



T.C.
MARDİN ARTUKLU ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
KİMYA ANABİLİM DALI

Yüksek Lisans Tezi

**2-AMİNO-1, 3, 5 –TRİAZİNE -4, 6-DİTHİOL' UN (2-ATD)
YUMUŞAK ÇELİK ÜZERİNE HİDROKLORİK ASİT
ÇÖZELTİSİNDE KOROZYONUNA KARŞI ADSORPSİYON VE
İNHİBİSYON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Selim ARSLANHAN

Mardin 2023

T.C.
MARDİN ARTUKLU ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
KİMYA ANABİLİM DALI

Yüksek Lisans Tezi

**2-AMİNO-1, 3, 5-TRİAZİNE-4,6-DİTHİOL' UN (2-ATD) YUMUŞAK
ÇELİK ÜZERİNE HİDROKLORİK ASİT ÇÖZELTİSİNDE
KOROZYONUNA KARŞI ADSORPSİYON VE İNHİBİSYON
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Selim ARSLANHAN

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Reşit YILDIZ

Mardin 2023

T.C.
MARDİN ARTUKLU ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİMİ ENSTİTÜSÜ
KİMYA ANABİLİM DALI

TEZ ONAYI

Enstitümüz Kimya Anabilim Dalı 21204002 numaralı öğrencisi Selim ARSLANHAN.'in hazırladığı yüksek lisans tezi 22.06.2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavında oybirliğiyle/oyçokluğu başarılı bulunarak jürimiz tarafından yüksek lisans/doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri	Ünvanı, Adı SOYADI	İmza
Başkan	Doç. Dr. Reşit YILDIZ	
Üye	Doç. Dr. Ali DÖNER	
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Serap TOPRAK DÖŞLÜ	

Onay

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun .../.../20.. tarih ve .../... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

.../.../20..

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Mardin Artuklu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içindeki bütün bilgileri etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tez çalışmasının hazırlık, bilgi, belge, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarda bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun davrandığımı,
- Tez çalışmasında kullanılan tüm eserlere eksiksiz atıf yaptığımı ve kullanılan tüm eserlere kaynaklar/kaynakçada yer verdiğimi,
- Tez çalışmasının özgün olduğunu,
- Tez çalışmasının Mardin Artuklu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı” ile tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabullendiğimi bildiririm.

İmza

Selim ARSLANHAN

Tarih (.../.../2023)

ÖZET

MARDİN ARTUKLU ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİMİ ENSTİTÜSÜ KİMYA ANABİLİM DALI

2-AMİNO-1, 3, 5-TRIAZİNE-4,6-DİTHİOL' UN (2-ATD) YUMUŞAK ÇELİK ÜZERİNE HİDROKLORİK ASİT ÇÖZELTİSİNDE KOROZYONUNA KARŞI ADSORPSİYON VE İNHİBİSYON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Selim ARSLANHAN

2-Amino-1,3,5-Triazine-4,6-Dithiol (2-ATD) 'in 0,5 M HCl çözeltisi içindeki yumuşak çelik korozyonuna etkisi, farklı konsantrasyon ve sıcaklık değerlerinde deneyler yapılarak araştırılmıştır. Araştırmada potansiyodinamik polarizasyon, elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ve lineer polarizasyon direnci (LRP) tekniklerinden yararlanılarak elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Derişim arttıkça inhibisyon etkinliğinin arttığı ancak sıcaklığın artmasıyla inhibisyon etkinliğinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca 120 saat boyunca ayrı ayrı hem inhibitörlü hem de inhibitörsüz ortamda bekletilen yumuşak çeliğin yüzey morfolojisi için taramalı elektron mikroskobu, atomik kuvvet mikroskobu ve enerji dağılımlı X- ışını spektroskopisi yöntemleri kullanılmıştır. Potansiyodinamik polarizasyon verileri, deneylerde kullanılan organik inhibitörün hem anodik hem de katodik bölgelerdeki reaksiyonlara etki etmesi sebebiyle karma bir inhibitör olarak tanımlanmıştır. Yumuşak çelik yüzeyine iyi tutunarak korozyon hızını ciddi anlamda azaltan 2-ATD'nin yüzey adsorpsiyon ölçümlerinin Langmuir izotermine uygun olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca deneye ilgili K_{ads} , ΔG°_{ads} gibi termodinamik değişkenler hesaplanarak tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Korozyon, Yumuşak Çelik, Korozyon İnhibitörü, İnhibitör, 2-ATD

ABSTRACT

MARDIN ARTUKLU UNIVERSITY

GRADUATE EDUCATION INSTITUTE DEPARTMENT OF CHEMISTRY

INVESTIGATION OF THE ADSORPTION AND INHIBITION PROPERTIES OF 2-AMINO-1,3,5-TRIAZINE-4,6-DITHIOL (2-ATD) AGAINST CORROSION IN HYDROCHLORIC ACID SOLUTION ON MILD STEEL

Selim ARSLANHAN

The effect of 2-Amino-1,3,5-Triazine-4,6-Dithiol (2-ATD) on mild steel corrosion in 0.5 M HCl solution was investigated by conducting experiments at different concentration and temperature values. In the research, the data obtained by using potentiodynamic polarization, electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and linear polarization resistance (LRP) techniques were evaluated. It has been observed that the inhibitory efficiency increases as the concentration increases, but the inhibitory efficiency decreases with increasing temperature. In addition, scanning electron microscopy, atomic force microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy methods were used for the surface morphology of mild steel, which was kept separately in both inhibitory and non-inhibitory environments for 120 hours. Potentiodynamic polarization data have been described as a mixed inhibitor due to the fact that the organic inhibitor used in the experiments affects the reactions in both anodic and cathodic regions. It has been found that the surface adsorption measurements of 2-ATD, which significantly reduces the corrosion rate by holding onto the mild steel surface well, are in accordance with the Langmuir isotherm. In addition, thermodynamic variables related to the experiment, such as K_{ads} , ΔG_{ads}° , were calculated and discussed.

Key Words: Corrosion, Mild Steel, Corrosion Inhibitor, İnhibitör, 2-ATD

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitim boyunca pozitif enerjisi, yol göstericiliği, çalışmalarımın gerçekleştirilmesi ve değerlendirilmesi sürecinde sürekli yanımda olan çok değerli sayın danışman hocam Doç. Dr. Reşit YILDIZ' a teşekkür ederim.

Araştırmamı yaparken hem teorik hem de uygulama noktasında bilgilerinden istifada ettiğim çok kıymetli ve değerli sayın Doç. Dr. Ali DÖNER ve Dr. Öğr. Üyesi Serap TOPRAK DÖŞLÜ hocalarıma çok teşekkür ederim.

Bana vermiş olduğu destek ve katkıları için değerli öğretmen arkadaşım Dr. Emrullah DENİZ' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Beni eğitim yaşamım boyunca destekleyen eşime, çocuklarıma, tüm diğer aile fertlerime ve kıymetli arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Mardin Artuklu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, bu tezi BAP.22.LEE.040 proje numarası ile desteklemiştir, katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Selim ARSLANHAN

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1.GİRİŞ	1
1.1. Korozyon ve Önemi	1
1.2. Korozyonun Oluşum Mekanizması	2
1.3. Korozyonu Önleme Yöntemleri	4
1.3.1. Malzeme İle İlgili Önlemler.....	5
1.3.2. Ortam Ara Yüzeyi ve Malzemede Alınacak Tedbirler	5
1.3.3. Ara Yüzey Geriliminin (Potansiyelinin) Değiştirilmesi	6
1.3.4. Ortamla İlgili Önlemler.....	6
1.4. İnhibitörlerin Sınıflandırılması	8
1.4.1. Etki Mekanizmasına Göre.....	8
1.4.2. Etki Etme Biçimlerine Göre.....	10
1.4.3. Oksitleyici Olup Olmamlarına Göre	10
1.4.4. Güvenli ve Güvenli Olmayan (tehlikeli) İnhibitörler	10
1.4.5. Kimyasal Doğalarına Göre.....	11
1.5. Organik İnhibitörlerin Adsorpsiyon Yoluyla İnhibisyonu.....	11
1.6. İnhibitörlerin Adsorpsiyon İzotermeleri	12
1.7. Adsorpsiyon Termodinamiği.....	14
1.8. Alternatif Akım (AC) İmpedans Yöntemi.....	15
1.9. İnhibitör Etkinliğinin Saptanması	16
1.10. Çalışmanın Amacı.....	16
2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	18

3.MATERYAL ve METODLAR.....	26
3.1. Materyaller	26
3.1.1. Araştırmada Kullanılan Kimyasal Malzemeler.....	26
3.1.2. Kullanılan Elektrotlar.....	27
3.1.3. Kullanılan Cihazlar	27
3.2. Metod	27
3.2.1. Kullanılan Elektrotların Hazırlanması	27
3.2.2. Elektrolit Çözelti Ortamının Hazırlanması	28
3.2.3. Elektrokimyasal Ölçüm Teknikleri	28
3.2.4. Yüzey Görüntüleme ve Element Analizi:	29
4.BULGULAR ve TARTIŞMA.....	30
4.1. Derişim Deneyleri	30
4.1.1. Açık Devre Potansiyeli (OCP) Eğrileri ve Değerlendirilmesi	30
4.1.2. 0,5 M HCl Çözeltisi İçinde Yumuşak Çeliğin Elektrokimyasal Davranışı	31
4.1.3. 0,5 M HCl + 2-Amino-1, 3, 5-Triazine-4,6-Dithiol (2-ATD)' ün Farklı Derişim Ortamlarında Yumuşak Çeliğin Elektrokimyasal Davranışı	32
4.1.4. Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi (EIS) ve Potasyodinamik Polarizasyon (PDP) Ölçümlerinin Değerlendirilmesi.....	39
4.2. Sıcaklık Deneyleri.....	42
4.2.1. Farklı Sıcaklıklarda Yapılan Deneylerden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi.....	46
4.3. 0,5 M HCl ve 0,5 M HCl+ 10 mM 2-ATD Çözeltileri İçerisinde Yumuşak Çeliğin Zamanla Elde Edilen Nyquist ve Tafel Eğrilerinin Değerlendirilmesi.....	50
4.4. Hidrojen Gazı Salınımı Deneyi ve Sonuçları.....	54
4.5. Adsorpsiyon İzotermi ve Değerlendirilmesi.....	55
4.6. Metal Yükünün Belirlenmesi Deneyi ve Sonuçları	57
4.7. Yüzey Görüntüleri ve Element Analizi Verilerinin Değerlendirilmesi.....	58
5.SONUÇLAR ve ÖNERİLER	61
KAYNAKÇA	64
ÖZGEÇMİŞ.....	69

TABLULAR DİZİNİ

- Tablo 4. 1:** 25 °C sabit sıcaklıkta 0,5 M HCl ve 0,5 M HCl' ye farklı derişimlerde 2-ATD eklenmesiyle oluştulan çözeltilerden elde edilen EIS ve LPR ölçümlerinden hesaplanan parametreler. 39
- Tablo 4. 2:** 25 °C sabit sıcaklıkta 0,5 M HCl ve 0,5 M HCl' ye farklı derişimlerde 42
- Tablo 4. 3: 0,5 M HCl ve 0,5 M HCl +10 mM 2-ATD içeren çözeltilerin farklı sıcaklıklarından elde edilen polarizasyon direnci(R_p), lineer polarizasyon direnci (R_p^*), Sabit faz elementi(CPE) ve yüzde inhibisyon etkinlikleri (%İE) değerleri. 47
- Tablo 4. 4:** 0,5 M HCl ve 0,5 M HCl +10 mM 2-ATD içeren çözeltilerin farklı sıcaklıklarından elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler..... 48
- Tablo 4. 5:** 25 °C sıcaklıkta 0,5 molar hidroklarik asit çözeltisi (inhibitörsüz) ve 0,5 M HCl+10 mM 2-ATD çözelti ortamlarınının farklı zaman aralıklarına ait polarizasyon dirençleri(R_p) Lineer Polarizasyon Dirençleri (LPR) (R_p^*), ve yüzde etkinlik (%İE) değerleri. 53
- Tablo 4. 6:** 25 °C sıcaklıkta 120 saat sonunda 0,5 M HCl ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD çözeltilerindeki potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler..... 53

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1: Korozyona maruz kalan metal yüzeyinde meydana gelen çift tabaka ve çift tabaka potansiyel dağılımı, Dış Helmholtz Tabakası (OHP).....	3
Şekil 1. 2: İyonlar ve yönlendirilmiş su moleküllerinin elektriksel çift katmanını ve elektrolit potansiyeli için gösterilen şematik gösterimi.	4
Şekil 1. 3: Metal/çözelti ara yüzeyinin eşdeğeri olarak kullanılan devre.....	15
Şekil 3. 1: İnhibitörün (2-ATD' nin) molekül yapısı	26
Şekil 4. 1: Yumuşak çeliğin 0,5 M HCl(●) ve 0,5 M HCl+ 0,5 mM(○) , 1 mM(▼),.... 30 5 mM(◇) ve 10 mM(■) 2-ATD içeren çözeltilerden elde edilen OCP eğrileri.	30
Şekil 4. 2: 0,5 M HCl içerisinde yumuşak çelik elektrotun açık devre potansiyelinde elde edilen Nyquist(a) ve Bode(b) Faz Açısı eğrileri.	31
Şekil 4. 3: Yumuşak çeliğin 0,5 M HCl içerisindeki E-I eğrisi.....	32
Şekil 4. 4: 0,5 M HCl(●) çözeltisi ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD(■) çözeltisinden elde edilen (a)Nyquist diyagramı (b) Bode diyagramı.	33
Şekil 4. 5: Yumuşak çeliğin 0,5 M HCl çözeltisinde elde edilen E-I eğrisi(●), 0,5 M HCl + 10 mM (ATD) çözeltisinde elde edilen E-I eğrisi(■).	34
Şekil 4. 7: 0,5 M HCl çözeltisinde elde edilen E-I eğrisi(●), 0,5 M HCl + 5 mM 2-ATD çözeltisinde elde edilen E-I eğrisi(◇).	35
Şekil 4. 8: 0,5 M HCl (●) çözeltisi ve 0,5 M HCl + 1 mM 2-ATD (▼)çözeltisinden elde edilen (a) Nyquist diyagramı (b) Bode diyagramı.	36
Şekil 4. 9: 0,5 M HCl çözeltisinde elde edilen E-I eğrisi(●), 0,5 M HCl + 1 mM 2- ATD çözeltisinde elde edilen E-I eğrisi(▼).	37
Şekil 4. 10: 0,5 M HCl (●) ve 0,5 M HCl + 0,5 mM 2-ATD(○) çözeltisinden elde edilen (a) Nyquist diyagramı (b) Bode diyagramı.....	37
Şekil 4. 11: 0,5 M HCl çözeltisinde elde edilen E-I eğrisi(●), 0,5 M HCl +0,5 mM 2-ATD çözeltisinde elde edilen E-I eğrisi(○).	38
Şekil 4. 12: 35 °C sıcaklıkta 0,5 M HCl (●) ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD(◇) çözeltisinden elde edilen (a) Nyquist diyagramı (b) Bode diyagramı.	42
Şekil 4. 13: 35 °C sıcaklıkta 0,5 M HCl (●) ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD(◇) çözeltisinden elde edilen E-I eğrisi.	43
Şekil 4. 14: 45 °C sıcaklıkta 0,5 M HCl (●) ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD(▼) çözeltisinden elde edilen (a) Nyquist diyagramı (b) Bode diyagramı.	44
Şekil 4. 15: 45 °C sıcaklıkta 0,5 M HCl (●) ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD(▼) çözeltisinden elde edilen E-I eğrisi.	44

Şekil 4. 16: 55 °C sıcaklıkta 0,5 M HCl (●) ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD(○) çözeltisinden elde edilen (a) Nyquist diyagramı (b) Bode diyagramı.	45
Şekil 4. 17: 55 °C sıcaklıkta 0,5 M HCl (●) ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD(○) çözeltisinden elde edilen E-I eğrisi.	46
Şekil 4. 19: 0,5 M HCl (○) ve 0,5 M HCl+10 mM 2-ATD(■) çözeltilerinin Arrhenius grafikleri.....	50
Şekil 4. 20: 25 °C sıcaklıkta 0,5 M HCl çözeltisi (○) ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD(●) çözeltisi içerisinde yumuşak çeliğin zamanla elde edilen Nyquist diyagramları.	51
Şekil 4. 21: 25 °C sıcaklıkta 0,5 M HCl çözeltisi (○) ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD(●) çözeltisinden 120 saat sonunda elde edilen E-I eğrisi.	52
Şekil 4. 22: 25 °C sabit sıcaklıkta 0,5 M HCl ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD çözeltilerinden 120 saat boyunca ölçülen hidrojen gazı salınımı hacim grafiği.	54
Şekil 4. 23: Lagmuir adsorpsiyon izotermi.	56
Şekil 4. 24: 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD çözelti ortamındaki yumuşak çeliğe ait R_p ve elektrot potansiyeli.....	57
Şekil 4. 25: 25 °C sabit sıcaklıkta 0,5 HCl ve 0,5 M HCl + 10mM 2-ATD çözeltileri içerisinde yumuşak çeliğin zamanla elde edilen SEM (a,a'), AFM-2D (b,b') ve 3D (c,c'), EDX atom dağılımı(d,d') ve haritalama. [(a,b,c,d) inhibitörsüz - (a',b',c',d') inhibitörlü].	60

SİMGELER VE KISALTMALAR

2-ATD	: 2-Amino-1, 3, 5-Triazine-4,6-Dithiol
%İE	: Yüzde İnhibisyon Etkinliği
CPE	: Sabit Faz Elemanı
C_{dl}	: Çift Tabaka Kapasidansı
K_{ads}	: Adsorpsiyon Denge Sabiti
ΔG°_{ads}	: Standart Adsorpsiyon Serbest Enerjisi
E_a	: Aktivasyon Enerjisi
ΔH^*	: Entalpi Değişimi
ΔS^*	: Entropi Değişimi
T	: Mutlak Sıcaklık
E_r	: Antropov Rasyonel Korozyon Potansiyeli
E_{ocp}	: Açık Devre Potansiyeli
E_{pzc}	: Sıfır Yük Potansiyeli
EIS	: Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi
PDP	: Potansiyodinamik Polarizasyon
LPR	: Lineer Polarizasyon Direnci
R_p	: Polarizasyon Direnci
$R_{p(inh)}$: İnhibitörlü Koşullardaki Polarizasyon Direnci
R_p^*	: Lineer Polarizasyon Direnci
i_{corr}	: İnhibitörsüz Koşullardaki Akım Yoğunluğu
i'_{corr}	: İnhibitörlü Koşullardaki Akım Yoğunluğu
E_{corr}	: Korozyon Potansiyeli
CR	: Korozyon Hızı
Z	: İmpedans
Z'	: Gerçek impedans
Z''	: Sanal impedans
θ	: Kaplanma Kesri
C_{inh}	: İnhibitör Konsantrasyonu

1. GİRİŞ

1.1. Korozyon ve Önemi

Metal ve alaşımların buldukları ortamların müdahalesiyle kimyasal ya da elektrokimyasal tepkimelere girmeleri ve çözünerek aşınmalarıyla kendi özelliklerini yitirmeleri olayına korozyon denir (Wen et al., 2015). Korozyon olayının gerçekleşmesiyle metal atomları ya ortama geçer ya da başka maddelerin atom veya molekülleriyle tepkimeye girerek metalin yüzeyinde tutunur. Metallerin çoğunluğu atmosfer ve su ortamında korozyona karşı dayanıklı olmayıp hızlı bir şekilde tahrip olabilirler. Doğadaki bütün metaller kararlı hale geçebilmek için diğer elementlerle bileşik oluşturma çabasına girerler. Metaller bileşik formuna geçebilmek için üzerlerindeki fazla enerjiyi tepkimeye girerek atarlar; böylece termodinamik olarak en düşük enerjili olurlar. Metallerin hemen hemen hepsi doğada normal şartlarda diğer element veya bileşiklerle tepkimeye girmiş halde bulunurlar. Bu sebeple korozyon reaksiyonları oluşurken enerji açığa çıkması sebebiyle geri döndürülemeyen (tersinmez) ve kendiliğinden oluşan tepkimelerdir. Bazı soy metaller hariç, diğer metal ve bu metallerin buldukları alaşımları korozyona uğrayıp deforme olabilirler.

Metaller en düşük enerjili olma eğiliminde olmaları sebebiyle doğada cevher olarak bildiğimiz oksit veya sülfür bileşikleri halinde karşımıza çıkarlar. Bir metalin günlük hayatta kullanılabilmesi için doğadan alınan cevherin çeşitli kimyasal ve fiziksel değişimlere tabi tutulması gerekir ancak bu değişimlerin gerçekleşmesi için de epeyce enerji ve emek harcanması kaçınılmaz bir durumdur. Bu kadar emek ve enerjinin harcanmasıyla elde edilen metaller çok kolay bir şekilde etraflarındaki diğer maddelerle etkileşime geçerek yani korozyona uğrayarak tekrardan düşük enerjili hallerine dönmek isterler (Erbil, 1985; Üneri, 1998).

Bütün ülkelerin özellikle de sanayisi çok daha fazla gelişmiş olan ülkelerin korozyon sebebiyle emek, enerji ve metalik malzeme kayıpları oldukça fazla olabilmektedir. Bu kayıpların hepsi üretim maliyetine yüklenmekte ve maliyeti artırmaktadır. Bunun yanı sıra korozyon olayı sonucunda özelliğini kısmen veya tamamen yitiren metalik malzemedan yapılmış araç-gereçlerin meydana getirdiği

patlamalar, kazalar, kimyasal madde sızıntıları, otomobil, uçak ve tren kazaları gibi sayısızca kayıpların sonuçları sadece maddi olarak ölçülemez. Bunun insan yaşamıyla olan yakın bağlantısı da göz önünde bulundurulduğunda, temel sebep olarak korozyon tahribatları mevcut olan ve ölçüsü hakkında tahmin yürütülemeyen giderlerin de dikkate alınması gerekir (Erbil, 1985).

Doğaya geri dönen bu metalik malzemeler, verilen emek ve enerjinin boşa gitmesi yanı sıra toprağın, suyun ve havanın kirlenmesine de sebep olabilmesi açısından korozyonun önlenmesi veya azaltılması çok büyük önem arz etmektedir. Bu amaçla korozyonun önlenmesinde bilinçli, planlı, etkin ve programlı yöntemlerin uygulanıp ve yeniden geliştirilmesi dikkate değer bir husus olarak karşımıza çıkmaktadır.

1.2. Korozyonun Oluşum Mekanizması

Korozyonun oluşumunu sağlayan tepkimenin cinsine göre korozyonlar genel anlamda iki kısma ayrılır bunlar Kimyasal korozyon (Kuru Korozyon) ve Elektrokimyasal korozyondur (Islak Korozyon).

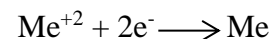
Kimyasal korozyon metal ve alaşımların buldukları ortamlardaki gazlarla reaksiyona girerek oksitlenmeleri olayı sonucunda oluşan korozyon türüdür. Ancak atmosferde bulunan su buharının sebep olduğu korozyon olayı bu tanıma dahil değildir. Elektrokimyasal korozyon ise metal ve alaşımların elektrolit çözeltilerde diğer maddelerle etkileşerek özelliklerini kısmen veya tamamen yitirmeleri olayıdır. Bu korozyon türü, elektriksel ara yüzey olarak isimlendirilen elektrot/elektrolit ara yüzeyinde gerçekleşir. Çözeltide iyonların difüzyonu (yayılma) ve yüzey üzerine adsorpsiyonu (tutunma) bu ara yüzeyde gerçekleşir.

Bu korozyon türleri tıpkı elektrolit çözeltiler içinde gerçekleşen pil gibi elektrokimyasal olaylardır. Korozyon tepkimeleri redoks tepkimeleridir yani yükseltgenme ve indirgenme yarı tepkimelerinin birlikte gerçekleşmesi olayıdır. Bu tür tepkimelerde anodik reaksiyon kısmında metale ait atomlar elektron yitirerek pozitif yüklü metal iyonlarına (katyon) dönüşürler. Bu olayda elektron üretilir ve katodik reaksiyonun görevi ise anodik kısımda üretilen elektronları harcamaktır ve bu olayı ortamda bulunan elektronegatif bir iyon veya molekül üstlenir.

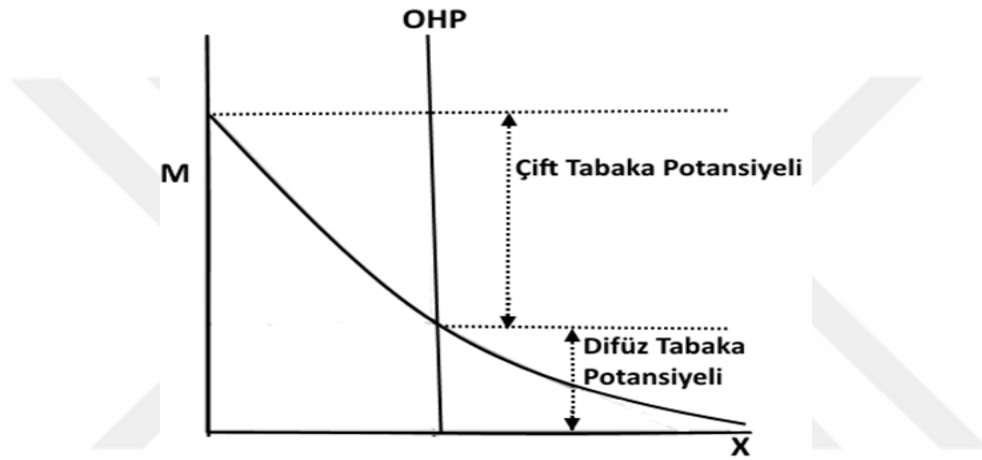
Anodik Reaksiyon



Katodik Reaksiyon



Korozyonun nasıl oluştuğunu anlayabilmek için yukarıda bahsi geçen tepkimelerin gerçekleştiği metal/çözelti ara yüzeyini iyi anlamaktan geçer. Çünkü elektron alış verişi bu ara yüzeyde gerçekleşmektedir. Metalden ayrılan metal iyonları (Me^{2+}) ve katodik reaksiyonu üstlenecek olan molekül veya iyon (oksijen molekülü veya hidrojen iyonu) metal yüzeyine taşınarak elektron alış verişi meydana gelir. Elektrolit çözelti ortamında metalin yüzey kısmına yakın olan iyonlar ya da dipoller metal yüzeyinde hareketli yani durağan olmayan negatif yüklü (elektronlar) taneciklerle etkileşerek çift tabaka oluşturur. Metala en çok yaklaşarak bu olayda görev üstlenen iyonların oluşturduğu tabakaya Helmholtz tabakası adı verilir.



Şekil 1. 1: Korozyona maruz kalan metal yüzeyinde meydana gelen çift tabaka ve çift tabaka potansiyel dağılımı, Dış Helmholtz Tabakası (OHP) (Sarı, 2015, s. 2).

Metal yüzeyine adsorplanmış iyonların merkezinden geçirilen düzleme İç Helmholtz Düzlemi (IHP), hidratize iyonların merkezinden geçen düzleme ise Dış Helmholtz Düzlemi (OHP) denir. Metal/çözelti ara yüzeyi iki tabakadan meydana gelmiştir. Bunlardan bir tanesi difüzyonun gerçekleştiği difüz tabakası diğeri ise elektriksel yoğunluğun fazla olduğu yoğun elektriksel çift tabakadır. Bunlardan birincisi olan Helmholtz tabakasından çözelti içine doğru olan difüz tabaka potansiyelidir. İkincisi olan difüz tabakası ise metal ve Helmholtz tabakası arasındaki potansiyel azalması olup yük akışının geçişine imkan verir. Oluşan potansiyel fark, iyonların yüzeye taşınmasına yardımcı olur (Erbil, 2012).

Korozyon özelliğine sahip olan iyon veya moleküller difüzyon sayesinde yoğun elektriksel çift tabakaya taşınarak metal yüzeyine adsorplanır ve böylece

1.3.1. Malzeme İle İlgili Önlemler

Malzeme seçimi: Malzemelerin yapıldığı metallerin ortamdaki diğer maddelerle etkileşimi farklılık gösterdiği için, üretilecek olan bir malzemenin kullanım amacına ve ortamına dikkat ederek yapımında kullanılacak metalin tercihi her şeyin başında gelir.

Tasarım: Herhangi bir amaç için yapılmış olan sistemin tasarımında, kurulacağı bölgenin hava koşullarının, atmosferin nem ve kirlilik seviyesinin, asit yağmuru faktörü ve sistemin kullanılacağı ortam koşullarının göz önünde bulundurulması, korozyonu engellemek veya azaltmak için önemlidir.

Kurulum yapılırken birbirine monte edilecek olan parçalar arasında boşluk ve su arklarının oluşmasını engellemeye yönelik tasarımlar uygulanmalıdır.

Galvanik korozyonun önüne geçmek için birlikte kullanılacak metallerin potansiyel farklarına dikkat edilmeli ve mümkün oldukça bu malzemeler birbirlerine bağlanırken temas olmaması için aralarına korozyona uğramayacak ara malzemeler kullanılmalıdır. Özellikle suya çok maruz kalan yapı ve sistemlerin eğim açılarını iyi ayarlayarak kurulumlarının yapılması, su birikimini en aza indirecektir.

1.3.2. Ortam Ara Yüzeyi ve Malzemedede Alınacak Tedbirler

Günlük hayatta korozyonu azaltmak veya önlemek için tercih edilen yöntemlerden birisi yüzeylerin boyanması diğeri de yüzeylerin kaplanmasıdır. Bu yöntemlerin amacı metalik malzemelerin ortamdaki diğer maddelerle etkileşimini azaltmaktır. Bu işlemlerin uygulanabilmesi için korozyondan korunacak olan yüzeylerin hazırlanmaları gerekir. Bunun için öncelikle metalik malzemenin üzerinde varsa oksit, yağ ve kir tabakalarının arındırılması ile işe başlanır. Ardından yüzey, değişik yöntemlerle pürüzsüz hale getirilerek parlatılır.

Organik kaplama ve boyama tekniği: Organik kaplamaların en önemli temsilcileri boyalardır. Temizlenmiş olan yüzeyler uygun boyalarla boyanarak ortamla teması azaltılır ve böylece korozyon olayının gerçekleşme ihtimali en aza indirilir (Szocinski & Darowicki, 2020).

Kaplama tekniği: Bu yöntem metalik malzemeleri korozyona karşı korumak için en çok tercih edilenidir. Korunması istenilen metali kaplarken ya ortama daha dayanıklı olan bir soy metal ya da kendisi daha aktif olup korozyona uğrayarak metalik malzemenin korozyona uğraması engellenir.

1.3.3. Ara Yüzey Geriliminin (Potansiyelinin) Değiştirilmesi

Korozyon olayının gerçekleşeceği metal/çözelti ara yüzeyinin potansiyeli değiştirilerek korozyon olayına karşı etkili bir yöntem uygulanabilir. Bu uygulamada amaç metalin açık devre potansiyelini daha negatif yöne kaydırarak korunacak metalik malzemenin ortamdaki diğer maddelerle tepkimeye girmesini engellemektir.

Katodik Koruma: Elektrokimyasal tepkimede hücreden net bir akım geçmesi durumunda, anotta yükseltgenme yarı tepkimesi katotta ise indirgenme yarı tepkimesi gerçekleşir. Bu tür tepkimelere redoks yani yükseltgenme-indirgenme tepkimesi adı verilir ve bu tepkimelerde anot bölgesinde metal malzeme elektron kaybederek ortama iyon şeklinde geçer yani korozyona uğrar ancak katot bölgesinde hiçbir şekilde korozyon olayı gerçekleşmez. Bu prensip ışığında korunmak istenilen metalin anodik bölgeleri katodik bölgelere dönüştürülmeye çalışılır bunun için de korunmak istenilen metal ya daha aktif olan başka bir metal ile bağlantısı sağlanır (galvanik anotla koruma yöntemi) ya da bu metale dışarıdan potansiyel (dış potansiyel uygulamalı katodik koruma) uygulanarak bu işlem gerçekleştirilir. Katodik koruma uygulamaları genellikle nötr veya nötre yakın ortamlarda yapılır.

Galvanik anotla koruma yönteminde anot olarak kullanılacak olan diğer metal bir nevi kurban olarak seçilmiştir ve sürekli kendisi korozyona uğrayacağı için kütlesi git gide azalır bu sebeple koruma olayının devam edebilmesi için bu metalin belli zaman aralıklarında yenisi ile değiştirilmesi gerekir.

Anodik Koruma: Bu yöntem uygulamasında metale dışarıdan anodik yönde bir dış akım verilerek metalin pasiflik potansiyeline ulaşması sağlanır. Anodik koruma aslında bir pasifleştirme işlemidir ve pasifleştirilen metal ortamdaki maddelerle tepkimeye giremeyeceği için korozyona uğrama durumu engellenmiş olunur. Fakat anodik koruma sadece pasifleşme özelliği olan sınırlı sayıdaki metaller için kullanılabilen bir yöntemdir.

1.3.4. Ortamla İlgili Önlemler

Metalik malzemelerin kullanıldığı ortamlarda korozyona sebep olacak korozif bileşenlerin tespit edilip ortamdan uzaklaştırılması önemli tedbirlerdendir. Bu tedbirlerin, malzemenin kullanım amacına ve kullanıldığı ortam şartlarına bakılarak alınması hem maliyet hem de verimlilik açısından son derece önemlidir.

İnhibitör Kullanımı: Korozyonu azaltmak veya önlemek için metalik malzemenin bulunduğu ortama dahil edilen maddelere inhibitör denir. Maliyetinin ekonomik ve kullanımının pratik olması açısından inhibitör madde kullanımı yaygın tercih edilen bir yöntemdir. İnhibitör madde molekülleri metalin yüzeyine tutunarak bir film tabakası oluştururlar ve bu sayede metalin ortamdaki diğer maddelerle etkileşimi azaltıldığı için korozyon hızı yavaşlamış olur (McEwan, 2004). Çoğu ortamın korozif özellikleri kontrol altına alınarak korozyon olayı yavaşlatılabilir. Mesela asidik ortamlar nötralize edilerek, havadaki nem giderilerek veya betonarmenin klorür iyonlarından arındırılmasıyla yapılabilir. Ancak su tankları, buhar kazanları, su nakil boru hatları ve ısıtma-soğutma gibi sistemlerde (katodik bölgede tepkime oksijen indirgenmesidir) ortamın korozif özelliğini değiştirmek bazen mümkün olmayabilir bu durumda bu sistemlere az miktarda inhibitör madde katılarak oksijen ortamdan uzaklaştırılır ve böylece korozyon önleme işlemi yapılmış olur. Anodik metalin çözünme reaksiyonu (Wei & Gao, 2019):

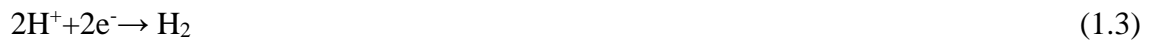


Katodik nötral ve alkali çözeltilerde oksijen indirgenmesi:



Korozyona uğramış metalik malzemelerin korozyon ürünlerinden arındırılmasında asitler kullanılır. Asitle temizleme (pickling) işlemi sürecinde katodik tepkime hidrojenin indirgenmesidir. Bu tür ortamlarda kullanılacak inhibitör madde moleküllerinin metalik malzemenin yüzeyine tutunup (adsorplanarak) film tabakası oluşturması istenir. Oluşan bu film tabakası hidrojenin indirgenmesini zorlaştıracığı için korozyon hızını azaltması beklenir.

Katodik asitli çözeltilerde hidrojen indirgenmesi:



Kullanılacak inhibitör maddelerin tercihi, kullanılacakları ortamın ve metalik malzemenin cinsine göre belirlenmesi etkinliği artırma ve maliyetin ekonomik olması açısından önemlidir.

1.4. İnhibitörlerin Sınıflandırılması

İnhibitör madde kullanımı, maliyetinin az ve uygulanması basit bir metot olması sebebiyle çokça tercih edilen bir yöntemdir. Ancak kullanılacak inhibitörlerin seçimi yapılırken bazı faktörlerin göz önünde bulundurulması gerekir. Bunların en başını, korunacak olan metalik malzemenin metal içeriği ve bu malzemenin kullanıldığı çevre ortam şartlarının bilinmesi çeker.

İnhibitörler; katodik, anodik veya aynı anda hem anodik hem de katodik tepkimeye etki etmeleri, yüzeye tutunma miktarları, kullanıldıkları ortam şartları, organik olup olmamaları, oksitleyici olup olmamaları, eklendikleri ortamda tehlike yaratıp yaratmamaları ve etkinlik süreleri gibi birçok faktör dikkate alınarak sınıflandırılırlar. Başlıca sınıflandırma örnekleri;

1.4.1. Etki Mekanizmasına Göre

Anodik İnhibitörler: Anodik inhibitör maddeleri korunmak istenilen metal yüzeyine tutunarak (adsorplanarak), suda bulunan oksijenin metali oksitlemesi suretiyle metal yüzeyinde pasif bir tabaka oluşturulur ve böylece anodik bölgede tepkime mekanizmasının yavaşlatılması gerçekleştirilmiş olunur. Anodik mekanizmasını yavaşlatan bu inhibitör koruma türü çok yaygın ve etkin kullanımı söz konusu olsa da bazı olumsuzlukları sebebiyle tehlike arz edebilmektedir. Örneğin inhibitör miktarı yeterli olmadığı durumlarda metal yüzeyi tam kapatılmadığı durumlarda büyük katot ve küçük anot çifti oluşur ve böyle bir durum çukurcuk korozyonuna sebep olabileceği için çok tehlikelidir. Bu tehlikeyi taşıma durumlarından dolayı anodik inhibitör maddelere “tehlikeli inhibitörler” de denir (Üneri, 1998). Anodik inhibitör olarak tercih edilen maddeler genellikle inorganiktir. Bunlara nitrik kromat, silikat, borat ve ortofosfat ve kromatlar örnek olarak verilebilir. Özellikle bu madde grupları metal yüzeyinde çok iyi tutunarak iyi bir oksit oluşturup metal iyonların difüzyonunu (yayılmasını) ve anodik bölgede çözünmeye karşı büyük bir engel oluştururlar.

Katodik inhibitörler: Bu tür inhibitörler adlarında da anlaşılacağı üzere katot bölgesinde gerçekleşmesi muhtemelen olan tepkimeyi engellemeye çalışarak korozyon hızını yavaşlatırlar (He, Dunn & Csantos, 2007). Bu işlemi yapmak için katot bölgesinde indirgenmek isteyen hidrojen veya oksijenin tepkimesini yavaşlatırlar. Genel olarak bu inhibitör türünü katyonlar oluşturur. Bu katyonlar kimyasal veya elektrokimyasal yöntemlerle metalin katot bölgesine taşınarak burada koruyucu bir film

tabaka oluştururlar. Böylece elektrolit ozeltide bulunan ve metal yüzeyinde indirgenmek isteyen moleküllerin bu metal yüzeyine indirgenmesini engellemeye çalışarak korozyon mekanizmasını durdurmak isterler. Örneğin kalsiyum fosfat ve kalsiyum bikarbonat türündeki katodik inhibitörler ortamda bulduklarında metal yüzeyinin çoğunluğunu örterek metalin katodik reaksiyona karşı tepki vermesini engelleyerek böylece korozyon hızını ciddi anlamda düşürmüş olurlar. Katodik inhibitörler, anodik inhibitörlerin ortamda az bulunmaları durumunda sebep olabilecekleri çukurcuk (bölgesel) korozyonuna sebep olmadıkları için ortamda az miktarda bulunmaları herhangi bir tehlike arz etmemektedir. Bu sebeple katodik inhibitörler güvenli inhibitörler olarak bilinirler.

Karma inhibitörler: Aynı anda hem katodik hem de anodik yarı tepkimelerine etki ederek korozyon mekanizmasını yavaşlatmaya çalışırlar. Bu sebeple etki düzeylerini llen potansiyele bakarak söylemek pek olanaklı değildir. Karma inhibitör olarak tanımlanan maddenin etkinliğini ancak ortamda mevcut iken ve mevcut değilken kaydedilen akım farklarına bakarak tespit etmek mümkün olabilmektedir. Akım farklarının oluşabilmesi durumuna karşılık aksine çoğu zaman potansiyelleri pek değişiklik göstermez.

Anodik veya katodik olarak kullanılan bazı inhibitörler de ortamın türüne göre bazen karma inhibitör gibi davranış sergileyerek hem anodik hem de katodik yarı tepkimesine etki edip korozyon hızını yavaşlatabilirler.

Bazı inhibitör maddeleri, metal yüzeyine fiziksel olarak adsorplanıp film oluşturma yöntemiyle doğrudan korozyonu önlemeye çalışırlar. Bazı türleri ise elektrotun yüzeyinde kimyasal tepkimeye girerek, oluşacak tepkime ürün/ ürünlerin inhibitör etkisi göstermesi yardımıyla dolaylı bir şekilde korozyonu önlemeye çalışırlar.

Adsorpsiyon ısıları fazla olmayıp düşük olan ve korozyon mekanizmasına direkt etki eden inhibitörlere birincil (primer), aksine yüksek adsorpsiyon ısısına sahip olup yüzeyde adsorplanıp birtakım elektrot tepkimeleri sonrasında meydana gelen ürün/ürünler vasıtasıyla inhibitör etkisi gstererebilen maddeler ise ikincil (sekonder) inhibitörler diye isimlendirilirler (Erbil, 2012).

1.4.2. Etki Etme Biçimlerine Göre

İnhibitörler direkt veya dolaylı şekilde, katodik ve anodik yarı tepkimelerine etki etmeleri durumlarına göre de sınıflandırılırlar. Bu anlamda etkime şekillerine göre inhibitörleri üç farklı başlık altında sınıflandırabiliriz.

Sınır Yüzeyi İnhibitörleri: Bu tür inhibitörler elektriksel çift tabakanın Helmholtz ara yüzeyindeki reaksiyonların basamaklarını yavaşlatmaya çalışırlar. Bu tür inhibitörler tepkime hızını yavaşlatmak için aktivasyon enerjisini artırır. Çünkü aktivasyon enerjisi, kimyasal bir tepkimenin meydana gelebilmesi için aşılması gereken enerji değeridir. Bu tür inhibitörlerin temel amacı da metalin Helmholtz ara yüzeyinde adsorplanıp, oluşması muhtemel olan tepkimenin aktivasyon enerjisini yükselterek tepkimenin gerçekleşmesini zorlaştırmaktır.

Elektrolit Filmi İnhibitörleri: Elektrot yüzeyinde bir difüzyon katmanı meydana getirerek reaksiyonun ilerleme hızını azaltarak korozyonu önlemeye veya azaltmaya çalışan inhibitörlerdir.

Membran (Zar) İnhibitörleri: Bu tür inhibitörler metal yüzeyinden başlayarak elektrolit çözelti içlerine doğru uzanan geçirimli gözeneklere sahip bir film tabakası meydana getirirler. Oluşan zar geçirimli bir tabaka yapısına sahip olduğundan bir elektrolit film tabakası kadar etkili olmayabilir ancak yine de yüzeyde gerçekleşecek olan tepkimelerin aktivasyon enerjisini artırarak korozyon hızının yavaşlamasına yardımcı olurlar.

1.4.3. Oksitleyici Olup Olmamlarına Göre

Bazı inhibitörler metalin yüzeyini oksitleyerek pasifleştirirler. Ancak oksitleyici olmayan inhibitörlerin metali pasifleştirebilmesi için çözelti içerisinde muhakkak oksijenin bulunması gerekir. Oksitleyici olarak bilinen inhibitörler ise pasifleştirme işlemi için, çözelti içerisinde çözünmüş oksijene ihtiyaç duymazlar, suyun yapısında var olan oksijeni kullanırlar. Bu söz edilen durumlarla alakalı olarak inhibitörler oksitleyici olan ve oksitleyici olmayan inhibitörler diye iki gruba ayrılırlar (Erbil, 2012).

1.4.4. Güvenli ve Güvenli Olmayan (tehlükeli) İnhibitörler

Miktarlarının belli bir seviyede olması sayesinde korozyon hızını azaltarak koruyuculuk sağlayan ancak bu miktarın azalması durumunda korozyon hızını artıran inhibitörler “tehlükeli inhibitörler” olarak adlandırılırken, miktarının değişmesiyle korozyon hızını hiçbir şekilde artırmayan ve derişim miktarı oranında korozyon hızını

azaltan inhibitörler ise “güvenli inhibitörler” olarak isimlendirilirler (Üneri, 1998).

1.4.5. Kimyasal Doğalarına Göre

İnhibitörleri kimyasal yapılarına göre iki gruba ayırmak mümkündür bunlar organik ve inorganik inhibitörlerdir. Organik ve inorganik yani organik olmayan inhibitörlerin korozyonu önlemeye çalışma mantığı birbirinden epeyce farklılık gösterir. İnorganik inhibitörler yaygın olarak anodik ve oksitleyici inhibitör olarak görev yaparlar. İnorganik inhibitörler genellikle nötr elektrolit çözeltilerde kullanılarak anodik yarı tepkimesine etki ederek metalin pasifleşmesine imkan sağlarlar. Bazı inorganik inhibitörler (silikat, nitrit, kromat ve ortofosfat gibi) metal yüzeyinde oluşturacakları pasif oksit film katmanı sayesinde metal iyonlarının difüzyonuna ve anodik bölgedeki çözünme durumuna karşı büyük bir engel oluşturarak korozyon hızını ciddi anlamda azaltırlar (Qi et al., 2012).

İnorganik inhibitörlerin aksine organik inhibitörler genellikle asitli çözeltilerde daha çok tercih edilirler. Organik inhibitörler, metal yüzeyine adsorplanarak koruyucu bir film tabakası oluştururlar ve böylece korozyon tepkimesinin yürümesini engelleyerek korozyonu azaltmaya çalışırlar (Döner & Kardaş, 2011).

1.5. Organik İnhibitörlerin Adsorpsiyon Yoluyla İnhibisyonu

Organik inhibitörlerin etkinlikleri, metalin yüzeyine adsorplanıp iyi bir koruyucu film tabakası oluşturmaları ile doğrudan alakalıdır. Organik madde molekülleri metal yüzeyine ne kadar çok tutunup iyi bir koruyucu tabaka oluştururlarsa korozyonu önleme konusunda da o kadar etkili olurlar. Çünkü oluşturacakları tabaka alanı genişledikçe koroziif ortamla temas edecek yüzey alanı azaltılmış olur ve bu da korozyon olayının azalmasına sebep olur. Bu sebeple inhibitör madde derişimi artıkça inhibitörün korozyonu önleme etkinliği de artmış olur. Anodik ve katodik bölgelerde metalin yüzeyine adsorplanacak olan organik inhibitör moleküllerinin oranı, metalin potansiyeline, inhibitör olarak kullanılacak maddenin molekül yapısı ve büyüklüğüne bağlı olarak büyük değişiklik gösterir.

Organik inhibitörler yaygın olarak metal yüzeyine adsorplanarak metal yüzeyini koruyucu bir film tabakası gibi örten maddeler olarak bilinirler (Tüken et al., 2012). Seçilecek olan inhibitör maddelerinin daha etkili olabilmesi için yapılarında genellikle S, O, N atomları ve aromatik halka bulunduranlar tercih edilir.

İnhibitör madde molekülleri, fiziksel, kimyasal veya hem fiziksel hem de kimyasal yöntemlerle metal yüzeyine tutunarak koruyucu bir film tabakası oluştururlar. Çoğunlukla elektronegatif grupların kimyasal adsorpsiyonda bağlanma (koordine bağ) merkezi olduğu tahmin edilir (Noor et al., 2005).

Adsorpsiyon yani inhibitör atomlarının metal yüzeyine tutunma olayı, organik inhibitör olarak kullanılacak olan bileşikte bulunan ve elektronegatifliği yüksek atomların metaldeki atomlarla elektron ortaklığı yapmaları şeklinde gerçekleşir. Organik inhibitör maddesine ait moleküllerin etkinliği yani koruyuculuğu adsorplanma yeteneğiyle doğru orantılıdır. Bu moleküllerin metali koruyabilmek için metal yüzeyinde bulunan su molekülleriyle yer değiştirerek koruyucu bir film tabakası oluşturdukları yapılan deneysel çalışmalarla ortaya konmuştur. Meydana gelen organik koruyucu film tabakasının, metal atomlarının elektrolit çözeltideki korozif iyonlarla temasını engellediği için korozyon olayını azaltmış olur.

Yapılan deneylerin sonuçlarına bakıldığında organik moleküllerin yapısında bulunan bazı grupların (etkileri tam olarak bilinmese de) inhibitör etkinliğini artırdığını yani korozyonu önleme konusunda işe yaradıklarını göstermektedir. Organik moleküllerde bulunan; OH-, -CN-, -COOH, -CHO, , -SN >CO, SO₃, -NH₃ gibi bir takım gruplar, çift bağ üçlü bağ ve tepkimeye girmemiş elektronlar var ise, metalle maddenin rahat bir şekilde etkileşime geçeceği ve böylece sıfır yük potansiyelini değiştirerek etkinliği artırıp, korozyonu engelleme konusunda başarılı oldukları bilinmektedir (Erbil, 1984).

1.6. İnhibitörlerin Adsorpsiyon İzotermi

Adsorpsiyon, inhibitör maddeye ait moleküllerin metalin yüzeyine tutunması olayıdır. Bu sayede çözeltide bulunan ve korozyona sebep olma ihtimali olan diğer moleküllerin metal yüzeyine tutunmalarını önlerler. Metal yüzeyindeki elektriksel çift tabakaya yapısı inhibitör molekülleri sayesinde değiştirilerek metalin, korozif ortamdaki iyonlarla etkileşime geçmesi engellenir. Çözelti ortamında tutunma yani adsorpsiyon yalnızca konsantrasyon ile alakalı bir durumdur. Adsorpsiyon olayının tespit edilmesi, inhibitör olarak kullanılacak maddenin etkinliğinin tespit edilmesi için son derece önemlidir. Adsorpsiyon miktarını tespit etmek için adsorpsiyon izotermi kullanılır.

Adsorpsiyon olayı fiziksel olarak oluşuyorsa, olayın gerçekleşmesi için harcanan enerji az demektir. Bu sebeple aktivasyon enerjisine duyulan ihtiyaç da az olur ancak adsorplanma olayı kimyasal olarak gerçekleşecekse olayın gerçekleşmesi için yeterli düzeyde aktivasyon enerjisine ihtiyaç duyulur.

Korozyondan korunmak istenen metal yüzeylerinin, inhibitör madde molekülleri tarafından kaplanma kesri, hem çözeltideki inhibitör konsantrasyonu ile hem de enerji ihtiyacıyla doğrudan ilgilidir. Metal yüzeyinin inhibitör madde molekülleri tarafından kaplanma kesri ile bu inhibitör maddenin çözeltideki derişimi ile olan ilişkisini açıklamak için çeşitli matematiksel formüller içeren adsorpsiyon izotermi kullanılmıştır. Bu izotermilerin hepsi inhibitör maddelerin kaplanma kesrini dolayısıyla inhibitör olarak kullanılacak maddelerin etkinliğini belirleyebilmek için kullanılsa da her izoterm kendine ait olan hesaplama şekline bağlı olarak farklılık gösterdiği söylenebilir.

Kaplanma kesri, inhibitörün koruma yüzdesinin bilinmesi yeterli olup bu değere eşit kabul edilir. Metal yüzeyinde adsorplanan (tutunan) inhibitör maddenin korozyonu epeyce yavaşlattığı kabul edilir. Buna göre; kaplanma kesri (θ), için (Erbil, 1984):

$$\theta = 1 - \frac{\text{inhibitörlü koşullardaki korozyon hızı}}{\text{inhibitörsüz koşullardaki korozyon hızı}} \quad (1.4)$$

(1.4) bağıntısı yazılarak hesaplama yapılır. Varsayımlara göre kaplanma kesri ile korozyon hızı arasında ters bir orantı söz konusudur. Metal yüzeyinde inhibitörlü maddeye ait moleküllerin fazla adsorplanmaları kaplanma kesrinin büyümesine neden olur ve bu durum da koruyuculuğu artırır. Yukarıdaki bağıntıdan da (1.4) anlaşılacağı üzere kaplanma kesri için, inhibitörlü ve inhibitörsüz ortamlarda yapılacak ayrı ayrı deneylerde korozyon hızları bulunarak hesaplama yapılır. Adsorpsiyonun hangi izoterme uyduğu çizilecek grafikler sayesinde belirlenebilir (Erbil, 2012).

İnhibitör maddenin olmadığı asitli çözeltilerde, metallerin yüzeyi kaplanamayacağı için metaller ile çözeltideki korozif madde molekülleri hızlı bir şekilde tepkimeye girerek korozyon olayı başlar. Asit çözeltilerine inhibitör madde eklendiğinde ise inhibitör madde tanecikleri (molekülleri) hızlı bir şekilde çıplak olan metalin yüzeyine fiziksel veya kimyasal yöntemle adsorplanarak korozyon için aktif

olan yüzeyi küçültürler ve böylece çözeltideki korozif iyonların metal ile tepkimeye girmesi engellenerek korozyon hızı yavaşlatılmış olur. İnhibitör olarak kullanılacak olan maddenin metal yüzeyini kaplamasıyla hesaplanacak olan yüzey kaplanma kesrinin (θ) 1' e eşit olması durumunda inhibitörlü ortamda korozyon hızı sıfır demektir. Ancak bunun pek mümkün olacağı söylenemez. Asitli çözeltilerde kullanılacak olan organik inhibitör maddeler sadece yüzeyi ince bir film tabakası ile kaplayarak koruma sağlamazlar aynı zamanda yük dağılımını değiştirerek yüzey potansiyelinin değişimini de sağlayarak korozyonu azaltmaya çalışırlar.

Adsorpsiyon kaplanma kesrini hesaplamak için en çok tercih edilen izoterm, Langmuir adsorpsiyon izotermidir. Langmuir adsorpsiyon izotermi homojen adsorpsiyon için kullanılır. Bu izoterminde kaplanma kesrini hesaplamak için,

$$\frac{\theta}{1-\theta} = K \cdot C \quad (1.5)$$

(1.5) bağıntısı kullanılır. Bağıntıdaki (θ) metal yüzeyindeki kaplanma kesri, (C) çözeltideki inhibitör konsantrasyonu ve (K) ise adsorpsiyon denge sabitini ifade etmektedir. Eşitliğin lineer denklemi yazılıp grafiği çizildiğinde, grafik bir doğru denklemi verir. $\frac{\theta}{1-\theta} = K \cdot C$ değişimi doğrusaldır ve deney sonuçlarının bunu doğrulaması, metal yüzeyindeki adsorpsiyonun Langmuir adsorpsiyon izotermine uyduğunu gösterir.

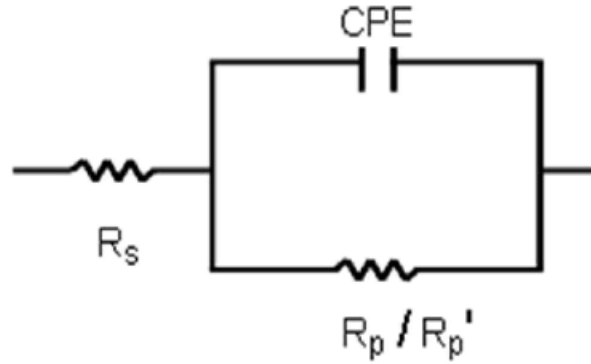
1.7. Adsorpsiyon Termodinamiği

Metal yüzeyinde gerçekleşen adsorpsiyon olayı termodinamik prensiplerine dayalı olup sistemin dengede olmasını gerektirir. Şayet sistemde dengesizlik varsa olay devamlı bir tarafa kayar. Sabit sıcaklık ve basınç altında sistem, serbest enerjisini azaltacak yöne doğru kayar. Sabit basınç ve sıcaklık altında adsorpsiyon olayı kendiliğinden ve istemli bir şekilde gerçekleşir ve bu durumda serbest enerji değişimi başka bir deyişle adsorpsiyon serbest enerjisi (ΔG°_{ads}) daima negatif (-) işaretli olur.

Adsorpsiyon ısısı olarak da kullanılan adsorpsiyon entalpisinin (-) işaretli olması olayın ekzotermik yani ısı veren, (+) işaretli olması ise olayın endotermik yani ısı alan şeklinde gerçekleştiğini gösterir.

1.8. Alternatif Akım (AC) İmpedans Yöntemi

Alternatif akım (AC) impedans tekniği son yıllarda korozyonu önleme araştırmalarında çok sık tercih edilen bir teknik olduğunu kanıtlamıştır (Berradja, 2019). Bu teknikte metal yüzeyine sürekli alternatif akım uygulanarak akımın devamlı yön değişikliği yapması sağlanır böylece yüzeyde belli bir yönde polarizasyonun olması engellenmiş olunur. Bu tekniğin uygulanabilmesi için metal/çözelti ara yüzeyini temsil eden bir eşdeğer devre tasarlanmıştır (Erbil, 2012). Metal/çözelti ara yüzeyinde meydana gelen çift tabakadaki, çift tabaka kapasitesi ve metal yüzeyi ile çözelti derinliklerinde oluşan dirençlerin meydana getirdiği “elektronik eşdeğer devre” modellenerek polarizasyon direnci tespit edilebilmektedir. Sıradan bir korozyon olayında metal/çözelti ara yüzeyinde meydana gelen elektrokimyasal çift tabakaya uygun eşdeğer devre Şekil 1.3’ te verilmiştir.



Şekil 1. 3: Metal/çözelti ara yüzeyinin eşdeğeri olarak kullanılan devre

Eşdeğer devrede devre elemanları olarak; çözelti direnci için (R_s) kavramı, yumuşak çelik yüzeyinin düzgün ve homojen olmaması sebebiyle çift tabaka kapasitansı (C_{dl}) yerine, sabit faz elemanı ve film sabit faz elemanı için (CPE) kavramı kullanılmıştır (Doğru Mert et al., 2011; Özcan & Dehri, 2012). Burada; R_p , inhibitör ($R_p = R_{ct} + R_d$) yokluğunda metal/çözelti ara yüzeyindeki yük transfer direncini (R_{ct}) ve (R_d) ise difüz katman direncini ifade etmektedir. R_p' , biriken türleri (R_a), R_p yüzeydeki kaplama ve film direncini (R_f), ($R_p = R_p (R_{ct} + R_d) + R_a + R_f$) ifade etmektedir. Bu eşdeğer devrede yer alan (CPE) ve (C_{dl}) kavramları Mansfeld'e göre hesaplanır (Hsu & Mansfeld, 2001).

$$Z_{CPE} = Y_o^{-1}(j\omega)^{-n} \quad (1.6)$$

Bağıntıda (1.6) yer alan Y_o , j , ω ve n sembolleri sırasıyla orantılılık katsayısı, $j^2 = -1$ sanal sayı, açısal frekans ve faz kaymasını ifade etmektedir.

$$C_{dl} = Y_o(\omega^m)^{n-1} \quad (1.7)$$

Burada (1.7) $\omega^m = 2\pi f_{max}$ (açısal frekans), f_{max} ise impedans bölgesindeki sanal maksimum frekans değeridir.

1.9. İnhibitör Etkinliğinin Saptanması

Korozyon inhibitörü olarak tercih edilecek maddelerin verimliliğini belirlemek için kullanılacak yöntemler genel anlamda korozyon hızını ölçmek için kullanılan yöntemlerle aynıdır. İnhibitör maddenin etkinliği, korozyon hızını yavaşlatıp istenmeyen bu durumu engellemeye çalışması ile doğrudan ilgili bir durumdur. İnhibitör olarak kullanılacak olan maddenin yapısı veya kullanılacağı ortamın türü önemli olsa da inhibitörün etkinliği yani verimliliği direkt olarak korozyon hızını ne kadar azalttığı ile alakalıdır. Bir inhibitörün etkinliğini belirlemek için metalik malzemenin inhibitörlü ve inhibitörsüz ortamlardaki ölçülen korozyon hızlarının karşılaştırılması gerekir. Bu anlamda bir metalin inhibitörsüz ortamdaki yüzey direnci (R_p) ve ortama inhibitör eklenerek yapılan deney sonucunda elde edilecek yüzey direnci (R_p') olarak belirtilirse, inhibitör etkinliği ($\%IE$) aşağıda verilen (1.8) bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

$$\% IE = \frac{R_p' - R_p}{R_p'} \times 100 \quad (1.8)$$

1.10. Çalışmanın Amacı

Günlük hayatımızın vazgeçilmezi haline gelen metallerin ve özellikle de metallerin bir alaşımı olan yumuşak çeliğin düşük maliyeti nedeniyle sanayide ciddi oranlarda kullanımını söz konusudur. Endüstride ve sanayide kullanımı bu kadar yaygın olan bu tür metalik malzemelerin üretimi sırasında hem emek hem de enerji harcanması

nedeniyle bu malzemelerin kullanımı sırasında hassasiyet gösterilmesi önemlidir. Bu tür metalik malzemelerin kullanımından kaynaklı yüzeylerinde oluşan kirlerin temizlenmesi için genellikle asit kullanılır ancak yapılacak temizlik işlemi sırasında metalin yüzeyinde arzu edilmeyen madde kayıpları meydana gelir. İnhibitör kullanımı bu tür kayıpların oranını en aza indirmek için sık tercih edilen bir yöntemdir. Metalik malzemenin yüzeyi, ortama eklenen organik inhibitör madde moleküllerinin adsorplanmasıyla bir film tabakası şeklinde kaplanarak korozif ortamdaki moleküllerle teması azaltılır ve böylece korozyon hızı önemli derecede azaltılmış olur. Azot içeren heterosiklik organik bileşiklerin, korozyonu önleme konusunda başarılı oldukları bilinir.

Bu çalışmada; yumuşak çeliğin 0,5 M hidroklorik asit çözeltisi içerisinde farklı derişim ve farklı sıcaklıklarda korozyonu önlemek için 2-Amino-1, 3, 5-triazine-4,6-dithiol' ün inhibisyon etkisi, elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS), potansiyodinamik polarizasyon (PDP), lineer polarizasyon direnci (LPR), taramalı elektron mikroskobu (SEM), atomik kuvvet mikroskobu (AFM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ve yüzey haritalama (EDX-Mapping) yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda amacımız literatüre yeni bir organik inhibitör kazandırmaktır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Dehri et al., (2006), yumuşak çeliğin, feniltiyöüre (PTU), tiyobenzamit (TBA)'in ve Metiltiyöüre (MTU)' nin 0,1 M H₂SO₄ çözeltisi içerisindeki korozyon davranışları, farklı sıcaklık değerlerinde yapılan deneylerle çalışılmıştır. Bu çalışmada kullanılan elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS), polarizasyon direnci ve polarizasyon eğrileri ölçüm yöntemleri neticesinde yukarıda adı verilen tüm inhibitör maddelerinin, farklı sıcaklık değerlerinde iyi inhibisyon gösterdikleri ortaya çıkmıştır. Ayrıca Nyquist eğrilerinin sonuçları göz önünde bulundurulduğunda her sıcaklık değerinde MTU' nun diğerlerine göre nazaran daha düşük inhibisyon etkinliği göstermiştir. Korozyon akım yoğunlukları değerleri, pH ile korozyon potansiyeli (gerilimi) kullanılıp hesaplanmıştır.

Özcan et al., (2008), 25 °C sıcaklıkta 1 M H₃PO₄ çözeltisinde çözünen, 5,5-dietilbarbitürik asit sodyum tuzu(DEBA), barbitürik asit (BA) ve tiobarbitürik asit (TBA) maddelerini inhibitör olarak kullanmışlardır. Deneylerini, elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS), potansiyodinamik polarizasyon (PDP) ve lineer polarizasyon direnci (LPR) ölçüm tekniklerini kullanarak yürütmüşlerdir. Yaptıkları deneysel sonuçlara göre inhibitör etkinliği olarak TBA' nın BA' ya göre daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. TBA moleküllerinin, yumuşak çelik yüzeyine adsorpsiyonu ile ilgili grafiğik Langmuir izotermine uymaktadır. Bu iki maddenin inhibitör etkinliği ve kuantum kimyasal parametreleri hesaplanarak korozyonu engelleme oranı ile ilgili kıyaslamaları yapılmıştır.

Keleş et al., (2008), yumuşak çeliğin 0,5 HCl çözeltisi içerisindeki korozyon durumu ile ilgili, Aminobifenil (Aph) ve 2-3-(hidroksibenzildienamino) bifenil'in (Aph-S) maddelerinin inhibitör etkileri, potansiyodinamik polarizasyon (PDP) ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ölçüm yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır. Elde edilen polarizasyon eğrileri sonuçları, Aph inhibitörünün katodik inhibitör olarak, Aph-S inhibitörünün ise karma inhibitör olarak davrandığını ortaya koymuştur. Her iki maddenin de adsorpsiyon grafikleri, Langmuir izotermine uymaktadır. Elde edilen bulgular, derişim artkça inhibitör etkinliğinin de orantılı bir

şekilde arttığını göstermiştir. Her iki maddeye ait termodinamik hesaplamalar yapılmış ve birbirleriyle kıyaslanmıştır.

Ali et al., (2012), yumuşak çeliğin karbondioksit ile doyurulmuş 0,5 M NaCl çözeltisindeki korozyon durumu ile ilgili, Dietilen tetra amin imidazolin (I) dönüşümü, tetra etil penta amin imidazolin (II) ve bis imidazolin (III) dönüşümünün inhibisyon etkinliklerini araştırmışlardır. Yapılan deney ve ölçüm sonuçları, karbondioksit ile doyurulmuş 0,5 M NaCl çözeltisindeki imidazolinlerin yüksek oranda inhibitör etkinliği gösterdikleri belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışma farklı sıcaklık değerlerinde de denenip ölçümleri alınmış ve ölçüm sonuçları sıcaklık arttıkça inhibitör maddelerinin daha fazla etkili olduklarını göstermiştir. 100 ppm derişim ve 40°C sıcaklıkta imidazolinler; (I), (II), (III) inhibisyon etkisinin sırasıyla %84, %95 ve % 96 olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar gösteriyor ki bu maddeler çelik yüzeyine hızlı bir şekilde adsorplanarak iyi bir koruma sağlamaktadırlar.

Yang et al., (2013), 1 M HCl çözeltisi içindeki yumuşak çeliğin korozyonuna karşı 3-piridinkarboaldehit tiyosemikarbozon (3-PCT)' un inhibitör etkisi araştırılmıştır. Bu çalışma, potansiyodinamik polarizasyon (PDP), elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ve kütle kaybı gibi ölçüm teknikleri tercih edilerek yürütülmüştür. Sıfır yük potansiyel ölçüm tekniği kullanılarak metal-çözelti ara yüzeyindeki inhibitör mekanizması tespit edilmiştir. Yapılan deney ve ölçüm sonuçları, hidroklorik asit içindeki bu inhibitörün hem katodik hem de anodik tepkimelerini yavaşlattığını göstermiştir. Metal yüzeyinde ölçülen adsorpsiyon mekanizmasının Langmuir izotermine uymakta olduğu tespit edilmiş ve ayrıca birtakım termodinamik parametreler (E_a , K_{ads} ve ΔG°_{ads}) hesaplanarak sonuçları tartışılmıştır.

Solmaz, (2013), 0,5 M hidroklorik asit çözeltisi içindeki yumuşak çeliğin korozyonuna karşı vitamin B1'in inhibitör etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmadaki inhibitör etkinliği elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS), kronoamperometri ve dönüşümlü voltametri ölçüm teknikleri kullanılarak tespit edilmeye çalışılmıştır. Çözeltide bekletilen yumuşak çeliğin yüzey analiz araştırması, enerji dağılımı X ışınları spektroskopisi (EDX), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) vasıtasıyla yapılmıştır. Metal yüzeyinde ölçülen adsorpsiyonun Langmuir izotermine uyduğu tespit edilmiştir.

Yıldız et al., (2014), 0,1 M hidroklorik asit çözeltisi içindeki 2- Pridinarbonitril 'in (2-PCN) yumuşak çeliğin korozyonuna karşı inhibisyon etkinliği araştırılmıştır. Çalışmada potansiyodinamik polarizasyon (PDP), lineer polarizasyon direnci (LPR), ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) gibi ölçüm teknikleri kullanılmıştır. Sıfır yük potansiyeli tekniğiyle adsorpsiyon mekanizması belirlenmiştir. Yumuşak çelik 120 saat boyunca hem inhibitörsüz hem de 10 mmol L⁻¹ 2-PCN içerikli çözelti ortamlarında bekletildikten sonra çıkartılıp yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelenmiştir. K_{ads} ve ΔG°_{ads} gibi termodinamik parametreler hesaplanmıştır. Ayrıca bu inhibitör maddeye ait adsorpsiyonun Langmuir izotermine uyduğu da görülmüştür.

Yıldız, (2014), 0,1 M hidroklorik asit çözeltisinde 4-amino-3-hidroksinaftalen-1-sülfonik asidin (4A3H1S) yumuşak çelikteki korozyona karşı davranışları farklı derişimlerde incelenmiştir. Bu çalışmada elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS), potansiyodinamik polarizasyon (PDP) ve Lineer Polarizasyon direnci (LPR) gibi ölçüm yöntemleri kullanılmıştır. Ayrıca yumuşak çeliğin yüzeyi, elektron mikroskobu (SEM) ile taranıp görüntülenerek analizi yapılmıştır. Sıfır yük potansiyeli (E_{pzc}) ölçümü vasıtasıyla metal ve çözelti ara yüzeyindeki inhibisyon sistemi saptanmıştır. Yumuşak çelik yüzeyinde 4A3H1S' nin iyi adsorplandığı ve Langmuir adsorpsiyon izotermine uyduğu tespit edilmiştir.

Yıldız, (2015), 0,1 M HCl' de farklı derişimlerde kullanılan 4,6-diamino-2-pirimidinetiliolun (4D2P) yumuşak çelikteki meydana gelecek korozyon üzerindeki etkisi değişik ölçüm teknikleri kullanılarak saptanmaya çalışılmıştır. İnhibitörün etkisini belirlemek için bu çalışmada elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS), potansiyodinamik polarizasyon (PDP) ve Lineer Polarizasyon direnci (LPR) gibi ölçüm yöntemleri kullanılmıştır. Sıfır yük potansiyeli (E_{pzc}) ve elektronik ölçüm parametreleri kullanılarak inhibisyon mekanizması tespit edilmiştir. 4D2P' nin yumuşak çelik yüzeyindeki belirlenen adsorpsiyonun Langmuir izotermine uyduğu tespit edilmiştir. 4D2P'nin yumuşak çelik yüzeyindeki korozyon etkisini belirlemek için ayrıca elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleme yapılarak anlaşılmaya çalışılmıştır. Bütün bu ölçme ve tarama yöntemlerine ilaveten kuantum hesaplamaları da yapılmış ve elde edilen parametreler tartışılmıştır.

Sığırcık et al., (2017), N,N'-bis(1-feniletanol) etilendiamin maddesi sentezlenerek bu maddenin 0.5 M HCl asit çözeltisi içindeki yumuşak çeliğin korozyon mekanizmasına karşı nasıl bir davranış sergileyeceği çeşitli teknikler kullanılarak inhibisyon etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada Potansiyodinamik ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ölçüm teknikleri kullanılmıştır. Bu maddenin korozyona olan etkisi farklı derişim ve sıcaklık değerlerinde çalışılarak araştırılmıştır. Yumuşak çelik yüzeyinde meydana gelen koruyucu film tabakasını incelemek ve görüntülemek için SEM, UV-görünür ve FT-IR analizleri de yapılmıştır.

Keleşoğlu et al., (2019), elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) potansiyodinamik polarizasyon (PDP), ve lineer polarizasyon direnci (LRP) teknikleri kullanılarak 1-(2-Hidroksietil)-2-imidazolidinonun (2-HEI) 0.5 M HCl çözeltisindeki yumuşak çeliğin korozyonu üzerindeki inhibitör davranışları, farklı derişim ve sıcaklıklarda incelenmiştir. Yapılan deney ve ölçüm sonuçları derişim arttıkça inhibisyon etkisinin arttığını, sıcaklık arttıkça ise azaldığını göstermiştir. Korozyon olayının yumuşak çelik yüzeyindeki etkisinin incelemek için yüzey elektron mikroskobu (SEM) ile taranarak görüntüleme yapılmıştır. Yumuşak çelik yüzeyi üzerindeki 1-(2-Hidroksietil)-2-imidazolidinonun adsorpsiyon mekanizması ekzotermik olup elde edilen adsorpsiyon mekanizmasının Langmuir adsorpsiyon izotermine uyduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kuantum hesaplamaları yapılarak elde edilen parametrelerin deney sonuçları ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Yıldız, (2019), 2,4-Diamino-6-hidroksipirimidin (2D6H), potansiyodinamik ölçümler, lineer polarizasyon direnci (LPR), taramalı elektron mikroskobu (SEM), elektrokimyasal deneyler ve kuantum kimyasal hesaplamaları kullanılarak 0,1 M HCl içinde yumuşak çeliğin (MS) korozyon inhibitörü olarak incelenmiştir. Tüm ölçümler, korozyon önleme etkinliğinin, 0,5 ila 10,0 mM aralığındaki bütün 2D6H derişimlerde olduğunu göstermektedir. MS yüzeyinde 2D6H' nin HCl varlığında adsorpsiyonunun Langmuir adsorpsiyon izotermine uyduğu belirlendi. Kuantum kimyasal hesaplamalarla açıklanan elektronik özellikler, deneysel inhibisyon üretkenlikleriyle ilişkilendirildi. İnhibisyon mekanizması E_{pzc} ölçümleri ile ortaya çıkarılmıştır.

Bashir et al., (2020), Bronopol'un 0,5 M HCl çözeltisindeki alüminyum metali için bir korozyon inhibitörü etkinliği araştırıldı. Bu araştırma için, kütle kaybı (WL), potansiyodinamik polarizasyon (PDP) ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi

(EIS) gibi ölçüm tekniklerinin yanı sıra atomik kuvvet mikroskobu (AFM) analizi kullanıldı. Yapılan ölçüm teknikleri ve analiz sonuçları Bronopol' un 4000 ppm derişimde maksimum %93,89 inhibisyon etkinliğini sergilediği tespit edilmiştir. Metal yüzeyinde meydana gelen adsorpsiyon mekanizmasının Langmuir adsorpsiyon izotermine uyduğu tespit edilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrileri Bronopol' un karışık bir inhibitör olduğunu ortaya çıkardı. Deneysel ve teorik sonuçlar, Bronopol' un çevre dostu bir korozyon inhibitörü olduğunu ortaya koydu.

Teng et al., (2021), Kirazlardan elde edilen biyo dostu bir antosiyaninin, 1 M hidroklorik çözeltisi içerisindeki yumuşak çeliğin korozyona karşı inhibitör durumu araştırıldı. Bu çalışmada, kütle kaybı testi, elektrokimyasal yöntemler ve yüzey ölçümleri kullanılarak veriler değerlendirildi. Elde edilen elektrokimyasal analiz sonuçları, antosiyanin, 800 mg / L'de maksimum inhibisyon verimi % 94,44 olarak belirlendi ve bu maddenin karma tip bir inhibitör olduğu tespit edildi. Antosiyaninin çelik yüzey üzerinde adsorpsiyonunun Langmuir izotermine uyduğu belirlendi. Yüzey analizi için de taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanıldı. Ayrıca kuantum kimyasal hesaplamalar da yapılarak sonuçlar değerlendirildi. Tüm veriler değerlendirildiğinde antosiyaninin karma bir inhibitör olduğu ve korozyonu önlemek amacıyla kullanılabileceği belirlenmiştir.

Salcı et al., (2022), 2-(2-aminofenil)benzimidazol (APBI) maddesinin 1 M HCl çözeltisi içindeki yumuşak çeliğin korozyonuna karşı inhibitör etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmada yöntem olarak potansiyodinamik polarizasyon (PDP), lineer polarizasyon direnci (LPR), elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS), döngüsel voltametri (CV) ve kronoamperometri (CA) ölçümleri tercih edildi. Yüzey analizi için ise enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) yöntemleri kullanıldı. İnhibitör varlığında çeliğin sıfır yükü (E_{pzc}) EIS yöntemi ile belirlendi ve bir adsorpsiyon süreci değerlendirildi. Deney sonuçları en yüksek inhibisyon etkinliğinin %98,8 olduğunu gösterdi. Yüksek inhibisyon etkinliği, APBI'nin yumuşak çeliğin yüzeyinde önemli derecede adsorplanarak koruyucu bir tabaka oluşturduğunu göstermektedir. APBI'nin yumuşak çelik yüzeyinde adsorpsiyonu aşındırıcı çözeltide Langmuir adsorpsiyon izotermine uyduğu görülmüştür.

Kaya et al., (2023), bu çalışmada, *Rheum ribes'in* (RR) çiçek özütünün adsorpsiyon ve korozyondan koruma yeteneği yumuşak çelik (MS) üzerinde 1 M HCl çözeltisinde elektrokimyasal teknikler yardımıyla incelenmiştir. Test çözeltilerine maruz bırakıldıktan sonra yumuşak çelik yüzeyi, taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ve temas açısı ölçümleriyle incelenmiştir. RR moleküllerinin MS yüzeyinde adsorpsiyonuna ve özüt içeren çözeltide çeliğin fazla yüzey yüküne karşılık gelen bazı termodinamik parametreler hesaplanmış ve korozyon önleme işleminin olası bir mekanizması tartışılmıştır. MS yüzeyinde oluşan özüt filmin dayanıklılığı potansiyodinamik ve potansiyostatik koşullar altında incelenmiştir. Korozyonun önlenmesinden sorumlu olan, MS yüzeyinde oluşan yapışkan ve düzgün dağılmış bir özüt filminin olduğu bulunmuştur. Çiçek özütünün, 1 saat ve 6 saat korozif ortama maruz kaldıktan sonra 1000 ppm konsantrasyonda %94,7 ve %98,4 koruma verimliliği sağladığı tespit edildi. RR çiçek özütü, ağırlıklı olarak katodik sürece ek olarak anodik reaksiyonları da yavaşlatmıştır.

Ziouani et al., (2023), Schiff bazının (1Z)-N-[2-(metiltio) fenil]-2-oksopropan hidrazonoil klorür(S1)' ün 1,0 M HCl içindeki yumuşak çeliğin korozyonuna karşı inhibitör etkisi araştırılmıştır. Bu çalışma, potansiyodinamik polarizasyon (PDP), kütle kaybı (WL) ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ve yüzey analizleri gibi ölçüm teknikleri kullanılarak yürütülmüştür. Deneysel sonuçlar, schiff bazının (S1) iyi bir inhibitör etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Derişim arttıkça inhibisyon etkisinin de arttığı belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışma farklı sıcaklık değerlerinde de (25 °C'den 55 °C' ye) çalışıldı ve en iyi inhibiör etkinliğinin $2,5 \times 10^{-3}$ M S1 çözeltisinde %87 olarak görüldü. Tüm deneysel sonuçlardan S1' in yumuşak çelik yüzeyine adsorbe edildiğinin ve böylece yumuşak çeliğin korozyon reaksiyonlarını engellediği tespit edilmiştir. Yumaşak çelik yüzeyindeki adsorbe olayının Lagmuir adsorpsiyon izortermine uyduğu belirlenmiştir.

Muthukrishnan et al., (2023), Yumuşak çelik korozyonuna inhibisyon etkisi bu çalışmada dibenzalaseton türevleri 1, 5-bis(2-nitrofenil)-1, 4-pentadien-3-on (BPDO)' nun yumuşak çeliğe korozyon inhibitör olarak 1 M H₂SO₄ çözeltisinde çalışılmıştır. Bu çalışma potansiyodinamik polarizasyon ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ve yüzey analizleri gibi ölçüm teknikleri kullanılarak yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarına göre konsantrasyonun artışıyla inhibitör etkinliğinin de arttığı, sıcaklığın artışıyla ise azaldığı tespit edilmiştir. BPDO' nun 1 M H₂SO₄ içinde karma inhibitör

olarak davrandığı görülmüştür. Hem polarizasyon hem de elektrokimyasal impedans testlerinde 308K ve 300 ppm BPDO kullanıldı ve sırasıyla %98,41 ve %97,57'lik maksimum inhibisyon verimliliğinin ortaya çıktığı görüldü. Yumuşak çelik yüzeyindeki adsorplanmanın Langmuir adsorbsiyon izotermine uyduğu tespit edilmiştir.

Yousef et al., (2023), Yeni triazole bağlı sakarin türevleri, yani 2- (3- metil-1H-1, 2, 4-triazol-5-il) benzo [d] izotiazol-3 (2H) -on 1, 1-dioksit (MTD) ve 2- (3-izopropil-1H-1,2,4-triazol-5-il)benzo[d]izotiazol-3(2H)-on 1,1-dioksit (ITD) mikrodalga ışınlama yöntemiyle sentezlenen bu inhibitörler, ¹H NMR, ¹³C NMR, FT-IR ve kütle spektroskopik yöntemleri aracılığıyla karakterize edildiler. Bu iki bileşiğin yumuşak çelik (MS) için 0,5 M HCl'de korozyon inhibitörleri olarak davranışları elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS), kütle kaybı (WL) ve potansiyodinamik polarizasyon (PDP) çalışmaları ile doğrulandı. Yapılan derişim ve sıcaklık deney sonuçlarına göre test edilen MTD ve ITD, 0,8 mM'de sırasıyla %94 ve %96'lık yüksek değerlerle korozyonu önleme başarılarının iyi olduğunu gösterdi. MTD ve ITD'nin polarizasyon çalışmaları neticesinde karma tip inhibitörler gibi davrandığını ortaya koydu. Metal yüzeyinde ölçülen adsorpsiyonun Langmuir izotermine uyduğu tespit edilmiştir. MS üzerinde MTD ve ITD'nin, standart adsorpsiyon serbest enerjisinden gözler önüne serilen değerler neticesinde tipik fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon davranışını gösterdiği belirlenmiş ve ayrıca yumuşak çeliğin yüzey analizini araştırmak için SEM, XPS ve XRD yöntemleri kullanılmıştır.

Bedair et al., (2023), Verici-alıcı yapıya sahip yeni sentezlenmiş kumarin-buta-1, 3-dien konjuge boyalar hazırlandı. Sentezlenen bu boyaların karakterizasyonu IR, ¹H NMR ve Kütle parçalanma analizi kullanılarak onaylanmıştır. Sentezlenen kumarin bileşiklerinin adsorpsiyon özellikleri deneysel olarak belirlendi ve teorik yöntemlerle ölçüldü. Sentezlenen kumarin boyalarının asitte çeliğe karşı korozyon önleyici etkisi ortam, plazma atomik emisyon spektrometresi, ağırlık kaybı ve elektrokimyasal yöntemlerle incelenmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon tekniği kullanılarak yapılan ölçüm sonuçlarına göre en yüksek inhibisyon verimi %97,62 olarak tespit edilmiştir. Yüzey koruma incelemesi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını (EDX) kullanılarak araştırılmıştır. Ayrıca inhibitörlerin adsorpsiyon mekanizması incelendi. Deneysel ve teorik sonuçlar bu boyaların çeliğin yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturarak korozyon mekanizmasını yavaşlattığı yeteneğine sahip olduğunu göstermiştir.

Keleşoğlu et al., (2023), 0,5 M HCl çözeltisi içindeki yumuşak çeliğin korozyonuna karşı Pirazinkarboksamid maddesi inhibitör olarak çalışılmıştır. Bu çalışmada elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) potansiyodinamik polarizasyon (PDP) ve lineer polarizasyon direnci (LRP) ölçümleri gibi elektrokimyasal yöntemler kullanılmış ve deneyler Pirazinkarboksamid* in 0,25 mM ile 1,0 mM arasında değişen farklı derişimlerinde yapılmıştır. Pirazinkarboksamid inhibitör maddesinin yumuşak çelik yüzeyindeki inhibisyon etkisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile taranarak incelenmiştir. Yumuşak çelik yüzeyinde meydana gelen adsorpsiyonun Langmuir adsorpsiyon izotermine uyduğu tespit edilmiştir. En yüksek derişim olan 1,0 mM inhibitörlü çözelti ortamındaki inhibisyon etkinliği %93,5 olarak tespit edilmiştir. Deneysel verilere ilaveten kuantum hesaplamaları da yapılarak elde edilen parametre sonuçları tartışılmıştır.

3. MATERYAL ve METODLAR

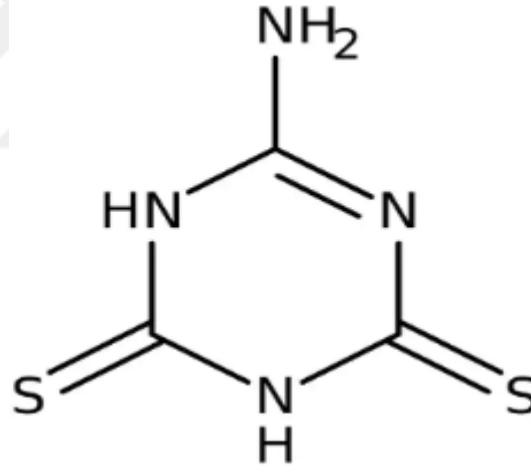
3.1. Materyaller

0,5 M hidroklorik asit çözeltisi içindeki yumuşak çeliğin korozyonuna 2-Amino-1, 3, 5- triazine-4, 6- dithiol (2-ATD) organik maddesinin inhibitör etkinliğinin değişik konsantrasyon ve sıcaklıklarda incelenmesinde kullanılan materyaller:

3.1.1. Araştırmada Kullanılan Kimyasal Malzemeler

Araştırılan inhibitör madde: 2-Amino-1, 3, 5-triazine-4, 6-dithiol (2-ATD)

(Alfa Aesar,% 90)



Şekil 3. 1: İnhibitörün (2-ATD' nin) molekül yapısı

HCl çözeltisi: 0,5 M hidroklorik asit çözeltisi için 12,06 Molarlık Merck marka HCl tercih edilmiştir.

Etanol: Metal yüzeydeki oksit ve yağları temizlemek için önce etanol ardından saf su kullanıldı.

Saf su: Çözeltilerin oluşturulması ve deneyler sırasında kullanılan araç- gereçlerin temizlenmesi amacıyla kullanıldı.

3.1.2. Kullanılan Elektrotlar

Çalışma elektrodu: İçeriği C (% 0,18), Mn (% 0,71), P (% 0,19), S (% 0,04), N(% 0,20), Si(% 0,24) , O (% 0,41) Cu (% 0,26) ve Fe (% 97,77) oranlarından oluşan endüstriyel yumuşak çelik tercih edilmiştir.

Referans Elektrot: Referans elektrot olarak Gümüş-gümüş klorür elektrodu (Ag/AgCl, Cl⁻) tercih edilmiştir.

Karşı Elektrot: Karşı elektrot olarak yüzey alanı 2 cm² olan platin kullanılmıştır.

3.1.3. Kullanılan Cihazlar

Elektrokimyasal Analizör: Elektrokimyasal ölçümlerin elde edilmesinde Gamry instruments potentiostat/galvanostat/ZRA/3000 model elektrokimyasal analizör cihazı tercih edilmiştir.

SEM (Scanning Electron Microscope): İnhibitörlü ve inhibitörsüz çözelti ortamında bulundurulan yumuşak çeliğin yüzey morfolojisini görüntülemek için Leo Evo 40 model taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır.

AFM (Atomic Force Microscope): İnhibitörlü ve inhibitörsüz çözelti ortamındaki yumuşak çeliğin yüzey analizini yapmak için Park system XE-100 model atomik kuvvet mikroskobu kullanılmıştır.

EDX (Enerji Dağılımlı X-ışını spektroskopisi) – EDX-Mapping: İnhibitörlü ve inhibitörsüz çözelti ortamındaki yumuşak çeliğin kimyasal karakterizasyonunu/element analizini yapmak için Bruker XFlash 6I10 model cihaz tercih edilmiştir.

Metal Parlatici: Çalışma elektrodu olarak kullanılacak olan yumuşak çeliğin yüzeyini pürüzsüz hale getirmek için yani parlatmak için kullanıldı. Yüzeyi parlatmak için; 180, 500 ve 1800 gritlik zımpara kağıtları tercih edilip kullanılmıştır.

Termostat: Çalışılan ortamın sıcaklığını ayarlamak için kullanılmıştır.

3.2. Metod

3.2.1. Kullanılan Elektrotların Hazırlanması

Yapısındaki metallerin ve oranlarının bilindiği yumuşak çelik 5 cm'lik silindirik çubuklar şeklinde hazırlanıp bir ucu bakır telle metalik bağlantı oluşturularak ve diğer ucunun yüzeyi açıkta olacak biçimde geri kalan kısımları polyester ile kaplatılmıştır. Çalışma için açıkta bırakılan yumuşak çelik yüzey alan ölçüsü 0,5 cm²' dir. Yumuşak

çeliğin açıkta kalan çalışma yüzeyi her ölçüm öncesinde mekanik parlatici ile farklı boyutlu zımpara kağıtları kullanılarak yapılan parlatma işleminden sonra saf suyla temizlenip filtre kağıdı yardımıyla kurutma işlemi gerçekleştirildikten sonra çalışma çözeltisine daldırılmıştır.

3.2.2. Elektrolit Çözelti Ortamının Hazırlanması

Derişim deneyleri için 25 °C sabit sıcaklıkta 0,5 M HCl çözeltisi ve 0,5 mM, 1 mM, 5 mM ve 10 mM derişimlerde 2-Amino-1, 3, 5-triazine-4,6-dithiol (2-ATD) içeren çözelti ortamları tercih edilmiştir.

Sıcaklık deneyleri için 25-55 °C sıcaklık aralığında 0,5 M HCl çözeltisi ve 10 mM sabit derişimlerde 2-Amino-1, 3, 5-triazine-4, 6-dithiol (2-ATD) içeren çözelti ortamları kullanılmıştır.

Zamanla elde edilen ve hidrojen gazı salınımı deneyleri için 25 °C sabit sıcaklıkta 0,5 M HCl çözeltisi ve 10 mM sabit derişimde 2-Amino-1, 3, 5-triazine-4, 6-dithiol (2-ATD) içeren çözelti ortamları kullanılmıştır.

Metal yükü belirleme deneyi için 25 °C sabit sıcaklıkta 10 mM sabit derişimde 2-Amino-1, 3, 5-triazine-4, 6-dithiol (2-ATD) içeren çözelti ortamı kullanılmıştır.

3.2.3. Elektrokimyasal Ölçüm Teknikleri

Elektrokimyasal ölçümlerin hepsinde üç elektrot yöntemi kullanılmış olup atmosfere açık alanda elektrolit çözelti ortamında 1 saat bekletilip çıkartılan yumuşak çelik elektrotuyla yapılmıştır.

Açık Devre Potansiyeli (OCP) Yöntemi: Kararlı bir potansiyel değeri elde edebilmek için OCP eğrileri 3600 saniye (1 saat) boyunca kaydedilmiştir.

Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi (EIS) Yöntemi: Bu teknikte deneyler, açık devre potansiyelinde 5 mV genlik ve 10^5 - 10^{-2} Hz frekans aralığı değerleri tercih edilerek ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerden elde edilen sonuçlar, Nyquist ve Bode diyagramları biçiminde ortaya konmuştur.

Lineer Polarizasyon Direnci (LPR) Yöntemi: Lineer Polarizasyon Direnci tekniğinde ölçümler, -0,01 V açık devre potansiyelinden başlanılıp +0,01 V' a kadar olan aralıkta tarama hızı 1mV/s olarak ayarlanıp elde edilmiştir. Elde edilen doğruların eğiminden yola çıkarak polarizasyon direnç değerleri hesaplanmıştır.

Potansiyodinamik Polarizasyon (PDP) Yöntemi: Bu teknik kullanılarak Tafel eğrileri (E-I) -0,75 V ile -0,25 V potansiyel aralığında 1mV/s tarama hızıyla taranarak alınmıştır.

3.2.4. Yüzey Görüntüleme ve Element Analizi:

Yumuşak çelikten 0,5 cm uzunluğunda kesilen 2 cm² alanına sahip silindirik parçaların yüzeyleri, metal parlaticı yardımıyla 180, 500 ve 1800 gritlik zımpara kağıtları kullanılarak parlatılmıştır. Parlatılan silindirik parçalar atmosfere açık ortamda olacak şekilde bir tanesi inhibitörsüz 0,5 M HCl çözeltisine diğeri ise aynı ortamda bulunan 0,5 M HCl +10 mM 2-ATD içeren inhibitörlü çözelti ortamına bırakılmıştır. Her iki parça 120 saat bekleme sonrasında çözeltilerden çıkartılarak etüvde yaklaşık bir saat bekletilerek kurumaları sağlanmış ve analize hazır hale getirilmişlerdir. Bu işlemler sonucunda silindirik parçaların yüzey analizlerini yapmak için SEM, AFM ve EDX teknikleri kullanılmıştır.

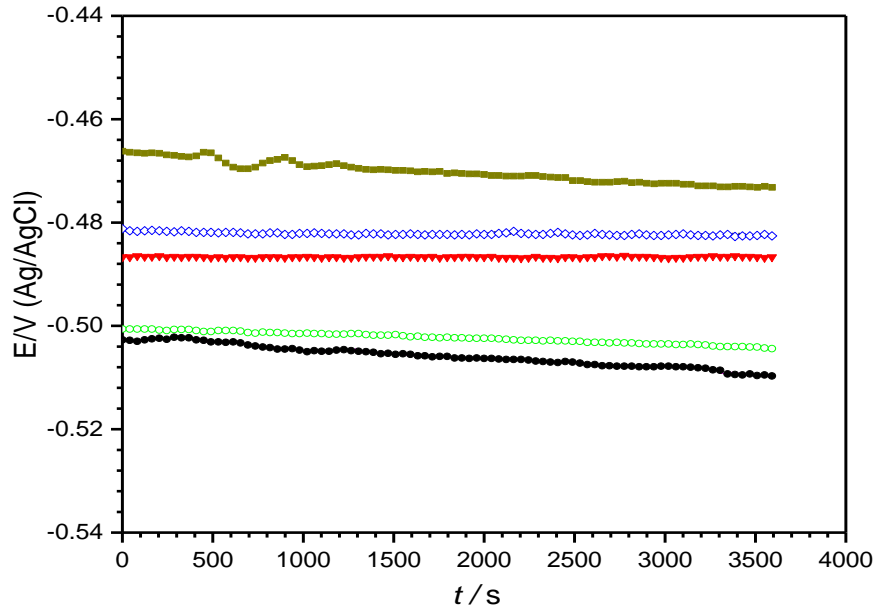
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Derişim Deneyleri

Bir organik inhibitör olarak 2-Amino-1, 3, 5-Triazine-4,6-Dithiol' ün (2-ATD) atmosferik koşullarda ve 0,5 M HCl çözeltisi içerisinde bulunan yumuşak çeliğin korozyonuna etkisi farklı derişim miktarlarında çalışılmıştır. Elektrokimyasal teknikler kullanılarak deneyler, 25 °C sabit sıcaklıkta 0,5 mM, 1 mM, 5 mM ve 10 mM gibi farklı derişimlerde 2-ATD içeren çözelti ortamlarında yapılmıştır.

4.1.1. Açık Devre Potansiyeli (OCP) Eğrileri ve Değerlendirilmesi

İnhibitörsüz ve farklı derişimli inhibitörlü ortamlardaki yumuşak çeliğin açık devre potansiyellerine ait OCP eğrileri, daha kararlı bir sonuç elde edebilmek için 3600 saniye boyunca kaydedilmiştir. İyonik çözelti ortamlarından elde edilen bu potansiyel, bu tür çözelti ortamları için yükseltgenme ve indirgenme reaksiyonlarını temsil etmektedir. İnhibitörsüz ve farklı derişimlerde hazırlanan inhibitörlü çözelti ortamlarındaki yumuşak çeliğe ait OCP eğrileri Şekil 4.1' de verilmiştir.



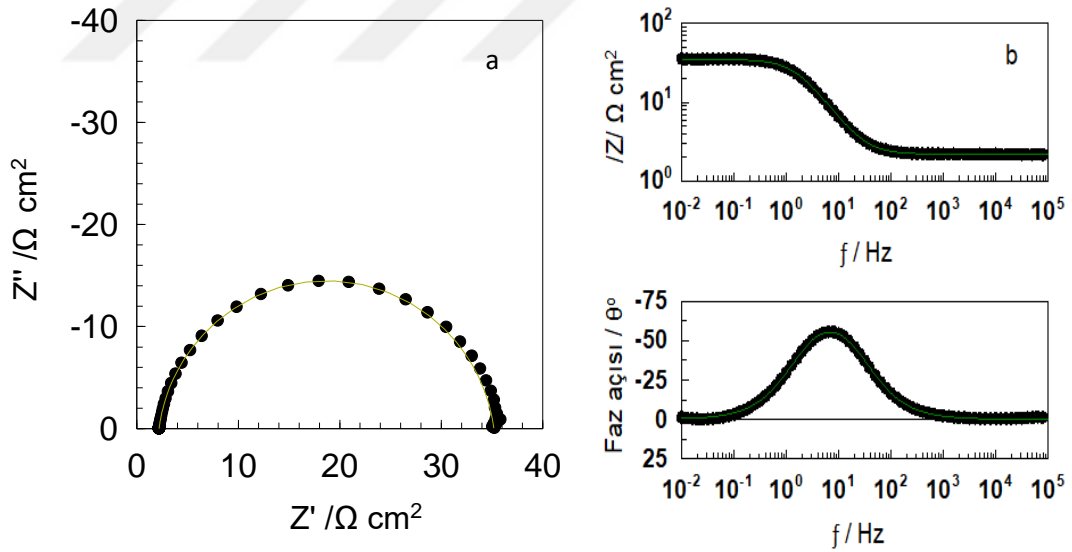
Şekil 4. 1: Yumuşak çeliğin 0,5 M HCl(●) ve 0,5 M HCl+ 0,5 mM(○) , 1 mM(▼), 5 mM(◇) ve 10 mM(■) 2-ATD içeren çözeltilerden elde edilen OCP eğrileri.

İnhibitörsüz ortamda klor (Cl^-) iyonlarının yumuşak çelik yüzeyine adsorpsiyonu ile elektrikli arayüzdeki potansiyel değerinin daha negatif bölgede olduğunu, ancak korozyon ortamına inhibitör maddesinin eklenmesi ile potansiyel değerinin pozitif bölgelere doğru kaydığı Şekil 4.1’ de görülmektedir. Bu durum inhibitör moleküllerinin negatif yüklü metal yüzeyine adsorplanması ile açıklanabilir (Cao, 1996; Munis et al., 2020).

Derişim arttıkça OCP potansiyelinin daha pozitif tarafa kayması, derişim arttıkça korozyon hızının azaldığını gösterir. Şekil 4.1’ de verilen grafik incelendiğinde derişim arttıkça potansiyel değerinin daha pozitif tarafa kaydığı görülmektedir. Pozitif tarafa kaymalar, korozyon olayının azalması anlamına gelmektedir (Tozar & Karahan, 2014).

4.1.2. 0,5 M HCl Çözeltisi İçinde Yumuşak Çeliğin Elektrokimyasal Davranışı

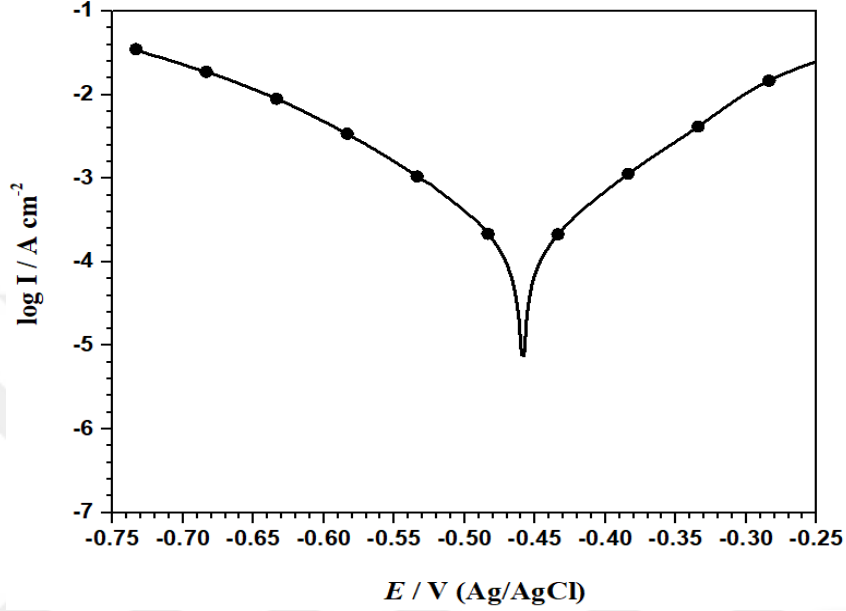
Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi (EIS) yöntemi sayesinde elde edilen Nyquist- Bode diyagramları ve Potansiyodinamik Polarizasyon (PDP) yöntemi kullanılarak elde edilen akım-potansiyel eğrileri (Tafel Eğrileri) sırayla aşağıda verilmiştir.



Şekil 4. 2: 0,5 M HCl içerisinde yumuşak çelik elektrotun açık devre potansiyelinde elde edilen Nyquist(a) ve Bode(b) Faz Açısı eğrileri.

Şekil 4.2’ de 0,5 M hidroklorik asit çözeltisi içerisinde yaklaşık bir saat bekletilen yumuşak çelik elektrotuna ait Nyquist(a) ve Bode(b) grafikleri gösterilmiştir. 0,5 molar hidroklorik asit çözeltisindeki açık devre potansiyeli -0,509 V olarak ölçülmüş olup impedans ölçümleri de bu potansiyel değerinde yapılmıştır. 10^5 Hz gibi

yüksek bir frekanstan başlayıp, 10^{-2} Hz gibi çok düşük olan bir değerde sonlanan eliptik bir eğrinin meydana geldiği görülmektedir. Oluşan yarım eliptik eğriden elde edilen impedansın $33 \Omega \text{ cm}^2$ olduğu tespit edilmiştir. Bu asit çözeltisi ortamında elde edilen impedans değerinden hesaplanan sabit faz elemanı (CPE) $387 \times 10^6 \text{ s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. 3: Yumuşak çeliğin 0,5 M HCl içerisindeki E-I eğrisi.

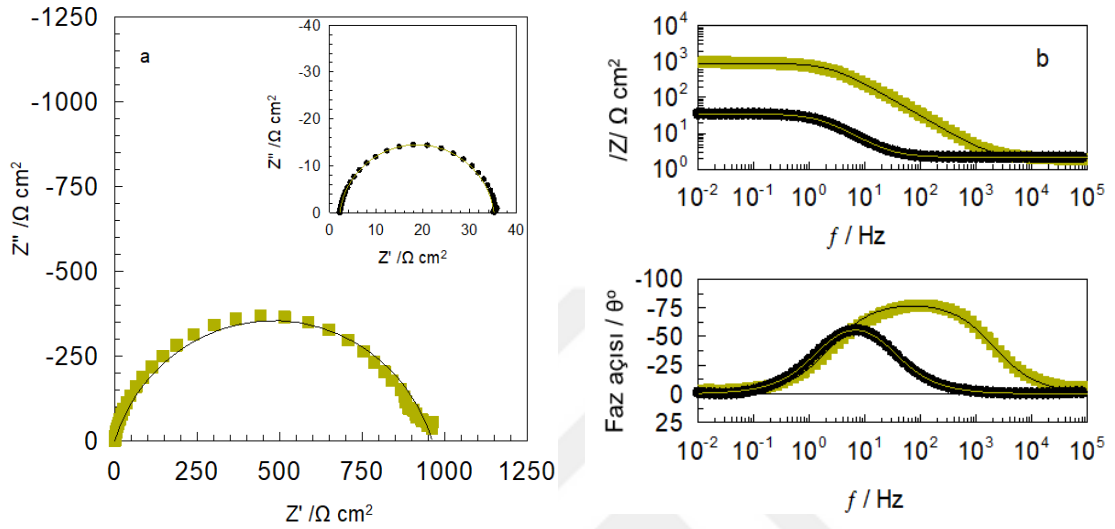
Şekil 4.3' te atmosfere açık şartlarda 0,5 M HCl çözeltisinde bulundurulmuş yumuşak çeliğin -0,75 V ile -0,25 V potansiyel aralığında hem katodik hem de anodik bölgelerde elde edilen akım (I) - potansiyel (V) eğrileri verilmiştir. Katodik bölgedeki akım artışı hidrojen indirgenmesine, anodik bölgedeki akım artışı ise demirin yükseltgenmesine denk gelmektedir.

4.1.3. 0,5 M HCl + 2-Amino-1, 3, 5-Triazine-4,6-Dithiol (2-ATD)' ün Farklı Derişim Ortamlarında Yumuşak Çeliğin Elektrokimyasal Davranışı

Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi (EIS) yöntemi sayesinde elde edilen Nyquist-Bode diyagramları ve Potansiyodinamik Polarizasyon (PDP) yöntemi kullanılarak farklı derişimli 2-ATD inhibitörlü çözelti ortamlarından elde edilen akım-potansiyel eğrileri (Tafel Eğrileri) sırayla verilmiştir.

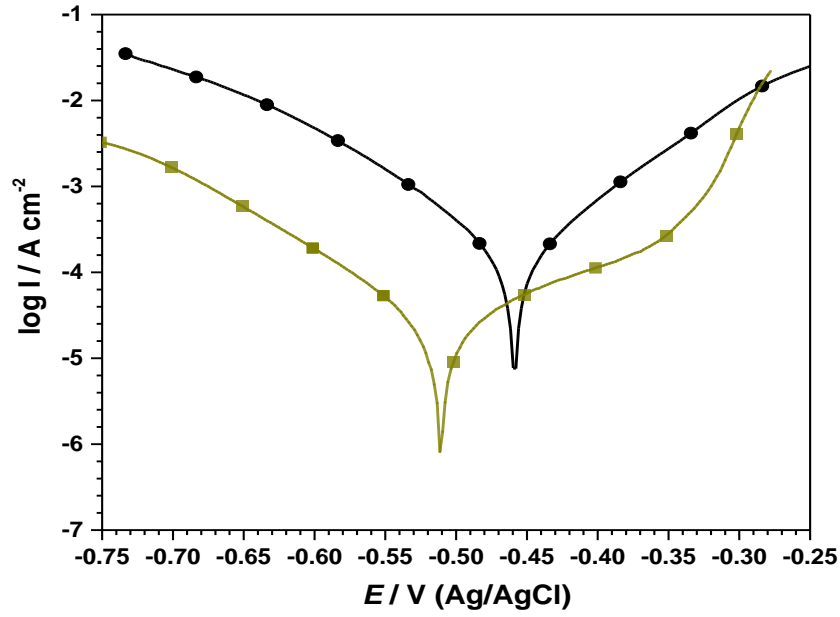
Şekil 4.4' te yumuşak çeliğin 0,5 molar hidroklorik asit çözeltisinde ve 0,5 molar hidroklorik asit çözeltisine 10 mM 2-Amino-1, 3, 5-Triazine-4, 6-Dithiol (2-ATD) ilave edilmesiyle oluşturulan inhibitörlü çözeltideki Nyquist ve Bode diyagramları aynı anda

gösterilmiştir. 10mM'lık bu inhibitör ortamındaki açık devre potansiyeli -0,473 V olup Şekil 4.4(a)' da gösterildiği gibi inhibitörsüz yani 0,5 M HCl çözelti ortamındaki yumuşak çelikten elde edilen Nyquist diyagramından yola çıkarak tespit edilen $33 \Omega \text{ cm}^2$ 'lik direnç miktarı, ortama (inhibitör madde olarak kullanılan) organik 2-ATD' nin ilave edilmesiyle $960 \Omega \text{ cm}^2$ 'ye çıkmıştır.



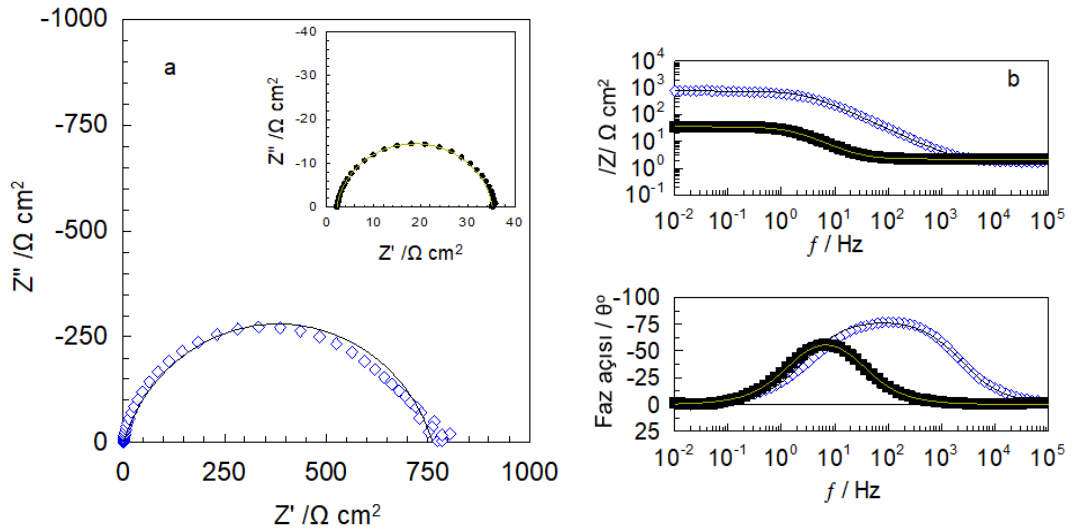
Şekil 4. 4: 0,5 M HCl(●) çözeltisi ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD(■) çözeltisinden elde edilen (a)Nyquist diyagramı (b) Bode diyagramı.

Şekil 4.4a'daki Nyquist diyagramından yola çıkarak elde edilen değerler kullanılarak sabit faz elemanı (CPE) hesaplandığında; inhibitörsüz ortam için bu değer $387 \times 10^6 \text{ s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$, inhibitörlü 2-ATD ortamında ise $102 \times 10^6 \text{ s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$ olduğu bulunmuştur. Değerler mukayese edildiğinde çift tabaka kapasitansında ciddi anlamda bir düşüş olduğu görülmektedir. 10 mM 2-ATD' nin varlığındaki çözelti ortamında inhibisyon etkinliğinin % 96,5 olduğu tespit edilmiştir. Elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ölçümüyle tespit edilen polarizasyon direncindeki (R_p) önemli artış, inhibitörün korozyon hızını engelleme konusunda etkili olduğunu ortaya koymuştur (Tang et al.,2012).



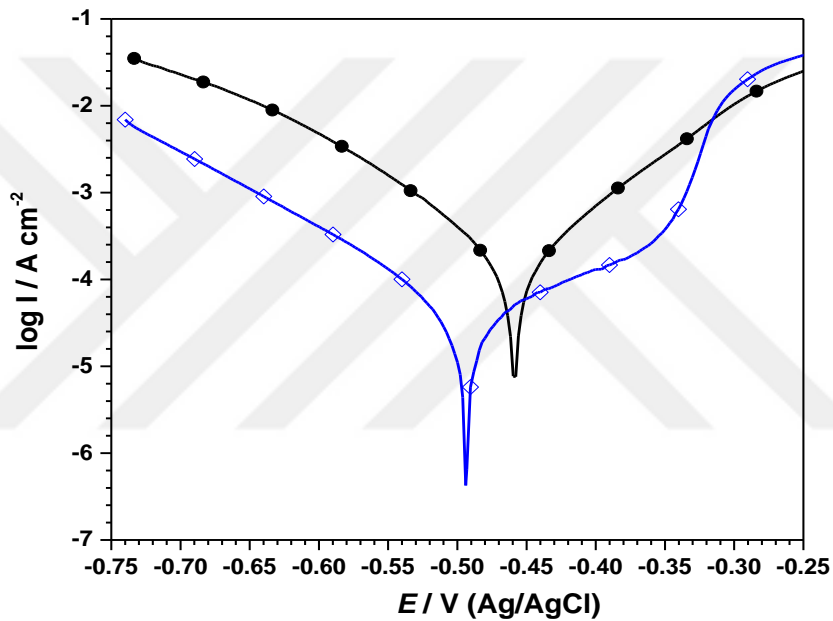
Şekil 4. 5: Yumuşak çeliğin 0,5 M HCl çözeltisinde elde edilen E-I eğrisi(●), 0,5 M HCl + 10 mM (ATD) çözeltisinde elde edilen E-I eğrisi(■).

Şekil 4.5’ te yumuşak çeliğin 0,5 molar hidroklorik asit çözeltisinde ve 0,5 molar hidroklorik asit çözeltisine organik madde olan 2-ATD’ nin 10 mM derişim olarak eklenmesiyle elde edilen çözeltideki akım (I) - potansiyel (V) eğrileri aynı grafikte verilmiştir. 10 mM 2-ATD’ nin ilave edilmesiyle elde edilen grafiğe bakıldığında hem anodik hem de katodik bölgelerde akım değerlerinin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. İnhibitör etkisinin her iki bölgede de etkili olduğu belirlenmiş ve buradan yola çıkarak inhibitörün karma tip inhibitör olarak davrandığı söylenebilir.



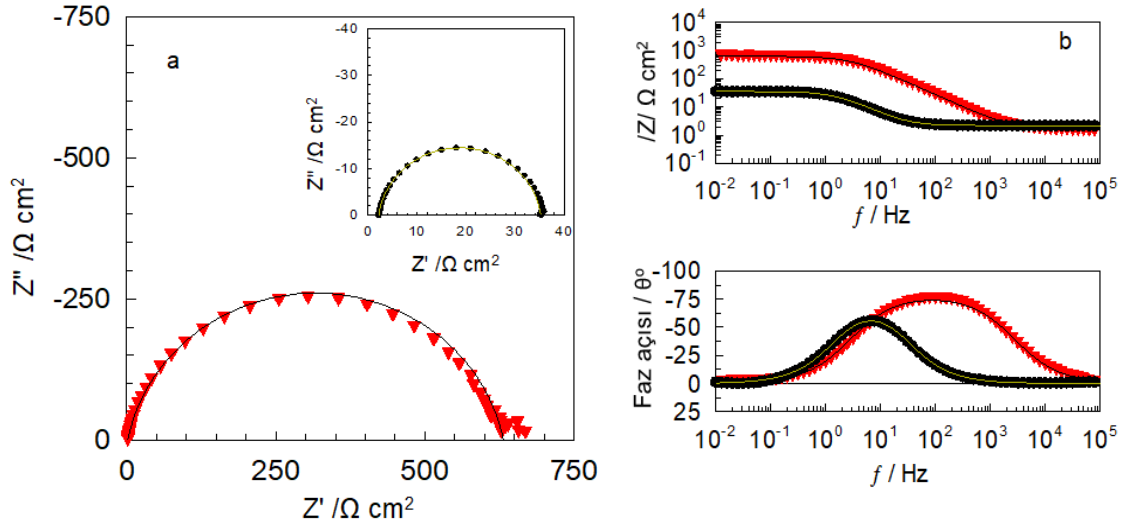
Şekil 4. 6: Yumuşak çeliğin 0,5 M HCl(●) çözeltisi ve 0,5 M HCl + 5 mM 2-ATD (◇) çözeltisinde elde edilen (a) Nyquist diyagramı (b) Bode diyagramı.

Şekil 4.6' da yumuşak çeliğin 0,5 M hidroklorik asit çözeltisinde ve 0,5 M hidroklorik asit çözeltisine 5 mM 2-ATD ilave edilmesiyle oluşturulan inhibitörlü çözeltideki Nyquist ve Bode diyagramları aynı anda gösterilmiştir. 5 mM' lık bu inhibitör ortamındaki açık devre potansiyeli -0,482 V olup Şekil 4.6.a' da gösterildiği gibi inhibitörsüz yani 0,5 M HCl çözelti ortamındaki yumuşak çelikten elde edilen Nyquist diyagramından yola çıkarak tespit edilen $33 \Omega \text{ cm}^2$ 'lik direnç miktarı, ortama 2-ATD' nin ilave edilmesiyle $760 \Omega \text{ cm}^2$ 'ye çıkmıştır. Ayrıca CPE değeri $119 \times 10^6 \text{ s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ve 5mM 2-ATD' nin varlığındaki çözelti ortamında inhibisyon etkinliğinin % 95,6 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4. 7: 0,5 M HCl çözeltisinde elde edilen E-I eğrisi(●), 0,5 M HCl + 5 mM 2-ATD çözeltisinde elde edilen E-I eğrisi(◇).

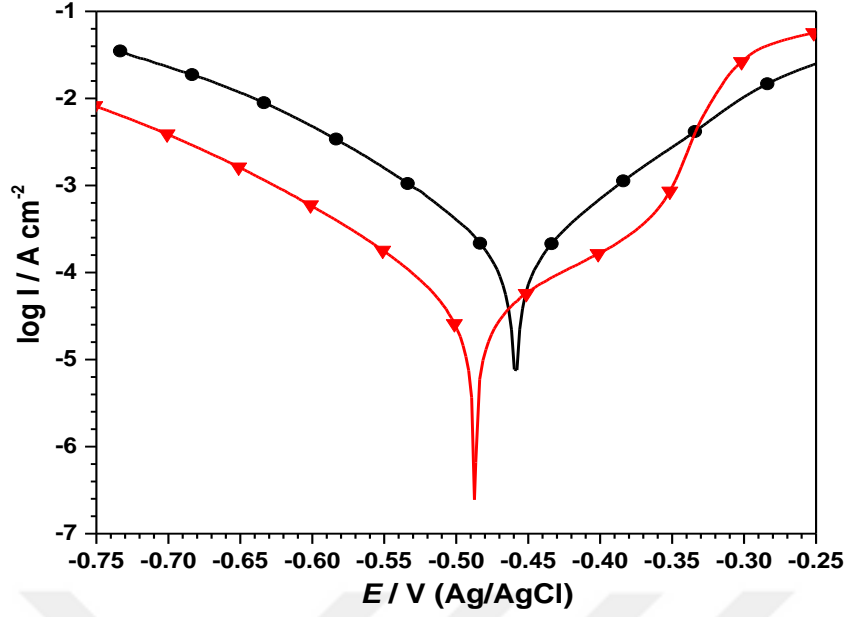
Şekil 4.7' de yumuşak çeliğin 0,5M hidroklorik asit çözeltisinde ve 0,5 M hidroklorik asit çözeltisine organik madde olan 2-ATD' nin 5 mM derişim olarak eklenmesiyle elde edilen yeni çözeltideki akım (I) - potansiyel (V) eğrileri beraber verilmiştir. 5 mM 2-ATD' nin ilave edilmesiyle elde edilen grafik incelendiğinde, akım değerinin anodik ve katodik bölgelerin her ikisinde de önemli derecede azaldığı görülmektedir.



Şekil 4. 8: 0,5 M HCl (●) çözeltisi ve 0,5 M HCl + 1 mM 2-ATD (▼)çözeltisinden elde edilen (a) Nyquist diyagramı (b) Bode diyagramı.

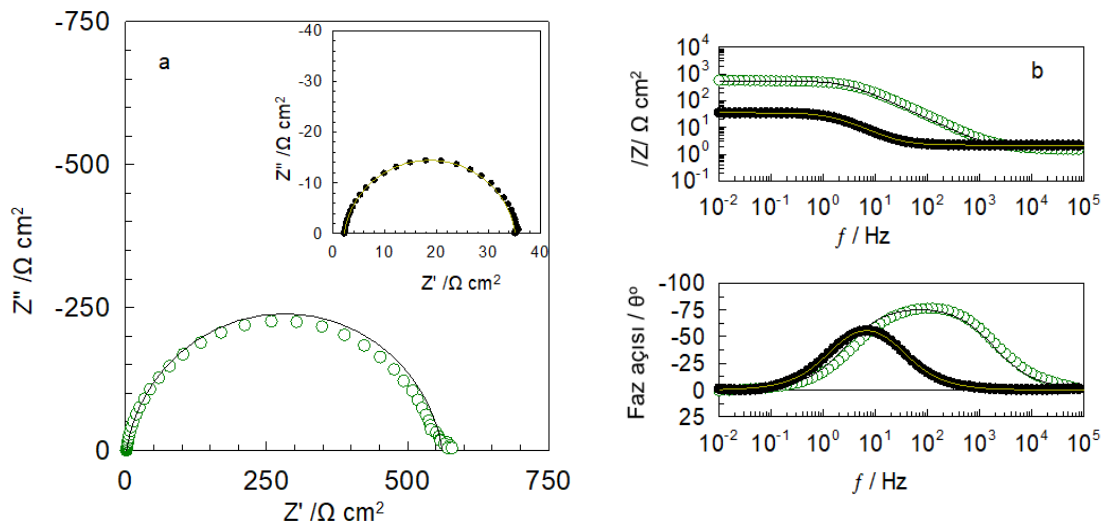
Şekil 4.8' de yumuşak çeliğin 0,5 M hidroklorik asit çözeltisinde ve 0,5 M hidroklorik asit çözeltisine 1 mM 2-ATD ilave edilmesiyle oluşturulan inhibitörlü çözeltideki Nyquist ve Bode diyagramları aynı anda gösterilmiştir. 1 mM' lık bu inhibitör ortamındaki açık devre potansiyeli -0,487 V olup Şekil 4.8a' da gösterildiği gibi inhibitörsüz yani 0,5 M HCl çözelti ortamındaki yumuşak çelikten elde edilen Nyquist diyagramından yola çıkarak tespit edilen $33 \Omega \text{ cm}^2$ 'lik direnç miktarı, asitli ortama 2-ATD' nin ilave edilmesiyle $630 \Omega \text{ cm}^2$ 'ye yükselmiştir.

İnhibitörlü çözeltideki impedans değerleri kullanılarak hesaplanan CPE değerinin $125 \times 10^6 \text{ s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$ olduğu belirlenmiştir. İnhibitör ortamındaki inhibisyon etkinliği % 94,7 olarak hesaplanmıştır. İnhibisyon etkinliğine bakıldığında, inhibitör olarak kullanılan 2-ATD derişiminin azalmasına rağmen korozyonu engelleme konusunda çok ciddi bir değişiklik olmadığı söylenebilir.



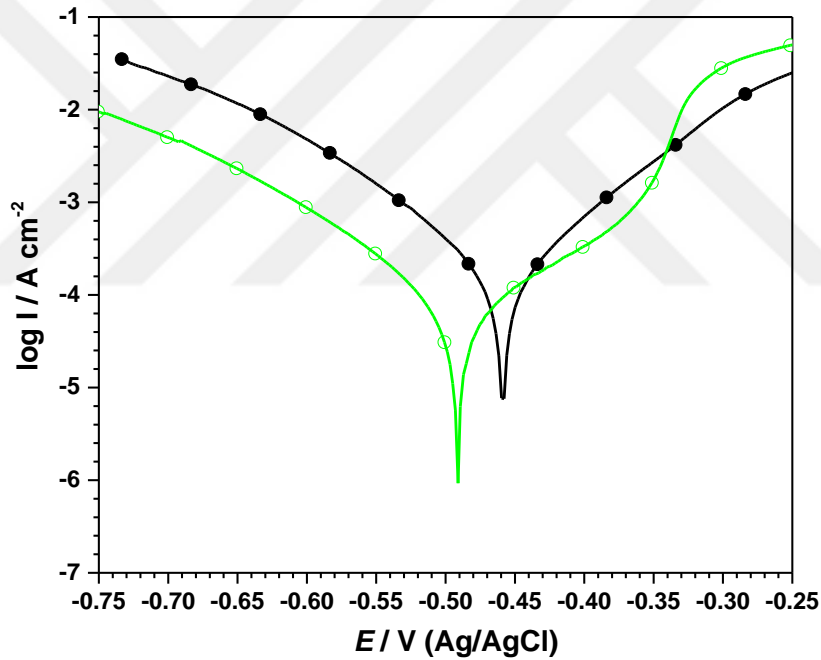
Şekil 4. 9: 0,5 M HCl çözeltisinde elde edilen E-I eğrisi(●), 0,5 M HCl + 1 mM 2- ATD çözeltisinde elde edilen E-I eğrisi(▼).

Şekil 4.9’ da yumuşak çeliğin 0,5M hidroklorik asit çözeltisinde ve 0,5 M hidroklorik asit çözeltisine organik madde olan 2-ATD’ nin 1 mM derişim olarak ilave edilmesiyle elde edilen çözeltideki akım (I) - potansiyel (V) eğrileri birlikte verilmiştir. 1 mM 2-ATD’ nin ilave edilmesiyle elde edilen grafik incelendiğinde, akım değerinin anodik ve katodik bölgelerin her ikisinde de önemli derecede azaldığı görülmektedir.



Şekil 4. 10: 0,5 M HCl (●) ve 0,5 M HCl + 0,5 mM 2-ATD(○) çözeltisinden elde edilen (a) Nyquist diyagramı (b) Bode diyagramı.

Şekil 4.10'da yumuşak çeliğin 0,5 M hidroklorik asit çözeltisinde ve 0,5 M hidroklorik asit çözeltisine 0,5 mM 2-ATD ilave edilmesiyle oluşturulan inhibitörlü çözeltideki Nyquist ve Bode diyagramları aynı anda gösterilmiştir. 0,5 mM'lık bu inhibitör ortamındaki açık devre potansiyeli -0,504 V olup Şekil 4.10a' da gösterildiği gibi inhibitörsüz yani 0,5 M HCl çözelti ortamındaki yumuşak çelikten elde edilen Nyquist diyagramından yola çıkarak tespit edilen $33 \Omega \text{ cm}^2$ 'lik direnç miktarı, ortama 2-ATD' nin ilave edilmesiyle $560 \Omega \text{ cm}^2$ 'ye yükselmiştir. İnhibitörlü çözeltideki impedans değerleri kullanılarak hesaplanan CPE değerinin $130 \times 10^6 \text{ s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$ olduğu bulunmuş ve inhibitör ortamındaki inhibisyon etkinliği de % 94,1 olarak hesaplanmıştır. Derişim miktarı çok azalmasına rağmen inhibisyon etkinliğinin çok değişmeyip yüksek bir yüzdelikte kalması bu inhibitör maddenin iyi bir inhibitör olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. 11: 0,5 M HCl çözeltisinde elde edilen E-I eğrisi(●), 0,5 M HCl +0,5 mM 2-ATD çözeltisinde elde edilen E-I eğrisi(○).

Şekil 4.11' de yumuşak çeliğin 0,5 M hidroklorik asit çözeltisinde ve 0,5 M hidroklorik asit çözeltisine organik madde olan 2-ATD' nin 0,5 mM derişim olarak eklenmesiyle elde edilen çözeltideki akım (I) - potansiyel (V) eğrileri birlikte verilmiştir. 0,5 mM 2-ATD' nin ilave edilmesiyle elde edilen grafik incelendiğinde, akım değerinin anodik ve katodik bölgelerin her ikisinde de önemli derecede azaldığı görülmektedir.

4.1.4. Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi (EIS) ve Potasyodinamik Polarizasyon (PDP) Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

Hem inhibitörsüz 0,5 M hidroklorik asit hem de bu çözeltiye 0,5 mM, 1mM, 5 mM ve 10 mM 2-ATD ilave edilmesiyle hazırlanan çözelti otamlarındaki yumuşak çeliğe ait Nyquist diyagramları incelendiğinde hepsinin tek luplu olduğu ve ayrıca alternatif akım impedansı yönteminin teorisinden istenildiği gibi yaklaşık olarak hepsinin yarım eliptik daire şekline sahip olduğu görülmüştür. Elde edilen Nyquist diyagramları için giriş bölümünde verilen Şekil 1.3' teki elektriksel eşdeğer devre önerilmiştir. Nyquist diyagramlarını fit etmek için Zview programı kullanılmış olup fitlerden elde edilen impedans parametreleri, lineer polarizasyon direnci ölçüm sonuçları ve yüzde inhibisyon etkinliği (%İE) değerleri Tablo 4.1' de verilmiştir.

Nyquist diyagram verilerinden yola çıkılarak elde edilen polarizasyon direnci değerleri kullanılarak ve Tablo 4.1' de sunulan yüzde inhibisyon etkinlikleri aşağıda gösterilen (4.1) bağıntısı aracılığıyla hesaplanmıştır.

$$\% \dot{I}E = \frac{R_{p(\text{inh})} - R_p}{R_{p(\text{inh})}} \times 100 \quad (4.1)$$

Burada ' R_p ' 0,5 M HCl koşullarında elde edilen polarizasyon direncini, ' $R_{p(\text{inh})}$ ' ise inhibitörlü koşullarda elde edilen polarizasyon direncini ifade etmektedir.

Tablo 4. 1: 25 °C sabit sıcaklıkta 0,5 M HCl ve 0,5 M HCl' ye farklı derişimlerde 2-ATD eklenmesiyle oluşturulan çözeltilerden elde edilen EIS ve LPR ölçümlerinden hesaplanan parametreler.

C_{inh} (mM)	EIS					LPR		
	R_p ($\Omega \text{ cm}^2$)	CPE_{dl} $Y_o (\times 10^6 \text{ s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2})$	n	$\dot{I}E(\%)$	C_{dl} ($\times 10^6 \text{ s} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$)	R_p ($\Omega \text{ cm}^2$)	$\dot{I}E(\%)$	
0,0	33	387	0,92	-	323,2	38	-	
0,5	560	130	0,91	94,1	98,4	555	93,1	
1,0	630	125	0,88	94,7	89,3	625	93,9	
5,0	760	119	0,81	95,6	67,1	714	94,6	
10,0	960	102	0,81	96,5	59,7	1000	96,2	

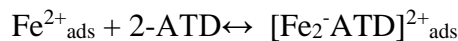
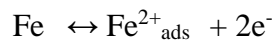
Tablo 4.1' deki verilere bakıldığında polarizasyon direncinin (R_p), inhibitör derişiminin artması ile birlikte yükseldiği buna karşılık sabit faz elemanı (CPE) ve çift tabaka kapasidansı (C_{dl}) değerinin ise düştüğü görölmektedir. Ortaya çıkan bu değerler elektriksel çift tabaka kalınlığının artması ile adsorpsiyon (tutunma) mekanizması aracılığıyla, inhibitör maddeye ait moleküllerin yumuşak çelik yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturduğunu ve bu sayede korozyonu engellediklerini ortaya koymuştur (Yıldız, 2014).

2-ATD inhibitör maddesinin hem anodik hem de katodik tarafta akım değerlerini düşürmesi bu inhibitör maddesine ait moleküllerin yumuşak çelik yüzeyine farklı iki formatta adsorplandığını gösterir. Bunlar;

1. Anodik tarafta yumuşak çelik yüzeyinde, protonlanmış inhibitör (2-ATD) moleküllerinin katyonlaşmış iyon formu, klor iyonlarıyla köprü oluşturarak elektrostatik bir şekilde adsorplanır.
2. Katodik tarafta yumuşak çelik yüzeyinde, pozitif yüklü inhibitör (2-ATD) molekülleri, su molekülleriyle kaplanmış yüzeye doğru hareketlenerek elektrostatik yöntemle adsorplanırlar.

Metal/ çözeltili ara yüzeyinde organik bir molekülün bu yüzeye adsorpsiyonu, çözeltili içerisindeki bu moleküllerin metal yüzeyinde var olan su molekülleriyle yer değiştirmesi biçiminde meydana gelir.

Çözeltideki inhibitör organik madde (2-ATD) derişiminin artması ile kapasidansın düşmesi, yumuşak çelik elektrotun yüzeyindeki koruyucu tabaka oluşumunun artmasına katkıda bulunarak koruyuculuğu arttırmıştır. Bunun sonucu olarak inhibitör ürün olarak oluşan $[Fe^{2+}_{ads}]$ iyonuna kimyasal kararlılığa ve adsorplanan $[Fe_2^-ATD]^{2+}_{ads}$ oksidatif özelliğine bağlı olarak katılabilmıştir.



Yüksek derişimlerde inhibitör molekülleri yumuşak çelik yüzeyine iyi bir şekilde adsorplanıp ve buna bağlı olarak polarizasyon direnci (R_p) değerini artarak korozyon hızı önemli derecede düşmüştür.

Potansiyodinamik Polarizasyon (PDP) ölçüm tekniği kullanılarak elde edilen Tafel eğrilerinden yola çıkarak hesaplanan korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}), korozyon potansiyeli (E_{corr}), Tafel eğimi (bc), korozyon hızı (CR) ve inhibisyon etkinliği ($\%IE$) değerleri Tablo 4.2' de sunulmuştur. Tafel eğrileri verilerinden inhibisyon etkinliğini ($\%IE$) hesaplamak için aşağıdaki bağıntı (4.2) kullanılmıştır.

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

Burada ' i_{corr} ' inhibitörsüz ortamdaki korozyon akım yoğunluğunu, ' i'_{corr} ' ise inhibitörlü ortamlardaki korozyon akım yoğunluğunu ifade etmektedir.

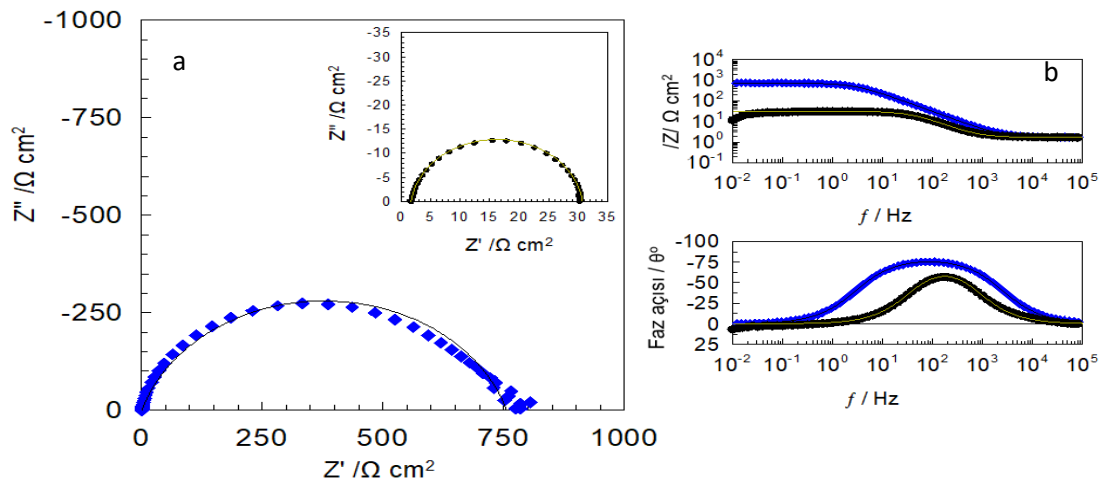
Tablo 4. 2.' deki veriler incelendiği zaman inhibitör derişiminin artması ile birlikte E_{corr} , i_{corr} ve CR değerlerinin azaldığı; inhibisyon etkinliğinin ise arttığı gözükmektedir. E_{corr} ve i_{corr} değerlerinin azalması yumuşak çelik yüzeyinde korozyon tepkimesinin git gide azaldığını göstermektedir. Nitekim yüzeydeki korozyon hızı (CR) değerlerinin azalması da yüzeydeki korozyon mekanizmasının yavaşladığını desteklemektedir. İnhibitör derişiminin artması ile birlikte korozyon hızının düşmesi, derişimin artması ile paralel olarak inhibitör moleküllerinin de yumuşak çelik yüzeyine daha fazla miktarda adsorplanarak yüzeyde daha iyi bir koruyucu film tabakası oluşturması ile açıklanabilir (Dohare et al., 2017).

Tablo 4. 2: 25 °C sabit sıcaklıkta 0,5 M HCl ve 0,5 M HCl' ye farklı derişimlerde 2-ATD eklenmesiyle oluştulan çözeltilerdeki potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler.

C_{inh} (mM)	E_{corr} (mV, Ag/AgCl)	i_{corr} (mA cm ⁻²)	bc (mV dec ⁻¹)	CR (mpy)	$\dot{I}E(\%)$
0,0	-458	0,172	96,9	78,44	
0,5	-491	0,0796	106,5	36,36	53,7
1,0	-487	0,0422	100,3	19,30	75,5
5,0	-494	0,042	108,9	19,23	75,5
10,0	-511	0,0238	99,8	10,88	86,2

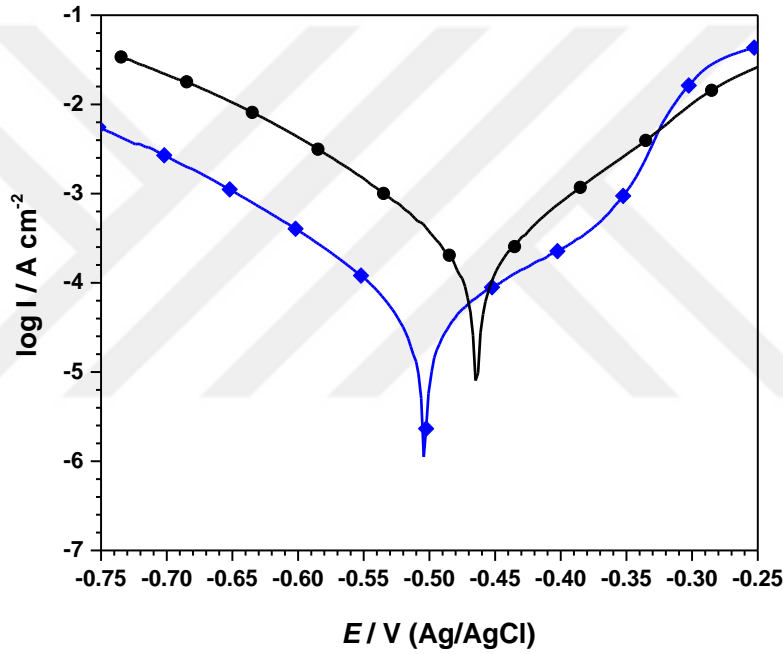
4.2. Sıcaklık Deneyleri

İnhibitör maddesi olarak kullanılan 2-ATD' nin farklı sıcaklık değerlerinde nasıl bir koruma sağlayacağını ve sıcaklığın inhibisyon etkisi üzerinde ne derece etki yapacağını ortaya koymak amacıyla 25 °C' da yapılmış olan deneylere ilaveten 35 °C, 45 °C ve 55 °C gibi farklı sıcaklık değerlerinde ve atmosfere açık şartlarda 0,5 M HCl içindeki yumuşak çelik elektrot ile çalışılan en yüksek konsantrasyon olan 10 mM 2-Amino-1, 3, 5-Triazine-4,6-Dithiol (2-ATD) eklenmesiyle elde edilen çözeltide deneyler yapılmıştır.



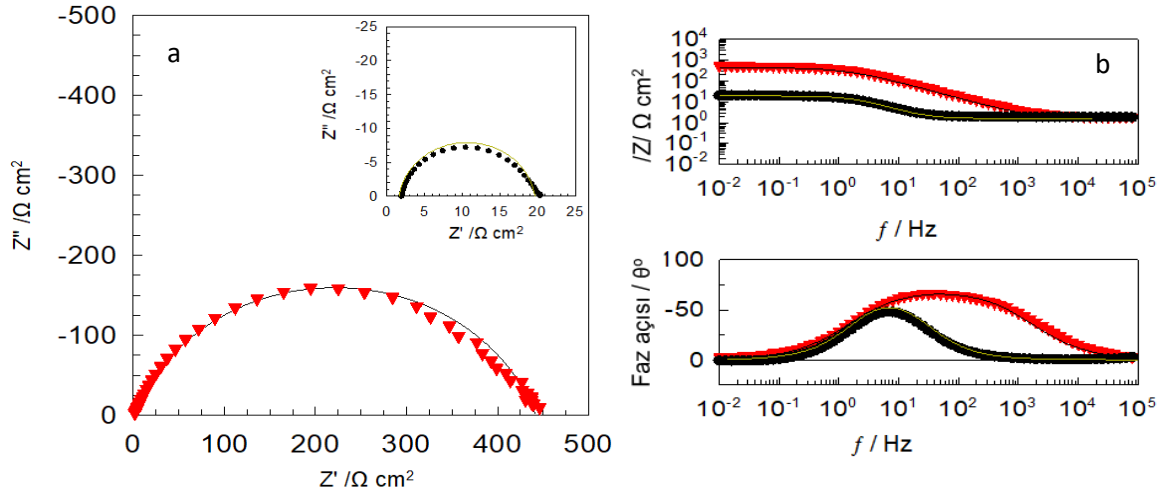
Şekil 4. 12: 35 °C sıcaklıkta 0,5 M HCl (●) ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD(♦) çözeltilisinden elde edilen (a) Nyquist diyagramı (b) Bode diyagramı.

Şekil 4.12(a)' da yumuşak çeliğin 0,5 molar hidroklorik asit çözeltisinde ve 0,5 molar hidroklorik asit çözeltisine 10 mM 2-Amino-1, 3, 5-Triazine-4,6-Dithiol (2-ATD) ilave edilmesiyle oluşturulan inhibitörlü çözeltide sıcaklık 35 °C ' de sabit tutularak elde edilen impedans diyagramları gösterilmiştir. Bu sıcaklık değerinde 0,5 M HCl çözelti ortamındaki yumuşak çelikten elde edilen Nyquist diyagramından yola çıkarak tespit edilen $29 \Omega \text{ cm}^2$ 'lik direnç miktarı, ortama 2-ATD' nin ilave edilmesiyle bu değer $755 \Omega \text{ cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Sabit faz elemanı (CPE) değeri inhibitörsüz ortamda $2251 \times 10^6 \text{ s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$ iken, inhibitörlü ortamda bu değer $151 \times 10^6 \text{ s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$ olarak belirlenmiştir. Bu deneyin yapıldığı ortamda 2-ATD' nin inhibisyon etkinliği % 96,1 olarak hesaplanmıştır.



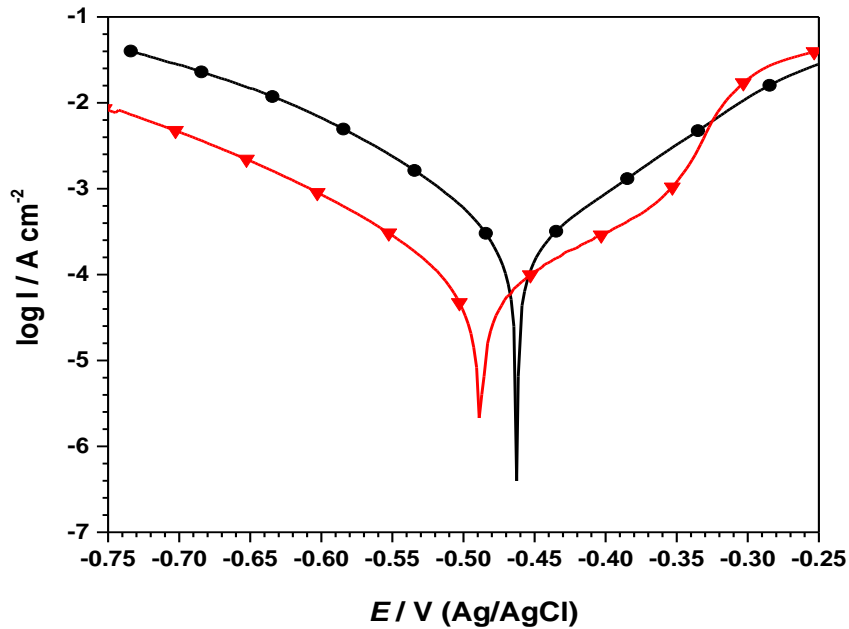
Şekil 4. 13: 35 °C sıcaklıkta 0,5 M HCl (●) ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD(◆) çözeltisinden elde edilen E-I eğrisi.

Şekil 4.13' te 35 °C sıcaklıkta 0,5 M HCl inhibitörsüz ortamında korozyon potansiyeli -0,465 V olarak ölçülmüştür. 10 mM 2-ATD' nin ilave edilmesiyle elde edilen grafik incelendiğinde akım değerinin anodik ve katodik bölgelerin her ikisinde de önemli derecede azaldığı görülmektedir.



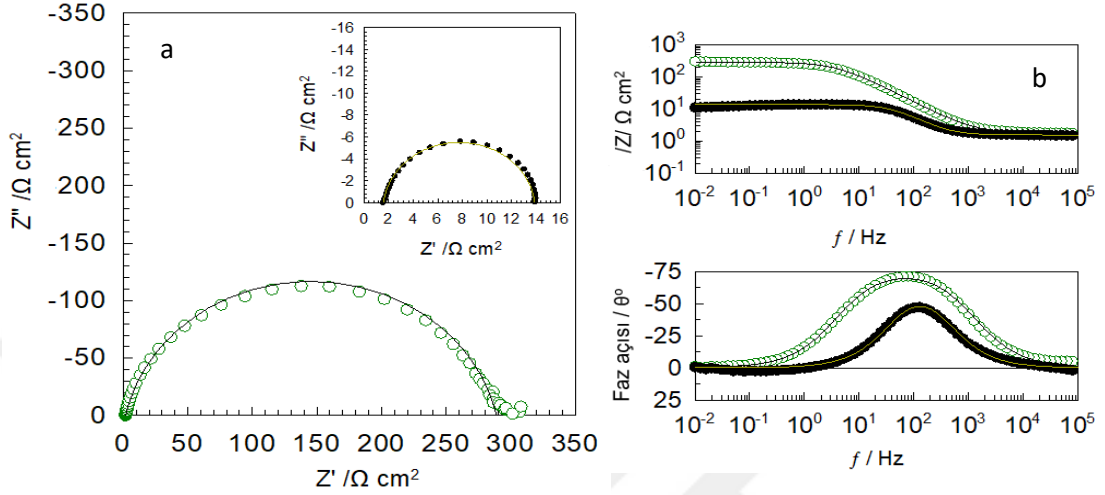
Şekil 4. 14: 45 °C sıcaklıkta 0,5 M HCl (●) ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD(▼) çözeltilisinden elde edilen (a) Nyquist diyagramı (b) Bode diyagramı.

Şekil 4.14' te 45 °C sıcaklıkta inhibitörsüz ve inhibitörlü ortamdaki yumuşak çelik elektrotuna ait Nyquist ve Bode diyagramları birlikte verilmiştir. İnhibitörsüz ortamdaki impedans değerinin $18 \Omega \text{ cm}^2$, CPE değeri $6000 \times 10^6 \text{ s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^2$ olarak belirlenirken buna karşılık inhibitörlü ortamdaki impedans değeri $440 \Omega \text{ cm}^2$, CPE değeri ise $181 \times 10^6 \text{ s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^2$ olarak tespit edilmiştir. 45 °C sabit sıcaklıktaki bu ortamda inhibitörlü maddenin inhibisyon etkinliği % 95,9 olarak tespit edilmiştir.



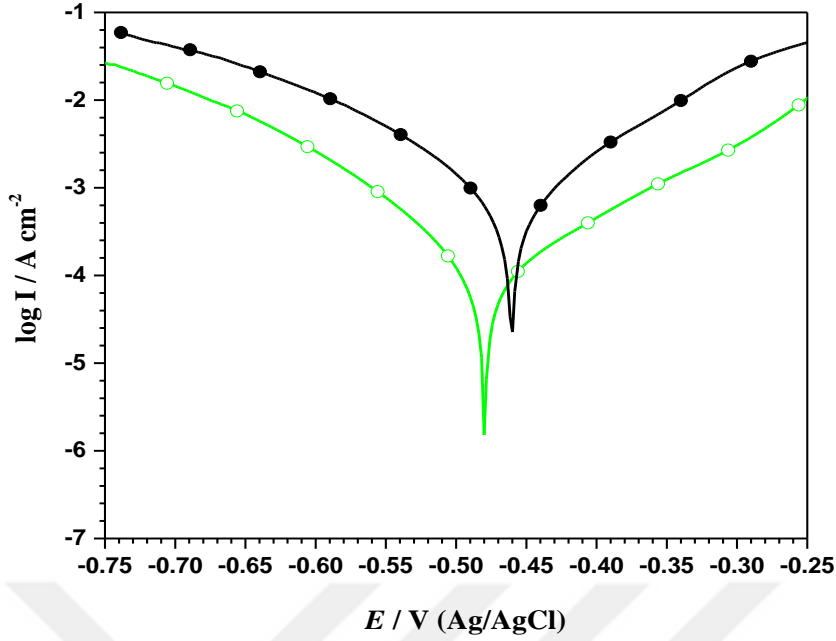
Şekil 4. 15: 45 °C sıcaklıkta 0,5 M HCl (●) ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD(▼) çözeltilisinden elde edilen E-I eğrisi.

Şekil 4.15' te 45 °C sıcaklıkta 0,5 M HCl inhibitörsüz ortamında korozyon potansiyeli -0,489 V olarak ölçülmüştür. 10 mM 2-ATD' nin ilave edilmesiyle elde edilen grafik incelendiğinde akım değerinin anodik ve katodik bölgelerin her ikisinde de önemli derecede azaldığı görülmektedir.



Şekil 4. 16: 55 °C sıcaklıkta 0,5 M HCl (●) ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD(○) çözeltilisinden elde edilen (a) Nyquist diyagramı (b) Bode diyagramı.

Şekil 4.16' da 55 °C sabit sıcaklıkta elde edilen Nyquist ve Bode diyagramları birlikte verilmiştir. Bu ortamda 0,5 M HCl çözelti ortamındaki yumuşak çelikten elde edilen Nyquist diyagramından yola çıkarak belirlenen 12,3 $\Omega \text{ cm}^2$ 'lik direnç miktarı, ortama 2-ATD' nin ilave edilmesiyle bu değer 287 $\Omega \text{ cm}^2$ olarak belirlenmiştir. Sabit faz elemanı (CPE) değeri inhibitörsüz ortamda $6700 \times 10^6 \text{ s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$ iken, inhibitörlü ortamda bu değer $219 \times 10^6 \text{ s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$ olarak belirlenmiştir. Bu sıcaklık ortamında 2-ATD' nin inhibisyon etkinliği % 95,7 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4. 17: 55 °C sıcaklıkta 0,5 M HCl (●) ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD(○) çözeltilisinden elde edilen E-I eğrisi.

Şekil 4.17' de 55 °C sıcaklıkta 0,5 M HCl inhibitörsüz ortamında korozyon potansiyeli -0,460 V olarak ölçülmüştür. 10 mM 2-ATD' nin ilave edilmesiyle elde edilen çözeltideki korozyon potansiyeli ise -0,480 V olarak ölçülmüştür. Grafik incelendiğinde akım değerinin anodik ve katodik bölgelerin her ikisinde de önemli derecede azaldığı görülmektedir.

Hem inhibitörsüz hem de inhibitörlü çözeltili ortamları ile yapılan sıcaklık deneylerinin tamamında sıcaklığın artmasıyla polarizasyon direnci azalmış aksine CPE değeri ise artmıştır. Sıcaklık deneylerinden elde edilen bütün veriler Tablo 4.3' te sunulmuştur.

4.2.1. Farklı Sıcaklıklarda Yapılan Deneylerden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Farklı sıcaklık değerlerinde yapılan deneylerin impedans ölçüm sonuçlarına ait grafikler Şekil 4.4; 4.12; 4.14; 4.16' da verilmişti. Bu şekillerde 25 °C, 35 °C, 45 °C ve 55 °C sıcaklık değerlerinde yapılan deneylerinden elde edilen Nyquist diyagramlarından yola çıkarak hesaplanan impedans ve yüzde inhibisyon etkinlik değerleri Tablo 4.3' te sunulmuştur. Polarizasyon dirençleri hem alternatif akım impedansı hem de klasik polarizasyon direnci hesaplama tekniği vasıtasıyla da hesaplanarak tabloda sunulmuştur.

Nyquist diyagramlarından elde edilen polarizasyon direç değerleri kullanılarak (4.1) bağıntısı yardımıyla yüzde inhibisyon etkinlik (% $\dot{I}E$) değerleri hesaplanmıştır.

Tablo 4. 3: 0,5 M HCl ve 0,5 M HCl +10 mM 2-ATD içeren çözeltilerin farklı sıcaklıklarından elde edilen polarizasyon direnci(R_p), lineer polarizasyon direnci (R_p^*), Sabit faz elemanı (CPE) ve yüzde inhibisyon etkinlikleri (% $\dot{I}E$) değerleri.

	T (°C)	R_p (ohm cm ²)	R_p^* (ohm cm ²)	CPE $Y_o(10^6 s^n \Omega^{-1} cm^{-2})$	n	% $\dot{I}E$ (imp)	% $\dot{I}E$ (LPR)
0,5 M HCl	25	33,0	38	387	0,917	---	---
	35	29,0	32	2251	0,919	---	---
	45	18,0	17	6000	0,920	---	---
	55	12,3	13	6700	0,947	---	---
10 mM	25	960	1000	102	0,809	96,5	96,20
	35	755	792	151	0,814	96,1	95,95
	45	440	419	181	0,820	95,9	95,94
	55	287	295	219	0,825	95,7	95,59

Örneğin 25 °C' deki inhibisyon etkinliği değeri %96,5 iken, 55 °C' deki değeri %95,7 olarak ölçülmüştür. Yüzde inhibisyon etkinliği değerleri arasındaki farkın fazla olmaması, metal/çözelti ara yüzeyinde kimyasal olarak gerçekleşen 2-ATD moleküllerinin adsorpsiyon mekanizmasının sıcaklıktan etkilenmediğini, fakat fiziksel olarak metal yüzeyine adsorplanan inhibitör moleküllerinin sıcaklığın artışı ile yüzeyden uzaklaştıkları şeklinde yorumlanabilir.

Potansiyodinamik Polarizasyon (PDP) ölçüm tekniği kullanılarak elde edilen Tafel eğrilerinden (Şekil 4.3; 4.13; 4.15; 4.17) yola çıkarak hesaplanan korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}), korozyon potansiyeli (E_{corr}), Tafel eğimi (bc), korozyon hızı (CR) ve inhibisyon etkinliği (% $\dot{I}E$) değerleri Tablo 4.4' de sunulmuştur.

Tablo 4. 4: 0,5 M HCl ve 0,5 M HCl +10 mM 2-ATD içeren çözeltilerin farklı sıcaklıklarından elde edilen potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler.

Sıcaklık(°C)	E_{corr} (mV, Ag/AgCl)	i_{corr} (mA cm ⁻²)	bc (mV dec ⁻¹)	CR (mpy)	$\dot{I}E(\%)$	
0,5 M HCl	25	-458	0,172	96,9	78,44	-
	35	-465	0,213	103,3	97,34	-
	45	-489	0,324	103,5	148,2	-
	55	-460	0,921	126,2	421,0	-
10 mM 2-ATD	25	-511	0,0238	99,8	10,88	86,2
	35	-504	0,0465	106	21,28	78,2
	45	-490	0,0856	113,3	39,14	73,6
	55	-480	0,1344	93,2	61,39	85,4

Tablo 4.4 incelendiği zaman ayrı ayrı sıcaklık değerlerindeki inhibitörlü ve inhibitörsüz ortamlarından elde edilen veriler kıyaslandığında; artan sıcaklık ile birlikte E_{corr} , i_{corr} ve CR değerlerinin inhibitörlü ortamda daha düşük olduğu görülmektedir. En yüksek sıcaklık değeri olan 55 °C’ deki inhibisyon etkinliğinin %85,4 olarak tespit edilmesi bu maddenin yüksek sıcaklıklarda bile koruyuculuk sağlayabileceğini göstermektedir.

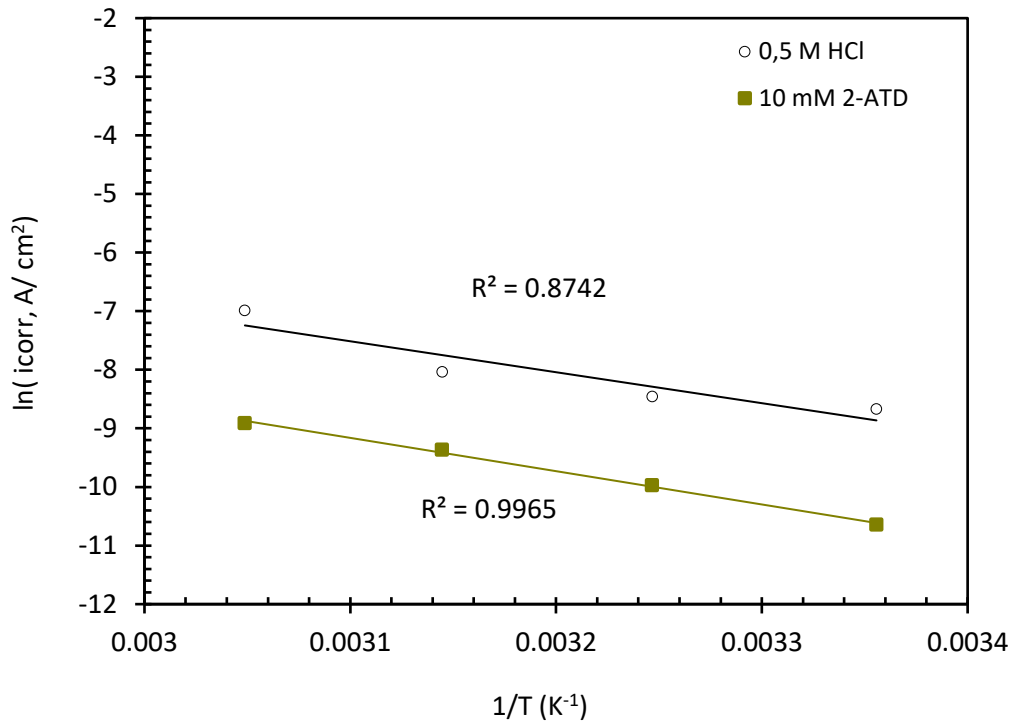
0,5 M HCl ve 0,5M HCl+ 10 mM 2-ATD çözeltilerindeki yumuşak çeliğe ait Arrhenius grafikleri (Şekil 4.18; 4.19) çizilmiş olup bu grafiklerden yola çıkarak; Aktivasyon Enerjisi(E_a), Entalpi (ΔH^*) ve Entropi (ΔS^*) değerleri hesaplanmıştır.

$$\ln(i_{corr}) = \ln(A) - \frac{E_a}{RT} \quad (4.3)$$

$$\ln\left(\frac{i_{corr}}{T}\right) = \left[\ln\left(\frac{R}{h N_a}\right) + \left(\frac{\Delta S^*}{R}\right)\right] - \frac{\Delta H^*}{RT} \quad (4.4)$$

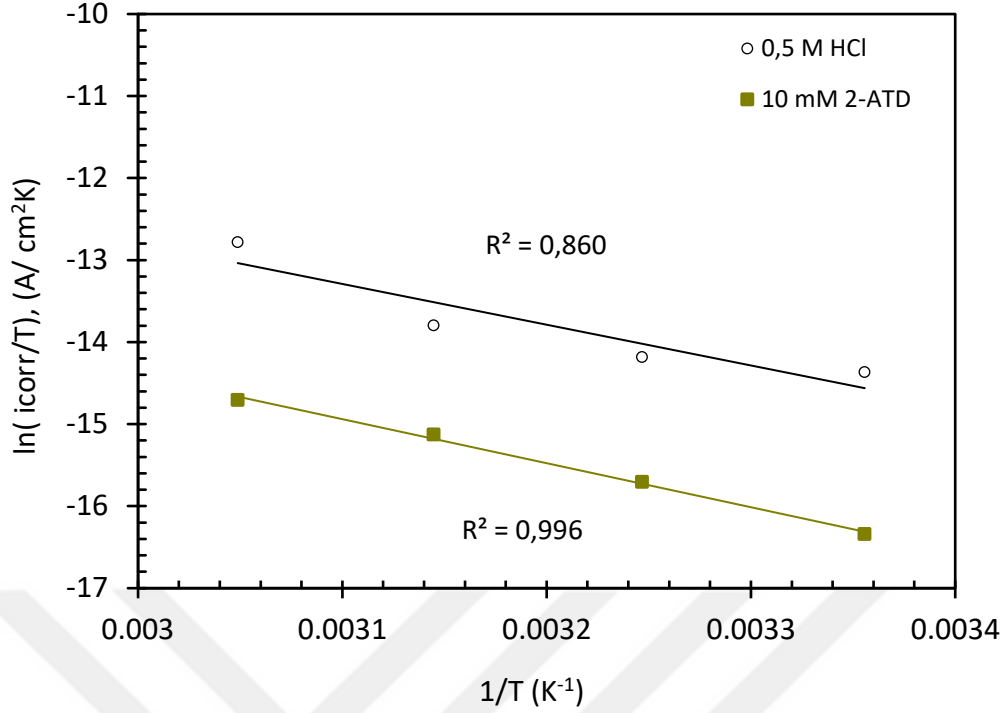
Bağıntılarda (4.3; 4.4) sembol olarak gösterilen A , E_a , R , T , h , N_a , ΔH^* ve ΔS^*

sırasıyla; Arrhenius faktörü, Aktivasyon enerjisi, Evrensel gaz sabiti, Mutlak sıcaklık, Plank sabiti, Avogadro sayısı, Entalpi ve Entropi' yi ifade etmektedir. Aktivasyon enerji değerleri, Şekil 4.18' deki, Entalpi (ΔH^*) ve Entropi (ΔS^*) değerleri ise Şekil 4.19' daki grafiklerin eğimlerinden yola çıkılarak sırasıyla (4.3) ve (4.4) bağıntıları yardımıyla hesaplanmıştır. Yumuşak çeliğe ait hesaplanan aktivasyon parametreleri ise inhibitörsüz ve inhibitörlü ortamlarda sırasıyla; İnhibitörsüz ortamda E_a değeri 43,91 kJ mol⁻¹ , ΔH^* değeri 41,31 kJ mol⁻¹ ve ΔS^* değeri ise -179,97 J mol⁻¹K⁻¹ olarak bulunurken, inhibitörlü ortamda ise E_a değeri 47,23 kJ mol⁻¹ , ΔH^* değeri 44,63 kJ mol⁻¹ ve ΔS^* değeri ise -183,38 J mol⁻¹K⁻¹ olarak belirlenmiştir.



Şekil 4. 18: 0,5 M HCl (○) ve 0,5 M HCl+10 mM 2-ATD(■) çözeltilerinin Arrhenius grafikleri.

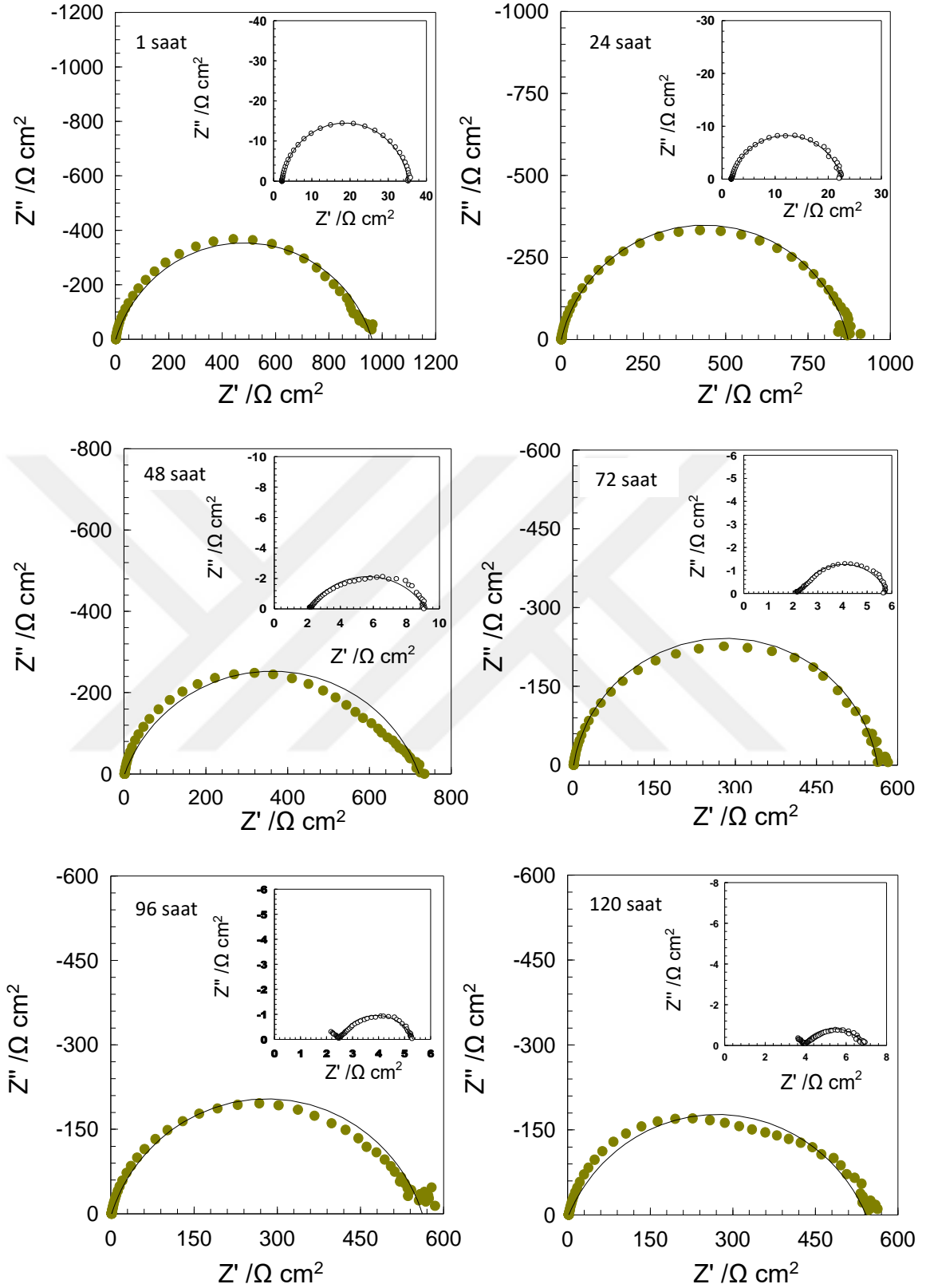
İnhibitörlü ortamın E_a değerinin, inhibitörsüz ortamın E_a değerinden yüksek olması; koruyucu bir tabaka oluşumu nedeniyle, yumuşak çeliğin korozyonu için daha yüksek enerji bariyerine ihtiyaç duyduğu anlamına gelir.



Şekil 4. 19: 0,5 M HCl (○) ve 0,5 M HCl+10 mM 2-ATD(■) çözeltilerinin Arrhenius grafikleri.

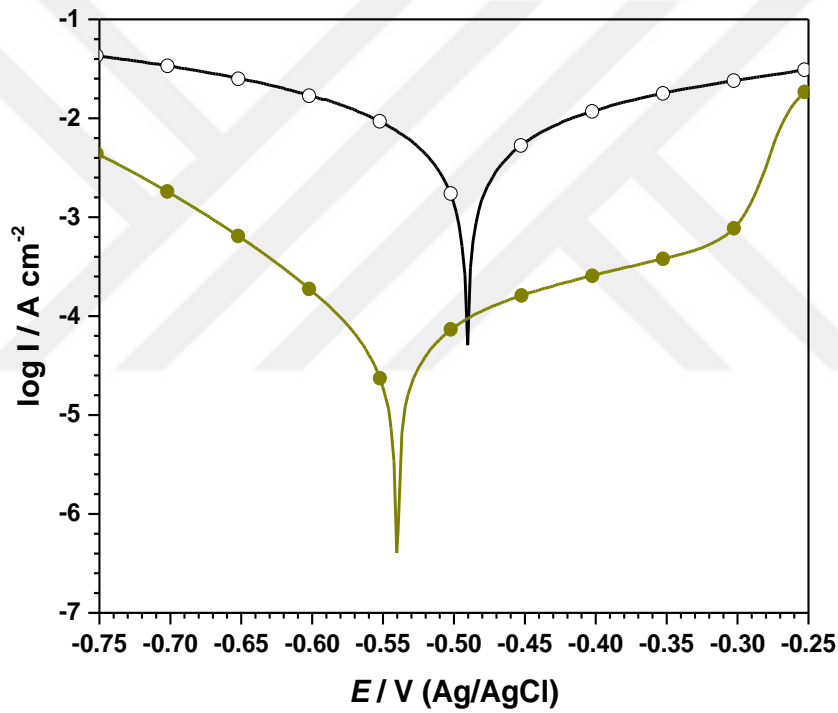
4.3. 0,5 M HCl ve 0,5 M HCl+ 10 mM 2-ATD Çözeltileri İçerisinde Yumuşak Çeliğin Zamanla Elde Edilen Nyquist ve Tafel Eğrilerinin Değerlendirilmesi

2-ATD inhibitör maddesinin uzun zamanlı süreçlerde nasıl bir koruma sağlayacağını gözleyebilmek ve zamanla inhibisyon etkinliğinin nasıl değiştiğini tespit etmek amacıyla derişim ve sıcaklık deneylerine ilaveten 25 °C’ de atmosfere açık şartlarda 0,5 M HCl içindeki yumuşak çelik elektrot ile çalışılan en fazla konsantrasyon olan 10 mM 2-Amino-1, 3, 5-Triazine-4,6-Dithiol (2-ATD) eklenmesiyle elde edilen çözeltilerde deneyler yapılmıştır. Ölçümler ilk 1. saat olmak üzere ardından her 24 saatte bir ve toplamda 120 saatlik bir periyot boyunca yapılmış olup bu ölçümlerden yola çıkılarak polarizasyon dirençleri (R_p) ve yüzde inhibisyon etkinlikleri (% $\dot{I}E$) hesaplanmıştır. Bu deneylerden elde edilen Nyquist diyagramları Şekil 4.20’ de verilmiştir.



Şekil 4. 20: 25 °C sıcaklıkta 0,5 M HCl çözeltisi (○) ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD(●) çözeltisi içerisinde yumuşak çeliğin zamanla elde edilen Nyquist diyagramları.

Şekil 4.20' deki Nyquist diyagramları incelendiğinde sürecin uzamasıyla birlikte inhibitörlü çözelti ortamlarında polarizasyon dirençlerinin ilk zamanlarda azaldığı daha sonra çok değişmediği gözükmektedir. Buna karşılık inhibitörsüz çözelti ortamında ise direncin kademeli bir şekilde sürekli azaldığı göze çarpmaktadır. Nyquist diyagramlarından yola çıkarak hesaplanan polarizasyon dirençleri ve yüzde inhibisyon etkinliklerine ait veriler Tablo 4.5' te verilmiştir. Polarizasyon dirençleri hem alternatif akım impedansı hem de klasik polarizasyon direnci hesaplama tekniği vasıtasıyla da hesaplanarak tabloda gösterilmiştir. Nyquist diyagramlarından elde edilen polarizasyon direnç değerleri kullanılarak (4.1) bağıntısı yardımıyla yüzde inhibisyon etkinlik (% $\dot{I}E$) değerleri belirlenmiştir.



Şekil 4. 21: 25 °C sıcaklıkta 0,5 M HCl çözeltisi (○) ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD(●) çözeltisinden 120 saat sonunda elde edilen E-I eğrisi.

Şekil 4.21' de 25 °C sıcaklıkta 120 saat bekleme sonrasında 0,5 M HCl inhibitörsüz ortamındaki yumuşak çelik elektrotuna ait korozyon potansiyeli -0,490 V olarak ölçülürken, 10 mM 2-ATD' li çözeltideki korozyon potansiyeli değeri -0,540 V olarak ölçülmüştür. 120 saatlik bekleme sonunda elde edilen E-I eğrisi incelendiğinde inhibitör maddesinin hem anodik hem de katodik tarafta akım yoğunluğunu düşürdüğü görülmektedir.

Tablo 4. 5: 25 °C sıcaklıkta 0,5 M hidroklorik asit çözeltisi (inhibitörsüz) ve 0,5 M HCl+10 mM 2-ATD çözelti ortamlarının farklı zaman aralıklarına ait polarizasyon dirençleri(R_p) Lineer Polarizasyon Dirençleri (LPR) (R_p^*) ve yüzde etkinlik ($\% \dot{I}E$) değerleri.

t (h)	0.5 M HCl		2-ATD			
	EIS	LPR	EIS	LPR		
	$R_p(\Omega \text{ cm}^2)$	$R_p^*(\Omega \text{ cm}^2)$	$R_p(\Omega \text{ cm}^2)$	$\dot{I}E(\%)$	$R_p^*(\Omega \text{ cm}^2)$	$\dot{I}E(\%)$
1	33,0	35	960	96,5	1000	96,5
24	20,7	18	870	97,6	855	97,9
48	7,0	8	720	99,0	745	98,9
72	3,5	4	561	99,3	532	99,2
96	2,8	3	560	99,5	525	99,4
120	3,1	3,5	540	99,4	500	99,3

Tablo 4.5' teki veriler incelendiğinde süreç uzadıkça hem inhibitörlü hem de inhibitörsüz ortamdaki yumuşak çeliğin polarizasyon dirençlerinin genellikle azaldığı gözükmemektedir. Polarizasyon dirençlerindeki azalmanın aksine yüzde inhibisyon etkinliklerinin ise genellikle arttığı tespit edilmiştir. Bu durum 2-ATD inhibitörünün uzun zaman süreçlerin de bile iyi koruma sağlayarak korozyon hızını azalttığını göstermektedir.

Tablo 4. 6: 25 °C sıcaklıkta 120 saat sonunda 0,5 M HCl ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD çözeltilerindeki potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler.

t (sa)	C_{inh} (mM)	E_{corr} (mV, Ag/AgCl)	i_{corr} (mA cm ⁻²)	b_c (mV dec ⁻¹)	CR (mpy)	$\dot{I}E(\%)$
120	0,0	-490	9,99	462,2	4564	-
	10,0	-540	0,045	97,2	20,44	99,5

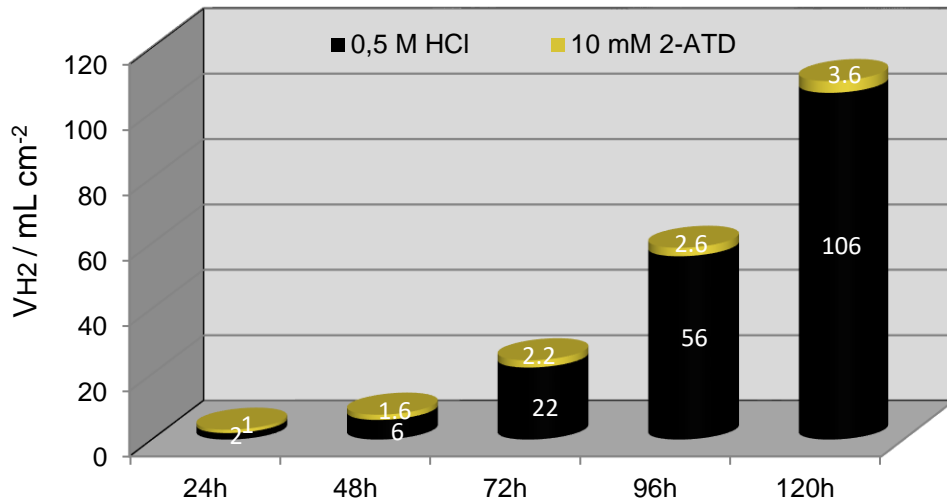
Yumuşak çeliğin 25 °C sıcaklıkta 120 saat boyunca 0,5 M HCl ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD çözeltilerinde bulundurulması sonunda elde edilen Tafel eğrilerinden

yola çıkarak elde edilen korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}), korozyon potansiyeli (E_{corr}), Tafel eğimi (bc), korozyon hızı (CR) ve inhibisyon etkinliği ($\%IE$) değerleri Tablo 4.6' da sunulmuştur. Tablo 4.6' daki veriler incelendiğinde inhibitörlü ortamdaki E_{corr} ve i_{corr} değerlerinin inhibitörsüz ortama nazaran çok düşük olması ve korozyon hızının çok düşük bir değer çıkması, 2-ATD moleküllerinin süreç uzasa bile yumuşak çelik yüzeyindeki korumanın varlığını göstermektedir. Ayrıca inhibisyon etkinliğinin 120 saat sonunda bile % 99,5 olarak belirlenmesi 2-ATD' nin iyi bir korozyon inhibitörü olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

4.4. Hidrojen Gazı Salınımı Deneyi ve Sonuçları

Elde edilen Elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS), lineer polarizasyon direnci (LPR) ve potansiyodinamik polarizasyon (PDP) sonuçlarını desteklemek ve korozyon sürecinin daha iyi anlaşılması için ayrıca hidrojen gazı (H_2) salınımı hacim ölçüm deneyi de yapılmıştır.

Yumuşak çelik atmosfere açık koşullarda ve 25 °C sabit sıcaklıkta iki ayrı kaptaki bulunan 0,5 M HCl ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD çözeltilerine daldırılarak korozyon tepkimesinin gerçekleşmesi ile katodik bölgede indirgenerek oluşacak hidrojen gazı hacminin ölçülmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 24 saat aralıklarla ve toplam 120 saat boyunca yapılmış olup ölçüm hacimleri Şekil 4.22' de sunulmuştur.



Şekil 4. 22: 25 °C sabit sıcaklıkta 0,5 M HCl ve 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD çözeltilerinden 120 saat boyunca ölçülen hidrojen gazı salınımı hacim grafiği.

Şekil 4.22' deki hidrojen gazı hacim miktarlarına bakıldığında, 120 saat sonunda inhibitörlü ortamdaki hidrojen gazı hacim miktarının toplam $3,6 \text{ mL cm}^{-2}$, inhibitörsüz ortamda ise toplam 106 mL cm^{-2} olarak ölçülmüştür. İki ortamdaki hidrojen gazı hacim miktarlarından yola çıkarak, inhibitör moleküllerinin (2-ATD) yumuşak çelik yüzeyine iyi bir şekilde adsorplanarak koruyucu bir tabaka oluşturduğu ve bunun neticesinde korozyon tepkime hızının ciddi anlamda yavaşladığı söylenebilir (Döner & Kardaş, 2011; Solmaz et al., 2008).

4.5. Adsorpsiyon İzotermi ve Değerlendirilmesi

Elektrokimyasal ölçümler ve hidrojen gazı salınımı deneyi sonuçları inhibitör maddeye ait moleküllerin çözelti içerisindeki yumuşak çeliğin yüzeyine çok iyi bir şekilde adsorplandığını ortaya koymaktadır bu sebeple adsorpsiyon mekanizmasının iyi bir şekilde açıklanması gerekmektedir.

2-ATD molekülünün $0,5 \text{ M HCl}$ çözelti ortamındaki adsorpsiyon biçimini araştırmak için inhibitörün etki mekanizmasında farklı adsorpsiyon izotermi uygulanmış olup Langmuir izotermi ile çok yüksek seviyede regresyon katsayısı ($R^2=1$) olarak belirlenmiştir. Tablo 4.1' deki farklı konsantrasyonlardan ve yüzde inhibisyonlarından yararlanılarak $0,5 \text{ HCl}$ çözelti ortamındaki 2-ATD inhibitörünün kaplanma kesri (θ) Langmuir izotermine uygulanmıştır. Adsorpsiyon denge sabitini (K_{ads}) hesaplamak için Langmuir izotermine kaplanma kesri (θ) ile inhibitör konsantrasyonu ($C_{(inh)}$) arasındaki matematiksel bağıntıdan (4.4) yararlanılmıştır (Keleş et al., 2008). Yumuşak çelik yüzeyinde belirlenen adsorpsiyon Langmuir adsorpsiyon izotermine uyduğu belirlenmiş olup elde edilen adsorpsiyona ait grafik Şekil 4.23' te verilmiştir.

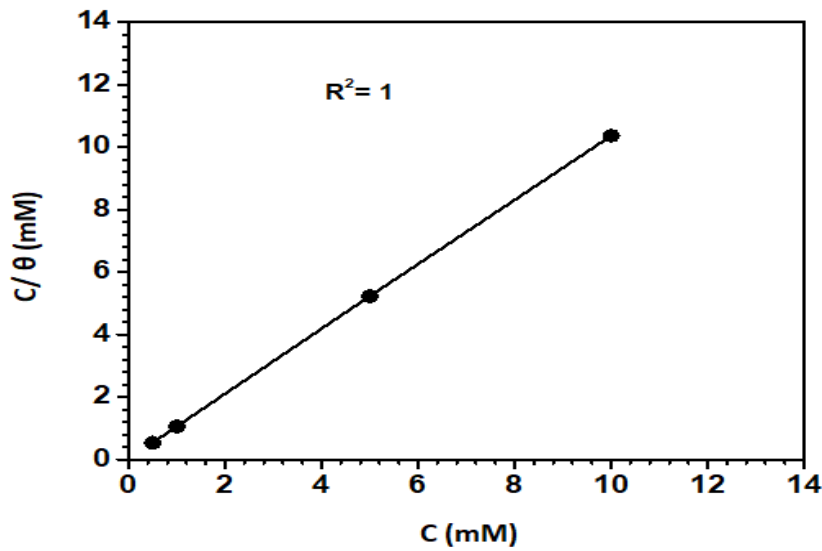
$$\frac{C_{(inh)}}{\theta} = \frac{1}{K_{(ads)}} + C_{(inh)} \quad (4.4)$$

Yukarıdaki bağıntı (4.4) kullanılarak hesaplanan adsorpsiyon denge sabiti (K_{ads}) değeri $3,9682 \times 10^4 \text{ M}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Diğer bir bağıntı olan (4.5)' ten yararlanılarak da adsorpsiyon serbest enerjisi (ΔG°_{ads}) değeri hesaplanmış olup adsorpsiyon serbest enerjisi (ΔG°_{ads}) ile adsorpsiyon denge sabiti (K_{ads}) (4.5) bağıntısı ile birbirleriyle ilişkilendirilmişlerdir (Ostapenko et al., 2014).

$$\Delta G^{\circ}_{\text{ads}} = - RT \ln(55.5K_{\text{ads}}) \quad (4.5)$$

Burada R: Evrensel gaz sabiti ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), T: Sıcaklık ($^{\circ}\text{K}$) ve 55,5 ise çözeltideki suyun konsantrasyonunu ifade etmektedir.

Adsorpsiyon serbest enerji değeri, yumuşak çelik yüzeyinde gerçekleşen molekül adsorpsiyonun istemli olup olmadığını ortaya koyar. Eğer bu değer negatif bir işarete sahip ise adsorpsiyon olayı kendiliğinden gerçekleşiyor demektir. $\Delta G^{\circ}_{\text{ads}}$ 'ye ait çıkan sayının mutlak değeri baz alındığında sayı büyüdükçe bu olayın kendiliğinden yürümeye daha istekli olduğunu gösterir (Seung-Hyun et al., 2013; Shao et al., 2022). Bu çözelti koşullarında 2-ATD inhibitörüne ait hesaplanan $\Delta G^{\circ}_{\text{ads}}$ değeri $-36,19 \text{ kJ/mol}$ olarak belirlenmiştir. Adsorpsiyon enerji değerinin negatif işaretli ve sayının mutlak değerinin büyük olması bu adsorpsiyon mekanizmasının hem kendiliğinden gerçekleşebileceğini hem de yumuşak çelik yüzeyi ile inhibitör molekülleri arasında güçlü etkileşimler var olduğunu gösterir. Adsorpsiyon serbest enerji ($\Delta G^{\circ}_{\text{ads}}$) değerinin -20 kJ/mol ile -40 kJ/mol değerleri arasında olması yumuşak çelik yüzeyindeki adsorpsiyon olayının hem fiziksel hem de kimyasal bir şekilde gerçekleştiği söylenebilir (Gurjar et al., 2022).



Şekil 4. 23: Lagmuir adsorpsiyon izotermi.

Metal yüzeyinde meydana gelen fiziksel ve kimyasal adsorpsiyon arasındaki sınır çizgisi net bir şekilde bilinmemesine karşın, adsorpsiyon enerji değeri ($\Delta G^{\circ}_{\text{ads}}$) -20 kJ/mol 'a eşit ya da daha az olması durumunda, pozitif veya negatif yüklü organik moleküller ve yüklü metal arasında elektrostatik olarak gerçekleşen etkileşimlerin

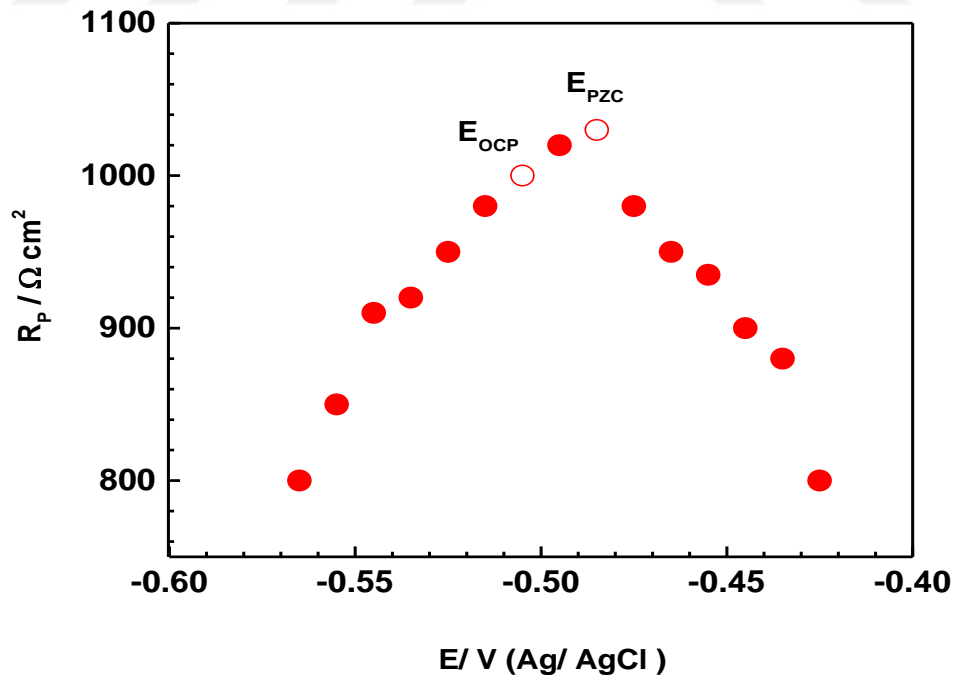
varolduğu; bu değerin -40 kJ/mol' a eşit veya daha büyük değerlerde ise metal yüzeyinde koordine türü bağ yapmak için organik moleküllerden buraya yk geçişini (transferini) gerektiren etkileşimler olduğu söylenmektedir (Moretti et al., 2013). Ayrıca organik bir molekülün metal yüzeyindeki adsorpsiyonu hakkında tamamen kimyasal veya tamamen fiziksel adsorpsiyon olduğu hakkında kesinlik bildiren bir değerlendirme yapılamamaktadır (Erbil, 2012).

4.6. Metal Yükünün Belirlenmesi Deneyi ve Sonuçları

Korozyonu nleme mekanizmasını anlamak için metalin elektriksel yükünün bulunması için (4.6) bağıntısı ile Şekil 4.24' teki grafik kullanılmıştır.

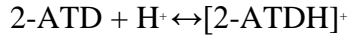
$$E_r = E_{ocp} - E_{pzc} \quad (4.6)$$

Burada (4.6) bağıntısında E_r ve E_{pzc} sırasıyla; Antropov'un rasyonel korozyon potansiyelini ve sıfır yük potansiyelini ifade etmektedir (Wang et al., 2011). E_{pzc} değeri, inhibitör ortamında maksimum R_p noktasına denk gelen gerilimdir ve Şekil 4.24' te görüldüğü gibi bu E_{pzc} değeri (-0,484 V (Ag/AgCl)) olarak belirlenmiştir. Aynı zelti ortamındaki E_{ocp} değeri ise -0,505 V olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4. 24: 0,5 M HCl + 10 mM 2-ATD zelti ortamındaki yumuşak çeliğe ait R_p ve elektrot potansiyeli.

Bağıntısı (4.6) yardımıyla E_r değeri; $E_r = -0,505 - (-0,484) = -0,021$ V olarak hesaplanır ve bu değer negatif olarak bulunması, çözelti ortamına 2-ATD' nin ilave edilmesiyle gerçekleştiği söylenebilir. Yumuşak çelik yüzeyinde gerçekleşen adsorpsiyon olayı başlangıçta muhtemelen protonlanmış inhibitör (2-ATDH^+) moleküllerinin, klor iyonlarıyla köprü oluşturarak elektrostatik bir biçimde meydana geldiği ardından çözelti içerisindeki bu moleküllerin metal yüzeyinde var olan su molekülleriyle yer değiştirmesi şeklinde meydana gelir.



Fiziksel adsorpsiyona ilaveten inhibitör molekülleri ile negatif yüklü yumuşak çelik arasında kimyasal adsorpsiyon da meydana gelerek yüzeyde koruyucu bir film tabakası oluşur ve böylece korozyon hızı yavaşlatılmış olur.

4.7. Yüzey Görüntüleri ve Element Analizi Verilerinin Değerlendirilmesi

Yüzey görüntüleme ve element analizleri, yapılmış olan elektrokimyasal teknikleri tamamlayıcı niteliğinde olup korozyon mekanizmasının daha somut bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanır. Ayrıca yumuşak çelik yüzeyinde 120 saat boyunca gerçekleşen korozyon tahribatının nasıl olduğunu görmek açısından da son derece önemlidir (Keleşoğlu et al., 2021).

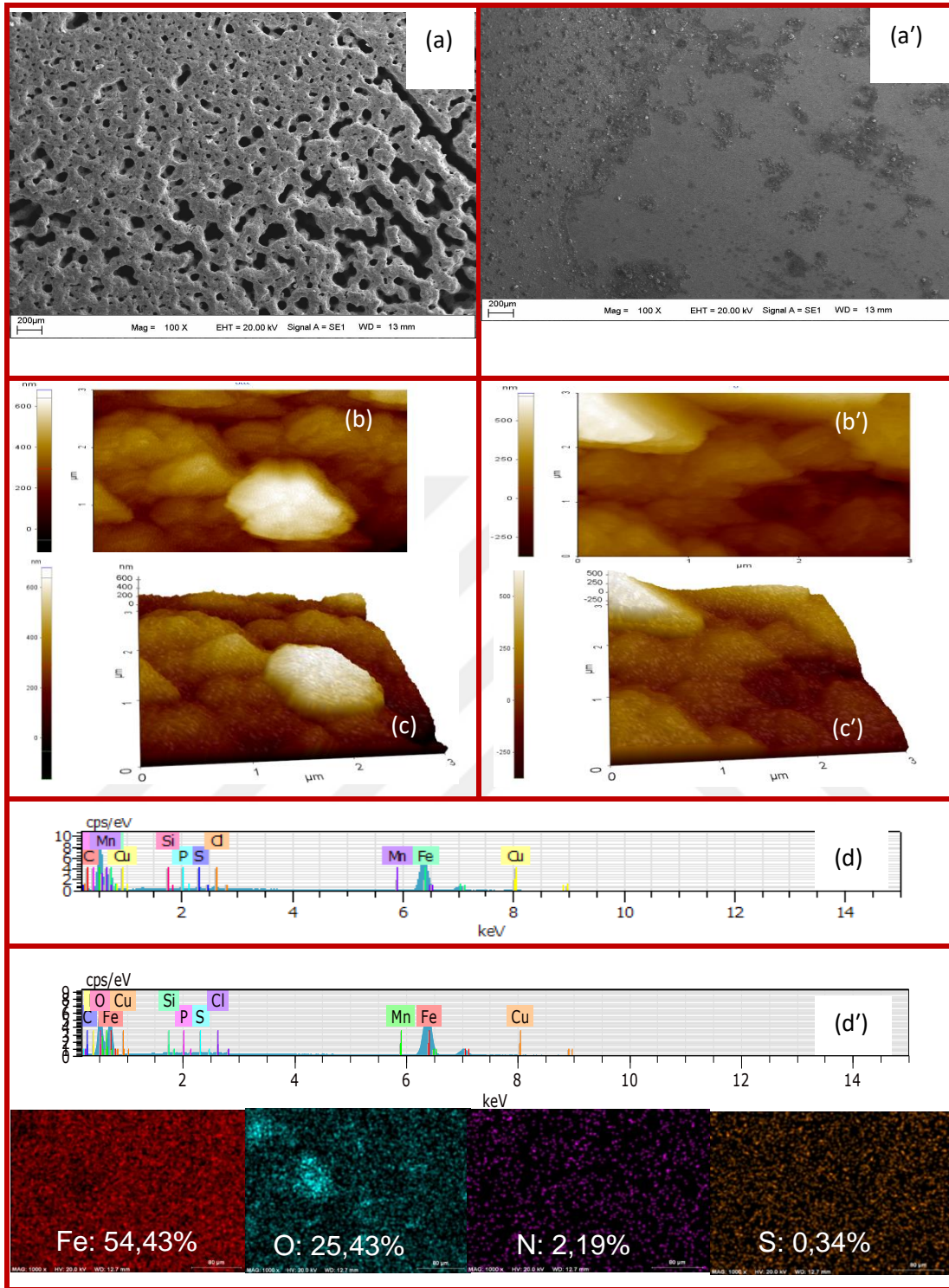
Yumuşak çelik elektrotunun atmosfere açık şartlarda 0,5 M HCl ve 0,5 M HCl + 10 mM 2- ATD barındıran çözeltilerde 120 saat bekletildikten daha sonra elde edilen SEM, 2D/3D görüntüleri ve EDX analizleri Şekil 4.25' te sunulmaktadır.

Şekildeki görüntüler incelendiğinde inhibitörsüz ortamdaki SEM görüntüsü Şekil 4.25.(a) incelendiğinde korozif ortamda savunmasız kalan yumuşak çeliğin yüzeyinde ciddi anlamda delinmelerin, çukurların, yarıkların ve korozyon ürünlerinin biriktiği görülmektedir ve bu durumlara çözelti ortamındaki Cl^- iyonları sebep olmaktadır (Mashuga et al., 2021). &

Buna karşın inhibitörlü ortamdaki yumuşak çeliğin yüzeyine ait SEM görüntüsü Şekil 4.25.(a') incelendiğinde ise 2-ATD moleküllerinin yüzeye iyi bir şekilde adsorplanarak film tabakası oluşturduğu ve bu sayede yüzeyin çok az bir korozyona uğradığı ve böylece yüzeyin çok daha düzgün kaldığı görülmektedir.

Yumuşak çelik yüzeyine ait 2D ve 3D AFM görüntüleri Şekil 4.25(b,b',c,c')' te verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde inhibitörsüz ortamdan elde edilen görüntülerin(b,c), 2-ATD' li ortamdan elde edilen görüntülere (b',c') göre çok daha fazla korozyona uğradığı ve bunun neticesinde yüzeydeki çukurların ve çatlakların daha fazla olduğu gözükmetedir. 0,5 M HCl ortamındaki çelik yüzeyinin pürüzlülük değeri 138,3 nm iken bu değer 2-ATD' li ortamda 71,1 nm' ye düşmüştür. Yumuşak çelik yüzeyindeki pürüzlülük değerinin düşme nedeni inhibitör moleküllerinin bu yüzeye iyice adsorplanarak koruyucu bir tabaka oluşturup korozyon mekanizmasını yavaşlatmalarından gelir (Quraishi et al., 2017).

0,5 M HCl çözeltisindeki yumuşak çeliğin atomik dağılımı ölçülmüş olup bu oranlar; Fe: %40,44; O: %54,29; N: %1,93 ve S: %0,51 olarak belirlenmiştir. Yüksek miktardaki oksijen (O) miktarı asit çözeltisinde oluşan demiroksit oluşumundan kaynaklanmaktadır(Berdimurodov vd., 2021). 2-ATD' li ortamdaki bu oranlar Şekil 4.25' te gösterilmiş olup N atom oranının arttığı ancak S atom oranının ise azaldığı gözükmetedir. İnhibitörlü ortamda bulunan yumuşak çelik yüzeyindeki Fe atom oranının daha fazla olması, yüzeyde korozyon olayının azalmış olması anlamına gelmektedir.



Şekil 4. 25: 25 °C sabit sıcaklıkta 0,5 HCl ve 0,5 M HCl + 10mM 2-ATD çözeltileri içerisinde yumuşak çeliğin zamanla elde edilen SEM (a,a'), AFM-2D (b,b') ve 3D (c,c'), EDX atom dağılımı(d,d') ve haritalama. [(a,b,c,d) inhibitörsüz - (a',b',c',d') inhibitörlü].

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

1. Atmosfere açık koşullarda yumuşak çeliğin, 0,5 molar hidroklorik asit çözeltisi ve ayrıca 0,5 M HCl' ye 0,5 mM, 1 mM, 5 mM, 10 mM 2-ATD organik inhibitörün ayrı ayrı ilave edilmesiyle hazırlanan çözeltilerde yapılan deneylerden elde edilen potansiyel- akım (E-I) eğrilerine bakıldığında, inhibitörlü çözeltilerde akım değerinin azaldığı görülmüştür. İnhibitör konsantrasyonu (derişimi) arttıkça akım yoğunluğunun daha fazla azaldığı tespit edilmiştir. 2-ATD inhibitörünün ilave edilmesiyle hem anodik hem de katodik bölgedeki akım yoğunluğunun azalması, bu inhibitörün karma tip inhibitör olduğunu göstermektedir.
2. Bütün inhibitörlü çözeltilerde ölçülen korozyon potansiyeli, inhibitörsüz çözelti ortamında ölçülen değerden daha negatife bölgeye yani katodik yöne kaydığı görülmüş ve en yüksek derişim olan 10 mM' da bu değer katodik bölgeye daha fazla kaydığı gözlenmiştir. Alternatif Akım İmpedansı (EIS) tekniği kullanılarak ve en yüksek derişimden (10 mM 2-ATD) elde edilen Nyquist diyagramından yola çıkarak hesaplanan en yüksek polarizasyon direnci $960 \Omega \text{ cm}^2$ olarak bulunmuştur. Bu en yüksek derişimde elde edilen verilerden yola çıkarak hesaplanan yüzde etkinlik inhibisyonu (%İE) değeri ise % 96,5 olup bu değer en iyi inhibisyon değeridir.
3. Çalışılan sıcaklık deneylerinden (25 °C, 35 °C, 45 °C ve 55 °C) elde edilen verilerden yola çıkarak hesaplanan yüzde inhibisyon etkinlik değerlerinin çok az değişmesi, bu inhibitör maddenin farklı sıcaklık değerlerinde bile koruma özelliğini devam ettirdiğini göstermektedir. En yüksek sıcaklık olan 55 °C' de bile inhibisyon etkinliği % 95,7 olarak belirlenmiştir.
4. Açık devre potansiyeli (OCP) deneyleri ve bu deneylerden elde edilen sonuçlardan yola çıkarak 2-ATD inhibitörünün OCP potansiyelini daha pozitif taraflara kaydırması, bu inhibitörün korozyon mekanizmasını yavaşlattığını göstermektedir.

5. 2-ATD inhibitör moleküllerinin yumuşak çeliğin yüzeyine çok iyi adsoplandığını, adsorpsiyon denge sabitine bakarak anlayabiliriz. Ayrıca yumuşak çelik yüzeyindeki adsorpsiyon mekanizması Langmuir adsorpsiyon izotermine uyum sağlamaktadır.
6. Organik inhibitör olarak tercih edilen 2-ATD maddesine ait adsorpsiyon serbest enerjisi (ΔG°_{ads}) değerinin -36,19 kJ/mol olarak belirlenmesi bu adsorpsiyon mekanizmasının hem kendiliğinden (istemli) gerçekleşebileceğini hem de yumuşak çelik yüzeyi ile inhibitör molekülleri arasında güçlü etkileşimler olduğunu yani hem fiziksel hem de kimyasal adsorpsiyon gerçekleşebileceğini gösterir.
7. 24 saat aralıklarla ve toplamda 120 saat boyunca inhibitörlü ve inhibitörsüz çözelti ortamlarında yapılan deney sonuçları değerlendirildiğinde, yumuşak çeliğin inhibitörlü ortamda daha az korozyona uğradığı ve böylece 2-ATD inhibitörünün zaman geçse bile iyi bir koruyuculuk sağladığı tespit edilmiştir.
8. Atmosfere açık şartlarda olacak şekilde bir tanesi inhibitörsüz 0,5 M HCl çözeltisine diğeri ise aynı ortamda bulunan 10 mM 2-ATD + 0,5 M HCl içeren inhibitörlü çözeltiye daldırılıp 120 saat bekleme sonrasında çıkartılıp çekilen SEM ve AFM görüntüleri incelendiğinde inhibitörlü ve inhibitörsüz görüntüleri arasında çok büyük bir fark olduğu anlaşılmaktadır. Bu görüntülerden yola çıkarak inhibitörlü ortamda adsorpsiyon olayı sayesinde inhibitör moleküllerinin yumuşak çelik yüzeyine çok iyi bir şekilde tutunup önemli derecede korozyon hızını yavaşlatıkları söylenebilir.
9. Hidrojen salınımı deneyinden elde edilen hacim sonuçları, 2-ATD moleküllerinin yumuşak çelik yüzeyine iyi bir şekilde adsoplanarak katodik bölgede hidrojen indirgenmesine denk gelen redoks yarı tepkimesini iyice azalttığı ve korozyon hızını yavaşlattığını göstermiştir.
10. Metal yükü belirleme deneyinden metal yükünün negatif olduğu tespit edilmiş olup, fiziksel adsorpsiyona ilaveten inhibitör molekülleri ile negatif yüklü yumuşak çelik arasında kimyasal adsorpsiyon da meydana gelerek yüzeyde koruyucu bir film tabakası oluşur ve böylece korozyon hızı yavaşlatılmış olur.

Atmosfere açık koşullarda farklı derişim ve sıcaklıklarda yapılan bu çalışma ile elde edilen sonuçlar ve görüntüler incelendiğinde 2-ATD inhibitör moleküllerinin 0,5 M HCl çözeltisi içerisinde yumuşak çelik yüzeyine çok iyi bir şekilde adsorplandığı ve yüzeyde iyi bir film tabakası oluşturarak yumuşak çeliğin bulunduğu korozif ortamdaki moleküllerle etkileşimini önemli derecede azalttığı ve böylece iyi bir

koruma sağladığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar neticesinde 2-ATD maddesi, atmosfere açık hidroklorik asit ortamlarında yumuşak elik korozyonunun önlenmesinde inhibitör olarak kullanılması tavsiye edilir.



KAYNAKÇA

- Ali, A. S., Jawich, M. W. S., Oweimreen, G. A., (2012). Heptadecyl-tailed mono- and bis-imidazolines: A study of the newly synthesized compounds on the inhibition of mild steel corrosion in a carbondioxide-saturated saline medium. *Corrosion Science*, 65, 104–112.
- Bashir, S., Thakur, A., Lgaz, H., Chung, III-M., Kumar, A. (2020). Corrosion inhibition efficiency of bronopol on aluminium in 0.5 M HCl solution: Insights from experimental and quantum chemical studies. *Surfaces and Interfaces*, 20, 100542.
- Bedair, M. A., Elaryian, H. M., Bedair, A. H., Aboushabba, R. M., Fouda, A. E. A. S., (2023). Novel coumarin-buta-1,3-diene conjugated donor–acceptor systems as corrosion inhibitors for mild steel in 1.0 M HCl: Synthesis, electrochemical, computational and SRB biological resistivity. *Inorganic Chemistry Communications*, 148, 110304.
- Berdimurodov, E., Kholikov, A., Akbarov, K., Guoc, L., Abdullah, A.M., Elik, M. (2021). A gossypol derivative as an efficient corrosion inhibitor for St2 steel in 1 M HCl + 1 MKCl: An experimental and theoretical investigation, *Journal of Molecular Liquids*, 328, 115475.
- Berradja, A., (2019). *Electrochemical Techniques for Corrosion and Tribocorrosion, Corrosion Inhibitors*.
- Cao, C. (1996). On electrochemical techniques for interface inhibitor research, *Corrosion Science*, 38, 2073–2082.
- Dehri, İ., Erbil, (2000). The effects of relative humidity on the atmospheric corrosion of defective organic coating materials: an EIS study with a new approach. *Corrosion Science*, 42:969-978.
- Dehri, İ., Özcan, M., (2006). The effect of temperature on the corrosion of mild steel in acidic media in the presence of some sulphur-containing organic compounds. *Materials Chemistry and Physics*, 98:316–323.
- Dehri, İ., Özcan, M., Erbil, M., (2004). Organic sulphur-containing compounds as corrosion inhibitors for mild steel in acidic media: correlation between inhibition efficiency and chemical structure. *Applied Surface Science* 236: 155–164.
- Doğru Mert, B., Mert, M. E., Kardaş, G., Yazıcı, B., (2011). Experimental and theoretical investigation of 3-amino-1,2,4-triazole-5-thiol as a corrosion inhibitor for carbon steel in HCl medium. *Corrosion Science*, 53, 4265–4272.
- Doğru Mert, B., Ongun Yüce, A.,Kardaş, G., Yazıcı, B., (2014). Inhibition effect of 2-amino-4-methylpyridine on mild steel corrosion: Experimental and theoretical investigation. *Corrosion Science*, 85, 287–295.

- Dohare, P., Ansari, K. R., Quraishi, M. A., Obot, I. B., (2017). Pyranpyrazole derivatives as novel corrosion inhibitors for mild steel useful for industrial pickling process: experimental and quantum chemical study. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 52, 197-210.
- Döner, A., Kardaş, G., (2011). N-Aminorhodanine as an effective corrosion inhibitor for mild steel in 0.5 M H₂SO₄. *Corrosion Science*, 53, 4223–4232.
- Erbil, M., (1984). *Korozyon İnhibitörleri*. SEGEM, Ankara, 148.
- Erbil, M., (2012). *Korozyon İlkeler ve Önlemler*. Poyraz Ofset, Ankara, 373 s.
- Gurjar, S., Ratnani, S., Kandwal, P., Tiwari, K.K., Sharma, A., Sharma S.K., (2022) Experimental and theoretical studies of 1-Benzyl pyridazinium bromide as green inhibitor for mild steel corrosion, *e- Prime Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2, 100054.
- He, X., Dunn, D. S., Csontos, A. A., (2007). Corrosion of similar and dissimilar metal crevices in the engineered barrier system of a potential nuclear waste repository. *Electrochimica Acta*, 52, 7556-7569.
- Hsu, C. H., Mansfeld, F., (2001). Technical note: concerning the conversion of the constant phase element parameter Ys into a capacitance. *Corrosion Science*, 57, 747–748.
- Kaya, F., Solmaz, R., Geçibesler, İ. H. (2023). The use of methanol extract of *Rheum Ribes* (Işgın) flower as a natural and promising corrosion inhibitor for mild steel protection in 1 M HCl solution. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*.
- Keleş, H., Keleş, M., Serindağ, O., Dehri, İ., (2008). Adsorption and inhibitive properties of aminobiphenyl and its Schiff base on mild steel corrosion in 0.5M HCl medium. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 320:138–145.
- Keleşoğlu, A., Yıldız, R., Dehri, İ., (2019). 1-(2-Hydroxyethyl)-2-imidazolidinone as corrosion inhibitor of mild steel in 0.5 M HCl solution: thermodynamic, electrochemical and theoretical studies. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 33(18), 2010-2030.
- Keleşoğlu, A., Sığırcık, G., Yıldız, R., Dehri, İ. (2021). Inhibition efficiency of pyrazinecarboxylic acid on mild steel in acidic environment. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 35(13), 1426-1446.
- Keleşoğlu, A., Sığırcık, G., Yıldız, R., Dehri, İ. (2023). Experimental and theoretical investigation of pyrazinecarboxamide against mild steel corrosion. *Journal of Dispersiyon Science and Technology*, 44(2), 329-341.

- Mashuga, M.E., Olasunkanmi, L.O., Lgaz, H., Sherif, E-S. M., Ebenso, E.E. (2021). Aminomethylpyridazine isomers as corrosion inhibitors for mild steel in 1 M HCl: Electrochemical, DFT and Monte Carlo simulation studies. *Journal of Molecular Structure*, 344, 117882.
- McEwan, J. J. (2004). Corrosion control in Southern Africa, 2. baskı, Güney Afrika: Corrosion Institute of South Africa, 16-18.
- Moretti, G., Guidi, F., Fabris, F., (2013). Corrosion inhibition of the mild steel in 0.5 M HCl by 2-butyl-hexahydropyrrolo[1,2-b][1,2]oxazole. *Corrosion Science*, 76:206–218.
- Munis, A., Zhao, T., Zheng, M., Rehman, A.U., Wang, F. (2020). A newly synthesized green corrosion inhibitor imidazoline derivative for carbon steel in 7.5% NH₄Cl solution. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 16, 100258.
- Muthukrishnan, P., Prakash, P., Kavi Rasu, K., Sakthivel, P., Muthukrishnaraj, A. (2023). Charge transfer resistance of nitro substituted dibenzalacetone on mild steel against acid attack. *Journal of the Indian Chemical Society*, 100, 100834.
- Noor, E. A., Al-Moubaraki, A. H., (2008). Corrosion Behavior of Mild Steel in Hydrochloric Acid Solutions. *International Journal Electrochemistry Science*, 3:806 – 818.
- Ostapenko, G. I., Gloukhov, P. A., Bunev, A. S., (2014). Investigation of 2-cyclohexenylcyclohexanone as steel corrosion inhibitor and surfactant in hydrochloric acid. *Corrosion Science*, 82:265–270.
- Özcan, M., Karadağ, F., Dehri, İ., (2008). Investigation of adsorption characteristics of methionine at mild steel/sulfuric acid interface: An experimental and theoretical study. *Colloids and Surfaces a Physicochemical and Engineering Aspects*, 316:55–61.
- Özcan, M., Solmaz, R., Kardaş, G., Dehri, İ. (2008). Adsorption properties of barbiturates as green corrosion inhibitors on mild steel in phosphoric acid. *Colloids and Surfaces a Physicochemical and Engineering Aspects*, 325:57–63.
- Özcan, M., Dehri, İ. (2012). Determination of impedance parameters for mild steel/HCl interface using integration method. *Corrosion Science*, 54, 201–204.
- Quraishi, M., A, Kumar, D., Kumar, V., (2017). Corrosion of Reinforced Steel in Concrete and Its Control: An overview. *Journal of Steel Structures & Construction*. 03. 10.4172/2472-0437.1000124.
- Qi, K., Qiu, Y., Chen, Z., Guo, X. (2012). Corrosion of conductive polypyrrole: Effects of environmental factors, electrochemical stimulation, and doping anions. *Corrosion Science*, 60, 50-58.

- Salcı, A., Yüksel, H., Solmaz, R. (2022). Experimental studies on the corrosion inhibition performance of 2-(2-aminophenyl)benzimidazole for mild steel protection in HCl solution. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 134, 104349.
- Sarı, A. (2015). 1-(2-Hidroksietil)-2-İmidazolidion (2-HEI) 'in yumuşak çelik korozyonuna 0,5 M HCl çözeltisi içinde etkisi. [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi]. Çukurova Üniversitesi.
- Seung-Hyun, Y., Young-Wun, K., Chung, K., Nam-Kyun, K., Joon-Seop, K. (2013) Corrosion inhibition properties of triazine derivatives containing carboxylic acid and amine groups in 1.0 M HCl solution. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(32), 10880–10889.
- Shao, H., Yin, X., Zhang, K., Yang, W., Chen, Y., Liu, Y. (2022) N-[2-(3-indolyl)ethyl]-cinnamamide synthesized from cinnamomum cassia presl and alkaloid tryptamine as green corrosion inhibitor for Q235 steel in acidic medium. *Journal of Materials Research and Technology*, 20, 916-933.
- Sığırcık, G., Yildirim, D., Tüken, T. (2017). Synthesis and inhibitory effect of N, N'-bis (1-phenylethanol) ethylenediamine against steel corrosion in HCl Media. *Corrosion Science*, 120, 184-193.
- Solmaz, R., Kardaş, G., Yazıcı, B., Erbil, M. (2008). Adsorption and corrosion inhibitive properties of 2-amino-5-mercapto-1,3,4-thiadiazole on mild steel in hydrochloric acid media. *Colloids and Surfaces a Physicochemical and Engineering Aspects*, 312, 7–17.
- Solmaz, R. (2013). Investigation of corrosion inhibition mechanism and stability of Vitamin. B1 on mild steel in 0.5 M HCl solution. *Corrosion Science*. 81, 75– 84.
- Szocinski, M., Darowicki, K. (2020). Performance of organic coatings upon cyclic mechanical load. *Progress in Organic Coatings*, 146, 105718.
- Tang, Y., Zhang, F., Cao, Z., Wu, Z., Jing, W., Chen, Y. (2012). Performance and theoretical study on corrosion inhibition of 2-(4-pyridyl)-benzimidazole for mild steel in hydrochloric acid. *Corrosion Science*, 61:1–9.
- Teng, Y., Zhang, W., Wang, M., Yu, C., Ma, Y., Bian, J., Yang, X., Zhang, D. (2021). Anthocyanin as sustainable and non-toxic corrosion inhibitor for mild steel in HCl media: Electrochemical, surface morphology and theoretical investigations. *Journal of Molecular Liquids*, 344, 117721.
- Tozar, A., Karahan, İ. H., (2014). Structural and Corrosion Protection Properties of Electrochemically Deposited Nano-sized Zn-Ni Alloy Coatings. *Applied Surface Science*, 318, 15-23.
- Tüken, T., Demir, F., Kıcı, N., Sığırcık, G., Erbil, M., (2012). Inhibition effect of 1-ethyl-3-methylimidazolium dicyanamide against steel corrosion. *Corrosion Science*, 59:110–118.

- Üneri, S., (1984). Korozyon İnhibitörlerinin Prensipleri ve Pratiği, Segem, Ankara, 121 s.
- Üneri, S., (1998). Korozyon ve Önlenmesi. Poyraz Matbaası, Ankara, 413 s.
- Yıldız, R., Döner, A., Doğan, T., Dehri, İ. (2014). Experimental studies of 2- pyridine carbonitrile as corrosion inhibitor for mild steel in hydrochloric acid solution. *Corrosion Science*, 82:125–132.
- Yıldız, R., Doğan, T., Dehri, İ. (2014). Evaluation of corrosion inhibition of mild steel in 0.1 M HCl by 4-amino-3-hydroxynaphthalene-1-sulphonic acid. *Corrosion Science*, 85:215-221.
- Yıldız, R. (2015). An electrochemical and theoretical evaluation of 4, 6-diamino-2-pyrimidinethiol as a corrosion inhibitor for mild steel in HCl solutions. *Corrosion Science*, 90, 544-553.
- Yıldız, R. (2019). Adsorption and inhibition effect of 2,4-diamino-6-hydroxypyrimidine for mild steel corrosion in HCl medium: experimental and theoretical investigation. *Ionics*, 25, 859–870.
- Yousef, T. A., Alhamzani, A. G., Abou-Krishna, M. M., Pradeep Kumar, C. B., Raghu, M. S., Yogesh Kumar, K., Prashanth, M. K., Jeon, B. H. (2023). Experimental and theoretical examinations of triazole linked saccharin derivatives as organic corrosion inhibitors for mild steel in hydrochloric acid. *Journal of Molecular Structure*, 1275, 134603.
- Ziouani, A., Atia, S., Hamani, H., Douadi, T., Al-Noaimi, M., Gherraf, N. (2023). Molecular dynamic simulation and experimental investigation on the synergistic mechanism and synergistic effect of (1Z) N [2 (methylthio) phenyl] 2oxopropanehydrazonoyl chloride (S1) corrosion inhibitor on mild steel in acid medium 1M HCl. *Journal of the Indian Chemical Society*, 100, 100832.
- Zhu, Y., Free, M. L., Woollam, R., & Durnie, W. (2017). A review of surfactants as corrosion inhibitors and associated modeling. *Progress in Materials Science*, 90, 159-223.
- Wang, X.M., Yang, H.Y., Wang, F.H. (2011). An investigation of benzimidazole derivative as corrosion inhibitor for mild steel in different concentration + solutions, *Corrosion Science*, 53, 113-121.
- Wei, L., Gao, K. (2019). Understanding the general and localized corrosion mechanisms of Cr-containing steels in supercritical CO₂-saturated aqueous environments. *Journal of Alloys and Compounds*, 792, 328-340.
- Wen, C., Li, J., Wang, S., Yang, Y. (2015). Experimental study on stray current corrosion of coated pipeline steel. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27, 1555-1561.
- Quraishi, Mumtaz & Nayak, Dheeresh & Kumar, R & Kumar, V.. (2017). Corrosion of Reinforced Steel in Concrete and Its Control: An overview. *Journal of Steel Structures & Construction*. 03. 10.4172/2472-0437.1000124.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	Selim ARSLANHAN
Yabancı Dili	İngilizce
Orcid Numarası	0009-0001-4302-5238
Ulusal Tez Merkezi Referans Numarası	10485921
Lise	Mardin Lisesi
Lisans	Fırat Üniversitesi/ Eğitim Fakültesi/ Fen Bilgisi Öğretmenliği (2006 Mezunu)
Yüksek Lisans	
Mesleki Deneyim	MEB, 2006-2023 Fen Bilimleri Öğretmeni (Halen devam ediyor)
Akademik Çalışmalar	Arslanhan, S. & Yıldız, R. (2023). Investigation of the Effect Of 2-amino-1, 3, 5-triazine-4, 6-dithiol on Corrosion Inhibition Of Mild Steel in 0,5 HCl Solutions. 3.Uluslararası Mühendislik ve Doğa Bilimleri Çalışmaları Kongresi/Ankara 24-25 Mayıs.