

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KLORÜR MİKTARININ VE GERİLMENİN DONATI ÇELİĞİNİN
KOROZYONUNA ETKİSİ

İslam ÇELİK

TEZ DANIŞMANI

Doç. Dr. İlker USTABAŞ

JÜRİ ÜYELERİ

Prof. Dr. Korhan OZGAN

Dr. Öğr. Üyesi Ali GÜRBÜZ

RİZE - 2022

Her Hakkı Saklıdır

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KLORÜR MİKTARININ VE GERİLMENİN DONATI ÇELİĞİNİN
KOROZYONUNA ETKİSİ

Doç. Dr. İlker USTABAŞ danışmanlığında, İslam ÇELİK tarafından hazırlanan bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulu kararı ile oluşturulan jüri tarafından 14/02/2022 tarihinde İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Unvanı, Adı Soyadı	İmza
Başkan	: Prof. Dr. Korhan OZGAN	
Üye	: Doç. Dr. İlker USTABAŞ	
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Ali GÜRBÜZ	

Doç. Dr. Ahmet YANIK
ENSTİTÜ MÜDÜRÜ

ÖNSÖZ

Donatı çeliği inşaat sektöründe en yaygın kullanılan yapı malzemelerinden biridir. İnşaat sektöründe kullanılan donatı çelikleri doğası gereği sürekli olarak korozyona uğrama eğilimindedirler. Donatının korozyona uğraması yapıların güvenliği etkilemektedir ve önemli bakım masrafları oluşturmaktadır. Donatı çeliğinin korozyondan korunmasında yeterli kalınlık ve özellikle beton örtüsü kullanılması önemli bir korozyondan korunma yöntemi olmaktadır. Ancak zaman içerisinde betonda gelişen karbonatlaşma ya da beton içerisinde bulunan veya dış ortamdan gelen klor gibi zararlı iyonlar beton örtüsünün koruyuculuğunu azaltarak donatının korozyona uğramasına yol açmaktadır. Bu yüzden çevrenin bozucu etkilerine maruz donatı çeliği veya betonarme elemanlarda korozyon mekanizmasının nasıl ilerleyeceği, yapının servis ömrünün tahmini, ilgili yapıların korozyondan dolayı nasıl bakım uygulanacağı gibi işlemlerde donatı çeliğinde korozyon ilerleme hızının tespit edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada elektrokimyasal yöntemle farklı klorür içeriğine sahip ortamlarda ve donatıda farklı gerilme durumlarında çelikteki korozyon hızları ölçülerek elde edilen korozyon değerlerinin betonarmedeki donatı çeliği ile ilişkileri karşılaştırılmıştır. İnşaat mühendisliğinde kullanılan donatı çeliklerinin farklı klorür içerikleri ve farklı gerilme seviyeleri altında uğradığı korozyon incelenmiştir.

Çalışma için kullanılan çelikler Karabük demir çelik fabrikasından temin edilmiştir. Donatı çeliklerinin işlenmesi ve korozyon hızı ölçümleri Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi İnşaat ve Makine Mühendisliği Bölümleri laboratuvarlarında yapılmıştır.

Bu çalışmanın bu noktaya gelinceye kadar emeği geçen Doç. Dr. İlker USTABAŞ, Doç. Dr. Ali Paşa HEKİMOĞLU, Doç. Dr. Murat ŞİRİN, Doç. Dr. Derya BAL ALTUNTAŞ ve Arş. Gör. Murat HACIOSMANOĞLU'na teşekkür ederim.

İslam ÇELİK

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Tarafımdan hazırlanan “ Klorür Miktarının ve Gerilmenin Donatı Çeliğinin Korozyonuna Etkisi” başlıklı bu tezi, Yükseköğretim Kurulu Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesindeki hususlara uygun olarak hazırladığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal işlemi kabul ettiğimi beyan ederim. 14/02/2022

İslam ÇELİK

Uyarı: Bu tezde kullanılan özgün ve/veya başka kaynaklardan sunulan içeriğin kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

KLORÜR MİKTARININ VE GERİLMENİN DONATI ÇELİĞİNİN KOROZYONUNA ETKİSİ

İslam ÇELİK

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışmanı: Doç. Dr. İlker USTABAŞ

Betonarme yapı elemanları ulaşımdan sağlığa, altyapıdan barajlara kadar çok çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır. Bu yapı elemanları servis ömürleri boyunca oldukça şiddetli çevre koşullarına maruz kalabilmektedir. Bundan dolayı betonarme yapılarda servis ömürleri boyunca çeşitli hasarlar ortaya çıkabilmektedir. Bu hasarların sebeplerinden en önemlilerinden biri çelik donatıların korozyonudur. Betonarme elemanlarda kullanılan çelik donatılar servis ömürleri boyunca çeşitli yükler altında ve farklı çevresel koşullar altında bulunur. Bu çevresel koşullar ve yüklerden dolayı meydana gelen gerilmeler altında çelik donatıya betonarme eleman içinde yeterli koruma sağlanmamışsa donatının korozyona uğraması kaçınılmazdır. Bu korozyon kendiliğinden oluşabileceği gibi ortamda bulunan klorürler, sülfatlar vb. birçok zararlı maddeler yüzünden de gerçekleşebilir. Ortaya çıkan bu durumda yapı güvenliği olumsuz etkilenir, ekonomik ve çevresel sorunlar ortaya çıkar.

Bu çalışmada saf su, musluk suyu, deniz suyu, 0,5 ve 1 mol/litre klorür konsantrasyonlarında ve çelik çekme cihazıyla elastik, akma, çekme ve kopma dayanımlarında gerilme uygulanan B420C sınıfı çelik donatıların elektrokimyasal yöntemle korozyona uğrama hızları ölçülmüştür. Kimyasal ölçümler için klasik üç elektrot yöntemi kullanılmış, sonuçlar tafel polarizasyon yöntemi ile analiz edilmiştir. Çelik donatıların yüzeyinde meydana gelen değişimleri gözlemek için SEM/EDS analizi ve mikro yapısal inceleme yapılmıştır.

Çalışma sonucunda klorür miktarı artan ortamlarda korozyon hızının arttığı görüldü. Donatı çeliğine gerilme uygulanması çekme bölgesine kadar korozyon hızını arttırdığı, kopma bölgesindeki donatı çeliğinde ise yaklaşık olarak elastik bölgede gerilme görmüş donatı seviyesinde korozyon hızının olduğu tespit edildi.

2022, 92 Sayfa.

Anahtar Kelimeler: Donatı korozyonu, Üç elektrot yöntemi, Tafel polarizasyon yöntemi, Korozyon Hızı, Klorür içeriği

ABSTRACT

THE EFFECT OF CHLORIDE CONTENT AND STRESS ON THE CORROSION OF REINFORCING STEEL

İslam ÇELİK

**Recep Tayyip Erdoğan University
Graduate Education Institute
Civil Engineering Department
Master's Thesis
Consultant: Doç. Dr. İlker USTABAŞ**

Reinforced concrete structural elements are used in a wide variety of sectors, from transportation to health, from infrastructure to dams. These structural elements can be exposed to severe environmental conditions throughout their service life. Therefore, various damages may occur in reinforced concrete structures during their service life. One of the most important causes of these damages is the corrosion of steel reinforcements. Steel reinforcements used in reinforced concrete elements are under various loads and different environmental conditions throughout their service life. If adequate protection is not provided to the steel reinforcement in the reinforced concrete element under the stresses caused by these environmental conditions and loads, corrosion of the reinforcement is inevitable. This corrosion can occur spontaneously, as well as chlorides, sulfates, etc. in the environment. It can also happen because of many harmful substances. In this situation, the building safety is adversely affected, and economic and environmental problems arise.

In this study, the corrosion rates of B420C class steel reinforcements, which are stressed in pure water, tap water, sea water, 0.5 and 1 mol/liter chloride concentrations and elastic, yield, tensile and tensile strengths with a steel drawing device, were measured by electrochemical method. The classical three-electrode method was used for chemical measurements, and the results were analyzed by the Tafel polarization method. SEM/EDS analysis and microstructural examination were carried out to observe the changes on the surface of the steel reinforcements.

As a result of the study, it was observed that the corrosion rate increased in environments with increasing chloride content. It was determined that the application of stress to the reinforcing steel increased the corrosion rate up to the tensile zone, and the corrosion rate in the reinforcing steel in the rupture zone was approximately at the level of the reinforcement that was stressed in the elastic zone.

2022, 92 Pages.

Anahtar Kelimeler: Reinforcement corrosion, Three-Electrode method, Tafel polarization method, Corrosion rate, Chloride content.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
TEZ ETİK BEYANNEMESİ	II
ÖZET	III
ABSTRACT.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
TABLolar DİZİNİ.....	X
SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ	XI
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler.....	1
1.2. Korozyon Mekanizması.....	3
1.3. pH'ın Korozyona Etkisi	9
1.4. Klor İçeriğinin Korozyona Etkisi	11
1.5. Sülfat İçeriğinin Korozyona Etkisi	12
1.6. Korozyon Ölçüm Yöntemleri	13
1.6.1. Kimyasal Korozyon Ölçüm Yöntemi.....	13
1.6.2. Elektriksel Korozyon Ölçüm Yöntemi.....	14
1.6.3. Elektrokimyasal Yöntemler	15
1.6.3.1. Potansiyodinamik Yöntem	15
1.6.3.2. Potansiyostatik Yöntem.....	15
1.6.3.3. Galvanostatik Yöntem	16
1.7. Korozyon Hızını Belirleme Yöntemleri	16
1.7.1. Tafel Polarizasyon Yöntemi.....	16
1.7.2. Lineer Polarizasyon Yöntemi.....	18
1.7.3. Elektro Kimyasal İmpedans Spektroskopisi (EIS) Yöntemi.....	19
1.7.4. Dinamik Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi (DEIS) yöntemi.....	20

1.7.5.	Harmonik Analiz (HA) Yöntemi	21
1.8.	Mekanik yüklerin korozyona etkisi	21
1.9.	Korozyondan Korunma Yöntemleri	22
1.10.	Literatür Özeti.....	25
2.	MALZEME VE DENEYLER	31
2.1.	Kullanılan malzemeler.....	31
2.2.	Elektrokimyasal Ölçüm Yöntemi	35
2.3.	SEM/EDS Analizi.....	38
3.	BULGULAR.....	39
3.1.	Elektrokimyasal yöntemle bulunan korozyon değerleri	40
3.2.	SEM/EDS Analizleri.....	52
4.	TARTIŞMA VE SONUÇ	68
KAYNAKLAR		75
ÖZGEÇMİŞ		Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. (a) Beton içindeki donatının korozyon mekanizmasının şematik gösterimi, (b) Gerçek gösterimi.....	4
Şekil 2. Klorürlerin neden olduğu donatı korozyonunun gelişme aşamaları (Poupard vd., 2004).	6
Şekil 3. Korozyon olayı sonucu oluşan demir oksitlerde hacim artışı ve etkileri (Baradan vd., 2010).	7
Şekil 4. Demir-Su sistemi için sulu ortamda Pourbaix diyagramı (Gerengi, 2008).	10
Şekil 5. (a) Donatıda korozyon gelişmemiş bir betonarme eleman kesiti, (b) eşdeğer elektrik devresi (Çil, 2006).	14
Şekil 6. Tafel ekstrapolasyon yöntemiyle korozyon akımı (I_{corr}) ve korozyon potansiyelinin (E_{corr}) bulunması (Gerengi, 2008).	17
Şekil 7. Lineer polarizasyon yöntemi ile polarizasyon direnci (R_p) bulunması (H. Gerengi, 2008).	18
Şekil 8. Nyquist Grafiği.	20
Şekil 9. Çelik donatıları çekme deneyinin uygulanması.....	32
Şekil 10. Donatı çeliğinin gerilme-şekil değiştirme diyagramı.	33
Şekil 11. Çelik donatıların tornada sıyrılmış ve sıyrılmamış durumları.	34
Şekil 12. Tornalama işlemi sonrası demir numunelerin dilimlenmesi.	34
Şekil 13. Yüzey parlatma işleminden sonra korozyon deneyine hazır hale getirilen numune.....	34
Şekil 14. Elektrokimyasal korozyon deneylerinin yapıldığı üç elektrot sistemi.	36
Şekil 15. Anot olarak kullanılan çelik donatı numuneleri.	36
Şekil 16. Katot olarak kullanılan paslanmaz platin elektrot.	37
Şekil 17. Referans elektrot olarak kullanılan doymuş kalomel elektrot.	37
Şekil 18. Çelik donatıların saf sudaki korozyon deneylerinden elde edilen tafel polarizasyon eğrileri.	40
Şekil 19. Saf su ortamında farklı gerilmelere maruz kalmış çelik donatılardaki korozyon hızları.	41
Şekil 20. Çelik donatıların musluk suyundaki korozyon deneylerinden elde edilen tafel polarizasyon eğrileri.	42
Şekil 21. Musluk suyu ortamında farklı gerilmelere maruz kalmış çelik donatılardaki korozyon hızları.	42

Şekil 22. Çelik donatıların 0,5M NaCl çözeltisindeki korozyon deneylerinden elde edilen tafel polarizasyon eğrileri.	44
Şekil 23. 0,5M NaCl çözeltisi ortamında farklı gerilmelere maruz kalmış çelik donatılardaki korozyon hızları.	44
Şekil 24. Çelik donatıların 1M NaCl çözeltisindeki korozyon deneylerinden elde edilen tafel polarizasyon eğrileri.	45
Şekil 25. 1M NaCl çözeltisi ortamında farklı gerilmelere maruz kalmış çelik donatılardaki korozyon hızları.	46
Şekil 26. Çelik donatıların deniz suyundaki korozyon deneylerinden elde edilen tafel polarizasyon eğrileri.	47
Şekil 27. Deniz suyu ortamında farklı gerilmelere maruz kalmış çelik donatılardaki korozyon hızları.	47
Şekil 28. Elektrokimyasal korozyon deneylerinin sonucunda elde edilen korozyon hızları.	48
Şekil 29. Farklı çözeltilerde gerçekleştirilen korozyon deneylerinin sonucunda bulunan korozyon hızları.	51
Şekil 30. Gerilme uygulanmamış ve korozyon deneyine tabi tutulmamış numunenin SEM görüntüsü.	53
Şekil 31. Elastik bölgede gerilme uygulanmış ve korozyon deneyine tabi tutulmamış numunenin SEM görüntüsü.	53
Şekil 32. Akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve korozyon deneyine tabi tutulmamış numunenin SEM görüntüsü.	54
Şekil 33. Çekme dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve korozyon deneyine tabi tutulmamış numunenin SEM görüntüsü.	54
Şekil 34. Kopma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve korozyon deneyine tabi tutulmamış numunenin SEM görüntüsü.	55
Şekil 35. Gerilme uygulanmamış ve musluk suyunda korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüsü.	56
Şekil 36. Akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve musluk suyunda korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüsü.	56
Şekil 37. Çekme dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve musluk suyunda korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüsü.	57

Şekil 38. Gerilme uygulanmamış ve 1 M NaCl çözeltisinde korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüsü.	58
Şekil 39. Akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve 1M NaCl çözeltisinde korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüsü.	58
Şekil 40. Çekme dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve 1 M NaCl çözeltisinde korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüsü.	59
Şekil 41. Kopma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve 1M NaCl çözeltisinde korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüsü.	59
Şekil 42. Akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve deniz suyunda korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüsü.	60
Şekil 43. Çekme dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve deniz suyunda korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüsü.	61
Şekil 44. Kopma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve deniz suyunda korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüsü.	61
Şekil 45. Akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve korozyon deneyine tabi tutulmamış numunenin EDS analizi.	63
Şekil 46. Akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve musluk suyu ortamında korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin EDS analizi.	64
Şekil 47. Akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve 1M NaCl çözeltisi ortamında korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin EDS analizi.	65
Şekil 48. Akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve deniz suyu ortamında korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin EDS analizi.	66

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Çimento ağırlığının yüzdesi olarak kritik klorür içeriği (Miyagawa, 1991).	5
Tablo 2. Çalışmada kullanılan donatı çeliğinin kimyasal analizi (%)	31
Tablo 3. Kullanılan musluk suyunun kimyasal analizi.....	35
Tablo 4. Karadeniz deniz suyunun kimyasal analizi.	35
Tablo 5. Çelik çekme deneyi sonuçları.....	39
Tablo 6. Elektrokimyasal korozyon deneyleri sonucunda bulunan deney sonuçları.....	50



SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ

I_{corr}	Korozyon Akımı
CTV	Kritik Klorür İçeriği
E_{corr}	Korozyon Potansiyeli
β_a	Tafel Polarizasyon Eğrisi Anodik Kol Eğimi
β_c	Tafel Polarizasyon Eğrisi Katodik Kol Eğimi
R_p	Korozyon Direnci
Z	Empedans
AC	Alternatif Akım
Φ	Demir Donatı Çapı
OCP	Açık Devre Potansiyel Eğrisi
KH	Korozyon Hızı
EW	Malzeme Özgün Eşdeğer Kütle
Ω	Korozyon Direnci Birimi (ohm)

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgiler

Betonarme, beton ve çelik donatının birlikte kullanılmasıyla oluşan kompozit bir yapı malzemesidir. Bu kompozit malzemenin matris fazını beton, lif fazını çelik donatı oluşturmaktadır. Betonarmede, beton ve çeliğin birbirine iyi kenetlenmesi yani aderansının yüksek olması gerekmektedir. Betonarme yapılarda malzemenin maruz kaldığı yükler karşısında oluşan gerilmeleri beton ve çelik birlikte karşılamaktadırlar. Bu birlikte çalışma mekanizması yapının maruz kaldığı yıpratıcı çevresel etkenler, tasarım ve uygulama hataları gibi çeşitli nedenlerden dolayı bozulabilmektedir. Özellikle çelik donatının korozyonu, beton ve çeliğin aderansını zayıflatan, donatı kesitinin azalması sonucu çekme gerilmelerine karşı dayanımı düşürüp betonarme yapı elemanının ömrünü kısaltan bir elektrokimyasal bozulma mekanizmasıdır. Aynı zamanda donatı korozyonu betonarme yapının ömrünü belirleyen en önemli bozulma mekanizmalarından biridir. Donatı korozyonundan dolayı betona gömülü donatının çevresinde hacim artışı meydana gelmektedir. Böylelikle bu hacim artışı betonun pas payının çatlamasına, dökülmesine ve betonarme yapının hasar görmesine yol açmaktadır.

Beton, çimento, agrega, su ve gerektiği zaman katkıları kullanılarak üretilen, betonarmede donatıyı sararak onu dış ortamdan gelebilecek nem, klorür iyonu gibi zararlılara karşı koruyan malzemedir. Betonun pH değeri 12,5 ile 13,5 arasındadır. Bu yüksek alkali ortam sayesinde beton, donatı çeliğinin korozyona uğramasını engellemektedir. Beton ve çeliğin ısı genleşmelerinin birbirine yakın olması bu iki malzemenin birlikte çalışmasını sağlamaktadır. Beton ile çeliğin yük taşıyabilme kapasitesinin yüksek olması ve birbirleriyle uyumlu çalışması bu malzemenin yapıların taşıyıcı elemanlarında kullanılmasına yol açmıştır. Betonarme yapıda, beton basınç kuvvetlerini taşıırken, donatı ise çekme kuvvetlerini karşılamaktadır. Betonarme, sahip olduğu üstün dayanım ve dayanıklılık, kolay üretim, çok yönlülüğü, hizmet ömrü boyunca düşük bakım maliyeti, enerji verimliliği, geniş ve ulaşılabilir hammadde yelpazesi nedeniyle günümüzde inşaat sektöründe en çok kullanılan ve önemi sürekli artan yapı malzemesidir. Betonarmeyi bu şekilde üstün yapı malzemesi yapan unsur sahip olduğu bu özelliklerin yanında zorlu çevre şartlarına direnç gösterebilmesi ve dayanıklı olabilmesidir. Ancak korozyon betonarmenin güvenliği için oldukça tehlikeli bir

etmemidir. Betona korozyona sebep olan zararlı tuzların nüfuz etmesi ya da beton karbonatlaşması sonucu betonun alkali ortamını kaybetmesi çelik donatıda korozyona yol açabilmekte ve yapı güvenliğini tehlikeye atarak betonarme yapı elemanlarında geri dönülemez hasarlara neden olabilmektedir. Bu hasarların en aza indirilmesi için betonun basınç dayanımı yüksek, boşluk oranının düşük ve geçirimsizliğinin az, net beton örtü kalınlığının (paspayı) yeterli ve sürekli olması çok önemlidir.

Türkiye’de yapılan yapı incelemelerinde düşük dayanım sınıfı ile birlikte sıklıkla donatı korozyonuna da rastlanmaktadır (Ustabaş, 2012; Doğan, 2015). Betonarme yapı elemanlarında donatı korozyonun oluşması ve gelişimi karmaşık kimyasal ve elektrokimyasal mekanizma altında yürümektedir. Yapı ömrünü direkt etkileyen donatı korozyonu mekanizması araştırmacılar tarafından sıklıkla çalışılan konular arasında yer almaktadır (Zhang vd., 2009). Farklı çevresel şartlar altında donatı korozyonunun nasıl oluştuğu, betonarme yapı elemanlarında donatı korozyon hızının tespiti en çok çalışılan konular arasında yer almaktadır (Moreno vd., 2004).

Betonarme yapı elemanlarında yapı ömrünün azalması ve hasarların ortaya çıkmasında en önemli etkenlerden bir tanesi donatı korozyonudur (Nahali vd., 2014). Normal şartlar altında betonun içinde bulunan donatı, betonun sahip olduğu yüksek alkali ortam sayesinde pasif halde bulunur ve korozyona karşı iyi şekilde korunmaktadır (Tang vd., 2012). Betonun çeşitli nedenlerden dolayı yapısının bozulmasının sonucunda ortama giren klorür ve sülfat gibi çeşitli zararlı iyonlar bu pasifliği ortadan kaldırır ve donatının korozyona uğramasını sağlar. Ortamda bulunan klorür veya sülfat içeriği arttıkça donatıda meydana gelen korozyon hızı ve miktarı da artış gösterir (Moreno vd., 2004). Bu şekilde meydana gelen olaylar sonucunda yapının bütünlüğü bozulur ve yapısal hasarlar meydana gelerek yapının kullanım ömrü azalır.

Betonarme yapıların servis gördükleri ortamlarda nasıl bozulma etkilerine maruz kaldıklarının bilinmesi yapılara uygulanacak bakımların ne zaman yapılması gerektiğini belirlemek için önemlidir. Betonarme yapılarda donatıların ne zaman korozyona uğrayabileceği, korozyona uğrama hızlarının tespiti ile ilgili birçok yöntem araştırmacılar tarafından önerilmektedir. Donatılar betonarme içerisinde şüphesiz sürekli yük altında bulunmaktadır. Bu yüklerden dolayı donatılar üzerinde gerilmeler meydana gelmektedir. Bu gerilmelerin donatının korozyon mekanizmasını nasıl etkilediğine dair araştırmalar ise oldukça kısıtlı kalmaktadır. Daha önceki yapılan araştırmalar donatının elastik deformasyonlarda nasıl etkilendiğine odaklanmıştır. Bu çalışmamızda ise Türkiye’de

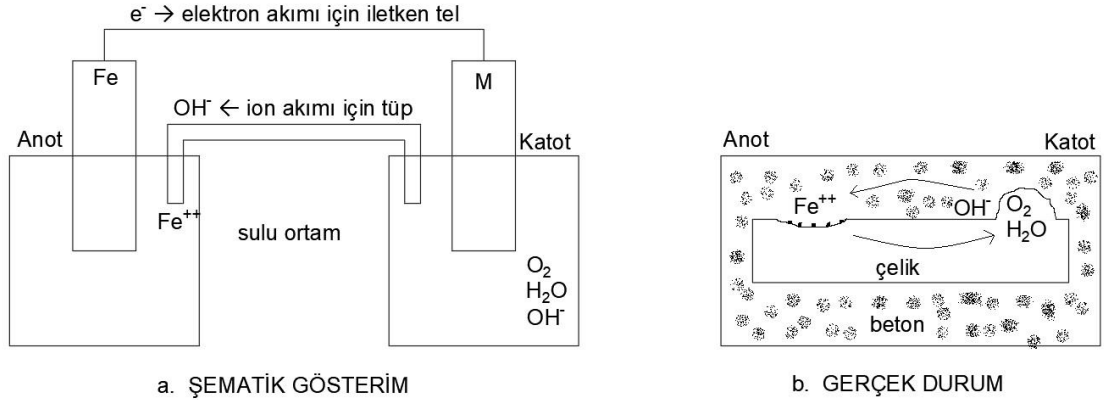
çoğu inşaatda kullanılan B420C sınıfı düşük karbonlu çelik donatının kritik gerilme noktalarında uygulanan gerilmelerin ortamda klorür iyonu varlığında donatının korozyonuna nasıl etki edeceği araştırılacaktır.

Bu çalışmada farklı klorür içeriğine sahip çözeltilerde farklı gerilme kuvvetlerine maruz kalmış çelik donatılarda polarizasyon yöntemine göre korozyon hızları ölçülmüştür. Bu ölçülen donatı korozyon hızının çevresel bozulma mekanizmasına maruz yapı betonlarındaki donatı korozyonları ile kıyaslamaları yapılmıştır.

1.2. Korozyon Mekanizması

Betonarme elemanlarda korozyon en basit tarifle çelik donatının doğada bulunan düşük enerjili temel hal seviyesine dönme isteğidir. Dünya atmosferinde donatı çeliği olarak kullanılan malzeme kararlı değildir ve her zaman oksijen ve su ile reaksiyona girerek daha düşük enerjili seviyelere dönmek ister. Bu kendiliğinden gerçekleşen bir olaydır ve önlem alınmazsa hiçbir şekilde engellenemez. Betonarme yapılarda beton donatıya korozyona karşı direnç göstermesi için gerekli olan ortamı sağlar. Ancak betonun içinde bulunan donatı, dış etkenlerden dolayı betonun yapısının bozulmasının sonucunda havayla ve nemle temas ederek korozyona uğrar.

Doğada altın ve platin dışındaki bütün metaller oksitler, sülfatlar, silikatlar ve karbonatlar olarak farklı bileşik halinde ve düşük enerji seviyelerinde (temel hal) kararlı olarak bulunurlar (Aköz ve Çakır, 2014). Metalleri bu kararlı yapılarından ayırıp yapı malzemesi olarak kullanılabilecek seviyeye getirmek oldukça enerji gerektiren bir olaydır ve süreç sonunda metaller yüksek enerji seviyelerinde kararsız bir hale gelir. Bu durumdaki metallerin doğadaki düşük enerjili hale dönme eğilimleri korozyonun temel nedenidir. Yaklaşık olarak her yıl üretilen metalik malzemelerin geri kazanım süreçleri de dâhil edildiğinde yaklaşık olarak %90'ı kullanılabilir halde olurlar. %10'luk kısım doğadaki kararlı haline dönerek yapı malzemesi olarak kullanılamaz hale gelir. Tüm dünyada metal maddelerin ulaşımından tarıma, inşaatından gemicilik sektörüne kadar her türlü yerde kullanıldığı düşünüldüğü zaman bu oran sınırlı kaynaklarımızın olduğu dünyada çok fazladır. İnşaat sektörü için donatının korozyonunu önlemek çok önemlidir. Beton içinde bulunan donatının korozyona uğraması için birçok etken olmasına rağmen sadece hava ile temas halinde olması bile yetmektedir. Bunun için betonun kaliteli yapılıp donatının yeterli miktarda korunması gerekir.



Şekil 1. (a) Beton içindeki donatının korozyon mekanizmasının şematik gösterimi, (b) Gerçek gösterimi.

Şekil 1 (a)'da görüldüğü gibi betonarme içerisinde oluşan korozyon mekanizmasını simüle etmek için anot ve katot oluşumunu sağlayan demir ve farklı bir metal, beton matrisinin oluşturduğu elektrolit çözelti için iletken tel ve tüp kullanılarak korozyon mekanizması sağlanabilir. Şematik gösterimde anot kısmında açığa çıkan elektronlar iletken tel yardımıyla katot bölgesine taşınır ve burada kullanılır. Korozyon reaksiyonları bu şekilde gerçekleşir. Şekil 1(b)'de görüldüğü gibi betonarme içerisinde oluşan korozyon mekanizmasında çelik yüzeyinde oluşan farklı elektrokimyasal potansiyellere sahip anodik ve katodik bölgeler, beton matrisindeki çözeltilerin oluşturduğu elektrolit çözelti ile birleşir ve donatının kendisi de elektronları ileten iletken tel muamelesi görür. Korozyon olayının gerçekleşmesi için elektronların açığa çıktığı anodik reaksiyon ve elektronların tüketildiği katodik reaksiyonların gerçekleşmesi gerekir. Aşağıda bu anodik ve katodik reaksiyonlar gösterilmiştir.

Anot Reaksiyonları:

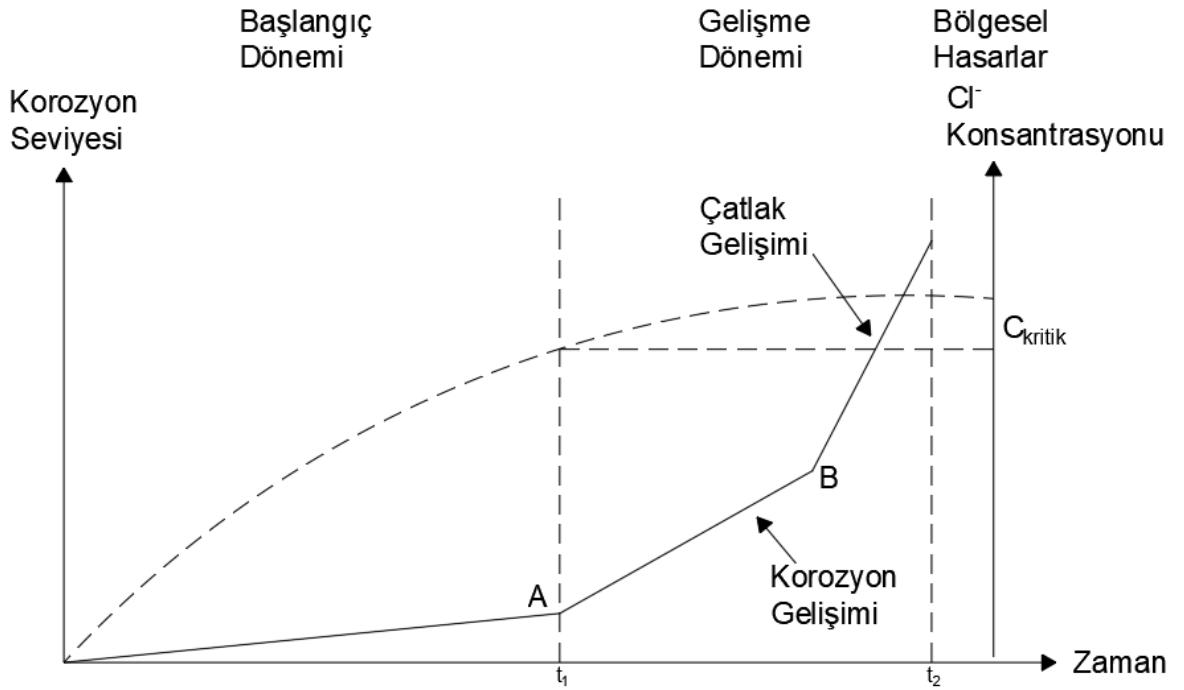


Katot Reaksiyonları:

Ortamda yeterince Cl^- iyonu bulunduğu zaman anot reaksiyonları 1.d ve 1.e de gösterilen şekilde ilerler. Cl^- iyonunun artması donatıdaki korozyon şiddetini de arttırmaktadır. Standartlarda donatının korozyonuna neden olan Cl^- miktarı çimento ağırlığının yüzdesi olarak çelik donatı ihtiva etmeyen betonlarda % 1, çelik donatı ihtiva eden betonlarda % 0,2 – 0,4, öngermeli betonlarda ise % 0,1 – 0,2 aralığında verilmiştir (TS EN 206, 2012). Ancak donatı korozyonunun belirlenmesinde serbest klorür miktarının bilinmesi yeterli değildir. Beton-donatı arayüzündeki boşluk suyunda $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ oranının kritik değer olan 0,6'yı aşması durumunda donatıda koruyucu film tabakası parçalanır ve donatı korozyona karşı korumasız hale gelir (Yu vd., 2012).

Tablo 1. Çimento ağırlığının yüzdesi olarak kritik klorür içeriği (Miyagawa, 1991).

Çimento ağırlığının %'si olarak eşik değeri	Korozyon durumu	Korozyon aktivite seviyesi
$\text{Cl}^- < \%0,3$	Düşük korozyon durumu	A
$\%0,3 \leq \text{Cl}^- < \%1,0$	Orta derece korozyon durumu	B
$\text{Cl}^- \geq 1,0$	Yüksek korozyon durumu	C

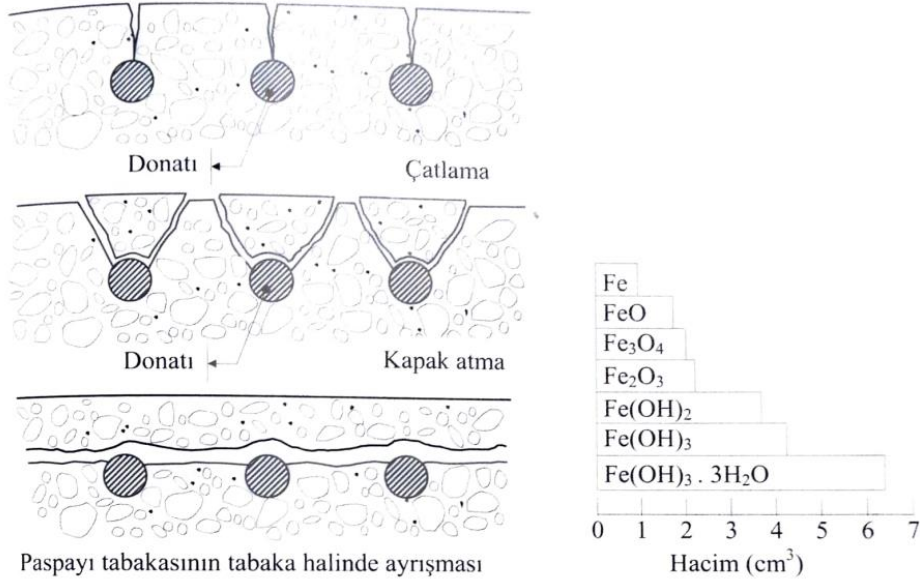


Şekil 2. Klorürlerin neden olduğu donatı korozyonunun gelişme aşamaları (Poupard vd., 2004).

Donatı korozyonunun betonarme eleman içerisinde gelişmesi Şekil 2’de gösterilmiştir. Buna göre t_1 ’e kadar olan zaman aralığında beton içerisine klorür iyonları girişi olmakta ve klorür iyonları beton içerisinde ve donatı yüzeyinde birirmektedir. Bu zaman aralığına başlangıç dönemi denilmektedir. Bu birikim gelişme dönemi boyunca belirli bir zaman devam eder ve t_2 ’ye gelindiğinde klorür iyonlarının konsantrasyonu kritik klorür içeriğine ulaştığı zaman donatı yüzeyindeki donatıyı korozyona karşı koruyan pasif film tabaka parçalanır. Bu zamandan sonra donatı korozyonu hızlanır ve yapıda donatı korozyonuna bağlı bölgesel hasarlar ortaya çıkmaya başlayarak yapıya hasar verir ve nihayetinde betonarme yapı kullanılamaz hale gelir.

Katotta açığa çıkan hidroksit ve anotta açığa çıkan demir iyonları birleşerek 1.b deki denkleme göre ferrohidroksite, sonra da kararlı form olan 1.c denklemindeki gibi ferrihidroksite (pas) dönüşür. Donatıyı kaplayan pas tabakası ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), aynı zamanda donatıyı korozyona karşı koruyan pasifleştirici tabakadır. Bu tabaka bileşiğe bağlı olarak 6 kata kadar hacim artışı gösterebilir. Hacim artışı başlangıçta boşlukları doldurarak donatı ile beton matrisi arasında aderansı artırır ancak zaman ilerledikçe beton iç gerilmelerini arttırarak çatlamlar, dökülmeler ve örtü betonun betondan ayrılması gibi olaylar gözükür. Bu olaylar birbirini zincirleme olarak etkileyerek daha da hızlandırır.

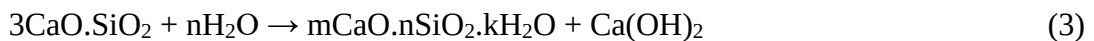
Korozyon oluştukça beton çatlar, beton çatladıkça daha fazla korozyon oluşur. Sonunda betonarme elemanda hasar oluşur ve yapının ömrü kısalmır. Aşağıda şekil 3’te bu olay görsel ile gösterilmiştir.



Şekil 3. Korozyon olayı sonucu oluşan demir oksitlerde hacim artışı ve etkileri (Baradan vd., 2010).

Gözenekliliği (porozitesi) düşük, yoğunluğu fazla, örtü beton kalınlığı (paspayı) yeterli ve kaliteli imal edilmiş bir betonda korozyon tehlikeli sınırlara ulaşmamaktadır. Çünkü korozyonun oluşması için oksijen ve suyun donatıya ulaşması gerekmektedir. Geçirimliliği düşük betonda oksijen ve suyun donatıya ulaşması gerçekleşmeyeceği için korozyon çok sınırlı miktarda kalacaktır ve yapı güvenliği tehlikeye girmeyecektir. Ancak betonun karbonatlaşması veya betona mineral katkı (puzolan) eklenmesi gibi pH’ı düşüren etmenler sonucunda ortamda yeterli miktarda bulunan Cl⁻ iyonları donatı korozyonuna sebebiyet verebilecektir.

Çimentonun ana bileşenleri trikalsiyum silikat (C₃S: 3CaO.SiO₂) ve dikalsiyum silikat (C₂S: 2CaO.SiO₂) maddeleridir. Bu maddeler hidratasyon sırasında suda erimeyen ve kararlı yapıda olan denklem (3) te görülen silikat jeli ve suda eriyen sönmüş kireç (Ca(OH)₂) oluşturur. Sönmüş kireç betonun içinde alkalinitesi yüksek (pH~13) bir ortam oluşturur ve bu ortam donatıyı korozyona karşı oldukça etkili bir biçimde korur.



Sönmüş kireç korozyona karşı dayanıklılığı çok düşük olan donatının yüzeyinde pasif bir film tabakası oluşturarak donatıyı korozyona karşı korur. Ancak betonun çeşitli dış etkiler sonucunda zarar görmesi veya hatalı imalat yapılarak geçirimli hale gelmesi, ortamda su ve oksijen bulunması, karbonatlaşma gibi olaylar sonucunda pH'ın düşmesi gibi olaylar sonucunda donatı üzerindeki pasif film parçalanır ve donatı korozyonu meydana gelir.

Betona gömülü donatı çubuklarının korozyonunun başlaması çoğunlukla, betonun yüksek alkali durumunda donatının yüzeyinde oluşan pasif filmin klorür kaynaklı parçalanmasının bir sonucudur. Donatı yüzeyinde belirli bir kritik klorür seviyesi olduğu zaman pasif film parçalanır ve donatıyı korozyona karşı koruyan etken ortadan kalkmış olur. Beton içindeki pH'ın karbonatlaşma vb. olaylar sonucunda düşmesi ile beton donatının pasif kalması için gerekli olan ortamı oluşturamaz ve bunun sonucunda korozyonu başlatması için gerekli olan kritik klorür seviyesi daha da düşerek donatının korozyona başlama süresi azalır (Moreno vd., 2004). Burada dikkat edilmesi gereken, yüksek pH'ın olduğu ortamda da korozyonun başlaması için belirli bir kritik klorür içeriği bulunmaktadır. Ancak pH'ın düşük olduğu duruma göre bu kritik klorür içeriği daha yüksektir. Bu durum da ortamda birikmesi gereken klorür miktarını artırır ve pH'ın yüksek olması yapının belirli bir miktar klorür konsantrasyonuna ulaşmaya kadar korozyona uğramadan stabil ve güvenli şekilde kalmasını sağlar.

Çelik donatının korozyonu yapılar için en önemli hasar nedenlerinden biridir ve dünya çapında önemli miktarda ekonomik kayıplara neden olur. Çelik dünya atmosferinde her zaman kararsızdır. Çelik, oksijen ve su ile reaksiyona girerek daha kararlı ve düşük enerjili hal olan oksit ve hidroksit formuna dönmeye çalışır. Donatı korozyonu, beton içinde birbirine yakın ya da uzak bölgelerde çeliğin yüzeyindeki elektrokimyasal potansiyel farklılıklar nedeni ile anodik ve katodik bölgeler oluşturan bir elektrolit ve beton gözenek çözeltisi arasında meydana gelir (Bertolini vd., 2013). Sıradan bir portland çimentosu ile hazırlanan betonun pH'ı 12,5 civarındadır. Gözenek çözeltisinin pH'ı 10,5'ten yüksek olduğunda donatı üzerinde koruyucu pasif bir oksit tabaka oluşur. Bu koruyucu tabaka 1mm kalınlığında yoğun bir γFeOOH filmidir ve doğası gereği dinamiklidir. Yani aynı zamanda hem bozulur hem de yeniden oluşur. Uygun koşullar altında bu şekilde uzun süre dayanır (Shaheen ve Pradhan, 2015). Bu pasif tabaka beton içinde demir katyonlarının (Fe^{2+}) elektrolit içindeki çözeltiye girmesini ve oksijen

anyonlarının (O^{2-}) çelik yüzeyle temas etmesini engelleyerek bir bariyer görevi görür (Al-Amoudi ve Maslehuddin, 1993). Çelik donatının yüzeyinde bu pasif katman beton içinde iki yolla bozulabilir. Birincisi karbonatlaşma veya yanlış üretim ile betonun pH'nın düşmesi, ikincisi ortamda klorür iyonlarının var olmasıdır. Bu iki durumdan klorür iyonları beton içinde donatı korozyonunu başlatan temel unsur olarak kabul edilir. Klorür iyonları da betona ya beton hazırlanırken kullanılan karma suyu ve mineral katkıların içinde ya da hizmet ömrü boyunca deniz ve yeraltı suyu gibi dış ortama maruz kalarak girebilir (Jarrah vd., 1995).

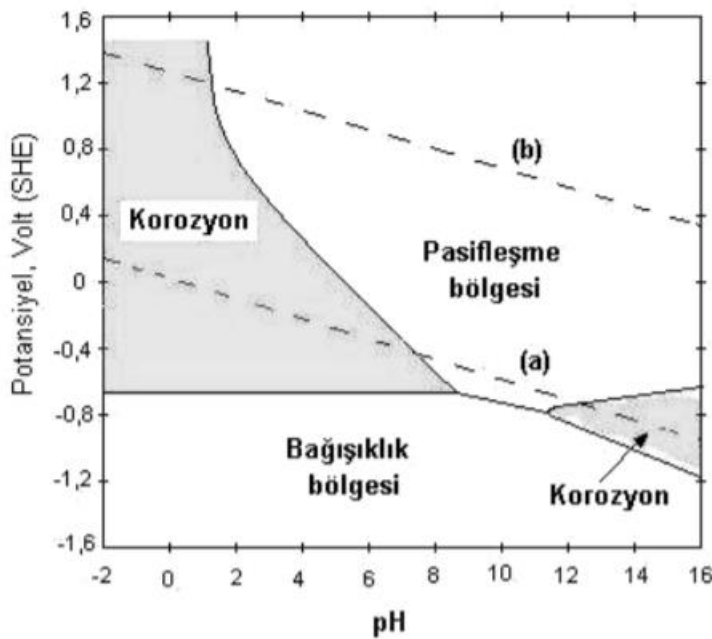
Klorür iyonları betonda serbest ve bağlı olmak üzere iki şekilde bulunmaktadır. Pasif filmin parçalanarak korozyonun başlamasını sağlayan aslında beton gözenek çözeltisi içinde bulunan serbest klorür iyonlarıdır. Pasif filmin parçalanması ile birlikte Fe^{2+} iyonları elektrolit çözeltisinin içinde anot bölgesinde çözünmeye, O^{2-} iyonları ise katot bölgesinde birikmeye başlar. Korozyonun hızı, katot bölgesinde oksijen ve nemin varlığına ve miktarına bağlı olarak değişir (Bertolini vd., 2013). Korozyon ürünü pas oluşumu, hacimde önemli bir artışa neden olur. Yani korozyon ürünleri, demir donatının hacminden daha fazladır. Bu hacimdeki artış betonda iç gerilmelere neden olarak betonda çatlama, kabarma, dökülme, çelik beton arayüzünde aderans kaybı ve çelik donatının kesit alanının azalmasına yol açar (Ahmad, 2003). Bu olayların sonucunda yapı dayanıklılığı azalır ve yapıda hasarlar meydana gelir.

1.3. pH'nın Korozyona Etkisi

Metallerin korozyona uğramasını belirleyen en önemli faktörlerden birisi pH değeridir. Metaller asidik ortamda korozyona uğrarken, bazik ortamda yüzeyinde oluşan pasif film sayesinde korozyonu azalır. Beton sahip olduğu yüksek alkalinite sayesinde donatıyı korozyona karşı koruyacak olan pasif filmin oluşmasını sağlar. Betonun bu yüksek pH değeri çimento hidratasyonu sırasında yapısında bulunan kalsiyum silikat hidratların (C-S-H) reaksiyona girerek oluşturduğu $Ca(OH)_2$ sayesinde olur. pH aynı zamanda korozyon sonucunda oluşacak olan ürünleri de etkilemektedir. Farklı pH derecelerinde farklı korozyon ürünleri oluşmaktadır. Bununla ilgili oluşturulan Pourbaix diyagramı Şekil 4'te görülmektedir. Şekil 4'teki diyagram incelendiğinde pH değerinin 10 – 14 seviyeleri arasında olması durumunda donatının pasif halde kalabileceğini ancak bu seviyelerin altına düştüğünde donatıda korozyonun başlayacağı anlaşılmaktadır. pH

değerinde meydana gelen düşüşler donatıda korozyonun şiddetini ve hızını arttırıp, donatının tamamen kaybolmasına yol açmaktadır.

Huet vd. (2005), tarafından yapılan bir çalışmada pH değerinin 10 ile 13 arasında olduğu zaman donatı yüzeyinde yaklaşık 10nm kalınlığında bir Fe_2O_3 tabakası bulunduğu ve bu tabakanın donatıyı korozyondan koruyan pasif tabaka olduğu belirtmişlerdir. Bu pasif tabaka sayesinde alttaki çelik tabaka korozyona uğramadan sağlam olarak kalabilmektedir. pH değerinin düşürülmesi bu pasif tabakanın parçalanmasına ve donatının korozyona uğramasına neden olmuştur.



Şekil 4. Demir-Su sistemi için sulu ortamda Pourbaix diyagramı (Gerengi, 2008).

Şekil 4'te demir-su sistemi için sulu ortamdaki elektrokimyasal denge diyagramı olan Pourbaix diyagramı görülmektedir. Bu diyagramda y ekseninde elektrot potansiyelleri, x ekseninde ise pH dereceleri gösterilmektedir. Bu diyagram demir donatının korozyona uğramadan stabil olarak kalabileceği bölgeyi kesin olarak gösterebilmektedir. Ancak grafikte demir donatının korozyona uğrama potansiyeli olan bölgelerde donatı üzerinde korozyon gözlenmeye bilir. Bunun nedeni başka bir etmen tarafından örneğin pasif tabaka oluşumu gibi korozyonun engellenmesidir. Pourbaix diyagramlarına bakılarak üzerinde çalışılan metalin korunması için hangi potansiyel ve pH aralığında çalışılacağını, hangi şartlar altında ne tip korozyon reaksiyonları gerçekleşeceği önceden tahmin edilebilir (Gerengi, 2008).

1.4. Klor İçeriğinin Korozyona Etkisi

Özellikle deniz ortamına maruz kalan yapılarda klorür kaynaklı donatı korozyonu betonarme yapıların erken hasar görmesinin ve stabilitesinin bozulmasının ana nedenidir (Bastidas vd., 2007, 2013). Betondaki klorürün en zararlı etkisi donatıda meydana getirebileceği korozyondur. Klor iyonları donatıların üzerinde betonun yüksek alkalinitesi sayesinde oluşan pasif film tabakasının parçalanmasına sebep olmaktadır. Bu sayede donatılar daha hızlı korozyona uğramaktadırlar. Klor iyonu donatıdaki demir iyonlarıyla reaksiyona girerek ferrohidroksite ve hidroklorik asit oluşturur. Hidroklorik asitte hidrojen ve klor iyonuna dönüşerek reaksiyonu daha fazla hızlandırarak zincirleme şekilde devam etmektedir.



Çelik donatının klorür kaynaklı korozyonu, betonarme yapıların servis ömründen önce bozulmasının ana nedenlerinden biridir. Deniz ortamları ve buz çözücü tuzların yaygın olarak kullanılması donatının yüzeyindeki pasif filmin parçalanarak bir anodik ve katodik reaksiyon hücresi olarak hareket etmesine izin vermektedir. Betonda klorür kaynaklı donatı korozyonu son yıllarda kapsamlı bir şekilde incelenmektedir. Bu incelemelerde çoğunlukla klorür eşik değeri (CTV) veya kritik klorür içeriği üzerine odaklanılmıştır. Kritik klorür içeriği, karbonatız alkali betondaki donatının yüzeyindeki pasif filmin parçalanması için ortamda bulunması gereken klorür içeriği olarak ifade edilir. Bu tanım sadece korozyonun ilk aşamasını dikkate alır yani donatının yüzeyindeki pasif filmin parçalanıp donatının korozyona başlaması için gerekli miktardır. Pratik mühendislikte ise kritik klorür içeriği çelik donatıda gözle görülür bir bozulmaya neden olan klorür miktarı olarak tanımlanmaktadır (Figueira vd., 2017).

Kritik klorür içeriği klorür/çimento ağırlığının yüzdesi olarak toplam klorür miktarı şeklinde veya Cl^- ve OH^- iyonlarının molar olarak oranı şeklinde ifade edilebilir. Burada OH^- iyonları donatı korozyonunu engelleyici, Cl^- iyonları ise donatı korozyonunu güçlendirici iyon olarak düşünülebilir. $\text{Cl}^- / \text{OH}^-$ oranı bir çözelti ortamında korozyonun başlamasına yol açacak olan agresif iyonların, korozyonu engellemeye çalışacak olan iyonlara oranını gösterir ve klorür/çimento ağırlığının yüzdesi olarak gösterime göre

ölçülmesi çok daha kolaydır. Bu oran genel olarak 0,6 olarak gösterilmektedir. Bu oranın 0,6 değerinin üzerine çıkması donatının yüzeyindeki pasif filmi parçalanmasına ve donatının korozyona açık bir hale gelmesini sağlamaktadır (Yu vd., 2012).

Cl^- / OH^- oranının artması donatının korozyona karşı göstereceği direncin düşmesi ile sonuçlanır. Bu durumda OH^- iyon konsantrasyonu ortamda ne kadar fazla ise donatının korozyona başlaması için gereken Cl^- iyon konsantrasyonu da o kadar fazla olacaktır. Benzer şekilde ağırlıkça yüzde olarak da aynıdır. Ortamda ağırlıkça %5'ten daha fazla miktarda klorür iyonları bulunduğu zaman donatı korozyonunu çok kısa süre içerisinde başlamaktadır (Figueira vd., 2017).

1.5. Sülfat İçeriğinin Korozyona Etkisi

Sülfat tuzları (Na_2SO_4 , $MgSO_4$, K_2SO_4) hem deniz suyunda hem de yeraltı sularında bulunmaktadır. Bu tuzlar agrega, karışım suyu, mineral katkıları gibi beton hazırlanırken doğrudan betona katılmasıyla bazen de yapının deniz veya yeraltı sularına maruz kalmasıyla beton içerisine nüfuz ederek betona girmektedirler. Sülfat iyonları çimentonun çeşitli hidratasyon ürünlerine saldırır ve beton içinde farklı bileşiklerin oluşmasına neden olur. Sodyum sülfat ve magnezyum sülfat, alçı oluşturmak için kalsiyum silikatların hidratasyonu sırasında açığa çıkan kalsiyum hidroksitle ($Ca(OH)_2$) reaksiyona girer. Bunun sonucunda sodyum hidroksit ($NaOH$), magnezyum hidroksit ($Mg(OH)_2$) ve kalsiyum sülfat (alçı taşı) ($CaSO_4$) oluşmaktadır. Oluşan alçıtaşı hidrate olmuş kalsiyum alüminatlar veya hidrate olmamış trikalsiyum alüminatlar ile etrenjit oluşturmak üzere reaksiyona girebilir (Shaheen ve Pradhan, 2015).

Deniz yapıları hem klorür kaynaklı donatı korozyonuna hem de sülfat iyonlarına maruz kalır ve iki agresif iyonun da ortamda bulunması nedeni ile korozyon mekanizması daha da karmaşık bir hal alır. Klorür, sülfat ve klorür-sülfat iyonlarının birlikte bulunduğu durumlar karşılaştırıldığı zaman sülfat iyonlarının tek başına ortamda bulunması donatının korozyonunu pek başlatmadığı ancak klorür-sülfat iyonlarının birlikte bulunması yalnız klorür bulunan ortama göre korozyonu daha fazla arttırdığı bilinmektedir. (Al-Amoudi ve Maslehuddin, 1993).

Çelik donatı yüzeyinde betonun sahip olduğu yüksek pH'dan dolayı, donatıyı korozyona karşı koruyan pasif bir oksit tabakası bulunur. Normal şartlar altında bu tabaka donatıyı korozyondan korur. Ancak ortamda klorür varlığı bu tabakaya zarar vererek

donatının korozyonunun başlamasını hızlandırır. Sülfat iyonlarının klorür iyonlarıyla birlikte bulunduğu zaman ise bu pasif tabaka daha hızlı bir şekilde parçalanarak korozyonun başlamasını daha da hızlandırır (Shaheen ve Pradhan, 2015). Sülfat iyonları bir nevi klorüre yardımcı iyon gibi davranarak donatının daha hızlı korozyona uğramasını sağlar ve yapı için tehlike oluştururlar.

1.6. Korozyon Ölçüm Yöntemleri

Korozyon, metalik malzemelerin içinde bulundukları ortamla reaksiyona girerek doğada bulundukları temel hallerine (düşük enerjili) dönme istekleridir. Korozyon olayı birçok metalde doğal olarak meydana gelir ve metallerin büyük kısmı dünya atmosferine dayanıklı olmayıp normal şartlar altında bile korozyona uğrarlar.

Korozyon hızı, metallerin belirli ortamlarda birim zamanda çözünme hızı olarak tarif edilebilir. Metal ve alaşımlarının korozyona karşı dayanıklılıklarının belirlenebilmesi için korozyon hızlarını saptamak önemlidir. Korozyon ölçüm yöntemleri kimyasal, elektriksel ve elektrokimyasal olarak üçe ayrılır.

1.6.1. Kimyasal Korozyon Ölçüm Yöntemi

Yaygın olarak kullanılan bu yöntemde temel amaç metali belirli bir zaman dilimi içinde korozyona uğratarak kütlede meydana gelen azalmayı bulabilmektir. Bunun için metal deneye başlamadan önce hassas şekilde ölçülmeli, korozyona uğrayacağı ortama bırakılmalı ve sonra metal yüzeyi temizlenerek tekrar hassas şekilde tartılmalıdır. Kütle kaybından metalin korozyon hızını belirlerken önemli olan nokta çözünmenin homojen olması ve korozyon ürünlerinin tamamının metal yüzeyinden uzaklaştırılmış olmasıdır. Numune yüzeyine yapışan korozyon ürünlerini kimyasal, elektrokimyasal, mekanik-kimyasal temizleme yapılarak yüzeyden koparılması gerekir.

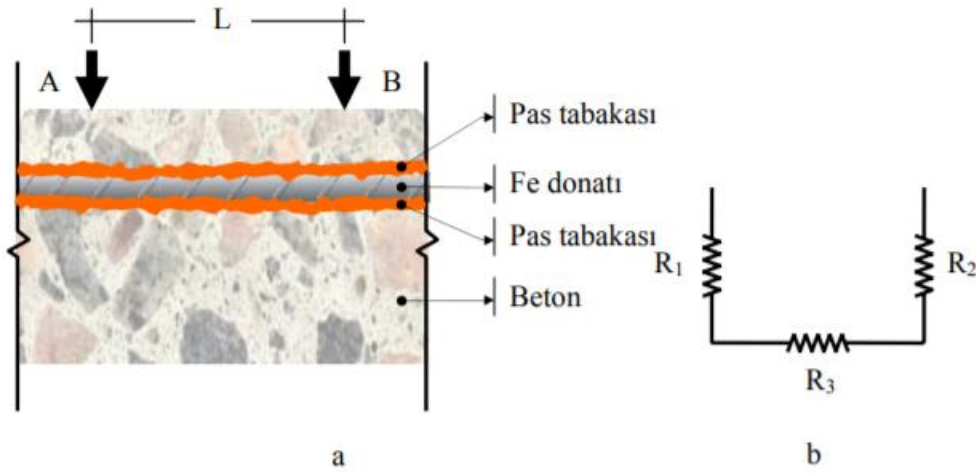
Kütle kaybı yönteminde korozyon hızı Denklem (6) ile hesaplanır.

$$Korozyon\ hızı = \frac{\Delta W}{A \times T} \quad (6)$$

Denklem (6)'da ΔW birim zaman ve birim alanda meydana gelen kütle kaybını (mg), A yüzey alanı (cm²), T ise uygulanan zamanı (saat) göstermektedir.

1.6.2. Elektriksel Korozyon Ölçüm Yöntemi

Bu yöntemde Şekil 5.(a)'da görüldüğü gibi bir metal örneğinin korozyon hızı, o metalin direncinin ölçülmesi ile hesaplanmaktadır. Metaller elektriği iyi iletmediği için korozyona uğramamış numunede direnç ölçümü yapılırken korozyona uğramış numuneye göre direnci daha küçük çıkmaktadır. Çelik numunesi korozyona uğradığı zaman kesitinde bir azalma meydana gelecek ve bu kesit azalmasından dolayı numunenin direnci artmaktadır.



Şekil 5. (a) Donatıda korozyon gelişmemiş bir betonarme eleman kesiti, (b) eşdeğer elektrik devresi (Çil, 2006).

Bu yöntemde kuru halde beton elektrik akımını iletmez ve direnci çok büyüktür. Betonun içindeki donatı ise elektrik akımını oldukça iyi iletir ve direnci sıfır kabul edilir. Betonun yüzeyinde bir L mesafesi uzunluğunda iki farklı noktadan direnç ölçümü yapılırken, beton yüzeyinden demir donatıya kadar olan mesafenin direnci R_1 , demir donatı üzerinde L mesafesi boyunca donatının direnci R_3 (donatı elektriği iyi iletmediğinden direnci sıfır kabul edilir) ve donatıdan betonun yüzeyine kadar olan kısmın direnci R_2 olur. Burada toplam devrenin eşdeğer direnci $R_1+R_2+R_3$ olur (Şekil 5. (b)). Korozyona uğradıktan sonra yine aynı mantıkla devrenin eşdeğer direnci $R_1+R_2+R_3$ olur. Ancak korozyona uğradıktan sonra R_3 değeri yani donatının direnci yüksek olacaktır. Çünkü oluşan korozyon ürünleri elektriksel olarak iletken değildir ve bu da direncin yükselmesi anlamına gelir. Bu iki durum arasındaki direnç farklılığının belirlenmesi sayesinde donatının korozyon miktarının belirlenmesi mümkün olmaktadır (Çil, 2006).

1.6.3. Elektrokimyasal Yöntemler

Metallerin korozyona uğraması elektrokimyasal bir olaydır. Sıvı içerisinde gerçekleşen korozyon olayında korozyona uğrayan metal bir elektrot olarak davranır ve bir elektrolit ile temas halinde olması gerekir. Bu şekilde birbirleri ile temas halinde bulunan iki metal parçası bir elektrolit içerisinde iken bir elektrokimyasal hücre oluştururlar. Bu hücrede devrenin tamamlanması ile elektrokimyasal korozyon olayı meydana gelir. Bir elektrokimyasal hücrede temel olarak dört tane eleman vardır. Bunlar anot, katot, fiziksel temas elemanı ve elektrolittir. Anot, hücrede elektron vererek korozyona uğrayan elemandır. Katot, hücrede elektron alan ve bu elektronların indirgenmesi ile ürün oluşturan elemandır. Fiziksel temas elemanı, devrenin tamamlanması için katot ve anot hücrede bağlantılı elemandır. Bu eleman anottan katota doğru elektron taşınmasında rol oynar. Elektrolit, hücrenin içindeki iletken yapıdaki çözüldür. Elektrolit, anot ve katotun her ikisiyle de temas halinde olup anottan kopan metal iyonlarının katota doğru hareket etmelerini sağlar.

Elektrokimyasal yöntemlerle korozyon ölçümlerinde polarizasyon eğrileri elde edilir. Bu eğriler korozyon mekanizmasının anlaşılması için çok önemlidir. Metallerin korozyonu belirli bir potansiyelde meydana gelmektedir. Yalnız bu potansiyelin ölçülmesi çok önemlidir. Korozyon potansiyeli ile korozyon hızı arasında doğrudan bir ilişki bulunmamaktadır. Ancak korozyon potansiyelinde belirli aralıklarda kaymaların yaşanması korozyonun hızı hakkında bilgiler verebilmektedir (Üneri, 1998).

1.6.3.1. Potansiyodinamik Yöntem

Bu yöntemde üçgen dalga veya merdiven (ramp) dalga jeneratörü kullanılarak uygulanan potansiyel belirli hızlarla değiştirilerek akım-potansiyel eğrileri elde edilir. Bu eğrilerdeki tepe potansiyelleri, tepe akımları ve potansiyel değiştirme hızları incelenerek korozyonun hızı ve mekanizması hakkında bilgiler elde edilmektedir (Gerengi, 2008).

1.6.3.2. Potansiyostatik Yöntem

Bu yönteme kararlı potansiyodinamik yöntem de denir. İncelenecek metalin korozyon potansiyeli ayarlandıktan sonra devreden geçen akımın miktarı ve yönü

ölçülerek polarizasyon eğrileri elde edilir. Dinamik yöntemden farklı olarak akım bir yönde ilerler. Bu polarizasyon eğrilerinden faydalanılarak metalin korozyon hızını bulmamıza yardımcı olan korozyon akımı hesaplanabilmektedir (Gerengi, 2008).

1.6.3.3. Galvanostatik Yöntem

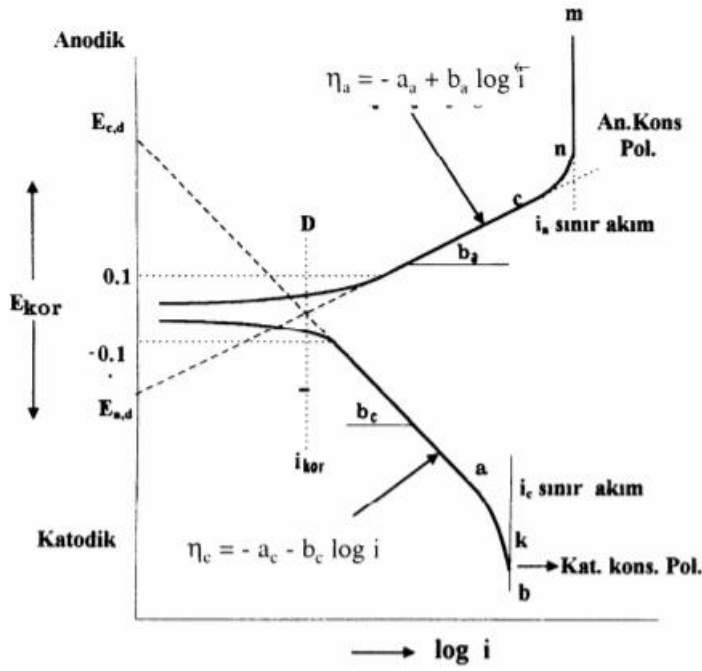
Bu yöntemde diğer yöntemlerden farklı olarak sabit akım uygulanır ve devredeki potansiyelin değişimi izlenir. Daha sonra korozyon davranışı belirlenmek istenen metal devreye bağlanarak devrenin direnci değiştirilir ve belirli bir akım uygulanır. Uygulanan akım altında oluşan potansiyel değerleri voltmetre aracılığıyla ölçülür ve metalin korozyon mekanizması hesaplanabilir (Gerengi, 2008).

1.7. Korozyon Hızını Belirleme Yöntemleri

Metallerin korozyonu elektrokimyasal yapıda olduğundan, korozyon hızını ölçmek için elektrokimyasal yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler korozyon hızının saptanmasında hızlı sonuçlar vermektedir ve uygulanabilirlikleri kolay olduğundan sıkça kullanılmaktadır.

1.7.1. Tafel Polarizasyon Yöntemi

Bu yöntemin kullanımı diğer yöntemlere göre daha kolaydır ve bu yüzden sanayide yaygın olarak kullanılmaktadır. Katodik potansiyel eğrisinin belirlenen korozyon potansiyeline ekstrapole edilmesiyle sistemde oluşan korozyon mekanizmasını ve korozyon hızını denetlemek mümkündür. Korozyon potansiyelinden itibaren potansiyostatik ve galvanostatik yöntemle oluşturulan anodik ve katodik yönlerin ikisinde de çizilen yarı logaritmik akım-potansiyel eğrilerinin çizgisel bölgelerinden alınan teğetlerin korozyon potansiyeline ekstrapole edilmesiyle korozyon akımı hesaplanır. Korozyon akımı aynı zamanda korozyon hızı olarak da düşünülebilir. Anodik ve katodik bölgelerin ikisinde birden potansiyel-akım grafikleri elde edilemediği zaman bu bölgelerden birinin korozyon potansiyeline ekstrapole edilmesiyle de korozyon hızı bulunabilir (Gerengi, 2008).



Şekil 6. Tafel ekstrapolasyon yöntemiyle korozyon akımı (I_{corr}) ve korozyon potansiyelinin (E_{corr}) bulunması (Gerengi, 2008).

Şekil 6'dan Stern ve Geary'nin elde ettikleri Denklem (7) ile korozyon akımı (I_{corr}) hesaplanmaktadır.

$$I_{corr} = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \frac{1}{R_p} \quad (7)$$

Denklem (7)'de β_a ve β_c sırasıyla anodik ve katodik doğruların eğimi, R_p ise polarizasyon direncini ifade etmektedir.

Tafel polarizasyon yönteminde elde edilen sonuçların doğruluğu, geleneksel kimyasal yöntem olan ağırlık kaybı metodlarından elde edilen sonuçlardan ya büyük ya da eşit olmaktadır. Bu yöntemde çok küçük korozyon hızının olması durumunda bile sistem başarılı bir şekilde çalışıp, sonuç vermektedir. Tafel eğrileri kullanılarak korozyon hızı ve korozyon akımı kolaylıkla ve kısa süre içerisinde hesaplanabilmektedir.

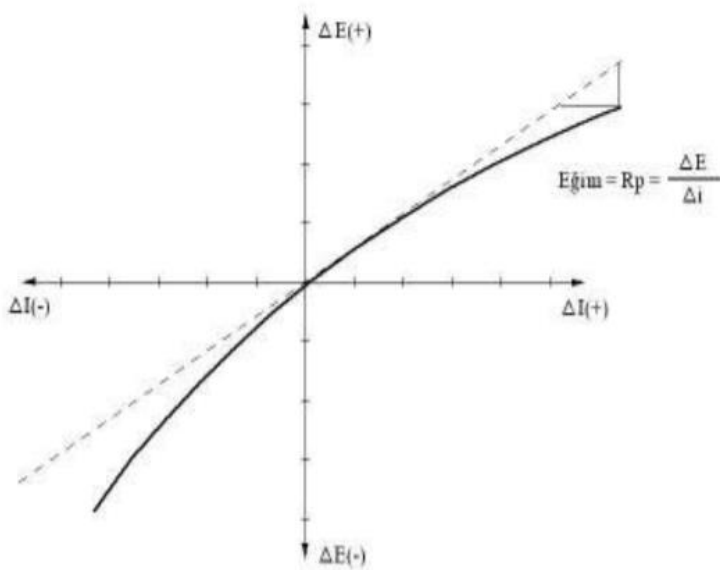
1.7.2. Lineer Polarizasyon Yöntemi

Bu yöntemin teorik temelleri Stern ve Geary (1957) tarafından atılmıştır. Metallerin korozyon mekanizması verilerini elde etmek için kullanılan hızlı ve tahribatsız ölçme yöntemidir. Bu yöntemle göre korozyon potansiyeli civarında Δi akımı etkisiyle oluşan ΔE potansiyel farkı arasında çizgisel bir bağıntı vardır. Bu çizgisel bölgeden geçen teğetin eğimi R_p (polarizasyon direnci) değerini verir (Şekil 7). Ancak bu çizgisel bağıntı en fazla 20 mV kadar uygulanabilmektedir (Gerengi, 2008).

$$\frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{\beta_a \beta_c}{2,303 i_{corr} (\beta_a + \beta_c)} \frac{1}{R_p} \quad (8)$$

Denklem (8)'de β_a ve β_c sırasıyla anodik ve katodik tafel sabitleri, i_{corr} korozyon akım yoğunluğu, $\Delta E/\Delta I$ akım potansiyel eğrisinin korozyon potansiyeli civarındaki eğimidir ve polarizasyon direnci olarak adlandırılmaktadır. Eşitlikteki β_a ve β_c değerleri tam olarak bilinemediği durumlarda $\beta_a = \beta_c = 0,12V$ olarak alınabilir. Değerler yerine konduğunda B ile ifade edilen bir sabit bulunur. B değeri 26 mV olarak kabul edilir. Polarizasyon direnci Denklem (9) ile hesaplanır. (Gerengi, 2008).

$$R_p = B \frac{\Delta i}{\Delta E} \quad (9)$$



Şekil 7. Lineer polarizasyon yöntemi ile polarizasyon direnci (R_p) bulunması (H. Gerengi, 2008).

1.7.3. Elektro Kimyasal İmpedans Spektroskopisi (EIS) Yöntemi

EIS korozyon hızı ölçümlerinde başarılı bir şekilde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde doğrusal akım yerine alternatif akım kullanılır ve diğer yöntemlere kıyasla çalışma elektrotu yüzeyine daha az hasar verir. Bu yöntemde Ohm yasasına göre devredeki toplam direnç hesaplanır. Toplam direnç Denklem (10)'da görüldüğü gibi devreden geçen akım ile voltajın arasındaki orandır.

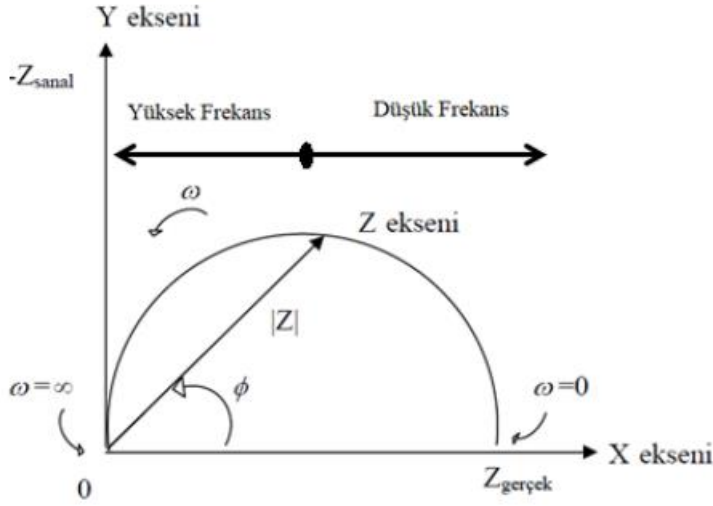
$$R = \frac{E}{I} \quad (10)$$

Ancak bu durum doğrusal akım durumunda geçerlidir. Alternatif akım için içine girdiğinde ise ortaya empedans kavramı çıkar.

$$Z = \frac{E}{I} \quad (11)$$

Denklem (11)'de Z empedansı, E voltajı ve I akımı göstermektedir.

Bu yönteme AC İmpedans yöntemi de denir. Bu yöntemde genelde hücreye 1 mHz – 100 kHz frekans ve 5 – 50 mV voltaj aralığında küçük bir sinüzoidal potansiyel gönderilir ve sistem bu potansiyele aynı büyüklükte fakat biraz geriden cevap verir. Bu aradaki gecikme faz kayması olarak adlandırılır. Bu empedans değerleri hayali (Z_{Im}) ve gerçek (Z_{Re}) empedans olarak adlandırılmaktadır. Bir grafiğin X ekseninde gerçek kısmı, Y ekseninde ise hayali kısmının gösterilmesi ile Şekil 8'de görülen “Nyquist Grafiği” elde edilir.



Şekil 8. Nyquist Grafiği.

Nyquist grafiğinde her farklı nokta farklı frekanstaki bir empedansı ifade etmektedir. Grafikte düşük frekanslı veriler sağ tarafta, yüksek frekanslı veriler sol tarafta bulunmaktadır. Şekilde empedans $|Z|$ uzunluğunda bir vektör olarak gösterilebilir ve X eksenı ile yaptığı açıya faz açısı denir. Bu grafikten istenilen polarizasyon direnci değerleri Denklem (12)' den hesaplanır (Gerengi, 2008).

$$|Z| = \sqrt{Z_{im}^2 + Z_{Rc}^2} \quad (12)$$

1.7.4. Dinamik Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi (DEIS) yöntemi

Bu yöntem Darowicki ve arkadaşları tarafından 2000 yılında yapılan bir çalışma ile bilim dünyasına sunulmuştur. Başta çukur korozyonu olmak üzere birçok alanda başarı ile kullanılmıştır. EIS yöntemi ile aynı çalışma prensibine sahiptir. Alternatif akım (AC) ile çalışan bu yöntemde temel farklılık gönderilen sinüzoidal dalgaya karşılık sistem tarafından üretilen cevabı özel olarak üretilmiş bir kart ile okunmaktadır. Bu özel olarak üretilmiş kart sayesinde daha kısa sürede daha fazla bilgi alınması mümkün olmaktadır. Bu şekilde sistem daha hızlı çalışmaktadır ve daha fazla elde edilen bilgi ile daha doğru sonuçlar üretilebilmektedir (Gerengi, 2008).

1.7.5. Harmonik Analiz (HA) Yöntemi

Bu yöntem saha çalışmalarında tafel sabitlerine ihtiyaç duymadan korozyon hızının hesaplanmasına olanak vermektedir ve bu yüzden son derece kullanışlıdır. Elektrokimyasal impedans spektroskopisi yöntemindekine benzer şekilde gönderilen sinüzoidal dalgaya karşı okunan akım değeri sinyal denetleme ünitesi denen elektronik bir kart tarafından okunmaktadır. Elde edilen akım değerleri kullanılarak aşağıdaki bağıntılar yardımıyla korozyon hızı değeri Denklem (13), (14) ve (15) kullanılarak hesaplanmaktadır (Gerengi, 2008).

$$i_f = i_{corr} \left(\frac{1}{b_a} - \frac{1}{b_c} \right) U_o \quad (13)$$

$$i_{2f} = \frac{i_{corr}}{4} \left(\frac{1}{b_a^2} - \frac{1}{b_c^2} \right) U_o^2 \quad (14)$$

$$i_{3f} = \frac{i_{corr}}{24} \left(\frac{1}{b_a^3} - \frac{1}{b_c^3} \right) U_o^3 \quad (15)$$

Burada U_o Sinüzoidal sinyalin genliği, i_f , i_{2f} , i_{3f} sırasıyla okunan üç akım değerini, b_a ve b_c tafel sabitlerini gösterir. Bu üç denklem yardımıyla sistemin korozyon akım yoğunluğu Denklem (10)'dan bulunur.

$$i_{corr} = \frac{i_f^2}{(48)^{0.5} (2i_f i_{3f} - i_{2f}^2)^{0.5}} \quad (16)$$

1.8. Mekanik yüklerin korozyona etkisi

Bu konu hakkında yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır ve bundan dolayı mekanik yüklerin korozyon mekanizmasına nasıl etki ettiğini genel olarak anlayamamıştır. Ancak yapılan literatür çalışmalarında metaller üzerine uygulanan mekanik yüklerin metallerin korozyon hızını arttırdığını, donatı üzerinde donatı korozyona karşı koruyan pasif tabakayı parçalayabileceğini, donatının yeniden pasifleşmesini zorlaştırabileceğini veya plastik deformasyon sonucunda engelleyebileceğini belirtmektedirler (Zhang vd., 2013; Gao vd., 2010; Poursaee ve Zhang, 2014). Genellikle sanat yapıları, enerji santralleri ve köprüler çeşitli mekanik yüklere servis ömürleri boyunca maruz kalırlar ve bu yükler altında yorulurlar. Bu yapılar buz çözücü tuzlar, yeraltı suları ve deniz suyu gibi agresif

ortamlara maruz kaldıklarında mekanik yüklerin de etkisiyle bozulma yaşarlar. Bu bozulmanın temel nedeni donatı korozyonudur. Farklı yükleme türleri donatılardaki pasivasyon ve depasivasyon süreçleri üzerinde farklı etkileri bulunabilir (Poursaei ve Zhang, 2014). Liu vd. (2004), yaptıkları çalışmada AA2024-T3 alüminyumunun 1M NaCl çözeltisi içinde çekme gerilmesi altında kimyasal davranışını incelediler ve gerilmemiş numunelere kıyasla gerilmiş numunelerin hem bozulmalarının hem de korozyon hızlarının daha fazla olduğunu bulmuşlardır. Gao vd. (2010), yaptıkları çalışmada sabit elastik yük altında düşük karbonlu beynitik çeliğinin daha fazla korozyon hızı gösterdiğini bulmuşlardır. Yükün artması metalin yüzünde oluşan pasif tabakadaki parçalanmayı hızlandığını, metalin daha hızlı ve şiddetli korozyona uğradığını göstermişlerdir. Zhang vd. (2013), NaCl çözeltisinde düşük karbonlu ve düşük alaşımlı farklı mikro yapılara sahip bir çeliğin korozyon davranışını incelemişlerdir ve çalışmalarında elastik yükün çeliğin korozyon davranışını hızlandığını göstermiştir. Feng vd. (2011), yaptıkları çalışmada beton bir ortamdaki donatılar üzerine uygulanan yüklerin korozyon üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Simüle edilmiş beton boşluk çözeltisinde çelik çubuklara çekme yükü uygulamışlar ve çekme yükünün altındaki pasif davranışı ve yük kaldırıldıktan sonraki yeniden pasifleşme evresini incelemişlerdir. Çekme kuvvetinin pasif filmi kırabileceğini ve daha yüksek çekme yükleri uygulanması durumunda pasif filmlerin daha ciddi hasar görebileceğini varsaymışlardır. Düşük çekme kuvveti altındaki çeliğin yük kaldırıldıktan sonra kendi kendine yeniden pasifleşebileceğini ancak plastik deformasyona uğramış çeliğin yük kaldırıldıktan sonra da kendi kendine pasifleşemeyeceğini, dışarıdan bir müdahale olması gerektiğini bulmuşlardır.

1.9. Korozyondan Korunma Yöntemleri

Korozyon kendiliğinden gerçekleşen bir olaydır ancak alınabilecek bazı önlemler ile korozyonu azaltmak hatta engellemek mümkündür. Geçirimsiz beton üretilmesi, beton yüzeyinin su itici maddeler veya uygun bir malzeme tabakasıyla kaplanması, beton üretiminde korozyon engelleyici maddelerin (inhibitörlerin) kullanılması korozyona karşı alınacak önlemler arasındadır. Çelik donatıların yüzeylerinin epoksi veya uygun bir madde ile kaplanması, beton içindeki örtü beton kalınlığının (paspayı) yeterli kalınlıkta

olması ve katodik koruma yapılarak çelik donatıyı korozyona karşı korumak mümkündür (Ustabaş, 2012).

Betonarme yapılarda beton donatıyı sararak onu dış etkilere korur. Ancak betonun zarar görüp çatlaması halinde donatı dış ortamlara maruz kalır ve koruyuculuk ortadan kalkar. Çevresel etkenlerden dolayı klorür gibi zararlı iyonlara maruz kalırsa donatı korozyonu meydana gelir. Beton hazırlanırken karma suyundan veya kullanılan mineral katkı malzemelerinden betona klorür girişi olabilir. Bu klorür miktarı belirli bir değerin üstüne çıkarsa donatı da korozyona sebep olmaktadır. Manera vd. (2008) sıradan portland çimentosu ile hazırlanan bir betonda donatının korozyonunu başlatabilecek kritik klorür içeriği çimento miktarının % 1,1 ile % 2 arasında olduğunu belirtmektedirler. TS EN 206 beton standartında ise bu oran çimento kütlesinin % 0,2 - % 0,4 olarak verilmiştir (TS EN 206, 2012). Korozyondan korunmak için öncelikle korozyonun başlamaması için önlem alınmalıdır. Bunun için betonarme yapının sağlam, hatasız ve sürekli olarak yapılması ve betonun içeriğine katılan maddelere dikkat edilerek ortamda klorür gibi zararlı iyonların bulunmaması ya da klorür miktarının sınırlandırılması gerekmektedir.

Çimento hidratasyon ürünlerinden C-S-H'nin klorür iyonları üzerinde absorbe edici bir etkisi bulunmaktadır ve bunun sayesinde beton matrisinde bulunan klorür iyon konsantrasyonunu azaltır (Tang vd., 2012). Klorür iyon konsantrasyonunun azalması doğal olarak donatı korozyonu üzerinde azaltıcı bir etkisi olacaktır. Bunun yanında gelişmekte olan yapı malzemesi geopolimer çimento ile kıyaslandığında geopolimer içindeki donatıların daha fazla korozyon direnci sergilemektedir (Fan vd., 2021). Korozyona neden olacak çevresel faktörlere maruz kalacak yapılarda bu durum düşünülebilir ve çimento yerine geopolimer yapı malzemeleri kullanılabilir.

Korozyondan korunmak için bazı korozyon önleyici maddeler (inhibitörler) kullanılmaktadır. Bu inhibitörlerden biri olan molibdat, hem çevre dostu ve verimli olması hem de yüksek inhibisyon etkinliği nedeni ile son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Bensabra vd., 2016). Molibdat iki farklı şekilde donatı korozyonunu engellemektedir. İlk olarak pasifleştirici karakterinden dolayı demiroksit ve hidroksit oluşumunu teşvik eder ve donatı çeliğinin pasifleşme ve yeniden pasifleşmesini güçlendirir. İkinci olarak ise donatı yüzeyinde metal ile agresif çözelti arasında fiziksel bariyer görevi gören molibden açısından zengin bir tortu oluşturur (Bensabra vd., 2016).

Bunun sonucunda donatının korozyona karşı direnci artar, korozyona uğraması zorlaşır ve yapı daha güvenli bir hale gelir.

Çelik donatıların korozyonunu azaltmak için çeşitli düşük alaşımlı karışımlar da kullanılmaktadır. Bu alaşımlar çeliğin süneklik, çekme mukavemeti ve yük taşıma kapasitesi gibi özelliklerine zarar vermezken korozyona karşı gösterdiği direncini arttırmaktadır. Ağırlıkça % 0,13 bakır ve ağırlıkça yüze % 0,10 krom içeren düşük alaşımlı çelik, korozyon deneylerine tabi tutulduktan sonra düşük alaşımlı çelik normal düşük karbonlu çeliğe kıyasla iki üç kat daha yavaş korozyon hızı sergilediği görülmüştür (Singh ve Singh, 2012). Benzer şekilde çelik donatıların korozyondan korunması için donatılara fosfor katılması da donatıların korozyon direncini arttırmaktadır. Fosforik demirler, normal demirler ile karşılaştırıldığında korozyona karşı sergilediği pasif davranış ve klorür kaynaklı donatı korozyonuna karşı gösterdiği üstün direnç ile normal demirlerden daha üstün özelliğe sahiptirler (Sahoo ve Balasubramaniam, 2008).

Betonarme yapılarda son yıllarda çimentoyla birlikte mineral katkı maddesi olarak puzolanlar kullanılmaktadır. Puzolan maddeler tek başına bağlayıcı özelliği olmayan ancak çimento ile birlikte kullanıldığında bağlayıcılık özelliği kazanan ve çimentonun performansını arttıran maddelerdir. En yaygın olarak bilinenleri uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, volkanik camlar ve tüflerdir. Doğal olarak oluşan ve bu puzolanlardan biri olan kireç taşı belirli bir incelikte öğütülerek kireç taşı tozu elde edilir ve çimentoyla birlikte kullanılabilir. Doğal olarak üretilen bu puzolan uçucu kül ve cürufun yetersiz olduğu ortamlarda tercih edilen özellikleri, düşük maliyeti ve geniş coğrafi dağılımı nedeniyle kullanılmaktadır. Ayrıca bu şekilde kireçtaşının çimento yerine kullanılması çimentonun üretimi sırasında oluşan çevre kirliliğini de azaltmaktadır (Li vd., 2018). Kireçtaşı tozu ilavesi betonda sertleşme aşamasında ortaya çıkan boşlukları doldurarak betonun geçirimsizliğini azaltarak çevreden betona zararlı madde girişini engelleyerek dayanıklılığını artırır (Aqel ve Panesar, 2016). Betona kireçtaşı ilave edilmesi betonun içinde ortaya çıkan hava boşlukları ve gözenekleri daha iyi kapatarak betonun içine agresif iyonlarının nüfuz etmesini engeller. Bunun sonucunda daha boşluksuz bir beton ortaya çıkar korozyonun başlamasını geciktirir (Li vd., 2020).

Çelik donatının korozyona karşı korunmasında bir diğer etkili yöntem katodik korumadır. Bu yöntem betonda donatının korozyonunu önemli ölçüde azaltmak için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir ve özellikle klorür kaynaklı donatı korozyonunda uzun vadede dayanıklı ve düşük maliyetli bir koruma tekniği sunar (Bellegheem vd.,

2021). Bu yöntem genel olarak iki şekilde uygulanır. İlk olarak galvanik katodik koruma olarak adlandırılan galvanik anotların kullanılmasıdır. Bu yöntemde donatı yüzeyine demirden daha negatif potansiyele sahip bir metal (anot) bağlanarak bir çeşit galvanik pil oluşturulur. Bu sayede korunması istenen donatı katot görevi görür ve anottan açığa çıkan elektronlar burada tüketilerek donatı zarar görmemiş olur. Galvanik katotlar belirli süreler içinde ağırlıkların kaybettikleri için değiştirilmeleri gerekir. İkinci olarak ise dış akım kaynaklı katodik korumadır. Bu yöntemde korunacak olan metale dışarıdan bir doğru akım uygulanır ve korunacak olan demir katot görevi görerek üzerinde anot tepkimelerin oluşması engellenir. İki çeşitli katodik koruma türünde de korunmak istenen metal çeşitli işlemlerle katot olarak çalışması sağlanır ve metal üzerinde anot tepkimelerinin oluşması engellenerek donatı korunmuş olur.

1.10. Literatür Özeti

Korozyonun engellenmesi yapı güvenliği, ekonomiklik ve görsel kusurların önlenmesi açısından çok önemlidir. Donatıların korozyonunda klorür ve sülfat tuzları gibi agresif iyonların olumsuz etkisi oldukça fazladır. Normalde beton içinde donatı yüksek alkali ortam neticesinde pasif olarak kalırken, ortamda zararlı iyonların bulunması durumunda donatı korozyona uğramaktadır. Beton içerisindeki alkali ortamın karbonatlaşma, asit saldırısı ve çeşitli sebeplerden dolayı betonun pH değerinin azalmasına yol açarak donatı korozyonunu hızlandırıp korozyon açısından olumsuz etkileri artırmaktadır.

Fan vd. (2021), yaptıkları çalışmada geopolimerde klorür kaynaklı donatı korozyonunu incelemişlerdir. Referans çözelti olarak çimentoyu simüle etmek için doymuş Ca(OH)_2 çözeltisi, geopolimeri simüle etmek için ise NaOH kullanmışlardır. Çözeltilerdeki klorür iyonu konsantrasyonunun artması ile donatının korozyona karşı gösterdiği direncin (R_p) azaldığını, hidroksit iyonu konsantrasyonunun artması ile de donatının yüzeyinde meydana gelen pasif filmin daha kararlı olduğunu ve artan OH^- konsantrasyonunun bu pasif filmin parçalanması için gereken kritik klorür içeriğini Cl^-/OH^- de arttırdığını belirtmişlerdir.

Moreno vd. (2004), yaptıkları çalışmada betondaki karbonatlaşma ve klor içeriğinin donatı korozyonu üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bunun için farklı pH dereceleri ve farklı klor içeriğindeki çözeltiler hazırlamışlardır. pH değerini ayarlamak için NaOH ve

$\text{Ca}(\text{OH})_2$, karbonatlaşma etkisini simüle etmek için NaHCO_3 ile Na_2CO_3 ve klorür miktarını ayarlamak için NaCl kullanmışlardır. Yapılan testlerin sonucunda yüksek alkali ortamda bulunan donatıların serbest korozyon potansiyelinde pasif durumda olduğunu yani pH etkisinden dolayı donatının pasif durumda kaldığı ve korozyon hızının azaldığını, klorür miktarının arttırılması ile donatının korozyona uğrama potansiyelinin arttığını ve kritik bir klorür içeriğinden sonra korozyon hızlı bir biçimde arttığını gözlemlemişlerdir. Düşük pH derecesinde ise donatı üzerinde korozyonun meydana geldiğini, klorür miktarının arttırılması ile de korozyon büyük miktarlara ulaştığını bulmuşlardır.

Zhang vd. (2009), yaptıkları çalışmada donatı çeliğinin mikro yapısı, klorür içeriği ve farklı pH derecelerinin donatı korozyonu üzerindeki ilişkisini araştırmışlardır. Beton gözenek çözeltisini simüle etmek için $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH ve KOH kullanmışlardır. Bu çözeltilerde pH derecesini ayarlamak için NaHCO_3 ve klor miktarını ayarlamak için NaCl tercih etmişlerdir. Deney sonuçlarına göre çeliğin optik mikrograflarında ferrit ve perlit olmak üzere iki baskın faz gözlemlemişlerdir. Lokalize olarak korozyon ferrit tane sınırları ve perlit tanelerinin üzerinde meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Çözeltinin daha yüksek pH değeri çeliğin pasifleşmesini kolaylaştırmakta ve korozyona uğrama ihtimalini azaltırken, klor içeriğinin artmasının donatı pasifliğinin daha çabuk bozulmasını ve daha fazla korozyona uğramasına yol açmaktadır.

Figueira vd. (2017), farklı pH dereceleri ve farklı yüzey bitirme işlemlerinin donatının kritik klorür içeriği değeri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Beton gözenek çözeltisini simüle etmek için $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH ve KOH kullanarak farklı pH derecelerinde çözeltiler hazırlamışlardır. Bu çözeltilere farklı klorür konsantrasyonu oluşturmak için farklı miktarlarda NaCl ekleyerek farklı Cl^-/OH^- iyon oranına sahip çözeltiler oluşturmuşlardır. Figueira vd. (2017), deney sonuçlarına göre farklı yüzey bitirme tiplerinin donatının korozyon davranışı üzerine etkilerinin olduğunu, Cl^-/OH^- iyon oranının artması ile donatının korozyona karşı gösterdiği direncin azaldığını ve donatının daha fazla korozyona uğradığını tespit etmişlerdir.

Yu vd. (2012), üç çeşit simüle edilmiş beton çözeltisinde çelik donatı için kritik klorür seviyesi ve klorür miktarının korozyon davranışını incelemişlerdir. Beton gözenek çözeltilerini simüle etmek için $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH ve KOH kullanmışlardır. Klor miktarını ayarlamak için farklı konsantrasyonlarda NaCl 'lü çözeltiler hazırlamışlardır. Çözeltinin pH derecesini arttırmak donatıların korozyon direncini arttırdığını ve klorür miktarının

artması donatının korozyon direncini azaltıp daha hızlı korozyona uğradığını tespit etmişlerdir.

Liu vd. (2016), yaptıkları çalışmada simüle edilmiş beton gözenek çözeltisinde klorür ve sülfat iyonlarının saldırısına maruz kalan donatılarda korozyon davranışını ve kritik klorür değerini araştırmışlardır. Simüle edilmiş gözenek çözeltisine klorür kaynağı olarak NaCl ve sülfat kaynağı olarak Na₂SO₄ her gün kademeli olarak 0,01 mol/L şeklinde ilave etmişlerdir. Donatı numunelerinin betondaki önceden pasifleştirilmiş durumu simüle etmek için 10 gün boyunca numuneler doymuş Ca(OH)₂ çözeltisinde bekletilmiştir. Klorür miktarının 0,05-0,06 mol/L klorür eşik değerine ulaştığında donatıdaki korozyon miktarının birden arttığını belirtmişlerdir. 0,05-0,06 mol/L değerinin donatı için kritik klorür içeriği olduğunu söylemişlerdir. Sülfat iyonlarının da bulunduğu klorürlü çözeltilere maruz kalan numunelerde korozyon riskinin daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Yani klorür ve sülfat iyonlarının birlikte bulunduğu ortamlarda donatının pasif filminin parçalanması daha erken olmakta ve korozyon riski artmaktadır.

Shi vd. (2016), klor konsantrasyonu ve ön pasivasyonun, düşük alaşımlı ve geleneksel düşük karbonlu çeliğin simüle edilmiş beton gözenek çözeltisindeki korozyon davranışı üzerine etkisini araştırmışlardır. Beton gözenek çözeltisini simüle etmek için Ca(OH)₂, NaOH, KOH ve az miktarda CaSO₄, klorür konsantrasyonunu ayarlamak için ise NaCl kullanmışlardır. Hem düşük alaşımlı hem de geleneksel düşük karbonlu çelikte yüksek pH derecesinden dolayı oluşan pasif filmin donatıları korozyona karşı koruduğu, klorür miktarının artması ile de donatıların korozyon direncinin azaldığı ve daha fazla korozyona uğradıklarını tespit etmişlerdir.

Poursaei ve Zhang (2014), yaptıkları çalışmada simüle edilmiş beton gözenek çözeltisinde klorürlü ve klorürsüz ortamlarda farklı tip ve seviyelerde mekanik yükler altında çeliklerin korozyon davranışını incelemişlerdir. Bu deneyler için çekme ve basınç altındaki numuneler olmak üzere iki takım numune grubu oluşturmuşlardır. Akma dayanımının % 0, % 33, % 55, % 110 ve % 165'lik oranlarında çeliklere yükleme yapmışlardır. Beton içinde donatı yüzeyinde oluşan pasif filmi simüle etmek için 72 saat boyunca numuneler klor içermeyen gözenek çözeltisine daldırılmıştır. Klorür içermeyen ortamda çekme gerilmeleri altındaki numuneler basınç gerilmeleri altındaki numunelere kıyasla biraz daha fazla koruyucu pasif bir tabakanın oluştuğunu bulmuşlardır. Klorür içeren ortamda ise, çekme gerilmelerine maruz kalan numuneler yüksüz ve basınç gerilmelerine maruz kalan numunelere kıyasla daha fazla korozyona uğramışlardır.

Basınç gerilmelerine maruz kalan numuneler ise yüksüz numunelere göre daha düşük korozyon miktarı göstermişlerdir. Bu davranış klorürlü ortamda çekme yüklerinin çeliğin korozyona karşı hassasiyetini arttırabileceğini, basınç gerilmelerinin ise bu hassasiyeti azaltabileceğini göstermektedir.

Feng vd. (2011), yaptıkları çalışmada beton gözenek çözeltisinde gerilme altındaki çelik çubukların pasif davranışı üzerine araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada portland çimentosu ve suyu ağırlıkça 1/2 oranında karıştırmışlar ve elde edilen hamurun suyu süzülerek pH 12,74 olan sıvı elde etmişlerdir. Hazırlanan çelik çubuklar pasif tabaka oluşturmak için 24 saat suda bekletilmişlerdir. Bu çelik çubuklara 1 kN, 2 kN, 4 kN, 5 kN ve 8 kN büyüklüğündeki yükler uygulanmıştır. Uygulanan yük kaldırıldıktan sonra yeniden pasivasyon davranışını gözlemlemek için numuneler yeniden gözenek çözeltisine daldırılmıştır. Bu çalışmaların sonucunda araştırmacılar, çeliğin gözenek çözeltisindeki pasif yeteneği uygulanan yük arttıkça azaldığını ve plastik deformasyona neden olan yüksek yükler altında çelik çubuklarda yeniden pasif tabakanın oluşmasının çok zor olduğu belirtmişlerdir.

Sahoo ve Balasubramaniam (2008), yaptıkları çalışmada simüle edilmiş beton gözenek çözeltisinde farklı klorür konsantrasyonunda fosforik demirlerde korozyonu incelemişlerdir. Üç tip fosforik demir, bir tane düşük karbonlu düşük alaşımlı ve bir tane düşük karbonlu çelik üzerinde korozyon deneyleri yaparak korozyon miktarlarını kıyaslamışlardır. Gözenek çözeltileri için pH derecesi 12,5 olan doymuş $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ve ağırlıkça %0, % 0,05, % 0,06, % 0,01 ve % 0,13 olan klorür çözeltileri kullanmışlardır. Deney sonuçlarına göre klorür miktarının artması her tip çelik üzerinde korozyon miktarını arttırmıştır. Ancak fosforik demirler normal demirlere kıyasla daha fazla korozyona karşı direnç göstermişlerdir.

Gao vd. (2010), yaptıkları çalışmada düşük karbonlu beyritik çeliğinin klorür iyonları içeren bir ortamda farklı sabit elastik yüksel altındaki korozyon davranışlarını incelemişlerdir. Kullanılan çeliğin akma ve çekme dayanımları sırasıyla 780MPa ve 890 MPa'dır. Numuneler akma mukavemetinin % 60, % 70 ve % 90 oranlarında yüklenmiş ve korozyon deneyi sırasında bu yüklemeler sabit tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre, yükleme arttıkça numuneler daha şiddetli korozyona uğradı ve farklı yüklemelerin korozyon şiddetleri arasındaki fark zamanla daha da arttığı tespit edilmiştir. Gerilmeye maruz kalmış metallerde Cl^- iyonlarının metalin korozyon şiddetini artırmakta ve zaman içerisinde bu fark daha belirgin hale gelmektedir.

Shuai vd. (2013), yaptıkları çalışmada farklı mikroyapılara sahip düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çeliğin NaCl çözeltisindeki korozyon davranışına yükleme koşullarının etkisini araştırmışlardır. Çelik numune olarak beynitik çelik ve çift fazlı ferritik-perlitik çelik kullanmışlardır. Çeliklerin akma dayanımları sırasıyla 697,6 MPa ve 284,5 MPa'dır. Testler ağırlıkça %3,5 NaCl içeren çözeltide gerçekleşmiştir. Deney sonuçlarına göre yüklenen numuneler, yüksüz numunelere göre daha yüksek korozyon hızı göstermişlerdir. Ancak numuneler aralarındaki korozyon farkı zamanla azalmıştır. Bu davranış metalin yüzey aktivitesini arttıran ve reaksiyon enerjisini azaltan uygulanan yükün ve metalin deformasyonuna bağlanmaktadır.

Moser vd. (2012), yaptıkları çalışmada simüle edilmiş alkali ve karbonatlı beton gözenek çözeltilerinde yüksek mukavemetli paslanmaz çeliklerin klorür kaynaklı korozyon direncini araştırmışlardır. Beton gözenek çözeltisini simüle etmek için pH derecesi 12,5 olan Ca(OH)_2 çözeltisi ve karbonatlaşma etkisini oluşturmak için NaHCO_3 ve Na_2CO_3 kullanmışlardır. Klorür etkisini araştırmak için 0 M, 0,25 M, 0,50M ve 1M konsantrasyonlarında NaCl çözeltiler hazırlamışlardır. Çelik numuneler yüksek alkali ortam pasif olarak kalmışlardır. Klorür miktarının arttırılması ile korozyon dirençlerinde azalma meydana gelmiş ancak bazı çelik türleri yüksek klorür konsantrasyonunda bile pasif halde veya az hasar almış olarak kalabilmeyi başarmışlardır. Karbonatlı ortamda ise alkali ortama göre daha düşük korozyon direnci sergilenmiş ve bu ortamda klorür iyonlarının artması ile korozyon direnci daha fazla düşmüştür.

Ye vd. (2013), yaptıkları çalışmada donatı çeliğinin farklı konsantrasyonlarda klorür içeren simüle edilmiş karbonatlı beton gözenek çözeltisinde korozyon davranışını incelemişlerdir. Beton gözenek çözeltisi için Ca(OH)_2 ve NaHCO_3 kullanılarak çözelti pH değeri 10 olarak ayarlanmıştır. Klorür etkisini gözlemlemek için 0 mol/L, 0,0001 mol/L, 0,001 mol/L, 0,01 mol/L, 0,05 mol/L ve 0,1 mol/L konsantrasyonlarında farklı klorür içerikleri kullanmışlardır. Klorür konsantrasyonu eşik değere ulaştığında donatı üzerindeki pasif filmin kararsız hale geldiği ve hatta yer yer lokal olarak bozulmaya başladığı tespit edilmiştir. pH derecesi 10 olan kullanılan çözeltide korozyonun başlaması için gerekli olan kritik klorür içeriği 0,01 mol/L olarak bulunmuştur. Bu çalışmada, klorür konsantrasyonu 0,01 mol/L altındaysa donatılar pasif olarak kalabileceği, klorür miktarının 0,01 mol/L'dan daha fazla olması durumunda korozyon miktarı ve hızının artacağı belirtilmiştir.

Shi vd. (2020), yaptıkları çalışmada klorür içeren doymuş $\text{Ca}(\text{OH})_2$ çözeltisinde iki farklı krom (Cr) ile modifiye edilmiş düşük alaşım çeliği ve normal düşük karbonlu donatı çeliğinin pasivasyon ve klorür kaynaklı donatı korozyonu üzerine araştırma yapmışlardır. Beton içinde donatı yüzeyinde oluşan pasif tabakayı simüle etmek için numuneler 10 gün boyunca pH derecesi 12,5 olan doymuş $\text{Ca}(\text{OH})_2$ çözeltisinde bırakılmış, daha sonra 1M konsantrasyona kadar NaCl kademeli olarak ilave edilerek numunelerin korozyon davranışları incelenmiştir. Artan klorür konsantrasyonu tüm çelikler için korozyon direncinin azalmasına ve çeliklerin daha fazla korozyona uğramasına sebep olmuştur. Cr ile modifiye edilmiş düşük alaşımlı çelikler ise normal çeliklere kıyasla klorür varlığında daha fazla korozyon direnci sergilemiş ve aynı zamanda yüzeylerinde oluşan pasif tabaka çelikleri korozyona karşı daha iyi bir şekilde korumuştur.

Shaheen ve Pradhan (2015), yaptıkları çalışmada farklı konsantrasyonlarda klorür ve sülfat iyonları ile kirlenmiş elektrolitik beton tozu çözeltilerinde donatı çeliğinin korozyon davranışını değerlendirmek için araştırmalar yapmışlardır. Klorür kaynağı olarak NaCl % 3, % 5 ve % 7 konsantrasyonlarında, sülfat kaynağı olarak Na_2SO_4 % 3, %6 ve % 12 konsantrasyonlarında kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre hem klorür hem de klorür-sülfatla kirlenmiş elektrolitik beton tozu çözeltilerinde serbest klorür konsantrasyonunun artması ile donatının pasif bölgesinin aralığı azalmıştır ve donatı korozyonu artmıştır.

2. MALZEME VE DENEYLER

2.1. Kullanılan malzemeler

Bu çalışmada, üç elektrot yöntemiyle Tafel polarizasyon eğrileri kullanılarak saf su, musluk suyu, deniz suyu ve 0,5 M ve 1 M klorür içeren çözeltilerde, hiç gerilme uygulanmamış B420C sınıfı donatı çeliğinde, elastik, akma, çekme ve kopma şekil değiştirme bölgelerinde çekme gerilmesi uygulanan donatı çeliklerinde oluşan korozyon hızları ölçülmüştür. Bu çalışmada bulunan korozyon hızları, Rize ilindeki betonarme yapı elemanlarındaki donatı korozyonu ile kıyaslanarak elde edilen deneysel korozyon hızları arazideki korozyon hızlarına uyarlanmıştır.

Bu çalışmada Karabük Demir Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş. 'den temin edilen TS 708'e uygun B420C sınıfı $\Phi 14$ 'lük çelik donatılar kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan donatı çeliğinin kimyasal analizi Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan donatı çeliğinin kimyasal analizi (%)

Element	Fe	C	Si	Mn	Cr	P	S
%	97,7	0,22	0,53	1,44	0.06	0.030	0.020

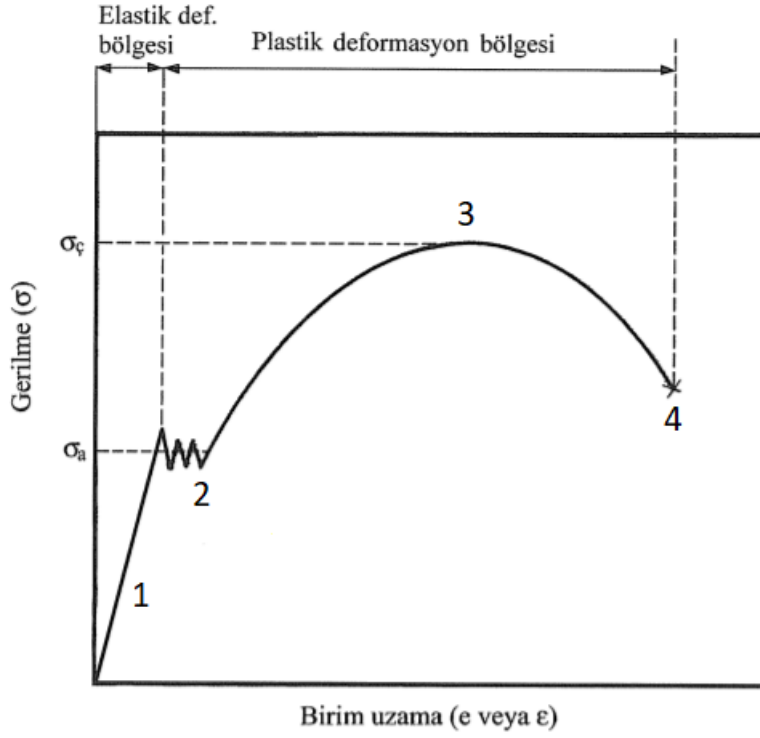
Donatı çelikleri Şekil 9'da görülen çene kısmı 170 mm'lik deney cihazında çekme deneyine tabi tutularak donatıların mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Çubukların çekme deneyi için boyları $L = (2 \times \text{Çene uzunluğu}) + 20 + L_0 + 20$ bağıntısına göre hesaplanmıştır. Buradaki L_0 değeri donatı çapının 5 katını ifade etmektedir. Çekme deneyi için donatı çubuklarının boyları $L = (2 \times 170) + 20 + (5 \times 14) + 20 = 450$ mm olarak hazırlanmıştır.



Şekil 9. Çelik donatıları çekme deneyinin uygulanması.

Şekil 10’da donatı çeliğinin gerilme-şekil değiştirme diyagramı görülmektedir. Şekil 10’da 1, 2, 3 ve 4 olarak isimlendirilen bölgelerde donatı çelikleri farklı büyüklüklerde çekme gerilmesine maruz bırakılmıştır. 1 ile numaralandırılan bölgede donatı üzerinde elastik çekme gerilmeleri olması için çekme cihazıyla 300 MPa (N/mm^2)’lık bir gerilme uygulanıp cihaz durdurulmuştur. 2 ile numaralandırılan bölgede donatı akma dayanımına ulaşmıştır ve akma tamamlanıp donatıda boy uzaması gerçekleştiği zaman cihaz durdurulup çelik çubuk cihazdan alınmıştır. Bu sayede çelik donatı akma gerilmesine maruz bırakılmıştır. Benzer şekilde 3 no’lu bölgede deney çelik donatı çekme gerilmesine ulaşana kadar devam ettirilmiş ve donatıya çekme gerilmesi uygulandıktan sonra deney durdurulmuştur. 4 no’lu bölgede donatı çeliği çekme cihazında koparıldıktan sonra elde edilen donatı çubukları kullanılmıştır. Numunelerin istenilen gerilme durumuna cihazın göstergesindeki gerilme şekil değiştirme diyagramı takip edilerek karar verilmiştir. Şekil 10’da 1 numaralı bölge ile gösterilen elastik bölgedeki numunelere 300 MPa (N/mm^2) gerilme uygulanmıştır. 2 numaralı bölge ile gösterilen akma dayanımı bölgesindeki numunelere 455 ± 10 MPa (N/mm^2) seviyesinde, 3 numaralı bölge ile gösterilen çekme dayanımı bölgesindeki numunelere ise 550 ± 10 MPa (N/mm^2) seviyesinde gerilme uygulanmıştır. 4 numaralı bölge ile gösterilen kopma

dayanımı bölgesinde ise numuneler çekme cihazında koparılabak kadar gerilme uygulanmıştır.



Şekil 10. Donatı çeliğinin gerilme-şekil değıştirme diyagramı.

Şekil 11’de çelik donatılar üzerinde çekme deneyi uygulanıp donatılar gerilmeye maruz bırakıldıktan sonra kesit alanlarını 1 cm^2 olacak şekilde tornalanmıştır. Korozyon deneyi için hazırlanan hücrede çelik donatının yüzey alanının 1 cm^2 olması gerekmektedir. Numunelerde tornalama işlemi bu yüzden yapılmıştır. Tornalama işleminde donatının sadece dış yüzeyleri sıyrılmış ve donatının iç bölgesine zarar verilmemiştir.



Şekil 11. Çelik donatıların tornada sıyrılmış ve sıyrılmamış durumları.

Şekil 12’de görüldüğü gibi kesit alanı 1 cm²’ye getirildikten sonra 5 mm uzunluğunda işaretlenip donatı çeliği dilimlenmiştir. Dilimleme yapıldıktan sonra demir numunelerin yüzeyi 320, 600 ve 2000’lik zımpara kâğıtları ile suyla birlikte zımpara yapılarak parlatılıp, aseton+etil alkol karışımı ile yıkanarak sıcak hava üflenerek kurutulmuş ve korozyon deneyine tabi tutulmuşlardır.



Şekil 12. Tornalama işlemi sonrası demir numunelerin dilimlenmesi.



Şekil 13. Yüzey parlatma işleminden sonra korozyon deneyine hazır hale getirilen numune.

Şekil 13’te görülen numune üç elektrot yönteminde saf su, musluk suyu, deniz suyu, 0,5 M ve 1 M sodyum klorür çözeltilerinin bulunduğu cam hücre içerisine konularak korozyon deneyine tabi tutulmuşlardır. Saf su, 0,5 M ve 1 M NaCl çözeltilerinin pH’ı 7,40, musluk suyunun pH’ı 7,60 ve deniz suyunun pH’ı 7,97 olarak ölçülmüştür. Tablo 3’te kullanılan musluk suyunun, Tablo 4’te Karadeniz deniz suyunun kimyasal analizi görülmektedir.

Tablo 3. Kullanılan musluk suyunun kimyasal analizi.

Maddeler	Miktar (mg/L)
Zn ²⁺	<0,01
P ₂ O ₅	0,02
Na ₂ O	60
Cl ⁻	18
SO ₄ ²⁻	16
NO ₃ ⁻	0,1
Pb ²⁺	<0,01
Şekerler	Yok
Askıda katı madde	Yok

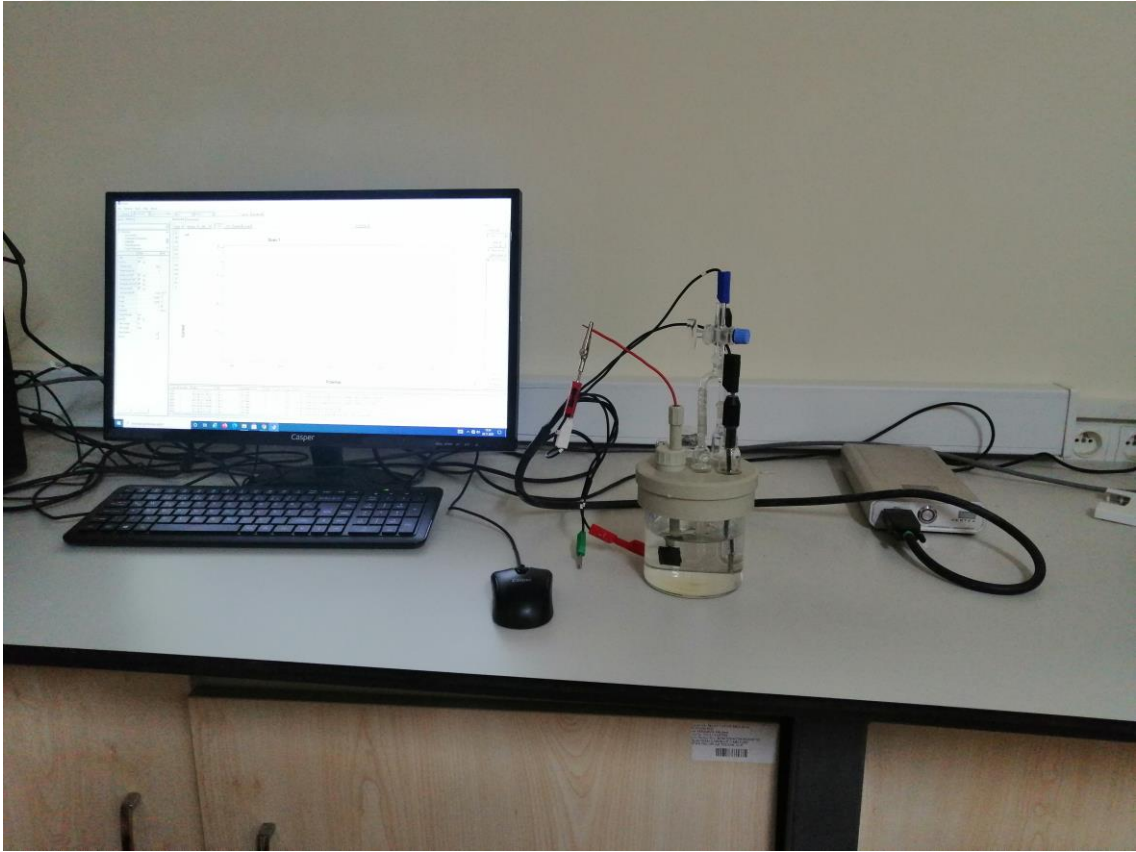
Tablo 4. Karadeniz deniz suyunun kimyasal analizi.

Maddeler	Miktar (mg/L)
Mg ²⁺	630
SO ₄ ²⁻	1270
Cl ⁻	8400
Na ⁺	5260
Ca ²⁺	250

2.2. Elektrokimyasal Ölçüm Yöntemi

Korozyon ölçümleri klasik 3 elektrot deney düzeneği kullanılarak yapılmıştır. Şekil 14’te korozyon ölçümlerinde kullanılan İvium marka Vertex Potansiyostat/Galvanostat, Zahner marka KMZ-3 model korozyon hücresi ve verilerin deney boyunca sürekli

kaydedilerek işlendiği bilgisayar görülmektedir. Anot olarak Şekil 15’te görülen demir numuneler, katot olarak Şekil 16’da görülen ince platin levha ve referans elektrot olarak Şekil 17’de görülen doymuş kalomel elektrot kullanılmıştır. Ölçümler oda sıcaklığında, -0,6V ile +0,6V potansiyel aralığında, 1 mV gerilim adımı ve 5mV/s tarama hızında yapılmıştır. Korozyon deneyinin sağlıklı bir şekilde gerçekleşmesi için oluşturulan korozyon hücresinin elektrokimyasal olarak denge durumuna gelmesi gerekmektedir. Bunun için deney düzeneği dengeye gelinceye kadar donatı çeliği numunesi yaklaşık 30 dakika boyunca çözelti içerisinde bekletilmektedir. Bu esnada açık devre potansiyel (OCP) eğrisi takip edilerek sistemin dengeye gelip gelmediği kontrol edilmektedir. OCP dengeye gelince deneye başlanarak tafel eğrileri oluşturulmaktadır.



Şekil 14. Elektrokimyasal korozyon deneylerinin yapıldığı üç elektrot sistemi.



Şekil 15. Anot olarak kullanılan çelik donatı numuneleri.



Şekil 16. Katot olarak kullanılan paslanmaz platin elektrot.



Şekil 17. Referans elektrot olarak kullanılan doymuş kalomel elektrot.

Tafel polarizasyon eğrilerinden elde edilen korozyon akım değerleri Denklem (17)'deki formülde yerine yazılarak korozyon hızları hesaplanmaktadır.

$$KH = (3272 \times I_{\text{corr}} \times EW) / (d \times A) \quad (17)$$

Bu formülde; KH: korozyon hızı, I_{corr} : korozyon akımını, EW: malzeme özgün eşdeğer kütle, d: malzemenin yoğunluğunu, A: korozyon test numunesinin yüzey alanını ifade etmektedir.

Korozyon hızını bulmak için Denklem 17'de kullanılan malzeme özgün eşdeğer kütle (EW) ise Denklem 18 (ASTM G 102 – 89, 1999) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$EW = \sum \frac{W_i}{n_i f_i} \quad (18)$$

Bu formülde; EW: malzeme özgün eşdeğer kütle, W_i : demir numunenin yapısında bulunan her bir elementin atom ağırlığı, f_i : demir numunenin yapısında bulunan her bir elementin kütle oranı, n_i : demir numunenin yapısında bulunan her bir elementin değerliğini göstermektedir.

Numunelerin korozyon dirençleri (R_p) ise bulunan korozyon akımlarına göre Denklem (7)'den hesaplanmaktadır.

Korozyon deneyleri 5 farklı çözelti ve 5 farklı gerilmeye maruz donatı çeliklerine uygulanmıştır. Her bir gerilme bölgesinde bulunan numuneler bütün çözeltiler içerisinde ayrı ayrı olarak korozyon deneyine tabi tutulmuştur. Her bir deney kontrol amaçlı 2 farklı

numuneye uygulanmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır. İki tane aynı donatı numunesi ve çözeltide korozyon hızları birbirinden çok farklı çıkmışsa tüm deney çözeltisi ve numuneleri yeniden hazırlanarak deney tekrarlanmıştır. Bu şekilde tekrarlanan ölçümler hariç bu çalışma için toplam 50 adet korozyon deneyi yapılmıştır. Çelik donatı numunelerinin korozyon hızı değerleri İvium yazılımı yardımıyla bilgisayar programından otomatik olarak hesaplanmıştır.

2.3. SEM/EDS Analizi

Çelik donatı numuneleri üzerinde korozyon deneyleri uygulandıktan sonra numunelerin SEM/EDS (taramalı elektron mikroskopu/enerji dağılım spektroskopisi) analizi yapılmıştır. Bu analiz için Jeol marka JSM6610 model bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Çelik donatıların içyapıları incelenerek donatıların içyapılarını gösteren fotoğraflar çekilmiştir. SEM analizleri geri saçılan (backscatter) elektron modunda 15 kV'lık hızlandırma voltajında, 100, 200 ve 500 büyütme oranlarında yapılmıştır. Çelik donatının içyapısında bulunan fazlar ise EDS analizi ile incelendi. SEM/EDS analizi sonucunda korozyona uğramış numunelerin içyapısında meydana gelen değişiklikler gözlemlenmiştir.

SEM/EDS analizleri için demir donatı numuneleri 320, 600 ve 2000 kalınlığında zımpara kâğıtları ile zımparalanarak yüzeyleri parlatılmış, etil alkol ve aseton karışımı çözelti ile yüzeyleri yıkanmış, sıcak hava üflenerek kurutulmuş ve sonrasında analiz yapılmıştır. Korozyona maruz bırakılmayan numuneler üzerinde hazırlık işlemlerinden hemen sonra, korozyona maruz kalan numuneler üzerinde ise korozyon deneylerinden hemen sonra SEM/EDS analizi yapılmıştır.

3. BULGULAR

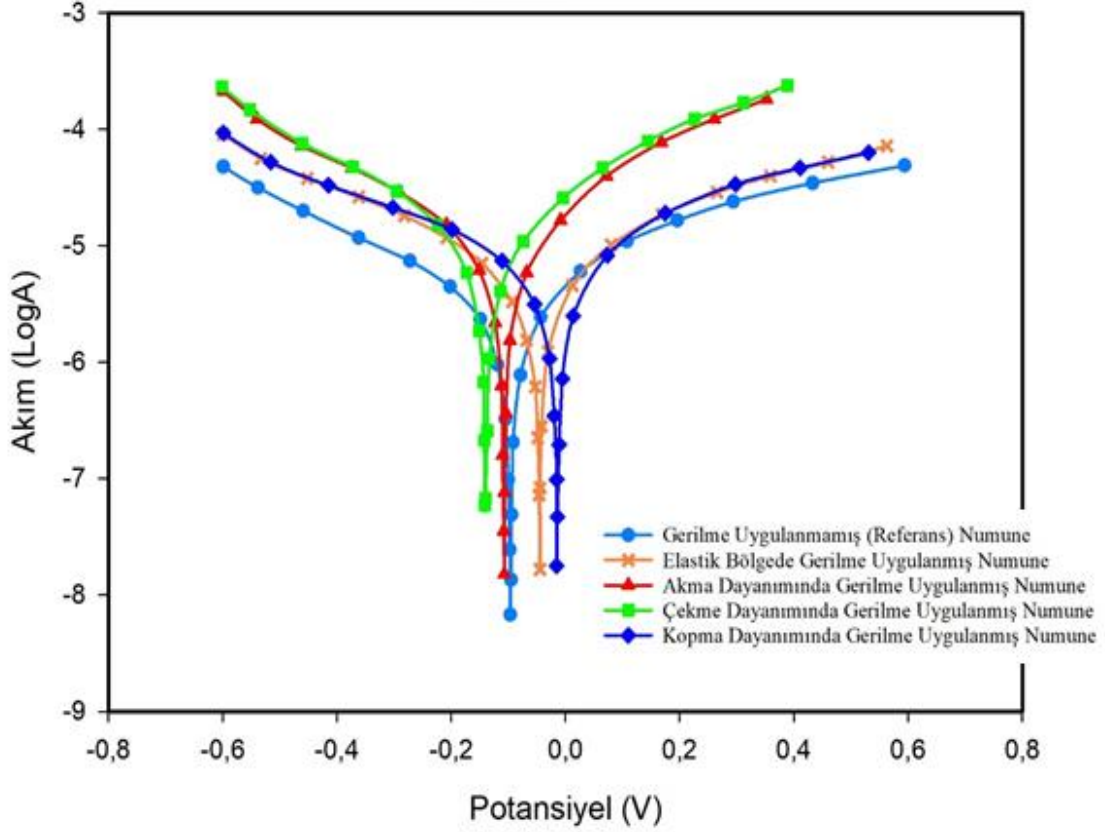
Bu çalışmada çekme deneyi uygulanarak kopartılan B420C sınıfı beş adet çelik donatılardan ölçülen boy uzaması, akma dayanımı ve çekme dayanımı değerleri Tablo 5'te gösterilmektedir. Çalışma boyunca 15 adet Ø14'lük donatı çeliği kullanılmıştır.

Tablo 5. Çelik çekme deneyi sonuçları.

Numune No	İlk Boy (mm)	Son Boy (mm)	Birim boy uzaması (%)	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)
1	110,00	144,49	31,36	454,55	558,10
2	110,00	137,05	24,59	442,48	543,61
3	110,00	140,87	28,06	447,30	549,14
4	110,00	138,79	26,17	428,34	533,46
5	110,00	147,97	34,52	432,82	533,73

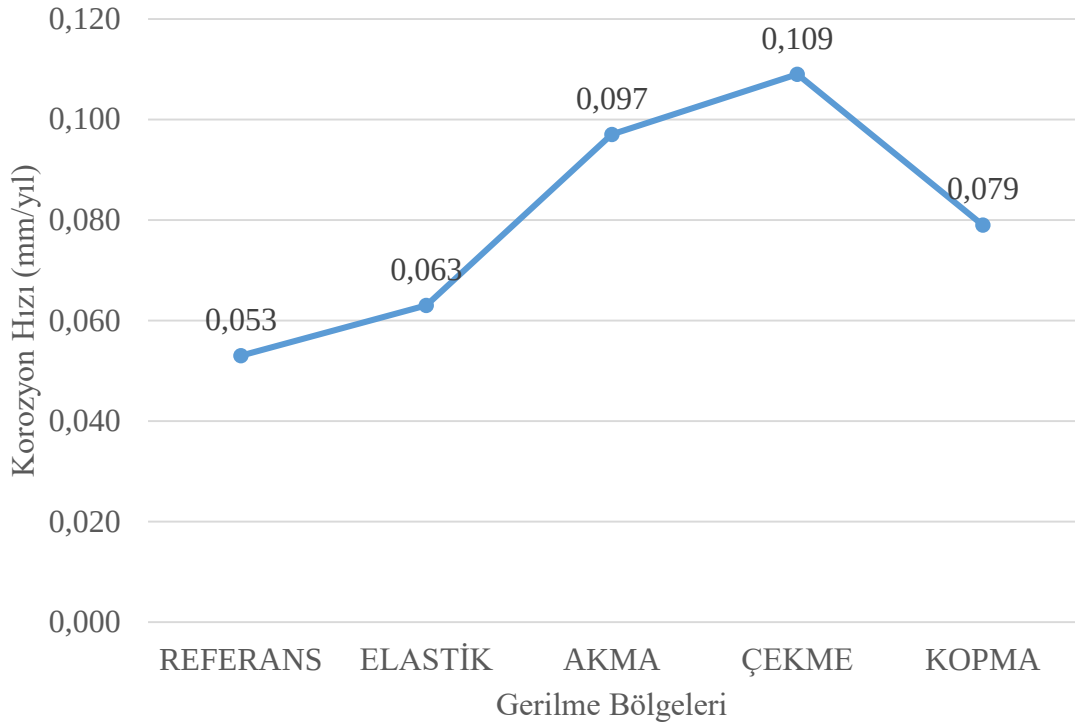
Tablo 5'te donatı çeliklerinin akma dayanımlarının 420 N/mm²'den, çekme dayanımlarının ise 500 N/mm²'den büyük olduğu görülmektedir. Çekme dayanımı/akma dayanımı oranları sırasıyla 1,28, 1,23, 1,23, 1,25, 1,23'tür ve bu değerler TS 708'in belirttiği en küçük 1,15, en büyük 1,35 değeri arasındadır. Deneysel akma dayanımı/karakteristik akma dayanımı oranları sırasıyla 1,08, 1,05, 1,07, 1,02, 1,03'tür ve TS708'in belirttiği 1,30 değerinden küçüktür. Kopma uzamaları TS708'de belirtilen %12 değerinden büyüktür. Çalışmada kullanılan donatı çelikleri TS 708'de belirtilen mekanik ve fiziksel kriterleri sağlamaktadır.

3.1. Elektrokimyasal yöntemle bulunan korozyon değerleri



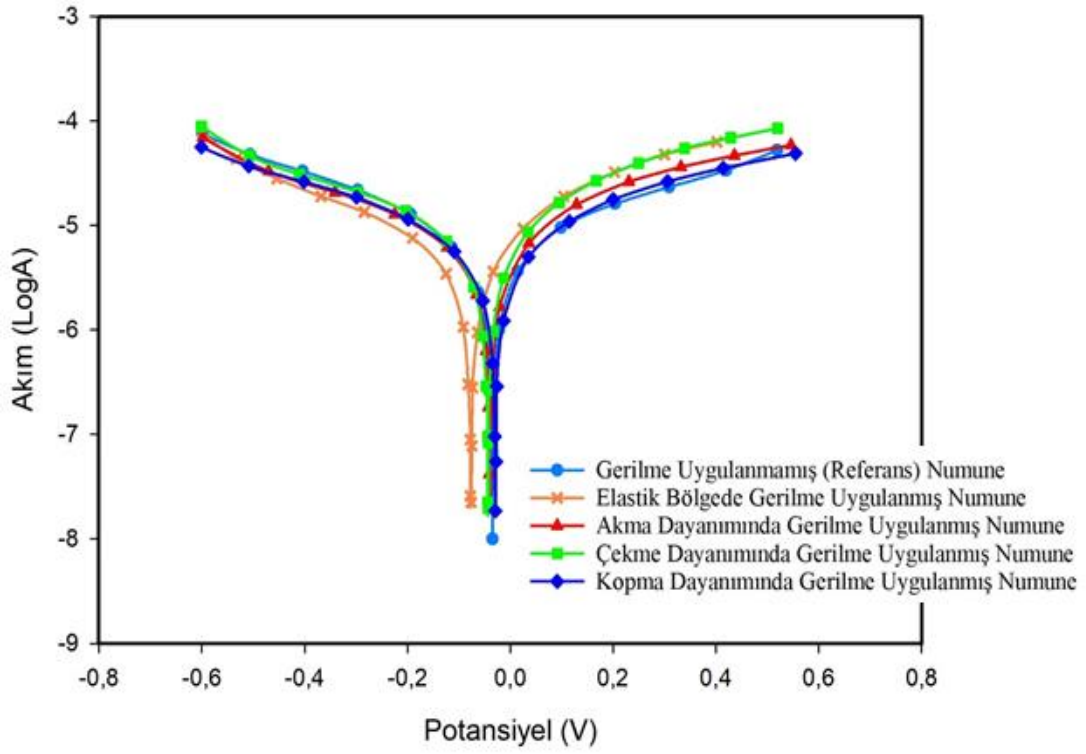
Şekil 18. Çelik donatıların saf sudaki korozyon deneylerinden elde edilen tafel polarizasyon eğrileri.

Şekil 18’de saf suda farklı gerilmelere maruz kalmış donatı çelikleri ile gerçekleştirilen korozyon deneyleri sonucunda elde edilen tafel eğrileri görülmektedir. Her bir tafel eğrisinin anodik ve katodik kolundan çizilen teğet doğrularının birleştiği noktanın düşey eksendeki bileşeni korozyon akımı değerini (I_{corr}), yatay eksen bileşeni ise korozyon potansiyeli değerini (E_{corr}) vermektedir. Bulunan korozyon akımı Denklem (17) de yerine yazılarak korozyon hızları hesaplanmaktadır. Korozyon direnci de korozyon akımı Denklem (7) de yerine yazılarak bulunmaktadır.

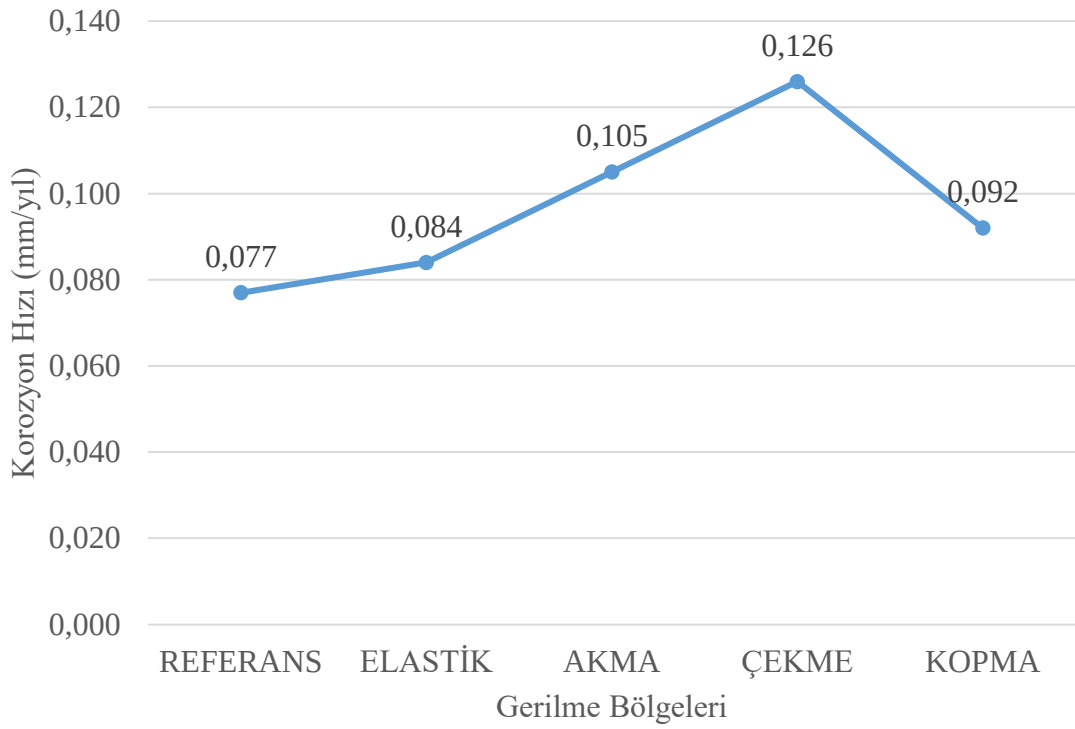


Şekil 19. Saf su ortamında farklı gerilmelere maruz kalmış çelik donatılardaki korozyon hızları.

Şekil 19’da görüldüğü gibi donatı çeliklerine gerilme uygulanması çekme bölgesine kadar donatıların korozyon hızını artırmıştır. Çekme deneyinde deney cihazında gerilme-şekil değiştirme eğrisinde en yüksek çekme gerilmesi oluşan kısım bu çalışmada çekme bölgesi olarak tarif edilen kısımdır. Gerilme-şekil değiştirme eğrisinde çekme gerilmesi değerinden sonraki gerilmeler daha düşük değerlerde ölçülmektedir ve bu bölge bu çalışmada kopma bölgesi olarak ifade edilmiştir. Donatıda en fazla gerilmenin olduğu çekme gerilmesinden sonraki kopma bölgesinde donatıda belirgin olarak kesit incelmesi meydana gelmektedir. Yani donatıda gerilme sonucunda biriken enerji donatı boy uzamasıyla harcanmaktadır. Şekil 19’da kopma bölgesi olarak tarif edilen kısımdaki donatıdaki korozyon hızı çekme bölgesi donatısından daha küçük değerde ölçülmüştür. Korozyon hızındaki bu azalma neticesinde kopma bölgesindeki numunelerin korozyon hızı akma bölgesindeki numunelerin korozyon hızından daha düşük olmuştur.

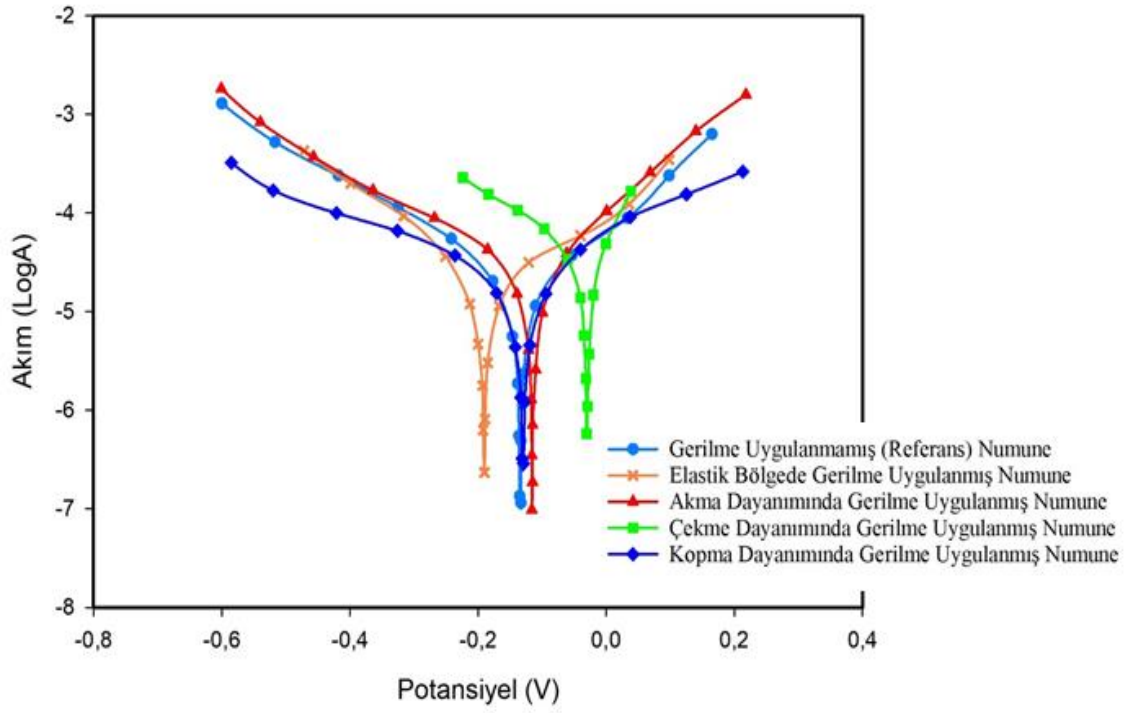


Şekil 20. Çelik donatıların musluk suyundaki korozyon deneylerinden elde edilen tafel polarizasyon eğrileri.

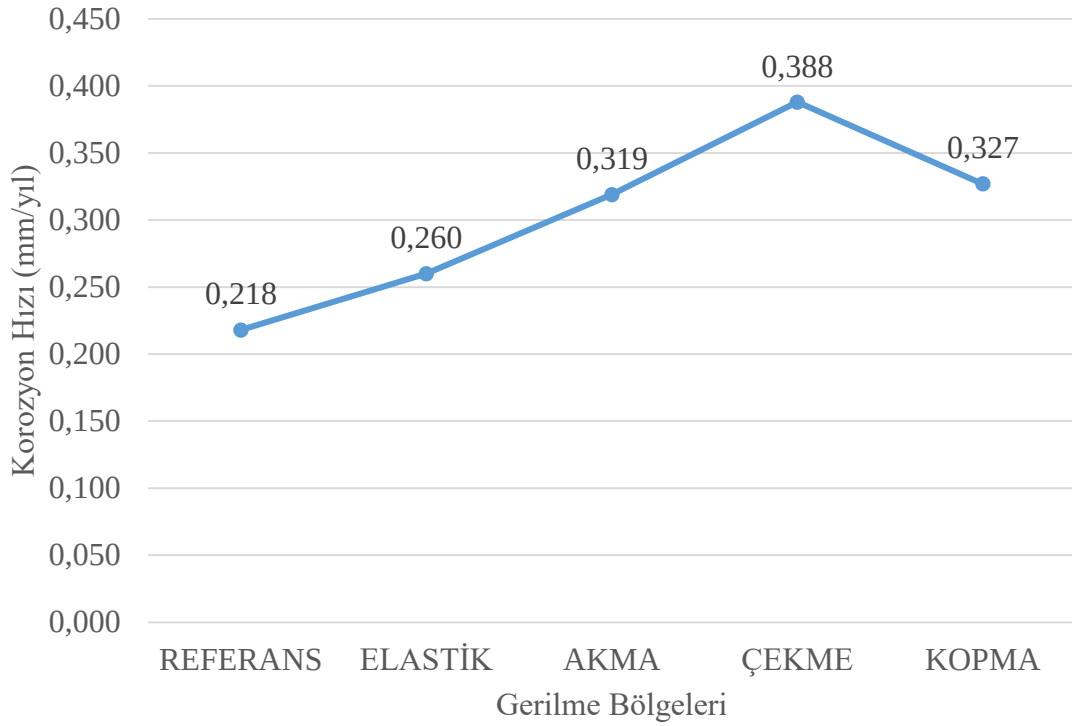


Şekil 21. Musluk suyu ortamında farklı gerilmelere maruz kalmış çelik donatılardaki korozyon hızları.

Şekil 20’de musluk suyunda farklı gerilmelere maruz kalmış donatı çelikleri ile gerçekleştirilen korozyon deneyleri sonucunda elde edilen tafel eğrileri, Şekil 21’de ise musluk suyu ortamında, gerilme uygulanmamış referans numunesinde, elastik, akma, çekme ve kopma bölgelerinde gerilme uygulanmış numunelerde ölçülen korozyon hızları görülmektedir. Şekil 19’de saf suda referans numunede 0,053 mm/yıl olarak ölçülen korozyon hızı, musluk suyunda % 45,3 artışla Şekil 21’de 0,077 mm/yıl değerinde ölçülmüştür. Musluk suyunda saf suya kıyasla çözeltideki iyonların artması donatı çeliğindeki korozyon hızının artmasına yol açmıştır. Musluk suyu ortamında elastik, akma, çekme ve kopma bölgesinde gerilme uygulanan donatı çeliklerin saf suya göre tüm bölgeler için korozyon hızları artış göstermiştir. Şekil 21’de musluk suyu ortamındaki donatı çeliklerinde referans numunelere göre elastik, akma ve çekme gerilmeleri uygulanan donatılarda korozyon hızlarında artış meydana gelmiştir. Çekme bölgesinden kopma bölgesine geçerken ise gerilme uygulanan donatılarda korozyon hızında azalma oluşmuştur. Bu azalma sonucunda kopma bölgesindeki numunelerin korozyon hızı akma bölgesindeki numunelerden de aşağıya düşmüştür. Şekil 21’de musluk suyunda gerilme bölgelerine göre korozyon hızlarında Şekil 19’a benzer bir değişim göstermiştir. Yani donatıya uygulanan gerilme artışı çekme bölgesine kadar donatının korozyon hızında artışa, kopma bölgesinde ise bir miktar azalmaya yol açmıştır.

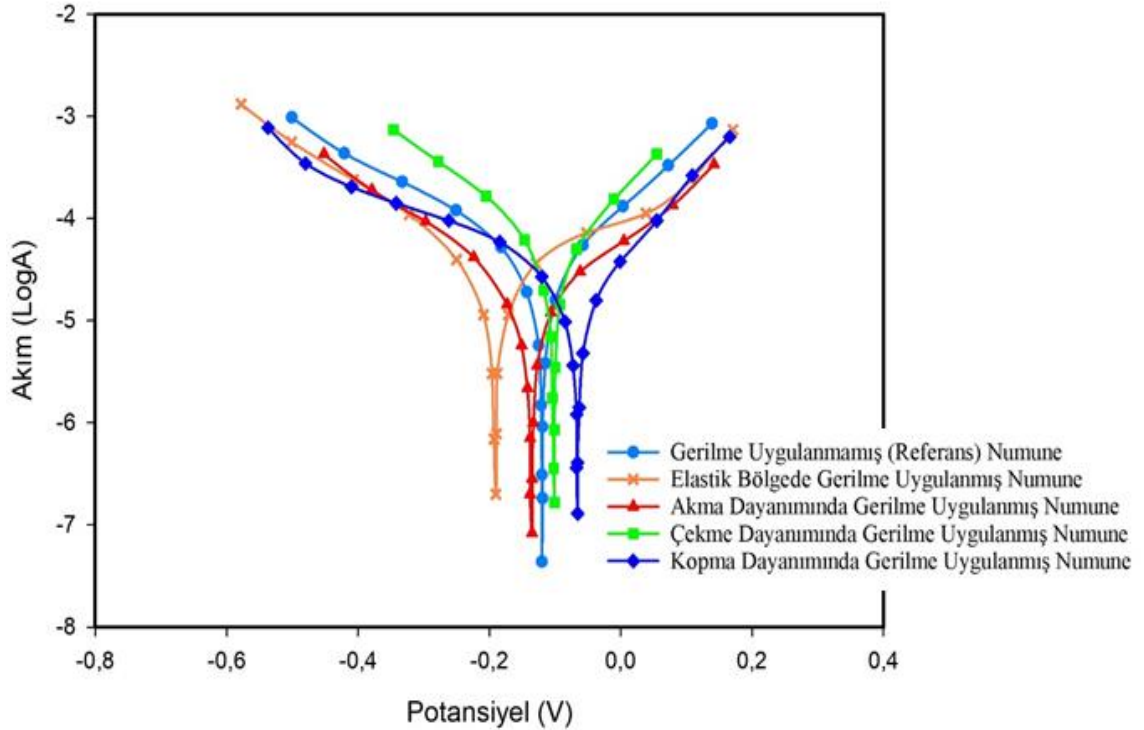


Şekil 22. Çelik donatıların 0,5M NaCl çözeltisindeki korozyon deneylerinden elde edilen tafel polarizasyon eğrileri.

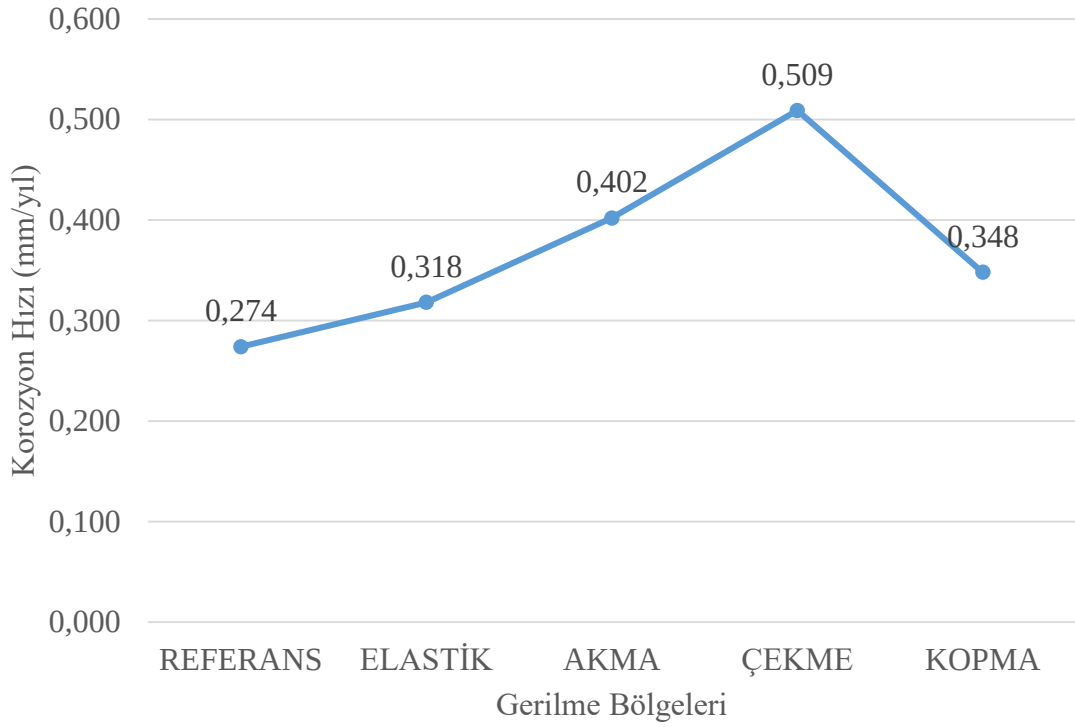


Şekil 23. 0,5M NaCl çözeltisi ortamında farklı gerilmelere maruz kalmış çelik donatılardaki korozyon hızları.

Şekil 22’de 0,5 M (molar) NaCl çözeltisinde farklı gerilmelere maruz kalmış donatı çelikleri ile gerçekleştirilen korozyon deneyleri sonucunda elde edilen tafel eğrileri, Şekil 23’de ise 0,5 M NaCl çözeltisi ortamında, gerilme uygulanmamış referans numunesinde, elastik, akma, çekme ve kopma bölgelerinde gerilme uygulanmış numunelerde ölçülen korozyon hızları görülmektedir. Şekil 23’te Şekil 19 ve Şekil 21’e benzer şekilde en düşük korozyon hızı referans numunesinde, en yüksek korozyon hızı çekme bölgesindeki numunede gözlenmiştir. Korozyon hızları referans numunesinden başlayarak çekme bölgesindeki numuneye kadar artmış, kopma bölgesindeki numunede ise çekme bölgesindeki numunelere göre korozyon hızında düşüş yaşanmıştır. Kopma bölgesinde meydana gelen korozyon hızındaki düşüş, saf su ve musluk suyu ortama dâhilere kıyasla daha az olmuş. Saf su ve musluk suyu çözeltisindeki korozyon hızındaki azalma ile akma bölgesindeki korozyon hızının altına düşerken 0,5 M sodyum klorür çözeltisindeki kopma bölgesindeki korozyon hızı akma bölgesindeki değerin üstünde kalmıştır. 0,5 M klorür çözeltisindeki referans numunesinde korozyon hızı musluk suyuna göre % 183,12 ve saf suya göre ise % 311,32 artışla 0,218 mm/yıl olmuştur.

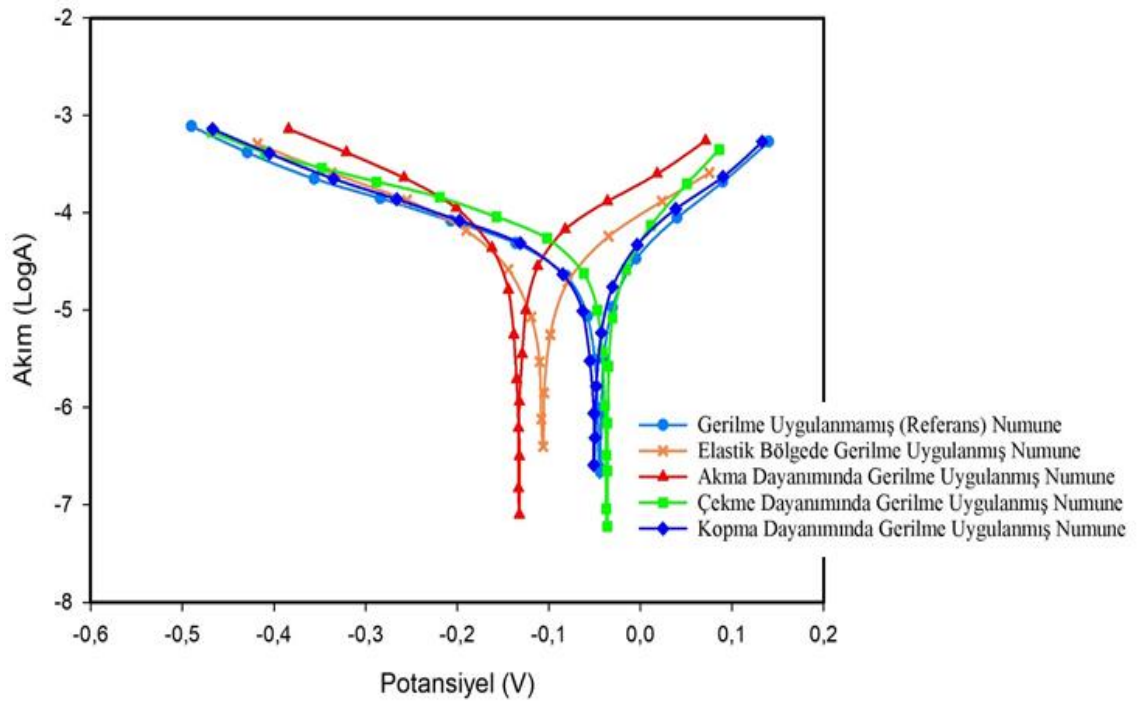


Şekil 24. Çelik donatıların 1M NaCl çözeltisindeki korozyon deneylerinden elde edilen tafel polarizasyon eğrileri.

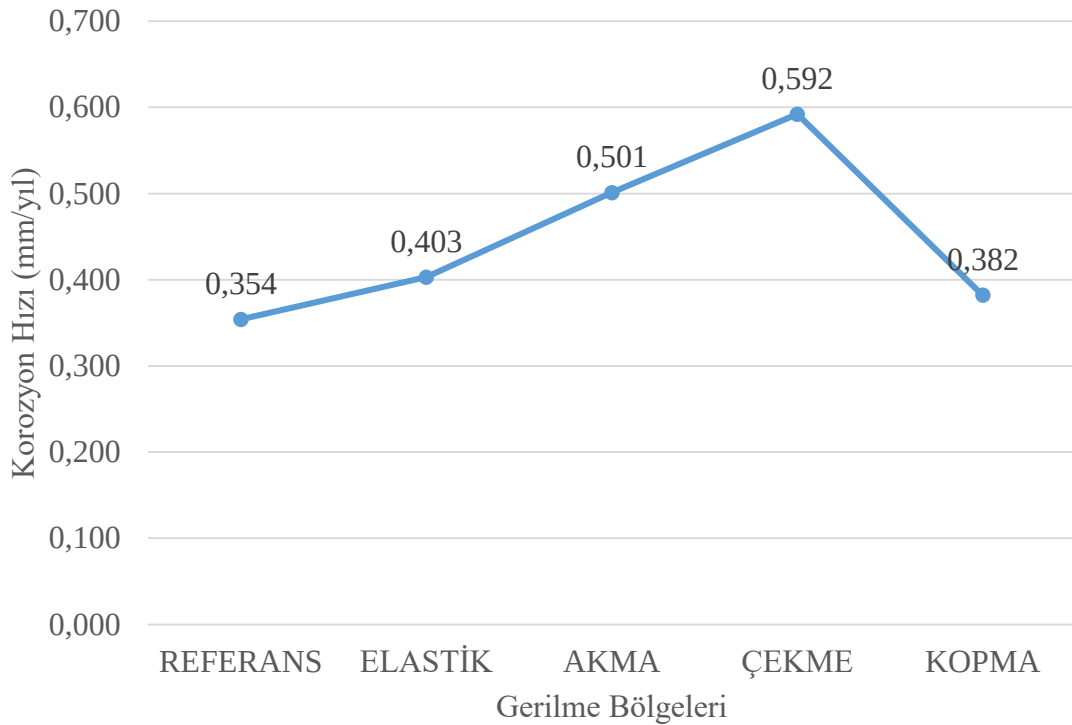


Şekil 25. 1M NaCl çözeltisi ortamında farklı gerilmelere maruz kalmış çelik donatılardaki korozyon hızları.

Şekil 24’de 1 M NaCl çözeltisinde farklı gerilmelere maruz kalmış donatı çelikleri ile gerçekleştirilen korozyon deneyleri sonucunda elde edilen tafel eğrileri, Şekil 25’de 1 M NaCl çözeltisi ortamında, gerilme uygulanmamış referans numunesinde, elastik, akma, çekme ve kopma bölgelerinde gerilme uygulanmış numunelerde ölçülen korozyon hızları görülmektedir. 1 M sodyum klorür çözeltisinde gerçekleştirilen korozyon deneyleri sonucunda bulunan korozyon hızları incelendiğinde benzer şekilde korozyon hızı referans numunesinde en düşük, çekme bölgesindeki numunede ise en yüksek olmuştur. Çekme dayanımından kopma dayanımına geçerken ise korozyon hızında düşüş meydana gelmiş ve korozyon hızı akma dayanımındaki korozyon hızının altına düşmüştür. Korozyon hızı referans numunesinde saf suya göre % 417, musluk suyuna göre % 255,84 ve 0,5 M klorür çözeltisine göre % 25,69 artışla 0,274 mm/yıl olmuştur. Çözeltilerin iyon derişimindeki artışa paralel olarak korozyon hızlarında da artış gözlenmiştir.

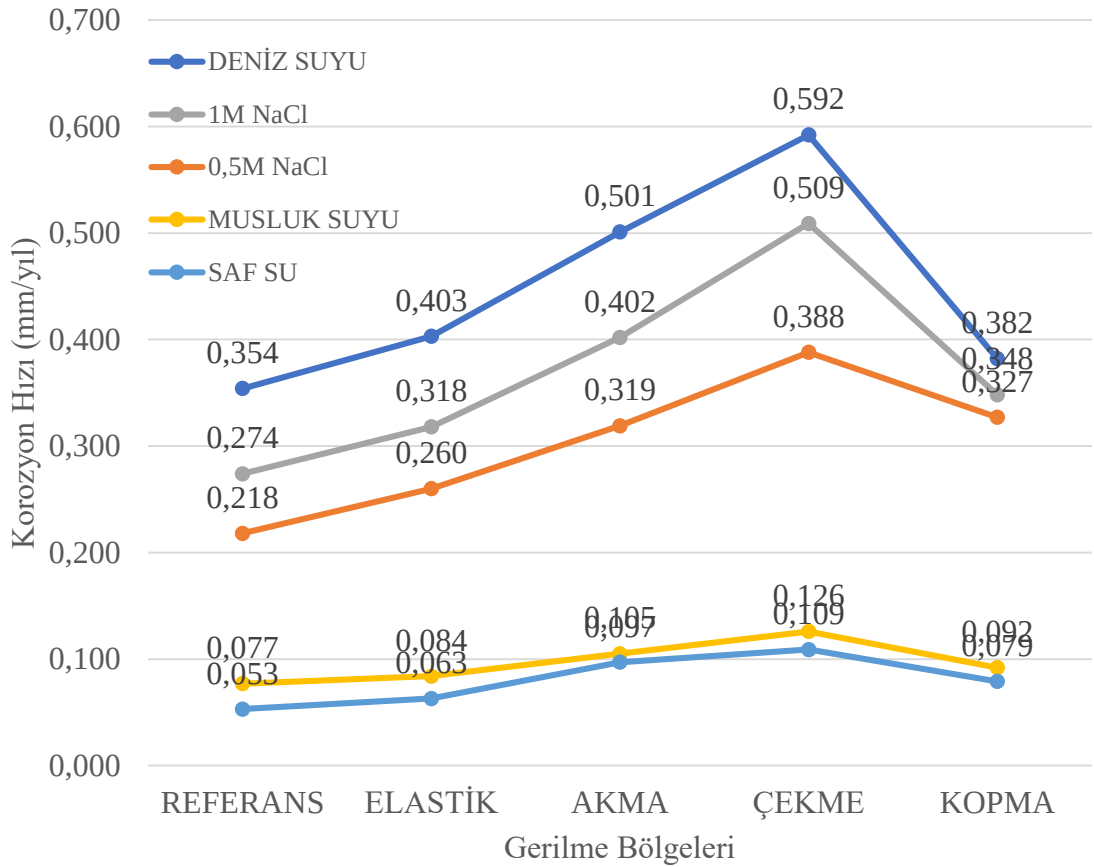


Şekil 26. Çelik donatıların deniz suyu ortamındaki korozyon deneylerinden elde edilen tafel polarizasyon eğrileri.



Şekil 27. Deniz suyu ortamında farklı gerilmelere maruz kalmış çelik donatılardaki korozyon hızları.

Şekil 26’da deniz suyunda farklı gerilmelere maruz kalmış donatı çelikleri ile gerçekleştirilen korozyon deneyleri sonucunda elde edilen tafel eğrileri, Şekil 27’de ise deniz suyu ortamında, gerilme uygulanmamış referans numunesinde, elastik, akma, çekme ve kopma bölgelerinde gerilme uygulanmış numunelerde ölçülen korozyon hızları gösterilmektedir. Şekil 27’de korozyon hızları musluk suyu, saf su ve sodyum klorür çözeltilerine benzer şekilde en düşük referans numunesinde en yüksek ise çekme bölgesindeki numunede ortaya çıkmıştır. Çekme bölgesindeki numuneden kopma bölgesindeki numuneye geçerken ise korozyon hızında düşüş meydana gelmiş ve korozyon hızı elastik bölgenin dahi altına ölçülmüştür. Korozyon hızı referans numunesinde saf suya göre % 567,93, musluk suyuna göre % 359,74, 0,5 M NaCl çözeltisine göre % 62,39 ve 1 M NaCl çözeltisine göre % 29,20 artışla 0,354 mm/yıl olmuştur. Deniz suyunda bulunan klorür miktarı yaklaşık olarak 0,25 M’a karşılık gelmektedir. Ancak diğer iyonların derişimi eklendiğinde toplam iyon derişimi artmakta ve sülfat etkisi ile birlikte korozyon hızı daha yüksek gelmektedir.



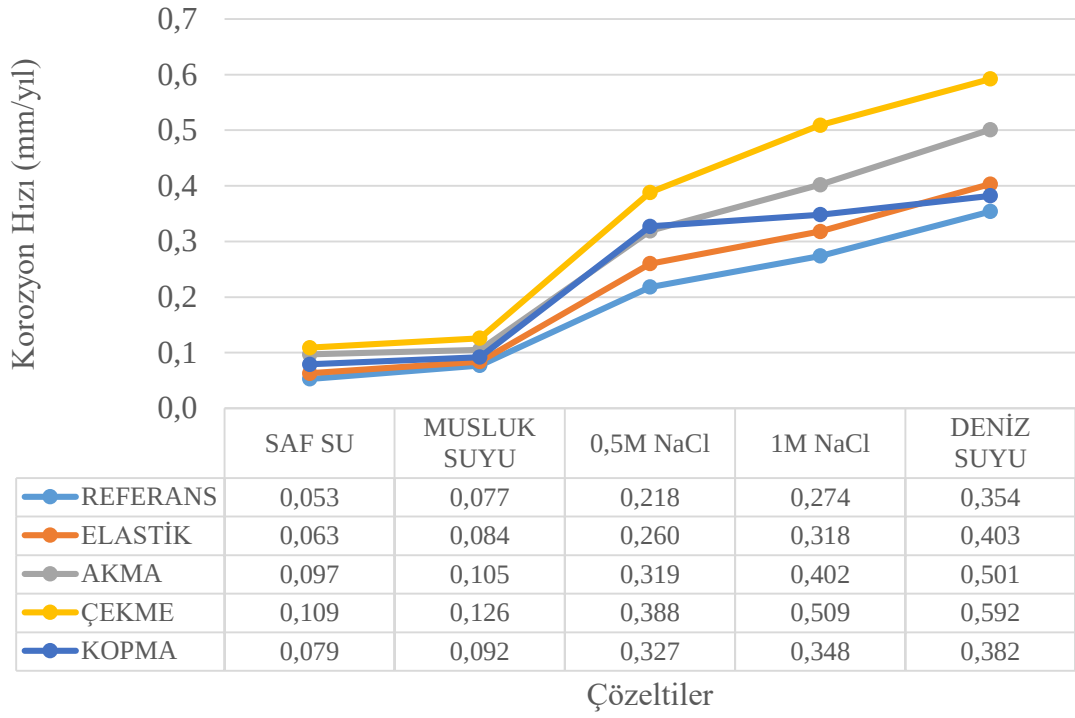
Şekil 28. Elektrokimyasal korozyon deneylerinin sonucunda elde edilen korozyon hızları.

Şekil 28’de bu çalışmada korozyon deneyleri sonucunda bulunan korozyon hızları görülmektedir. Tüm çözeltilerde korozyon hızları referans numunesinde en düşük, çekme bölgesinde en yüksek olmuş ve kopma bölgesinde çekme bölgesindeki değere göre bir düşüş tespit edilmiştir. Korozyon deneyleri sonucunda elde edilen tafel polarizasyon eğrileri yardımıyla korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akımı (I_{corr}), İvium yazılımı yardımıyla korozyon hızı değerleri ve Denklem (7) kullanılarak da korozyon direnci (R_p) bulunmuştur. Bu değerler Tablo 6’da görülmektedir.



Tablo 6. Elektrokimyasal korozyon deneyleri sonucunda bulunan deney sonuçları

Çözelti	Gerilme	E_{corr} (V)	I_{corr} (A.cm ⁻²)	Korozyon direnci R_p (ohm)	Korozyon hızı (mm/yıl)
Saf Su	-	-0,1756	$4,51 \cdot 10^{-6}$	$2,57 \cdot 10^4$	0,053
	Elastik	-0,0676	$5,39 \cdot 10^{-6}$	$2,43 \cdot 10^4$	0,063
	Akma	-0,1110	$8,30 \cdot 10^{-6}$	$1,53 \cdot 10^4$	0,097
	Çekme	-0,1733	$9,38 \cdot 10^{-6}$	$1,46 \cdot 10^4$	0,109
	Kopma	-0,1129	$6,81 \cdot 10^{-6}$	$1,70 \cdot 10^4$	0,079
Musluk	-	-0,0024	$6,60 \cdot 10^{-6}$	$1,78 \cdot 10^4$	0,077
Suyu	Elastik	-0,1363	$7,19 \cdot 10^{-6}$	$1,62 \cdot 10^4$	0,084
	Akma	-0,1174	$8,97 \cdot 10^{-6}$	$1,50 \cdot 10^4$	0,105
	Çekme	-0,1161	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$1,36 \cdot 10^4$	0,126
	Kopma	-0,0668	$7,92 \cdot 10^{-6}$	$1,55 \cdot 10^4$	0,092
0,5M NaCl	-	-0,0882	$1,87 \cdot 10^{-5}$	$2,53 \cdot 10^3$	0,218
	Elastik	-0,1660	$2,23 \cdot 10^{-5}$	$2,36 \cdot 10^3$	0,260
	Akma	-0,1022	$2,74 \cdot 10^{-5}$	$1,42 \cdot 10^3$	0,319
	Çekme	-0,0174	$3,33 \cdot 10^{-5}$	$1,11 \cdot 10^3$	0,388
	Kopma	-0,1429	$2,81 \cdot 10^{-5}$	$1,30 \cdot 10^3$	0,327
1M	-	-0,1004	$2,35 \cdot 10^{-5}$	$2,03 \cdot 10^3$	0,274
NaCl	Elastik	-0,1557	$2,73 \cdot 10^{-5}$	$1,86 \cdot 10^3$	0,318
	Akma	-0,074	$3,45 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^3$	0,402
	Çekme	-0,0920	$4,37 \cdot 10^{-5}$	$8,43 \cdot 10^2$	0,509
	Kopma	-0,0347	$2,99 \cdot 10^{-5}$	$1,22 \cdot 10^3$	0,348
Deniz	-	-0,0385	$3,04 \cdot 10^{-5}$	$1,20 \cdot 10^3$	0,354
Suyu	Elastik	-0,0826	$3,46 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^3$	0,403
	Akma	-0,0724	$4,30 \cdot 10^{-5}$	$8,57 \cdot 10^2$	0,501
	Çekme	-0,0177	$5,08 \cdot 10^{-5}$	$7,55 \cdot 10^2$	0,592
	Kopma	-0,0661	$3,28 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^3$	0,382



Şekil 29. Farklı çözeltilerde gerçekleştirilen korozyon deneylerinin sonucunda bulunan korozyon hızları.

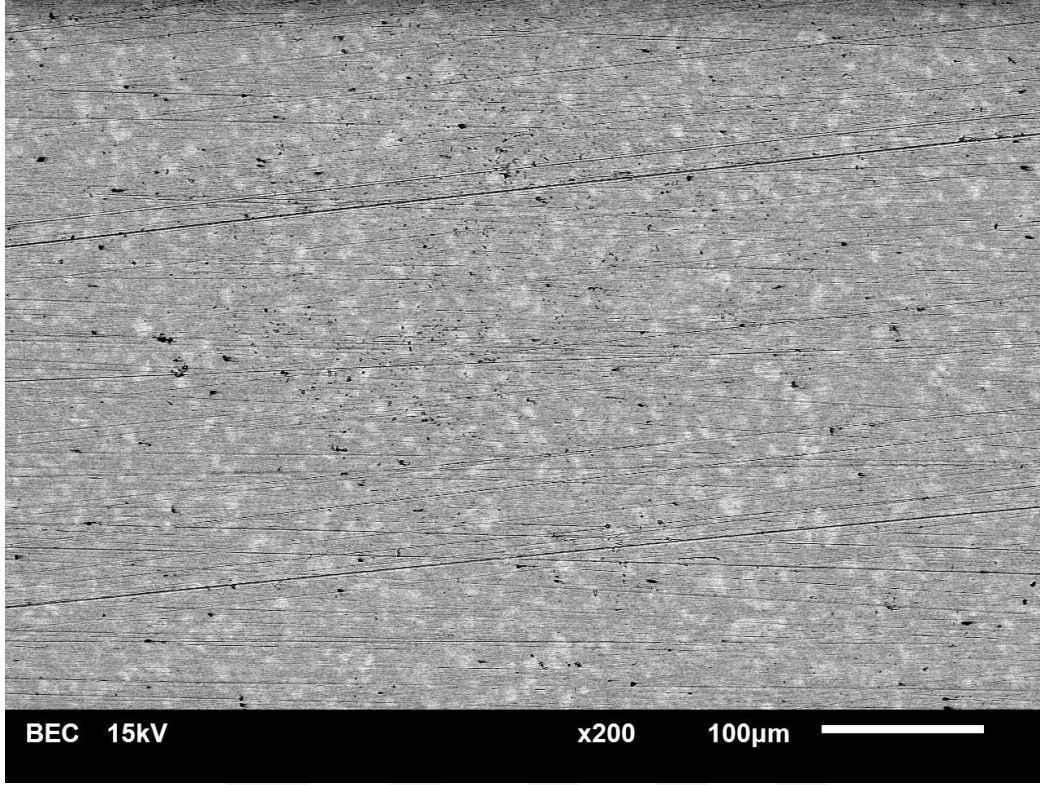
Şekil 29’da saf su, musluk suyu, 0,5 M NaCl, 1 M NaCl ve deniz suyu çözeltileri içerisinde gerçekleştirilen elektrokimyasal korozyon deneyleri sonucunda bulunan donatı çeliklerinde ki korozyon hızları görülmektedir. Referans numunelerde korozyon hızı en az 0,053 mm/yıl ile saf su ortamı içerisinde, en fazla 0,354 mm/yıl ile deniz suyu ortamı içerisinde ölçülmüştür. Referans numunelerin korozyon hızındaki oransal olarak en fazla artış musluk suyundan 0,5 M NaCl çözeltisine geçerken meydana gelmiştir. Elastik bölgede gerilme uygulanan numunelerde korozyon hızı en az 0,063 mm/yıl ile saf su ortamı içerisinde, en fazla 0,403 mm/yıl ile deniz suyu ortamı içerisinde ölçülmüştür. Akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış numunelerin korozyon hızı en az 0,097 mm/yıl ile saf su ortamı içerisinde, en fazla 0,501 mm/yıl ile deniz suyu ortamı içerisinde gözlemlenmiştir.

Çekme dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış numunelerin korozyon hızı en az 0,109 mm/yıl ile saf su ortamı içerisinde, en fazla 0,592 mm/yıl ile deniz suyu ortamı içerisinde gözlemlenmiştir. Bu gerilme bölgesinde de önceki bölgelerde olduğu gibi korozyon hızları saf sudan deniz suyuna kadar artış göstermiştir. Kopma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış numunelerin korozyon hızı en az 0,079 mm/yıl ile saf su

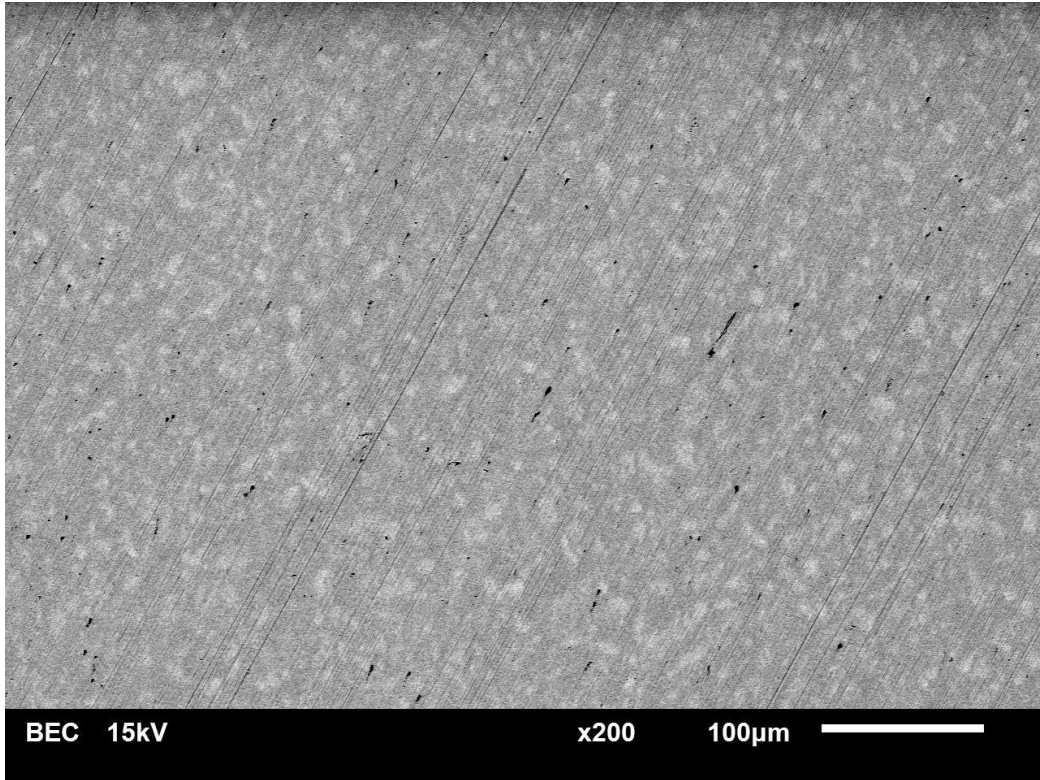
ortamı içerisinde, en fazla 0,382 mm/yıl ile deniz suyu ortamı içerisinde gözlemlenmiştir. Bu bölgede bulunan numunelerin korozyon hızları çekme ve akma dayanımı bölgesindeki numunelerden düşük, referans ve elastik bölgedeki numunelerden daha fazladır. Ancak bu bölgedeki numunelerin korozyon hızları akma dayanımı bölgesindeki numunelerden genel olarak düşük olmasına rağmen 0,5 M NaCl çözeltisinin akma dayanımı bölgesindeki numunesinde korozyon hızı kopma dayanımı bölgesindeki numuneden daha yüksektir. Benzer bir durum elastik bölgedeki numunelerde vardır. Elastik bölgedeki numunelerin korozyon hızı bu bölgedeki numunelerin korozyon hızından daha düşük olmasına rağmen deniz suyunda elastik bölgedeki numunenin korozyon hızı bu bölgedeki numunenin korozyon hızından daha yüksektir. Kopma dayanımında gerilme uygulanan numuneler arasında ise korozyon hızı saf sudan deniz suyuna doğru klorür miktarının artması ile artmıştır. Kopma dayanımı bölgesinde korozyon hızı musluk suyundan 0,5 M NaCl çözeltisine geçerken ani yükselmiş, daha sonra ise yükselişi yavaşlamıştır. Korozyon direnci ise Tablo 6’da gösterildiği gibi klorür miktarı ve numuneler üzerinde uygulanan gerilmeler arttıkça azalmıştır.

3.2. SEM/EDS Analizleri

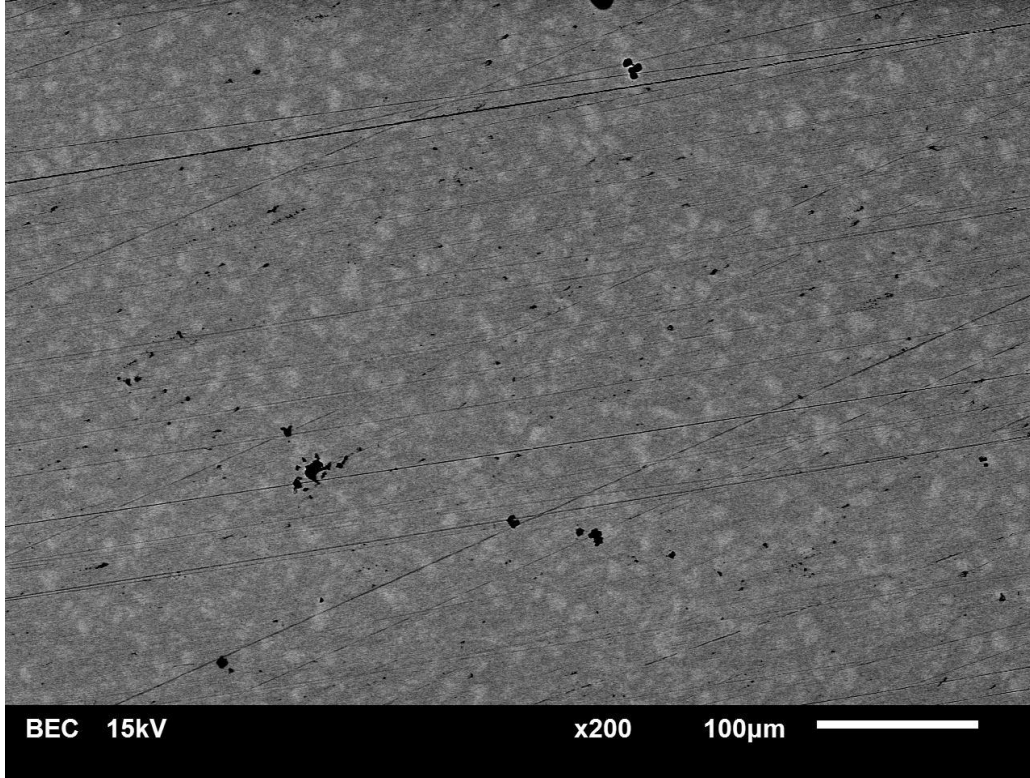
SEM/EDS analizleri referans teşkil etmesi açısından ilk olarak her bir gerilme bölgesinde korozyon deneyine tabi tutulmamış yani donatı üzerinde korozyon meydana gelmemiş numuneler kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra her bir farklı gerilme bölgelerinde ve farklı çözeltilerde korozyon deneyine tabi tutulan numunelerin analizleri yapılmıştır.



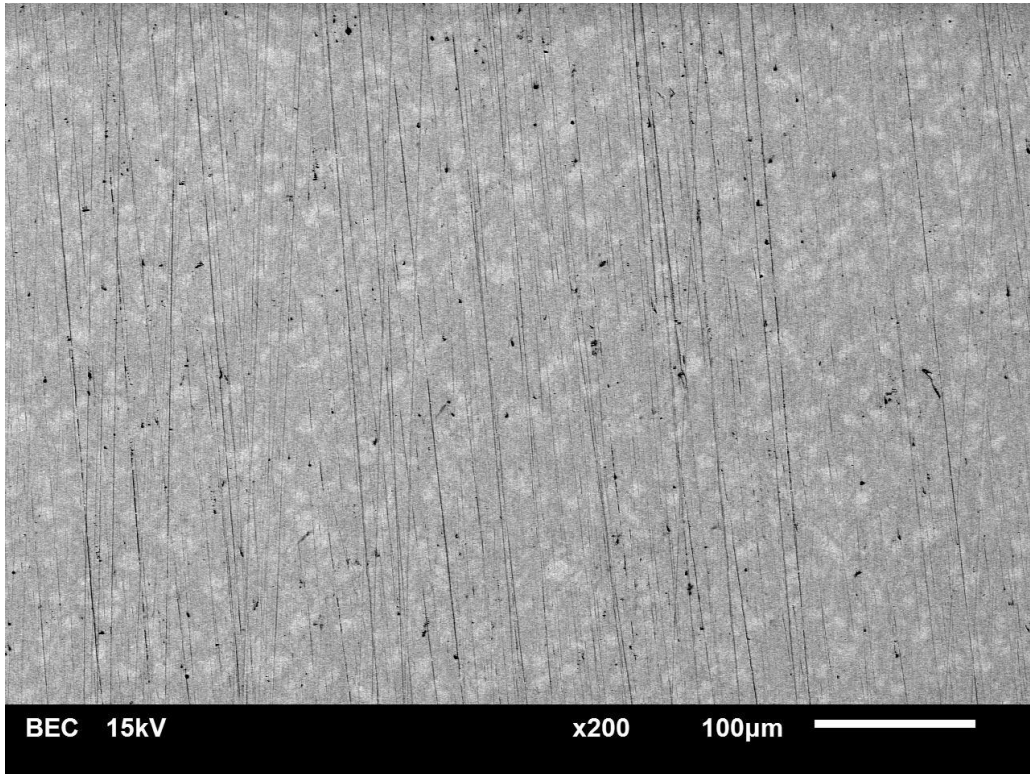
Şekil 30. Gerilme uygulanmamış ve korozyon deneyine tabi tutulmamış numunenin SEM görüntüsü.



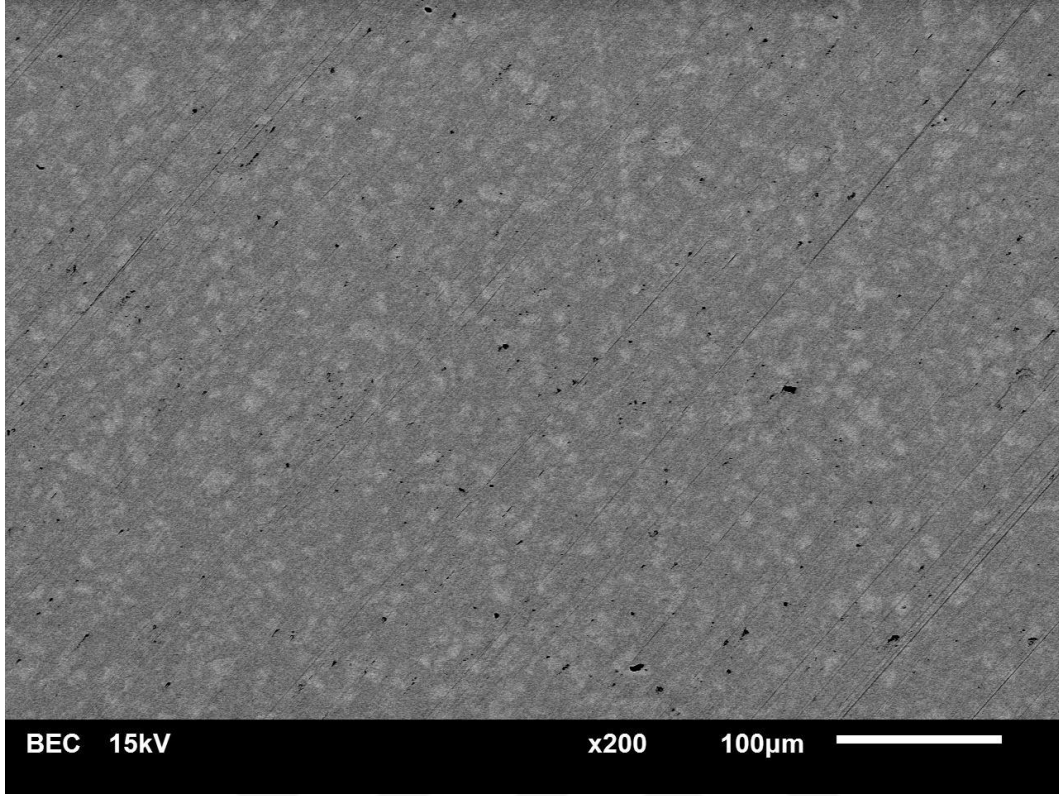
Şekil 31. Elastik bölgede gerilme uygulanmış ve korozyon deneyine tabi tutulmamış numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 32. Akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve korozyon deneyine tabi tutulmamış numunenin SEM görüntüsü.

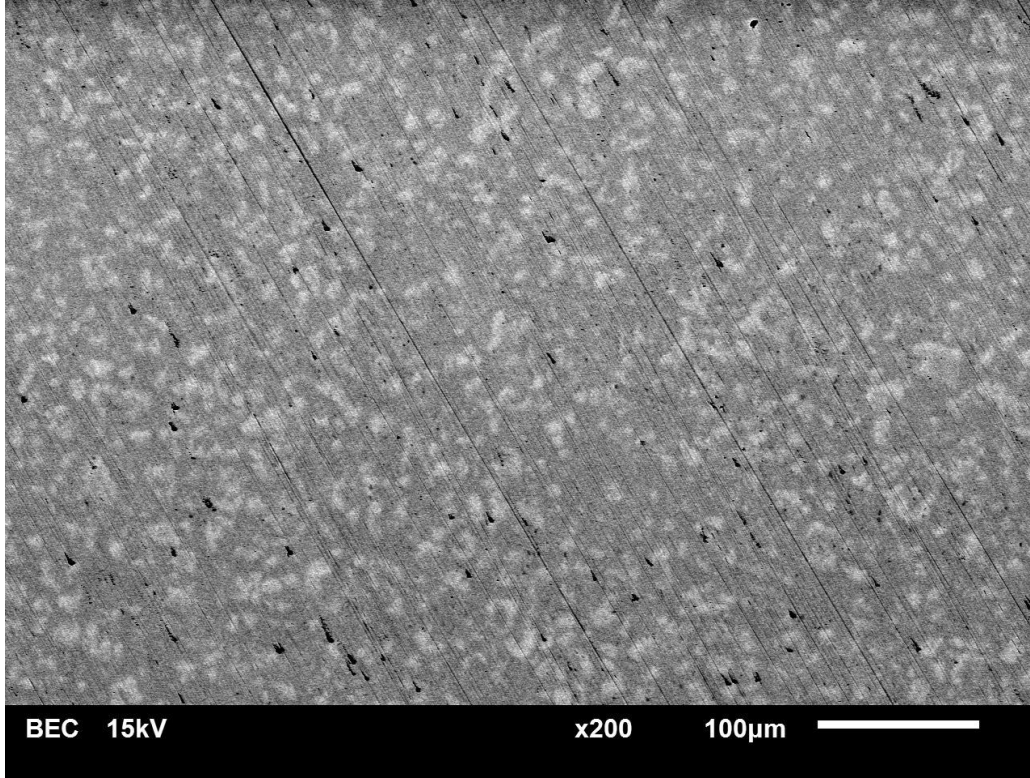


Şekil 33. Çekme dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve korozyon deneyine tabi tutulmamış numunenin SEM görüntüsü.

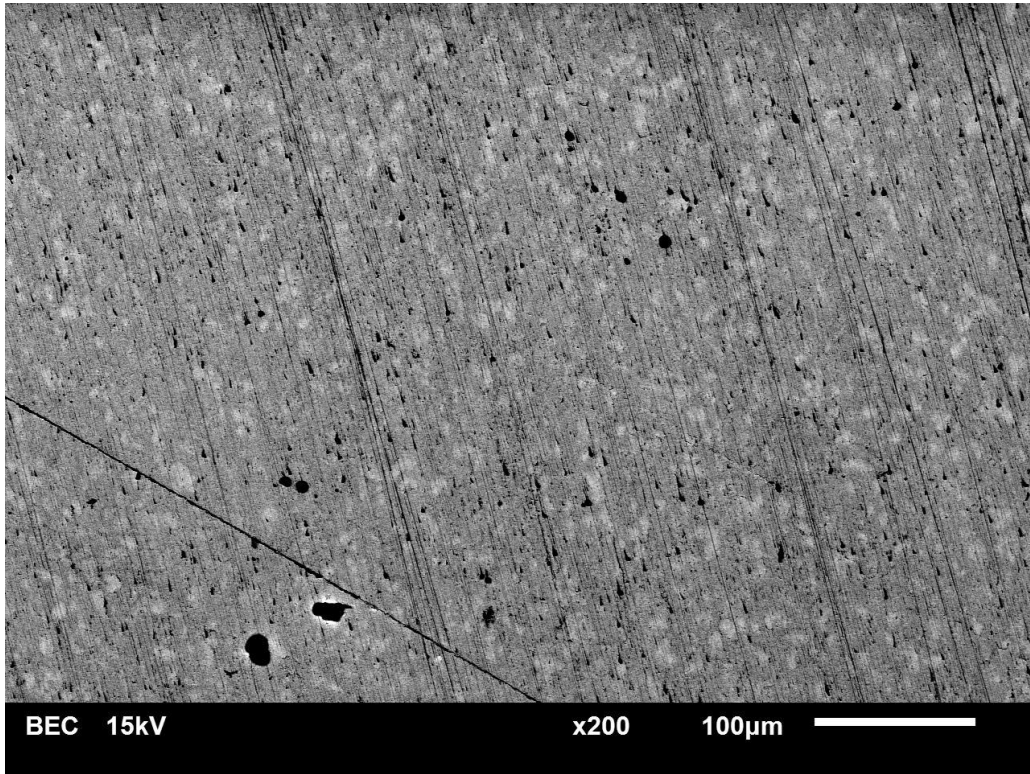


Şekil 34. Kopma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve korozyon deneyine tabi tutulmamış numunenin SEM görüntüsü.

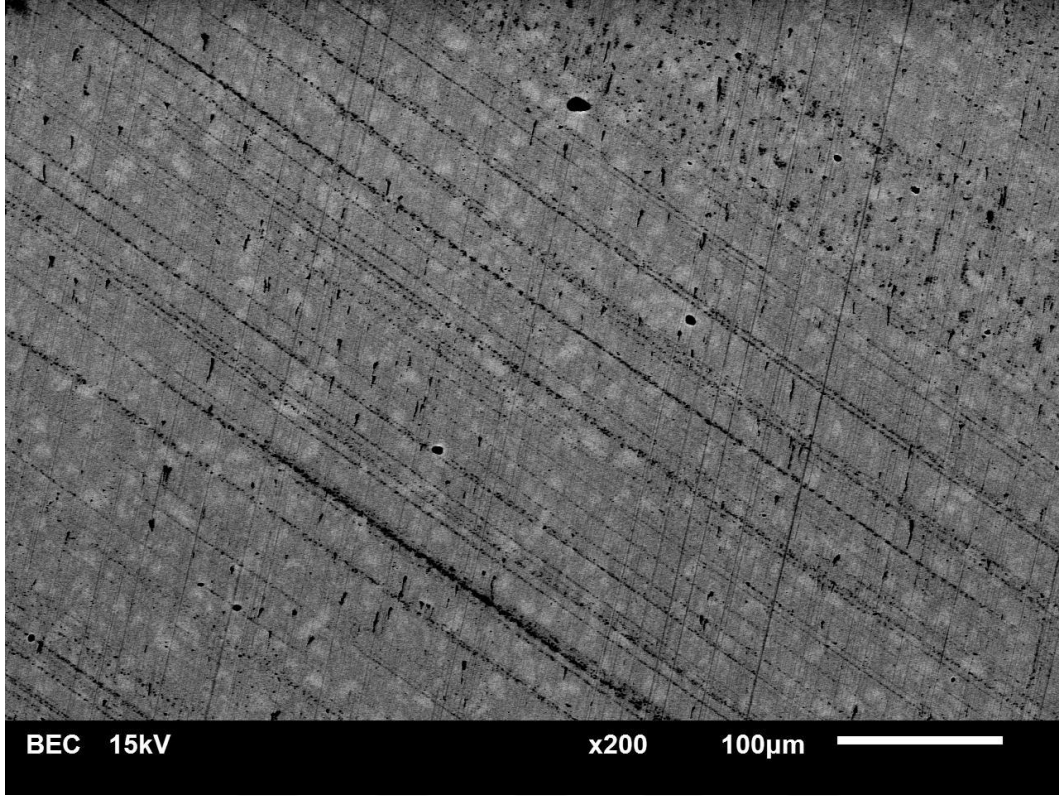
Şekil 30’da gerilme uygulanmamış ve korozyon deneyine tabi tutulmamış numunenin SEM görüntüsü, Şekil 31’de elastik bölgede, Şekil 32’de akma dayanımı bölgesinde, Şekil 33’de çekme dayanımı bölgesinde ve Şekil 34’de ise kopma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve korozyon deneyine tabi tutulmamış numunelerin 200 kat büyütme SEM görüntüleri görülmektedir. Numunelerin yüzeylerinin temiz ve korozyon kalıntıları bulunmamaktadır. Görsellerde küçük siyah şeklinde gözüken noktaların demir donatının içerisinde bulunabilecek boşluklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 35. Gerilme uygulanmamış ve musluk suyunda korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüsü.

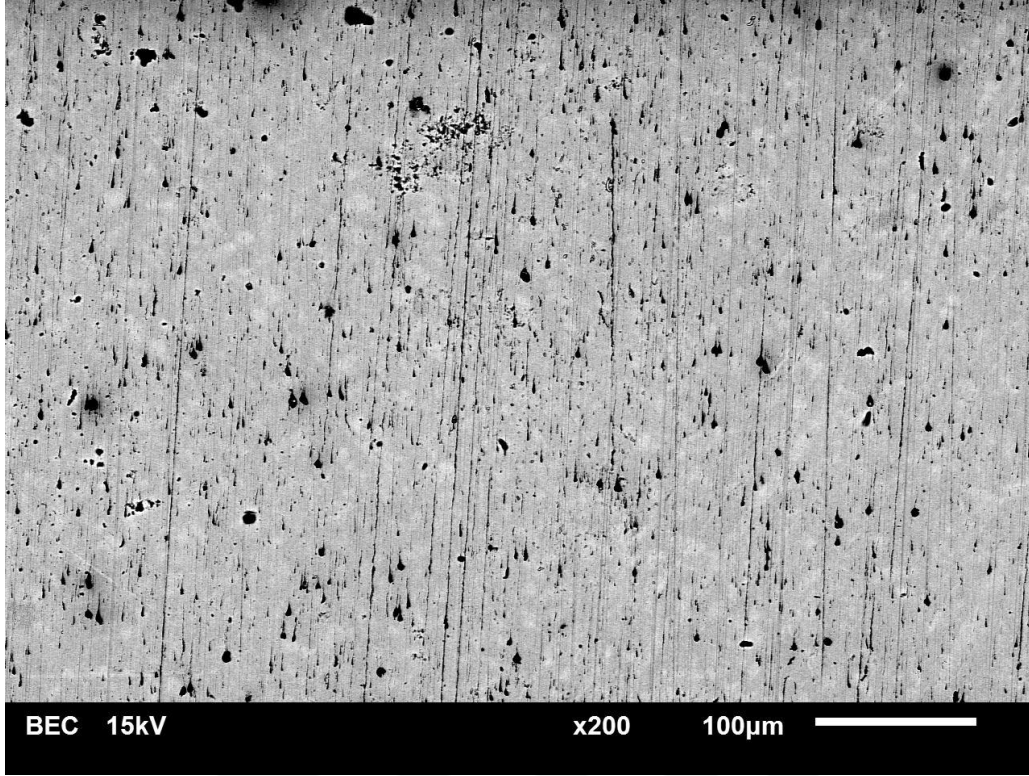


Şekil 36. Akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve musluk suyunda korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüsü.

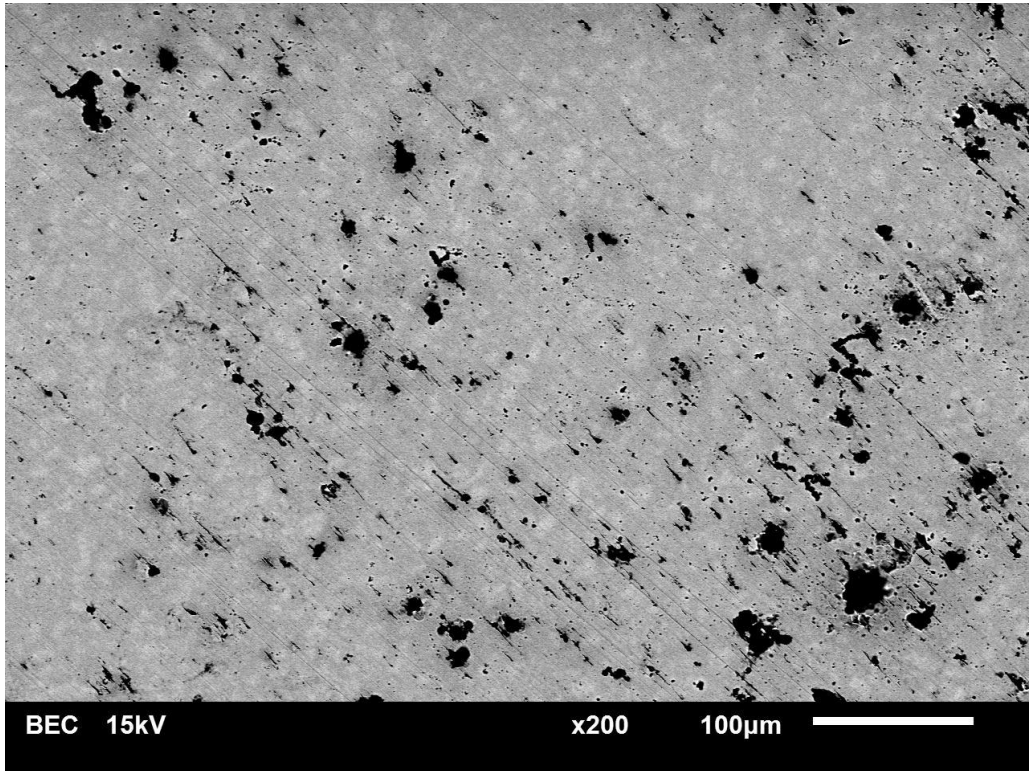


Şekil 37. Çekme dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve musluk suyunda korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüsü.

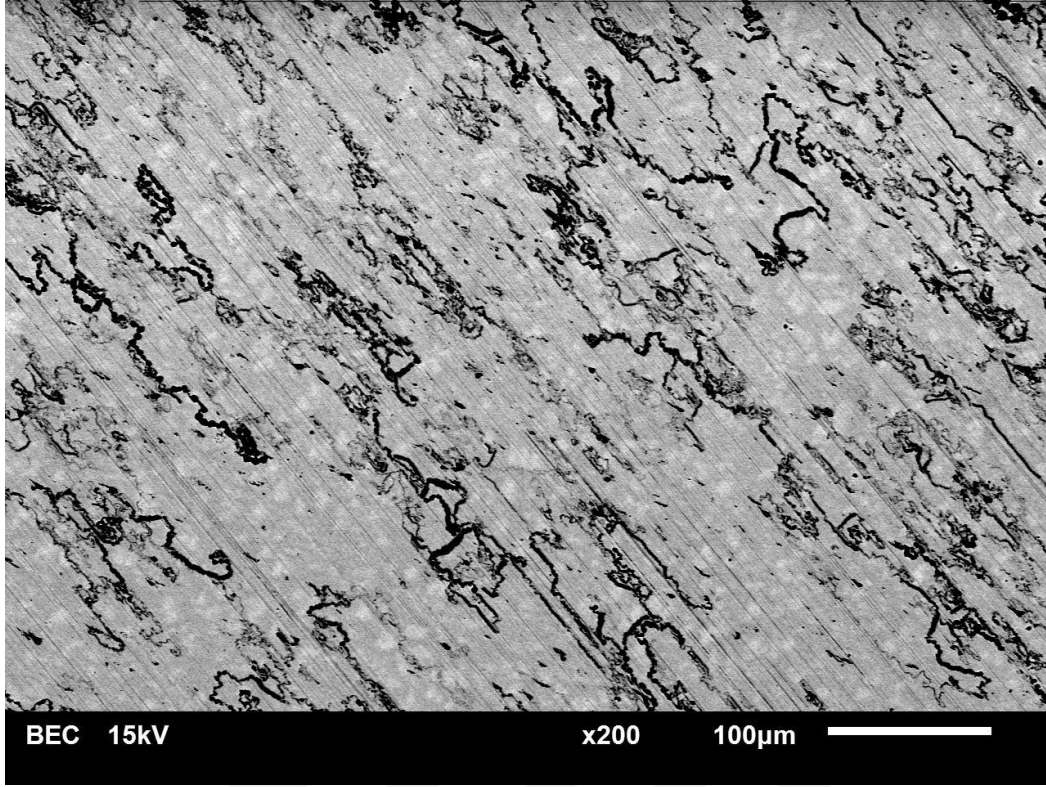
Şekil 35’de gerilme uygulanmamış, Şekil 36’da akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış, Şekil 37’de ise çekme dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve musluk suyunda korozyon deneyine tabi tutulan numunelerin 200 kat büyütme SEM görüntüleri görülmektedir. Şekil 35’de donatı yüzeyinde bazı noktalarda az miktarlarda korozyon kalıntıları (demir pası) gözükmemektedir. Bunun sebebi musluk suyunda az miktarda var olan agresif iyonlar donatı yüzeyinde belirli noktalarda korozyona neden olmuştur. Bu durumda donatı üzerinde korozyon vardır fakat az miktardadır. Şekil 36 ve Şekil 37’de ise uygulanan gerilmenin artması sonucunda donatı yüzeyinde korozyon izleri Şekil 35’e göre daha belirgin hale geldi. Korozyon hızı değerleriyle paralel olarak referans numunesinden akma ve çekme dayanımında gerilme uygulanan numuneye doğru korozyon miktarlarında artış gözlemlendi.



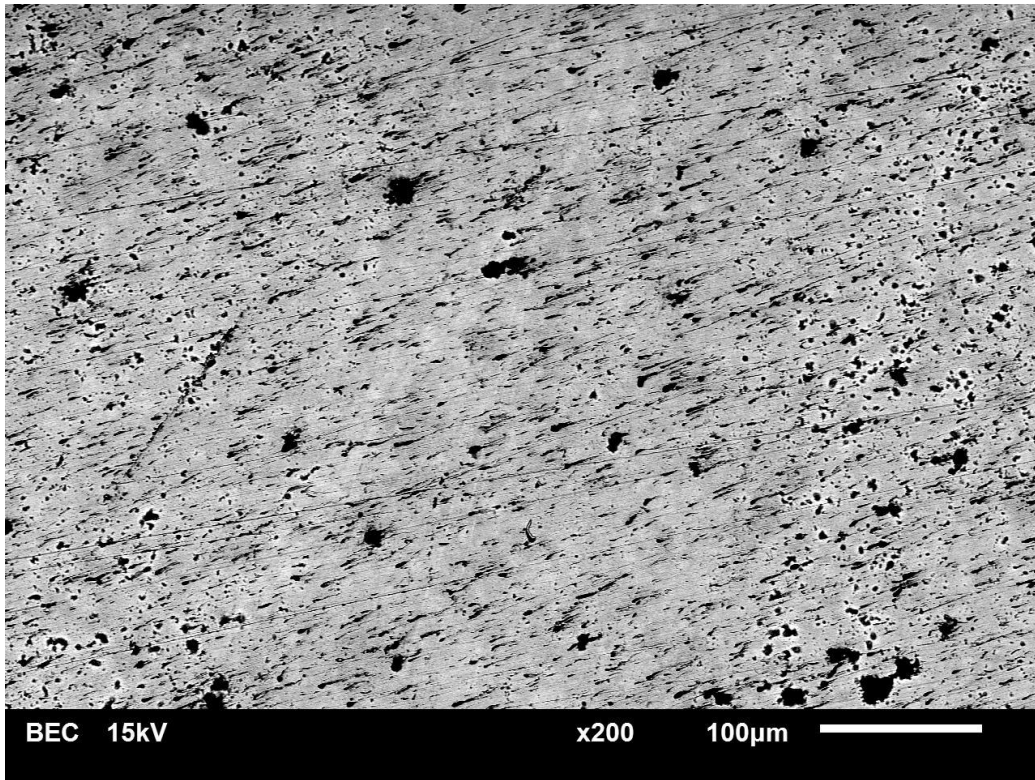
Şekil 38. Gerilme uygulanmamış ve 1 M NaCl çözeltisinde korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 39. Akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve 1M NaCl çözeltisinde korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüsü.

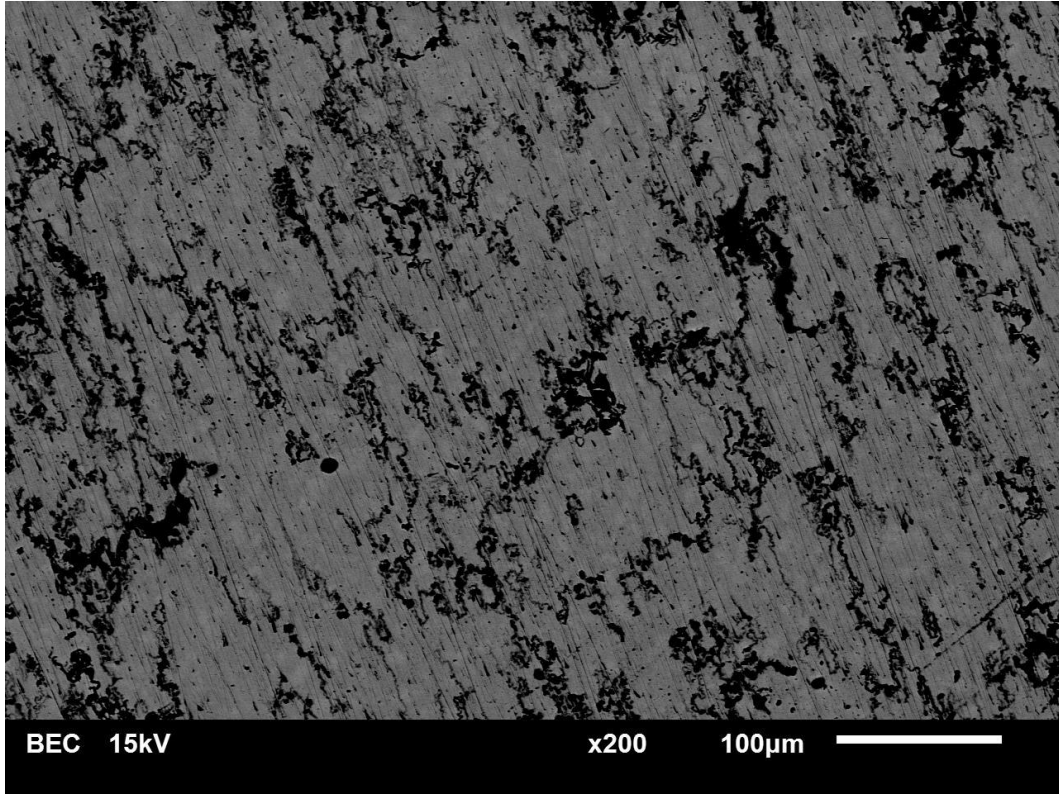


Şekil 40. Çekme dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve 1 M NaCl çözeltisinde korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüsü.

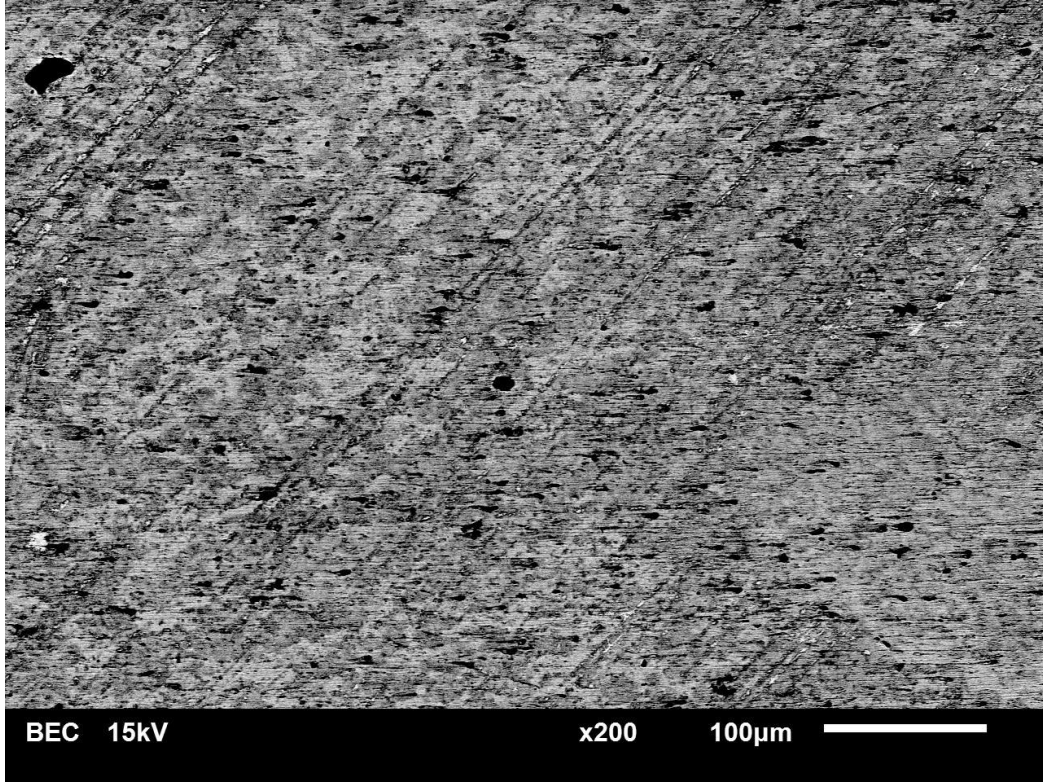


Şekil 41. Kopma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve 1M NaCl çözeltisinde korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüsü.

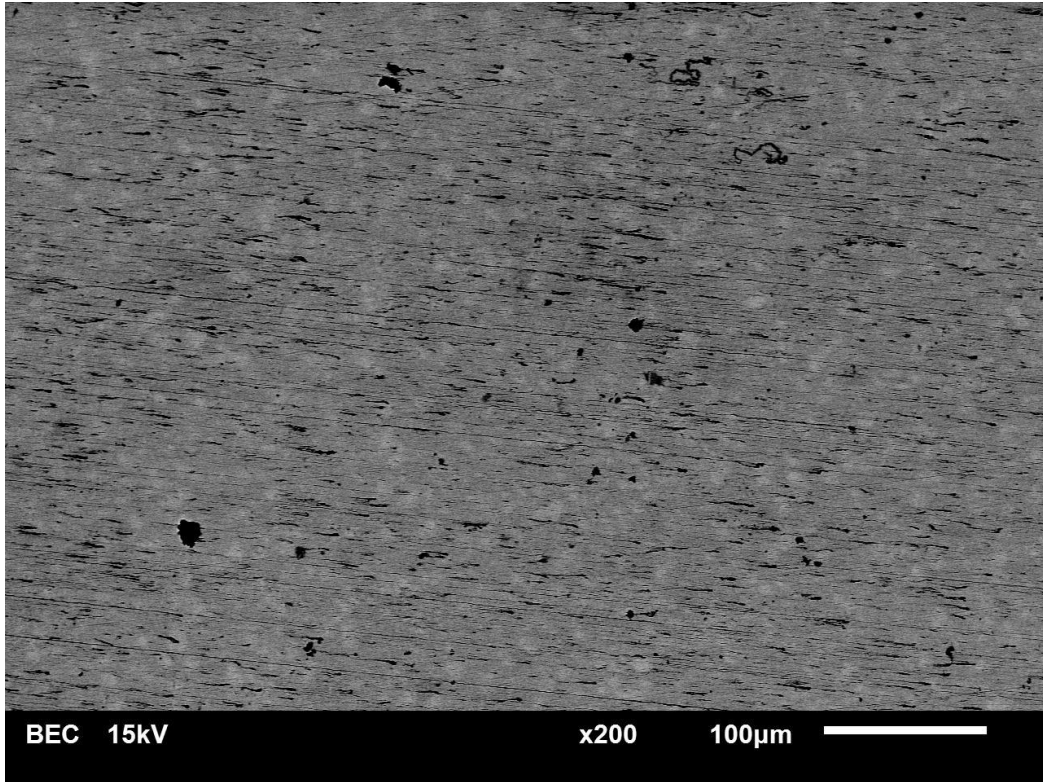
Şekil 38’de gerilme uygulanmamış, Şekil 39’da akma dayanımında gerilme uygulanmış, Şekil 40’da çekme dayanımında gerilme uygulanmış, Şekil 41’de ise kopma dayanımında gerilme uygulanmış ve 1 M NaCl çözeltisinde korozyon deneylerine tabi tutulmuş numunelerin 200 kat büyütme SEM görüntüleri görülmektedir. Gerilme uygulanmamış numunenin 1 M NaCl çözeltisi içerisinde korozyon testi uygulanması ile donatı yüzeyinde yüksek miktarda korozyon ortaya çıkmıştır. Şekil 38’de görülen yüzeyin kirliliği demir pasıdır. Görsellerdeki korozyon miktarları çekme bölgesinde akma bölgesine göre artış göstermiştir. Şekil 40’da donatı korozyon tüm yüzeyi kaplamış durumdadır. SEM görselleri incelendiğinde korozyon hızı yüksek ölçülen numune yüzeylerinde daha fazla korozyon kalıntılarına rastlanmıştır.



Şekil 42. Akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve deniz suyu korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüsü.



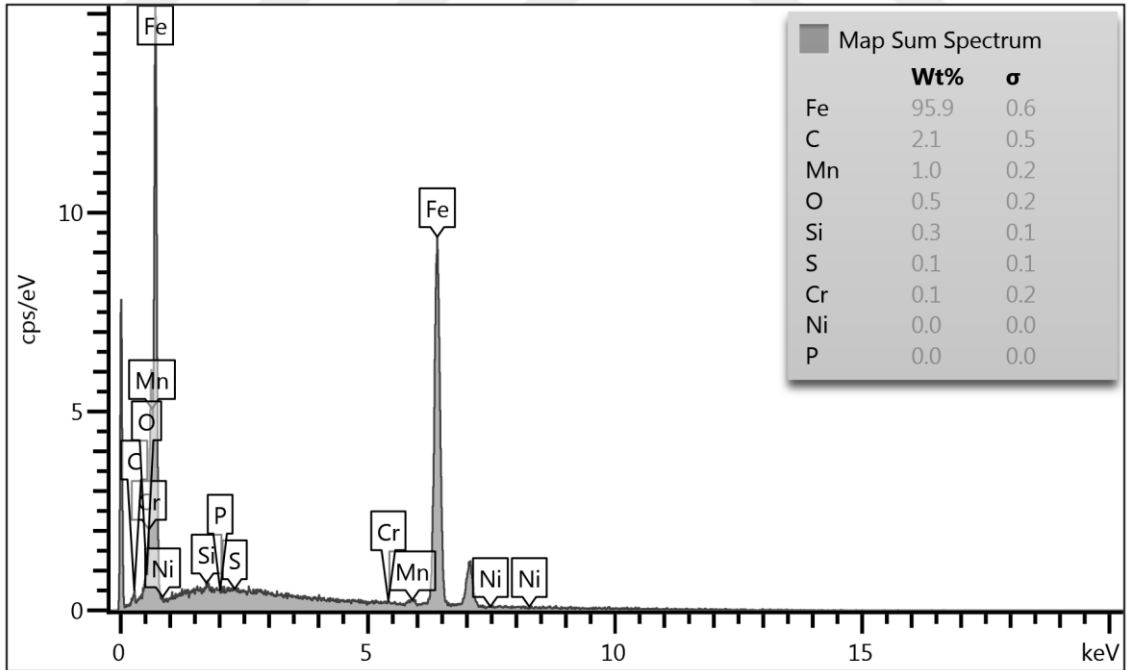
Şekil 43. Çekme dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve deniz suyunda korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüsü.



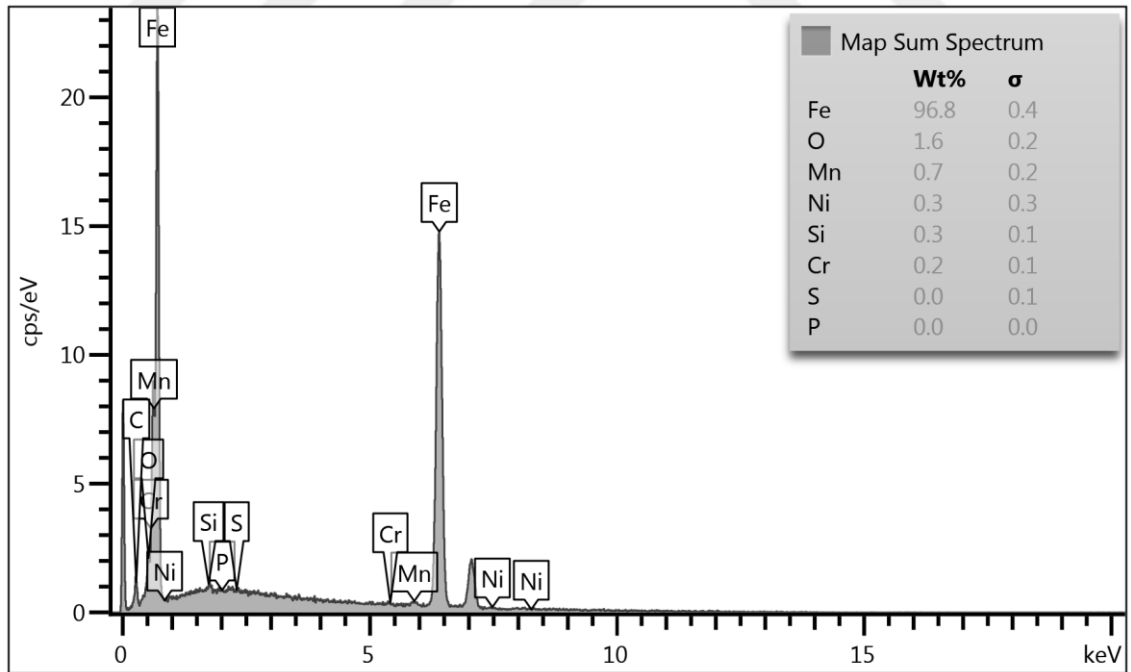
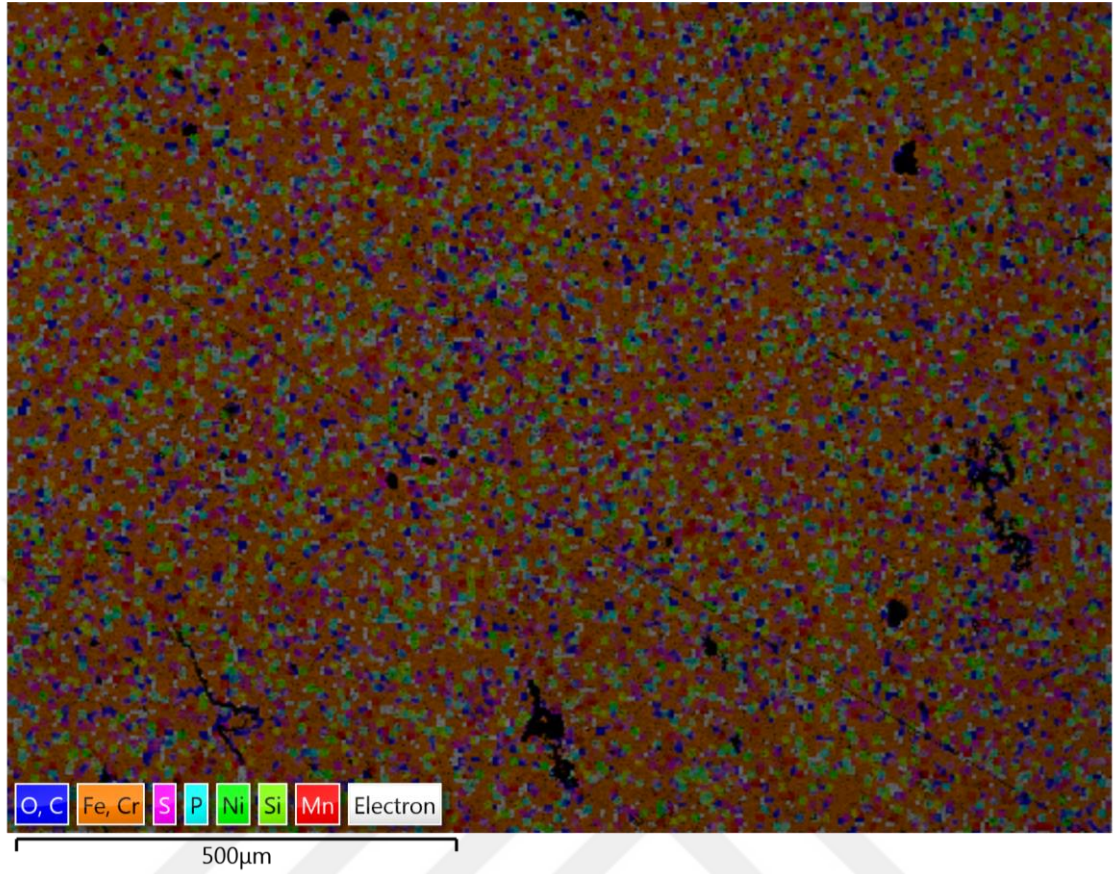
Şekil 44. Kopma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve deniz suyunda korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin SEM görüntüsü.

Şekil 42’de akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış, Şekli 43’de çekme bölgesinde gerilme uygulanmış, Şekil 44 de ise kopma bölgesinde gerilme uygulanmış ve deniz suyunda korozyon deneyine tabi tutulmuş numunelerin 200 kat büyütme SEM görüntüleri görülmektedir. Şekil 42 ve Şekil 43’de numunelerin yüzeyinde tüm yüzeye yayılan yoğun korozyonu görülmektedir. Deniz suyunun oldukça aşındırıcı etkisi yüzünden donatılarda yüksek miktarda korozyon ortaya çıkmıştır. Korozyonun bu derece fazla olması deniz suyu ve yüksek miktarda klorür içeren ortamların demir donatıların korozyonu için ne kadar tehlikeli olduğunun göstergesidir.

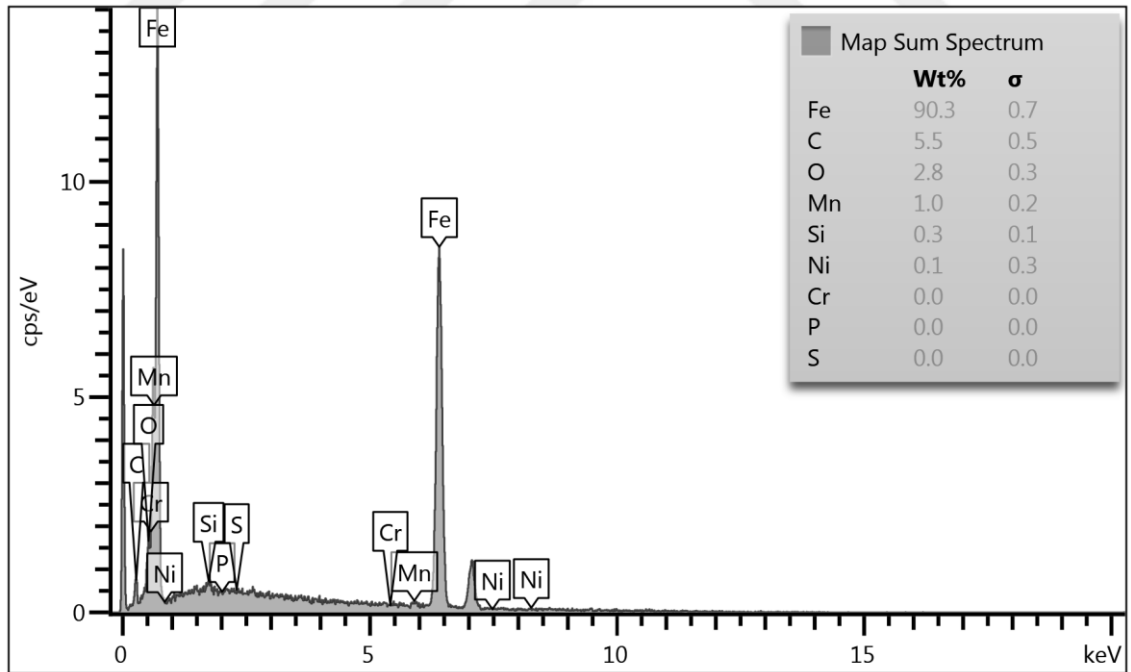
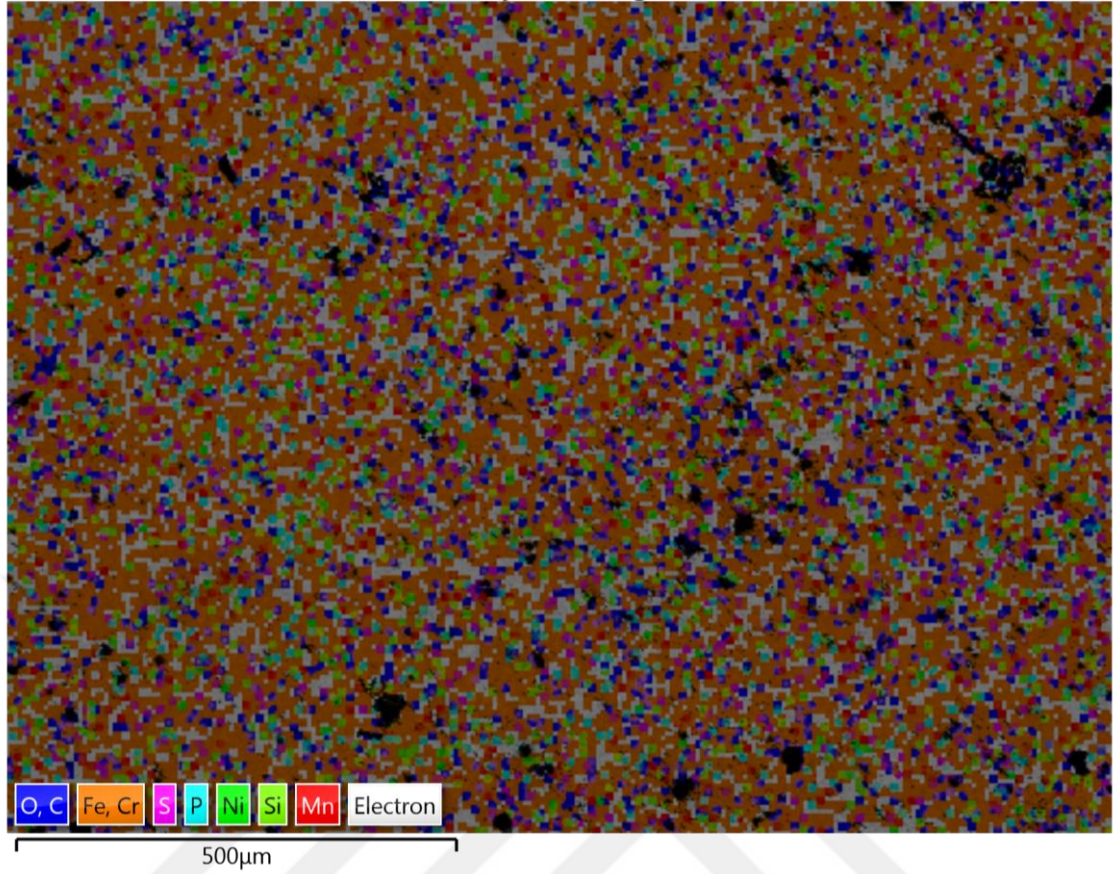




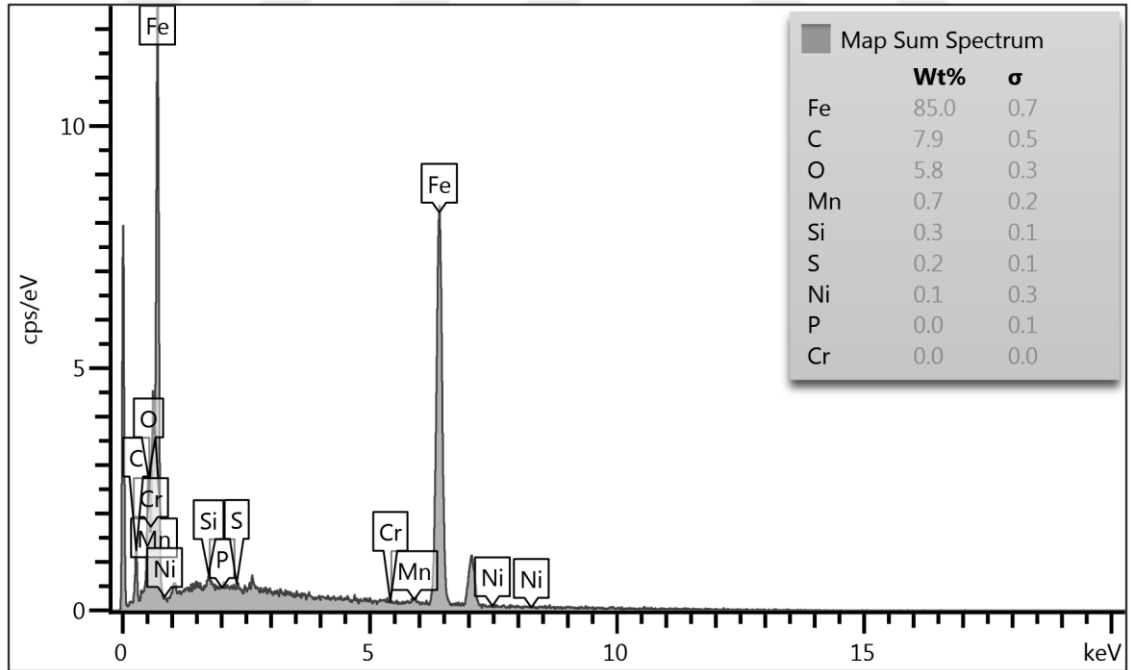
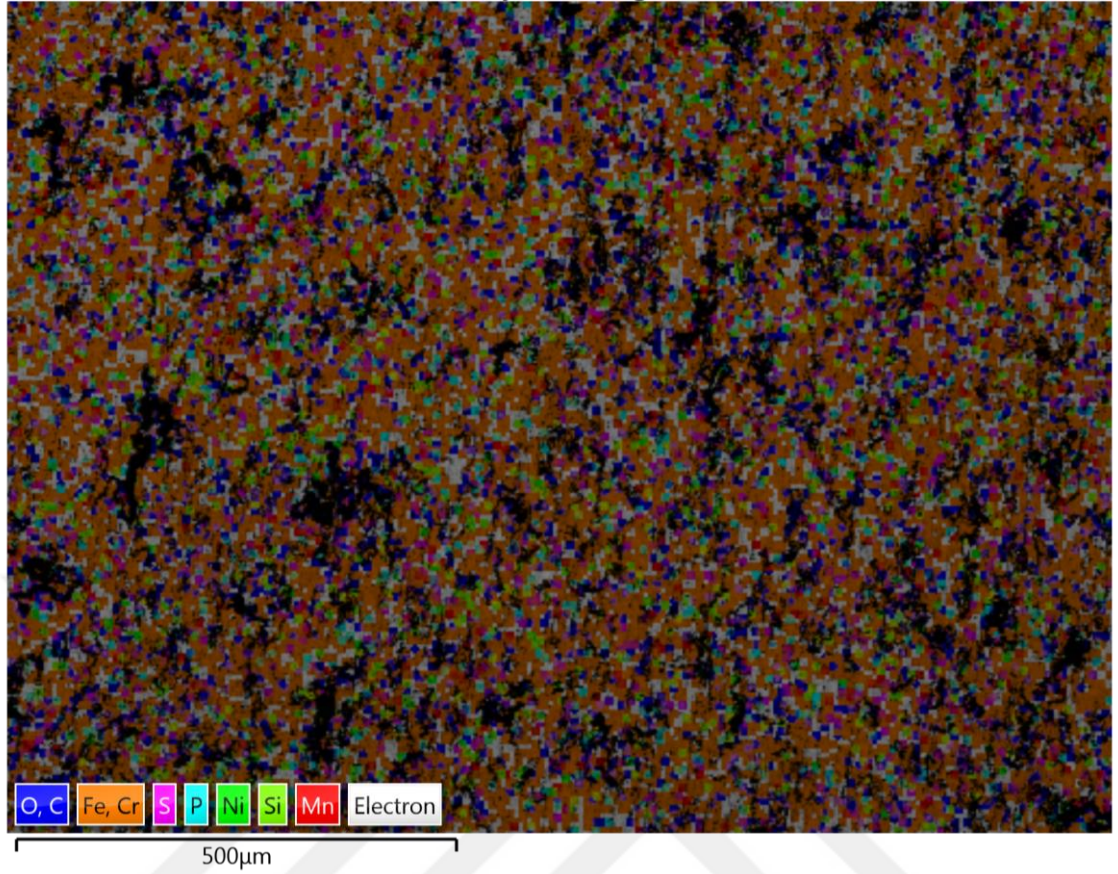
Şekil 45. Akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve korozyon deneyine tabi tutulmamış numunenin EDS analizi.



Şekil 46. Akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve musluk suyu ortamında korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin EDS analizi.



Şekil 47. Akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve 1M NaCl çözeltisi ortamında korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin EDS analizi.



Şekil 48. Akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve deniz suyu ortamında korozyon deneyine tabi tutulmuş numunenin EDS analizi.

Şekil 45’de akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve korozyon deneyine tabi tutulmamış, Şekil 46, 47 ve 48’de akma dayanımı bölgesinde gerilme uygulanmış ve sırasıyla musluk suyu, 1 M klorür çözeltisi ve deniz suyu ortamlarında korozyon deneyine tabi tutulmuş numunelerin enerji dağılım spektroskopisi (EDS) analizi sonuçları görülmektedir. Şekil 45’te numune üzerinde korozyon miktarının az ve oksijen miktarının % 0,5 olduğu görülmektedir. Şekil 46’da oksijen miktarı % 1,6, Şekil 47’de oksijen miktarı % 2,8, Şekil 48’de oksijen miktarı % 5,8 olarak görülmektedir. Korozyon sonucunda oluşan korozyon ürünlerinin demir-oksit tabakaları olduğu bilinmektedir. Bu sebeple EDS analizleri sonucunda ortaya çıkan oksijen miktarındaki bu artış, korozyon miktarının artması ve korozyon sonucunda oluşan demir-oksitlerin numune yüzeyinde birikmesi sonucunda ortaya çıkmıştır.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Çelik donatılarda meydana gelen korozyon inşaat sektöründe ortaya çıkardığı ekonomik ve yapısal zararlar oldukça büyüktür. Bu nedenle çelik donatıların korozyona uğrama süreçleri, korozyon mekanizmaları ve korozyon hızlarının izlenmesi vazgeçilmez bir önem arz etmektedir. Bu çalışmadaki amacımız çelik donatının farklı seviyelerde klorür içeren ortamlara maruz kaldığında klorür kaynaklı donatı korozyonunun, çelik donatıya uygulanan gerilmelerden dolayı donatı üzerinde meydana gelen çatlaklardan ve deformasyonlardan nasıl etkilendiğini incelemektir. Çelik donatılar üzerine uygulanan gerilmelerden akma dayanımından büyük olanlar tasarımsal olarak aşırıdır ve gerçek bir yapıda bu seviyede yüklemeler gerçekçi değildir. Ancak bu çalışmada donatı üzerindeki gerilmelerin korozyon üzerindeki etkisini ve eğilimini gözlemlemek amacıyla çekme ve kopma dayanımları da kullanılmıştır.

Şekil 29 ve Tablo 6’da çelik donatılara uygulanan bütün gerilme seviyelerinde gerçekleştirilen korozyon deneyleri sonucunda çözeltiler içerisindeki klorür ve diğer zararlı iyonların artması sonucunda korozyon hızında artma, korozyon dirençlerinde azalma olduğu açıkça görülmektedir. Korozyon direnci gerilme uygulanmayan, musluk suyu ortamına maruz kalan numunede $1,78.10^4 \Omega$, 0,5 M NaCl çözeltisi ortamına maruz kalan numunede $2,53.10^3 \Omega$ ve 1 M NaCl çözeltisi ortamına maruz kalan numunede $2,03.10^3 \Omega$ olarak ölçülmüştür. Zhang vd. (2009), yılında yapılan bir çalışmada ise pH 10,5 olan 0,1 M NaCl çözeltisi ortamında $2,6.10^5 \Omega$, pH 10,5 olan 1 M NaCl çözeltisi ortamında ise $4,0.10^4 \Omega$ olarak ölçmüşlerdir. Görüldüğü gibi ortamda bulunan klorür iyonlarının konsantrasyonu arttığında korozyon dirençlerinde bir azalma meydana gelmekte, korozyon hızı ve miktarı artmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada bizim de elde ettiğimiz klorür miktarının artması ile çelik donatılarda meydana gelen korozyon hızı ve miktarının artması önceki çalışmalar ve literatür ile uyumludur.

Bu çalışmada çözeltide klorür ve diğer zararlı iyonların konsantrasyonlarının artmasıyla korozyon hızında ve akımında bir artış olduğu gözlemlendi. Gerilme uygulanmamış numuneler üzerinde gerçekleştirilen korozyon deneyleri sonucunda saf su ortamındaki numunelerde korozyon akımı $4,51.10^{-6} \text{ A.cm}^{-2}$, musluk suyu ortamındaki numunelerde korozyon akımı $6,60.10^{-6} \text{ A.cm}^{-2}$ olarak bulunmuştur. 0,5 M NaCl çözeltisi ortamındaki numunelerde korozyon akımı $1,87.10^{-5} \text{ A.cm}^{-2}$, 1 M NaCl çözeltisi ortamındaki numunelerde korozyon akımı $2,35.10^{-5} \text{ A.cm}^{-2}$ ve deniz suyu ortamındaki

numunelerde korozyon akımı $3,04.10^{-5} \text{ A.cm}^{-2}$ olarak bulunmuştur. Tablo 6’da, çözeltiler içerisindeki klorür iyonlarının artması ile korozyon hızları ve akımlarındaki artış diğer gerilme seviyelerinde de gerilme uygulanmamış numunelere benzer şekilde arttığı görülmektedir. Figueira vd. (2017), yılında yaptıkları çalışmada benzer şekilde ortamda bulunan klorür iyonlarının artması ile korozyon akımının arttığını gözlemlemişlerdir. Korozyon akımında meydana gelen artış korozyon hızında ve miktarında meydana gelen artış olarak düşünülebilir. Yani bir numunenin korozyon hızı ve miktarı artıyorsa korozyon mekanizması daha yüksek akım değerlerinde ortaya çıkmaktadır. Çalışmamızda sonuçlar bu durum ile uyumlu olmaktadır. Klorür ve diğer zararlı iyonların miktarının artması korozyon akımını, hızını ve miktarını arttırmıştır.

Yu vd. (2012), yılında yaptıkları çalışmada pH 13,3 olan çözeltide Cl^- iyon konsantrasyonu yaklaşık olarak 0,1 M iken korozyon akımı değerini (I_{corr}) yaklaşık olarak $1.10^{-6} \text{ mA.cm}^{-2}$ olarak ölçmüştür. Cl^- iyon konsantrasyonu yaklaşık olarak 1 M’a çıkarıldığında ise korozyon akımını yaklaşık olarak $1.10^{-2} \text{ mA.cm}^{-2}$ olarak ölçmüştür. Görüldüğü gibi klorür iyon konsantrasyonunun 0,1 M’dan 1 M’a çıkması durumunda korozyon akımında (I_{corr}) ciddi bir artış olmaktadır. Korozyon akımlarında meydana gelen bu artış demir donatının artan klorür konsantrasyonu ile birlikte daha fazla korozyona uğradığı anlamında gelmektedir.

Bu çalışmamızda kullanılan deniz suyunun kimyasal analizi Tablo 4’te gösterilmiştir. İncelendiği zaman deniz suyundaki klorür miktarı molar olarak yaklaşık 0,25 M’a, sülfat miktarı ise molar olarak yaklaşık 0,013 M’a tekabül etmektedir. Ancak Şekil 29’da görüldüğü üzere deniz suyunda meydana gelen korozyon bütün gerilme sınıflarında 0,5 M NaCl ve 1 M NaCl çözeltilerinden daha fazladır. Bunun nedeni deniz suyunda klorür iyonlarının yanında başta sülfat iyonu olmak üzere diğer zararlı iyonların bulunmasıdır. Liu vd. (2016), yılında yaptıkları çalışmada 0,6 M NaCl içeren çözeltide gerçekleştirdikleri korozyon deneyleri sonucunda korozyon akımını yaklaşık olarak $1,6.10^{-6} \text{ A.cm}^{-2}$ olarak bulmuşlardır. 0,6 M NaCl içeren çözeltiye 0,02 M SO_4^{2-} ekledikleri zaman ise korozyon akımını yaklaşık olarak $4,2.10^{-6} \text{ A.cm}^{-2}$ olarak bulmuşlardır. Klorür ve sülfat iyonlarının donatıya birlikte etkimesi durumunda korozyon akımında artış meydana gelmiştir. Korozyon akımındaki bu artış klorür ve sülfat iyonlarının donatıya birlikte etki ettiği durumda korozyon miktarının arttığı anlamına gelmektedir. Yaptığımız çalışmada gerilme uygulanmayan numunelerde 0,5 M NaCl çözeltisinde korozyon akımı $1,87.10^{-5} \text{ A.cm}^{-2}$, deniz suyunda ise $3,18.10^{-5} \text{ A.cm}^{-2}$ olarak bulunmuştur. 0,5 M NaCl

çözeltisinde klorür iyonu konsantrasyonunun daha fazla olmasına rağmen deniz suyunda klorür ve sülfat iyonlarının donatıya aynı anda etkimesi sonucunda korozyon akımı değeri deniz suyunda 0,5 M NaCl çözeltisine göre daha fazla gelmiştir. Korozyon akımlarındaki bu artış korozyon miktarının da arttığının göstergesidir. Sonuç olarak klorür ve sülfat iyonlarının çelik donatıya aynı anda etkimesi durumunda daha yüksek korozyon akımı, hızı ve miktarı ortaya çıkmaktadır.

Şekil 45, 46, 47 ve 48’de gösterildiği gibi çelik donatılarda meydana gelen korozyon sonucunda numunelerin yüzeyindeki oksijen miktarında artış gözlemlenmiştir. Oksijen miktarındaki bu artış korozyon mekanizması sonucunda ortaya çıkan demir-oksitlerin donatı yüzeyinde birikmesinden kaynaklanmaktadır. Shi vd. (2016), yılında yaptıkları çalışmada 0,1 M, 0,3 M ve 1 M NaCl çözeltileri ortamlarında gerçekleştirdikleri korozyon deneyleri sonucunda klorür miktarındaki artış ile korozyon direncinde azalma ve korozyon akımında yükselme gözlemlenmiştir. Korozyon akımındaki bu artış önceki kısımlarda bahsedildiği gibi korozyon miktarının arttığını göstermektedir. Çalışma sonucunda yaptıkları SEM/EDS analizlerinde numunenin korozyon ürünlerinin gözlemlenmediği kısımda EDS analizi sonucunda oksijen miktarını ağırlıkça % 2,43, korozyon ürünlerinin gözlemlendiği kısımda ise EDS analizi sonucunda oksijen miktarını ağırlıkça % 32 olarak bulmuşlardır. Görülmektedir ki korozyona uğrayan numunelerde EDS analizleri sonucunda oksijen seviyelerindeki artış oluşan demir-oksit tabakalarından kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde yaptığımız çalışmamızda bulduğumuz oksijen seviyelerindeki artış daha fazla korozyon ürününün donatı yüzeyinde birikmesi sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu durum donatının maruz kaldığı ortamda bulunan klorür ve diğer zararlı iyonların konsantrasyonlarının artması korozyon hızını ve miktarını arttırdığının göstergesidir.

Numunelere çekme gerilmeleri uygulandığında, çeliğin tane sınırlarında mikro/nano çatlakların meydana geldiği düşünülebilir. Yüksek enerjili bölgeler olan bu tane sınırlarında oluşan çatlaklar neticesinde korozyona karşı daha hassas hale gelir. Ortamda klorür iyonlarının var olması bu hassasiyeti daha da artırır. Bu nedenle çekme gerilmeleri etkimiş bir çelikte çatlak ucunda meydana gelen elektrokimyasal ve mekanik faktörlerin etkileriyle korozyon artmaktadır (Poursaee ve Zhang, 2014). Gerilme miktarı arttırıldığında özellikle akma dayanımı ve sonrasında çelik donatılarda boy uzamaları meydana gelmekte ve donatı üzerinde iş yapılmaktadır. Yapılan bu iş ve uygulanan gerilme neticesinde ortaya çıkan bu mikro/nano çatlaklar büyümekte ve donatıda enerji

birikmesi olarak donatı yüksek enerjili hale gelmektedir. Bu enerji birikmesi çelik donatısını kopana kadar devam etmektedir. Donatının yüksek enerjili halde olması ve çatlakların varlığı sebebiyle donatı korozyona karşı daha duyarlıdır ve ortamda klorür iyonlarının varlığı oluşacak olan korozyonu önemli ölçüde arttırır. Bu nedenle gerilme uygulanmış numunelerde meydana gelen mekanik ve elektrokimyasal faktörlerin birleşmesi ile bu numunelerde korozyon miktarının artması olası bir sonuçtur.

Poursaee ve Zhang (2014), yılında yaptıkları çalışmada elastik bölgede çekme ve basınç gerilmeleri uygulanan numunelerin korozyon davranışlarını incelemişlerdir. Çekme gerilmeleri altındaki numunelerin referans numunelerine göre daha yüksek korozyon akımı sergilediklerini ve korozyon miktarlarının arttığını göstermişlerdir. Bu çalışmada elde edilen verilere göre gerilme miktarının artması ile korozyon akımı (I_{corr}) ve hızının arttığı anlaşılmaktadır. Çelik donatılara gerilme uygulanması sonucunda donatılarda mekanik ve elektrokimyasal değişimler meydana gelmekte ve bunun sonucunda korozyon miktarında artış meydana gelmektedir.

İnşaatlarda kullanılan donatı çeliği düşünüldüğünde özellikle pilye, etriye veya kanca oluşturmak için donatıda uygulanan işlemler donatının bir gerilme ile yüklenmesine neden olacaktır. Bu işlemler sırasında pilye, etriye ve kancalarda donatının bükülen kısımlarda basınç ve çekme gerilmeleri oluşacaktır. Oluşan bu gerilmeler sonucunda donatının bükülen yerlerinde çatlaklar meydana gelmekte ve bu çatlaklar sonucunda korozyon hızının işlem görmemiş donatılardan daha fazla korozyon hızına sahip olabilecektir.

Bu çalışmada SEM/EDS analizleri sonucunda elde edilen görseller incelendiğinde korozyona uğrayan metallerde oluşan korozyon ürünleri ve miktarları açıkça görülebilmektedir. Çelik donatı numuneleri üzerinde uygulanan gerilme miktarlarının artması donatılarda daha fazla korozyon oluşturmuştur. Yapılan elektrokimyasal testlerin sonucuna paralel olarak korozyon hızı ne kadar artmış ise numunelerin yüzeyinde meydana gelen korozyon ürünleri de o derecede artış göstermiştir. Gao vd. (2010) yılında yaptıkları çalışmada düşük karbonlu çeliği akma dayanımının % 60, % 70 ve % 90'ı büyüklükte yük uygulayarak korozyon deneyi yapmışlardır. Yapılan yükleme ve klorür miktarındaki artışın donatıda meydana gelen korozyonu arttırdığını bulmuşlardır. Gao vd. (2010), tarafından yapılan çalışma ile bu çalışmada bulunan gerilme artışı ile korozyon hızı artışı benzerdir. Ancak çekme bölgesini geçen kopma bölgesindeki donatıda çekme bölgesine göre donatı hızında azalma meydana gelmektedir. Yani donatıya gerilme

uygulanması çekme bölgesine kadar korozyonu artırmakta kopma bölgesinde ise çekme bölgesine göre korozyon azalmaktadır. Bu durum SEM görselleri ile de desteklenmektedir.

Çelik donatılara çekme gerilmesi uygulanması donatılar üzerinde boy uzamasına, çelik donatısındaki boşlukların gelişmesine ve donatı üzerinde iş yapılarak enerjisinin artmasına neden olmaktadır. Meydana gelen bu enerji artışı donatının kopması sırasında harcanır ve donatıda hem mekanik hem de elektrokimyasal değişiklikler meydana gelir. Ortaya çıkan bu durumda donatı daha düşük enerjili hale gelir. Bu durumda donatı üzerinde gerilme uygulanmış duruma kıyasla korozyona karşı daha duyarsızdır ve üzerinde daha az korozyon olması beklenir. Yaptığımız çalışmada da elektrokimyasal deneylerin sonucunda bulunan korozyon akımları, dirençleri ve hızları ve SEM/EDS analizleri bu durumu desteklemektedir.

Şekil 28’de görüldüğü gibi genel olarak kopma dayanımındaki numunelerin, çekme dayanımı ve akma dayanımındaki numunelere göre korozyon hızı daha az olmuştur. Bu durum kopma dayanımında donatıda meydana gelen diskolasyonlarda tanelerin birbirine daha fazla yaklaşması ve donatıdaki iç enerjinin tüketilmesi ile meydana geldiği tarafımızdan düşünülmektedir. Ancak korozyon hızlarında meydana gelen bu azalma düzenli değildir. 0,5 M NaCl çözeltisinde kopma dayanımındaki numunelerin korozyon hızı akma dayanımındaki numunelerin korozyon hızından yüksek olurken, deniz suyunda kopma dayanımındaki numunelerin korozyon hızı elastik bölgedeki numunelerden bile daha düşük olmuştur. Korozyon hızlarında meydana gelen düşüşlerin bu şekilde farklı olması parmak izi gibi donatının kopması sırasında her bir donatı için ayrı ayrı mekanik ve elektrokimyasal değişikliklerin oluştuğunun göstergesidir.

Çelik donatılarda akma dayanımından düşük miktarda yani elastik bölgede gerilme uygulanması durumunda gerilme kaldırıldıktan sonra donatıda plastik bir deformasyonun oluşmadığı kabul edilmektedir. Bu durumda çelik donatının içyapısında hatalar oluşmadığı düşünülebilir. Ancak yaptığımız bu çalışmada elastik bölgede gerilme uygulanan numuneler gerilme uygulanmayan numunelerden bütün çözeltilerin içerisinde daha fazla korozyon hızı ve miktarı göstermiştir. Bu şekilde korozyon hızında meydana gelen artış çelik donatıya elastik bölgede gerilme uygulandığında da donatının içyapısında bir takım dislokasyonlar, mekanik ve elektrokimyasal değişiklikler meydana geldiği düşünülebilir.

Ustabaş (2011), yılında yaptığı çalışmada Rize ilinde 20 yıldır kullanılan ve çevresel faktörlerden dolayı yeraltı sularının etkisinde kalan bodrum kat donatılarında oluşan korozyonları incelemiştir. Çalışmada incelenen yapıların ortalama basınç dayanımları 11,65 MPa gelmiştir. Yapının farklı bölgelerinden alınan numunelerin sonuçlarına göre klorür içeriği çimento miktarının yüzdesi olarak en fazla % 0,87 ve en az % 0,12 olarak bulunmuştur. TS EN 206'da bu değer % 0,2-0,4 arasındadır. Görüldüğü gibi incelenen yapıların bazılarında TS EN 206'da belirlenen değer 2 katından daha fazla klorür birikmesi olmuştur. İnceleme sonrasında betonarme yapıların donatılarında farklı klorür seviyelerinde donatı korozyonundan dolayı donatı kesitindeki kayıpların 20 yıllık bir süreçte en fazla 2,4 mm ve en az 1,8 mm olduğu tespit edilmiştir. Rize ili çevresinde yeraltı sularına maruz kalmış bir binada 20 yıl içerisinde gerçekleşen ortalama korozyon miktarı 2,1 mm olarak düşünülebilir. Yaptığımız çalışmada elastik bölgede gerilme uygulanan bir numunenin musluk suyundaki korozyon hızı 0,084 mm/yıl olarak bulundu. 20 yıllık bir süre düşünüldüğünde musluk suyundaki korozyon miktarı 1,68 mm olmaktadır. Buradan yola çıkarak benzer koşullara maruz kalacak olan betonarme yapılarda meydana gelecek korozyon miktarının yaklaşık olarak bu çalışmada kullandığımız elektrokimyasal korozyon ölçüm kullanılarak tahmin edilebileceğini düşünmekteyiz. Bunun için laboratuvar koşullarında mm/yıl cinsinden bulunan korozyon hızı, hesaplanmak istenen süre ve aradaki farktan dolayı 1,25 ile çarpılıp bu süre sonunda betonarme yapıda oluşacak olan korozyon miktarı hesaplanabilir. Bunun için aşağıdaki denklem tarafımızdan önerilmektedir.

$$KM = 1,25 \times KH \times t \quad (19)$$

Burada KM: betonarme yapıda hesaplanmak istenen süre sonunda gerçekleşecek olan korozyon miktarı (mm), KH: laboratuvar ortamında bu çalışmada kullandığımız elektrokimyasal yöntemle hesaplanan korozyon hızı (mm/yıl) ve t: korozyon miktarı hesaplanmak istenen süredir (yıl).

Bu çalışmada çekme gerilmeleri uygulanmış çelik donatıların 5 adet farklı çözeltide meydana gelen korozyon davranışı incelenmiştir. İnceleme sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- 1.Çözelti içerisindeki iyon miktarının artması çelik donatılarda korozyon direncini düşürmekte, korozyon akımını ve hızını arttırmaktadır.
2. Donatı çeliğine gerilme uygulanması çekme bölgesine kadar korozyon hızını artırmaktadır. Gerilme uygulanmış donatıların korozyon hızı gerilme uygulanmamış numunelere göre daha fazla olmaktadır.
- 3.Klorür ve sülfat iyonlarının ortamda aynı anda bulunması donatı korozyonu üzerinde sadece klorürlü ortamlara göre daha olumsuz etkisi olmaktadır. Klorür ve sülfat iyonlarının donatıya birlikte etkimesi durumunda donatıda daha fazla korozyon oluşmaktadır.
- 4.Karadeniz deniz suyu donatı çeliği üzerinde 1 M sodyum klorürlü çözeltiden daha fazla korozyona yol açmaktadır.
- 5.Çelik donatının kopma bölgesinde çelik donatıdaki atom taneleri birbirine daha fazla yaklaşmakta ve donatıda bir enerji boşalması meydana gelmektedir. Bu durumlar neticesinde çelik donatı çekme bölgesinde gerilme uygulanmış donatıya göre kopma bölgesinde gerilme uygulanmış donatıda daha az korozyon oluşmaktadır.
- 6.Çelik donatıya elastik bölgede çekme gerilmesi uygulanması, gerilme uygulanmamış duruma göre korozyon miktarında artışa neden olmuştur. Elastik bölgede ortaya çıkan korozyon miktarındaki bu artış donatıya elastik bölgede de gerilme uygulansa bile donatı içyapısında mekanik ve elektrokimyasal değişiklikler olmaktadır.
- 7.Bu çalışmada kullanılan elektrokimyasal metot olan üç elektrot yöntemiyle hesaplanan korozyon hızları kullanılarak Rize ili için betonarme yapı donatılarının korozyonlarının tahmini için kullanılabilir. Bunun için $KM = KH \times t$ denklemi tarafımızdan önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Ahmad, S. (2003). Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction – a review. *Cement and Concrete Composites*, 25(4-5), 459-471. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00086-0).
- Aköz, F. ve Çakır, Ö. (2014). Betonarme Korozyonu. Hazır beton kongresi, İstanbul, Temmuz-Ağustos, 70-85.
- Al-Amoudi, O.S.B. and Maslehuddin, M. (1993). The effect of chloride and sulfate ions on reinforcement corrosion. *Cement and Concrete Research*, 23(1), 139-146. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90144-X](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90144-X).
- Aqel, M. and Panesar, D.K. (2016). Hydration kinetics and compressive strength of steam-cured cement pastes and mortars containing limestone filler. *Construction and Building Materials*, 113, 359-368. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.031>.
- ASTM G 102 – 89, (1999). Calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements. American Society For Testing And Materials, Pennsylvania, 7 p.
- Bastidas, D.M., Gonzalez, J.A., Feliu, S., Cobo, A. (2007). A quantitative study of concrete-embedded steel corrosion using potentiostatic pulses. *Corrosion: The Journal of Science & Engineering*, 63(12), 1094-1100. <https://doi.org/10.5006/1.3278327>.
- Bastidas, D.M., Cobo, A., Otero, E., Gonzalez, J.A. (2013). Electrochemical rehabilitation methods for reinforced concrete structures: advantages and pitfalls. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 43(3), 248-255. <https://doi.org/10.1179/174327808X272423>.
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H. (2010). Beton ve betonarme yapılarda kalıcılık (durabilite). Türkiye Hazır Beton Birliği.
- Belleghem, B.V., Maes, M., Soetens, T. (2021). Throwing power and service life of galvanic Cathodic protection with embedded discrete anodes for steel reinforcement in chloride contaminated concrete. *Construction and Building Materials*, 310, 125-187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125187>.
- Bensabra, H., Franczak, A., Aaboubi, O., Azzouz, N., Chopart, J.P. (2016). Inhibitive effect of molybdate ions on the electrochemical behavior of steel rebar in simulated concrete pore solution. *Metallurgical and Materials Transactions*, 48, 412-424.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Radaelli, E., Polder, R. (2013). Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis. Wiley-Vch, ISBN: 978-3-527-33146-8, 434 p.

- Broomfield, J.P., Davies, K., Hladky, K. (2002). The use of permanent corrosion monitoring in new and existing reinforced concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 24(1), 27-34. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00024-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00024-5).
- Çil, İ. (2006). Betonarme donatısında elektriksel yöntemlerle korozyon ölçümü. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(1), 59-63.
- Doğan, M. (2015). Corrosion failure in concrete reinforcement to damage during seismic. *Engineering Failure Analysis*, 56, 275-287. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.01.015>.
- Fan, L.F., Zhong, W.L., Zhang, X.G. (2021). Chloride-induced corrosion of reinforcement in simulated pore solution of geopolymer. *Construction and Building Materials*, 291, 123385. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123385>.
- Feng, X., Tang, Y., Zuo, Y. (2011). Influence of stress on passive behaviour of steel bars in concrete pore solution. *Corrosion Science*, 53(4), 1304-1311. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.12.030>.
- Figueira, R.B., Sadovskib, A., Melo, A.P., Pereira, E.V. (2017). Chloride threshold value to initiate reinforcement corrosion in simulated concrete pore solutions: The influence of surface finishing and pH. *Construction and Building Materials*, 141, 183-200. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.004>.
- Gao, K., Li, D., Pang, X., Yang, S. (2010). Corrosion behaviour of low-carbon bainitic steel under a constant elastic load. *Corrosion Science*, 52(10), 3428-3434. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.06.021>.
- Gerengi, H. (2008). Tafel Polarizasyon (TP), Lineer Polarizasyon (LP), Harmonik Analiz (HA) ve Dinamik Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi (DEIS) yöntemleriyle düşük karbon çeliği (AISI 1026), pirinç-MM55 ve nikelium-118 alaşımlarının yapay deniz suyunda korozyon davranışlarının ve pirinç alaşımlarına benzotriazol'ün inhibitör etkisinin araştırılması. Doktora Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Bölümü, Eskişehir, Türkiye, 203 s.
- Hansson, C.M., Poursaee, A., Jaffer, S.J. (2007). Corrosion of reinforcing bars in concrete. *Portland Cement Association*, Skokie, Illinois, USA, December, 106-124.
- Hekimoğlu, A.P., Çalış, M. (2018). Titanyum ile tane inceltmenin Al-25Zn alaışının mikro yapı, mekanik ve korozyon özelliklerine etkisinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(1), 311-322. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.464676>.
- Huet, B., L'Hostis, V., Miserque, F., Idrissi, H. (2005). Electrochemical behavior of mild steel in concrete: influence of pH and carbonated content of concrete pore solution. *Electrochimica Acta*, 51(1), 172-180. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.04.014>.

- Jarrah, N.R., Al-Amoudi, O.S.B., Maslehuddin, M., Ashiru, O.A., Al-Mana, A.I. (1995). Electrochemical behaviour of steel in plain and blended cement concretes in sulphate and/or chloride environments. *Construction and Building Materials*, 9(2), 97-103. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00002-W](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00002-W).
- Li, C., Jiang, L., Xu, N., Jiang, S. (2018). Pore structure and Permeability of concrete with high volume of limestone powder addition. *Powder Technology*, 338, 416-424. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.07.054>.
- Li, C., Jiang, L., Li, S. (2020). Effect of limestone powder addition on threshold chloride concentration for steel corrosion in reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 131, 106018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106018>.
- Liu, G., Zhang, Y., Ni, Z., Huang, R. (2016). Corrosion behavior of steel submitted to chloride and sulphate ions in simulated concrete pore solution. *Construction and Building Materials*, 115, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.213>.
- Liu, X., Frankel, G.S., Zoofan, B., Rokhlin, S.I. (2004). Effect of applied tensile stresses on intergranular corrosion of AA2024-T3. *Corrosion Science*, 46(2), 405-425. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(03\)00149-5](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(03)00149-5).
- Manera, M., Vennesland, O., Bertolini, L. (2008). Chloride Threshold for rebar corrosion in concrete with addition of silica fume. *Corrosion Science*, 50(2), 554-560. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.07.007>.
- Miyagawa, T. (1991). Durability design and repair of concrete structures: Chloride corrosion of reinforcing steel and alkali-aggregate reaction. *Magazine of Concrete Research*, 43(156), 155-170. <https://doi.org/10.1680/mac.1991.43.156.155>.
- Moreno, M., Morris, W., Alvarez, M.G., Duffo, G.S. (2004). Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions: Effect of carbonation and chloride content. *Corrosion Science*, 46(11), 2681-2699. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.03.013>.
- Moser, R.D., Singh, P.M., Kahn, L.F., Kurtis, K.E. (2012). Chloride-induced corrosion resistance of high-strength stainless steels in simulated alkaline and carbonated concrete pore solutions. *Corrosion Science*, 57, 241-253. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.12.012>.
- Nahali, H., Dhouibi, L., Idrissi, H. (2014). Effect of phosphate based inhibitor on the threshold chloride to initiate steel corrosion in saturated hydroxide solution. *Construction and Building Materials*, 50, 87-94. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.054>.
- Poupard, O., Ait-Mokhtar, A., Dumargue, P. (2003). Corrosion by chlorides in reinforced concrete: Determination of chloride concentration threshold by impedance spectroscopy. *Cement and Concrete Research*, 34(6), 991-1000. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.009>.

- Poursaei, A. and Zhang, Y. (2014). Passivation and corrosion behavior of carbon steel in simulated concrete pore solution under tensile and compressive stresses. *American Society of Civil Engineers*, 27(8). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001199](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001199).
- Sahoo, G., Balasubramaniam, R. (2008). On the corrosion behaviour of phosphoric irons in simulated concrete pore solution. *Corrosion Science*, 50(1), 131-143. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.06.017>.
- Shaheen, F. and Pradhan, B. (2015). Effect of chloride and conjoint chloride-sulfate ions on corrosion of reinforcing steel in electrolytic concrete powder solution (ECPS). *Construction and Building Materials*, 101(1), 99-112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.028>.
- Shi, J., Sun, W., Jiang, J., Zhang, Y. (2016). Influence of chloride concentration and pre-passivation on the pitting corrosion resistance of low-alloy reinforcing steel in simulated concrete pore solution. *Construction and Building Materials*, 111, 805-813. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.107>.
- Shi, J., Ming, J., Wu, M. (2020). Electrochemical behavior and corrosion products of Cr-modified reinforcing steels in saturated Ca(OH)₂ solution with chlorides. *Cement and Concrete Composites*, 110, 103587. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103587>.
- Singh, J.K., Singh, D.D.N. (2012). The nature of rusts and corrosion characteristics of low alloy and plain carbon steels in three kinds of concrete pore solution with salinity and different pH. *Corrosion Science*, 56, 129-142. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.11.012>.
- TS EN 206, (2014). Beton – özellik, performans, imalat ve uygunluk. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 94.
- TS EN 197-1, (2012). Çimento – bölüm 1: genel çimentolar – bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 29.
- Tang, Y.M., Miao, Y.F., Zuo, Y., Zhang, G.D., Wang, C.L. (2012). Corrosion behavior of steel in simulated concrete pore solutions treated with calcium silicate hydrates. *Construction and Building Materials*, 30, 252-256. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.033>.
- Ustabaş, İ. (2011). The effect of capillarity on chloride transport and the prediction of the accumulation region of chloride in concretes with reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials*, 28(1), 640-647. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.043>.
- Üneri, S. (1998). Korozyonun Temel İlkeleri. SAGEM, 462 s.
- Ye, C.Q., Hu, R.G., Dong, S.G., Zhang, X.J., Hou, R.Q., Du, R.G., Lin, C.J., Pan, J.S. (2013). EIS analysis on chloride-induced corrosion behavior of reinforcement steel in simulated carbonated concrete pore solutions. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 688, 275-281. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2012.09.012>.

- Yu, H., Chiang, K.T.K., Yang, L. (2012). Threshold chloride level and characteristics of reinforcement corrosion initiation in simulated concrete pore solutions. *Construction and Building Materials*, 26(1), 723-729. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.079>.
- Zhang, F., Pan, J., Lin, C. (2009). Localized corrosion behaviour of reinforcement steel in simulated concrete pore solution. *Corrosion Science*, 51(9), 2130-2138. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.05.044>.
- Zhang, S., Pang, X., Wang, Y., Gao, K. (2013). Corrosion behavior of steel with different microstructures under various elastic loading conditions. *Corrosion Science*, 75, 293-299. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.06.012>.

