



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KİMYA ANABİLİM DALI



PALUSTRIELLA COMMUTATA KARAYOSUNU EKSTRAKTININ ASİDİK
ORTAMDAKİ YUMUŞAK ÇELİĞİN ELEKTROKİMYASAL DAVRANIŞINA
ETKİSİ

MUHAMMET SEVİMKAN

OCAK 2025

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
KİMYA ANABİLİM DALI

PALUSTRIELLA COMMUTATA KARAYOSUNU EKSTRAKTININ ASİDİK
ORTAMDAKİ YUMUŞAK ÇELİĞİN ELEKTROKİMYASAL DAVRANIŞINA
ETKİSİ

MUHAMMET SEVİMKAN

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç. Dr. Demet ÖZKIR

OCAK 2025

Muhammet SEVİMKAN tarafından **Doç. Dr. Demet ÖZKİR** danışmanlığında hazırlanan “*Palustriella Commutata* Karayosunu Ekstraktının Asidik Ortamdaki **Yumuşak Çeliğin Elektrokimyasal Davranışına Etkisi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Kimya** Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Mehmet Erman MERT, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve
Teknoloji Üniversitesi

Üye : Prof. Dr. Yavuz SÜRME, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Demet ÖZKİR, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/..../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun/..../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Prof. Dr. Mustafa KARATEPE
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Muhammet SEVİMKAN

ÖZET

PALUSTRIELLA COMMUTATA KARAYOSUNU EKSTRAKTININ ASİDİK ORTAMDAKİ YUMUŞAK ÇELİĞİN ELEKTROKİMYASAL DAVRANIŞINA ETKİSİ

SEVİMKAN, Muhammet

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Kimya Anabilim Dalı

Danışman

: Doç. Dr. Demet ÖZKIR

Ocak 2025, 58 sayfa

Bu tez çalışmasında, bir briyofit türü olan *Palustriella commutata* karayosununun 298 K'de 1,0 M HCl çözeltisindeki yumuşak çeliğin korozyon davranışına “yeşil inhibitör” olarak etkisi **ilk kez** incelenmiştir. Karayosunu ekstraktının yeni bir yeşil inhibitör olarak uygulanabilirliği, bazı elektrokimyasal yöntemler kullanılarak test edilmiştir. Ekstrakt'ın farklı derişimlerini içeren ve içermeyen 1,0 M HCl çözeltilerinde bir saat daldırma süresi sonunda, EIS, LPR ve potansiyodinamik polarizasyon yöntemleri ile ölçümler yapılmış, ayrıca bazı zaman parametreleriyle değişimini incelemek amacıyla, EIS ile impedans diyagramları oluşturulmuştur. Ayrıca, metalin inhibisyon mekanizması açısından EIS yöntemi ile yüzey yükü belirlenmiş ve bunun sonucunda, protonlanmış inhibitör moleküllerinin doğrudan yumuşak çelik yüzeyine adsorplandığı tespit edilmiştir. Çalışma elektrotlarının yüzey morfolojileri, alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yüzey analizlerinden, elektrot yüzeyinde korozyona karşı net bir koruyucu film tabakası oluştuğu açık bir şekilde gözlenmiştir. Elektrokimyasal deneylerle, yüzey analizi çalışmaları birbirini destekler niteliktedir.

Anahtar Sözcükler: Briyofit, *Palustriella commutata*, yeşil inhibitör, asidik korozyon, elektrokimyasal impedans spektroskopisi, alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu, atomik kuvvet mikroskobu

SUMMARY

EFFECT OF *PALUSTRIELLA COMMUTATA* MOSS EXTRACT ON ELECTROCHEMICAL BEHAVIOR OF MILD STEEL IN ACIDIC MEDIUM

SEVİMKAN, Muhammet

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Chemistry

Supervisor

: Doç. Dr. Demet ÖZKIR

January 2025, 58 pages

In this thesis study, the effect of the bryophyte species *Palustriella commutata* moss on the corrosion behaviour of mild steel in 1.0 M HCl solution at 298 K as a “green inhibitor” has been investigated for the first time. The applicability of moss extract as a new green inhibitor has been tested using some electrochemical methods. Measurements were performed using EIS, LPR, and potentiodynamic polarization methods after a one-hour immersion period in 1.0 M HCl solutions containing and not containing different concentrations of the extract. Additionally, impedance diagrams were created using EIS to examine changes with certain time parameters. In addition, the surface charge of the metal was determined by the EIS method in terms of the inhibition mechanism, and as a result, it was found that the protonated inhibitor molecules were adsorbed directly onto the metal surface. The surface morphologies of the working electrodes were carried out using field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and atomic force microscopy (AFM). From the surface analyses, it was plainly observed that a clear protective film layer was formed against corrosion on the electrode surface. The electrochemical experiments and surface analysis studies are complementary to each other.

Keywords: Bryophyte, *Palustriella commutata*, green inhibitor, acidic corrosion, electrochemical impedance spectroscopy, field emission scanning electron microscopy, atomic force microscopy

ÖN SÖZ

Korozyonun milyarlarca liralık zarara yol açan bir olgu olması, doğal bir afet olması ve ülkece yaşadığımız son deprem felaketini de göz önünde bulundurduğumuzda hem can hem de mal kayıplarına yol açan önemli bir sorundur. Üstelik artan sanayileşmeyle birlikte ortaya çıkan çevre kirliliğini de göz önünde bulundurduğumuzda korozyonun önlenmesi ve önlemler alınması oldukça önem arz etmektedir.

Bu sebeple de gerçekleştirilen bu tez çalışmasında, gerek ülkemiz gerekse de bilimsel açılarından çevreye herhangi bir zararlı etkisi olmayan, doğa dostu yeni bitkisel kaynaklı inhibitörlerin kazandırılması ve metallerin korozyonunu önlemede oldukça yaygın bir etki göstermeleri amaçlanmıştır. Bu amaçtan yola çıkılarak, sucul bir karayosunu olan *Palustriella commutata*'nın sulu ekstraktı, asitli ortamda bulunan yumuşak çelik için yeni bir yeşil inhibitör olarak kullanılmış ve zaman parametresine dayalı olarak etkisi detaylandırılmıştır.

Yüksek lisans tez çalışmamın planlama, literatür tarama ve laboratuvar çalışmalarımın gerçekleştirilmesi sırasında, beni yönlendirmesi ve tecrübesiyle her türlü konuda destek vererek zamanından esirgemeyen değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Demet ÖZKIR'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgilerini, tecrübelerini ve kaynaklarını esirgmeden bana rehberlik eden Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü'nün değerli öğretim üyelerine saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım. Aynı zamanda, korozyon deneyleri sırasında Elektrokimya araştırma laboratuvarı imkanı için Kimya Bölümü öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Emel BAYOL'a, mikroskop görüntüleme imkanı için Biyoloji Bölümü öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Osman SEYYAR'a ve karayosunu temini için Peyzaj Mimarlığı öğretim üyesi Sayın Prof. Dr. Tülay EZER'e teşekkür ederim. Bu yüksek lisans tezimi tüm hayatım boyunca her daim yanımda bulunan, çalışmaya teşvik eden sevgili annem Cemile ŞANLI'ya, babam Halil ŞANLI'ya sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGE VE KISALTMALAR	xii
BÖLÜM I	1
GİRİŞ	1
1.1 Metal ve Korozyon	1
1.2 Korozyonun Sınıflandırılması	3
1.3 Korozyonu Önlemenin Önemi	11
1.3.1 Metallerin ön işlemi	11
1.3.2 Uygun tasarım	12
1.3.3 Doğru malzeme seçimi	12
1.3.4 Kurban elektrot yöntemi	12
1.3.5 Katodik koruma yöntemi	13
1.3.6 Bariyer koruma yöntemi	14
1.3.7 Elektrokaplama yöntemi	14
1.3.8 Lazer teknolojisi yöntemi	15
1.4 Korozyon İnhibitörleri	15
1.5 Yeşil İnhibitörler	17
BÖLÜM II	21
2 LİTERATÜR ÖZETİ	21
BÖLÜM III	28
MATERYAL VE METOT	28
3.1 Materyal	28
3.1.1 Kullanılan cihazlar	28
3.1.2 Kullanılan kimyasal ve elektrotlar	29
3.2 Metot	29

3.2.1 HCl (2,0 M) çözeltisinin hazırlanması	29
3.2.2 HCl (1,0 M) elektrolit çözeltisinin hazırlanması.....	30
3.2.3 Bitki materyali.....	30
3.2.4 <i>Palustriella commutata</i> karayosunu ekstraktının hazırlanması	31
3.2.5 Korozyon deneyleri için yumuşak çeliklerin hazırlanması	32
3.2.6 Elektrokimyasal ölçümlerle inhibisyon etkinliği	33
3.2.7 Yumuşak çeliğin sıfır yük potansiyelinin belirlenmesi.....	34
3.2.8 Yumuşak çeliklerin yüzey morfolojilerinin incelenmesi	34
BÖLÜM IV.....	35
BULGULAR VE TARTIŞMA	35
4.1 Farklı Elektrokimyasal Yöntemlerle Bir Saat Daldırma Süresi Sonunda Korozyon İnhibisyonunun Değerlendirilmesi	35
4.2 Farklı Daldırma Süreleri Sonunda EIS Verilerinin Korozyon İnhibisyonunun Değerlendirilmesi.....	40
4.3 Yumuşak Çeliğin <i>P. commutata</i> Ekstrakt Etkisi ile Sıfır Yük Potansiyelinin Değerlendirilmesi.....	44
4.4 Yumuşak Çelik Elektrotların FE-SEM ve AFM Analizleri İle Yüzey Morfolojilerinin Değerlendirilmesi.....	45
BÖLÜM V	49
SONUÇLAR.....	49
KAYNAKLAR	51
ÖZ GEÇMİŞ	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. 1,0 M HCl ve <i>P. commutata</i> ekstraktı içeren çözeltilerde 1 saat daldırma süresi sonunda <i>EIS</i> , * <i>LPR</i> ve ** <i>potansiyodinamik polarizasyon</i> ölçümlerinden elde edilen korozyon parametreleri	37
Çizelge 4.2. Farklı daldırma sürelerinde <i>P. commutata</i> ekstraktını içeren ve içermeyen HCl çözeltilerindeki yumuşak çeliğin impedans parametreleri.....	42



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Doğal olarak oluşmuş günlük yaşamdan görüntülenen bazı korozyon örnekleri (orjinal)	3
Şekil 1.2. Islak ve kuru korozyon arasındaki temel farklılıkların şematize olarak sınıflandırılması.....	5
Şekil 1.3. ASM'nin yaptığı korozyon türlerinin şematize olarak sınıflandırılması.....	7
Şekil 1.4. Metal yüzeyinde oluşan aralık (çatlak) korozyonunun temsili gösterimi.....	7
Şekil 1.5. Paslanmaz çelik yüzeyinde oluşan çukurcuk korozyonu	8
Şekil 1.6. Demir yüzeyinde oluşan farklı havalandırma korozyonunun görüntüsü.....	9
Şekil 1.7. Korozyon inhibitörlerinin sınıflandırılması.....	16
Şekil 1.8. <i>Palustriella commutata</i> 'nın suda stereomikroskop altında çekilmiş görüntüleri	19
Şekil 3.1. İnhibitör etkisi incelenen <i>Palustriella commutata</i> 'nın çekilmiş fotoğrafları ..	30
Şekil 3.2. <i>Palustriella commutata</i> 'nın reflux prosesi	31
Şekil 3.3. <i>Palustriella commutata</i> stok çözeltisinin derişimini belirleme aşamaları.....	32
Şekil 4.1. <i>P. commutata</i> ekstraktı içeren ve içermeyen 1,0 M HCl çözeltileri için öngörülen eşdeğer devre modelleri	35
Şekil 4.2. Farklı derişimlerde <i>Palustriella commutata</i> ekstraktını içeren ve içermeyen 1,0 M HCl çözeltilerinde 1 saat daldırma süresi sonunda elde edilen impedans eğrileri	36
Şekil 4.3. Farklı derişimlerde <i>P. commutata</i> ekstraktını içeren ve içermeyen 1,0 M HCl çözeltilerinde elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrileri	38
Şekil 4.4. Farklı derişimlerde <i>P. commutata</i> ekstraktını içeren ve içermeyen HCl çözeltilerinde 24-120 saat daldırma süreleri sonunda elde edilen EIS eğrileri	41
Şekil 4.5. <i>P. commutata</i> ekstraktı (% 0,080 (w/v)) için sıfır yük potansiyelinin belirlenmesi	45
Şekil 4.6. <i>P. commutata</i> ekstraktı içeren ve içermeyen HCl elektrolitinde 120 saat daldırma sonrası 200 kat büyütülerek alınan FE-SEM görüntüleri.....	46
Şekil 4.7. <i>P. commutata</i> ekstraktı içeren ve içermeyen HCl elektrolitinde 120 saat daldırma sonrası 2000 kat büyütülerek alınan FE-SEM görüntüleri.....	46

- Şekil 4.8. 1,0 M HCl çözeltisindeki yumuşak çeliğin 298 K'de 120 saatlik daldırma süresi sonrasında elde edilen AFM görüntüleri.....47
- Şekil 4.9. % 0,080 (w/v) derişimdeki *Palustriella commutata* yosun ekstraktı çözeltisine 120 saatlik daldırma sonrasında yumuşak çeliğin 298 K'deki elde edilen AFM görüntüleri48



SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler

%	Yüzde
°C	Santigrat derece
K	Kelvin

Açıklama

Kısaltmalar

μA	Mikroamper
AC	Alternatif Akım
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
CHI	Elektrokimyasal Analizör
CPE	Sabit Faz Elementi
E_{corr}	Korozyon Potansiyeli
EIS	Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi
E_{ocp}	Açık Devre Potansiyeli
FE-SEM	Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
HCl	Hidroklorik Asit
LPR	Lineer Polarizasyon Direnci
mL	Mililitre
n	Sabit Faz Katsayısı
nm	Nanometre
PZC, Syp	Sıfır Yük Potansiyeli
R_a	Birikinti Direnci
R_{ct}	Yük Transfer Direnci
R_f	Film Direnci
R_p	Polarizasyon Direnci
R_{por}	Por Direnci
η	İnhibisyon Etkinliği
R_a (AFM için)	Metal yüzeyinin ortalama pürüzlülük değeri

BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1 Metal ve Korozyon

Korozyon, metalik malzemeler ile çevresi arasında gerçekleşen bir elektrokimyasal tepkimedir ve metalin bozunmasına, çevre-su kirliliğine, ekonomik kayıplara ve süreç güvenliğinin tehlikeye girmesine neden olmaktadır. Ayrıca korozyon, fiziksel görünüm, mekanik özellikler ve malzeme dayanımı gibi ciddi sorunlara yol açabilmektedir. Bunun yanı sıra metalik malzeme korozyonunun neden olduğu ekonomik kayıplar da toplum açısından bir tehdit oluşturarak ekonomi üzerinde de olumsuz bir etki yansıtmaktadır (Ech-chihbi vd., 2019; Alvarez vd., 2022).

Korozyon sorunlarının sıklıkla görüldüğü endüstrilerin başında petrol, su şebekeleri, atık su arıtma tesisleri, ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemleri, enerji santralleri, boya ve inşaat endüstrileri, tekstil ve boyama sektörü, gıda-ilaç ve otomotiv sektörleri gelmektedir. Çeşitli endüstriyel sektörlerde kazan temizlikleri, petrol depolama tanklarının asitle muamelesi, yüzey temizleme ve kireç giderme işlemleri hidroklorik asit (HCl) gibi asitlerle yaygın olarak yapılmaktadır. Asitle temizleme (pickling) işlemi, metal yüzeyinde biriken pas ve korrozif maddeleri asit ile birlikte ince tabaka halinde yüzeyden uzaklaştırma olayıdır. Metallerin korozyona uğramasını da çözelti pH ve sıcaklığı, asitle temizleme, yüzey temizleme, ortamdaki kirleticilerin varlığı ve kireç giderme gibi endüstriyel işlemler kolaylaştırmaktadır (Umoren vd., 2019).

Metallerin tamamı aslında doğada, oksit ve sülfür şeklindeki cevherleri halinde bulunmaktadır. Bu formlar, minimum enerjiye ve maksimum düzensizliğe sahip oldukları için metallerin doğadaki en kararlı durumlarını temsil ederler. Yumuşak çelik ve alaşımları, düşük maliyeti, yüksek esneklik ve adaptasyon yeteneği, güçlü mekanik özellikleri ve kolay bulunabilirliği gibi nedenlerle pek çok endüstriyel ve mühendislik sektöründe yaygın olarak kullanılan bir metal olmasına rağmen, korozyondan en çok etkilenen metallere de birisidir (Ech-chihbi vd., 2020; Ouakki vd., 2021). Ekonomik maliyet göz önüne alındığında, korozyon sonucu kaybolan ve işlenemez hale gelen

metalın alınacak uygun bir önlemlle kazanılması, yani metalın ömrünün uzatılması ile daha verimli kullanımı sağlanmış olur. Güvenlik açısından bakıldığında, korozyon, sistemlerin dayanımını azaltarak çökmesine ve daha ciddi kazalara yol açabilmektedir. Örneğin, nükleer atıkların depolanması ve taşınması sırasında korozyon kaynaklı arıza ve kazalara özellikle özen gösterilmelidir. Kaynakların korunması açısından değerlendirildiğinde ise, sınırlı dünya rezervleri nedeniyle sadece emek ve enerjinin boşa harcanması değil, aynı zamanda metal bazlı malzemelerin biriken stoklarının verimsiz kullanımı da göz ardı edilemeyecek ayrı bir öneme sahiptir (Erbil, 2012).

Korozyona karşı alınan önlemler beraberinde büyük ekonomik kayıpları da getirebilmektedir. Örneğin, metallerin korozyona karşı dayanıklılığını artırmak için yüzey kaplama işlemleri yapılabilmekte, metalın bulunduğu ortamın etkisini azaltmak amacıyla ek sistemler kurulup, korozyona uğrayan parçalar yenileriyle değiştirilebilmektedir. Ancak, korozyona uğrayan bir malzemenin değiştirilmesi durumunda, yalnızca yeni parça maliyeti değil, aynı zamanda işletmenin durmasından kaynaklanan kayıplar ve korozyonun neden olduğu ürün değerindeki azalmalar gibi dolaylı maliyetler de dikkate alınması gereken önemli giderler arasındadır. Korozyon, doğal bir süreç olduğundan ve hayatımızın hemen her alanında gözlemlenebildiğinden, Şekil 1.1’de günlük yaşamdan alınmış bazı doğal korozyon örnekleri sunulmuştur.





Şekil 1.1. Doğal olarak oluşmuş günlük yaşamdan görüntülenen bazı korozyon örnekleri (orjinal)

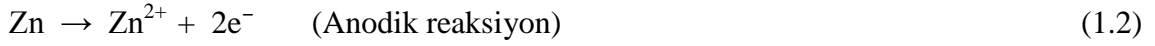
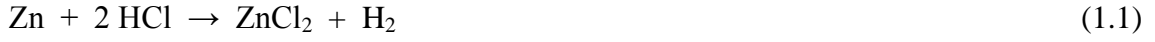
1.2 Korozyonun Sınıflandırılması

Korozyon, bir malzemenin (metal, seramik, polimer vb.) çevresi ile olan geri dönüşümsüz bir ara yüzey reaksiyonudur ve bu reaksiyon, malzemenin tüketilmesi veya çevredeki bir bileşene çözünmesi ile sonuçlanmaktadır. Korozyon, her zaman olmamakla birlikte malzemenin kullanımına zarar veren etkilerle sonuçlanmakta ve genellikle erime, buharlaşma, aşınma ya da mekanik olarak kırılma gibi yalnızca fiziksel/mekanik süreçler korozyon terimine dâhil edilmemektedir. Toprak ve su ortamlarında bulunan çeşitli mikroorganizmaların rolleri de düşünüldüğünde, korozyon tanımı mikrobiyal etkili faktörleri de kapsayacak şekilde genişletilebilir.

Korozyon:

- ✓ Kimyasal ve elektrokimyasal korozyon,
- ✓ Yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklık korozyonu,
- ✓ Islak ve kuru korozyon gibi farklı şekillerde sınıflandırılabilir.

Kuru korozyon, genellikle yüksek sıcaklıklarda, sulu bir ortamın olmadığı ve gazlar ile buharların bulunduğu koşullarda meydana gelmektedir. Korozyonun elektrokimyasal doğası, çinkonun (Zn) seyreltik hidroklorik asit içinde çözünmesi ile daha rahat anlaşılabilir.



Net hücre reaksiyonunu oluşturan iki yarı reaksiyon eşitlik 1.2 ve 1.3'te gösterilmiştir. HCl çözeltisine daldırılan bir Zn metalini düşündüğümüzde, reaksiyon sonucu Zn metali az bir zamanda çözünerek aşınmaya başlayacak ve yeteri miktarda beklendiğinde ise, çinkonun tamamen çözünerek yok olduğu gözlenecektir. Eşitlik 1.1'e göre, Zn korozyon sonucu çözünerek metalik özelliğini kaybetmiştir. Serbest halde kalan elektronlarla da hidrojen iyonları katodik bölgede indirgenerek, hidrojen gazını oluşturmuştur.

Islak ve kuru korozyon arasındaki temel farklılıkları daha iyi açıklayabilmek amacıyla Şekil 1.2 oluşturulmuştur.

Kuru (kimyasal) korozyon	Islak (elektrokimyasal) korozyon
<ul style="list-style-type: none"> • Atmosferik gazların metal yüzeyine doğrudan kimyasal saldırısı ile oluşur. • Düşük veya yüksek sıcaklıkta, metalin doğasına bağlı olarak gerçekleşir. • Kuru koşullarda, iletken bir sıvı veya nem bulunmaması durumunda meydana gelir. • Kendiliğinden kontrol edilen ve yavaş gelişen bir süreçtir. • Korozyon, adsorpsiyon mekanizmasıyla gerçekleşir. • Homojen ve heterojen metalik yüzeylerde meydana gelir. • Korozyon tüm yüzeye eşit şekilde dağılır. • Aynı anot ve katot bölgeleri oluşmaz. • Korozyon ürünü metalik yüzeyde eşit şekilde birikir. • Kuru korozyon, metal ve gazlar arasındaki afinitiyeye ve oluşan ürünün doğasına bağlıdır. • Oksidasyon korozyonu, kuru yani kimyasal korozyon için iyi bir örnektir. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bir metalin iletken bir sıvı veya elektrolitik ortamla teması sonucu oluşur. • Islak korozyon, iletken bir sıvı, elektrolitik bir ortam veya nemin varlığında ve ıslak koşullarda meydana gelir. • Normal sıcaklık koşullarında gerçekleşir. • Sürekli ve hızlı gerçekleşen bir süreçtir. • Korozyon, elektrokimyasal reaksiyon mekanizmasıyla gerçekleşir. • Sadece heterojen metalik yüzeylerde meydana gelir. • Korozyon yalnızca anotun bulunduğu bölgede büyük oranda lokalize olarak gerçekleşir. • Aynı anot ve katot bölgeleri oluşur ve birbirleriyle temas halindedir. • Korozyon ürünü anotta değil, katot veya anot-katot arasında birikir. • Islak korozyon, potansiyel fark ve ortamın doğasına bağlıdır. • Galvanik korozyon, farklı havalandırma korozyonu, çukurcuk korozyonu, su hattı korozyonu ve gerilme korozyonu elektrokimyasal yani ıslak korozyon için iyi birer örnektir.

Şekil 1.2. Islak ve kuru korozyon arasındaki temel farklılıkların şematize olarak sınıflandırılması

Korozyon sürecinde, bir metal asidik ortamda çözünürken, anodik bölgedeki elektronlar katodik bölgelere doğru metal içerisinde kısa devre aracılığıyla taşınmaktadır. Bu durum da, elektron transferinin durdurulmasını veya korozyon sürecinin kontrol altına alınmasını imkânsız hale getirmektedir. Yani, korozyonun aslında denetimsiz bir pil reaksiyonuna benzer şekilde geliştiği söylenebilir. Bilinen pil sistemlerinde kimyasal enerji, kontrollü bir şekilde elektrik enerjisine dönüştürülebilirken, korozyon sürecinde kimyasal enerji kontrolsüz bir şekilde elektrik enerjisine dönüşmesine neden olabilir. Bu süreçte, madde kaybı gerçekleşirken, aynı zamanda elde edilebilecek elektrik enerjisi söz konusu değildir (Erbil, 2012).

Anodik ve katodik bölgedeki reaksiyon hızlarını çevresel etkiler, oksijen ve diğer oksitleyicilerin varlığı, akış hızlarındaki değişiklikler, sıcaklık, reaktan derişimleri ve pH gibi faktörler etkileyebilmektedir. Korozyonun temel mekanizması korozyon hücrelerinin oluşumunu içeriyor olsa da, meydana gelebilecek birçok farklı korozyon türü veya şekli mevcuttur. Ancak, korozyonun gerçekleşmesi için ayrı (fiziksel olarak bağımsız) anotlar ve katotlar gerekmediği unutulmamalıdır. Aynı (tek) yüzeyde, anodik

(korozyon/yükseltgenme) ve katodik (indirgenme) reaksiyonlarının gerçekleştiği mikro düzeyde sayısız anodik ve katodik alanlar da oluşturulabilmektedir. Her korozyon türü, anodik ve katodik bölgelerin belirli bir düzenine ve türüne bağlı olarak, belirli desenler ve yerleşimler gösterebilir. En önemli korozyon türleri arasında üniform korozyon, galvanik korozyon, konsantrasyon hücreleri, su hattı saldırısı, çukurcuk korozyonu (pitting), dezinsifikasyon, seçici çözünme, atmosferik korozyon, aşındırma korozyonu, fretleme (sürtünme) korozyonu, boşluk ya da gevşeklik korozyonu, kavitasyon korozyonu, gerilme (stres) korozyonu, taneler arası ve taneler içi korozyonu, hidrojen çatlama-gevrekleşmesi ve korozyon yorgunluğu gelmektedir (Sully ve Taylor, 2004). “Amerikan Metaller Derneği (ASM)” 1987 yılında korozyon türlerini Şekil 1.3’teki gibi sınıflandırmıştır (Sully ve Taylor, 1987).

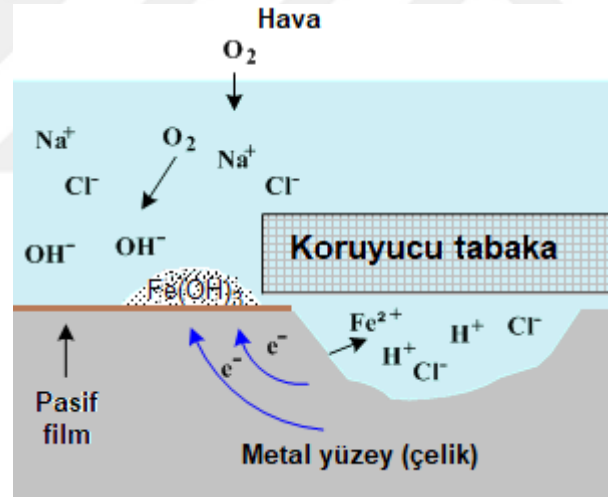
“Aralık korozyonu”, iki birleşik yüzeyin (iki metal ya da metal-metal olmayan yüzeyler arasındaki) arasındaki çatlak/yarık bölgesine yakın bir metal üzerinde oluşan lokal bir saldırıdır. Buradaki korozyon genellikle tek bir metale ait lokal bir bölgeyle sınırlıdır. Bu tür korozyon, iyonlar veya oksijen nedeniyle oluşan konsantrasyon gradyanıyla başlatılabilir. Çatlağın içinde klorür birikimi ise hasarı daha da fazla şiddetlendirebilmektedir. Bu tür korozyonu etkileyen çeşitli faktörler vardır. Örneğin;

- ✓ Malzemeler: Alaşım bileşimi, metalografik yapı.
- ✓ Çevresel koşullar: pH, oksijen derişimi, halojenür derişimleri, sıcaklık vb. gibi koşullar.
- ✓ Çatlakların geometrik özellikleri: Çatlakların şekli, yüzey pürüzlülüğü.
- ✓ Malzeme türü: Metal-metal ya da metal-metal olmayan bileşim türleri.

Bu tür faktörler, çatlak (aralık) içindeki kimyasal ve fiziksel koşulları değiştirerek korozyon sürecinin hızını ve şiddetini belirlemektedirler. Şekil 1.4’te oluşan bir aralık (çatlak) korozyonunu şematik olarak görmekteyiz.

Genel korozyon: Uniform incelmeyeyle baskın hale gelen korozyon türleridir.		
• Atmosferik korozyon	• Galvanik korozyon	• Kaçak akım korozyonu
• Erimiş tuz korozyonu	• Sıvı metallerde korozyon	• Yüksek sıcaklık korozyonu
• Genel biyolojik korozyon		
Lokale (yerel) korozyon: Belirli bölgelerde metal aşınması yüksek orandadır.		
• Çatlak (aralık, yarık) korozyonu	• Filiform korozyon	• Çukurcuk korozyonu
• Lokale (yerel) biyolojik korozyon		
Metalurjik etkili korozyon: Alaşım kimyası ve ısıl işlemden etkilenen korozyon türleridir.		
• Taneler arası korozyon	• Alaşım sızlaştırma (dealloying) korozyonu	
Mekanik yardımcı bozunma: Mekanik bir bileşenle olan korozyon türleridir.		
• Aşınma korozyonu	• Fretleme korozyonu	• Kavitasyon ve su damlası çarpması
• Korozyon yorgunluğu		
Çevresel etkili çatlama: Korozyon nedeniyle gerilme (stres) altında oluşan çatlamalardır.		
• Gerilme – korozyon çatlama (SCC)	• Hidrojen hasarı	
• Sıvı metal gevrekleşmesi	• Katı metal kaynaklı gevrekleşme	

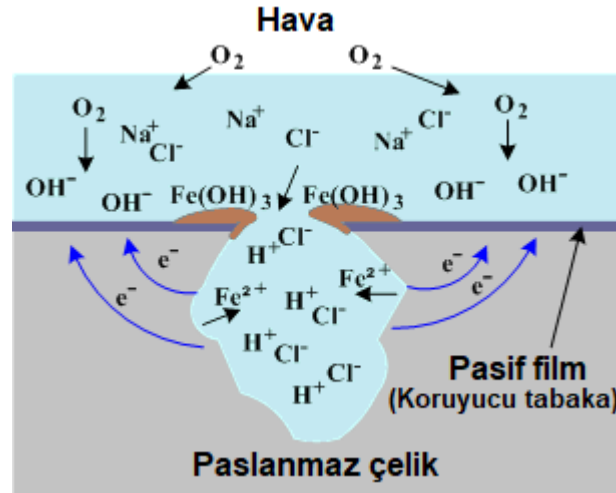
Şekil 1.3. ASM'nin yaptığı korozyon türlerinin şematize olarak sınıflandırılması



Şekil 1.4. Metal yüzeyinde oluşan aralık (çatlak) korozyonunun temsili gösterimi

“Filiform korozyonu”, aralık korozyonunun özel bir türüdür. “Çukurcuk korozyonu” ise daha küçük alanlarla sınırlı lokal (yerel) bir korozyon türüdür (Şekil 1.5). Mikroçukurların oluşumu oldukça zarar verici olabilir. Çukurlaşma korozyonunun şiddetini değerlendirmek için en derin çukurun ortalama penetrasyona oranı olan “**çukurlaşma faktörü**” kullanılabilir. Bu tür korozyon, genellikle pasif metallerde ve alaşımlarda gözlemlenmektedir. Oksijen veya iyon gradyanlarını içeren derişim hücreleri, anot ve katot bölgeleri oluşturarak çukurlaşmayı başlatabilmektedir. Klorür iyonları, pasif filmlere zarar vererek çukurcuk oluşumunu kendi kendini katalize eden bir süreç

dönüştürebilmekte ve çukurlaşma eğilimi, çukurlaşma potansiyellerinin ölçümü ile tahmin edilebilmektedir.



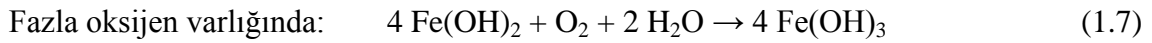
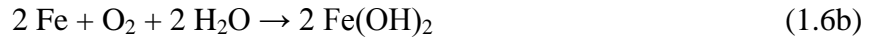
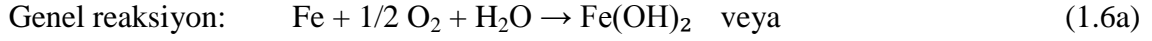
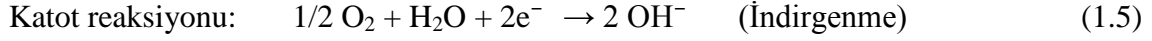
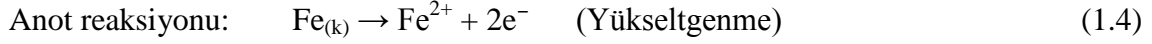
Şekil 1.5. Paslanmaz çelik yüzeyinde oluşan çukurcuk korozyonu

“Uniform korozyon”, yüzey kaplaması veya inhibitörlerle korunmayan demir esaslı metallerde ve alaşımlarda yaygın olarak görülen bir korozyon türü olup, korrozif ortamlara maruz bırakıldığında, yüzeyde homojen bir “pas” tabakası oluşmaktadır. Atmosferik korozyon, bu tür korozyona verilebilecek en tipik örnektir. “Galvanik korozyon” ise genellikle farklı metallerin korozyonu olarak adlandırılmakta ve galvanik çiftlerde daha aktif olan metalin korozyona uğramasıyla meydana gelmektedir. Aynı zamanda, çok fazlı alaşımlarda da yaygın bir şekilde görülebilmektedir. Buna örnek olarak, alüminyum alaşımlarındaki bakır (Cu) içeren çökeltiler ve metalik çinko (Zn) içerisindeki demir (Fe) ve Cu gibi safsızlıklar verilebilir.

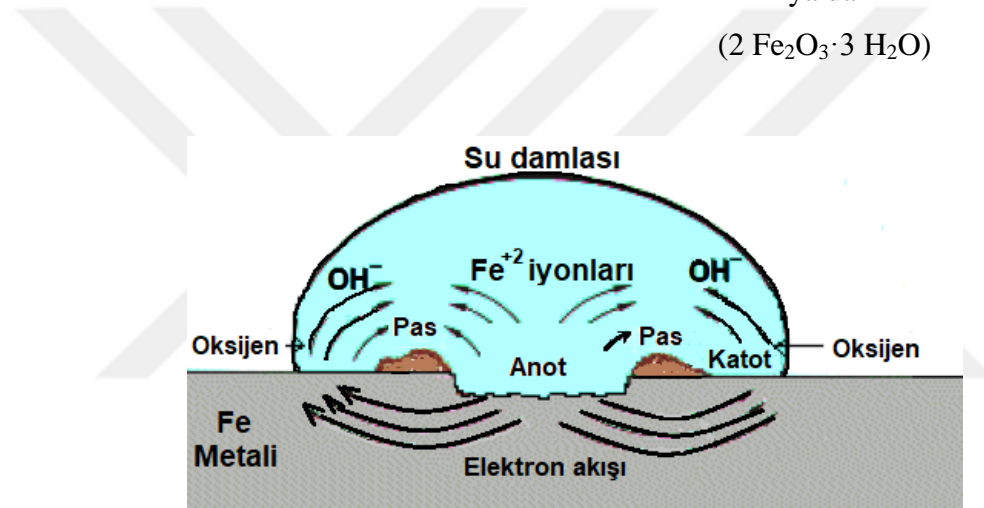
“Derişim hücresi korozyonu”, metalin farklı bölgeleri etrafındaki sıvı ortam derişimindeki farklılardan kaynaklanır. Farklı havalandırma korozyonu ise derişim hücresi korozyonunun bir türü olup, bir elektrolitik ortamda metalin farklı havalandırılmış bölgeleri arasındaki potansiyel farkından kaynaklanmaktadır. Metalin daha yüksek hava derişimine maruz kalan kısmı, daha fazla oksijenlenmiş bölge olup, “katot” görevi görmekteyken, Aynı zamanda elektrolitin daha derin kısmına daldırılmış olan metal bölgesi ise daha az oksijenlenmiş bölge olup, “anot” olarak işlev görmektedir. Elektronlar, metal boyunca anottan (daha az oksijenlenmiş bölge) katoda (daha fazla oksijenlenmiş bölge) doğru akarlar, bu sırada iyonlar elektrolitik ortam aracılığıyla birbirine doğru hareket ederek korozyon ürününü oluştururlar (Şekil 1.6). Anodik bölgede, oksidasyon sonucu metal çözünmesi meydana gelirken, katodik

bölgede ise oksijenin indirgenmesi türünden bir reaksiyon gerçekleşerek, hidroksit iyonlarını oluşturmaktadır (De Gruyter vd., 2001).

Demir metali durumunda:



ya da
($2 \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$)



Şekil 1.6. Demir yüzeyinde oluşan farklı havalandırma korozyonunun görüntüsü

Örneğin Şekil 1.6'daki gibi bir demir metali düşünelim, üzerine kısmen birkaç damla su düşmesiyle birlikte farklı havalandırma korozyonuna uğramaktadır. Metal yüzeyinin suyla kaplı kısmı ise daha az oksijenlenmiş bölge, yani anot haline gelirken, suyla kaplanmamış kısmı ise daha fazla oksijenlenmiş bölge, yani katot olarak işlev görmektedir.

“Alaşım-sızlaştırma korozyonu”, bir alaşımın aşındırıcı bir ortamda aktif metal fazının seçici olarak çözünmesini ifade eder. Örnek olarak, bakır ve çinko içeren pirinç alaşımını verebiliriz. Çinko bakıra göre anodiktir (aktiftir). Bu nedenle, korrozif bir ortamda seçici olarak dezinsifikasyon (çinko giderme) meydana gelir ve matris içindeki katodik bakır zenginleşecektir (pirincin renginin sarıdan kırmızıya dönmesi işlemi). Mesela gri dökme demirin grafitleşmesi de örnek olarak verilebilir. Grafit katodik

olması sebebiyle matris içerisindeki demirin çözünmesini artıracak ve geride bir grafit ağı bırakacaktır. Bu örneklerin dışında;

- ✓ Kalay bronzları: Sıcak tuzlu su veya buhar ortamında kalayın seçici olarak çözünmesi,
- ✓ Kıymetli metal alaşımları: Altın gibi bakır veya gümüş içeren alaşımlar, güçlü asitler ya da sülfür ortamında bakır veya gümüşün öncelikli çözünmesi,
- ✓ Bakır-nikel alaşımları: Kondansatör borularında nikel giderme işlemi (nikelin seçici olarak çözünmesi-denikelizasyon).

Metallerde veya alaşımlarda tane sınırlarında ya da bunlara yakın bölgelerde meydana gelen lokalize (yerel) saldırıya, “taneler arası korozyon” denir. Bazı etkenler taneler arası korozyona katkıda bulunmaktadır. Bunlardan ilki, tane sınırlarında bulunan safsızlıklar ve çökelmelerdir. Diğeri ise, korozyona karşı direnç sağlamak için tane sınırı bölgesinde eklenen bir alaşım elementinin tükenmesi etkenleridir. Paslanmaz çelik birleşimli yapılarda, taneler arası korozyon yaygın olarak görülebilir ve genelde birleşme yerinin çürümesi olarak tabir edilmektedir. “Erozyon korozyonu”, yüzeyler ve aşındırıcı sıvılar arasındaki bağıl hareket nedeniyle meydana gelen metallerin ve alaşımların bozunması olayıdır. Bağıl hareketin hızına bağlı olarak aşınma meydana gelmekte ve bu korozyon türü de, yönlülüğe sahip oluklar ve yüzey desenleriyle karakterize edilmektedir. Örnek olarak, paslanmaz alaşımlı pompa pervanelerini verebilmek mümkündür. Hareketli sıvılara maruz kalan tüm donanım türleri erozyon korozyonuna uğramaya yatkındırlar. Birçok arıza çarpma etkisine bağlanabilir. Yüksek hızdaki çarpmaya bağlı olan erozyon korozyonu sıklıkla buhar yoğunlaştırıcı borularda, yüksek sıcaklıktaki petrol rafinerilerinde bulunan sürgülü vanalarda, giriş borularında ve buhar türbin kanatlarında meydana gelmektedir.

“Biyolojik korozyon” ise mikro (bakteri gibi) ve makro organizmalar (alg, mantar, deniz canlıları vb.) gibi canlı organizma faaliyetlerinden etkilenen bir korozyon türüdür. Çeşitli pH, sıcaklık ve basınç koşullarında gelişebilen bu tür, canlı organizmaların metabolik reaksiyonlara katılımını ve anodik-katodik reaksiyonlarını doğrudan etkilemektedir. Etki mekanizması koruyucu filmleri bozarak, korrozif koşul ya da tortular oluşturması ile organizmaların belirli korozyon türlerini kolaylaştırmakta veya hızlandırmaktadır (Fernandes ve Montemor, 2014; Pal ve Lavanya, 2022).

1.3 Korozyonu Önlemenin Önemi

Korozyonun kontrol altına alınması, metallerin büyük bir kısmının işlevselliğini yitirmesinin önlenmesini mümkün kılmaktadır. Yükselen enerji seviyelerine sahip ve kararlı duruma dönme eğiliminde olan metallerde görülen korozyon hasarı, belirli yöntemlerle minimuma indirilebilir. Ancak, alınan önlemlerin korozyon sürecini yalnızca yavaşlatabileceği, tamamen durdurulmasının mümkün olmayabileceği unutulmamalıdır. Korozyonun kontrol altına alınmasında ilk adım, uygun malzeme seçimi ve doğru tasarımın uygulanmasıdır. Daha sonra, malzeme ile çevresel etkenler arasındaki ara yüzeyin korunması sağlanmalıdır. Bu amaçla, korrozif bileşenler ortamdaki uzaklaştırılabilir veya metal yüzeyine ulaşmaları engellenebilir. Ayrıca, metal yüzeyinin potansiyelini değiştirmek veya inhibitör etkili maddeler eklemek gibi yöntemlerle de korozyon önenebilmektedir.

Korozyon, özellikle metaller ve alaşımlar olmak üzere malzemeleri etkileyen küresel bir olgudur ve olumsuz etkilerini önlemek için etkili bir azaltma gerektirmektedir. Korozyonun çeşitli biçimlerde olması, metalin doğal yapısından ve aşındırıcı ortamlarından kaynaklanmaktadır. Metallerdeki korozyonla mücadele etmek veya korozyona direnmek için birçok yöntem mevcuttur. Üreticiler, malzemelerin kullanılacağı belirli ortamları göz önünde bulundurarak, uygun maliyetli malzeme üretimi ile optimum korozyon direncini sağlama arasında bir denge bulmaya çalışmaktadırlar.

Korozyonu önlemenin çeşitli yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemlerin en yaygınları arasında ön işlem, uygun tasarım ve malzeme seçimi, kurban elektrot koruma, katodik koruma, bariyer koruma, elektro-kaplama, çinko galvanizleme ve lazer teknolojisi kullanımları yer almaktadır. Her bir yöntem, metal yüzeyler üzerindeki korozyon etkilerini azaltmayı ya da bu etkilere karşı direnç sağlamayı farklı şekillerde amaçlamaktadır (Balangao, 2024).

1.3.1 Metallerin ön işleme

Bu işleminde herhangi bir koruyucu önlem uygulanmadan önce, metal yüzeyinin iyice temizlenmesi gerekmektedir. Yağdan arındırma (giderme), genellikle trikloretilen gibi uçucu bir organik çözücü kullanılarak gerçekleştirilmekte ve yağlı-gresli olan yüzey

filmlerini etkili bir şekilde çözmektedir. Ayrıca, mekanik temizlemeyi tamamlayan bir yöntem olarak asit ile temizleme ve yüzeydeki oksit tabakasını gidermek için alternatif olarak kullanılabilir. Metal yüzeyin uygun şekilde hazırlanması, özellikle yağ ve gresin uzaklaştırılması, herhangi bir kaplama uygulamadan önce oldukça önemlidir ve bu işlem bir alkali çözelti ile yıkama yoluyla sağlanabilmektedir (Jones ve Foreman, 2015).

1.3.2 Uygun tasarım

Korozyonun en aza indirilmesi için malzeme tasarlarken, iki farklı metal birbiriyle temas ettiğinde, anot olarak belirlenen metalin daha büyük bir yüzey alanına diğer metalin ise daha küçük bir yüzey alanına sahip olması gerekli olan temel ilkeler arasındadır. Ayrıca, farklı metaller temas halinde ise, bu metallerin elektrokimyasal seride mümkün olduğunca yakın konumlandırılması tercih edilmelidir. Doğrudan temas kaçınılmazsa, metal-metal elektriksel temasını önlemek için yalıtım malzemelerinin kullanılması önerilmektedir. Katı birikimini engellemek için keskin köşelerden kaçınılmalı ve kaplamaların kırılarak hasar görmesi durumunda ise hızlı gelişen lokal korozyonu önlemek için metallerin boyanması ya da kaplanması hususlarında son derece dikkatli davranılması gerekmektedir (Shibli vd., 2015).

1.3.3 Doğru malzeme seçimi

Doğru malzemenin seçimi, çalışma ortamında kullanım amacına uygun olarak en iyi direnç seviyesini sağlamak için yapılmaktadır. Bu süreç, malzemenin çekme mukavemeti, korozyon direnci ve maliyet etkinliği gibi özelliklerinin değerlendirilmesini içermektedir. İlk seçim, deneyim ve güvenlik esas alınarak yapılmakta, ardından malzemenin belirli koşullarda yeniden değerlendirilmesi için laboratuvar testleri gerçekleştirilmektedir. Son olarak, safsızlıklar, sıcaklık ve basınç gibi faktörlerin değerlendirilmesi amacıyla sonuçların değerlendirilmesi yapılmaktadır.

1.3.4 Kurban elektrot yöntemi

Kurban elektrot yöntemi, bir metali korumak için daha aktif veya daha elektropozitif bir başka metalin tabakasıyla kaplamayı içermektedir. Bu yöntemde, esas metal yerine dış

tabakanın korozyona uğraması sağlanır (Harsimran vd., 2021). Kurban elektrot yönteminde, daha aktif metal yüzeyi elektron kaybederek iyonik hale geçer ve elektronlarını serbest bırakır. Zamanla daha aktif olan metal tükenir, fakat yalnızca mevcut olduğu sürece koruma sağlayacaktır. Örneğin, galvanizleme işleminde demirin (Fe), çinko (Zn) ile kaplanması kurban elektrot yöntemine iyi bir örnektir. Bu işlemde, daha elektropozitif olan Zn, anot görevi görmekte ve korozyona uğrayarak altındaki Fe'yi çinko tabakası tükenene kadar koruma sağlayacaktır.

1.3.5 Katodik koruma yöntemi

Katodik koruma, korozyonu uzaklaştırmak için özel tasarlanmış bir sistemdir. Çok korrozif ortamlarda bile, metal yüzeylerde korozyon oluşmasını önleyen etkili bir süreçtir. Birçok sektör için en etkili korozyon koruma şekillerinden birisidir. Bu yöntem, bir elektrokimyasal hücre oluşturarak korozyonu durdurmaya yardımcı olmayı amaçlayan bir sistemden oluşmaktadır. Bu sistem, bir metal korozyona uğrarken başka bir metalin (katot korozyona uğramayacağı için) korozyona uğramadığı büyük bir pil gibi çalışmaktadır. Yani, elektrik hücrelerinde katodun korozyona uğramaması, aslında buna katodik koruma denmesinin asıl nedenidir. Kurban elektrot yönteminde, korunacak bir malzeme, örneğin demir, daha aktif bir metalle bağlantılandırılmakta idi. Daha aktif olan anot yükseltgenir ve elektron vererek iyonik hale dönüşüp zamanla tükenmekteydi (Kumar vd., 2019). Katodik koruma yöntemi ise iki şekilde gerçekleştirilmektedir. Birincisi kurban anot, ikincisi ise dış akım (etkilenmiş akım) yöntemidir. Kurban anot yöntemi, anot görevi görece metalin korozyona uğrayarak, korunacak malzemeyi korumasına dayanmaktadır. Bu nedenle bu yöntem “kurban anot yöntemi” olarak adlandırılmaktadır. Anot olarak yaygın şekilde kullanılan metaller arasında magnezyum, çinko ve alüminyum gelmektedir. Bu metaller, teoride ve pratikte etkin (verimli) akım sağlama, zamanla azalmayan sürekli akım üretimi ve pasif film oluşumunu engelleme gibi özelliklere sahiptirler. Diğer taraftan, dış akım yöntemi ise korozyona uğramayan inert anotlar kullanarak dış bir kaynaktan akım akışı sağlar ve koruma derecesi uygulanan potansiyel ile belirlenmektedir. Korumanın sağlanabilmesi için, metal çözünmesinin olduğu anot reaksiyonunu ortadan kaldıracak şekilde potansiyel yeterince düşürülerek, yükseltgenme reaksiyonunun denge potansiyeline eşit ya da daha düşük bir değere ulaşılması sağlanmalıdır. Bu yöntemde bir yalıtkan tel, anotu ve korunacak malzemeyi içten bağlayarak elektrolit üzerinden bir akım yolu

oluşturmakta ve galvanik sistemden farklı olarak, yükseltgenme potansiyelindeki farkı kullanmaktadır. Ayrıca sistem, akım akışını sağlamak için dış bir güç kaynağı kullanmaktadır.

1.3.6 Bariyer koruma yöntemi

Metal yüzeyini kaplama, korozyona karşı alınan koruyucu önlemlerden biridir ve bu kaplamaların çoğu, metalik yüzey ile korrozif ortam arasında bir bariyer görevi görmektedir. Kaplamalar metalik veya metalik olmayan özelliklere sahip olabilmekte ve etkinlikleri de yüzeyin hazırlanma şekline göre değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, yapışkan ve homojen bir kaplama elde etmek için yüzeyin iyice temizlenerek, hazırlanması son derece önemlidir (Qian vd., 2015).

Kaplama, metal yüzeyi ile atmosfer arasında uygun bir bariyer oluşturarak korozyonu önlemenin en basit yöntemlerinden biridir. Bu yöntem, metali hava, su ve karbondioksit etkilerinden korumaktadır. Bu koruma metal yüzeyinin boyalar, yağlar veya gres yardımıyla kaplanması, aşınmayan metallerin kullanılması ya da belirli kimyasalların uygulanması yoluyla sağlanabilmektedir. Bu yöntem örneği olarak grafeni göstermek mümkündür. İnert oluşu, benzersiz yapısı ve elektriksel özellikleri sebebiyle bariyer koruma yönteminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Altıgen bir yapıda güçlü bir şekilde bağlanmış karbon atomlarından oluşan grafen, diğer malzemelerin kimyasal reaksiyonlara girebileceği koşullarda inertliğini koruyacaktır (Armijo, 1968).

1.3.7 Elektrokaplama yöntemi

Elektrokaplama yönteminin, 1805 yılında İtalyan kimyager Luigi Brugnatelli tarafından bulunduğu kabul edilmektedir. Birçok deneme ve başarısızlığın ardından, gümüş üzerine ince bir altın tabakasını kaplayarak başarıya ulaştığı bilinmektedir. Bu teknik, bir metali başka bir metal ile kaplamak için bir çözeltiden elektrik akımı geçirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Örneğin, krom kaplama yöntemi araç tekerlek jantlarını ve gaz brülörlerini korozyona karşı koruma amaçlı kullanılırken, nikel kaplama yöntemi ise hem dekoratif amaçlar hem de çeşitli makine parçaları için tercih edilen yöntemlerdendir (Giurlani vd., 2018).

1.3.8 Lazer teknolojisi yöntemi

Lazer teknolojisi metalleri korozyondan korumak için de kullanılabilir. Örneğin, yeni bir yüzey işleme olan “lazer şokla işleme”, hedef yüzeye yüksek enerji yoğunluklu lazer darbeleri tarafından üretilen şok dalgaları aracılığıyla derin kalıntı mekanik stresi indükleyerek metal korozyonunu en aza indirmeyi amaçlamaktadır (Hanoon vd., 2020). Lazerlerin artan kullanımı, yüksek üretkenliklerine, otomasyon yeteneklerine, temassız işleme, bitirme işlemlerinin ortadan kaldırılmasına, azaltılmış işleme maliyetlerine, iyileştirilmiş ürün kalitesine, maksimum malzeme kullanımına ve minimum ısıdan etkilenen bölgeye bağlanabilmektedir (Kharanzhevsky vd., 2020).

1.4 Korozyon İnhibitörleri

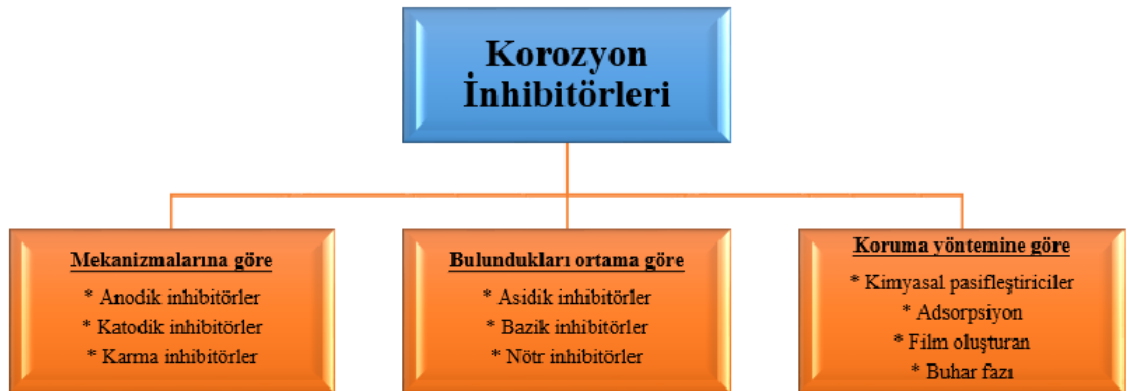
Korozyon inhibitörleri, genellikle düşük derişimlerde bile korozif bir ortama eklendiklerinde korozyon sürecini yavaşlatan veya durduran maddelerdir. Bu maddeler, ortamın bileşenleriyle kimyasal bir reaksiyona girmeksizin korozyonu etkili bir şekilde kontrol altına alabilmektedir. Metalin değiştirilmesinin ekonomik açıdan uygun olmadığı durumlarda, ortamın korozif özelliklerini azaltmak amacıyla inhibitörlerin kullanımı tercih edilmektedir. Bir korozyon inhibitörünün temel işlevi, bulunduğu ortamda katodik ve anodik reaksiyonların hızını düzenleyerek korozyon hızını kontrol altına almaktır. Bu inhibitörler, metal yüzeyinin elektriksel direncini artırmak, iyonların metal yüzeyine difüzyonunu veya hareketini sınırlamak ve katodik/anodik polarizasyon davranışını (örneğin, Tafel eğrilerindeki değişimlerle) yükseltmek suretiyle etkili olurlar (Aejitha vd., 2014).

İnhibitörler, genellikle sulu çözeltilerde çözünebilen organik veya inorganik moleküllerden oluşur. İnorganik inhibitörler arasında kromatlar, nitritler, silikatlar, arsenatlar ve fosfatlar en yaygın kullanılanlardır. Organik inhibitörler ise heterohalkalı azot bileşikleri, tiyoller, aminler, tiyoalkoller, hidrazin gibi kükürt içeren bileşikler ve eterlerden oluşur (Al-Amiery vd., 2016; Alamiery, 2024). Bununla birlikte, bazı inorganik tuzların toksisite içermesi nedeniyle, günümüzde organik inhibitörlerin kullanımı daha fazla tercih edilmektedir.

Organik inhibitörler, metal yüzeyine adsorplanarak etki göstermektedirler. Yapılarında azot, oksijen, kükürt ve fosfor gibi heteroatomlarında serbest elektron çiftleri bulunması ve aromatik halkalı bileşikler içermesi, bu inhibitörlerin metal yüzeyine adsorpsiyonunu kolaylaştırmakta ve güçlendirmektedir. Adsorpsiyon türü, fiziksel veya kimyasal olabilir. İnhibitör molekülleri ile metal atomları arasında Coulomb ya da Van der Waals kuvvetleri gibi zayıf etkileşimler oluştuğunda fiziksel adsorpsiyondan, metal atomlarıyla inhibitör molekülleri arasında koordine kovalent gibi güçlü kimyasal bağlar meydana geldiğinde ise kimyasal adsorpsiyondan söz edilmektedir.

Bir inhibitörün etkinliği, molekül yapısında bulunan elektron verme kapasitesine de büyük ölçüde bağlıdır. Korozyon inhibitörlerinin metal yüzeyine adsorpsiyonunda, inhibitör performansı genellikle inhibitörün kapladığı metal yüzey alanının toplam yüzeye oranına bağlıdır. Metal yüzeyine adsorpsiyon, adsorplanan türlerin iyonik veya dipol yükleri ile metal/çözelti ara yüzeyindeki elektriksel yük arasındaki elektrostatik çekim kuvvetine dayalı olarak gerçekleşmektedir.

Fonksiyonel grupların inhibisyon üzerindeki etkisi göz önüne alındığında, inhibitörler metale koordine kovalent bağlar oluşturarak elektron transferi yoluyla bağlanır. Bu bağlanma, genellikle düşük enerjili boş elektron orbitallerine sahip oldukları için geçiş metallerinde daha etkili bir şekilde gerçekleşir. İnhibitör moleküllerinin adsorpsiyonu, metal yüzeyindeki su moleküllerinin yer değiştirmesini içeren bir mekanizmayla ilerler. Bu süreçte, inhibitör molekülü çözülmüş durumdan adsorplanmış hale geçerken bir enerji değişikliği meydana gelir. Bu enerji değişimi, inhibitör molekülündeki hidrokarbon gruplarının büyüklüğüyle doğrudan ilişkilidir (Özkır vd., 2012). Korozyon inhibitörlerini aşağıdaki gibi sınıflandırmak mümkündür (Şekil 1.7).



Şekil 1.7. Korozyon inhibitörlerinin sınıflandırılması

Kimyasal maddelerin yapısal özellikleri dikkate alınarak gerçekleştirilen çeşitli inhibitör uygulamaları, inhibitörlerin etkinliğinin büyük ölçüde moleküllerin yapısına ve molekül üzerindeki polar gruplara bağlı olduğunu ortaya koymuştur (Özkır, 2019a; Özkır ve Bay, 2024).

1.5 Yeşil İnhibitörler

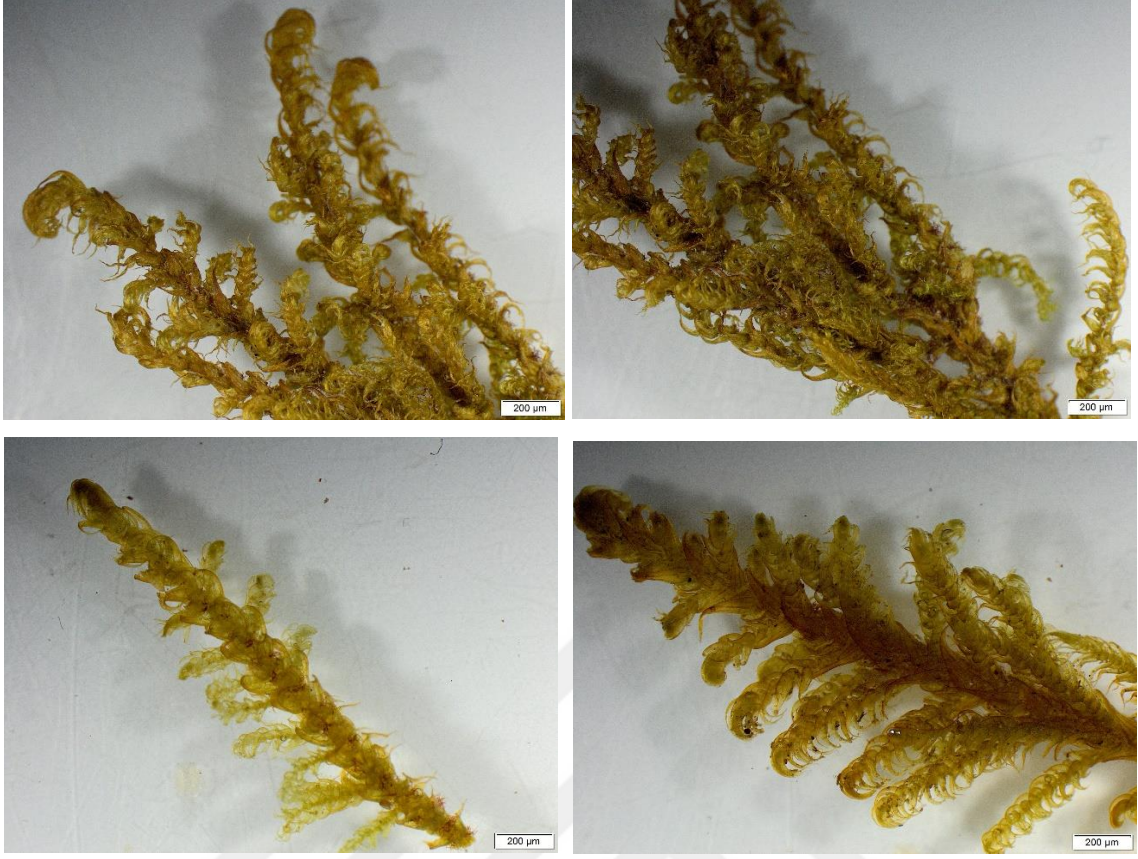
Yeşil korozyon inhibitörleri, çevresel düzenlemelerdeki değişiklikler ve çevresel farkındalığın artması nedeniyle dikkat ve bir o kadar da ilgi çekmektedir. Son yıllarda, çevre dostu malzeme ve uygulamaların önemi giderek artmaktadır. Bu bağlamda, yeşil inhibitörler olarak bilinen, doğal kaynaklardan elde edilen ve çevreye zarar vermeyen kimyasal maddeler, korozyon öncesinde ve sonrasında metal yüzeylerinin korunmasında etkin bir alternatif olarak dikkat çekmektedir. Bu çevresel düzenlemeler, toksik etkileri nedeniyle geleneksel bilinen korozyon inhibitörlerinin kullanımını kısıtlamaktadır. Doğal ürünler, yeşil korozyon inhibitörleri için iyi bir kaynak olarak kabul edilmektedir. Bu ürünlerin çoğu, organik bileşiklerde bol miktarda mevcut olan O, C, N ve S gibi aktif elektron çiftlerine sahip elementleri içeren ekstraktlar, metaller veya alaşımlar üzerinde adsorpsiyonunu sağlayarak yüzeyde koruyucu bir film oluşumuna katkıda bulunarak, korozyonu engellerler. Yeşil kimya ve yeşil kimyasal teknolojilerin gelişimi, yeni korozyon inhibitörleri olarak kabul edilen iyonik sıvılar için de yenilikçi sentez yöntemleri sunmaktadır. Bu iyonik sıvıların adsorpsiyon mekanizması, farklı ortamlarda nasıl etki ettikleri ve çeşitli metal ve alaşımları üzerindeki koruyucu rolleri yaygın tartışmalar arasında gelmektedir. Geleneksel korozyon inhibitörleri, kimyasal bileşikler kullanarak korozyonun engellenmesine yardımcı olurken, genellikle toksik ve çevreye zararlı olabilmektedirler. Yeşil inhibitörler ise doğada biyolojik olarak parçalanabilir olmaları, toksik olmayan özelliklere sahip olmaları ve sürdürülebilir bir çözüm sunmaları açısından daha avantajlıdır (Mahmoud vd., 2025).

Yeşil inhibitörler, genellikle bitkiler, meyve kabukları, yosunlar ve diğer doğal maddelerden elde edilen bileşenlerdir. Bu inhibitörlerin çoğu, metallerin yüzeyine adsorplanarak koruyucu bir film tabakası oluşturur ve böylece metalin korozyonunu engellemektedirler. Doğal inhibitörlerin kullanımı, çevre bilincinin arttığı günümüzde, hem endüstriyel hem de akademik araştırmalarda giderek yaygınlaşmaktadır. Ayrıca bu

tür inhibitörler, çevreye duyarlı uygulamalar gerektiren endüstrilerde, özellikle gıda, ilaç ve tekstil sektörlerinde kullanımı için büyük bir potansiyel taşımaktadır (Zhang vd., 2025).

Karayosunları ve ciğer otları, küçük ve genellikle düşük boylu bitkiler olup filogenetik olarak damarlı bitkiler ile algler arasında yer alan Bryophyta bölümünü oluştururlar. Bryophyta'nın, dünya genelinde 22.000'den fazla türe sahip olduğu ve yaklaşık 3000 türünün tıbbi değeri olduğu bildirilmiştir (Tonguc Yayintas vd., 2017). Bu nedenle, bitki âleminin bu özgün bölümü, son yıllarda artan bir ilgi görmektedir. Karayosunları, birçok yeni doğal ürün veya sekonder metabolit (fitokimyasal) kaynağı olarak dikkate değer bir rezervuar olarak kabul edilmektedir. Bazı araştırmalar karayosunlarının (özellikle ciğer otlarının bibenzilleri) AIDS tedavisinde potansiyel yararlarını da öngörmektedir (Pejin vd., 2013). Karayosunları, ciğer otları ve boynuz otlarını içeren Bryophyta bölümünün, izopren, asetaldehit, monoterenler, seskiterpenler, yeşil yaprak uçucuları ve alkoller dahil olmak üzere çevreye birkaç biyojenik uçucu organik bileşik (BVOC) yaydığı bildirilmiştir. Karayosunlarının BVOC salınımının, biyotik ve abiyotik streslere karşı bir savunma mekanizması oluşturduğu öne sürülmektedir. Örneğin, bazı ciğer otlarında bulunan yağ cisimciklerinin terpen ve aromatik bileşikler içerdiği ve salyangozlar ile diğer hayvanlara karşı otçul caydırıcı bir rol üstlendiği düşünülmektedir. Briyofitler, kara bitkilerinin en eski sınıfıdır (Langford vd., 2023). Karayosunları (Bryophyta bölümü), briyofitler arasında en büyük grubu oluşturmaktadır. Diğer briyofit türlerine kıyasla daha fazla yapısal çeşitlilik göstermelerinin yanı sıra evrimsel olarak da daha ileri bir gelişmişlik düzeyine sahiptirler. Bu grubun en belirgin özelliği, türlerin çoğunda sporların dağılımını sağlayan ve kontrol eden higroskopik (suya duyarlı) peristom dişlerine sahip olmalarıdır.

Bu çalışmada, *Palustriella commutata* karayosunu, korozyon inhibitörleri açısından önemli bir aday olarak öne çıkmaktadır. *Palustriella commutata*, sucul bir yosun olup, su kenarlarında ve bataklık alanlarında yetişmektedir. Higroskopik ve sucul özelliğe sahip olması ile öne çıkan *P. commutata*'nın bu özelliğini sergilemek amacıyla suda çekilen stereomikroskop görüntüleri Şekil 1.8'de verilmiştir. Aynı zamanda kıvrık kancalı yosun ismiyle de bilinmektedir.



Şekil 1.8. *Palustriella commutata*'nın suda stereomikroskop altında çekilmiş görüntüleri

Bitki, kimyasal bileşim açısından oldukça zengin olup, çeşitli alkaloidler, flavonoidler, fenolik asitler ve tanenler gibi bileşenler içermektedir. Bu bileşenler, bitkinin korozyon önleyici özellik gösterme potansiyeline sahip olmasını sağlayan ana etkenlerdir. Flavonoidler ve fenolik bileşikler, genellikle bitkilerde antioksidan, anti-inflamatuar ve koruyucu özelliklere sahip olmaları ile bilinirler. *Palustriella commutata*'nın sucul yaşam alanlarında hayatta kalabilmesi için, çeşitli doğal savunma mekanizmaları geliştirdiği ve suyun üzerinde bulunan zararlı maddeleri filtreleme yeteneği sayesinde ekosisteme katkı sağladığı bilinmektedir. Bu yosun ekstraktının, yumuşak çeliğin asidik ortamda elektrokimyasal davranışına etkisi, bu çalışmanın temel konusudur ve yapılan literatür araştırmalarında bu yosunun korozyon inhibitör etkisinin araştırıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Çalışmada, *Palustriella commutata* karayosunundan elde edilen sulu ekstraktın, özellikle hidroklorik asitli çözeltide yumuşak çelik yüzeyinde nasıl bir koruyucu etki sağladığı, bu ekstraktın korozyon hızını nasıl azaltabileceği ve elektrokimyasal testler ile bu etkinin nasıl ölçüleceği ele alınacaktır. *Palustriella commutata* karayosununun

potansiyel avantajlarından biri de biyolojik olarak parçalanabilir olmasıdır. Yeşil inhibitörlerin çevresel açıdan avantajları, doğada çözünür ve toksik olmayan özelliklere sahip olmalarından kaynaklanır. Bu tür inhibitörler, geleneksel sentetik kimyasal inhibitörlere kıyasla çevre dostu bir alternatif sunmaktadır. Ayrıca, bu bitki ekstraktlarının kullanımı, kimyasal atıkların azaltılmasına ve sürdürülebilir uygulamaların yaygınlaşmasına yardımcı olacaktır. Bitki ekstraktları, metal korozyonunun önlenmesi ve azaltılması için “yeşil” alternatifler olarak değerlendirilebilmektedir. Bu nedenle, bitki ekstraktlarında bulunan aktif bileşiklerin elektrokimyasal özelliklerini ve reaksiyon mekanizmalarını anlamak, bu tür katkı maddelerinin mekanizmalarını ve uygulamalarını daha derinlemesine incelemek için gereklidir.



BÖLÜM II

LİTERATÜR ÖZETİ

Kumar ve Mohana'nın 2014 yılında yayımladıkları bir çalışmada, *Pterolobium hexapetalum* (PH) ve *Celosia argentea* (CA) bitkilerinin metanolik ekstraktlarının ön fitokimyasal araştırması yapılmış olup, PH ve CA metanolik ekstraktlarının endüstriyel su ortamında bulunan yumuşak çelik için korozyon inhibitörleri olarak etkilerini, kütle kaybı ve elektrokimyasal yöntemler kullanarak incelemişlerdir. Her iki ekstraktın da yumuşak çelik yüzeyine adsorpsiyonu Langmuir izoterm modeline uymuştur. Elektrokimyasal impedans spektroskopisi ölçümü, ekstrakt konsantrasyonunun artmasıyla yük transfer direncinin arttığını göstermiştir. Çalışmada çeşitli termodinamik parametreler değerlendirilmiş ve tartışılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yüzeydeki adsorplanmış olan film analiz edilmiştir. Ayrıca, bitki ekstraktlarının antioksidan aktiviteleri belirlenerek, elde edilen inhibisyon etkinliği sonuçlarıyla ilişkilendirilmiştir (Kumar ve Mohana, 2014).

Mehdipour ve arkadaşları 2015 yılında Aloe Vera yaprağı ekstraktının, 1 M H₂SO₄ çözeltisinde paslanmaz çeliğin çevre dostu bir inhibitör olarak korozyon önleme etkisini, elektrokimyasal teknikler ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelemişlerdir. Lineer polarizasyon ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi sonuçları, Aloe Vera ekstraktının etkinliğini, konsantrasyonun artmasıyla birlikte doğrulamıştır. Aloe Vera ekstraktının korozyon inhibisyonu, elektrokimyasal gürültü (EN) tekniğiyle de incelenmiştir. Ayrıca, Aloe Vera'nın yüksek performanslı sıvı kromatografi ve GC-MS kullanılarak yapılan karakterizasyonu üzerine bir literatür taraması yapılmıştır (Mehdipour vd., 2015).

Fadhil ve arkadaşlarının 2020 yılında yaptıkları bir çalışmada, *Portulaca grandiflora* yaprak (PGL) ekstraktının, 0,5 M HCl ortamında N80 karbon çeliği üzerindeki korozyon önleme etkisini, farklı sıcaklık ve inhibitör konsantrasyonlarında incelemişlerdir. PGL'nin inhibitör performansı, kütle kaybı ve elektrokimyasal teknikler (polarizasyon ölçümü, açık devre potansiyeli ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi) kullanılarak değerlendirilmiştir. Fourier dönüşüm infrared spektroskopisi, ultraviyole spektral analizleri ve yüzey morfolojisi sonuçları, korozyon

hızlarıyla elde edilen verileri güçlü bir şekilde desteklemiştir. Elde edilen sonuçlar, inhibitörün karbon çeliğinin asidik ortamda korozyonunu etkili bir şekilde önleyebildiğini, 60 °C ve 20 mL/L inhibitör derişiminde maksimum %95 inhibisyon etkinliği sağladığını göstermektedir. PGL'nin çelik yüzeyine adsorpsiyonunun Langmuir izoterm modeline uygun olduğu tespit edilmiştir. Adsorpsiyon ısısı değerleri, sıcaklık 30°C'den 60°C'ye yükseldiğinde -17,71 kJ/mol'den -22,03 kJ/mol'e artmış ve metal yüzeyindeki adsorpsiyonun karma tür olduğuna işaret etmiştir (Fadhil vd., 2020).

Özkır ve Ezer'in 2020 yılında yayımladıkları bir araştırma makalesinin en önemli yönü, Bryofit türlerinden olan *Hypnum cupressiforme* Hedw.'nin 1,0 M HCl çözeltisinde 298 K'de yumuşak çeliğın korozyon davranışı üzerindeki "yeşil inhibitör" etkisinin ilk kez incelenmesidir. Karayosunu ekstraktının inhibitör etkisi, elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) tekniğiyle araştırılmıştır. Nyquist diyagramları, ekstraktın farklı derişimlerinin çeşitli daldırma süresi parametreleriyle olan değişimini incelemek amacıyla oluşturulmuştur. Ayrıca, inhibitör mekanizması açısından metalin yüzey yükü EIS tekniğiyle belirlenmiş ve protonlanmış inhibitör moleküllerinin doğrudan metal yüzeyine adsorplandığı sonucuna varılmıştır. Çalışma elektrotlarının yüzey morfolojisi, alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FESEM) ve optik metal mikroskopi teknikleriyle incelenmiştir. Elektrokimyasal deneyler ve yüzey analiz çalışmaları birbirini destekler niteliktedir (Özkır ve Ezer, 2020).

Özkır'ın 2021 yılında yapmış olduğu bir makalesinde, bir Marchantiophyta türü olan *Plagiochila porelloides*'in (Torr. ex Nees) Lindenb., 298 K'de hidroklorik asit çözeltisindeki yumuşak çeliğe korozyon inhibisyon etkisini elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS), lineer polarizasyon (LPR) ve potansiyodinamik polarizasyon tekniklerini kullanarak ilk kez incelemiştir. Deneyler, her elektrokimyasal ölçüm öncesinde, farklı konsantrasyonlardaki *Plagiochila porelloides* ekstraktı içeren asidik çözeltilerde yumuşak çelik elektrotlarının 1 saat süreyle daldırılmasıyla gerçekleştirilmiş ve bu süre zarfında agresif çözelti ile dengeye ulaşılmıştır. Bu ciğerotu ekstraktı, 1 saatlik elektrokimyasal deneyler sonucunda güçlü bir inhibitör etki göstermiş ve ekstrakt konsantrasyonu arttıkça, yumuşak çeliğın asidik çözeltilerdeki koruyucu etkisi de artmıştır. Ayrıca, 1,0 M HCl çözeltilerindeki elektrotların yüzey görüntüleri, ciğerotu ekstraktı bulunan ve bulunmayan çözeltilerle 1 saatlik maruziyet sonrasında optik mikroskopla incelenmiş ve inhibitör ekstrakt çözeltisindeki metal

yüzeyinin, inhibitörsüz metal yüzeyine göre daha düzgün bir görünüme sahip olduğu ispatlanmıştır. Elektrokimyasal bulgular ile yüzey görüntüleri birbirini desteklemektedir (Özkır, 2021).

Özkır'ın 2022 yılında yayımlanmış olduğu çalışmasında, Bryaceae familyasına ait bir yosun türü olan *Ptychostomum schleicheri* ekstraktının, 1 M HCl çözeltisindeki yumuşak çeliğin korozyonuna karşı inhibitif etkisini, Tafel ekstrapolasyon, elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ve lineer polarizasyon (LPR) direnci yöntemleriyle ilk kez incelenmiştir. Elektrokimyasal deneyler, yumuşak çeliklerin HCl çözeltilerinde dört farklı konsantrasyonda yosun ekstraktı içeren çözeltilerde 1 saat süreyle daldırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Yosun ekstraktının en yüksek konsantrasyonu olan % 0,200 (w/v)'de, üç elektrokimyasal yöntemle de yaklaşık %90 inhibisyon etkinliği göstermiş ve ekstraktın koruyucu etkisinin, *Ptychostomum schleicheri* ekstraktı konsantrasyonunun artmasıyla birlikte arttığı gözlemlenmiştir. 1 saatlik daldırma süresinin sonunda, *P. schleicheri* ekstraktı bulunan ve bulunmayan 1 M HCl çözeltilerindeki yumuşak çelik yüzeylerinin morfolojileri, metal mikroskobu ile incelenmiştir. Son olarak, elektrokimyasal veriler ve yüzey morfolojisi sonuçlarına göre, ekstrakt moleküllerinin yumuşak çelik yüzeyine adsorplanarak neredeyse tam bir kaplama ve etkileşim sağladığı söylenebilir (Özkır, 2022).

Hjouji ve arkadaşlarının 2023 yılında yaptıkları bir çalışmada, *Datura stramonium* bitkisinin tohumunun farklı çözücülerle (hekzan, eter, kloroform ve metanol) elde edilen ekstraktlarının 1 M HCl çözeltisindeki yumuşak çeliğin korozyonuna etkisi araştırılmıştır. Ekstraktların korozyon hızı ve inhibisyon etkinliği, gravimetrik yöntem (kütle kaybı), potansiyodinamik polarizasyon ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi kullanılarak araştırılmıştır. Sonuçlar, *Datura stramonium* ekstraktlarından metanolik ekstraktı için $0,2 \text{ g/L}^{-1}$ konsantrasyonunda maksimum % 94,2 ile yüksek performans sergilediğini göstermiştir. *Datura stramonium* tohumlarının farklı ekstraktlarının varlığında elde edilen polarizasyon eğrileri, inhibitörlerin doğası gereği karma tipte olduğunu ve tercihen korozyondan sorumlu aktif bölgeleri bloke ettiğini göstermiştir. Elektrolitin UV-vis. spektroskopisi ile yapılan inhibitör analizi, 1 M HCl ortamında demir katyonu ile ekstraktlar arasında kompleks oluşumuna dair somut kanıtlar sağlamaktadır. Ayrıca, araştırmacılar tarafından korozyon inhibitörünün karbon çelik yüzeyindeki adsorpsiyonunu modellemek için dört farklı adsorpsiyon

izotermi kullanılmış ve analizler, adsorpsiyonun ağırlıklı olarak fiziksel adsorpsiyon olduğunu göstermiştir. Yumuşak çeliğin yüzeyinde koruyucu bir inhibitör tabakasının oluşumu, taramalı elektron mikroskobu (SEM/EDX) kullanılarak doğrulanmıştır (Hjouji vd., 2023).

El Houda ve arkadaşlarının 2024 yılında yayımladıkları makalelerinde, çevre dostu bir inhibitör olarak *Trifolium repens*'i kullanarak API5LX60 karbon çeliğinin % 3,5 NaCl ortamında korozyon direncini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. İnhibitör ekstraktı, FTIR spektroskopisi kullanılarak analiz edilmiştir. Korozyon davranışını araştırmak için gravimetrik ve elektrokimyasal yöntemler (potansiyodinamik polarizasyon ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS)) kullanılmıştır. Ayrıca, yüzey morfolojileri taramalı elektron (SEM) ve atomik kuvvet mikroskopları (AFM) ile analiz edilmiştir. Sonuç olarak, % 3,5 NaCl ortamında farklı derişimler test edildikten sonra, % 98 gibi bir yüksek inhibisyon seviyesi 20 ppm'de elde edilmiştir. Bu inhibitörün ağırlıklı olarak katodik etkiyle karma tip bir etki gösterdiğini doğrulamaktadır. İnhibisyon mekanizması, Langmuir modeline göre metal yüzeyler üzerinde korozyon önleme yeteneğini artıran fiziksel adsorpsiyonu içermektedir. Ekstrakt, metal yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturarak, korozyonu başarılı bir şekilde engellemektedir. Bu durumu, elektrokimyasal deneyler ve yüzey analizleri doğrulamaktadır. Sonuçlar, ekstraktın güçlü bir antikorozyf madde olarak etkili olduğunu göstermektedir (El Houda vd., 2024).

Kusuma ve arkadaşlarının 2024 yılında yaptıkları çalışmalarında, alüminyumun HCl ortamındaki korozyonunu önlemek amacıyla *Spinacia oleracea* (ıspanak yaprağı) ekstraktı kullanmışlardır. Ispanak yaprağı ekstraktı, çözücü olarak etanol kullanılarak maserasyon yöntemiyle elde edilmiş ve daha sonra ekstraktı saflaştırmak için damıtılmıştır. Korozyon inhibisyon özellikleri gravimetrik yöntemle incelenmiştir. Sonuçlar, *Spinacia oleracea* ekstraktının alüminyumun HCl ortamındaki korozyon hızını etkini bir şekilde azaltabildiğini ve maksimum % 96,7742'lik koruma sağladığını göstermiştir. Ispanak yaprağı ekstraktı, alüminyum yüzeyinde kimyasal adsorpsiyon yolu ile koruyucu bir tabaka oluşturarak adsorplanmış ve yüzey kaplama kesrini arttırarak kütle transferini engellediği sonucuna varılmıştır. İnhibitör konsantrasyonu arttıkça korozyon hızı azalırken, korozyon inhibisyon etkinliği artmaktadır. Bu çalışma,

Spinacia oleracea ekstraktının yüksek etkinliğe sahip, uygulanabilir bir organik korozyon inhibitörü olarak bir alternatif seçenek sunmaktadır (Kusuma vd., 2024).

Sajadi ve arkadaşlarının 2024 yılındaki çalışmalarında, *lemon verbena* ekstraktının oda sıcaklığında 0,5 M H₂SO₄ ve 1 M HCl ortamında yumuşak çelik (st37) için çevre dostu bir korozyon inhibitörü olarak etkisini, elektrokimyasal akım gürültü (ECN), elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS), potansiyodinamik polarizasyon ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) yöntemleri kullanılarak araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar, inhibitör konsantrasyonunun 0,5 M H₂SO₄ çözeltisinde 2000 ppm'e ve 1 M HCl çözeltisinde 2500 ppm'e kadar artırılmasıyla inhibisyon etkinliğinin arttığını, ancak sıcaklık artışıyla azaldığını göstermiştir. ECN sonuçları, *lemon verbena* ekstraktının, her iki asidik ortama da eklendiğinde gürültüden kaynaklı yüklerin (Q) azaldığını ortaya koymuştur. Q değerleri, sırasıyla H₂SO₄ ve HCl ortamlarında en düşük 15 mCoul ve 60 mCoul olarak ölçülmüştür. EIS ölçümleri, belirli bir konsantrasyona kadar inhibitör ilavesiyle, H₂SO₄ ortamında yük transfer direncinin 186 Ω cm²'ye ve HCl ortamında 350 Ω cm²'ye kadar arttığını, çift tabaka kapasitansının (*C_{dl}*) ise azaldığını göstermiştir. Potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri, bu ekstraktın karma tipte bir inhibitör olarak davrandığını ortaya koymuştur. Sıcaklığın inhibisyon ve korozyon süreçleri üzerindeki etkisine dayalı olarak bazı termodinamik parametreler belirlenmiştir. Ekstraktın alaşım yüzeyine adsorpsiyonu, Langmuir adsorpsiyon modeline uymuş ve hem H₂SO₄ hem de HCl çözeltilerinde ekstraktın baskın olarak kimyasal olarak adsorplandığı bir karma adsorpsiyon modeli ileri sürülmüştür. Termodinamik parametreler, H₂SO₄ ortamında artan entropi ile kendiliğinden ve ekzotermik olarak, HCl ortamında ise azalan entropi ile adsorplanmış olduğunu göstermektedir. SEM incelemesi ise ayrıca inhibitörün adsorpsiyon performansını doğrulamaktadır. Bu sonuçlar, *lemon verbena* ekstraktının yumuşak çelik (st37) için her iki ortamda da çevre dostu ve etkili bir korozyon inhibitörü olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Sajadi vd., 2024).

Belhadj ve arkadaşlarının 2025 yılında yayımladıkları makalelerinde, H₂SO₄ ve HCl çözeltilerinde yumuşak çeliğin korozyonuna çevre dostu bir korozyon inhibitörü olarak, Siyah Hardal Çekirdeği Ekstraktını (BMSE) kullanarak test etmişlerdir. Ekstraktın fitokimyasal içeriği GC-MS ve FTIR analizleriyle belirlenmiştir. Korozyon inhibisyon etkinliği, potansiyodinamik polarizasyon (PDP), elektrokimyasal impedans

spektroskopisi (EIS) ve kütle kaybı yöntemleriyle (ICP-AES ve UV-Vis ile birlikte) değerlendirilmiştir. Yüzey karakterizasyonu için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) kullanılmıştır. Yoğunluk fonksiyon teorisi (DFT) hesaplamaları, adsorpsiyon sürecini açıklamaya yönelik uygulanmıştır. BMSE'nin en yüksek inhibisyon etkinliği, 400 ppm konsantrasyon için HCl çözeltisinde % 92,5 ve H₂SO₄ çözeltisinde ise % 89,8 olarak elde edilmiştir. BMSE, Langmuir adsorpsiyon izotermine uygun adsorpsiyon davranışı sergileyerek, karma tip inhibitör olarak tanımlanmıştır. DFT simülasyonları, yumuşak çelik yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşumunu elektron verici-alıcı etkileşim mekanizması yardımıyla doğrulamıştır (Belhadj vd., 2025).

Djermoune ve arkadaşlarının 2025 yılında yaptıkları çalışmalarında, agresif 0,5 M HCl çözeltisinde bulunan X42 çeliğinin korozyonunu önlemek için *Aloysia triphylla* (Cezayir Limon mine çiçeği) bitkisinden alınan ekstraktın yeni ve etkili bir yeşil inhibitör olarak etkisini incelemiştirlerdir. Araştırma kapsamında yüzey analizi, kütle kaybı ölçümleri, elektrokimyasal teknikler ve kuantum kimyasal analizler (DFT) gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, *Aloysia triphylla* ekstraktının X42 çeliğinin 0,5 M sulu HCl çözeltisindeki çözünme hızını yüksek oranda inhibe ettiğini göstermektedir. İnhibisyon etkinliği, ekstraktın inhibitör konsantrasyonu ile pozitif bir ilişki göstererek, 3,4 g/L derişim için % 94 inhibisyon etkinliğine ulaşmıştır. Polarizasyon ölçümleri, inhibitörün karma tip davranış sergilediğini ve daha çok katodik süreç üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Elektrokimyasal impedans sonuçları, inhibitörün asidik çözeltiliye eklenmesinin yük transfer direncinde bir artışa ve çift tabaka kapasitansında bir azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Adsorpsiyon sürecinin X42 çelik yüzeyinde Langmuir izotermine uygun olduğu belirlenmiştir. Arrhenius grafiği, adsorpsiyon sürecinin kimyasal adsorpsiyon vasıtasıyla olduğunu doğrulamıştır. Yüzey incelemeleri, X42 çeliği üzerinde koruyucu bir tabaka varlığını ortaya koyarak, DFT analizine göre inhibitörün metal yüzeyi ile elektron verici-alıcı etkileşim mekanizması aracılığıyla etkileşime girdiğini doğrulamıştır (Djermoune vd., 2025).

Gapsari ve arkadaşlarının 2025 yılında yayımladıkları bir makalede, zorlu endüstriyel ortamları temsil eden derişik sülfürik asit içerisindeki yumuşak çelik için sürdürülebilir, yeşil bir korozyon inhibitörü olarak *Andrographis paniculata* yaprak ekstraktının (APLE) etkisi araştırılmıştır. Elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ve

potansiyodinamik polarizasyon (PDP) yöntemleri kullanılarak yapılan incelemelerde, APLE inhibitörünün 4000 ppm konsantrasyonunda % 95,14'lük yüksek bir inhibisyon etkinliği sağladığı ve ayrıca hem anodik hem de katodik korozyon tepkimelerini etkin bir şekilde azalttığı gözlemlenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi ise metal yüzeyinde oluşan koruyucu tabakayı ortaya koyarak, inhibitörün korozyon hızını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. APLE adsorpsiyonunun tek tabakalı adsorpsiyonu temsil eden Langmuir izotermine uyduğunu belirlemişlerdir. Kuantum kimyasal hesaplamalar ise inhibitörün elektron verme kapasitesini doğrulayarak, yüzey kararlılığını arttıran fiziksel adsorpsiyon mekanizmasını açıklamaktadır. Bu bulgular, *Andrographis paniculata* yaprak ekstraktının, geleneksel inhibitörlere çevre dostu bir alternatif olarak uygulanabilirliğini ortaya koymakta ve çeşitli asidik ortamlarda kullanım için umut vadeden bir seçenek olduğunu göstermektedir (Gapsari vd., 2025).

Zhang ve arkadaşlarının 2025 yılında gerçekleştirdikleri bir araştırmada, *Artemisia verlotiorum* ekstraktını, asidik çözeltideki yumuşak çelik için oldukça etkin yeşil bir korozyon inhibitörü olarak kullanmışlardır. Elektrokimyasal ölçümler, *Artemisia verlotiorum* ekstraktının 500 mg/L konsantrasyonda % 98,6'lık oldukça yüksek bir inhibisyon etkinliği sergilediğini doğrulamış ve bu değer, literatürde bildirilen bitki ekstraktı olan korozyon inhibitörlerinden daha yüksek bulunmuştur. Ekstraktın inhibisyon mekanizması teorik hesaplamalarla açıklanmış olup, GFN-xTB hesaplamaları, *Artemisia verlotiorum* ekstraktının içerdiği kumarinler ve flavonoidlerin oksijen atomları vasıtasıyla metal yüzeyine adsorplandığını göstermiştir. Bu çalışma, sadece bitki ekstraktlarının kaynak kullanımını genişletmekle kalmayıp, aynı zamanda çevre dostu kimya alanına yenilikçi ve etkili bir korozyon inhibitörü kazandırmıştır (Zhang vd., 2025).

BÖLÜM III

MATERYAL VE METOT

3.1 Materyal

3.1.1 Kullanılan cihazlar

Distile su cihazı: Elektrokimyasal deneylerde, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü Analitik Kimya (Şimşek marka) ve Elektrokimya (Termal Marka M 113500D model, 3 L/saat kapasiteli) araştırma laboratuvarlarında bulunan distile su cihazları kullanılmıştır.

Elektrokimyasal analizör: Elektrokimyasal ölçümler, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü Elektrokimya Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan, bilgisayar entegreli CHI 660B model analizör kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Mekanik parlaticılı zımpara cihazı: Elektrokimyasal ölçümlerde, metal yüzeyinin çözeltiliyle temas eden yüzeyini parlatmak amacıyla özel olarak imal edilmiş olan ve dönen bir çark mekanizmasıyla yüzey zımparalama-parlatma işlemlerini gerçekleştirmektedir.

Analitik terazi: Tez kapsamında stok sulu ekstraktı hazırlama aşamasında karayosununun tartılması işlemi Radwag Wagi Electroniczne marka AS 220/C/2 model analitik terazi (0,1 mg duyarlılığa sahip) ile gerçekleştirilmiştir.

Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM): Çalışma elektrotlarının yüzey fotoğraflarının ve yüzey analizlerinin elde edilmesinde, Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan bilgisayar entegreli Zeiss GeminiSEM 500 model alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM): Çalışma elektrotlarının ayrıntılı 2D ve 3D yüzey fotoğrafları, Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde

bulunan Veeco Multimode 8 Nanoscope 3D model AFM cihazı kullanılarak elde edilmiştir.

Zımpara kâğıdı: Çalışma elektrotlarının çözeltiyle temas edecek yüzeylerini parlatmak amacıyla 150 ve 600 numaralı zımpara kâğıtları kullanılmıştır.

Demir testeresi: Çalışma elektrotlarının yüzey analizlerini yaptırmak amacıyla metal yüzeyinden paralel kesit almak amacıyla kullanılmıştır.

3.1.2 Kullanılan kimyasal ve elektrotlar

HCl: Elektrokimyasal ölçümler için analitik saflıktaki hidroklorik asit (HCl), Merck (Darmstadt, Germany) firmasından temin edilerek kullanılmıştır. [Merck (1.00317.2500): 36,461 g/mol, % 37-38, 1,19 kg/L yaklaşık **12,07 M** $\{[(1,19 \text{ kg/L} \times 1000 \text{ g.kg}^{-1}) \times (37/100)] / 36,461 \text{ g.mol}^{-1}=12,07 \text{ M}\}$

Tez çalışmasında gerçekleştirilen tüm elektrokimyasal deneylerde, CHI 660B model elektrokimyasal analizör cihazı kullanılarak klasik üç elektrot tekniği uygulanmıştır.

- ✓ Çalışma Elektrodu: Korozyon deneylerinde, yüzey alanı $0,5024 \text{ cm}^2$ olan yumuşak çelik (demir) çalışma elektrotları olarak uygulanmıştır.
- ✓ Karşı Elektrot: Deneylerde, $1 \times 1 \text{ cm}$ boyutlarında yüzey alanı 2 cm^2 olan saf platin levha karşı elektrot olarak kullanılmıştır.
- ✓ Referans Elektrot: Korozyon ölçümlerinde Ag/AgCl (3,0 M KCl) referans elektrot olarak uygulanmıştır.

3.2 Metot

3.2.1 HCl (2,0 M) çözeltisinin hazırlanması

Yaklaşık 12 M'lık HCl, her biri 1 mL asit ve 5 mL distile su kullanılarak toplamda altı kez seyreltilmiş ve derişimi NaHCO_3 ile kontrol edilerek hazırlanmıştır.

3.2.2 HCl (1,0 M) elektrolit çözeltisinin hazırlanması

Deneyin gerçekleştirileceği zaman, ayarlı 2,0 M HCl çözeltisinden 500 mL, bir litrelik balon jøjeye konularak ardından distile su ile toplam hacim bir litreye seyreltilerek çözeltinin hazırlanması sağlanmıştır.

3.2.3 Bitki materyali

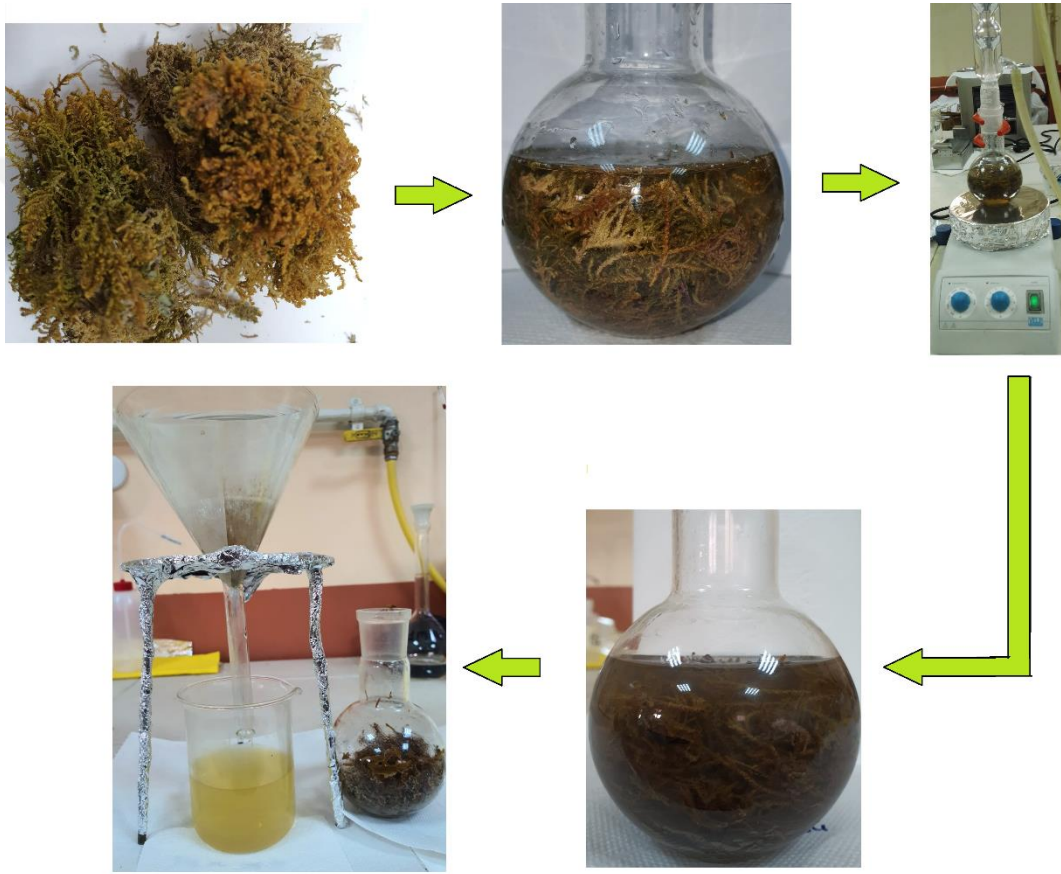
Tez çalışmasında inhibitör etkisi incelenen eski adı “*Cratoneuron commutatum*” olan “*Palustriella commutata*” sucul bir karayosunudur. Şekil 3.1’de *Palustriella commutata*’nın fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 3.1. İnhibitör etkisi incelenen *Palustriella commutata*’nın çekilmiş fotoğrafları

3.2.4 *Palustriella commutata* karayosunu ekstraktının hazırlanması

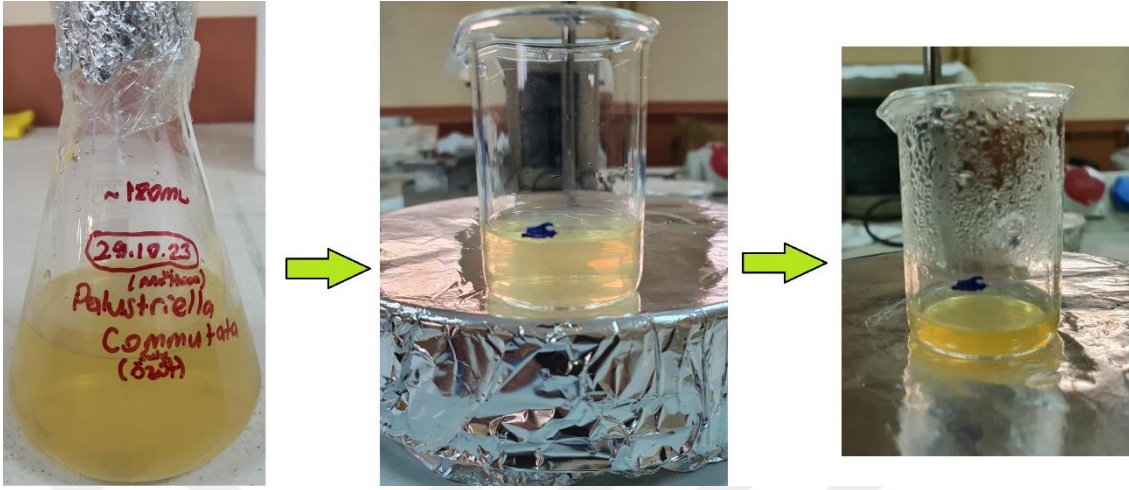
Palustriella commutata örnekleri öncelikle, toprak vb. kısımlarından mekanik olarak ayıklanarak uzaklaştırıldı. Temizlenmiş *Palustriella commutata* örnekleri, yaklaşık 24 saat süreyle 40 °C’de bir etüv içerisinde kurutuldu ve kurutma işlemi tamamlandıktan sonra daha küçük parçalar halinde kesilen örneklerden yaklaşık 5 g kadar tartılıp, üzerine aldığı kadar destile su ilavesiyle 26 saat geri soğutucu altında kaynatıldı (reflux işlemi) (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. *Palustriella commutata*'nın reflux prosesi

Reflux işlemi sonunda elde edilen ekstrakt çözeltisini, *Palustriella commutata* posasından ayırmak amacıyla süzme işlemi gerçekleştirildi (Şekil 3.2). Elde edilen açık sarı renkli (**R: 169, G: 148, B: 59**) sulu ekstrakt yaklaşık 180 mL elde edildi. Daha sonra süzülen stok yosun ekstrakt çözeltisinin derişimini % (w/v) cinsinden belirlemek amacıyla, sulu ekstrakttan 10 mL alınıp buharlaştırılarak 100 mL'deki miktarı yani gerçek derişimi % 0,160 (w/v) olarak belirlenmiştir (Şekil 3.3). Çalışılan diğer derişimler ise gerçek derişimi belirlenmiş olan stok çözeltiden seyrelme metodu ile

hazırlanmıştır. Korozyon ölçümlerinde gerekli olan elektrolit ortam ise 1,0 M HCl çözeltisi ile sağlanmıştır.



Şekil 3.3. *Palustriella commutata* stok çözeltisinin derişimini belirleme aşamaları

3.2.5 Korozyon deneyleri için yumuşak çeliklerin hazırlanması

Kimyasal bileşimi “% 0,21700 Cu, % 0,00198 Co, % 0,01100 P, % 0,08400 C, % 0,06030 Cr, % 0,07890 Ni, % 0,10200 Si, % 0,00222 Nb, % 0,01040 Mo, % 0,01100 V, % 0,01900 S, % 0,01620 Sn, % 0,40900 Mn ve geriye kalan miktarı Fe” olan çalışma elektrotları kullanılmıştır. Çalışma elektrotu olarak kullanılan silindirik demir çubuk (0,8 cm çap ve 5,0 cm boyunda), daha önceki çalışmalarda üst kısmından 0,5 cm derinliğinde matkapla delinerek ve iletkenliği sağlamak amacıyla bir ucuna bir bakır tel (2,5 mm çap ve 20 cm uzunluğunda) bağlanmıştır. Daha sonra, yalnızca ölçüm yapılacak olan ucu açıkta kalacak şekilde, elektrot yüzeyi bir spatül yardımıyla epoksi ile kaplanmıştır. Ardından, elektrotlar bir kalıba yerleştirilmiş ve üzerine hızlandırıcı ile sertleştirici karıştırılmış polyester reçinesi dökülerek elektrot hazırlama işlemi tamamlanmıştır. Bir ucu açık bırakılan yumuşak çelik yüzeyi, elektrolit çözeltilerine daldırılmadan hemen önce sırasıyla 150 ve 600 gritlik zımpara kâğıtları kullanılarak temizlenmiştir. Temizleme işleminin ardından, alümina çözeltisiyle yüzeyler parlatılmış ve elektrotlar, çözeltilere yerleştirilmeden önce distile su ve aseton ile yıkanarak temizlenmiştir. Bu şekilde hazırlanan elektrotların çözeltilerle temas eden yüzey alanı $0,5024 \text{ cm}^2$ olarak hesaplanmıştır $\{S=\pi r^2 = 3,14 \times (0,4^2) = 0,5024 \text{ cm}^2\}$.

3.2.6 Elektrokimyasal ölçümlerle inhibisyon etkinliği

Yumuşak çeliğin elektrokimyasal özellikleri, üç elektrotlu bir sistem kullanılarak 298 K sıcaklıkta incelenmiştir. Deneyle, 1,0 M HCl çözeltisinde karayosunu ekstraktı eklenmeden ve inhibitör olarak sırasıyla % 0,010 (w/v), % 0,020 (w/v), % 0,040 (w/v), % 0,060 (w/v) ve % 0,080 (w/v) *Palustriella commutata* ilavesiyle gerçekleştirilmiştir. İlk olarak uygulanan yöntem elektrokimyasal impedans spektroskopisidir. EIS ölçümlerinde bir saatlik daldırma süresinin ardından, açık devre potansiyeli ölçülmüş ve 5 mV genlik ve 10^5 Hz ile 5×10^{-3} Hz aralığında frekans taraması yapılarak sistemin Nyquist eğrileri oluşturulmuştur. Elde edilen EIS verilerini düzgün açıklayabilmek için öncelikle Zwiev2 yazılımıyla eğriler fitlenmiş (uyarlanmış) ve çözümlere uygun iki farklı eşdeğer devre modeli öngörülmüştür. Öngörülen elektriksel eşdeğer devre modelleri, Bölüm 4'te Şekil 4.1'de sunulmuş olup; bu modellerden elde edilen EIS parametreleri ise aynı bölümde Çizelge 4.1'de detaylandırılmıştır. Ayrıca EIS yöntemiyle bir de yeşil inhibitörün zaman parametresiyle değişimini incelemek amacıyla aynı çalışma 24, 48, 72, 96 ve 120 saatlik daldırma süreleri sonrasında da gerçekleştirilmiş ve bulgular Bölüm 4'te Şekil 4.4 ve Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Tez çalışmasında uygulanan ikinci elektrokimyasal ölçüm tekniği ise lineer polarizasyon direncidir (LPR). Bir saatlik denge süreci olan daldırma süresinin ardından, karayosunu ekstraktı içermeyen ve *Palustriella commutata* ekstraktı ilave edilmiş her beş derişim için yumuşak çeliğin Ag/AgCl referans elektrota karşı açık devre potansiyeli ölçülmüştür. Bu ölçümün ardından, 0,1 mV/s tarama hızı kullanılarak ± 10 mV'luk potansiyel aralığında akım-potansiyel (I-E) grafikleri elde edilmiştir. Korozyon potansiyeli civarında, akım-potansiyel eğrisi lineer bir şekilde değiştiğinden tüm eğrilerin eğimlerinin tersi bu yöntemle elde edilen polarizasyon direncini (R_p) verecektir. Örnek olarak 1,0 M HCl elektrolitinin polarizasyon direncinin hesaplanması gösterilmiştir ($1 / 0,007047 = 141,90 \Omega$ bu değer yumuşak çeliğin yüzey alanı ile çarpılarak; $R_p = 141,90 \Omega \times 0,5024 \text{ cm}^2 = 71,29 \Omega \cdot \text{cm}^2 \cong 71 \Omega \cdot \text{cm}^2$). LPR yöntemiyle hesaplanan parametreler Bölüm 4'te Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

Tez çalışmasında uygulanan üçüncü ve son elektrokimyasal teknik, Tafel ekstrapolasyonu potansiyodinamik polarizasyon ölçümleridir. Yine 298 K sıcaklıkta 1,0 M HCl ve bu ortama beş farklı derişimde *Palustriella commutata* ilave edilmiş

çözeltilerde yarı logaritmik olan akım-potansiyel eğrileri çizilerek yumuşak çeliğin elektrokimyasal davranışı araştırılmıştır. Yine çalışma elektrotunun Ag/AgCl'ye karşı açık devre potansiyeli ölçüldükten sonra, 1 mV/s tarama hızında önce katodik yöne -350 mV, daha sonra anodik yöne +350 mV tarama yapılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Cihazdan alınan $\log i$ (korozyon akım) değerleri yumuşak çeliğin yüzey alanı 0,5024 cm²'ye bölünerek yarı logaritmik [$\log i$ ($\mu A.cm^{-2}$)] akım yoğunluğu değerleri hesaplanmıştır. Bu eğriler Bölüm 4'te (Şekil 4.3) ve hesaplanan parametreler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

3.2.7 Yumuşak çeliğin sıfır yük potansiyelinin belirlenmesi

Yumuşak çeliğin yüzey yükü metal/çözelti ara yüzeyinde oluşan elektriksel alandan kaynaklanmaktadır. Bu sebeple yumuşak çeliğin yüzey yükü, sıfır yük potansiyelinin (E_{syp}) korozyon potansiyeliyle (E_{kor}) karşılaştırılması sonucu belirlenmektedir. Yapılan bu ölçüm sonucunda yumuşak çeliğin yüzey yükü negatif değer alırsa, elektrot yüzeyi negatif yüklü, yani metal yüzeyine kationların adsorpsiyonu, pozitif değer alırsa, elektrot yüzeyi pozitif yüklü, yani metal yüzeyine anyonların adsorpsiyonu söz konusu olacaktır. En yüksek derişimde (% 0,080(w/v)) *Palustriella commutata* ekstraktı içeren 1,0 M HCl çözeltisine EIS yöntemiyle farklı potansiyeller uygulayarak, yumuşak çeliğin yüzey yükü belirlenmiş olup, bulgular Bölüm 4'te (Şekil 4.5) yorumlanmıştır.

3.2.8 Yumuşak çeliklerin yüzey morfolojilerinin incelenmesi

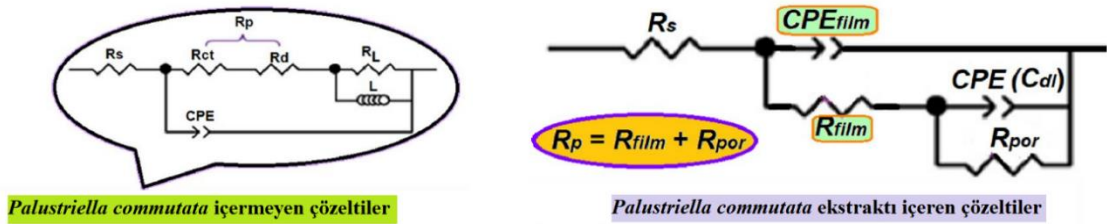
En yüksek derişimde *Palustriella commutata* ekstraktı içeren ve içermeyen 1,0 M HCl çözeltilerindeki yumuşak çelik elektrotların yüzey morfolojilerini belirlemek amacıyla, yüzeyden 5 mm uzaklıktan kesilerek en uzun daldırma süresi sonundaki (120 saat) yüzey görüntüleri alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FESEM/Zeiss GeminiSEM 500) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM/Veeco Multimode 8 Nanoscope 3D) ile incelenerek, yeşil inhibitörün korozyon sürecine katkısı morfolojik açıdan da değerlendirilmiştir. Elde edilen yüzey mikrografları Bölüm 4'te Şekil 4.6-4.9'de sunulmuştur.

BÖLÜM IV

BULGULAR VE TARTIŞMA

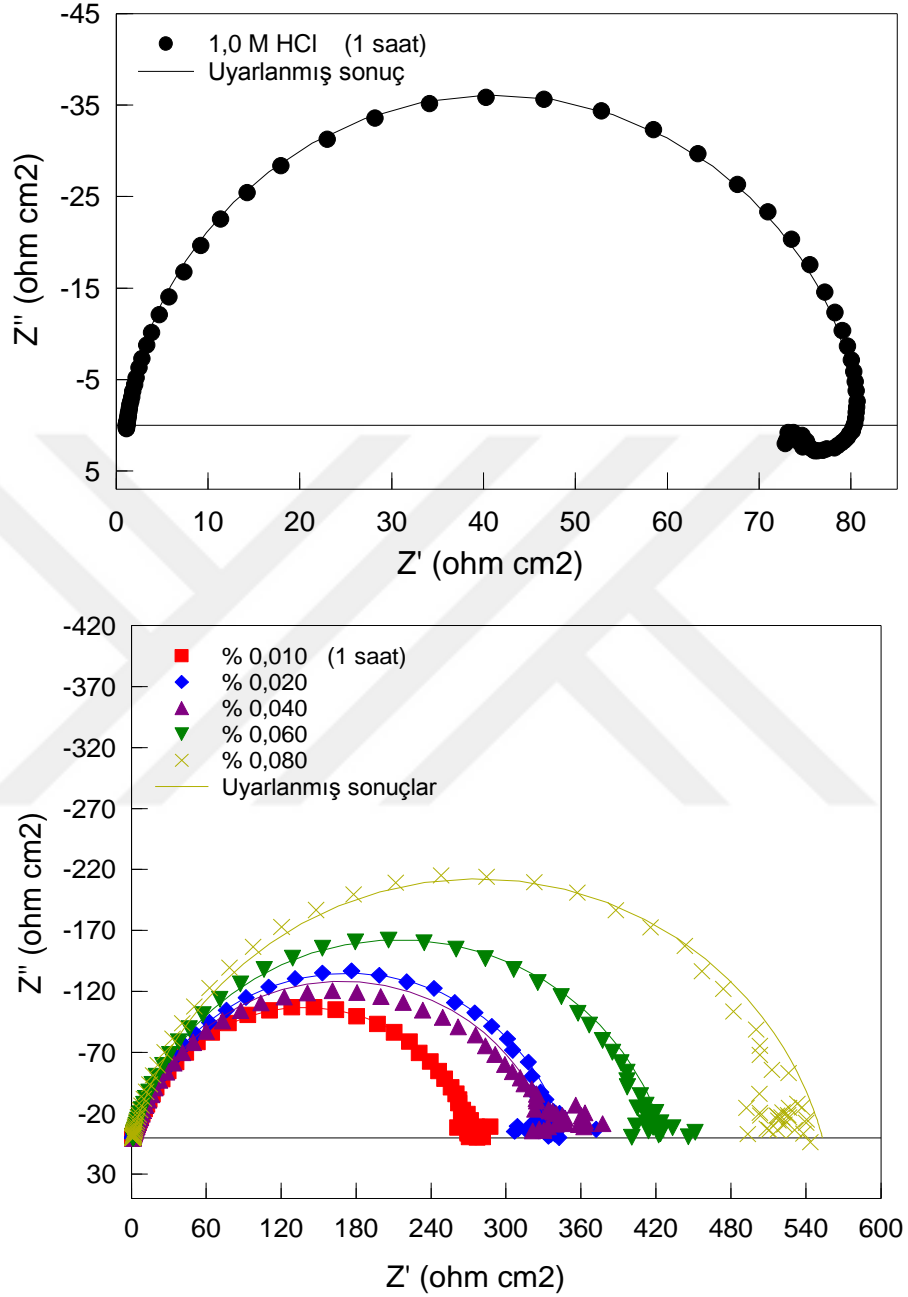
4.1 Farklı Elektrokimyasal Yöntemlerle Bir Saat Daldırma Süresi Sonunda Korozyon İnhibisyonunun Değerlendirilmesi

Korozyon hızının değerlendirilmesinde kullanılan yöntemin, metal yüzeyinin doğal yapısını mümkün olduğunca az etkilemesi büyük önem taşımaktadır (Erbil, 2012). Bu doğrultuda, metalin doğal özellikleri üzerinde minimum etki oluşturduğu kabul edilen elektrokimyasal bir yöntem olan alternatif akım (AC) impedansı, en çok tercih edilen öncü yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Tez çalışmasının bu aşamasında, *Palustriella commutata* ekstraktının yumuşak çelik yüzeyi üzerindeki yeşil inhibitör etkisi, beş farklı derişimde 298 K’de bir saatlik daldırma süresi boyunca EIS, LPR ve potansiyodinamik polarizasyon yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Yumuşak çeliğin elektrokimyasal olarak davranışını belirlemek amacıyla; inhibitörsüz ve karayosunu içeren 1,0 M HCl çözeltilerinde bir saat daldırma süresi sonunda ölçüm alınarak impedans diyagramları (Nyquist eğrileri) oluşturulmuştur. CHI marka 660B model elektrokimyasal analizör cihazından elde edilen deneysel veriler, “txt” uzantılı dosyalar şeklinde kaydedilmiş ve bu veriler kullanılarak Zview2 yazılımı ile sistemin eşdeğer devresi modellenmiştir. Söz konusu eşdeğer devre modeli, Şekil 4.1’de sunulmuştur. Şekil 4.1’de, *Palustriella commutata* içeren çözeltiler için önerilen eşdeğer devre modelinin, yalnızca asitli elektrolit çözelti için önerilen modelden farklılık gösterdiği görülmektedir. Agresif çözeltideki eşdeğer devre modelinde; R_s , R_p , R_L , L ve CPE devre elemanları bulunurken, karayosunu ekstraktı içeren çözeltilerde; R_s , R_{por} ($R_p = R_f + R_{por}$, ($R_{por} = R_{ct} + R_d + R_a$)), R_f , CPE_{film} (film kapasitansı) ve CPE_{dl} (C_{dl} : Çift tabaka kapasitansı) gibi devre elemanları bulunmaktadır.



Şekil 4.1. *P. commutata* ekstraktı içeren ve içermeyen 1,0 M HCl çözeltileri için öngörülen eşdeğer devre modelleri

Şekil 4.2’de inhibitörsüz 1,0 M HCl ve *P. commutata* ekstraktını içeren çözeltilerde bir saat daldırma süresi sonrasında elde edilen impedans (Nyquist) diyagramları yarım elips şeklinde olmuştur.



Şekil 4.2. Farklı derişimlerde *Palustriella commutata* ekstraktını içeren ve içermeyen 1,0 M HCl çözeltilerinde 1 saat daldırma süresi sonunda elde edilen impedans eğrileri

Şekil 4.2’den açıkça görüldüğü üzere tüm karayosunu ekstraktı içeren çözeltilerde yüksek frekans bölgesinde oluşan yarım daire lupları (yarıçapları), inhibitörsüz (1,0 M HCl) ortamdakinden daha büyük olarak, yeşil inhibitörün derişimi arttıkça luplar (yarıçaplar) da artmıştır. Bir saatlik daldırma sonrası elde edilen impedans eğrilerinden çözelti direnci (R_s), polarizasyon direnci (R_p), indüktif direnç (R_L), indüktans (L), sabit

faz elementi (CPE: Constant Phase Element) ve yüzde inhibisyon etkinliği değerleri (% η) Çizelge 4.1’de EIS kısmında verilmiştir.

Çizelge 4.1. 1,0 M HCl ve *P. commutata* ekstraktı içeren çözeltilerde 1 saat daldırma süresi sonunda EIS, *LPR ve **potansiyodinamik polarizasyon ölçümlerinden elde edilen korozyon parametreleri

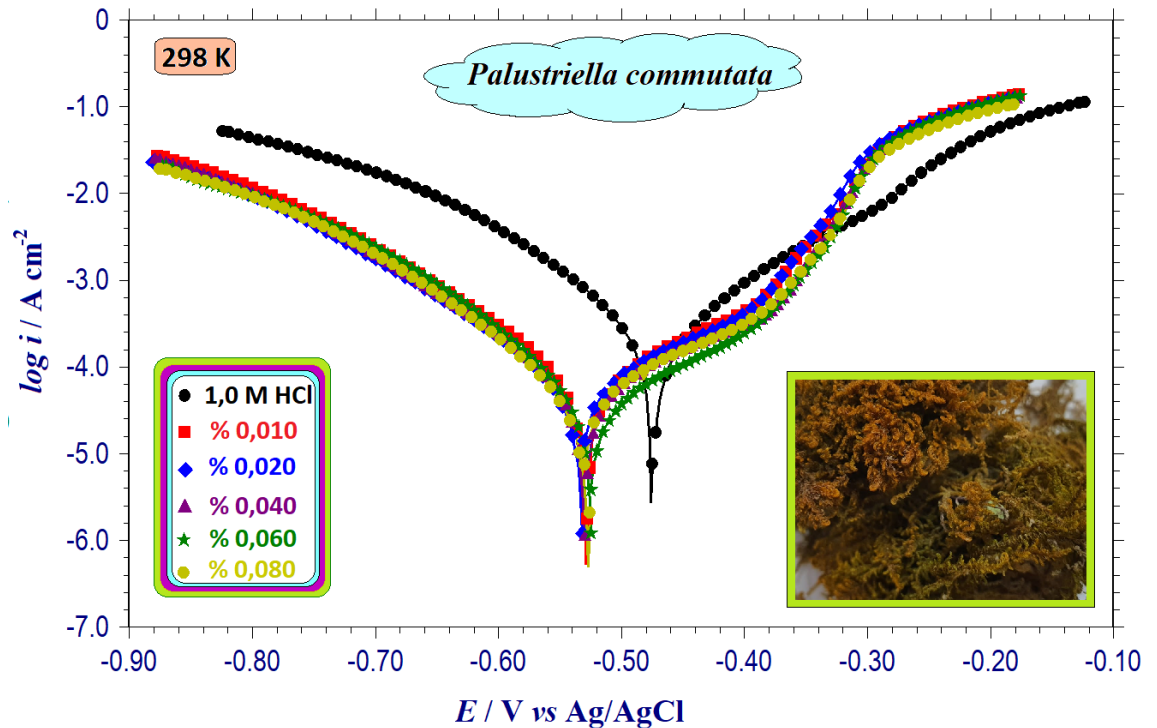
<i>P. commutata</i>	EIS							
	E_{ocp} (V/Ag/AgCl)	R_s (Ωcm^2)	CPE ($\mu F cm^{-2}$)		R_L (Ωcm^2)	L (H)	R_p (Ωcm^2)	η (%)
0	-0,474	1,2	110	0,94	8	4	72	-
% 0,010	-0,525	1,0	95	0,84	-	-	276	73,91
% 0,020	-0,529	1,2	90	0,85	-	-	346	79,19
% 0,040	-0,520	1,3	88	0,81	-	-	356	79,78
% 0,060	-0,525	1,4	75	0,83	-	-	425	83,06
% 0,080	-0,526	1,2	63	0,84	-	-	552	86,96
<i>P. commutata</i>	*LPR							
	E_{kor} (V/Ag/AgCl)	R_p (Ωcm^2)		η (%)				
0	-0,475	71		-				
% 0,010	-0,525	283		74,91				
% 0,020	-0,530	347		79,54				
% 0,040	-0,523	366		80,60				
% 0,060	-0,531	435		83,68				
% 0,080	-0,525	582		87,80				
<i>P. commutata</i>	**Potansiyodinamik polarizasyon (TAFEL Ekstp. Met.)							
	E_{kor} (V/Ag/AgCl)	$-\beta_c$ ($mV dec^{-1}$)	i_{kor} ($\mu A cm^{-2}$)		η (%)			
0	-0,475	108	265		-			
% 0,010	-0,528	108	65		75,47			
% 0,020	-0,532	109	53		80,00			
% 0,040	-0,530	106	50		81,13			
% 0,060	-0,525	95	43		83,77			
% 0,080	-0,526	96	36		86,42			

Çizelge 4.1’e göre EIS ölçümü sonucu HCl çözeltisinde R_s değeri $1,2 \Omega cm^2$ iken, *P. commutata* ekstraktı içeren çözeltilerde çok fazla bir değişiklik gözlenmemiş ve yaklaşık $1 \Omega cm^2$ civarında olmuştur. Zview2 yazılımı ile elde edilen CPE ve sabit faz katsayısı (n) değerleri, aynı çizelgede sunulmuştur. 1,0 M HCl çözeltisinde “ n ” değeri 0,94 olarak belirlenmişken, *P. commutata* ekstraktı içeren çözeltilerde bu değer daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. İnhibitörsüz HCl çözeltisinde R_p değeri $72 \Omega cm^2$ olarak ölçülmüş, ancak ortama yeşil inhibitör eklenmesiyle R_p değerlerinde artış meydana gelmiştir. EIS yöntemiyle belirlenen R_p değerlerinin, bir saatlik daldırma süresi sonunda $276-552 \Omega cm^2$ aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Bu R_p değerlerinden hesaplanan inhibisyon etkinliği (% η), karayosunu ekstraktının ilavesiyle artış göstermiştir. Bu yöntemle % η değerleri, % 73,91 ile % 86,96 aralığında değişmiş olup, oldukça yüksek

bir koruma sağlandığı açıkça gözükmemektedir. İnhibitörsüz agresif HCl çözeltisindeki CPE değeri $110 \mu F cm^{-2}$ hesaplanmışken, ortama eklenen *P. commutata* ekstraktı ile azaldığı gözlemlenmiştir. Yosun ekstraktını içeren ortamlarda CPE değerleri $63-95 \mu F cm^{-2}$ aralığında değişmiştir. Açık devre potansiyeli değeri (E_{ocp}), HCl elektrolitinde $-0,474 V$ iken *P. commutata* ekstraktı içeren çözeltilerde daha katodik (negatif) potansiyellere kaydığı gözükmemektedir (Çizelge 4.1).

*Lineer polarizasyon direnci ölçümü sonucunda hesaplanan R_p ve % η değerleri aynı Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Agresif 1,0 M HCl elektrolitinde R_p değeri $71 \Omega cm^2$ iken çözeltilere *P. commutata* ekstraktı eklenmesiyle arttığı gözlemlenmiştir. *LPR yöntemi ile hesaplanan R_p değerleri ise $283-582 \Omega cm^2$ aralığındadır. R_p verilerinden elde edilen % η değerleri çözeltilere *P. commutata* ekstraktı eklendikçe artmış ve % $74,91-87,80$ aralığında olmuştur.

Üçüncü ve son elektrokimyasal yöntem olan Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile **potansiyodinamik polarizasyon eğrileridir.



Şekil 4.3. Farklı derişimlerde *P. commutata* ekstraktını içeren ve içermeyen 1,0 M HCl çözeltilerinde elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrileri

Bunun için inhibitörsüz ve beş farklı derişimde yeşil inhibitör içeren 1,0 M HCl çözeltilerine 1 saat süreyle daldırılan yumuşak çeliklerin yarı logaritmik akım-

potansiyel eğrileri oluşturulmuştur. Elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Şekil 4.3'te, bu eğrilerden elde edilen ^{**}potansiyodinamik polarizasyon parametreleri de ^{**}Çizelge 4.1'de sunulmuştur. Şekil 4.3'teki yarı logaritmik akım-potansiyel eğrileri ve ^{**}Çizelge 4.1'den görüleceği üzere yumuşak çeliğin 298 K'de inhibitörsüz ortamda E_{kor} değeri -0,475 V iken ortama *P. commutata* ekstraktı eklendiğinde daha katodik (negatif) potansiyellere kaymıştır. İnhibitörsüz ve sulu yosun ekstraktı içeren çözeltilerde bu yöntemle elde edilen maksimum potansiyel değişiminin 57 mV olduğu gözükmemektedir. Tüm deney çözeltilerinde, karayosunu ekstraktının derişimi arttıkça korozyon akım yoğunluğu (i_{kor}) değerleri aşamalı bir şekilde azalış göstermiş ve buna bağlı olarak inhibisyon etkinliği değerleri (% ^{**} η) de yükselmiştir. İnhibisyon etkinliği değerleri % 75,47–86,42 aralığında olmuştur. Agresif HCl çözeltisinde katodik Tafel sabiti ($-\beta_c$) 108 $mV dec^{-1}$ iken *P. commutata* içeren çözeltilerde ise 95 $mV dec^{-1}$ –109 $mV dec^{-1}$ aralığında değişim göstermektedir. Yeşil inhibitör içeren ve içermeyen elektrolit çözeltilerde hesaplanan $-\beta_c$ değerlerinde fazla değişim gözlenmemesi, hidrojen oluşum mekanizmasının *P. commutata* ekstraktından etkilenmediğini göstermektedir. Aynı zamanda Şekil 4.3'teki katodik eğrilere bakıldığında, yosun ekstraktının ilavesi, HCl çözeltisindeki kıyasla önemli ölçüde akım yoğunluğunu düşürmüştür. Bu nedenle, yeşil inhibitör olarak etkisi değerlendirilen yosun ekstraktı, *P. commutata*'nın, HCl elektrolitinde katodik inhibitör görevi gördüğü çok açık bir şekilde görülmektedir (Musa vd., 2010). Aynı zamanda katodik Tafel eğrilerinin paralel olduğu görülmektedir. Bu durum, açık bir şekilde hidrojen indirgenme mekanizmasının inhibitörden etkilenmediğini göstermektedir (Şekil 4.3). Uygulanan her üç elektrokimyasal yöntemle yüzde inhibisyon etkinliği (% η) değerleri hesaplanmış olup, bu değerlerin bir kısmı Çizelge 4.1'de bir diğer kısmı da Çizelge 4.2'de sunulmuştur. Yeşil inhibitör etkisi incelenen *P. commutata* ekstraktının yumuşak çelik yüzeyini koruma etkisi bu değerlere göre yorumlanmıştır. *P. commutata* ekstraktının her üç elektrokimyasal yöntemle hesaplanan inhibitör etkinliği değerlerinin birbiriyle son derece uyumlu olduğu net bir şekilde gözükmemektedir (Çizelge 4.1). Her üç yöntemle hesaplanan % η değerleri aşağıdaki eşitliklerle belirlenmiştir.

EIS ve ^{*}LPR için:

$$\eta(\%) = \left(\frac{R'_p - R_p}{R'_p} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

Burada “% η ” inhibisyon etkinliği değeridir, R'_p ve R_p ise sırasıyla yosun ekstraktı içeren ve içermeyen çözeltilerin polarizasyon direnci değerleridir (Özkır, 2019b).

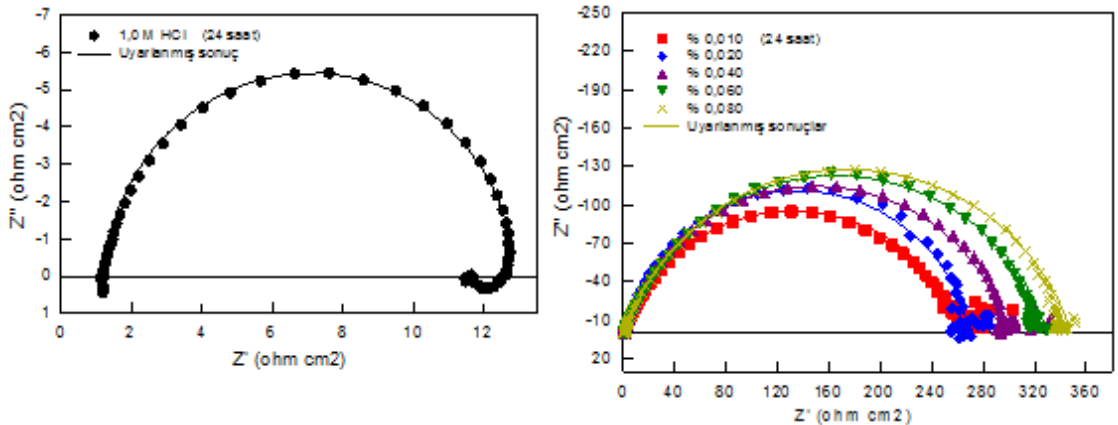
**Potansiyodinamik polarizasyon için:

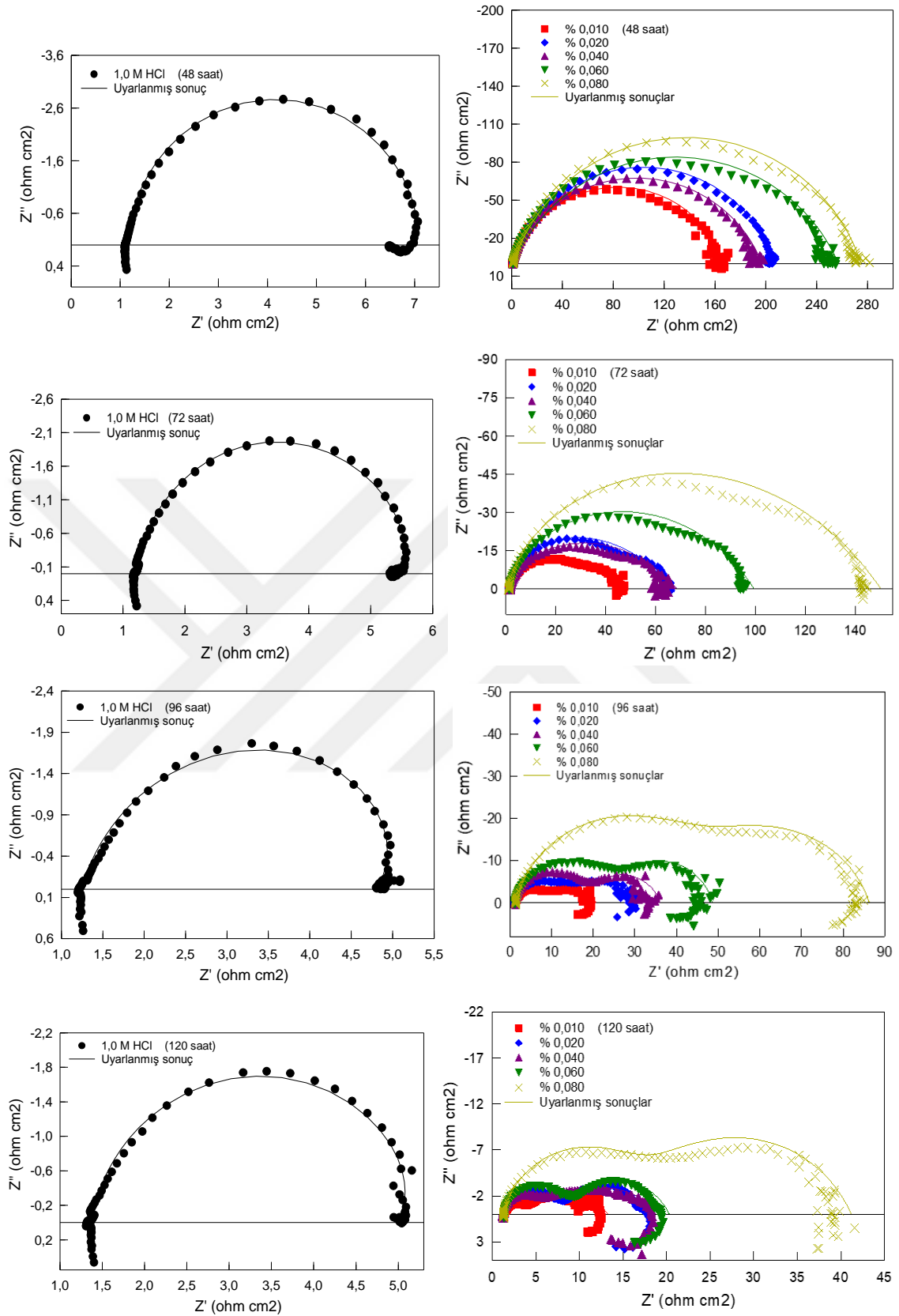
$$\eta(\%) = \left(\frac{i_{corr} - i'_{corr}}{i_{corr}} \right) \times 100 \quad (4.2)$$

Burada % η Tafel ekstrapolasyonuyla belirlenen inhibisyon etkinliği değeridir. Ayrıca, i_{corr} ve i'_{corr} değerleri ise sırasıyla inhibitör içermeyen ve yosun ekstraktı içeren çözeltilerin akım yoğunluğu değerleridir (El Tamany vd., 2018).

4.2 Farklı Daldırma Süreleri Sonunda EIS Verilerinin Korozyon İnhibisyonunun Değerlendirilmesi

Tez çalışmasının bu aşamasında da alternatif akım impedansı yöntemiyle bir saat daldırma süresinin dışında, yeşil inhibitörümüzün daha uzun daldırma sürelerinde yumuşak çeliğin korozyonuna etkisini incelemeyi amaçladık. EIS yöntemi bilindiği üzere, özellikle alternatif akımla çalışması ve zamana dayalı parametrelerin değerlendirilmesinde metal yüzeyini bozmaması sebebiyle sıklıkla tercih edilen yöntemlerin başında gelmektedir (Erbil, 2012). Bölüm 4.1'in EIS yöntemi kısmında gerçekleştirilen çalışma, bu kısımda daldırma sürelerinin 24, 48, 72, 96 ve 120 saat olduğu çözeltilerle de yapılarak, eğriler şekil 4.4'te gösterilmiştir. Yosun ekstraktı içeren ve içermeyen beş farklı daldırma süresinde elde edilen EIS (Nyquist) diyagramları yarım elips şeklinindedir (şekil 4.4). Yine burada da EIS verilerini doğru açıklamak ve “(fitlemek: Deneysel verileri uyarlamak)” için CHI marka 660B model elektrokimyasal analizör cihazından elde edilen deneysel verileri “txt uzantılı” dosyalar halinde kaydederek, bu verilerden Zview2 yazılımı yardımıyla impedans parametreleri elde edilmiş ve sonuçlar ve izelge 4.2'de sunulmuştur.





Şekil 4.4. Farklı derişimlerde *P. commutata* ekstraktını içeren ve içermeyen HCl çözeltilerinde 24-120 saat daldırma süreleri sonunda elde edilen EIS eğrileri

Çizelge 4.2. Farklı daldırma sürelerinde *P. commutata* ekstraktını içeren ve içermeyen HCl çözeltilerindeki yumuşak çeliğin impedans parametreleri

C (% w/v) Zaman	E_{ocp} (V/Ag/AgCl)	R_s (Ωcm^2)	R_p (Ωcm^2)	CPE		R_L (Ωcm^2)	L (H)	η (%)
				($\mu F/cm^2$)	n			
24 saat								
0	-0,458	1,2	11	2600	0,95	1,3	1,1	-
% 0,010	-0,520	1,1	262	1280	0,89	-	-	95,80
% 0,020	-0,523	1,2	268	924	0,84	-	-	95,90
% 0,040	-0,531	1,3	298	619	0,80	-	-	96,31
% 0,060	-0,517	1,2	330	418	0,82	-	-	96,67
% 0,080	-0,528	1,1	350	176	0,81	-	-	96,86
48 saat								
0	-0,458	1,1	5	10123	0,94	0,7	1	-
% 0,010	-0,559	1,0	166	3005	0,80	-	-	96,99
% 0,020	-0,551	1,0	206	1246	0,81	-	-	97,57
% 0,040	-0,571	1,0	197	896	0,77	-	-	97,46
% 0,060	-0,571	1,0	256	607	0,80	-	-	98,05
% 0,080	-0,568	1,0	274	305	0,74	-	-	98,18
72 saat								
0	-0,457	1,2	4	19642	0,90	0,4	0,4	-
% 0,010	-0,582	1,4	48	9259	0,52	-	-	91,67
% 0,020	-0,599	1,3	66	4322	0,54	-	-	93,94
% 0,040	-0,600	1,5	67	1913	0,55	-	-	94,03
% 0,060	-0,604	1,4	98	905	0,63	-	-	95,92
% 0,080	-0,589	1,2	149	651	0,61	-	-	97,32
96 saat								
0	-0,456	1,3	4	38697	0,83	0,9	0,3	-
% 0,010	-0,598	1,2	20	16025	0,59	-	-	80,00
% 0,020	-0,609	1,3	32	7977	0,42	-	-	87,50
% 0,040	-0,584	1,1	35	4008	0,80	-	-	88,57
% 0,060	-0,613	1,1	48	2078	0,85	-	-	91,67
% 0,080	-0,603	1,3	85	1256	0,80	-	-	95,29
120 saat								
0	-0,460	1,4	4	36520	0,89	0,4	0,3	-
% 0,010	-0,561	1,3	12	20613	0,51	-	-	66,67
% 0,020	-0,599	1,3	17	13123	0,70	-	-	76,47
% 0,040	-0,575	1,1	19	7285	0,48	-	-	78,95
% 0,060	-0,599	1,3	20	4126	0,71	-	-	80,00
% 0,080	-0,600	1,2	40	2138	0,73	-	-	90,00

Farklı daldırma sürelerine sahip diyagramlardan açık bir şekilde görüldüğü üzere *P. commutata* ekstraktını içeren çözeltilerde elde edilen impedans eğrilerinin yarıçapları, 1,0 M HCl çözeltisinininkinden daha büyük olmuş ve *P. commutata* ekstrakt derişimi arttıkça yarıçapların da arttığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, her daldırma süresinde karayosun ekstraktı içeren çözeltilerde kapasitif lupun çapı, derişimin artmasıyla önemli ölçüde artmaktadır. Her derişimde ise daldırma süresi arttıkça kapasitif lupların çapında azalmalar gözlenmektedir. Şekil 4.4'ten ve Çizelge 4.2'den net bir şekilde görüldüğü üzere yosun ekstraktı içeren çözeltilerde daldırma süresi uzadıkça buna bağlı olarak R_p değerleri de azalmıştır. Örneğin, en yüksek derişim olan % 0,080 (w/v) *P. commutata* ekstraktı içeren çözeltilerde 24, 48, 72, 96 ve 120 saatlik daldırma sonrasında R_p

değerleri sırasıyla 350, 274, 149, 85 ve 40 Ωcm^2 , % η değerleri ise sırasıyla % 96,86; % 98,18; % 97,32; % 95,29 ve % 90,00 olmuştur.

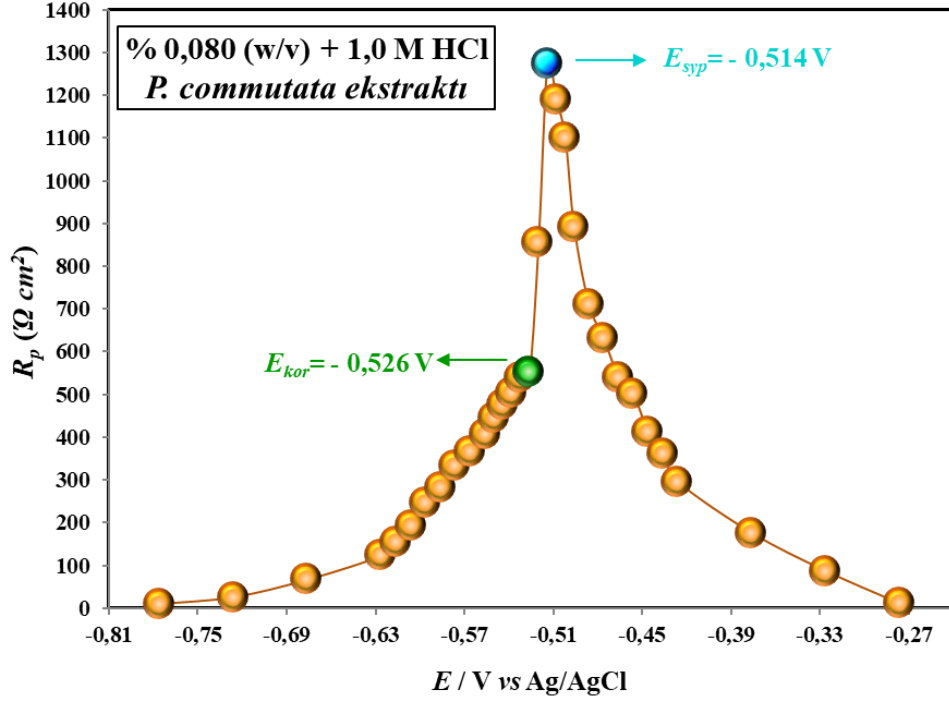
İnhibitörsüz agresif HCl çözeltisinde yumuşak çeliğin R_p değeri 24 saatlik daldırma süresi sonunda 11 Ωcm^2 iken, 120 saat daldırma sonrası bu değer 4 Ωcm^2 'ye düşmüştür. R_p değerleri 24 saat sonunda % 0,010 (w/v), % 0,020 (w/v), % 0,040 (w/v), % 0,060 (w/v) ve % 0,080 (w/v) *P. commutata* içeren çözeltilerde sırasıyla 262 Ωcm^2 , 268 Ωcm^2 , 298 Ωcm^2 , 330 Ωcm^2 ve 350 Ωcm^2 olmuştur. Diğer daldırma süreleri için R_p 'nin dağılım aralığı: 48 saat için 166–274 Ωcm^2 , 72 saat için 48–149 Ωcm^2 , 96 saat için 20–85 Ωcm^2 ve 120 saat için 12–40 Ωcm^2 olmuştur. Bunun sonucunda, yosun ekstraktının derişiminin artmasıyla yumuşak çelik yüzeyinde oluşan koruyucu inhibitör film tabakasının büyüdüğünü ve yumuşak çeliğin yüzeyinin çok iyi örtüldüğünü söyleyebiliriz. Aynı derişim sıralaması için 24 saatlik daldırma süresi sonunda % η 'nin dağılım aralığı: % 95,80–96,86 olmuştur. Daldırma süresi uzadıkça, her derişimde R_p değerlerinin azalmasına rağmen korumanın hala devam ettiği görülmektedir. Bu bulgular sonucunda, yeni yeşil inhibitörler sınıfına aday olan *P. commutata* ekstraktı, HCl çözeltisinde uzun süre daldırılmış olan yumuşak çelik için iyi bir “yeşil korozyon inhibitörü” görevi gördüğü sonucu çıkarılabilir. Şekil 4.4'e bakıldığında *P. commutata* ekstraktı içeren çözeltilerde özellikle 96 saatlik daldırma süresinden sonra EIS eğrilerinde, biri yüksek diğeri düşük frekans bölgesinde hafif bozulmuş iki kapasitif lup oluştuğu gözlenmektedir. Bu durumun, yumuşak çelik elektrotun hidroklorik asitli çözeltilere maruziyet süresinin uzamasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Çizelge 4.2'den net görüleceği üzere 48. saate kadar yüzde inhibisyon etkinliği değerleri artış göstermiş ve 72. saatten itibaren hafifçe azalmaya başlamıştır. Bu durum, yumuşak çelik yüzeyinde oluşan inhibitör filminin 72. saate kadar kararlılığını yüksek oranda koruduğunu ve bu süreden sonra yüzeydeki stabilitenin bir miktar azalmaya başladığı sonucunu düşündürmektedir. 120. saatin sonunda en yüksek derişimde hala koruma % 90'dır. Bu değer, bir saatlik daldırma süresinin sonundaki değerden bile hala yüksektir. Aynı çizelgeden *CPE* değerleri değerlendirilecek olursa, hem yosun ekstraktı içeren hem de içermeyen çözeltilerdeki *CPE* değerleri daldırma süresi arttıkça artmış ve yosun derişiminin artmasıyla azalmıştır. *P. commutata* ekstrakt derişiminin artmasına bağlı olarak daldırma süresi arttıkça “*n*” (yüzey pürüzlülük katsayısı) değerlerinin azalması *P. commutata* ekstraktının içerdiği sekonder metabolit denilen fitokimyasal (alkoloid, flavanoid, terpenoid vb.) moleküllerinin yumuşak çelik yüzeyine adsorpsiyonunun ayrı

bir kanıtı olarak yorumlanabilir. *P. commutata* ekstrakt derişiminin artması ile polarizasyon direnci ve inhibisyon etkinliği değerlerindeki artma ve *CPE* değerlerindeki azalma, bazı araştırmacıların da belirttikleri gibi yumuşak elik yüzeyine tutunan organik moleküllerin sayısının artışından kaynaklandığı söylenebilir (Akkoç vd., 2023; zkır ve Seyyar, 2023). *CPE* değerlerindeki bu azalma, yerel dielektrik sabitindeki azalmadan ya da çift tabakanın kalınlığındaki artıştan kaynaklanmaktadır. Bunun sebebi, esas olarak metal yüzeyine *P. commutata* ekstraktının içerdiği sekonder metabolit moleküllerinin adsorpsiyonu sonucunda, daha önceden adsorplanan iyon ve su moleküllerinin kademeli olarak yer değiştirmesidir. İyon ve su moleküllerinden daha büyük olan sekonder metabolit moleküllerinin (alkaloidler, flavanoidler, fenolik bileşikler vb.) adsorpsiyonu, çift tabaka kalınlığındaki artma vasıtasıyla kapasitansı azalmaktadır (Erbil, 2012).

4.3 Yumuşak eliğin *P. commutata* Ekstrakt Etkisi ile Sıfır Yük Potansiyelinin Değerlendirilmesi

Elektrokimyasal deneylerin son aşaması, sıfır yük potansiyelinin (E_{syp}) korozyon potansiyeli (E_{kor}) ile karşılaştırılmasıdır. Metalik malzemelerin korozyon sürecinde farklı yüklerde bulunması, inhibitörlerin seçiciliğinin değerlendirilmesinde önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır. İnhibitör özelliği incelenen moleküllerin metal yüzeyine adsorpsiyonunu etkileyen temel unsurlar arasında kullanılan elektrolitin türü, metalin yüzey yükü ve yapısı ile inhibitör molekülünün kimyasal yapısı yer almaktadır. Metalin yüzey yükünün, metal-zelti ara yüzeyinde oluşan elektriksel alandan kaynaklandığı bilinmektedir (zkır vd., 2012). Bu nedenle, yumuşak çeliğin yüzey yükü, sıfır yük potansiyelinin (E_{syp}) korozyon potansiyeliyle (E_{kor}) karşılaştırılmasıyla belirlenmiştir.

Agresif elektrolit zelti içinde bulunan *P. commutata* ekstraktının yumuşak çeliğin yüzeyine adsorplanabilmesi onun sıfır yük potansiyeline (E_{syp}) bağlı olup, bu aşamada metalin yüzey yükü, 1,0 M HCl zeltisine en yüksek derişimde (% 0,080 (w/v)) *P. commutata* ekstraktı ilave edilerek, bir saatlik daldırma süresi sonunda açık devre potansiyelinden ± 250 mV farklı potansiyeller uygulanarak EIS lmleri alınmıştır. Bu ölümlerden elde edilen R_p değerleri yumuşak çeliğin yüzey alanıyla çarpılarak potansiyele karşı Şekil 4.5'teki grafik elde edilmiştir. Elde edilen eğrideki maksimum nokta ise sıfır yük potansiyelini göstermektedir.



Şekil 4.5. *P. commutata* ekstraktı (% 0,080 (w/v)) için sıfır yük potansiyelinin belirlenmesi

Yapılan potansiyel ölçümleri sonucunda yumuşak çeliğin yüzey yükü eğer negatif ise elektrot yüzeyi negatif yüklüdür ve katyonların adsorpsiyonu söz konusudur. Eğer pozitif ise elektrot yüzeyi pozitif yüklüdür ve metal yüzeyine anyonların adsorpsiyonu söz konusudur. *P. commutata* ekstraktı (% 0,080 (w/v) + 1,0 M HCl) çözeltisinde yumuşak çelik elektrotun denge potansiyeli ($E_{ocp}=E_{kor}$) -0,526 V, E_{syp} : -0,514 V olarak belirlenmiştir.

$$\psi = E_{kor} - E_{syp} \quad (4.3)$$

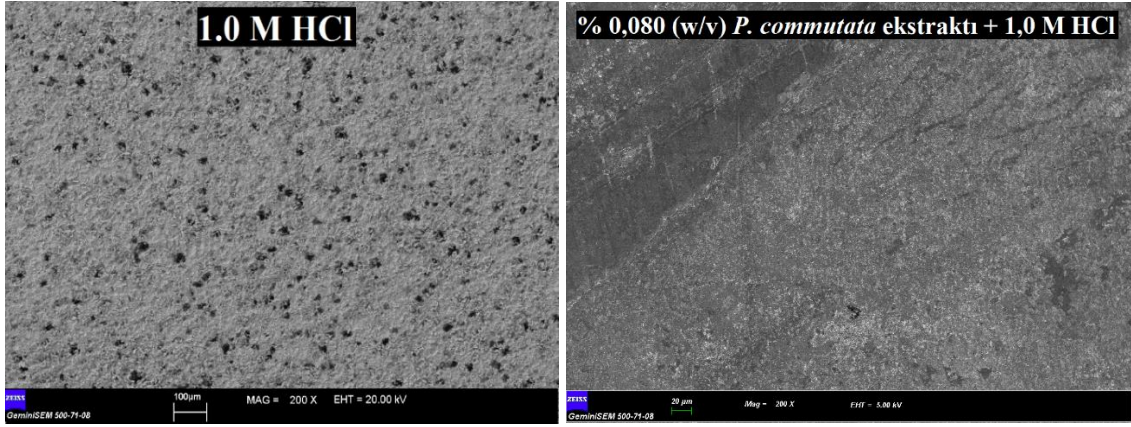
$\psi = -0,526 - (-0,514) = -0,012$ V olarak hesaplanmıştır.

Aradaki fark negatif (-0,012 V) olduğu için yumuşak çelik elektrotun yüzeyinin korozyon sürecinde negatif yüklü olduğuna karar verilmiştir. Bu durumda negatif yüklü metal yüzeyine protonlanmış haldeki *P. commutata* inhibitör moleküllerinin adsorpsiyonu söz konusudur.

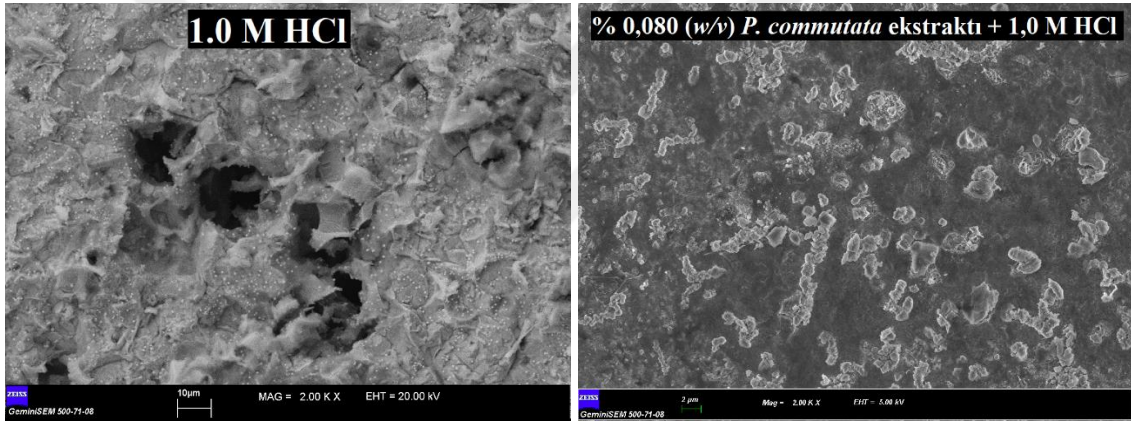
4.4 Yumuşak Çelik Elektrotların FE-SEM ve AFM Analizleri İle Yüzey Morfolojilerinin Değerlendirilmesi

298 K sıcaklıkta karayosunu ekstraktı içermeyen agresif HCl ve en yüksek (% 0,080 w/v) derişimde *P. commutata* ekstraktını içeren 1,0 M HCl çözeltilerine 120 saat süreyle daldırılmış yumuşak çeliklerin yüzey morfolojilerini belirlemek amacıyla

ayrıntılı yüzey analizleri olan FE-SEM ve AFM analizleri yapılmıştır. Yumuşak çelik elektrotların FE-SEM analizi ile 200 ve 2000 kat büyütülmüş yüzey görüntüleri sırasıyla Şekil 4.6 ve 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.6. *P. commutata* ekstraktı içeren ve içermeyen HCl elektrolitinde 120 saat daldırma sonrası 200 kat büyütülerek alınan FE-SEM görüntüleri

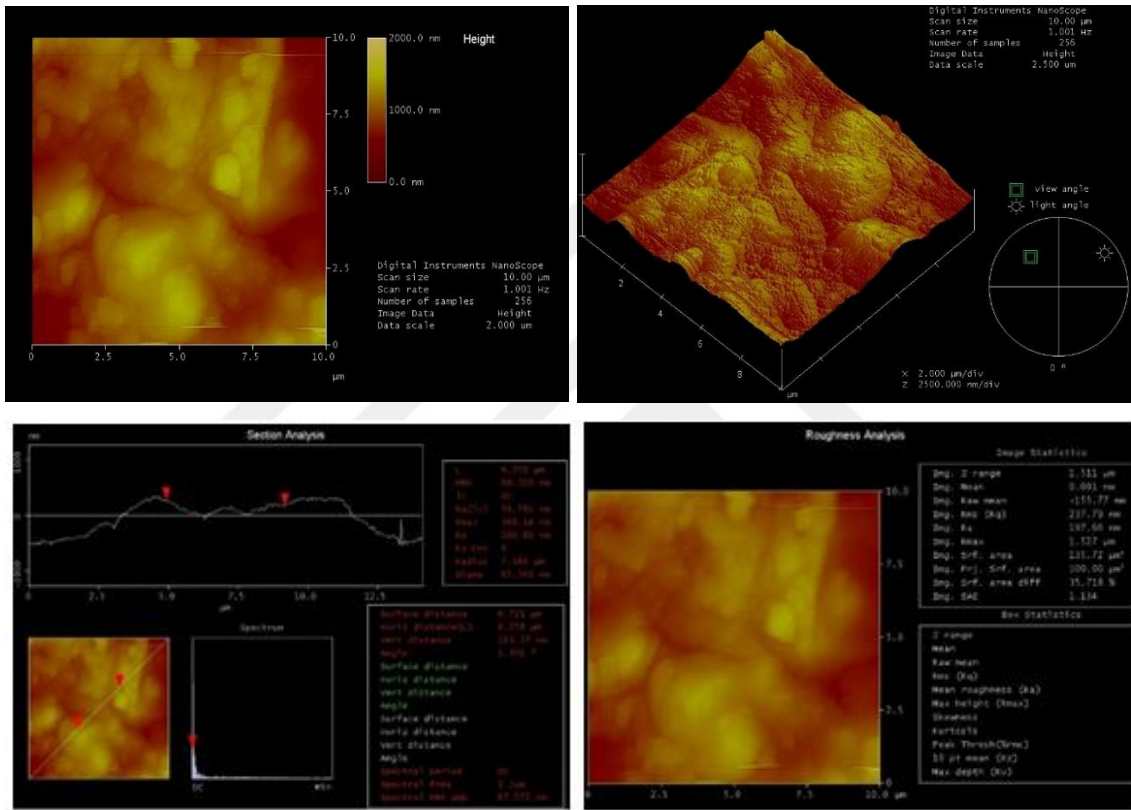


Şekil 4.7. *P. commutata* ekstraktı içeren ve içermeyen HCl elektrolitinde 120 saat daldırma sonrası 2000 kat büyütülerek alınan FE-SEM görüntüleri

Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu, yüksek çözünürlüğe sahip ve daha net yüzey analizi incelemesi yapabilme imkânı sağlayabilen bir tekniktir. Bu görüntülerden kolayca görüleceği üzere 1,0 M HCl çözeltisinde bekletilmiş elektrot yüzeylerinde girintili-çıkıntılı, büyük çukurcuklar gözlenmiştir (Şekil 4.6 ve 4.7). Asitli agresif ortama *P. commutata* ekstraktı eklendiğinde ise hem yüzeylerin daha düzgün neredeyse pürüzsüz bir görünüm aldığı, hem de büyük çukurcukların sayıca azaldıkları ve neredeyse yok denecek kadar küçüldükleri gözlemlenmiştir.

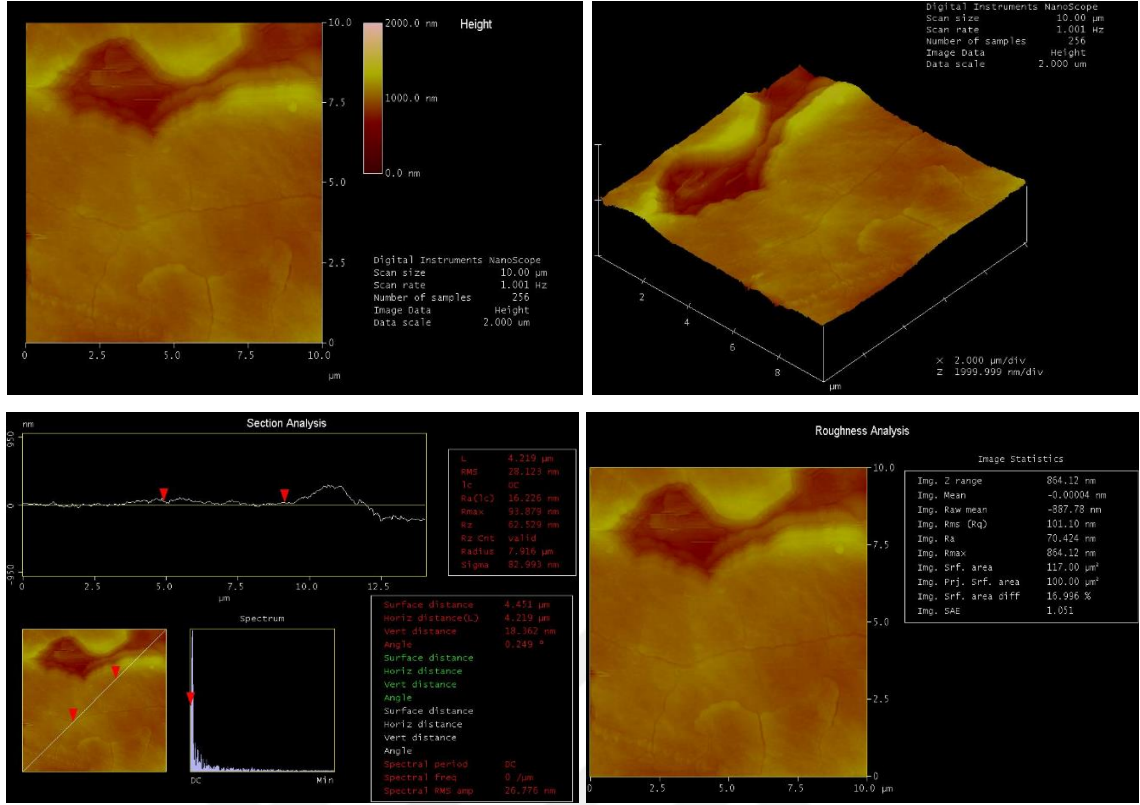
Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile korozyon sürecinin yüzey analiz çalışmaları son derece yeni ve elverişli bir teknolojidir. Neredeyse tüm alanlarda nano seviyede çalışmak için kullanılan bir yöntem olup, bu yöntemle moleküler seviyede

görüntülemeler alabilme ya da yüzeylerin doğrudan görüntülerinin alınabildiği için çok kullanışlıdır. Atomik seviyeye yakın çözünürlükte üç boyutlu görüntüler elde edilebildiği ve ayrıca yüzey özellikleri, pürüzlülüğü ve esnekliği hakkında önemli bilgiler sunduğu için korozyon inhibitörü çalışmalarında tercih edilmektedir. Yumuşak çelik yüzeyinin % 0,080 (w/v) derişimde *P. commutata* ekstraktı içeren ve içermeyen HCl elektrolitinde 120 saat daldırma süresi sonrasında elde edilen iki boyutlu (2D) ve üç boyutlu (3D) AFM görüntüleri Şekil 4.8 ve 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.8. 1,0 M HCl çözeltisindeki yumuşak çeliğin 298 K'de 120 saatlik daldırma süresi sonrasında elde edilen AFM görüntüleri

Şekil 4.8'den anlaşılacağı üzere, yumuşak çeliğin yüzeyi agresif korrozif çözeltiden oldukça etkilenmiş, büyük ve geniş boşluklara sahip pürüzlü bir yüzeye dönmüştür. Yüzeyin ortalama pürüzlülük (R_a) değerinin **197,66 nm** olduğu gözlenmiştir. En yüksek derişimde *P. commutata* ekstraktı içeren çözeltiye ait ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değeri ise **70,424 nm** olmuştur (Şekil 4.9). Yeşil inhibitörün mevcut olduğu çözeltiye yumuşak çeliğin 120 saatlik daldırma sonrasında yüzeyinin daha düzgün ve daha az pürüzlü bir yapıya sahip olduğu AFM analizleri ile de desteklenmiştir.



Şekil 4.9. % 0,080 (w/v) derişimdeki *Palustriella commutata* yosun ekstraktı çözeltilisine 120 saatlik daldırma sonrasında yumuşak çeliğin 298 K'deki elde edilen AFM görüntüleri

Karayosun ekstraktı içermeyen çözeltideki R_a değeri 197,66 nm iken, % 0,080 (w/v) derişimde *P. commutata* ekstraktı içeren çözeltideki R_a değeri 70,424 nm olarak ölçülmüştür. Yani yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Bu iki değer arasındaki fark bile yeşil inhibitör etkisini incelenen *Palustriella commutata* yosun ekstraktının, yumuşak çeliğin asidik korozyonuna oldukça etkili olduğunu söylemek için geçerli bir diğer kanıttır. Sonuç olarak, bu çalışmada gerçekleştirilen yüzey analizi çalışmaları olan FE-SEM ve AFM bulguları hem birbiriyle son derece uyumlu, hem de elektrokimyasal deney sonuçlarını destekler niteliktedir (Özkır ve Bay, 2024).

BÖLÜM V

SONUÇLAR

Bu çalışmanın önemi, 1,0 M HCl çözeltisine daldırılmış olan yumuşak çeliğin korozyonuna, Amblystegiaceae familyasından bir briyofit türü olan eski adıyla “*Cratoneuron commutatum*” olarak da bilinen *Palustriella commutata* ekstraktının yeni bir yeşil inhibitör olarak etkisinin ilk defa incelendiği bu tez çalışmasında, yapılan literatür taramasında daha önce gerçekleştirilmiş herhangi bir araştırmaya rastlanılmaması, bu çalışmayı özgün kılan en önemli unsur olmuştur.

Bu çalışma, agresif HCl çözeltisi içerisindeki yumuşak çeliğin korozyon davranışına yeni yeşil bir inhibitör olarak *Palustriella commutata* sulu ekstraktının etkisini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Bunun için *P. commutata* yosunu içermeyen ve % 0,010–% 0,080 (w/v) aralığında *P. commutata* içeren 1,0 M HCl çözeltileri kullanılmış ve bu çözelti derişimleriyle öncelikle 298 K’de bir saat daldırma süresi sonunda EIS, LPR ve potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Uygulanan her üç yöntemle elde edilen yüzde inhibisyon etkinliği değerleri ise birbirleri ile son derece uyumlu olmuş ve en yüksek derişimde koruma % 86-88 aralığında olmuştur. Potansiyodinamik polarizasyon bulgularına göre, *P. commutata* yosun ekstraktı derişiminin artmasıyla katodik bölgedeki korozyon potansiyeli değerlerinin inhibitör içermeyen agresif çözeltiliye göre daha negatif (katodik) potansiyellere kayması sonucu bu bölgedeki korozyon akım yoğunluğu değerlerini daha belirgin şekilde azaltması ile *P. commutata* yosun ekstraktının yumuşak çeliğe “katodik inhibitör” olarak etkidiği sonucuna varılmıştır.

Ayrıca ilk kez inhibitör uygulaması gerçekleştirilen *P. commutata* yosun ekstraktının zamana (24-120 saat) bağlı parametrelerle dayanımını belirlemek amacıyla EIS ile ölçümler alınmış ve inhibitörün farklı derişimlerinin zamana bağlı inhibisyon etkinlikleri değerlendirilmiştir. Yüksek inhibisyon 96. saate kadar devam etmiş ve bu süreden sonra bir miktar azalma göstererek korumaya devam ettiği dikkat çekmiştir. Aynı zamanda metalin sıfır yük potansiyeli ile yüzey yükü negatif olarak belirlenmiş olup, bu deney ile korozyon sürecindeki yumuşak çeliğin yüzeyine protonlanmış halde

bulunan yosun ekstraktındaki aktif inhibitör moleküllerinin adsorplanacağı belirlenmiştir.

Bu elektrokimyasal deneyler ile belirlenen inhibitör etkisi bir de yüzey analiz çalışmaları ile desteklenmiştir. En yüksek derişimde (% 0,080 w/v) inhibitör içeren ve içermeyen 1,0 M HCl çözeltilerinde 298 K'de 120 saat süreyle daldırılmış olan elektrotların yüzey morfolojileri FE-SEM ve AFM analizleri ile incelenmiştir. İnhibitörlü ve inhibitörsüz yüzeyler, hem 200 kat hem de 2000 kat büyütülerek FE-SEM ile alınmış mikrografların karşılaştırılması sonucu, inhibitörsüz yüzeydekinin aksine, inhibitör içeren yüzeyin FE-SEM görüntüsünde çukurcukların neredeyse tamamen azaldığı ve daha düz bir görünüm aldığı izlenmiştir. AFM analizi de FE-SEM ile son derece tutarlı sonuçlar vermiştir. İnhibitörsüz (197,66 nm) çözeltiye nazaran, *P. commutata* yosun ekstraktı içeren elektrot yüzeyinin ortalama pürüzlülük değeri (70,424 nm) çok daha düşük ölçülmüştür. Elde edilen FE-SEM ve AFM yüzey görüntüleri birbirlerini oldukça iyi desteklemektedir.

Palustriella commutata, sucul bir yosun olup, su kenarlarında ve bataklık alanlarında yetişmektedir. Bitki, kimyasal bileşim açısından çeşitli alkaloidler, flavonoidler, fenolik asitler ve tanenler gibi bileşenler içermektedir. Bu bileşenler, bitkinin korozyon önleyici özellik gösterme potansiyeline sahip olmasını sağlayan ana etkenlerin başında olduğu düşünülmektedir. Bu sebeple, *P. commutata* yosun ekstraktının yapısında bolca mevcut olduğu düşünülen sekonder metabolitlerin (alkaloidler, flavonoidler, fenolik bileşikler vb.) yapısındaki aromatik halkaların, π -elektronlarının ve oksijen, azot gibi eşleşmemiş elektronlara sahip heteroatomların güçlü elektron sağlayıcı olmaları sebebiyle, bitki ekstraktının yapısındaki etken maddeleri daha fazla aktive ederek daha etkin yüzey alanına sahip hale getirmektedirler. Yani yapıyı biraz daha fazla negatif yaptıklarından sulu çözeltide Fe^{+2} iyonu şeklinde bulunan metalin yüzeyini daha fazla kapatmaktadır yorumu yapılabilir.

Bunun sonucunda 1,0 M hidroklorik asitli ortamda bulunan yumuşak çelik için bu tez çalışmasıyla ilk defa korozyon inhibitörü etkisi incelenmiş olup, bu yeni yeşil inhibitörün oldukça etkin bir inhibitör olduğunu ve uygulamaya yönelik yeni yeşil bir inhibitör olarak kullanılabileceğini önerebilmekteyiz.

KAYNAKLAR

Aejitha, S., Kasthuri, P.K. and Geethamani, P., “Inhibitory Action of Acalypha Indica Extract On Corrosion of Mild Steel in Hydrochloric Acid Medium”, *Chemical Science Review and Letters*, 2(7), 566–573, 2014.

Akkoç, S., Özkır, D., Başaran, E., Kaya, S. and Berisha, A., “A combined experimental and theoretical approach effect of a benzimidazolium salt as a new corrosion inhibitor on mild steel in HCl solution”, *Ionics*, 29, 3813-3827, 2023.

Alamiery, A.A., “Synthesized Heterocyclic Compounds as Corrosion Inhibitors for Steel in Acidic Environments: A Mini-Review”, *Journal of Materials and Engineering*, 2(4), 235–249, 2024.

Al-Amiery, A., Al-Majedy, Y., Al-Duhaidahawi, D., Kadhum, A.A. and Mohamad, A.B., “Green Antioxidants: Synthesis and Scavenging Activity of Coumarin Thiadiazoles as Potential Antioxidants Complemented by Molecular Modeling Studies”, *Free Radicals and Antioxidants*, 6(2), 173–177, 2016.

Alvarez, P.E., Fiori-Bimbi, M.V., Valenti, R.V., Hidalgo, J.R., Brandan, S.A. and Gervasi, C.A., “Improved electrochemical strategy to characterize adsorption and corrosion inhibition related to biomolecules from plant extracts: the case of Annona cherimola”, *Results in Chemistry*, 4, 100233, 2022.

Armijo, J.S., “Intergranular corrosion of nonsensitized austenitic stainless steels”, *Corrosion*, 24(1), 24–30, 1968.

Balangao, J.K.B., “Corrosion of Metals: Factors, Types and Prevention Strategies”, *Journal of Chemical Health Risks*, 14(1), 79–87, 2024.

Belhadj, O., El Fakir, Z., El Amri, A., Idrissi, A., Sghir, C., Bouzakraoui, S., Ouakki, M. and Cherkaoui, M., “Black Mustard Seed Extract as a new greener corrosion inhibitor: Experimental and DFT studies”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 707, 135911, 2025.

De Gruyter, J., Mertens, S.F.L. and Temmerman, E., “Corrosion due to differential aeration reconsidered”, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 506, 61–63, 2001.

Djermoune, A., Maizia, R., Zahzouh, M. and Khelfaoui, Y., “*Aloysia triphylla* plant extract as an eco-friendly corrosion inhibitor for API 5L X42 steel in hydrochloric acid medium: A combined experimental and DFT study”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 709, 136068, 2025

Ech-chihbi, E., Nahlé, A., Salim, R., Oudda, H., El Hajjaji, F., El Kalai, F., El Aatiaoui, A. and Taleb, M., “An investigation into quantum chemistry and experimental evaluation of imidazopyridine derivatives as corrosion inhibitors for C-steel in acidic media”, *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 5, 24, 2019.

Ech-chihbi, E., Nahlé, A., Salim, R., Benhiba, F., Moussaif, A., El-Hajjaji, F., Oudda, H., Guenbour, A., Taleb, M., Warad, I. and Zarrouk, A., “Computational, MD simulation, SEM/EDX and experimental studies for understanding adsorption of benzimidazole derivatives as corrosion inhibitors in 1.0 M HCl solution”, *J. Alloys Compd.*, 844, 155842, 2020.

El Houda, S.N., Amel, B. and Malika, F., “*Trifolium repens* extracts as a green corrosion inhibitor for carbon steel in a 3.5% NaCl solution”, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 165, 105771, 2024.

El Tamany, El-S.H., Elsaeed, S.M., Ashour, H., Zaki, E.G. and El Nagy, H.A., “Novel acrylamide ionic liquids as anti-corrosion for X-65 steel dissolution in acid medium: Adsorption, hydrogen evolution and mechanism”, *J. Mol. Struct.*, 1168, 106-114, 2018.

Erbil, M., Korozyon İlkeler – Yöntemler, *Korozyon Derneği Yayını*, Poyraz Ofset, Ankara, 2012.

Fadhil, A.A., Khadom, A.A., Ahmed, S.K., Liu, H., Fu, C. and Mahood, H.B., “Portulaca grandiflora as new green corrosion inhibitor for mild steel protection in hydrochloric acid: Quantitative, electrochemical, surface and spectroscopic investigations”, *Surfaces and Interfaces*, 20, 100595, 2020.

Fernandes, J.S. and Montemor, F., “Corrosion”, *Materials for Construction and Civil Engineering*, 679–716, 2014.

Gapsari, F., Setyarini, P.H., Anam, K., Hadisaputra, S., Hidayatullah, S., Purnami, Sulaiman, A.M. and Lai, C.W., “Efficacy of *Andrographis paniculata* leaf extract as a green corrosion inhibitor for mild steel in concentrated sulfuric acid: Experimental and computational insights”, *Results in Surfaces and Interfaces*, 18, 100361, 2025.

Giurlani, W., Zangari, G., Gambinossi, F., Passaponti, M., Salvietti, E., Di Benedetto, F., Caporali, S. and Innocenti, M., “Electroplating for decorative applications: Recent trends in research and development”, *Coatings*, 8(8), 260, 2018.

Hanoon, M., Zinad, D.S., Resen, A.M. and Al-Amiery, A.A., “Gravimetric and surface morphology studies of corrosion inhibition effects of a 4-aminoantipyrine derivative on mild steel in a corrosive solution”, *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 9(3), 953-966, 2020.

Harsimran, S., Santosh, K. and Rakesh, K., “Overview of corrosion and its control: A critical review”, *Proc. Eng. Sci.*, 3(1), 13-24, 2021.

Hjouji, K., Ech-chihbi, E., Atemni, I., Ouakki, M., Ainane, T., Taleb, M. and Rais, Z., “*Datura stramonium* plant seed extracts as a new green corrosion inhibitor for mild steel in 1M HCl solution: Experimental and surface characterization studies”, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 34, 101170, 2023.

Jones, F.R. and Foreman, J.P., “Ch.12-The response of aerospace composites to temperature and humidity”, *Polymer Composites in the Aerospace Industry*, (ISBN 9780857095237), Editor(s): Irving, P.E., Soutis, C., *Woodhead Publishing*, Elsevier, 335–369, 2015.

Kharanzhevsky, E.V., Reshetnikov, S.M., Efimov, A.V., Gil'mutdinov, F.Z. and Krivilev, M.D., "Application of some inhibitors for improving the corrosion resistance of ceramic coatings deposited on non-alloy steel by short-pulse laser treatment", *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition*, 9(1), 44–55, 2020.

Kumar, C.B.P. and Mohana, K.N., "Phytochemical screening and corrosion inhibitive behavior of *Pterolobium hexapetalum* and *Celosia argentea* plant extracts on mild steel in industrial water medium", *Egyptian Journal of Petroleum*, 23, 201–211, 2014.

Kumar, S., Kumar, M. and Handa, A., "High temperature oxidation and erosion-corrosion behaviour of wire arc sprayed Ni-Cr coating on boiler steel", *Materials Research Express*, 6(12), 125533, 2019.

Kusuma, H.S., Danera, G.S., Maulana, A.D., Rahmasari, M., Nida, R.A., Amenaghawon, A. N., Darmokoesoemo, H. and Zarrouk, A., "Effect of spinach (*Spinacia oleracea*) leaf extract on the aluminum (Al) as a green corrosion inhibitor in HCl medium", *Hybrid Advances*, 7, 100283, 2024.

Langford, B., Cash, J.M., Vieno, M., Heal, M.R., Drewer, J., Jones, M.R., Leeson, S.R., Simmons, I., Braban, C.F. and Nemitz, E., "Evaluation of isoprene light response curves for bryophyte-dominated ecosystems and implications for atmospheric composition", *Environmental Research: Ecology*, 2(1), 011002, 2023.

Mahmoud, G.A., Abdel-karim, A.M., Saleh, S.M., El-Meligi, A.A. and El-Rashedy, A.A., "Corrosion inhibition of copper alloy of archaeological artifacts in chloride salt solution using Aloe vera green inhibitor", *Journal of Alloys and Compounds*, 1010, 177540, 2025.

Mehdipour, M., Ramezanzadeh, B. and Arman, S.Y., "Electrochemical noise investigation of Aloe plant extract as green inhibitor on the corrosion of stainless steel in 1 M H₂SO₄", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 318–327, 2015.

Musa, A.Y., Kadhum, A.A.H., Mohamad, A.B. and Takriff, M.S., “Experimental and theoretical study on the inhibition performance of triazole compounds for mild steel corrosion”, *Corrosion Science*, 52, 3331–3340, 2010.

Ouakki, M., Galai, M., Benzekri, Z., Aribou, Z., Ech-chihbi, E., Guo, L., Dahmani, K., Nouneh, K., Briche, S., Boukhris, S. and Cherkaoui, M., “A detailed investigation on the corrosion inhibition effect of by newly synthesized pyran derivative on mild steel in 1M HCl: experimental, surface morphological (SEM-EDS. DRX& AFM) and computational analysis (DFT & MD simulation)”, *J. Mol. Liq.*, 344, 117777, 2021.

Özkır, D., Kayakırılmaz, K., Bayol, E., Gürten, A.A. and Kandemirli, F., “The inhibition effect of Azure A on mild steel in 1M HCl. A complete study: Adsorption, temperature, duration and quantum chemical aspects”, *Corrosion Science*, 56, 143–152, 2012.

Özkır, D., “A Newly Synthesized Schiff Base Derived from Condensation Reaction of 2,5-dichloroaniline and benzaldehyde: Its Applicability through Molecular Interaction on Mild Steel as an Acidic Corrosion Inhibitor by Using Electrochemical Techniques”, *Journal of Electrochemical Science and Technology*, 10(1), 37–54, 2019a.

Özkır, D., “The Electrochemical Variation of a Kind of Protein Staining and Food Dye as a New Corrosion Inhibitor on Mild Steel in Acidic Medium”, *International Journal of Electrochemistry*, 2019, 1–11, 2019b.

Özkır, D. and Ezer, T., “A New Inhibitor Approach to the Corrosion of Mild Steel in Acidic Solution with Long-Term Impedance Tests: A New Application Area for *Hypnum cupressiforme* (Bryophyta)”, *Anatolian Bryology*, 6(2), 119–128, 2020.

Özkır, D., “An Overview of *Plagiochila porelloides* (Marchantiophyta) as a New Environmentally Sustainable Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in Acidic Solution”, *Anatolian Bryology*, 7(2), 119–130, 2021.

Özkır, D., “The Green Inhibitive Effect of *Ptychostomum schleicheri* (Bryophyta) Extract on Mild Steel Corrosion”, *Anatolian Bryology*, 8(2), 114–122, 2022.

Özkır, D. and Seyyar, O., “Application of a new inhibitor for the corrosion of iron in acidic solution: Electrochemical effect of a scorpion venom”, *Eurasian J. Bio. Chem. Sci.*, 6(2), 88-93, 2023.

Özkır, D and Bay, Y., “Synthesis and characterization of a new eco-friendly dopamine derivative schiff base as an effective corrosion inhibitor for mild steel in acidic environment”, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 38(13), 2447–2475, 2024.

Pal, M.K. and Lavanya, M., “Microbial Influenced Corrosion: Understanding Bioadhesion and Biofilm Formation”, *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 8, 76, 2022.

Pejin, B., Bogdanovic-Pristov, J., Pejin, I. and Sabovljevic, M., “Potential antioxidant activity of the moss *Bryum moravicum*”, *Nat. Prod. Res.*, 27, 900-902, 2013.

Qian, Y., Li, Y., Jungwirth, S., Seely, N., Fang, Y. and Shi, X., “The application of anti-corrosion coating for preserving the value of equipment asset in chloride-laden environments: a review”, *International Journal of Electrochemical Science*, 10(12), 10756–10780, 2015.

Sajadi, G.S., Salmanian, F., Naghizade, R. and Hosseini, S.M.A., “The inhibitive action of *lemon verbena* plant extract as an economical and eco-friendly corrosion inhibitor for mild steel in acidic solutions”, *International Journal of Electrochemical Science*, 19, 100699, 2024.

Shibli, S.M.A., Meena, B. N. and Remya, R., “A review on recent approaches in the field of hot dip zinc galvanizing process”, *Surface and Coatings Technology*, 262, 210–215, 2015.

Sully, J.R. and Taylor, D.W., “Electrochemical Methods of Corrosion Testing”, *Metals Hand Book*. 13, 1987.

Sully, J.R. and Taylor, D.W., “Electrochemical Methods of Corrosion Testing”, Metals Handbook, **McGraw-Hill, Inc.**, New York, 13, 2004.

Tonguc Yayintas, O., Alpaslan, D., Karagul Yuceer, Y., Yilmaz, S. and Sahiner, N., “Chemical composition, antimicrobial, antioxidant and anthocyanin activities of mosses (*Cinclidotus fontinaloides* (Hedw.) P.Beauv. and *Palustriella commutata* (Hedw.) Ochyra) gathered from Turkey”, **Natural Product Research**, 31(18), 2169–2173, 2017.

Umoren, S.A., Solomon, M.M., Obot, I.B. and Suleiman, R.K., “A critical review on the recent studies on plant biomaterials as corrosion inhibitors for industrial metals”, **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, 76, 91–115, 2019.

Zhang, Q.H., Yang, X.B., Zhang, Y. and Xu, N., “*Artemisia verlotiorum* extract as green corrosion inhibitor for enhanced corrosion resistance of mild steel in acidic solution”, **Journal of Molecular Liquids**, 419, 126811, 2025.

ÖZ GEÇMİŞ

Muhammet SEVİMKAN **** tarihinde ****'da doğdu. Tarsus Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Kimya Bölümünden mezun olduktan sonra Gazi Üniversitesi Eğitim Fakültesi Kimya Öğretmenliği Bölümünde **** yılında lisans öğrenimini tamamladı. Yüksek lisans öğrenimine **** yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı'nda başladı. **** yılında yüksek lisans öğrenimini tamamlayarak mezun oldu.



