

**T.C.
ADYAMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DONATILI BETONDA KOROZYON VE ADERANSIN ARAŞTIRILMASI

RAMAZAN YAVUZ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ADYAMAN, 2021

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DONATILI BETONDA KOROZYON VE ADERANSIN ARAŞTIRILMASI

Ramazan YAVUZ

Adıyaman Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN
Yıl : 2021, Sayfa sayısı: 57

Jüri : Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN
Prof. Dr. İbrahim Özgür DENEME
Dr. Öğr. Üyesi Kadir GÜÇLÜER

Betonun hizmet verdiği süre boyunca karşılaştığı zararlı etkilere karşı dayanıklı olması önemlidir. Betonun düşük çekme gerilme davranışı özelliği, donatı ile geliştirilmektedir. Ancak beton içine gömülen donatının, korozyona uğrama riski bu önemli özelliği olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Donatının korozyona uğraması, taşıma kapasitesi başta olmak üzere, sistemin tümünün olumsuz etkilere uğramasına sebep olur. Bu çalışmada korozyon inhibitörü kullanımının donatılarda oluşabilecek korozyona ve beton ile donatı arasında oluşan aderansa etkisi araştırılmıştır. Çalışmada 15x15x15 cm boyutunda betonarme küp numuneler üretilmiştir. Beton ile donatı arasındaki aderans kuvveti, kübik betonarme numuneler üzerinde test edilmiştir. Ayrıca çalışmada, beton karışımında ağırlıkça çimentonun %1'i oranında kalsiyum nitrat bazlı korozyon inhibitörünün kullanıldığı numunelere 7, 28, 90 ve 180 gün olmak üzere, 20±2 °C'de tatlı-tuzlu su kürü uygulanmıştır. Deney numunelerinin aderans özelliklerini belirlemek için çekme-çıkarma ve korozyon davranışlarını ölçmek için ise yarı hücre korozyon potansiyeli ölçümü deneyleri uygulanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda korozyon inhibitörü kullanılan numunelerde korozyon inhibitörü kullanılmayan numunelere göre korozyon oluşumunun daha yavaş gerçekleştiği tespit edilmiştir. Korozyon etkisiyle beton ile donatı arasındaki aderansın azaldığı, korozyon inhibitörü kullanılan numunelerde ise beton ile donatı arasındaki aderansın arttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton; Donatı; Korozyon; İnhibitör; Aderans

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF CORROSION AND ADHERENCE IN REINFORCED CONCRETE

Ramazan YAVUZ

Adiyaman University
Graduate Education Institute
Department of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN
Year : 2021, Number of page: 57

Jury : Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN
Prof. Dr. İbrahim Özgür DENEME
Asst. Prof. Dr. Kadir GÜÇLÜER

It is important that the concrete is resistant to the harmful effects it encounters during its service period. The low tensile stress behavior of concrete is enhanced by reinforcement. However, the risk of corrosion of the reinforcement embedded in the concrete may adversely affect this important feature. Corrosion of the reinforcement causes negative effects of the entire system, especially the carrying capacity. In this study, the effect of the use of corrosion inhibitors on the corrosion that may occur in reinforcement and the adherence between concrete and reinforcement was investigated. In the study, concrete cube samples of 15x15x15 cm were produced. The bond strength between concrete and reinforcement was tested on cubic reinforced concrete specimens. In addition, in the study, fresh-salt water curing was applied at 20±2 °C, for 7, 28, 90 and 180 days, on the samples in which 1% of the cement by weight calcium nitrate-based corrosion inhibitor was used. Half-cell corrosion potential measurement tests were applied to measure the shrinkage-extraction and corrosion behavior of the test samples to determine the adherence properties. As a result of the study, it was determined that the corrosion formation was slower in the samples with corrosion inhibitor than the samples without corrosion inhibitor. It was determined that the adherence between concrete and reinforcement decreased with the effect of corrosion, and the adhesion between concrete and reinforcement increased in the samples using corrosion inhibitor.

Key Words: Concrete; Steel; Corrosion; Inhibitor; Adherence

BEYAN

“Donatılı Betonda Korozyon ve Aderansın Araştırılması” başlıklı tezimde çalışmaların tamamen akademik kurallara ve etik değerlere sadık kalınarak yürütüldüğünü ve yazımda yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu ayrıca alıntılardan bilimsel etiğe uygun atıf yaparak yararlanmış olduğumu beyan ederim.

Ramazan Yavuz

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasından yazımına kadar geçen her aşamada desteğini ve yardımını esirgemeyen tez danışmanım sayın Prof. Dr. Osman GÜNAYDIN'a, yol gösterici önerilerde bulunan ve deneylerin yapılmasında büyük yardımlarını gördüğüm kıymetli hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Kadir GÜÇLÜER'e sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
BEYAN.....	III
TEŞEKKÜR.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÇİZELGELER DİZİNİ	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
RESİMLER DİZİNİ.....	X
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	XI
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	4
3. DONATILI BETONDA KOROZYON ve ADERANS	9
3.1. Betona Gömülü Donatı Korozyonu.....	9
3.1.1. Korozyon Mekanizması.....	9
3.1.2. Donatı Korozyonuna Etki Eden Faktörler	12
3.1.2.1. Beton Kalitesi.....	12
3.1.2.2. Klorür İyonları	12
3.1.2.3. Karbonatlaşma.....	14
3.1.2.4. pH Derecesi.....	14
3.1.3 Yarı Hücre Potansiyeli.....	15
3.2. Beton-Donatı Aderansı.....	16
3.2.1. Aderans Mekanizması.....	16
3.2.2. Aderans Çeşitleri.....	16
3.2.2.1. Kenetlenme Aderansı	16
3.2.2.2. Eğilme Aderansı.....	17
3.2.3. Aderans Dayanımına Etki Eden Faktörler	17
3.2.3.1. Donatı Çapı	17
3.2.3.2. Donatı Konumu.....	17

3.2.3.3. Kenetlenme Boyu.....	17
3.2.4. Çekme-Çıkarma Deneyi	18
3.3. İnhibitör Kullanımının Korozyon ve Aderans Üzerindeki Etkisi	19
4. MATERYAL ve YÖNTEM	22
4.1. Materyal.....	22
4.1.1. Beton Numunelerinin Hazırlanması	22
4.1.2. Çelik Donatılar.....	24
4.1.3. NaCl Çözeltisi.....	25
4.1.4. Epoksi	25
4.1.5. Yarı Hücre Potansiyeli Deney Düzenegi	26
4.1.6. Çekme-Çıkarma Deney Düzenegi	27
4.2. Yöntem	28
4.2.1. Yarı Hücre Potansiyel Deneyi	28
4.2.3. Çekme-Çıkarma Deneyi	31
5. BULGULAR ve TARTIŞMA	33
5.1. Yarı Hücre Potansiyeli Sonuçları	33
5.1.1. 7 Günlük İnhibitörsüz Yarı Hücre Potansiyeli Sonuçları	33
5.1.2 7 Günlük İnhibitörlü Yarı Hücre Potansiyeli Sonuçları	34
5.1.3. 28 Günlük İnhibitörsüz Yarı Hücre Potansiyeli Sonuçları	35
5.1.4. 28 Günlük İnhibitörlü Yarı Hücre Potansiyeli Sonuçları	36
5.1.5. 90 Günlük İnhibitörsüz Yarı Hücre Potansiyeli Sonuçları	37
5.1.6. 90 Günlük İnhibitörlü Yarı Hücre Potansiyeli Sonuçları	38
5.1.7. 180 Günlük İnhibitörsüz Yarı Hücre Potansiyeli Sonuçları	39
5.1.8. 180 Günlük İnhibitörlü Yarı Hücre Potansiyeli Sonuçları	40
5.2. Çekme-Çıkarma Deneyi Sonuçları.....	42
5.2.1. 7 Günlük İnhibitörsüz Çekme-Çıkarma Deneyi Sonuçları.....	42
5.2.2. 7 Günlük İnhibitörlü Çekme-Çıkarma Deneyi Sonuçları	43
5.2.3. 28 Günlük İnhibitörsüz Çekme-Çıkarma Deneyi Sonuçları.....	44
5.2.4. 28 Günlük İnhibitörlü Çekme-Çıkarma Deneyi Sonuçları	45
5.2.5. 90 Günlük İnhibitörsüz Çekme-Çıkarma Deneyi Sonuçları.....	45
5.2.6. 90 Günlük İnhibitörlü Çekme-Çıkarma Deneyi Sonuçları	46
5.2.7. 180 Günlük İnhibitörsüz Çekme-Çıkarma Deneyi Sonuçları.....	47

5.2.8 180 Günlük İnhibitörlü Çekme-Çıkarma Deneyi Sonuçları	48
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	51
KAYNAKLAR	53
KİŞİSEL BİLGİLER.....	57



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 1 m ³ betonda kullanılan malzeme miktarı	22
Çizelge 4.2 Çelik donatının referans elektrotlarına göre korozyon durumu	29
Çizelge 5.1 7 günlük inhibitörsüz potansiyel değerleri.....	33
Çizelge 5.2 7 günlük inhibitörlü potansiyel değerleri.....	34
Çizelge 5.3 28 günlük inhibitörsüz potansiyel değerleri.....	35
Çizelge 5.4 28 günlük inhibitörlü potansiyel değerleri.....	36
Çizelge 5.5 90 günlük inhibitörsüz potansiyel değerleri.....	37
Çizelge 5.6 90 günlük inhibitörlü potansiyel değerleri.....	38
Çizelge 5.7 180 günlük inhibitörsüz potansiyel değerleri.....	39
Çizelge 5.8 180 günlük inhibitörlü potansiyel değerleri.....	40
Çizelge 5.9 7 günlük inhibitörsüz aderans dayanımları	43
Çizelge 5.10 7 günlük inhibitörlü aderans dayanımları	44
Çizelge 5.11 28 günlük inhibitörsüz aderans dayanımları	44
Çizelge 5.12 28 günlük inhibitörlü aderans dayanımları	45
Çizelge 5.13 90 günlük inhibitörsüz aderans dayanımları	46
Çizelge 5.14 90 günlük inhibitörlü aderans dayanımları	47
Çizelge 5.15 180 günlük inhibitörsüz aderans dayanımları	47
Çizelge 5.16 180 günlük inhibitörlü aderans dayanımları	48

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Beton-donatı kesiti	2
Şekil 2.1 Donatı korozyonu evrimi	4
Şekil 2.2 İhtiyaç duyulan profesyonel gruplar	8
Şekil 3.1 Ana bölüm planı.....	9
Şekil 5.1 7, 28, 90 ve 180 günlük yarı hücre potansiyel okumaları.....	41
Şekil 5.2 7, 28, 90 ve 180 günlük aderans dayanımları	49



RESİMLER DİZİNİ

Resim 2.1 Donatı korozyonu ile ilgili teknolojik zorluklar	5
Resim 3.1 Betona gömülü donatının korozyon mekanizması	11
Resim 3.2 Klorür iyonlarının oluşturduğu çukur korozyonu	13
Resim 3.3 Yarı hücre potansiyeli ölçüm düzeneği	15
Resim 3.4 Yükleme esnasında çelik donatının betonun içinden çekilmesi	18
Resim 3.5 Korozyon inhibitörünün işlevselliği	21
Resim 4.1 Çalışmada kullanılan küp kalıplar	23
Resim 4.2 Kalıplara dökülen betona vibrasyon işleminin uygulanması	23
Resim 4.3 Çelik donatılar.....	24
Resim 4.4 Betona gömülü çelik donatı	24
Resim 4.5 Hazırlanan kür havuzu	25
Resim 4.6 Epoksi uygulaması	25
Resim 4.7 Yarı hücre potansiyeli deney cihazı	26
Resim 4.8 Çekme-çıkarma deney düzeneği	27
Resim 4.9 Numunenin yarı hücre potansiyeli ölçümü	28
Resim 4.10 28, 180 ve 360 gün sonunda donatıda meydana gelen korozyon	30
Resim 4.11 Numunenin a) Kalıbın içine yerleştirilmesi b) Çekip-çıkartılması.....	31

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

l	: Betona gömülü donatı uzunluğu
%	: Yüzde
cm	: Santimetre
cm ³	: Santimetreküp
kg	: Kilogram
m ³	: Metreküp
mm	: Milimetre
mm ²	: Milimetrekare
mV	: Milivolt
N	: Newton
°C	: Derece santigrat
τ	: Aderans dayanımı
Φ	: Nervürlü donatı çapı
π	: Pi sayısı

Kısaltmalar

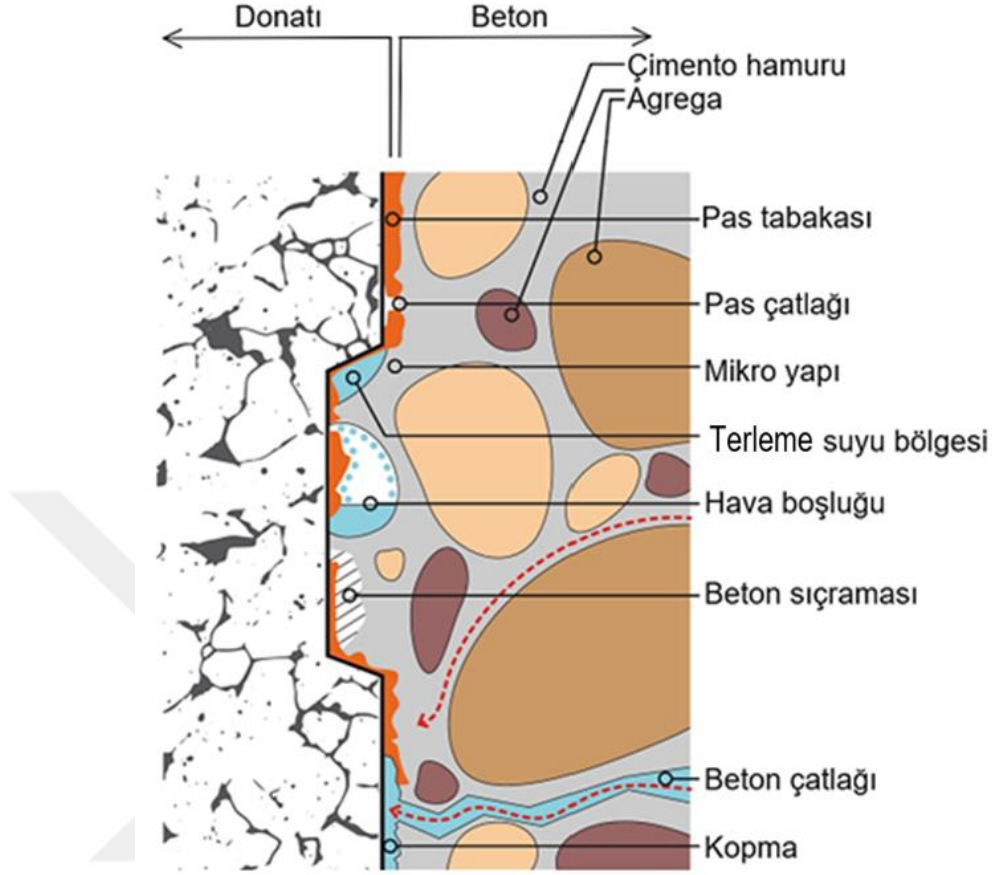
ASTM	: American society for testing materials
Ca(OH) ₂	: Kalsiyum hidroksit
CaCO ₃	: Kalsiyum karbonat
Ccrit	: Kritik klorür içeriği
CO ₂	: Karbondioksit
Cu/CuSO ₄	: Bakır/bakır sülfat
CSE	: Referans elektrot
E	: Korozyon potansiyeli
Fe	: Demir
H ₂ O	: Su
MPa	: Megapaskal
mVort	: Milivolt ortalaması
NaCl	: Sodyum klorür
O ₂	: Oksijen
pH	: Hidrojen potansiyeli

1. GİRİŞ

Beton, yüksek basınç dayanımı, çok yönlülüğü ve düşük maliyeti sayesinde yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Betonun çekme mukavemeti, basınç mukavemetine göre belirgin bir şekilde daha düşük olduğu için çekme mukavemetinin güçlendirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle beton ve çeliğin birlikte kullanıldığı betonarme yapılarda betonun çekme gerilmeleri altındaki davranışını güçlendirmek için donatı kullanılmaktadır. Genel olarak, betonarmede kullanılan donatı çeliği ile beton arasındaki davranış uyumu ve donatı çeliğinin beton örtüsü sayesinde hem fiziksel hem de kimyasal etkilere karşı korunabildiği için betonarme yapıların ekonomik ömrü ve dayanıklılığı öne çıkmaktadır. Fiziksel açıdan bakıldığında donatı, beton örtü sayesinde karbondioksit, nem ve klorür iyonları gibi zararlı maddelerden korunabilmektedir [1].

Çelik donatılarda oluşan korozyon, genellikle yapı elemanlarındaki sünek davranışın bozulmasındaki en önemli faktörlerden biri olarak kabul edilir ve yapıların dayanıklılığını tehdit eder [2]. Donatıya temas eden klorür iyonları, donatı korozyonunun mekanizmasında önemli bir rol oynayarak, korozyonunun başlamasını hızlandırır [3]. Beton içinde gömülü olan donatı, çevresinde donatıya sıkıca yapışan bir pasif film tabakası oluştursa da, klorür iyonları pasif filmi yok ederek korozyonu başlatabilmektedir [4].

Şekil 1.1’de gösterilen beton-donatı kesiti, klorüre maruz kalan ortamlarda korozyon davranışı üzerinde özel bir etkiye sahiptir. Özellikle önemli olan beton ve donatı arasındaki aderansın belirli yönlerini de etkiler. Klorür kaynaklı korozyonun başlamasının açıklanmasında ve tahmin edilmesinde beton-donatı kesitine ait etkinin yetersiz anlaşılmasından kaynaklanmaktadır. Birkaç belirgin örnek vermek gerekirse, bazı koşullar altında gözenekler, boşluklar ve çatlakların klorür kaynaklı korozyonun başlamasını güçlü bir şekilde etkilediği gözlemlenmiştir. Beton-donatı kesitinin özellikleri zamana bağlı olarak maruz kalma koşulları, yapısal yükleme ve malzeme ömrüne göre sürekli değişir [5].



Şekil 1.1 Beton-donatı kesiti [5]

Beton ve donatı arasındaki bağlantı mekanizmaları, yüksek yapısal performans elde etmek için çok hayati işlevsel gereksinimlerdir. Bu bağlantı mekanizması, en kesin mekanik özelliklerden biri olarak kabul edilir ve nihai yapısal malzemenin tekdüzeliğinin temelidir [6]. Aderans olarak adlandırılan bağlantı, beton ve donatı arasındaki karşılıklı kuvvet aktarımından oluşur. Bu işbirliğinin mekanizması betonarmenin özüdür [7]. Beton yapılar da çeliğin korozyonu ve aderans, beton yapıların hizmet ömrünü etkilemede önemli bir rol oynar. Korozyonu önlemek ve servis ömrünü uzatmak amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler, betonun yüzeyini kaplama, donatıyı kaplama, anodik-katodik koruma, elektrokimyasal yöntemler, alternatif donatı ve korozyon inhibitörlerinden oluşmaktadır. Mevcut tüm teknikler arasında, korozyon inhibitörlerinin kullanımı, kolay işletme, düşük maliyet ve yüksek korozyon direnci etkisi nedeniyle betonarme

yapıların korozyon koruması için en uygun ve verimli yöntemlerden biridir. Betona küçük konsantrasyonlarda eklenen inhibitörler, betonarmede korozyonun başlamasını geciktirmek ve yavaşlatmak için tasarlanmıştır. İnhibitörlerin çoğu, koruyucu film oluşturarak ve donatı yüzeyini stabilize ederek etki eder, bazı inhibitörlerse betonla reaksiyona girerek betonun geçirgenliğini azaltır. Korozyon inhibitörleri genellikle yeni inşaatlarda betonda katkı maddesi olarak kullanılır, ancak yamalar için betona karıştırılarak, beton yüzeyine püskürtülerek veya doyma işlemi uygulanarak onarımlar için de kullanılmaktadırlar [8].

Beton içine gömülü donatıdan uzun yıllar korozyona uğramadan hizmet vermesi beklenir. Ancak geçirgenliğin artması ile yüksek alkali seviyesi düşmeye başlar, beton donatıyı koruyamaz (pasif film tabakası kaybolur) ve korozyon oluşumu başlar. Oluşan bu korozyon, endüstriyel üretkenlik ve güvenlik üzerinde sık sık ciddi bir yük oluşturmaktadır. Bazen korozyon bozulma felaketi o kadar şiddetlidir ki, doğal afetlerle (deprem, sel vb.) eş tutulabilir. Bu nedenle korozyon, tüm dünyada ekonomiye önemli bir yük getirebilmektedir. Son istatistiklere göre, küresel korozyon maliyetinin 2.5 trilyon dolar veya dünya gayri safi yurtiçi hasılasının %3.4'ü civarında olduğu belirlenmiştir. Öte yandan, uygun korozyon koruma stratejileri uzun vadede milyarlarca dolar tasarruf sağlayabilmektedir [9].

Bu çalışmada aderans özellikleri ve beton içerisindeki donatının korozyon performansı deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada 15x15x15 cm boyutlarındaki donatılı beton numuneleri hazırlanmıştır. Beton ile donatı arasındaki aderans kuvveti, küp betonarme numuneler üzerinde kontrol edilmiştir. Çimento ağırlığının %1'i oranında kalsiyum nitrat bazlı korozyon inhibitörü beton hazırlık aşamasında kullanılmıştır. Donatılı olarak üretilen bütün numunelere, tatlı-tuzlu su kürü olmak üzere 20±2 °C'de iki farklı kür uygulanmıştır. 7, 28, 90 ve 180 gün sonunda aderans özelliklerini belirlemek amacıyla çekme-çıkarma deneyi ve beton içerisindeki donatının korozyona olan eğilimlerini ve sonuçlarını ortaya çıkarmak için yarı hücre potansiyeli deneyi yapılmıştır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Donatı korozyonu, beton yapılarda hasara neden olur ve yapı güvenliği açısından oldukça maliyetli bir sorundur. Bu nedenle bu yapıların yüzey ömrünü artıracak yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Korozyon önleme yöntemlerinden biri uygun beton tasarımıdır. Düşük su/çimento oranına sahip yüksek kaliteli beton kullanımı, betonu daha yoğun ve daha az geçirgen hale getirir, ayrıca daha kalın beton kaplama derinliği, korozyonun başlama süresini ve agresif maddelerin mesafesini ve donatı çeliğine ulaşma süresini uzatacaktır. Son yıllarda klorür saldırısına maruz kalan beton yapıların hizmet ömrünü artırmak için kullanılabilecek çeşitli malzeme ve yöntemler hızla geliştirilmektedir [10].

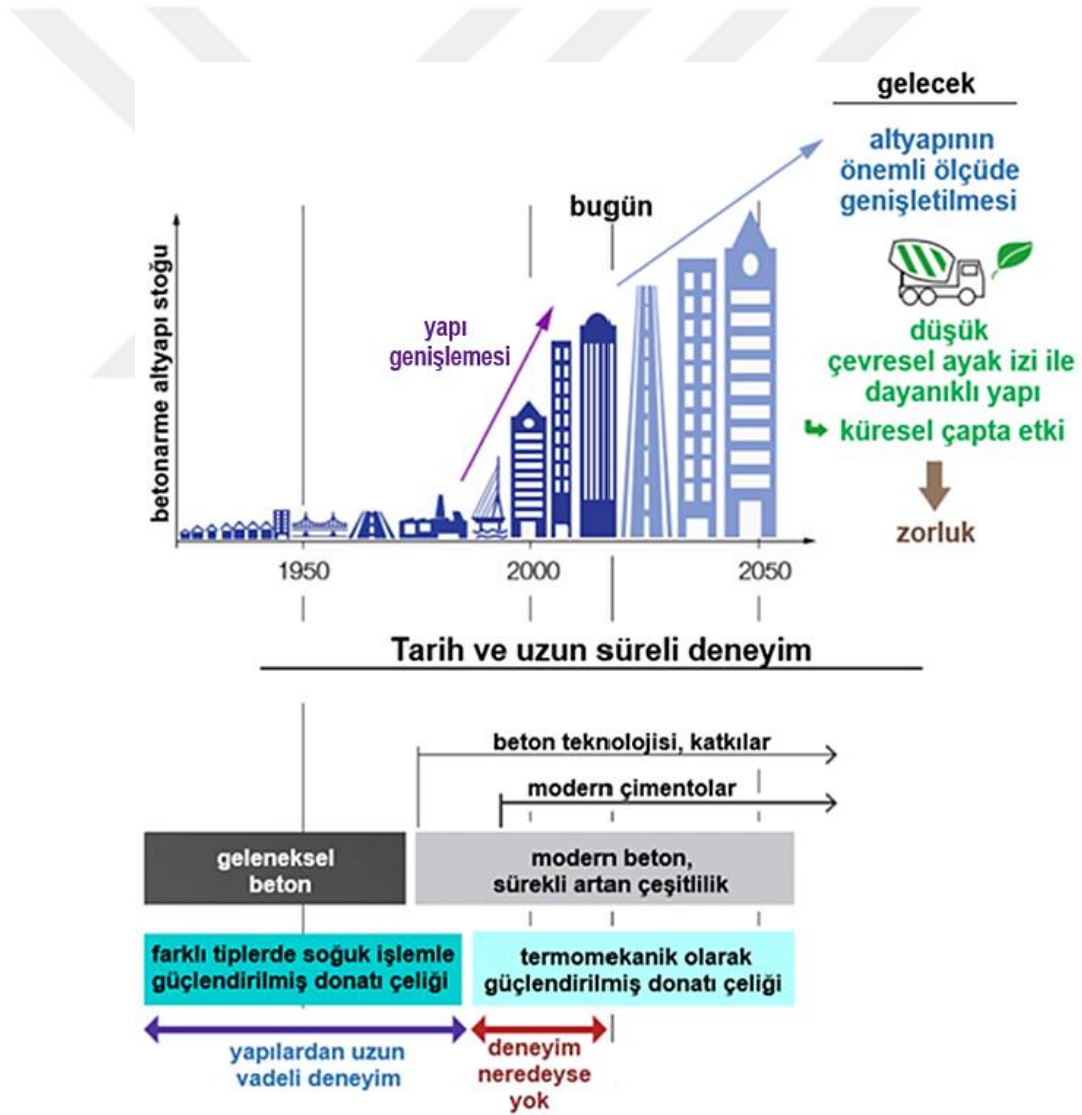
Zhang [1] donatılı betonun klorür ortamındaki dayanıklılığını araştırmış ve Şekil 2.1'deki modeli tasarlamıştır.



Şekil 2.1 Donatı korozyonu evrimi [1]

Kuluçka dönemi, bu süre zarfında betondaki çatlaklar kolay erişim sağlayarak, agresif iyonların betondaki donatı derinliğine ulaşmasını sağlar. *Başlangıç aşaması*, korozyonun başlaması için koşullar sağlanana kadar aşındırıcı maddelerin betondan çeliğe taşınmasını tanımlar. *Tetikleme aşaması*, bu süre zarfında, bağların ayrıldığı alanlar nedeniyle korozyon süreci çok yavaş devam eder. *Yayılma aşaması*, korozyon ve ilgili hasarın bir sınır durumuna kadar birikmesi ve böylece hizmet ömrünün sonuna gelinmesi sürecini anlatır.

Angst [11] çeliğin betondaki korozyonu ile ilgili büyük toplumsal, ekonomik, teknolojik, eğitimsel zorluklar ve bu alandaki ilgili konuları araştırmıştır. Başlıca teknolojik zorluklar bir yandan dayanıklı yeni yapılar tasarlamak, yani betonarme yapıların gerçek ortamlarında, özellikle modern malzemeler için ve uzun vadeli malzemelerin yokluğunda ilerleyen yıllarda korozyon performansını güvenilir bir şekilde tahmin etmek gerektiğini ileri sürmüştür. Öte yandan, mevcut eskiyen betonarme yapılarının maliyetini etkin bir şekilde sürdürmeye, deneyime dayalı karar almayı terk etmeye ve bunun yerine bilgi tabanlı seçim ve onarım eylemlerinin tasarımına doğru ilerlemeye giderek artan bir ihtiyaç olduğu söylemiştir (Resim 2.1).



Resim 2.1 Donatı korozyonu ile ilgili teknolojik zorluklar [11]

Cao ve ark. [12] betonda klorür kaynaklı korozyon tahminini geliştirmek için, beton-donatı kesitinin yerel özelliklerinin etkisinin araştırılmasına odaklanmışlardır. Beton-donatı kesitinde bulunabilen özelliklerin çoğu, geleneksel Ccrit çalışmalarında tipik olarak yeterince dikkate alınmamakta ve raporlanmamaktadır. Ayrıca, laboratuvar testlerinde genellikle göz ardı edilen takviye çeliğinin stres durumunun bir rol oynayabileceği görmüşlerdir. Çeliğin betonda korozyon başlangıcını neyin kontrol ettiğini açıklamak ve betonda korozyon başlangıcının tahmini için Ccrit kavramından daha iyi kavramlar geliştirmek için gereken temel bilimsel anlayışı sağlayacağını ileri sürmüşlerdir.

Shaikh [13] çatlaklı betondaki çeliğin korozyonunun, klorür penetrasyon derinliği kadar çatlak derinliğinin artması ve ayrıca çatlak derinliğinin artmasıyla beraber klorür difüzyonunun arttığı sonucuna ulaşmıştır.

Sassine ve ark. [14] donatılı betonda yarı hücre potansiyel ölçümlerinin uygulanmasına ilişkin bazı belirsiz fikirlerin ve önerilerin açıklığa kavuşturulmasını amaçlamışlardır. ASTM potansiyel sınırları, betonarme yapılarda yarı hücre potansiyel haritalarını analiz etmek için kafa karıştırıcı bir yol oluşturur. Daha yüksek katot-anot oranına ve dolayısıyla daha yüksek korozyon kinetiğine sahip bir sistem, beton yüzeyinde daha yüksek potansiyel değerler üretebileceğini göstermişlerdir.

Zou ve ark. [15] %0-5 klorürlü betondaki donatının yarı hücre potansiyel okumalarını ölçmüşlerdir. Klorür iyonları sabit olduğunda ve donatının korozyon seviyesi %5'ten az olduğunda, donatının korozyon seviyesindeki artışla birlikte yarı hücre potansiyeli keskin bir şekilde azaldığı, ancak korozyon seviyesi %5'ten büyük olduğunda, donatı korozyonu seviyesindeki değişim ile yarı hücre potansiyeli önemli bir düşüş göstermemiştir. Aynı örtü kalınlığındaki betonda klorür iyonu konsantrasyonu ile yarı hücre potansiyeli ve donatının korozyon seviyesi arasında bir korelasyon olduğu ve klorür iyonu konsantrasyonunun artmasıyla betondaki yarı hücre potansiyelinin azaldığı gösterilmiştir. Klorür iyonlarının donatı korozyon sürecinde katalitik bir rol oynaması, betondaki donatının korozyon seviyesini hızlandırması ve bunun yarı hücre potansiyelinin azalmasına yol açabildiğini tespit etmişlerdir.

Ozbolt ve ark [16] korozyonun donatı çekme kapasitesi üzerindeki etkisi ve korozyon ürünlerinin çatlaklardan taşınmasının etkisini incelenmişlerdir. Çatlaklar üzerinde nispeten büyük miktarda korozyon ürününün dağılmış olması nedeniyle, pasın taşınması hesaba katıldığında korozyon kaynaklı hasar daha az belirgindir. Çekme arızası, donatının betondan çekilmesinden değil, beton kaplamanın arızalanmasından kaynaklanmaktadır. Sayısal analiz sonuçlarının gösterdiği gibi, korozyona bağlı hasar, çekme kapasitesini önemli ölçüde azaldığını saptamışlardır.

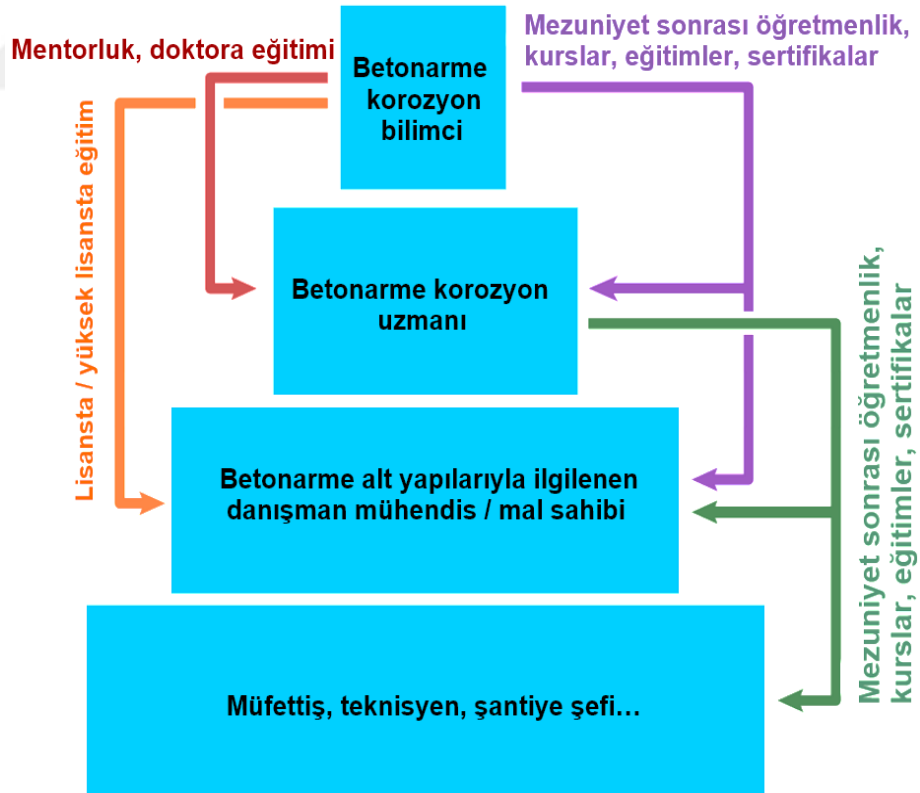
Sibahy ve Sabhan [17] farklı kür şartlarına maruz bırakılan beton elemanların aderans davranışını araştırmışlardır. Tuz çözeltisine maruz kalma süresinin artmasıyla korozyon hızı artar. Fakat epoksiyle kaplanmış olan donatıların korozyon oluşmasını önlediğini tespit etmişlerdir. Beton blok numunelerin güçlendirilmiş donatı çelikleri, tuz çözeltisine maruz kalması nedeniyle dış yüzeylerde belirgin bir korozyon sergilediğinde, çekme dayanımı değeri olumsuz etkilenmiştir. Çekme dayanımı değerindeki en yüksek düşüş, epoksi kaplama maddesi içeren betonarme bloklarda gözlenmiştir. Bu, esas olarak, bu tür bir maddenin donatılar ve donatıyı çevreleyen beton arasındaki yapışmayı azaltmadaki rolünden kaynaklandığının sonucuna varmışlardır.

Ma ve ark. [18] donatılar ve beton arasındaki bağ davranışı üzerinde korozyon ve korozyona bağlı çatlakların etkisini araştırmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Düz ve deforme donatılı numuneler üzerinde çekme testleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, korozyon kaybının %2.4'ten az olduğu durumlarda bağ mukavemeti üzerindeki korozyon etkisinin göz ardı edilebileceğini göstermişlerdir. Beton ve düz donatı arasındaki bağ davranışı, korozyona, deforme donatılı numuneye göre daha duyarlı olduğunun sonucuna varmışlardır. Donatıların seçimi, özellikle deforme donatı numuneleri için yapışma davranışını iyileştirmenin alternatif bir yolu olduğunu gözlemlemişlerdir.

Abosrra [10] kalsiyum nitratın alkali çözeltilere batırılmış ve betona gömülü yumuşak çeliğin klorür kaynaklı korozyonunu etkili bir şekilde engellediği göstermiştir. Betonda kalsiyum nitrat korozyon inhibitörü kullanımının ana avantajı, beton özelliklerine olumsuz etkisinin olmadığını açıklamıştır.

Lee ve ark. [8] betona gömülü çelik donatıların etrafında koruyucu bir film oluşturan korozyon inhibitörlerinin, konsantrasyonları çok düşük olduğunda donatı korozyonunu önlemede etkisiz olduğunu açıklamışlardır. Korozyon inhibitörleri, ancak inhibitörün konsantrasyonu gözenek çözeltisindeki klorür iyonlarının konsantrasyonundan daha yüksek olduğunda takviye için yeterli koruma sağlayabileceğini saptamışlardır. İnhibitörlerin aşırı dozajı, çukurlaşmaya ve sızıntıya neden olacağını ifade etmişlerdir.

Angst [11] inşaat mühendislerinin ve betonarme altyapılarla çalışan diğer profesyonellerin (Şekil 2.2) pratikte olmayan resmileştirilmiş korozyon eğitimi, üniversiteler ve diğer eğitim kurumlarının yanı sıra meslek birliklerinin bu alanda bir yol gösterici fırsat sunduğunu ifade etmiştir. İdeal olarak, bu profesyoneller grubu, standart dışı durumlara, yani tamamen deneyime dayalı yaklaşımların kullanılmadığı durumlara uygulanabilecek kadar evrensel olan korozyon ve beton malzeme bilimi hakkında derin bir anlayışa sahip olması gerektiğini vurgulamıştır.



Şekil 2.2 İhtiyaç duyulan profesyonel gruplar [11]

3. DONATILI BETONDA KOROZYON ve ADERANS

Bu tez çalışması temel olarak 3 bölümden oluşmakta ve bu bölümler alt başlıklara ayrılmıştır. Bu bölümlere ait incelemeler Şekil 3.1'deki akış şemasında verilmiştir.



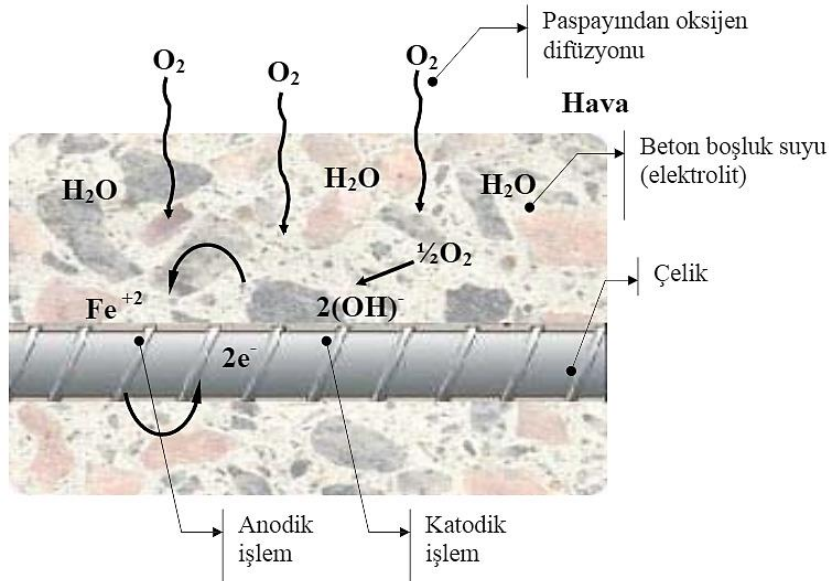
Şekil 3.1 Ana bölüm planı

3.1. Betona Gömülü Donatı Korozyonu**3.1.1. Korozyon Mekanizması**

Betona gömülü donatı çeliğinin kullanımı, betonun kullanılabileceği uygulamaların genişlemesine yol açmıştır. Betonarme günümüzde ve tarihsel olarak çok çeşitli inşaat projelerinde kullanılmıştır. Betonun düşük çekme kapasitesi, büyük

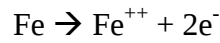
miktarlarda iç çekme gerilimine dayanabilen yapı elemanlarını inşa etmek için çeliğin eklenmesiyle azaltılır. Çeliğin mekanik özellikleri ve çevresindeki beton, donatı korozyonu kolaylaştıran koşullara maruz kalırsa tehlikeye girer. Betondaki çeliğin korozyonu, beton yapıların bütünlüğünü, mukavemetini ve estetiğini etkileyen en yaygın ve maliyetli sorunlardan biridir. Klorür iyonlarını içermeyen diğer mekanizmalar, betonun karbonatlaşmasında olduğu gibi, betondaki çeliğin korozyonuna yol açabilse de, klorür girişi korozyon ve korozyona bağlı bozulmanın gelişmesinin açık ara en yaygın nedenidir [19]. Betonarme yapılarda beton, donatıya koruma sağlar. Ancak, karbonatlaşma ve klorür saldırısı gibi iki ana olay, alkali beton ortamında çeliği kaplayan demir hidroksitin yüzey tabakasında bozulmaya neden olabilir. Atmosferik karbon dioksit (CO_2) ile beton gözeneklerindeki su arasındaki reaksiyon ile çözünmeyen karbonat oluşumu ile karakterize edilen karbonatlaşma, betonun gözenek çözeltisinin pH değerinin azalmasıyla donatı çeliğinin korozyonuna yol açar [20]. Karbonatlaşma etkisi ile karşılaştırıldığında, klorürle tetiklenen korozyon çok daha şiddetlidir ve agresif ortamda araştırılması öncelikli olmalıdır. Beton yüzeyinden içeriye doğru klorür iyonlarının göçü pasif tabakanın bozulmasına ve daha fazla korozyona neden olacaktır [21].

Beton yapılarda nem (H_2O) ve oksijen (O_2) varlığında, donatıların yüzeyi çevresinde 1 ila 10 mm kalınlığında çok ince bir pasif tabaka oluşur. Hidroksit iyonlarının varlığından dolayı beton, pH'ı 11.75 ila 13.5 arasında olan yüksek alkali bir ortamdır. Alkali ortam, çeliğin pasifliğini koruması için ideal ortamı sağlar. Ancak, yüksek alkali beton ortamında, beton pH'nın 13'ü geçtiği durumlarda ince oksit koruyucu film oluşur. Beton ortamının yüksek alkalitesi, doymuş kalsiyum hidroksit, sodyum hidroksit, potasyum hidroksit gibi yeterli konsantrasyonda hidroksit tuzlarının veya bunların bazılarının veya hepsinin bir kombinasyonunun varlığından kaynaklanmaktadır. Pasif katmandaki hidroksit iyonları, çelik donatıların çevresinde biriken klorür iyonları veya diğer kimyasal tuzlar dahil aşındırıcı maddelerle kimyasal olarak reaksiyona girme eğilimindedir. Hidroksit iyonlarının tüketilmesi nedeniyle beton gövdenin pH'ı düşer ve pasif tabakanın zayıflamasına neden olur [22].

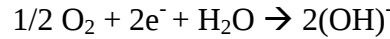


Resim 3.1 Betona gömülü donatının korozyon mekanizması [23]

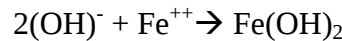
Genel anlamda korozyon, birbirini bütünleyen ve eş zamanlı ilerleyen, redüksiyon (indirgenme) ve oksidasyon (yükseltgenme) olarak adlandırılan iki tane elektrokimyasal tepkimeyle (Resim 3.1) oluşur. Redüksiyon atomdan ayrılan elektronların başka bir ortamda harcanmasıdır. Oksidasyon ise atom halindeki çeliğin elektron kaybederek iyonla dönüşmesidir. Redüksiyon için “katot reaksiyonu” Oksidasyon için “anot reaksiyonu”, adları kullanılır. Pozitif yüklü iyonlar çözeltiye karışırlar. Negatif yüklü bağımsız elektronlar ise donatı yardımıyla katoda aktarılıp elektrolit bileşenlerince adsorbe olurlar [23].



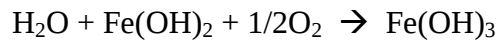
Katodik işlemde, donatıyla beraber katoda aktarılan elektronlar oksijen ve suyla bir araya gelerek hidroksit iyonlarını meydana getirirler.



Anottan çözeltiye aktarılan demir iyonları hidroksit iyonlarıyla reaksiyona girerek demir hidroksiti oluştururlar.



$\text{Fe}(\text{OH})_2$ suda çözünür ve kararsızdır. Daha sonra oksijen ve suyla bir araya gelerek anot çevresinde sarı renkli boşluklu bir “pas tabakası” oluşturur [23].

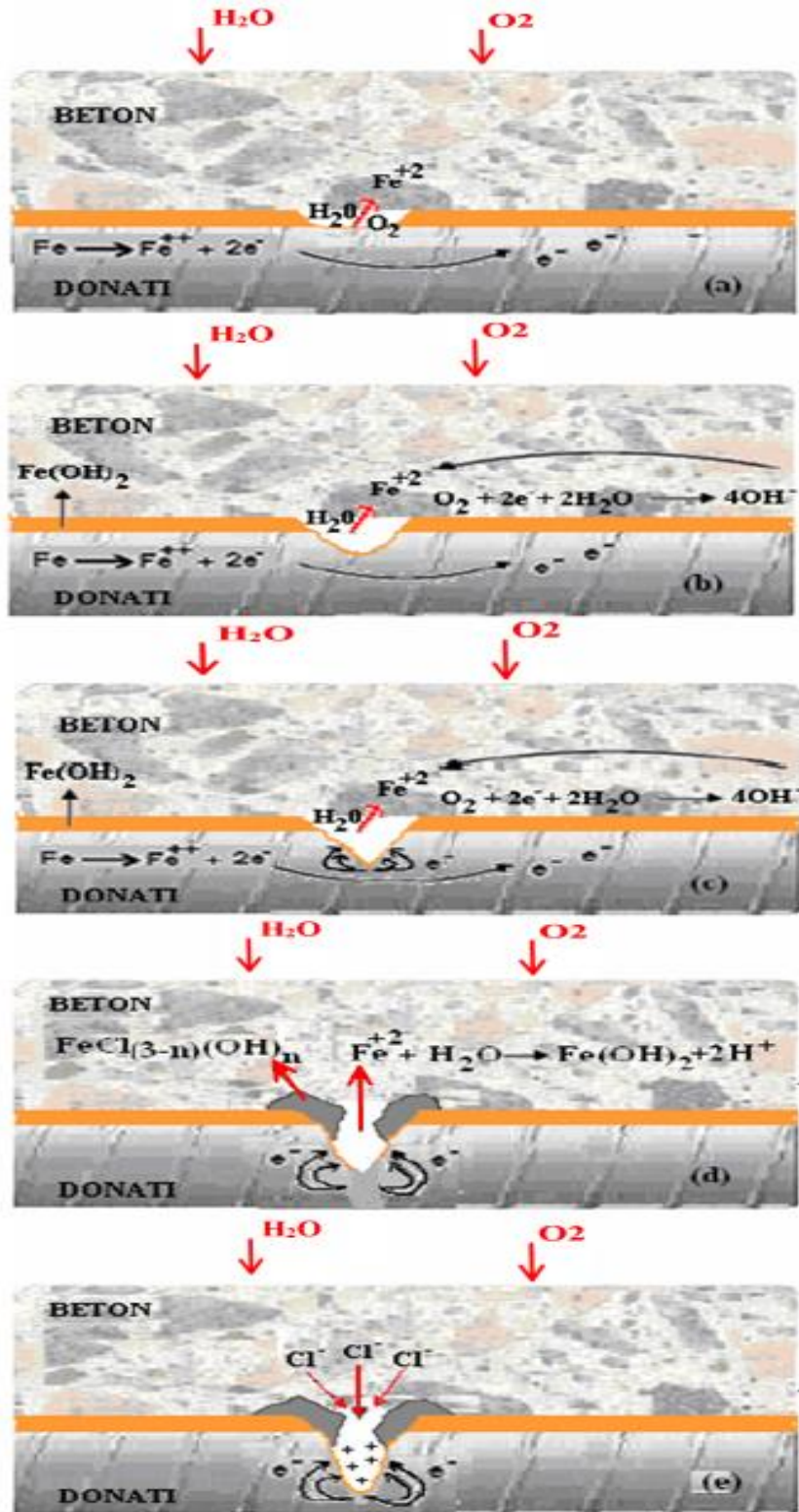


3.1.2. Donatı Korozyonuna Etki Eden Faktörler**3.1.2.1. Beton Kalitesi**

Su/çimento oranı, beton örtü kalınlığı, içinde bulunduğu ortam, ıslanma-kuruma etkisi, donma-çözülme etkisi, nem ve betonda bulunan çatlaklar korozyonu dolaylı veya dolaysız etkileyen etmenlerdir. Betonda rötire, oturma gibi nedenlerden dolayı oluşan çatlaklar da korozyonu dolaylı ve dolaysız olacak şekilde etkilemektedir. Çatlak bulunan betonlara zararlı madde girişi daha kolay olur. Ayrıca donatıya sağlanan fiziksel koruma çatlaklar nedeniyle hasar alır. Boşluk oranı, boşlukların sürekliliği ve yapısı korozyon hakkında belirleyici etmenlerde öncü olmaktadır. Belirli bir su/çimento oranında çimento tipi, inceliği ve puzolanik katkıların poroziteyi ve boşluk dağılımını etkiler. Genellikle uçucu kül, cüruf ve silis dumanı boşluk oranını azaltır ve betonun matris fazını düzenli hale dönüştürür [24].

3.1.2.2. Klorür İyonları

Beton korozyonu, güvenlik sorunuyla ilgili olarak çok endişe yaratmaktadır. Betonarmenin istenilen kullanım ömrü çevre şartlarından daha uzun olmalıdır. Bilindiği üzere donatı korozyonu, betonarmenin dayanıklılığını yüksek oranda etkileyen en önemli problemlerdendir. Klorür iyonları, bu korozyon sürecini hızlandırabilecek agresif maddedir [25]. Karbonatsız, alkali betonda donatı korozyonu ancak donatı yüzeyindeki klorür içeriği belirli bir sınır değerine ulaştığında başlayabilir [26]. Beton içinde var olan klorür iyonlarının pasifliği bozucu etkisi, klorür iyonlarının elektronegativitesi hâkim bir iyon oluşuyla nitelendirilmektedir. Sonuç olarak donatı tabakasında hidroksit iyonları ve oksijenden daha ciddi biçimde adsorbe olur. Adsorbe edilen bu klorür iyonları korozyon neticesinde meydana gelen demir iyonları ile birleşerek demir klorür olacak şekilde çözeltiye aktarılır. Bu durumda klorür iyonları çukur korozyonunun (Resim 3.2) hızlanmasına sebep olur [27].



Resim 3.2 Klorür iyonlarının oluşturduğu çukur korozyonu [27]

3.1.2.3. Karbonatlaşma

Atmosferik CO₂ beton sistemlere nüfuz ederse CO₂, oksijen ve suyun yeterli olduğu her yerde betonda kalsiyum hidroksitle birleşebilir.



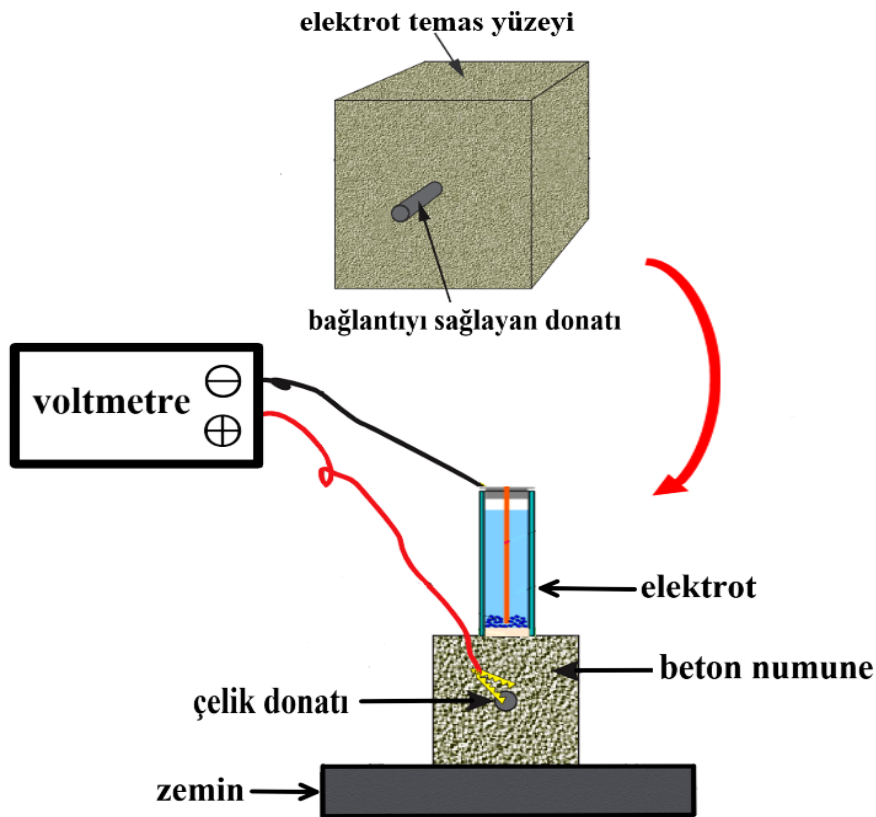
Beton pH'ı, betondaki hidroksit iyonlarının zamana göre dağılımına bağlıdır. Karbonatlaşma reaksiyonunda hidroksit iyonlarının tüketimi nedeniyle, beton pH'ı önemli ölçüde azaltılabilir. Sonuç olarak, çelik donatıların çevresindeki beton pH'ı 8'e düşerse koruyucu tabaka pasifleşir. Son zamanlarda, hava kirliliği sonucu açığa çıkan yüksek CO₂ oranı, beton yapılarda karbonatlaşma kaynaklı korozyon oranını artırmaktadır. Bu nedenle, yapılar CO₂'e daha fazla maruz kaldığından, korozyon sürecini anlamak son inşaat mühendisliği çalışmaları için bir endişe konusudur. CO₂ betonun içine nüfuz eder ve çelik donatılara doğru hareket ederse, beton ortamı hem klorür kaynaklı hem de karbonatlaşma kaynaklı korozyon riski altındadır. Karbonatlaşma reaksiyonu, su içeriğinin artmasına ve ayrıca beton gözenekliliğinin azalmasına neden olur. Beton gözenekliliğinin azalması nedeniyle agresif çevresel maddelerin difüzyonu azalabilir. Bununla birlikte, karbonatlaşma reaksiyonlarından kaynaklanan hacim genişlemesi, iç gerilmeleri arttırır ve betonun çatlak oluşturmalarını etkiler [22].

3.1.2.4. pH Derecesi

Beton yüksek alkali içeriği ve 12.5 ile 13.5 arasındaki yüksek pH'ı nedeniyle betona gömülü donatı çeliği için korozyona dayanıklı bir ortam sağlar. Bu alkaliler çeliği pasifleştirir ve ona pasif film olarak bilinen korozyona karşı koruyucu bir tabaka oluşturur. Bu film, demir oksitler çeliğin yüzeyi etrafında katı fazlar oluşturduğunda oluşur. Donatı üzerindeki oksit moleküllerinin varlığı, reaksiyonların metal atomlarını çözeceği yerleri bloke eder [19]. Betondaki çeşitli pH seviyeleri için, korozyon hızı değişir. pH 10'dan büyükse, korozyon riski oluşmaz. pH 4 ile 10 arasındaysa, korozyon hızı istikrarlı olarak kabul edilir. pH 4'ten düşükse, sınır değerini aşmıştır ve korozyon çok hızlı bir şekilde yayılır [3].

3.1.3 Yarı Hücre Potansiyeli

Yarı hücre potansiyel yönteminin algılama prensibi, donatıdaki korozyonun elektrokimyasal davranışını karakterize etmek için kullanılabilir. Yarı hücre potansiyel ölçümleri, beton köprü döşemelerinde ve boru hatları gibi diğer yapılarda inşaat demiri korozyonunun izlenmesi için kullanılabilir. Sıcaklık +2 °C'nin üzerinde olduğu sürece, ortamın türü ne olursa olsun yapının ömrü boyunca her zaman kullanılabilir. Resim 3.3'te gösterildiği gibi, yarı hücre ölçümleri için genellikle 'referans elektrot' olarak bilinen bir bakır/bakır sülfat elektrotu (Cu/CuSO_4) veya bir gümüş/gümüş klorür elektrotu (Ag/AgCl) kullanılır. Stabil bir elektrot potansiyeline sahip olan, diğer yarı hücrenin potansiyelinin belirlenmesini sağlayan gösterge elektrot olarak da bilinir. Bu referans elektrot, çelik donatının üzerindeki beton yüzeye yerleştirilir ve çelik donatıyla bağlantısı sağlanır [28].



Resim 3.3 Yarı hücre potansiyeli ölçüm düzeneği [29]

3.2. Beton-Donatı Aderansı

3.2.1. Aderans Mekanizması

Betonarme, yapı alanında yaygın olarak kullanılan bir malzeme olarak iyi özelliklere sahiptir. Bu özelliklerden biri beton ile donatı arasındaki aderanstır. Aderans, betonarmenin yapı malzemesi olarak çalışmasına izin veren bir mekanizma olarak görülebilir. Onun varlığı olmadan, donatı beton matrisin içinde kayar ve yapı, düz beton bir yapıya benzer bir davranışa sahip olur [30]. Aderans mekanizması, çelik donatı ile çevresindeki beton arasındaki etkileşim olup, kuvvetlerin donatıdan çevredeki betona aktarılmasıdır. Güçlendirici çelik donatıların bağı, öncelikle mekanik kilitleme, yapışma ve sürtünmeye bağlıdır. Yapışmanın etkisi küçüktür ve sürtünme kuvvetleri, yapışma başarısız olana ve beton ile donatı arasında göreceli yer değiştirme oluşana kadar gelişmez. Düz donatılarda her iki durum da önemlidir. Deforme olmuş çelik donatılar için, betona gömülü donatıların nervürlerinin mekanik kilitlemesi, bağ gerilimi-deformasyon davranışını yönetir [10].

3.2.2. Aderans Çeşitleri

3.2.2.1. Kenetlenme Aderansı

Beton kütle içerisine yeterli uzunlukta gömülmüş olan çelik bir donatıyı çekerek çıkarmak mümkün olmamaktadır. Kenetlenme boyunun uygun uzunlukta olmaması halinde ise iki ihtimal ile karşılaşılabilir. Bu ihtimallerden ilki, çelik donatının yüzey geometrisinin durumuna göre donatının sıyrılıp çıkmasıdır. İkinci ihtimal ise; çelik donatının, etrafını saran beton kütleyle yarmasıdır. Çelik donatının beton içerisine gömülme boyu kenetlenme uzunluğu olarak nitelendirilirken, oluşan bu aderans da kenetlenme aderansı adı verilmektedir. Beton ile çelik donatının kenetlenmesinin yeterli olduğu durumlarda, donatının sıyrılması veya betonun yarılması olaylarının gerçekleşme ihtimali azalmış olur [31].

3.2.2.2. Eğilme Aderansı

Betonarme bir yapıda, beton ile çelik donatı arasında kesit kuvvetlerinin geçişi söz konusudur. Bu geçiş aderans sayesinde meydana gelmektedir. Çelik donatının birim uzama kapasitesi, betonun birim uzama kapasitesinden nispeten daha fazladır. Bu yüzden donatıdaki birim uzama giderek arttığında betonda çatlama meydana gelmektedir. Eğilme aderansı, betonarme elemanların eğilme altındaki çatlama durumlarında büyük önem arz etmektedir [31].

3.2.3. Aderans Dayanımına Etki Eden Faktörler**3.2.3.1. Donatı Çapı**

Çelik donatı boyutu, çelik donatı ile çevresindeki beton arasındaki bağ gerilmesini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Nervürlü donatı bağ kuvvetini etkilerken, daha büyük donatı çapları, daha küçük donatı çaplarına kıyasla daha düşük bağ kuvveti geliştirir [20].

3.2.3.2. Donatı Konumu

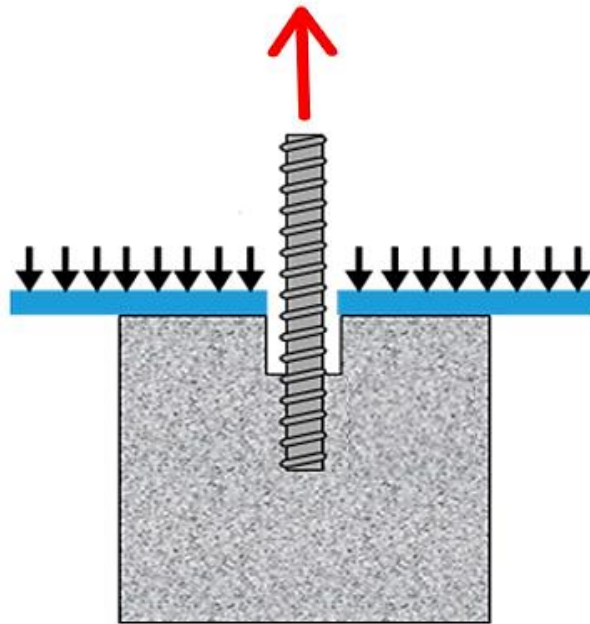
Aderansın iyi olabilmesi için betonun içerisinde bulunan donatıyı tamamen sarması gereklidir. Betonlama esnasında üst tabakaya yakın donatıların tabanında toplanan hava kabarcıkları bu donatıların beton ile olan aderansını olumsuz etkiler [32].

3.2.3.3. Kenetlenme Boyu

Beton ve donatı arasındaki kenetlenmenin yeterli olması için donatı akma ötesi şekil değiştirme yaptığı veya akma dayanımına eriştiğinde, çelik donatının betonu yarmaması ve betondan sıyrılması icap etmektedir. Bu nedenle kenetlenme boyunun ihtiyaca uygun olması gereklidir [32].

3.2.4. Çekme-Çıkarma Deneyi

Çekme-çıkarma testinin orijinal fikri Sovyetler Birliği'nde ortaya çıkmış olsa da, 30'ların sonu ile 40'ların ortalarına kadar uzanmaktadır [33]. Bağ-kayma davranışını araştırmak için beton ile donatı arasındaki bağı ölçmek için birçok farklı test türü vardır. Bu testlerden en yaygın olanları çekme testleridir. Bu testlerin avantajları ve dezavantajları vardır. Çekme testi, kısa bağ uzunlukları için nispeten basittir. Çelik donatı bir beton numunenin içine gömülür ve daha sonra doğrudan beton bloktan çekilir, bu da üç genel arıza tipine yol açabilir. Çelik donatıyı çevreleyen betonun, çelik donatı nervürleri tarafından oluşturulan kesmede başarısız olduğu çekme kırılması, (ii) çelik donatı çevresinde radyal çatlakların oluştuğu, bu çatlaklar beton yüzeyinin dışına ulaştığında numunenin ayrıldığı ve (iii) çelik donatının akmasıdır. Avantaj olarak beton ile çelik donatı arasındaki kaymanın ölçülmesinden dolayı bağlanma mukavemetinin hesaplanmasını sağlar. Bu nedenle, bu test, farklı beton karışımlarının kayma direnci, çimento ikame malzemeleri ve farklı seviyelerde çelik donatı korozyonu gibi çeşitli bağ mukavemeti parametrelerinin etkisini incelemek için yeterli olacaktır [20].



Resim 3.4 Yükleme esnasında çelik donatının betonun içinden çekilmesi [34]

Bu test bağıın gerçek direnciyle karşılaştırıldığında, bağıın orantılı direncinin elde edildiğı her yerde faydalı görünmektedir. Yükleme sonunda (Resim 3.4), uygulanan yük arttığında kayma miktarı artar, bu da yüksek düzeyde bir aderans gerilmesine ve donatı betonunda bir kaymanın derinden genişlemesine yok açmaktadır. Betona gömülü çelik donatı yeterince uzunsa, bağlanma dayanımı donatıdaki çekme dayanımından daha yüksek hale gelir ve donatının kopması sonucunda kırılma olur. Donatı daha kısaysa aderans dayanımı donatının dayanımından daha az olmaktadır. Beton ve donatıdaki çekme nedeniyle kırılma meydana gelir. Bir beton için boyuna yönde yarıma meydana gelmesi durumunda, göçme nedeniyle çevredeki betonu çatlatmaya başlayacaktır. Ayrıca, bu test türü, betonarme yapılarında mevcut olan eğilme momentlerine veya dış kesmeye maruz kalmamaktadır. Bu nedenle, çekme testindeki arıza tipi gerçekçi olmamaktadır [6].

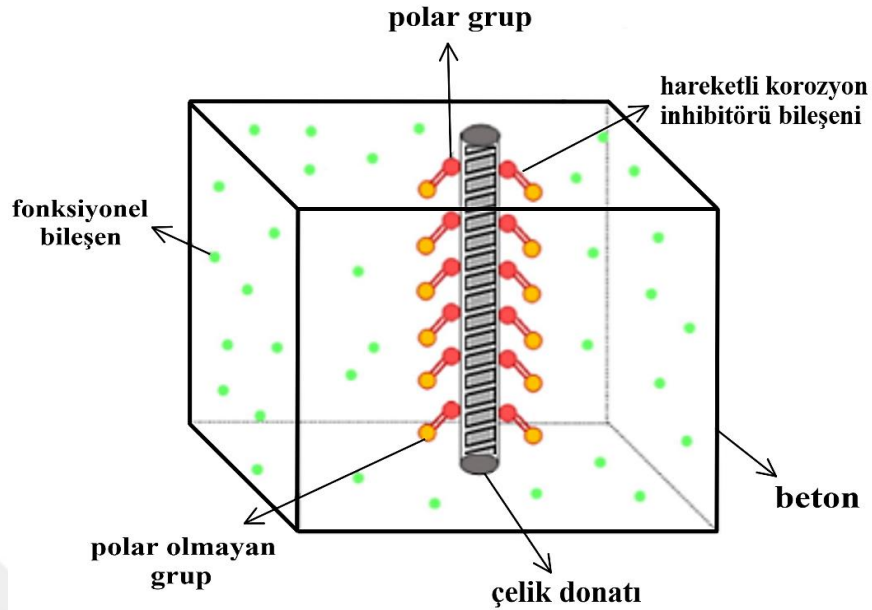
3.3. İnhibitör Kullanımının Korozyon ve Aderans Üzerindeki Etkisi

Betona gömülü çelik donatının korozyon hasarı, betonarmenin dayanıklılığını etkileyen, ciddi mühendislik problemlerine ve ekonomik kayıplara neden olan çok önemli bir faktör olarak kabul edilmektedir. Avrupa'da betonarme altyapıların eskimesine bağılı bakım maliyetleri son yıllarda sürekli artmış ve toplam maliyetin ana bileşeni haline gelmiştir. Amerika Birleşik Devletleri'nde, köprü altyapılarının korozyon hasarı ile ilgili yıllık doğrudan maliyet, 2009 yılında 17 milyar dolardı. Çin'de, betonarme (otoyollar, köprüler ve binalar dahil) korozyon hasarının neden olduğu ekonomik kayıp, 2014 yılında gayri safi yurtiçi hasılasının yaklaşık %1.4'ünü oluştuyordu.

Karbonatlaşma ve klorür girişi, betonarme korozyonun başlamasının iki ana nedeni olarak kabul edilir. Karbonatlaşma işlemi sırasında CO_2 , Ca(OH)_2 ile reaksiyona girer ve beton gözenek çözeltisinin pH'ını 13.5–12.6'dan 8–9'a düşürür, bu da donatıda tek tip korozyon hasarına yol açar. Beton-donatı kesitindeki klorür iyonları donatı yüzeyinde adsorbe olabilir ve daha sonra pasif tabakayı yok ederek donatıda yerel çukur korozyon hasarına yol açabilir böylece yerel pH 5'in altına düşebilmektedir. Son yıllarda kıyı ekonomisinin hızla gelişmesi ve deniz

kaynaklarının kullanımının artması nedeniyle, tüm dünyada yüksek klorür konsantrasyonuna sahip şiddetli deniz ortamında hizmet veren betonarme yapılar artmaktadır. Bu nedenle deniz ortamında betonarme yapıların korozyon hasarını etkin bir şekilde önlemek ve onarmak büyük önem arz etmektedir [35]. Günümüzde deniz beton yapılarının dayanıklılığını artırmak için birçok teknik mevcuttur. Bunlar elektrokimyasal rehabilitasyon teknikleri, değişen malzeme karışım oranı, enjeksiyon onarım teknolojisi, yüzey kaplama koruması, biyolojik iyileştirme teknolojisi vb. teknikler olmaktadır. Bunların arasında, elektrokimyasal rehabilitasyon teknikleri ve ilave fonksiyonel malzemeler, çok fazla zaman ve kaynak tasarrufu sağlayabilmektedir böylece beton koruyucu tabakayı kazmadan klorür iyonu korozyonunu temel olarak önleyebilmektedir [36].

Kolaylık, maliyet etkinliği, bulunabilirlik ve yüksek korozyon direnci gibi avantajlarından dolayı korozyon inhibitörleri kullanılmaktadır. Korozyon inhibitörü katkılarının klorür penetrasyonuna karşı direnci artırabileceği ve kritik klorür eşiğini düşürebilmektedir. Korozyon inhibitörleri, betona karıştırma sırasında veya sertleşmiş betonun dış yüzeyine uygulama sırasında eklenir. Kalsiyum nitrat, sodyum nitrat ve potasyum kromat gibi korozyon inhibitörleri mevcuttur [37]. Korozyon inhibitörleri, inorganik inhibitör ve organik inhibitör olmak üzere iki gruba ayrılır. İnorganik korozyon inhibitörleri, özellikle nitrat bazlı olanlar, laboratuvar ve sahada en yaygın olarak uygulanan korozyon inhibitörü katkılarıdır. Bununla birlikte, nitratlar çözünürdür bu nedenle insanlar ve hayvanlar için toksik olduğu kabul edilir. Çevre dostu malzeme geliştirme konusundaki artan endişe nedeniyle, organik korozyon inhibitörleri son zamanlarda büyük ilgi görmüştür. Organik korozyon inhibitörleri, koruyucu bir organik film oluşturmak için donatı yüzeyine sıkıca adsorbe edilir, anodik-katodik reaksiyonları hafifletir ve dolayısıyla çelik donatının korozyon hızını azaltır. Organik korozyon inhibitörünün korozyon yayılımına direnme başarısına rağmen, organik kompozitler tarafından tetiklenen hava sürüklenmesi, dikkate alınması gereken Portland çimentosu hidrasyonunun önemli bir yan etkisine yol açmaktadır. Bu nedenle fiziksel ve dayanıklılık performansı ile ilgili beton özelliklerinin olumsuz etkilenmemesine dikkat edilmelidir [38].



Resim 3.5 Korozyon inhibitörünün işlevselliği [36]

Korozyon inhibitörü katkı bileşenlerinin beton karışımına dahil edilmesi korozyonu önlemenin etkili bir yoludur. Bileşenlerin (Resim 3.5) eklenmesi yoluyla beton yapılarda dayanıklılık geliştirmenin fizibilitesini daha fazla araştırmak için, çatlak direnci ve korozyon inhibitörü gibi kompozit fonksiyonel bileşenlerin etkisi analiz edilir. Su ve klorür direnci gibi beton dayanıklılık parametreleri, beton gözenek yapıları kompozit fonksiyonel bileşenlerle iyileştirildikçe geliştirilir. Bunun olası nedeni, farklı tuz bileşenlerinin beton gözeneklerinde bulunması ve reaksiyon ürünlerinin bazı gözenekleri rafine edip tıkayabilmesidir [36].

Korozyon inhibitörlerinin kullanıldığı onarım yöntemleri arasında, betonu karıştırırken korozyon inhibitörünün eklenmesi ve beton yüzeyine korozyon inhibitörünün uygulanması yer alır. Betonu karıştırırken korozyon inhibitörünün eklenmesi yöntemiyle ilgili büyük bir sorun, inhibitörlerin sertleşmiş betona enjekte edilememesidir. Ayrıca, beton yüzeyine yüksek konsantrasyonlarda korozyon inhibitörü uygularken çelik donatıya nüfuz etmek zordur. Bu nedenle, korozyon inhibitörleri yüksek konsantrasyonlarda beton donatısına tekrar tekrar enjekte edebilen pres yönteminin geliştirilmesine artan bir ihtiyaç vardır. Betonun su geçirgenliği ve belirli bölgelerde korozyon inhibitörlerinin nüfuz etmesiyle bağlantılı nitrat konsantrasyonları üzerine çalışmalar da gereklidir [39].

4. MATERYAL ve YÖNTEM**4.1. Materyal****4.1.1. Beton Numunelerinin Hazırlanması**

Çalışmada hazır beton santrali tarafından temin edilen C 30 dayanım sınıfında beton kullanılmıştır. Numunelerin hazırlanmasında 0-5 mm'lik elekler arasında kalan %59 doğal kum, 5-12 mm'lik ve 12-22.4 mm'lik elekler arasında kalan %41 doğal çakıl kullanılmıştır. Üretici tarafından 1 m³ betonda 310 kg çimento, 185 kg su, 1132 kg doğal kum, 216 kg ince agrega, 575 kg iri agrega, çimentonun ağırlıkça %1'i (3.10 kg) oranında kalsiyum nitrat bazlı korozyon inhibitörü katkısı kullanılarak 2421.1 kg/m³ birim kütleyle sahip bir taze beton bileşimi tasarlanmıştır (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1 1 m³ betonda kullanılan malzeme miktarı

Kullanılan Malzeme Cinsi	Miktarı (kg)
Çimento CEM I 42.5 R	310
Su	185
Doğal kum	1132
İnce agrega	216
İri agrega	575
Korozyon inhibitörü	3.10
Toplam	2421.1 kg/m³

Çalışmada kullanılan 15x15x15 cm boyutlarında standart küp kalıpları (Resim 4.1) Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi yapı malzemeleri laboratuvarından temin edilmiştir.



Resim 4.1 Çalışmada kullanılan küp kalıplar

C 30 dayanım sınıfında olan betonun kalıplara dökülüp hazırlandıktan sonra Resim 4.2’de gösterildiği gibi vibrasyon işlemi (1-10 sn) uygulanmıştır.



Resim 4.2 Kalıplara dökülen betona vibrasyon işleminin uygulanması

4.1.2. Çelik Donatılar

Yarı hücre potansiyeli ve çekme-çıkarma deneyinde kullanılan donatılı beton numunelerin hazırlanmasında Resim 4.3'te verilen 16 mm çapında ve 20 cm uzunluğunda nervürlü S420a betonarme çeliği kullanılmıştır.



Resim 4.3 Çelik donatılar

Kalıplara dökülen betona vibrasyon işlemi uygulandıktan sonra 20 cm'lik donatının 10 cm'lik kısmı Resim 4.4'te görüldüğü gibi betonun içine gömülmüştür.



Resim 4.4 Betona gömülü çelik donatı

4.1.3. NaCl Çözeltisi

Tatlı ve tuzlu su kürü (%3'lük NaCl) olmak üzere 20 ± 2 °C'de iki farklı kür ortamı hazırlanmıştır (Resim 4.5).



Resim 4.5 Hazırlanan kür havuzu

4.1.4. Epoksi

Çalışmada kullanılan epoksi malzemesi (Resim 4.6) termosetler grubundan yapıştırıcı bir reçinedir. Çelik donatıların üst tabakasının havayla olan bağlantısını kesip aradaki boşluğu kapatmak için kullanılır.



Resim 4.6 Epoksi uygulaması

4.1.5. Yarı Hücre Potansiyeli Deney Düzeneği

Betona gömülü çelik donatıların korozyon ölçümünü hasarsız ve hızlı bir şekilde yapan taşınabilir cihazdır. Numunelerin yarı hücre potansiyelleri ölçülmesinde direnci yüksek olan bir voltmetre kullanılmaktadır. Bu voltmetre sayesinde çelik donatının potansiyeli referans elektrotun durumuna göre ölçülmektedir. Deneysel çalışmada referans elektrotu olarak Cu/CuSO₄ (bakır/bakır sülfat) kullanılmaktadır. Çekme-çıkarma deneyi yapılmadan önce tatlı-tuzlu suda bekletilen çelik donatılı beton numunelerinin korozyon ölçümünde kullanılmıştır. Deneysel çalışmada Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi yapı malzemesi laboratuvarından temin edilen ve Resim 4.7’de gösterilen deney düzeneği kullanılmıştır.



Resim 4.7 Yarı hücre potansiyeli deney cihazı

4.1.6. Çekme-Çıkarma Deney Düzenegi

Test cihazıyla beton numune içine gömülü olan çelik donatının eksenel çekme kuvveti sayesinde çekilip-çıkarma uygulaması yapılmaktadır. Deney aşamasında üretilen numunelere ait ölçümler Adıyaman Ultra Yapı Malzemeleri Kalite Kontrol ve Beton Laboratuvarında UTM 4000 model cihazla (Resim 4.8) yapılmıştır.



Resim 4.8 Çekme-çıkarma deney düzenegi

4.2. Yöntem**4.2.1. Yarı Hücre Potansiyel Deneyi**

Yarı hücre potansiyel deneyi betona gömülü donatının ASTM C 876'ya göre korozyon ölçümlerinin yapılmasıdır. Bu ölçümler Resim 4.9'da gösterilen deney düzeneğinden faydalanılmıştır. Çalışma mantığı, çelik donatının açık devre ya da korozyon potansiyelinin belli bir zaman zarfı boyunca ölçülmesine dayanır ve korozyon riski hakkında fikir edinmeyi sağlar. En yaygın olarak kullanılan referans elektrotu Cu/CuSO_4 'tır. Uygulama ve saklanma pratikliğinden dolayı yaygın bir şekilde kullanılır.



Resim 4.9 Numunenin yarı hücre potansiyeli ölçümü

Tatlı-tuzlu su kürü ortamında bekletilen donatılı numuneler 7, 28, 90 ve 180 gün sonunda kür havuzundan çıkarılıp yarı hücre potansiyeli okumaları yapılmıştır. Betona gömülü donatının potansiyeli, voltmetrenin donatı ile olan bağlantısı sağlanarak sonuçlar elde edilmiştir. Çelik donatının voltmetrenin pozitif kutbuyla

olan bağlantısı sağlanırken, elektrot ise voltmetrenin negatif kutbuna bağlanır. Betona gömülü çelik donatının birbirinden farklı elektrotlarına göre ulaşılan yarı hücre potansiyel değerleri ve korozyon olasılıkları arasındaki bağlantılar Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Çelik donatının referans elektrotlarına göre korozyon durumu [40]

Cu/CuSO₄	Korozyon
mV (CSE)	Durumu
-200 < E	Korozyon olasılığı %10
-350 < E < -200	Korozyon olasılığı %50
E < -350	Korozyon olasılığı %90
E < -500	Şiddetli korozyon

Referans elektrotu incelediğinde yarı hücre potansiyel değerinin -200 mV’luk değerden daha büyük (daha pozitif) olması durumunda korozyon olasılığının %10 olduğunu ifade etmektedir. Çelik donatının yarı hücre potansiyel değeri -350 mV ile -200 mV arasında olduğunda korozyon olasılığının %50 olduğu anlamına gelmektedir. Yarı hücre potansiyel değerinin -350 mV’tan daha negatif olduğu durumda ise korozyon olasılığının %90 olduğunu ifade etmektedir. Potansiyele ait okumanın -500’den daha negatif olduğu durumda ise şiddetli korozyonun var olduğu anlamına gelmektedir.

Bu yöntem yeterince pratik ve kullanışlı olup, kullanımı için gerekli teçhizatlar bulunabilmektedir. Çelik donatının epoksiyle kaplanıp kaplanmadığı, oksijen durumu, inhibitör kullanımı, karbonatlaşma ve betonun porozitesi yarı hücre potansiyel okumalarını etkilemektedir. Betonda bulunan oksijen yetersizliği, korozyon olasılığı yoksa bile donatının daha aktif olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle beton içinde yarı hücre potansiyel okumaları daha negatif değerler alabilmektedir [41].

Üretilen donatılı beton numunelerin 28, 180 ve 360 (fazladan eklenmiştir) gün sonunda kür havuzundan çıkarıldıktan donatıda meydana gelen korozyon durumları Resim 4.10'da gösterilmiştir.

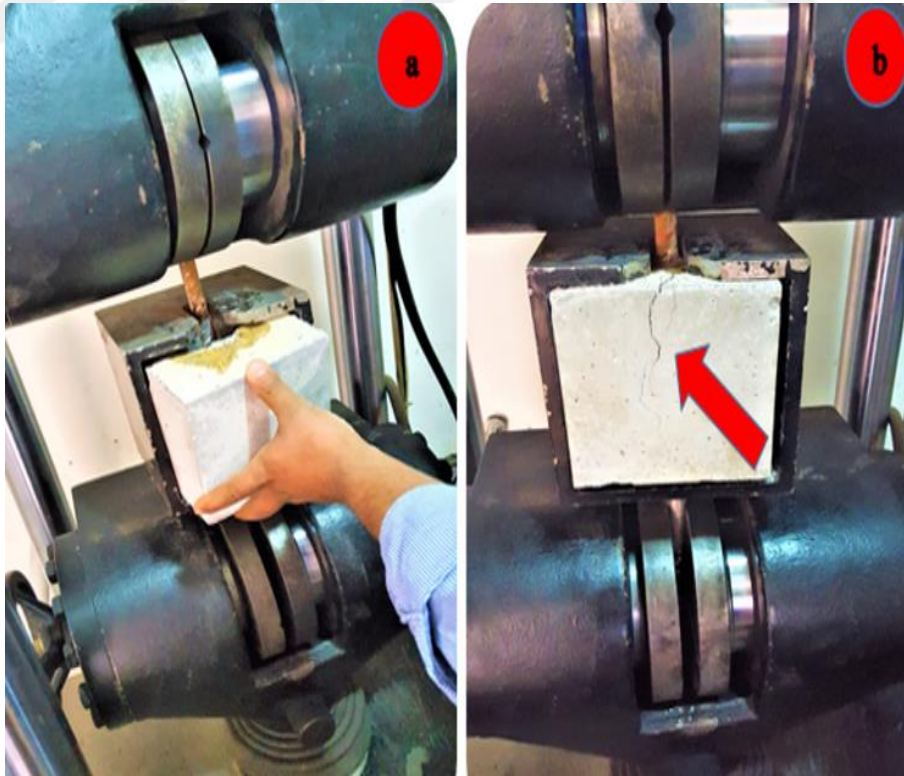


Resim 4.10 28, 180 ve 360 gün sonunda donatıda meydana gelen korozyon

4.2.3. Çekme-Çıkarma Deneyi

Çekme-çıkarma deneyinin yapılma amacı, statik yük altındaki malzemelerin plastik ve elastik davranışlarını tespit etmektir. Çekme-çıkarma deneyinde tabandan sabitlenmiş kübik bir beton kütlesinin içine sabitlenmiş olan çelik donatı, alt hareketli ucundan eksenli boyunca artan P kuvveti sayesinde betondan çekilip sıyrılmasıdır (Resim 4.11).

Güvenli aderans dayanımı olarak sıyrılma sonucunun 0.25 mm olması durumunda yüke karşılık gelen aderans dayanımı baz alınmaktadır. Bu deneyde karşılık gelen dik kesme kuvvetinin bulunmaması ve pas payının fazla olması asıl davranışın tespit edilmesi konusunda engel teşkil etmektedir. Bu nedenlerden ötürü çekme-çıkarma deneyiyle kenetlenme boyunun bulunması doğru sonuçlar vermemektedir. Fakat donatıların betonla olan aderanslarının kıyaslanması amacıyla rahatlıkla kullanılabilir.



Resim 4.11 Numunenin a) Kalıbın içine yerleştirilmesi b) Çekip-çıkartılması

Yapılan çekme-çıkarma deneyi sonrasında elde edilen çekme dayanımlarından yola çıkarak aderans kuvvetleri bulunmuştur. Aderans dayanımlarının belirlenmesi amacıyla elde edilen aderans kuvvetleri aşağıda verilen (4.1) denkleminde yerine yazılmıştır.

$$\tau = \frac{\text{Aderans kuvveti}}{\pi \times \varphi \times \ell} \quad (4.1)$$

τ = Aderans dayanımı

$\varnothing$ = Donatı çapı

ℓ = Betona gömülü donatı uzunluğunu simgeler [42]

Yukarıdaki verilerden hareketle aderans dayanımının etkilediği alan, kullanılan çelik donatının yüzey alanıdır. Tatlı-tuzlu su kürü ortamında 7, 28, 90 ve 180 gün bekletilen donatılı numuneler kür havuzundan çıkarılıp yarı hücre potansiyeli okumaları yapıldıktan sonra çekme-çıkarma deneyine tabi tutularak aderans dayanımları bulunmuştur.

5. BULGULAR ve TARTIŞMA

5.1. Yarı Hücre Potansiyeli Sonuçları

5.1.1. 7 Günlük İnhibitörsüz Yarı Hücre Potansiyeli Sonuçları

7 gün boyunca inhibitörsüz tatlı-tuzlu su kürüne tabi tutulmuş 15x15x15 cm³'lük donatılı beton numunelerin çekme-çıkarma deneyi yapılmadan önce her bir yan yüzeyinde yarı hücre potansiyel okumaları yapıp daha sonra ortalamaları alınarak Çizelge 5.1'de gösterilmiştir. Deney sonucunda okunan yarı hücre potansiyel değerleri Çizelge 4.2'de verilen ASTM C 876 sınır okumaları ile kıyaslanarak çelik donatının korozyon olasılığı hakkında yorum yapılmıştır.

Çizelge 5.1 7 günlük inhibitörsüz potansiyel değerleri

Kür	Numune	mV				mV _{ort}	ASTM C876 Sınır Değeri (mV)
Tatlı	1	-240	-256	-260	-245		
	2	-240	-214	-227	-210	-244	-350 < E < -200
	3	-246	-249	-275	-264		
Tuzlu	1	-296	-300	-305	-308		
	2	-315	-310	-307	-330	-311	-350 < E < -200
	3	-298	-325	-327	-309		

7 gün sonunda tatlı su kürüne ait milivolt (mV) ortalamaları %3'lük NaCl çözeltisine konulan milivolt (mV) ortalamalarından daha pozitif değer aldığı gözlemlenmiştir. Tatlı su kürüne ait milivolt ortalamaları Çizelge 4.2'de gösterilen ASTM C 876 sınır değerlerine göre kıyaslandığında korozyon olasılığının %50 olduğu sonucuna varılmıştır.

5.1.2 7 Günlük İnhibitörlü Yarı Hücre Potansiyeli Sonuçları

7 gün boyunca inhibitörlü tatlı-tuzlu su kürüne tabi tutulmuş numunelerin önce her bir yan yüzeyinde yarı hücre potansiyel okumaları hesaplanıp daha sonra ortalamaları alınarak Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 7 günlük inhibitörlü potansiyel değerleri

Kür	Numune	mV				mV _{ort}	ASTM C876 Sınır Değeri (mV)
Tatlı	1	-195	-225	-179	-197		
	2	-186	-174	-180	-183	-185	-200 < E
	3	-175	-203	-158	-165		
Tuzlu	1	-236	-248	-240	-237		
	2	-253	-290	-288	-272	-260	-350 < E < -200
	3	-265	-246	-248	-300		

NaCl çözeltisinin korozyona meyilli ortam oluşturmasından hareketle tatlı su kürüne ait potansiyel değerleri tuzlu su kürüne ait potansiyel değerlerinden daha pozitif değerler aldığı Çizelge 5.2’de görülmektedir. Hem tatlı hem de tuzlu su kürüne ait numunelerde kullanılan inhibitörden kaynaklı Çizelge 5.1’de gösterilen 7 günlük inhibitörsüz numunelerdeki potansiyel değerlerinden daha pozitif değerler elde edilmiştir. Buradan yola çıkarak 7 gün geçmesine rağmen korozyon inhibitörü kullanımının fark oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Tatlı su kürüne ait mV_{ort} okuması olarak -185 mV değeri elde edilmiş ve bu değer Çizelge 4.2’de gösterilen -200 mV sınır değerini aşmadığı gözlemlenerek henüz korozyon olasılığının başlamadığı tespit edilmiştir. Tuzlu su kürüne ait mV okuması ise -260 mV değeri ile -200 mV sınır değerini aşıp korozyon olasılığının %50 olduğu değer olarak ölçülmüştür.

5.1.3. 28 Günlük İnhibitörsüz Yarı Hücre Potansiyeli Sonuçları

28 gün boyunca inhibitörsüz tatlı-tuzlu su kürüne tabi tutulmuş numunelerin önce her bir yan yüzeyinde yarı hücre potansiyel okumaları hesaplanıp daha sonra ortalamaları alınarak Çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3 28 günlük inhibitörsüz potansiyel değerleri

Kür	Numune	mV				mV _{ort}	ASTM C876 Sınır Değeri (mV)
Tatlı	1	-320	-315	-296	-301		
	2	-332	-307	-311	-295	-305	-350 < E < -200
	3	-288	-287	-305	-303		
Tuzlu	1	-460	-472	-430	-436		
	2	-458	-454	-442	-456	-450	-500 < E < -350
	3	-447	-458	-450	-431		

28 günlük potansiyel okumalarında elde edilen değerler 7 günlük potansiyel okumalarına göre hem inhibitör kullanılmayan hem de kullanılan tatlı-tuzlu su kürüne ait okumalardan daha negatif değerler almıştır. Tatlı su küründe ölçülen -305 mV değeri korozyonun daha -350 mV sınır değerini aşmadığı yani korozyon olasılığının %90 olmadığı sonucuna varılmıştır.

NaCl çözeltisine ait -450 mV potansiyel değeri tatlı su kürüne ait değerden daha negatif çıkmış aynı zamanda Çizelge 4.2'de gösterilen -350 mV ile -500 mV sınır değerleri arasında kalarak korozyon olasılığının %90 olduğu tespit edilmiştir. Bu değerlerden yola çıkarak korozyonun istikrarlı bir şekilde ilerlediği fakat daha şiddetli korozyon bölgesine ulaşmadığı görülmüştür. Sonuç olarak 28 günlük inhibitörsüz yarı hücre potansiyel okumaları 7 günlük inhibitörsüz okumalara göre daha negatif aldığı tespit edilmiştir.

5.1.4. 28 Günlük İnhibitörlü Yarı Hücre Potansiyeli Sonuçları

28 gün boyunca inhibitörlü tatlı-tuzlu su kürüne tabi tutulmuş numunelerin önce her bir yan yüzeyinde yarı hücre potansiyel okumaları hesaplanıp daha sonra ortalamaları alınarak Çizelge 5.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.4 28 günlük inhibitörlü potansiyel değerleri

Kür	Numune	mV				mV _{ort}	ASTM C876 Sınır Değeri (mV)
Tatlı	1	-245	-230	-261	-250		
	2	-290	-249	-263	-275	-251	-350 < E < -200
	3	-218	-225	-206	-295		
Tuzlu	1	-352	-348	-340	-322		
	2	-352	-339	-365	-335	-340	-350 < E < -200
	3	-320	-324	-337	-342		

İnhibitör kullanımının ne derece önemli olduğu anlamak için 28 günlük inhibitörlü potansiyel okumaları 28 günlük inhibitörsüz potansiyel okumalarıyla karşılaştırıldığında, inhibitör kullanılan numunelerde yarı hücre potansiyel okumalarının daha pozitif değerler aldığı görülmüştür. İnhibitör kullanımının aynı zamanda Çizelge 4.2'de verilen -350 mV sınır değerinin daha aşılmadığı yani korozyon oluşumunun sabit bir ilerleme gösterdiğini saptanmıştır. 28 gün sonunda inhibitörlü tatlı-tuzlu su kürleri zamana bağlı olarak 7 gün sonunda ölçülen değerlerden daha fazla korozyona uğrama riski olmasından ötürü daha negatif değerler almıştır. Tatlı su kürüne ait yarı hücre potansiyeli tuzlu su kürüne ait yarı hücre potansiyeli okumasından %35'lik negatif azalış göstermiştir. 28 günlük inhibitörlü yarı hücre potansiyel okumaları 7 günlük inhibitörlü yarı hücre potansiyel okumalara göre %33'lük negatif artış göstermiştir. Sonuç olarak inhibitör kullanımından kaynaklı -350 mV sınır değerinin henüz aşılmadığı gözlemlenmiştir.

5.1.5. 90 Günlük İnhibitörsüz Yarı Hücre Potansiyeli Sonuçları

90 gün boyunca inhibitörsüz tatlı-tuzlu su kürüne tabi tutulmuş numunelerin önce her bir yan yüzeyinde yarı hücre potansiyel okumaları hesaplanıp daha sonra ortalamaları alınarak Çizelge 5.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 5.5 90 günlük inhibitörsüz potansiyel değerleri

Kür	Numune	mV				mV _{ort}	ASTM C876 Sınır Değeri (mV)
Tatlı	1	-407	-415	-401	-397		
	2	-406	-409	-382	-386	-402	-500 < E < -350
	3	-405	-418	-385	-411		
Tuzlu	1	-492	-495	-500	-502		
	2	-488	-489	-495	-498	-495	-500 < E < -350
	3	-510	-477	-490	-507		

90 gün sonunda tatlı-tuzlu kürlere tabi tutulan numuneler üzerinde yapılan potansiyel okumalarının ortalaması sırasıyla tatlı su kürü için -402 mV tuzlu su kürü için ise -495 mV sonuçları elde edilmiş ve Çizelge 4.2’de verilen sınır değerlere göre henüz -500 mV sınırı aşılmadığı görülmüştür. 90 günlük yarı hücre potansiyel okumaları 7 ve 28 günlük okumalara göre daha negatif değerler alırken Çizelge 5.7 ve Çizelge 5.8’de gösterilen potansiyel değerlere göre daha pozitif değerler aldığı gözlemlenmiştir. Bu durum kür süresinin artmasıyla birlikte numunelerin korozyona uğrama yani daha negatif değerler almaya meyilli olduğunu ifade etmektedir.

90 günlük inhibitörsüz milivolt değerleri 7 günlük inhibitörsüz milivolt değerlerine göre %61’lik negatif artış gösterirken, 28 günlük inhibitörsüz değerlere göre %18’lik negatif artış görülmüştür. Sonuç olarak tatlı-tuzlu su kürlerine ait potansiyel değerleri -350 ve -500 mV sınır değerleri arasında kaldığı görülmüştür.

5.1.6. 90 Günlük İnhibitörlü Yarı Hücre Potansiyeli Sonuçları

90 gün boyunca inhibitörlü tatlı-tuzlu su kürüne tabi tutulmuş numunelerin önce her bir yan yüzeyinde yarı hücre potansiyel okumaları hesaplanıp daha sonra ortalamaları alınarak Çizelge 5.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.6 90 günlük inhibitörlü potansiyel değerleri

Kür	Numune	mV				mV _{ort}	ASTM C876 Sınır Değeri (mV)
Tatlı	1	-256	-268	-220	-214		
	2	-244	-232	-258	-207	-257	-350 < E < -200
	3	-230	-236	-366	-352		
Tuzlu	1	-372	-348	-348	-385		
	2	-367	-363	-372	-340	-364	-500 < E < -350
	3	-360	-369	-391	-355		

Okumalar incelendiğinde 90 günlük inhibitör kullanılan numunelere ait yarı hücre potansiyel değerleri 90 günlük inhibitör kullanılmayan numunelere göre daha pozitif değerler almıştır. 90 gün sonunda potansiyel okumalarında tatlı su kürüne ait numunelerin tuzlu su kürüne ait numunelere göre daha pozitif değerler alarak korozyon açısından daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Tatlı su kürüne ait okumaların daha pozitif değerler almasıyla beraber potansiyel değerleri -350 ile -200 mV sınır değerleri arasında kalarak korozyon olasılığının %50 olduğu bölgede olduğu tespit edilmiştir. Fakat NaCl çözeltisine maruz kalan kür havuzundan elde edilen -364 mV sınır değeri Çizelge 4.2'de verilen -350 mV sınır değerini aşarak korozyon olasılığının %90 olduğu bölgeye geçtiği ancak -500 mV değerini henüz aşmadığı yani şiddetli korozyon bölgesine geçiş yapmadığı sonucuna varılmıştır.

5.1.7. 180 Günlük İnhibitörsüz Yarı Hücre Potansiyeli Sonuçları

180 gün boyunca inhibitörsüz tatlı-tuzlu su kürüne tabi tutulmuş numunelerin önce her bir yan yüzeyinde yarı hücre potansiyel okumaları hesaplanıp daha sonra ortalamaları alınarak Çizelge 5.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.7 180 günlük inhibitörsüz potansiyel değerleri

Kür	Numune	mV				mV _{ort}	ASTM C876 Sınır Değeri (mV)
Tatlı	1	-433	-452	-440	-438		
	2	-481	-486	-480	-477	-463	-500 < E < -350
	3	-435	-463	-471	-493		
Tuzlu	1	-608	-598	-596	-603		
	2	-630	-628	-604	-592	-617	E < -500
	3	-643	-650	-664	-591		

Çizelge 5.7’de tatlı su kürüne ait -463 mV değeri Çizelge 4.2’deki -350 mV ve -500 mV sınır değerleri arasında kalmış fakat NaCl çözeltisinden bekletilen ortalama yarı hücre potansiyel okumaları -500 mV sınır değerini aşarak şiddetli korozyon bölgesinde geçmiştir. 180 günlük inhibitörsüz potansiyel okumaları 90 günlük inhibitörsüz potansiyel okumalarıyla karşılaştırıldığında %20 negatif artış tespit edilmiştir.

Numunelerin kür havuzunda bekletme sürelerinin son günü olan 180 gün sonunda tatlı su kürüne ait -463 mV ve NaCl çözeltisine ait -617 mV potansiyel değerleri en yüksek negatif potansiyel değerleri olarak ölçülmüştür. 180 günlük inhibitörsüz NaCl çözeltisinde bekletilen numunelere ait yarı hücre potansiyel okumaları aynı zamanda korozyon oluşumu yönünden en dayanıksız değerler olduğu gözlemlenmiştir.

5.1.8. 180 Günlük İnhibitörlü Yarı Hücre Potansiyeli Sonuçları

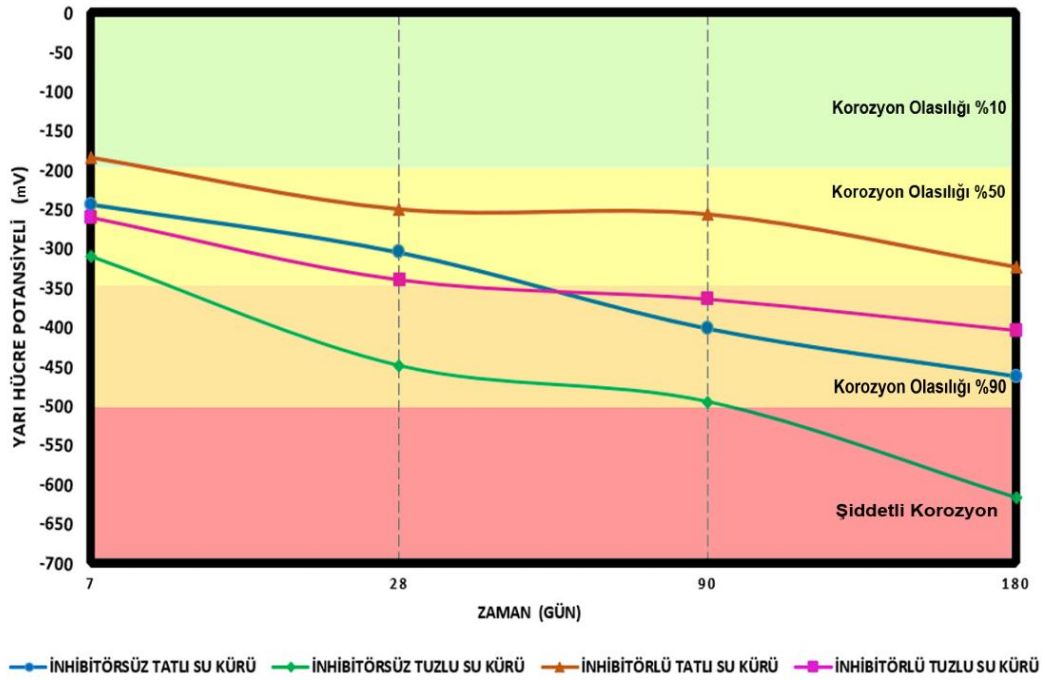
180 gün boyunca inhibitörlü tatlı-tuzlu su kürüne tabi tutulmuş numunelerin önce her bir yan yüzeyinde yarı hücre potansiyel okumaları hesaplanıp daha sonra ortalamaları alınarak Çizelge 5.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.8 180 günlük inhibitörlü potansiyel değerleri

Kür	Numune	mV				mV _{ort}	ASTM C876 Sınır Değeri (mV)
Tatlı	1	-309	-301	-326	-351		
	2	-320	-325	-317	-310	-324	-350 < E < -200
	3	-371	-297	-324	-335		
Tuzlu	1	-439	-425	-437	-412		
	2	-387	-371	-376	-393	-404	-500 < E < -350
	3	-405	-410	-425	-369		

Çizelge 5.8’de ölçülen potansiyel değerleri 7, 28 ve 90 gün sonunda inhibitör kullanılan numunelerde ölçülen potansiyel değerlerine göre daha negatif değerler almış fakat 180 gün sonunda inhibitör kullanılmayan yarı hücre potansiyel değerlerine göre daha pozitif değerler almıştır. 180 gün sonunda inhibitör kullanılmayan numunelerden daha pozitif değerler almasının ana nedeni korozyon inhibitörü olduğu anlaşılmıştır.

180 gün sonunda inhibitör kullanılmayan numunelere kıyasla aynı süre boyunca kür işlemi yapılmasına rağmen Çizelge 4.2’de gösterilen -500 mV sınır değeri henüz aşılmamıştır. Tatlı su kürüne ait -324 mV ve NaCl çözeltisine ait -404 mV değeri korozyon inhibitörü kullanımının numunelerde oluşan korozyon durumunu olumlu yönde etkilediği sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.1 7, 28, 90 ve 180 günlük yarı hücre potansiyel okumaları

İnhibitör kullanılan ve kullanılmayan donatılı betonların 7, 28, 90 ve 180 gün sonunda tatlı-tuzlu su kür havuzlarından çıkarıldıktan sonra yarı hücre potansiyeli deneyi yapılmıştır ve bu deneye ait okumaların değişimi Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Yarı hücre potansiyel deneyi ile Çizelge 4.2’de verilen ASTM C 876 sınır değerleri karşılaştırılarak üretilen donatılı beton numunelerin korozyon olasılıkları hakkında bilgi sahibi olunmuştur.

Başlangıç kürü olan 7 günlük bütün numunelere ait elde edilen potansiyel okumaları -350 mV sınır değerinin üstünde kaldığı tespit edilmiştir. 7 günlük inhibitörsüz tatlı su kürüne ait potansiyel okumaları inhibitörsüz NaCl çözeltisine ait potansiyel okumalarından daha pozitif değerler almış ve her iki değere ait ölçümler -200 ile -350 mV sınır değerleri arasında kalmıştır. Fakat inhibitör kullanılan tatlı su kürüne ait potansiyel okumaları -200 mV sınır değerinin üstünde kalarak korozyon olasılığının %10 olduğu bölgede kalmıştır. İnhibitör kullanılmasına rağmen 7 günlük NaCl çözeltisinde bekletilen numunelere ait yarı hücre potansiyeli okumaları -200 mV değerinden daha negatif değerler almıştır.

28 gün sonunda elde edilen tüm potansiyel okumaları 7 günlük potansiyel okumalarından daha negatif değerler almıştır. İnhibitörsüz tuzlu su kürüne ait potansiyel okumaları dışındaki tüm değerler -350 mV sınır değerinin üstünde kalmış fakat inhibitörsüz tuzlu su kürüne ait potansiyel okumaları -350 mV sınır değerini aşarak korozyon olasılığının %90 olduğu bölgele geçmiştir.

90 gün sonunda tüm numunelere ait potansiyel okumaların henüz -500 mV sınır değerini aşmadığı yani şiddetli korozyon bölgesine geçmediği ve tümünün -200 ile -500 mV arasındaki bölgede kaldığı gözlemlenmiştir. 90 günlük yarı hücre potansiyel okumaları 7 ve 28 günlük okumalara göre daha negatif değerler almış fakat 180 günlük numunelere göre daha pozitif değerler almıştır. 90 günlük inhibitörsüz potansiyel değerleri 7 günlük inhibitörsüz potansiyel değerlerine göre %61 negatif artış gösterirken, 28 günlük inhibitörsüz potansiyel değerlerine göre %18'lik negatif artış göstermiştir.

180 gün sonunda en yüksek negatif potansiyel değeri olan -617 mV değeri inhibitörsüz tuzlu su kürüne aittir. Bu değer inhibitör kullanımının oldukça önemli olduğunu göstermiştir [17], [23], [43]. 28, 90 ve 180 gün sonunda okunan tüm yarı hücre potansiyel değerlerinin gittikçe daha negatifleştiği fakat korozyon inhibitörü kullanılan numunelere ait yarı hücre potansiyel değerlerinin, kullanılmayan numunelere göre daha pozitif değerlerde kaldığı sonucuna varılmıştır [8], [10], [43], [44]. İnhibitör kullanımının faydası özellikle 180 günlük inhibitör kullanılan tatlı su kürü numunelerine ait potansiyel okumalarının -350 mV sınır değerinden daha pozitif değerlerde kaldığında gözlemlenmiştir.

5.2. Çekme-Çıkarma Deneyi Sonuçları

5.2.1. 7 Günlük İnhibitörsüz Çekme-Çıkarma Deneyi Sonuçları

Tahribatsız yarı hücre potansiyeli ölçümleri yapıldıktan sonra numunelere ait aderans dayanımlarını bulmak amacıyla çekme-çıkarma deneyi yapılmıştır. 7 günlük kür işleminden sonra inhibitör katkı kullanılmayan numunelere ait aderans dayanımları Çizelge 5.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.9 7 günlük inhibitörsüz aderans dayanımları

Kür	Numune	Çekme Dayanımı (MPa)	Aderans Dayanımı (MPa)	(Aderans Dayanımı) _{ort} (MPa)
Tatlı	1	138	2.8	3.0
	2	149	3.0	
	3	160	3.2	
Tuzlu	1	158	3.2	3.3
	2	173	3.5	
	3	161	3.2	

Çizelge 5.9’da gösterilen değerler incelendiğinde ulaşılan en yüksek çekme dayanımı tuzlu su kürüne ait 173 MPa değeridir. NaCl çözeltisine ait aderans dayanımlarının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak 7 günlük NaCl çözeltisinin aderans dayanımları tatlı su kürüne ait aderans dayanımlarına göre daha yüksek değerler aldığı görülmüştür.

5.2.2. 7 Günlük İnhibitörlü Çekme-Çıkarma Deneyi Sonuçları

7 günlük kür işleminden sonra inhibitör katkı kullanılan numunelere ait aderans dayanımları Çizelge 5.10’da gösterilmiştir. Tuzlu su kürüne ait çekme dayanımları sırasıyla 195, 186 ve 183 MPa bulunmuş ve bu dayanımların tüm tatlı su kürüne ait dayanımlardan daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Çizelge 5.9’da verilen ve inhibitör katkı kullanılmayan numunelerle karşılaştırıldığında daha yüksek aderans dayanımları elde edilmiştir. İnhibitör katkı kullanılan numunelerde kullanılmayan numunelere göre çekme dayanımı %10’luk, aderans dayanımları da %11’lik artış göstermiştir. Bu artışın nedeni inhibitör kullanımından dolayı beton ile donatı arasındaki sürtünme ve yapışmanın artması olarak düşünülmektedir.

Çizelge 5.10 7 günlük inhibitörlü aderans dayanımları

Kür	Numune	Çekme Dayanımı (MPa)	Aderans Dayanımı (MPa)	(Aderans Dayanımı) _{ort} (MPa)
Tatlı	1	168	3.4	3.2
	2	157	3.1	
	3	154	3.1	
Tuzlu	1	195	3.9	3.8
	2	186	3.7	
	3	183	3.7	

5.2.3. 28 Günlük İnhibitörsüz Çekme-Çıkarma Deneyi Sonuçları

28 günlük kür işleminden sonra inhibitör katkı kullanılmayan numunelere ait aderans dayanımları Çizelge 5.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.11 28 günlük inhibitörsüz aderans dayanımları

Kür	Numune	Çekme Dayanımı (MPa)	Aderans Dayanımı (MPa)	(Aderans Dayanımı) _{ort} (MPa)
Tatlı	1	196	3.9	3.9
	2	185	3.7	
	3	205	4.1	
Tuzlu	1	170	3.4	3.5
	2	179	3.6	
	3	183	3.7	

Çizelge 5.11’de inhibitör katkı kullanılmayan numunelerde elde edilen değerler Çizelge 5.10 ile karşılaştırıldığında aderans dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir.

5.2.4. 28 Günlük İnhibitörlü Çekme-Çıkarma Deneyi Sonuçları

28 günlük kür işleminden sonra inhibitör katkı kullanılan numunelere ait aderans dayanımları Çizelge 5.12’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.12 28 günlük inhibitörlü aderans dayanımları

Kür	Numune	Çekme Dayanımı (MPa)	Aderans Dayanımı (MPa)	(Aderans Dayanımı)_{ort} (MPa)
Tatlı	1	256	5.1	5.1
	2	224	4.5	
	3	289	5.8	
Tuzlu	1	224	4.5	4.4
	2	196	3.9	
	3	234	4.7	

28 günün sonunda inhibitör katkı kullanılan numunelere ait aderans dayanımları ve çekme dayanımları inhibitör kullanılmayanlara göre arttığı tespit edilmiştir.

5.2.5. 90 Günlük İnhibitörsüz Çekme-Çıkarma Deneyi Sonuçları

90 günlük kür işleminden sonra inhibitör katkı kullanılmayan numunelere ait aderans dayanımları Çizelge 5.13’te gösterilmiştir.

Çizelge 5.13 90 günlük inhibitörsüz aderans dayanımları

Kür	Numune	Çekme Dayanımı (MPa)	Aderans Dayanımı (MPa)	(Aderans Dayanımı) _{ort} (MPa)
Tatlı	1	206	4.1	4.4
	2	223	4.5	
	3	230	4.6	
Tuzlu	1	205	4.1	3.9
	2	198	4.0	
	3	185	3.7	

Elde edilen değerler incelendiğinde tatlı su kürüne ve NaCl çözeltisine ait üretilen 3 numunenin aderans dayanımları ortalamaları sırasıyla 4.4 ve 3.9 MPa olarak bulunmuş ve bu dayanımlar inhibitör kullanılmayan 28 günlük değerlere göre %12'lik artış göstermiştir.

5.2.6. 90 Günlük İnhibitörlü Çekme-Çıkarma Deneyi Sonuçları

90 günlük kür işleminden sonra inhibitör katkı kullanılan numunelere ait aderans dayanımları Çizelge 5.14'te gösterilmiştir. Elde edilen değerler incelendiğinde inhibitör kullanılmayan 90 günlük numunelerle karşılaştırıldığında aderans dayanımlarının tatlı su küründe 4.4 MPa'dan 6.3 MPa'a, tuzlu su küründe ise 3.9 MPa'dan 4.8 MPa'a yükseldiği sonucuna varılmıştır. Bu artışların nedeni korozyon inhibitörü kullanımının korozyona karşı donatıları koruduğu ve pas ile oksit oluşumunu engellemesi olduğu görülmüştür. Hem tespit edilen korozyon hem de aderans dayanımları neticesinde beton ile çelik donatı arasındaki kenetlenmenin güçlendiği sonucuna varılmıştır. Korozyon inhibitörü kullanımının kullanılmayana göre sağladığı kontrol mekanizması aderans dayanımlarını önemli bir şekilde etkilediği tespit edilmiştir.

Çizelge 5.14 90 günlük inhibitörlü aderans dayanımları

Kür	Numune	Çekme Dayanımı (MPa)	Aderans Dayanımı (MPa)	(Aderans Dayanımı) _{ort} (MPa)
Tatlı	1	356	7.1	6.3
	2	287	5.7	
	3	308	6.2	
Tuzlu	1	257	5.1	4.8
	2	249	5.0	
	3	216	4.3	

5.2.7. 180 Günlük İnhibitörsüz Çekme-Çıkarma Deneyi Sonuçları

180 günlük kür işleminden sonra inhibitör katkı kullanılmayan numunelere ait aderans dayanımları Çizelge 5.15’te gösterilmiştir.

Çizelge 5.15 180 günlük inhibitörsüz aderans dayanımları

Kür	Numune	Çekme Dayanımı (MPa)	Aderans Dayanımı (MPa)	(Aderans Dayanımı) _{ort} (MPa)
Tatlı	1	305	6.1	5.6
	2	274	5.5	
	3	260	5.2	
Tuzlu	1	210	4.2	4.8
	2	249	5.0	
	3	265	5.3	

Çizelge 5.15’te elde edilen değerler incelendiğinde 7 ve 28 günlük inhibitör kullanılmayan numunelerin aderans dayanımlarından daha yüksek değerler aldığı tespit edilmiş fakat son kür işlemi olan 180’lük inhibitör katkı kullanılan numunelere göre aderans dayanımlarının daha az olduğu gözlemlenmiştir.

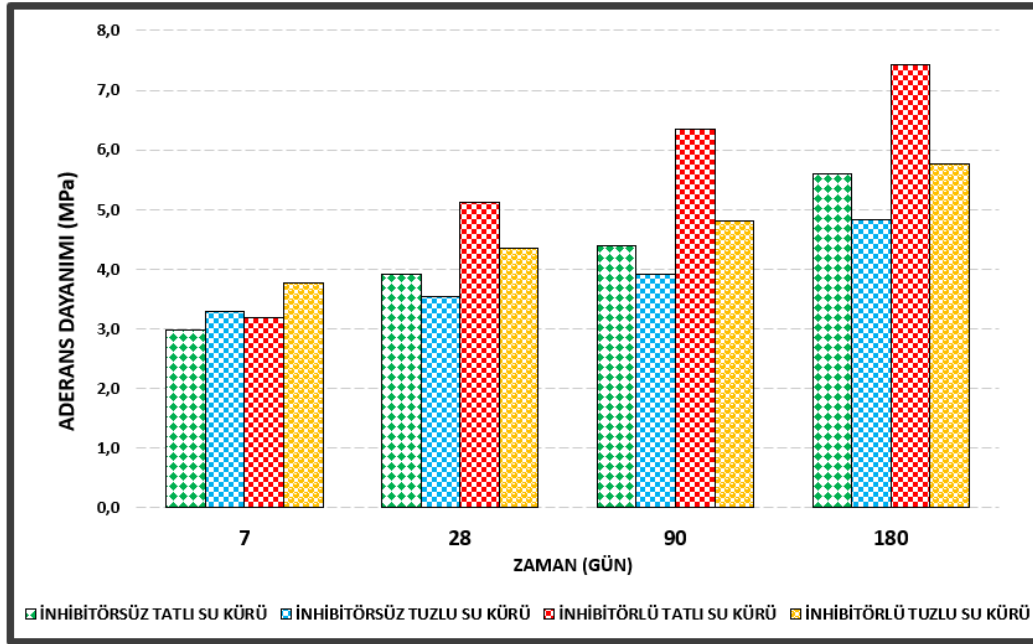
5.2.8 180 Günlük İnhibitörlü Çekme-Çıkarma Deneyi Sonuçları

180 günlük kür işleminden sonra inhibitör katkı kullanılan numunelere ait aderans dayanımları Çizelge 5.16’da gösterilmiştir.

Çizelge 5.16 180 günlük inhibitörlü aderans dayanımları

Kür	Numune	Çekme Dayanımı (MPa)	Aderans Dayanımı (MPa)	(Aderans Dayanımı) _{ort} (MPa)
Tatlı	1	378	7.6	7.4
	2	381	7.6	
	3	354	7.1	
Tuzlu	1	308	6.2	5.8
	2	284	5.7	
	3	273	5.5	

Son kür işlemi sonunda elde edilen değerler incelendiğinde çekme dayanımı ortalaması tatlı su kürü için 371 MPa, NaCl çözeltisi için 288 MPa bulunmuş, aderans dayanım ortalaması ise tatlı su kürü için 7.4 MPa, NaCl çözeltisi için 5.8 MPa bulunmuştur. Bu değerler aynı zamanda hem çekme hem de aderans dayanımları için en yüksek dayanımların olduğu seri olduğu sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak aderans dayanımları inhibitör kullanılan numunelerde kullanılmayan numunelere göre kıyaslandığında daha yüksek değerler elde edildiği görülmüştür.



Şekil 5.2 7, 28, 90 ve 180 günlük aderans dayanımları

Üretilen beton numuneleri ve çelik donatılar arasındaki kenetlenme, korozyon inhibitörünün kullanılmasıyla birlikte ne ölçüde etkilendiğini araştırmak amacıyla 7, 28, 90 ve 180 gün sonunda korozyon ölçümleri yapıldıktan sonra beton içine gömülü çelik donatılar çekme-çıkarma deneyi ile çıkarılmıştır. Yapılan çekme-çıkarma deneyi sonrasında (4.1) denkleminden yararlanarak elde edilen aderans kuvvetlerinden Şekil 5.2’de verilen aderans dayanımları tespit edilmiştir. En düşük aderans dayanımları 7 günlük numunelere aittir fakat korozyon inhibitörü katkısı kullanılan numunelerin aderans dayanımları korozyon inhibitörü kullanılmayan numunelerin aderans dayanımlarından daha yüksek sonuçlar aldığı görülmüştür. 7 günlük NaCl çözeltilerine ait aderans dayanımları tatlı su kürüne ait aderans dayanımlarından daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlardan hareketle NaCl iyonunun tatlı su kürüne göre başta aderans dayanımlarını daha olumlu yönde etki ettiği sonucuna varılmıştır [17]. 28 günlük aderans dayanımları incelendiğinde kür sürelerinin artmasıyla beraber aderans dayanımlarının da arttığı görülmüş aynı zamanda inhibitör katkısı kullanılan numunelere ait aderans dayanımları inhibitör katkısı kullanılmayanlara göre arttığı tespit edilmiştir [23], [43]–[45].

90 gün sonunda grafikteki değerler incelendiğinde inhibitör kullanılan numunelere ait aderans dayanımları inhibitör kullanılmayanlarla kıyaslandığında tatlı su küründe 4.4 MPa'dan 6.3 MPa'ya, NaCl kürüne ait aderans dayanımları ise 3.9 MPa'dan 4.8 MPa'ya yükseldiği görülmektedir. Bu artışların sebebi korozyon inhibitörü kullanımının korozyona karşı çelik donatıları koruduğu ve pas oluşumunu önlemesi olduğu sonucuna varılmıştır. 180 gün sonunda en yüksek aderans dayanımları elde edilmiştir. 180 günlük aderans dayanımları ile 90 günlük aderans dayanımları karşılaştırıldığında %22'lik aderans dayanımı artışı meydana geldiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak korozyon inhibitörü kullanımının verdiği kontrol mekanizması sayesinde beton ile çelik donatı arasındaki kenetlenmenin kuvvetlendiği ve aderans dayanımlarını olumlu şekilde etkilendiği sonucuna varılmıştır [16], [18], [23].

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada korozyon inhibitörü kullanımının betona gömülü çelik donatının korozyon performansına ve aderans dayanımına olan etkileri araştırılmıştır. Çalışmada donatı çapı 16 mm olan 15x15x15 cm boyutlarındaki donatılı beton numuneleri üretilmiştir. Üretilen numuneler tatlı-tuzlu su kürü olmak üzere iki farklı küre tabi tutulmuştur. 7, 28, 90 ve 180 gün sonunda korozyon durumunu öğrenmek için yarı hücre potansiyel deneyi ve aderans özelliklerini belirlemek için de çekme-çıkarma deneyi yapılmıştır.

- Üretilen numunelerin kür sürelerinin artmasıyla beraber korozyon ölçümüne ait yarı hücre potansiyel okumalarının gittikçe daha negatif değerler aldığı fakat korozyon inhibitörü katkısı kullanılan numunelere ait yarı hücre potansiyel okumalarının daha düşük negatif değerlerde kaldığı tespit edilmiştir.
- 28 gün sonunda inhibitör katkı kullanılmayan NaCl çözeltisine ait -450 mV değeri tatlı su kürüne ait değerden daha negatif değer almıştır ve -350 ile -500 mV sınır değerleri arasında kalarak korozyon riskinin %90 olduğu bölgede yer aldığı gözlemlenmiştir.
- Son kür işlemi olan 180 gün sonunda tatlı su kürüne ait korozyon inhibitörü kullanılmayan ve kullanılan numuneler arasında %53'lük yarı hücre potansiyel farkı oluşmuştur. Elde edilen bu değerler aynı zamanda korozyon inhibitörü kullanımının yarı hücre potansiyeli okumalarının daha pozitif değerler almasında önemli olduğu göstermiştir.
- NaCl çözeltisine maruz kalmış numunelerde korozyon inhibitörü kullanımının çelik donatı korozyonu açısından olumlu yönde davranış sergilediği sonucuna varılmıştır.
- Aderans dayanımları incelendiğinde ilk seride NaCl çözeltisine ait aderans dayanımları tatlı su kürüne göre daha fazla olduğu fakat ilerleyen serilerin tümünde daha düşük aderans dayanımları elde edildiği sonucuna varılmıştır. Bu durum NaCl iyonlarının aderans dayanımlarını tatlı su kürüne göre başta

daha olumlu bir şekilde etkilediği fakat kür sürelerinin artmasıyla beraber tam tersi duruma geçtiği anlaşılmıştır.

- 180 gün sonunda tatlı su kürüne tabi tutulan ve korozyon inhibitörü kullanılan ve kullanılmayan numuneler arasından %33'lük aderans dayanımı artışı tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar korozyon inhibitörü kullanımının aderans dayanımını arttırmada önemli bir rol aldığını göstermiştir.
- Elde edilen çekme-çıkarma deneyi sonuçlarına göre korozyon inhibitörü katkısı kullanılarak üretilen numunelere ait beton-donatı aderansı üzerinde olumsuz bir etki yaratmadığı görülmüştür.
- Deney sonuçları incelendiğinde çelik donatı korozyonu beklenildiği gibi kullanılan betonun hasar seviyesini arttırmış aynı zamanda daha olumsuz performans göstermesine neden olmuştur.
- Korozyon sonucu meydana gelen kayıpları en aza indirmek amacıyla, ülkelerin korozyon hakkında kendileri için özgün araştırma-geliştirme merkezlerini kurması ve bu merkezlerde yapılacak olan çalışmaların kalitesinin artırılmasıyla hem ulusal hem de uluslararası çapta oluşabilecek gelişmelerin bilim dünyası açısından faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] W. Zhang, "Effect of top-casting defects and transverse cracks on the corrosion behavior of steel in reinforced concrete exposed to chloride environment," Doktora tezi, Chongqing Üniversitesi, 2021.
- [2] W. Zhu, K. Yu, Y. Xu, K. Zhang, and X. Cai, "A prediction model of the concrete cracking induced by the non-uniform corrosion of the steel reinforcement," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 4, pp. 830–845, 2020.
- [3] F. Karaboğa, "Corrosion resistance of reinforcement steel embedded in chloride contaminated concrete with and without metakaolin," Yüksek lisans tezi, Gaziantep Üniversitesi, 2012.
- [4] H. N. Xuan, L. T. Van, B. I. Bulgakov, and O. V Alexandrova, "Strength, chloride resistance and corrosion reinforced of High-strength concrete," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, pp. 1425–1437.
- [5] U. M. Angst *et al.*, "The steel–concrete interface," *Mater. Struct.*, vol. 50, no. 2, pp. 143–167, 2017.
- [6] W. K. A. Alfouadi, "Experimental and finite element analysis of steel-concrete bond behavior," Doktora tezi, Gaziantep Üniversitesi, 2020.
- [7] A. Wojtowicz, A. Ubysz, and J. Michaek, "How vibrations affect steel-to-concrete adherence," in *MATEC Web of Conferences*, 2018, pp. 251–259.
- [8] H.-S. Lee, V. Saraswathy, S.-J. Kwon, and S. Karthick, *Corrosion Inhibitors for Reinforced Concrete: A Review*. Book Citation Index in Web of Science, 2018.
- [9] İ. B. Topçu and A. Uzunömeroğlu, "Properties of corrosion inhibitors on reinforced concrete," *J. Struct. Eng. Appl. Mech.*, vol. 3, no. 2, pp. 93–109, Jun. 2020.
- [10] L. R. Abosrra, "Corrosion of steel reinforcement in concrete. Corrosion of mild steel bars in concrete and its effect on steel-concrete bond strength," Doktora tezi, Bradford Üniversitesi, 2010.
- [11] U. M. Angst, "Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete," *Mater. Struct.*, vol. 51, no. 1, pp. 1–20, 2018.
- [12] Y. Cao, C. Gehlen, U. Angst, L. Wang, Z. Wang, and Y. Yao, "Critical chloride content in reinforced concrete — An updated review considering Chinese experience," *Cem. Concr. Res.*, vol. 117, pp. 58–68, Mar. 2019.
- [13] F. U. A. Shaikh, "Effect of Cracking on Corrosion of Steel in Concrete," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–12, Dec. 2018.
- [14] E. Sassine, S. Laurens, R. François, and E. Ringot, "A critical discussion on rebar electrical continuity and usual interpretation thresholds in the field of

- half-cell potential measurements in steel reinforced concrete,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 51, no. 4, pp. 1–12, Aug. 2018.
- [15] Z. H. Zou, J. Wu, Z. Wang, and Z. Wang, “Relationship between half-cell potential and corrosion level of rebar in concrete,” *Corros. Eng. Sci. Technol.*, vol. 51, no. 8, pp. 588–595, Nov. 2016.
- [16] J. Ožbolt, F. Oršanić, and G. Balabanić, “Modeling pull-out resistance of corroded reinforcement in concrete: Coupled three-dimensional finite element model,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 46, pp. 41–55, Feb. 2014.
- [17] A. Al-Sibahy and M. Sabhan, “Corrosion effects on the bond behaviour of steel bars in self-compacting concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 250, p. 118568, Jul. 2020.
- [18] Y. Ma, Z. Guo, L. Wang, and J. Zhang, “Experimental investigation of corrosion effect on bond behavior between reinforcing bar and concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 152, pp. 240–249, Oct. 2017.
- [19] R. A. Newsome, “Evaluating corrosive site performance of coastal bridges,” Yüksek lisans tezi, Kuzey Karolina Üniversitesi, 2020.
- [20] A. A.Elbusaefi, “The Effect of Steel Bar Corrosion on the Bond Strength of Concrete Manufactured With Cement Replacement Materials,” Doktora tezi, Cardiff Üniversitesi, 2014.
- [21] Z. Li, Z. Jin, P. Wang, and T. Zhao, “Corrosion mechanism of reinforced bars inside concrete and relevant monitoring or detection apparatus: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 279, p. 122432, Apr. 2021.
- [22] M. Farhadi, “Finite Element Modeling of Steel Corrosion in Concrete Structures,” Yüksek lisans tezi, Virginia Politeknik Enstitüsü ve Eyalet Üniversitesi, 2018.
- [23] H. Yiğiter, “Betonarme donatısında klorid korozyonu gelişiminin elektrokimyasal yöntemlerle belirlenmesi,” Doktora tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2008.
- [24] Ö. Karadağ, “Standart ve ölçülmüş k-değerlerine göre uçucu kül içeren betonların donatı korozyonuna karşı eşdeğer dayanıklılık performanslarının karşılaştırılması,” Yüksek lisans tezi, Gebze Teknik Üniversitesi, 2018.
- [25] H. Feng, L. Cui, and M. Zhang, “Steel corrosion behavior measurement based on electrochemical approach,” *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 11, no. 6, pp. 4658–4666, 2016.
- [26] U. Angst, B. Elsener, C. K. Larsen, and Ø. Vennesland, “Critical chloride content in reinforced concrete - A review,” *Cement and Concrete Research*, vol. 39, no. 12. Pergamon, pp. 1122–1138, Dec. 01, 2009.
- [27] S. Taban, “Farklı oranlarda zeolitik tüf katkısının beton özellikleri ve betonarme çeliği korozyonuna etkilerinin araştırılması,” Doktora tezi, Gazi

Üniversitesi, 2010.

- [28] A. S. Amiri, “A Comparison Between Ultrasonic Guided Wave Leakage and A Comparison Between Ultrasonic Guided Wave Leakage and Half-Cell Potential Methods in Detection of Corrosion in Half-Cell Potential Methods in Detection of Corrosion in Reinforced Concrete Structure,” Doktora tezi, Nebraska Üniversitesi, 2020.
- [29] V. Volpi-León, L. D. López-León, J. Hernández-ávila, M. A. Baltazar-Zamora, F. J. Olguín-Coca, and A. L. López-León, “Corrosion study in reinforced concrete made with mine waste as mineral additive,” *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 12, no. 1, pp. 22–31, 2017.
- [30] A. L. Sartori, L. M. Pinheiro, R. M. Da Silva, S. B. Freitas, and T. G. Cesar, “Adherence between steel bars and lightweight concrete with EPS beads,” *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.*, vol. 10, no. 1, pp. 122–159, 2017.
- [31] B. O. Yalçın, “Soğuk ortamda üretilen betonarme elemanların donatı aderansının incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Gümüşhane Üniversitesi, 2019.
- [32] A. Şahin, “F tipi uçucu kül kullanımının mafsallı giriş deneyi ile aderans etkisinin deneysel olarak incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, KTO Karatay Üniversitesi, 2019.
- [33] A. Brencich, “A post-installed insert for pull-out tests on concrete up to 70 MPa,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 95, pp. 788–801, Aug. 2015.
- [34] K. Tsiotsias and S. J. Pantazopoulou, “Analytical Investigation on the Effect of Test Setup on Bond Strength,” *CivilEng*, vol. 2, no. 1, pp. 14–34, 2021.
- [35] J. Hu *et al.*, “The effect of organic core-shell corrosion inhibitors on corrosion performance of the reinforcement in simulated concrete pore solution,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 267, p. 121011, Jan. 2021.
- [36] C. Pan *et al.*, “Effects of corrosion inhibitor and functional components on the electrochemical and mechanical properties of concrete subject to chloride environment,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 260, p. 119724, Nov. 2020.
- [37] M. Harilal *et al.*, “The chloride-induced corrosion of a fly ash concrete with nanoparticles and corrosion inhibitor,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 274, p. 122097, Mar. 2021.
- [38] W. Xu, J. Wei, Z. Yang, P. Xu, and Q. Yu, “Feasibility and corrosion inhibition efficacy of zeolite-supported lauric acid imidazoline as corrosion inhibitor in cementitious mortar,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 250, p. 118861, Jul. 2020.
- [39] X. Y. Wang, S. Lee, and H. Cho, “Penetration properties and injecting conditions of corrosion inhibitor for concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 284, p. 122761, May 2021.
- [40] “ASTM C 876-91: Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated

Reinforcing Steel in Concrete,” 1991.

- [41] R. Ögüt, “Bazalt lifi kullanımının betonun mekanik özelliklerine ve korozyon dayanıklılığına etkisi,” Yüksek lisans tezi, Dumlupınar Üniversitesi, 2020.
- [42] A. Jansson, “Effects of Steel Fibres on Cracking in Reinforced Concrete,” Doktora tezi, Chalmers Teknoloji Üniversitesi, 2011.
- [43] A. R. Boğa, “Yüksek fırın cürufu ve korozyon inhibitörü kullanımının beton içerisindeki donatı korozyonuna ve beton özelliklerine etkileri,” Doktora tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 2010.
- [44] Ö. Aydın, “Beton yapılarda donatı korozyonunun önlenmesine yönelik tedbirlerin araştırılması,” Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2012.
- [45] A. R. Boğa, “Uçucu küllü betonarme elemanlarda donatı korozyonunun hızlandırılmış yöntemlerle araştırılması,” Yüksek lisans tezi, Osmangazi Üniversitesi, 2005.