

**T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KOROZYONA MARUZ KALMIŞ TAM ÖLÇEKLİ BETONARME
KOLONLARDA ADERANS-KAYMA İLİŞKİSİNİN DENEYSEL
OLARAK İNCELENMESİ**

Mehmet Fırat MERMİT

Danışman: Doç. Dr. Hakan YALÇINER

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**ERZİNCAN
2019
Her Hakkı Saklıdır.**

Kabul ve Onay Sayfası

Doç. Dr. Hakan YALÇINER danışmanlığında, Mehmet Fırat MERMİT tarafından hazırlanan bu çalışma 07/11/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği/oy çokluğu (3/3) ile kabul edilmiştir.

Başkan :Doç. Dr. Oğuz Akın DÜZGÜN

İmza: 

Üye :Doç. Dr. Hakan YALÇINER

İmza: 

Üye :Dr. Öğr. Üyesi Atila KUMBASAROĞLU

İmza: 

Yukarıdaki sonuç Enstitü Yönetim Kurulunun 10./12/2019 tarih ve 50/.../8..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Prof. Dr. Mustafa Fatih ERTUGAY
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etiğe Uygunluk Sayfası

“Korozyona Maruz Kalmış Tam Ölçekli Betonarme Kolonlarda Aderans-Kayma İlişkisinin Deneysel Olarak 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. 07/11/2019



**Mehmet Fırat
MERMİT**

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KOROZYONA MARUZ KALMIŞ TAM ÖLÇEKLİ BETONARME KOLONLARDA ADERANS-KAYMA İLİŞKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Mehmet Fırat MERMİT

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hakan YALÇINER

Betonarme yapılarda oluşan korozyon, yapı sektöründe neden olduğu birçok problemten dolayı büyük bir öneme sahiptir. Korozyon sonucu mevcut yapı elemanlarında oluşan olumsuz sonuçlar betonunun çatlaması, pas payının dökülmesi, donatı kesit alanının azalması ve beton ile donatı arasındaki aderans kaybı gibi birçok olumsuzluğa sebebiyet vermektedir. Son yıllarda betonarme binaların sismik performanslarının değerlendirilmesi için birçok farklı model geliştirilmiştir. Bu modeller ile yapılan değerlendirmelerde, korozyonun yapı elemanlarına etkisi yalnızca donatı alanındaki azalmaya bağlı olarak değerlendirilmektedir. Korozyondan dolayı beton ile donatı arasındaki aderans kaybı göz önüne alınmamakta ve yapılan değerlendirmelerde donatı kayması sebebiyle yapısal ötelemedeki ilave artış dikkate alınmamaktadır. Betonarme yapılarda beton ile donatı arasındaki ilişkiyi ifade eden en önemli kavram, aderans ve buna bağlı olarak oluşan donatı kaymasıdır. TÜBİTAK 3501 (116M162) projesi kapsamında yapılan bu çalışmada, betonarme kolon donatıları hızlandırılmış korozyon yöntemi kullanılarak kontrollü olarak paslandırılmıştır. C30 beton basınç dayanımına sahip 5 adet tam ölçekli betonarme kolon numuneler üretilmiştir. Üretilen betonarme kolon numuneleri %2.00, %2.79, %5.65 ve %8.52 olmak üzere dört farklı korozyon oranlarında paslandırılmıştır. Deney numunelerine sabit eksenel yük (0.20) ve yanal yük uygulanmıştır. Yükleme deneylerinden sonra paslandırılmış betonarme kolon numuneler kırılarak beton içerisinden çıkartılan tüm donatılar belirtilen ölçülerde kesilerek gerçek korozyon oranları elde edilmiştir. Kesilen her bir boyuna donatılara çekme deneyi uygulanarak farklı korozyon oranlarında paslandırılmış betonarme boyuna donatıların mekanik özellikleri elde edilmiştir. Betonarme kolonlara sabit eksenel ve tersinir yanal yük uygulanarak bu korozyon oranlarıyla ilişkilendirilecek şekilde yük-deplasman sonuçları, süneklik oranları, enerji yutma kapasiteleri ve aderans-kayma değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan faydalanılarak farklı korozyon oranlarına ve beton basınç dayanımına bağlı olacak şekilde, donatıda oluşan kaymanın yapı üzerinde oluşturduğu etkileri tahmin etmek için deneye dayalı bir çalışma yapılmıştır.

2019, 111 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Aderans, Betonarme, Çelik donatı, Kayma, Kolon, Korozyon

ABSTRACT

Master Thesis

BOND-SLIP RELATIONSHIPS OF FULL SCALED REINFORCED CONCRETE COLUMNS SUBJECTED TO CORROSION

Mehmet Fırat MERMİT

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hakan YALÇINER

Corrosion in reinforced concrete structures is of great importance due to the many problems that it causes in the building sector. The negative results of the existing building elements as a result of corrosion lead to many problems such as cracking of concrete, pouring of rust share, decrease of cross section of reinforcement and loss of adherence between concrete and reinforcement. In recent years, many different models have been developed to evaluate the seismic performance of reinforced concrete buildings. In the evaluation made with these models, the effect of corrosion on the structural elements is evaluated only due to the decrease in the reinforcement area. The loss of adherence between concrete and reinforcement due to corrosion is not taken into account and the additional increase in structural displacement due to slippage of reinforcement is not taken into consideration. The most important notion that expresses the relationship between concrete and reinforcement in reinforced concrete structures is adherence and related slip of reinforcement. In this study carried out within the scope of TÜBİTAK 3501 (116M162) project, reinforced concrete column reinforcement was controlled by using accelerated corrosion method. 5 full-scale reinforced concrete column samples with C30 concrete compressive strength were produced. The produced concrete column samples were corroded in four different corrosion rates as 2.00%, 2.79%, 5.65% and 8.52%. Constant axial load (0.20) and lateral load were applied to the test specimens. After loading tests, the corroded concrete column samples were broken and all reinforcements removed from the concrete were shear to the specified dimensions and actual corrosion rates were obtained. Mechanical properties of corrugated longitudinal reinforcement at different corrosion rates were obtained by applying tensile test to each shear longitudinal reinforcement. By applying constant axial and reversible lateral loads to the reinforced concrete columns, load-displacement results, ductility ratios, energy absorption capacities and adherence-slip values were obtained in relation to these corrosion rates. Using the obtained results, an experimental study was conducted to estimate the effects of sliding on the structure depending on different corrosion rates and concrete compressive strength.

2019, 111 Pages

Keywords: Adherence, Column, Corrosion, Reinforced concrete, Slip, Steel bars

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve deneyimleriyle bana her konuda desteğini esirgemeyen danışmanım, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Doç. Dr. Hakan YALÇINER' e, çalışma süreci boyunca yanımda olan ve hiçbir desteğini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Atila KUMBASAROĞLU' na ve eğitim hayatım boyunca, maddi ve manevi açıdan her türlü desteğini ve dualarını esirgemeyen canım aileme teşekkürlerimi borç bilirim.

Deneysel çalışmalarım boyunca her zaman yanımda olan ve hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen çok değerli meslektaşlarım, Arş. Gör. Ahmet İhsan TURAN' a, Rameen KOHİSTANİ' ye, Enis DOĞRU' ya, Aqludin KARİMİ' ye, Umytjan YANGİBAYEV' e ve tezin yazımında katkıları olan Arş. Gör. Alper ÇELİK' e teşekkürlerimi borç bilirim.

“Korozyona Maruz Kalmış Tam Ölçekli Betonarme Kolonlarda Aderans-Kayma İlişkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi” adlı bu tez çalışması, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu TÜBİTAK 3501 (116M162) proje kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca burslu öğrenci olarak yer aldığım TÜBİTAK kurumuna yapmış olduğu desteklerinden dolayı teşekkürlerimi borç bilirim.

Mehmet Fırat MERMİT

Aralık, 2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	x
SİMGELER ve KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	7
2.1. Korozyona Maruz Kalmış Betonarme Elemanlar Üzerinde Yapılmış Gerçek Faraday Çalışmaları.....	7
2.1.1. Gerçek Faraday kütle kaybı modelleri.....	7
2.2. Paslandırılmamış Betonarme Elemanlar İçin Yapılmış Aderans-Kayma Çalışmaları	9
2.2.1. Otani ve Sozen (1972) aderans-kayma modeli	9
2.2.2. Alsiwat ve Saatcioglu (1992) aderans-kayma modeli	10
2.2.3. Sezen ve Setzler (2008) aderans-kayma modeli.....	13
2.3. Paslandırılmış Betonarme Elemanlar İçin Yapılmış Aderans Çalışmaları.....	16
2.3.1. Cabrera (1996) aderans gerilmesi modeli	16
2.3.2. Auyeung vd. (2000) aderans gerilmesi modeli	17
2.3.3. Lee vd. (2002) aderans gerilmesi modeli.....	18
2.3.4. Fang vd. (2004) aderans gerilmesi modeli.....	19
2.3.5. Chung vd. (2008) aderans gerilmesi modeli	20
2.3.6. Yalciner vd. (2012b) aderans gerilmesi modeli	21
2.3.7. Chung vd. (2004) aderans boyu modeli	24
3. KURAMSAL TEMELLER	27
3.1. Betonarme.....	27
3.1.1. Beton.....	27
3.1.2. Betonarme donatı.....	28
3.2. Korozyon	29
3.2.1. Betona gömülü donatı korozyonu	30

3.2.2. Korozyon çeşitleri.....	33
3.2.3. Hızlandırılmış korozyon işlemi	34
3.3. Aderans.....	36
3.3.1. Aderans mekanizması.....	39
3.3.2. Aderansa etki eden temel faktörler	40
4. MATERYAL ve YÖNTEM	42
4.1. Betonarme Kolon, Kiriş ve Temel Elemanların Malzeme Özellikleri.....	42
4.1.1. Beton.....	42
4.1.2. Donatı.....	43
4.2. Betonarme Kolon, Kiriş ve Temel Elemanların Kesit Özellikleri.....	45
4.2.1. Betonarme kolonların kesit özellikleri.....	45
4.2.2. Betonarme kiriş ve temellerin kesit özellikleri	49
4.3. Betonarme Donatı İşleri	50
4.4. Kalıp Montaj İşleri	59
4.5. Beton Döküm İşleri	60
4.6. Hızlandırılmış Korozyon Yöntemi.....	64
4.7. Deney Düzeneği.....	68
4.7.1. Yükleme sistemi	68
4.7.2. Ölçüm ve veri toplama sistemi	72
4.7.2.1. Yer değiştirme ölçerler	73
4.7.2.2. Gerinim ölçerler	77
4.8. Deney Programı	81
5. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	82
5.1. Deney Sonuçları.....	82
5.1.1. Betonarme kolon elemanların gerçek korozyon oranları.....	82
5.1.2. Donatı çekme deney sonuçları	89
5.1.3. Yük-deplasman sonuçları.....	92
5.1.4. Aderans-kayma sonuçları.....	96
6. SONUÇLAR.....	100
KAYNAKLAR.....	102
EKLER.....	107
Ek-1. Yükleme Deneylerinden Sonra Kırımları Yapılan Betonarme Kolonlar	107
Ek-2. Deneysel Çalışmada Kullanılan Yükleme Sistemi	109
Ek-3. Paslandırma Sürecinde Kullanılan Hızlandırılmış Korozyon Yöntemi	110

Ek-4. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar	111
ÖZGEÇMİŞ	112

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Alsiwat ve Saatcioglu (1992) tarafından geliştirilen aderans-kayma modeli: (a) Elastik bölge için oluşan şekil değiştirme dağılımı, (b) Donatı boyunca oluşan şekil değiştirme dağılımı, (c) Beton ile donatı arasındaki aderans gerilmesi.	11
Şekil 2.2. Aderans-kayma modeli (Sezen ve Setzler, 2008).	13
Şekil 2.3. Aderans-kayma modeli (Sezen ve Setzler, 2008).	15
Şekil 2.4. Korozyon oranı ile aderans kuvveti dağılımı (Auyeung vd., 2000).	17
Şekil 2.5. Korozyon oranı ile aderans kuvveti dağılımı (Lee vd., 2002).	18
Şekil 2.6. Korozyon oranı ile aderans gerilmesi dağılımı (Fang vd., 2004).	19
Şekil 2.7. Korozyon oranı ile aderans gerilmesi dağılımı (Chung vd., 2008).	20
Şekil 2.8. Korozyon oranı ile aderans gerilmesi dağılımı (Yalciner vd., 2012b).	22
Şekil 2.9. Korozyon oranı ile aderans gerilmesi dağılımı (Yalciner vd., 2012b).	22
Şekil 2.10. Betonarme kiriş elemanında belirlenen aderans boyundaki değişkenliğin şematik gösterimi (Chung vd., 2004).	24
Şekil 2.11. Korozyon oranına bağlı olarak elde edilen aderans boyundaki değişkenlik (Chung vd., 2004).	24
Şekil 3.1. Korozyon sonucu kiriş alt bölgesinde oluşan hasar (Erzincan, 2019).	29
Şekil 3.2. Korozyon sonucu kiriş tüm yüzey bölgesinde oluşan hasar (Erzincan, 2019).	30
Şekil 3.3. Betona gömülü donatıda gerçekleşen korozyon mekanizması.	31
Şekil 3.4. Hızlandırılmış korozyon mekanizması (Cairns vd., 1999).	36
Şekil 3.5. Donatı çubuğu boyunca oluşan gerilme değişimi (Karataş, 2007).	40
Şekil 4.1. Silindir ve küp numunelerin beton basınç deneyleri.	43
Şekil 4.2. Betonarme donatılarına uygulanan donatı çekme deneyi.	44
Şekil 4.3. Betonarme donatıların gerilme-birim uzama sonuçları.	44
Şekil 4.4. Betonarme boyuna ve sargı donatılarının tasarım planındaki yerleşimi.	46
Şekil 4.5. Betonarme kolon, kiriş ve temel donatıların tasarım planındaki yerleşimi. ...	47
Şekil 4.6. Betonarme kolonlarının tasarlanan plandaki üç boyutlu kesit özellikleri.	48
Şekil 4.7. Tam ölçekli betonarme kiriş ve temel elemanların kesit özellikleri.	49
Şekil 4.8. Tasarım planına uygun olarak kesilmiş kolon, kiriş ve temel donatıları.	50
Şekil 4.9. Betonarme kolon elemanların enine sargı (etriye) donatılarının tartılması. ...	51
Şekil 4.10. Betonarme kolon elemanların boyuna donatılarının tartım işlemi.	51

Şekil 4.11. Betonarme kolon donatıları için hazırlanan renkli kodlama planı.	53
Şekil 4.12. Betonarme kolon donatıları için hazırlanan renkli kodlama kabloları.	53
Şekil 4.13. Betonarme kolon boyuna donatılarına renkli kodlama kabloların bağlanması.	54
Şekil 4.14. Betonarme donatılarına plastik boruların yerleştirilmesi.	55
Şekil 4.15. Donatılara yerleştirilen plastik boruların elektrik bandı ile bantlanması.	55
Şekil 4.16. Yalıtım işlemleri tamamlanmış betonarme donatıların montajı.	55
Şekil 4.17. Betonarme kolon sargı donatıların sırasına göre kodlandırılması.	56
Şekil 4.18. Sargı donatıların montaj işleminde kodlandırma sırasına göre yerleşimi. ...	56
Şekil 4.19. Betonarme giriş ve temel donatılarının bağlanması.	57
Şekil 4.20. Betonarme kolon boyuna ve sargı donatılarının bağlanması.	57
Şekil 4.21. Betonarme kolon boyuna donatılarına bakır kabloların bağlanması.	58
Şekil 4.22. Betonarme kolon sargı donatılarına bakır kabloların bağlanması.	58
Şekil 4.23. Montajı tamamlanmış betonarme kolon numunelerin donatı kafesleri.	59
Şekil 4.24. Kolon numuneler için montajı yapılan betonarme kalıplar.	60
Şekil 4.25. Montajı tamamlanmış kalıplara donatı kafeslerin yerleştirilmesi.	60
Şekil 4.26. Beton döküm işleri ve betonarme numunelere vibratör uygulanması.	61
Şekil 4.27. Beton döküm işlemi tamamlanmış kolon numuneler.	61
Şekil 4.28. Beton döküm esnasında silindir ve küp numune alınması.	62
Şekil 4.29. Beton döküm sonrası kalıptan çıkarılan betonarme kolon numuneler.	63
Şekil 4.30. Kolon numunelerin tam ölçekli paslandırma havuzuna taşınması.	63
Şekil 4.31. Boyuna ve enine donatılara bağlanan bakır kablolar.	64
Şekil 4.32. Hızlandırılmış korozyon deney düzeneğinin şematiksel üç boyutlu tasarımı.	65
Şekil 4.33. Paslandırma havuzunda uygulanan hızlandırılmış korozyon deney düzeneği.	66
Şekil 4.34. Hızlandırılmış korozyon deney düzeneğinin şematiksel gösterimi.	66
Şekil 4.35. Faraday Kanununa göre elde edilen teorik kütle kaybı ile gerçek kütle kaybının karşılaştırılması (Yalciner vd., 2012b).	67
Şekil 4.36. Kolonlara uygulanacak yükleme sistemi için tasarlanan deney düzeneği.	69
Şekil 4.37. Yükleme deneyleri için tasarlanan deney düzeneği; (a) Ön görünüşü, (b) Yan görünüşü.	69
Şekil 4.38. Yükleme sisteminde kullanılan deney düzeneği.	70
Şekil 4.39. Yanal yüklemeyi sağlayan hidrolik piston ve yük hücresi.	71
Şekil 4.40. Eksenel yüklemeyi sağlayan hidrolik pistonlar.	72

Şekil 4.41. Yanal yer değiştirmelerin ölçülmesi için kullanılan yer değiştirme ölçer.	74
Şekil 4.42. Yer değiştirme ölçerlerin betonarme kolon üzerindeki yerleşimi.	75
Şekil 4.43. Deney düzeneğinde kullanılan yer değiştirme ölçerler.	76
Şekil 4.44. Gerinim ölçerlerin yapıştırılması; (a) Aseton ile temizlenen donatı yüzeylerine gerinim ölçerlerin yapıştırılması, (b) Yapıştırılan gerinim ölçerlerin üzerlerinin koruma malzemesiyle kapatılması.	78
Şekil 4.45. Gerinim ölçerlerin yapıştırıldığı kısımlara tamir harcının uygulanması.	79
Şekil 4.46. Beton yüzey bölgesine gerinim ölçer yapıştırılması.	80
Şekil 4.47. Gerinim ölçerlerin tasarlanan plana göre yapıştırıldığı yerler.	80
Şekil 4.48. Gerinim ölçerlerin deneysel çalışmada kullanıldığı yerler.	81
Şekil 5.1. Betonarme kolonların yükleme deneylerinden sonra kırılması işleri.	82
Şekil 5.2. Betonarme kolon boyuna ve sargı donatıları için kimyasal temizleme işleri.	83
Şekil 5.3. Betonarme kolon boyuna ve sargı donatıları için mekanik temizleme işleri.	83
Şekil 5.4. Betonarme kolon boyuna donatılarında elde edilen korozyon oranlarının dağılımları.	84
Şekil 5.5. Betonarme kolon sargı donatılarında elde edilen korozyon oranlarının dağılımları.	85
Şekil 5.6. Çekme deneyi uygulanan betonarme kupon donatıları.	90
Şekil 5.7. Korozyona maruz bırakılmış betonarme donatıların mekanik özellikleri.	91
Şekil 5.8. Yük-deplasman sonuçları.	92
Şekil 5.9. Sezen (2000) modeline göre idealize edilmiş yük-deplasman eğrisi.	93
Şekil 5.10. Betonarme kolon numunelerin enerji yutma kapasiteleri.	95
Şekil 5.11. Her bir betonarme kolon için elde edilen aderans - sıyrılma dağılımları.	99

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan betonun karışım değerleri (1 m ³ için).....	42
Tablo 4.2. Çekme deneyleri sonucunda elde edilen donatıların mekanik özellikleri.	44
Tablo 4.3. TÜBİTAK 3501 (116M162) projesi kapsamında üretilen tam ölçekli betonarme kolon donatılarının korozyon öncesi elde edilen ilk kütleleri (g)...	52
Tablo 4.4. Yükleme sisteminde kullanılan alet ve cihazlar.....	68
Tablo 4.5. Ölçüm ve veri toplama sisteminde kullanılan cihazlar.	73
Tablo 4.6. Yer değiştirme ölçerlerin uygulamadaki yerleri ve özellikleri.	74
Tablo 4.7. Gerinim ölçerlerin kullanım mesafeleri ve özellikleri.	78
Tablo 5.1. TÜBİTAK 3501 (116M162) projesi kapsamında deneyleri gerçekleştirilen tam ölçekli betonarme kolon numunelerde elde edilen korozyon oranları.	86
Tablo 5.2. TÜBİTAK 3501 (116M162) projesi kapsamında deneyleri gerçekleştirilen tam ölçekli betonarme kolon numunelerin boyuna ve sargı donatılarında elde edilen toplam kütleleri ve korozyon oranları.	87
Tablo 5.3. Donatı mekanik özelliklerinin belirlenmesi için kesilen betonarme kupon donatılarının korozyon oranları.....	90
Tablo 5.4. Çekme deneyleri sonucunda elde edilen betonarme donatılarının mekanik özelliklerinin gravimetrik değerleri.....	91
Tablo 5.5. Yapılan monotonik yükleme deneyleri sonrasında elde edilen gravimetrik değerler.	93

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

A	Akım
A_S	Paslanmamış Donatının Kesit Alanı
A_{SS}	Sargı Donatısının Kesit Alanı
A_{SL}	Boyuna Donatısının Kesit Alanı
c	Beton Paspayı
C	Beton Sınıfı
C_L	Korozyon Oranı
CL_L	Boyuna Donatı Korozyon Oranı
CL_N	Kolonun Negatif Yönündeki Korozyon Oranı
CL_P	Kolonun Pozitif Yönündeki Korozyon Oranı
CL_S	Sargı Donatısının Korozyon Oranı
CL_T	Kolonun İtme Yönündeki Ortalama Korozyon Oranı
d	Donatının İlk Çapı
d_o	Donatının Korozyon Öncesi Çapı
d_r	Donatının Korozyon Sonrası Çapı
E	Elastisite Modülü
f'_c	Betonun Karakteristik Basınç Dayanımı
f_s	Donatıdaki Maksimum Gerilim
f_y	Akmadaki Gerilim
H	Kolon Yüksekliği
I	Sistemden Geçen Elektrik Akımı
l_d	Elastik Bölgenin Aderans Boyu
l'_d	Elastik Ötesi Bölgenin Aderans Boyu
L	Kolon Boyuna Donatısı
L_{sh}	Donatının Pekleşmedeki Aderans Boyu
L_{pc}	Donatının Kopmadaki Aderans Boyu
L_{yp}	Donatının Akmadaki Aderans Boyu
M	Moment

M_y	Akmadaki Moment
N	Kolona Etkiyen Eksenel Yük
S	Kolon Sargı Donatısı
SG	Gerinim Ölçer
t	Saniye Olarak Uygulanan Korozyon Süresi
u_b	Uniform Aderans Gerilmesi
u_e	Elastik Bölgenin Aderans Gerilmesi
W_i	Donatı Boyuna Düşen İlk Kütle
W_f	Donatı Boyuna Düşen Son Kütle
x	Paslandırılmamış Kolon
α	Yüzdelik Olarak Korozyon Oranı
τ	Aderans Gerilmesi
δ	Düzeltilme Katsayısı
μ	Süneklik Oranı
\emptyset	Donatı Çapı
ΔA_S	Donatı Çapındaki Kesit Kayıpları
Δ_u	Göçmedeki Yer Değiştirme
Δ_y	Akmadaki Yer Değiştirme
ε_s	Donatıdaki Maksimum Gerinim
ε_{sh}	Pekleşme bölgesinde Oluşan Gerinim
ε_y	Akma Bölgesinde Oluşan Gerinim
θ_S	Kaymadan Dolayı Oluşan Maksimum Dönme

Kısaltmalar

ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
ASTM	Amerikan Test ve Materyaller Topluluğu
FEMA	Federal Acil Durum Yönetim Kurumu
LVDT	Doğrusal Değişken Türevsel Dönüştürücü
RC	Betonarme
TS	Türk Standartları
TS-EN	Türk Standartları Avrupa Normu
TSE	Türk Standartları Enstitüsü

Tam Ölçekli Betonarme Kolonların Adlandırılmaları

C1	30 MPa dayanıma sahip bir numaralı betonarme kolon
C2	30 MPa dayanıma sahip iki numaralı betonarme kolon
C3	30 MPa dayanıma sahip üç numaralı betonarme kolon
C4	30 MPa dayanıma sahip dört numaralı betonarme kolon
C5	30 MPa dayanıma sahip beş numaralı betonarme kolon

1. GİRİŞ

Betonarme yapı elemanlarında korozyonun oluşmasıyla birlikte donatı kesitindeki azalma, beton ile donatı arasında oluşan aderans kaybı ile birlikte çekme dayanımı düşük olan betonun çatlamasına sebep olmaktadır. Korozyon ilerleyen zamanlarda yapının servis ömrünü tamamlamadan yıkılmasına ve can kaybının oluşmasına kadar varan sonuçlara sebep olmaktadır. 1999 yılında meydana gelen Marmara depreminden sonra, betonarme yapılarda yapılan hasar tespit çalışmalarında, yıkılan birçok betonarme yapıda dayanımı düşük beton kullanılması, yapılan imalatlarda işçilik hataları ve beton üretiminde yoğun olarak deniz kumunun kullanılması gibi durumlardan dolayı betonarme donatılarında önemli oranlarda paslanmaların olduğu gözlenmiştir. Bu durum korozyonun yapılar üzerinde oluşturduğu etkilerin ne kadar önemli bir faktör olduğunu göstermektedir. Yalciner vd. (2012a) tarafından yapılan çalışmada 25 yıllık bir betonarme yapının korozyon sonucunda oluşturduğu olumsuz etkileri göz önünde bulundurularak yapılan değerlendirmeler neticesinde yapı sisteminin hizmet ömrünü tamamlayamayacağı anlaşılmış ve yapının yıkılması gerektiği ön görülmüştür. Verilen karar doğrultusunda yapı sistemi kontrollü olarak yıktırılmıştır.

Betonarme yapı elemanlarında oluşan korozyon ile birlikte donatı kesitinde azalma ve donatı hacminin artması ile birlikte betonarme elemanlarında çatlama ve dökülmeler oluşur. Korozyon ile birlikte artan bu çatlama ve dökülmeler neticesinde beton ile donatı arasındaki aderans dayanımında azalma ve bu azalmanın etkisi ile donatıda kaymanın oluşması ve yapı sisteminde meydana gelen ötelenmenin artması gibi yapı davranışını etkileyebilecek olumsuz sorunları beraberinde ortaya çıkarmaktadır.

Korozyonun yapı davranışına olan etkisi ile birlikte ilk olarak korozyon oranlarının belirlenebilmesi için birçok deneysel çalışma yapılmıştır (Morinaga, 1988; Gulikers, 2005; Ghods vd. 2007). Korozyon oranlarının belirlenmesi için yapılan deneysel çalışmalardan sonra korozyonun aderans dayanımı üzerindeki etkisi ile devam etmiştir. Beton ile donatı çubuğu arasındaki temel ilişkiyi belirleyen aderans, betonarme yapı elemanlarında önemli bir yer tutmaktadır.

Korozyon sonucunda oluşan aderans kaybını tahmin edilebilmesi için geliştirilen çalışmalarda (Cabrera, 1996; Auyeung vd. 2000; Lee vd. 2002; Fang vd. 2004, Yalciner

vd. 2012b) aderans ve donatı sıyrılma ilişkisinin tartışılmış olmasına karşın, korozyondan dolayı betonarme elemanlarındaki donatı kaymasını aksnel yük etkisi altında tahmin etmeye yönelik bir deneysel çalışma yapılmamıştır. Küp içerisinde yerleştirilen donatıların çekip çıkarılması ile elde edilen çalışmalarda hem donatı hem de beton yalnızca çekme kuvvetlerine maruz kalmakta ve aksnel yükün etkisi göz ardı edilmektedir (Yalciner vd., 2012b). Özellikle, geliştirilen modellerde aderans boyunun deney düzeneğine bağılı olarak sabit alınması, korozyonun betonarme elemanlarında aderans boyundaki değişkenliği ihmal etmektedir.

Alsıwat ve Saatcioglu (1992) tarafından yapılan çalışmada paslandırılmamış betonarme elemanlarda donatıda oluşan kaymayı tahmin etmek için bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen aderans-kayma modelinde, donatı kaymasından dolayı betonarme eleman uçlarında oluşan dönmelerin güvenilir analitik tahminler için doğrusal olmayan analizlerde hesaba katılmasının şartından bahsedilmiştir. Buna paralel olarak aynı şekilde Sezen ve Moehle (2006) tarafından yapılan çalışmada, paslandırılmamış betonarme kolonlarında donatı kayması toplam yanal yer değiştirirmede %25-40 oranında etkisi olduğunu belirtilmiştir. Bu oran korozyonlu yapılarda aderans kaybı ile birlikte daha fazla olacağından yapı performans değerlendirilmelerinde doğru sonuçlara varmak için önemli yer teşkil etmektedir.

Sezen ve Setzler (2008) tarafından paslanmamış betonarme kolonları için birebir ölçekli betonarme kolanlarından elde edilen sonuçlar doğrultusunda geliştirilen aderans-kayma modeli özellikle donatının akma öncesi (elastik) ve sonrası (elastik ötesi) için farklı bölgelerde kayma hesabını tahmin edebilmek açısından büyük bir öneme sahiptir. Sezen ve Setzler (2008) tarafından geliştirilen modelde donatının elastik ve elastik olmayan bölgelerindeki aderans gerilmeleri yönetmeliklerce tanımlanan beton basınç dayanımına bağılı olarak elle alınmıştır.

Korozyon etkisi altındaki betonarme elemanlarındaki donatıdaki kayma hesabının yapılabilmesi için herhangi bir çalışma olmadığından dolayı, araştırmacılar korozyondan dolayı meydana gelen aderans kaybı ve buna bağılı olarak betonarme donatısındaki kaymayı hesaplayabilmek için paslandırılmamış betonarme elemanlar için geliştirilen donatı kayma modelleri üzerinde bir takım varsayımlarda bulunarak literatürdeki bu açığı kapatmaya çalışmaktadırlar. Yalciner vd. (2012c) korozyona

maruz kalmış betonarme elemanlarının zamana bağlı olarak sismik performanslarının tahmin edilebilmesi için yapmış olduğu çalışma bunlardan bir tanesidir. Yalciner vd. (2012c) tarafından yapılan tek serbestlik dereceli sistem üzerinde zamana bağlı sismik performans seviyesinin tahmini edilebilmesi çalışmasında; korozyondan dolayı betonarme donatısındaki kaymanın hesaplanabilmesi için Sezen ve Setzler (2008) modeli kullanılmıştır. Ancak, korozyon etkisini hesaba katmak için Sezen ve Setzler (2008) modelinde varsayılan korozyonsuz aderans denklemi yerine Stanish vd. (1999) tarafından geliştirilen korozyona maruz kalmış sargısız betonarme döşeme testinden elde edilen aderans gerilmesi denklemi kullanılmıştır. Stanish vd. (1999) tarafından geliştirilen model kullanılarak aderans gerilmesi korozyon oranına bağlı olarak farklı zaman dilimleri için hesaplanmıştır. Korozyon oranına bağlı olarak hesaplanan aderans gerilmesi Sezen ve Setzler (2008) modelinin içerisinde kullanılarak betonarme donatı kaymasının korozyon oranına bağlı olarak hesaplanmasını sağlamıştır. Böylelikle zaman tanım analizi de kullanılarak korozyona maruz kalmış yapının farklı korozyon oranları için zamana bağlı sismik performans seviyelerinin tahmin edilmesine olanak sağlamıştır. Yalciner vd. (2012c) tarafından yapılan çalışmada her bir korozyon oranlarına bağlı olarak yapının sismik performansı düşmektedir. Bunun temel nedeni Stanish vd. (1999) modelinde aderans gerilmesinin her bir korozyon oranına bağlı olarak giderek azalmasıdır. Hâlbuki korozyon belirli seviyelere kadar aderans gerilmesini artırmakta ardından hacimsel artışın yaratmış olduğu çatlama etkisi ile aderans gerilmesi giderek azalmaktadır (Yalciner vd., 2012b).

Yalciner vd. (2012a) tarafından yapılan çalışmada korozyona maruz kalmış 25 yıllık bir betonarme binası için zaman tanım analizi kullanılarak yapının performans seviyesini zamana bağlı olarak tahmin etmeye dayanmaktadır. Yapılan performans analizinde sadece korozyondan dolayı oluşan donatı kesitindeki azalma göz önüne alındığında yapı performans seviyesinin ne olacağı ve donatı kesitindeki azalma ile birlikte aderans kaybın ile donatısındaki kaymanın birlikte hesaba katılmasıyla yapı performans seviyesinin ne olacağı karşılaştırılarak; betonarme donatısındaki kayma değerinin yapı performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yalciner vd. (2012a) tarafında yapılan deneysel çalışma sonucunda, $2.43 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ bir korozyon oranında; 25 yıl sonra korozyonun yalnızca donatı alanındaki etkisi göz önüne alındığında, aynı maksimum yer ivmelenme değerinde yapının göçme öncesi performans seviyesini geçme olasılığı

%55 olarak hesaplamıştır. Daha sonra aynı maksimum yer ivmelenme değerinde hem donatı alanındaki azalma hem de aderans-kayma ilişkisinin hesaba dâhil edilmesi ile yapının göçme öncesi performans seviyesini geçme olasılığı %77 olarak hesaplanmıştır. Yapının 50 yıl sonraki performans seviyesini belirlemek için aynı maksimum yer ivmelenmesinde korozyondan dolayı sadece donatı alanındaki azalma göz önüne alındığında yapının göçme öncesi performans seviyesini geçme olasılığı %62 olarak hesaplamıştır. Bu olasılık aynı maksimum yer ivmelenmesinde korozyondan dolayı hem donatı kesitindeki azalma hem de aderans-kayma ilişkisinin hesaba dâhil edilmesi ile yapının göçme öncesi performans seviyesini geçme olasılığı %84 olarak hesaplanmıştır.

Korozyona maruz kalmış betonarme yapıların yapı performans seviyelerinin değerlendirilmesine ilişkin yapılan bir diğer çalışmada Berto vd. (2009) tarafından yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada betonarme elemanlarında donatı kayması doğrusal olmayan itme analizlerinde hesaba katılmamış ve donatıda meydana gelen kaymanın öneminden bahsetmiştir. Betonarme donatılarında oluşan kaymanın etkisinin araştırılarak yeni çalışmaların yapılması gerektiğinin belirtmiştir.

Betonarme yapıların performans seviyelerinin doğru olarak değerlendirilmesi, meydana gelen depremlerde hem can kaybını hem de mal kaybını en az düzeye indirmek veya tamamen önlemek açısından büyük bir öneme sahiptir. Mevcut literatürde, betonarme donatısında oluşan farklı korozyon oranları için; betonarme kolon donatılarındaki kayma değeri ve buna bağlı olarak ötelenme, dönme ve eğrilik gibi yapısal performansı belirleyen etkenlerin hesaplanabilmesi için daha önceden yapılan bir çalışma bulunmamaktadır.

Korozyona maruz kalmış betonarme yapıların performans seviyelerinin değerlendirilmesinde belirtilen değişkenler göz önüne alınmamakta ve yapıda istenilen performans seviyesinden farklı sonuçlar oluşturmaktadır. Gerek ülkemizde gerek dünyada korozyona maruz kalmış betonarme yapılar için istenilen seviyelerde değerlendirmelerin yapılması mümkün olmamaktadır.

TÜBİTAK 3501 (116M162) projesi kapsamında yapılan bu çalışmanın temel amacı farklı korozyon oranlarına maruz kalmış tam ölçekli betonarme kolonlarında aderans-kayma ilişkisinin sabit aksenal yük ve monotonik yanal yükün etkisi altında

değerlendirilmesidir. Bu amaçla aynı beton basınç dayanımına sahip 5 adet tam ölçekli betonarme kolon hızlandırılmış korozyon yöntemi kullanarak dört farklı korozyon oranı (%2.00, %2.79, %5.65 ve %8.52) için paslandırılmıştır. Dört farklı korozyon oranı için yükleme deneyleri sırasında betonarme kolonlarının taşıma kapasitelerinin yaklaşık olarak %20 oranına kadar olacak şekilde tek tip sabit aksenal yük ve monotonik yanal yük uygulanarak betonarme kolonlar yükleme etkisi altında deneylere tabi tutulmuştur. Elde edilen deneysel veriler sonucunda, betonarme kolonlarında korozyon oranına bağlı olarak aderans gerilmesindeki artış ve azalışlar ve donatı kaymalarının tahmin edilebilmesi için deneysel bir çalışmanın yapılması amaçlanmıştır. Elde edilen aderans ve donatı kaymalarının yapı davranışı üzerinde oluşturabilecek etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Daha önceki yıllarda yapılan çalışmalarda korozyonun yapı davranışı üzerindeki etkisi tam olarak göz önünde bulundurulmamaktadır. Ancak korozyon olayı, yapının veya yapı elemanının ömrü boyunca devam eden bir olay ve ilerleyen zamanlarla oluşturabileceği etkileri de göz önünde bulundurulması büyük bir öneme sahiptir.

Yapılan bu çalışma ile yapıların veya yapı elemanların oluşan korozyonun etkisi altında incelemesi ile ilerleyen zamanlarla birlikte yapı davranışının betonarme elemanlarda aderans etkisi ile birlikte donatıda oluşan kaymaya bağlı olarak daha kolay bir şekilde değerlendirmesine olanak sağlayacaktır. Kısacası; betonarme yapılarda yapı davranış seviyesini belirleyen birtakım değişkenlerin yanı sıra, korozyon etkisi ile birlikte meydana gelen kaymanın hesaba katılabilmesine olanak sağlayacaktır.

Tez çalışması kapsamında yapılan bu deneysel çalışma ile elde edilen aderans-kayma hesaplamaları sayesinde ileriki yıllarda meydana gelebilecek riskli durumlara karşı insanların can güvenliğini sağlamak ve oluşabilecek can kayıplarının önleyebilmek için korozyona maruz kalmış betonarme yapıların değerlendirmesinde büyük önem taşımaktadır. Ayrıca betonarme yapılarda yapı davranışını belirleyen birkaç değişkenin yanı sıra, meydana gelen korozyonun oluşturabileceği etkinin de yapılacak hesaplamalara yansıtılmasında önemli oranlarda olanak sağlayacaktır. Betonarme yapı elemanlarında oluşan korozyon oranlarının belirlenmesinden sonra her yapı elemanı için korozyon öncesi durumuyla karşılaştırılarak yapı davranışındaki değişiklikler daha kolay bir şekilde değerlendirilebilecektir.

Yapılan çalışma kapsamında betonarme donatısındaki kaymanın hesaplanabilmesi için daha önce yapılmış aderans ile kayma çalışmaları göz önünde bulundurulmuştur. Korozyondan dolayı donatı kesitinde meydana gelen azalma, aderans kaybı, betonarme donatısındaki kayma değerleri elde edilmiştir. Yapılan bu çalışma ile korozyona maruz kalmış betonarme yapıların aderans-kayma ilişkisine bağlı olarak yapı elemanların davranışının doğru bir şekilde değerlendirilmesinde büyük bir katkı sağlayacağı düşünölmektedir.

Bu tez altı bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünden sonraki kaynak özetleri bölümünde geçmişte konu kapsamında yapılmış çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

Kuramsal Temeller bölümünde yapılan çalışmayla ilgili temel konular hakkında tanımlamalar ve genel bilgiler açıklanmıştır.

Materyal ve Yöntem bölümünde yapılan deneysel çalışmaya hazırlık ve deneyin yapılışı hakkında genel bilgiler açıklanmıştır.

Araştırma Bulguları bölümünde yapılan deneylerin sonucunda elde edilen veriler hakkında gerekli olan temel bilgiler açıklanmıştır.

Sonuç bölümünde yapılan deneyler sonucunda elde edilen bulgulara dayanarak gerekli olan sonuçlar ve öneriler açıklanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yapılan tez çalışmasının bu bölümde gerçek korozyon oranlarının hesaplanması için daha önceki çalışmalarda geliştirilen modeller ile birlikte paslandırılmamış ve paslandırılmaya maruz bırakılmış numunelerde beton ile donatı arasındaki aderans kaybı ve aderans kaybına bağlı olarak donatıda oluşan kayma gerilmesinin hesaplanması için daha önceden geliştirilen modellere yer verilmiştir.

2.1. Korozyona Maruz Kalmış Betonarme Elemanlar Üzerinde Yapılmış Gerçek Faraday Çalışmaları

2.1.1. Gerçek Faraday kütle kaybı modelleri

Auyeung vd. (2000) tarafından geliştirilen gerçek kütle kaybı modelinde, beton basınç dayanımı 28 MPa olan ve 178x178x178 mm boyutlara sahip küp numuneler kullanmıştır. Bu numunelere 19 mm çapında betonarme donatısı yerleştirmiştir. Daha sonra hızlandırılmış korozyon yöntemini kullanarak betonarme donatılarını paslandırmıştır. Deneysel numuneleri %0 ile %5.91 arasında paslandırmıştır. Auyeung vd. (2000) tarafından geliştirilen gerçek kütle kaybı modeli Denk. 2.1'de verilmiştir.

$$\text{Gerçek kütle kaybı} = 0.4651F - 0.5624 \quad (2.1)$$

Verilen Denk. 2.1'de F Faraday kütle kaybını temsil etmektedir.

El Maaddawy vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada numunelerin üretiminde beton basınç mukavemeti 35 MPa olan beton sınıfı kullanılmıştır. 10.2 cm ve 20.4 cm yüksekliklere sahip tam ölçekli beton silindir numunelere 11.3 mm, 16 mm ve 19.5 mm çaplara sahip betonarme donatılar yerleştirilmiştir. Daha sonra yerleştirilen numuneler hızlandırılmış korozyon yöntemi kullanılarak paslandırılmıştır. Paslandırılmış beton numunelerde elde edilen korozyon oranları %0 ile %39.3 arasındaki değerler kullanılmıştır. El Maaddawy vd. (2006) tarafından yapılan deneysel çalışmada geliştirilen gerçek kütle kaybı modeli Denk. 2.2'de verilmiştir.

$$\text{Gerçek kütle kaybı} = 0.44F \quad (2.2)$$

Yalciner vd. (2012b) tarafından yapılan deneysel çalışmada 23 MPa ve 51 MPa beton basınç dayanımlarına sahip beton numuneler kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada her bir beton basınç dayanımında üretilen numuneler için 10 mm, 30 mm ve 45 mm pas payı kullanılmıştır. Yalciner vd. (2012b) tarafından yapılan deneysel çalışmada korozyon oranları %0 ile %18.75 arasındaki değerler almıştır. Yalciner vd. (2012b) tarafından yapılan deneysel çalışmada geliştirilen gerçek kütle kaybı modeli Denk. 2.3'te verilmiştir.

$$\text{Gerçek kütle kaybı} = 0.703F - 0.15 \quad (2.3)$$

Paul vd. (2016) tarafından yapılan deneysel çalışmada 26 MPa ve 28 MPa beton basınç dayanımlarında üretilen beton numunelerine hızlandırılmış korozyon yöntemi uygulanarak paslandırılmıştır. İki tip beton basınç dayanımlarında, üç farklı kesit özelliklerinde ve farklı pas paylarında üretilen beton numuneler deneysel çalışmada kullanılmıştır. Farklı pas paylarında üretilen numunelerin gerçek ve teorik kütle kayıpları (Faraday denklemini kullanarak) da karşılaştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda oluşan gerilmeler, beton basınç dayanımları, beton pas payları ve gerçek kütle kayıplarının çatlakların davranışı üzerinde önemli etkiler oluşturduğu görülmüştür. Paul vd. (2016) tarafından yapılan deneysel çalışmada geliştirilen gerçek kütle kaybı modeli Denk. 2.4'te verilmiştir.

$$\text{Gerçek kütle kaybı} = 1.0939F - 8.2744 \quad (2.4)$$

Tam ölçekli olarak üretilen betonarme numunelerine uygulanan hızlandırılmış korozyon yöntemi sonucunda elde edilen gerçek kütle kaybı değerlerinin hesabında daha önceki yıllarda elde edilen modellerin kullanılması yeterli değildir.

Biçer vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada 25 cm genişliğe, 40 cm yüksekliğe ve 250 cm uzunluğa sahip betonarme kiriş numuneler kullanılmıştır. Kiriş numunelerin üretiminde 25 MPa beton basınç dayanımına sahip beton kullanılmıştır. Tam ölçekli betonarme kiriş numuneler paslandırdıktan sonra kırılarak boyuna ve sargı donatıları çıkartılan her bir numunenin gerçek korozyon oranları elde etmiştir. Denk. 2.5'te Biçer vd. (2018) tarafından geliştirilen gerçek kütle kaybı modeli verilmiştir.

$$\text{Gerçek kütle kaybı} = 0.0003F^2 - 1.843F + 4580.2 \quad (2.5)$$

Ch vd. (2006) tarafından yapılan çalışmada korozyon sürecini hızlandırabilmek için betonarme donatılarına kademeli olarak tuz püskürtülerek donatıların paslandırılması sağlanmıştır. Bu deneysel çalışma ile paslandırılan donatıların mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmada kütle kaybının donatının paslanmaya maruz kalma süresiyle paralel bir şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak donatıda oluşan çekme dayanımı ile süneklik değerlerinin korozyon oranının artmasıyla birlikte önemli oranlarda azalma gösterdiğini belirtmiştir. Yapılan korozyon deneylerinden sonra korozyon oranının artmasına bağlı olarak betonarme donatı çapındaki azalmayı hesaplayabilmek için Denk. 2.6'yı önermiştir.

$$d_r = d\sqrt{(1 - a)} \quad (2.6)$$

Denk. 2.6'da d_r (mm) donatının korozyondan sonra oluşan son çapı, d (mm) donatının korozyon öncesi ilk çapı ve a (%) ise yüzdelik olarak korozyon oranını temsil etmektedir.

2.2. Paslandırılmamış Betonarme Elemanlar İçin Yapılmış Aderans-Kayma Çalışmaları

2.2.1. Otani ve Sozen (1972) aderans-kayma modeli

Otani ve Sozen (1972) tarafından yapılan deneysel çalışmada paslandırılmamış betonarme kolon donatılarında donatı kayması üzerine geliştirilen model temelinde donatı boyunca oluşan aderans gerilmelerinin eşit olarak değerlendirilmesi ilkesine dayanmaktadır. Geliştirilen modelde aderans gerilmesi beton basınç dayanımına bağlı olarak tanımlanmıştır. Otani ve Sozen (1972) tarafından geliştirilen aderans gerilmesi modeli Denk. 2.7'de verilmiştir.

$$u_b = 6.5\sqrt{f'_c} \quad (2.7)$$

Denk. 2.7'de u_b (N/mm²) üniform aderans gerilmesini ve f'_c (N/mm²) ise beton basınç dayanımını temsil etmektedir.

Otani ve Sozen (1972) tarafından geliştirilen modelde donatıda oluşan gerilmelerin donatı boyunca doğrusal olarak azaldığı ve aderans boyu mesafesinde sıfıra ulaştığı

belirtilmiştir. Böylelikle belirlenen bu durumun neticesinde betonarme donatısında oluşan kayma donatı boyu ile birim şekil değiştirme grafiğinin altında kalan alan olarak tanımlanmışlardır. Dolayısıyla donatıda oluşan kaymayı hesaplamak için Denk. 2.8'i önermişlerdir.

$$Sıyrılma = \frac{\varepsilon_s l_d}{2} = \frac{f_s l_d}{2E_s} = \frac{f_s^2 l_d}{52E_s \sqrt{f'_c}} \quad (2.8)$$

Denk. 2.8'de sırasıyla $Sıyrılma$ (mm) donatıda oluşan kaymayı, ε_s (mm/mm) donatıdaki birim şekil değiştirmeyi, l_d (mm) aderans boyunu, f_s (N/mm²) donatıdaki gerilim değerini, f'_c (N/mm²) beton basınç mukavemetini ve E_s (N/mm²) ise donatının elastisite modülünü temsil etmektedir.

Geliştirilen modelin yapı performans analizlerinde kullanılabilmesi için donatıda oluşan gerilme değerleri ile moment değerleri arasındaki ilişkinin doğrusal olduğunu kabul ederek ($\frac{f_s}{f_y} = \frac{M}{M_y}$) donatıda oluşan kaymadan dolayı meydana gelebilecek dönmeyi hesaplayabilmek için Denk. 2.9'u önermişlerdir.

$$\theta_s = \frac{M^2 f_y^2 d_b}{8E_s u_b (d-d') M_y^2} = \frac{M^2 f_y^2 d_b}{52E_s \sqrt{f'_c} (d-d') M_y^2} \quad (2.9)$$

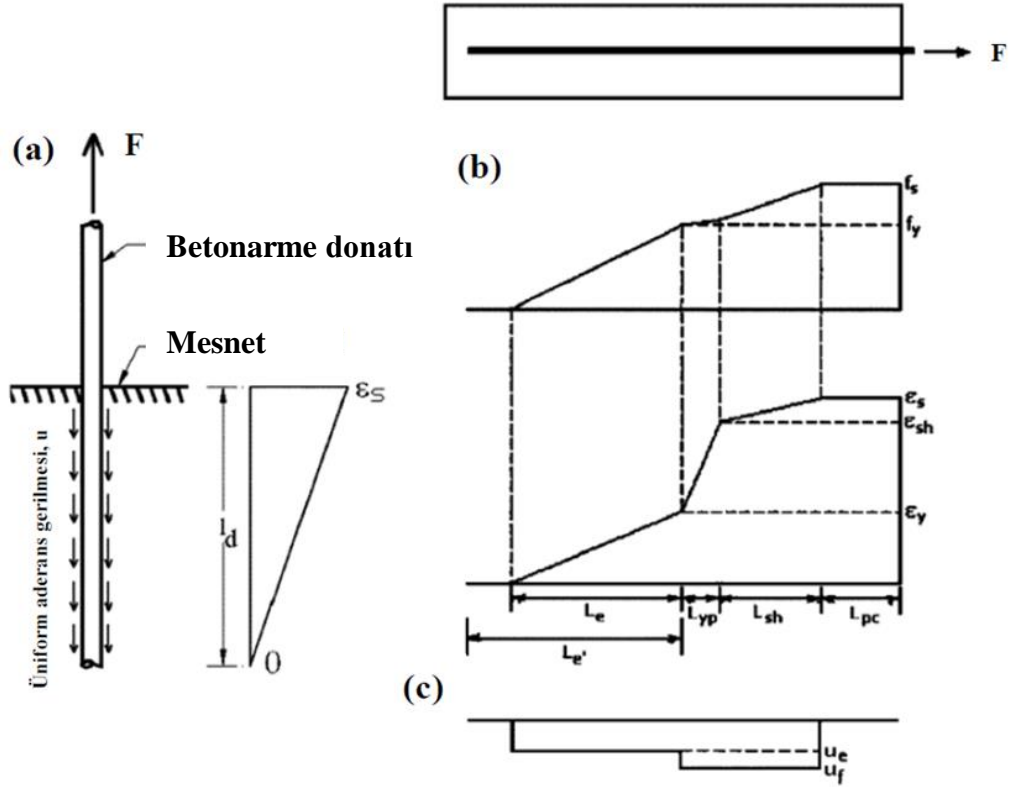
Denk. 2.9'da θ_s (rad/m) kaymadan dolayı oluşan dönmeyi, M (kN.m) oluşan momenti, f_y (N/mm²) donatıdaki akma gerilmesini, d_b (mm) donatı çapını, E_s (N/mm²) donatının elastisite modülünü, f'_c (N/mm²) beton basınç dayanımını, M_y (kN.m) akma noktasında oluşan momenti ve u_b (N/mm²) ise aderans gerilmesini temsil etmektedir.

Geliştirilen model yapı elemanın elastik bölgenin sınırları içindeki dönmeleri hesaplayabilmek için kullanılan bir model olup elastik ötesi (akma sonrası) davranışların gerçekleştiği betonarme elemanlar için yeterli olmamaktadır.

2.2.2. Alsiwat ve Saatcioglu (1992) aderans-kayma modeli

Alsiwat ve Saatcioglu (1992) tarafından geliştirilen modelde donatı kayması donatıdaki birim şekil değiştirmeye bağlı olarak donatıdaki uzamaya karşılık gelen birim şekil değiştirmenin altındaki alanı hesaplama prensibine dayanmaktadır. Donatı kayması ya

da donatıdaki uzama olarak tanımlanan modelde aderans boyu ve karşılık gelen birim şekil değiştirme için dört farklı bölge tanımlanmış olup; Şekil 2.1’de Alsiwat ve Saatcioglu (1992) tarafından geliştirilen aderans-kayma modeli gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Alsiwat ve Saatcioglu (1992) tarafından geliştirilen aderans-kayma modeli: (a) Elastik bölge için oluşan şekil değiştirme dağılımı, (b) Donatı boyunca oluşan şekil değiştirme dağılımı, (c) Beton ile donatı arasındaki aderans gerilmesi.

Şekil 2.1’de gösterildiği gibi Alsiwat ve Saatcioglu (1992) betonarme donatısında oluşan kayma için elastik bölge, akma bölgesi (elastik ötesi), pekleşme bölgesi ve paspayının kırılarak sabit gerilmelerin olduğu çekip çıkarma bölgeleri tanımlanmıştır. Geliştirilen modelde tanımlanan her bir bölge için ayrı ayrı olarak donatıdaki uzamalar hesaplanarak geliştirilen modelde ortalama aderans gerilmesi ACI 408 (1979) komitesi yönetmeliğine göre kabul edilmiştir. Denk. 2.10’da ACI 408 (1979) komitesi tarafından önerilen elastik bölgedeki ortalama aderans gerilmesi modeli verilmiştir.

$$u_e = u_{ACI} = \frac{f_y d_b}{4l_d} \quad (2.10)$$

Denk. 2.10'da u_e (N/mm²) elastik bölgede oluşan aderans gerilmesini, f_y (N/mm²) donatıda oluşan akma gerilmesini, d_b (mm) donatı çapını ve l_d (mm) ise aderans boyunu temsil etmektedir.

Kuvvet denge denkleminde yararlanılarak elde edilen, elastik bölgenin aderans boyu Denk. 2.11 yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$L_e = \frac{f_s d_b}{4u_e} \quad (2.11)$$

Denk. 2.11'de L_e (mm) elastik bölgedeki aderans boyunu, f_s (N/mm²) donatının nihai gerilmesini, d_b (mm) donatı çapını ve u_e (N/mm²) ise elastik bölgede oluşan aderans gerilmesini temsil etmektedir.

Akma bölgesi için ise numunelerde oluşan aderans boyu Denk. 2.12 yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$L_{yp} = \frac{\Delta f_s d_b}{4u_f} \quad (2.12)$$

Denk. 2.12'de L_{yp} (mm) akma bölgesindeki aderans boyunu, f_s (N/mm²) donatıdaki nihai gerilmeyi, d_b (mm) donatı çapını ve u_f (N/mm²) ise akma bölgesinde oluşan aderans gerilmesini temsil etmektedir.

Alsawat ve Saatcioglu (1992) tarafından geliştirilen modelin sağlamış olduğu en önemli yararlarından biri Denk. 2.12'de akma bölgesinde elastik uniform aderans gerilmesi yerine sürtünme aderans gerilmesi donatının nervürlü yüzey özelliklerine bağlı olarak geliştirilen modele yansıtılmış olmasıdır. Pochanart ve Harmon (1989) tarafından geliştirilen sürtünme aderans gerilmesi Alsawat ve Saatcioglu (1992) tarafından geliştirilen modelde kullanılmış olup Denk. 2.13'ün donatı kaymasının hesaplanması için önerilmiştir.

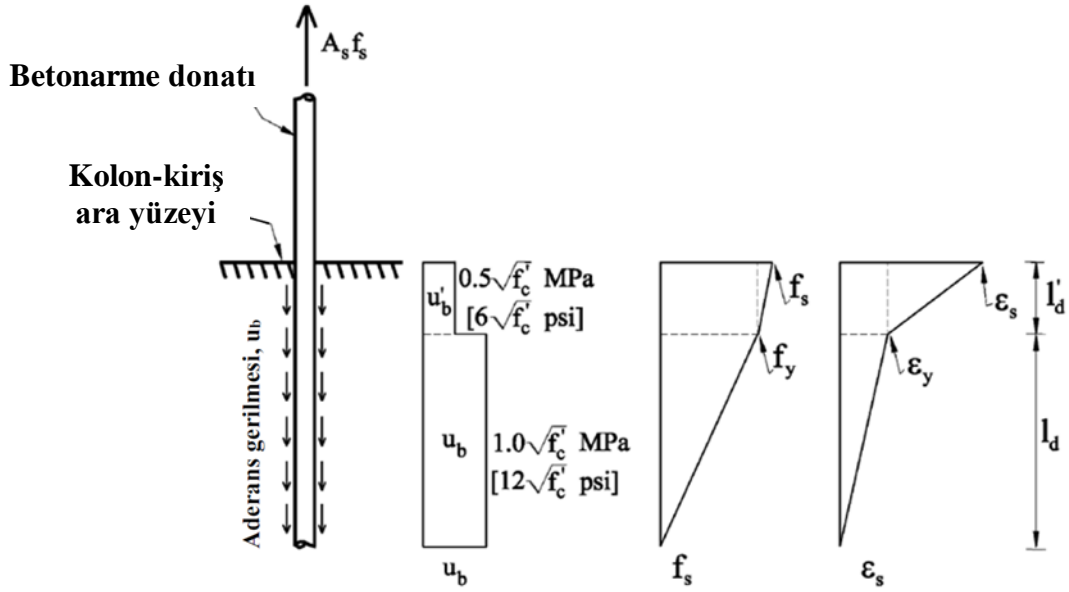
$$\delta_{ext} = \varepsilon_s L_{pc} + 0.5(\varepsilon_s + \varepsilon_{sh})L_{sh} + 0.5(\varepsilon_{sh} + \varepsilon_y)L_{yp} + 0.5(\varepsilon_y)L_e \quad (2.13)$$

Denk. 2.13'te ε_s (mm/mm) donatıdaki birim şekil değiştirmeyi, ε_{sh} (mm/mm) pekleşme bölgesindeki birim şekil değiştirmeyi, ε_y (mm/mm) akma bölgesindeki birim şekil değiştirmeyi, L_e (mm) elastik bölgedeki donatı boyunu, L_{yp} (mm) akma bölgesindeki

donatı boyunu, L_{sh} (mm) pekleşme bölgesindeki donatı boyunu ve L_{pc} (mm) ise kopma bölgesindeki donatı boyunu temsil etmektedir.

2.2.3. Sezen ve Setzler (2008) aderans-kayma modeli

Sezen ve Setzler (2008) tarafından geliştirilen model daha önceden yapılmış modeller göz önünde bulundurularak deneysel olarak elde edilen bir modeldir. Geliştirilen modelde donatıda oluşan kayma birim şekil değıştirmenin altında kalan alanın hesaplanmasına bağılı olup donatının akmadan önce (elastik) ve aktıktan sonraki elastik ötesi bölgesi için ayrı ayrı olarak donatıda oluşan kaymanın hesaplanmasını önermektedir. Şekil 2.2’de Sezen ve Setzler (2008) tarafından geliştirilen aderans-kayma modeli gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Aderans-kayma modeli (Sezen ve Setzler, 2008).

Şekil 2.2’de elastik ve elastik ötesi bölgeler için iki farklı ortalama aderans gerilmesi ve iki bölge için hesaplarda göz önünde bulundurulması gereken aderans boyu tanımlanmış olup Denk. 2.14’te Sezen ve Setzler (2008) tarafından geliştirilen donatıda oluşan kayma modeli verilmiştir.

$$Sıyrılma = \int_0^{l_a+l'_a} \epsilon(x) dx \quad (2.14)$$

Denk. 2.14'te *Sıyrılma* (mm) donatıda oluşan kaymayı, l_d (mm) donatının elastik bölgedeki aderans boyunu ve l'_d (mm) ise donatının akma sonrası elastik ötesi bölgenin aderans boyunu temsil etmektedir.

Burada Denk. 2.14'ün iki alan için aderans boyuna bağlı olarak hesaplanan alan ile birlikte donatının akmadan önce donatıda ki kayma hesabı Denk. 2.15 yardımıyla ve akma sonrası donatıda ki kayma hesabı için ise Denk. 2.16 yardımıyla hesaplanmasını önerilmiştir.

$$Sıyrılma = \frac{\varepsilon_s l_d}{2} \quad \text{için} \quad \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \quad (2.15)$$

Denk. 2.15'te *Sıyrılma* (mm) donatıda oluşan kaymayı, ε_s (mm/mm) donatıdaki nihai birim şekil değiştirmeyi, ε_y (mm/mm) akma bölgesindeki birim şekil değiştirmeyi ve l_d (mm) ise donatının elastik bölgedeki aderans boyunu temsil etmektedir.

$$Sıyrılma = \frac{\varepsilon_s l_d}{2} + \frac{(\varepsilon_s + \varepsilon_y) l'_d}{2} \quad \text{için} \quad \varepsilon_s > \varepsilon_y \quad (2.16)$$

Denk. 2.16'da *Sıyrılma* (mm) donatıda oluşan kaymayı, ε_s (mm/mm) donatıdaki nihai birim şekil değiştirmeyi, ε_y (mm/mm) akma bölgesindeki birim şekil değiştirmeyi, l_d (mm) donatının elastik bölgedeki aderans boyunu ve l'_d (mm) ise donatının akmadan sonraki aderans boyunu temsil etmektedir.

Elastik ötesi (akma sonrası) bölge için Denk. 2.17 yardımıyla aderans boyunun hesaplanması önerilmiştir.

$$l'_d = \frac{(f_s - f_y) d_b}{4u'_b} \quad (2.17)$$

Denk. 2.17'de u'_b (N/mm²) akma sonrası bölgede oluşan aderans gerilmesini, d_b (mm) donatı çapını, l'_d (mm) akma sonrası bölgenin aderans boyunu ve f_y (N/mm²) akma gerilmesini temsil etmektedir.

Aderans kaybından dolayı oluşan donatı kaymasının etkisiyle elastik (akma öncesi) bölgede oluşacak dönme Denk. 2.18 yardımı ile elastik ötesi (akma sonrası) bölgede

2.3. Paslandırılmış Betonarme Elemanlar İçin Yapılmış Aderans Çalışmaları

2.3.1. Cabrera (1996) aderans gerilmesi modeli

Cabrera (1996) yapmış olduğu çalışmada 15x15x15 cm boyutunda ürettiği küp numunelerin merkezine 12 mm çapındaki betonarme donatıları yerleştirmiş ve daha sonra bu donatılara hızlandırılmış korozyon yöntemi kullanmak üzere deneysel bir model geliştirmiştir. Deneysel çalışmada donatıların numunelere gömülen boyu 40 mm olarak seçilmiş ve donatıların kopma dayanıma ulaşmadan sıyrılması amaçlanmıştır. Tek bir beton basınç dayanımı deneysel çalışmada göz önüne alınmıştır. Yapılan deneysel çalışmada korozyon oranı %0 ile %12 arasında değerler almıştır. Denk. 2.20'de verilen aderans gerilmesi korozyon oranının bir işlevi olarak tanımlanmıştır. Ancak yapılan çalışmada beton basınç dayanımı ile ilgili herhangi bir bilginin verilmemesi modelin kullanılabilirliği değişen beton basınç dayanımının etkisi altındaki aderans gerilmesini sınırlandırmıştır. Geliştirilen bu model aderans gerilmesinin korozyon oranına bağlı olarak doğrusal bir şekilde azalmasına neden olmuştur.

$$\tau = 23.478 - 1.313C_L \quad (2.20)$$

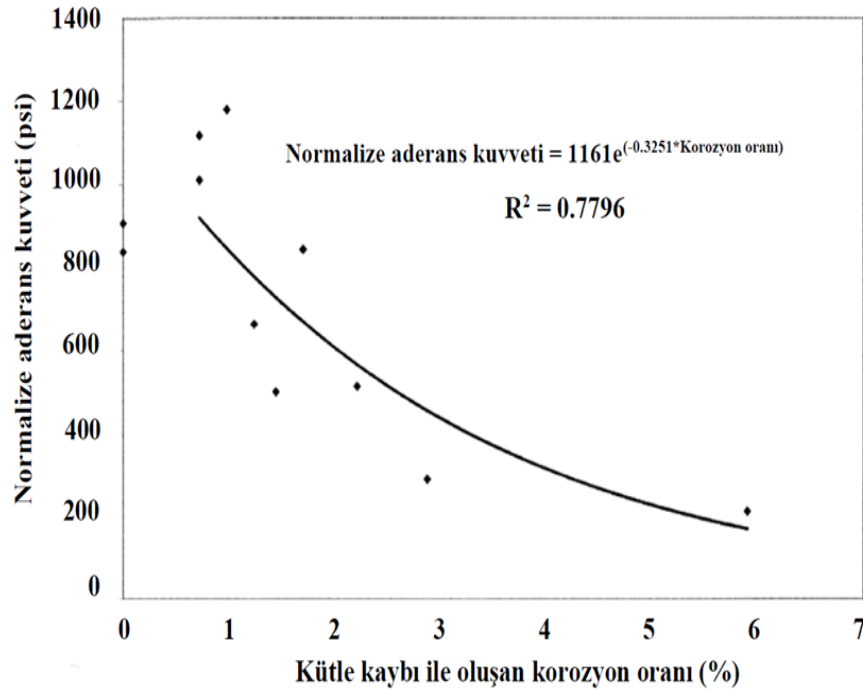
Denk. 2.20'de τ (N/mm²) aderans gerilmesini ve C_L (%) ise korozyon oranını temsil etmektedir.

Cabrera (1996) tarafından geliştirilen modelde aderans gerilmesi sadece korozyon oranının bir işlevi olarak belirlenebilmektedir. Farklı birçok araştırmacı (Auyeung vd. 2000; Lee vd. 2002; Fang vd. 2004) küp veya dikdörtgen şeklinde ürettikleri beton numunelerine yerleştirdikleri betonarme donatılarını hızlandırılmış korozyon yöntemi ile paslandırdıktan sonra çekme deneyi uygulayarak aderans gerilmesinin belirlenebilmesi için deneye dayalı farklı birçok modeller geliştirmişlerdir. Geliştirilen bütün modellerin hepsinde aderans gerilmesi sadece korozyona bağlı olarak hesaplanabilmektedir. Beton basınç dayanımının, paspayının ve betonda oluşan çatlak sayısı ve artan genişliklerin etkisi yapılan aderans hesaplamalarında araştırmacılar tarafından geliştirilen modellerde kullanılmıştır. Ayrıca geliştirilen modellerdeki en büyük eksiklik, aderans gerilmesinin verilen her bir korozyon oranı değerince sürekli azalması durumudur. Hâlbuki korozyon belli bir orana kadar aderans gerilmesini

artırmakta ve belli bir korozyon oranından sonra aderans gerilmesinin azalmasına sebebiyet vermektedir. Korozyonun bu davranışı daha önceki araştırmacılar tarafından da belirtilmiş olmasına rağmen, bu durum geliştirdikleri deneysel dayalı modellerde göz önünde bulundurulmamıştır.

2.3.2. Auyeung vd. (2000) aderans gerilmesi modeli

Auyeung vd. (2000) tarafından yapılan çalışma 19 mm çapındaki betonarme donatılarının daha önceden 178x178x355 mm boyutlarında üretilmiş olan beton prizmasına yerleştirilmesi ve donatıların çekip çıkartılmasına dayalı yapılan deneysel bir çalışmadır. Çalışmada tek tip beton sınıfı kullanılmış olup 28 günlük beton basınç dayanımı 28 MPa olarak verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada pas oranları %0 ile %5,91 arasında değerler almıştır. Şekil 2.4'te Auyeung vd. (2000) tarafından verilen ve idealleştirilmiş aderans gerilmesini korozyon oranının bir işlevi olarak gösteren grafik yer almaktadır. Aderans gerilmesini korozyonun bir işlevi olarak belirlemeye yarayan Denk. 2.21'de Cabrera (1996) tarafından geliştirilen modelden farklı olarak aderans gerilmesinde azalmalar olmuştur.



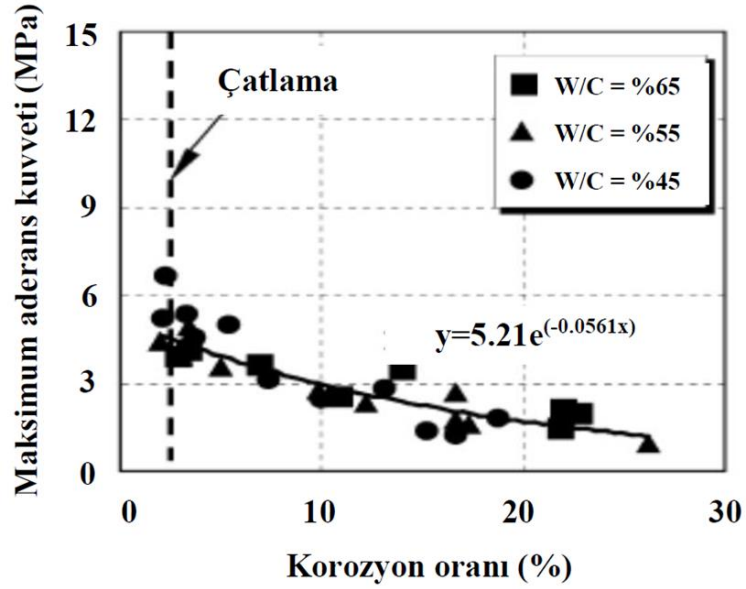
Şekil 2.4. Korozyon oranı ile aderans kuvveti dağılımı (Auyeung vd., 2000).

$$\tau = 8.0048e^{-0.3251C_L} \quad (2.21)$$

Denk. 2.21'de τ (N/mm²) aderans gerilmesini ve C_L (%) ise korozyon oranını temsil etmektedir.

2.3.3. Lee vd. (2002) aderans gerilmesi modeli

Lee vd. (2002) tarafından yapılan çalışmada farklı beton basınç dayanımlarında ve farklı korozyon oranlarına bağlı olarak aderans gerilmesini tahmin etmek için Denk. 2.22'de verilen model geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada 42.1 MPa, 33.0 MPa ve 24.7 MPa olmak üzere üç farklı beton basınç dayanıma sahip küp numuneler kullanılmış ve bu numuneler üzerinde deneyler yapılmıştır. Hızlandırılmış korozyon yöntemi kullanılarak paslandırılmış betonarme donatıları küp numunelerine üç farklı pas payında yerleştirilerek pas payının aderans gerilmesine olan etkisi incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada korozyon oranı %0 ile %30 arasında değerler almıştır. Auyeung vd. (2000) tarafından geliştirilen modelde olduğu gibi Lee vd. (2002) tarafından geliştirilen modelde de aderans gerilmesi korozyon oranına bağlı olarak azalma göstermiştir. Şekil 2.5'te Lee vd. (2002) tarafından geliştirilen aderans gerilmesi modeli verilmiştir.



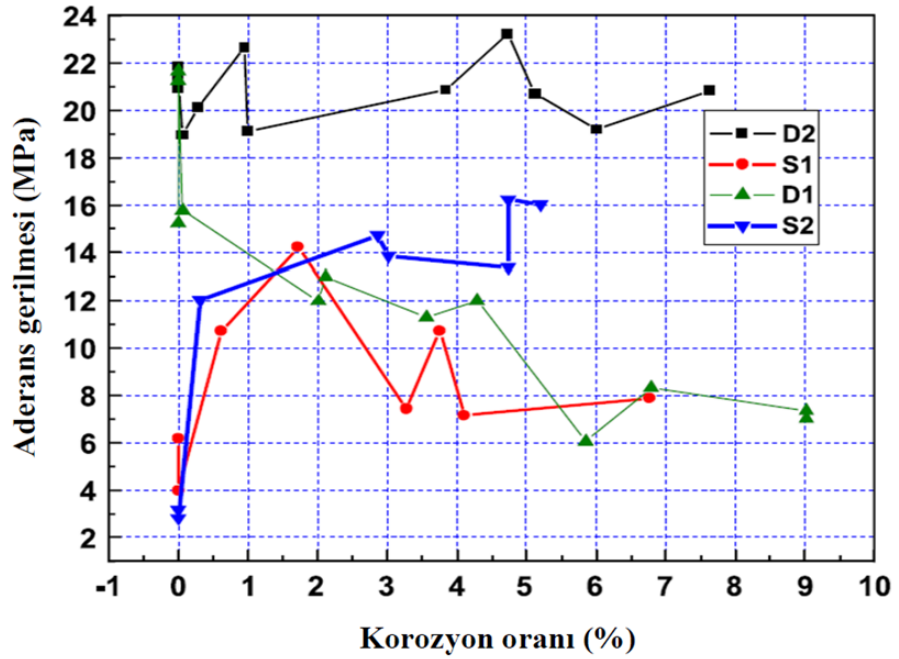
Şekil 2.5. Korozyon oranı ile aderans kuvveti dağılımı (Lee vd., 2002).

$$\tau = 5.21e^{(-0.0561C_L)} \quad (2.22)$$

Denk. 2.22'de τ (N/mm²) aderans gerilmesini ve C_L (%) ise korozyon oranını temsil etmektedir.

2.3.4. Fang vd. (2004) aderans gerilmesi modeli

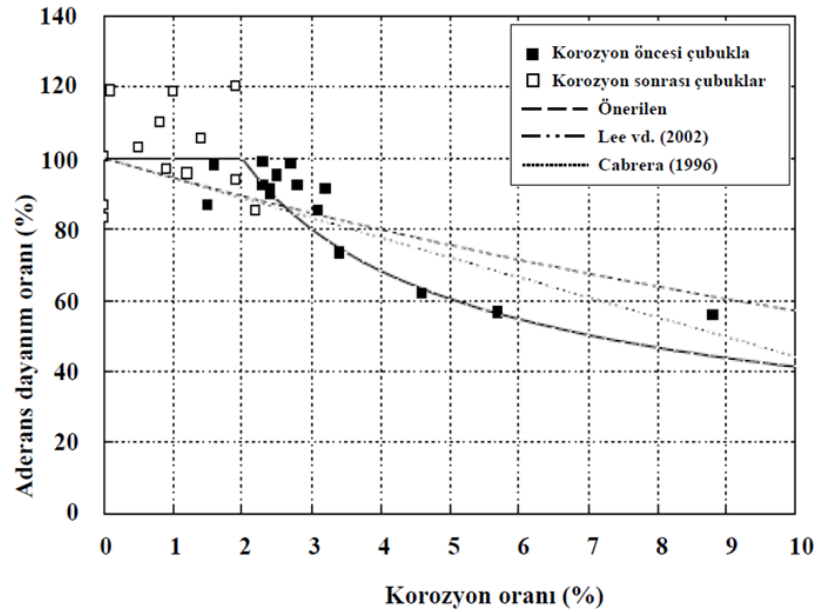
Fang vd. (2004) tarafından yapılan deneysel çalışmada 52,1 MPa beton basınç dayanımına sahip beton sınıfı kullanılmıştır. Yapılan çalışmada 20 mm çapındaki sargılı ve sargısız; nervürlü ve nervürsüz düz yüzeyli betonarme donatıları 140x140x180 mm boyutlarındaki beton numuneler içerisine yerleştirilerek hızlandırılmış korozyona maruz bırakılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada numunelere uygulanan korozyon oranları ise %0 ile %9 arasında değerler almıştır. Şekil 2.6'da gösterildiği üzere daha önce belirtilen aderans gerilmesi modellerinden farklı olarak Fang vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada aderans gerilmesi göz önüne alınan korozyon oranına bağlı olarak doğrusal bir şekilde ani azalma göstermektedir. Aderans gerilmesi belli bir korozyon oranına kadar artmakta ardından azalım göstermektedir. Fang vd. (2004) tarafından elde edilen aderans gerilmesi değerleri korozyonun betonarme donatısı üzerindeki etkisini daha doğru bir şekilde ifade etmektedir. Korozyon ürününün donatı çevresini sararak sargılama etkisini artırdığı ardından hacimsel genişlemeye bağlı olarak betonda çatlamanın meydana gelmesi ile birlikte aderans gerilmesinin azalması gerektiği prensibi ortaya tekrardan koyulmuştur. Bunlara ek olarak sargı donatılarının korozyon etkisinde göz önüne alınması gerektiği belirtilmiştir.



Şekil 2.6. Korozyon oranı ile aderans gerilmesi dağılımı (Fang vd., 2004).

2.3.5. Chung vd. (2008) aderans gerilmesi modeli

Chung vd. (2008) tarafından yapılan çalışmada aderans gerilmesinin korozyon oranına bağlı olarak nasıl bir değişim gösterdiğini belirtmek için bir model geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada özellikle hızlandırılmış korozyon yönteminin kullanıldığı çalışmalarda zaman zaman tercih edilen ve donatıların beton dışında paslandırılarak ardından beton dökümü ve çekme deneylerin yapıldığı çalışmalara atıfta bulunmak ve iki durum arasındaki farkı ortaya koymak için yapılan deneysel bir çalışmadır. Yapılan deneysel çalışmada tek tip beton basınç dayanımı ve pas payı göz önüne alınmıştır. Hızlandırılmış korozyon yönteminin kullanıldığı çalışmada korozyon oranı %0 ile %10 arasında değerler almıştır. Daha önce belirtilen aderans gerilmesi modellerinden farklı olarak Chung vd. (2008) aderans gerilmesinin %2 korozyon oranına kadar sabit kaldığını ve ardından korozyon oranına bağlı olarak azalma gösterdiğini kabul edilmiştir. Şekil 2.7'de Chung vd. (2008) tarafından yapılan çalışmada elde edilen korozyon oranına bağlı aderans gerilmesi dağılımı verilmiştir. Yapmış olduğu çalışmada korozyon oranını %2 ve altında olduğu durumlarda aderans gerilmesinin Denk. 2.23'te ki değere eşit olduğunu belirlemiştir. Daha sonra korozyon oranının %2'den fazla olduğu durumlarda aderans gerilmesinin Denk. 2.24'te ki denklemi kullanarak hesaplamıştır.



Şekil 2.7. Korozyon oranı ile aderans gerilmesi dağılımı (Chung vd., 2008).

$$\tau = 16.87 \quad C_L \leq \%2 \quad (2.23)$$

$$\tau = 24.7C_L^{-0.55} \quad C_L > \%2 \quad (2.24)$$

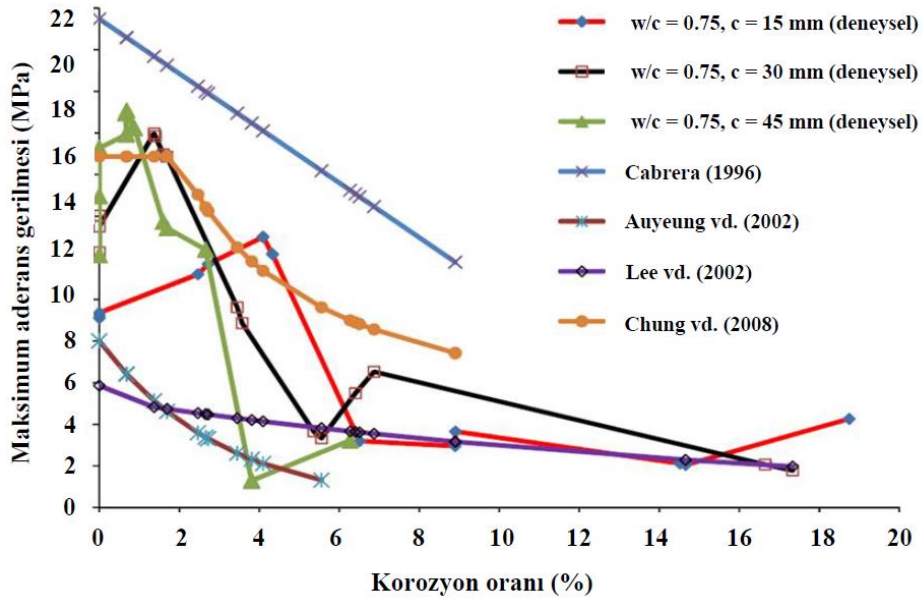
Denk. 2.23 ve Denk. 2.24'te τ (N/mm²) aderans gerilmesini ve C_L (%) ise korozyon oranını temsil etmektedir.

Yukarıda açıklanan deneysel çalışmalar ya tek bir beton basınç dayanımı ya da tek bir beton pas payını korozyon etkisi altında çalıştığından korozyonun aderans gerilmesine olan etkisini tam olarak ifade etmemektedir. Farklı beton basınç dayanımlarında ya da farklı pas paylarının göz önüne alındığı çalışmalarda ise korozyon belli orana kadar aderans gerilmesine katkısı ihmal edildiğinin korozyonun beton içerisindeki temel prensibi ile çelişkiler göstermiştir.

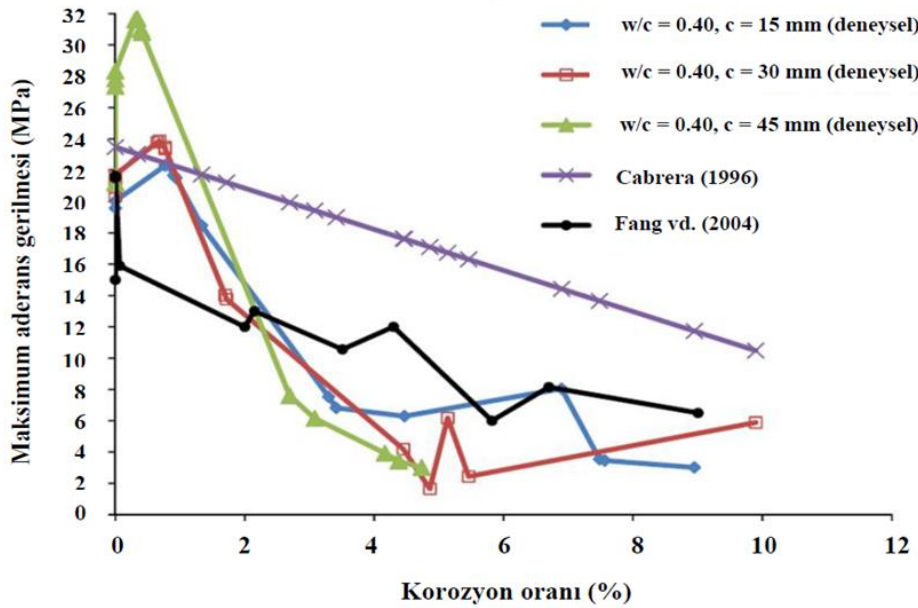
2.3.6. Yalciner vd. (2012b) aderans gerilmesi modeli

Yalciner vd. (2012b) tarafından yapılan çalışma, korozyonun iki tip beton basınç dayanımı ve üç farklı pas payı kullanılarak üretilen numunelerin aderans gerilmesi üzerindeki etkisini incelemek için yapılan son çalışmalardan biridir. Yapılan çalışmada korozyonun düşük ve yüksek basınç dayanımlarındaki etkisi incelenmiştir. En düşük olarak 23 MPa ve en yüksek olarak da 51 MPa beton basınç dayanımı kullanılarak numuneler tasarlanmıştır. Hızlandırılmış korozyon yönteminin kullanıldığı deneysel çalışmada korozyon oranları %0 ile %18.75 arasında değerler almıştır. Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da gösterildiği üzere aynı korozyon oranında paspayının donatı çapına olan oranına bağlı olarak aderans gerilmesi değişkenlik göstermektedir. Paspayının donatı çapı oranına bağlı olarak değerinin artması ile birlikte aderans gerilmesi paslanmamış numuneler için artmaktadır. Ancak paspayının donatı çapına olan oranının paslanmış numunelerde artması durumunda aderans gerilmesindeki azalışın daha erken korozyon oranlarında meydana gelmesine sebebiyet vermiştir. Paspayının donatı çapına olan oranın artması ile birlikte korozyon ürünü daha çok bir alana basınç uygulamakta ve daha erken korozyon seviyelerinde aderans kaybı meydana gelmektedir. Paspayının donatı çapına oranının çok düşük olması durumunda (paslanmış elemanlarda) korozyon ürünü beton içerisinde daha az bir alana etki etmekte ve bu etki beton basınç dayanımına göre de değişkenlik göstermektedir. Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da gösterildiği

üzere paslanmamış numunelerde aderans gerilmesi değerleri beton basınç dayanımının artması ile birlikte artmıştır. Ancak beton basınç dayanımının artması ile birlikte aynı korozyon oranında düşük beton basınç dayanıma sahip numunelerdeki aderans gerilmesindeki artış daha yüksek korozyon oranlarında devam etmiştir. Yüksek beton basınç dayanımda gevrek olan beton korozyonun etkisi ile daha da gevrek bir hal alarak daha düşük korozyon oranlarında aderans gerilmesinin azalmasına sebebiyet vermiştir.



Şekil 2.8. Korozyon oranı ile aderans gerilmesi dağılımı (Yalciner vd., 2012b).



Şekil 2.9. Korozyon oranı ile aderans gerilmesi dağılımı (Yalciner vd., 2012b).

Yalciner vd. (2012b) tarafından geliştirilen model aderans gerilmesinin beton basınç dayanımına, pas payına, donatı çapına ve korozyon oranlarına bağlı olarak tahmin etmeye yarayan deneye dayalı bir modeldir. Geliştirilen model aderans gerilmesinin arttığı bölge ve azaldığı bölge olarak iki kısma ayrılmıştır. Aderans gerilmesinin arttığı ve azaldığı bölgeler beton basınç dayanımı ve paspayının donatı çapına oranına bağlı olarak farklı şekillerde yapılmıştır. Aderans gerilmesinin belirli korozyon oranlarından sonra azalması beton da çatlamanın başladığı ve çatlak genişliğine bağlı olarak aderans gerilmesinin tahmin edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Yapılan deneysel çalışmada aynı korozyon oranında betondaki birincil çatlak genişliklerinin yüksek beton basınç dayanımında daha fazla olduğu gözlenmiş ve elde edilen veriler deneysel modele yansıtılmıştır. Yapılan çalışmada aderansın arttığı bölgeler için pas payının donatı çapına oranı 2’de küçük ise ve korozyon oranlarına bağlı olarak 23 MPa ve 51 MPa beton basınç dayanımındaki numuneler için elde edilen aderans gerilmesi Denk. 2.25 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$0 \leq C_L \leq 4 \quad f'_c = 23MPa \text{ için};$$

$$c/D < 2 \text{ ve } 0 \leq C_L \leq 0.8 \quad f'_c = 51MPa \text{ için}$$

$$\tau_{bu} = 0.40551f'_c - 0.25306\left(\frac{c}{D}\right) + 0.97926C_L \text{ (MPa)} \quad (2.25)$$

Yapılan çalışmada aderansın arttığı bölgeler için pas payının donatı çapına oranı 2’de büyük veya eşit olduğu durumlarda ise ve korozyon oranlarına bağlı olarak 23 MPa ve 51 MPa beton basınç dayanımındaki numuneler için elde edilen aderans gerilmesi Denk. 2.26 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$0 \leq C_L \leq 1.4 \quad f'_c = 23MPa \text{ için};$$

$$c/D \geq 2 \text{ ve } 0 \leq C_L \leq 0.68 \quad f'_c = 51MPa \text{ için}$$

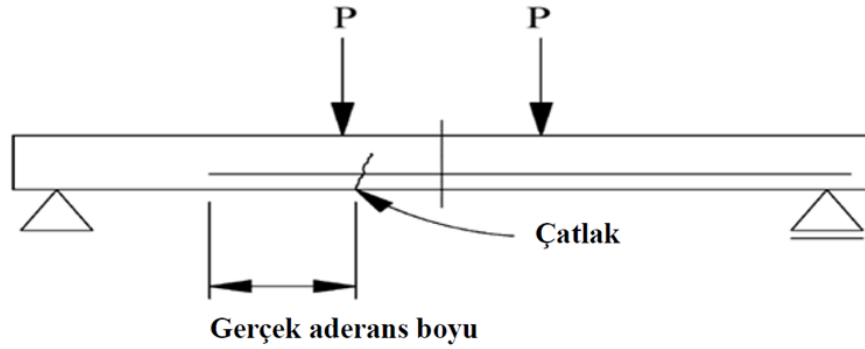
$$\tau_{bu} = e^{(0.01572f'_c + 0.22957\left(\frac{c}{D}\right) + 0.13946C_L + 1.75913)} \text{ (MPa)} \quad (2.26)$$

Aderansın azaldığı bölgeler için ise pas payına, korozyon oranlarına, beton basınç dayanımına bağlı olarak numuneler elde edilen aderans gerilmesi Denk. 2.27 yardımıyla hesaplanmıştır.

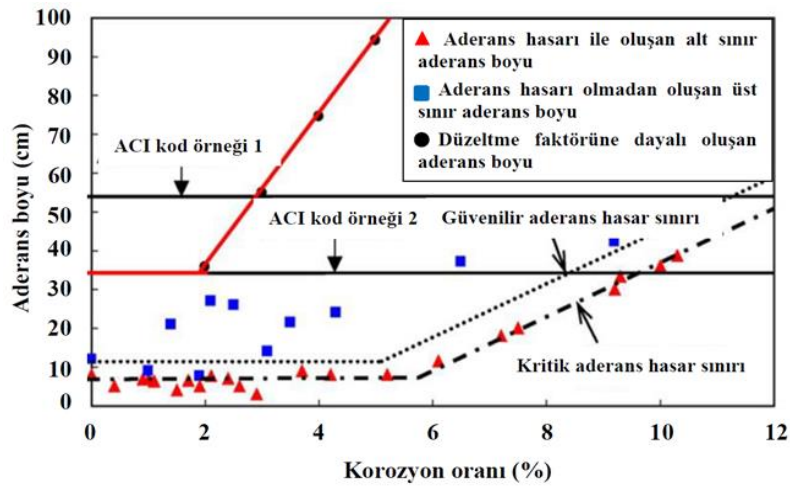
$$\tau_{bu} = e^{(0.01667f_c' - 1.06499W_{cr} + 0.20658(\frac{c}{D}) - 0.12928C_L + 1.80139)} \quad (MPa) \quad (2.27)$$

2.3.7. Chung vd. (2004) aderans boyu modeli

Chund vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada korozyonun aderans ve donatı kayma ilişkilerinin tanımlanmasında oldukça önemli bir yere sahiptir. Yapılan deneysel çalışma ile birlikte ACI 318 (2002) komitesi yönetmeliğinde tanımlanan aderans boyu korozyon etkisi altında incelenmiş ve korozyon oranına bağlı olarak bir düzeltme katsayısı tanımlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmada Şekil 2.10'da gösterildiği gibi betonarme kirişlerine yerleştirilen çekme donatıları kiriş açıklığından belli bir mesafede kesilerek bırakılmıştır. Farklı korozyon oranları için elde edilen aderans boyundaki değişkenlik ise Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Betonarme kiriş elemanında belirlenen aderans boyundaki değişkenliğin şematik gösterimi (Chung vd., 2004).



Şekil 2.11. Korozyon oranına bağlı olarak elde edilen aderans boyundaki değişkenlik (Chung vd., 2004).

Yapılan deneysel çalışma sonucunda korozyondan dolayı oluşan aderans boyundaki değişkenliği belirleyebilmek için geliştirilen deneye dayalı model Denk. 2.28'de gösterilmektedir.

$$l'_d = l_d x \frac{1}{\delta} \quad (2.28)$$

Denk. 2.28'de δ düzeltme katsayısı olup, korozyon oranının 2 ve 2'nin altındaki değerlerde 1 alınması, ikiden büyük olan değerlerde ise $2.09C_L^{-1.06}$ alınması gerekli olduğu önerilmiştir. Chung vd. (2004) tarafından yapılan çalışmada korozyondan dolayı aderans boyundaki değişkenlik kiriş içerisine yerleştirilen ve ucu kesilen donatının katkısı ile sağlanmıştır. Mevcut yapıların durumu göz önüne alınarak yapılan bu çalışmada kolon boyuna donatıların uçları kesilmediğinden dolayı ve serbest bir uç yaratılmamasından dolayı bu serbest uç birden fazla gerinim pulunun yapıştirılması ile mevcut çalışmada tespit edilmiştir. Elde edilen gerçek aderans boyundaki korozyona bağlı değişkenlik oldukça önemlidir. Mevcut alan yazında aksenal yük etkisi altında paslanmış betonarme kolonları için farklı korozyon oranlarında aderans boyunu tahmin etmeye yönelik amprik bir model bulunmamakta olup; yapılan bu çalışma ile bu eksiklik giderilmeye çalışılmış ve aderans-kayma ilişkisi modelinde aderans boyundaki değişkenlik göz önüne alınmıştır.

Yalciner vd. (2012a) tarafından yapılan çalışma yapı performans seviyesinin zamana bağlı olarak tahmin etmeye dayanmaktadır. Yapılan performans analizinde sadece korozyondan dolayı donatı kesitindeki azalma göz önüne alındığında yapı performans seviyesinin ne oranda değişeceği ve donatı kesitindeki azalmayla birlikte aderans kaybından dolayı betonarme donatısında oluşan kaymanın hesaba alınmasıyla yapı performans seviyesinin ne oranda değişeceğini karşılaştırılarak; betonarme donatısındaki kayma değerinin yapı performansı üzerindeki etkisini incelemiştir. Yalciner vd. (2012a) tarafından yapılan deneysel çalışma sonucunda, $2.43 \mu A/cm^2$ lik bir korozyon oranında; 25 yıl sonra korozyonun yalnızca donatı alanındaki etkisi hesaba katıldığında, aynı maksimum yer ivmelenme değerinde yapının göçme öncesi performans seviyesini geçme olasılığı %55 olarak hesaplamıştır. Daha sonra aynı maksimum yer ivmelenme değerine donatı kesitindeki azalma ile birlikte aderans-kayma ilişkisinin hesaba dâhil edilmesi ile yapının göçme öncesi performans seviyesini

geçme olasılığı %77 olarak hesaplanmıştır. Yapının 50 yıl sonraki performans seviyesini aynı maksimum yer ivmelenmesinde korozyondan dolayı sadece donatı kesitindeki azalma göz önüne alındığında yapının göçme öncesi performans seviyesini geçme olasılığı %62 olarak hesaplanmıştır. Daha sonra aynı maksimum yer ivmelenmesinde korozyondan dolayı hem donatı alanındaki azalma hem de aderans-kayma ilişkisinin hesaba dâhil edilmesi ile yapının göçme öncesi performans seviyesini geçme olasılığı %84 olarak hesaplanmıştır.

Yalciner vd. (2012c) korozyona maruz kalmış betonarme elemanlarının zamana bağlı olarak sismik performanslarının tahmin edilebilmesi için yapmış olduğu çalışma bunlardan bir tanesidir. Yalciner vd. (2012c) tarafından yapılan tek serbestlik dereceli sistem üzerine zamana bağlı sismik performans seviyesinin tahmini edilebilmesi için yapılan çalışmasında korozyondan dolayı betonarme donatısındaki kaymanın hesaplanabilmesi için Sezen ve Setzler (2008) modeli kullanılmıştır. Ancak, korozyon etkisini hesaba katmak için Sezen ve Setzler (2008) modelinde varsayılan korozyonsuz aderans denklemi yerine Stanish vd. (1999) tarafından geliştirilen korozyona maruz kalmış sargısız betonarme döşeme testinden elde edilen aderans gerilmesi denklemi kullanılmıştır. Stanish vd. (1999) tarafından geliştirilen model kullanılarak aderans gerilmesi korozyon oranına bağlı olarak farklı zaman dilimleri için hesaplanmıştır. Korozyon oranına bağlı olarak hesaplanan aderans gerilmesi Sezen ve Setzler (2008) modelinin içerisinde kullanılarak betonarme donatı kaymasının korozyon oranına bağlı olarak hesaplanmasını sağlamıştır. Böylelikle zaman tanım analizi de kullanılarak korozyona maruz kalmış betonarme bir yapının farklı korozyon oranları için zamana bağlı sismik performans seviyelerinin tahmin edilmesine olanak sağlamıştır.

Yalciner vd. (2012c) tarafından yapılan çalışmada artan her bir korozyon oranlarına bağlı olarak yapının sismik performansı düşmektedir. Bunun temel nedeni Stanish vd. (1999) modelinde aderans gerilmesinin her bir korozyon oranına bağlı olarak giderek azalmasıdır.

Mevcut literatürde betonarme kolonlarda korozyona bağlı olarak donatıda oluşan kaymanın hesaplanabilmesi için yapılan herhangi bir çalışmanın olmamasından dolayı birçok araştırmacının daha önceden yapılmış modellerin kendi çalışmalarında birbiri içerisinde kullanılmasına sebep olmuştur.

3. KURAMSAL TEMELLER

TÜBİTAK 3501 (116M162) projesi kapsamında yapılan çalışmanın bu bölümünde çalışma ile ilgili olan beton, donatı, betonarme, korozyon, korozyonun oluşum mekanizması ve aderans-kayma konuları hakkında genel tanımlamalar yapılmıştır.

3.1. Betonarme

Çekme dayanımı çok düşük olan beton bir malzemedен taşıyıcı bir yapı sistemi oluşturmak oldukça zordur. Bu durum göz önünde bulundurularak yapılan en iyi çözüm, betondaki çekme gerilmelerinin betonun içine yerleştirilen, donatı ile karşılanabilmesidir. Çelik donatı ve betonun birlikte çalışarak oluşturduğu kompozit malzemeye betonarme denir.

3.1.1. Beton

Beton yapı malzemesi; çimento, su, agrega ile birlikte gerekli olduğu durumlarda istenilen özelliklere uygun olarak belirli bir miktarda katkı maddelerinin kullanılmasıyla elde edilen bir malzemedir. Beton yapı malzemelerin ana yapısı çimento, su ve çeşitli boyutlarda elde edilmiş agregalardan oluşmaktadır (Demirel ve Yazıcıoğlu, 2007).

Yapılan hesaplamalarda betonun çekme dayanımı oldukça düşük olduğu için dikkate alınmamaktadır. Beton numunelere uygulanan aksel basınç deneyinin etkisindeki davranışını tahmin edebilen gerilme-birim uzama eğrileri için 150x300 cm boyutlarında kullanılan beton silindir numunelerine uygulanan basınç deneyi ile elde edilmektedir. Yapılan beton basınç deneylerinde uygulanan yükün silindir numunelerin yüzey kesit alanına bölünmesiyle basınç etkisiyle numunede oluşan gerilme kolay bir şekilde hesaplanmaktadır (Ersoy ve Özcebe, 2004).

Beton döküm sürecinde en önemli aşamalardan bir tanesi de kürlenmenin yapılmasıdır. Kür genel anlamıyla betonun istenilen düzeyde dayanım kazanabilmesi için çimentonun reaksiyona (hidratasyonu) girme sürecini devam ettirebilmek amacıyla beton numunelere uygulanan bir yöntemdir. Teknik açıdan çimento hamurunun üzerine ilave edilen su ile gerekli olan su ihtiyacının karşılanmasıyla betonda istenilen nem ve ortam

koşullarının sağlanmasıyla betonun istenilen dayanıma ulaşabilmesi için yapılan bir yöntemdir. Betonun istenilen dayanıma ulaşabilmesi için çimentonun su ile yapacağı hidratasyon reaksiyonları ile sağlanmaktadır. Betonun bünyesinde bulunan suyun azalmaması için kürün yapılması gereklidir. Yapılarda kullanılan beton yapı malzemesinin dayanımı beton üretiminde kullanılan çimentonun kalitesine, agregaların türüne, kullanılan karışımların oranlarına, üretimde kullanılan yöntem, beton dökümü esnasında uygulanan yöntem ve dökümden sonra betona uygulanan kür koşullarına bağlıdır. Ayrıca beton üretiminde çevresel faaliyetlerin oluşturmuş olduğu etkiler göz önünde bulundurulmalıdır. Betona yeteri kadar kür uygulanmamış ise betonun dayanımı yaklaşık olarak yüzde otuzlara kadar düşebilmektedir. Ancak betonun kalıcılığı (dürabilitesi) önemli oranlarda düşmektedir. Yani betonun hizmet ömrü boyunca istenilen dayanımının azalacağı anlamı taşımaktadır. Kür işlemi uygulanmamış beton elemanların dayanımının düşmesiyle betonun geçirimsizliği yaklaşık olarak on katta kadar artmaktadır. Betonun geçirimsizliğinin artması ile birlikte betonarme elemanlarda önemli oranlarda korozyonun oluşmasına yol açmaktadır (Taşdemir, 2002).

3.1.2. Betonarme donatı

Çelik donatı, betonarme bir yapının güvenliğini en iyi tanımlayan ve yapının uzun ömürlü olmasında en önemli etken olan bir malzemedir. Çeliğin hazırlanması ve montajı önemlidir. Çünkü çelik betonarme donatısı, yanlış uygulamalar sonucu yapıda önemli hasarlara neden olabilmektedir. Betonarme yapılarda çelik donatılar betonda meydana gelen çekme gerilmelerin rahat bir şekilde karşılanabilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Betonarme yapılarda kullanılan çelik donatılar değişik boy ve çaplarda üretilmektedir. Betonarme yapılarda kullanılan çelik donatılar TS 708 (2010) standartlarında belirtilen özelliklere göre üretilmekte ve sınıflandırılmaktadır.

Betonarme donatılar nervürlü ve düz yüzey özelliklerine göre beton ile oluşturdukları temel aderans bağ ilişkisi yönünden büyük önem taşımakta ve bu durum göz önünde bulundurularak değerlendirilmektedir. Nervürlü (dişli) yüzeye sahip olan betonarme donatılar aderans dayanımını önemli oranlarda artırmaktadır. Bu tür donatı çubukların yüzey bölgelerinde belirli açıyla yerleştirilen ve beton ile aderansı sağlayan nervürler (dişler) bulunmaktadır. Düz yüzeyli olarak üretilen betonarme donatılar ise yüzeylerinin

düz olmasıyla birlikte nervürlü betonarme donatılarla karşılaştırıldığında aderansı artırıcı herhangi etkileri bulunmamaktadır (Doğangün, 2002).

Betonarme donatıların dayanımı ile ilgili olarak akma dayanımları, karakteristik akma dayanımları ve çekme dayanım gibi mekanik özellikler yapılan hesaplamalarda kullanılmaktadır. Yapılan tez çalışması kapsamında TS 708 (2010) standart hükümlerine uygun olarak en düşük akma dayanımları 420 MPa ve en düşük çekme dayanımları ise 500 MPa olan nervürlü yüzey özelliklerine sahip betonarme donatılar kullanılmıştır.

3.2. Korozyon

Korozyon olayı, malzemelerin doğa ortamında bulunan en düşük enerjili durumları olan oksitli hollere geçmesi durumudur (Baradan vd. 2002). Ortamda bulunan metallerin birçoğu elementler şeklinde daha kararlı hollerde değildir. Uygun olan çevresel ortamlarda üzerinde taşıdıkları enerjiyi aktararak eski bileşenli hollerine dönmektedirler. Diğer bir yandan korozyon, malzemelerin bulunduğu ortam koşullarında kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda hasarlara uğraması durumudur. Malzemelerin korozyona uğraması sonucunda elde edilen ürüne pas ürünü denilmektedir. Korozyona maruz kalmış malzemelerde kütle kayıpların oluşmasıyla malzemelerin dayanımlarının düşmesine ve hizmet ömürlerinin azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca meydana getirdiği kimyasal reaksiyonlar sonucunda malzemelerin mekanik özelliklerinin değişmesine neden olmaktadır. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de betonarme bir yapı elemanının korozyon sonucunda uğradığı hasar gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Korozyon sonucu kiriş alt bölgesinde oluşan hasar (Erzincan, 2019).



Şekil 3.2. Korozyon sonucu giriş tüm yüzey bölgesinde oluşan hasar (Erzincan, 2019).

3.2.1. Betona gömülü donatı korozyonu

Betonarme yapıların inşasın da kullanılan çelik donatılar en sade halleriyle hava ve suyun bulunduğu ortamlarda meydana gelen olumsuz etkilerden dolayı önemli oranlarda zarar görmektedirler. Betonarme yapılarda kullanılan beton ise çelik donatının etrafını sararak donatının ortamda bulunan korozyonun zararlı etkilerine karşı önemli oranlarda koruyarak donatının görevini yerine getirmesine ve yapının ise hizmet ömrünü tamamlamasına imkân sağlamaktadır.

Betonarme donatıların suyun bulunduğu ortam koşullarında korozyona maruz kalmaları elektrokimyasal bir olaydır. Bu durumda elektrokimyasal olayların gerçekleşebilmesi içinde bazı temel koşullara ihtiyaç vardır. Eğer bu tür koşulların oluşmaması durumlarda korozyon süreci tamamlanmadan durur. Korozyon sürecinin devam etmesi için anot, katot reaksiyonları ve bu reaksiyonların oluşması sırasında elektron ve iyon alışverişini sağlanması gereklidir. Demir iletkenlikten iyonik iletkenliğe olan pozitif yüklerin geçişini gerçekleştiren oksitleyici elektrot reaksiyonlarına anodik reaksiyon denilmektedir. Donatı üzerinde gerçekleşen anodik reaksiyonu Denk. 3.1’de gösterilmektedir.



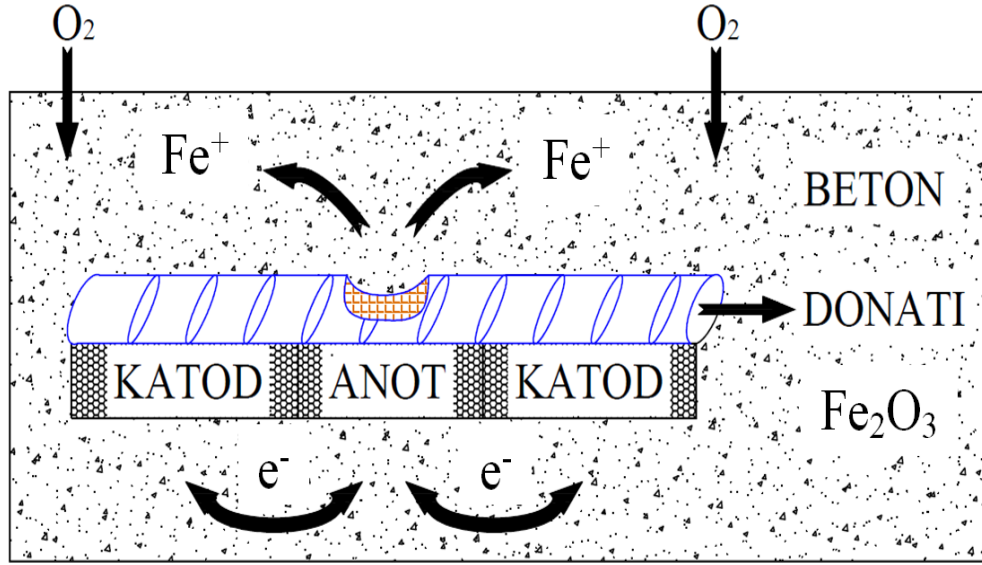
Donatıdan elektrolite negatif yüklerin geçtiği indirgenme reaksiyonuna katodik reaksiyon denilmektedir. Gerçekleşen katodik reaksiyon Denk. 3.2’de gösterilmektedir.



Demir paslanınca $Fe_2(OH)_2$ haline gelerek demir hidroksiti oluşturur. Denk. 3.3'te demir hidroksitin oluşum reaksiyonu gösterilmektedir.



Betona gömülü donatının korozyon oluşum mekanizması Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Betona gömülü donatıda gerçekleşen korozyon mekanizması.

Betonarme donatılarda oluşan korozyon betonun göstermiş olduğu direnç ile birlikte içerisindeki iyonların miktarına da bağlıdır. Beton içerisinde bulunan iyonların miktarı ne kadar fazla ise korozyonun oranı o kadar fazladır. Betonun göstermiş olduğu direnç korozyonun oluşma ihtimalini azaltmaktadır. Yapılarda korozyon oluşumuna sebep olan iki çeşit çevresel faktör mevcuttur. Bu çevresel faktörlerden biri karbonatlaşma ve bir diğeri ise klorür korozyonudur.

Betonarme yapılarda oluşan karbonatlaşma betonun en dış yüzeyinden başlayarak yapının veya yapı elemanının iç bölgesine kadar ulaşmaktadır. Havada bulunan karbondioksitin üretimde kullanılan çimento malzemesiyle suyun bulunduğu ortamlarda reaksiyona girmesiyle kalsiyum hidroksitin oluşmasıyla karbonatlaşma olayı gerçekleşmektedir. Karbonatlaşma olayının gerçekleşebilmesi için ortamda karbondioksit, nemli hava ve kalsiyum hidroksitin bulunması gereklidir. Karbonatlaşma

betonun yüzey bölgesinde hızlı bir şekilde başlayarak yapı elemanların iç bölgelerine kadar ilerledikten sonra giderek yavaşlamaktadır (Baradan vd. 2002). Yapı elemanında oluşan karbonatlaşma ile birlikte donatının hava ortamlarına açık bir duruma gelmesiyle paslanma süreci başlayacaktır. Betona gömülü donatılarda meydana gelen karbonatlaşma reaksiyonu Denk. 3.4'te gösterilmektedir.



Denk. 3.4'te betonun yapısında bulunan kalsiyum hidroksit atmosferde bulunan karbondioksit ile birleşerek kalsiyum karbonatı meydana getirmektedir. Bununla birlikte betonun pH değerini düşmektedir. Betonarme donatılarda meydana gelen zararlı etkiler oluşan klorür etkisinden dolayıdır. Betonarme donatıların üzerinde bulunan ve koruyucu görevi gören film tabakası ortamda oluşan klorür etkisinden dolayı zarar görmektedir. Oluşan bu klorür etkileşimi ile anot ve katotların arasındaki iyonların geçişi artmaktadır. Ortamdaki pH değerleri düşüren klorür iyonları asidik özellikleri artırmaktadır. Klorür etkisi ile demir ve hidroksitlerin ortamda sürekli bulunmasıyla meydana gelen korozyon olayı belirli süre boyunca devam etmektedir. Denk. 3.5'te oluşan klorür reaksiyonu verilmiştir.



Klorür iyonları betonda oluşan çatlakların olduğu kısımlardan donatıya ulaşarak korozyon mekanizmasını oluşturmaktadır. Beton üretiminde kullanılan klorür miktarı TS EN 206-1 (2000) standart hükümlerine uygun olarak kontrol edilmesi korozyon oluşumu açısından büyük önem arz etmektedir.

Mevcut yapı stoğu göz önüne alındığında yapısal güvenlik anlamında en büyük olumsuz sonuçlar korozyon sebebiyle kaynaklanmaktadır. Ülkemizde görülen düşük beton basınç dayanımı, yetersiz pas payı, uygun olmayan imalatlarda olumsuz etkilere zemin hazırlamaktadır Donatı korozyonu sonucu ortaya çıkan olumsuz sonuçlar başta donatının mekanik özelliklerinin değişmesi olmak üzere yapı elemanın taşıma kapasitesine de zarar vermektedir. Korozyon işlemi ile zamanla ortaya çıkan korozyon ürünü hacimsel artış yaparak donatıyı çevreleyen beton tabakasının etrafında gerilmeler

oluşturarak betonun çatlamasına sebep olmaktadır. Böylece beton ile donatı arasındaki aderans bağının zayıflamasına yol açmaktadır.

Yapıda oluşan korozyon yapının servis ömrünü tamamlamadan yıkılmasına veya yapının güçlendirilmesine neden olduğu bilinmektedir.

Korozyonun oluşmasına sebep olan temel faktörler:

- Ortamın nem oranının uygun koşullarda olmaması
- Üretimde kullanılan çimento türünün ve kalitesinin uygun olmaması
- Su çimento oranının istenilen düzeylerde olmaması
- Beton örtü (Pas payı) kalınlığının istenilen kalınlıkta olmaması
- Betonun pH değerinin istenilen değerlerde olmaması
- Ortam sıcaklığının istenilen düzeylerde olmaması
- Beton üretiminde kullanılan karışım oranlarının uygun olmaması
- Beton ile temas eden topraktaki organik maddelerin etkisi
- Betondaki çatlak sayısı ve genişliğinin fazla olması
- Kaçak elektrik akımların oluşumu şeklinde sıralanabilir.

3.2.2. Korozyon çeşitleri

Korozyonun oluşması pozitif yüklemeyi sağlayan anot ve negatif yüklemeyi sağlayan katotların dağılımına bağlı bir durumdur. Korozyon olayı metaller üzerinde farklı fiziki değişiklikler oluşturmaktadır. Başlıca korozyon çeşitleri üniform (genel), oyuklanma (çukur), galvanik (metal çifti) ve çatlak (aralık) korozyonudur.

Üniforma korozyon, donatı yüzeyin boyunca her taraftan eşit dağılım oluşturan korozyon türüdür. Burada korozyon hızının donatı boyunca her noktasında aynı hızla ilerlemekte ve bu durumla beraber oluşan kesit kaybı da her noktada aynıdır. Hasara uğramış yapılarda atmosferle temas içinde bulunan birçok metal üniforma korozyona maruz kalmaktadır. En az zarar oluşturan korozyon türüdür. Bu korozyon hasarına maruz kalmış metaller kırılmadan daha uzun süre kullanılmaktadır.

Çukur korozyonu bir diğer adıyla oyulanıma korozyonu metal malzemelerin yüzey bölgelerinin bazı kısımlarında oyuk şeklide çukurcuklar oluşturarak meydana gelen

korozyon çeşitlerinden biridir. Çukur veya oyuk korozyonu pasif özellik gösteren metaller olarak bilinen paslanmayan çelik ve alüminyum özellik taşıyan alaşımlardan oluşabilmektedir. Bu tür korozyonun oluşabilmesi için ortamda halojen iyonların olması gereklidir. Bu tür korozyon olaylarında anot ve katot bölgeleri bir birinden ayrı olarak tanımlanmıştır. Anot, metal yüzeyinin herhangi bir bölgesinde oluşan oyuk (çukur) içinde bulunan dar bir bölge olarak tanımlanmakta ve katot ise oyuğun çevresini kaplayan geniş bir alan olarak tanımlanmıştır. Korozyon sürecinin artmasıyla birlikte oyuğun giderek büyümesiyle metal malzemelerin o bölgelerinde kısa sürede delinmesine neden olacaktır. Oyulanıma korozyonu çok tehlikeli olan bir korozyon türüdür.

Ortamda yer alan iki metal malzemenin arasında bir potansiyel fark oluşmaktadır. Bu metallerin arasında elektronik veya elektrolitik iletkenlik olması durumunda, oluşan potansiyel fark elektron akımına neden olur. Korozyona daha az dayanıklı olan metalin (anot) korozyonu artarken diğer metalin (katot) korozyonu ise azalır. Bu tip korozyonlarda yüksek dayanıklı olan metal ya korozyona hiç uğramaz ya da çok az korozyona uğrar. Bu korozyon türüne metal çifti korozyonu da denir. Metaller arası potansiyel farkı ne kadar az olursa, korozyon o kadar az olur.

Çatlak (aralık) korozyonu, birbirine değmeyen, aralarında boşluk bulunan ve her iki yüzeylerin arasında bulunan oksijen değişiminin neden olmasıyla ortaya çıkmaktadır. Metal malzemelerin yüzeylerinde bulunan kılcal çatlaklar, dar yüzey aralıkları ve levhaların arasında bulunan boşlukların içine ortamda bulunan elektrolitlerin girmesi oldukça zordur. Belirtilen bu alanlar durgun özelliklere sahip bölgeler oluşturmaktadır. Bu tür bölgelerde meydana gelen korozyonun hızı oldukça fazladır. Çatlak korozyonu genel olarak aralık korozyonu olarak tanımlanmaktadır. Hemen hemen her türlü malzemede bu tür korozyon olayı oluşabilmektedir.

3.2.3. Hızlandırılmış korozyon işlemi

Normal koşullarda uzun sürede etkisini gösterecek korozyon olayının, kısa sürede gerçekleşebilecek biçimde tasarlanarak yapılan deneysel sistemlere hızlandırılmış korozyon yöntemi denilmektedir (ASTM-G15, 2004). Yapılan deneysel çalışma

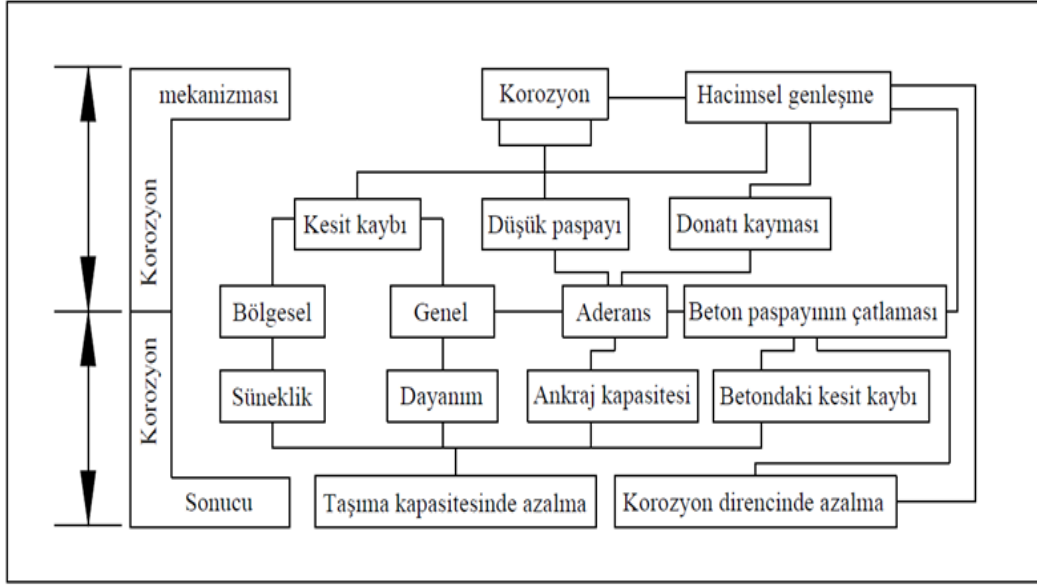
sürecinde istenilen korozyon seviyelerine ulaşılabilmesi için deney numunelerine hızlandırılmış korozyon yöntemi uygulanmıştır.

Daha önceki yıllarda yapılan deneysel çalışmalarda aynı ortam koşullarında korozyona maruz bırakılmış numuneler için doğal ortamda kendiliğinden oluşan korozyon ile hızlandırılmış korozyon mekanizması kullanılarak elde edilen korozyon arasındaki temel ilişki araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda elde edilen sonuçların doğrultusunda uygulanan her iki korozyon olayının da beton elemanların pas paylarının çatlaması sonucunda dökülmesine neden olduğu görülmüştür. Yapılan araştırma sonuçlarına göre her iki korozyon olayının benzer özellikler taşıdığı sonucuna varılmıştır (Bonacci, 1998).

Yapılan çalışmalarda kullanılan hızlandırılmış korozyon yöntemi, elektrokimyasal olarak her bir numunenin üzerine anot ve katot kutuplarının kullanıldığı bölgelere elektrik akımının düşük oranlarda uygulanmasıyla oluşan bir sistemdir. Tastani, (2004) tarafından daha önceki yıllarda yapılan çalışmada laboratuvar ortam koşullarında altı voltluk elektrik akımının numunelere uygulanmasıyla elde edilen korozyon oranlarının doğadaki ortam koşullarında oluşan korozyon oranlarıyla aynı oranda korozyon ürününün elde edildiği gözlenmiştir. Burada anlaşılacağı gibi laboratuvar ortamlarında altı voltluk elektrik akımının kullanılmasıyla doğal ortamlarda oluşan korozyon ile aynı oranlarda korozyon ürünü elde etmek için yeterli olduğu belirtilmektedir (Tastani, 2004).

Doğal ortamlarda oluşan korozyon olayını laboratuvar ortam koşullarında gerçekleştirebilmek için birçok çeşit deneysel yöntem kullanılmaktadır. Laboratuvar ortam koşullarında en çok kullanılan korozyon yöntemleri; ortamda bulunan ani sıcaklık ve nemli hava değişimine maruz bırakmak, yüksek oranda klorür çözeltisi ekleme, yüksek oranlarda oksijen ve karbondioksit çözeltisi ekleme gibi oldukça önemli olan yöntemler yer almaktadır. İstenilen korozyon oranının ne oranlarda olması gerektiği yapılacak korozyon yöntemlerinin iyi ve kolay bir yöntemin seçilmesine bağlıdır. Örneğim her hangi bir malzeme üzerinde karbonatlaşma etkisini inceleyebilmek için yüksek oranlarda karbondioksit çözeltisi, galvanik (aralıklı) korozyon mekanizmasını inceleyebilmek için ise ortamdaki sıcaklık, nemli ortam koşullarıyla birlikte yüksek oranlarda klorür çözeltisi kullanılmaktadır (Zhang, 2005).

Korozyona maruz kalmış betonarme bir yapı elemanının davranışını belirleyebilmek için kullanılan bu mekanizma büyük önem arz eden bir durumdur. Korozyona uğramış bir yapı elemanında hem kullanılan betonun hem de çelik donatının mekanik özelliklerine önemli oranlarda zarar vermektedir. Şekil 3.4'te Cairns vd. (1999) tarafından yapılmış hızlandırılmış korozyon mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Hızlandırılmış korozyon mekanizması (Cairns vd., 1999).

3.3. Aderans

Betonarme yapılarda beton ile çelik donatının birlikte çalışabilmesi için, beton ile çelik donatı arasında bir yapışma (bağ) özelliğinin olması gerekir. Burada belirtilen yapışma özelliğine kısaca aderans adı verilmektedir.

Bir yapı malzemesinin betonarme davranış gösterebilmesi için o yapıdaki beton ve donatının birbirine iyi bir biçimde kenetlenmesi gerekmektedir. Betonun donatıyı sargılaması sonucu, beton ile donatı arasında bir kayma gerilmesi oluşur. Kenetlenme sonucu oluşan bu gerilmelere aderans adı verilir (Ersoy, 1985).

Beton ile donatı arasındaki aderans, pek çok araştırmacı tarafından ilgi duyulan bir konu olmuştur. Çeşitli uygulamalar esnasında dayanımı yüksek olan çeliklere ait aderansın, klasik düz yüzeyli donatılardan çokta farklı olmadığı görülmüştür. Bu sebeple yeni tip çeliklerde, yüksek dayanım özelliğinden faydalanabilmenin yolları araştırılmaya

başlanmıştır ve beton ile donatı arasındaki sürtünmenin artırılması gerektiği anlaşılmıştır. Yüzeyinde girinti-çıkıntı olan demirler ile nervürlü donatı adını verdiğimiz demirlerin, aderansa sağladığı katkı fark edilmiş ve böylece günümüz betonarme donatı çeşidi olarak nervürlü donatı inşaatlarda yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır (Arda, 1968).

Nervürlü donatı, aderansın artmasına yardımcı olur. Aderans, nervürlü demir tercih edilmesi halinde oluşan mekanik kenetlenmeye, donatı ile beton arasında yaşanan sürtünmeye ve betonun donatıya yapışma mukavemetine bağlıdır (Beycioğlu, 2013).

Mekanik kenetlenme, sistemin hesaba katıldığı düzeye uygun biçimde sürtünme olarak kabul edilebilir. Betonun donatıya yapışmasından dolayı oluşan aderans direnci düşüktür; beton ile donatı arasındaki ayrılma baş gösterdiği zaman da tesiri çabucak yok olur. Fakat çelik çubuk çıkıntılarının taşıma tesirinden dolayı oluşturduğu eğik kuvvetler, beton ile çelik donatı çubuğu arasındaki kuvvet değişiminin sürekliliğine olanak vermektedir (İşsever, 2013).

Çoğunlukla aderansın, çimento harcı ile donatının düz yüzü arasındaki adezyon kuvveti nihayetinde oluştuğu tahmin edilse de küçük kuvvetler dahi bu yapışmayı sona erdirir ve donatı betondan sıyrılıp çıkar. Böyle bir sıyrılmanın oluşmasıyla birlikte sürtünme tesiri sonucunda aderans ortaya çıkar. Donatı yüzeyinin pürüzlülük durumu, sürtünmeden dolayı meydana gelen aderansı önemli oranlarda etkiler. Donatı ile beton arasındaki aderans donatı çeliğinin paslanmaya başlamasıyla pürüzlülikle beraber artar. Fakat bu pas nedeniyle bir korozyon tabakasının oluşması durumunda, çelik donatı çubuğun bu tabakadan çıkması daha rahat ve kolay gerçekleşeceği için aderansın kaybolmasına sebep olur. Yani az miktarda ki paslanma aderans üzerinde pozitif etki yaratırken, genel olarak donatı çeliğinin paslanması aderansın sona ermesine neden olmaktadır (İşsever, 2013).

Aderansın istenilen seviyede olması için aderans boyunun yeterli düzeyde bulunması lazımdır. Bu özelliği gösteren aderansa kenetlenme aderansı denir. Kenetlenmenin beklenen düzeyde olabilmesi için çelik donatı çubuğunun akma dayanımına erişmeli veya şekil değiştirme durumu meydana gelmesi halinde betonu yarmamalı ve betondan kolay bir şekilde sıyrılarak çıkmamalıdır (Ersoy ve Özcebe, 2001).

Betonarme yapı elemanlarında oluşan aderans, yapı elemanlarına uygulanan yüklerin durumuna göre iki farklı şekilde oluşmaktadır. Bunlardan ilki ankraj (dış) aderansı olarak bilinen ve betona gömülü olan çelik donatılarda basınç ve çekme etkisi oluşturan yüklemeler durumunda donatının beton içerisinden kolay bir şekilde kaymasını önleyebilen aderans çeşididir. Bir diğeri ise betonarme yapılarda çelik donatının kaymaya uğramamasıyla birlikte çekme ve eğilmeye çalışan ve beton ile çelik donatının birlikte çalışmasını sağlayan aderansa iç aderans adı verilmektedir. Ayrıca yapı elemanlarında oluşan çatlakların durumunu belirleyen aderans çeşididir. Nervürlü betonarme donatıların aderans dayanımı, nervürlü donatıların yüzeyini kaplayan betona karşı nervürlerin göstereceği taşıma kapasitelerine bağlı olan bir durumdur. Betonarme donatıların nervürlü yüzeyi boyunca beton ile donatı arasında oluşan sürtünme ile betonarme donatısının yüzeyinde bulunan dişler (nervürler) donatının betondan kolay bir şekilde kaymasını (sıyırılmasını) önleyerek aderans dayanımına olan katkısıyla önemli bir yer tutmaktadır (Yücel vd., 2006).

Betonarme yapı elemanlarında oluşan aderans gerilmeleri çelik donatıların yüzeylerine paralel olarak oluşmaktadır. Oluşan bu tür gerilmelere kayma gerilmeleri denilmektedir. Beton ile çelik donatı arasında oluşan aderans, beton ile çelik donatı arasında oluşan sürtünmeler ile karşılanmaktadır. Nervürlü betonarme donatılarda nervür dişleri dışında bulunan beton kılıfının etrafında oluşmaktadır. Düz yüzeyli betonarme donatılarda ise oluşan aderans gerilmeleri donatının yüzey bölgesinde oluşmaktadır. Böylelikle düz yüzeyli betonarme donatılarda aderans gerilmelerin kaybolmasıyla betonarme donatı betondan kolay bir şekilde ayrılarak sıyırılmaktadır. Nervürlü donatı çubuklarında ise donatıyı kaplayan beton kılıf parçası betondan ayrılarak kopmaktadır. Yani nervürlü betonarme donatılarında meydana gelen aderans problemi beton ile çelik donatı arasında oluşan çekme gerilmesi sorunlarına dönüşmektedir. Betonarme yapılarda oluşan çekme ve basınç dayanımların bir birine olan ilişkisi göz önünde bulundurulursa, betonarme yapılarda kullanılan beton sınıf değerinin artmasıyla aderans gerilmesinin giderek artacağı anlaşılmaktadır (Akman, 1992).

Genel olarak düz yüzey özelliklerine sahip olan betonarme donatıların çimento harcı ile oluşturdukları yapışma sonucunda ortaya çıkan aderans göz önünde bulundurulursa da oluşan bu zayıf etkilerle birlikte meydana gelen zorlanmalar, donatı ile beton arasındaki

yapışma özeliğini tamamen ortadan kaldırarak ve betonarme donatısının kolay bir şekilde betondan sıyrılmasına neden olacaktır. Burada donatı sıyrılmaların meydana gelmesiyle kayma ve sürtünmelerin etkisi ile birlikte yapışma özelliği taşıyan aderans da ortaya çıkmaktadır. Sürtünmelerin oluşturduğu etkiler sonucunda meydana gelen aderans betonarme donatıları yüzey özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Düz yüzeyli betonarme donatılar incelendiğinde yüzeylerinin düz olmasının yanı sıra bir miktar pürüzlülüğün olduğu görülmüştür. Betonarme donatının paslanmasıyla birlikte meydana gelen pürüzlülük özelliğiyle beton ile donatı arasında oluşan yapışma özelliğini sağlayan aderans giderek artmaktadır. Ancak meydana gelen paslanmanın pas tabakası oluşturarak betonun çatlamasıyla birlikte betonarme donatısının betondan kolay bir şekilde sıyrılmasını sağlayarak aderans dayanımının azalmasına neden olacaktır (Celep ve Kumbasar, 1998).

Betonarme yapılarda aderans dayanımı, çekme donatıların kenetlenme boyları ile ilişkilidir. Betonarme donatı çubuğunun betona gömülü olarak çekilerek çıkarılması oldukça zor olan bir durumdur. Aderans boyunun istenilen düzeylerde olmaması durumunda betonarme donatı çubuğunun yüzey özelliklerine göre betondan kolay bir şekilde sıyrılarak betonu parçalanmasına neden olmaktadır (Yücel vd., 2006).

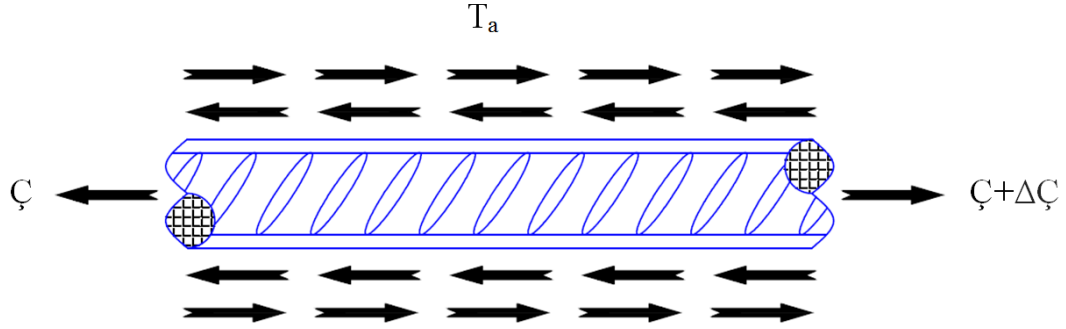
Betonarme yapı elemanlarında aderans boyunun istenilen düzeylerde olabilmesi için betonarme donatı akma gerilmesine ulaştığında veya donatı aktıktan hemen sonra belirli oranlarda şekil değiştirmelerin oluşmasıyla betonarme donatı betonu kolay bir şekilde yarmamalı ve betondan sıyrılmamalıdır (Ersoy ve Özcebe, 2004).

3.3.1. Aderans mekanizması

Beton ile donatı arasında birbirine paralel doğrultuda, göreceli olarak hareketlerine engel olan kuvvetlere aderans gerilmeleri denir. Bu gerilmelerin meydana gelmesi için beton ile donatının, birbirlerini karşılıklı olarak yer değiştirmeye zorlaması gerekmektedir.

Aderans kayması, ortaya çıkan bu aderans kuvvetleri etkisi altında betonarme donatısı ile betonun göreceli olarak birbirleri üstünden kaymasıdır. Betonda meydana gelen çatlak genişliklerinin atması, aderans kaymalarının arttığını göstermektedir. Eğer donatı

betondan kolay bir şekilde sıyrılmış ise kaymalar sınırsız bir duruma geçmiş ve betonarme elemanlarda aderans tamamen kaybolmuştur (Karataş, 2007). Şekil 3.5'te Karataş (2007) tarafından hazırlanan donatı çubuğu boyunca oluşan gerilme değişimi gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Donatı çubuğu boyunca oluşan gerilme değişimi (Karataş, 2007).

Şekil 3.5'te görüldüğü gibi, çelik donatı çubuğun bir ucundan diğer bir ucuna doğru gerilme değişimi meydana geldiğinden, çelik donatının dengede durmasını sağlayan donatı etrafında oluşan kayma gerilmeleridir. İşte bu kayma gerilmelerine aderans gerilmeleri denilmektedir (Karataş, 2007).

Beton ve çelik donatı arasındaki gerilme değişimi iki yapı malzemesi arasındaki aderans özelliklerine bağlı olan bir durumdur. Aderans gerilmesi; çatlak genişliklerini, betonarme elemanların doluşturduğu yer değiştirmelerini, aynı zamanda betonarme donatı ve ek yeri boylarını belirlemektedir (Desnerck vd., 2010).

3.3.2. Aderansa etki eden temel faktörler

Aderans dayanımına etki eden pek çok temel faktör vardır. Hem kullanılan malzemeler hem bu malzemelerden dolayı oluşan çeşitli kuvvetler ve daha birçok sebep, aderans dayanımını gerek arttırıcı yönde gerekse azaltıcı yönde etkilemektedir. Bu nedenle bütün bu temel faktörler göz önüne alınarak betonarme elemanlarda aderans dayanımı ile ilgili hesapların yapılması gerekmektedir. Yapılan hesaplamalar doğrultusunda, istenilen tasarımın uygulamaya konulması çok daha kolay olacaktır.

Aderans dayanımına etki eden temel faktörler şu şekildedir:

- Betonun çekme mukavemetinin istenilen düzeylerde olmaması aderans dayanımını olumsuz yönden etkilemektedir. Ayrıca üretimde kullanılan betonun kalitesi de aderans dayanımını önemli oranlarda etkilemektedir.
- Daha önceki yıllarda yapılan çalışmalar sonucunda betonarme donatısında oluşan akma gerilmelerin aderans dayanımını önemli oranlarda etkileyen faktörlerden biri olduğu anlaşılmıştır.
- Betonarme donatısının yüzey özellikleri (nervürlü ve düz) aderans dayanımını önemli oranlarda etkileyen temel faktörlerdendir.
- Betonarme donatıların çapı özellikle nervürlü çelik donatılar için çok daha önemli olduğu yapılan deneysel çalışmalarda anlaşılmıştır. Burada nervürlü çelik donatıların aderans dayanımına olan katkısının çok büyük olduğu anlaşılmaktadır.
- Aderans boyu ile aderans gerilmesi arasında ters bir ilişki söz konusudur. Aderans boyunun yeterli olup olmadığı durumlar aderans dayanımını önemli oranlarda etkilemektedir.
- Beton örtüsü (pas payı) özellikle nervürlü (dişli) betonarme donatılarda çok önemli etkiler oluşturmaktadır. Yetersiz pas payı aderans dayanımını önemli oranlarda etkiler.
- Korozyonun betonarme donatısı üzerinde oluşturduğu kesit kaybı aderans dayanımını önemli oranda etkilemektedir.
- Betonarme yapılarda kullanılan enine sargı (etriye) donatısı, aderans dayanımını önemli oranlarda artırmaktadır.
- Betonarme donatısının betona yerleştirilmesi sırasındaki donatının yeri etkili olmaktadır. Özellikle kullanılan kalıp yüzeyine yakın yerleştirilen donatıların mukavemetinin çok daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bunun temel nedeni üst donatıların altında biriken hava kabarcıkları ve beton dökümü ile piriz alma süresi arasında oluşan çökmelerdir.
- Beton üretiminde kullanılan agreganın türü, çimentonun kalitesi ve istenilen özelliklere göre ilave edilen katkıları aderans dayanımını önemli oranlarda etkilemektedir. Örneğin çakıl agregalar kullanılarak üretilen betonun aderans dayanımı kırma taş agregaları kullanılarak üretilen betona göre oldukça düşüktür (Bazant ve Planas, 1998).

4. MATERYAL ve YÖNTEM

TÜBİTAK 3501 (116M162) projesi kapsamında gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmanın bu bölümünde TS 500 (2000) standart hükümlerine göre üretilmiş olan tam ölçekli betonarme kolon numunelerin üretim sürecinde kullanılan malzemelerin özellikleri, tasarım sürecinde kullanılan elemanların kesit özellikleri, numunelere uygulanan hızlandırılmış korozyon yöntemi, yükleme sistemi ve ölçüm düzenekleri ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Detaylı olarak açıklanan bu bilgilendirmelerin daha anlaşılır olmasıyla birlikte gelecekte yapılacak çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

4.1. Betonarme Kolon, Kiriş ve Temel Elemanların Malzeme Özellikleri

Yapılan tez çalışmasının bu bölümde çalışma kapsamında tasarlanan tam ölçekli betonarme kolon, kiriş ve temel numunelerin üretiminde kullanılan beton ve çelik donatıların malzeme özelliklerinden bahsedilmiştir.

4.1.1. Beton

Tez çalışması kapsamında C30 beton basınç dayanımına sahip hazır beton kullanılmıştır. Aynı malzeme ve kesit özelliklerine sahip 5 adet tam ölçekli betonarme kolon numuneler üretilmiştir. Üretilen betonarme numunelerin beton döküm işleri aynı gün ve saatlerde gerçekleştirilmiştir. Beton dökümü uygun hava koşullarında yapılmıştır. Tablo 4.1’de Bu çalışma kapsamında betonarme kolonların üretiminde kullanılan betonun karışım hesabında kullanılan değerler verilmiştir.

Tablo 4.1. Deneysel çalışmada kullanılan betonun karışım değerleri (1 m³ için).

Betonun karışım bileşenleri	C30/37
Su/çimento oranı (%)	0.58
Su (kg/m ³)	182
Çimento (kg/m ³)	314
İri agregası (kg/m ³)	980
İnce agregası (kg/m ³)	690

Şekil 4.1’de gösterildiği gibi tam ölçekli betonarme kolon numunelerin beton basınç dayanımlarını tahmin edebilmek için beton döküm işleri sırasında aynı sayıda alınan silindir ve küp numunelerine beton basınç deneyleri uygulanmıştır. Yapılan dayanım deneyleri sonucunda 28 günlük silindir numunelerin ortalama beton basınç dayanımı 37.46 MPa ve küp numunelerin ortalama beton basınç dayanımı ise 46. 83 MPa olarak hesaplanmıştır.



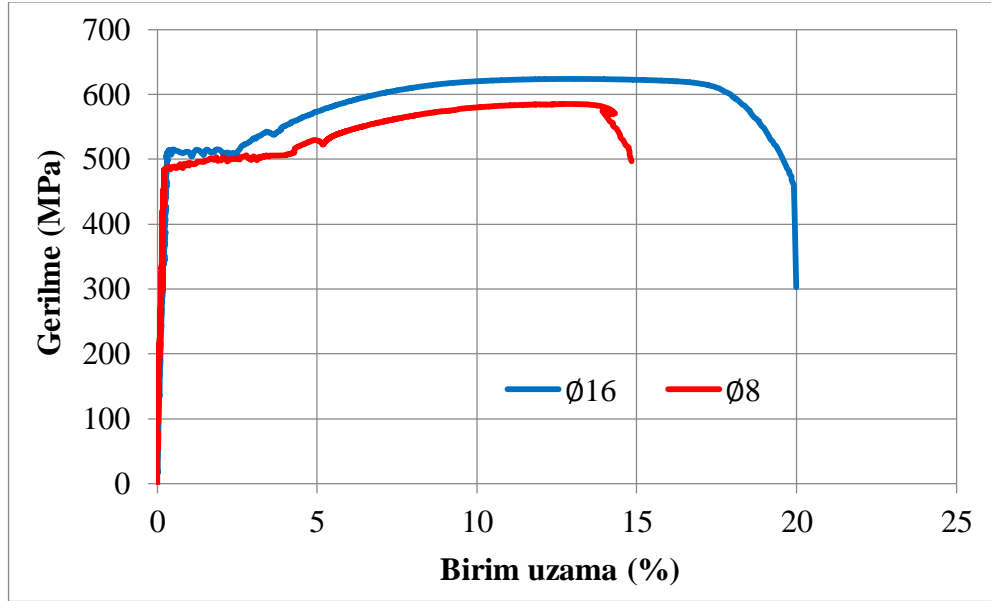
Şekil 4.1. Silindir ve küp numunelerin beton basınç deneyleri.

4.1.2. Donatı

Yapılan çalışma kapsamında üretilen betonarme kolon numunelerin boyuna ve sargı donatıları için TS 708 (2010) standart hükümlerine uygun olarak nervürlü yüzey özelliklerine sahip olan nervürlü betonarme donatısı kullanılmıştır. Betonarme kolon numunelerin tasarımı ve üretiminden önce üretimde kullanılan betonarme çelik donatıların istenilen dayanımlara sahip olup olmadığını anlayabilmek için Şekil 4.2’de gösterildiği gibi TS 708 (2010) standart hükümlerine uygun olarak donatı çekme deneyleri yapılmıştır. Yapılan çekme deneylerinde 600 kN çekme kapasiteye sahip mekanik donatı çekme cihazı kullanılmıştır. Yapılan çekme deneyleri öncesinde tüm donatıların çapları kumpas yardımıyla ölçülerek elde edilmiştir. Şekil 4.3’te gösterildiği gibi donatı çekme deneyleri ile her bir donatı için gerilme-birim uzama ilişkileri elde edilmiştir. Yapılan çekme deneyleri sonucunda elde edilen donatıların mekanik özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Betonarme donatılarına uygulanan donatı çekme deneyi.



Şekil 4.3. Betonarme donatıların gerilme-birim uzama sonuçları.

Tablo 4.2. Çekme deneyleri sonucunda elde edilen donatıların mekanik özellikleri.

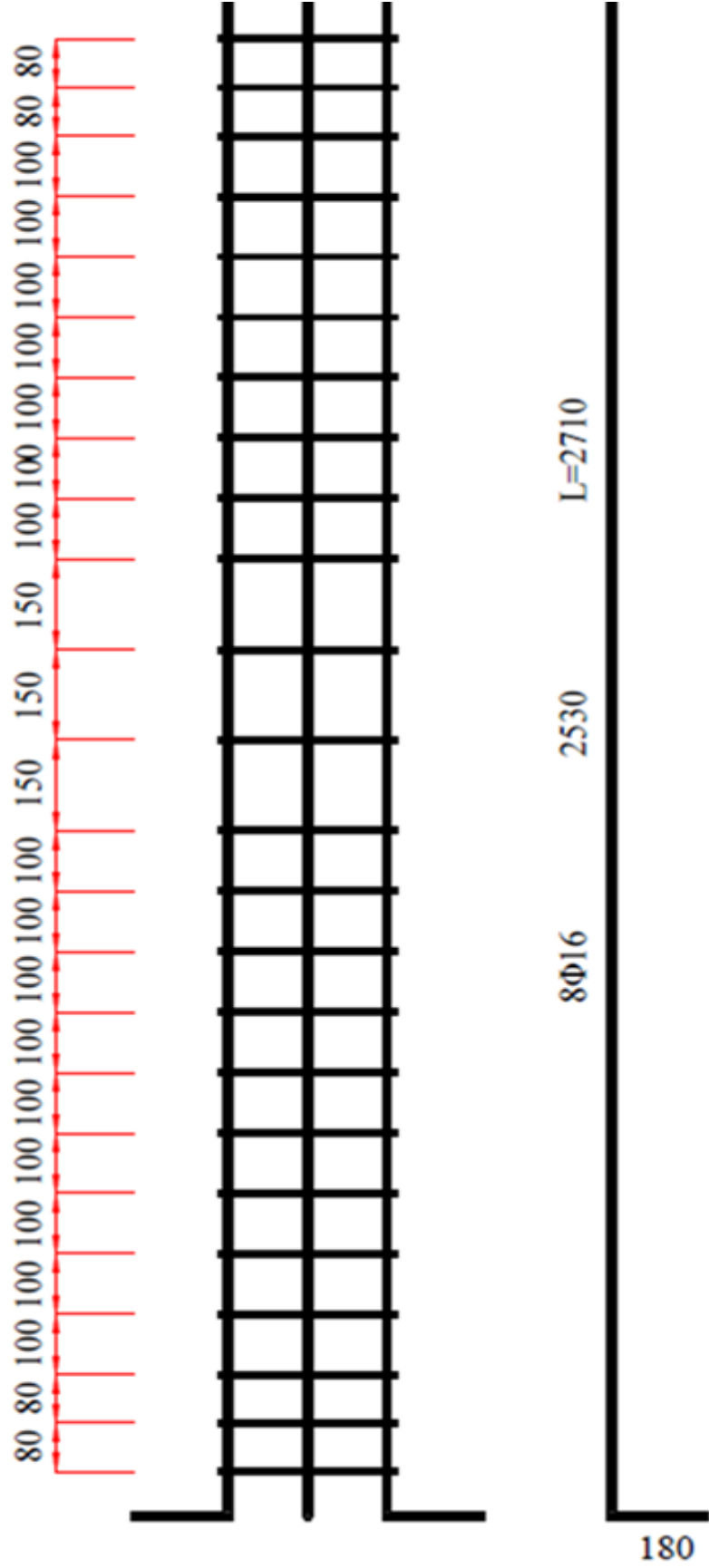
Malzeme (S420)	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Akmadaki Uzama (%)	Kopmadaki uzama (%)	Elastisite Modülü (GPa)
Ø8	492.54	585.29	0.7143	14.62	194.472
Ø16	515.18	623.78	0.5015	19.88	189.441

4.2. Betonarme Kolon, Kiriş ve Temel Elemanların Kesit Özellikleri

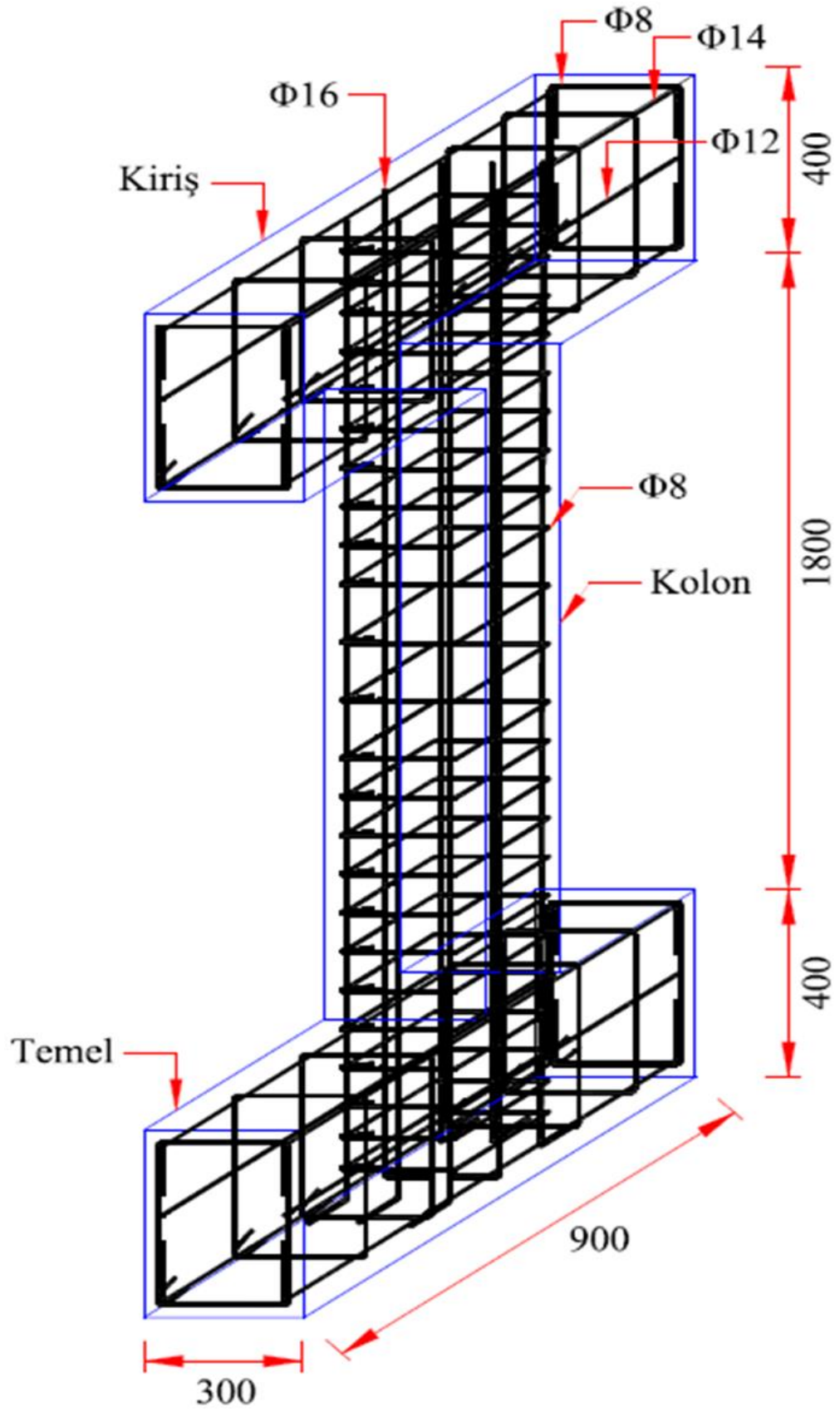
Bu bölümde tez çalışması kapsamında üretilen betonarme numuneler için daha önceden tasarlanan planda belirtilen kolon, kiriş ve temel betonarme elemanların kesit özelliklerinden bahsedilmiştir.

4.2.1. Betonarme kolonların kesit özellikleri

TÜBİTAK 3501 (116M162) projesi kapsamında yapılan çalışmada aynı malzeme ve kesit özelliklerine sahip 5 adet geleneksel yöntemlere bağlı olarak tasarlanan tam ölçekli betonarme kolon numuneler üretilmiştir. Deneyleri gerçekleştirilen betonarme kolon numunelerinin kesit özellikleri Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Betonarme kolonların temel üst seviyesinden kiriş alt seviyesine kadar olan net açıklığı 1800 mm olup temel alt seviyesinden kiriş üst seviyesine kadar olan açıklığı 2600 mm'dir. Üretilen tam ölçekli betonarme kolon numunelerin tümü aynı kesit özelliklere sahiptir. Betonarme kolon numunelerin kesitleri 300x300 mm ve yükseklikleri ise 1800 mm olarak tasarlanmıştır. Betonarme kolon donatı kafeslerinin montajı için TS 500 (2000) standart hükümlerine uygun olarak nervürlü yüzey özelliklerine sahip 16 mm çapında 8 adet boyuna donatı ve 8 mm çapında 18 adet iki ucu kancalı olan sargı (etriye) donatısı yapılan tasarım planına göre kullanılmıştır. Projelendirilmesi yapılan betonarme kolonların üretiminde kullanılan ve koruyucu görevi gören beton örtüsü (pas payı), beton dış yüzey bölgesinden betonarme donatısının merkezine olan mesafesi 35 mm olarak yapılmıştır.



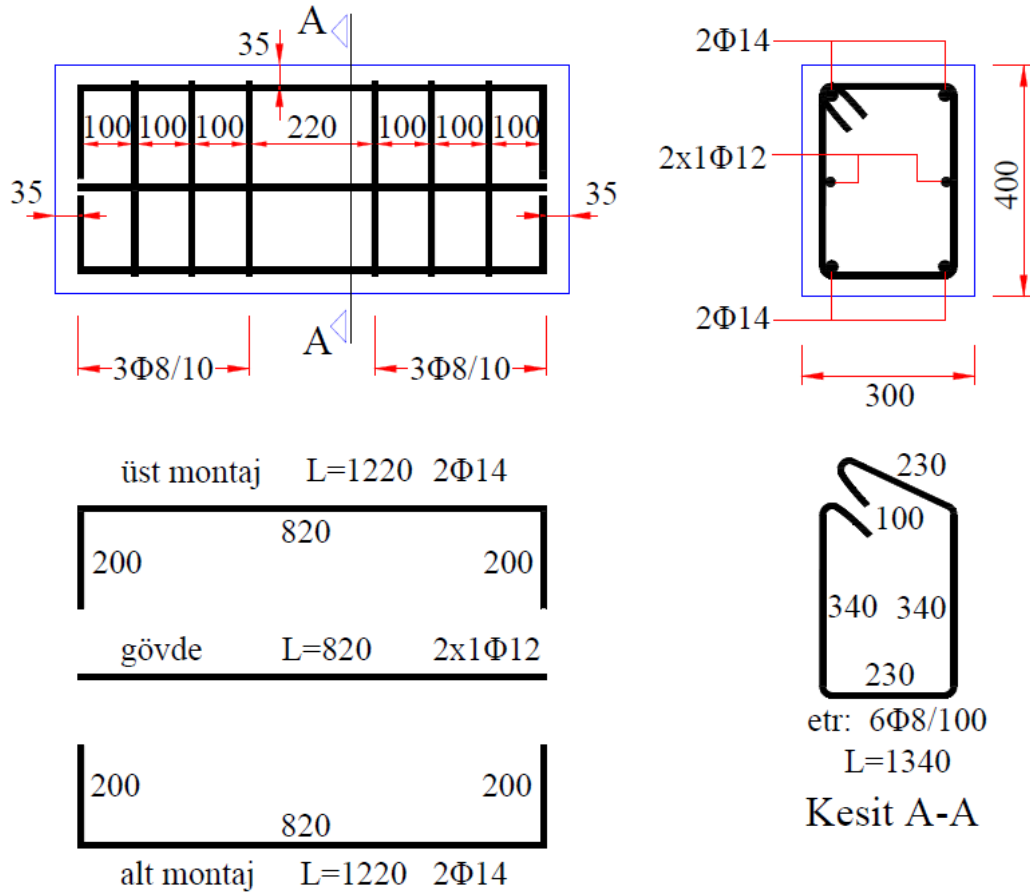
Şekil 4.4. Betonarme boyuna ve sargı donatılarının tasarım planındaki yerleşimi.



Şekil 4.6. Betonarme kolonlarının tasarlanan plandaki üç boyutlu kesit özellikleri.

4.2.2. Betonarme kiriş ve temellerin kesit özellikleri

Yapılan bu çalışmada C30 beton basınç dayanımına sahip 5 adet geleneksel yöntemlere bağlı olarak tasarlanan tam ölçekli betonarme kolon numuneler için kiriş ve temeller üretilmiştir. Deneyleri gerçekleştirilen betonarme kiriş ve temel numunelerin kesit özellikleri özdeş olup Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Betonarme kiriş ve temellerin net uzunluğu 900 mm, genişlikleri 300 mm ve yükseklikleri 400 mm olarak tasarlanmıştır. Kiriş ve temel donatı kafeslerin montajı için TS 500 (2000) standart hükümlerine uygun olarak nervürlü yüzey özelliklerine sahip 14 mm çapında 4 adet montaj donatı, 12 mm çapında 2 adet gövde donatı ve 8 mm çapında 6 adet sargı donatısı kullanılmıştır. Projelendirilmesi yapılan betonarme kiriş ve temel elemanların üretiminde kullanılan ve koruyucu görevi gören beton örtüsü, beton dış yüzey bölgesinden betonarme donatısının merkezine olan mesafesi 35 mm olarak yapılmıştır.



Şekil 4.7. Tam ölçekli betonarme kiriş ve temel elemanların kesit özellikleri.

4.3. Betonarme Donatı İşleri

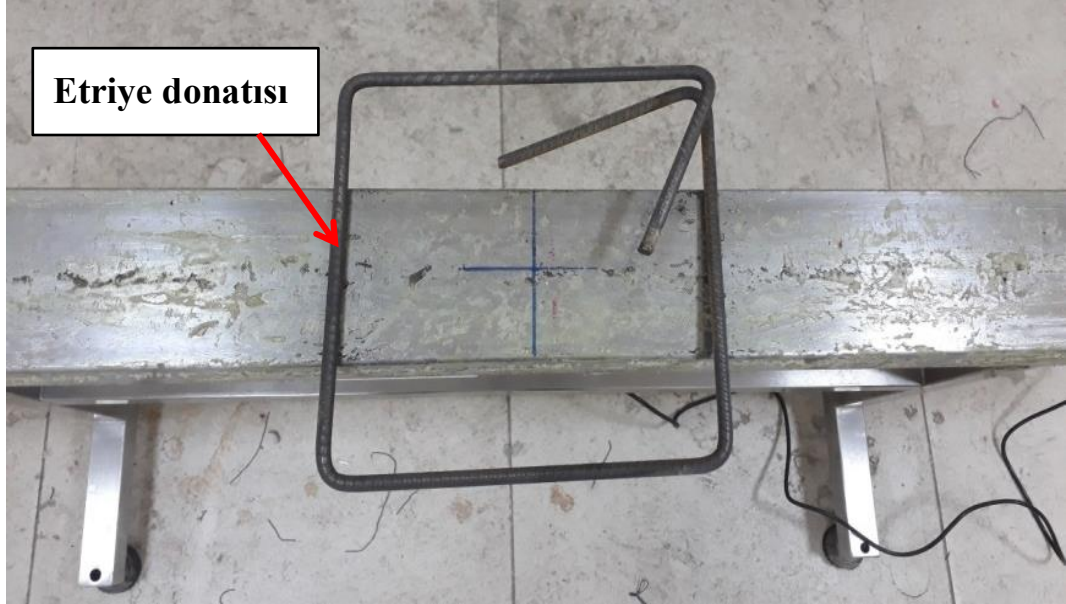
Tez çalışması kapsamında üretilen 5 adet tam ölçekli betonarme kolon numunelerinin donatıları TS 500 (2000) standart hükümleri esas alınarak daha önce tasarlanan planda belirlenen ölçülerde kesilmiştir. Tasarlanan plana uygun olarak kesilen betonarme donatılar Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



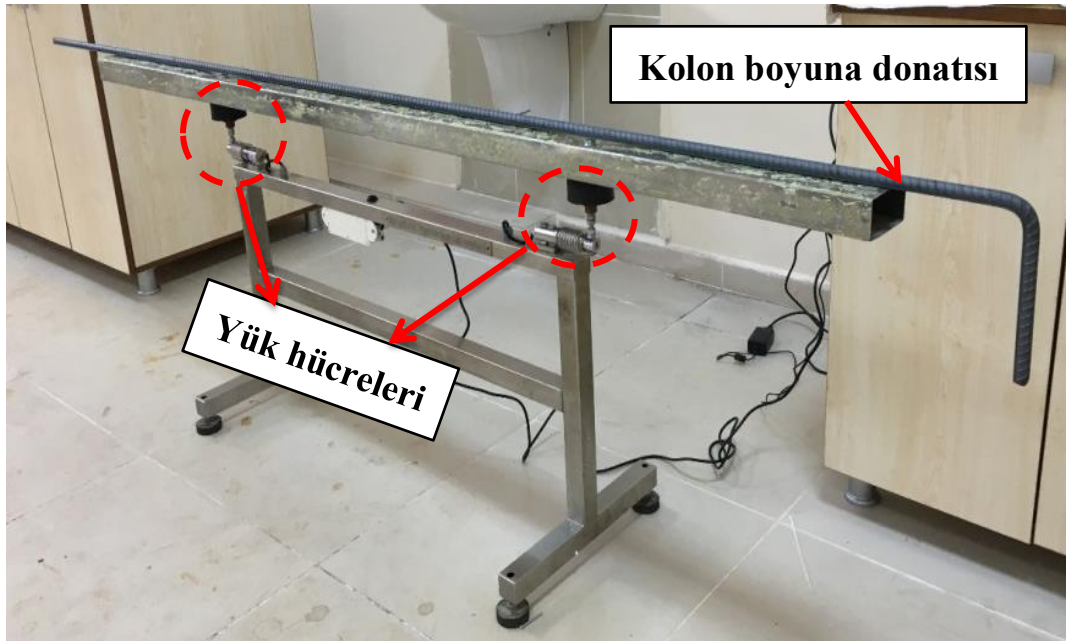
Şekil 4.8. Tasarım planına uygun olarak kesilmiş kolon, kiriş ve temel donatıları.

Betonarme donatıların kesim işlemlerinin tamamlanmasından sonra tartım işlemine geçilmeden önce donatıların ilk ağırlıklarını etkileyecek toz, toprak ve donatı parçacıkları gibi atıklar tel fırça kullanılarak tüm boyuna ve sargı (etriye) donatılarından arındırılmıştır. Betonarme donatıların mekanik temizleme işlemlerinden sonra tüm boyuna ve sargı donatıların ilk kütlelerini belirleyebilmek için 0.05 g duyarlılığa sahip olan ve her iki ucunda yük hücreli olan hassas tartım terazisi kullanılmıştır. Şekil 4.9’da tez çalışması kapsamında betonarme kolon elemanlarının enine sargı donatıları için

yapılan tartım işlemi ve Şekil 4.10'da ise betonarme kolonların boyuna donatıları için yapılan tartım işlemi gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Betonarme kolon elemanlarının enine sargı (etriye) donatılarının tartılması.



Şekil 4.10. Betonarme kolon elemanlarının boyuna donatılarının tartım işlemi.

Betonarme donatıların tartım işlemi kontrollü bir şekilde yapılarak tamamlandıktan sonra donatıların ilk kütleleri elde edilmiştir. Betonarme donatıların paslandırma işlemi öncesi elde edilen ilk kütleleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

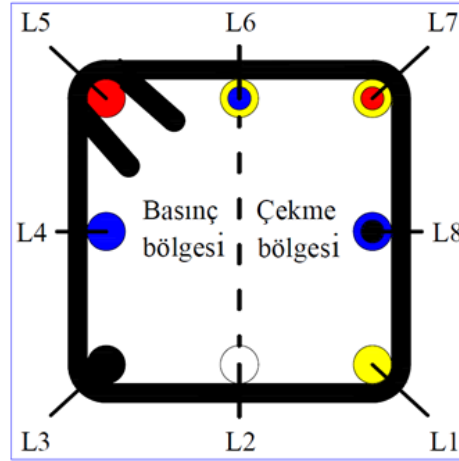
Tablo 4.3. TÜBİTAK 3501 (116M162) projesi kapsamında üretilen tam ölçekli betonarme kolon donatılarının korozyon öncesi elde edilen ilk kütleleri (g).

N/A_c. f_{ck}= %20					
Kod	C1	C2	C3	C4	C5
	CL_T= %0.00	CL_T= %2.00	CL_T= %2.79	CL_T= %5.65	CL_T= %8.52
L₁		4059.5	4022.0	4084.0	4142.0
L₂		4060.0	4018.0	4027.5	4118.0
L₃		4068.0	4072.0	4038.5	3997.0
L₄		3984.0	4016.5	3988.0	4041.0
L₅		4059.5	4057.5	4018.0	4009.0
L₆		4117.5	4096.0	4112.0	3977.5
L₇		4104.0	3959.5	4160.5	4108.5
L₈		4036.0	4026.0	4043.0	4036.5
S₁		446.5	433.5	461.5	442.0
S₂		443.5	448.5	449.5	429.0
S₃		471.0	457.0	460.0	445.0
S₄		453.5	461.0	451.0	449.0
S₅		422.5	464.0	442.5	462.5
S₆		448.0	444.5	444.5	437.5
S₇		477.0	471.0	441.5	438.5
S₈		491.0	460.0	441.5	460.0
S₉		456.0	446.0	442.5	445.5
S₁₀		419.5	448.0	446.5	443.5
S₁₁		434.5	445.5	432.0	424.5
S₁₂		451.5	460.0	431.0	442.5
S₁₃		451.0	431.5	451.0	467.0
S₁₄		464.0	445.5	437.0	440.5
S₁₅		444.0	442.5	426.0	449.0
S₁₆		443.0	467.0	442.0	439.0
S₁₇		456.0	445.5	463.5	441.0
S₁₈		452.0	428.5	449.0	488.5

KOROZYONA MARUZ BIRAKILMAYAN BETONARME KOLON

Verilen Tablo 4.3'te L_{1-8} (g) 8 adet boyuna donatının ilk kütlesini, S_{1-8} (g) 18 adet triye donatısının ilk kütlesini ve CL_T (%) ise korozyon oranlarını temsil etmektedir.

Kolon boyuna ve sargı donatı sayılarının fazla olması ve çalışmanın temelini oluşturan donatıların ilk ve son kütlelerinin tartım işlemlerinin doğru bir şekilde yapılabilmesi için her bir betonarme kolonun boyuna ve sargı donatıları tartım öncesi ve sonrasında kodlandırılmıştır. Kodlama aşamasında olası hataları en aza indirmek için önceden belirlenen ve renklendirilen bakır kablolar kolon boyuna donatılarına sarılmıştır. Şekil 4.11'de her bir betonarme kolon için kullanılan renk kodlamaları için tasarlanmış kodlama planı ve Şekil 4.12'de ise hazırlanan renklendirilmiş bakır kablolar ve bakır kabloların boyuna donatılara sarım işlemleri gösterilmektedir.



Şekil 4.11. Betonarme kolon donatıları için hazırlanan renkli kodlama planı.



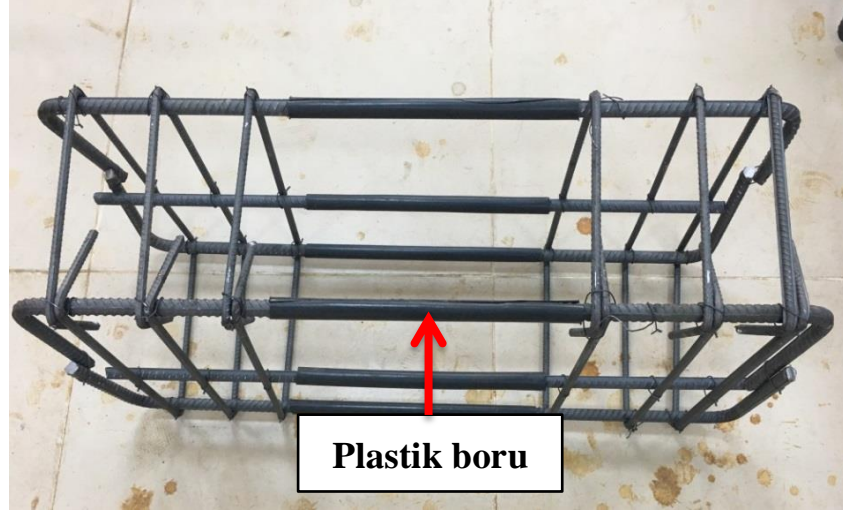
Şekil 4.12. Betonarme kolon donatıları için hazırlanan renkli kodlama kabloları.

Ayrıca daha önceden deneysel çalışma için renkli kodlama planına göre hazırlanan renkli kodlama kablolarının betonarme kolonların boyuna donatılarına bağlanması işlemi Şekil 4.13'te gösterilmektedir.



Şekil 4.13. Betonarme kolon boyuna donatılarına renkli kodlama kablolarının bağlanması.

Şekil 4.11'de gösterilen renkli kodlama planına göre tüm betonarme kolonlar aynı şekilde montajı yapılmış ve böylelikle gerinim ölçerlerin her bir kolon numunesi için aynı bakış açısında yerleştirilmesi ve ilgili donatıdaki gerçek korozyon oranının doğru bir şekilde bulunmasına olanak sağlamıştır. Her ne kadar tüm donatılardan elektrik akımının geçirilmesi sağlansa da gerinim ölçerlerinin yapıştırıldığı boyuna donatıdaki korozyon oranının tespit edilmesi (boyuna donatılarda farklı korozyon oranlarının oluşma ihtimaline karşın) ve sonuçların daha iyi bir şekilde değerlendirilebilmesi açısından önemlidir. Çalışma kapsamında betonarme kiriş ve temellerin korozyona maruz kalmamaları için kolon donatılarının kiriş ve temel donatı kafeslerine temas ettiği bölgeler PVC plastik borular ve elektrik bandı ile kontrolü bir şekilde sarılmıştır. Plastik boruların alt yüzeyleri yine elektrik akımının kesintiye uğratılabilmesi için elektrik bandı ile sarılmıştır. Beton dökümü sırasında plastik boruların içine sızabilecek suyun önlenmesi amacı ile plastik boruların üstü üçüncü kez elektrik bandı ile sarılarak yalıtım işlemi tamamlanmıştır. Bu işlem 5 adet betonarme kolon numuneler için üretilen kiriş ve temel donatıları için uygulanmıştır. Betonarme kiriş ve temel elemanların boyuna ve sargı donatılarına uygulanan yalıtım işleri Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da gösterilmektedir.



Şekil 4.14. Betonarme donatılarına plastik boruların yerleştirilmesi.



Şekil 4.15. Donatılara yerleştirilen plastik boruların elektrik bandı ile bantlanması.



Şekil 4.16. Yalıtım işlemleri tamamlanmış betonarme donatılarının montajı.

Kodlama işlemi tamamlanan betonarme kolon numunelerin boyuna ve sargı donatılarının montaj işlemine geçilmiştir. Şekil 4.19’da kiriş, temel donatılarının ve Şekil 4.20’de ise betonarme kolon boyuna ve sargı donatılarının montaj işlemleri gösterilmektedir.



Şekil 4.19. Betonarme kiriş ve temel donatılarının bağlanması.



Şekil 4.20. Betonarme kolon boyuna ve sargı donatılarının bağlanması.

Donatı bağlama ve yalıtım işlerinin sonra betonarme kolonlarında paslandırma aşamasında pozitif iletkenliği sağlayacak bakır kabloların imalatına geçilmiştir. Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de pozitif iletkenliği sağlayacak bakır kablolar tüm betonarme kolonların 8 adet boyuna ve 18 adet enine sargı donatılarının her biri için ayrı olarak bağlanmıştır. Kolon boyunca uzatılan diğer bir kablo ise tüm enine sargı donatılarına tam temas sağlayacak şekilde birbirlerine sıkı bir şekilde bağlanmıştır. Bakır kabloların beton yüzeyinden çıkan kısımları plastik aksamından sıyrılmayarak su içerisinde kalacak olan betonarme kolon donatılarına elektrik akımının aktarılmasını sağlamıştır. Tüm donatılarda mümkün olduğunca eşit düzeylerde korozyon oranlarının elde edilebilmesi ve beton içinden geçen akımın daha iyi iletilebilmesi için boyuna ve sargı donatılarının köşe bölgelerinde bağ teli olarak bakır kablolar kullanılmıştır.



Şekil 4.21. Betonarme kolon boyuna donatılarına bakır kabloların bağlanması.



Şekil 4.22. Betonarme kolon sargı donatılarına bakır kabloların bağlanması.

Şekil 4.22’de gösterildiği gibi kolon boyunca sargı donatılarına bağlanan bakır kabloların iki sargı donatısı arasında kalan kısımları için bakır kabloların plastik koruyucu kaplamaları soyulmamıştır. İş gücü ve zaman bakımından oldukça emek isteyen bu aşamada; mümkün olduğunca iletilen akımın donatıdan donatıya geçmesi hedeflenmiş ve en kısa yolu izleyebilecek akımın betondan çıkışı engellenmeye çalışılmıştır. Donatı bağlama, kolon, kiriş ve temel montaj işlemlerinin ardından son bir kez renk kodlamaları kontrol edilerek betonarme kolonları beton dökümü için hazır hale getirilmiştir. Şekil 4.23’te aynı beton basınç dayanımı ve %20 eksenel yük için montajı tamamlanan 5 adet tam ölçekli betonarme kolon numuneler gösterilmektedir. Donatı bağlama işlerinin tamamlanmasından sonra sırasıyla kolon numuneler için kalıp montaj ve beton döküm işlerine geçilmiştir.



Şekil 4.23. Montajı tamamlanmış betonarme kolon numunelerinin donatı kafesleri.

4.4. Kalıp Montaj İşleri

Tez çalışması kapsamında betonarme kalıpların montajında su yalıtımlı Plywood kalıpları kullanılmıştır. Kalıp üretiminde kullanılan Plywood kalıpları donatı kafeslerine tasarım planında belirtilen ölçülerde kesilerek montajları yapılmıştır. Betonarme kolon donatı kafeslerin kalıplara yerleştirilmeden önce kalıpların iç kısımları tahta parçası gibi zararlı maddelerden temizlenmiştir. Daha düzgün beton yüzeyi elde etmek, kalıbın su emmesini önlemek ve kalıp sökümünü kolaylaştırmak için kalıpların tüm iç yüzeyleri

kalıp yağı ile yağlanmıştır. Şekil 4.24'te betonarme kolon numuneler için yapılan kalıp montaj işlemleri ve Şekil 4.25'te ise montajı tamamlanmış betonarme kalıplara kolon donatı kafeslerinin yerleştirilmesi işlemi gösterilmektedir.



Şekil 4.24. Kolon numuneler için montajı yapılan betonarme kalıplar.



Şekil 4.25. Montajı tamamlanmış kalıplara donatı kafeslerin yerleştirilmesi.

4.5. Beton Döküm İşleri

Tez çalışması kapsamında yapılan bu çalışmada TS 500 (2000) standart hükümlerine uygun olarak beton döküm işleri yapılmıştır. Beton döküm işleri için hiçbir katkı maddesi kullanılmadan tek seferde gerçekleştirilmiştir. Beton döküm işleri sırasında

betonun tüm donatıların arasına ve kalıp köşelerine boşluk kalmayacak şekilde yerleşmesini sağlamak için TS 1247 (1984) standart hükümlerine uygun olarak vibratör uygulanmıştır. Şekil 4.26'da beton döküm işlemi ile vibratör uygulanması ve Şekil 4.27'de ise beton dökümü tamamlanmış kolon numuneler gösterilmektedir.

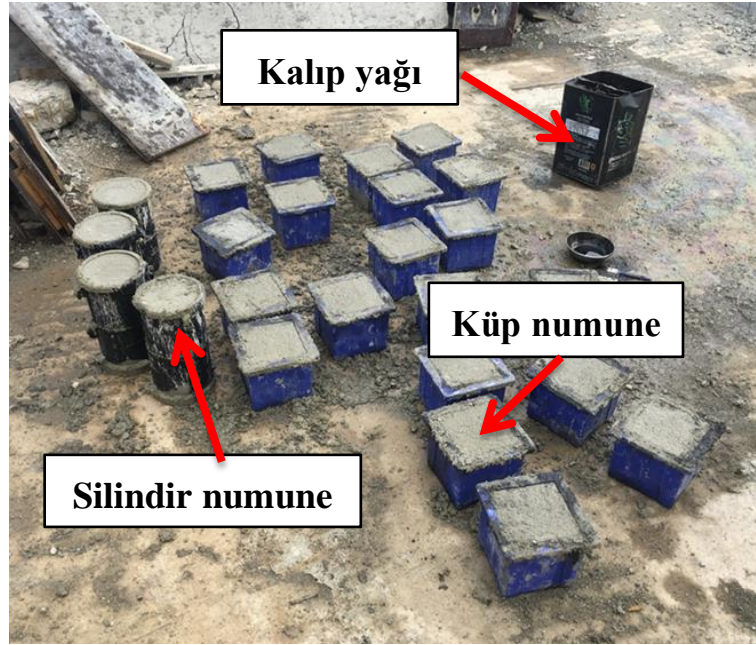


Şekil 4.26. Beton döküm işleri ve betonarme numunelere vibratör uygulanması.



Şekil 4.27. Beton döküm işlemi tamamlanmış kolon numuneler.

Betonarme kolonların beton basınç mukavemetlerini tespit etmek amacıyla beton dökümü işlemi sırasında TS EN 206 (2000) standart hükümlerine uygun olarak Şekil 4.28’ de gösterildiği üzere 6 adet küp ve silindir numunesi alınmıştır. Numune alımında numunelerin su sızdirmasını önlemek amacıyla plastik kalıp kullanılmıştır. Kalıpların tamamı numune alımından önce yağlanmıştır. Küp numunesi için 150x150x150 mm boyutlarında, silindir numunesi için ise 150x300 mm boyutlarında plastik numune kalıpları kullanılmıştır. Beton numuneleri bir hafta süresince kolon numuneleri ile aynı koşulları altında kürlenmiştir. Yapılan kürleme işlemi ile beton basınç dayanımlarında oluşabilecek her hangi farklılıkların önüne geçilmiştir. Alınan numunelerin tamamı, betonarme kolon elemanların yükleme deneylerine alındığı aynı gün içerisinde basınç deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 4.28. Beton döküm esnasında silindir ve küp numune alınması.

Beton döküm işleminden sonra betonun su içeriği çimentonun hidratasyonu için yeterlidir, ancak beton dökümünden sonra ilerleyen saatlerde betonun nem ve sıcaklık gibi durumları göz önünde bulundurmamak gerekir. Nem ve sıcaklık durumlarının istenilen seviyelerden farklı olması durumunda betonda mikro (kılcal) çatlaklar oluşacaktır. Oluşan bu çatlaklar ise ilerleyen zamanlarda genişleyebilmektedir. Belirtilen bu olumsuzlukların önüne geçebilmek için beton döküm tarihinden itibaren 7 gün boyunca

günde 3 kez krleme işlemi yapılmıştır. Betonarme kolonları beton dökümünden 5 gün sonra Şekil 4.29’da gösterildiği üzere kalıplardan çıkartılmıştır.



Şekil 4.29. Beton döküm sonrası kalıptan çıkarılan betonarme kolon numuneler.

Beton dökümünden 28 gün sonra betonarme kolon numuneleri hızlandırılmış korozyon yöntemi ile korozyona maruz bırakılmaları için 5 adet tam ölçekli kolon numuneler tek seferde Şekil 4.30’da gösterildiği gibi taşıma kapasitesi 3 ton olan seyyar vinç yardımı ile kontrollü bir Şekilde tam ölçekli betonarme paslandırma havuzuna taşınarak yerleştirilmiştir. Paslandırma havuzuna yerleştirilen betonarme kolon numunelere uygulanacak hızlandırılmış korozyon yöntemi için bakır kabloların koruma aksamaları dikkatli bir Şekilde soyularak kablolar bağlanmıştır.

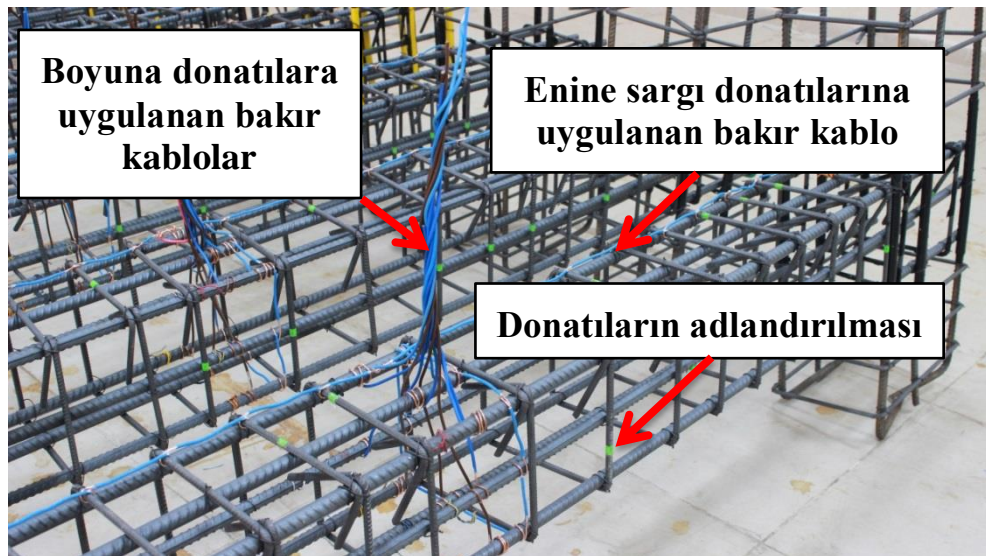


Şekil 4.30. Kolon numunelerin tam ölçekli paslandırma havuzuna taşınması.

4.6. Hızlandırılmış Korozyon Yöntemi

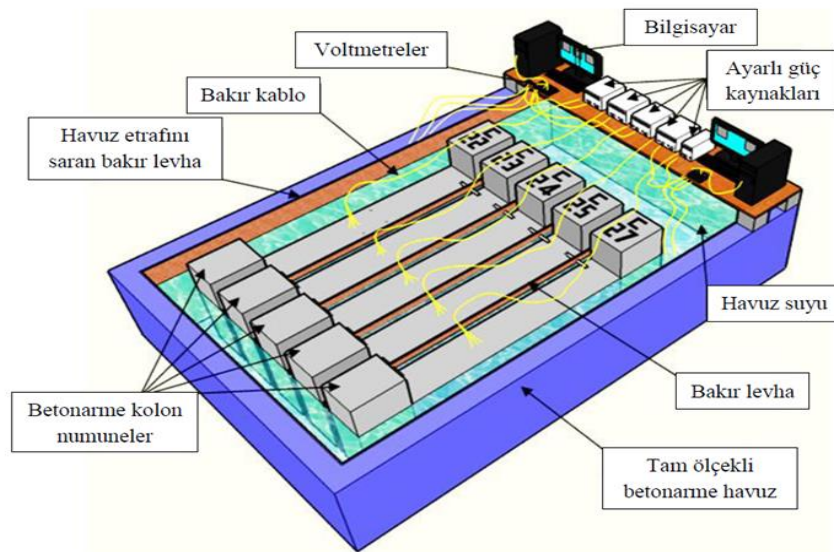
Uzun süren korozyon olayını hızlandırılmış korozyon yöntemi kullanarak daha kısa sürede gerçekleşebilmek mümkün olan bir durumdur. Tez çalışması kapsamında üretilmiş olan 5 adet tam ölçekli kolon numunelerin 4 adedi farklı pas oranlarında (%2.00, %2.79, %5.65 ve %8.52) korozyona maruz bırakılmış olup geriye kalan 1 adet tam ölçekli betonarme kolon numune ise paslandırılmamıştır.

Yalciner vd. (2017) tarafından daha önce yapılmış olan çalışma kapsamında kullanılan hızlandırılmış korozyon yönteminde betonarme numunelerin tüm donatı kafeslerine bakır kablo bağlanmıştır. Devreden geçen akım donatı kafeslerine bağlanan bakır kablolar yardımıyla donatı boyunca yol izleyerek üniform bir paslanmanın oluşması sağlanmıştır. TÜBİTAK 3501 (116M162) projesi kapsamında yapılan çalışmada da Yalciner vd. (2017) tarafında yapılan çalışma göz önüne alınarak Şekil 4.31’de görüldüğü gibi tüm boyuna ve enine sargı donatılara 4 mm çapında bakır kablolar bağlanmıştır. Kullanılan bakır kablolar TS EN 50525-2-31 (2012) standartlarına uygun olarak uygulanmıştır. Kabloların dış koruma kaplamaları yalnızca donatı ile temas edecek bölgelerde ayrılmıştır. Bakır kablolar donatılara bağlanırken tek parça halinde kullanılmıştır. Bu yönteme ek olarak boyuna ve enine sargı donatıların birleşim yerleri de bakır kablo ile bağlanmıştır. Amaç akımın donatı boyunca geçişinin sağlanarak korozyonun eşit bir şekilde oluşmasını sağlamaktır.

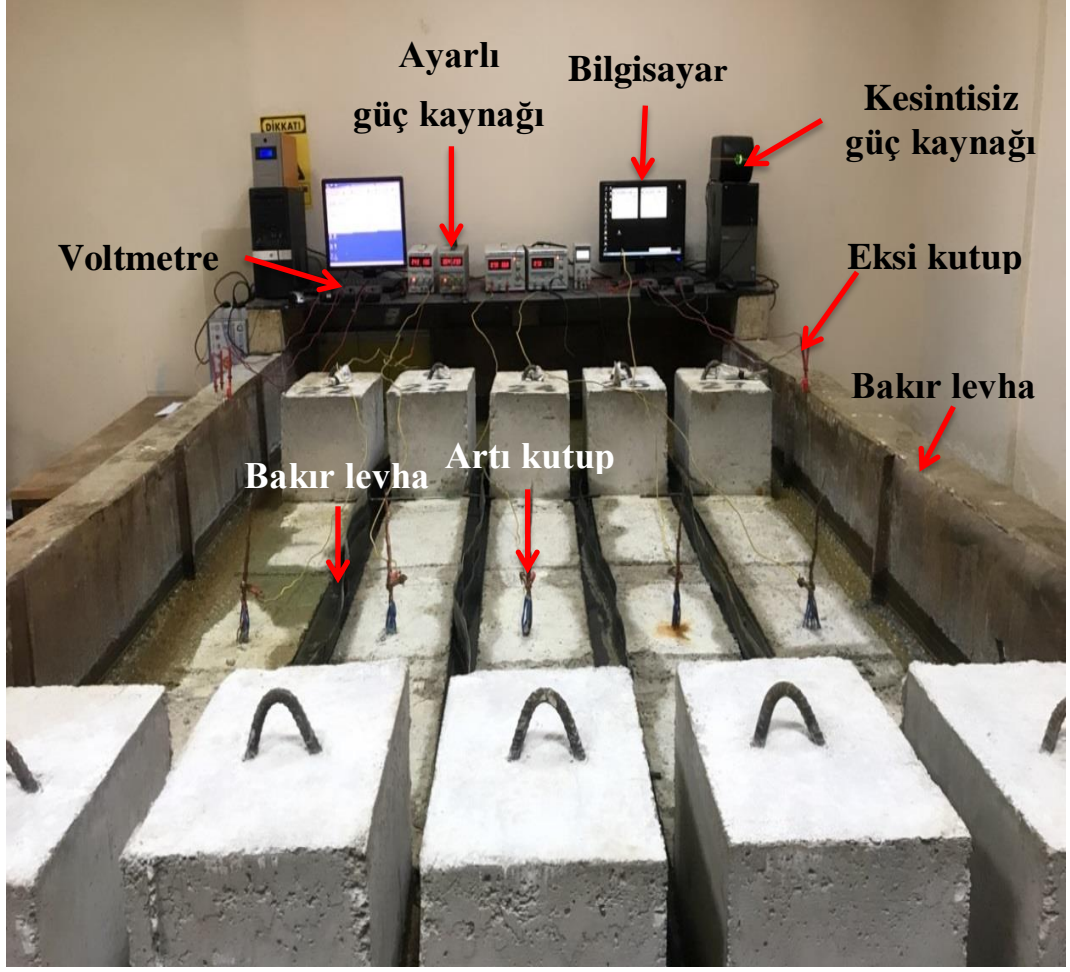


Şekil 4.31. Boyuna ve enine donatılara bağlanan bakır kablolar.

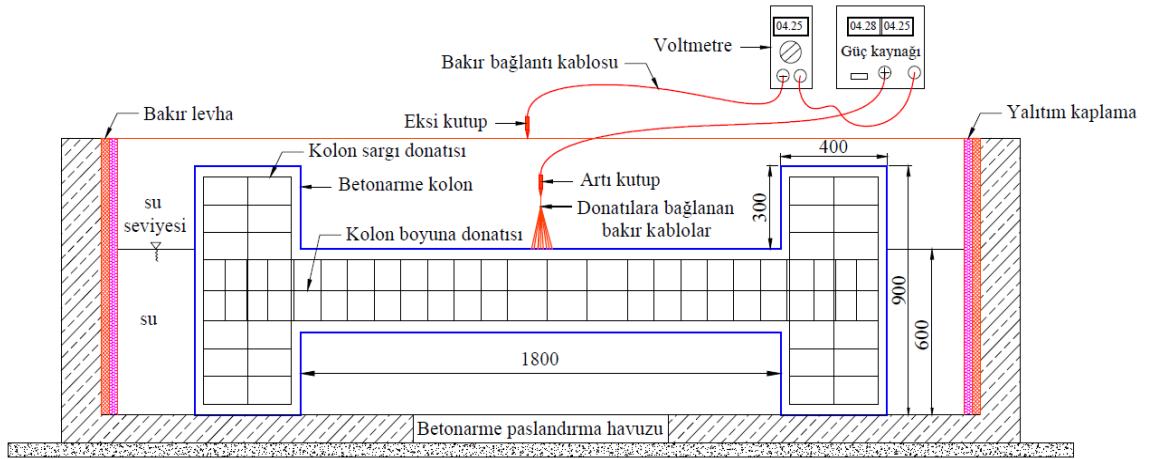
Tez çalışması kapsamında üretilmiş olan tam ölçekli betonarme kolonlarına uygulanan hızlandırılmış korozyon yöntemi şekil 4.33'te gösterilen tam ölçekli betonarme paslandırma havuzunda gerçekleştirilmiştir. Tam ölçekli betonarme paslandırma havuzu, 1750 mm genişliğinde ve 850 mm yüksekliğinde tasarlanmıştır. Betonarme paslandırma havuzunda oluşabilecek elektrik akım kaçığının önüne geçebilmesi için havuzun tüm iç yüzeyleri plastik su yalıtımlı membran malzemesi ile kaplanmıştır. Hızlandırılmış korozyon yönteminde kullanılacak olan devre elemanları 60 volt kapasiteli ve 10 amper değerinde ayarlı güç kaynağı, akımların her 60 saniyede bir bilgisayar ortamında kayıt alınabilmesi için gerekli olan bağlantı kabloları ve geçen akımın tespiti için gerekli olan voltmetrelerden oluşmaktadır. Hızlandırılmış korozyon yönteminin doğru bir şekilde gerçekleştirebilmesi için güç kaynağın artı kutbu tam ölçekli betonarme kolon donatı kafeslerine bağlanmış olan bakır kablolarla, eksi kutbu ise betonarme paslandırma havuzunun tüm iç yüzeyini çevreleyen bakır plakaya bağlanmıştır. Tüm betonarme kolon numuneleri seyyar vinç yardım ile tam ölçekli betonarme paslandırma havuzuna yerleştirildikten sonra tam ölçekli betonarme kolon numunelerin aralarına 2 mm kalınlıkta bakır plakalar yerleştirilmiştir. Yerleştirilen bakır plakalar ile üniform bir korozyon dağılımı elde edilmesi amaçlanmıştır. Şekil 4.32, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'te gösterildiği gibi havuzundaki su seviyesi betonarme kolon numunelerinin orta açıklık bölgesinin üst seviyesine kadar çıkarılmıştır. Havuzun su seviyesi paslandırma süreci tamamlana kadar aynı seviyede tutulmuştur.



Şekil 4.32. Hızlandırılmış korozyon deney düzeneğinin şematiksel üç boyutlu tasarımı.



Şekil 4.33. Paslandırma havuzunda uygulanan hızlandırılmış korozyon deney düzeneği.



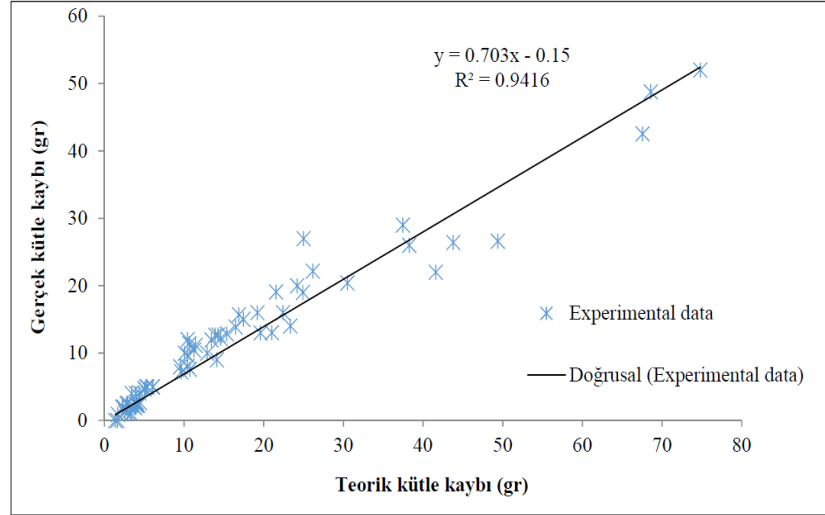
Şekil 4.34. Hızlandırılmış korozyon deney düzeneğinin şematiksel gösterimi.

Faraday Kanunu kullanılarak teorik olarak elde edilen kütle kayıpları ve hızlandırılmış korozyon deney süreleri çok kolay bir şekilde hesaplanabilmektedir. Faraday Kanununa göre hesaplanacak olan kütle kaybı Denk. 4.1’de verilmiştir.

$$m = \frac{t(s) \times I(A) \times 55.847}{2 \times 96.487} \quad (4.1)$$

Denk. 4.1'de I (A) sistemden geçen elektrik akımı, t sistemden geçen süreyi, 96.487 (A.sn/mol) Faraday sabitini ve 55.847 (g/mol) değeri ise metalin atomik kütesini temsil etmektedir.

Deneylein kontrolü bir şekilde gerçekleşmesi için gerekli teorik korozyon oranları hesabında kullanılan Faraday Kanunu donatılara yalın halde akım uygulayarak gerçekleştirilmiştir. Beton içerisinde bulunan çelik donatılarında korozyon sürecinin hemen başlayamaması betonun malzeme özelliği olarak donatıyı koruyucu etkisi sebebiyle korozyon sürecinin başlayabilmesi için belirli bir enerji gereksinimine ihtiyaç vardır. Teorik olarak elde edilen korozyon değerleri gerçek değerlerden düşük olması da belirtilen bu sebeplerden kaynaklanmaktadır. Yalciner vd. (2012b) tamamlamış olduğu deneysel çalışma sonucunda Faraday Kanununa göre hesaplamış olduğu teorik kütle kaybı değerleri ile gerçek kütle kaybı değerlerini karşılaştırmış ve istenilen korozyon seviyelerine daha yakın değerler veren bir model sunmuştur. Şekil 4.35'te verilen grafikte istenilen korozyon oranlarının Faraday Kanunu kullanılarak elde edilmesi için gerekli olan ilişki gösterilmektedir.



Şekil 4.35. Faraday Kanununa göre elde edilen teorik kütle kaybı ile gerçek kütle kaybının karşılaştırılması (Yalciner vd., 2012b).

Yapılan bu çalışmada hızlandırılmış korozyon yönteminde kullanılan Faraday Kanunu yalnızca istenilen gerçek kütle kaybı değerlerini teorik olarak yakın bir şekilde elde

etmek amacıyla kullanılmıştır. Betonarme kolon donatılarındaki korozyon oranlarını ve gerçek kütle kayıplarını elde etmek için tamamlanan yükleme deneylerinden sonra betonarme kolon numuneler kırılarak içerisinde donatıları çıkarılması sonucu elde edilmiştir. Denk. 4.2 yardımıyla paslandırma sonrası kolon donatılarında oluşan gerçek pas oranlarını hesaplanmıştır.

$$C_L = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 (\%) \quad (4.2)$$

Denk. 4.2’de C_L (%) korozyon oranını, W_i (g) donatılarının ilk kütesini, W_f (g) ise korozyona uğramış donatıların beton içerisinde çıkartılarak mekanik ve kimyasal temizleme işlemlerinden sonraki elde edilen son kütesini temsil etmektedir.

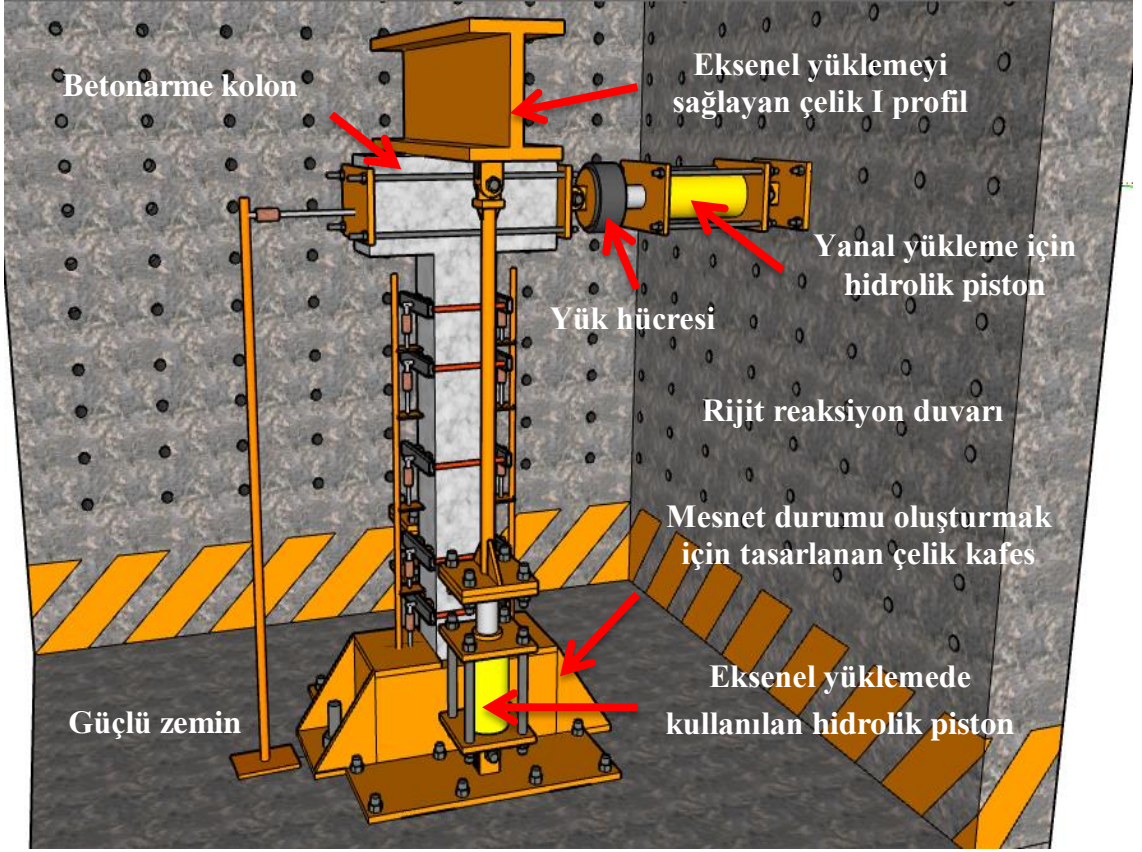
4.7. Deney Düzenegi

4.7.1. Yükleme sistemi

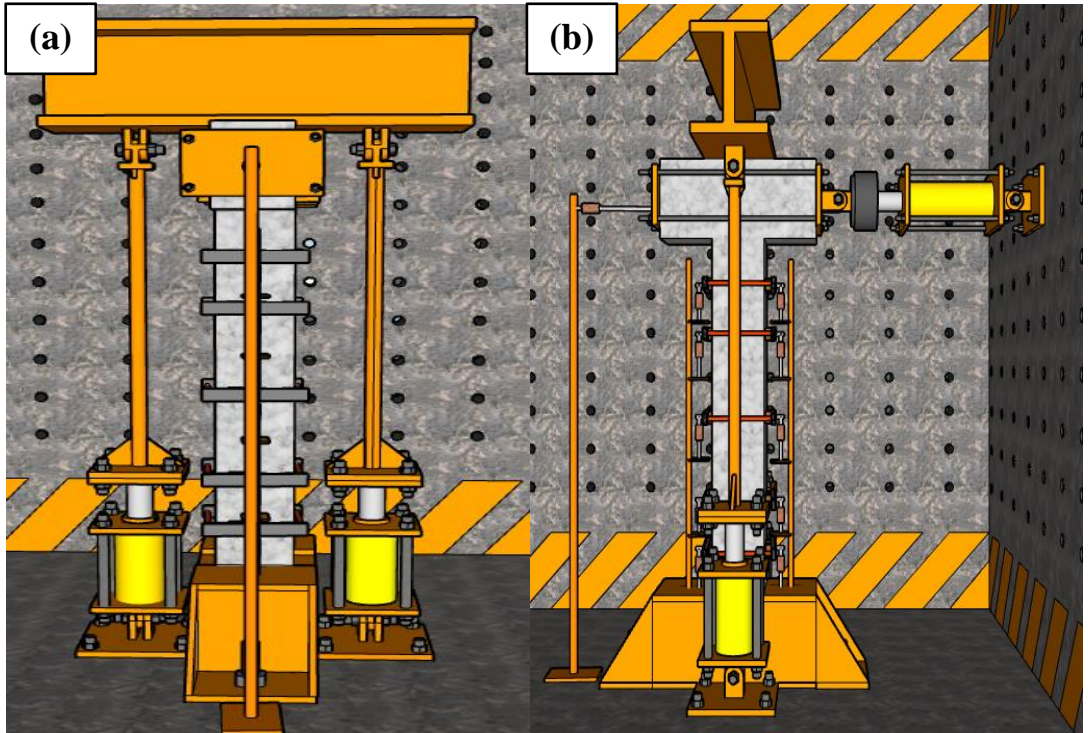
Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü 13 Mart Yapı Mekaniği Laboratuvarında ilk kez betonarme kolonlarına sabit aksel ve monotonik yanal yükün aynı anda uygulanması sebebi ile tüm yükleme ve ölçüm düzenegi sıfırdan kurulmuştur. Bu bölümde deney düzeneginin hazırlanma sürecinde yükleme sisteminde kullanılan aletler, cihazlar ve kullanılan malzemeler sonraki yıllarda yapılacak çalışmalara rehberlik etmesi amacıyla ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Tez çalışması kapsamında yükleme sisteminde kullanılan malzemeler Tablo 4.4’te verilmiştir. Şekil 4.36’da üç boyutlu olarak tasarlanan yükleme deney düzenegi, Şekil 4.37’de üç boyutlu olarak tasarlanan yükleme sisteminin ön ve yan görünümü ve Şekil 4.38’de ise uygulamada kullanılan yükleme sistemi gösterilmektedir.

Tablo 4.4. Yükleme sisteminde kullanılan alet ve cihazlar.

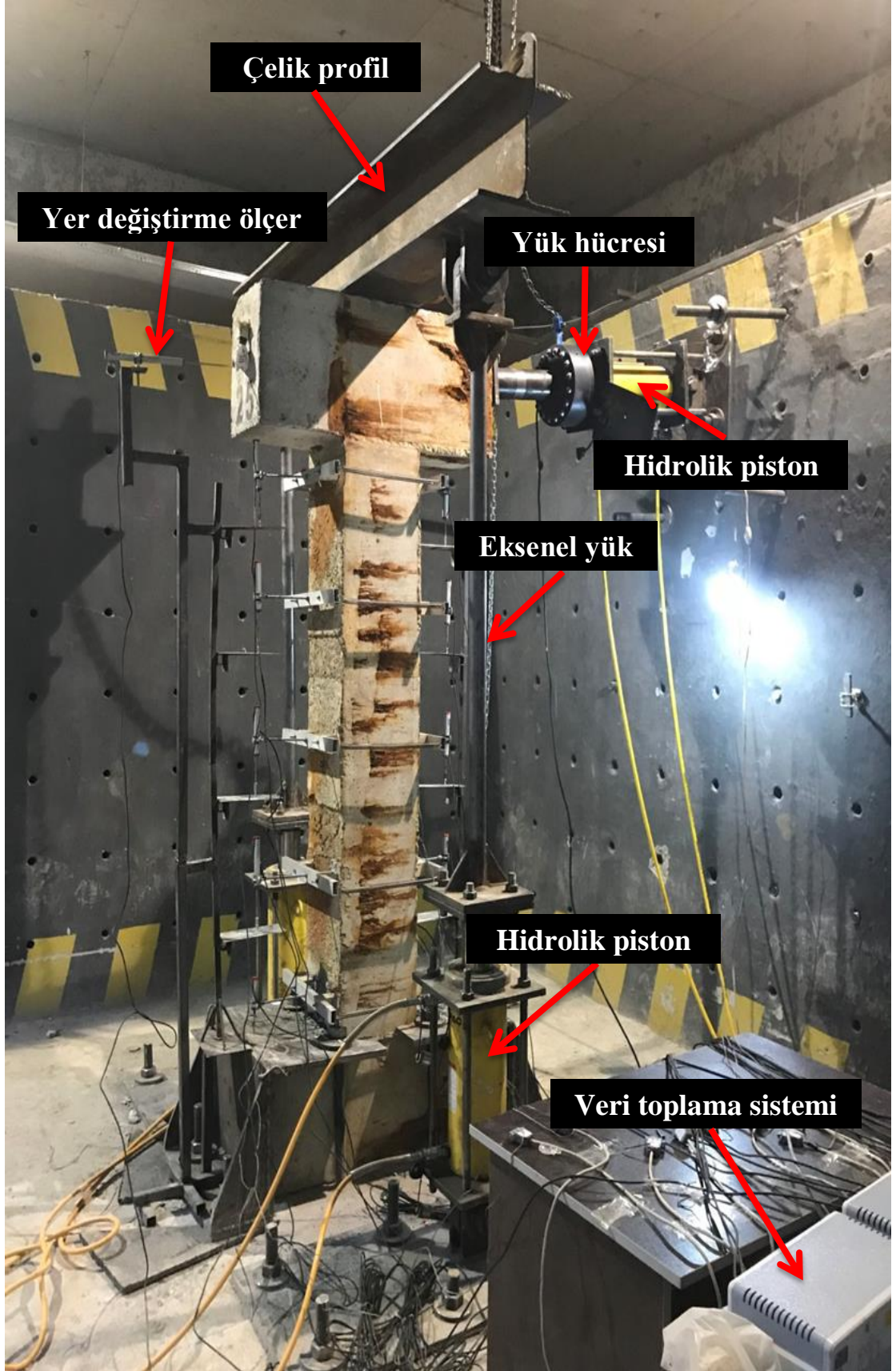
Malzeme Adı	Kullanım Amacı	Marka	Kapasite (ton)
Hidrolik piston-1	Eksenel yükleme	ENERPAC	100
Hidrolik piston-2	Yanal yükleme	ENERPAC	60
Yük hücresi	Yük ölçümü	CAS	60



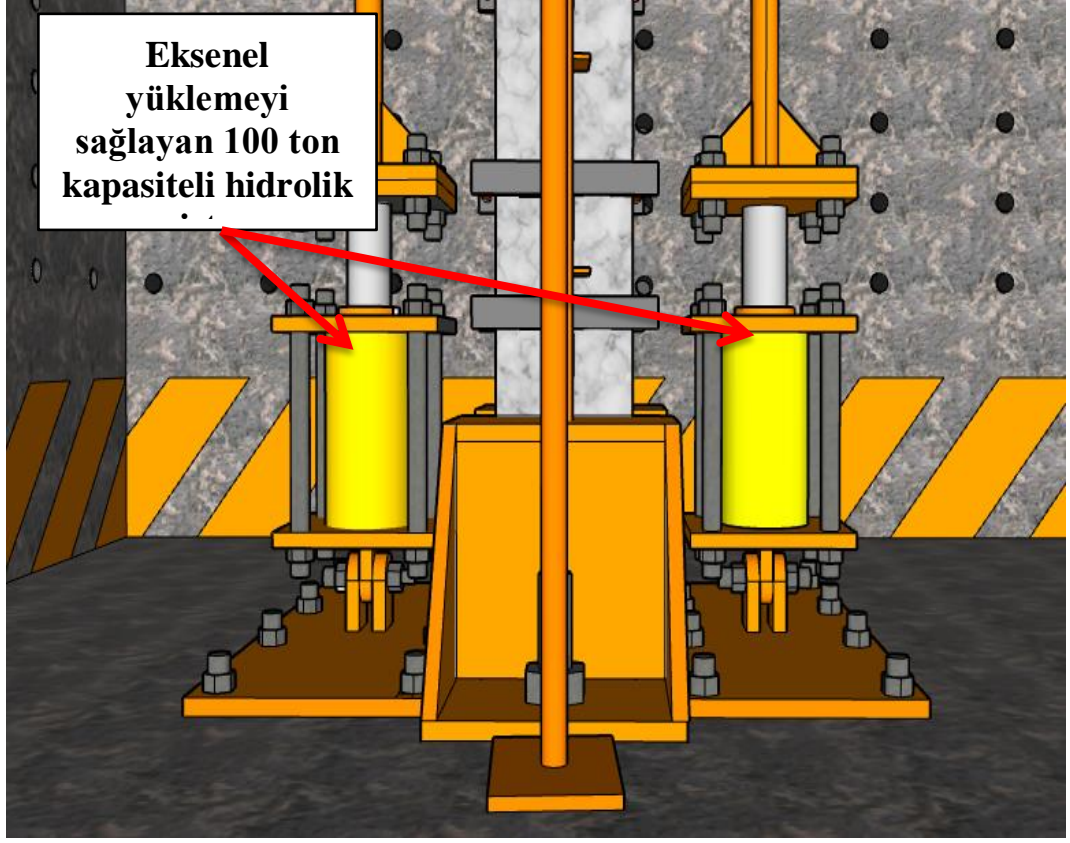
Şekil 4.36. Kolonlara uygulanacak yüklemeye sistemi için tasarlanan deney düzeneği.



Şekil 4.37. Yüklemeye deneyleri için tasarlanan deney düzeneği; (a) Ön görünüşü, (b) Yan görünüşü.



Şekil 4.38. Yükleme sisteminde kullanılan deney düzeneği.



Şekil 4.40. Eksenel yüklemeyi sağlayan hidrolik pistonlar.

Deneysel çalışmada tüm betonarme kolon numuneleri için aynı deney düzeneği kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Tüm betonarme kolonları (C1, C2, C3, C4 ve C5) için aynı eksenel yük uygulanmıştır. Eksenel yük değeri karakteristik beton basınç dayanımları göz önüne alınarak numunelerin taşıma kapasitelerinin %20'si ($N/A_c \cdot f_{ck} = \%20$) kadar uygulanmıştır. Burada betonarme kolonlar için 674 kN eksenel yük uygulanmıştır. Eksenel yükün uygulanması ile birlikte monotonik yanal yük numunenin göçme durumuna erişinceye kadar uygulanmıştır.

4.7.2. Ölçüm ve veri toplama sistemi

13 Mart Yapı Mekaniği Laboratuvarında yapılan deney numunelerin ölçümleri eş zamanlı olarak 3 adet veri aktarım cihazı (Data logger) aracılığıyla bilgisayar ortamına aktarılarak kaydedilmiştir. Yer değiştirme ölçerler (LVDT) biri kolon başlık yer değiştirmesi ölçmek için ve on tanesi eğriliği ölçmek için kolonun belirlenen bölgelerine yerleştirilmiştir. Yük ölçümlerinde tersinir artırımlı monotonik yanal yükün belirlenmesi için yanal yüklemeyi sağlayan hidrolik silindirin ucuna yük hücresi

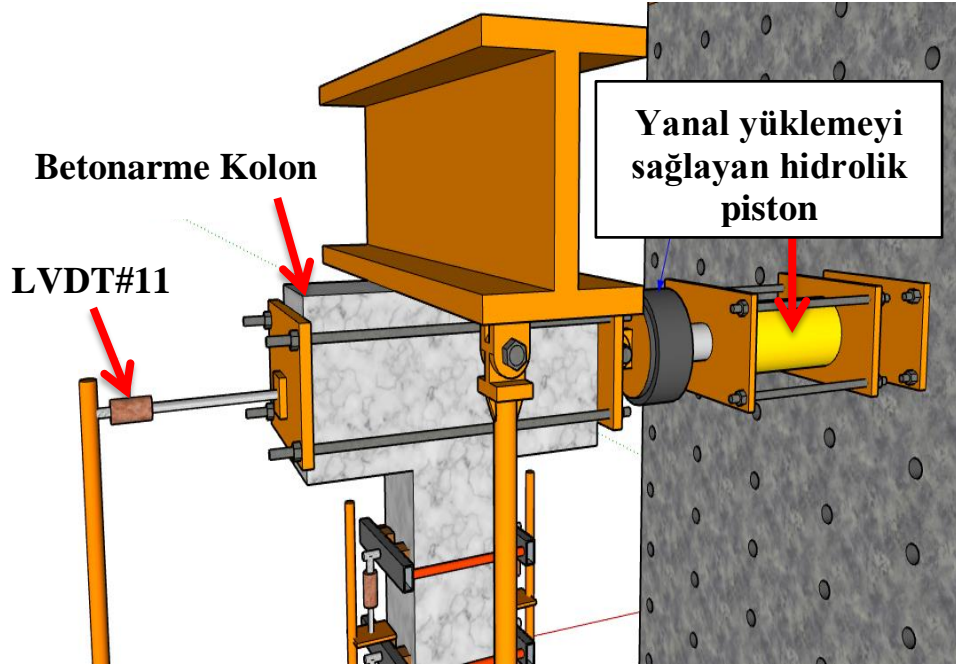
yerleştirilmiştir. Eksenel yükleme düzeylerinin ayarlanması amacıyla hidrolik pistonlara bağlı olan manometrelerden uygulanan basınç seviyesi okunmuştur. Tam ölçekli kolonun boyuna donatılarındaki şekil değiştirmeleri ölçmek için gerinim ölçerler (SG) numunelerin paslandırma süreçlerinin tamamlanmasından sonra belirlenen bölgelerin uygun bir şekilde açılıp temizlendikten sonra yapıştırılmış ve koruma kaplamasıyla kapatıldıktan sonra tüm kolon numuneler aynı beton basınç dayanımına sahip tamir harcıyla açılan yüzeyler kapatılmıştır. Tablo 4.5'te ölçüm ve veri toplama sisteminin kapasite ve genel özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 4.5. Ölçüm ve veri toplama sisteminde kullanılan cihazlar.

Malzeme Adı	Kullanım Amacı	Marka	Kapasite
Yer Değiştirme Ölçer (LVDT#11)	Yanal ötelenmenin ölçümü	OPKON	200 mm
Yer Değiştirme Ölçer (LVDT#1-10)	Eğrilik hesabı	OPKON	100 mm
Gerinim ölçerler (SG#1-8, SG#Beton)	Birim şekil değiştirmelerin ölçümü	TML	10 ve 30 mm
Veri aktarma cihazı (Data logger)	Sinyallerin dijital veriye dönüştürülüp bilgisayar ortamına aktarılması	Test Box	24 Kanal girişli

4.7.2.1. Yer değiştirme ölçerler

Hem eğrilik ve hem de aderans-kayma ilişkisinin tespiti için boyuna çekme donatısına yedi adet ve basınç donatısına da bir adet olmak üzere toplam sekiz adet birim şekil değiştirme ölçerlerin yapıştırılmasından bir gün sonra betonarme kolon yükleme sistemine yerleştirilmiştir. Deney numunesinin tamamını temsil edecek şekilde, farklı seviyelerde moment-eğrilik ilişkisinin ölçülmesi için 100 mm kapasitede karşılıklı birer adet olmak üzere toplam on adet yer değiştirme ölçerler kullanılmıştır. Tam ölçekli kolon numunelerin yanal yer değiştirmelerin ölçülmesi için numunelerin giriş ortasına (numunenin tepesi hizasında) bir adet 200 mm kapasiteli (LVDT#11) yer değiştirme ölçer, özel olarak tasarlanan güçlü bir aparata monte edilmiştir. Şekil 4.41'de yanal yer değiştirmeleri sağlayan yer değiştirme ölçer gösterilmektedir.



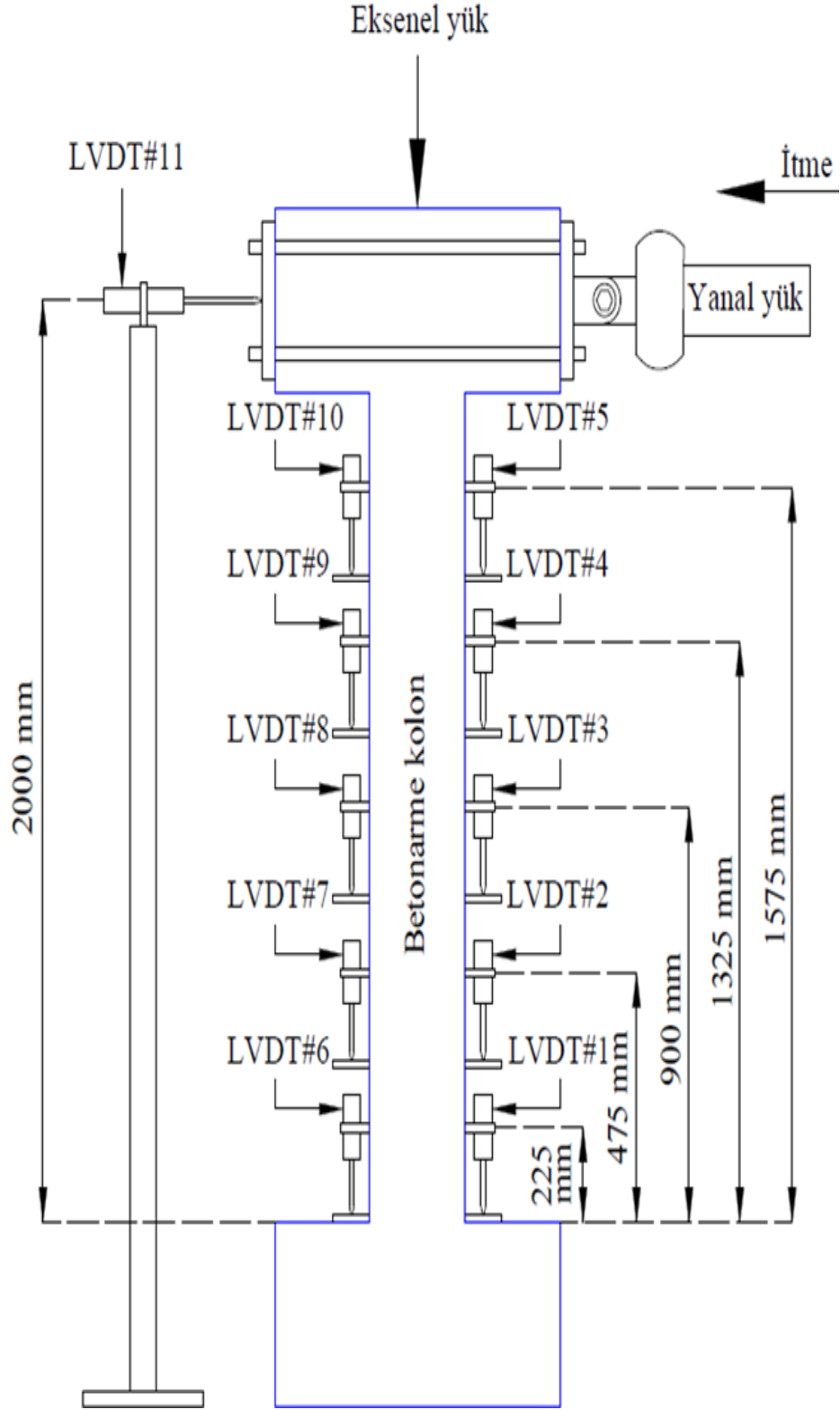
Şekil 4.41. Yanal yer değiştirmelerin ölçülmesi için kullanılan yer değiştirme ölçer.

Betonarme kolonu boyunca meydana gelen moment-eğrilik değerleri için yer değiştirme ölçerler temel üst seviyesinde itibaren Tablo 4.6’da belirtildiği mesafelerde kiriş alt bölgesine kadar olan kısımlara kontrollü bir şekilde yerleştirilmiştir.

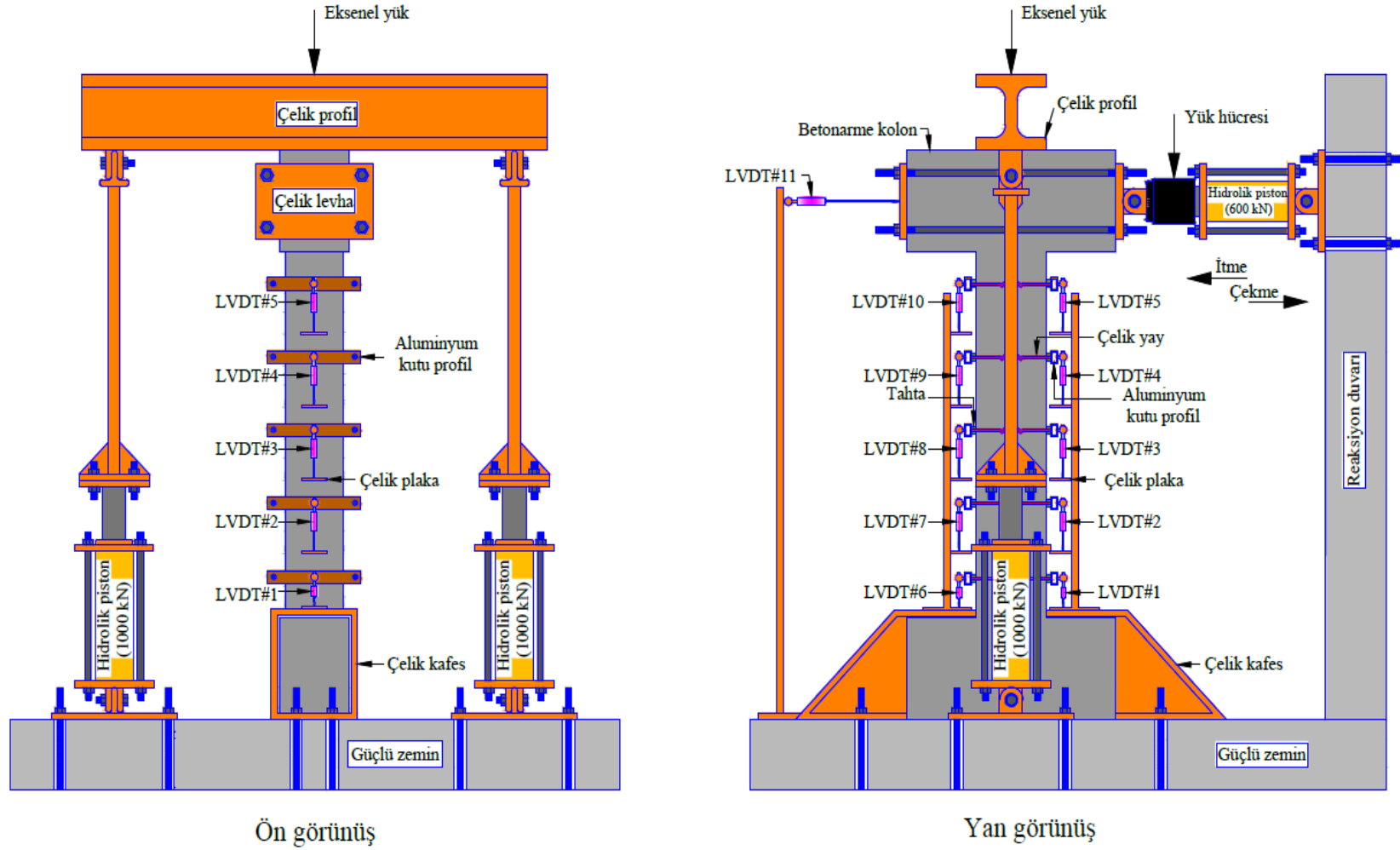
Tablo 4.6. Yer değiştirme ölçerlerin uygulamadaki yerleri ve özellikleri.

Yer değiştirme Ölçer adı	Yerleştirildiği Konum	Yerleştirildiği Mesafe (mm)	Kapasite/ Özellikler (mm)
LVDT#1	Çekme bölgesi	225	100
LVDT#2	Çekme bölgesi	475	100
LVDT#3	Çekme bölgesi	900	100
LVDT#4	Çekme bölgesi	1325	100
LVDT#5	Çekme bölgesi	1575	100
LVDT#6	Basınç bölgesi	225	100
LVDT#7	Basınç bölgesi	475	100
LVDT#8	Basınç bölgesi	900	100
LVDT#9	Basınç bölgesi	1325	100
LVDT#10	Basınç bölgesi	1575	100
LVDT#11	Kiriş orta bölgesi	2000	200

Tam ölçekli betonarme kolon numune üzerine monte edilen tüm ölçüm cihazlarına ait detaylar Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'te gösterilmektedir.



Şekil 4.42. Yer değiştirme ölçerlerin betonarme kolon üzerindeki yerleşimi.



Şekil 4.43. Deney düzeneğinde kullanılan yer değiştirme ölçerler.

Birçok deneysel çalışmalarda ölçüm sistemleri için gerekli aparatlar beton içerisine açılan delikler yardımı ile sağlanmaktadır. Beton içerisine yerleştirilen aparatların eğilmesi veya bu aparatlara yakın noktalarda betonun hasar almasından dolayı deneysel verilerin etkilenmesinin söz konusu olduğu düşünülmektedir. Mevcut çalışmada bu durum özellikle göz önüne alınmıştır. Şekilde 4.43'te gösterildiği gibi yer değiştirme ölçerler doğrudan deney numunesine (beton yüzeyine) monte edilmemiştir. Ölçüm cihazları alüminyum bir kutu profil üzerine sabitleştirilmiştir. Alüminyum kutular ise kolon yüzeyine epoksi ile yapıştırılmış olan 45x45x45 mm boyutlara sahip küp kesitli tahta takozlara sabitleştirilmiştir. Alüminyum kutular deney sırasında kesit bütünlüğünün korunabilmesi amacıyla karşılıklı olarak, yaylı bir sistem ile birbirine iliştilmiştir. Bu yay sistemi, kesit sistemini bir arada tutacak kadar güçlü ve yerel deformasyonlar altında deforme olabilecek kadar esnektir. Yer değiştirme ölçerler deney sırasında düşeyde sarkmasını önlemek için yer değiştirme ölçerler ile alüminyum kutular arasında, ilave bir birleştirme aparatı kullanılmıştır. Deney numuneleri dışarıdan uygulanacak çeşitli müdahaleler ile testler sırasında farklı yapısal özellikleri içermemesi için deneysel kurulumda böyle bir yöntem kullanılmıştır.

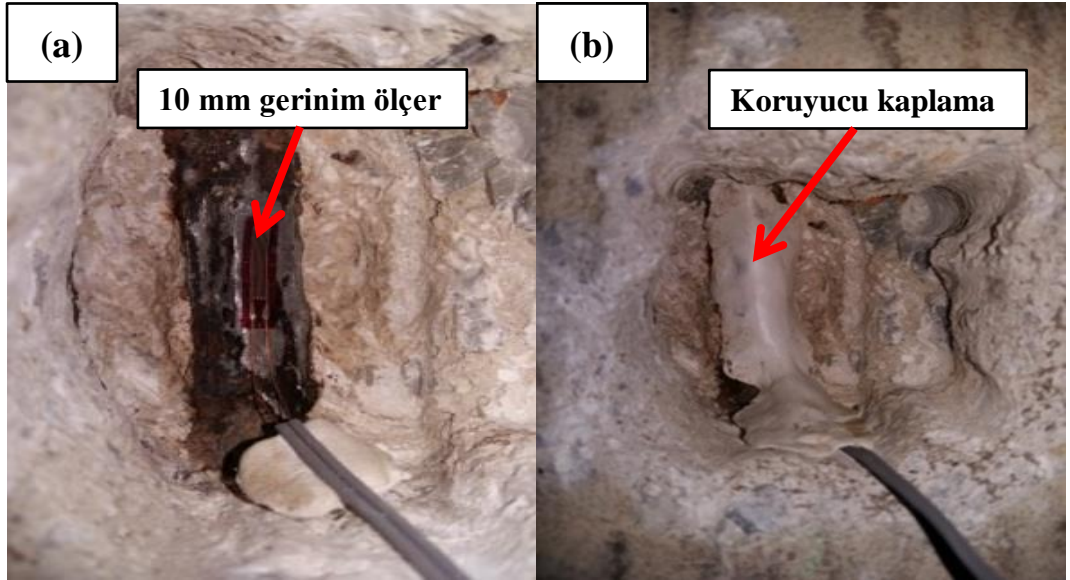
4.7.2.2. Gerinim ölçerler

Tam ölçekli betonarme kolonların çekme ve basınç bölgelerdeki boyuna donatıya gerinim ölçerler yapıştırılarak yükleme sırasındaki birim şekil değiştirme değerlerinin ölçümü yapılmıştır. Bu işlemin paslandırma süreci tamamlandıktan sonra gerçekleştirilmiş olmasının sebebi korozyon sonucu meydana gelecek pas ürününün hassas devre düzeneğinin çalışma performansını olumsuz etkilemesidir. Paslandırma süreci tamamlanan tam ölçekli betonarme kolon numunelerinin Şekil 4.44'te görüldüğü gibi çekme (L8) ve basınç (L4) donatıların bulunduğu kısımlar Tablo 4.7'de belirtilen aralıklarla da FERROSCAN adı verilen donatı tarama cihazı ile belirlenmiş ve belirlenen kısımlar 50x50x50 mm boyutunda beton yüzeyler açılmıştır. Donatı yüzeyleri gerinim ölçerlerin yapıştırılması için özel aparat sayesinde zımparalanarak pürüzsüz hale getirilmiştir. Pürüzsüz hale getirilen donatı yüzeyleri aseton ile temizlenerek temiz bir yüzey elde edilmiştir. 10 mm uzunluğunda kullanılan gerinim ölçerler donatı yüzeyine yapıştırılmadan önce alt yüzeylerine yapıştırıcısı sürülmüştür. Gerinim ölçerlerin yapıştırılmasından sonra üzerleri özel koruyucu kaplama

malzemesiyle kapatılmıştır. Donatı yüzeyine uygulanan gerinim ölçerlerin zarar görmemeleri için açılan kısımlar Şekil 4.45'te gösterildiği gibi betonarme kolon numunelerle aynı beton basınç dayanımına sahip yapısal tamir harcı ile kapatılarak deneye hazır hale getirilmiştir.

Tablo 4.7. Gerinim ölçerlerin kullanım mesafeleri ve özellikleri.

Şekil değiştirme Ölçer adı	Yapıştırılma Yeri	Yapıştırılma Mesafesi (mm)	Kapasite/ Özellikler (mm)
SG#1	Çekme donatısı (L8)	75	10
SG#2	Çekme donatısı (L8)	175	10
SG#3	Çekme donatısı (L8)	300	10
SG#4	Çekme donatısı (L8)	450	10
SG#5	Çekme donatısı (L8)	650	10
SG#6	Çekme donatısı (L8)	850	10
SG#7	Çekme donatısı (L8)	1100	10
SG#8	Basınç donatısı (L4)	75	10
SG#Beton	Beton yan yüzeyi	200	30



Şekil 4.44. Gerinim ölçerlerin yapıştırılması; (a) Aseton ile temizlenen donatı yüzeylerine gerinim ölçerlerin yapıştırılması, (b) Yapıştırılan gerinim ölçerlerin üzerlerinin koruma malzemesiyle kapatılması.

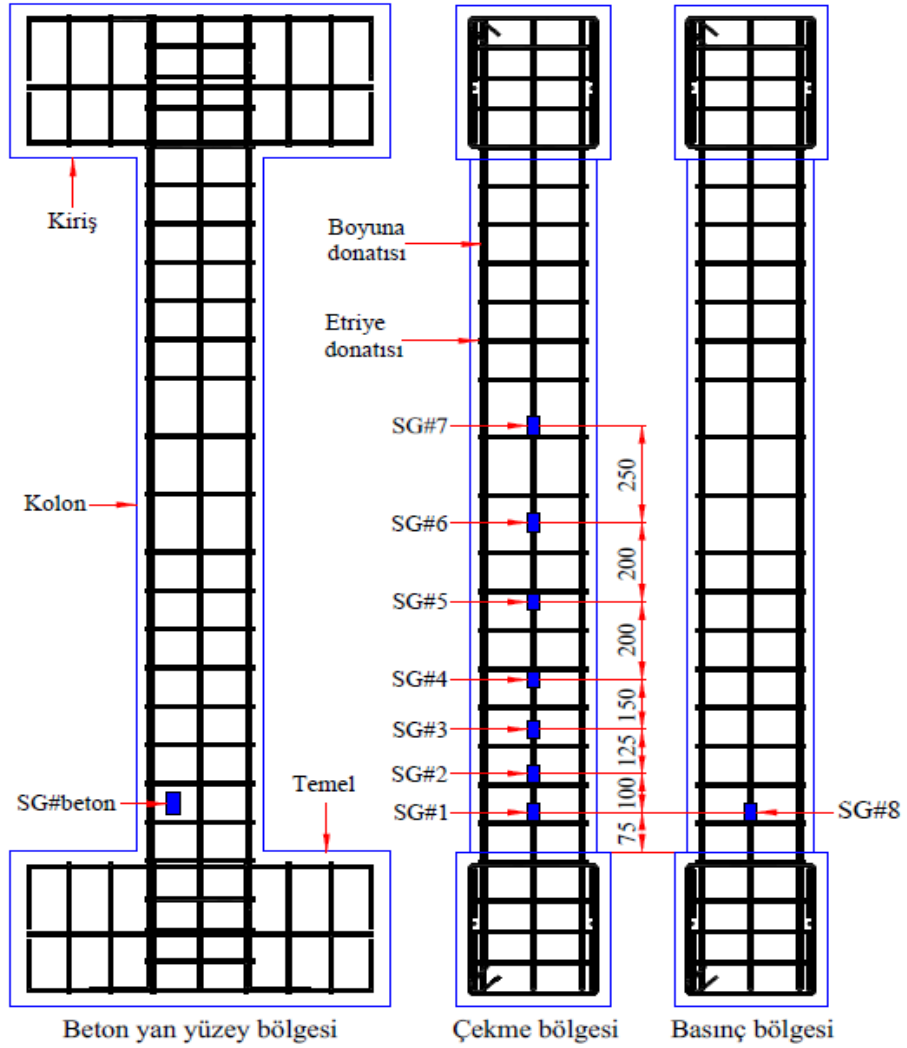


Şekil 4.45. Gerinim ölçerlerin yapıştırıldığı kısımlara tamir harcının uygulanması.

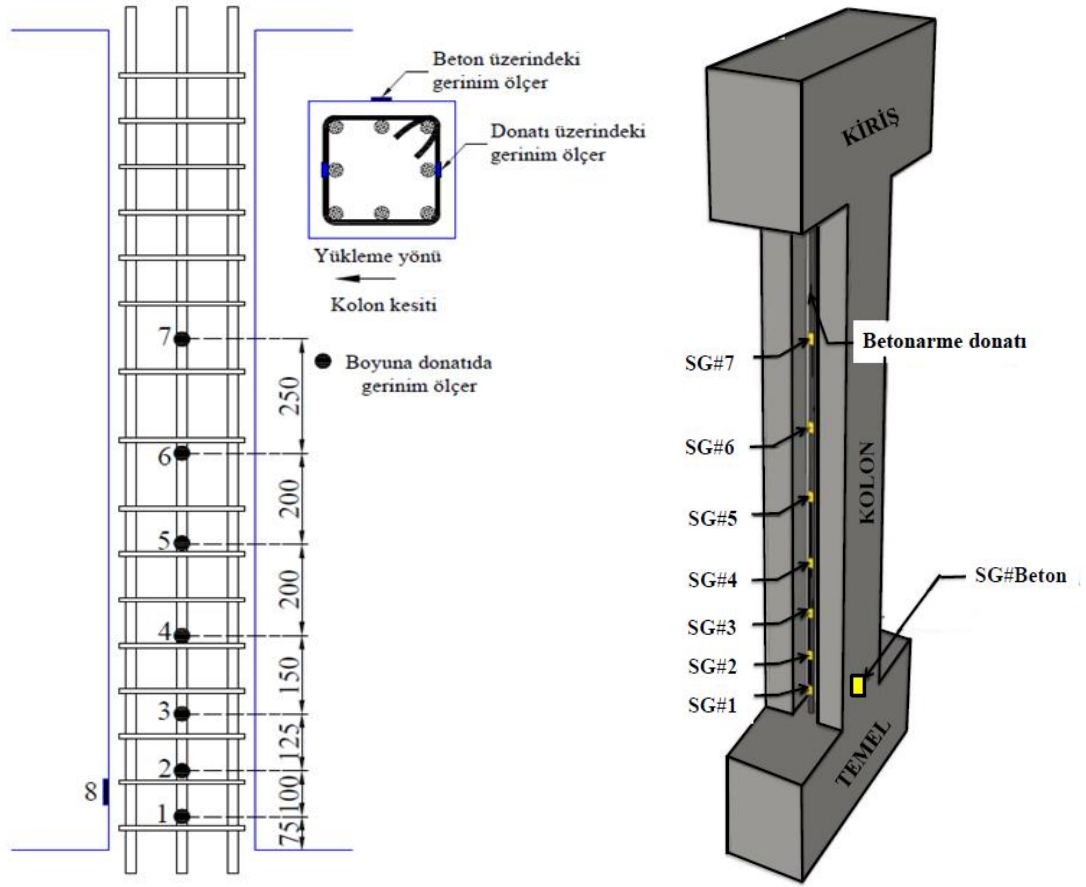
Betonarme kolon donatısında kullanılan 10 mm' lik gerinim ölçerler beton yüzey bölgesi için tercih edilmemiştir. Kolon donatısında kullanılan gerinim ölçerler uygulanan sabit aksenal ve monotonik yanal yükün etkisiyle donatıda oluşan gerinim değerlerinin hesaplanması amacıyla kullanılmıştır. Şekil 4.46'da gösterilen 30 mm' lik gerinim ölçerler kullanılarak beton yüzeyinden daha sağlıklı veri alınması sağlanmıştır. Kolonların beton yüzeyine yerleştirilecek olan yer değiştirme ölçerler uygulanmadan önce beton yüzeyi iyice zımparalanmış pürüzsüz hale getirilmiştir. Gerinim ölçer yüzeyine uygulanan yapıştırıcı beton yüzeyi içinde kullanılmıştır yapıştırıcının kuruması ile koruyucu kaplama malzemesi kullanılarak gerinim ölçerler koruma altına alınmıştır. Sonuç olarak beton yüzey bölgesine yapıştırılan gerinim ölçer ile betonun en dış lifine ait şekil değiştirme değerleri ölçülmüştür. Şekil 4.47 ve Şekil 4.48'de betonarme kolon donatılarına ve beton yüzeyine yapıştırılan gerinim ölçerlerin yerleşimi gösterilmektedir.



Şekil 4.46. Beton yüzey bölgesine gerinim ölçerin yapıştırılması.



Şekil 4.47. Gerinim ölçerlerin tasarlanan plana göre yapıştırıldığı yerler.



Şekil 4.48. Gerinim ölçerlerin deneysel çalışmada kullanıldığı yerler.

4.8. Deneysel Programı

Monotonik yükleme deneyleri FEMA 461 (2007) protokol hükümleri göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir. FEMA 461 (2007) protokolü bir yapının deprem sırasında meydana gelebilecek yüklerin etkisinde ne gibi davranış sergileyeceğini açıklamaktadır. Monotonik artırımlı yükleme deneylerine başlamadan önce numuneler sabit aksenal yüklemeye tabi tutulmuştur. Yapılan çalışmada FEMA 461 (2007) göz önüne alınarak, çalışma kapsamında kullanılan 5 adet tam ölçekli betonarme kolonlarına (C1, C2, C3, C4 ve C5) %20 sabit aksenal yük etkisi altında monotonik yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel programda FEMA 461 (2007) protokolü göz önüne alınarak her bir genlik için 3 çevirim gerçekleştirilmiştir. Paslandırılmaya maruz kalmış ve paslandırılmamış 5 adet tam ölçekli betonarme kolon elemanları üzerinde yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen sonuçlarının değerlendirilmesi ve daha öncelerde belirtilen çelişkili durumların giderilmesiyle gelecekte yapılacak çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1. Deney Sonuçları

Tez çalışmasının bu bölümünde yapılan monotonik yükleme deneylerinden sonra elde edilen gerçek korozyon dağılımları, betonu kırılarak çıkartılan donatıların çekme deney sonuçları, yük-deplasman ilişkileri ve aderans- kayma sonuçları açıklanmıştır.

5.1.1. Betonarme kolon elemanların gerçek korozyon oranları

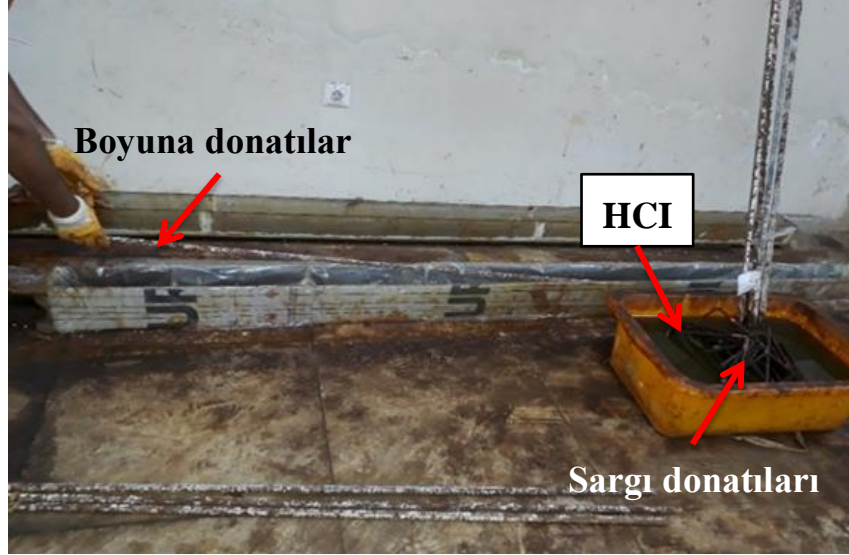
Tam ölçekli betonarme kolonların gerçek korozyon oranlarını elde etmek için yapılan deneylerden sonra tüm betonarme kolon numuneler hilti yardımı ile kırılarak; betonarme boyuna ve sargı donatıları daha önceden belirlenen kodlama sıralamasına göre beton içerisinden çıkartılmıştır. Şekil 5.1’de görüldüğü gibi betonarme kolonların yükleme deneylerinden sonra kırılma işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.1. Betonarme kolonların yükleme deneylerinden sonra kırılması işleri.

Beton içerisinden çıkartılan donatılar ASTM G1-03 (2003) standart hükümlerine uygun olarak önce mekanik ardından kimyasal temizleme işlemine tabi tutulmuştur. Mekanik temizleme işlemleri için tel fırçalar ile donatı yüzeyinde bulunan tüm pas ürünü arındırılmıştır. Kimyasal temizleme işlemleri için ise alüminyum bir havuz yapılmış ve içerisinde su ağırlığının %5’i kadar hidroklorik asit konulmuştur. Betonarme boyuna ve

enine sargı donatılar asitli su havuzuna batırılarak yaklaşık olarak 30 dakika süre ile havuz içinde bekletilerek donatı yüzeyindeki pas ürünleri kaldırılmıştır. Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te beton içerisinden çıkartılan betonarme kolon donatılarına uygulanan kimyasal ve mekanik temizleme işlemleri sırasıyla gösterilmektedir.

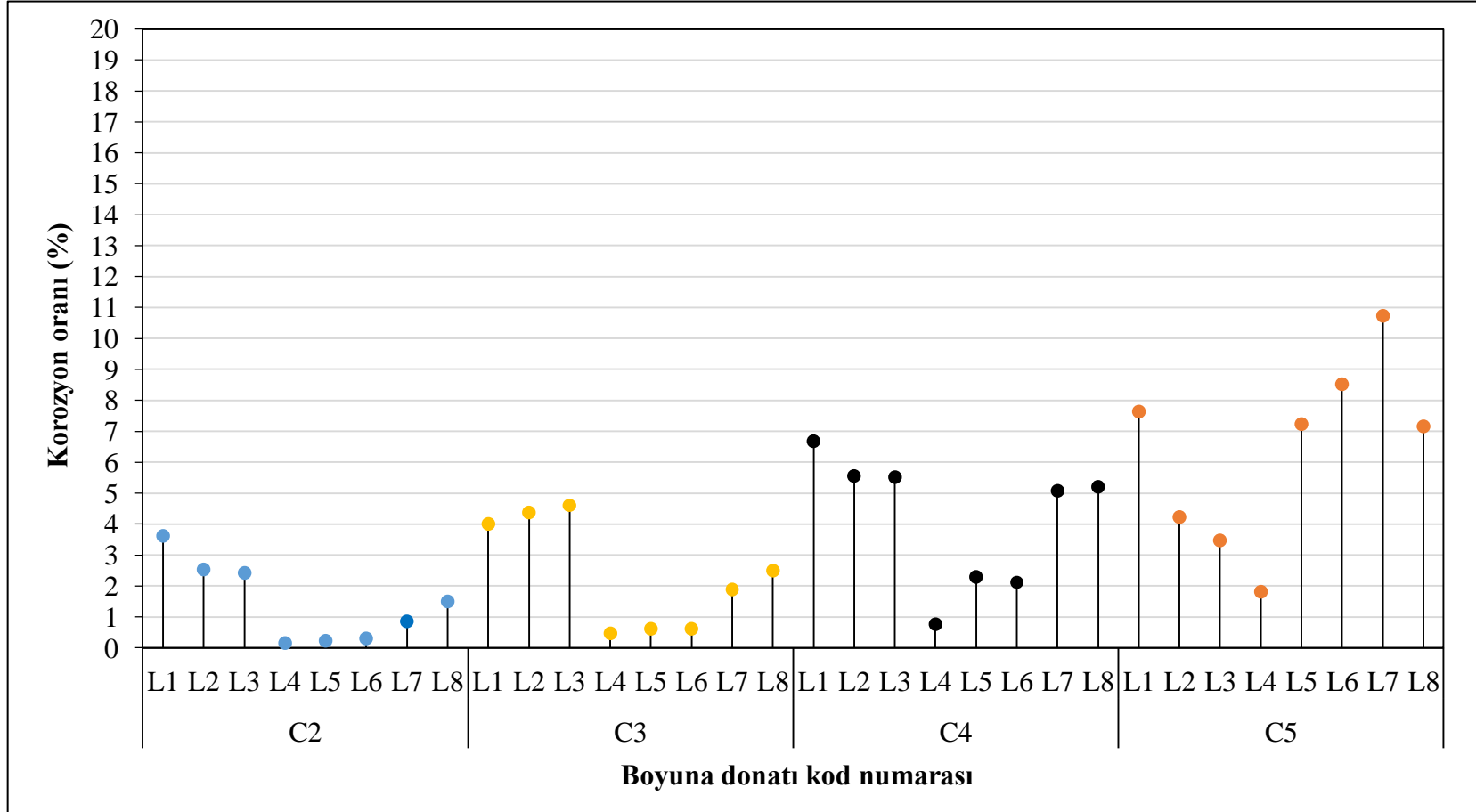


Şekil 5.2. Betonarme kolon boyuna ve sargı donatıları için kimyasal temizleme işleri.

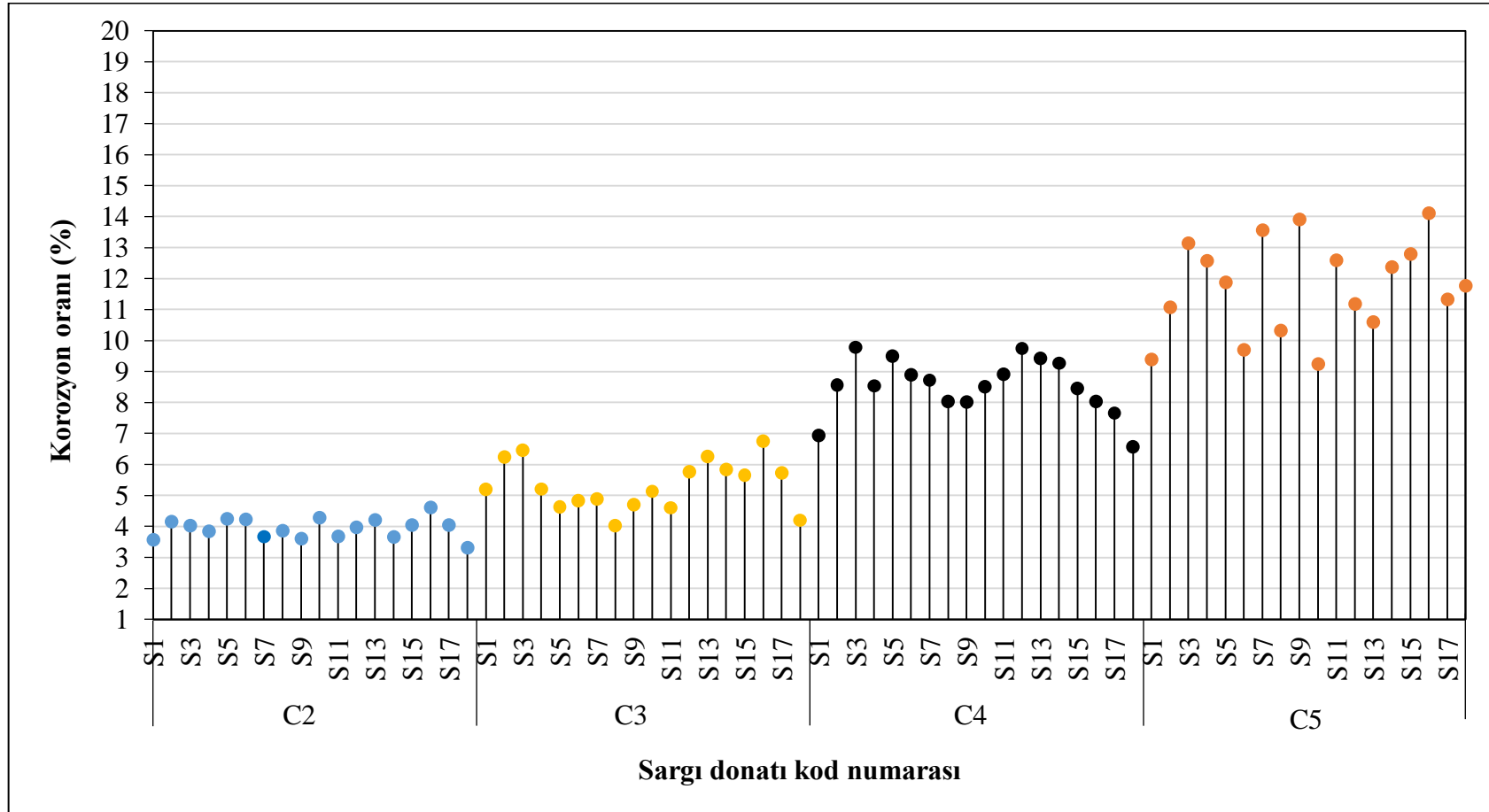


Şekil 5.3. Betonarme kolon boyuna ve sargı donatıları için mekanik temizleme işleri.

Betonarme kolon donatılarına uygulanan kimyasal ve mekanik temizleme işlemlerinden sonra tüm boyuna ve sargı donatılarının kütleleri ikinci kez tartılarak her bir betonarme donatısındaki gerçek korozyon oranları elde edilmiştir. Her bir betonarme kolonu için elde edilen korozyon dağılımları Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'te gösterilmiş olup ve özetlenen gravimetrik deney sonuçları Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.4. Betonarme kolon boyuna donatılarında elde edilen korozyon oranlarının dağılımları.



Şekil 5.5. Betonarme kolon sargı donatılarında elde edilen korozyon oranlarının dağılımları.

Tablo 5.1. TÜBİTAK 3501 (116M162) projesi kapsamında deneyleri gerçekleştirilen tam ölçekli betonarme kolon numunelerde elde edilen korozyon oranları.

Numune adı	N/Ac.fck (%)	İlk kütle (g)		Gerçek kütle kaybı (g)		Gerçek korozyon oranı (%)		Faraday kütle kaybı (g)	ΔA_s (mm ²)		Çekme bölgesi korozyon oranı (%)	Basınç bölgesi korozyon oranı (%)	Uygulanan akım-saat (A.h)
		S	L	S	L	CL _S	CL _L		S+L	ΔA_{sS}			
C1	20	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
C2	20	8124.5	32488.5	321.0	474.5	3.95	1.46	6.50	1.99	23.49	2.00	0.95	2533.1
C3	20	8099.5	32267.5	432.5	768.5	5.34	2.38	8.01	2.68	38.31	2.80	1.90	3104.6
C4	20	8012.5	32471.5	683.0	1350.0	8.52	4.16	12.00	4.28	66.87	5.65	2.86	4663.9
C5	20	8044.5	32429.5	945.5	2064.0	11.75	6.36	17.00	5.91	102.37	8.52	4.18	6604.4

S (g): 18 adet betonarme kolon sargı donatısının toplam kütlesi.

L (g): 8 adet betonarme kolon boyuna donatısının toplam kütlesi.

CL_S (%): Sargı donatılarındaki toplam ortalama korozyon oranı.

CL_L (%): Boyuna donatılarındaki toplam ortalama korozyon oranı.

ΔA_s (mm²): Donatı çapındaki kesit kaybı.

CL_{Li} (%): Çekme bölgesindeki boyuna donatılarındaki toplam ortalama korozyon oranı.

CL_{Lc} (%): Basınç bölgesindeki boyuna donatılarındaki toplam ortalama korozyon oranı.

Tablo 5.2. TÜBİTAK 3501 (116M162) projesi kapsamında deneyleri gerçekleştirilen tam ölçekli betonarme kolon numunelerin boyuna ve sargı donatılarında elde edilen toplam kütleleri ve korozyon oranları.

Numune adı	Eksenel yük oranı (N/A _c . f _{ck}) (%)	Boyuna donatılarının toplam ilk kütlesi (g)	Boyuna donatılarının toplam son kütlesi (g)	Sargı donatılarının toplam ilk kütlesi (g)	Sargı donatılarının toplam son kütlesi (g)	Uygulanan akım-saat (A.h)
		L ₁₋₈	L ₁₋₈	S ₁₋₁₈	S ₁₋₁₈	
C1	20	x	x	x	x	x
C2	20	32488.5	32014.0	8124.5	7803.5	2533.1
		C _{LL} (%): 1.46		C _{LS} (%): 3.95		
C3	20	32267.5	31499.0	8099.5	7667.0	3104.6
		C _{LL} (%): 2.38		C _{LS} (%): 5.34		
C4	20	32471.5	31121.5	8012.5	7329.5	4663.9
		C _{LL} (%): 4.16		C _{LS} (%): 8.52		
C5	20	32429.5	30365.5	8044.5	7099.0	6604.4
		C _{LL} (%): 6.36		C _{LS} (%): 11.75		

S₁₋₁₈ (g): 18 adet betonarme kolon sargı donatısının toplam kütlesi.

L₁₋₈ (g): 8 adet betonarme kolon boyuna donatısının toplam kütlesi.

C_{LL}: Boyuna donatılardaki gerçek korozyon oranı.

C_{LS}: Sargı donatılardaki gerçek korozyon oranı.

Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de gösterildiği gibi betona gömülmüş betonarme donatılarına uygulanan hızlandırılmış korozyon yöntemi ile yapılan deneysel çalışmalar için elde edilen gerçek korozyon oranları betonun göstermiş olduğu direnç nedeni ile her zaman teorik olarak elde edilen korozyon oranından daha azdır. Yalciner (2017) ve Bicer vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada korozyon sürecinde Faraday Kanununa göre korozyon oranının %5 değerine ulaşması ile korozyon mekanizmasının başladığı belirlenmiş ve ayrıca bu durum mevcut tez çalışması kapsamında desteklenmiştir. Bu sebeple gelecekte büyük ölçekli betonarme elemanlarının paslandırılmasına ilişkin yapılacak deneysel çalışmalar için istenilen korozyon oranlarının daha doğru bir şekilde tahmin edilebilmesi için Faraday Kanununa göre hesaplanan korozyon oranlarının belirtilen oranlarda göz önüne alınmasında faydalı sağlayacaktır. Tablo 5.1’de sargı donatılarının ilk kütlelerinin boyuna donatılara oranla daha az olması nedeniyle, uygulanan aynı korozyon süresi ve akım için elde edilen sargı donatıların korozyon oranları daha fazladır. Burada, sargı donatıları ile boyuna donatılarda meydana gelen korozyon seviyelerin birbirlerine olan dağılımlarının göz önüne alınmasıyla gelecekteki akademik çalışmalar için fayda sağlayacağı ön görülmektedir. Tablo 5.2’de sargı donatılarından elde edilen korozyon oranlarının boyuna donatılardan elde edilen korozyon oranlarına oranı tüm betonarme kolonları için oldukça yakındır. Korozyona maruz bırakılmış betonarme kolonlar üzerine yapılan deneysel çalışmalarda ve geliştirilen modellerde (Ma vd. 2012; Yang vd. 2016) bu durumun ihmal edilmesi sonucunda geliştirilen modeller arasında özellikle paslanmış betonarme kolonlarının sünekliği üzerine farklı sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Paslanmış betonarme kolonlarının yapısal davranışlarını tahmin etmek için geliştirilen mevcut modeller, genellikle boyuna donatıda ya ortalama korozyon oranının ya da maksimum korozyon oranının kullanılması ile geliştirilen modellerdir. Ancak doğrusal olmayan yapı davranışında sargı donatılarının toplam yer değiştirmeye olan katkısı göz önüne alındığında, boyuna donatılarda aynı korozyon oranına sahip ancak sargı donatılarındaki farklı korozyon oranlarının meydana geldiği iki farklı betonarme kolonu için yapısal davranışın tamamen birbirinden farklı olacağı göz önüne alınmalıdır. Li vd. (2018) tarafından yapılan deneysel çalışmada paslandırılmış tam ölçekli betonarme kolonlarının sünekliği korozyona maruz bırakılmamış tam ölçekli betonarme kolonuna göre artarken, Yang vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada azalmış ve Ma vd. (2012) tarafından yapılan

çalışmada ise %4.1 korozyon oranına kadar tekrar artış göstermiştir. Bundan dolayı hızlandırılmış korozyon yönteminin kullanılarak paslandırıldığı betonarme elemanları için boyuna ve sargı donatılarının korozyon oran katkı çarpanlarının, sargı donatılarının süneklik üzerindeki etkisi göz önüne alınarak doğru bir şekilde değerlendirilmesi büyük önem kazandırmaktadır.

Tablo 5.2'de göz önünde bulundurulması gereken diğer bir durum ise betonarme kolonların basınç ve çekme bölgelerindeki korozyon oranlarının doğru bir şekilde değerlendirilmesidir. Mevcut çalışmanın monotonik (tek yönlü yükleme) deney programına sahip olmasına karşın, bu çalışmada çekme ve basınç bölgesi için korozyon oranları ayrı olarak elde edilmiştir. Giriş kısmında özet olarak sunulan ve mevcut literatürde geliştirilen modellerin tersinir ve yer değiştirme kontrollü yükleme programı sonucunda elde edilmesinde bu durum büyük önem kazandırmaktadır. Kolonun tek bir yüzeyinden elde edilen korozyon oranlarının kullanılması ile geliştirilen modellerin korozyonun tersinir yük etkisi altında tüm yapı sistemini temsil edebilecek değerlerden uzaklaşmasına neden olabilir. Bu nedenle; yapılan yüklemenin türüne bağlı olarak geliştirilecek modellerde hangi korozyon oranlarının dikkate alınmasının iyi bir şekilde karar verilmesi ve uygulanan yükleme deney programları için en azından plastik mafsallık bölgesi için her iki doğrultudaki korozyon oranlarının donatı kupon testleri ile tespit edilmesi gerektiği önerilmektedir.

5.1.2. Donatı çekme deney sonuçları

Yükleme deneyleri tamamlanan tam ölçekli betonarme kolonlar kırılarak içlerindeki donatılar çıkartılarak temizlik ve tartım işlemleri yapılmıştır. Daha önce yapılan tartım işleminden sonra beton içerisinde paslandırılan betonarme donatılar kolon numunelerin kiriş bölgelerinden kolon temel yüzeyine doğru uzanan gerinim ölçerlerin yapıştırıldığı betonarme kolon donatıları uygun boyutlarda kesilerek çekme deneyine hazır duruma getirilmiştir. Çekme deneyi için 5 adet monotonik yüklemeye tabi tutulmuş betonarme kolon numunelerin her birinde L8 konumunda bulunan ve daha önceden gerinim ölçerlerin yapıştırıldığı boyuna donatılar seçilmiştir. Çekme deneyleri için kesilen boyuna donatılardaki korozyon oranlarının kesilmemiş betonarme donatısındaki korozyon oranına mümkün olduğunca yakın olmasına dikkat edilmiştir. Tablo 5.3'te

gösterildiği gibi kesilen kupon donatılar ile kesilmemiş boyuna donatılardaki korozyon oranlarının mümkün olduğunca aynı korozyon oranlarına sahip olmasına özen gösterilerek donatılar kesilmiştir.

Betonarme kolon numunelerde kesilen paslandırılmış donatılar ile aynı uzunluğa sahip paslandırılmamış referans boyuna donatıların korozyon oranlarının belirlenebilmesi için kullanılmıştır. Betonarme kolon numuneler kırılarak içerisinden çıkartılan ve ardından kesilerek korozyon oranları elde edilen betonarme donatılarının gerçek korozyon oranları Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Donatı mekanik özelliklerinin belirlenmesi için kesilen betonarme kupon donatılarının korozyon oranları.

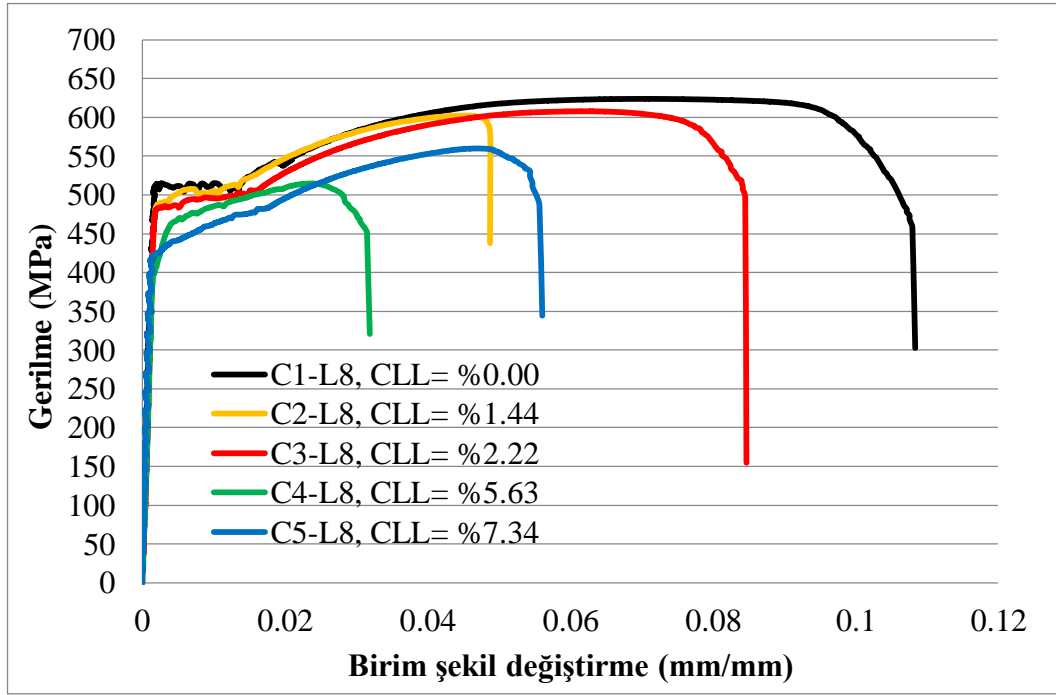
Kod	d_0 (mm)	W_i (gr)	W_f (gr)	CL_L (%)	Kesilmemiş donatının korozyon oranı (%)	d_r (mm)
C1	16.00	x	x	x	x	16.00
C2	16.00	746.77	736.00	1.44	1.51	15.88
C3	16.00	746.77	730.20	2.22	2.50	15.80
C4	16.00	746.77	704.70	5.63	5.37	15.56
C5	16.00	746.77	691.97	7.34	7.16	15.42

Betonarme kolon numuneler kırılarak içerisinden çıkartılıp ve ardından kesilip tartılarak korozyon oranları elde edilen betonarme donatıları için çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.6'da farklı korozyon oranları için daha önceden kesilerek gerçek korozyon oranları elde edildikten sonra çekme deneyi uygulanan betonarme kupon donatıları gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Çekme deneyi uygulanan betonarme kupon donatıları.

Toplamda 5 adet 16 mm çapında boyuna kupon donatılarına çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi uygulanan betonarme kupon donatılarının gerilme-gerinim ilişkileri Şekil 5.7’de ve elde edilen mekanik özellikleri Tablo 5.4’te verilmiştir.



Şekil 5.7. Korozyona maruz bırakılmış betonarme donatılarının mekanik özellikleri.

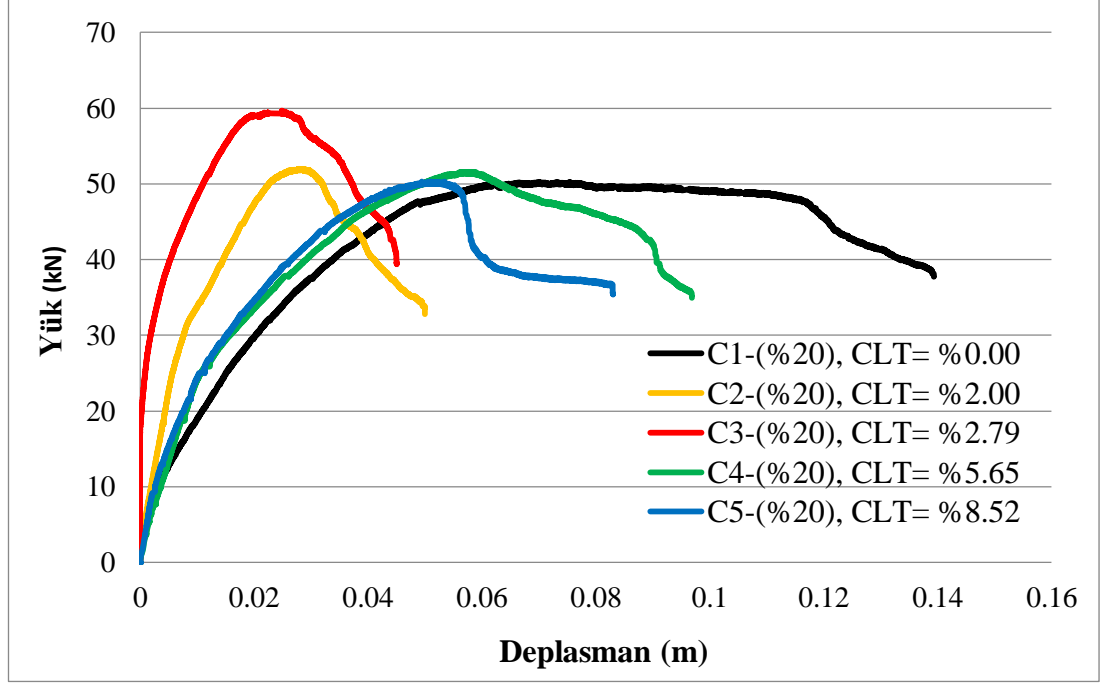
Şekil 5.7’de gösterildiği gibi farklı korozyon oranları sonucunda elde edilen donatı mekanik özellikleri gelecekteki çalışmalara rehberlik etmesi amacı ile sunulmuştur. Söz konusu çalışma kapsamında aderans-kayma hesaplamaları için beton içerisinde paslandırılan ve betonarme kolon numuneler kırılarak çıkartılan donatıların mekanik özellikleri yapılan hesaplamalarda göz önüne alınmıştır.

Tablo 5.4. Çekme deneyleri sonucunda elde edilen betonarme donatılarının mekanik özelliklerinin gravimetrik değerleri.

Numune (L8)	CLL (%)	f _y (MPa)	f _{sh} (MPa)	f _{su} (MPa)	f _{max} (MPa)	ε _y	ε _{sh}	ε _{su}	ε _{max}	E (GPa)
C1	0.00	515.18	502.61	458.03	623.78	0.0027	0.0134	0.1079	0.0706	189.441
C2	1.44	488.41	513.07	557.07	602.20	0.0028	0.0130	0.0488	0.0452	175.614
C3	2.22	484.03	506.10	496.85	607.81	0.0025	0.0152	0.0845	0.0617	190.506
C4	5.63	422.50	485.08	451.76	514.76	0.0025	0.0113	0.0315	0.0236	169.595
C5	7.34	428.20	482.44	485.59	559.87	0.0027	0.0173	0.0557	0.0470	155.943

5.1.3. Yük-deplasman sonuçları

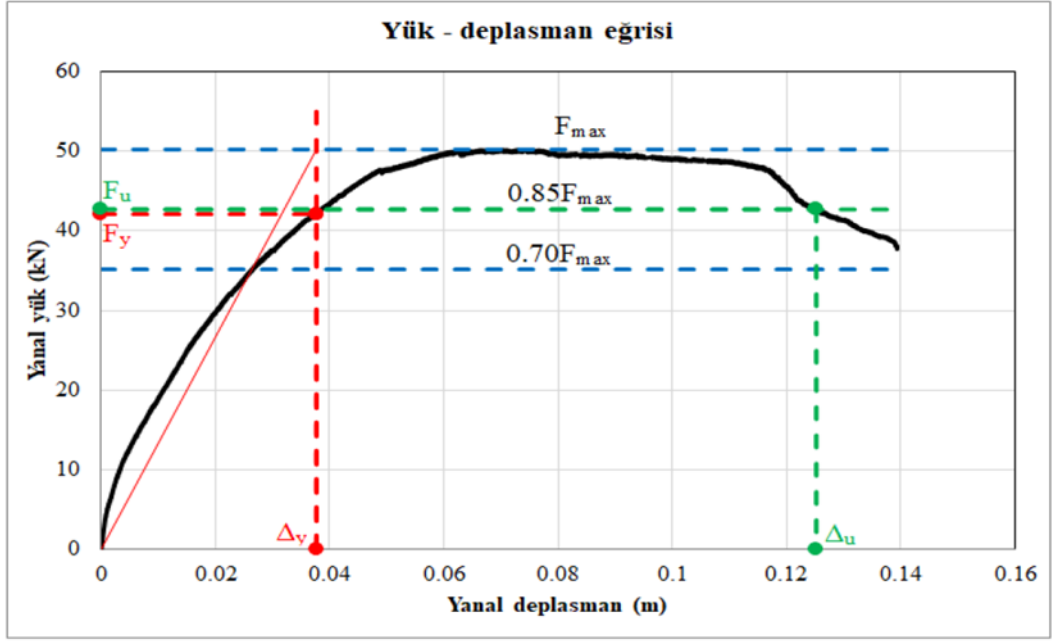
Yapılan monotonik yanal yükleme deneyleri sonucunda beş adet tam ölçekli betonarme kolonlar için elde edilen yük-deplasman sonuçları Şekil 5.8’de gösterilmektedir.



Şekil 5.8. Yük-deplasman sonuçları.

Şekil 5.8’de gösterildiği gibi betonarme donatılarındaki korozyon oranının artması ile birlikte yapılan monotonik (tek yönlü) yanal yükleme çevrimlerinin sayısında azalma görülmektedir. Aynı beton basınç dayanımı, farklı korozyon oranlarında sabit eksenel yük ve monotonik yanal yükün etkisi altında deneye tabi tutulan betonarme kolonlardaki çevrim sayısındaki değişkenlik ise numunelere uygulanan korozyon oranından dolayı oluşmaktadır.

Deneyleri gerçekleştirilen tam ölçekli betonarme kolonlara ait Şekil 5.8’de gösterilen yük-deplasman dağılımları mevcut kolonlara ait korozyon oranları ve beton basınç mukavemetleri göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Betonarme kolonların akma dayanımları ve bu akma dayanımlarına karşılık gelen yer değiştirmeler elde edilen yük-deplasman eğrilerinin daha önceki yıllarda Sezen (2000) tarafından gerçekleştirilen çalışmaya göre Şekil 5.9’da gösterildiği gibi bazı idealleştirmeler yapılarak elde edilmiştir.



Şekil 5.9. Sezen (2000) modeline göre idealize edilmiş yük-deplasman eğrisi.

Bazı idealleştirmeler yapılarak elde edilen Şekil 5.9'da yük-deplasman eğrisinin orijinden geçen en büyük yükün %70'ine karşılık gelen ve yük-deplasman eğrisini kesen ikinci bir çizgi çizilmiştir. Bu çizgi, aynı rijitliğe sahip olarak en büyük yüke karşılık gelen yatay çizgi ile kesişme noktasına uzatılarak çizilmiştir. Bu çizgi ile akma noktasını elde etmek için yatay eksen üzerine kondurulmuştur. Yer değiştirmeler ise uygulanan en büyük yükün %85'ine karşılık ölçülen maksimum yer değiştirme olarak tanımlanmıştır. Bu yöntem kullanılarak hesaplanan yük-deplasman sonuçları, enerji yutma kapasiteleri ve süneklik oranları Tablo 5.5'te verilmiştir.

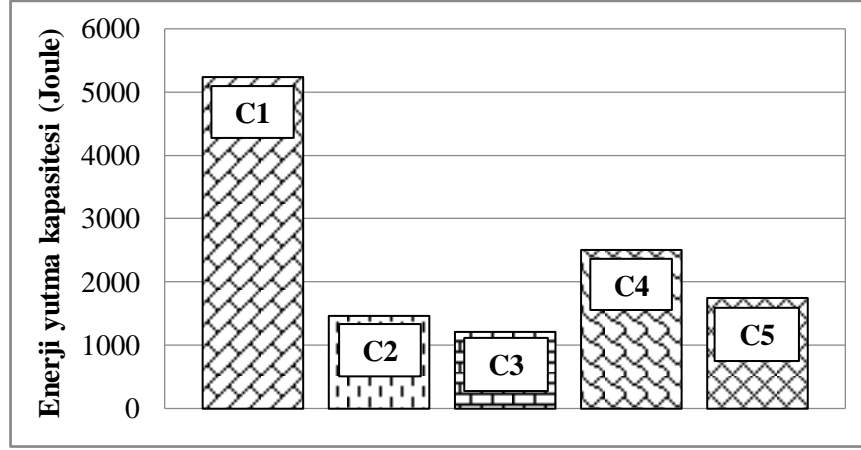
Tablo 5.5. Yapılan monotonik yükleme deneyleri sonrasında elde edilen gravimetrik değerler.

Kolon no	F_y (kN)	F_u (kN)	Δ_y (m)	Δ_u (m)	μ	E (joule)	CL_L (%)	CL_S (%)	CL_T (%)
C1	42.10	42.71	0.04	0.13	3.32	5239.63	-	-	-
C2	44.05	44.19	0.02	0.04	2.14	1465.00	1.46	3.95	2.00
C3	46.14	59.65	0.01	0.02	2.88	1218.71	2.38	5.34	2.79
C4	42.61	49.06	0.03	0.07	1.98	2506.77	4.16	8.52	5.65
C5	42.03	50.31	0.03	0.05	1.67	1749.64	6.36	11.75	8.52

Şekil 5.8’de ve yapılan monotonik yükleme deneyleri sonucunda elde edilen sonuçların verildiği Tablo 5.5’te gösterildiği gibi, korozyon ürününün betonarme donatısı üzerinde oluşturduğu hacimsel birikme nedeni ile belirli korozyon oranlarına kadar akma ve nihai yük dayanımlarında artmaların olduğu gözlenmektedir. Bu artmalar aderans kaybına bağlı olarak donatıda oluşan kaymanın toplam yer değiştirmeye olan katkısından dolayıdır. Ancak yapılan monotonik yüklemenin gerilmelerin yeniden oluşmasına olanak sağlayan tersinir (çift yönlü) yükleme göre etkisinin yeterli olmamasından dolayı oluşan artma ve azalma değerleri belirli düzeylerde kalmaktadır. Monotonik yanal yüklerin artırılmasıyla betonarme kolon numunelerine uygulanan korozyonun etkisi ile oluşan rijitlik değerinin giderek azaldığı görülmüştür.

Yapılan deneylerden sonra elde edilen veriler süneklik açısından değerlendirildiğinde, artan korozyon oranlarıyla birlikte korozyona maruz kalmış betonarme kolonların süneklikleri giderek azalmıştır. Belirli korozyon oranlarına kadar aderans gerilmesinde oluşan artmaya bağlı olarak korozyona maruz kalmış betonarme kolonların sünekliklerinde artmaların oluşması beklenmektedir. Ancak yapılan monotonik yanal yükleme deneyleri sonucunda korozyonun oluşturacağı bu etki tam olarak görülmemektedir. Bunun temel nedeni, çekme bölgesinde (kolon alt bölgesinde) meydana gelen birincil korozyon çatlakların uygulanan yükün etkisi ile giderek artmasıdır. Yapılan yükleme sonucunda meydana gelen bu çatlaklar yapı elemanında çatlakların oluşmadığı duruma göre önemli oranlarda rijitliklerin değişmesine sebep olacaktır.

Yapılan monotonik yükleme deneylerinden sonra korozyona maruz bırakılmamış C1 betonarme kolonunun süneklik oranının C5 betonarme kolonu ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak %50 oranında azaldığı görülmüştür. Yapılan deneylerden sonra artan korozyon oranına bağlı olarak C1, C2, C4 ve C5 betonarme kolon numunelerin süneklik oranlarının giderek azalması ve C3 betonarme kolonu içinde elde edilen süneklik oranlarının artması, eşdeğer enerji yöntemi kapsamında oluşan rijitliklerin farklı olmasından dolayı oluşmaktadır. Şekil 5.10’da yapılan monotonik yükleme deneyler sonucunda elde edilen betonarme kolonların enerji yutma kapasiteleri gösterilmektedir.



Şekil 5.10. Betonarme kolon numunelerin enerji yutma kapasiteleri.

Şekil 5.10'da gösterildiği üzere korozyona maruz kalmış tam ölçekli betonarme kolonlar enerji yutma kapasiteleri bakımından değerlendirildiğinde, korozyonun yapı davranışı üzerinde oluşturduğu etki açık bir şekilde görülmektedir.

Sabit aksenal yük ve monotonik yanal yükün etkisi altında korozyona maruz bırakılmamış C1 betonarme kolonun %8.52 korozyon oranına maruz bırakılmış C5 betonarme kolonu ile karşılaştırıldığında, enerji yutma kapasitesinin %67 oranında azaldığı görülmüştür. Şekil 5.10'da görüldüğü gibi aynı beton basınç dayanımlarına sahip betonarme kolonlarda enerji yutma kapasitesi belirli korozyon oranlarına kadar arttığı ve ileri korozyon oranlarında ise giderek azalmaktadır. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda, korozyonun yapı davranışı üzerinde oluşturacağı etkilerin belirlenebilmesi için yükleme programından elde edilecek hasar düzeylerinin belirlenmesi önemli oranlarda fayda sağlayacaktır.

Betonarme kolonların paslandırma havuzunun alt kısmında bulunan donatılarda (L1, L7 ve L8) korozyon oranları diğer kısımlarda (L2, L3, L4, L5 ve L6) bulunan donatılardan daha fazla olduğu için yapı performans seviyelerinde farklı davranışlara sebep olmaktadır.

Yapılan deneysel çalışma kapsamında korozyon ürünün oluşturmuş olduğu hacimsel artışa bağlı olarak betonarme elemanlarında çatlakları meydana getirerek bu çatlakların betonarme elemanlarına uygulanan yükler etkisi ile daha fazla artmış ve bununla birlikte donatı kesit alanının azalmasına sebep olmuştur. Korozyona maruz kalmış betonarme

donatısının artan korozyon oranlarında başta akma dayanımı olmak üzere birçok mekanik özelliği azalmaktadır. Boyuna ve sargı donatılarının kesit alanlarının azalması ile birlikte betonarme elemanın taşıma kapasitesi artan korozyon oranına bağlı olarak giderek azaldığı tespit edilmiştir.

5.1.4. Aderans-kayma sonuçları

Mevcut literatürde yer alan ve günümüze kadar yapılan çalışmaların sonucunda elde edilen veriler göz önünde bulundurulduğunda korozyonun oluşturduğu hasarların sonucunda meydana gelen aderans kayıpları ve buna bağlı betonarme donatısında oluşan kaymalar yapılan deneysel çalışmayla incelenmiştir. Aderans-kayma ilişkilerine olan etkisi bakımından farklı korozyon oranlarında betonarme kolon numuneler incelenmiştir. Korozyon sonucunda oluşan aderans ve bunun sonucunda betonarme donatılarında oluşan kaymalar yapı performans seviyesini büyük oranlarda olumsuz yönde etkilemektedir. Sezen ve Mohle (2006) tarafından yapılan çalışmada; yanıl yer değiştirmelerin %25 ile %40'ın donatı kaymasından dolayı oluştuğu durumlar göz önünde bulundurularak aderans-kayma ilişkisinin korozyonun oluşturduğu etkiler altında incelenmesi gerektirmektedir. Yapılan yükleme deneylerinden sonra farklı korozyon oranlarına maruz kalmış tam ölçekli betonarme kolonlar için Alsiwat ve Saatcioglu (1972) modeli ile Sezen ve Setzler (2008) modeli göz önüne alınarak tez çalışmasına geçilmiştir. İlk aşamada her bir betonarme kolon donatılarındaki gerçek aderans boyunun hesaplanması için kolon içerisinden çıkartılan ve farklı korozyon oranlarına sahip betonarme donatılar için çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneylerinin yapılabilmesi için yükleme deneylerinden sonra beton içerisinden çıkartılan ve ardından tartma işlemlerinin tamamlanması ile birlikte; betonarme kolonlarının kiriş alt bölgelerinden kolon temel üst yüzeyine doğru uzanan ve gerinim ölçerlerin yapıştırıldığı (L8 boyuna donatısı) betonarme donatıları daha önce belirlenen boylarda kesilmiştir. Çekme deneylerinin kontrollü bir şekilde yapılabilmesi için istenilen boylarda kesilen boyuna donatılardaki korozyon oranlarının kesilmemiş betonarme donatısındaki korozyon oranına mümkün olduğunca yakın olmasına özen gösterilmiştir. Tablo 5.3'te gösterildiği üzere kesilen kupon donatılar ile kesilmemiş boyuna donatılardaki korozyon oranlarının mümkün olduğunca aynı korozyon oranlarına sahip olmasına dikkat edilerek kontrollü bir şekilde donatılar kesilmiştir.

Kesilen paslandırılmış donatılar ile aynı uzunluğa sahip kontrol donatıları (paslanmamış aynı uzunluktaki donatılar) istenilen korozyon oranlarının belirlenebilmesi için kullanılmıştır. Aderans-kayma modelinin geliştirilmesi için kullanılacak olan korozyona maruz kalmış betonarme donatılarının mekanik özelliklerinin belirlenmesinden sonra, her bir betonarme kolon donatısına yapıştırılan gerinim ölçerler yardımı ile kolon donatısı boyunca gerinim dağılımı elde edilmiştir. Yapılan gerinim dağılımı sonuçlarına bakıldığında betonarme kolonların L8 donatısının 175 mm mesafesinde yapıştırılan gerinim ölçerlerin bulunduğu yerlerde gerilmelerin yoğun olduğu bölgeler olarak tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak yapılan çekme deneylerinde elde edilen veriler kullanılarak her bir betonarme kolonun elastik bölgede oluşan aderans gerilmesi Denk. 5.1 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$u_b = \frac{f_y d_b}{4l_d} = \frac{E_s \varepsilon_s d_b}{l_d}, \quad \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \quad (5.1)$$

Burada u_b elastik bölgedeki aderans gerilmesini, f_y (N/mm²) akma kuvvetini, d_b (mm) donatı çapını, E_s (N/mm²) betonarme donatısının elastisite modülünü ve l_d (mm) elastik (akma sonrası) bölgenin aderans boyunu temsil etmektedir.

Elastik bölge içerisinde betonarme donatısında oluşan kayma Denk. 5.2 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$Sıyrılma = \frac{\varepsilon_s l_d}{2}, \quad \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \quad (5.2)$$

Burada $Sıyrılma$ (mm) betonarme donatısında oluşan kaymayı, l_d (mm) elastik bölgenin aderans boyunu ve ε_s (mm/mm) donatıda oluşan şekil değiştirmeyi temsil etmektedir.

Elastik ötesi bölgelerde oluşan aderans gerilmesi Denk. 5.3 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$u'_b = \frac{(f_s - f_y) d_b}{4l'_d}, \quad \varepsilon_s > \varepsilon_y \quad (5.3)$$

Burada u'_b (N/mm²) elastik ötesi bölgede oluşan aderans gerilmesini, l'_d (mm) elastik ötesi bölgede oluşan aderans boyunu temsil etmektedir.

Elastik ötesi bölgelerde betonarme donatısında oluşan kayma Denk. 5.4 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$Sıyrıılma = \frac{\varepsilon_s l_d}{2} + \frac{(\varepsilon_s + \varepsilon_y) l'_d}{2}, \quad \varepsilon_s > \varepsilon_y \quad (5.4)$$

Her ne kadar korozyon belirli bir seviyeye kadar beton ile donatı arasındaki aderans gerilmesini artırsa da, artan korozyon oranı ile birlikte aderans gerilmesinin azalmasıyla donatıda oluşan kaymanın artması yapı elemanının oluşturmuş olduğu davranışla ortaya çıkmaktadır.

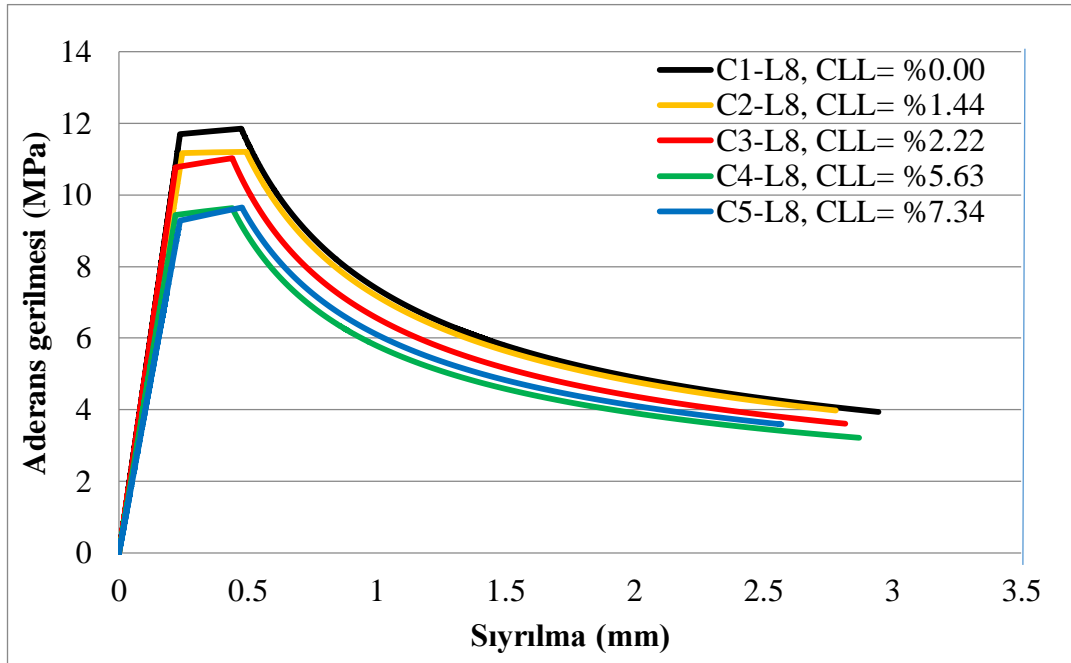
Yapılan hesaplamalar sonucunda Şekil 5.11'de farklı korozyon oranlarında aderans - kayma dağılımı verilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda paslandırılmamış olan C1 kolonu ile paslandırılmış kolonlar karşılaştırılmıştır. Paslanmamış C1 kolonunda elde edilen aderans gerilmesi 11.85 MPa buna göre sırasıyla paslandırılmış betonarme kolonlardan (C2, C3, C4 ve C5) elde edilen aderans gerilmesi sırasıyla 11.21, 11.00, 9.65 ve 9.00 MPa olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda Korozyon oranının artmasıyla birlikte paslandırılmamış betonarme kolon (C1) ile paslandırılmış betonarme kolonlar (C2, C3, C4 ve C5) karşılaştırıldığında sırasıyla %5.40, %6.92, %18.57 ve %24.00 oranlarında aderans gerilmesinde azalmaların olduğu görülmüştür. Korozyonun artmasıyla birlikte betonarme donatılarda oluşan aderans gerilmesi azalmaktadır. Bununla birlikte betonarme donatılarda aderans gerilmesinin azalmasıyla donatıda oluşan kayma artmaktadır. Yapılan çalışmada aynı beton basınç dayanımlara sahip ve farklı korozyon oranlarında monotonik yüklemeye maruz bırakılmış tam ölçekli betonarme kolonlar artan korozyonun etkisiyle aderans gerilmesinde azalmalar tespit edilmiştir. Yapı elemanlarında aderans gerilmesinin azalmasıyla birlikte betonarme donatısında oluşan kaymalar artmıştır. Artan bu kaymalarla birlikte yapı elemanının taşıma kapasitesini azalmasına neden olmuştur.

Aderans gerilmesi en yüksek değerleri elastik bölge sınırları içerisinde yer almaktadır. Ancak elastik ötesi bölge sınır içerisinde sağlanan aderans gerilmesi ve buna bağlı betonarme donatılarda oluşan kaymalar yapı elemanlarında sünekliği belirli oranlara kadar artırmaktadır. Ancak artan korozyonun etkisiyle süneklikte azalmaların olduğu görülmüştür

Yapılan monotonik yükleme deneyleri sonucunda artan korozyon oranlarının oluşturduğu etkilerden dolayı hasara uğrayan tam ölçekli betonarme kolon numunelerde aderans gerilmesinin önemli oranlarda azaldığı ve buna bağlı olarak betonarme donatısında oluşan kaymanın giderek arttığı görülmüştür. Yapılan deneysel çalışmada meydana gelen donatı kaymasının yapı performansını önemli oranlarda olumsuz yönden etkilemektedir.

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlara göre korozyona maruz bırakılmamış betonarme kolonu ile korozyona maruz bırakılmış betonarme kolonlarına göre karşılaştırıldığında aderans boyun artan korozyon oranıyla %2.82 oranında arttığı görülmüştür. Aderans gerilmesi korozyona maruz kalma süresinin artmasına bağlı olarak giderek değişmiştir. Burada korozyon oranının artmasıyla birlikte aderans gerilmesi giderek azalmış ve buna bağlı olarak donatı oluşan kayma giderek artmıştır. Ayrıca aderans gerilmesinin azalmasıyla birlikte aderans boyunda artışlar görülmüştür.

Betonarme yapılarda aderans gerilmesinin yetersiz olduğu durumlarda donatılar üzerlerine düşen görevleri yerine getiremeden sıyrılırlar. Bunun sonucunda yapı elemanlarında istenilen performans seviyelerinden uzaklaşarak zamanla yapının ömrünü tamamlamadan geçmesine sebep olmaktadır.



Şekil 5.11. Her bir betonarme kolon için elde edilen aderans - sıyrılma dağılımları.

6. SONUÇLAR

Sabit eksenel yük ve monotonik yanal yükün etkisi altında korozyona maruz bırakılmış tam ölçekli betonarme kolonlarda aderans kaybına bağlı olarak donatıda oluşan kayma etkisinin incelenmesi için deneysel bir çalışma yapılmıştır. TÜBİTAK 3501 (116M162) projesi kapsamında yapılan bu çalışmada deneye tabii tutulan betonarme kolonlar, ilgili yönetmeliklere uygun olarak geleneksel yapıların özelliklerine göre nervürlü betonarme donatısı ve C30 beton sınıfı kullanılarak aynı kesit özelliklerine sahip olan betonarme elemanlar üretilmiştir. Betonarme elemanlarından bir tanesi referans olarak seçilerek hiçbir etkiye maruz bırakılmamış ve kalan diğer dört adet betonarme kolon numuneler ise hızlandırılmış korozyon yöntemi kullanılarak farklı oranlarda korozyona maruz bırakılmıştır. Yapılan deneylerden sonra numunelerin betonları kırılarak içerisindeki donatılar daha önceden belirtilen kodlama planına göre kontrollü bir şekilde çıkartılarak gerçek korozyon oranları elde edilmiştir. Deneyleri gerçekleştirilen tam ölçekli betonarme kolon numuneler, yükleme deneyi ile göçünceye kadar zorlanmış, yük-deplasman, süneklik, enerji yutma kapasiteleri ve aderans-kayma ilişkileri incelenmiştir. Bu bölümde elde edilen sonuçlar açıklanmıştır.

Paslandırılmamış betonarme kolon numunesi (C1), hızlandırılmış korozyon yöntemi kullanılarak paslandırılan betonarme kolon numunelerine (C2, C3, C4 ve C5) göre karşılaştırıldığında dayanımının yüksek olduğu görülmüştür. Artan korozyonun etkisiyle daha gevrek dayanım kaybı oluşmuştur. Yapılan çalışma ile korozyonun yapı elemanların davranışını önemli oranlarda etkilediği belirlenmiştir.

Monotonik yükleme deneylerinden sonra elde edilen sonuçlara bakıldığında artan korozyon oranına bağlı olarak C1, C2, C4 ve C5 betonarme kolon numunelerin süneklik oranlarının azalması ve C3 betonarme kolonu için elde edilen süneklik oranlarının artması, eşdeğer enerji yöntemi kapsamında oluşan rijitliklerin farklı olmasından dolayı olduğu görülmüştür.

Sabit eksenel yük ve monotonik yanal yük etkisi altında deneyleri gerçekleştirilen betonarme kolonlar karşılaştırıldığında, yüksek korozyon oranlarına kadar paslandırılmamış betonarme elemanın enerji yutma kapasitesinin paslandırılmamış referans betonarme elemanın enerji yutma kapasitesine göre %67 oranlarına kadar azaldığı

görülmüştür. Enerji yutma kapasitesi düşük seviyelerdeki korozyon oranlarına kadar arttığı, yüksek korozyon oranlarında ise giderek azalmaktadır.

Paslandırılmamış referans betonarme kolonu ile paslandırılmış C5 kolonuyla karşılaştırıldığında korozyon oranının artmasına bağlı olarak %24 oranına kadar azalan aderans gerilmesiyle birlikte donatıda oluşan sıyrılma giderek artmıştır. Donatıda meydana gelen sıyrılma tam olarak o bölgede oluşan birim şekil değiştirmeyi temsil etmektedir. Dolayısıyla betonarme yapı elemanlarda meydana gelen sıyrılma birim şekil değiştirmelerle ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte aderans boyunda %2.82 oranında artış olduğu görülmüştür. Bu artışlar donatı sıyrılmasına bağlı olarak meydana gelmiştir.

Paslanmaya maruz kalmış betonarme donatıların kesit alanlarının azalması betonarme elemanların aderansını fazla etkileyememektedir. Burada aderans dayanımını azaltan en önemli temel etken korozyon sürecinde meydana gelen birincil korozyon çatlaklarının yüklemeye etkisi ile giderek artması sonucu donatının yeterli oranlarda gerilme alamamasıdır. Çatlak genişliği arttıkça o bölgede aderans boyu da artmıştır. Buna bağlı olarak aderans gerilmeleri giderek azalmıştır. Paslandırılmış betonarme kolonlarda donatı kaymasının toplam yanal yer değiştirmeye %35-43 oranlarında etkisinin olduğu görülmüştür.

Aderans dayanımının artan korozyon oranına bağlı olarak bir miktar arttığı daha sonra ki korozyon oranlarında giderek azalma göstermiştir. Aderans dayanımı tüm betonarme elemanlarda elastik bölgeye kadar giderek artmış, akma sonrası bölgede giderek azalmıştır. Aderans gerilmelerin korozyon etkisine bağlı olarak azalmasıyla betonarme elemanlarda oluşan donatı kayması giderek artış göstermiştir. Artan korozyon oranlarında aderans dayanımının azalması ve betonarme elemanlarda sıyrılmaların meydana gelmesiyle yapı elemanların davranışlarını olumsuz yönde etkilediği görülmüştür.

Korozyona maruz kalmış betonarme yapılarda yapı performans seviyesini etkilenmesinde korozyonun oluşturduğu zararlarla beraber aderans kaybı ve buna bağlı oluşan sıyrılma değerlerinin yapılan değerlendirmelerde göz önünde bulundurulması gelecekteki çalışmalar açısından oldukça fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- ACI Committee 318-02. (2002) “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI318R-02)”. *American Concrete Institute*, Farmington Hills MI: 190.
- ACI Committee 408-03. (1979) “Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension (ACI 408R-03)”. *American Concrete Institute*, Farmington Hills MI: 47-61.
- Akman, M.S. (1992) “Deniz yapılarında beton teknolojisi”, İTÜ, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, *Ofset Matbaası*, İstanbul. S. 74-105.
- Alsawat, J.M. and Saatcioglu, M. (1992) “Reinforcement Anchorage Slip Under Monotonic Loading”. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 118(9), 2421-2438.
- ASTM (American Standards for Testing and Materials). (2003) “Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens”, *G1-03, West Conshohocken*, PA, 1-9.
- ASTM (American Standards for Testing and Materials). (2004) “Standard terminology relating to corrosion and corrosion testing”, *G15-04, The American Society for Testing and Materials*, Pennsylvania.
- Arda, T. S. (1968) “Betonarmede Aderans Konusunda Bir Derleme”, *İTÜ Mimarlık Fakültesi Yayını*, İstanbul.
- Auyeung, Y., Balaguru, P. and Chung, L. (2000) “Bond Behavior of Corroded Reinforcement Bars”, *ACI Materials Journal*, 97(2), 214-220.
- Baradan, B. (1997) “Yapı Malzemesi-II”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları*, İzmir, s.174-176.
- Bazant, Z. P. and Planas, J. (1998) “Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quassibrittle Materials”, *CRC*, 616.
- Berto, L., Vitaliani, R., Saetta, A. and Simioni, P. (2009) “Seismic Assessment of Existing Reinforced Concrete Structures Affected by Degradation Phenomena”, *Structural Safety*, 31(4), 284-297.
- Beycioğlu, A. (2013) “Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Beton ile Donatı Aderans İlişkisinin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Bicer, K., Yalciner, H., Pekrioglu, B. A. and Kumbasaroglu, A. (2018) “Effect of corrosion on flexural strength of Reinforced Concrete beams with polypropylene fibers”, *Construction and Building Materials*, 185, 574-588.

- Bonacci, J. F. (1998) "Laboratory simulations of corrosion in reinforced concrete and repair with CFRP wraps", *CSCCE 1998 Annual Structural Speciality Conference*, Montreal, 653-662.
- Cairns, B., Russell, E. E. and Travis, L. D. (1999) "The Research Scanning Polarimeter: Calibration and ground-based measurements", *In Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing II, Denver. Col.*, Proc. SPIE, vol. 3754, pp. 186.
- Cabrera, J. G. (1996) "Deterioration of Concrete Due to Reinforcement Steel Corrosion", *Cement and Concrete Composites*, 18 (1), 47-59.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N. (1998) "Betonarme Yapılar", *Sema Matbaacılık*, İstanbul.
- Ch, A, Apostolopoulos., M, Papadopoulos., and S, Pantelakis. (2006) "Tensile Behaviour of corroded reinforcing steel bars BSt 500s", *Construction and Building Materials*, pp. 782-789.
- Chung, L., Ho Cho, S., Ho Jay Kim, J. and Tea Yi, S. (2004) "Correction Factor Suggestion for ACI Development Length Provisions Based on Flexural Testing of RC Slabs With Various Levels of Corroded Reinforcing Bars", *Journal Engineering Structures*, 26(8), 1013-1026.
- Chung, L., Ho Jay Kim, J. and Tea Yi, S. (2008) "Bond Strength Prediction for Reinforced Concrete Members With Highly Corroded Reinforcing Bars", *Cement and Concrete Composites*, 30(7), 603-611.
- Demirel, B. ve Yazıcıoğlu, S. (2007) "Silis Dumanının Karbon Fiber Takviyeli Hafif Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(1), 103-109.
- Desnerck, P., De Schutter, G. and Taerwe, L. (2010) "Bond Behaviour of Reinforced Bars in SCC: Experimental Determination by Using Beam Tests", *Materials and Structures*, Vol. 43, pp. 53-62.
- Doğangün, A. (2002) "Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarım İlkeleri", *Birsen Yayınevi*, İstanbul.
- El Maaddawy, T., Chahrour, A. and Soudki, K. (2006) "Effect of fiber-reinforced polymer wraps on corrosion activity and concrete cracking in chloride-contaminated concrete cylinders", *Journal of Composites for Construction*, 10(2), 139-147.
- Ersoy, U. (1985) "Betonarme", *Evrım Yayınevi*, İstanbul.
- Ersoy, U. ve Özcebe, G. (2001) "Betonarme: Temel İlkeler TS 500 (2000) ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap", Genişletilmiş Yeni Baskı, *Evrım Yayınevi*, İstanbul.

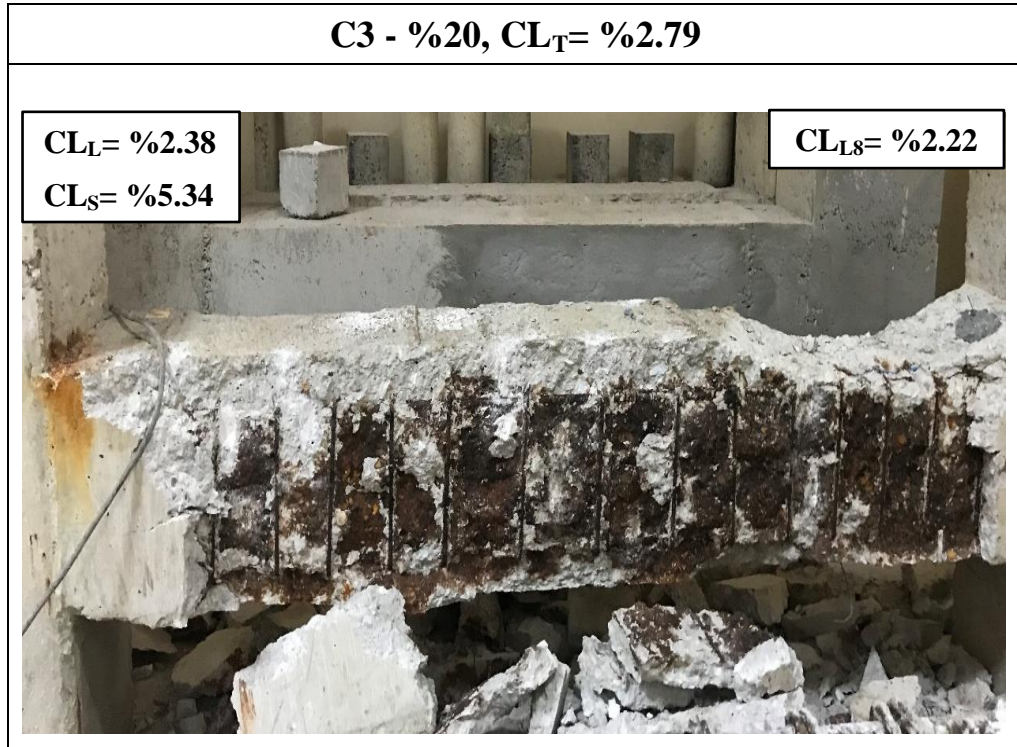
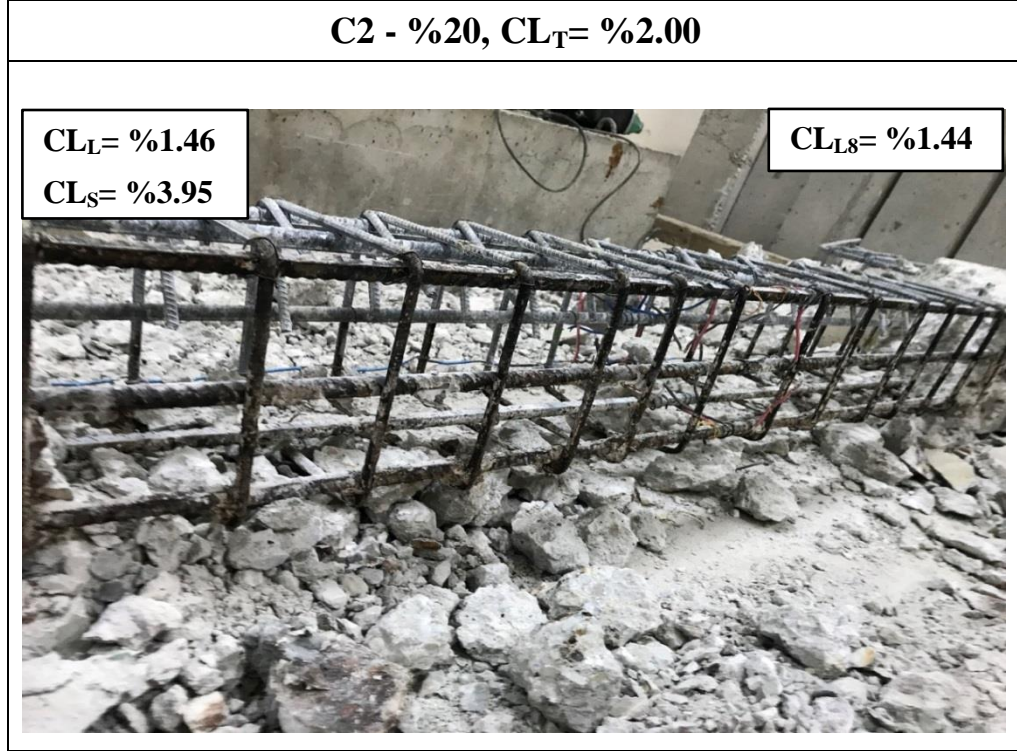
- Ersoy, U. ve Özcebe, G. (2004) “Betonarme”, Genişletilmiş 2. Baskı, *Evrım Yayınevi*, İstanbul, 721s.
- Fang, C., Lundgren, K., Chen, L. and Zhu, C. (2004) “Corrosion Influence on Bond in Reinforced Concrete”, *Cement and Concrete Research*, 34 (11), 2159-2167.
- FEMA (Federal Emergency Management Agency). (2007) “Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components”, *FEMA-461*, Washington, DC, 1-113.
- Ghods, P., Isgor, O. B. and Pour-Ghaz, M. (2007) “A Practical Method for Calculating the Corrosion Rate of Uniformly Depassivated Reinforcing Bars in Concrete”, *Materials and Corrosion*, 58(4), 265-272.
- Gulikers, J. (2005) “Theoretical Considerations on the Supposed Linear Relationships Between Concrete Resistivity and Corrosion Rate of Steel Reinforcement”, *Materials and Corrosion*, 56(6), 393-403.
- İşsever, F. (2013) “Birden Fazla Mineral Katkı İçeren, Kendiliğinden Yerleşen Harcın Dayanım, Dayanıklılık ve Viskozite Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ.
- Karataş, M. (2007) “Mineral Katkı Dozajının ve Türünün Kendiliğinden Sıkışan Betondaki Donatı Aderansına Etkisi”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ.
- Lee, H.S., Noguchi, T. and Tomosawa, F. (2002) “Evaluation of the Bond Properties Between Concrete and Reinforcement as a Function of the Degree of Reinforcement Corrosion”, *Cement and Concrete Research*, 32(8), 1313-1318.
- Li, D., Wei, R., Xing, F., Sui, L., Zhou, Y. and Wang, W. (2018) “Influence of Non-uniform corrosion of steel bars on the seismic behavior of reinforced concrete columns”, *Construction and Building Materials*, 167, 20-32.
- 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.
- Morinaga, S. (1988) “Prediction Of Service Life of Reinforced Concrete Buildings Based on Rate of Corrosion of Reinforcing Steel”, Special Rep. No. 23, *Institute of Technology*, Shimizu Corporation, Tokyo, Japan, 82.
- Otani, S. and Sozen, M. A. (1972) “Behaviour of multi-story Reinforced Concrete frames during earthquakes”, *Structural Research Series*, University of Illinois, Urbana. No. 392, pp. 551.
- Paul, S. C., Babafemi, A. J., Conradie, K. and Van, Zijl, GPAG. (2016) “Applied voltage on corrosion mass loss and cracking behavior of steel-reinforced SHCC and mortar specimens”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(5), 1-9.

- Pochanart, S. and Harmon, T. (1989) "Bond-slip model for generalized excitation including fatigue." *American Concrete Institute Materials Journal*, 86 (5), 465-474.
- Sezen, H. (2000) "Seismic behavior and modeling of reinforced concrete building columns" Doctor of Philosophy, *Engineering - Civil and Environmental Engineering, University of California*, Berkeley, 1-336.
- Sezen, H. and Moehle, J. P. (2006) "Seismic Test of Concrete Columns With Light Transverse Reinforcement", *American Concrete Institute Structural Journal*, 103(6), 824-849.
- Sezen, H. and Setzler, E. J. (2008) "Reinforcement slip in Reinforced concrete columns". *American Concrete Institute Structural Journal*, 105(3), 280-289.
- Stanish, K. and Hooton, R. D. (1999) "Pantazopoulou SJ. Corrosion Effects on Bond Strength in Reinforced Concrete", *American Concrete Institute Structural Journal*, 96(6), 915-921.
- Tastani, S. P. and Pantazopoulou, S. J. (2004) "Experimental evaluation of FRP jackets in upgrading RC corroded columns with substandard detailing", *Engineering Structures*, 26, 817-829.
- Taşdemir, M. A. (2002) "Betonun Dayanım ve Durabiliteye Göre Tasarımı ve Üretimi", İMO İstanbul Şubesi, *Sürekli Eğitim Seminerleri*, İstanbul.
- TS 500. (2000) "Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS 708. (2010) "Beton çelik çubuklar", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS 1247. (1948) "Beton Yapım, Döküm ve bakım kuralları", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN-206. (2000) "Beton-Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 50525-2-31. (2012) "Elektrik Kabloları - Alçak gerilim Enerji Kabloları", *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Yalciner, H., Sensoy, S. and Eren, O. (2012a) "Effect of Corrosion Damage on the Performance Level of a 25-Year-Old Reinforced Concrete Building", *Journal of Shock and Vibration*, 19, 1-12.
- Yalciner, H., Eren, O. and Sensoy, S. (2012b) "An Experimental Study on the Bond Strength Between Reinforcement Bars and Concrete as a Function of Concrete Cover, Strength And Corrosion Level", *Cement and Concrete Research*, 42(5), 643-655.

- Yalciner, H., Sensoy, S. and Eren, O. (2012c) “Time-dependent Seismic Performance Assessment of a Single-Degree- of-Freedom Frame Subject to Corrosion”, *Engineering Failure Analysis*, 19, 109-122.
- Yalciner, H. (2017) “Paslanmaya maruz kalmış betonarme kirişlerde geo-grid kullanımının süneklik üzerinde etkisi”, *FBA-2016-330, Erzincan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi*, 13 pp.
- Yang, S. Y., Song, X. B., Jia, H. X., Chen, X. and Liu, X. L. (2016) “Experimental research on hysteretic behaviors of corroded reinforced concrete columns with different maximum amounts of corrosion of rebar”, *Construction and Building Materials*, 121, 319-327.
- Yücel, K.T., Özel, C., Gülmez, S., Kuşçu, A. ve Uygunoğlu, T. (2006) “Normal ve Fiber Takviyeli Betonlarda Donatı-Beton Aderans Dayanımının Belirlenmesi ve Bulanık Mantıkla Modellenmesi”, *İÇTAG A040 (104I040) sayılı TÜBİTAK hızlı destek projesi*, Ankara, 55s.
- Zhang, B. (2005) “Development of corrosion resistant galvanizing alloys” Thesis de D. Fi School of Engineering - *University of Birmingham, Edgbaston*, Birmingham, Reino Unido.

EKLER

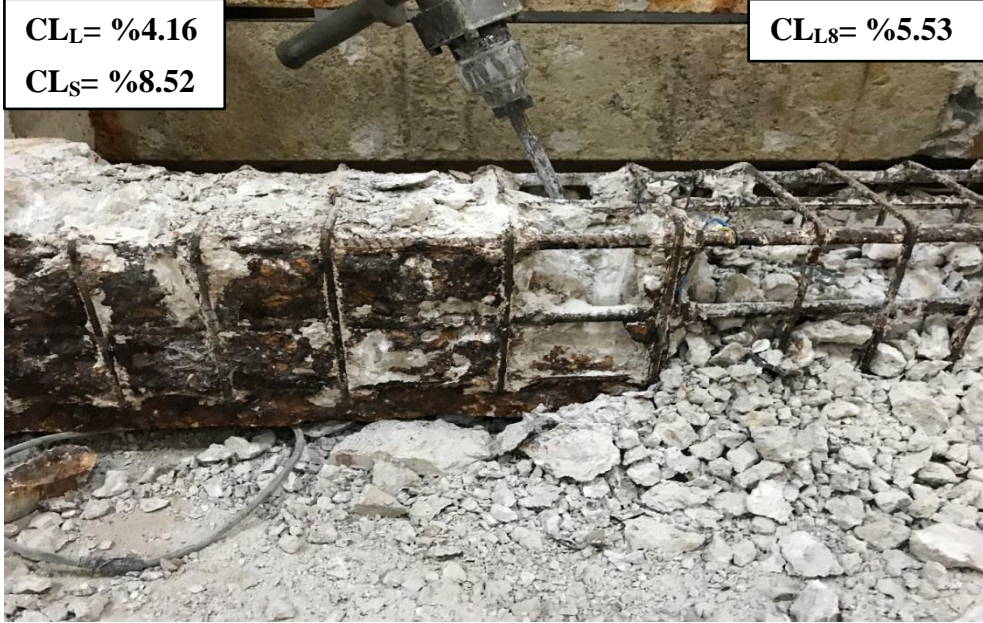
Ek-1. Yükleme Deneylerinden Sonra Kırımları Yapılan Betonarme Kolonlar



C4 - %20, CL_T= %5.65

CL_L= %4.16
CL_S= %8.52

CL_{L8}= %5.53



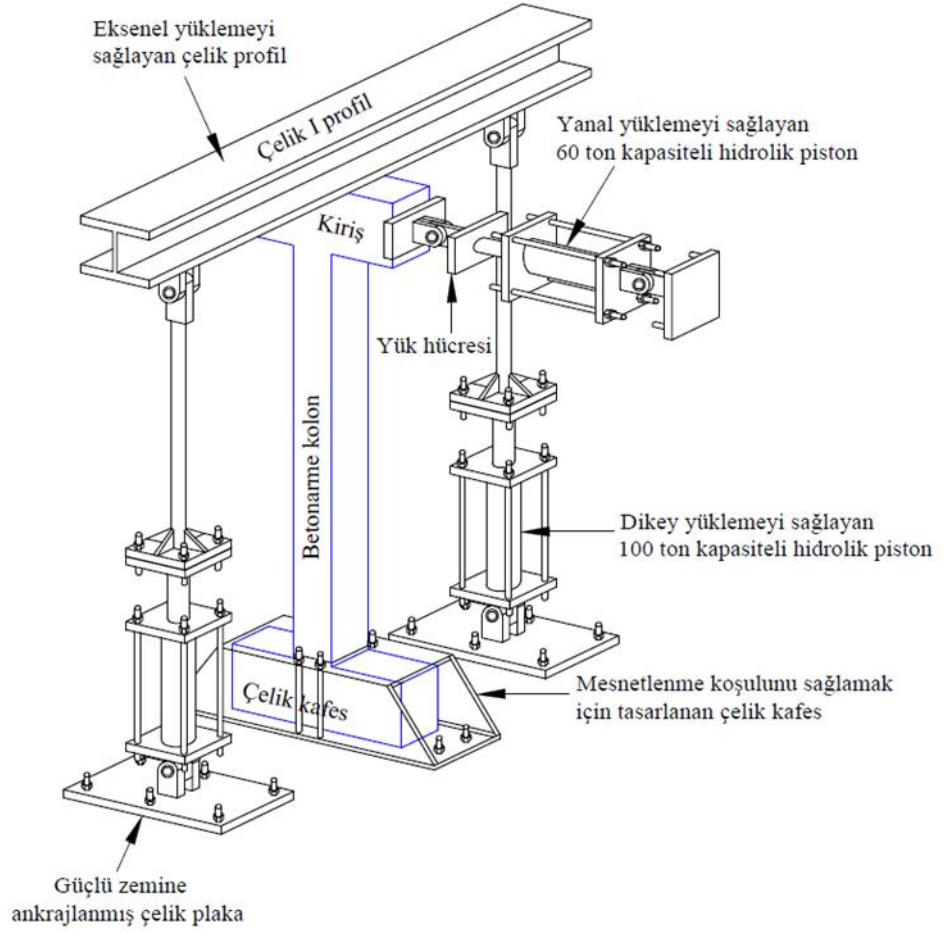
C5 - %20, CL_T= %8.52

CL_L= %6.36
CL_S= %11.75

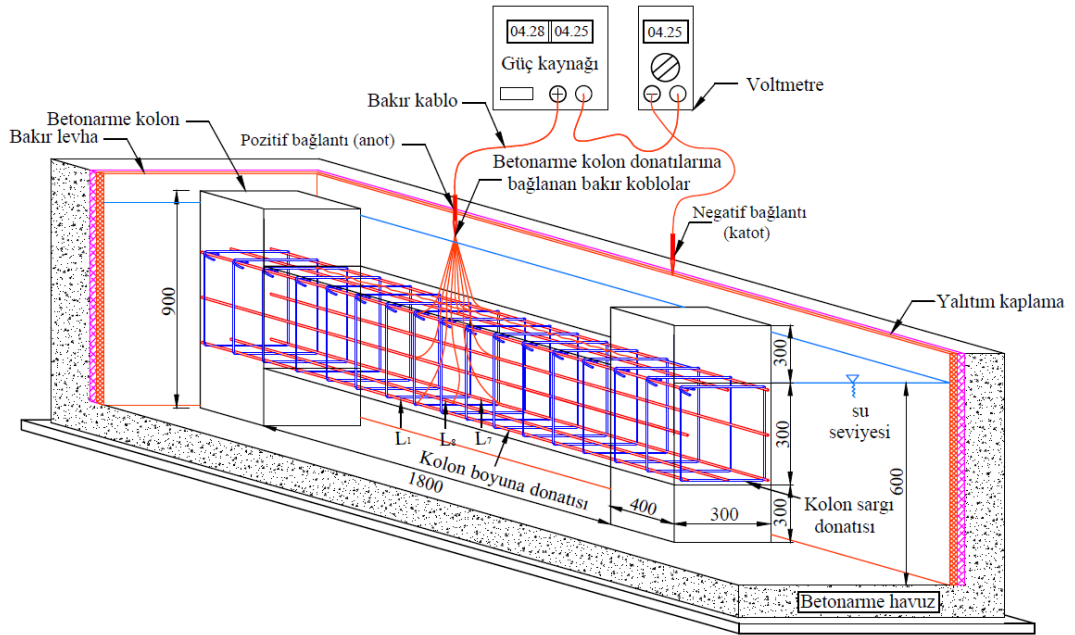
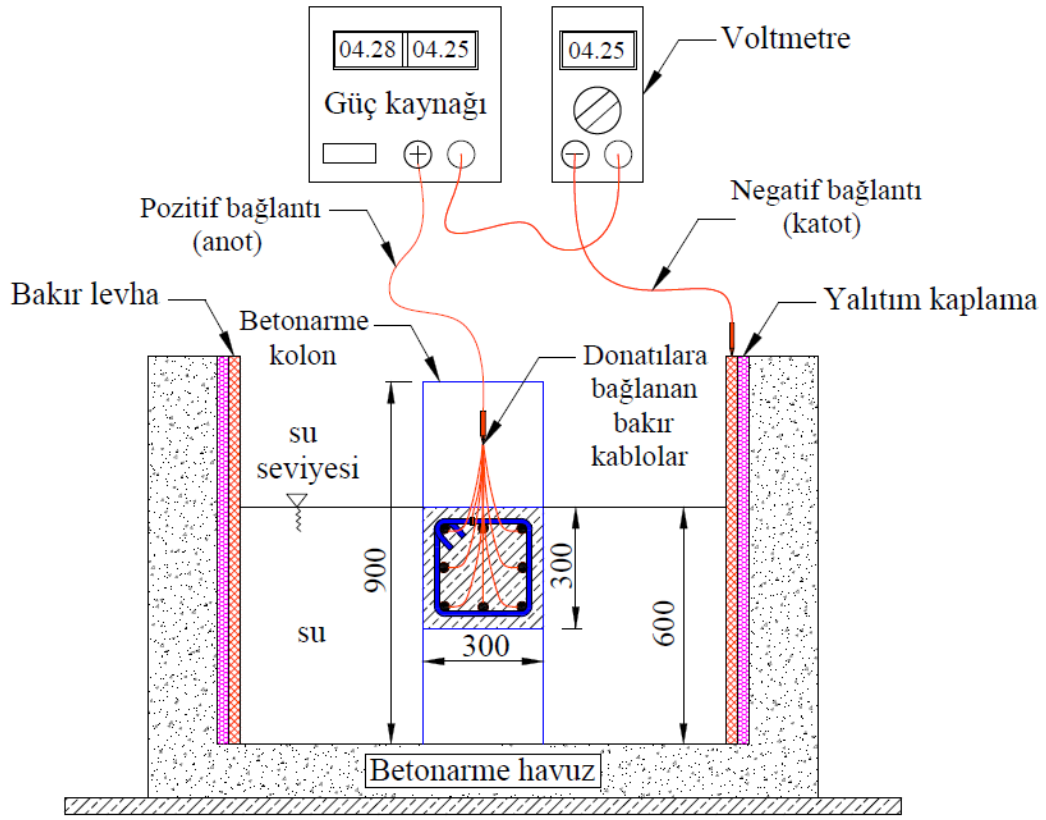
CL_{L8}= %7.34



Ek-2. Deneysel Çalışmada Kullanılan Yükleme Sistemi



Ek-3. Paslandırma Sürecinde Kullanılan Hızlandırılmış Korozyon Yöntemi



Ek-4. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar

- Mermit, M. F., Kohistani, R., Karimi, A., Yalciner, H. ve Kumbasaroglu, A. (2018) “Korozyona Maruz Kalmış Betonarme Kolonların Monotonik Yükleme Etkisindeki Davranışı”, *International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology*, 22-23 Kasım, Ankara / Türkiye. Poster sunumu.
- Yalciner, H., Kumbasaroglu, A., Mermit, M. F., Kohistani, R. ve Karimi, A. (2019) “Paslanmaya Maruz Kalmış Tam Ölçekli Betonarme Kolonların Monotonik Yükleme Etkisi Altında Yapısal Davranışlarının İncelenmesi: Korozyon Çalışmaları İçin Öneriler”, *Erzincan University Journal of Science and Teknology*, Erzincan, 12(2), 695-713.
- Yalciner, H., Kumbasaroglu, A., Mermit, M. F., Dogru, E., Turan, A. İ., Karimi, A., Kohistani, R. and Bicer. K. (2019) “Flexural Strength of Corroded Reinforced Concrete Beams”, *ACI Structural Journal*, 20 (100-112).
- Yalciner, H. (2017) “Paslanmaya Maruz Kalmış Betonarme Kolonlarda Donatı Sıyrılma Hesabı için Deneye Dayalı bir Modelin Geliştirilmesi”, *TÜBİTAK 3501 (116M162)*, Bu projede tez sahibi bursiyer araştırmacı öğrenci olarak yer almıştır.

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Fırat MERMİT, 1991 yılında Van'ın Topaktaş köyünde doğmuştur. İlköğrenimini İsmail Hakkı Tonguç ilköğretim okulunda tamamladıktan sonra 2007 yılında Vali Haydarbey Anadolu Lisesine başladı. 2011 yılında liseden mezun olduktan sonra 2012 yılında Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2016 yılında bu bölümden İnşaat Mühendisi olarak mezun olmuştur. Daha sonra birçok özel firmada proje mühendisliği ve saha şefliği yaptıktan sonra 2017 yılında Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisansa başlamıştır. Aynı yıl Erzincan Yapı Denetim firmasında çalışmaya başlamış ve halen yapı denetim firmasında sorumlu kontrol mühendisi olarak çalışmaktadır. Ayrıca TÜBİTAK 3501 (116M162) numaralı projeye burslu öğrenci olarak dâhil olmuş ve halen devam etmektedir.