

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS

KOROZYONA MARUZ KALMIŞ BETONARME DÖŞEMELERİN
EĞİLME YÜKÜ ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞI

Halil İbrahim SEZGİN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Atila KUMBASAROĞLU

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

ERZİNCAN
2021

Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans

KOROZYONA MARUZ KALMIŞ BETONARME DÖŞEMELERİN EĞİLME YÜKÜ ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞI

Halil İbrahim SEZGİN

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Atila KUMBASAROĞLU

Toplam beş adet iki doğrultulu korozyona uğramış betonarme döşemeler aksel eğilme yükü altında test edilmiştir ve bir adet korozyonsuz betonarme döşeme ile karşılaştırılmıştır. Betona gömülü donatı çubuklarının korozyona maruz bırakılması için hızlandırılmış bir korozyon yöntemi kullanılmıştır. Eğilme dayanımı testlerinden sonra beton kırılarak ve tüm donatı çubukları çıkarılarak gerçek korozyon seviyeleri elde edilmiştir. Betonarme döşemelerin kısa ve uzun doğrultularında gerçek korozyon seviyeleri elde edilerek, betonarme döşemelerin her iki doğrultuda deneysel moment kapasiteleri, akma hattı teoremine göre belirlenmiştir. Literatürde bulunan deneysel veriler, korozyona uğramış betonarme döşemelerin moment taşıma kapasitelerinin ve göçme yüklerinin tahmin edilmesi için daha önce ve yeni geliştirilen modellerin doğrulanması için kullanılmıştır. Yürütülen deneysel çalışmalara ait sonuçlardan, betonarme döşeme numunelerinin yük taşıma ve enerji yutma kapasitelerinin daha yüksek korozyon oranı ile azaldığı anlaşılmıştır. Yapılan araştırma sonucunda, korozyona uğramış betonarme döşemelerin enerji yutma kapasitelerinin ve süneklik oranlarının hesaplanmasında kullanılan yer değiştirme bazlı ve/veya eğrilik bazlı yöntemler ile gerçek korozyon seviyelerinin elde edilememesi nedeniyle literatürde bulunan deneysel test sonuçlarının yanıltıcı olduğu bulunmuştur.

2021, 38 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Beton, Döşeme, Eğilme dayanımı, Korozyon.

ABSTRACT

MSc Thesis

BEHAVIOR OF CORRODED REINFORCED CONCRETE SLABS UNDER THE FLEXURAL LOADING EFFECT

Halil İbrahim SEZGİN

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

Supervisor: Assist. Prof. Atila KUMBASAROĞLU

Total of five two-way corroded reinforced concrete (RC) slabs were tested under flexure and compared with one uncorroded RC slab. An accelerated corrosion method was used to corrode the reinforcement bars embedment in concrete. Actual corrosion levels were obtained following the flexural strength tests by breaking the concrete and extracting all reinforcement bars. With the help of the actual corrosion levels at short and long directions of the RC slabs were obtained, experimental residual moment capacities of RC slabs at two directions based on yield line theorem were determined. Experimental data found in the literature were used for the validation of the previous and the newly developed models to predict the moment resisting capacities and failure loads of corroded RC slabs. From test results, the load-carrying and energy absorption capacities of reinforced concrete specimens were found to decrease with higher corrosion ratio. It was found that because of not obtained actual corrosion levels and used displacement and/or curvature methods for the calculation of energy capacities and ductility ratios of corroded RC slabs misleading the experimental test results found in the literature.

2021, 38 Pages

Keywords: Concrete, Corrosion, Flexural strength, Slab.

TEŞEKKÜR

“Korozyona Maruz Kalmış Betonarme Döşemelerin Eğilme Davranışının Araőtırılması” yüksek lisans tezimi hazırlarken araőtırmalarımın her aőamasında bilgi, öneri ve desteğini esirgemeyerek çalıőmamı tamamlamama katkıda bulunan danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Atilla KUMBASAROğLU ’na, Doç. Dr. Hakan YALÇINER ’e yüksek lisans dersleri esnasındaki yardımlarından dolayı Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalının çok kıymetli ve saygıdeğer hocalarına, Arő. Gör. Alper ÇELİK ’e ve Arő. Gör. Ahmet İhsan TURAN ’a, dostlarıma, aileme ve kızıma en derin duygularla teşekkür ederim.

Halil İbrahim SEZGİN

Haziran, 2021

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iiii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR	viiviii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1. Korozyona Maruz Kalmış Betonarme Kirişler	3
2.2. Korozyona Maruz Kalmış Betonarme Döşemeler	4
3. KURAMSAL TEMELLER	7
3.1. Korozyon Süreci.....	7
3.2. Korozyonun Yapısal Performans Üzerindeki Etkileri.....	8
3.3. Döşemelerin Akma Çizgisi Yöntemine Göre Analizi.....	9
3.3.1. Akma çizgisi analiz yöntemi	9
3.3.2. Virtüel iş teoremi yöntemi ile akma çizgisi analiz yöntemi.....	10
4. MATERYAL ve YÖNTEM	12
4.1. Materyal	12
4.1.1. Malzeme mekanik özellikleri	12
4.1.2. Deneysel numunelerin kesit özellikleri	13
4.2. Yöntem	15
4.2.1. Hızlandırılmış korozyon metodu.....	15
4.2.2. Yükleme düzeneği ve ölçüm sistemi.....	18
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	222
5.1. Gerçek Korozyon Seviyeleri	222
5.2. Çatlak Davranışı	244
5.3. Yük-Deplasman İlişkileri	266
5.4. Süneklik Oranları	30
6. SONUÇLAR	333

7. ÖNERİLER.....	344
KAYNAKLAR	355
EKLER.....	388
Ek-1. Tez Sahibinin Bilimsel Çalışmaları.....	388



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Basit Mesnetli Dikdörtgen Bir Döşemenin Akma Çizgisi Paterni.	10
Şekil 4.1. Korozyonsuz Ve Korozyonlu Donatı Çubuklarının Mekanik Özellikleri.	13
Şekil 4.2. Deneysel Numunelerin Kesit Özellikleri.	14
Şekil 4.3. Donatı Çubukları İçin Kullanılan Bakır Teller.	15
Şekil 4.4. Hızlandırılmış Korozyon Yöntemi: (A) Test Düzenegi; (B) Şematik Taslak.	16
Şekil 4.5. Yükleme Düzenegi: (A) Şematik Gösterim; (B) Yükleme Düzenegi EnKesiti; (C) Yükleme Düzenegi Fotoğrafi.	21
Şekil 5.1. Gerçek Korozyon Seviyelerinin Elde Edilmesi Süreci: (A) Betonarme Döşeme Numunelerinin Kırılması; (B) Boyuna Donatı Çubuklarının Mekanik Olarak Temizlenmesi İşlemi Ve Yeniden Tartılması.	23
Şekil 5.2. Korozyon Seviyelerinin Dağılımı: (A) S2; (B) S3; (C) S4; (D) S5; (E) S6.	244
Şekil 5.3. Betonarme Döşeme Numunelerinin Göçme Modundaki Çatlak Paterni.	255
Şekil 5.4. Döşeme Numunelerinin Eksenel Yük-Orta-Açıklık Deplasman İlişkileri. ..	277
Şekil 5.5. Orta-Açıklık Deplasman-Döşeme Boyutları İlişkileri; (A) Döşemenin Uzun Doğrultusu; (B) Döşemenin Kısa Doğrultusu.	30

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 5.1. Gravimetrik test sonuçları.....	23
Tablo 5.2. Deneysel Test Sonuçlarının Özeti.	277
Tablo 5.3. Yük-Orta Açıklık Deplasman İlişkilerinden Elde Edilen Bulguların Özeti.	288



SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

A_c	Kesit Alanı
f_c	Beton Basınç Dayanımı (silindir numune)
L_p	Plastik Mafsals Boyu
F_y	Akma Yüğü
F_u	Nihai Yüğü
Δ_y	Akma Yüğüne Karşılık Gelen Deplasman
Δ_u	Nihai Yüğü Karşılık Gelen Deplasman
ϕ_y	Akma Yüğüne Karşılık Gelen Eğrilik
ϕ_u	Nihai Yüğü Karşılık Gelen Eğrilik
σ	Gerilme
ε	Şekil Değıştirme
CL_L	Boyuna Donatılardaki Ortalama Korozyon Oranı
CL_S	Sargı Donatılarındaki Ortalama Korozyon Oranı
CL_{LP}	Pozitif Yöndeki Boyuna Donatıların Korozyon Oranı
CL_{Ln}	Negatif Yöndeki Boyuna Donatıların Korozyon Oranı
E_u	Nihai Yüğü Karşılık Gelen Kümülatif Enerji Tüketimi
E_y	Akma Yüğüne Karşılık Gelen Kümülatif Enerji Tüketimi
E_{max}	Maksimum Yüğü Karşılık Gelen Kümülatif Enerji Tüketimi
W_{cr}	Çatlak Genişliğı

Kısaltmalar

ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
TS-EN	Türk Standartları Avrupa Normu
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
NACE	Ulusal Korozyon Mühendisleri Birliğı
GSKD	Gayri Safi Katma Değer

1. GİRİŞ

Beton yapı malzemesinin çekme dayanımı özelliklerinin iyileştirilmesi için çelik donatı çubuklarının kullanılması uzun yıllardır kabul gören bir uygulamadır. Betonarme yapı elemanları, dayanıklılık (durabilite) ve zorlu çevre koşullarına dayanma kabiliyeti ile bilinir. Bununla birlikte, betonarme yapılar, beton içerisinde pas-payı sınırlarında yer alan donatı çelik çubuklarının korozyonuna neden olan çeşitli çevresel saldırıların zararlı etkilerine sürekli olarak maruzdurlar. Bu durum, özellikle yüksek klor iyonu koşullarının söz konusu olduğu zorlu çevresel ortamlarda olduğu kadar, buz çözücü tuzun betonarme yapılardaki çelik donatı çubuklarının korozyonunu artırdığı ortamlarda da geçerlidir. Gelineen noktada, donatı çeliğinin korozyonu, betonarme yapılarda erken bozulmanın birincil nedeni olarak yaygın bir şekilde kabul edilmekle birlikte, birçok betonarme yapının beklenenden çok daha erken hizmet verebilirliğinin sonlanabildiği ve/veya stabilitesinde kabul edilemez kayıplar yaşadığı bilinmektedir.

Hâlihazırda, betonarme taşıyıcı yapıların tasarım ömrünün, sadece donatı korozyonunun başlamasına kadar geçen süre değil, aynı zamanda yapının artık amaca uygun olmadığı bir seviyedeki korozyon boyutunun ulaşması için gereken süre de dikkate alınarak tahmin edileceği yeni performansa dayalı tasarım kodları geliştirilmektedir. Bu nedenle, betonarme bir elemanın yapısal davranışının korozyondan önemli ölçüde etkilenmeden önce, eğer varsa, hangi seviyede korozyona izin verilebileceğini belirlemek önemlidir.

Donatı çelik çubuklarının korozyona maruz kalması durumunda ortaya çıkabilecek iki olumsuz mekanizmadan birisi, betonarme taşıyıcı bileşenlerin yük taşıma kapasitesinde bir azalmaya neden olabilmesidir. Öncelikli olarak, donatı çelik çubuklarının kesit alanı, korozyonun etkisi arttıkça azalır ve donatı çubuğu korozyonunun şiddeti, betonarme döşemelerin eğilme dayanımı, deformasyon davranışı, sünekliği, aderans dayanımı ve göçme modu üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilmektedir. Donatı çelik çubuklarının korozyona maruz kalması durumunda ortaya çıkabilecek diğer bir olumsuz mekanizma ise korozyonun donatı çelik çubuğu ile betonun ara-yüzünde ortaya çıkan aderans dayanımı üzerindeki etkisidir. Donatı çubuğu ile beton ara-yüzünde oluşan korozyon ürünlerinin genişleyebilme özelliği, donatı çubuğunu çepeçevre saran beton üzerinde çatlamaya ve pul pul dökülmeye neden olan radyal bir basınç uygulamaktadır. Beton yüzeyindeki dökülmeler, beton pas-payını kaldırarak aderans mukavemetini azaltacak

olup bu durum çelik donatı çubuklarının sargılama etkisini azaltacaktır ve nihayetinde betonun daha fazla korozyon etkisine maruz kalmasına neden olacaktır. Korozyon etkisi ayrıca inşaat demiri üzerindeki nervürlerin de bozulmasına neden olabilmektedir ki bu durum donatı çubuğunun yüzey alanını değiştirir ve aderans dayanımını azaltır. Bununla birlikte, bazı araştırmacılar, düşük korozyon seviyelerinin, aderans mukavemetinde bir artışa katkıda bulunabilecek, rijit bir şekilde yapışan bir pas tabakası ürettiğini bulmuşlardır (Kivell ve diğerleri, 2011; Bicer ve diğerleri).

Betonarme kirişler ve döşemeler eğilme davranışı açısından benzerlik gösterebilse de ve betonarme döşemeler genellikle betonarme kiriş blok kesitinin bir formu olarak 1 m genişliğinde düşünülen döşeme kesiti temel alınarak tasarlansa da, korozyona maruz kalmış betonarme döşemeler için kullanılacak olan yeni performansa dayalı tasarım kodlarında korozyonlu betonarme taşıyıcı kirişlerin eğilme dayanımı ve/veya davranışı için geliştirilen modellerde halen bir endişe vardır. Betonarme döşeme elemanlarında enine doğrultudaki etriye demirlerinin aslında sargılama etkisinin olmadığı göz önünde bulundurulduğunda, donatı sargılama etkisinin yük taşıma kapasitesi üzerindeki genel etkileri, korozyonlu betonarme kirişlerin daha önce geliştirilmiş olan modellerinin doğrulanmasını gerektirmektedir. Ayrıca bu şartlara ilave olarak, korozyona uğramış betonarme döşemeler üzerinde yürütülen deneysel çalışmalar sonucunda geliştirilen model sayısı da oldukça kısıtlıdır. Bir başka gerekçe olarak, basitçe mesnetlenen betonarme döşeme deneylerinden, en son geliştirilen model (Said ve Hussein, 2019a,b), yalnızca sabit mesnetli betonarme döşemeler için değil, aynı zamanda gerçek korozyon seviyeleri için de doğrulanmamıştır. Bu nedenle, bu tez çalışması kapsamında sabit mesnetli taşıyıcı betonarme döşemeler test edilmiş ve gerçek korozyon seviyeleri için korozyona uğramış betonarme döşemelerin artık moment kapasiteleri elde edilmiştir. Ayrıca, literatürde daha önce yürütülen çalışmalarda korozyona maruz kalmış taşıyıcı betonarme döşemelerin belirlenen süneklik oranları için oldukça çelişkili sonuçlar bulunmuştur ve bu çalışmada bu durum da ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Korozyon etkisinin betonarme taşıyıcı elemanlar üzerindeki etkileri uzun zamandır araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Korozyon etkilerinin modellenmesindeki zorluklar nedeniyle, araştırmacılar tarafından geliştirilmiş olan deneysel (ampirik) modeller, korozyona maruz kalmış betonarme taşıyıcı elemanlar üzerinde yapısal değerlendirilme ve buna karşılık onarım ve güçlendirme açısından karar verilmesi için önemlidir. Beton elemanlar arasında, betonarme taşıyıcı döşemeleri diğer yapısal elemanlardan (yani kirişler ve kolonlar) ayıran ana tasarım parametresi, kesme kuvvetinin beton tarafından karşılanması gerektiğidir ve bundan dolayı tasarım sürecinde enine doğrultuda donatı çubuklarına ihtiyaç duyulmamasıdır. Betonarme taşıyıcı kirişler ve döşemeler eğilme davranışı açısından benzerlik gösterebilse de ve betonarme taşıyıcı döşemeler genellikle betonarme taşıyıcı kiriş blok kesitinin bir formu olarak 1 m genişliğinde düşünülen döşeme kesiti temel alınarak tasarlanırsa da, yapısal davranış, özellikle enine doğrultuda etriye demirlerinin süneklik davranışı üzerindeki etkisinden dolayı korozyona maruz kalınma durumunda farklıdır. Konunun daha iyi anlaşılabilmesi için kaynak özetleri, korozyona maruz kalmış betonarme taşıyıcı kirişler ve betonarme taşıyıcı döşemeler açısından ayrı ayrı ele alınmıştır.

2.1. Korozyona Maruz Kalmış Betonarme Kirişler

Suffern ve diğerleri (2010) tarafından yürütülen deneysel bir çalışma, enine doğrultuda etriye demiri olmayan betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesinin, enine doğrultuda etriye demiri bulunan korozyona maruz kalmış betonarme kirişlerinkinden daha büyük olduğunu göstermiştir. Bu önemli deneysel bulgu, son yıllarda, korozyona maruz kalmış betonarme kirişlerin eğilme mukavemetini tahmin etmek için geliştirilen modeller için (Bicer ve diğerleri, 2018) enine doğrultuda etriye demirlerindeki korozyonun etkisini değerlendirmek için yapılan ileriki çalışmalara ışık tutmuştur. Yalçın ve diğerleri (2020) tarafından geliştirilen en son ampirik modellerden biri, korozyona maruz kalmış betonarme kirişlerin hem çekme bölgesi çubuklarındaki hem de enine doğrultuda etriye demirlerindeki korozyon seviyelerinin bir fonksiyonu olduğunu tahmin etmek için geliştirilmiştir. Yalçın ve diğerleri (2020) tarafından geliştirilen ampirik model, Suffern ve diğerleri (2010) tarafından enine doğrultuda etriye demirleri üzerinde belirtilen bulguyu dikkate alarak Bicer ve diğerleri (2018) tarafından ortaya atılan deneysel modeli

geliştirmiştir. Biçer ve diğerleri (2018) ile Yalçiner ve diğerleri (2020) tarafından geliştirilen model, korozyona maruz kalmış betonarme kirişlerin eğilme dayanımı kapasitesini tahmin etmek için önceki modellerin (Azad ve diğerleri, 2010; Ahmad, 2017) enine doğrultuda etriye demirlerindeki korozyon seviyeleri dikkate alınmadığı için ya düşük ya da fazla tahmin edildiğini göstermiştir.

Betonarme döşemelerin tasarım yöntemlerinden biri olarak, eğilme davranışı altında 1 m genişliğindeki döşeme kesitine dayanmasına ve betonarme kirişlerin çatlak kesiti olarak betonarme döşemelerin eğilme dayanımını belirlemek mümkün olsa da, Suffern ve diğerleri (2010), Bicer ve diğerleri (2018) ve Yalçiner ve diğerleri (2020) tarafından geliştirilen enine doğrultudaki etriye demirlerinin sargılama etkisi üzerine korozyonun etkisi açısından altı çizilen önemli katkısı dikkate alınarak, korozyonlu betonarme döşemelerin moment taşıma (dayanım) kapasitelerinin tahmin edilmesinde kullanılacak korozyonlu betonarme kirişlerin modellenmesi konusunun geliştirilmesi ihtiyacı halen vardır.

2.2. Korozyona Maruz Kalmış Betonarme Döşemeler

Basit mesnetli (mesnetlerden birisi sabit ve diğeri hareketli olan mesnetlenme biçimi) korozyona maruz kalmış betonarme döşemeler üzerinde çok sayıda deneysel çalışma yapılmış olmasına rağmen, bugüne kadar, korozyonlu betonarme döşemelerin moment taşıma kapasitelerinin tahmininde kullanılmak üzere kullanılagelen korozyona maruz kalmış betonarme kirişlerin herhangi bir geliştirilmiş modeli doğrulanmamıştır. Korozyona maruz kalmış betonarme döşemelerin yapısal davranışlarını araştırmak için birçok deneysel çalışma yapılmıştır. Gerçekleştirilmiş olan deneysel çalışmalardan biri Almusallam ve diğerleri (1996) tarafından $305 \times 711 \times 63,5$ mm ($12,01 \times 27,99 \times 2,5$ inç) boyutlarına sahip tek doğrultulu basit mesnetli korozyona uğramış betonarme döşemeler için yapılmıştır. Çalışma kapsamında donatı korozyonunun, üniform olarak yüklenmiş ve basitçe mesnetlenen tek doğrultulu döşemelerin eğilme dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Almusallam ve diğerleri (1996) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada betonarme döşeme numuneleri, servis yükü olmadan doğru akım tekniği kullanılarak korozyona uğratılmıştır. Bu çalışmada, eksenel eğilme deneylerinden sonra betonun içerisinden çıkarılan donatı çubukları için gravimetrik testler yapılarak gerçek korozyon seviyeleri elde edilmiştir. Almusallam ve diğerleri (1996) tarafından % 60

donatı korozyonuna sahip döşemelerin eğilme dayanımının donatısız beton döşemelere benzer olduğu bulunmuştur. Sonuçta, Almusallam ve diğerleri (1996) tarafından, korozyona uğramış betonarme döşemelerin eğilme mukavemetini tahmin etmek için herhangi bir ampirik model önerilmemiştir.

Deneysel çalışmalardan bir diğeri ise eğilme elemanlarının yalnızca çekme bölgelerinde korozyona uğramış donatıların, aderans mukavemetini tahmin etmek için bir model geliştirmek amacıyla Stanish ve diğerleri (1999) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, 350× 1300×150 mm (13.78×51.18× 5.91 inç) boyutlarına sahip toplam 10 adet tek doğrultulu, basit mesnetli betonarme döşemeler üzerinde dört noktadan eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Donatı çubuklarının korozyona uğratılması sürecinde servis yükü olmaksızın doğru akım tekniği kullanılmıştır; buna göre ortalama korozyon seviyeleri, donatı çubukları üzerindeki kupon testlerinden elde edilmiş olup, korozyon oranları % 0 ile % 20.7 arasında değişmiştir.

Chung ve diğerleri (2008) tarafından deneyi yapılan 70 adet basit mesnetli betonarme döşemelerin özellikle yük-yer değiştirme davranışları üzerindeki aderans kuvvetinin etkisini araştırmak için deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yürütülen deneysel çalışmada dört noktadan yükleme düzeneği kullanılarak aksel eğilme testi yapılan betonarme döşemelerin boyutları, 500×1200×90 mm (19.69×47.24×3.54 inç) olarak tasarlanmıştır. Bu araştırma kapsamında da, donatı çubuklarının korozyona uğratılması sürecinde servis yükü olmaksızın doğru akım tekniği kullanılmıştır. Bu çalışmada, elde edilen korozyon seviyeleri, % 0 ile % 4.6 arasında değişen oranlarda, Faraday Yasasına dayanan teorik korozyon seviyeleri için yalnızca donatı çapı kaybı dikkate alınarak belirlenmiştir. Chung ve diğerleri (2008) tarafından ayrıca korozyona maruz kalmış betonarme döşeme numunelerinin yük taşıma kapasitelerinin tahmin edilmesi için çatlak kesit analizi (yani, döşeme ve betonun kalınlığı boyunca doğrusal birim şekil değiştirme dağılımının doğrusal olarak elastik olduğu varsayılmıştır) de yapılmıştır.

3 adet iki doğrultulu korozyona maruz kalmış betonarme döşemeler üzerinde yapılan en son deneysel çalışmalardan biri, Said ve Hussein (2019a) tarafından gerçekleştirilmiştir. Said ve Hussein (2019a) tarafından korozyona maruz kalmış betonarme döşemeler için mevcut literatürde aslında koşulların gerçekçi olmadığı ve yeterli veri bulunmadığı belirtilmiştir. Bu çalışmada, donatı çubuklarının korozyona uğratılması sürecinde servis yükleri olmaksızın hızlandırılmış bir korozyon yöntemi kullanılmıştır. Said ve Hussein

(2019a) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, elde edilen korozyon seviyeleri, Faraday Yasasına dayanan teorik bulunan korozyon seviyeleri olup yapılmayan gravimetrik çalışmalardan dolayı gerçek korozyon seviyelerini temsil etmeyebilir. Gerçek korozyon seviyelerinin elde edilmesinde Faraday Yasasının kullanımının dezavantajları, mevcut literatürde (Chung ve diğerleri, 2004; Amleh ve Ghosh, 2006; Yalciner ve diğerleri, 2012; Auyeung ve diğerleri, 2000; El Maaddawy ve diğerleri, 2006; Paul ve diğerleri, 2017) geniş çapta bildirilmiştir. Önceki çalışmaların aksine (Almusallam ve diğerleri, 1996; Stanish ve diğerleri, 1999; Chung ve diğerleri, 2008), Said ve Hussein (2019a) tarafından yapılan çalışmada, döşemelerin dörtkenarı da yükleme çerçevesi üzerinde basitçe mesnetlendirilmiştir.

Said ve Hussein (2019a) tarafından yapılan çalışmada gerçek korozyon seviyeleri elde edilmemiş olsa da, bu çalışmada önemli bir sonuç keşfedilmiştir. Bu çalışmada deneysel olarak elde edilen göçme yükleri, dört farklı şartnamede [yani, Kanada Şartnamesi (CSA 23.3-14), Amerika Şartnamesi (ACI 318-14), İngiliz Standardı (BS 8110-97) ile Avrupa Şartnamesi (EC2)] önerilen tahmini göçme yükleri ile karşılaştırılmış ve hiçbir standardın % 25 ve % 50 kütle kaybı ile döşemeler için güvenilir sonuçlar vermediği sonucuna ulaşılmıştır. Buna karşılık Said ve Hussein (2019a) tarafından gerçekleştirilen çalışmada geliştirilen ampirik model, elde edilen gerçek korozyon seviyeleri için güncel olarak doğrulanmamıştır. Said ve Hussein (2019a) tarafından belirtildiği üzere, test verileri sayısı oldukça azdır ve korozyona maruz kalmış betonarme döşemeler için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Bu nedenle, yukarıda bahsedilen çalışmalar da dikkate alınarak, bu tez kapsamında yürütülen deneysel çalışmada, gerçek korozyon seviyelerinin elde edilmesi için enine ve boyuna doğrultudaki tüm donatı demirleri betonarme döşemelerinden çıkarılmıştır. Bu çalışmada ayrıca, önceki çalışmaların aksine, eksenel eğilme testi altında basitçe mesnetlenen betonarme döşemelerden ziyade betonarme döşemelerin dörtkenarının hepsinde kullanılan sabit mesnetler sayesinde akma çizgisi davranışı sağlanmıştır. Akma çizgisi teoremi kullanılarak, betonarme döşemelerin her iki doğrultusundaki gerçek korozyon seviyelerinin katkısı, bu deneysel çalışma ile geliştirilen ampirik model için dikkate alınmıştır.

3. KURAMSAL TEMELLER

Korozyona maruz kalmış betonarme döşemelerin eğilme yükü/moment taşıma gücü kapasitesi araştırılırken, konunun bütünlüğü açısından incelenmesi gereken araştırma konuları Kuramsal Temeller bölümünde ele alınmıştır. Bu kapsamda öncelikli olarak korozyon süreci tartışılmıştır. Korozyon sürecinde korozyonun oluşma nedenleri ve korozyonu etkileyen parametreler incelenmiştir. Sonraki aşamada korozyonun yapısal etkisi ve yapıların korozyon etkisine karşılık davranışları incelenmiştir. Son aşamada ise teorik olarak güvenilirliği sağlanmış olan Akma Çizgisi Yöntemi ele alınmıştır ve betonarme döşemelerin Akma Çizgisi Yöntemine göre analizi incelenmiştir.

3.1. Korozyon Süreci

Betonarme yapı elemanlarındaki donatı demirinin korozyonu, demir atomlarının oksijen veya klorür atomları ile birleşerek yeni bir bileşik oluşturduğunda meydana gelir. Bu süreç betonarme yapı elemanlarında mevcut gözeneklerdeki suyun bir elektrolit görevi görmesine bağlı olarak gelişen bir elektrokimyasal reaksiyondur. Betonun, donatı ile birlikte korozyon sürecine dâhil olması durumunda, betonsuz bir ortamda korozyona maruz kalan metalin korozyonundan oldukça farklı bir süreç gelişmektedir. Başlangıçta beton, temel bir ortam oluşturarak korozyonu engeller. Ancak korozyonun herhangi bir sebeple başlaması ile beton pas-payı, korozyon ürünlerinin formunu değiştirerek donatı demirinin etkisiz kalmasına neden olmaktadır. Korozyonun sürecinin ilerlemesi durumu kompozit yapı elemanlarının oksijen erişiminin kısıtlanmasıyla sonuçlanmaktadır. Çelik donatı demiri, korozyon süreci ile birlikte sınırlı olan beton pas-payı bölgesinde pas ürünlerini oluşturur. Ortaya çıkan pas ürünleri, betonsuz bir ortamda çelik bir çubuğun korozyona maruz kalması ile ortaya çıkardığı pas ürünleri ile benzerlik gösterir. Bu durum ise giderek beton pas-payının zayıflamasına neden olur. Beton pas-payının zayıflamasına karşılık, betonarme eleman içerisindeki pH seviyesi dengelenemediği için korozyon reaksiyonları bilinen korozyon reaksiyonundan farklı gerçekleşir. Korozyon sürecinin en iyi bilenen sonuçlarından birisi donatı kesit alanının azalmasına bağlı olarak donatı oranının küçülmesidir. Bir başka önemli sonuç, betonarme kesit içerisinde ortaya çıkan korozyon ürünlerinin, orijinal donatı çeliğine göre daha büyük bir hacme sahip olmasıdır. Bu durum beton pas-payı cidarında ilave gerilmelere neden olmaktadır. İlave gerilmeler ise beton pas-payı yüzeyinde rastgele gelişen korozyon çatlaklarına ve dahası pas-payının

olduğu gibi dökülmesine varacak kadar yol açmaktadır. Dolayısıyla bu sonucun betonarme yapının performansı üzerinde bir miktar etkiye sahip olacağı beklenmektedir.

Betondaki korozyon seviyesini çeşitli faktörler etkilemektedir. Bu faktörler arasında; beton kalitesi, pas-payı kalınlığı, olabilecek herhangi bir çatlak, gözenek sisteminin su ve oksijen içeriği ve klorür konsantrasyonu veya karbonatlaşma yoğunluğu sıralanabilir. Beton kalitesi, oksijenin yanı sıra zararlı maddelerin erişimini sınırlayarak korozyon oranını etkiler. Beton kalitesi, su-çimento oranının düşürülmesi veya karışıma bağlayıcı çimento malzemesinin ilave edilmesi ile iyileştirilebilir. Bunun yanında, beton pas-payı kalınlığının artırılması, içeri girebilecek korozif madde miktarını azaltma konusunda benzer bir etkiye sahiptir. Prizini alan sertleşmiş beton yüzeyinde oluşabilecek çatlaklar ise zararlı kimyasallar ve oksijen veya su için geçiş yolları sağlayarak korozyon oranını artırır. Korozyon her iki oksijen veya suyun varlığını gerektiren elektrokimyasal bir süreç olduğundan dolayı, betonun oksijen ve su içeriği önemlidir. Bu materyallerin herhangi birisinin bulunmaması durumunda, korozyonun oluşmayacağı söylenebilir.

3.2. Korozyonun Yapısal Performans Üzerindeki Etkileri

Betonarme yapılardaki donatı çubuğunun korozyonu, betonarme bir kesitin yapısal performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu etkilerden birisi, korozyonun donatı çubuğunun mekanik özellikleri üzerindeki etkisidir. Bu etki ise iki yönlüdür. Birincisi, donatı çubuğundaki kesit kaybıdır. Donatı çubuğu kesit kaybının, donatı çubuğunun taşıyabileceği yük ile orantılı olarak azaldığı, yapılan birçok çalışma ile rapor edilmiştir (Ting ve Nowak, 1991; Yuan ve Marosszky, 1991). Korozyonun yapısal performans üzerindeki diğer bir etkisi ise beton pas-payının dökülmesi ile ilgilidir. Korozyon pas ürünleri, betonarme kesit içerisinde serbest halde bulunarak beton pas-payı cidarında gerilme yığılmalarına ve betonarme kesitin genişlemesine neden olmaktadır. Bu durum ise beton pas-payının dökülmesiyle birlikte, donatı çubuğunun etrafındaki betonun kaybı ile sonuçlanmaktadır. Beton pas-payının dökülmesi durumu başlıca iki olumsuz problemi ortaya çıkarmaktadır. Bunlardan birincisi, donatı demiri ile beton arasındaki aderans kaybına yol açabilir. İkincisi; bu sonucun beton kesit kaybı etkisine sahip olmasıdır. Beton kesit kaybının özellikle basınç bölgesinde olması halinde ise sonuç daha kritiktir. Dolayısıyla beton kesit kaybı betonarme taşıyıcı elemanın kapasitesini düşürme etkisine sahip olmaktadır.

3.3. Döşemelerin Akma Çizgisi Yöntemine Göre Analizi

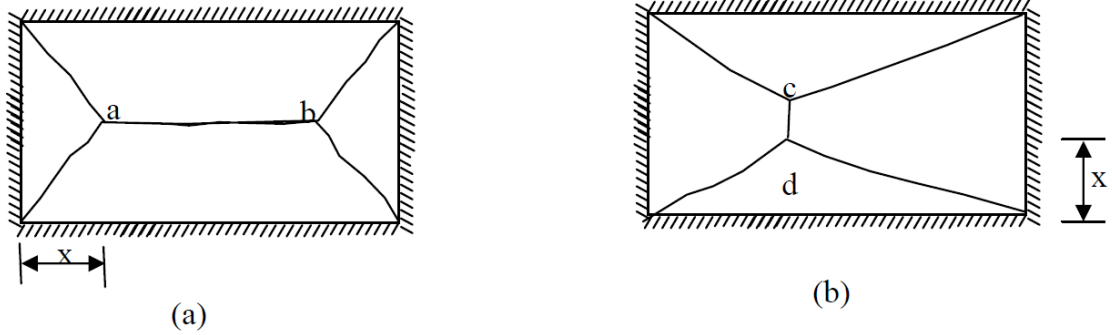
3.3.1. Akma çizgisi analiz yöntemi

Betonarme döşeme elemanlarda akma ve dönme modeli oluşturulduktan sonra, dönme eksenlerinin belirli konumu ve yönü ile döşeme için göçme yükü, virtüel iş yöntemi veya denge denklemleri yöntemi ile belirlenebilir. Her iki durumda da, betonarme döşeme analizinin akma çizgisi yönteminin, verilen eğilme dayanımı için gerçek çökme yükünün hiçbir zaman öngörülen yükten daha yüksek olmayacağı, ancak daha düşük olabileceği anlamında bir üst sınır yöntemi olduğu vurgulanmalıdır. Her iki yaklaşımla çözümün iki temel aşaması vardır. Bunlar; (1) göçme mekanizmasının doğru saptanması ve (2) bu göçme mekanizması için, akma çizgilerinin tam konumunu ve yönelimlerini tanımlayan geometrik parametrenin bulunması ve uygulanan yük ile taşınan moment arasındaki ilişkinin çözülmesidir. Her iki yöntem de betonarme döşeme elemanları için seçilen mekanizma açısından doğru çözümü sağlamaktadır, ancak gerçek göçme yükü doğru göçme mekanizmasının seçilmesi ile mümkündür.

Her iki yöntemde de, bir göçme mekanizmasının üretilmesi için öncelikle bir akma çizgisi modelinin varsayılması gerekmektedir. Doğru olduğu varsayılan bir göçme mekanizmasında, betonarme döşeme kesitleri arasındaki akma çizgilerinin sehim uyumluluğu korunurken betonarme döşeme kesitlerinin akma çizgileri boyunca dönerek rijit gövde hareketleri yapması mümkündür. Akma çizgisi yönteminde birden fazla olası akma çizgisi modeli olabilir. Bu durumda olası tüm akma çizgisi desenlerine yönelik çözümler aranmalıdır ve en küçük nihai yükü veren çözüm tasarımda kullanılmalıdır. Örneğin, üniform yüke maruz kalan basit mesnetli dikdörtgen bir betonarme döşemenin göçme modeli, dikdörtgen döşemenin en-boy oranına bağlı olarak Şekil 3.1'de (a) veya (b)'de gösterildiği gibi şekillenebilir.

Akma çizgisi modelinin seçiminden sonra, Şekil 3.1 (a) veya (b)'de bilinmeyen olarak tanımlanan x mesafesinin belirlenerek, akma çizgilerinin konumunun tasarlanması gerekmektedir. Bu aşamada, virtüel iş teoremi yöntemi ve/veya denge denklemleri yönteminin kullanması tercih edilebilir. Virtüel iş teoremi yönteminde, betonarme döşeme kesitlerinin akma çizgileri boyunca (sehim uyumluluğu korunurken) eş-zamanlı olarak rijit gövde hareketleri sırasında nihai yük tarafından yapılan toplam pozitif iş, eğilme ve/veya burulma momentleri tarafından yapılan toplam negatif işe eşitlenerek

bilinmeyen x 'i içeren bir denklem oluşturulur. Son aşamada ise en küçük nihai yükü veren x değeri diferansiyel hesapla bulunur.



Şekil 3.1. Basit mesnetli dikdörtgen bir döşemenin akma çizgisi paterni.

Denge denklemleri yönteminde, x 'in değeri, döşeme kesitleri için bilinen statik denge denklemlerinin uygulanmasıyla elde edilir, ancak optimum konum, akma çizgilerinin kesişme noktasında önceden belirlenmiş olan düğüm kuvvetlerinin yerleştirilmesiyle tanımlanır.

3.3.2. Virtüel iş teoremi yöntemi ile akma çizgisi analiz yöntemi

Akma çizgisi analiz yönteminin virtüel iş teoremi yöntemi ile çözülmesi, betonarme döşemelerin analizinde en popüler ve en kolay yoldur. Virtüel iş denklemi (çerçevelerin plastik analizi için kullanılan denkleme benzer), deneysel elde edilen sonuçlara göre daha küçük bir değer olarak hesaplanan doğru nihai momenti verir. Diğer bir deyişle, virtüel iş denklemi, varsayılan bir eğilme dayanımına sahip betonarme bir döşemede nihai yükü bulmak için kullanılırsa, elde edilen değer, döşemenin taşıma kapasitesi üzerinde bir üst sınır olacaktır. Buna göre, virtüel iş denklemi ile elde edilen momentin, deneme sayısına ve/veya seçilen göçme modelinin belirsizliğine bağlı olarak küçük bir yüzde oranında artırmak makul bir tasarım prosedürü gibi görünmektedir. Teorik model nihai momentin maksimum olduğu modeldir. Bu durum, göçme modelinin belirli parametrelerle (x_1, x_2, \dots) tanımlanması ve virtüel iş denkleminin bu parametrelerin bir fonksiyonu olarak m [$m = f(x_1, x_2, \dots)$] değerini vermesi ile sağlanabilir. Maksimum momente karşılık gelen parametrelerin değeri, kısmi diferansiyel çözüm $(\delta f / \delta x_1) = 0$, $(\delta f / \delta x_2) = 0$ ile belirlenir.

Daha önce de belirtildiği üzere, betonarme bir döşemeyi virtüel iş yöntemiyle analiz etmek için, nihai yükte döşeme için bir akma çizgisi modeli varsayılır. Akma çizgisi

modelinde betonarme kesitler rijit gövdeler olarak kabul edilebilir ve böylece daha fazla sehim ile birlikte döşeme deformasyonu sadece akma çizgilerinde meydana gelir. Döşeme kesitleri, dış yükler, eğilme ve burulma momentleri ile akma çizgileri boyunca oluşan kesme kuvvetleri altında dengede bulunmaktadır.

Virtüel iş teoremi yönteminde, döşeme içinde uygun bir nokta seçilir ve yükleme yönünde küçük bir δ yer değiştirmesi verilir. Buna göre, döşemenin tüm noktalarında ortaya çıkan $\delta(x, y)$ yer değiştirmeler ve döşeme kesitlerinin akma çizgileri etrafındaki dönme miktarı, δ cinsinden ve/veya döşeme kesitlerinin boyutları cinsinden bulunabilir. Virtüel iş, dış yükler ve akma çizgileri boyunca iç kuvvetler tarafından yapılacaktır. Dış kuvvetlerin, yani birim kesit başına üniform dağıtılmış nihai yük tarafından yapılan iş W_u Eş. 3.1'deki gibi ifade edilebilir.

$$\iint W_u \delta(x, y) dx dy = \sum W_u \Delta \quad (3.1)$$

Burada W_u ; akma çizgisi modelinin bir kesitindeki toplam yük ve Δ ; yük doğrultusunda döşeme merkezinde oluşan sehimdir.

Akma çizgisi doğrultusunda iç kuvvetler tarafından yapılan iş, yalnızca eğilme momentlerinden kaynaklanmaktadır, çünkü burulma momentleri ve kesme kuvvetleri tarafından yapılan iş, tüm döşeme üzerinde toplandığında sıfırdır. Döşemenin nihai taşıma momenti (m_{un}), L_o uzunluğundaki bir akma çizgisinin birim genişliğince nispi dönme (θ_n) nedeniyle, iki kesit arasındaki akma çizgisi etrafında yapılan iç kuvvetlerin işi; $m_{un} \theta_n L_o$ 'dır. Akma çizgileri boyunca iç kuvvetleri tarafından yapılan toplam iş daha önce de belirtildiği üzere, nihai taşıma momentleri tarafından yapılan toplam iş olarak ifade edilir ($\sum m_{un} \theta_n L_o$). Yapılan tanımlamalara göre virtüel iş denklemi Eş. 3.2'deki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} \sum W_u \Delta - \sum m_{un} \theta_n L_o &= 0 \\ \sum W_u \Delta &= \sum m_{un} \theta_n L_o \end{aligned} \quad (3.2)$$

4. MATERYAL ve YÖNTEM

Yürütülen deneysel çalışma kapsamında bir adedi korozyonsuz olmak üzere toplam altı adet iki doğrultulu betonarme döşeme numuneleri beş farklı korozyon seviyeleri için test edilmiştir. Üretilen deneysel numuneler, kolay anlaşılabilir olması açısından, $SA_{x,y}$ olarak isimlendirilmiştir. Burada A, betonarme döşeme numunesinin numarasını, x ve y ise sırasıyla, kısa ve uzun doğrultulardaki boyuna çekme donatı çubuklarının ortalama korozyon seviyelerini temsil etmektedir.

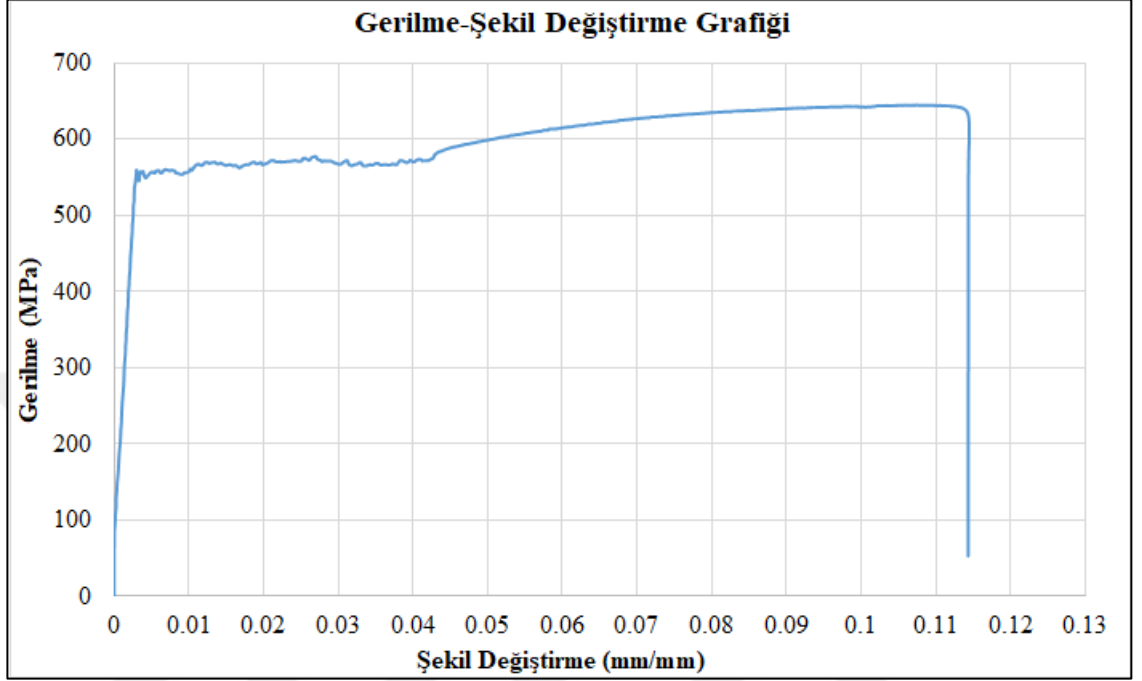
4.1. Materyal

4.1.1. Malzeme mekanik özellikleri

Her bir betonarme döşeme numunesinin üretilmesi için piyasa şartlarında hazır beton kullanılmıştır. Temin edilen hazır betonun içeriğinde herhangi bir hava sürükleyici veya su azaltıcı katkı maddeleri kullanılmamıştır. Deneysel çalışma kapsamında uygulanan hızlandırılmış korozyon yöntemi öncesinde beton döküm işlemi tamamlandıktan sonra, betonarme döşeme numunelerinin zamanla kazanabileceği karakteristik beton basınç dayanımındaki değişiklikleri önlemek için tüm betonarme döşeme numuneleri üç aylık süre boyunca kür işlemine tabi tutulmuştur. Beton döküm işlemi sırasında her bir deneysel numune için ayrıca temin edilen kübik beton numunelerin basınç dayanımları, ASTM C39/C39M (2005) şartnamesine göre gerçekleştirilmiştir. Deneysel numunelerin 150x150 mm'lik kübik numunelere göre kaydedilen ortalama beton basınç dayanımı, eksenel eğilme yükleme testlerinin yapıldığı süreçte 32 MPa olarak elde edilmiştir.

Her betonarme döşeme numunesi için piyasa şartlarında temin edilen 8 mm çapında donatı çubukları kullanılmıştır. Betonarme döşeme numunelerindeki korozyonsuz ve korozyonlu donatı çubuklarının karakteristik mekanik özellikleri, ASTM A370-08a (2008) şartnamesine göre çekme testleri yapılarak belirlenmiştir. Korozyona uğramış donatı çubuklarının mekanik özellikleri, yürütülen eksenel eğilme yükleme testleri ve betondan tüm donatı çubuklarının çıkarılması sonrasında elde edilmiştir. Betonun kırılarak çıkarılan korozyonlu boyuna donatı çubukları daha sonra ve gerçek korozyon seviyesi belirlenmiş her bir betonarme döşeme numunesinin yapısal tartışmalarının daha sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için farklı parçalarda kesilmiştir. Özellikle kesimi yapılan boyuna donatı çubuklarındaki korozyon seviyelerinin betonarme döşeme

numunelerinin belirlenmiş olan ortalama korozyon seviyelerine benzerlik göstermesi sağlanmıştır. Korozyonsuz ve korozyonlu donatı çubuklarının mekanik özellikleri Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Korozyonsuz ve korozyonlu donatı çubuklarının mekanik özellikleri.

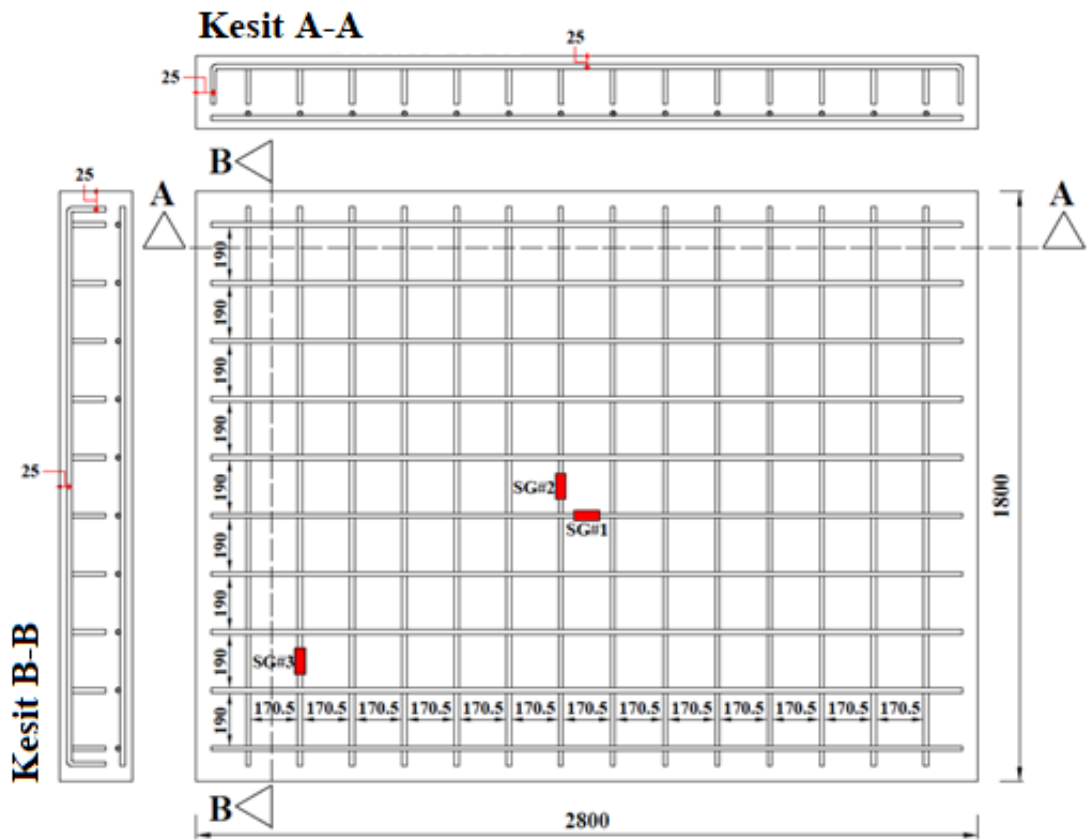
Şekil 4.1’de kullanılan passız 8 mm çaplı boyuna donatı çubuklarının ortalama mekanik özellikleri akma ve kopma mukavemetleri açısından sırasıyla A ve B MPa olarak ölçülmüştür. Akma ve kopma dayanımlarına karşılık gelen donatı birim şekil değiştirme (deformasyon) özellikleri ise sırasıyla C ve D olarak elde edilmiştir. Şekil 4.1’de gösterildiği gibi, korozyon seviyesi arttıkça donatı çubuklarının erken akma ve kopma özelliklerinin ortaya çıkmıştır.

4.1.2. Deneysel numunelerin kesit özellikleri

Betonarme döşeme numunelerinin kesit özellikleri (boyutları ve donatı detayları), Şekil 4.2’de gösterilmektedir; burada, test edilen her bir betonarme döşeme numunesi, donatı çubuklarının aynı boyutlarına ve doğrultularına sahiptir. Şekil 4.2’de her bir betonarme döşeme numunesi 1800 mm genişliğe, 150 mm kalınlığa ve 2800 mm açıklığa sahiptir. Betonarme döşeme numuneleri, kırk sekiz adet 8 mm çapında boyuna donatı çubukları ile donatılmıştır. Boyuna donatı çubukları, uzun kenarda 190 mm ve kısa kenarda 170,5 mm aralıklarla düzenlenmiştir. Tüm betonarme döşeme numuneleri için beton pas-payı

derinliği 25 mm olarak tasarlanmıştır. Akma çizgisi yöntemine göre betonarme döşeme numunelerinin kısa ve uzun doğrultularında tasarlanan teorik moment taşıma kapasitesi sırasıyla 32,39 kN.m ve 28,87 kN.m'dir. Tasarlanan betonarme döşeme numunelerinin hesap edilen göçme yükü, virtüel iş yöntemine göre 113,5 kN'dir.

Deneysel çalışma kapsamında, hızlandırılmış korozyon yöntemi sonrasında ve eksenel eğilme yükleme testlerinden önce, çekme donatı çubuklarına birim Şekil değiştirme ölçerlerin yapıştırılması için tüm betonarme döşeme numunelerine küçük delikler açılmıştır. Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, maksimum deformasyonların kaydedilmesi için betonarme döşeme numunelerinin orta açıklığında kısa ve uzun doğrultularındaki çekme donatı çubuklarına iki adet birim Şekil değiştirme ölçer (yani, SG#1 ve SG#2) yapıştırılmıştır. Bir adet birim Şekil değiştirme ölçer de (yani, SG#3) ayrıca, korozyon etkisi altındaki betonarme döşeme numunelerinin gerilme ve yük aktarım kapasitesini tartışmak için mesnetin en yakın tarafındaki bir konumda çekme donatı çubuğuna yapıştırılmıştır.

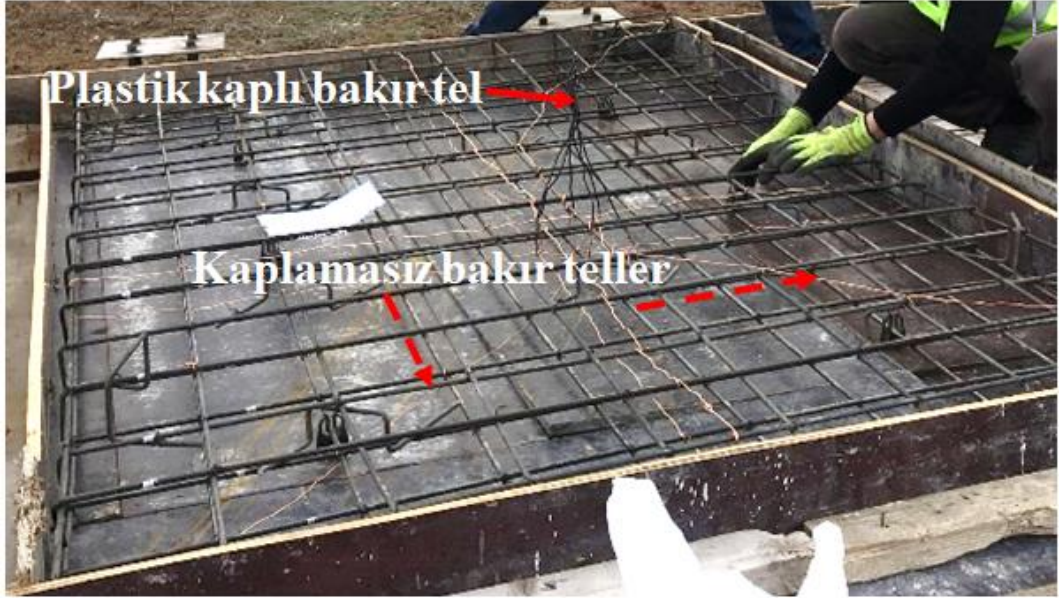


Şekil 4.2. Deneysel numunelerin kesit özellikleri.

4.2. Yöntem

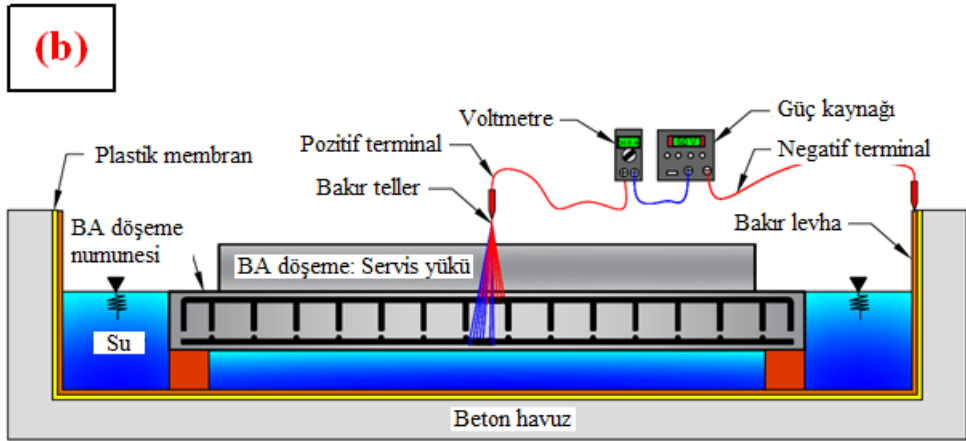
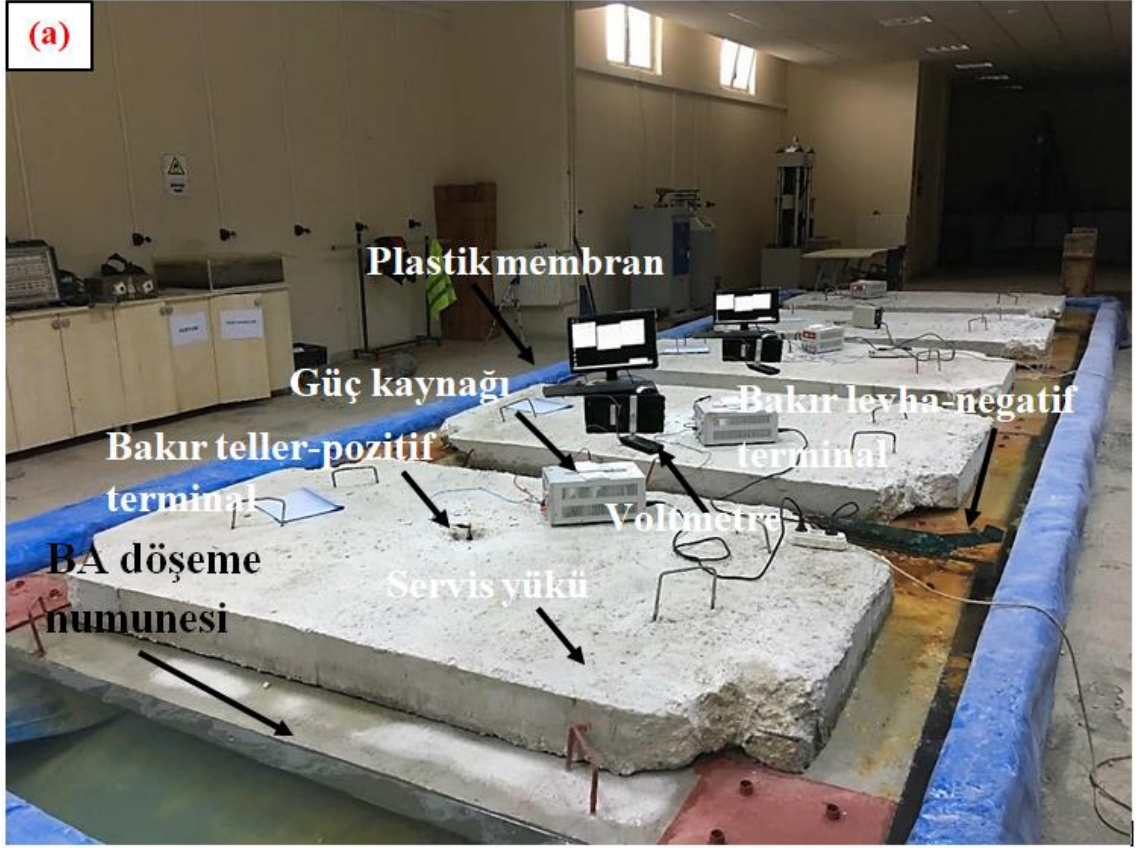
4.2.1. Hızlandırılmış korozyon metodu

Donatı çubuklarının tasarlanan konfigürasyonuna göre kalıba yerleştirilmesinden ve hızlandırılmış korozyon sürecinden önce, numunelere ait tüm donatı çubukları, ilk kütlelerinin kaydedilmesi amacıyla mekanik yöntem ile temizlenmiştir. Betonarme döşeme numunelerinin kısa ve uzun doğrultularındaki her bir boyuna donatı çubuğunun başlangıç kütlelerinin ölçülmesi için iki noktadan yük hücresine sahip bir terazi sistemi kullanılmıştır (bkz. Şekil 5.1. (a)). Şekil 4.3'te de gösterildiği gibi, donatı çubuklarının başlangıç kütlesi kaydedildikten sonra, 4 mm çapında paslanmaz bakır teller (yani, pozitif terminal), beton dökülmeden önce her bir boyuna donatı çubuğuna bağlanmıştır.



Şekil 4.3. Donatı çubukları için kullanılan bakır teller.

Üç aylık beton kür sürecinden sonra, tüm betonarme döşeme numuneleri hızlandırılmış bir korozyon yöntemine tabi tutulmuştur. Tez kapsamındaki araştırmada, hızlandırılmış bir korozyon havuzu inşa edilmiştir ve betonarme döşeme numunelerinin korozyon süreci için kullanılmıştır. Şekil 4.4'te araştırma için inşa edilerek, betonarme döşeme numunelerinin hızlandırılmış korozyon sürecinde kullanılan korozyon havuzunun fotoğrafı ve şematik taslağı gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Hızlandırılmış korozyon yöntemi: (a) test düzeneği; (b) şematik taslak.

Şekil 4.4'te, 60 V (Volt) nominal voltaja ve 0-10 A (Amper) aralığında nominal akıma sahip ayarlanabilir bir doğru akım güç kaynağı kullanılmıştır. Şekil 4.4'den görüldüğü üzere, boyuna donatı çubuklarından uzatılmış olan bakır teller, anot görevi görmesi için güç kaynaklarının pozitif terminaline bağlanmıştır. Betonarme döşeme numunelerini çepçevre sarması ve katot görevi görmesi amacıyla, korozyon havuzuna paslanmaz bakır

levhalar yerleştirilmiştir. Akımın bir dakikalık aralıklarla kaydedilmesi için her bir numuneye dijital voltmetreler bağlanmıştır. Eş. 4.1 bağıntısı ile ifade edilen Faraday Kanunu, sadece teorik olarak tasarlanmış korozyon seviyelerine ulaşıldığının izlenmesi amacıyla kullanılmıştır.

$$k\ddot{u}tle\ kayb\ddot{u} = \frac{t(s) \times I(A) \times 55.847}{2 \times 96,487} \quad (4.1)$$

Burada $t(s)$ korozyon s\ddot{u}resi ve $I(A)$ akımdır, 55.847 (g/mol) demir i\ddot{c}in molar k\ddot{u}tledir ve 96.487 (coulomb) ise Faraday sabitidir. Daha \ddot{u}nce de belirtildiği \ddot{u}zere, Faraday Kanunu sadece tasarlanan korozyon seviyelerinin izlenmesi i\ddot{c}in kullanılmıştır. Ger\ddot{c}ek korozyon seviyeleri, betonarme d\ddot{o}şeme numuneleri betonunun kırılması ve t\ddot{u}m boyuna donatı \u00e7ubuklarının eksenel eğilme testlerinden sonra \u00e7ıkarılması ve Eşitlik 4.2'ye g\ddot{u}re yeniden tartılmasıyla elde edilmiştir:

$$CL = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \quad (4.2)$$

Burada, m_i , donatı \u00e7ubuklarının korozyon s\ddot{u}recinden \ddot{u}nceki orijinal k\ddot{u}tlesidir ve m_f , donatı \u00e7ubuklarının korozyon \ddot{u}r\ddot{u}nlerinin mekanik temizleme işlemi ile \u00e7ıkarılmasından sonraki k\ddot{u}tlesidir. Boyuna donatı \u00e7ubuklarının en-kesit alanlarındaki ortalama kayıp (ΔA_s), Eş. 4.3 kullanılarak hesaplanmıştır:

$$\Delta A_s = A_s \times \frac{\Delta m}{m} \quad (4.3)$$

Burada ΔA_s , en- kesitteki donatı alanı kaybı (mm^2), A_s bir adet korozyonsuz donatı \u00e7ubuğunun en-kesit alanı (mm^2) ve Δm , Eş. 4.4 kullanılarak hesaplanan birim uzunluk başına d\ddot{u}şen k\ddot{u}tle kaybıdır (g/mm).

$$\Delta m = m - m' \quad (4.4)$$

Burada m ve m' sırasıyla korozyonsuz ve korozyonlu donatı \u00e7ubuklarının birim uzunluk başına d\ddot{u}şen k\ddot{u}tlesidir (g/mm). Mevcut \u00e7alışmada, betonarme d\ddot{o}şeme numunelerinin her bir donatı \u00e7ubuğundaki ger\ddot{c}ek korozyon seviyeleri elde edilmiştir. \u00c7alışmada elde edilen ger\ddot{c}ek korozyon seviyeleri, diğer \u00e7alışmalarda (\ddot{u}rneğin, Almusallam ve diğerleri 1996; Yal\c{c}iner ve diğerleri 2020) olduğu gibi, donatı \u00e7ubuklarının uzunluğu boyunca \ddot{u}niform korozyon olarak kabul edilen k\ddot{u}tle kaybına dayanmaktadır. Donatı \u00e7ubukları

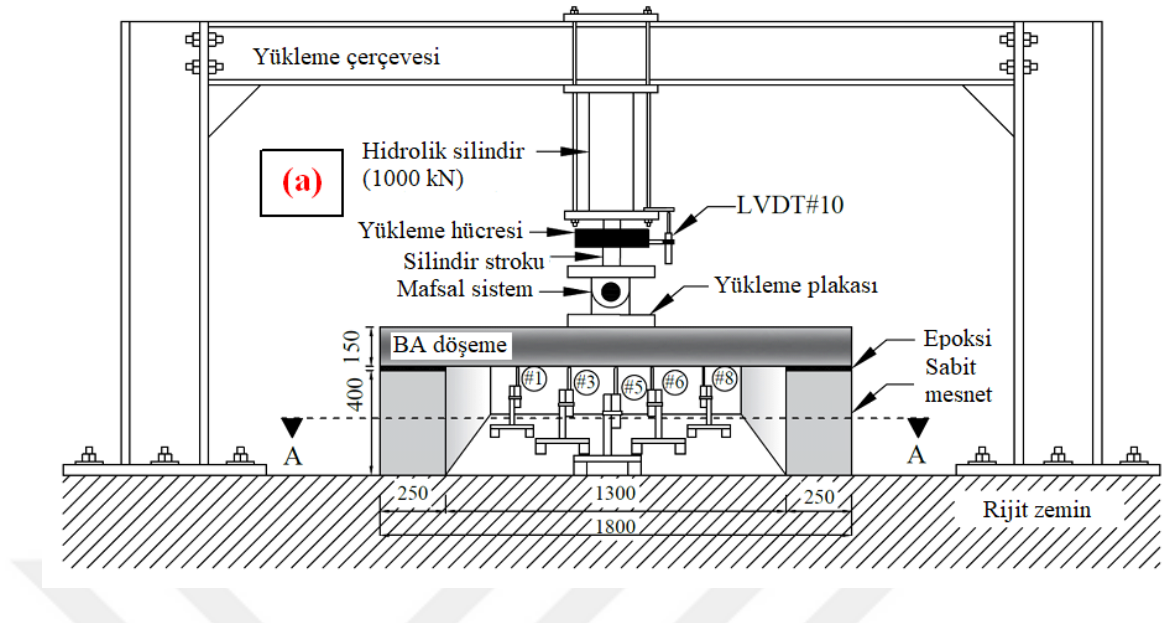
yüzeylerinin herhangi bir bölgesinde oluşabilen ve farklı kesit kaybına sebep olan derin çürük korozyonunun, üç-boyutlu (uzaysal) farklılıklar nedeniyle korozyona uğramış betonarme elemanların yapısal davranışının farklı olabileceği ve farklı bir çalışmanın yapılmasını gerektirdiği iyi bilinmektedir. Mevcut betonarme elemanlardan mahallinde veri toplanması sırasında, açığa çıkarılan donatı çubuğunun korozyona maruz kalmış olması durumunda, yapılan olan analiz kapsamında özellikle derin çürük korozyonunun modellenmesinin kolay olmadığı kabul edilmesi gerekmektedir. Daha ileri çalışmalar için dikkate alınması gereken mevcut çalışmanın bir diğer önemli noktası ise, yükleme sisteminin korozyon sürecinde kabul edilebilirliğidir. Malumbela ve diğerleri (2009), korozyon süreci sırasında korozyona maruz kalmış betonarme kirişlere uygulanan yükleme türü (yani servis yüklü veya servis yükü olmadan) üzerine bir tartışma yoluyla mevcut literatürde bulunan çelişkileri göstermiştir. Korozyon işlemi sırasında yükleme tipi ve uygulanan akım süresi (yani, korozyon süresi) ve dolayısıyla kullanılan korozyon yöntemine (yani, etkilenen akım tekniği ve doğal olarak indüklenen korozyon) dayalı ortaya çıkan korozyon çatlak yayılması da deneysel sonuçları etkileyebilmektedir.

Betonarme döşeme numunelerinin zamana bağlı olarak gerçekleşen deformasyonlarının servis yükleri altında çok kısa bir süre içerisinde meydana gelebildiği gerçeğinden ve bu çalışmada uygulanan akım tekniğinden dolayı, tüm betonarme döşemeler herhangi bir servis yükü olmadan korozyona maruz bırakılmıştır. Şekil 4.4'te gösterildiği üzere, Faraday Kanununa göre teorik olarak tasarlanan korozyon seviyelerine ulaşıldıktan sonra korozyon süreci sona erdirilmiştir ve betonarme döşeme numuneleri bundan sonra bir yıl boyunca statik servis yükleri altında korozyon havuzunda tutulmuştur. Bunun için, 3,75 kN/m² kapasitede bir yüke sahip 15 mm kalınlığında üretilen ilave betonarme döşemeler, betonarme döşeme numunelerine yüklenmiştir. Böylece, betonarme döşeme numunelerinin statik servis yükleri altındaki zamana bağlı deformasyonları ve çatlak genişliklerinin yayılması simüle edilmiştir.

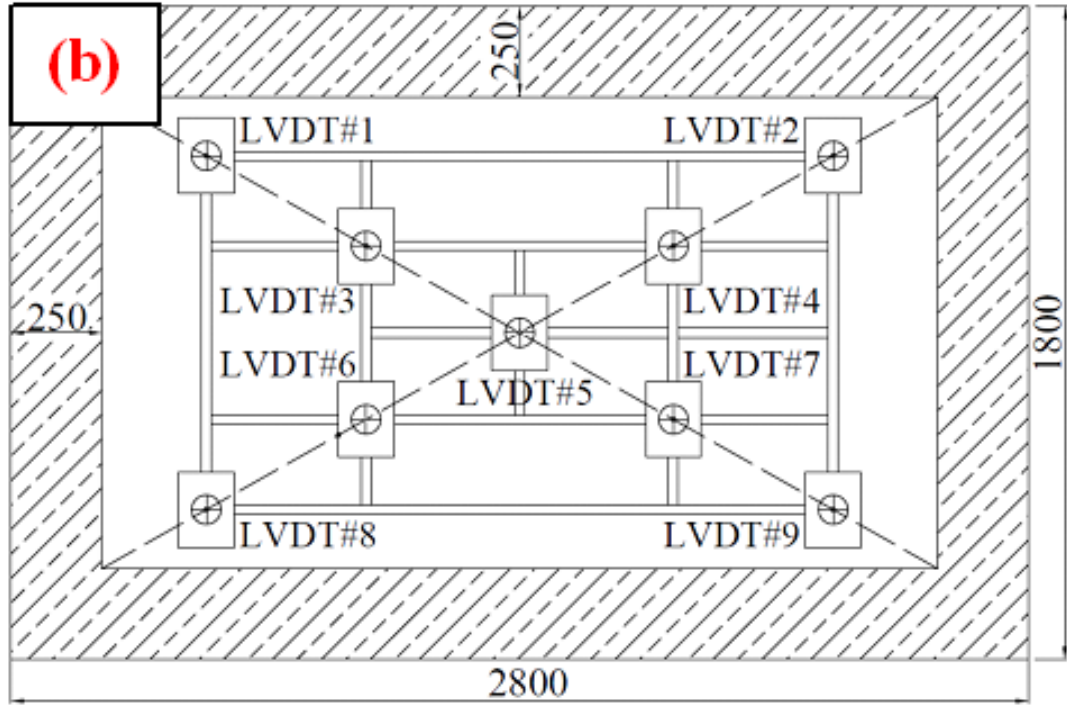
4.2.2. Yükleme düzeneği ve ölçüm sistemi

Hızlandırılmış korozyon sürecinden sonra, tüm korozyonsuz ve korozyonlu betonarme döşeme numuneleri için aksel eğilme testleri yapılmıştır. Yükleme düzeneği ve ölçüm sisteminin gösterimi ve şematik diyagramı Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Şekil 4.5'te, aksel yükleme sistemi betonarme döşeme numuneleri göçme moduna ulaşıncaya kadar döşeme

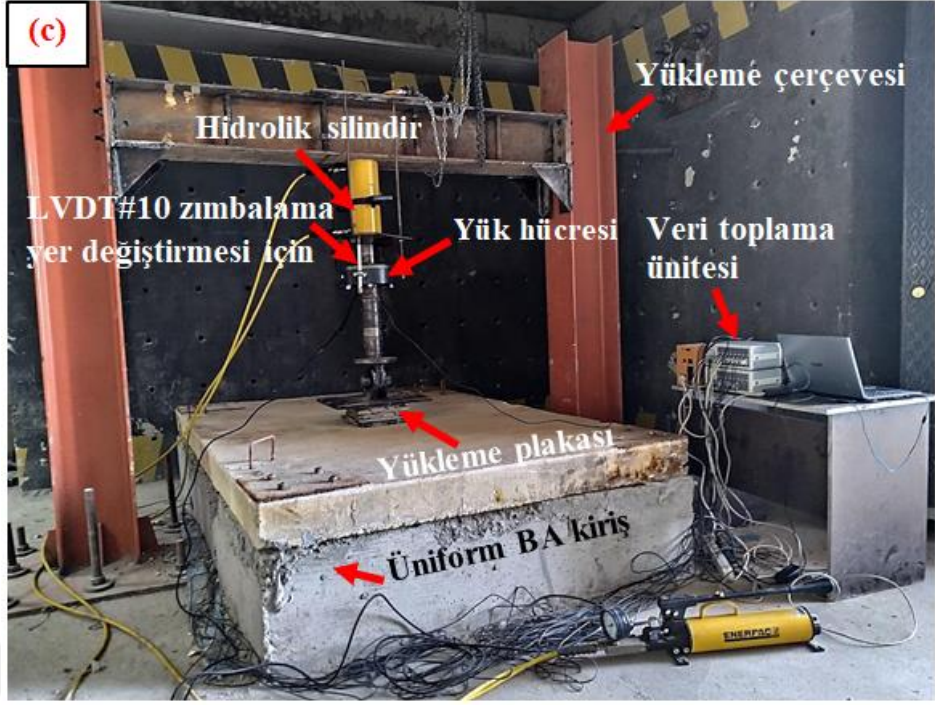
numunelerinin üst basınç bölgesinden monotonik olarak uygulanmıştır. Betonarme döşeme numuneleri, rijit dikdörtgen uzanan betonarme kirişler üzerinde mesnetlendirilmiştir. Betonarme döşeme numunelerinin altında 250 mm genişliğe sahip inşa edilen kirişler, mesnet koşulları sabit mesnet olarak değerlendirilmesi sağlanmıştır. Böylece betonarme döşeme numunelerinin kısa ve uzun doğrultularındaki akma çizgisi sırasıyla üçgen ve trapez olacak şekilde tasarlanmıştır. Yükleme düzeneğinde çelik bir yükleme çerçevesine asılı olarak, 600 kN kapasiteli bir hidrolik silindir kullanılmıştır. Betonun üst yüzeyine uygulanan yük üzerinde etkili olan hidrolik silindir ucundaki yükleme plakası, zımbalama etkisini önlemek için TS500 (2002) standardına göre özel olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan çelik yükleme plakasının kesit alanı 447,21 cm²'dir. Şekil 4.5 (b)'de gösterildiği üzere, betonarme döşeme numunelerinin orta açıklığında ve akma çizgisi boyunca oluşan yer değiştirmelerin kaydedilmesi için betonarme döşeme numunelerinin çekme bölgesine dokuz adet yer değiştirme ölçerler [doğrusal değişken diferansiyel transformatör (LVDT#1-9)] yerleştirilmiştir. Gerçekleşebilecek zımbalama etkisinden kaynaklanan yer değiştirmenin kaydedilebilmesi için hidrolik silindir ve yük hücresi arasına bir adet LVDT (yani, LVDT#10) ilave olarak yerleştirilmiştir. Buna göre deneysel numunenin basınç bölgesinde olası zımbalama etkisinin gerçekleşmemesi durumunda, LVDT#5 (yani, çekme bölgesine yerleştirilen LVDT) ile LVDT#10 (yani, basınç bölgesine yerleştirilen LVDT) uygulanan benzer yük için aynı yer değiştirmeleri kaydetmelidir. Göçme moduna kadar uygulanan benzer yük seviyesi için, LVDT#10 ölçüm sisteminde (deneysel döşeme numunenin beton basınç bölgesindeki birim şekil değiştirme (deformasyon) miktarının toplam yer değiştirmeye (deplasmana) katkısının ihmal edilerek) LVDT#5 ölçüm sisteminden daha büyük bir değer kaydedilmesi durumunda, deneysel olarak ölçülen yük- toplam deplasman eğrilerinin (grafiklerinin) değerlendirilmesinde, zımbalama etkisi dikkate alınmıştır. Deneysel betonarme döşeme numunelerine takılan tüm cihazları okumalarının eş-zamanlı olarak kaydedilmesi için bir veri toplama ünitesi kullanılmıştır.



Kesit A-A



Şekil 4.5. Yükleme düzeneği: (a) şematik gösterim; (b) yükleme düzeneği en-kesiti; (c) yükleme düzeneği fotoğrafı.



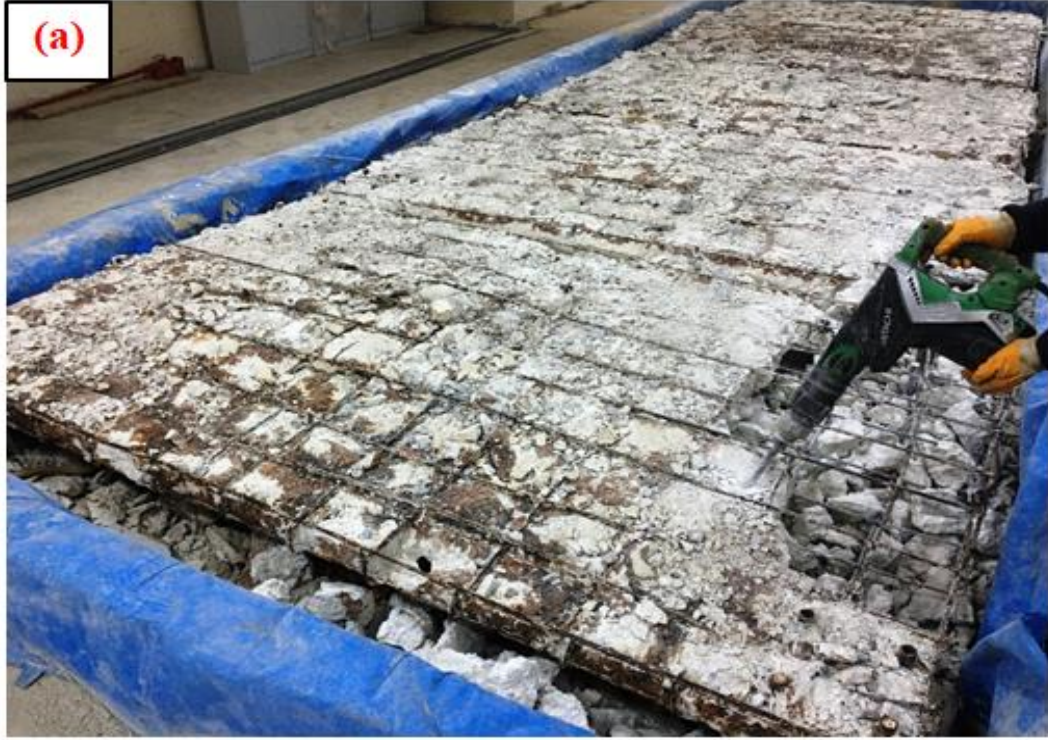
Şekil 4.6. Devam Yükleme düzeneği: (a) şematik gösterim; (b) yükleme düzeneği en-kesiti; (c) yükleme düzeneği fotoğrafı.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

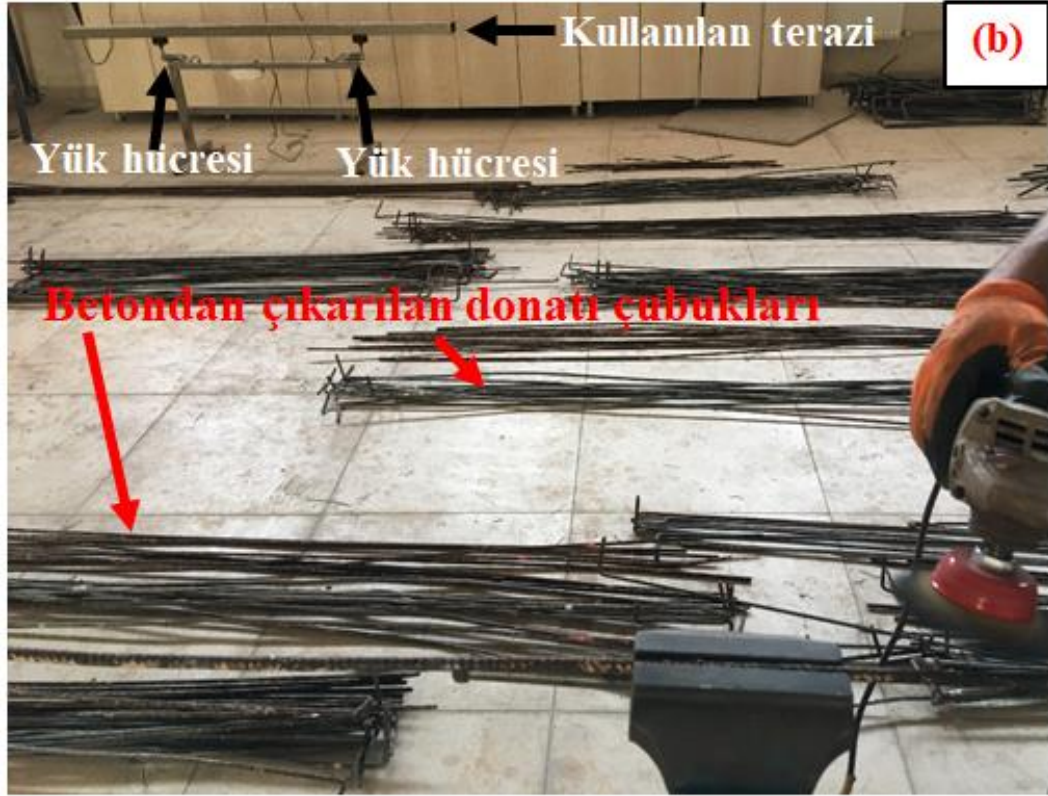
Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen araştırma bulguları, gerçek korozyon seviyeleri, yük-yer değiştirme eğrileri, çatlak modelleri, akma çizgisi boyunca oluşan maksimum deplasman eğrileri, uzun ve kısa doğrultulara ait moment taşıma gücü ve eksenel eğilme yükü-donatı çubuğu birim şekil değiştirme oranı ilişkileri olarak sunulmuştur.

5.1. Gerçek Korozyon Seviyeleri

Eksenel eğilme testlerinden sonra tüm betonarme döşeme numuneleri kırılarak her bir boyuna çubuğu betondan çıkarılmıştır. Donatı çubuklarının betondan çıkarılmasından sonra, ASTM G1-03 (2003) standardına göre tüm boyuna donatı çubuk yüzeylerinden korozyon ürünlerinin çıkarılması için donatı çubukları fırçalanarak mekanik temizlik işlemi uygulanmıştır. Şekil 5.1, donatı çubuklarının gerçek korozyon seviyesini elde etmek için uygulanan temizleme işlemini göstermektedir; donatı çubukları için ayrıntılı gravimetrik test sonuçları ise Tablo 5.1’de sunulmuştur.



Şekil 5.1. Gerçek korozyon seviyelerinin elde edilmesi süreci: (a) betonarme döşeme numunelerinin kırılması; (b) boyuna donatı çubuklarının mekanik olarak temizlenmesi işlemi ve yeniden tartılması.



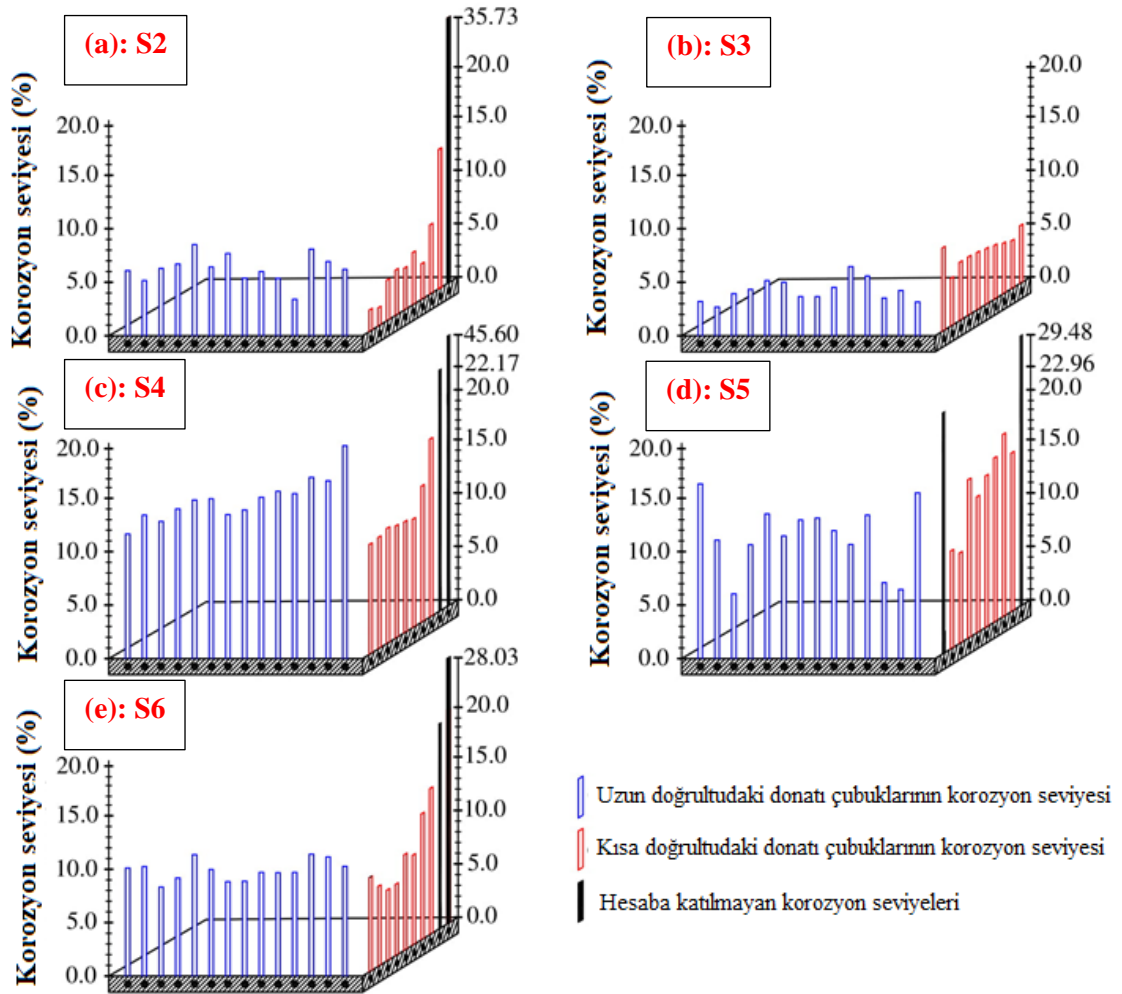
Şekil 5.2. Devam Gerçek korozyon seviyelerinin elde edilmesi süreci: (a) betonarme döşeme numunelerinin kırılması (b) boyuna donatı çubuklarının mekanik olarak temizlenmesi işlemi ve yeniden tartılması.

Tablo 5.2. Gravimetrik test sonuçları.

Döşeme	İlk kütle (g)		Son kütle (g)		Korozyon oranı (%)			ΔA_s (mm ²)	
	<i>S</i>	<i>L</i>	<i>S</i>	<i>L</i>	<i>CL_S</i>	<i>CL_L</i>	<i>CL_A</i>	ΔA_s <i>S</i>	ΔA_s <i>L</i>
S1	-	-	-	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
S2	9776,0	9996,5	9142,0	9515,0	6,49	4,82	5,64	3,26	2,42
S3	9854,5	11056,5	9438,0	10465,0	4,23	5,35	4,82	2,13	2,69
S4	9108,0	8872,0	7785,5	7853,0	14,52	11,48	13,02	7,30	5,77
S5	9842,5	7910,0	8714,0	6855,5	11,47	13,34	12,30	5,76	6,70
S6	9784,5	8829,5	8814,5	8029,5	9,91	9,06	9,51	4,98	4,22

Her bir boyuna donatı çubuğundaki gerçek korozyon seviyeleri elde edilmiş olup, boyuna donatı çubuklarının her iki uzun ve kısa doğrultularındaki gerçek korozyon seviyelerinin dağılımı Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Şekil 5.2’de görüldüğü gibi, aynı betonarme döşeme numunelerine yerleştirilen donatı çubuklarına aynı miktarda akım uygulanmasına rağmen, beton yüzeye yakın bazı donatı demirleri daha fazla korozyon seviyelerine maruz kalmıştır. Benzer betonarme döşeme numuneleri için korozyon seviyeleriyle ilgili temel farklılıklar, beton yüzeyindeki ilk korozyon çatlamaından kaynaklanmıştır. Betonarme döşeme numunelerinin beton pas-payı derinlikleri boyunca ilk korozyon çatlakları

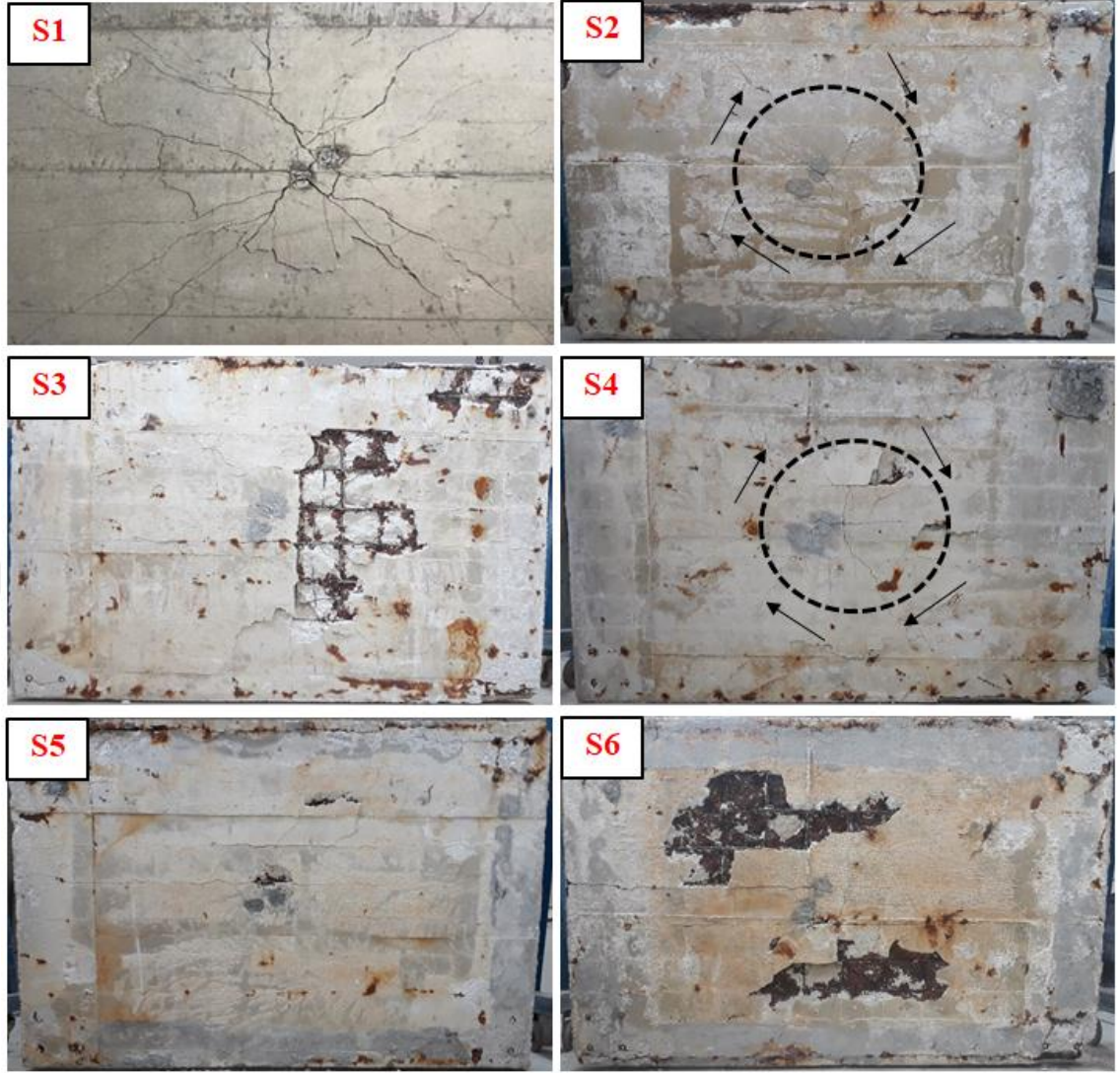
oluştduğunda, dış taraftaki donatı çubukları korozyona daha fazla maruz kalmıştır. Bu nedenle, betonarme döşeme numunelerinin dış yüzeylerindeki korozyon seviyeleri (bakınız Şekil 5.2), Tablo 5.1’de de gösterildiği üzere, elde edilen ortalama korozyon seviyeleri için dikkate alınmamıştır. Dış yüzeylerdeki boyuna donatı çubuklarının bu tür korozyon seviyelerinin, ilgili boyuna donatı çubuklarının mesnet genişliği içinde kaldığı için korozyon seviyeleri açısından genel yapısal davranışı etkilemediği düşünülmektedir.



Şekil 5.3. Korozyon seviyelerinin dağılımı: (a) S2; (b) S3; (c) S4; (d) S5; (e) S6.

5.2. Çatlak Davranışı

Tüm betonarme döşeme numunelerinde ortaya çıkan çatlama paterni, deney düzeneğine önceden yerleştirilen kameralar yardımıyla gözlemlenmiştir ve test edilen betonarme döşeme numunelerinin göçme yüklerindeki çatlama paterni Şekil 5.3’te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Betonarme döşeme numunelerinin göçme modundaki çatlak paterni.

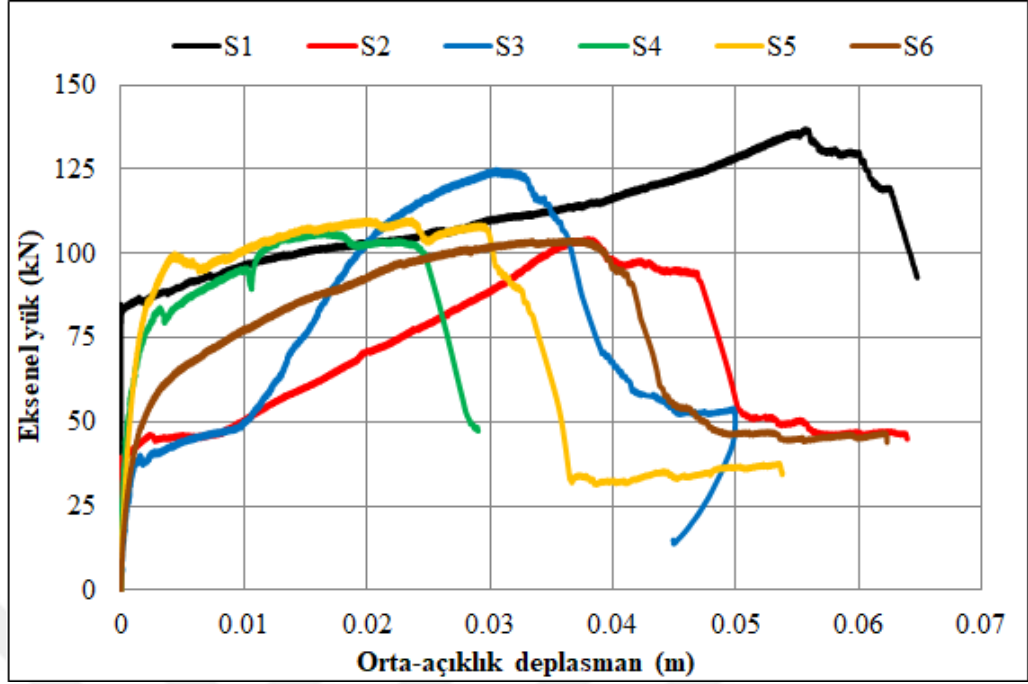
Şekil 5.3'te, S1 korozyona uğramamış betonarme döşeme numunesinde ortaya çıkan eğilme çatlaklarının özellikle akma çizgisi boyunca gelişerek yayıldığı görülmektedir. Gözle görülebilen ilk eğilme çatlakları, uygulanan yükün orta noktasından betonarme döşeme numunesinin köşelerine ve mesnetlerin kısa doğrultularına kadar uzanmıştır. Uygulanan yükün artırılmasıyla, küçük ölçekli eğilme çatlakları, akma çizgisi çevresi ile kabaca eş merkezli olarak ortaya çıkmaya başlamıştır. Tasarlanan yükleme plakasına göre, nihai yük taşıma kapasitesine ulaşıncaya kadar S₁ betonarme döşeme numunesi için zımbalama etkisi oluşmamıştır. Ancak nihai yük taşıma kapasitesine ulaşıldığında ve daha sonra yük taşıma kapasitesi önemli ölçüde azalmaya başladığında, eğilme çatlak genişlikleri önemli ölçüde artmış ve eğilme davranışı zımbalama etkisine dönüşmüştür.

Şekil 5.3'teki korozyona uğramış betonarme döşemeler durumunda ise çatlakların sayısı korozyonsuz betonarme döşemelere kıyasla daha az ortaya çıkmıştır ancak genişliği daha fazla olarak sonuçlanmıştır. Akma çizgisi boyunca korozyona uğramış betonarme döşeme numunelerinde azalan çatlak sayısı, korozyona uğramış döşeme numunelerinin enerji yutma kapasitelerindeki azalmanın nedeni olmuştur. Uygulanan aksel eğilme yükü arttırıldığında ve donatı çubuklarını çevreleyen ilk korozyon çatlak genişlikleri arttığında, korozyona uğramış betonarme döşeme numuneleri beton pas-payında gözle görülebilir dökülmeler meydana gelmiştir. Korozyona uğramamış betonarme döşeme numunesinde meydana geldiği gibi, beton pas-payının dökülme eğilimi akma çizgisi boyunca doğrusal değildir. Şekil 5.3'te, S2 ve S4 korozyona uğramış betonarme döşeme numuneleri üzerindeki oklarla gösterildiği gibi, yük uygulandığında orta noktalarda radyal gerilmeler oluşmuştur. Bununla birlikte, betonarme döşeme numunelerinin beton pas-payının dökülmesi ve dolayısıyla azalan aderans dayanımı ile agrega köprüleme etkisinin kaybedilmesi nedeniyle, bu gerilmeler, S₁ korozyonsuz betonarme döşeme numunesinde sergilendiği gibi akma çizgilerinin geliştirilmesi için donatı çubuklarının uzunluğu boyunca beklenti doğrultusunda aktarılamamıştır.

5.3. Yük-Deplasman İlişkileri

Şekil 5.4, test edilen betonarme döşeme numuneleri için orta açıklıktaki yük-deplasman grafiklerini göstermektedir. Deneysel olarak elde edilen test sonuçları da Tablo 5.2'de özetlenmiştir.

Test edilen betonarme döşeme numunelerinin göçme modu, Broms (1990) tarafından önerilen şartlara göre tanımlanmıştır. Broms (1990) tarafından, yapılarda betonarme döşeme sistemini oluşturan iç kolonlardaki plakaların özellikle zımbalama dayanımı ve buna bağlı olarak ortaya çıkan deplasmanların tahmin edilmesi için bir tasarım yöntemi önerilmiştir. Buna göre göçme modunun, kolon yakınındaki plaka basınç bölgesinin, ya yüksek radyal basınç gerilmeleri ya da yüksek teğetsel basınç gerilmeleri ile zorlandığı zaman meydana geldiği varsayılmıştır. Tespit edilen şartlar için, boyut etkileri ve artan dayanım ile birlikte artan beton gevreklik etkisi dikkate alınmıştır.



Şekil 5.5. Döşeme numunelerinin eksenel yük-orta-açıklık deplasman ilişkileri.

Tablo 5.3. Deneysel test sonuçlarının özeti.

Döşeme	P_y	Δ_y	P_u	Δ_u	Moment kapasitesi, kN.m			Korozyon oranı (%)		
					M_s	M_l	M_u	CL_s	CL_L	CL_A
S1	95	0,009	137	0,056	11,83	6,69	13,59	0,0	0,0	0,0
S2	87	0,029	104	0,038	9,02	5,10	10,36	6,49	4,82	5,64
S3	115	0,024	125	0,031	10,78	6,10	12,39	4,23	5,35	4,82
S4	78	0,002	106	0,016	9,19	5,19	10,55	14,52	11,48	13,02
S5	85	0,002	110	0,024	9,50	5,37	10,92	11,47	13,34	12,30
S6	77	0,010	104	0,037	8,98	5,08	10,32	9,91	9,06	9,51

Broms (1990) tarafından önerilen yöntem; sünek eğilme göçme modundan gevrek zımbalama göçme moduna, küçük-ölçekli test numunelerinden tam-ölçekli yapıya, simetrik yüklemekten simetrik olmayan yüklemelere ve düşük beton basınç dayanımı ve donatı oranı seviyesinden yüksek beton basınç dayanımı ve donatı oranı seviyesine kadar değişen koşullarla literatürde bildirilen zımbalama testlerinden elde edilen sonuçlarla oldukça mükemmel bir uyum göstermiştir.

Mevcut çalışma için ve yük-orta açıklık deplasman eğrisi incelendiğinde, S1 betonarme döşeme numunesinin sünek bir davranış sergilediği ancak göçme modunun zımbalama etkisine bağlı olarak gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Korozyona maruz kalmış betonarme döşeme numunelerinde ise daha önce belirtildiği üzere eksenel eğilme testi öncesinde korozyona bağlı çatlaklar oluşmuştur. Korozyonlu betonarme döşeme numunelerinden

düşük seviyede korozyona maruz kalan numunelerden S2_{6,49,4,82} ve S3_{4,23,5,35} numuneleri referans numuneden farklı olarak plastik akma dayanım performansı bir miktar daha geç oluşmuştur. Şekil 5.4'deki, yük-orta açıklık deplasman ilişkisinden anlaşılacağı üzere eksenel yükün sabit kaldığı, buna karşılık deplasmanların devam edebildiği durumda oluşan plato nedeni ile gevrek olmayan ancak yine de sünek sayılabilen bir davranış gösterdiği anlaşılmaktadır. Daha yüksek korozyon seviyelerine sahip olan S4_{14,52,11,48}, S5_{11,47,13,34}, ve S6_{9,91,9,06} döşeme numunelerinin ise referans numuneye göre daha erken plastik akma dayanım performans özelliğinden dolayı korozyon seviyesine bağlı olarak rijitlik karakteristiği artmıştır ve azalan sünek davranış sergilemiştir. Tüm numunelerde eksenel eğilme yüklemesinden dolayı zımbalama etkisi gözlemlenmiştir. Korozyonlu betonarme döşeme numunelerinin, Şekil 5.4'de yük-orta açıklık deplasman ilişkisine göre sergilediği farklı davranışların, sünek davranış veya zımbalama etkisine bağlı olan sünek davranış olup olmadığı, göçme moduna kadar yürütülen testlerde yük-orta açıklık deplasman ilişkisi açısından kesit akma noktası ve maksimum noktası arasındaki enerji yutma kapasitesi ilişkilerine göre belirlenmiştir (Yaciner ve Kumbasaroglu; 2020).

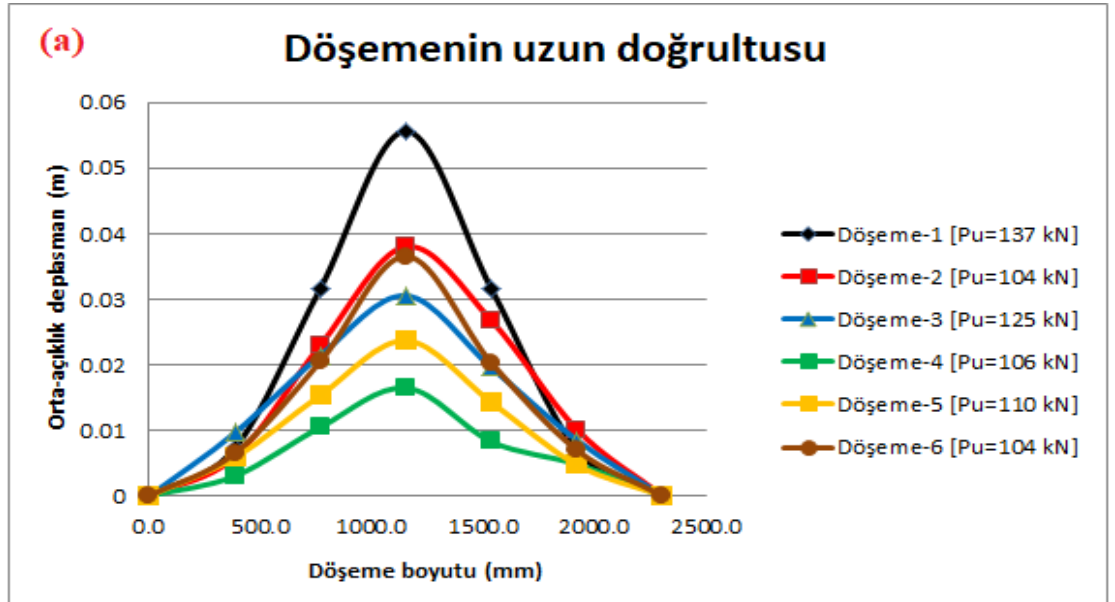
Test edilen betonarme döşeme numunelerinin rijitliği, deneysel olarak elde edilen yük-orta açıklık deplasman ilişkisinden belirlenmiştir. Çalışma kapsamında üretilen deneysel betonarme döşeme numunelerinin uzun ve kısa doğrultularındaki korozyon seviyeleri birbirinden farklı olduğundan ve elde edilen yük-orta açıklık deplasman ilişkilerinin her iki doğrultunun da yük taşıma kapasitesini temsil ettiği için, rijitlik bozulmaları ile ilgili gerekli tartışmalar her iki doğrultunun ortalama korozyon seviyeleri dikkate alınarak yapılmıştır. Eksenel eğilme yüklemesi altında test edilen tüm deneysel numunelerin enerji yutma kapasiteleri, birincil rijitlikleri ve süneklikleri yük-orta açıklık deplasman ilişkisine göre hesap edilmiştir ve Tablo 5.3'te özetlenmiştir.

Tablo 5.4. Yük-orta açıklık deplasman ilişkilerinden elde edilen bulguların özeti.

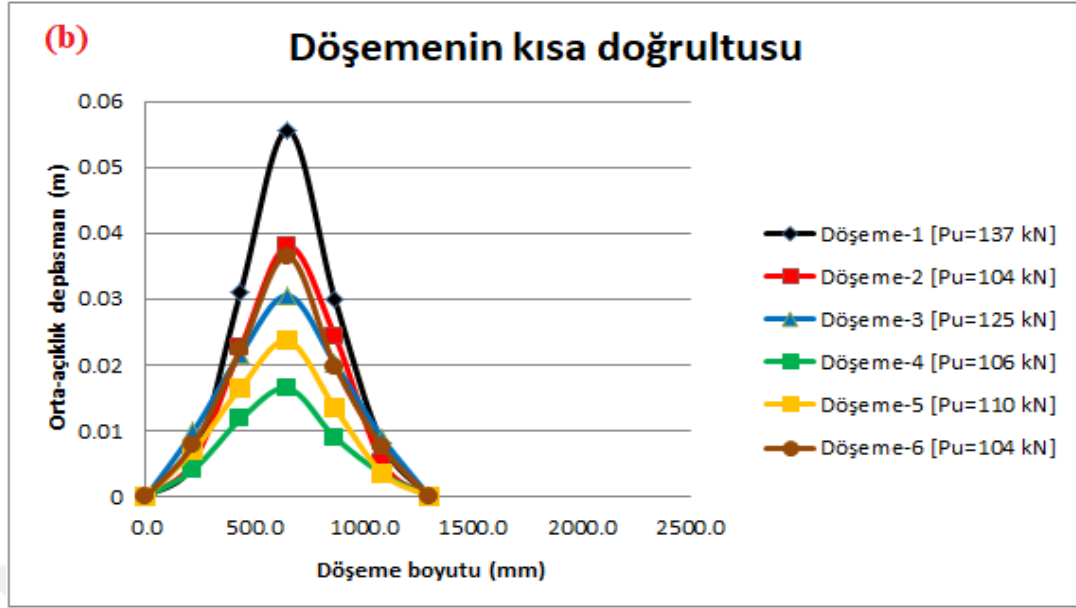
Döşeme	P _y	Δ _y	P _u	Δ _u	Yük-orta açıklık deplasman ilişkisi			Korozyon oranı (%)		
					E (kNm)	k ₁ (kN/m)	μ (m/m)	CL _s	CL _L	CL _A
S1	95	0,009	137	0,056	7,175	15004	7,41	0,0	0,0	0,0
S2	87	0,029	104	0,038	4,405	3588	4,45	6,49	4,82	5,64
S3	115	0,024	125	0,031	3,808	5132	4,34	4,23	5,35	4,82
S4	78	0,002	106	0,016	2,636	46893	2,15	14,52	11,48	13,02
S5	85	0,002	110	0,024	4,113	51161	3,74	11,47	13,34	12,30
S6	77	0,010	104	0,037	4,675	10875	5,38	9,91	9,06	9,51

Test edilen betonarme döşeme numunelerinin enerji yutma kapasiteleri, yük-orta açıklık deplasman eğrilerinin altındaki alanın maksimum yükün azalan trendinde, %85'ine kadar entegre edilmesiyle hesap edilmiştir. Korozyon seviyeleri arttıkça betonarme döşeme numunelerinin yük ve/veya moment taşıma kapasitesi, döşeme numunelerinde gerçekleşemeyen deplasman kabiliyetine (bakınız Şekil 5.5) ve azalan enerji yutma kapasitesine rağmen, referans numuneye göre bariz bir azalma/farklılık olmamıştır. Maksimum yük, döşeme numunesinin ancak nihai kapasiteye ulaşıldığında ani olarak azalmıştır. Said ve Hussein (2019a) tarafından yapılan çalışmada, korozyona uğramış betonarme döşemelerin % 25'e kadar elde edilen korozyon seviyelerinde, enerji yutma kapasitelerinin, korozyona uğramamış referans betonarme döşemelere göre daha yüksek çıktığı savunulmuştur.

Tez kapsamında üretilen betonarme döşeme numuneleri için servis yükü Cabrera (1996) ve Aoude ve diğerleri (2014) tarafından önerildiği üzere referans döşeme numunesinin maksimum yük kapasitesinin % 60 oranı olarak tanımlanmıştır. Yürütülen deneysel çalışmada üretilen betonarme döşeme numunelerine servis yükleri, numunelerin kür süreci ve hızlandırılmış korozyon sürecinden sonra uygulanmıştır.



Şekil 5.6. Orta-açıklık deplasman-döşeme boyutları ilişkileri; (a) döşemenin uzun doğrultusu; (b) döşemenin kısa doğrultusu.



Şekil 5.7. Devam Orta-açıklık deplasman-döşeme boyutları ilişkileri; (a) döşemenin uzun doğrultusu; (b) döşemenin kısa doğrultusu.

5.4. Süneklik Oranları

Tez kapsamında yapılan detaylı araştırmalardan, korozyona maruz kalmış betonarme elemanların süneklik oranlarının hesaplanması ve karşılaştırılmasında iki ana nedenden dolayı bazı sorunlara neden olabileceği anlaşılmıştır. Bu nedenlerden birincisi, Said ve Hussein (2019a,b) tarafından rapor edildiği üzere, korozyon işlemi sırasında indüklenen akım ve donatı yüzeyine yapıştırılan birim şekil değiştirme ölçerlerin hızlandırılmış korozyon sürecinde hasar görebilirliği nedeniyle, korozyona maruz kalmış betonarme elemanların eğilme donatı çubuklarının ilk akmasının saptanmasının ve dolayısıyla süneklik oranlarının belirlenmesinin güçlüğüdür. Yük-orta açıklık deplasman eğrilerinin idealize edilerek bir akma noktasına karar vermek için farklı yöntemler mevcut olsa da, bu tür yöntemler ile donatı çubuğunda veya betonarme elemanın en-kesitinde bir akma noktasının bulunmasında, donatı çubuklarının eğilme öncesinde şayet donatı çubuğunun akma seviyesine ulaşmadan göçme modunun meydana gelmesi durumu bazı sorunlara neden olabilir. İkinci sorun ise yer değiştirme bazlı ve/veya eğrilik yöntemleri (yani; $\mu_D = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$, $\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y}$) kullanılarak geleneksel yöntemlerle belirlenen süneklik oranları ile ilgilidir. Bu yöntemde, çelik donatı çubuklarının korozyona maruz kalması ve yükleme altında daha da genişleyen ilk korozyon çatlak genişliklerinin ortaya çıkması, akma dayanımındaki akma deplasmanı veya eğriligi önemli ölçüde azaltabilmektedir. Azalan

akma dayanımı, yer değiştirme bazlı ve/veya eğrilik bazlı yöntemler kullanıldığında, korozyonlu betonarme elemanların süneklik oranlarının artmasıyla sonuçlanmaktadır. Bu şekilde ortaya çıkabilecek problemler nedeniyle Yalçın ve Kumbasaroğlu (2020), kümülatif enerji dağılımını akma dayanımında harcanan enerjiye bölerek korozyona uğramış betonarme elemanlar için şiddetle enerji bazlı süneklik indeksinin (yani $\mu_E = \frac{E_u}{E_y}$) kullanılmasını önermiştir.

Korozyona maruz kalmış betonarme kirişlerin süneklik indeksinin belirlenmesinde bir başka yöntem ise Dang ve François (2014) tarafından; korozyonlu betonarme bir kirişin nihai yer değiştirmesinin, korozyonsuz betonarme kirişin nihai yer değiştirmesine oranı (yani; $\mu_{korozyon} = \frac{\Delta_u(korozyonlu)}{\Delta_u(korozyonsuz)}$) olarak önerilmiştir. Daha sonra, Dang ve François (2014) tarafından önerilen yöntem, elde edilen deneysel sonuçlar için Said ve Hussein (2019a,b) tarafından da kullanılmıştır. Said ve Hussein (2019a,b) tarafından yapılan çalışmada kütle kaybının artmasının, nihai yükte deplasmanın artması ve test edilen betonarme döşemelerin süneklik indekslerinin % 15, % 25 ve % 50 kütle kaybı için % 68,9, % 68,7 ve % 74 oranında artması nedeniyle süneklik indeksinde bir artışa neden olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, Dang ve François (2014) tarafından, korozyona uğramış betonarme kirişlerin süneklik indeksinde düşüş (yani nihai deplasmanda azalma) olduğu belirtilmiştir. Dang ve François (2014) ile Said ve Hussein, (2019a,b) tarafından rapor edilen sonuçlar arasındaki çelişkili araştırma bulguları, korozyona bağlı olarak eleman rijitliğindeki azalma ile açıklanabilir.

Korozyona maruz kalmış betonarme elemanların rijitliği azaldığından, korozyonlu elemanlar için korozyonsuz elemanlara kıyasla daha düşük uygulanan yük ile daha fazla deplasman meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, korozyona maruz kalmış elemanların nihai yükünün artan deplasmanı, Dang ve François (2014) tarafından önerilen yöntem kullanıldığında, korozyona uğramış betonarme elemanların süneklik indeksinin artacağı ve artışın yanılıcı olabileceği söylenebilir. Dang ve François (2014) tarafından önerilen yöntem, deneysel referans numunelerine göre aynı miktarda enerji yutma kapasitesi veya normalize edilmiş uygulanan yük için hem nihai deplasmanlar (yani, korozyonlu ve korozyonsuz numuneler) belirlenirse doğru sonuçlar sağlanabilir. Bu nedenle, Said ve Hussein (2019a,b) tarafından elde edilen deneysel sonuçlar, korozyonlu betonarme döşemelerin göçme öncesinde daha az enerji yutma kapasitesine rağmen, korozyonlu

betonarme döşemeler için korozyonsuz betonarme döşemelere kıyasla daha yüksek süneklik göstermektedir. Said ve Hussein (2019a,b) tarafından elde edilen yük orta açıklık deplasman eğrilerinin deneysel test sonuçları tekrar gözden geçirildiğinde; korozyonlu betonarme döşemelerin rijitliklerinin önemli ölçüde azaldığı ve korozyonlu betonarme döşemelerin nihai yer değiştirmesinin daha düşük uygulanan yükler için (yani, daha az enerji yutma kapasitesi için) arttığı anlaşılmıştır. Bu nedenle, bu tez kapsamında, Li ve diğerleri (2018) ve Yalçiner ve Kumbasaroğlu (2020) tarafından korozyona uğramış betonarme döşeme numunelerinin süneklik indeksini belirlemek için yer değiştirme bazlı yöntem yerine enerji bazlı yöntem kullanılarak deneysel numunelerin süneklik oranları hesap edilmiştir ve sonuçlar Tablo 5.3'te özetlenmiştir. Böylece, gerçek korozyon seviyelerinin elde edilmemesi nedeniyle, yüksek korozyon seviyeleri için betonarme döşeme numunelerinin enerji yutma kapasiteleri ve süneklik oranları arasında çelişkili sonuçlar bulunmamıştır.

6. SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında tam ölçekli betonarme döşemeler hızlandırılmış korozyon yöntemi ile %4.82, %5.64, %9.51, %12.30, ve %13.02 oranlarında paslandırılmıştır. Bu çalışmada hızlandırılmış korozyon yönteminin kullanılmasının temel amacı, doğal yollarla uzun sürecek paslanma olayının kısa sürede istenilen oranlarda elde edilmesidir. Paslanma sürecinin tamamlanmasının ardından betonarme döşemelerin taşıma gücü kapasitelerinin tespit edilmesi amacıyla numuneler çeşitli ölçüm elemanları ile donatılarak eksenel eğilme yükleri altında teste tabi tutulmuştur. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- 1- Hızlandırılmış korozyon yönteminin betonarme döşemelerde uygulanmasının ardından yükleme deneyleri gerçekleştirilen numunelerin tümü kırılarak betonarme donatılar çıkartılmıştır. Çıkartılan betonarme donatılarına ASTM-G1-03 yönetmeliğine uygun olarak kimyasal ve mekanik temizleme işlemi uygulanmıştır. Bu işlemler sonucunda S2-S3-S4-S5 ve S6 numunelerine ait betonarme donatılarının gerçek korozyon oranları sırasıyla kısa doğrultuda; 0.0, 6.49, 4.23, 14.52, 11.47 ve 9.91 uzun doğrultuda; %0.0, %4.82, %5.35, %11.48, %13.34, ve %9.06 olarak elde edilmiştir.
- 2- Betonarme döşemelerdeki korozyon oranları incelendiğinde kısa ve uzun doğrultudaki köşe donatılarının, beton yüzeyine yakın olmaları sebebiyle diğer donatılara oranla daha fazla paslandığı görülmüştür. Köşe donatılardaki meydana gelen bu farklılık yapılan taşıma gücü değerlendirmelerinde dikkate alınmamıştır.
- 3- Betonarme döşemelerde korozyon oranının artmasıyla birlikte taşıma gücü kapasitelerinde ciddi azalmalar gözlemlenmiştir.
- 4- Betonarme döşemelerde birincil çatlakların oluşmasının ardından yüklemenin etkisiyle çatlaklar önemli ölçüde genişleyerek aderans kaybına yol açmıştır.
- 5- Betonarme döşemelerde oluşan akma çizgileri, taşıma gücü kaybının en belirgin göstergesidir. Paslı betonarme döşemelerin akma çizgileri, referans numunesi gibi oluşmamıştır. Paslı numunelerde yük aktarılamadığı için belirli bölgelerde gerilme yığılmalarına neden olmuştur.

7. ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının paslanmış betonarme döşemeler ile ilgili yapılacak olan yeni deneysel çalışmalara ışık tutması düşünülmektedir. Elde edilen bulgular neticesinde sunulan öneriler aşağıda sıralanmıştır,

- 1- Yapılacak olan korozyona maruz kalmış betonarme döşeme çalışmalarında tasarım esnasında planlanan mesnet koşullarına olumsuz bir etki göstermemesi amacıyla, hızlandırılmış korozyon yöntemi sürecinde köşe donatılarının yüksek oranda paslanmasına önlem alınmalıdır. Örneğin beton dökümünden önce köşe donatılarının diğer donatılarla birleştiği bölgeler parafin ile kaplanarak bu donatılar koruma altına alınabilir.
- 2- Yapılacak olan diğer çalışmalarda, hızlandırılmış korozyon yönteminden sonra birincil çatlak genişliklerinin ölçülerek deney sonrasında elde edilen sonuçlarla ilişkilendirilip hasarsız değerlendirme yöntemlerinin geliştirilmesi önem arz etmektedir.
- 3- Betonarme yapı sistemlerinde deprem etkisi altında döşemelere etkiyen yanal yüklerin benzeştirilerek tersinir-tekrarlanır yükleme programı oluşturulması ile deneylerin gerçekleştirilmesi bu konuda yapılan araştırmalara farklı bir bakış açısı getirecektir.

KAYNAKLAR

- Ahmad, S. (2017). "Prediction of residual flexural strength of corroded reinforced concrete beams", *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 64(1), 69-74.
- Almusallam, A. A., Al-Gahtani, A. S., Aziz, A. R., Dakhil, F. H. and Rasheeduzzafar. (1996). "Effect of reinforcement corrosion on flexural behavior of concrete slabs", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 8(3), 123-127.
- Amleh, L., and Ghosh, A. (2006). "Modeling the effect of corrosion on bond strength at the steel-concrete interface with finite-element analysis", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(6), 673-682.
- Aoude, H., Cook, W. D., and Mitchell, D. (2014). "Effects of simulated corrosion and delamination on response of two-way slabs. *Journal Of Structural Engineering*, 140(1), 04013023.
- ASTM A370-08a, (2008). "Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products," *ASTM International*, West Conshohocken, PA, pp. 1-47.
- ASTM C39/C39M, (2005). "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens," *ASTM International*, West Conshohocken, PA, pp. 1-7.
- ASTM G1-03, (2003). "Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens", *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 9 pp.
- Auyeung, Y., Balaguru, P. and Chung, L. (2000). "Bond behavior of corroded reinforcement bars", *Materials Journal*, 97(2), 214-220.
- Azad, A. K., Ahmad, S. and Al-Gohi, B. H. A. (2010). "Flexural strength of corroded reinforced concrete beams", *Magazine of Concrete Research*, 62(6), 405-414.
- Bicer, K., Yalciner, H., Balkıs, A. P. and Kumbasaroglu, A. (2018). "Effect of corrosion on flexural strength of reinforced concrete beams with polypropylene fibers", *Construction and Building Materials*, 185, 574-588.
- Broms, C. E. (1990). "Punching of flat plates: a question of concrete properties in biaxial compression and size effect", *ACI Structural Journal*, 87(3), 292-304.
- Cabrera, J. G., (1996). "Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion", *Cement and Concrete Composites*, 18(1), 47-59.
- Chung, L., Cho, S. H., Kim, J. H. J. and Yi, S. T. (2004). "Correction factor suggestion for ACI development length provisions based on flexural testing of RC slabs with various levels of corroded reinforcing bars", *Engineering Structures*, 26(8), 1013-1026.
- Chung, L., Najm, H., and Balaguru, P. (2008). "Flexural behavior of concrete slabs with corroded bars", *Cement and Concrete Composites*, 30(3), 184-193.

- Dang, V. H. and François, R. (2014). “Prediction of ductility factor of corroded reinforced concrete beams exposed to long term aging in chloride environment”, *Cement and Concrete Composites*, 53, 136-147.
- 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.
- Kivell, A., Palermo, A. and Scott, A. (2011) “Effects of bond deterioration due to corrosion in reinforced concrete”, Proceedings, *9th Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, 081-088.
- 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.
- Malumbela, G., Alexander, M., and Moyo, P. (2009). “Steel corrosion on RC structures under sustained service loads—A critical review”, *Engineering Structures*, 31(11), 2518-2525.
- Paul, S. C., Babafemi, A. J., Conradie, K. and van Zijl, G. P. (2017). “Applied voltage on corrosion mass loss and cracking behavior of steel-reinforced SHCC and mortar specimens”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(5), 1-9.
- Stanish, K., Hooton, R. D. and Pantazopoulou, S. J. (1999). “Corrosion effects on bond strength in reinforced concrete”, *ACI Structural Journal*, 96(6), 915-921.
- Said, M. E, and Hussein, A. A. (2019b). “Effect of bandwidth reinforcement corrosion on the response of two way slabs”, *Construction and Building Materials*, 216, 137-148.
- Said, M. E. and Hussein, A. A. (2019a). “Structural behavior of two-way slabs with large corroded area”, *Engineering Structures*, 199, 1-11.
- Suffern, C., El-Sayed, A. and Soudki, K. (2010). “Shear strength of disturbed regions with corroded stirrups in reinforced concrete beams”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(8), 1045-1056.
- Ting, S. C., and Nowak, A. S. (1991). Effect of reinforcing steel area loss on flexural behavior of reinforced concrete beams. *Structural Journal*, 88(3), 309-314.
- TS500, (2000). “Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Yalciner, H., Eren, O., and Sensoy, S. (2012). “An experimental study on the bond strength between reinforcement bars and concrete as a function of concrete cover, strength and corrosion level”, *Cement and Concrete Research*, 42(5), 643-655.

Yalciner, H., Kumbasaroglu, A., El-Sayed, A. K., Balkis, A. P., Dogru, E., Turan, A. I., Karimi, A., Kohistani, R., Mermit, M. F. and Bicer, K. (2020). “Flexural Strength of Corroded Reinforced Concrete Beams”, *ACI Structural Journal*, 117(1).

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

Yuan, Y. S., and Marosszeky, M. (1991). Analysis of corroded reinforced concrete sections for repair. *Journal of Structural Engineering*, 117(7), 2018-2034.



EKLER

Ek-1. Tez Sahibinin Bilimsel Çalışmaları

- 1- Kumbasaroğlu, A . ve Sezgin, H.I., (2020). Kullanılan Farklı Katkı Maddelerinin ve Farklı Beton Dayanım Seviyelerinin Kısa Kirişlerin Sünekliğine Etkisi . Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi , 13 (2) , 756-771 . DOI: 10.18185/erzifbed.714757
- 2- Kumbasaroğlu, A., Yalçınmer, H., Sezgin, H. İ. , Turan, A. İ. , Çelik, A., & Yangibayev, U., (2021). Investigation of Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Slabs . the 10th International Scientific Research Congress (pp.304-319). Ankara, Turkey