T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOROZYONA MARUZ KALMIŞ BETONARME KOLONLARIN YAPISAL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Alper ÇELİK

Danışman: Doç. Dr. Hakan YALÇINER

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN
2020
Her Hakkı Saklıdır.

Bilimsel Etiğe Uygunluk Sayfası

"Korozyona Maruz Kalmış Betonarme Kolonların Yapısal Davranışlarının İncelenmesi" isimli "Yüksek Lisans" tezim tarafımca intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 20/11/2020



Alper ÇELİK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KOROZYONA MARUZ KALMIŞ BETONARME KOLONLARIN YAPISAL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Alper ÇELİK

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hakan YALÇINER

Betonarme elemanlarda oluşan donatı korozyonu sebebiyle, yapıların hedeflenen performans seviyeleri olumsuz yönde etkilenmektedir. Donatı kesit alanında azalma, korozyon ürünlerinin hacimsel genişlemesi ile betonun çatlaması, beton ve donatı arasındaki aderans kuvvetinin azalması korozyonun betonarme elemanlarda neden olduğu başlıca olumsuz etkilerdendir. Paslanmış betonarme kolonların yapısal performanslarının doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için yapılan araştırmalar bu bağlamda halen önemini korumaktadır. Gerçekleştirilen bu tez çalışması kapsamında yüksek seviyelerde donatı korozyonunun, betonarme kolonların yapısal davranışları üzerine etkisini incelemek üzere 5 adet betonarme kolonu deneye tabi tutulmuştur. Bir adet betonarme kolon, referans numunesi olarak korozyona maruz bırakılmamış olup diğer numunelere paslandırma havuzunda farklı seviyelerde hızlandırılmış korozyon süreci uygulanmıştır. Paslandırma sürecinin ardından numuneler üzerinde korozyon sebebiyle meydana gelen birincil çatlak genişlikleri mikroskop yardımıyla ölçülerek çatlak haritaları oluşturulmuştur. Elde edilen çatlak genişlik değerleri ile literatürde birincil çatlak genişliklerinden korozyon oranını tahmin eden ampirik modellerin doğrulaması yapılmıştır. Betonarme kolon numuneleri sabit eksenel yük altında, artırımsal tersinir tekrarlanır yanal yük uygulanarak teste tabi tutulmuştur. Yükleme deneylerinden sonra numuneler kırılarak boyuna donatılar ve sargı donatıları çıkarılmış ve mekanik olarak korozyon artıklarından temizlenmiştir. Donatıların son kütleleri hassas terazi ile kayıt altına alınarak numunelerin gerçek korozyon oranları hesaplanmıştır. Elde edilen tüm deneysel verilerin ışığında korozyona maruz kalmış betonarme kolonların sismik performans seviyelerinin belirlenmesi için enerji bazlı ampirik modeller önerilmiştir.

2020, 82 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Betonarme, çatlak, donatı, kolon, korozyon,

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF STRUCTURAL BEHAVIOR OF CORRODED REINFORCED CONCRETE COLUMNS

Alper ÇELİK

Erzincan Binali Yıldırım University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hakan YALÇINER

Due to the reinforcement corrosion that occurs in reinforced concrete elements, the targeted performance levels of the structures are negatively affected. The main negative effects of corrosion on reinforced concrete elements are the decrease in the area of the reinforcement, the volumetric expansion of the corrosion products and the cracking of the concrete, the decrease in the adherence force between the concrete and the reinforcement. In this context, the researches conducted to evaluate the structural performance of rusted reinforced concrete columns are still important. Within the scope of this thesis study, 5 reinforced concrete columns were tested in order to examine the effect of high levels of reinforcement corrosion on the structural behavior of reinforced concrete columns. One reinforced concrete column was not exposed to corrosion as a reference sample, and accelerated corrosion processes were applied to other specimens at different levels in the corrosion pool. After the rusting process, the width of primary cracks caused by corrosion on the specimens was measured with the help of a microscope and crack maps were created. With the obtained crack width values, empirical models predicting the corrosion rate from primary crack widths in the literature were verified. Reinforced concrete column specimens were tested under constant axial load by applying incremental reversible repetitive lateral load. After the loading tests, the samples were broken, the longitudinal reinforcements and winding fittings were removed and mechanically cleaned of corrosion residues. Final weights of the rebars were recorded with precision scales and the actual corrosion rates of the samples were calculated. In the light of all experimental data obtained, energy-based empirical models have been proposed to determine the seismic performance levels of reinforced concrete columns exposed to corrosion.

2020, 82 Pages

Keywords: Corrosion, crack, column, reinforced concrete,

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübelerini hiçbir zaman esirgemeyen başta çok değerli bilim insanı danışman hocam Doç.Dr. Hakan YALÇINER'e Dr. Öğr. Üyesi Atila KUMBASAROĞLU'na, kıymetli meslektaşım Arş. Gör. Ahmet İhsan TURAN'a, Umytjan YANGIBAYEV'e, Rameen KOHISTANI'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatımın her anında olduğu gibi bu süreçte de maddi ve manevi olarak desteklerini üzerimden bir an olsun esirgemeyen canım aileme, ayrıca bu süreçte göstermiş olduğu sabır ve anlayış için nişanlım Dr. Ayşe Sena ÖZKAN'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışması Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FBA-2020-659 proje numarası ile desteklenişti.

Alper ÇELİK
Aralık, 2020

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
TABLOLAR LİSTESİ viii
SİMGELER ve KISALTMALAR ix
1. GİRİŞ 1
2. KAYNAK ÖZETLERİ 4
2.1. Plastik Mafsal Boyu Üzerine Gerçekleştirilen Araştırmalar 4
2.1.1. Baker (1956) 4
2.1.2. Mattock (1964) 5
2.1.3. Corley (1966) 6
2.1.4. Mattock (1967) 6
2.1.5. Park, Priestly, Paulay ve Gill (1982) 7
2.1.6. Sheikh ve diğerleri (1993, 1994 ve 1998) 7
2.2. Korozyona Maruz Kalmış Betonarme Kolon Çalışmaları 8
2.2.1. Ma ve diğerleri (2012) 8
2.2.2. Meda ve diğerleri (2014) 8
2.2.3. Guo ve diğerleri (2015) 8
2.2.4. Yang ve diğerleri (2016) 9
2.2.5. Li ve diğerleri (2018) 9
2.2.6. Yalciner ve diğerleri (2019), Yalciner ve Kumbasaroglu (2020) 9
3. KURAMSAL TEMELLER 11
3.1. Betonarme ve Donatı Korozyonu 11
3.1.1. Korozyon mekanizması 12
3.2. Plastikleşme ve Plastik Mafsal Kavramı 13
3.2.1. Moment-eğrilik ilişkisi 13
3.2.2. Plastik mafsal tanımı 15
3.2.2.1. Yığılı plastik davranış 16
3.2.2.2. Yayılı plastik davranış 17
3.2.3. Eğrilik-dönme ilişkisi 17

3.2.4. Dönme-yer değiştirme ilişkisi 19
4. MATERYAL ve YÖNTEM 21
4.1. Materyal 21
4.1.1. Malzeme ve kesit özellikleri 21
4.1.1.1. Donatı mekanik özellikleri 24
4.1.2. Numunelerin hazırlanması 25
4.1.2.1. Donatı işleri 25
4.1.2.2. Kalıp işleri 25
4.1.2.3. Beton işleri 26
4.2. Yöntem 26
4.2.1. Hızlandırılmış korozyon yöntemi 26
4.2.2. Deney düzeneği 28
4.2.3. Yükleme programı 30
5. ARAŞTIRMA BULGULARI 32
5.1. Deney Sonuçları 32
5.1.1. Gerçek korozyon oranları 32
5.1.2. Paslanmış donatıların mekanik özellikleri 42
5.1.3. Korozyon sebebiyle oluşan birincil çatlak genişlikleri 44
5.1.4. Yük-deplasman sonuçları 54
5.1.5. Enerji yutma kapasiteleri 61
5.1.6. Plastik mafsal boyları 66
5.1.7. Geliştirilen modeller için yol haritası ve örnek analiz 69
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 71
KAYNAKLAR 73
EKLER 76
Ek-1. Numunelerin Deney Sonrası Fotoğrafları 77
Ek-2. Tez Çalışması Sürecinde Yapılan Bilimsel Çalışmalar 82
ÖZGEÇMİŞ 83

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 Eğilme etkisi altında betonarme bir kesit (Celep, 2008).....14
Şekil 3.2 Betonarme kesitlerde moment eğrilik ilişkisi (Özer, 2008).....15
Şekil 3.3 Eğilme momenti-eğilme rijitliği ilişkisi (Celep, 2008).....15
Şekil 3.4 Sürekli kirişe ait ve plastik mafsal ilişkisi (Celep, 2007). 17
Şekil 3.5 Betonarme kolonların moment-eğrilik diyagramı (Özmen vd. 2007). 18
Şekil 3.6 İdealleştirilmiş eğrilik diyagramı (Celep ve Kumbasar, 2004).....18
Şekil 3.7 Konsol kolonda plastik mafsal (Park ve Paulay, 1975) 20
Şekil 4.1 Kolon numunelerinin kesit özellikleri 22
Şekil 4.2 Deneysel numunelerin 3 boyutlu modeli 23
Şekil 4.3 16 mm çapında boyuna donatı için gerilme-şekil değiştirme eğrisi 24
Şekil 4.4 Donatı kafeslerinin oluşturulması 25
Şekil 4.5 Kalıpların oluşturulması 25
Şekil 4.6 Beton dökümü.....26
Şekil 4.7 Tam ölçekli paslandırma havuzunda numunelerin paslandırılması.....27
Şekil 4.8 Tüm donatılardan bakır kabloların geçirilmesi.....28
Şekil 4.9 Deney düzeneği.....29
Şekil 4.10 Yükleme programı 30
Şekil 5.1 Yükleme deneylerinden sonra kolon numuneleri 32
Şekil 5.2. Numunelerin kırıma hazırlanması.....33
Şekil 5.3. Numunelerin kırımı.....33
Şekil 5.4. Donatıların mekanik temizlenmesi 34
Şekil 5.5. Donatıların hassas terazi ile son ağırlıklarının tartımı 35
Şekil 5.6. Paslanmış kolonlardan çıkartılan boyuna donatılar ve sargı donatıları 35
Şekil 5.7 Boyuna donatıların korozyon dağılımları 36
Şekil 5.8. Sargı donatılarının korozyon dağılımları.....37
Şekil 5.9. Paslanmış betonarme donatıları için çekme deneyi 43
Şekil 5.10. Paslanmış donatılara ait gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri 44
Şekil 5.11. Paslandırma sürecinden sonra numunelerin temizliği 45
Şekil 5.12. Mikroskopla çatlak ölçümü 45
Şekil 5.13. C2 Betonarme kolonu için çatlak deseni 46
Şekil 5.14. C3 Betonarme kolonu için çatlak deseni 47

Şekil 5.15. C4 Betonarme kolonu için çatlak deseni 48
Şekil 5.16. C5 Betonarme kolonu için çatlak deseni 49
Şekil 5.17. Kesilen paslanmış betonarme donatıları 50
Şekil 5.18 Çatlak genişliği-korozyon oranı ilişkisi 52
Şekil 5.19 Çatlak genişliğine bağlı kesit kaybı tahmini 53
Şekil 5.20 C1 numunesi yük-deplasman ilişkisi 54
Şekil 5.21 C2 numunesi yük-deplasman ilişkisi 55
Şekil 5.22 C3 numunesi yük-deplasman ilişkisi 55
Şekil 5.23 C4 numunesi yük-deplasman ilişkisi 56
Şekil 5.24 C5 numunesi yük-deplasman ilişkisi 56
Şekil 5.25 Tüm numunelerin iskelet eğrileri 57
Şekil 5.26 C2 Kolonu yük-deplasman idealleştirilmesi 58
Şekil 5.27 C3 Kolonu yük-deplasman idealleştirilmesi 58
Şekil 5.28 C3 Kolonu yük-deplasman idealleştirilmesi 59
Şekil 5.29 C4 Kolonu yük-deplasman idealleştirilmesi 59
Şekil 5.30 C5 Kolonu yük-deplasman idealleştirilmesi 60
Şekil 5.31 Enerji yutma kapasiteleri 62
Şekil 5.32 Passız kolonların enerji kapasitesi-ötelenme ilişkisi 63
Şekil 5.33 Paslanmış kolonların enerji kapasitesi-ötelenme ilişkisi 64
Şekil 5.34 Geliştirilen modellerin doğrulanması 66
Şekil 5.35 Geliştirilen modeller için yol haritası 70
Şekil Ek-1.1 C1 numunesinin deney sonrası görüntüleri 77
Şekil Ek-1.2 C2 numunesinin deney sonrası görüntüleri 78
Şekil Ek-1.3 C3 numunesinin deney sonrası görüntüleri 79
Şekil Ek-1.4 C4 numunesinin deney sonrası görüntüleri 80
Şekil Ek-1.5 C5 numunesinin deney sonrası görüntüleri 81

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1 Donatı mekanik özellikleri.....24
Tablo 4.2 Yükleme adımları 31
Tablo 5.1 C2 Numunesi için gerçek korozyon oranlarının hesaplanması 38
Tablo 5.2 C3 Numunesi için gerçek korozyon oranlarının hesaplanması 39
Tablo 5.3 C4 Numunesi için gerçek korozyon oranlarının hesaplanması 40
Tablo 5.4 C5 Numunesi için gerçek korozyon oranlarının hesaplanması 41
Tablo 5.5 C5 Numunesi için gerçek korozyon oranlarının hesaplanması 43
Tablo 5.6 Birincil çatlak genişlikleri (mm).....50
Tablo 5.7 Çatlak ölçümleri ve ilişkili korozyon oranları 51
Tablo 5.8 Pozitif yükleme için yük-deplasman ilişkisi idealleştirme sonuçları.....61
Tablo 5.9 Negatif yükleme için yük-deplasman ilişkisi idealleştirme sonuçları 61
Tablo 5.10 Ortalama yük-deplasman ilişkisi idealleştirme sonuçları 61
Tablo 5.11 Plastik mafsal boyu ölçümleri (cm) 68

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

Ac	Kesit Alanı
f_c	Beton Basınç Dayanımı (silindir numune)
L_p	Plastik Mafsal Boyu
F_y	Akma Yükü
F_u	Nihai Yük
Δ_y	Akma Yüküne Karşılık Gelen Deplasman
Δ_u	Nihai Yüke Karşılık Gelen Deplasman
$\emptyset_y$	Akma Yüküne Karşılık Gelen Eğrilik
$\emptyset_u$	Nihai Yüke Karşılık Gelen Eğrilik
σ	Gerilme
ε	Şekil Değiştirme
CL_L	Boyuna Donatılardaki Ortalama Korozyon Oranı
CL_S	Sargı Donatılarındaki Ortalama Korozyon Oranı
CL_{L_P}	Pozitif Yöndeki Boyuna Donatıların Korozyon Oranı
CL_{L_n}	Negatif Yöndeki Boyuna Donatıların Korozyon Oranı
E_u	Nihai Yüke Karşılık Gelen Kümülatif Enerji Tüketimi
E_y	Akma Yüküne Karşılık Gelen Kümülatif Enerji Tüketimi
E_{max}	Maksimum Yüke Karşılık Gelen Kümülatif Enerji Tüketimi
W_{cr}	Çatlak Genişliği

Kısaltmalar

ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

1. GİRİŞ

Yapısal elemanların servis ömürleri boyunca işlevlerini yerine getirmelerine durabilite veya dayanıklılık adı verilmektedir. Betonarme yapılarda beton basınç dayanımının artışı dayanım ve durabilite gibi birçok parametreyi olumlu yönde etkilemektedir. Ancak, dış yükler açısından gerekli dayanımı sağlayan oldukça kaliteli betonarme elemanlar dahi, çeşitli çevresel etkiler sebebiyle kısa sürede bozularak performans açısından üzerine düşen görevleri yerine getiremeyip, kullanılmaz hale gelebilmektedir. Betonarme elemanların kalıcılığını yitirmesine yol açan bu etkenler fiziksel, kimyasal, biyolojik veya mekanik kökenli olabilmektedir (Baradan ve Aydın, 2013). Betonarme elemanların servis ömürlerinin azalmasına yol açan bu etkenlerden birisi de donatı korozyonudur. En genel ifadeyle korozyon, metal malzemelerde ortam şartlarına bağlı olarak meydana gelen kimyasal ve fiziksel bozulmaların tümüne verilen isimdir. Betonarme elemanlarda meydana gelen donatı korozyonu ise, betonun içinde gömülü olan çelik donatıların çevresel etkiler nedeniyle kesit kaybına uğramasıdır. Betonarme elemanlarda genellikle beton, basınç kuvvetlerini çelik donatılar ise çekme kuvvetlerini karşılamaktadır. Beton ile çeliğin birbirine kenetlenmesinin iyi olması, genleşme katsayılarının birbirine yakın olması ve her ikisinin de yük taşıyor olmasından dolayı bu iki malzeme bir arada kullanılarak monolitik yapı sistemleri üretilebilmektedir. Beton, bazik özellikte olmasından dolayı içerisindeki çelik donatıları korozyona karşı çok iyi korumaktadır. Ancak, su ve nem gibi çeşitli çevresel etkilerden meydana gelen donatı korozyonu sonucu beton ve çelik arasında aderans kaybı oluşur ve böylece beton ve çelik malzemesi birlikte çalışamaz. Bununla birlikte, donatı korozyonuna maruz kalan betonarme elemanlarda meydana gelen olumsuzluklardan biri de betonun çatlamasıdır. Ayrıca, korozyon etkisi ile meydana gelen aderans kaybı ve çatlak oluşumları ile betonarme elemanların sismik performans seviyeleri de önemli ölçüde azalmaktadır.

Betonarme yapı sistemleri ekonomik ömürleri boyunca çeşitli dış etkenler sebebiyle korozyon etkisine maruz kalmaktadır. Aktif deprem kuşağı üzerinde yer alan ülkemizin mevcut yapı stokunun çoğunlukla betonarme binalardan oluştuğu göz önüne alındığında korozyona maruz kalmış betonarme elemanların tahribatlı veya tahribatsız yöntemlerle incelenerek performans seviyelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi oldukça önemlidir.

1999 Gölcük depremi sonrası, betonarme yapılarda gerçekleştirilen incelemelerde, yapıların göçmesinde rol oynayan önemli faktörlerden birinin betonarme donatılarındaki paslanma olarak belirlenmiştir. Örneğin, Çağatay (2005) tarafından yapılan çalışmada, 17 Ağustos Marmara depreminde göçen birçok betonarme binada deniz kumu kullanıldığı ve bu sebeple betonarme donatılarında paslanmaların meydana geldiği gözlenmiştir. Yalciner vd. (2012) tarafından yapılan diğer bir çalışmada ise 25 yıllık bir betonarme binanın paslanmadan dolayı yıkımına karar verilmiş ve betonarme bina ekonomik döngüsünü tamamlamadan yıkılmıştır.

Son yıllarda korozyona maruz kalmış betonarme kolonların sismik performans düzeylerinin tahmin edilebilmesine yönelik birçok araştırma literatürde yer bulmuştur. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, elde edilen gerçek korozyon oranlarının %0 ile %20 arasında sınırlı kaldığı görülmüştür. Korozyon oranının artmasıyla betonarme kolonların tekrarlı yükleme etkisi altında enerji yutma kapasitelerinin azaldığı sonucuna varılmıştır. Ancak literatürdeki bazı çalışmalarda korozyon oranının artmasıyla birlikte deplasman bazlı sünekliliğin de arttığı sonucuna varılmıştır Meda vd. (2014), Guo vd. (2015), Li vd. (2018). Enerji yutma kapasitesinin, süneklilik ile ilişkili bir değişken olduğu göz önüne alındığında literatürde bu konuda çelişkiler mevcuttur. Yalciner vd. (2020) tarafından korozyona maruz kalmış betonarme kolonların performans kriterlerinin, geliştirilecek enerji bazlı denklemler yardımıyla belirlenmesinin daha doğru olacağı savunulmuştur.

Betonarme elemanlarda, yatay yüklere bağlı oluşacak yer değiştirme miktarlarının tahmin edilmesi, yapı ve deprem mühendisliğinin en önemli konuları arasında yer almıştır. Betonarme kolon, yanal bir yer değiştirmeye maruz kaldığında, maksimum moment bölgesinde ağır hasarlar görülmektedir. Plastik mafsal adı verilen bu bölgelerde, büyük elastik ötesi eğrilikler meydana gelmektedir. Ülkemizdeki yapıların çok büyük bir kısmını oluşturan betonarme elemanların doğrusal ötesi davranışı, kullanılan sargılı beton etki ve plastik mafsal boyuna bağlıdır (Fardis ve Biskinis, 2003). Birçok deprem yönetmeliği, yapılarda meydana gelen büyük yer değiştirmeler esnasında, yanal yük taşıma kapasitelerinin yanı sıra düşey taşıyıcı sistemde can güvenliğini sağlamak amacıyla, kolonlardan önce kirişlerde plastik mafsal üretmeyi amaçlamaktadır. Ancak, son depremler ve deneysel çalışmalar, güçlü kolon- zayıf kiriş prensibinin uygulanmasına rağmen, güçlü yer hareketleri sebebiyle kirişlerden önce kolonlarda plastik mafsal

oluşabildiğini göstermiştir (Bayrak ve Sheikh, 1997). Bir betonarme kolon veya kirişin toplam yer değiştirmesi, eğriliğin uzunluk boyunca integre edilmesiyle tahmin edilebilmektedir. Böylelikle, betonarme bir kolonun yer değiştirme kapasitesinin tahmin edilebilmesi, plastik mafsal boyunun doğru bir şekilde belirlenmesi ile mümkün olabilmektedir. Programlarda bulunan otomatik mafsal özelliklerinin enine donatının yetersiz olduğu ülkemiz mevcut yapı stokunun birçoğu için uygun olmadığı önceki çalışmalarda belirtilmiştir (İnel ve Özmen, 2006). Literatürde, farklı eksenel yük düzeylerinin ve farklı donatı düzenlerinin betonarme yapı elemanlarında plastik mafsal boyuna etkisi üzerine birçok çalışma mevcuttur.

Korozyon etkisine maruz kalmış betonarme yapıların sismik performanslarının analitik modeller yardımı ile tahmin edilebilmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri kesite ait plastik mafsal özelliklerinin korozyon etkisi ile birlikte idealize edilmesidir. Yalciner vd. (2015) tarafından yapılan bir çalışmada paslanmış bir betonarme binanın sismik performansı, plastik mafsal özelliklerinin idealleştirilmesi ile hesaplanmıştır. Bu çalışmada, korozyonun donatı ve beton mekanik özellikleri üzerine etkisi, aderans kuvveti ve aderans kuvvetine bağlı meydana gelen donatı sıyrılması neticesinde kesitteki ek dönme miktarı göz önüne alınarak ve kesit plastik mafsalları idealize edilmiş ve zaman-tanım alanında analizinin kullanılması ile sismik performans seviyesi hesaplanmıştır. Mevcut literatürde paslanmış betonarme kolonlarının plastik mafsal boylarındaki değişkenliğini korozyon oranının bir fonksiyonu olarak tahmin eden ampirik bir model olmadığından, Yalciner vd. (2015) yapılan çalışmada plastik mafsal boyu teorik olarak hesaplanan ($0.5 \times h$) plastik mafsal boyu olarak dikkate alınmıştır.

Bu anlamda, korozyon etkisine maruz kalmış betonarme yapıların sismik performans seviyelerinin belirlenmesi için yapılacak olan doğrusal olmayan analizlerde, plastik mafsal boylarının ampirik modeller yardımıyla doğru bir şekilde tanımlanması oldukça önem arz etmektedir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Plastik Mafsal Boyu Üzerine Gerçekleştirilen Araştırmalar

Literatürde betonarme yapı elemanlarının plastik mafsal boyunu etkileyen birçok parametre vardır. Bunlardan bazıları;

- Beton dayanımı,
- Eksenel yük düzeyi,
- Moment gradyanı (eğimi),
- Plastik mafsal bölgesindeki kayma gerilmesi düzeyi,
- Enine ve boyuna donatıların mekanik özellikleri,
- Plastik mafsal bölgesindeki sargı donatısı oranı ve etkinliğidir.

Birçok araştırmacı (Bae, 2005; Baker, 1956; Corley, 1966; Mattock, 1965; Mendis, 2002; Park, Priestley, ve Gill, 1982; Paulay ve Priestley, 1992; Priestley ve Park, 1987; Sheikh ve Khoury, 1993) betonarme elemanlarının plastik mafsal boylarının belirlenmesi için deneysel çalışmalar sonucunda çeşitli ifadeler önermişlerdir.

1960'lı yıllarda betonarme yapı elemanlarında moment-eğrilik ilişkilerini araştırmak üzere Avrupa Beton Komitesine bağlı laboratuvarlarda 94 adet deney gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu deneysel çalışmalardaki değişkenler genel olarak, beton dayanım sınıfı, çekme donatısı miktarı, basınç donatısı miktarı ve eksenel yük oranı şeklinde belirlenmiştir.

2.1.1. Baker (1956)

Baker' in 1956 yılında kirişler üzerinde yapmış olduğu deneysel çalışmalarda, beton basınç dayanımı 17 MPa ile 40 MPa, donatının akma dayanımı 275 MPa ile 585 MPa arasında değiştirilmiştir. Çekme donatısının miktarı %0.25 ile %4 arasındadır. Sargı donatısı miktarı ise %0.05 ve %1.51 arasındadır. Eksenel yük düzeyi 0.15 $A_c f_c$ ile 1.0 A_c f_c arasındadır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda Baker (1956) plastik mafsal boyunun hesabında Eşitlik 2.1'de verilen formülü önermiştir.

$$L_p = \mathrm{k}_1 k_2 k_3 \left(\frac{z}{d}\right)^{0.25} d \qquad (2.1)$$

Bu eşitlikte; k_1 sıcakta haddelenmiş çelik için 0.7, soğukta haddelenmiş çelik için 0.9'dur, ayrıca z, eğilme olmayan noktadan kritik kesite olan mesafe ve d, kiriş efektif derinliğidir.

$$k_2 = 1 + 0.5\frac{P}{P_0}$$

$$k_3 = 0.9 - \frac{0.3}{23.5}\left(f_c{}' - 11.7\right)$$

Baker ve Amarokone 1964 yılında yapmış oldukları çalışma sonucunda, Eşitlik 2.1' de verilen ifadeyi daha da sadeleştirerek Eşitlik 2.2'yi önermişlerdir.

$$L_p = 0.8\mathrm{k}_1\mathrm{k}_3\left(\frac{\mathrm{z}}{\mathrm{d}}\right)c \qquad (2.2)$$

Bu eşitlikte; c tarafsız eksen derinliğidir.

2.1.2. Mattock (1964)

Mattock kirişlerde plastik mafsal uzunluklarına etki eden parametreleri incelemek amacıyla 1964 yılında 37 adet betonarme kiriş üzerinde deney yapmıştır. Deneysel çalışmalarda Mattock tarafından dikkate alınan değişkenler, beton basınç dayanımı (fc), efektif kiriş derinliği (d), moment gradyanı (z/d) , donatı oranı (ρ) ve çekme donatısının akma dayanımları (f_y) olmuştur. Yapılan çalışmada beton basınç dayanımı 27.5 MPa-41.4 MPa, efektif kiriş derinliği 250 mm-500mm, moment gradyanı 2.75-11, donatı oranı %1-%3 ve donatı akma dayanımı 324 MPa- 414 MPa arasında değişiklik göstermiştir.

Mattock (1964) gerçekleştirdiği deneylere göre, kiriş uzunluğu boyunca yayılı olan plastisite dağılımı z/d oranı arttıkça ve çekme donatısı oranı azaldıkça artmaktadır sonucunu elde etmiştir. Mattock plastik mafsal boyu için Eşitlik 2. 3'te verilen ampirik formülü önermiştir.

$$l_p = \frac{d}{2}\left[1 + \left(1.14\sqrt{\frac{z}{d}} - 1\right)\left\{1 - \left(\frac{q-q'}{q_b}\right)\sqrt{\frac{d}{16.2}}\right\}\right] \quad (2.3)$$

Bu eşitlikte, d Kiriş efektif derinliği (inch olarak) z, eğilme olmayan noktadan kritik kesite olan mesafe (inch olarak) q, çekme donatısı indeksi q', basınç donatısı indeksi q_b, dengeli çekme donatısı indeksi olarak tanımlanmaktadır.

2.1.3. Corley (1966)

1966 yılında Corley, Mattock (1964)'ün plastik mafsal boyu üzerine yapmış olduğu çalışmaları geliştirmek üzere tekil yüke maruz basit mesnetli betonarme kirişlerde deneysel çalışmalar yapmıştır. Corley (1966)' in deneylerinde plastik mafsal boyuna etkisi araştırılmak üzere seçilen birinci derece değişkenler sargı ve boyut etkisidir. Bunun yanında, moment gradyanının ve çekme donatısı oranının da plastik mafsal boyu üzerine etkisi araştırılmıştır. Corley, yayılı plastisitenin betonarme eleman geometrisinin temel bir fonksiyonu olduğunu ve kirişin boyutunun dönme kapasitesi üzerine etkisi olmadığını raporlamıştır. Ayrıca, Mattock (1964)'ün geliştirmiş olduğu ampirik modelde yer alan $\left(\frac{q-q'}{q_b}\right)$ etkisinin plastik mafsal boyunda ihmal edilebileceği sonucuna varmıştır. Corley' in plastik mafsal boyu için önermiş olduğu bağıntı Eşitlik 2.4'te verilmiştir.

$$l_p = \frac{d}{2} + 0.2\frac{z}{\sqrt{d}} \quad (2.4)$$

Eşitlikte verilen d ve z inch cinsindedir.

2.1.4. Mattock (1967)

Mattock Eşitlik 2. 3'te geliştirmiş olduğu ampirik bağıntıyı 1967 yılında sadeleştirerek plastik mafsal uzunluğu için d ve z ye bağlı olarak Eşitlik. 2.5'te gösterilen yeni bir ifade önermiştir.

$$l_p = \frac{d}{2} + 0.05z \quad (2.5)$$

2.1.5. Park, Priestly, Paulay ve Gill (1982)

1982 yılında Park vd. 4 adet tam ölçekli betonarme kolon üzerinde deneysel çalışma yürütmüşlerdir. Deneylerde kullanılan betonarme kolon numunelerinin en kesit boyutları 550×550 mm'dir. Kolonlara uygulanan eksenel yük düzeyleri ise 0.2 $A_c f_c$ ile 0.6 $A_c f_c$ arasındadır. Park vd. deneysel olarak elde edilen plastik mafsal uzunluklarının, bir dereceye kadar eksenel yük oranından bağımsız olduğu sonucuna varmışlarıdır. Park vd. betonarme kolonlar için plastik mafsal boyunu "0.4h" olarak önermişlerdir.

Aynı çalışma sonuçlarına bağlı olarak benzer bir yaklaşımla, Park ve Priestly (1987), betonarme kolonlar için plastik mafsal boyu için Eşitlik 2.6'da verilen formülü önermişlerdir.

$$l_p = 0.08L + 6d_b \quad (2.6)$$

Bu eşitlikte;

L= Kritik kesitten eğilmenin olmadığı noktaya mesafe,

d_b= Boyuna donatı çapıdır.

Eşitlik 2.6'da önerilen plastik mafsal boyu eşitliğinin iki bileşeni bulunmaktadır. Park ve Priestly (1987) ilk terimi, kolon eğilme davranışıyla, ikinci terimi ise boyuna donatıdaki kayma ile ilişkilendirmişlerdir. Daha sonra Park ve Priestly (1992), boyuna donatının farklı büyüklükleri için çalışmayı tekrarlayıp Eşitlik 2.7'yi önermişlerdir.

$$l_p = 0.08L + 0.022d_b f_y \quad (2.7)$$

1992 yılında Park ve Paulay tipik betonarme kolonlarda plastik mafsal boyunun $l_p = 0.5h$ 'a karşılık geldiğini belirtmişlerdir.

2.1.6. Sheikh ve diğerleri (1993, 1994 ve 1998)

Sheikh ve Khory (1993), Sheikh vd. ve Bayrak ile Sheikh (1998) yüksek eksenel yük altında gerçekleştirmiş oldukları betonarme kolon deneylerinde, plastik mafsal uzunluklarının 1.0h'a eşit olduğunu belirtmişlerdir.

2.2. Korozyona Maruz Kalmış Betonarme Kolon Çalışmaları

Mevcut literatürde korozyona maruz betonarme kolon çalışmaları oldukça yeni olup, son yıllarda bu alanda yapılan deneysel çalışmalar hızlı bir şekilde artmaktadır.

2.2.1. Ma ve diğerleri (2012)

Ma vd. 2012 yılında gerçekleştirmiş oldukları deneysel çalışmada 260 mm çapında dairesel kesitli betonarme kolonlar üretmişlerdir. Betonarme kolonların net uzunluğu 1000'dir ve çalışmada kullanılan betonun karakteristik basınç dayanımı 32.4 MPa olarak ölçülmüştür. Deneysel çalışmada betonarme kolonlara uygulanan eksenel yük oranı %15 ile %90 arasındadır. Ma vd. (2012) tersinir tekrarlanır yükleme deneylerinden sonra numunelerin gerçek korozyon oranlarını %0-%15 arasında elde etmişlerdir. Ma vd. (2012) paslanmış betonarme kolonları için akma yükü, nihai yük ve süneklik oranının tahmin edilebilmesine yönelik 3 adet ampirik model geliştirmişlerdir.

2.2.2. Meda ve diğerleri (2014)

Meda vd. (2014) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, 300 mm×300 mm kesit boyutlarına ve 1500 mm net uzunluğa sahip betonarme kolon numuneleri üzerinde çalışılmıştır. Çalışmada kullanılan betonarme kolonların beton basınç dayanımları 20 Mpa dır. Deneysel çalışmada uygulanan eksenel yük oranı %22 olup, tersinir tekrarlanır yanal yükleme yapılmıştır. Çalışmada sargı donatıları paslandırılmamış ve boyuna donatılar ise kolon yüksekliğinin üçte birlik kısmında paslandırılmıştır. Meda vd. (2014) tarafından yapılan deneysel çalışmada teorik olarak hesaplanan korozyon oranı %20 dir. Artan korozyon oranlarına karşı enerji yutma kapasitelerinin de arttığı sonucuna varılmıştır. Çalışma sonucunda herhangi bir ampirik model geliştirilmemiştir.

2.2.3. Guo ve diğerleri (2015)

Guo ve diğerleri tarafından 2015 yılında yapılan deneysel çalışmada 600 mm × 250 mm en kesit boyutlarına sahip ve 2500 mm uzunluğunda 3 adet betonarme kolon numunesi kullanılmıştır. Numunelerin betona basınç dayanımları 42.9 Mpa olarak elde edilmiştir. Deney esnasında, kolon numuneleri %10 eksenel yük oranı altında tersinir tekrarlanır

yanal yükleme etkisine maruz bırakılmıştır. Çalışmada kullanılan betonarme kolonları için teorik korozyon oranları sırasıyla %5, %10 ve %15 olarak hesaplanmıştır. Guo vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada Ma vd. (2012) ve Meda vd. (2014)'den farklı olarak sargı donatıları ve boyuna donatılar için gerçek korozyon oranları ayrı olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak paslanmış betonarme kolonların enerji yutma kapasiteleri paslanmamış referans numuneye göre azalmıştır. Deneysel çalışma sonucunda paslanmış betonarme kolonların yapısal performanslarını değerlendirmeye yönelik herhangi bir ampirik model geliştirilmemiştir.

2.2.4. Yang ve diğerleri (2016)

Yang vd. (2016) tarafından yapılan deneysel çalışmada betonarme kolon numuneleri 210 mm × 210 mm en kesit boyutlarına ve 1500 mm net uzunluğa sahiptir. Numunelere ait teorik korozyon oranları %5, %10, %15 ve %20 olarak oluşturulmuştur. Numunelerin yükleme deneyleri, tersinir tekrarlanır yanal yükleme ve %18 eksenel yük oranı etkisi altında yapılmıştır. Deplasman bazlı hesaplanan süneklik değerleri korozyon oranının artmasıyla birlikte azalmıştır. Deneysel çalışma sonucunda paslanmış betonarme kolonların süneklik oranlarını ve enerji yutma kapasitelerini tahmin etmeye yönelik 2 adet ampirik Eşitlik önerilmiştir.

2.2.5. Li ve diğerleri (2018)

Li vd. (2018) tarafından yapılan deneysel çalışmada 4 adet dikdörtgen kesitli betonarme kolunu kullanılmıştır. Numunelere ait beton basınç dayanımı 50.2 MPa olarak elde edilmiştir. Yapılan çalışmada betonarme kolonları %10 ve %30 olmak üzere iki farklı eksenel yük oranı altında deneye tabi tutulmuştur. Li vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma kapsamında korozyona maruz betonarme kolonların yapısal performanslarını tahmin etmeye yönelik bir model geliştirilmemiştir.

2.2.6. Yalciner ve diğerleri (2019), Yalciner ve Kumbasaroglu (2020)

Tez sahibinin bursiyer olarak görev aldığı TÜBİTAK 3501 projesi kapsamında, Yalciner ve Kumbasaroglu tarafından 2020 yılında gerçekleştirilen deneysel çalışmada 300 mm × 300 mm en kesit ölçülerine ve 2500 mm yüksekliğe sahip betonarme kolon numuneleri

kullanılmıştır. Deneysel çalışmada 8 MPa, 20 MPa ve 30 MPa basınç dayanımına sahip üç farklı beton sınıfı kullanılmıştır. Deney programında her beton sınıfı kendi içerisinde iki farklı gruba ayrılarak %20 ve %40 eksenel yük oranında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler tersinir tekrarlanır yanal yükleme ve sabit eksenel yük altında yapılmıştır. Deney sonrası elde edilen gerçek korozyon oranları boyuna donatılarda %0 ile %7 arasında sargı donatılarında ise %0 ile %12 değerleri arasındadır. Literatürdeki diğer korozyona maruz kalmış betonarme kolon çalışmalarına kıyasla oldukça geniş kapsamda oluşturulan deneysel program ile birçok parametre farklı açılardan incelenebilmiştir. Ayrıca Yalciner vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışma kapsamında korozyona maruz kalmış betonarme kolonlarda, birincil çatlak genişliklerine bağlı olarak tahribatsız bir şekilde korozyon oranının belirlenmesi ve ardından yapının sismik performans değerlendirilmesi mümkün olmuştur. Bu çalışmalarda, deplasman bazlı süneklik değerlendirmesinin paslanmış kolonlar için yanıltıcı olabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, korozyon oranının artması ile kolonların enerji tüketme kapasiteleri azalmıştır. Bu nedenle korozyona maruz kalmış betonarme kolonların yapısal performanslarının değerlendirilmesinde geliştirilecek olan enerji bazlı modellerin kullanılmasının daha doğru olacağı sonucuna varılmıştır.

Mevcut literatür incelendiğinde günümüze kadar gerçekleştirilen korozyona maruz kalmış betonarme kolon çalışmalarında incelenen korozyon oranı %0 ile %20 arasında sınırlı kalmıştır. Yüksek korozyon oranlarını da içeren enerji bazlı modellerin geliştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca mevcut literatürde paslanış betonarme kolonların plastik mafsal uzunluğunu tahmin etmeye yönelik bir ampirik model geliştirilmemiştir.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Betonarme ve Donatı Korozyonu

Beton; agrega, kum ve suyun çimento bağlayıcılığında homojen olarak karıştırılmasıyla elde edilen bir yapı malzemesidir. Betonun çekme dayanımı basınç dayanımına kıyasla oldukça düşüktür. Betonun yapısal olarak taşıyıcı sistemlerde kullanılmasında çekme dayanımını arttırmak için ilave malzeme kullanıma ihtiyaç duyulmaktadır. Betonun basınç dayanımına kıyasla zayıf olan çekme dayanımı özelliğinin, beton içerisinde çelik donatılar kullanılarak geliştirildiği kompozit malzemeye betonarme adı verilmektedir. Betonarme yapı elemanlarının servis ömürlerinin azalmasına neden olan faktörlerin başında donatı korozyonu gelmektedir. Betonarme donatılarında meydana gelen korozyon, yalnızca donatının değil içinde bulunmuş olduğu beton malzemesinin de mekanik özelliklerinin olumsuz yönde etkilemektedir. Yapıların tasarım aşamasında göz önüne alınmayan korozyon etkisi, korozyonun neden olduğu kimyasal ve fiziksel bozulmalar ile yapıların sismik etkiler altında daha fazla hasar almasına neden olmaktadır.

Ülkemizdeki yapı stokunun performans düzeylerini olumsuz yönde etkileyen başlıca parametreler, düşük basınç dayanımına sahip beton kullanımı, projeye uygun imalat yapılmaması, işçilik kalitesinin yetersiz olmasının yanı sıra betonarme donatılarının korozyon etkisine maruz kalması şeklinde sıralanmaktadır. Betonarme yapı elemanlarında korozyon ve meydana getirdiği etkilerin incelenmesi için yapılan bilimsel çalışmalar son yıllarda oldukça önem kazanmıştır. 1999 yılında meydana gelen Marmara Depremi sonrasında betonarme yapılar üzerinde yapılan incelemelerde, donatı korozyonunun yapıların sismik performanslarında oldukça olumsuz sonuçlar meydana getirdiği görülmüştür. Betonarme yapı elemanlarındaki donatı korozyonu temel olarak çelik donatılarda meydana gelen kesit kaybı sonucunda ortaya çıkan pas ürünlerinin donatı çevresinde birikerek betonda çatlak oluşturması ve ardından pas payı tabakasının donatılardan ayrılması olayının bütünüdür. Bu olumsuz etkilere ilave olarak donatı ve beton arasındaki aderans kuvvetlerinin azalması sonucu donatıda meydana gelen ek sıyrılmalar gibi olumsuzluklarda yapı performansını olumsuz etkileyen parametrelerdendir.

3.1.1. Korozyon mekanizması

Atmosferik ortamda kalan metal bir malzeme zamanla korozyona maruz kalarak zarar görebilmektedir. Betonarme bir eleman içerisinde bulunan çelik donatı, betonun bazik özelliğinden dolayı korozyon etkisinden kısmen korunmaktadır. Su veya neme maruz kalan betonarme elemanda, beton içerisinde gömülü halde bulunan çelik donatının korozyonu elektrokimyasal bir süreçtir. Paslanma sürecinin oluşması ve devam etmesi için iyon alışverişinin sağlanması gereklidir. İyon alışverişi anodik ve katodik reaksiyonlar ile gerçekleşmektedir. Korozyon sürecinde meydana gelen elektrokimyasal tepkimeler Eşitlik 3.1, Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3'te verilmiştir (Broomfield, 2007).

Anot Reaksiyonu: $\mathrm{Fe} \rightarrow \mathrm{Fe}^{+2} + 2\mathrm{e}^{-}$ (3.1)

Katot Reaksiyonu: $\mathrm{Fe} \rightarrow \mathrm{Fe}^{+2} + 2\mathrm{e}^{-}$ (3.2)

Demir Hidroksit: $2\mathrm{Fe} + 2\mathrm{H_2O} + \mathrm{O_2} + 4\mathrm{OH} \rightarrow 2\mathrm{Fe(OH)_2}$ (3.3)

Betonarme bir elemanda, karbonatlaşma ve klorür saldırısı olmak üzere korozyona neden olan başlıca iki adet çevresel etki bulunmaktadır. Beton yüzeyindeki karbondioksitin zamanla beton tabakasının içine nüfuz ederek beton içerisinde bulunan kalsiyum hidroksit ile tepkimeye girerek kalsiyum karbonat açığa çıkarmasına karbonatlaşma adı verilmektedir. Karbonatlaşma mekanizması ortamdaki karbondioksit ve nem yoğunluğuyla ilişkilidir. Karbonatlaşma mekanizmasının kimyasal denklemi Eşitlik 3.4'te verilmiştir.

$\mathrm{Ca(OH)_2} + \mathrm{CO_2} \rightarrow \mathrm{CaCO_3} + \mathrm{H_2O}$ (3.4)

Karbonatlaşmanın oluşması ile betondaki PH değeri azalmaktadır. Normal şartlarda bazik özelliğiyle donatıları korozyona karşı koruyan beton karbonatlaşma sonucunda bu işlevi yerine tam olarak getirememektedir. PH seviyesinin azalması sonucunda ortamda bulunan klorür iyonlarının donatı ile etkileşimi sonucunda iyon transferi yoğunlaşmış olur. Eşitlik 3.5'te klorür iyonlarının demir ile girdiği kimyasal tepkime verilmiştir.

$\mathrm{Fe_3}^{+} + 3\mathrm{CI} \rightarrow \mathrm{Fe(OH)_3} + 3\mathrm{CI}$ (3.5)

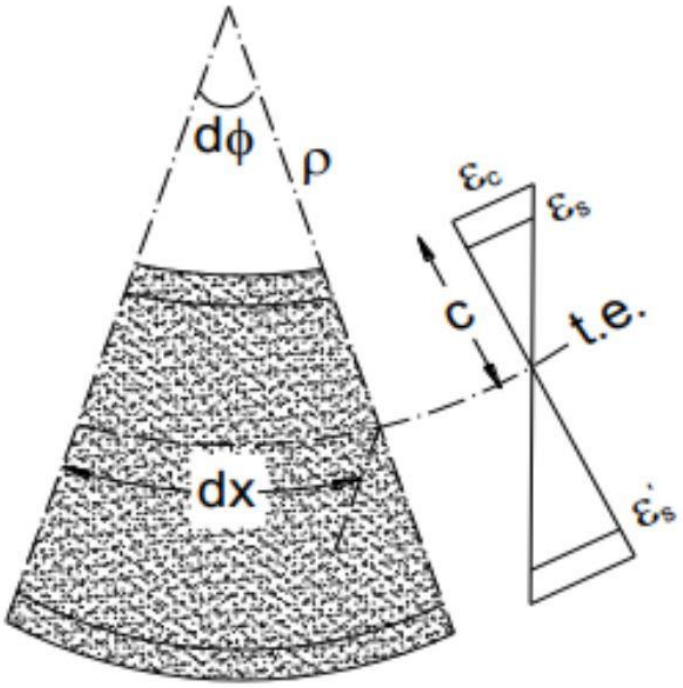
3.2. Plastikleşme ve Plastik Mafsal Kavramı

Yapı sistemine etkiyecek bir deprem durumunda yapıda can güvenliğinin sağlanması gerekliliği tasarım aşamasının temel hedeflerindendir. Bunun için yapısal sistemin kontrollü bir şekilde hasar alması gerekmektedir. Hasarın doğru bir şekilde öngörülebilmesi için elemanların elastik ötesi davranışına hâkim olunması gerekmektedir. Bu sebeple plastik mafsal kavramı ve plastikleşme yapı mühendisliğinin önemli konularındandır. Yapı sistemindeki hasarın ölçüsü, sistemi oluşturan yapısal elemanlarda oluşan hasar tiplerine ve büyüklüklerine göre değerlendirilmektedir.
Taşıyıcı elemanlarda oluşan bu hasarlar, yapı sisteminde kat ötelenmesi olarak kendini göstermektedir. Yapısal sistemde oluşan kat ötelenmelerinin büyük bir bölümü, taşıyıcı sistem elemanlarının plastik mafsal adı verilen bölgelerinde meydana gelen eğrilik ve dönme neticesinde oluşmaktadır. Bu sebeple yapısal sistemin doğrusal-elastik olmayan yöntemlerle çözümlenmesi yapısal sitem hakkında daha gerçekçi ve kesin sonuçlar elde etmeye imkân tanımaktadır.

3.2.1. Moment-eğrilik ilişkisi

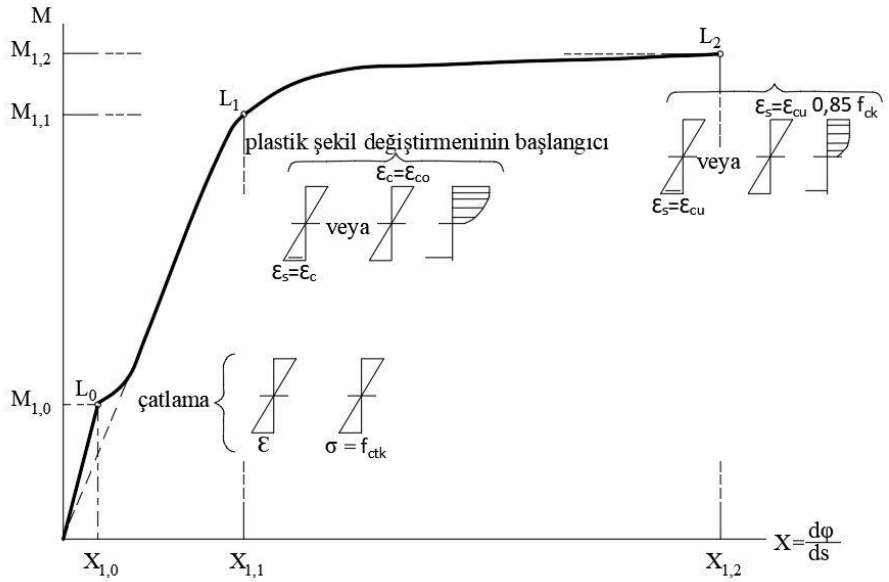
Yapısal sistemde düşey taşıyıcı elemanlar genellikle eksenel yük ve eğilme momenti etkisine maruz kalmaktadır. Eksenel yük ve eğilme momenti etkisindeki bir kesitin davranışı, en sağlıklı bir biçimde, gerçek malzeme davranışını temel alarak hesaplanmış veya deneysel verilerden elde edilmiş, Moment-Eğrilik eğrilerinden izlenebilir. M- Φ eğrisi yapısal davranışı çok açık bir biçimde gösterir.

Genel bir ifadeyle eğrilik, birim boyda meydana gelen dönme açısıdır. Betonarme bir kesitte eğrilik Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, iki kesit arasındaki dönme açısı farkından veya doğrudan kesitteki birim deformasyondan yararlanılarak hesaplanabilir.



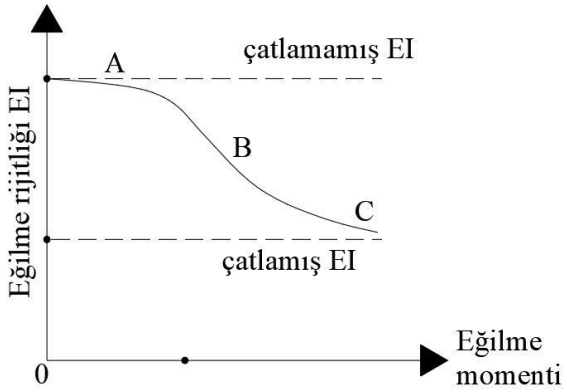
Şekil 3.1 Eğilme etkisi altında betonarme bir kesit (Celep, 2008)

Eğilme ve eksenel yüke maruz kesitlere ait tipik moment-eğrilik ilişkisi Şekil 3.2'de verilmiştir. Artan moment etkisinde betonun en dış çekme lifindeki normal kuvvet, betonun çekme dayanımına ulaştığı anda (M_{LO}) beton kabuğu çatlamaya başlar ve paspayı tabakası dökülür. Böylece kesit yüksekliğinin azalmasıyla, kesitin atalet momenti ve eğilme rijitliği azalır. Kesitin eğilme rijitliğinin azalmasıyla, kesit eğriliğinde ani bir artış meydana gelir. Sonrasında kesit, plastik şekil değiştirme sınırına ulaşıncaya kadar artan moment etkisinde elastik şekil değiştirme yapar. Plastik şekil değiştirme esnasında betonarme eleman bir miktar daha moment alarak moment taşıma kapasitesine ulaşır. Plastik şekil değiştirme bölgesinde kesitte çok büyük eğrilikler ve bu sebeple kalıcı hasarlar meydana gelir. Ardından moment taşıma kapasitesine ulaşan betonarme kesitte göçme meydana gelir.



Şekil 3.2 Betonarme kesitlerde moment eğrilik ilişkisi (Özer, 2008)

Betonarme bir kesitte eğilme rijitliğinin, eğilme momentine göre değişimi Şekil 3.3'te verilmiştir. Eğilme momenti etkisindeki kesitin çatlamasıyla birlikte kesitin eğilme rijitliğinin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Çatlamış kesite ait eğilme rijitliğinin, normal kesit rijitliğine oranı %40-%60 arasında kabul edilmektedir.



Şekil 3.3 Eğilme momenti-eğilme rijitliği ilişkisi (Celep, 2008)

3.2.2. Plastik mafsal tanımı

Yapısal elemanlarda doğrusal olmayan davranışın karşılığı hasar olarak nitelendirilebilmektedir. Genel bir ifadeyle plastik mafsal kavramı plastikleşmenin ve kalıcı hasarın yoğun olarak meydana geldiği bölge olarak tanımlanmaktadır. Yapısal elemanlarda şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı bölgeler, genel olarak eğilme momenti

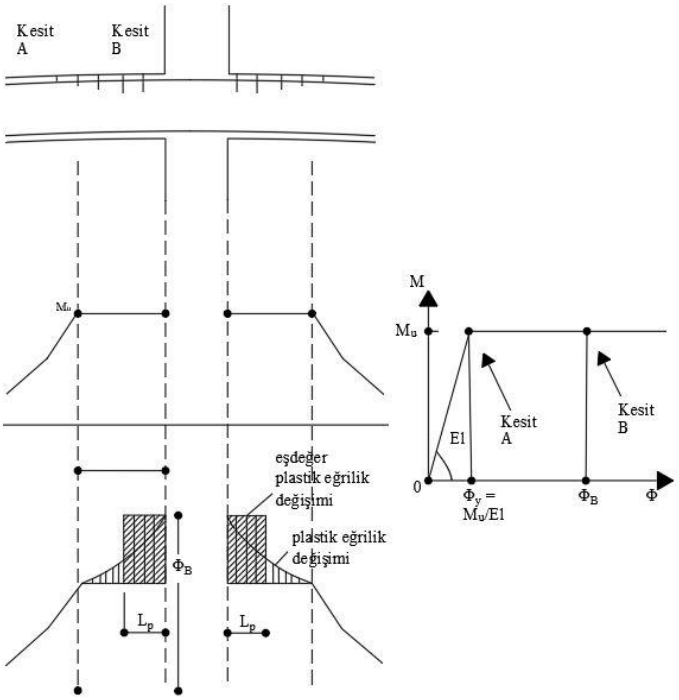
değerinin maksimum olduğu bölgelere karşılık gelmektedir. Plastik mafsallarda dönme sabit moment altında gerçekleşmektedir. Eğriliğin plastik mafsal bölgesinde sabit olduğu kabul edilerek plastik mafsallarda oluşan dönme miktarı göreli bir kolaylıkla hesaplanabilmektedir (İnel vd. 2008).

Plastik mafsal davranışı, yığılı plastik davranış modeli ve yayılı plastik davranış modeli olmak üzere iki başlıkta sınıflandırılmaktadır.

3.2.2.1. Yığılı plastik davranış

Yapısal sisteme etkiyen yükler altında sistemde kalıcı şekil değiştirmeler oluşmaya başlar. Oluşan kalıcı şekil değiştirmelerin elemanın bir bölgesinde toplandığı kabul edilebilir. Kalıcı şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı bu bölgelere plastik mafsal tanımlaması yapılmaktadır. Bu varsayımda elemanın plastik mafsal bölgeleri dışında kalan bölgelerinde doğrusal elastik davranış sergilediği kabul edilmektedir. Yapı mühendisliği literatüründe bu hipotez plastik mafsal hipotezi olarak geçmektedir (Özer, 2009). Plastik mafsal kabulü, yığılı plastik davranış modeline dayanmaktadır. Plastik mafsalda meydana gelen toplam dönme miktarı, plastik eğrilik ile plastik mafsal boyunun çarpımına eşittir.

Şekil 3.4'te sürekli bir betonarme kirişe ait moment-eğrilik ve plastik mafsal uzunluğu ilişkisi verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere plastik eğriliklerin yoğunlaştığı bölgelerde eşdeğer plastik eğrilikler tanımlanmaktadır.



Şekil 3.4 Sürekli kirişe ait ve plastik mafsal ilişkisi (Celep, 2007)

3.2.2.2. Yayılı plastik davranış

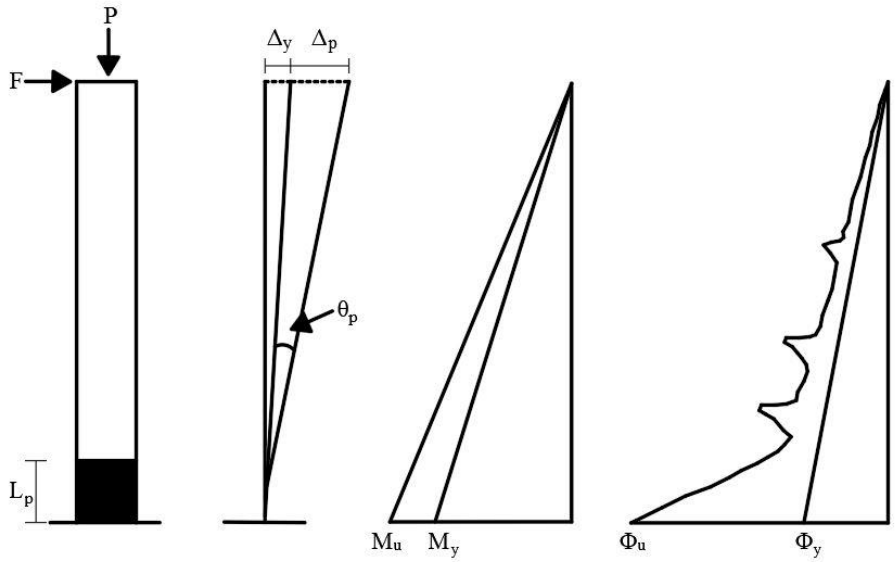
Yayılı plastik davranış modeli, doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin tüm eleman boyunca ya da plastik şekil değiştirme bölgelerinde yayılı bir şekilde dağıldığı varsayımına dayanmaktadır. Yığılı plastik davranış modeline göre daha gerçekçi bir yaklaşım olması bu modelin avantajıdır. Yayılı plastik davranış varsayımı, elemanların lifli olarak tanımlanarak modellenmesi esasına dayanır. Bu modelleme tekniğinde beton ve çelik malzemesi küçük hücrelere ayrılarak her bir hücre için çevrimsel gerilme-şekil değiştirme ilişkisi elde edilir.

Yayılı plastik davranış modelinde yapısal elemanlarda plastik mafsal oluşumuna izin verilememekle birlikte, doğrusal olmayan davranış kesitlerin liflerindeki gerilmeler ve şekil değiştirmeler ile ifade edilmektedir.

3.2.3. Eğrilik-dönme ilişkisi

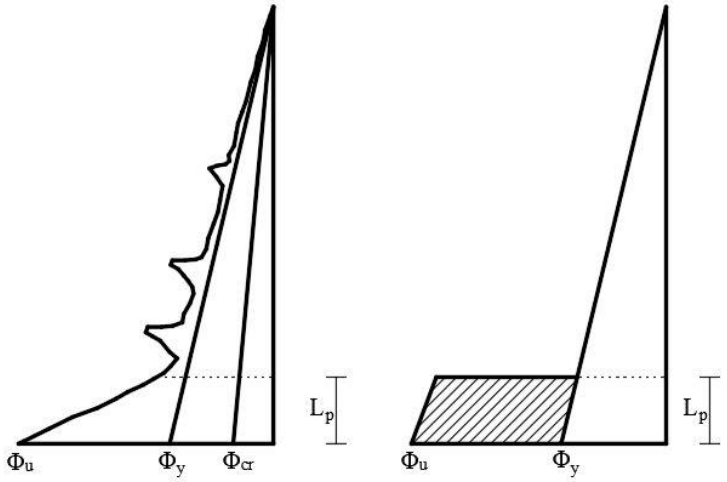
Eğilme momenti altındaki kesitlerde eğilme şekil değiştirmesi bir başka deyişle eğrilik meydana gelir. Kesitlerde oluşan eğilme şekil değiştirmesi elemanda dönme alarak

yansımaktadır. Eğilme hâkim davranışa sahip betonarme kolonlara ait moment-eğrilik ilişkisi Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Betonarme kolonların moment-eğrilik diyagramı (Özmen vd. 2007)

Plastik mafsal hipotezinde, doğrusal elastik olmayan davranışın elemanın belirli bir bölgesinde sınırlı kaldığı varsayılır. Bu kabullerden yola çıkarak idealleştirilen eleman boyunca eğrilik dağılımı Şekil 3.6'da verilmektedir. Şekil 3.6'da görüleceği üzere eğriliğin plastik mafsal bölgesinde ani bir atış gösterdiği kabul edilmektedir.



Şekil 3.6 İdealleştirilmiş eğrilik diyagramı (Celep ve Kumbasar, 2004)

Plastik mafsalda oluşan toplam dönme miktarı, eğriliğin plastik mafsal boyunca integrasyonu ile hesaplanabilir (Eşitlik 3.6). İdealize edilmiş eğrilik dağılımında ise toplam dönme miktarı, plastik mafsal bölgesindeki ortalama eğriliğin plastik mafsal boyu ile çarpılması sonucu elde edilebilecektir (Eşitlik 3.7).

$$\theta = \int_0^{L_P} \phi(x)dx \tag{3.6}$$

$$\theta = \phi \times L_P \tag{3.7}$$

Bu eşitliklerde; θ, dönme açısını, ϕ eğriliği ve L_P plastik mafsal uzunluğunu ifade etmektedir.

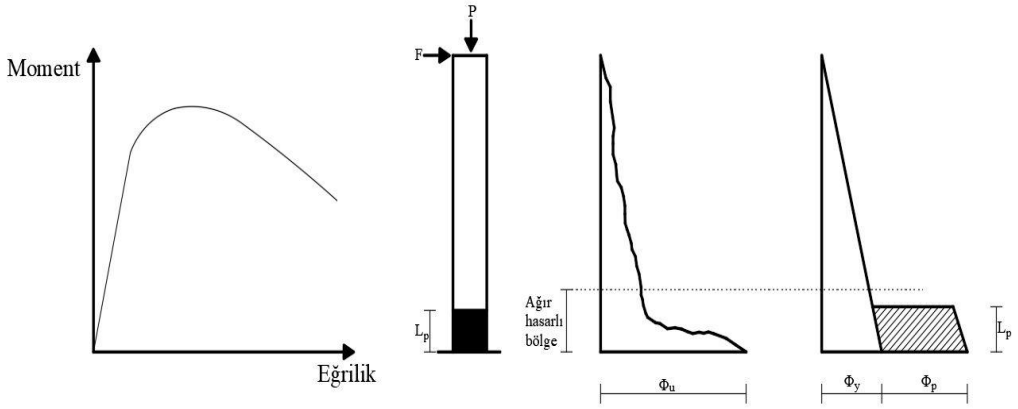
3.2.4. Dönme-yer değiştirme ilişkisi

Şekil 3.6'da görüldüğü üzere maksimum moment bölgesinde eğrilikler yoğunlaşmaktadır. Bu bölgede oluşan plastik eğrilikler eşdeğer plastik eğriliklere dönüştürülmekte ve idealize edilmiş bu bölgeye plastik mafsal bölgesi adı verilmektedir. Plastik mafsal uzunluğunun bilinmesiyle, kolonların uç yer değiştirmeleri moment alan teoremlerinden hesaplanabilir. Bu sebeple, betonarme kolonların plastik mafsal uzunluklarının gerçeğe en yakın şekilde belirlenmiş olması, yatay yükler altında davranışın iyi bir şekilde tahmin edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Plastik mafsalların dönme kapasitesini Eşitlik 3.8'de verilmiştir (İnel vd. 2008).

$$\theta_p = \frac{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{ce}}{d} l_p \tag{3.8}$$

Plastik mafsalların dönme kapasitesini veren bu eşitlikte; θ_p plastik dönmeyi, ε_{cu} nihai durumda betondaki birim kısalmayı ve ε_{ce} betonda elastik birim kısalmayı ifade etmektedir.

İdealleştirilmiş eğrilik diyagramında moment-alan teoremi kullanılarak dönme ve yer değiştirme değerleri hesaplanabilmektedir (Şekil 3.7). Konsol bir betonarme kolonda moment alan teoremi kullanılarak elde edilen dönme ve uç deplasman bağıntıları aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.7 Konsol kolonda plastik mafsal (Park ve Paulay, 1975)

Akma Durumunda:

$$\theta_y = \frac{\phi_y \times L}{2} \tag{3.9}$$

$$\Delta_y = \frac{\phi_y \times L}{2}\frac{2 \times L}{3} = \frac{\phi_y \times L^2}{3} \tag{3.10}$$

Nihai Durumda:

$$\theta_u = \frac{\phi_y \times L}{2} + (\phi_u + \phi_y) \times L_p \tag{3.11}$$

$$\Delta_u = \frac{\phi_y \times L^2}{3} + (\phi_u + \phi_y) \times L_p \times \left(L - \frac{L_p}{2}\right) \tag{3.12}$$

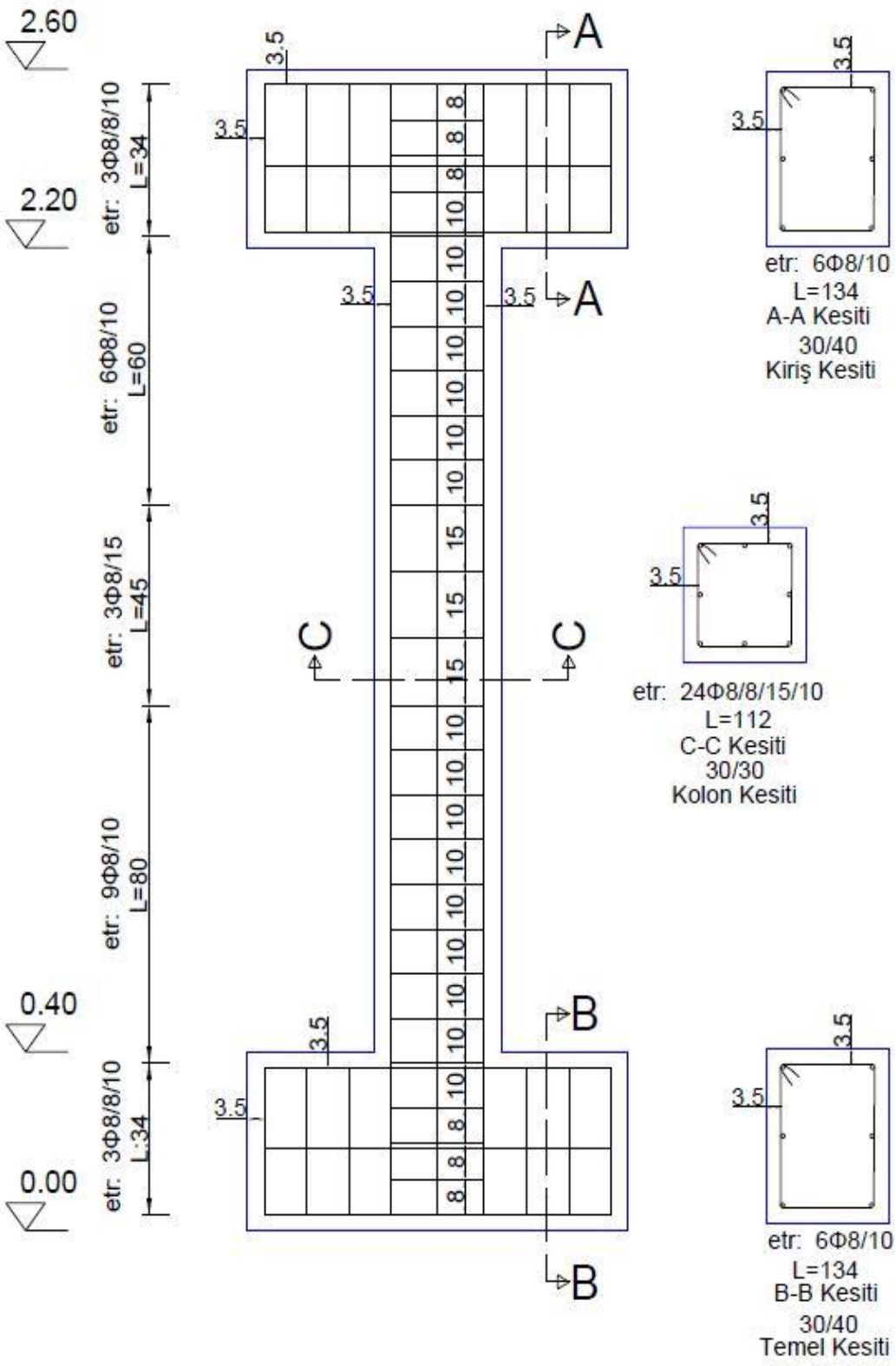
4. MATERYAL ve YÖNTEM

Tez sahibinin bursiyer olarak yer aldığı TÜBİTAK 3501 (116M162) projesi kapsamında üretilen 30 adet betonarme kolonu ile aynı malzeme ve kesit özelliklerine sahip 5 adet betonarme kolonu BAP-FBA-2020-659 projesi kapsamında üretilmiştir. Hızlandırılmış korozyon yöntemi ile yüksek düzeyde paslandırılan numunelere ait malzeme-kesit özellikleri, yükleme programı ve ölçüm düzeneği hakkında detaylı bilgiler verilmiştir

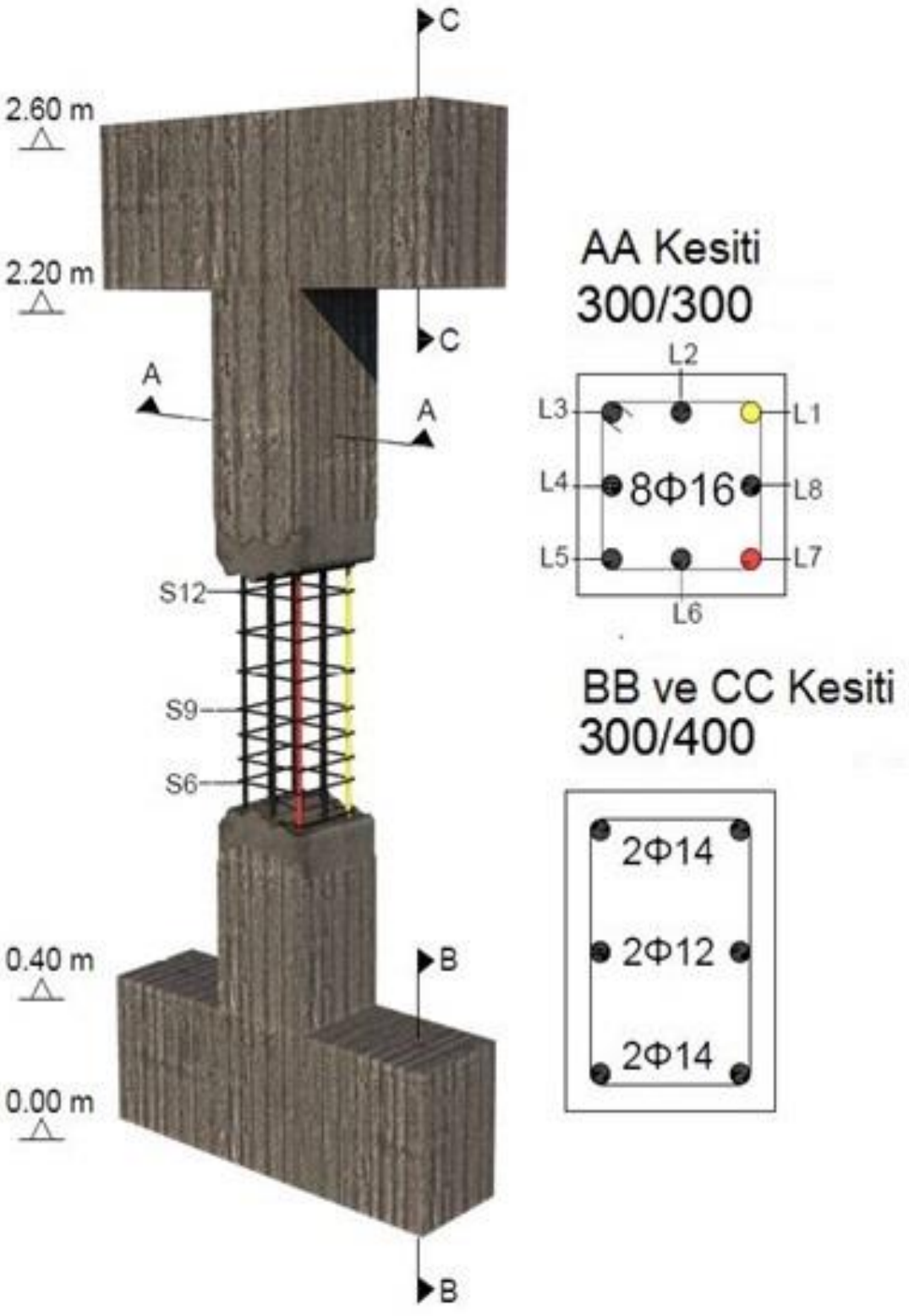
4.1. Materyal

4.1.1. Malzeme ve kesit özellikleri

Tez çalışması kapsamında 15 MPa basınç dayanımına sahip 5 adet tam ölçekli betonarme kolon üretilmiştir. Betonarme kolonlara ait kesit özellikleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Betonarme kolon numunelerinin üç boyutlu modeli Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Betonarme kolon numunelerinin en kesit boyutları 30×30 cm boyutlarındadır. Kolon numunelerinin temel üstünden kiriş altına olan net yüksekliği 180 cm'dir. Her bir kolon numunesinde bir sıra ara donatı olacak şekilde toplamda 8 adet 16 mm çapında boyuna donatılar kullanılmıştır. 8 mm çapına sahip sargı donatıları 10 cm aralıklarla yerleştirilerek donatı kafesi oluşturulmuştur. Betonarme kolon numunelerinde kullanılan çelik donatıların mekanik özellikleri özdeştir.



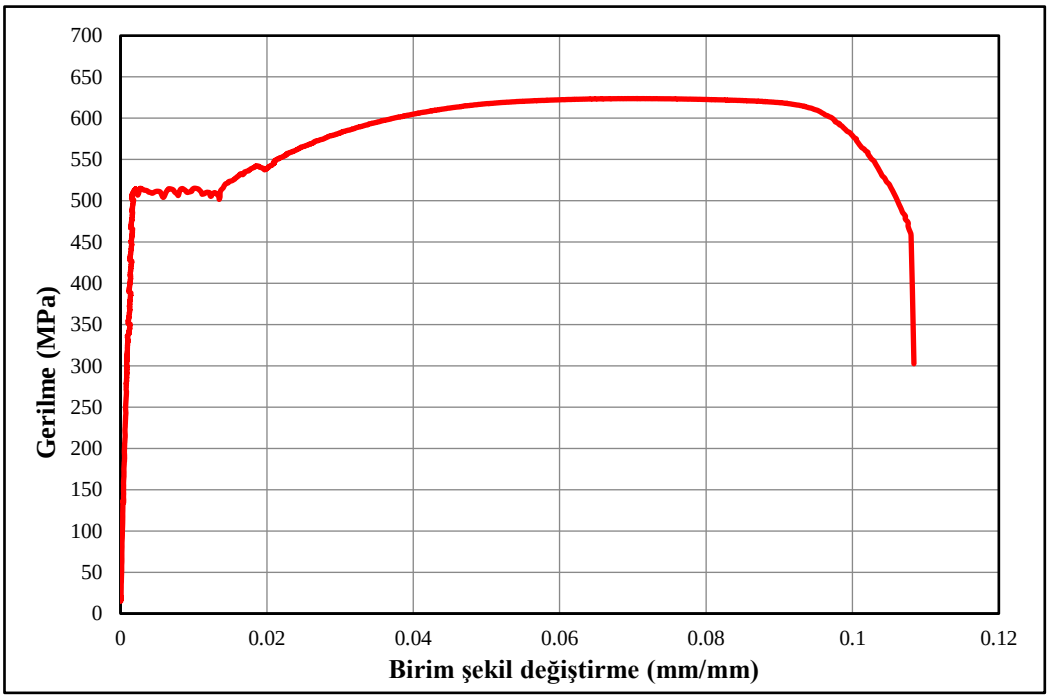
Şekil 4.1 Kolon numunelerinin kesit özellikleri



Şekil 4.2 Deneysel numunelerin 3 boyutlu modeli

4.1.1.1. Donatı mekanik özellikleri

Tez çalışması kapsamında üretilen betonarme kolonlarda kullanılan 16 mm çapında boyuna için çekme deneyi uygulanarak mekanik özellikler elde edilmiştir. Donatı çekme deneyi sonucunda elde edilen grafik Şekil 4.3'te verilmiştir. Çekme deneyi sonuçlarına bağlı olarak elde edilen donatı mekanik özellikleri Tablo 4.1'de özetlenmiştir.



Şekil 4.3 16 mm çapında boyuna donatı için gerilme-şekil değiştirme eğrisi

Tablo 4.1 Donatı mekanik özellikleri

Donatı	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (mm/mm)	Elastisite Modülü (MPa)
Ø16	492.54	585.29	0.1162	194472

4.1.2. Numunelerin hazırlanması

4.1.2.1. Donatı işleri

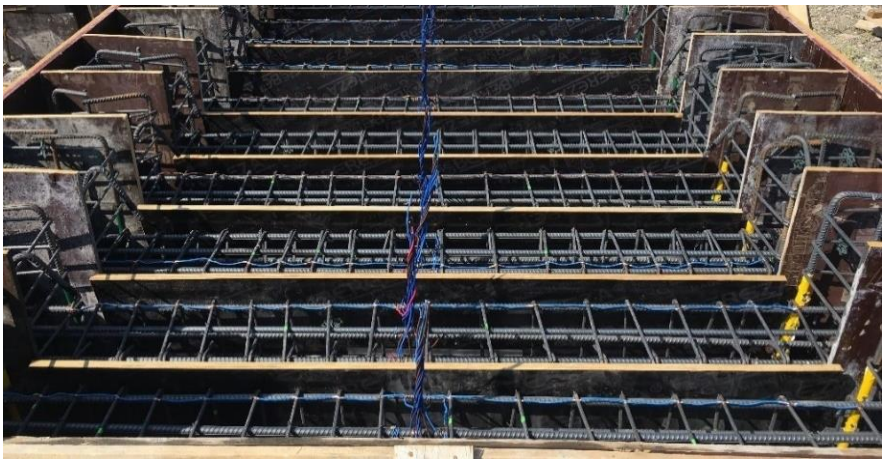
Tez çalışması kapsamında 5 adet betonarme kolon için hazırlanan 16 mm en kesit çapında 40 adet boyuna donatı ile 8 mm en kesit çapında 90 adet sargı donatısı kodlanarak ilk kütleleri kayıt altına alınmıştır. Tartım işleminden sonra donatılar plan ölçülerine uygun bir şekilde bağlanarak kafes haline getirilmiştir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Donatı kafeslerinin oluşturulması

4.1.2.2. Kalıp işleri

Tez çalışması kapsamında üretilen betonarme kolon numunelerinin imalatında ahşap kalıplar kullanılmıştır. Üretilen kalıplara daha önce hazırlanan donatı kafesleri yerleştirilerek numuneler beton dökümüne hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Kalıpların oluşturulması

4.1.2.3. Beton işleri

Çalışma kapsamında hazırlanan betonarme kolon numunelerinde hazır beton kullanılmıştır (Şekil 4.6). Beton dökümü esnasında her bir betonarme kolondan 6 adet silindir beton numunesi alınmıştır. Alınan bu numuneler betonarme kolon deneyinin gerçekleştirileceği güne kadar betonarme kolonlar ile aynı koşullarda muhafaza edilmiştir. Silindir numuneler betonarme kolonların deney günü kırılarak basınç dayanımları elde edilmiştir. Paslandırma süreci beton dökümünden 3 ay sonra gerçekleştirilmiştir.



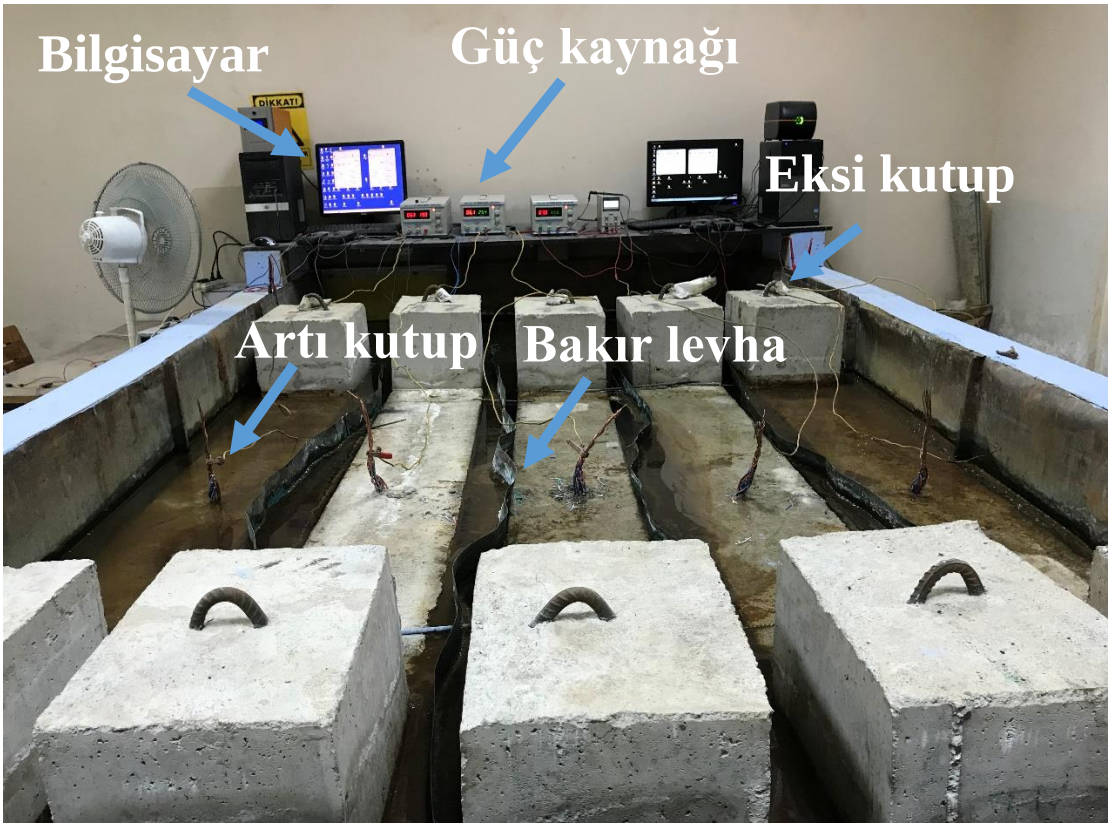
Şekil 4.6 Beton dökümü

4.2. Yöntem

4.2.1. Hızlandırılmış korozyon yöntemi

Betonarme elemanlarda paslanma süreci genellikle uzun yıllar içinde gerçekleşmektedir. Hızlandırılmış korozyon yöntemi, betonarme elemanlardaki donatıların elektriksel ve kimyasal etkiler ile paslanma sürecini hızlandırmayı hedefleyen bir yöntemdir. Tez çalışması kapsamında hazırlanan tam ölçekli betonarme kolon numunelerinden 4 adedi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi 13 Mart Yapı Mekaniği Laboratuvarında bulunan tam ölçekli bakır kaplı paslandırma havuzunda paslandırılmıştır. Şekil 4.7 de gösterilen

tam ölçekli paslandırma havuzunda olması muhtemel elektrik kaçaklarını önlemek için havuzun tüm yüzeyleri plastik membran ile kaplanmıştır.



Şekil 4.7 Tam ölçekli paslandırma havuzunda numunelerin paslandırılması

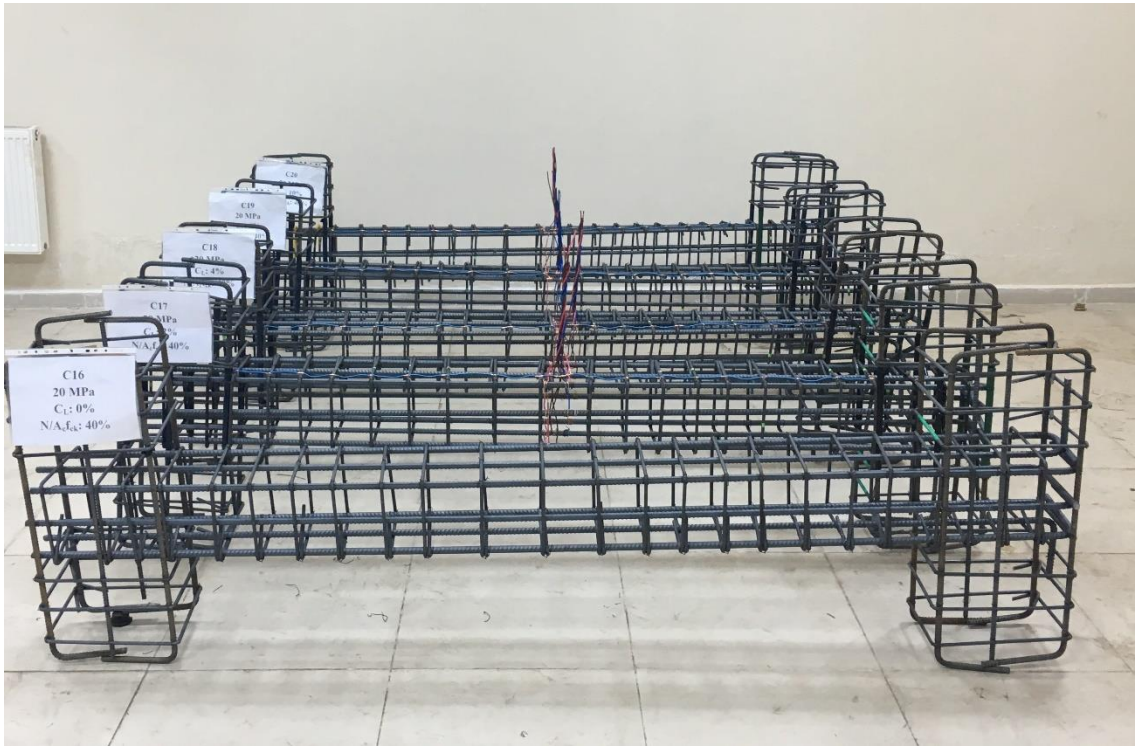
Numunelere ait gerçek korozyon oranlarının belirlenebilmesi için tüm boyuna ve sargı donatılarının ilk kütleleri hassas terazi yardımıyla kayıt altına alınmıştır. Homojen bir korozyon dağılımının elde edilebilmesi için tüm boyuna ve sargı donatılarından 4 mm çapında bakır kablolar geçirilmiştir (Şekil 4.8). Betonarme kolonlardan çıkan bakır kablolara 60 volt kapasiteli ayarlanabilir güç kaynakları pozitif terminal olarak bağlanmıştır. Elektrik devresinin tamamlamak için negatif terminal olarak havuzu çepeçevre saran bakır levhalar kullanılmıştır. Kontrollü paslanmanın sağlanabilmesi amacıyla sistemden geçen akım kayıt altına alınmıştır. Kayıt altına alınan akımlar kullanılarak teorik paslanma miktarı Faraday kanununa göre hesaplanmıştır.

Hedeflenen korozyon oranlarını elde etmek için gereke akım miktarı ve süresi Faraday Kanununa göre hesaplanabilmektedir. Bae vd., (2009); X.Liu vd., (2018); Nossoni (2015) ve Wang vd, (2004) yapmış oldukları çalışmalarda donatıların kütle kayıplarını Faraday

Kanunu'nu kullanarak hesaplamış iken, Coronelli (2002) ve Stanish vd, (1999) ise çaptaki azalmayı ilk çapa bölerek hesaplamıştır.

$$\mathrm{m} = \frac{t(s)\times I(A)\times 55.847}{n\times 96{,}487} \qquad (4.1)$$

Eşitlik 4.1'deki ifadelerden t saniyeyi, I sistemden geçen akımı, n korozyon sürecinde üretilen veya harcanan elektron miktarını, 55.847 değeri metalin atomik kütlesini (gr/mol), 96.487 (A.sn/mol) ise Faraday sabitini göstermektedir.



Şekil 4.8 Tüm donatılardan bakır kabloların geçirilmesi

4.2.2. Deney düzeneği

Korozyona maruz kalan betonarme kolonların tersinir tekrarlanır yükleme etkisi altında yapısal davranışlarının ve deprem performanslarının incelenmesi amacıyla yükleme ve ölçüm düzeneği oluşturulmuştur. Deneyler yer değiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Yanal yükleme, itme ve çekme olarak 60 ton kapasiteli hidrolik kriko ile el pompası kullanılarak uygulanmıştır. Kolon numunesinde tepe deplasman, 200 mm kapasiteli yer değiştirme ölçer yardımıyla ölçülmüştür. Kolon boyunca eğrilik ve dönme dağılımının elde edilmesi için numunelerin pozitif yükleme bölgesine sürekli şekilde 100

mm kapasiteli LVDT'ler yerleştirilmiştir. Deney sırasında elde edilen veriler 8 kanallı veri toplama cihazı yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır. Oluşturulan deney düzeneği Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



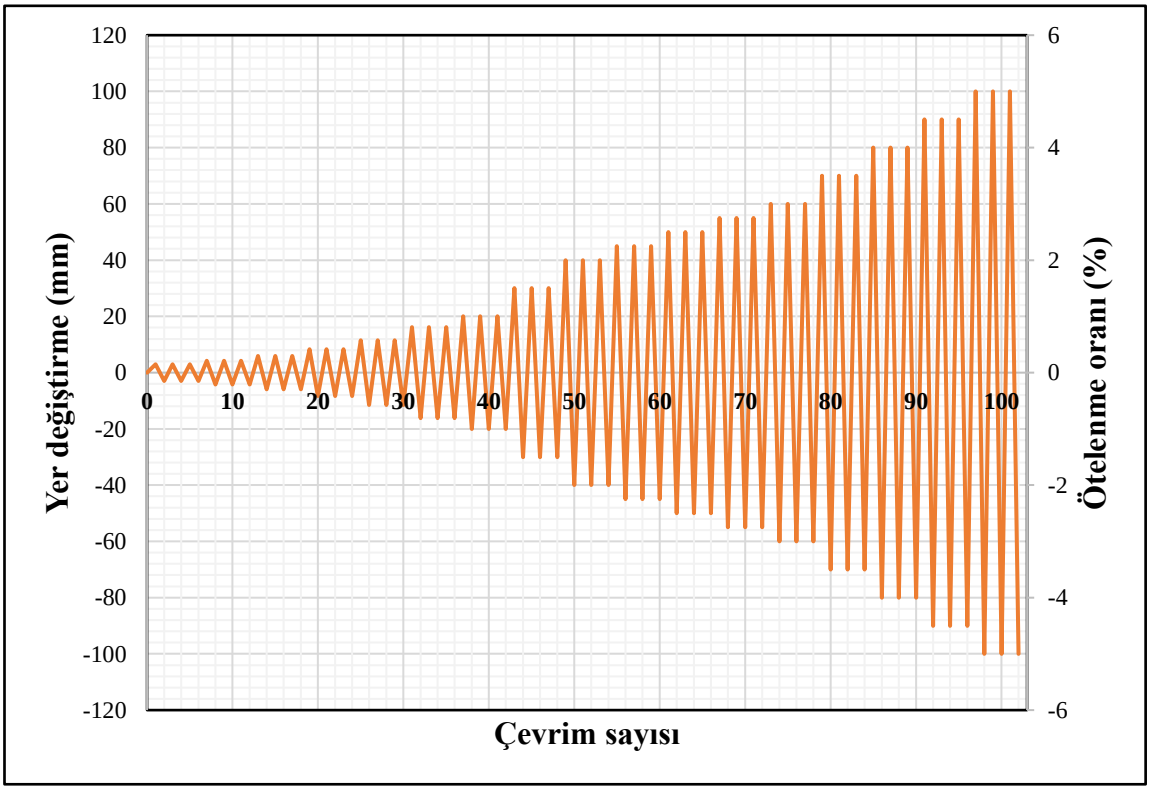
Şekil 4.9 Deney düzeneği

- 1-Betonarme Kolon
- 2-Eksenel Yükleme Kirişi
- 3-Toplam Yer Değiştirme Ölçer (200 mm kapasiteli LVDT)
- 4-Kolon Boyunca Eğrilik Ölçer (8 adet 100 mm kapasiteli LVDT)
- 5-Yanal Yükleme İçin Hidrolik Piston (60 ton kapasiteli)
- 6-Eksenel Yükleme İçin Hidrolik Piston (2 adet 100 ton kapasiteli)
- 7-Yanal Yükleme İçin El Pompası
- 8-Eksenel Yükleme İçin El Pompası (2 adet)

- 9-8 Kanallı Veri Toplayıcı (2 adet)
- 10-Güç Kaynağı
- 11-Reaksiyon Duvarı

4.2.3. Yükleme programı

Deneyler, tersinir tekrarlanır yükleme etkisi altında deplasman kontrollü olarak yapılmıştır. FEMA 461 (2007) ve ACI 374 (2006) yönetmeliği göz önüne alınarak her bir deplasman için 3 çevrim gerçekleştirilmiştir. Yük-deplasman grafiklerinin idealleştirilmesi aşamasında akma ve nihai noktaların kesin olarak belirlenebilmesi amacıyla yükleme protokolüne 45 mm ve 55 mm genlik değerleri eklenmiştir. Artırımsal yükleme programı Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Yükleme protokolünde gerçekleştirilen tepe deplasmanları ve ötelenme oranları Tablo 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.10 Yükleme programı

Tablo 4.2 Yükleme adımları

Adım	Deplasman (mm)	Ötelenme (%)
1	3.00 mm	0.15
2	4.20 mm	0.21
3	5.88 mm	0.29
4	8.32 mm	0.42
5	11.52 mm	0.58
6	16.13 mm	0.81
7	20 mm	1.00
8	30 mm	1.50
9	40 mm	2.00
10	45 mm	2.25
11	50 mm	2.50
12	55 mm	2.75
13	60 mm	3.00
14	70 mm	3.50
15	80 mm	4.00
16	90 mm	4.50
17	100 mm	5.00

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmanın sonuçlarına yer verilmiştir. Bir adet referans numunesi olmak üzere toplamda 5 adet tam ölçekli betonarme kolonu, eksenel yük taşıma kapasitesinin %40'ı kadar yük altında tersinir tekrarlanır yanal yükleme ile deneye tabi tutulmuştur. Betonarme kolonların yükleme deneyleri sonrası durumları Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Yükleme deneylerinden sonra kolon numuneleri

5.1. Deney Sonuçları

Deney sonuçları beş başlık altında incelenmiştir. Bu başlıklar sırasıyla gerçek korozyon oranlarının belirlenmesi, birincil çatlak genişlikleri, yük deplasman ilişkileri, moment eğrilik ilişkileri, enerji yutma kapasitelerinin belirlenmesi ve plastik mafsal boyu uzunluklarının ölçülmesi şeklindedir.

5.1.1. Gerçek korozyon oranları

Gerçek korozyon oranlarının belirlenmesi için, yükleme deneyleri sonrasında numuneler kırılarak boyuna donatılar ve sargı donatıları çıkartılmıştır (Şekil 5.2 ve Şekil 5.3).



Şekil 5.2. Numunelerin kırıma hazırlanması

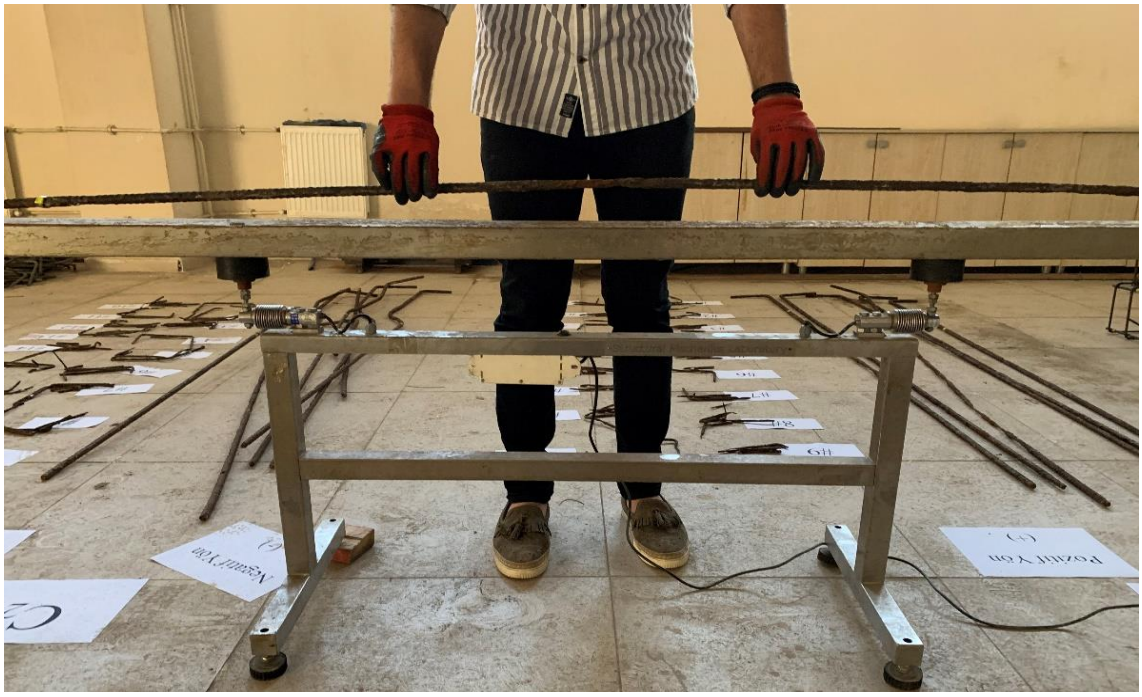


Şekil 5.3. Numunelerin kırımı

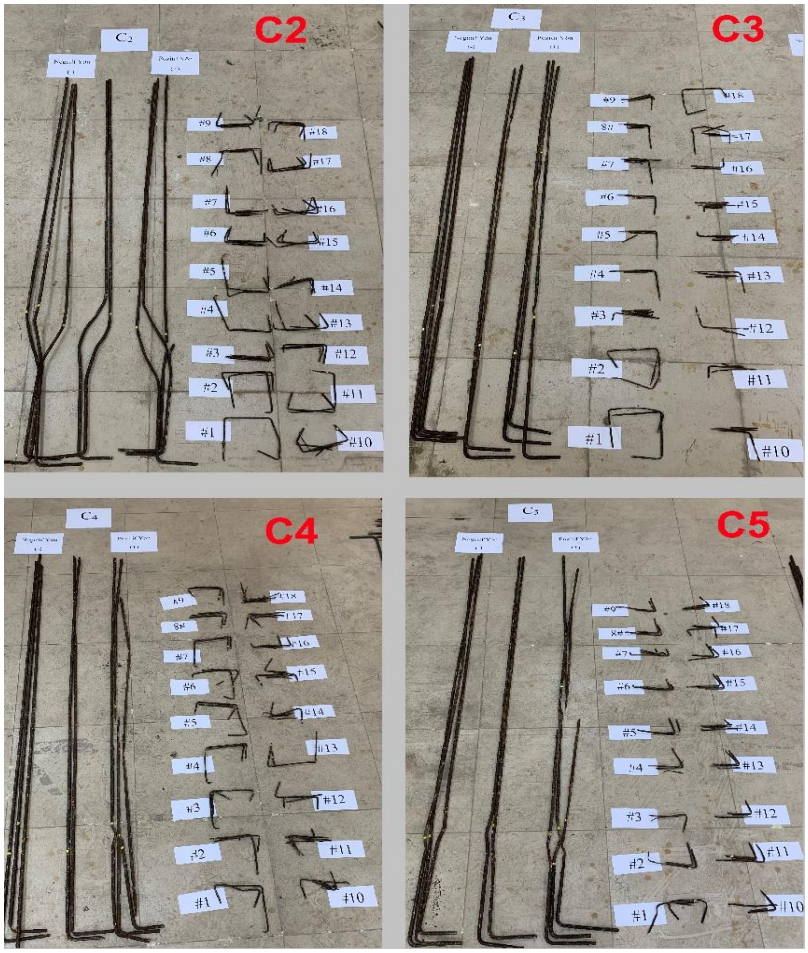
Hızlandırılmış korozyon yöntemi ile paslandırılan kolon numunelerinin içinden çıkartılan paslanmış donatılar mekanik temizleme işlemine tabi tutulmuştur (Şekil 5.4). Temizleme işlemi sonrasında paslanmış betonarme kolonlardan çıkartılan boyuna donatıların ve sargı donatılarının kütleleri, hassas terazi ile her bir donatı en az 3 kez tartılarak belirlenmiştir (Şekil 5.5). Her bir donatının paslanma süreci sonundaki ağırlığı belirlendikten sonra kütle kaybına bağlı olarak gerçek korozyon oranları hesaplanmıştır. Donatıların ilk kütleleri ve son ağırlıklarının yer aldığı korozyon oranı hesap tabloları her bir betonarme kolon numunesi için verilmiştir (Tablo 5.1, Tablo 5.2, Tablo 5.3 ve Tablo 5.4). Elde edilen korozyon dağılımlarına ait grafikler boyuna donatılar için Şekil 5.7'de sargı donatıları için ise Şekil 5.8'de verilmiştir.



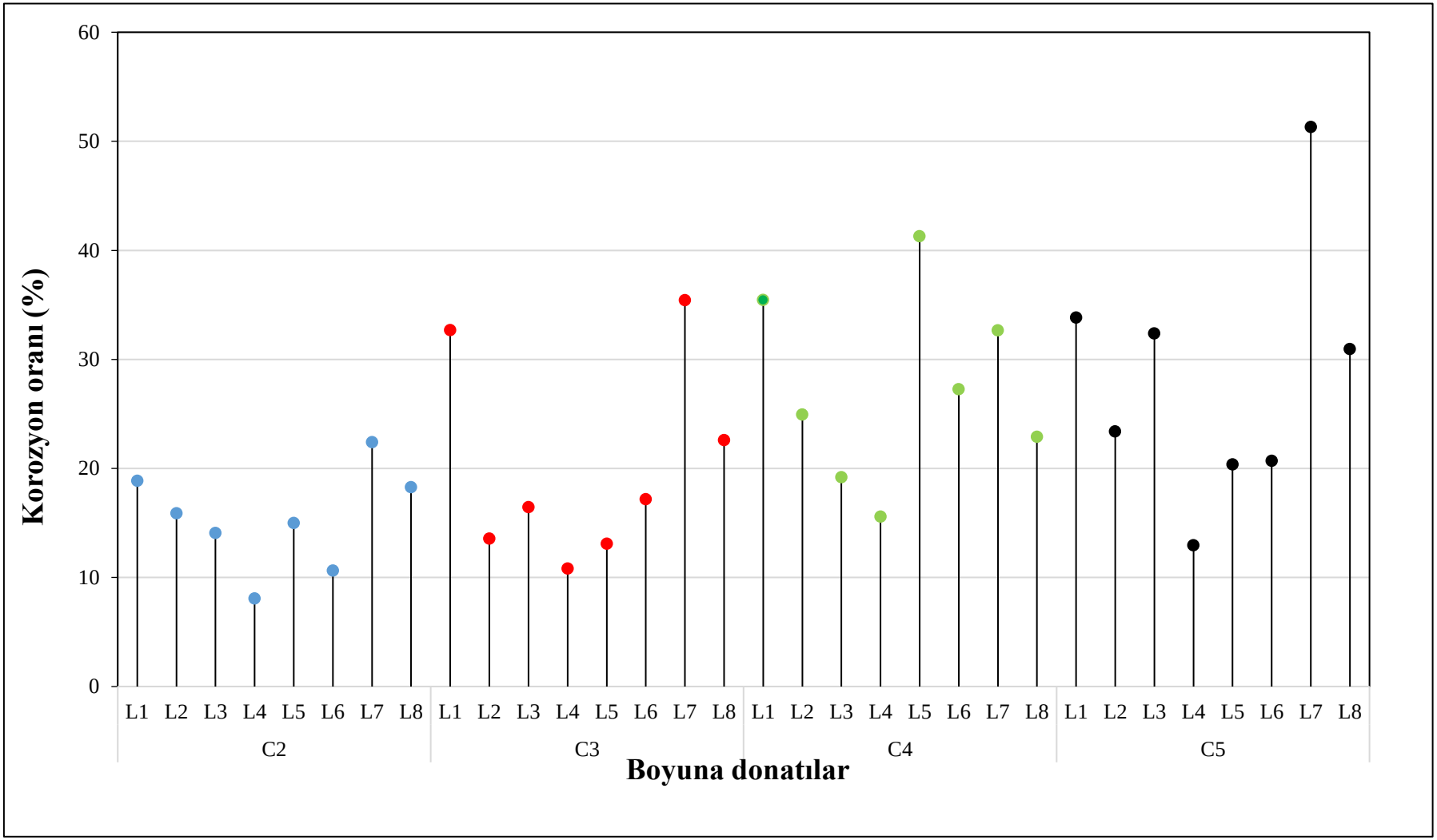
Şekil 5.4. Donatıların mekanik temizlenmesi



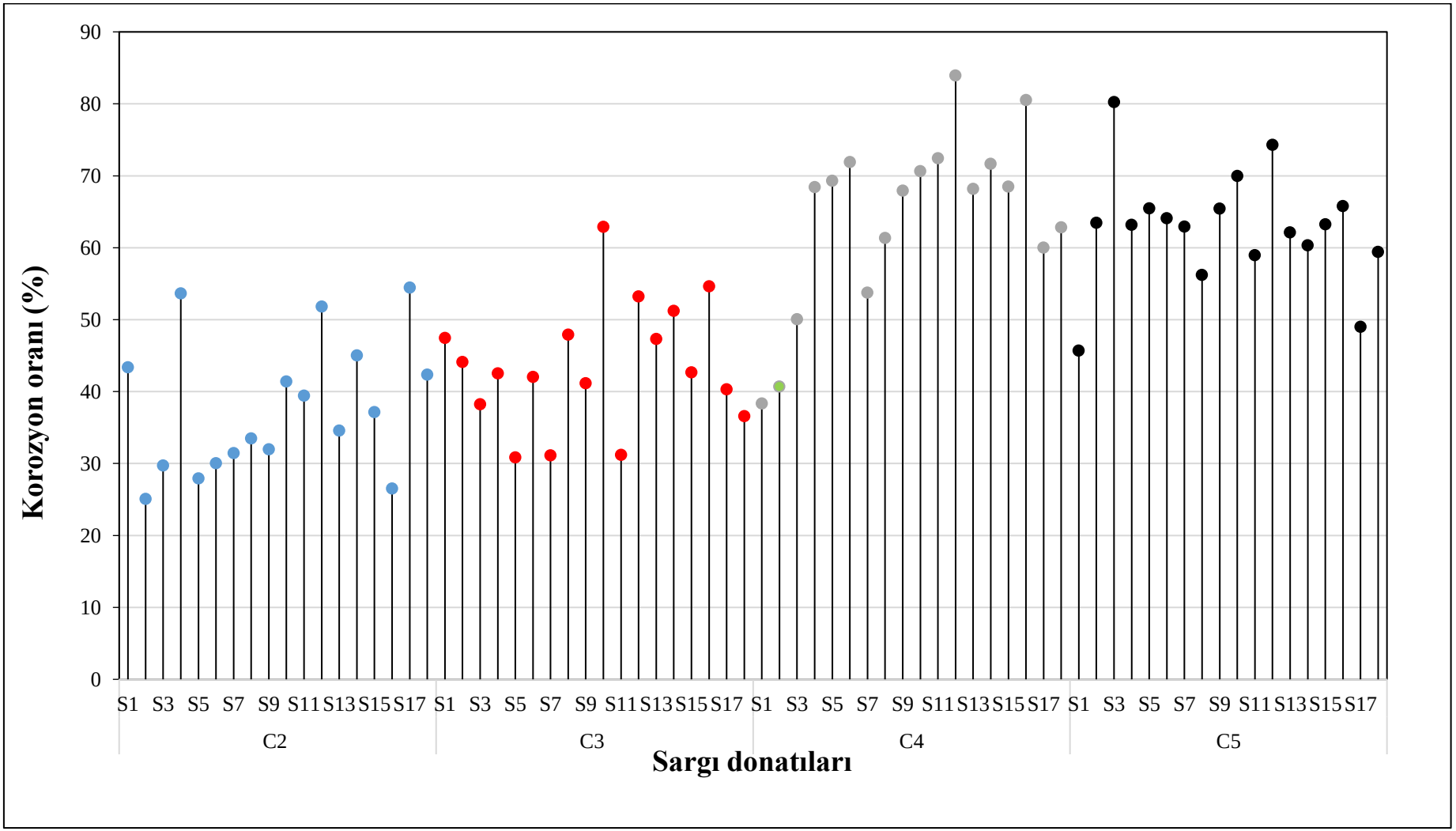
Şekil 5.5. Donatıların hassas terazi ile son ağırlıklarının tartımı



Şekil 5.6. Paslanmış kolonlardan çıkartılan boyuna donatılar ve sargı donatıları



Şekil 5.7 Boyuna donatıların korozyon dağılımları



Şekil 5.8. Sargı donatılarının korozyon dağılımları

Tablo 5.1 C2 Numunesi için gerçek korozyon oranlarının hesaplanması

Numune	Donatı	İlk Kütle (gr)	Son Kütle (gr)	Kütle Kaybı (%)
Boyuna Donatılar	**L-1**	4100.0	3326.0	18.88
	L-2	4010.0	3373.0	15.89
	L-3	4060.5	3488.0	14.10
	L-4	4046.0	3719.0	8.08
	L-5	4044.5	3437.5	15.01
	L-6	4085.5	3651.0	10.64
	L-7	4037.0	3132.5	22.41
	L-8	4104.0	3353.5	18.29
Toplam		**32487.5**	**27480.5**	**15.41**
Sargı Donatıları	**S-1**	441.5	250.0	43.37
	S-2	452.5	339.0	25.08
	S-3	471.0	331.0	29.72
	S-4	463.0	214.5	53.67
	S-5	427.5	308.0	27.95
	S-6	457.5	320.0	30.05
	S-7	426.0	292.0	31.46
	S-8	440.5	293.0	33.48
	S-9	442.5	301.0	31.98
	S-10	468.5	274.5	41.41
	S-11	447.5	271.0	39.44
	S-12	449.5	216.5	51.84
	S-13	429.5	281.0	34.58
	S-14	448.5	246.5	45.04
	S-15	448.0	281.5	37.17
	S-16	429.5	315.5	26.54
	S-17	447.0	203.5	54.47
	S-18	439.0	253.0	42.37
Toplam		**8029.0**	**4991.5**	**37.83**

Tablo 5.2 C3 Numunesi için gerçek korozyon oranlarının hesaplanması

Numune	Donatı	İlk Kütle (gr)	Son Kütle (gr)	Kütle Kaybı (%)
Boyuna Donatılar	**L-1**	4058.0	2731.5	32.69
	L-2	4083.5	3529.0	13.58
	L-3	4064.5	3395.5	16.46
	L-4	4062.0	3622.5	10.82
	L-5	4051.0	3520.0	13.11
	L-6	4024.0	3332.5	17.18
	L-7	3991.5	2577.0	35.44
	L-8	4041.0	3128.0	22.59
Toplam		**32375.5**	**25836.0**	**20.20**
Sargı Donatıları	**S-1**	445.5	234.0	47.47
	S-2	450.0	251.5	44.11
	S-3	443.0	273.5	38.26
	S-4	462.0	265.5	42.53
	S-5	447.0	309.0	30.87
	S-6	443.5	257.0	42.05
	S-7	441.5	304.0	31.14
	S-8	454.0	236.5	47.91
	S-9	424.0	249.5	41.16
	S-10	486.5	180.5	62.90
	S-11	445.5	306.5	31.20
	S-12	504.5	2360	53.22
	S-13	432.0	227.5	47.34
	S-14	444.0	216.5	51.24
	S-15	448.5	257.0	42.70
	S-16	445.5	202.0	54.66
	S-17	421.5	251.5	40.33
	S-18	441.5	280.0	36.58
Toplam		**8080.0**	**4538.0**	**43.84**

Tablo 5.3 C4 Numunesi için gerçek korozyon oranlarının hesaplanması

Numune	Donatı	İlk Kütle (gr)	Son Kütle (gr)	Kütle Kaybı (%)
Boyuna Donatılar	**L-1**	4052.5	2616.0	35.45
	L-2	4043.5	3035.0	24.94
	L-3	4113.5	3324.5	19.18
	L-4	4064.5	3431.0	15.59
	L-5	4027.0	2364.5	41.28
	L-6	4039.0	2938.0	27.26
	L-7	4009.5	2700.0	32.66
	L-8	4044.5	3118.0	22.91
Toplam		**32394.0**	**23527.0**	**27.37**
Sargı Donatıları	**S-1**	446.0	275.0	38.34
	S-2	465.5	276.0	40.71
	S-3	442.5	221.0	50.06
	S-4	451.0	142.5	68.40
	S-5	467.5	143.5	69.30
	S-6	464.5	130.5	71.91
	S-7	455.0	210.5	53.74
	S-8	463.0	179.0	61.34
	S-9	450.5	144.5	67.92
	S-10	448.0	131.5	70.65
	S-11	439.0	121.0	72.44
	S-12	460.5	74.0	83.93
	S-13	452.5	144.0	68.18
	S-14	441.0	125.0	71.66
	S-15	461.5	145.5	68.47
	S-16	454.5	88.5	80.53
	S-17	475.0	190.0	60.00
	S-18	449.0	167.0	62.81
Toplam		**8186.5**	**2909.0**	**64.47**

Tablo 5.4 C5 Numunesi için gerçek korozyon oranlarının hesaplanması

Numune	Donatı	İlk Kütle (gr)	Son Kütle (gr)	Kütle Kaybı (%)
Boyuna Donatılar	**L-1**	4077.0	2698.0	33.82
	L-2	4041.5	3096.5	23.38
	L-3	4008.5	2710.5	32.38
	L-4	4022.0	3501.0	12.95
	L-5	4074.5	3245.0	20.36
	L-6	4117.0	3265.0	20.69
	L-7	4219.0	2054.0	51.32
	L-8	4027.0	2780.5	30.95
Toplam		**32586.5**	**23350.5**	**28.34**
Sargı Donatıları	**S-1**	446.5	242.5	67.92
	S-2	439.0	160.5	70.65
	S-3	453.0	89.5	73.37
	S-4	446.5	164.5	76.09
	S-5	427.0	147.5	78.82
	S-6	451.0	162.0	81.54
	S-7	448.0	166.0	84.26
	S-8	434.0	190.0	86.98
	S-9	448.5	155.0	89.71
	S-10	451.0	135.5	92.43
	S-11	435.0	178.5	95.15
	S-12	455.0	117.0	97.88
	S-13	430.5	163.0	100.60
	S-14	438.5	174.0	103.32
	S-15	446.0	164.0	106.04
	S-16	454.5	155.5	108.77
	S-17	452.0	230.5	111.49
	S-18	451.0	183.0	114.21
Toplam		**8007.0**	**2978.5**	**62.80**

Yükleme deneylerinden sonra elde edilen gerçek korozyon oranları incelendiğinde, her bir kolon numunesinin kendi arasında boyuna donatılarında veya sargı donatılarında düzenli bir dağılım olmadığı görülmüştür. Ancak, ortalama değerler dikkate alındığında aynı numune içerisinde 8 mm çapında sargı donatılarında, 16 mm çapında boyuna donatılara göre yaklaşık 2 kat daha fazla kesit kaybı meydana gelmiştir. Paslandırma sürecinde tüm donatılardan elektrik akımı geçtiği göz önüne alındığında, donatı çapının paslanma sürecinde etkili olduğu anlaşılmıştır. Boyuna donatılar ve sargı donatılarının korozyon oranları arasında ilişki bulunmaktadır. Bu sebeple geliştirilecek olan deneysel modellerde maksimum korozyon oranı yerine boyuna donatılardaki ortalama korozyon oranının dikkate alınması gerekmektedir.

Kolonların kırılmasından sonra donatılarda yapılan gözlemler neticesinde, yüksek korozyon seviyelerinde meydana gelen kesit kayıpları birçok sargı donatısında kopmalara sebebiyet verdiği tespit edilmiştir. Meydana gelen sargı donatısı kayıpları kolonda sargılama etkisini önemli ölçüde azaltarak eksenel yük altında boyuna donatıların burkulmasına neden olmuştur. Burkulmalar daha çok kolonların plastik mafsal bölgesinde yoğunlaşmıştır. Tasarım aşamasında, donatı korozyonu oluşması muhtemel yapıların kolonlarında çiroz donatısı kullanılması gibi burkulma boyunu azaltacak ilave tedbirlerin alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

5.1.2. Paslanmış donatıların mekanik özellikleri

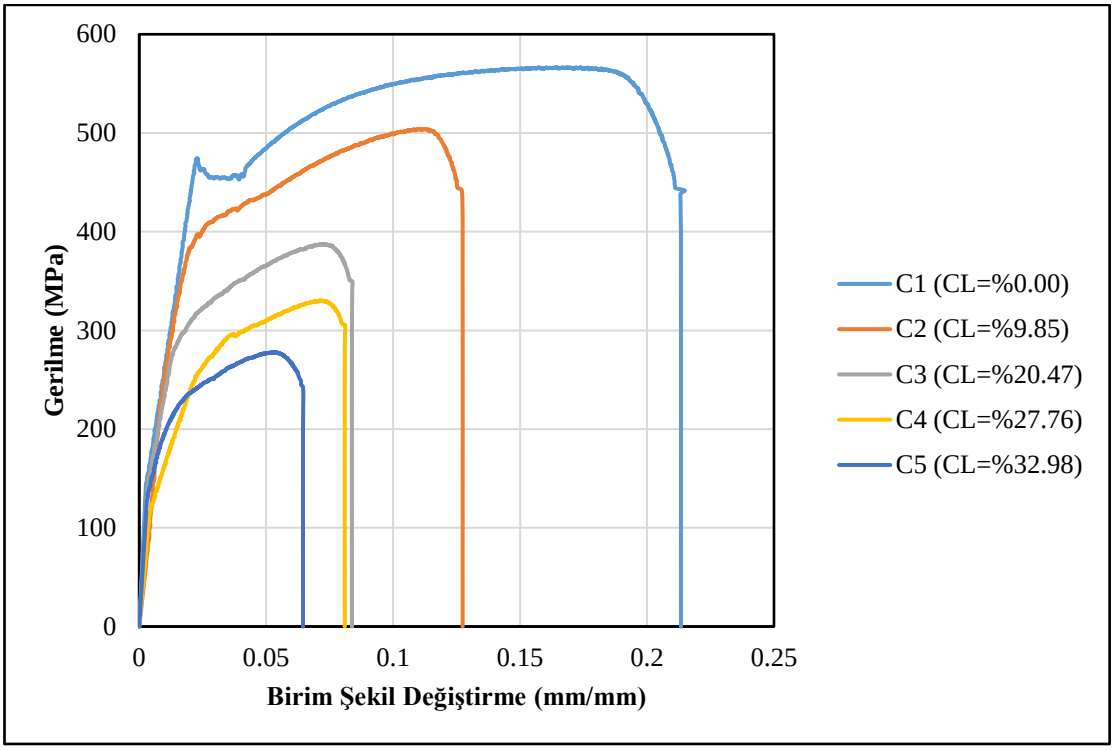
Yükleme deneylerinden sonra gerçek korozyon oranlarının belirlenmesi amacıyla betonarme kolonlardan çıkarılan paslanmış donatılara ait mekanik özellikler çekme deneyleri ile belirlenmiştir (Şekil 5.9). Çekme deneyleri için, her bir kolon numunesinin L_8 boyuna donatısından ortalama korozyonu temsil eden 40 cm boyunda numuneler hazırlanmıştır. Çekme deneyleri sonucunda elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 5.10'da mekanik özellikler ise Tablo 5.5 'de gösterilmiştir.



Şekil 5.9. Paslanmış betonarme donatıları için çekme deneyi

Tablo 5.5 C5 Numunesi için gerçek korozyon oranlarının hesaplanması

Numune	Korozyon Oranı (%)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (mm/mm)
C1	0	566.619	399.271	0.2149
C2	9.85	504.109	418.343	0.1274
C3	20.47	387.536	312.112	0.0840
C4	27.76	330.184	278.332	0.0812
C5	32.98	277.798	199.548	0.0646



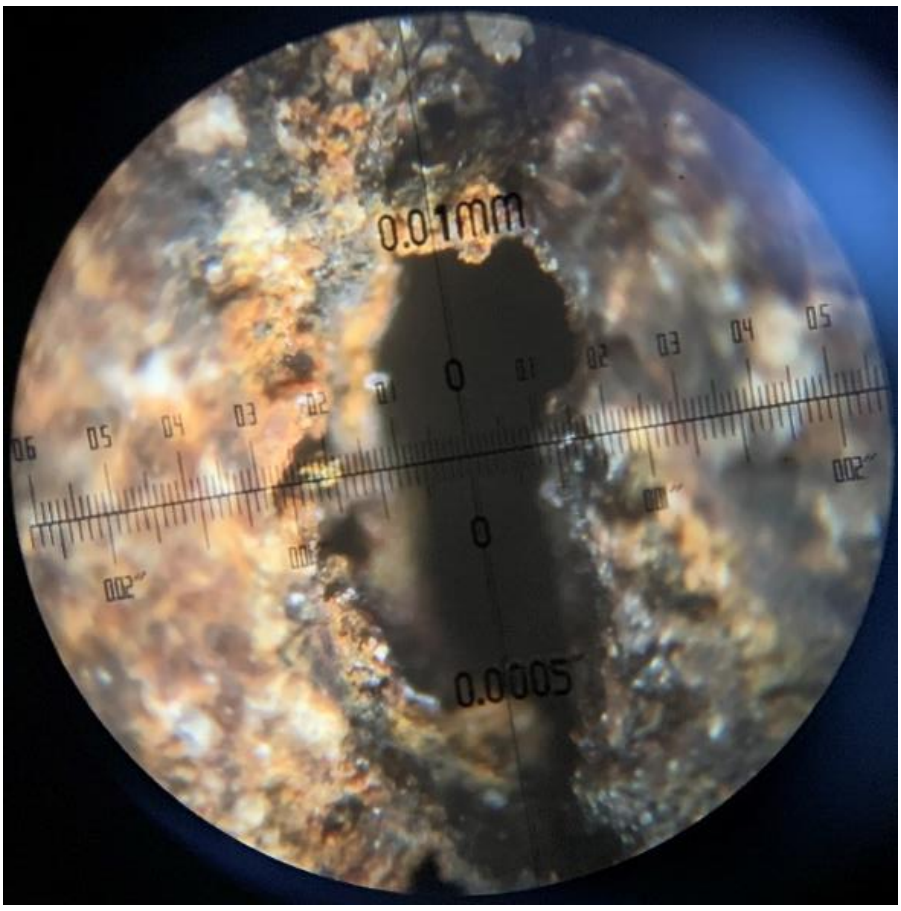
Şekil 5.10. Paslanmış donatılara ait gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri

5.1.3. Korozyon sebebiyle oluşan birincil çatlak genişlikleri

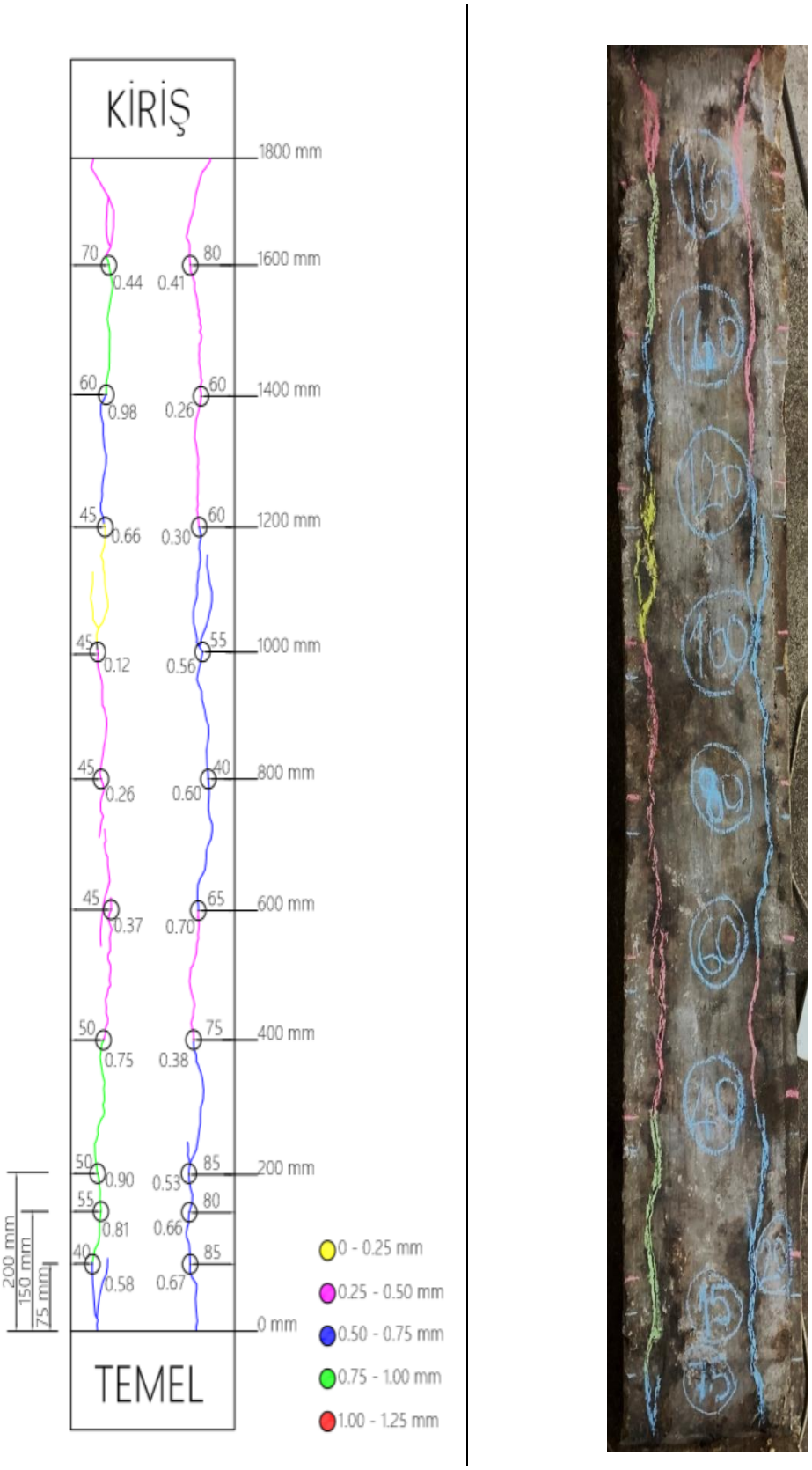
Hızlandırılmış korozyon sürecinden sonra numuneler paslandırma havuzundan çıkartılıp temizlenmiştir (Şekil 5.11). Numuneler deney düzeneğine alınmadan önce korozyon sebebiyle kolon numunelerinde meydana gelen birincil çatlak genişlikleri Şekil 5.10'da gösterildiği gibi çatlak mikroskobu ile ölçülerek numunelerin çatlak haritaları çizilmiştir (Şekil 5.14, Şekil 5.15, Şekil 5.16 ve Şekil 5.17). Çatlaklar teorik plastik mafsal bölgesinde temelden itibaren 7.5 cm ve 15 cm de ölçülmüştür. Sonraki çatlak genişliği ölçümleri her 20 cm de bir yapılmıştır. Çatlak genişliklerinin ölçülmüş olduğu aralıklarda donatılar aynı boyda kesilerek son Kütle tartımları yapılmıştır. L1 ve L7 donatılarının belirlenen boylarda kesilerek korozyon dağılımlarının belirlenmesi ile çatlak genişlikleri ilişkilendirilmiştir.



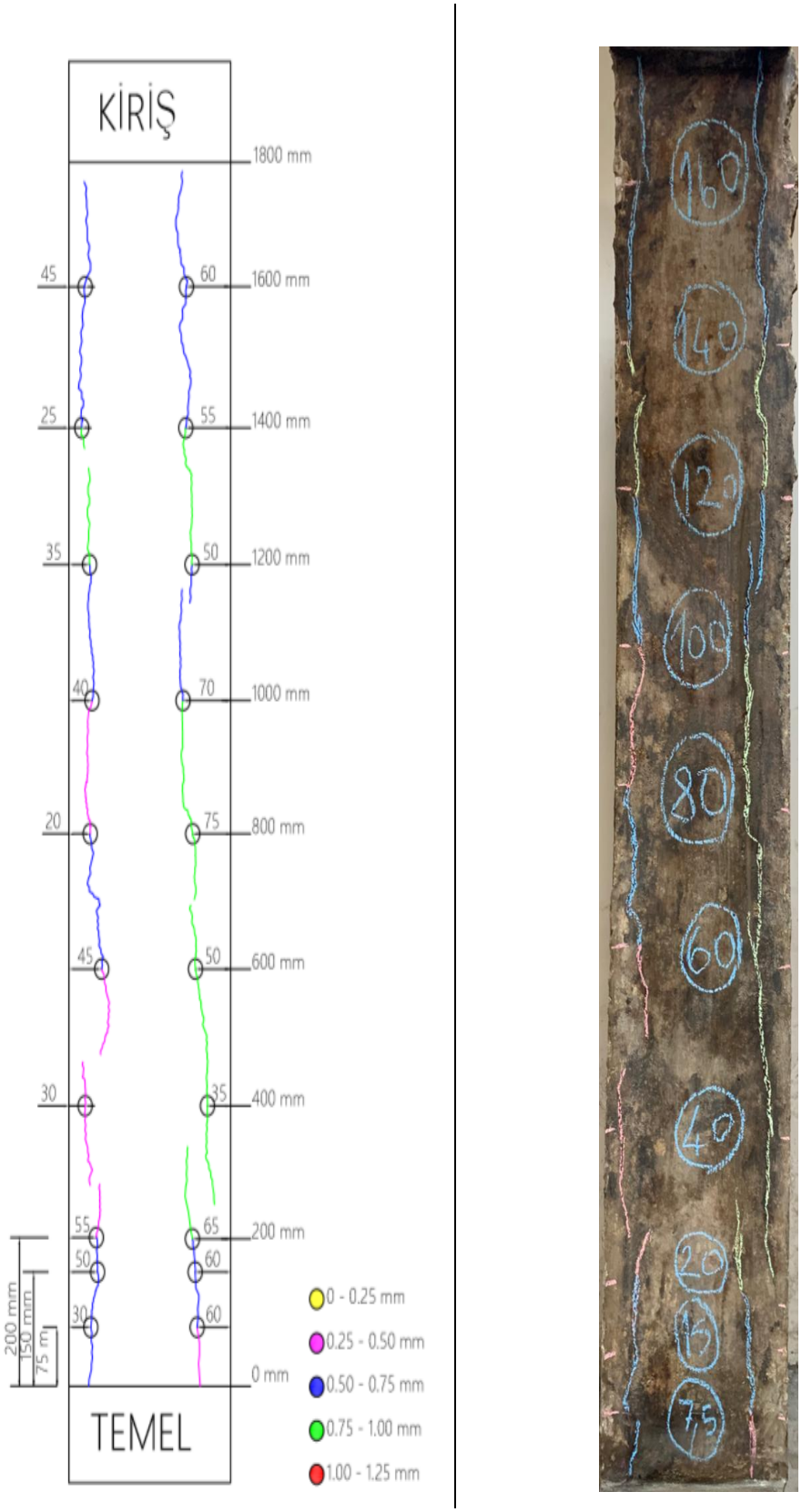
Şekil 5.11. Paslandırma sürecinden sonra numunelerin temizliği



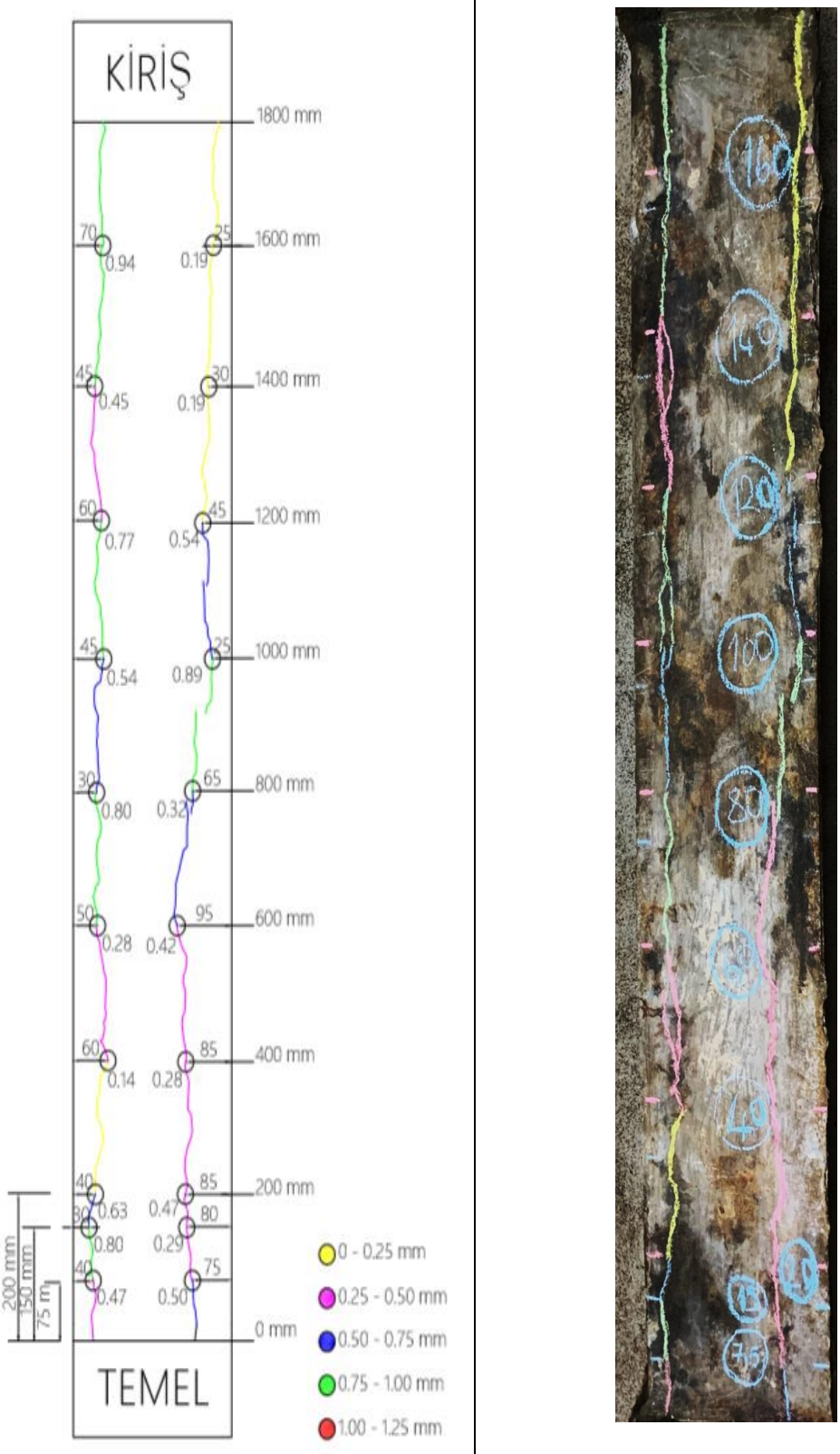
Şekil 5.12. Mikroskopla çatlak ölçümü



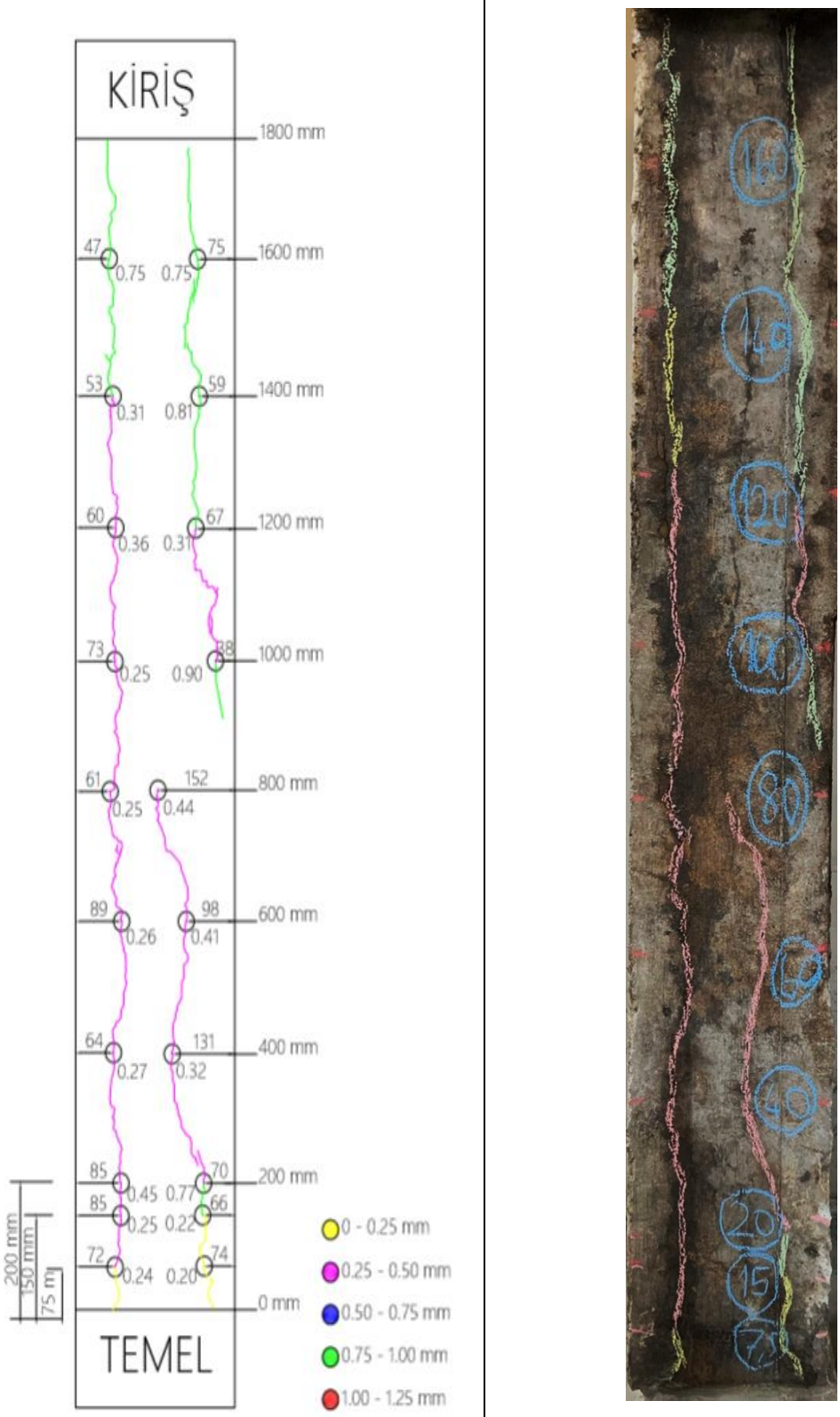
Şekil 5.13. C2 Betonarme kolonu için çatlak deseni



Şekil 5.14. C3 Betonarme kolonu için çatlak deseni



Şekil 5.15. C4 Betonarme kolonu için çatlak deseni



Şekil 5.16. C5 Betonarme kolonu için çatlak deseni

Korozyon nedeniyle betonarme kolon numunelerinin çekme yüzü bölgesinde oluşan birincil çatlaklara ait genişlik değerleri temelden mesafesine bağlı olarak Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6 Birincil çatlak genişlikleri (mm)

Mesafe (mm)	C2		C3		C4		C5	
	L_7	L_1	L_7	L_1	L_7	L_1	L_7	L_1
75 mm	0.58	0.67	0.53	0.41	0.47	0.50	0.24	0.20
150 mm	0.81	0.66	0.67	0.65	0.80	0.29	0.25	0.22
200 mm	0.90	0.53	0.50	0.57	0.63	0.47	0.45	0.77
400 mm	0.75	0.38	0.43	0.80	0.14	0.28	0.27	0.32
600 mm	0.37	0.70	0.40	0.85	0.28	0.42	0.26	0.41
800 mm	0.26	0.60	0.55	0.91	0.80	0.32	0.25	0.44
1000 mm	0.12	0.56	0.40	0.97	0.54	0.89	0.25	0.90
1200 mm	0.66	0.30	0.53	0.55	0.77	0.54	0.36	0.31
1400 mm	0.98	0.26	0.75	0.80	0.45	0.19	0.31	0.81
1600 mm	0.44	0.41	0.55	0.70	0.94	0.19	0.75	0.75
Ortalama	**0.587**	**0.507**	**0.531**	**0.721**	**0.582**	**0.409**	**0.339**	**0.513**

Betonarme kolon numunelerinin pozitif yükleme yüzeyinde bulunan L_1 ve L_7 donatıları hizasında çatlak ölçümü yapılmıştır. İlgili donatılar ölçüm yapılan 11 bölgede kesilerek bölgesel korozyon oranları hesaplanmıştır. Kesilen parçalar için hesaplanan korozyon oranları ve bu bölgelerde ölçülen birincil çatlak genişlikleri Tablo 5.7'de verilmiştir.

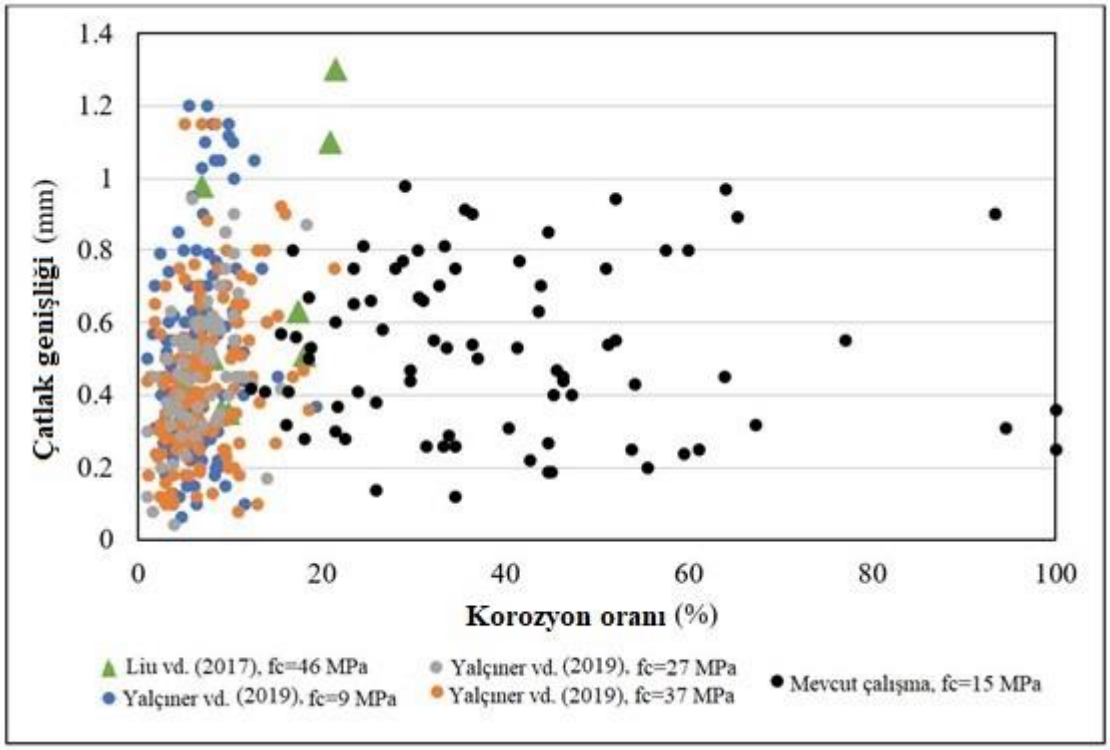


Şekil 5.17. Kesilen paslanmış betonarme donatılar

Tablo 5.7 Çatlak ölçümleri ve ilişkili korozyon oranları

Mesafe (mm)	C_2				C_3				C_4				C_5			
	L-1		L-7		L-1		L-7		L-1		L-7		L-1		L-7	
	C_L (%)	W_{cr} (mm)	C_L (%)	W_{cr} (mm)	C_L (%)	W_{cr} (mm)	C_L (%)	W_{cr} (mm)	C_L (%)	W_{cr} (mm)	C_L (%)	W_{cr} (mm)	C_L (%)	W_{cr} (mm)	C_L (%)	W_{cr} (mm)
75	18.65	0.67	26.65	0.58	16.43	0.41	41.32	0.53	18.65	0.5	45.77	0.47	55.55	0.20	59.55	0.24
150	25.32	0.66	33.32	0.81	23.54	0.65	30.65	0.67	33.77	0.29	59.99	0.80	42.66	0.22	53.77	0.25
200	33.61	0.53	36.29	0.9	15.50	0.57	36.96	0.50	29.59	0.47	43.67	0.63	28.92	0.77	63.79	0.45
400	25.80	0.38	34.51	0.75	16.75	0.80	54.27	0.43	22.61	0.28	25.96	0.14	16.25	0.32	44.72	0.27
600	32.83	0.70	21.78	0.37	44.72	0.85	47.24	0.40	12.23	0.42	18.26	0.28	23.95	0.41	33.17	0.26
800	21.61	0.60	34.51	0.26	35.51	0.91	32.16	0.55	67.34	0.32	30.49	0.80	46.23	0.44	61.14	0.25
1000	17.25	0.56	34.51	0.12	64.15	0.97	45.23	0.40	65.33	0.89	51.26	0.54	93.30	0.90	100.0	0.25
1200	21.44	0.30	30.99	0.66	77.22	0.55	18.76	0.53	36.35	0.54	41.54	0.77	40.37	0.31	100.0	0.36
1400	31.49	0.26	28.98	0.98	57.45	0.80	23.45	0.75	45.06	0.19	46.23	0.45	24.46	0.81	94.64	0.31
1600	13.74	0.41	29.65	0.44	43.89	0.70	52.09	0.55	44.72	0.19	52.09	0.94	27.97	0.75	51.09	0.75
Ort.	24.17	0.51	31.12	0.59	39.52	0.72	38.21	0.53	37.56	0.41	41.53	0.58	39.96	0.51	66.19	0.34

Ölçülen birincil çatlak genişlikleri ile e bu bölgelerde hesaplanan korozyon oranlarına ait ilişki Şekil 5.18'de verilen grafik üzerinde gösterilmiştir. Korozyon oranı ile çatlak genişliği ilişkisi için oluşturulan grafikte Yalciner vd. (2019) ve Liu vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen korozyon çalışmalarına ait çatlak-korozyon oranı ilişkileri de dahil edilmiştir.



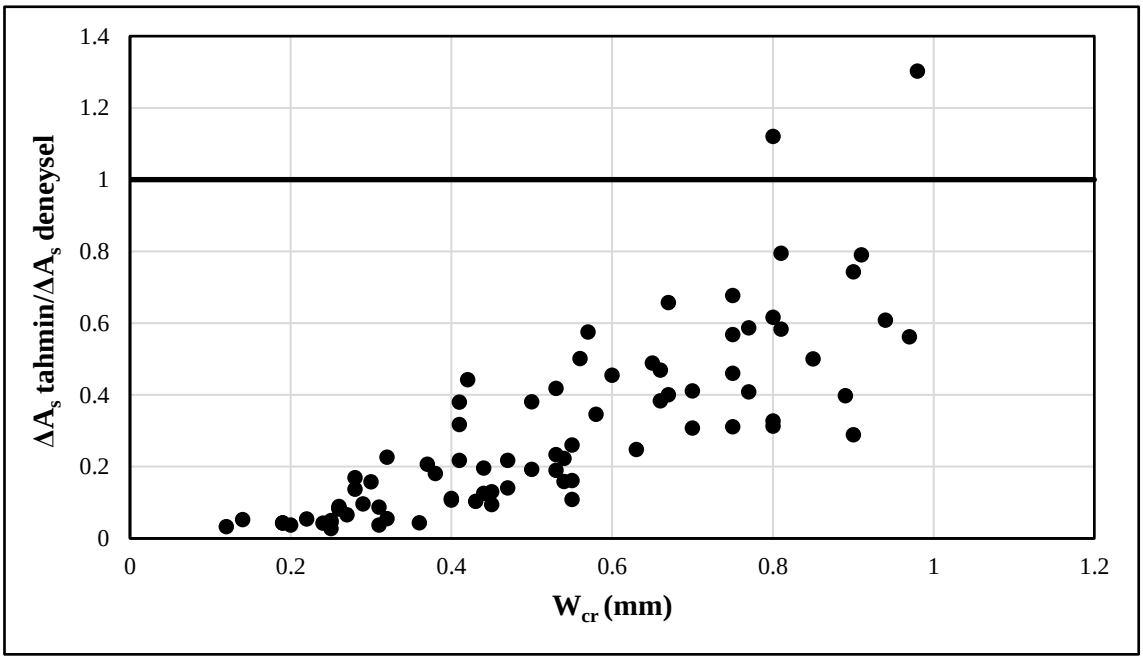
Şekil 5.18 Çatlak genişliği-korozyon oranı ilişkisi

Elde edilen sonuçlar literatürdeki çalışmalar ile birlikte incelendiğinde, Şekil 5.18'den görüleceği üzere, yaklaşık olarak %20 korozyon oranı seviyesine kadar çatlak genişliği ile korozyon oranı arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Ancak yüksek korozyon seviyelerinde, korozyon oranının artışıyla çatlak genişliğinin artmadığı ve grafik üzerinde geniş bir yayılım gösterdiği görülmektedir.

Yalciner ve vd. (2019) tarafından paslanmış betonarme kolonlar üzerinde yapılan deneysel çalışmada, birincil çatlak genişliklerine bağlı olarak kesit kayıplarını tahmin etmeye yönelik bir ampirik model önerilmiştir (Eşitlik 5.1).

$$\Delta A_s = \frac{W_{cr}}{-0.046 \times W_{cr} + 0.058} \tag{5.1}$$

Deneysel çalışma kapsamında elde edilen çatlak genişlikleri Yalciner vd. (2019) tarafından literatürde önerilen Eşitlik 5.1'e girilerek donatıda meydana gelen kesit kayıpları tahmin edilmiştir. Denklemden elde edilen kesit kayıplarının deney sonuçlarında elde edilen kesit kayıplarına oranı her bir çatlak genişliğinde hesaplanmıştır.

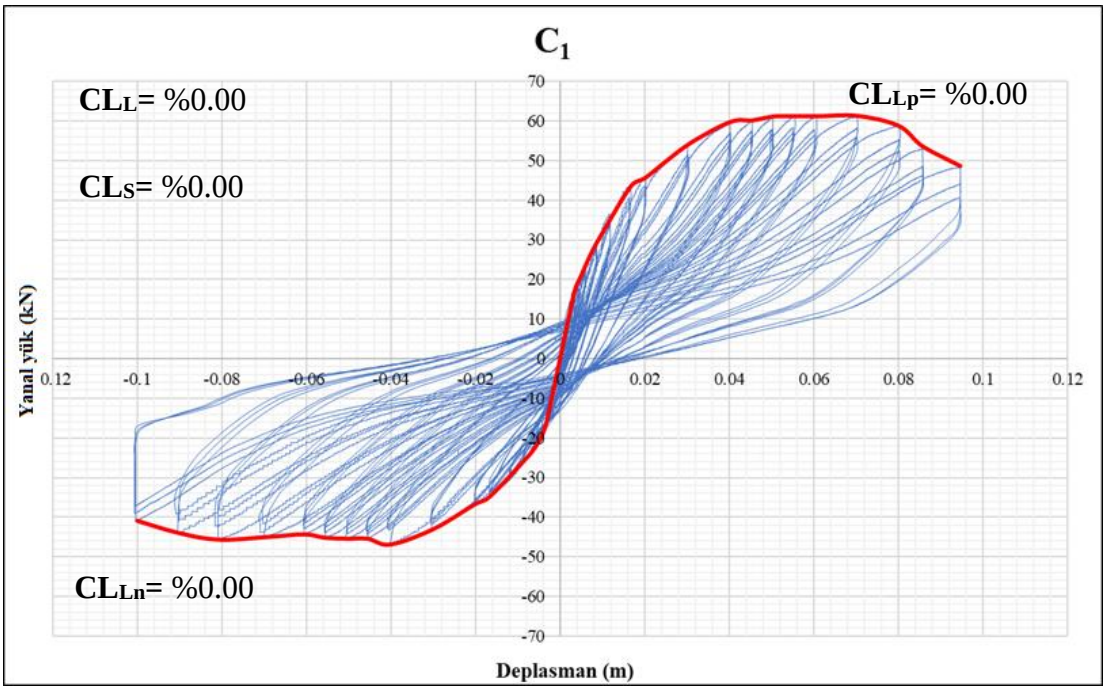


Şekil 5.19 Çatlak genişliğine bağlı kesit kaybı tahmini

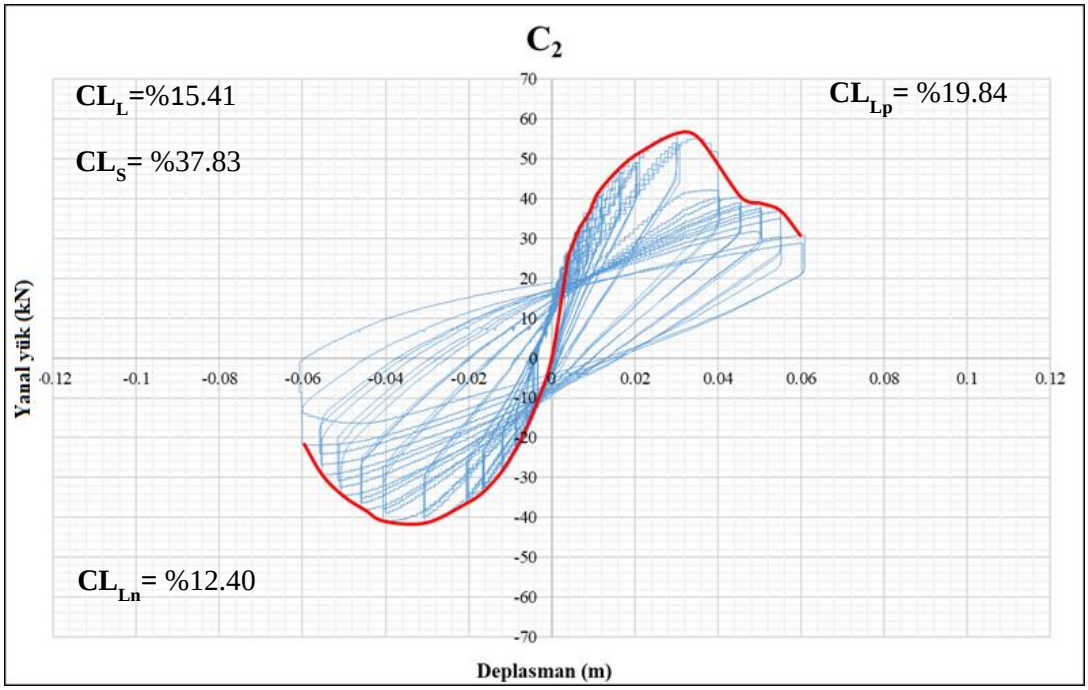
Şekil 5.19'da verilen grafik incelendiğinde, Yalciner vd. (2019) tarafından çatlak genişliğine bağlı donatıda meydana gelen kesit kayıplarının tahmin edilebilmesine yönelik geliştirilen denklemin (Eşitlik 5.1) yüksek korozyon oranlarında tahmin gücü azalmaktadır. Bu durum çatlak gelişiminin belli bir korozyon oranına kadar devam etmesi ve ardından çatlak genişliğinin sabit kalarak donatı kesit alanında azalmaların devam etmesi ile açıklanabilir.

5.1.4. Yük-deplasman sonuçları

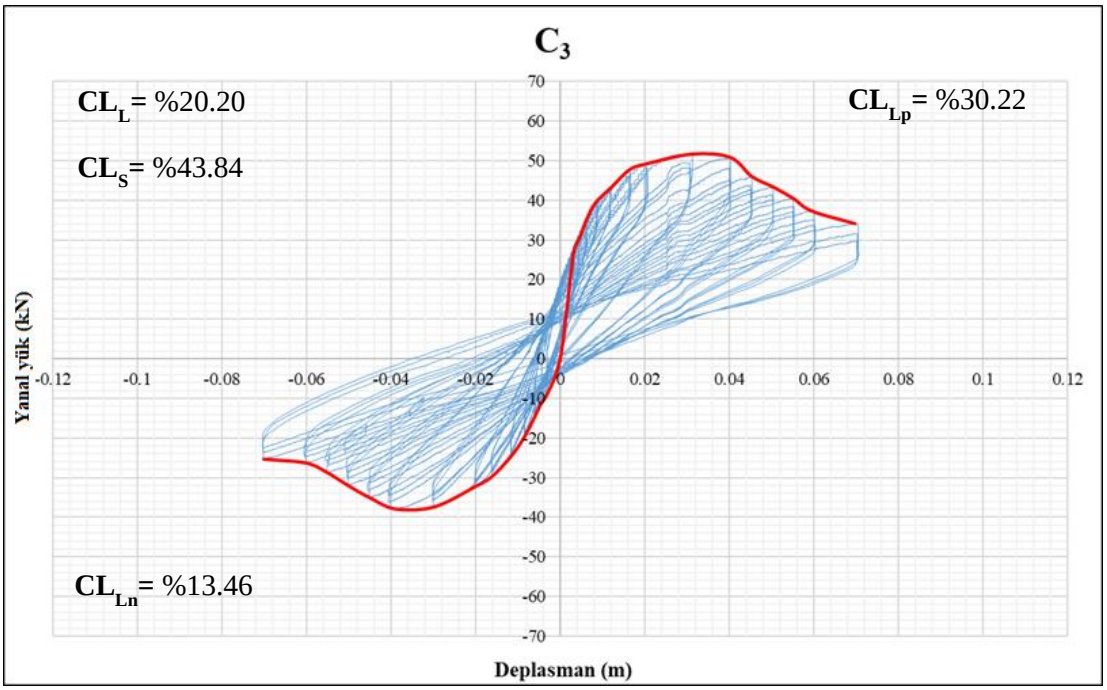
Tersinir tekrarlanır yanal yük ve sabit eksenel yük etkisi altında gerçekleştirilen deneyler sonucunda her bir deney numunesi için elde edilen ait yük- deplasman ilişkileri bu bölümde verilmiştir (Şekil 5.20, Şekil 5.21, Şekil 5.22, Şekil 5.23 ve Şekil 5.24). Deney esnasında 60 ton kapasiteli yük hücresi ile uygulanan yanal yüke karşılık gelen yer değiştirme miktarı 200 mm kapasiteli potansiyometrik cetvel ile kayıt altına alınmıştır. Her bir çevrimsel döngüde ulaşılan maksimum yükler işaretlenerek her bir numune için elde edilen zarf eğrileri Şekil 5.25'te verilmiştir.



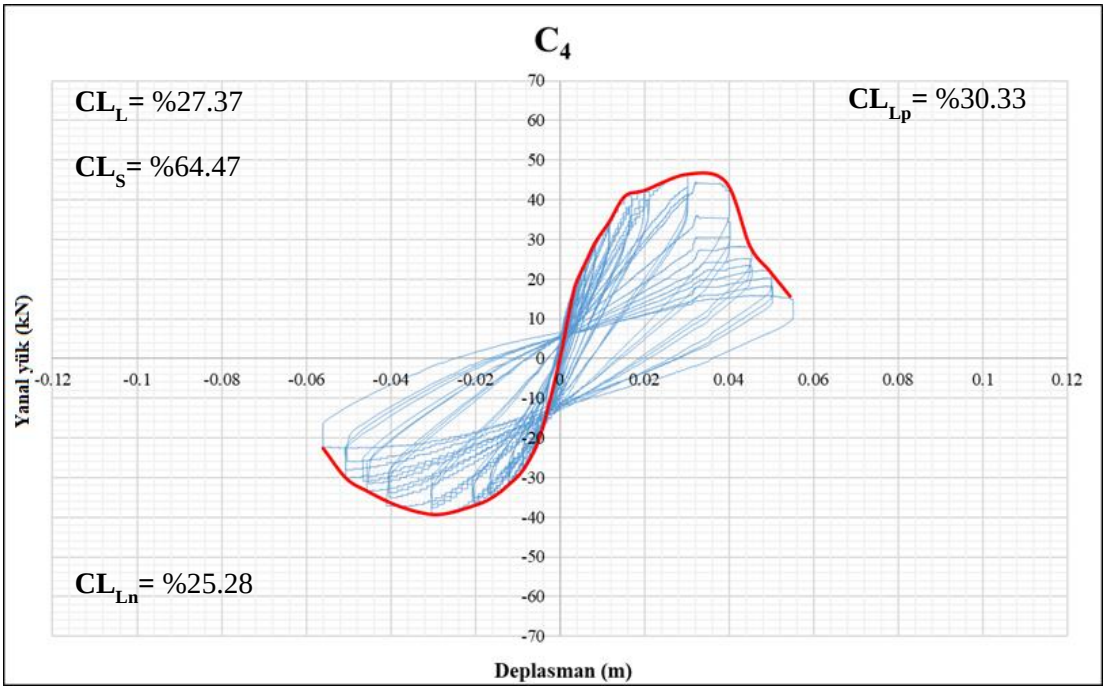
Şekil 5.20 C1 numunesi yük-deplasman ilişkisi



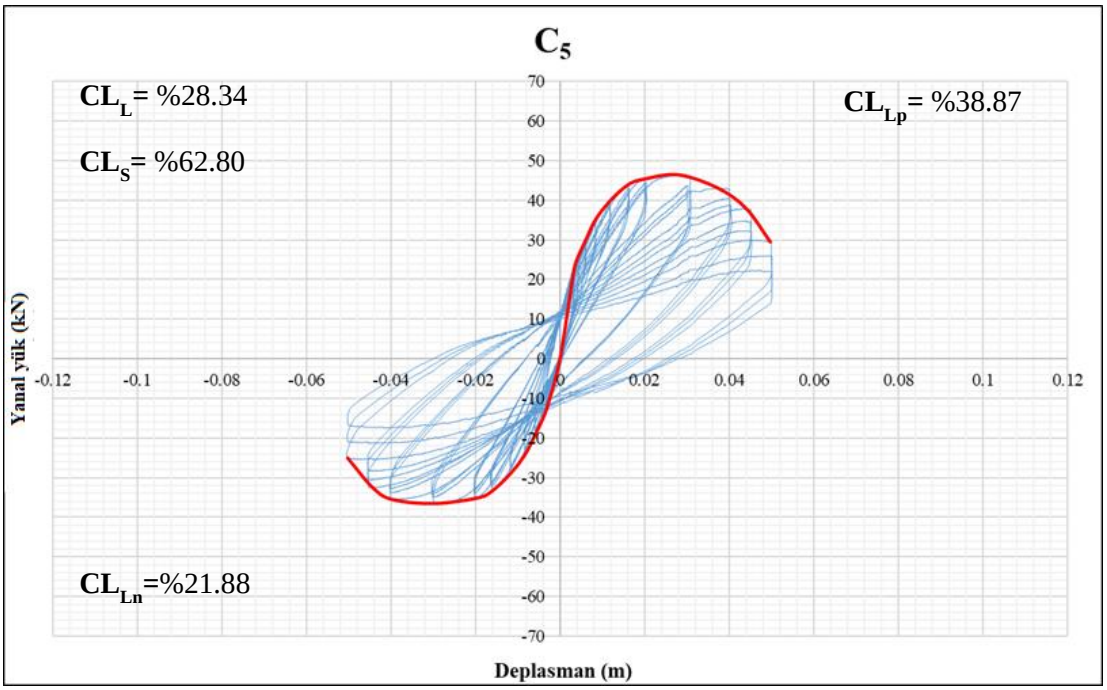
Şekil 5.21 C2 numunesi yük-deplasman ilişkisi



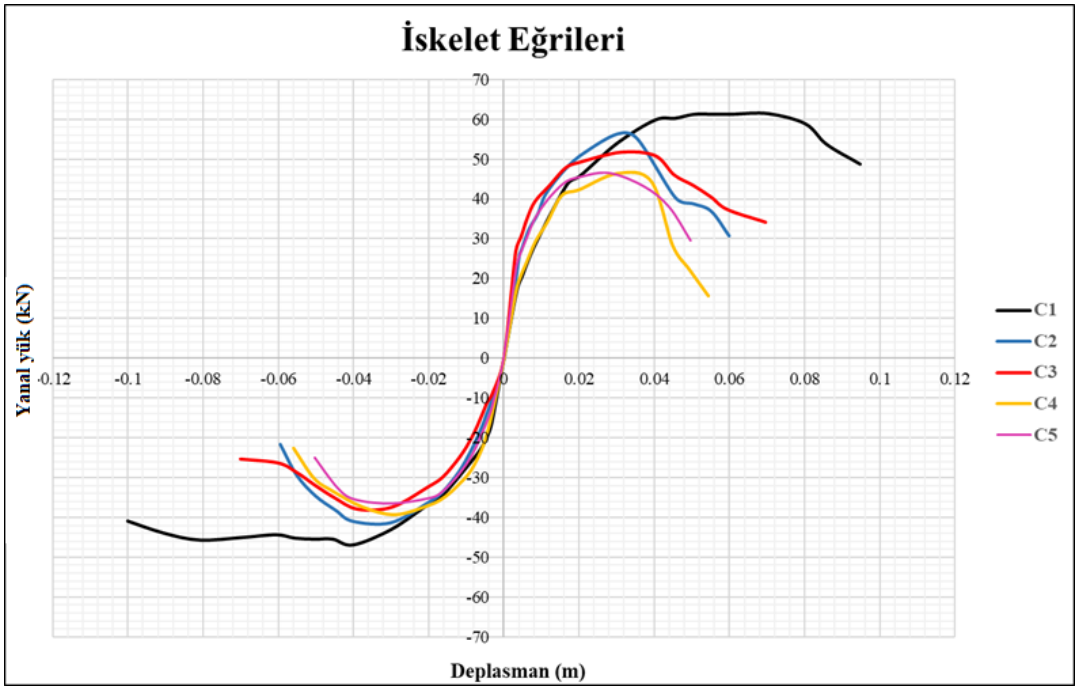
Şekil 5.22 C3 numunesi yük-deplasman ilişkisi



Şekil 5.23 C4 numunesi yük-deplasman ilişkisi



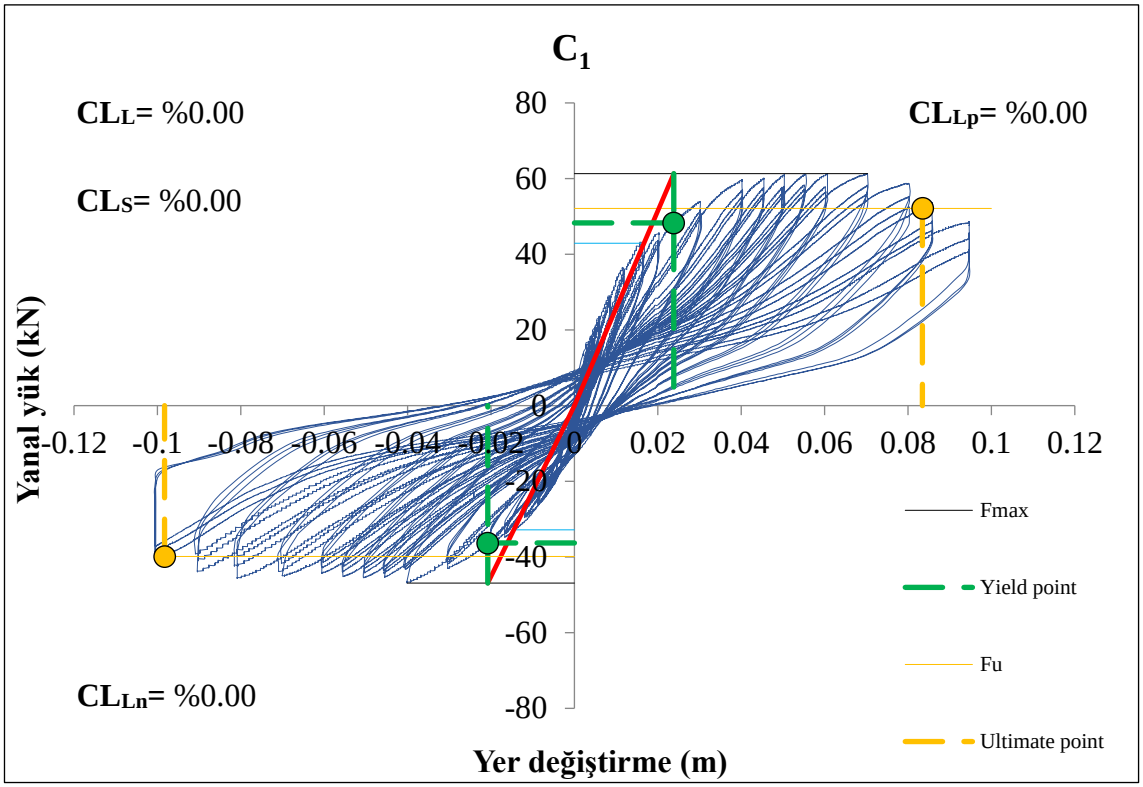
Şekil 5.24 C5 numunesi yük-deplasman ilişkisi



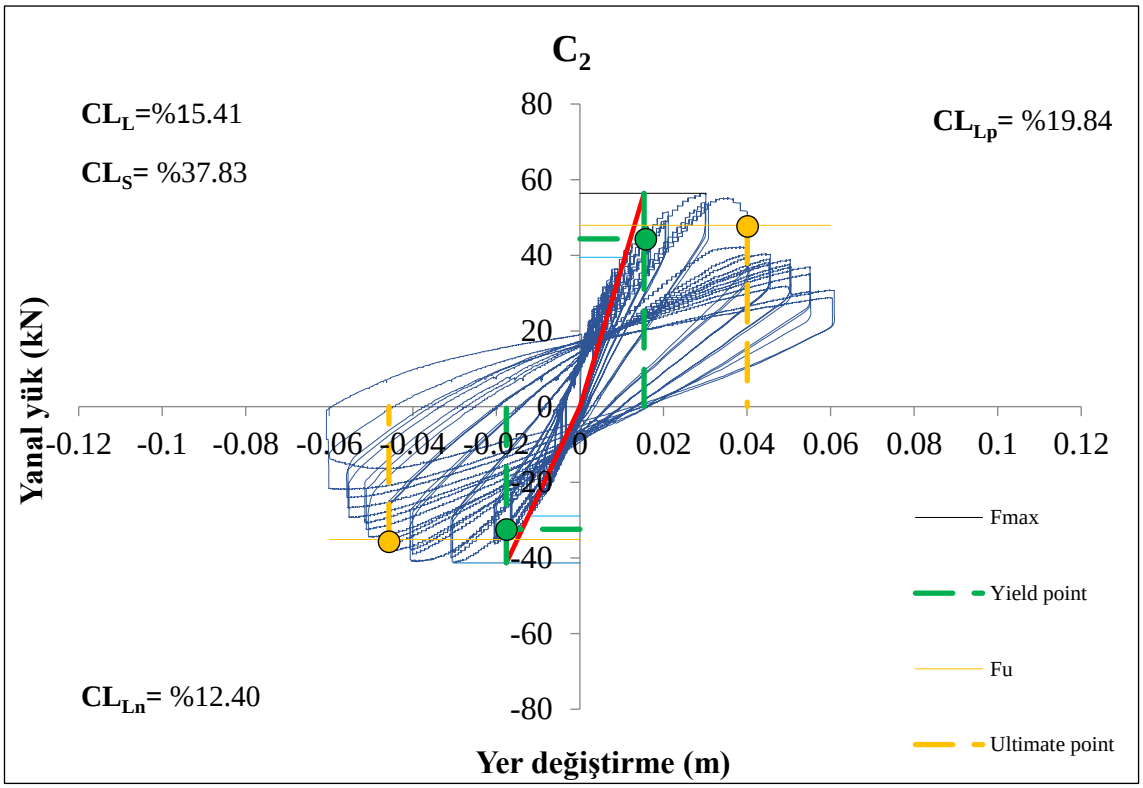
Şekil 5.25 Tüm numunelerin iskelet eğrileri

Tersinir tekrarlanır yükleme etkisi altında yapılan deney sonuçlarına ait yük deplasman grafikleri Sezen-Möhle (2004) tarafından önerilen yöntem ile idealize edilmiştir. Numunelere ait akma noktaları idealleştirme ile belirlenmiştir. İdealize edilmiş yük-yer değiştirme ilişkileri Şekil 5.26-Şekil 5.30'da gösterilmiştir. İdealleştirme adımları şu şekildedir;

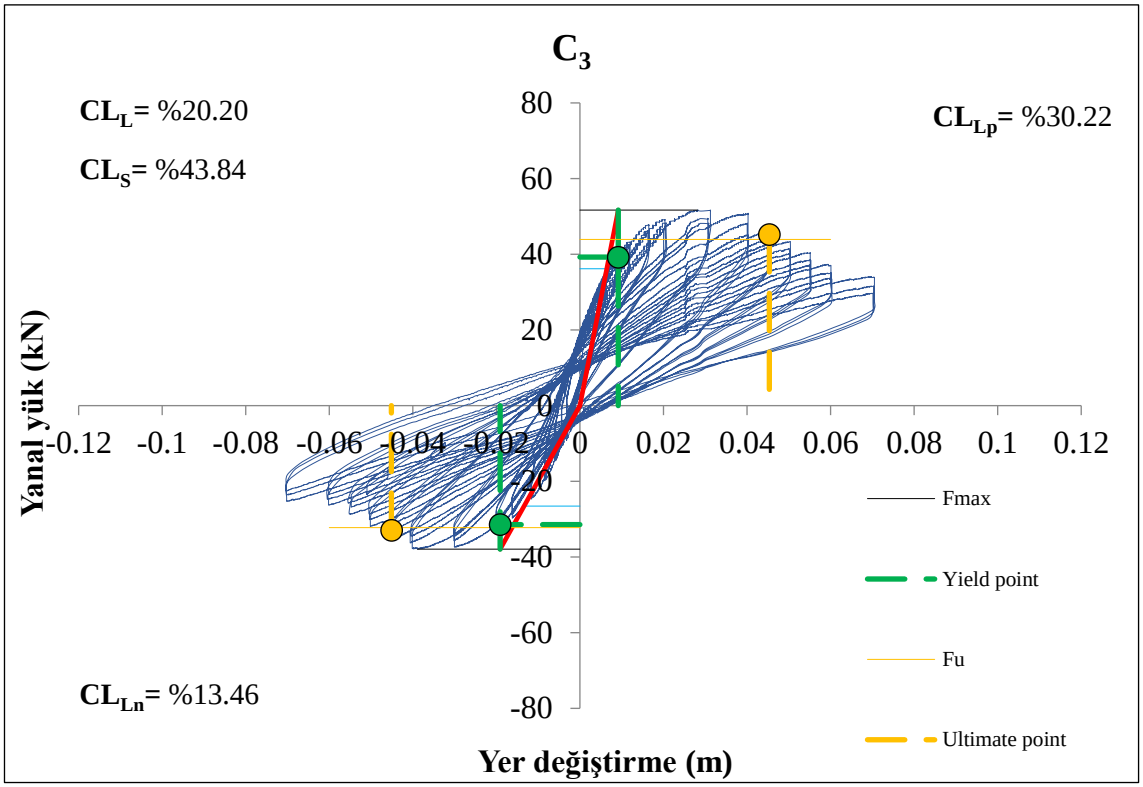
1. Maksimum yanal yük pozitif ve negatif yönler için ayrı ayrı bulunur.
2. Maksimum yükün %70 e düştüğü yük değerine ulaşan ilk nokta belirlenerek grafik üzerinde işaretlenir.
3. Belirlenen bu noktadan ve orijinden geçecek bir doğru çizilir. Doğrunun eğimi birincil rijitlik (k_1) değeridir.
4. Çizilen bu doğru aynı eğim ile maksimum yük sınırına kadar çizilir.
5. Doğrunun maksimum yük sınırı ile kesiştiği noktadan x eksenine dik bir doğru çizilir.
6. X ekseninde bulunan bu değer Akma deplasmanı (Δ_y) olarak belirlenir.
7. Akma deplasmanına karşılık gelen ilk yük değeri akma kuvvetti (F_y) olacaktır.
8. Maksimum yükün %85 e düştüğü son çevrimsel yük değeri nihai kuvvet (F_u) olacaktır.



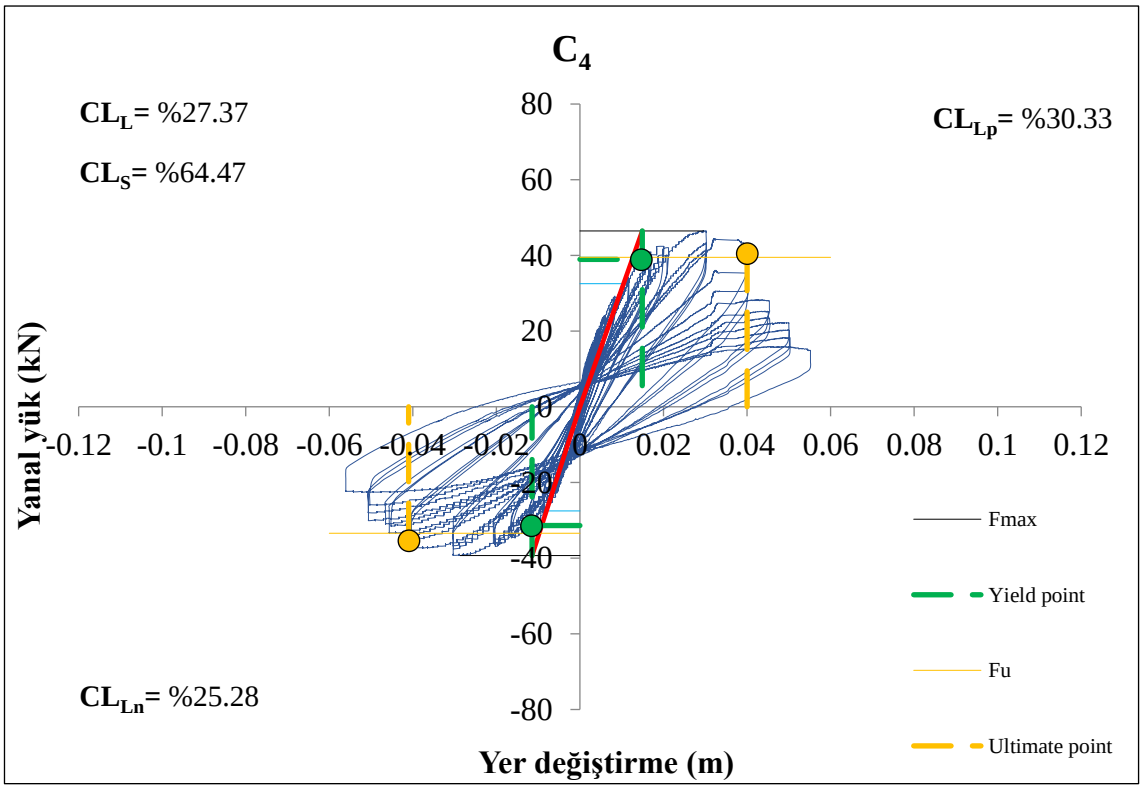
Şekil 5.26 C2 Kolonu yük-deplasman idealleştirilmesi



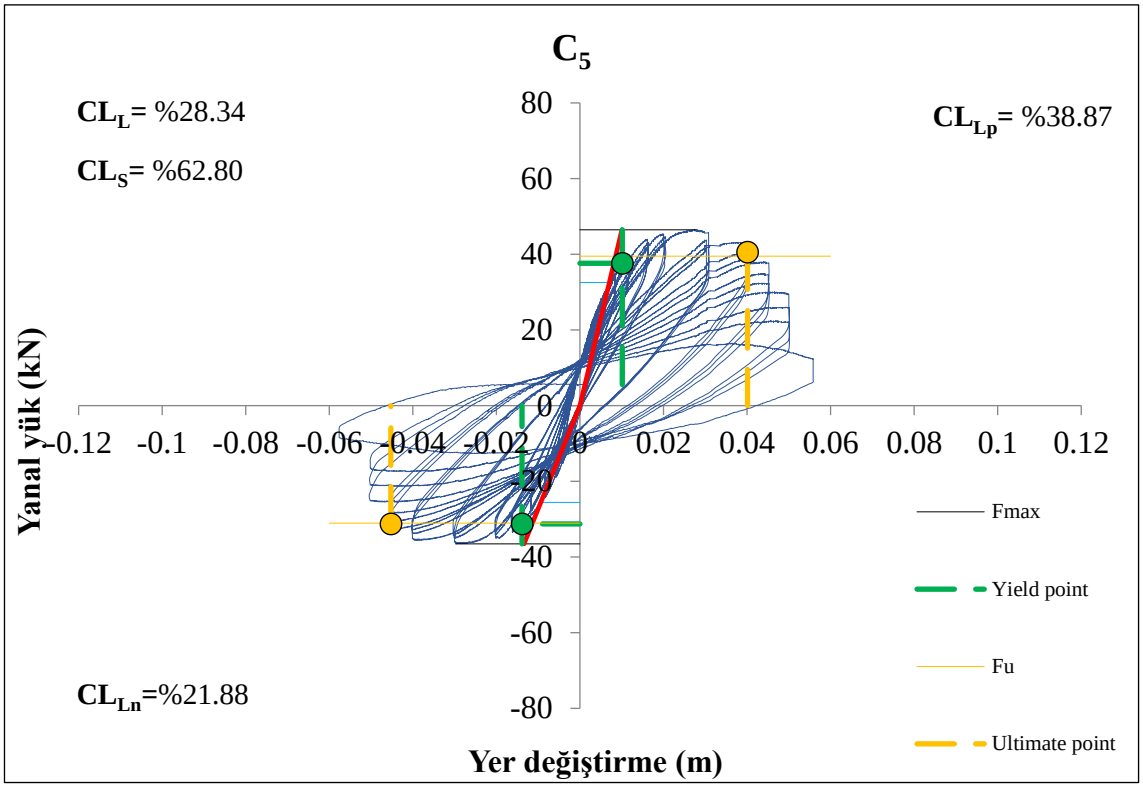
Şekil 5.27 C3 Kolonu yük-deplasman idealleştirilmesi



Şekil 5.28 C3 Kolonu yük-deplasman idealleştirilmesi



Şekil 5.29 C4 Kolonu yük-deplasman idealleştirilmesi



Şekil 5.30 C5 Kolonu yük-deplasman idealleştirilmesi

İdealleştirilmesi yapılan yük-yer değiştirme ilişkilerinin sonuçları tablolarda özetlenmiştir (Tablo 5.8, Tablo 5.9 ve Tablo 5.10). Korozyon oranının artmasıyla, pozitif ve negatif yükleme yönlerinde kolon numunelerinin taşıdığı maksimum yanal yük (F_{max}) belirgin bir şekilde azalmıştır. Aynı şekilde akma yükleri (Fy) ve maksimum yükün %85'ine karşılık gelen nihai yükler de (F_u) korozyon oranının artmasıyla azalmıştır.

Özetlenen deney sonuçları incelendiğinde C3 numunesinin korozyon seviyesine göre daha sünek davranış sergilediği görülmektedir. Bu durum, C3 numunesinin hızlandırılmış korozyon sürecinde temel bölgesinde korozyon sebebiyle ciddi hasarlar meydana gelmesi ile deney esnasında uygulanan eksenel yük düzeyinin düşmesiyle açıklanabilir.

Tablo 5.8 Pozitif yükleme için yük-deplasman ilişkisi idealleştirme sonuçları

Pozitif Yükleme								
Numune	**CL_L (%)**	**CL_s (%)**	**F_{max} (kN)**	**F_y (kN)**	**F_u (kN)**	**Δ_y (m)**	**Δ_u (m)**	**μ**
C_1	**0.000**	**0.000**	61.310	48.285	52.162	0.024	0.083	3.517
C_2	**15.410**	**37.830**	56.403	44.347	47.739	0.016	0.040	2.549
C_3	**20.200**	**43.840**	51.677	39.258	45.195	0.009	0.045	4.958
C_4	**27.370**	**64.470**	46.467	38.955	40.530	0.015	0.040	2.728
C_5	**28.340**	**62.800**	46.467	37.622	40.590	0.010	0.040	3.956

Tablo 5.9 Negatif yükleme için yük-deplasman ilişkisi idealleştirme sonuçları

Negatif Yükleme								
Numune	**CL_L (%)**	**CL_s (%)**	**F_{max} (kN)**	**F_y (kN)**	**F_u (kN)**	**Δ_y (m)**	**Δ_u (m)**	**μ**
C_1	**0.000**	**0.000**	46.891	36.289	39.864	0.021	0.098	4.725
C_2	**15.412**	**37.830**	41.318	32.412	35.138	0.018	0.042	2.383
C_3	**20.199**	**43.840**	37.925	31.442	32.957	0.019	0.045	2.358
C_4	**27.372**	**64.470**	39.318	31.382	35.320	0.012	0.041	3.527
C_5	**28.343**	**62.800**	36.531	31.261	31.261	0.014	0.045	3.264

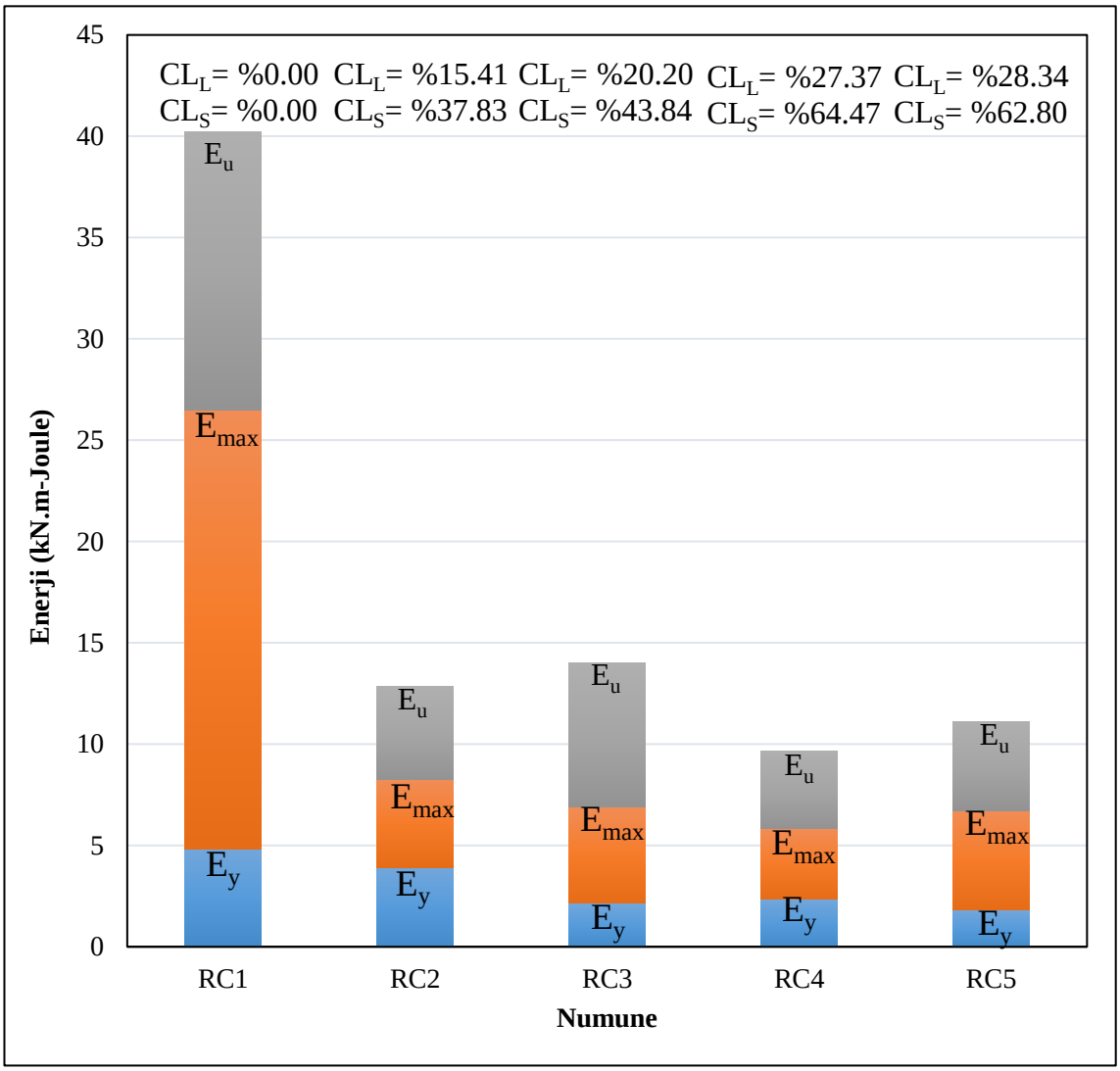
Tablo 5.10 Ortalama yük-deplasman ilişkisi idealleştirme sonuçları

İki Doğrultulu Göçme Kriteri								
Numune	**CL_L (%)**	**CL_s (%)**	**F_{max} (kN)**	**F_y (kN)**	**F_u (kN)**	**Δ_y (m)**	**Δ_u (m)**	**μ**
C_1	**0.000**	**0.000**	54.101	42.287	46.013	0.022	0.091	4.121
C_2	**15.412**	**37.830**	48.860	38.379	41.439	0.017	0.041	2.466
C_3	**20.199**	**43.840**	44.801	35.350	39.076	0.014	0.045	3.658
C_4	**27.372**	**64.470**	42.893	35.168	37.925	0.013	0.041	3.128
C_5	**28.343**	**62.800**	41.499	34.441	35.926	0.012	0.043	3.610

5.1.5. Enerji yutma kapasiteleri

Eğilme etkisi altındaki elemanların yük-deplasman grafiklerinin altında kalan alanlar enerji yutma kapasitesi veya tokluk olarak isimlendirilir. Deneysel çalışma kapsamında kolon numuneleri için akma yükü, maksimum yük ve nihai yük değerlerinde enerji yutma kapasiteleri hesaplanmıştır (Şekil 5.31). Passız olan referans numunesinin nihai yükte tüketmiş olduğu toplam enerji miktarı 40.217 (kN.m) olarak hesaplanmıştır. Korozyona

maruz bırakılan numunelerin nihai enerji yutma kapasiteleri korozyon oranının artması ile referans numuneye oranla sırasıyla %68, %65, %75 ve %72 olarak azalmıştır.

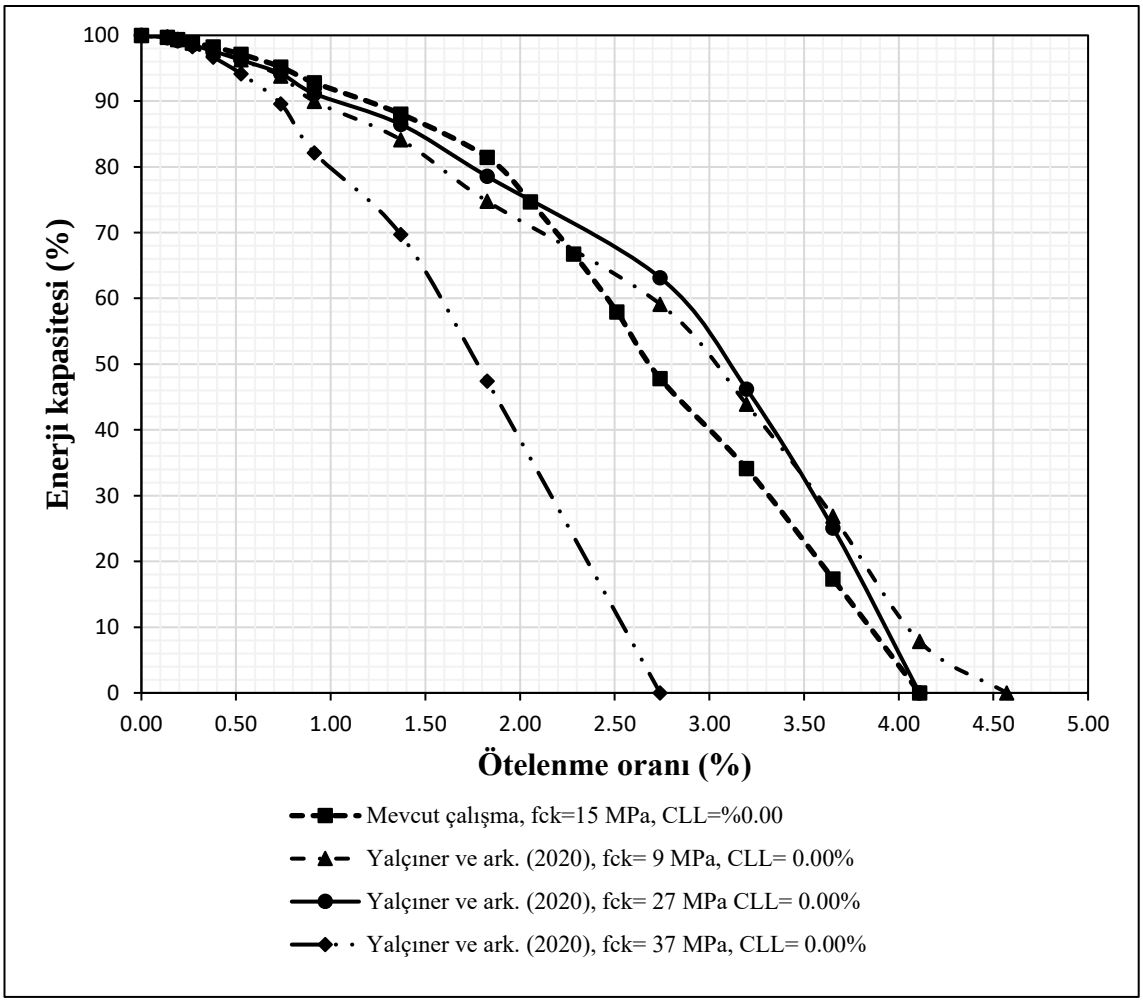


Şekil 5.31 Enerji yutma kapasiteleri

Korozyona maruz kalmış betonarme kolonların enerji bazlı performans analizlerinin yapılabilmesi için, yükleme programındaki her bir ötelenme oranına karşılık gelen enerji yutma kapasiteleri üç çevrimi de dahil edecek şekilde hesaplanmıştır. Çevrimsel yüklemede maksimum yükün %85'ine karşılık gelen nihai yük değeri için hesaplanan enerji değeri nihai enerji kapasitesi (E_u) olarak isimlendirilmiştir. Ötelenme adımlarına göre kümülatif olarak hesaplanan enerji değerleri nihai enerji miktarına oranlanarak ötelenme-enerji tüketim ilişkisi elde edilmiştir. Enerji bazlı yapılan bu değerlendirme

yönteminde tez kapsamında gerçekleştirilen deneylerin haricinde Yalciner ve vd. tarafından 2020 yılında gerçekleştirilen, malzeme ve kesit özellikleri aynı olan deneysel çalışmanın verileri de kullanılmıştır.

Korozyonsuz referans numunelerinin ötelenme-enerji tüketim ilişkileri Şekil 5.32'de gösterilmiştir.



Şekil 5.32 Passız kolonların enerji kapasitesi-ötelenme ilişkisi

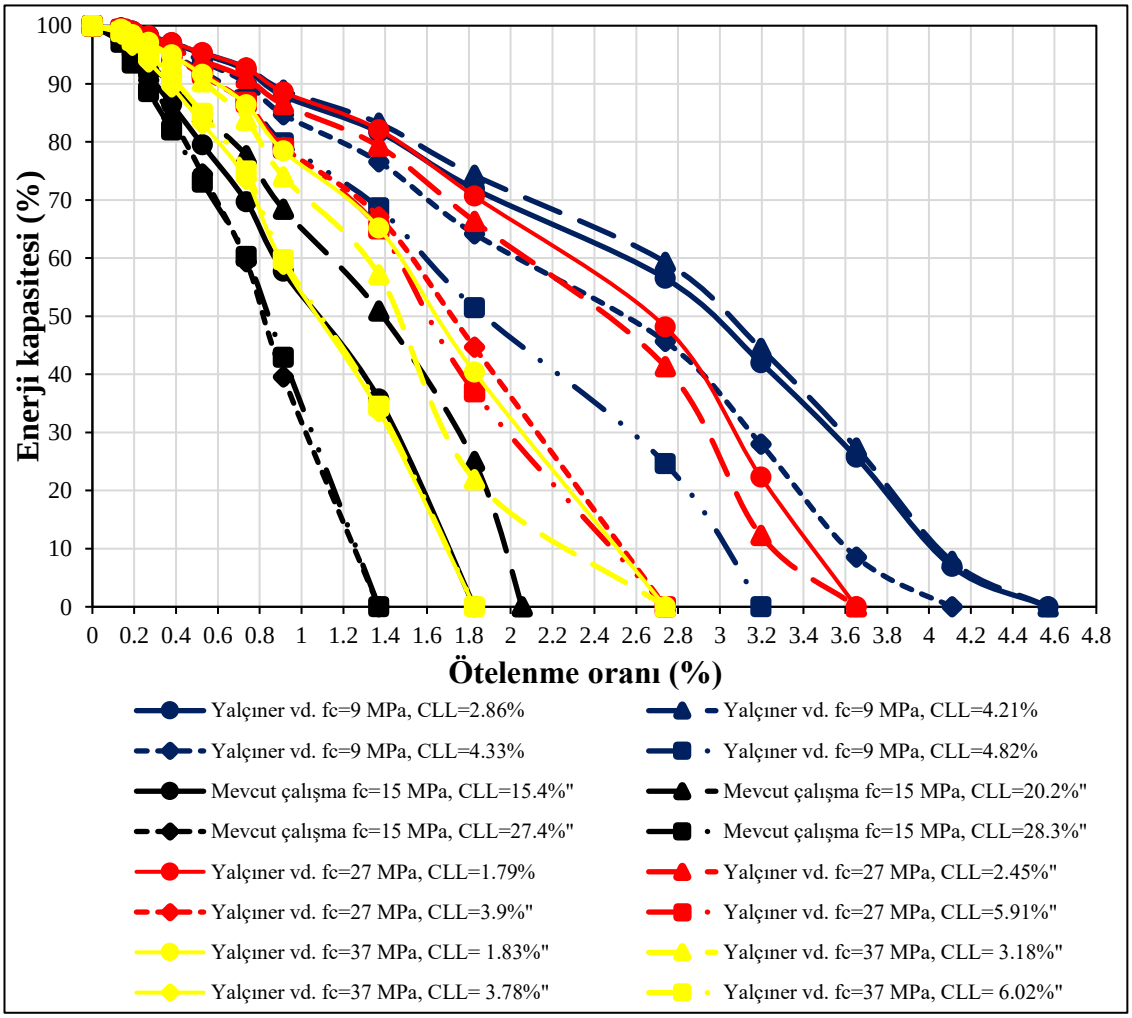
Tez çalışması kapsamında tersinir tekrarlanır yükleme etkisi altında deneyi yapılan referans numunesinin (C_1) nihai enerji tüketimine karşılık gelen ötelenme oranı %4.11 dir. Mevcut çalışmadaki referans kolonun enerji-ötelenme ilişkisi Yalciner ve vd. (2020) tarafından 9 MPa ve 27 MPa dayanımımdaki passız betonarme kolonlar için yapılan deneysel çalışmanın sonuçları ile benzerdir. %2-%2,5 arasında başlayan farklılık, mevcut çalışmada yükleme programının değiştirilmesi ile açıklanabilir. 37 MPa basınç

dayanımına sahip betonarme referans kolonunun nihai enerji tüketimine karşılık gelen ötelenme değeri %2,73 olarak hesaplanmıştır. Bunun sebebi, yüksek basınç dayanımında betonarme kolonun diğer numunelere göre daha gevrek davranış sergilemesi ile açıklanabilir.

Passız betonarme kolonların yüzde enerji kapasitelerine karşılık gelen ötelenme miktarının hesaplanabilmesi için iki farklı ampirik denklem geliştirilmiştir. Beton basınç dayanım sınıfının 9 MPa ile 27 MPa arasında olması durumunda Eşitlik 5.2, 27 MPa'dan büyük olması durumunda Eşitlik 5.3 kullanılacaktır.

$$9\ MPa \leq fc\ \leq 27\ MPa\ ;\ E_{passız}\ (\%) = 100 - 11 \times \delta^{1.5} \tag{5.2}$$

$$fc\ \geq 27\ MPa;\ E_{passız}\ (\%) = 100 - 22 \times \delta^{1.5} \tag{5.3}$$



Şekil 5.33 Paslanmış kolonların enerji kapasitesi-ötelenme ilişkisi

Mevcut çalışma kapsamında yüksek oranda paslandırılan kolon numuneleri ile Yalciner vd. (2020) tarafından 3 farklı beton sınıfı ve farklı korozyon oranları için deneyleri gerçekleştirilen kolon numunelerinin enerji kapasitesi (%)-ötelenme ilişkileri Şekil 5.33'te bir arada verilmiştir. Mevcut çalışmadaki betonarme kolonların beton sınıfı 15 MPa olmasına rağmen, korozyon oranının diğer numunelerden oldukça yüksek olması sebebiyle nihai enerjilerini çok daha erken ötelenme oranlarında tüketmişlerdir. Betonarme kolonların nihai yer değiştirme kapasitelerinde beton basınç dayanımına göre korozyon etkisinin daha efektif olduğu açık bir şekilde anlaşılmaktadır.

Paslanmış betonarme kolonların yüzde enerji kapasitelerine karşılık gelen ötelenme miktarının hesaplanabilmesi için korozyon oranına bağlı iki farklı ampirik denklem geliştirilmiştir. Beton basınç dayanım sınıfının 9 MPa ile 27 MPa arasında olması durumunda Eşitlik 5.4, 27 MPa'dan büyük olması durumunda Eşitlik 5.5 kullanılacaktır.

$$9\ MPa \leq fc\ \leq 27\ MPa; E_{paslı}\ (\%) = 110 - 26 \times \delta - CL_L \tag{5.4}$$

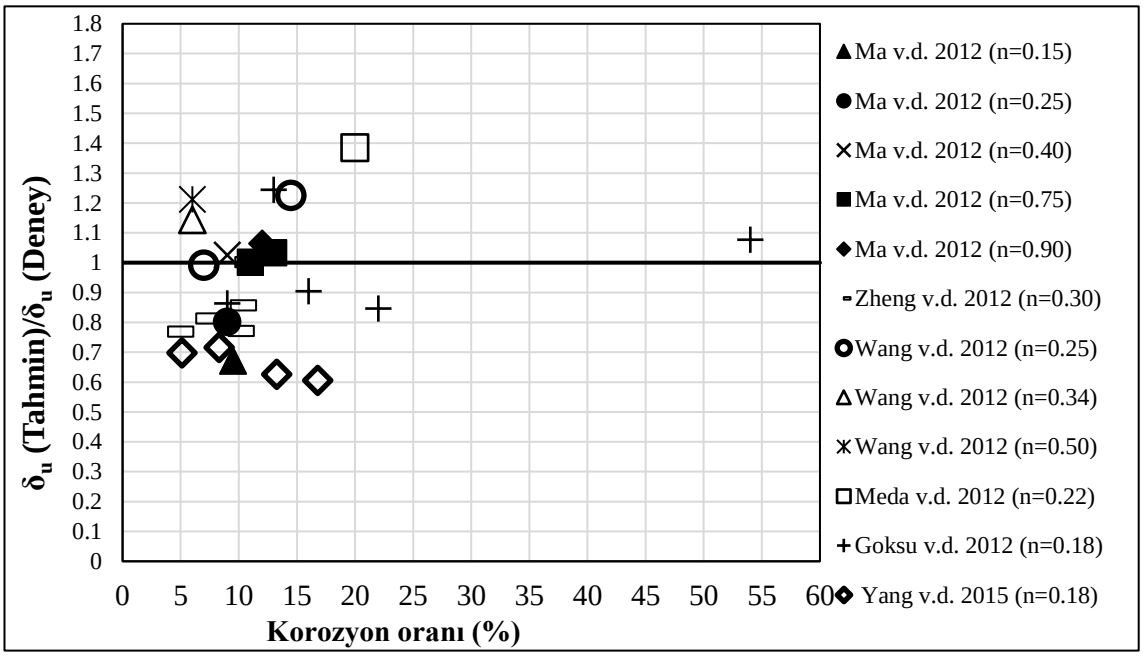
$$fc\ \geq 27\ MPa;\ E_{paslı}\ (\%) = 117 - 43 \times \delta - 3 \times CL_L \tag{5.5}$$

Geliştirilen ampirik modeller kullanılarak paslı ve passız kolonların hedeflenen performans seviyesine ait % enerji miktarı hesaplanacaktır. Hesaplanan enerjiler ve hedeflenen performans seviyesi kullanılarak Eşitlik 5.6 yardımıyla korozyona maruz betonarme kolonun ötelenme oranına göre yeni performans seviyesi belirlenebilecektir. Deneysel modellerde kullanılan korozyon oranı (CL_L) boyuna donatılardaki ortalama korozyon oranıdır.

$$\delta_{yeni=\delta_{hedef}\times\frac{E_0\ (hedef\ performans\ seviyesinde\ \%enerji)}{E_c\ (hedef\ performans\ seviyesinde\ \%enerji)}} \tag{5.6}$$

Ayrıca, geliştirilen deneysel modeller sayesinde betonarme kolonların nihai enerji tüketimine karşılık gelen çatı katı ötelenme oranları da hesaplanabilmektedir. Nihai enerji tüketimine karşılık gelen çatı katı ötelenmeleri, geliştirilen enerji denklemlerinde Enerji değişkenine 0 girilerek hesaplanacaktır. Literatürde paslanmış betonarme kolon deneyleri üzerinde gerçekleştirilen diğer deneysel çalışmalara ait veriler kullanılarak geliştirilen modellerin doğrulaması yapılmıştır. Farklı korozyon oranları ve eksenel yük

düzeyleri için gerçekleştirilen deneysel çalışmalara ait nihai çatı katı ötelenmeleri geliştirilen modeller ile tahmin edilmiştir (Şekil 5.34).



Şekil 5.34 Geliştirilen modellerin doğrulanması

Literatürde 10 farklı eksenel yük oranında gerçekleştirilen paslanmış betonarme kolon deneylerine ait nihai çatı katı ötelenmeleri geliştirilen denklem yardımıyla tahmin edildiğinde, δ_u (Tahmin)/δ_u (Deneysel) oranı 0.6-1.4 aralığında değişim göstermiştir. Şekil 5.34'te görüleceği üzere düşük eksenel yük oranlarında gerçekleştirilen deneysel çalışmalara (Yang vd. n=0.18, ve Ma vd. n=0.15) ait verilerde önerilen modellerin tahmin gücü azalmaktadır. Bu durum, yanal yükleme etkisi altında betonarme kolonların sünekliğinin eksenel yük oranı ile ilişkili olması ile açıklanabilir. Tez çalışması kapsamında numunelerin tamamı 0.40 eksenel yük oranı altında deneye tabii tutulmuş ve geliştirilen modellerde 0.40 eksenel yük oranı için veriler dikkate alınmıştır. Gelecek çalışmalarda, enerji bazlı denklemlerin farklı eksenel yük oranları için de geliştirilmesi önem arz etmektedir.

5.1.6. Plastik mafsal boyları

Betonarme elemanlar akma yüküne karşılık gelen moment kapasitelerine ulaştıktan sonra yüklemeye devam edildiğinde sabit moment altında dönmeye ve şekil değiştirmeye başlayarak enerji tüketimine bu şekilde devam eder. Bu sebeple eğilme hâkim davranış

gösteren elemanların maksimum moment bölgelerinde ciddi hasarlar oluşmaktadır. Deprem esnasında sabit moment altında plastik şekil değiştirmeler ile hasar alan bu kritik bölgelere plastik mafsal adı verilmektedir. Tez çalışması kapsamında tersinir yükleme deneyleri yapılan betonarme kolonlarda oluşan plastik mafsal boyları detaylı bir şekilde ölçülmüştür. Betonarme kolonların her bir yüzeyinde (ön yüzey, arka yüzey, sağ yüzey, sol yüzey) üç adet ölçüm yapılmıştır. Tüm ölçümlerin ortalamasından, temelde sağlam kalan bölge (S.R. Stub Region) uzunluğu çıkarılarak numunelere ait plastik mafsal boyları (L_P) deneysel olarak elde edilmiştir (Tablo 5.11).

Deney sonuçları ve yapılan ölçümlere göre korozyon oranının artması ile plastik mafsal boyu artmaktadır. Bu durum, korozyon nedeniyle oluşan birincil çatlakların yükleme etkisi ile genişleyerek ciddi kesit kayıpları ve ağır hasarlara yol açması ile açıklanabilir. Deney numunelerinin deney sonra plastik mafsal bölgelerinin fotoğrafları Ek-2'de verilmiştir. Referans numunesinin (C_1) deneysel olarak ölçülen plastik mafsal boyu 14.20 cm'dir. Korozyon etkisi göz ardı edildiğinde, Park ve Paulay (1975) tarafından önerilen ve teorik olarak itme analizlerinde kullanılan plastik mafsal boyu denklemine göre hesaplanan plastik mafsal uzunluğu 15 cm'dir.

Donatı korozyonuna maruz betonarme kolon elemanlarının plastik mafsal uzunluklarını tahmin edebilmek için boyuna donatıların ortalama korozyon oranları ve sargı donatılarının ortalama korozyon oranlarına bağlı olarak iki adet ampirik model geliştirilmiştir (Eşitlik 5.7 ve Eşitlik 5.8).

$$L_{P_{corroded}} = 0.5 \times h + 4 \times \sqrt{CL_S} \tag{5.7}$$

$$L_{P_{corroded}} = 0.5 \times h + 6.15 \times \sqrt{CL_L} \tag{5.8}$$

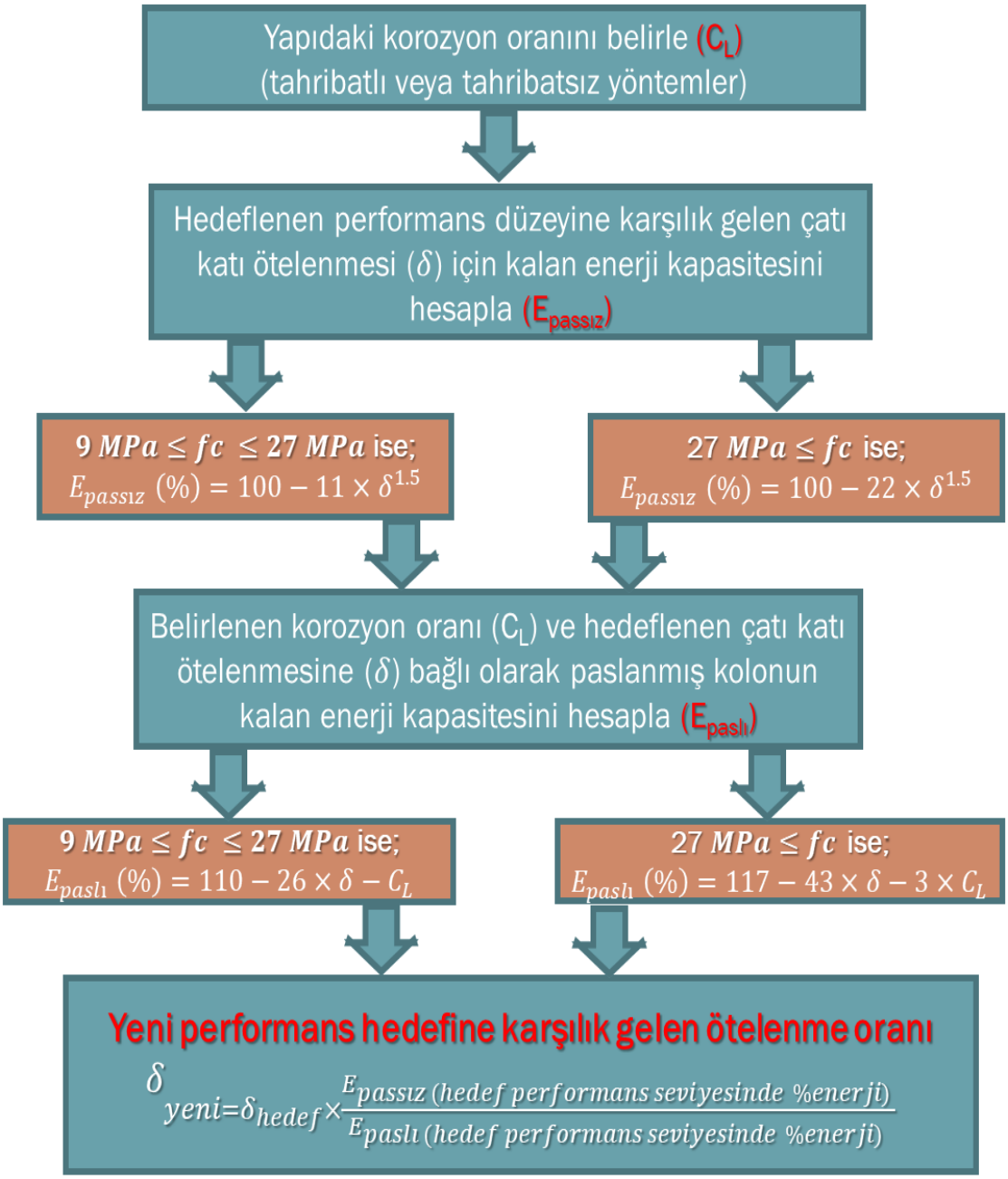
Tablo 5.11 Plastik mafsal boyu ölçümleri (cm)

Numune	Ön Yüzey			Arka Yüzey			Sağ Yüzey			Sol Yüzey			Ort. (cm)
	Sağ (cm)	Orta (cm)	Sol (cm)	Sağ (cm)	Orta (cm)	Sol (cm)	Sağ (cm)	Orta (cm)	Sol (cm)	Sağ (cm)	Orta (cm)	Sol (cm)	
	24	0	20	15	0	15.5	28.5	0	25	16.5	0	26	
C1		**S.R (cm)**			**S.R (cm)**			**S.R (cm)**			**S.R (cm)**		14.208
		0			0			0			0		
	58	38	52	59	56	56.5	55	57	58	49	54	56	
C2		**S.R (cm)**			**S.R (cm)**			**S.R (cm)**			**S.R (cm)**		43.667
		5			13			5.5			18		
	62	39	63	68.5	65	66.5	69	51	61.5	64	59	69	
C3		**S.R (cm)**			**S.R (cm)**			**S.R (cm)**			**S.R (cm)**		20.333
		5			13			17			10		
	35	18	36	19	16	14	17	0	28	31	0	30	
C4		**S.R (cm)**			**S.R (cm)**			**S.R (cm)**			**S.R (cm)**		50.208
		0			0			0			0		
	48	31	43	52	55	57.5	57	47	48.5	44	43	54	
C5		**S.R (cm)**			**S.R (cm)**			**S.R (cm)**			**S.R (cm)**		43.833
		3			5			4			6		

5.1.7. Geliştirilen modeller için yol haritası ve örnek analiz

Deneysel çalışma sonucunda elde edilen deneysel modellerin sırasına uygun bir şekilde kullanılması için bir yol haritası belirlenmiştir. Paslanmış betonarme kolonların korozyon oranına göre yeni performans hedefi Şekil 5.35'te verilen yol haritası takip edilerek belirlenebilecektir. Deneysel modellerin ve yol haritasının kullanımı için örnek bir uygulama analizi yapılmıştır.

Örnek uygulama analizi için 15 MPa basınç dayanımına sahip, maksimum kat ötelenme oranı %0.5 olarak tasarlanan ve sonradan boyuna donatılarında ortalama %15 oranında korozyonun meydana geldiği varsayılan bir yapı sistemi düşünülecektir. Vision 2000 yönetmeliğine göre hedeflenen performans seviyesi "operational" (hemen kullanım) olan bir yapı sisteminin çatı katı ötelenmesi %0.5 oranından düşük olmalıdır. Eşitlik 5.2 kullanılarak %0.5 çatı katı ötelenmesi oranı için passız betonarme kolonda hesaplanacak kalan enerji miktarı %96 olacaktır. Eşitlik 5.4 kullanılarak %15 ortalama korozyon oranına ve %0.5 çatı katı ötelenmesi oranına karşılık gelen kalan enerji miktarı %82 olarak hesaplanacaktır. Yapı sisteminin korozyon etkisine bağlı yeni performans çatı katı ötelenmesi Eşitlik 5.6 yardımıyla %0.59 olarak hesaplanacaktır. Hesaplanan yeni çatı katı ötelenmesi oranına göre yapı sisteminin performans düzeyi Vision 2000 yönetmeliğine göre "life safety" (can güvenliği) olarak belirlenecektir.



Şekil 5.35 Geliştirilen modeller için yol haritası

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında yüksek seviyelerde donatı korozyonunun, betonarme kolonların yapısal davranışları üzerine etkisini incelemek üzere 5 adet tam ölçekli betonarme kolonu imal edilmiştir. Bir adet betonarme kolon referans tutularak korozyona maruz bırakılmamış olup, diğer numunelere tam ölçekli paslandırma havuzunda farklı seviyelerde hızlandırılmış korozyon süreci uygulanmıştır. Paslandırma sürecinin ardından numuneler üzerinde korozyon sebebiyle meydana gelen çatlak genişlikleri mikroskopla ölçülerek haritalandırma yapılmıştır. Tam ölçekli betonarme kolon numuneleri sabit eksenel yük altında, artırımsal tersinir tekrarlanır yanal yük uygulanarak teste tabi tutulmuştur. Yükleme deneylerinden sonra numunelerdeki boyuna donatılar ve sargı donatıları kırılarak çıkarılmış ve mekanik olarak beton artıklarından temizlenmiştir. Donatıların son kütleleri hassas terazi ile kayıt altına alınarak numunelerin gerçek korozyon oranları hesaplanmıştır. Elde edilen tüm deneysel verilerin ışığında sismik performans parametreleri detaylı bir şekilde incelenmiş olup, elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Hızlandırılmış korozyon yöntemine maruz bırakılan betonarme kolonların sargı donatılarında, aynı numune içerisindeki boyuna donatılara göre yaklaşık iki kat daha fazla kesit kaybı meydana gelmiştir. Aynı numune içerisindeki tüm donatılardan elektriksel akım geçtiği göz önüne alındığında paslanma sürecinde donatı çapının etkili olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Boyuna donatılar ve sargı donatılarının korozyon oranları arasında ilişki bulunmaktadır. Bu sebeple geliştirilecek olan deneysel modellerde maksimum korozyon oranı yerine boyuna donatılardaki ortalama korozyon oranının dikkate alınması gerekmektedir.
2. Betonarme kolon numunelerinin çekme yüzünde bulunan L_1 ve L_7 donatıları hizasında okunan çatlaklar ve aynı seviyelerde kesilen donatılarla hesaplanan bölgesel kesit kayıpları incelenmiştir. Çatlak genişliğinin bir seviyeye kadar korozyon oranıyla orantılı olduğu, yüksek korozyon seviyelerinde çatlağın daha fazla genişlemediği sonucuna varılmıştır. Yüksek korozyon seviyelerinde tahribatsız yöntem olan çatlak değerlendirmesinin yanıltıcı olabileceği göz önüne alınmalıdır.
3. Deplasman bazı hesaplanan süneklik değerleri incelendiğinde, referans numunesinin (C_1), diğer numunelere göre daha sünek olduğu görülmektedir. Paslı numunelerin

kendi arasında deplasman bazlı süneklik değerlendirmesinin iki doğrultulu göçme kriteri (pozitif ve negatif yükleme) göz önüne alınarak yapılmasının daha doğru olacağı tespit edilmiştir. Ancak, sünekliğin enerji yutma kapasitesiyle doğrudan ilişkili olduğu düşünüldüğünde her biri gevrek olan paslı elemanların süneklik değerlendirmelerinin geliştirilen deneysel modeller yardımıyla enerji bazlı yapılması tavsiye edilmektedir.

4. Yük-deplasman ilişkisinde her bir çevrim altında kalan alan hesaplanarak nihai yük düzeyine kadar olan enerji yutma kapasiteleri elde edilmiştir. C_1 referans kolonunun nihai yüke kadar tüketmiş olduğu enerjisi, bir başka deyişle enerji kapasitesi 40.215 (kN.m) olarak hesaplanmıştır. Paslı olan numuneler C_2, C_3, C_4 ve C_5 in enerji kapasiteleri sırasıyla %68, %65, %75 ve %72 oranlarında azalmıştır. Donatı korozyonunun betonarme kolonlarda enerji yutma kapasitesini düşürerek, sismik performansı olumsuz yönde etkilediği açık bir şekilde görülmektedir.
5. Yığılı plastik davranış modeline göre statik itme analizlerinde kolonların tepe deplasman değerlerini elde etmek için plastik mafsal boyu kullanılmaktadır. Yönetmeliklere göre normal kolonlarda 0.5h-1.0h arası kabul edilen plastik mafsal boyu için korozyon etkisi göz önüne alınmamaktadır. Deney sonrası yapılan ölçümler neticesinde donatı korozyonunun betonarme kolonlarda plastik mafsal boyunu ciddi düzeyde artırdığı gözlemlenmiştir.
6. Yüksek korozyon seviyelerinde meydana gelen kesit kayıpları sargı donatılarında kopmalara sebebiyet vermiştir. Meydana gelen sargı donatısı kayıpları kolonda sargılama etkisini önemli ölçüde azaltarak eksenel yük altında boyuna donatıların burkulmasına neden olmuştur. Burkulmalar daha çok kolonların plastik mafsal bölgesinde yoğunlaşmıştır. Tasarım aşamasında, donatı korozyonu oluşması muhtemel yapıların kolonlarında çiroz donatısı kullanılması gibi burkulma boyunu azaltacak ilave tedbirlerin alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

ACI Committee 318. (2005) "Building code requirements for reinforced concrete and commentary", ***American Concrete Institute Farmington Hills,*** MI:429.

ASTM (American Standards for Testing and Materials). (2005) "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", ***C39M–05, West Conshohocken,*** PA.

ASTM (American Standards for Testing and Materials). (2008) "Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products", ***A370–08a, West Conshohocken,*** PA.

Baradan, B., ve Aydın, S. (2013). Betonun Durabilitesi (Dayanıklılık, Kalıcılık). ***Beton 2013 Hazır Beton Kongresi,*** 265-288.

Baker, J. F. (1956). *The steel skeleton*. ***CUP Archive***.

Bae, S., (2005) Seismic performance of full-scale reinforced concrete columns, PhD Thesis, ***The University of Texas***, USA.

Bae, SW. and Belarbi, A. (2009) "Effects of corrosion of steel reinforcement on RC columns wrapped with FRP sheets", ***Journal of Performance of Constructed Facilities,*** 23(1), 20–31.

Baker, A.L.L., (1956) Ultimate Load Theory Applied To The Design of Reinforced and Prestressed Concrete Frames. ***Concrete Publications Ltd***., London.

Baker, A.L.L., Amarakone, A.M.N., (1964) Inelastic hyperstatic frame analysis, Proceedings ***International Symposium on the Flexural Mechanics of Reinforced Concrete,*** Miami, pp. 85-142.

Bayrak, O., Sheikh, S.A., (1998) Confinement reinforcement design considerations for ductile hsc columns. ***Journal of Structural Engineering***. Vol. 124, no. 9, 999-1010.

Broomfield, J. P. (2007). Corrosion of Steel in Concrete (İkinci Baskı). London and Newyork: Taylor and Francis Group, 7-9.

Celep, Z., (2007) Betonarme sistemlerde doğrusal olmayan davranış: plastik mafsal kabulü ve çözümleme, ***Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, 16-20 Ekim. Celep, Z., 2008: Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış ve Çözümleme,*** Beta Dağıtım, İstanbul.

Celep, Z., Gençoğlu, M., (2008) Deprem yönetmeliği (2007) doğrusal olmayan çözümleme yöntemlerine basit örnekler, ***Prof. Yusuf Berdan, Prof. İsmet Aka, Prof. Mehmet Rahmi Bilge ve Prof.Dr. Halit Demir Betonarme Yapılar Semineri***, İstanbul.

Celep, Z., Kumbasar. N., (2004) Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, ***Beta Dağıtım***, İstanbul.

Celep, Z., Kumbasar. N., 2005: Betonarme Yapılar, ***Beta Dağıtım***, İstanbul.

Coronelli., D. (2002) "Corrosion cracking and bond strength modeling for corroded bars in reinforced concrete", ***American Concrete Institute Structural Journal,*** 99 (3), 267–276.

Corley, W.G. (1966), "*Rotational capacity of reinforced concrete beams", Journal of the Structural Division,* **ASCE**, 92(5),121-146.

Çağatay, İ. H. (2005) "Experimental Evaluation of Buildings Damaged in Recent Earthquakes in Turkey", ***Engineering Failure Analysis,*** 12, 440-452.

Fardis MN and Biskinis DE (2003) "Deformation of RC members, as controlled by flexure or shear". ***Proceedings of the International Symposium Honoring Shunsuke Otani on Performance-Based Engineering for Earthquake Resistant Reinforced Concrete Structures***, The University of Tokyo, Tokyo, Japan. September 8-9.

FEMA (Federal Emergency Management Agency), (2007) "Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components", ***FEMA-461, Washington***, DC, 1-113

İnel, M., Özmen, H.B., Bilgin, H., (2008) Sargı etkisi modelleme analiz programı kullanım kılavuzu. Denizli.

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

Mattock, A. H. (1965). "*Rotational capacity of hinging regions in reinforced concrete beams*." ***Special Publication***, 12, 143-181.

Mattock, A.H., (1964) Rotational capacity of hinging regions in reinforced concrete beams, Proceedings ***International Symposium on the Flexural Mechanics of Reinforced Concrete,*** ACI SP-12, Miami, 143-181.

Mattock, A.H., (1967) Rotational capacity of hinging regions in reinforced concrete ceams. ***Journal of the Structural Division***. Vol. 93, no. ST2, pp. 519- 522.

Meda, A., Mostosi, S., Rinaldi, Z., and Riva, P. (2014) "Experimental evaluation of the corrosion influence on the cyclic behaviour of RC columns", ***Engineering Structures,*** 76, 112-23.

Nossoni, G. (2015) "Modeling the Corrosion Rate of Steel Reinforcement in FRP-Wrapped Concrete", ***Journal of Composites for Construction,*** 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000625. 04015068.

Park, R., Paulay, T., (1975) Reinforced Concrete Structure, ***John Wiley&Sons, Inc., New York***

Stanish, K., and Hooton, RD. (1999) "Pantazopoulou SJ. Corrosion effects on bond strength in reinforced concrete", ***American Concrete Institute Structural Journal,*** 96(6), 915–21.

Sheikh, S.A., Khoury, S.S., (1993) Confined concrete columns with stubs. ***American Concrete Institute Structural Journal***. Vol. 90, no. 4, pp. 414-431.

TS EN 206-1 (2002) "Beton-Bölüm 1: Özellik. Performans. İmalat ve Uygunluk", ***Türk Standartları Enstitüsü,*** Ankara.

TS500 (2000). "Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları'', ***Türk Standartları Enstitüsü,*** Ankara.

Wang, CY., Shih, CC., Hong, SC., and Hwang, WC. (2004) "Rehabilitation of cracked and corroded reinforced concrete beams with fiber-reinforced plastic patches", ***Journal of Composites for Construction,*** 8(3), 219–28.

X, Liu., and Y, Li. (2018) **"**Experimental study of seismic behavior of partially corrosion-damaged reinforced concrete columns strengthened with FRP composites with large deformability", ***Construction and Building Materials,*** 191, 1071–1081.

Yalciner, H., & Kumbasaroglu, A. (2020). Experimental Evaluation and Modeling of Corroded Reinforced Concrete Columns. ***ACI Structural Journal***, 117(4).

Yalciner, H., Kumbasaroglu, A., & Karimi, A. (2019). 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.

Yalciner, H., Eren, O., and Sensoy, S. (2012) "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.

Yang, SY., Song, XB., Jia, HX., Chen, X., and Liu, XL. (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.

EKLER

EK-1. Numunelerin Deney Sonrası Fotoğrafları

C_1

ÖN YÜZEY



ARKA YÜZEY



SAĞ YÜZEY



SOL YÜZEY



Şekil Ek-1.1 C1 numunesinin deney sonrası görüntüleri

C_2

ÖN YÜZEY



ARKA YÜZEY



SAĞ YÜZEY



SOL YÜZEY



Şekil Ek-1.2 C2 numunesinin deney sonrası görüntüleri

C_3

ÖN YÜZEY



ARKA YÜZEY



SAĞ YÜZEY



SOL YÜZEY



Şekil Ek-1.3 C3 numunesinin deney sonrası görüntüleri

C_4

ÖN YÜZEY



ARKA YÜZEY



SAĞ YÜZEY



SOL YÜZEY



Şekil Ek-1.4 C4 numunesinin deney sonrası görüntüleri

C_5

ÖN YÜZEY



ARKA YÜZEY



SAĞ YÜZEY



SOL YÜZEY



Şekil Ek-1.5 C5 numunesinin deney sonrası görüntüleri

EK-2. Tez Çalışması Sürecinde Yapılan Bilimsel Çalışmalar

Celik A., Yalciner H., Kumbasaroglu A., Turan A.I. (2020) "Cyclic Loading Test on Highly Corroded Reinforced Concrete Columns" CEB-FIB Capacity Assessment of Corroded Reinforced Concrete Structures Workshop, 1-4 Aralık 2020, İtalya

Celik A., Yalciner H., Kumbasaroglu A., Turan A.I. (2020) "Korozyona Maruz Kalmış Betonarme Kolonların Yapısal Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi" 4.Uluslararası Akdeniz Sempozyumu, 22-24 Ekim 2020, Mersin, Türkiye

ÖZGEÇMİŞ

Alper Çelik, 1994 yılında Erzincan'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Erzincan'da tamamladı. 2018 yılında Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Lisans eğitimi sürecinde bir adet TÜBİTAK-2209/A projesi yürütücülüğünü yaptı. 2018 yılında Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2019 yılında Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Yüksek lisans eğitiminde, bir adet TÜBİTAK 3501 projesinde bursiyer olarak, 3 adet Bilimsel Araştırma Projesinde (BAP) araştırmacı olarak yer aldı.