



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

Yüksek Lisans Tezi

HCl ASİT ÇÖZELTİSİNDE YUMUŞAK ÇELİĞİN
KORUNMASI İÇİN YEŞİL BİR KOROZYON
İNHİBİTÖRÜ OLARAK KİLİS YÖRESİNDE YETİŞEN
KUŞ EKMEĞİ (*POLYGONUM AVICULARE L.*)
ÖZÜTÜNÜN İNCELENMESİ

Ahmet KARTAL

22204001

Mardin 2024

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

Yüksek Lisans Tezi

HCl ASİT ÇÖZELTİSİNDE YUMUŞAK ÇELİĞİN
KORUNMASI İÇİN YEŞİL BİR KOROZYON
İNHİBİTÖRÜ OLARAK KİLİS YÖRESİNDE YETİŞEN
KUŞ EKMEĞİ (*POLYGONUM AVICULARE L.*)
ÖZÜTÜNÜN İNCELENMESİ

Ahmet KARTAL
22204001

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Reşit YILDIZ

Mardin 2024

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

TEZ ONAYI

Enstitümüz Kimya Anabilim Dalı 22204001 numaralı öğrencisi Ahmet KARTAL'ın hazırladığı “HCl Asit Çözeltilisinde Yumuşak Çeliğin Korunması için Yeşil Bir Korozyon İnhibitörü Olarak Kilis Yöresinde Yetişen Kuş Ekmeği (*Polygonum Aviculare L.*) Özütünün İncelenmesi” başlıklı tez çalışması, 14/11/2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavında oybirliğiyle başarılı bulunarak jürimiz tarafından yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri	Unvanı, Adı SOYADI	İmza
Danışman Üye	Prof. 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 çalışmada;

- 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 çalışmada 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

Ahmet KARTAL

Tarih (14/11/2024)

ÖZET

MARDİN ARTUKLU ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİMİ ENSTİTÜSÜ KİMYA ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

HCl ASİT ÇÖZELTİSİNDE YUMUŞAK ÇELİĞİN KORUNMASI İÇİN YEŞİL BİR KOROZYON İNHİBİTÖRÜ OLARAK KİLİS YÖRESİNDE YETİŞEN KUŞ EKMEĞİ (*Polygonum aviculare* L.) ÖZÜTÜNÜN İNCELENMESİ

Ahmet KARTAL

Kuş ekmeği (*Polygonum aviculare* L.) bitki özütünün 1 M HCl çözeltisi içindeki yumuşak çelik korozyonuna olan etkisi, farklı sıcaklık değerleri ve konsantrasyonlarında deneyler yapılarak araştırılmıştır. Potansiyodinamik polarizasyon, elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EIS) ve lineer polarizasyon direnci (LPR) tekniklerden yararlanıp elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Derişim ile inhibisyon etkinliğinin doğru, sıcaklık ile ise ters orantılı olduğu görülmüştür. Ayrıca oluşan etkileri daha iyi gözlemlemek için 120 saat boyunca inhibitörlü ve inhibitörsüz ortamda bekletilen yumuşak çeliğin yüzey morfolojisi farklı yöntemler kullanılarak değerlendirilmiştir. SEM, AFM, EDX ve XPS gibi yöntemler kullanılarak oluşan görüntü ve ortaya çıkan değerler yorumlanmıştır. Bu yeşil inhibitör, anodik ve katodik bölgede etkisini göstermesi sebebiyle karma inhibitör olarak tanımlanmıştır. Çelik üzerine iyi tutunup korozyon hızını ciddi anlamda düşüren bu inhibitörün, yüzey adsorpsiyon ölçümlerinin Langmuir izotermine de uygun olduğu tespit edilmiştir. Adsorpsiyonun ve inhibisyonun aktivasyonunu anlamak için hem inhibitör hem de inhibitör içermeyen 1 M HCl ortamında aktivasyon enerjileri belirlenmiştir. Bunun için Arrhenius eşitliğinden yararlanılmıştır. Ayrıca bazı termodinamik değişkenler (K_{ads} , ΔG°_{ads}) hesaplanarak tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yumuşak çelik, korozyon, inhibitör, kuş ekmeği, korozyon inhibitörü

ABSTRACT

MARDIN ARTUKLU UNIVERSITY
GRADUATE EDUCATION INSTITUTE DEPARTMENT OF CHEMISTRY
MASTER'S THESIS

INVESTIGATION OF BIRD BREAD (*POLYGONUM AVICULARE L.*) EXTRACT GROWN IN KILIS REGION AS A GREEN CORROSION INHIBITOR FOR THE PROTECTION OF MILD STEEL IN HCl ACID SOLUTION

Ahmet KARTAL

The effect of bird bread (*Polygonum aviculare L.*) plant extract on mild steel corrosion in 1 M HCl solution was investigated by conducting experiments at different temperature values and concentrations. Potentiodynamic polarization, electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and linear polarization resistance (LPR) techniques were used to evaluate the data obtained. It was observed that the inhibition efficiency was directly proportional to concentration and inversely proportional to temperature. In addition, in order to better observe the effects, the surface morphology of the mild steel kept with and without inhibitor for 120 hours was evaluated using different methods. SEM, AFM, EDX and XPS were used to interpret the images and the resulting values. This green inhibitor is defined as a mixed inhibitor because it acts in the anodic and cathodic region. The surface adsorption measurements of this inhibitor, which adheres well to the steel and significantly reduces the corrosion rate, were found to be in accordance with the Langmuir isotherm. In order to understand the activation of adsorption and inhibition, activation energies were determined in 1 M HCl medium both with and without inhibitor. Arrhenius equation was used for this. Some thermodynamic variables (K_{ads} , ΔG°_{ads}) were also calculated and discussed.

Key Words: Corrosion inhibitor, mild steel, polygonum aviculare, corrosion, inhibitor

TEŞEKKÜR

Öncelikle yüksek lisans eğitimim boyunca rehberliği, yol göstericiliği, çalışmalarımın gerçekleştirilme ve değerlendirilme sürecinde yanımda duran, yorulduğumda moral verip enerjisini bana de yansıtan, güler yüzlü değerli sayın danışman hocam Prof. Dr. Reşit YILDIZ' a teşekkür ederim.

Araştırmamı yaparken hem teorik hem de uygulama noktasında bilgilerinden istifade ettiğim, benim için bundan sonraki akademik ve sosyal hayatımda yer etmesini temenni ettiğim çok kıymetli ve değerli sayın Doç. Dr. Ali DÖNER ve Dr. Öğr. Üyesi Serap TOPRAK DÖŞLÜ hocalarıma çok teşekkür ederim. Ayrıca Kuş Ekmeği bitkisinin toplanmasında yardımcı olan Kilis ili Alatepe Köyünden Hatice Yıldız'a, ekstraksiyon işlemlerinde yardımcı olan Doç. Dr. Mehmet Fırat BARAN hocama çok teşekkür ederim.

Bana vermiş olduğu destek ve katkıları, bir abi gibi yaklaşp bilgilerini bana aktarmaktan kaçınmayan ve ileride güzel projelere birlikte katılacağımıza inandığım değerli öğretmen arkadaşım Selim ARSLANHAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Beni bu zorlu eğitim sürecinde destekleyen eşime, kıymetli dostum Burak KÖKÇE'ye ve bu süreçte vakit ayıramadığım ama eğitim çalışmalarına sürekli destek olan aile fertlerime teşekkürü bir borç bilirim.

KASIM 2024

Ahmet KARTAL

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN.....	iv
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xii
GİRİŞ	1
1.1. Araştırmanın Amacı ve Çalışmanın Önemi	1
1.2. Korozyon ve İnhibisyon.....	2
1.2.1. Korozyonun tanımı ve nedenleri.....	2
1.2.2. Korozyon inhibitörleri ve kullanım alanları.....	3
1.2.3. Korozyon inhibitörlerinin çalışma prensipleri	4
1.3. Yumuşak Çelik ve Korozyon.....	5
1.3.1. Yumuşak çeliğin tanımı ve özellikleri	5
1.3.2. Yumuşak çelikte korozyon problemi	5
1.3.3. Korozyon inhibitörlerinin yumuşak çelik üzerindeki etkileri	5
1.4. Korozyon İnhibitörlerinin Tipleri	6
1.4.1. Anorganik korozyon inhibitörleri	7
1.4.2. Organik korozyon inhibitörleri	8
1.5. Yeşil İnhibitörler	9
1.5.1. Yeşil inhibitörlerin tanımı ve özellikleri	9
1.5.2. Yeşil inhibitörlerin endüstriyel uygulamaları	10
1.6. İnhibitörlerin Adsorpsiyon İzotermi	10
1.7. Yumuşak Çelikte Korozyon İnhibisyonu İçin Kullanılan Yöntemler	12
1.7.1. Yüzey kaplama yöntemleri	12
1.7.2. İnhibisyon katkılı koruyucu kaplamalar	13
1.7.3. Elektrokimyasal yöntemler	14
BİRİNCİ BÖLÜM.....	15
KAYNAK ARAŞTIRMASI	15
İKİNCİ BÖLÜM.....	23

MATERYAL ve METOT.....	23
2.1. Deney Tasarımı	23
2.2. Deneylerin Gerçekleştirilmesi.....	26
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM	28
ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	28
3.1. Derişim Deney Bulgularının Değerlendirilmesi	28
3.1.1. Açık devre potansiyeli eğrileri ve değerlendirilmesi	28
3.1.2. 1 M HCl Çözeltisi içinde bulunan yumuşak çeliğin elektrokimyasal davranışı	30
3.1.3. 1 M HCl + KE'nin farklı derişimlerinin bulunduğu ortamlarda yumuşak çeliğin elektrokimyasal davranışı	34
3.1.4. Potansiyodinamik polarizasyon eğrileri ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi ölçümleri sonuçları ve değerlendirmeleri	40
3.2. 1 M HCl ve 1 M HCl + 1000 ppm KE Çözeltileri İçerisinde Bulunan YÇ'nin Zamanla Elde Edilen Nyquist ve Tafel Eğrilerinin Değerlendirilmesi.....	44
3.3. Sıcaklık Deneyleri.....	48
3.4. Hidrojen Gazı Oluşumu Deneyi ve Sonuçları.....	56
3.5. Adsorpsiyon İzotermi ve Sonuçları	57
3.6. Metal Yükünün Belirlenip Sonuçların Değerlendirilmesi	58
3.7. Element Analizi Verileri ve Yüzey Görüntü Değerlendirmeleri	60
SONUÇLAR ve ÖNERİLER	65
KAYNAKÇA	68
ÖZGEÇMİŞ.....	74

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa No
Tablo 3.1. Kullanılan elektrotlar	23
Tablo 3.2. Çalışma boyunca yapılan deney çeşitleri.....	26
Tablo 4.1. 25 °C sıcaklıkta 1 M HCl ve 1 M HCl + farklı konsantrasyonlarda eklenen KE çözelti ortamlarına ait polarizasyon dirençleri (R_p) Lineer Polarizasyon Dirençleri (LPR) (R_p) ve yüzde etkinlik (%IE) değerleri.....	40
Tablo 4.2. 25 °C sıcaklıkta 1 M HCl ve 1 M HCl + farklı konsantrasyonlarda eklenen KE özütlerin içeren çözelti ortamlarına ait Potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler	42
Tablo 4.3. Zamana bağlı elde edilen EİS, LPR ve IE sonuçları.....	46
Tablo 4.4. 120 saat sonunda 1 M HCl ve 1 M HCl + 1000 ppm KE çözeltilerindeki Potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler	47
Tablo 4.5. Farklı sıcaklık ortamlarından elde edilen EİS ve LPR parametreleri	51
Tablo 4.6. Farklı sıcaklık ortamlarında bulunan 1 M HCl ve 1 M HCl + 1000ppm KE içeren çözeltilerdeki YÇ'nin elde edilen korozyon değerleri	54
Tablo 4.7. 25°C sabit sıcaklıkta 1 M HCl ve 1 M HCl+ 1000 ppm KE özütü içeren çözeltilerden oluşan 120 saat boyunca ölçülen hidrojen gazı hacim grafiği	56

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Elektrokimyasal korozyon hücresinin oluşum şeması	2
Şekil 1.2. Demirin korozyonunu gösteren örnek resim.....	3
Şekil 1.3. Örnek bir organik inhibitörün metal yüzeyinde oluşturduğu adsorpsiyonu.....	4
Şekil 1.4. Etki mekanizmasına göre inhibitör çeşitleri.....	6
Şekil 1.5. Etki etme biçimlerine göre inhibitör çeşitleri.....	6
Şekil 1.6. Kimyasal doğalarına göre inhibitör çeşitleri.....	7
Şekil 2.1. KE özütünün LC/ESI-MS/MS kromatogramı (a) ve başlıca bileşikleri (b)	24
Şekil 3.1. 3600 Saniye boyunca 1 M HCl (■) ve 1 M HCl + KE'nin farklı (100 ppm(●), 250 ppm(▼), 500 ppm(▼), 750 ppm(◆) ve 1000 ppm(◆)) derişimlerinde eklenmiş çözeltilerden elde edilen açık devre potansiyel eğrileri.....	29
Şekil 3.2. 1 M HCl çözeltisi (●) içinde bulunan YÇ elektrotun açık devre potansiyelinde elde edilen Nyquist eğrisi	30
Şekil 3.3. 1 M HCl çözeltisi (●) içinde bulunan YÇ elektrotun açık devre potansiyelinde elde edilen Bode diyagramı	31
Şekil 3.4. 25°C sıcaklıkta bulunan 1 M HCl çözeltisi (■) içerisindeki YÇ'den elde edilen E-I eğrisi	33
Şekil 3.5. 25°C sıcaklıkta bulunan 1 M HCl + 100 ppm KE özütü içeren çözeltilerden (Δ) elde edilen Nyquist diyagramı	34
Şekil 3.6. 25°C Sıcaklıkta bulunan 1 M HCl + 250 ppm KE özütü içeren çözeltilerden (◇) elde edilen Nyquist diyagramı	35
Şekil 3.7. 25°C sıcaklıkta bulunan 1 M HCl + 500 ppm KE özütü içeren çözeltilerden (x) elde edilen Nyquist diyagramı	35
Şekil 3.8. 25°C sıcaklıkta bulunan 1 M HCl + 750 ppm KE özütü içeren çözeltilerden (○) elde edilen Nyquist diyagramı.	36
Şekil 3.9. 25°C sıcaklıkta bulunan 1 M HCl + 1000 ppm KE özütü içeren çözeltilerden (■) elde edilen Nyquist diyagramı	37
Şekil 3.10. 25°C sıcaklıkta bulunan 1 M HCl (●) ve 1 M HCl + 100 ppm(Δ), 250 ppm(◇), 500 ppm(x), 750 ppm (○),1000 ppm (■) farklı derişim değerlerinde KE özütü içeren çözeltilerden elde edilen Nyquist diyagramları	38
Şekil 3.11. 25°C sıcaklıkta bulunan 1 M HCl (●) ve 1 M HCl + 100 ppm(Δ), 250 ppm(◇), 500 ppm(x), 750 ppm (○),1000 ppm (■) farklı derişimlerde KE içeren çözeltilerden elde edilen Bode diyagramları.....	39

Şekil 3.12. 25°C sıcaklıkta bulunan 1 M HCl (●) ve 1 M HCl + 100 ppm (▼), 250 ppm (◇), 500 ppm (x), 750 ppm (○), 1000 ppm (■) KE içeren çözeltilerden elde edilen E-I eğrileri.....	41
Şekil 3.13. 1 M HCl çözeltisinde zamana bağlı olarak oluşan YÇ'den elde edilen Nyquist diyagramları, 24.saat (◇), 48.saat(x), 72.saat(Δ), 96.saat (●), 120.saat(■).	44
Şekil 3.14. 1 M HCl + 1000 ppm KE içeren çözeltide YÇ'den elde edilip zamana bağlı olarak oluşan Nyquist diyagramları 24.saat (■), 48.saat (○), 72.saat (◀), 96.saat (◆), 120.saat (x).....	45
Şekil 3.15. 120 saat sonunda 1 M HCl (■) ve 1 M HCl + 1000 ppm KE (●) içeren çözeltilerden elde edilen E-I eğrileri.....	47
Şekil 3.16. 1 M HCl çözeltisi içerisinde bulunan YÇ'nin farklı sıcaklık ortamları olarak 25°C (■), 35°C (▼), 45°C (X), 55°C (●)'den elde edilen Nyquist diyagramları	48
Şekil 3.17. 1 M HCl +1000 ppm KE içeren çözelti içerisinde bulunan YÇ'nin farklı sıcaklık ortamları olarak 25°C (▼), 35°C (X), 45°C (□), 55°C (◆)'den elde edilen Nyquist diyagramları	49
Şekil 3.18. 1M HCl +1000 ppm KE içeren çözelti içerisinde bulunan YÇ'nin farklı sıcaklık (35°C (x), 45°C (□), 55°C (◆)) ortamlarından elde edilen Bode diyagramları..	50
Şekil 3.19. 1 M HCl içeren çözeltilerin farklı sıcaklık ortamlarından (25°C (■), 35°C (▼), 45°C (x) ve 55°C (●)) elde edilen E-I eğrileri.....	52
Şekil 3.20. 1 M HCl + 1000 ppm KE içeren çözeltilerin farklı sıcaklık ortamlarından (25°C (▶), 35°C (x), 45°C (□) ve 55°C (◆)) elde edilen E-I eğrileri.....	53
Şekil 3.21. YÇ elektrot üzerinde inhibitör ve inhibitör içermeyen 1 M HCl ortamında elde edilen 1000/T-lni _{corr} grafiği.....	55
Şekil 3.22. Langmuir adsorpsiyon izotermi.....	57
Şekil 3.23. 1 M HCl + 1000 ppm KE çözelti ortamındaki YÇ'ye ait R _p ve elektrot potansiyeli.....	58
Şekil 3.24. 25°C sabit sıcaklıkta 1 M HCl ve 1 M HCl + 1000 ppm KE çözeltileri içerisinde YÇ'nin zamanla elde edilen SEM (a,a'), AFM-2D (b,b') ve 3D (c,c') görüntüleri	60
Şekil 3.25. Sabit sıcaklıkta 1 M HCl (a) ve 1 M HCl + 1000 ppm KE (b) çözeltileri içerisinde YÇ'den zamanla elde edilen EDX atom dağılımı.....	61
Şekil 3.26. YÇ elektrotun, 1 M HCl ortamında, 24 saat bekletildikten sonra alınan XPS grafikleri.....	62
Şekil 3.27. YÇ elektrotun, 1000 ppm KE içeren 1 M HCl ortamında, 24 saat bekletildikten sonra alınan XPS grafikleri.....	63

SİMGELER ve KISALTMALAR

Bu tez çalışmasında kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda belirtilmiştir.

Simgeler

E_{ocp}	: Açık devre potansiyeli
N_{ads}	: Adsorplanan inhibitör moleküllerinin sayısı
K_{ads}	: Adsorpsiyon denge sabiti
ΔQ	: Adsorpsiyon ısısı
E_a	: Aktivasyon enerjisi
E_r	: Antropov rasyonel korozyon potansiyeli
C_{dl}	: Çift tabaka kapasitansı
Z'	: Gerçek impedans
R_i	: İnhibitör bulunan ortamdaki korozyon hızı
C_{inh}	: İnhibitör konsantrasyonu
$n (\%)$	: İnhibitör verimliliği
Z	: İmpedans
θ	: Kaplanma kesri
β_c	: Katodik tafel eğimi
i_{corr}	: Korozyon akım yoğunluğu
E_{corr}	: Korozyon potansiyeli
R_p^*	: Lineer polarizasyon direnci
T	: Mutlak sıcaklık
$R_{p(inh)}$	: İnhibitörlü koşullardaki polarizasyon direnci
R_0	: İnhibitörsüz ortamdaki korozyon hızı

R_p	: Polarizasyon direnci
Z''	: Sanal impedans
E_{pzc}	: Sıfır yük potansiyeli
ΔG°_{ads}	: Standart adsorpsiyon serbest enerjisi
N_{tot}	: Yüzeydeki toplam aktif bölge sayısını

Kısaltmalar

OCP	: Açık devre potansiyeli
AFM	: Atomik kuvvet mikroskobu
CP	: Cyclic polarizasyon
EİS	: Elektrokimyasal impedans spektroskopisi
EDX	: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi
KE	: Kuş ekmeği
CR	: Korozyon hızı
LP	: Lineer polarizasyon
LPR	: Lineer polarizasyon direnci
PDP	: Potansiyodinamik polarizasyon
CPE	: Sabit faz elemanı
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
YÇ	: Yumuşak çelik
%İE	: Yüzde inhibisyon etkinliği

GİRİŞ

Bu çalışmada, Kuş Ekmeği özütünün farklı konsantrasyon, sıcaklık ve zamana bağlı deneyleriyle yumuşak çelik üzerindeki korozyonu 1 M Hidroklorik asit çözeltisi içerisinde nasıl engellediği araştırılacaktır. Ayrıca, çalışma içerisinde bu özütün literatüre girmesi halinde çevre dostu özellikleri ve ekonomik avantajları da ele alınacaktır. Sonuç bölümünde, KE özütünün YÇ üzerindeki korozyonu azaltmada ne kadar etkili olduğu değerlendirilecektir.

Bu tez yazısında, öncelikle korozyon ve inhibitör kavramlarının temel bilgileri ile başlanarak, tez çalışmasının neden yapıldığı ve beklenen katkılarının neler olabileceği detaylandırılacaktır. Ayrıca çalışma içerisinde elde edilen bulguların literatürde yapılan bazı yeşil ve organik inhibitör çalışmalarına yer verilecektir.

1.1. Araştırmanın Amacı ve Çalışmanın Önemi

Araştırma, KE özütünün korozyon üzerindeki etkilerini derinlemesine inceleyerek oluşan sonuçlara göre yeşil inhibitörler bakımından hem çevresel hem de ekonomik açıdan avantajlarını ortaya koymayı hedeflemektedir. Bu araştırmanın amacı, korozyonun etkilerini azaltmak ve metalin ömrünü uzatmak için etkili olabilecek, literatüre yeni bir yeşil inhibitör eklemektir.

Endüstriyel uygulamaların hızlı gelişiminde, korozyonun küresel bir sorun haline geldiği ortadadır. Günümüz şartlarında korozyonun teknik anlamda önüne geçilemese de korozyon kaynaklı hasarların zamanında tespit edilmesi ve korozyonun hızının belirlenip kontrol altında tutulmaya çalışılması, bununla beraber korozyon kaynaklı hasarların yol açabileceği maddi zarar ve kayıpların azaltılabilmesi de mümkündür.

Çevre dostu yeşil inhibitörlerin kullanımı, ayrıca çevresel sürdürülebilirlik açısından da büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, korozyona karşı etkili yeşil inhibitörlerden olabilecek KE'nin etkinliğini belirleyerek, gelecekteki yeşil inhibitör araştırmaları için bir referans oluşturacaktır.

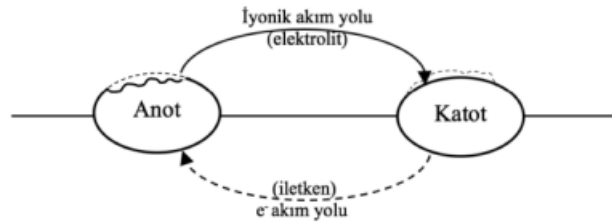
1.2. Korozyon ve İnhibisyon

Bu bölümde öncelikle korozyon ve inhibisyon kavramlarından başlanarak ardından inhibitör maddeler kısaca açıklanacaktır. Bu, çalışmanın öneminin yeteri miktarda anlaşılması için temel oluşturacaktır.

Doğada bulunan element çeşitlerinden olan metaller, genellikle bileşik halinde bulunurlar. Metallerden alaşımlar üretildiği gibi metallerin daha işlevsel, ekonomik ve enerjili hale getirilmek için yeni moleküllerinde üretildiği bilinmektedir. Her ne kadar üretilen bu metaller veya alaşımların işlendikleri ortamda kusursuz kalması istenilse de ortamda bulunan çeşitli faktörler dolayısıyla bu metaller, ortamdaki diğer elementlerle reaksiyona girip önce iyonik hale sonrasında ise yine ortamda bulunan başka elementlerle etkileşim kurup, tekrardan kararlı hali olan bileşiklere dönmeye çalışırlar. Bunun sonucunda kimyasal veya fiziksel bozunumlar olması kaçınılmazdır.

1.2.1. Korozyonun tanımı ve nedenleri

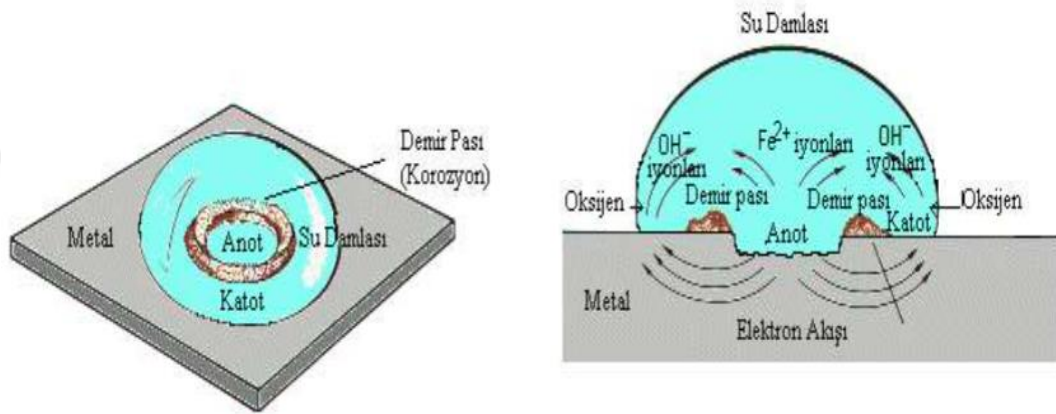
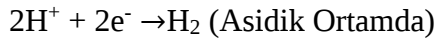
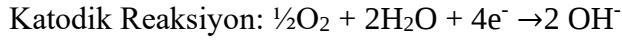
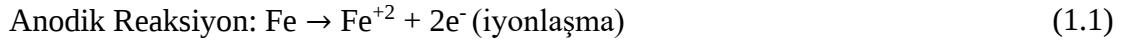
Korozyon genel anlamda; malzeme ile çevresi arasında, kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan kayıplardır (Çiçek vd., 2011). Metal yüzeylerin oksidasyonu veya diğer kimyasal reaksiyonlar sonucunda meydana gelir. Bunun sonucunda yapısal bütünlük zayıflar. Korozyon hücresinin genel oluşum şeması Şekil 1.1.'de verilmiştir.



Şekil 1.1. Elektrokimyasal korozyon hücresinin oluşum şeması (Davis, 2000)

Korozyonun başlıca nedenlerine bakacak olursak; nem, oksijen, tuzlu su, asitler ve diğer kimyasal maddeler söylenebilir. Korozyon sürecinin başlaması, metal yüzeyinde anot ve katot bölgelerinin oluşması ile gerçekleşir. Anot bölgesinde metal iyonlarına çözülürken, katot bölgesinde indirgenme reaksiyonları gerçekleşir. Bu süreç, metalin çevresel faktörlerle etkileşimi sonucu hızlanabilir.

Demirin korozyonunu örnek olarak verecek olursak, ortamdaki anodik ve katodik reaksiyonlar şunlardır:



Şekil 1.2. Demirin korozyonunu gösteren örnek resim (Bıyık, 2013)

Korozyonun hızını etkileyen faktörler arasında ise sıcaklık, tuzluluk, pH ve metalin kimyasal yapısı gibi etkenler sayılabilir. Korozyonun ekonomik ve yapısal zararlara neden olması, endüstriyel tesislerde ve altyapılarda ciddi sorunlara yol açtığı bilinmektedir. Bu nedenle, korozyonun önlenmesi ve kontrolü büyük önem taşımaktadır.

Anodik koruma, organik madde kaplamaları, katodik koruma, inhibitör uygulamaları, korozif gidericiler kullanma ve boyama metalin korozyondan korunmasında uygulanan başlıca koruma yöntemleridir (Erbil, 2012).

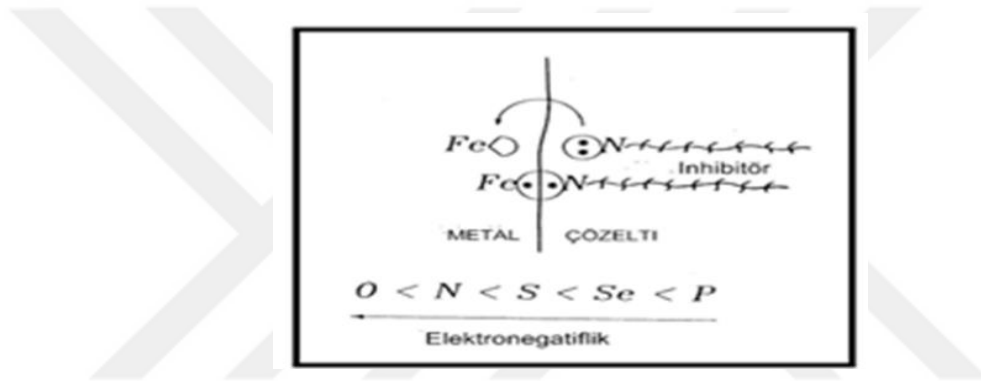
1.2.2. Korozyon inhibitörleri ve kullanım alanları

Çevresel bileşenlerle birlikte belirgin bir reaksiyon oluşturmadan korozyonu engelleyen, azaltan organik veya inorganik bileşenlerden oluşan kimyasal maddelere korozyon inhibitörleri denir (Raja et al., 2008). Bu inhibitörler, petrol, gaz, su arıtımı ve otomotiv gibi çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılır.

1.2.3. Korozyon inhibitörlerinin çalışma prensipleri

Korozyon inhibitörleri, genellikle metal yüzeyinde adsorbe olarak veya çözeltide korozyon reaksiyonlarını engel olarak etki gösterirler. İnhibitörler metalin çevre ile olan ilişkisini engelleyecek bir tabaka oluşturur ve metalin kimyasal reaksiyonlara girmesini engeller. Bunun sonucunda bu inhibitörler korozyon sürecini yavaşlatır veya kısmen durdurur.

Aşağıda verilen şekilde (Şekil 1.3.) organik inhibitör molekülünde var olan bir azot atomunun, demir metali ile yapmış olduğu elektron ortaklığı sonucu çevrede bulunan korozif iyonların metal yüzeyine yaklaşmalarını önleyerek korozyon reaksiyonunun başlamasına engel olan süreci gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Örnek bir organik inhibitörün metal yüzeyinde oluşturduğu adsorpsiyonu (Yalçın vd., 1997)

Kimyasal veya fiziksel etkileşimler, inhibitörlerin etkinliğini belirler. İnhibitörlerin etkinliği, kullanılan malzemeye ve çevresel koşullara bağlı olarak değişiklik gösterebildiği gibi bu değerın hesaplanması ise inhibitörlü ortamdaki korozyon hızı ile inhibitörün olmadığı ortamdaki korozyon hızı karşılaştırmasıyla elde edilir.

$$IE = \frac{(R_0 - R_i)}{R_0} \quad (1.2)$$

R_0 : İnhibitörsüz ortamdaki korozyon hızı

R_i : İnhibitör bulunan ortamdaki korozyon hızı

IE : İnhibitörün etkinliği

İnhibitörün etkili olduğunu söylemek için uzun süreli koruma sağlaması önemli bir kriterdir.

1.3. Yumuşak Çelik ve Korozyon

YÇ'nin korozyonu, çalışma içerisinde yapılan deneylerde araştırılan faktörlere etki ettiğinden, YÇ'nin içeriğinin ne olduğu ve bazı temel özelliklerin nelerden oluştuğunun bilinmesinin çalışmayı daha iyi yorumlamaya sebep olacağı düşünülmektedir.

1.3.1. Yumuşak çeliğin tanımı ve özellikleri

YÇ, düşük karbon içeriği nedeniyle özellikle kolay işlenebilir ve kaynaklanabilir bir malzemedir. Uygun maliyetli ve işlenmesi kolay bir malzeme olan bu çelik türü bu sebeple genellikle inşaat ve otomotiv gibi sektörlerinde tercih edilir.

Karbon içeriğinin düşük olması, çeliğin mekanik özelliklerini etkiler; bu, çeliğin yüksek çekme dayanımını korurken sertliğini belirli bir seviyede tutar (Jones, 1996). YÇ, çeşitli endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahip olup, korozyonun etkilerini azaltmak için özel koruma gerektirir.

1.3.2. Yumuşak çelikte korozyon problemi

YÇ korozyona karşı oldukça hassastır. Korozyonun YÇ yüzeyinde oksidasyon ve diğer kimyasal reaksiyonlar sonucu oluştuğu bilinmektedir. Bu durum, çelik yüzeyinin bozunmasına ve yapısal bütünlüğün kaybına yol açar. YÇ'de korozyon problemleri, ekonomik kayıplara neden olabileceği gibi bazı yapısal zayıflamalara da sebep olabilir. Korozyonun önlenmesi ve kontrolü, YÇ'den yapılan yapıların ömrünü uzatmak ve bakım maliyetlerini azaltmak için önemlidir.

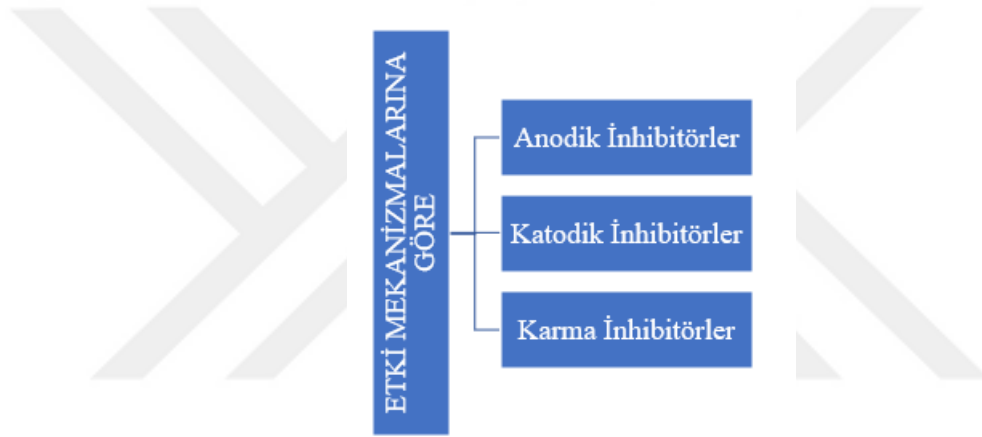
1.3.3. Korozyon inhibitörlerinin yumuşak çelik üzerindeki etkileri

YÇ'de korozyon inhibitörleri, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan etkili bir koruma yöntemidir. Bu tür inhibitörler, operasyonel güvenilirliği artırmak, özellikle yapısal parçaların ömrünü uzatmak ve bakım maliyetlerini azaltmak için önem arz ederler. Korozyon inhibitörlerinin seçimi ve uygulanması ise spesifik endüstriyel gereksinimlere ve çevresel koşullara göre dikkatlice planlanması gereken aşamalardır.

Korozyon inhibitörleri, yumuşak çelik yüzeyinde gerçekleşen anot veya katot reaksiyonlarını yavaşlatarak korozyonu önleyebilir. Bazı korozyon inhibitörleri, çözeltinin pH'ını değiştirebilir veya tamponlayarak daha az korozyona uğramasını sağlayabilir. Yine aynı şekilde bazı inhibitörlerin YÇ yüzeyinde oluşabilecek çatlaklarda koruyucu bir tabaka oluşturup, çatlak korozyonunu engelleyebileceği de söylenebilir.

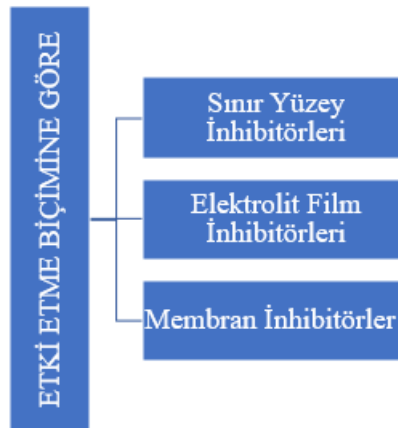
1.4. Korozyon İnhibitörlerinin Tipleri

Korozyon inhibitörleri, inhibitörün yüzeye tutunma miktarları, hangi ortam ve şartlarda kullanıldıkları, etki mekanizmaları gibi faktörler dikkate alınıp farklı sınıflandırmalar yapılabilir.



Şekil 1.4. Etki mekanizmasına göre inhibitör çeşitleri

Etki mekanizmasına göre katodik inhibitörler, anodik inhibitörler ve karma inhibitörler olarak sınıflandırılır.



Şekil 1.5. Etki etme biçimlerine göre inhibitör çeşitleri

Etki etme biçimleri dikkate alındığında sınır yüzey inhibitörleri, elektrolit filmi inhibitörleri, membran (zar) inhibitörleri şeklinde sınıflandırmak mümkündür. Oksitleyici olup olmamalarına göre ise oksitleyici olanlar ve oksitleyici olmayan inhibitörler olarak gruplandırılabilir.



Şekil 1.6. Kimyasal doğalarına göre inhibitör çeşitleri

Kimyasal doğalarına göre ise inorganik inhibitörler, organik inhibitörler olarak ikiye ayrılabilir. Her bir inhibitör tipi, farklı kimyasal özelliklere ve uygulama alanlarına sahiptir. Sıradaki başlıkta çalışılan inhibitör tipine göre detay olarak kimyasal olarak gruplandırılan inhibitör çeşitleri ve mekanizmalarından bahsedilecektir.

1.4.1. Anorganik korozyon inhibitörleri

Anorganik korozyon inhibitörleri, genellikle metal yüzeylerinde çözünerek veya adsorbe olarak etki gösterir. Genellikle nötr elektrolitlerin içinde kullanılıp anodik tepkime üzerinde etkisini göstererek metalin pasif konumda olmasını sağlar. Bu tür inhibitörler, inorganik tuzlar veya bileşiklerden oluşur ve su bazlı ortamlarda etkili olurlar.

Yapılan bir çalışmada (Koluçolak, 2019), beton katkı malzemesi olarak akışkanlaştırıcı ve içinde inhibitör madde bulunan ve bulunmayan betonarme numuneleri hazırlanmış, kullanılan malzemelerin betonarme numunelerde bir korozyon türü olan donatı korozyonunu engellemedeki etkinlikleri incelenmiştir. Birinci grup inhibitörsüz tutulup, ikinci grup numunelerde beton harç karışımına kalsiyum nitrit inhibitörü eklenmiştir. Numuneler distile su, %5,85 ve %3,5 Cl^- konsantrasyondaki tuzlu su çözeltisi içinde dört ay süre ile bekletilerek hızlandırılmış korozyona uğratılmıştır. Beton katkılarının; katkısız numune ile karşılaştırma yapıldığı zaman, kalsiyum nitritin betonun basma dayanımını %6,42 arttırdığı tespit edilmiştir.

Hızlandırılmış korozyon süresi sonunda, en iyi inhibisyon etkinliği %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde kalsiyum nitrit inhibitörlüğünde 120. gün sonunda %91,13 olarak bulunmuştur. Kalsiyum nitrit inhibitörünün betonarme numunelerde korozyonu önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir. 0,1 M nitrit iyonlarının karışıma eklenmesi sonucu polarizasyon direnci değerlerinin önemli ölçüde arttığı görülmüştür.

Başka bir çalışmada ise (Aktürk, 2015), ‘belirlenmiş bir tork değeri altında aralık oluşturunucular ile birleştirilen AISI 316L paslanmaz çelik malzemeden dizayn edilmiş parçaların aralık korozyonu ve buna bağlı gelişen korozyon yorulmasının önlenmesi için iki inorganik tuzun inhibisyonu test edildi. Klor iyonlarının paslanmaz çelik malzeme üzerindeki pasif filmi bozucu etkisi bilindiğinden, bu anyonun miktarı kademeli olarak azaltılırken yerine aynı miktarda inhibitör eklendi. İnhibitör olarak Na_2SO_4 ve NaNO_3 tercih edildi. Belirlenen çeşitli derişimlerde ki $\text{Na}_2\text{SO}_4 - \text{NaCl}$ ve $\text{NaNO}_3 - \text{NaCl}$ kombinasyonlarıyla hazırlanan test çözeltilerinin içindeki 316L paslanmaz çeliğinin OCP, lineer polarizasyon (LP) ve CP testleri havası alınmış 75°C ’lik bir ortamda ASTM G5 standart test prosedürlerine göre yapıldı. AISI 316L’nin bazı test çözeltileri içindeki Potansiyodinamik-galvanostatik cyclic polarizasyon testleri yeterli miktarlarda kullanılan her iki inhibitörün de aralık korozyonunu bir dereceye kadar önleyebildiğini gösterdi.’

1.4.2. Organik korozyon inhibitörleri

Organik korozyon inhibitörleri adsorpsiyon inhibitörleri olarak da bilinip genellikle çevre dostu ve biyolojik olarak parçalanabilir özelliklere sahip olmalarıyla tanınırlar. Metal yüzeyinde adsorbe olarak bağlanırlar ve koruyucu bir organik film tabakası oluşturarak korozyona karşı direnç sağlayıp çoğunlukla asidik çözeltiler içinde kullanılırlar. Çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır.

Yapılan çalışmada (Arslanhan, 2023) 2-Amino-1,3,5-Triazine-4,6-Dithiol (2-ATD) organik inhibitörün 0,5 M HCl çözeltisi içindeki yumuşak çelik korozyonuna etkisi, farklı sıcaklık ve konsantrasyon değerlerinde deneyler yapılarak araştırılmıştır. Derişim arttıkça inhibisyon etkinliğinin arttığı ancak sıcaklığın artmasıyla inhibisyon etkinliğinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca 120 saat boyunca bekletilen yumuşak çeliğin yüzey morfolojisi için SEM, AFM ve EDX yöntemleri kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan organik inhibitörün hem anodik hem de katodik bölgelerdeki reaksiyonlara etki etmesi sebebiyle karma bir inhibitör olarak tanımlanmıştır. 2-ATD’nin yüzey adsorpsiyon ölçümlerinin Langmuir izotermine uygun olduğu ifade edilmiştir.

Organik inhibitörlerin etkinliği, metal yüzeyine yüksek oranda adsorbe olmaları ve koruyucu filmler oluşturmaları ile sağlanır. Ancak, bu inhibitörlerin etkinliği çevresel koşullara ve metalin kimyasal yapısına bağlı olarak değişebilir (Smith et al., 2021). Su bazlı çözeltiler veya yağlar içinde dağıtılarak uygulanabilirler ve uzun süreli koruma sağlayabilirler.

Organik molekül içeren metal-çözelti arayüzeyinde, toplamda dört çeşit adsorpsiyon meydana gelebilir (Aktaran ve Keleş, 2008):

- 1-) Yüklü metal ile yüklü moleküller arasında elektrostatik etkileşimler,
- 2-) Moleküldeki ortaklanmamış elektron çiftleriyle metal arasındaki etkileşimler,
- 3-) p-elektronlarının metal ile etkileşimi,
- 4-) Tüm etkileşim türlerinin kombinasyonu (Bentiss et al., 2001).

1.5. Yeşil İnhibitörler

Yeşil inhibitörler, çevre dostu kimyasal maddeler olarak korozyon kontrolü sağlamak amacıyla kullanılır. Bu inhibitörler, genellikle doğal kaynaklardan türetilir veya biyolojik olarak kolayca parçalanabilir özelliklere sahip olup günümüzde artık çevre ile dost olan yeşil korozyon inhibitörleri tercih edilmektedir (Biswas et al., 2015)

1.5.1. Yeşil inhibitörlerin tanımı ve özellikleri

Yeşil inhibitörler, çevreye ve insan sağlığına zararı minimumda tutan kimyasal bileşikler olup günümüzde yaygın kullanılan korozyon inhibitörlerine alternatif olarak üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Yeşil, sürdürülebilir ve çevre dostu alternatif korozyon inhibitörleri çeşitli bitkilerin tohum, çiçek, kabuk, yaprak, kök ve hatta bitkinin tamamından elde edilebilmektedir (Alrefae et al., 2021). Ayrıca Özer (2021) tarafından bildirildiğine göre süt ürünleri içerisinde bulunan kazein (Zomorodian et al., 2021), kitosan (Zhao et al., 2020), arı poleni ekstraktı (Ahmed & Zhank., 2020) gibi birçok malzemenin farklı metaller üzerinde etkili olabilecek yeşil inhibitörler olarak kullanılabileceği ifade edilmektedir.

Günbeyi (2020) yaptığı çalışmada yumuşak çeliğin 0,5 M Na₂SO₄ çözeltisindeki korozyonuna kapari bitkisi tohumundan elde edilen özütün inhibitör etkisini araştırmıştır. Elde edilen sonuçlardan ekstrakt derişimine ve pH'a bağlı olarak kapari bitkisi tohumunun inhibitör olma durumlarının değiştiği gözlenmiştir. pH aralığı 2 ve 4

olduğunda kapari bitkisi tohumu özütünün iyi bir inhibitör olarak gözlenmiştir. En yüksek inhibisyon etkinliği pH 2’de %77 olarak bulunmuştur.

1.5.2. Yeşil inhibitörlerin endüstriyel uygulamaları

Yeşil inhibitörler, endüstriyel alanda giderek yaygın olarak kullanılmaktadır. Çevresel düzenlemeler ve sürdürülebilirlik hedefleri doğrultu ve kapsamında, birçok sektör yeşil inhibitörlerini tercih etmeye yeni yeni başlamıştır. Bu inhibitörler, su bazlı kaplamalar, koruyucu kaplamalar ve çeşitli endüstriyel süreçlerde kullanılmaktadır.

Yeşil inhibitörlerin endüstriyel kullanımı, çevre dostu uygulamalar açısından önemli bir yere sahip olacağı şimdiden ortadadır. Örneğin, otomotiv ve inşaat sektörlerinde yeşil inhibitörler, metal yüzeylerin korozyonuna karşı koruma sağlamak için kullanılır. Bu tür uygulamalar hem düşük maliyet hem de çevre dostu çözümler sunar.

1.6. İnhibitörlerin Adsorpsiyon İzotermi

Adsorpsiyon, iyon, atom ya da moleküllerin bir katı üzerine tutunması şeklinde tanımlanabilir. Katı üzerine tutunan bu taneciklerin yüzeyden ayrılmasına desorpsiyon, katıya absorplayıcı, katı yüzeyinde tutunan maddeye ise adsorplanan adı verilmektedir (Bayol, 2005).

Adsorpsiyon izotermi, yüzey üzerine adsorpsiyon yapan moleküllerin davranışlarını ve bu davranışların matematiksel modellerini açıklayan önemli araçlardır. Korozyon inhibitörlerinin etkinliğini belirlemede de yaygın olarak kullanılırlar. Bu bölümde kaplanma kesri, kaplanma kesri ile inhibitör derişimi arasındaki bağıntılar ve çeşitli adsorpsiyon izotermi incelenecektir.

Kaplanma Kesri (θ): Kaplanma kesri, bir yüzeyin kaplanma oranını temsil eder ve yüzeydeki aktif bölgelerin inhibitör molekülleri tarafından kaplanma miktarını belirtir. Bu kesir, yüzeydeki adsorplanan inhibitör miktarının toplam aktif bölge sayısına oranı olarak tanımlanır:

$$\theta = \frac{N_{ads}}{N_{tot}} \quad (1.3)$$

Burada N_{ads} adsorplanan inhibitör moleküllerinin sayısını ve N_{tot} yüzeydeki toplam aktif bölge sayısını temsil eder (Jones, 1996).

Kaplanma Kesri ve İnhibitör Derişimi Arasındaki Bağntı: Kaplanma kesri, inhibitör derişimi (C) ile çeşitli adsorpsiyon izotermi kullanılarak modellenir. Bu izoterm, adsorpsiyon olayını farklı yaklaşımlarla açıklayan matematiksel denklemler sunar.

Langmuir Adsorpsiyon İzotermi: Langmuir izotermi, yüzeyin homojen olduğunu ve yüzeydeki adsorpsiyonun tek tabakalı olduğunu varsayar (Langmuir, 1918). Bu izoterm, göre kaplanma kesri ve inhibitör derişimi arasındaki ilişki şu şekilde verilir:

$$\frac{C}{\theta} = \frac{1}{K} + C \quad (1.4)$$

Burada K adsorpsiyon denge sabitidir (Langmuir, 1918). Bu denklem, inhibitörün etkinliğini belirlemek için kullanılır.

Langmuir 'in teorik yaklaşımı aşağıda verilen kabullere dayandırılmıştır (Bayol, 2005);

- Katı yüzeylerinde belirli sayıda adsorpsiyon merkezi bulunur. Herhangi bir basınç ve sıcaklıkta dengede bu adsorpsiyon bölgelerinin θ gibi bir kesri adsorplanan moleküller tarafından işgal edilmiş ise, $1-\theta$ kadar işgal edilmemiş durumdadır. Yüzeyin örtülü kesri θ ve yüzey örtülü olmayan kesri ise $1-\theta$ olarak gösterilebilir.
- Adsorpsiyon merkezlerden her birine yalnızca bir molekül tutunabilir.
- Bütün adsorpsiyon merkezleri için adsorpsiyon ısısı aynı olup yüzeyin örtülü kesrine bağlı değildir.
- Farklı merkezler üzerine bağlanmış moleküller arasında hiçbir etkileşim durumu söz konusu değildir.
- Bir molekülün işgal ettiği bir noktayı terk etme şansı veya işgal edilmemiş bir merkeze bağlanması komşu adsorpsiyon merkezlerinin dolu olup olmamasına bağlı değildir.

Freundlich Adsorpsiyon İzotermi: Freundlich izotermi, heterojen yüzeyler için uygundur ve adsorpsiyonun çok tabakalı olabileceğini kabul eder (Freundlich, 1907). Freundlich izotermi şu şekilde ifade edilir:

$$\theta = K_F C^{1/n} \quad (1.5)$$

Burada K_F ve n deneysel sabitlerdir (Freundlich, 1907). Bu model, düşük derişimlerde daha iyi sonuçlar verir.

Frumkin Adsorpsiyon İzotermi: Frumkin izotermi, adsorpsiyon sırasında moleküller arası etkileşimleri dikkate alır (Frumkin, 1925). Denklem şu şekildedir:

$$\log\left(\frac{\theta}{1-\theta}\right) = \log K + \alpha\theta \quad (1.6)$$

burada α , adsorplanan moleküller arası etkileşim parametresidir (Frumkin, 1925).

Temkin Adsorpsiyon İzotermi: Temkin izotermi, adsorpsiyon enerjisinin lineer olarak azaldığını varsayar (Temkin et al., 1940). Bu izoterme göre kaplanma kesri ve inhibitör derişimi arasındaki ilişki:

$$\theta = \frac{RT}{\Delta Q} \ln(KC) \quad (1.7)$$

burada T mutlak sıcaklık, R gaz sabiti ve ΔQ adsorpsiyon ısıdır (Temkin et al., 1940).

Flory-Huggins Adsorpsiyon İzotermi: Flory-Huggins izotermi, polimer adsorpsiyonunu ve kaplanma kesrini şu şekilde ifade eder (Flory, 1953):

$$\ln\left(\frac{\theta}{C(1-\theta)}\right) = \ln K + x \ln(1-\theta) \quad (1.8)$$

burada x , moleküllerin kapladığı yer sayısını temsil eder (Flory, 1953).

1.7. Yumuşak Çelikte Korozyon İnhibisyonu İçin Kullanılan Yöntemler

Yumuşak çeliğin düşük karbon içeriği nedeniyle korozyona karşı oldukça duyarlı olduğundan önceki bölümlerde bahsedilmişti. Bu düşük karbon içeriği nedeniyle, bu tür metallerin korozyona karşı korunması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler, genel olarak yüzey kaplama yöntemleri, inhibitör katkılı koruyucu kaplamalar ve elektrokimyasal yöntemler olarak sınıflandırılır.

1.7.1. Yüzey kaplama yöntemleri

Metal yüzeyinin kaplanıp, metalin iletken ortamla bağlantısının kesilmesi sonucu korozyondan korumanın sağlandığı sık kullanılan yöntemlerdir. Yüzeyi örten tabakanın

porözitesi koruyuculuk durumunu etkiler. Genel olarak metal ve metal olmayan kaplamalar olarak iki başlıkta ele alınabilir.

Metal olan kaplama türleri: Elektro kaplama, difüzyon ve sıcak daldırma gibi yöntemler kullanılarak yapılan türlerdir. Genelde çinko alüminyum tercih edilir. Galvanizleme, çelik yüzeyinin üzerine çinko kaplanarak yapılan bir kaplama yöntemidir. Çinko, hava ve su ile reaksiyona girerek kendini koruyan bir tabaka oluşturur. Bu tabaka, çeliğin korozyona karşı dayanıklılığını önemli ölçüde artırır (Smith, 2010).

Krom kaplama ise, metal yüzeyine ince bir krom tabakası uygulayarak koruma sağlar. Krom kaplama, metal yüzeyini oksidasyon ve aşınma gibi zararlı etkilerden korur. Özellikle yüksek sıcaklık ve kimyasal ortamlarda etkili bir koruma sağlar (Jones, 2012). Krom kaplama, aynı zamanda metalin estetik değerini artırarak, çeşitli endüstriyel uygulamalarda tercih edilir.

Metal olmayan kaplama türleri: Organik maddeler ve boya içerirler. Esas amaç olarak parça yüzeylerinin görünümlerinin iyileştirilmesi ve korunması için kullanılır. Boya, malzemenin yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturur. Bu tabaka soyulmadığı veya çatlamadığı müddetçe metal malzemeyi korozyondan korur.

Metal malzemelerin yüzeylerinde oksit filmi oluşur. Bunun sebebi metalin içinde bulundukları ortamla çevresel etkilerden kaynaklı reaksiyona girmesidir. Bu tür oksit filmler de koruyucu kaplama görevi yapabilirler (Keleş, 2008).

1.7.2. İnhibisyon katkılı koruyucu kaplamalar

İnhibisyon katkılı koruyucu kaplamalar, inhibisyon maddeleri içeren özel formülasyonlardır. Bu kaplamalar, metal yüzeyinde inhibisyon maddelerinin kontrollü salınımını sağlayarak korozyonu önlemeye yardım ederler. Yüksek performanslı ve uzun ömürlü koruma sağlayabilirler.

İnhibisyon katkılı koruyucu kaplamaların üretimi, kaplama malzemelerine korozyon inhibitörleri eklenerek gerçekleşir. Bu kaplamalar, metal yüzeyinde hem fiziksel hem de kimyasal koruma sağlar ve metalin korozyona karşı direncini artırır (Miller, 2008). İnhibitörler, metal yüzeyinde koruyucu bir film oluşturarak korozyonun yayılmasını önler. Bu kaplamalar, çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmakta olup, farklı çevresel koşullara göre formüle edilir. Örneğin, deniz suyu gibi agresif ortamlarda kullanılan kaplamalar, yüksek düzeyde koruma sağlar ve metalin ömrünü önemli ölçüde

uzatır (Cohen, 2002). İnhibisyon katkılı kaplamalar, genellikle organik veya anorganik bileşenlerden oluşur ve bu bileşenler, kaplamanın performansını artırır.

1.7.3. Elektrokimyasal yöntemler

Elektrokimyasal yöntemler, YÇ yüzeyinde korozyonu kontrol altında tutmayı elektrokimyasal reaksiyonları kullanarak başarır. Bu yöntemler, genellikle çeşitli elektrokimyasal teknikler ve akım uygulamalarını içerir. Yüzeyin paslanma direncini artırmak için etkili olabilirler.

Elektrokimyasal yöntemler, metal yüzeyindeki korozyonun kontrol edilmesinde etkili bir yaklaşım sunar. Bu yöntemler, metalin elektrokimyasal özelliklerini değiştirerek korozyonu azaltır ve koruma sağlar (Perry, 2010). Elektrokimyasal yöntemler, özellikle büyük metal yapılar ve boru hatları gibi geniş alanlarda etkili bir çözüm sunar.

Anodik koruma yöntemi, metal yüzeyinde koruyucu bir oksit tabakası oluşturarak korozyonu önler. Bu tabaka, metalin yüzeyinde kimyasal reaksiyonlara karşı bir bariyer oluşturur ve böylece metalin korozyona karşı direncini artırır (Smith, 2010). Anodik koruma, özellikle yüksek korozyon riski taşıyan ortamlarda etkilidir.

Katodik koruma ise, metal yüzeyine negatif bir potansiyel uygulayarak koruma sağlar. Bu yöntem, metal yüzeyinin korozyonunu azaltır ve paslanmayı önler. Katodik koruma, genellikle boru hatları ve büyük metal yapılar gibi uzun süreli koruma gerektiren uygulamalarda tercih edilir (Jones, 2012). Bu yöntem, metalin ömrünü uzatır ve bakım maliyetlerini düşürür.

BİRİNCİ BÖLÜM

KAYNAK ARAŞTIRMASI

Keleş (2008), 2-aminofenol (2-AF), 4-amino-m-kresol (4-AK), 6-amino-m-kresol (6-AK) ve Tiramın (TR) in 0,1 M H_2SO_4 çözeltisi içindeki YÇ korozyonuna inhibitör etkileri sıcaklık ve derişim değerlerine bağılı olarak incelenmiştir. Farklı deney olarak polimerleşme özelliğı saptanan 6-amino-m-kresol'ün elektro polimerizasyonu, platin elektrot yüzeyinde, 0,1 M Na_2SO_4 çözeltisinde pH 5, 7 ve 9 olduğunda gerçekleştirilmiştir. Çalışılan moleküllerin İE'leri elektrokimyasal yöntemler kullanılarak belirlenmiştir. Buna göre orta derecede etkin inhibitör oldukları belirlenen moleküllerin, etkinlik bakımından en iyi sonucun TR olduğu sonucuna varılmıştır. Ea, adsorpsiyon serbest enerjileri ve sıfır yük potansiyelleri, inhibitörlerin YÇ yüzeyine adsorpsiyonu fiziksel etkileşimlerle olduğunu göstermiştir.

Karadaş (2010), İndol ve tiyazol grubu içeren 2-Metil-3-(tiyazol-2-ildiazenil)-1H-indol (TAİ-1) ve bu organik boyarmaddenin inhibitör özellikleri üzerine fenil ve metil sübstitüentlerinin etkilerini incelemek için TAİ-1 in dört farklı türevi, HCl korozif ortamında derişim deneyleri yapmıştır. YÇ üzerinde bu moleküllerin inhibitör etkinlikleri EİS ve Tafel yöntemleri kullanılarak belirlenip ortaya konulmuştur. Bunların arasında en etkin korumayı sağlayan inhibitörün ise 1-Metil-2-fenil-3-(5-metiltiyazol-2-ildiazenil)-1H-indol (TAİ-5) olduğu bulunmuştur. İnhibitör derişimi arttıkça inhibisyon etkinliğı artmıştır. Derişim 2×10^{-4} M değerinde olduğunda %90,1 değeri ile maksimum sonuca ulaşılmıştır. Adsorpsiyon serbest enerjisi, sıfır yük potansiyeli ve E_a TAİ-5 in YÇ yüzeyine adsorpsiyonunun fiziksel etkileşimlerle olduğu ortaya konmuştur. Bunlarla birlikte protonlanan inhibitör molekülleri Cl^- iyonu köprüleri üzerinden elektrostatik olarak tutunduğı sonucuna varılmıştır.

Onat (2011), YÇ korozyonuna 1,0 M HCl çözeltisinde derişimleri değiştirerek karbazol'ün inhibisyon etkisi kısa ve uzun bekleme sürelerinde elektrokimyasal impedans (EİS) ve OCP değişiminin ölçülmesi ile araştırmıştır. Kısa süreli testlerde lineer polarizasyon direnci (LPR) ve Potansiyodinamik polarizasyon (PDP) yöntemleri ile çalışmıştır. PDP eğrilerinden yola çıkarak bu bileşiğin 1,0 M HCl çözeltisinde YÇ'ye karma tip inhibitör olarak davrandığı belirlenmiştir. Ayrıca inhibitörün Langmuir adsorpsiyon izotermine uyduğu görölmüştür. Adsorpsiyon denge sabiti ve ΔG°_{ads} değerleri de ayrıca hesaplanmıştır. Sıcaklık etkisi ise 298 – 328 K'de gibi farklı değerlerde incelenip $1,0 \times 10^{-3}$ M inhibitörlü ve inhibitörsüz çözelti-lerde çalışılmıştır. Farklı sıcaklıktaki korozyon hızlarından aktivasyon enerjileri (E_a) hesaplanmış olup 1,0 M HCl ortamlarında E_a değeri 58,26 kJ/mol olarak belirtilmiştir. ΔG°_{ads} değerleri bu çalışmadaki her çözelti ortamı için negatif çıkmıştır. Ortaya çıkan bu negatif değerler ise 31,7 – 33,2 kJ/mol aralığında olmuştur

Ongun Yüce (2011), Rodanin-N-Asetik Asit, 2-Tiyodantoin, 3-Tiyofen Asetik Asit, 2- Tiyofen Asetik Asit içeren ortamların, 0,1 M Hidroklorik asit çözeltisi olduğu ve içindeki YÇ'nin korozyonuna inhibisyon etkileri PDP, EİS ve LPR teknikleri kullanılarak derişim ve sıcaklığa bağlı deneyler yapılarak araştırmıştır. Uzun zaman testlerinden, organik maddelerin farklı konsantrasyonlarında R_p değişimi ve H_2 gaz çıkışı belirlenmiştir. En yüksek iki inhibitör derişiminde $5,0 \times 10^{-3}$ M R-NA ve $1,0 \times 10^{-2}$ M R-NA içeren çözelti-lerde yüzeyde oluşan film kararlılığından dolayı zamanla H_2 gazı çıkışı sıfır düzeyinde kaldığı şekiller ile sunulmuştur. İnhibitörlü ve inhibitörsüz çözelti-lerinde YÇ elektrotun daldırma zamanından sonra yüzey görüntüleri elde edilmiştir. Her organik madde için YÇ korozyonuna ait E_a ve termodinamik değerler (K_{ads} , ΔG°_{ads}) hesaplanmıştır. Adsorpsiyon serbest enerji (ΔG°_{ads}) değerleri R-NA, 2-THD, 3-THA ve 2- THA için sırasıyla -33,08, -31,6, -30 ve -28 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. İnhibitörlü ve inhibitörsüz çözelti-lerinde YÇ elektrotun sıfır yük potansiyeli Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi yöntemiyle belirlenmiş ve organik maddelerin adsorpsiyon prosesleri için mekanizma önerilmiştir. Sonuçlara bakıldığında organik maddelerin YÇ korozyonu üzerine inhibisyon etkilerinin 2-THA hariç, iyi olduğunu göstermiştir. En yüksek inhibisyon verimliliğinin ise R-NA içeren çözelti-lerde bulunmuştur.

Akyıldız (2013) çalışmasında, 3-Amino-5-methylisoxazole (3A5M), 5-Amino-3-methylisoxazole (5A3M)'nin 0,1 M HCl çözeltisi içindeki YÇ'nin, korozyonuna inhibisyon etkileri EİS ve akım potansiyel eğrileri kullanılarak farklı daldırma sürelerine

ve derişime bağlı olarak değişimi belirlenmiştir. Ayrıca maddelerin elektrot yüzeyindeki adsorpsiyon davranışlarının moleköl yapısı ve fonksiyonel grupların konuma bağlılığı belirlenmiştir. EİS yöntemiyle YÇ elektrodun sıfır yük potansiyeli belirlenmiştir. Elde edilen eğride CPE değerine karşılık gelen potansiyel sıfır yük potansiyeli -0,496 V, yumuşak çelik elektrotun bu koşullardaki OCP ise -0,446 V olarak belirlenmiştir. YÇ elektrotun 4 saatlik daldırma zamanından sonra çözelti derişiminin etkinliğe katkısını belirlemek için yüzey görüntüleri elde edilmiştir. 0,5 M HCl çözeltisi elde edilen şekilden YÇ'nin daha fazla korozyona uğradığı görölmüştür. Sonuçlar araştırılan inhibitör maddelerin YÇ yüzeyinde zamanla kaybolan koruyucu bir film tabakası oluşturduğunu göstermiştir. İnhibitörlerin orta derecede bir etkinlik sağladığı da ayrıca belirtilmiştir.

Baş (2013), 2-hidroksi-benzaldehit vep-Aminoasetanilitin kondenzasyon tepkimesi ile Metil N-4- ((E-(2-Hidroksibenzilitamino) fenilformimit (Mhf) sentezlenmiş ve yapısı, ¹H-NMR, UV-vis ve FTIR analizleriyle aydınlatılmıştır. p-Aminoasetanilit ve Mhf'nin 1,0 M HCl ortamındaki PDP, EİS ve LPR teknikleri kullanılarak YÇ'nin korozyon davranışına inhibitör etkileri sıcaklıklar 298–328 K'de olmak üzere araştırılmıştır. Tüm inhibitörlerde çalışılan tüm sıcaklıklarda; i_{corr} değerleri derişim arttıkça azaldığı görölüp, sıcaklık arttıkça iyonik iletkenlik arttığından dolayı arttığı saptanmıştır. İnhibitörlerin karma inhibitör olarak davrandıkları Polarizasyon eğrilerinden yola çıkılarak ifade edilmiştir. Langmuir adsorpsiyon izotermine uygunluğu da kontrol edilip tespit edilmiştir. Termodinamik parametreler inhibitör moleküllerinin, YÇ yüzeyine fiziksel olarak absorplandığını göstermiştir. Bekleme zamanı ile ΔG_{ads} ve K_{ads} değerlerinde değişme gerçekleşmemiş olup yaklaşık her iki inhibitörde de -30 kJ/mol dolayında kaldığı ifade edilmiştir. YÇ'nin yüzey morfolojilerine ise SEM ve AFM yöntemleri kullanılarak bakılmıştır. Yüzey görüntülerinde inhibitörlerin koruma sağladığı görölmektedir. Elde edilen veriler doğrultusunda, inhibitör moleküllerinin YÇ korozyonunun kontrolünde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Sarı (2015), 1-(2-Hidroksietil)-2-İmidazolidion 2-(HEI)'nin YÇ korozyonuna karşı 0,5 M Hidroklorik asit çözeltisi içinde EİS, Potansiyodinamik polarizasyon ve LPR gibi metotlar kullanılarak araştırmıştır. Ayrıca farklı sıcaklıklarda inhibitör etkisi incelenmiş ve YÇ yüzeyinin morfolojisi hem inhibitörsüz hem inhibitörlü ortamda SEM ile incelenip ortaya konmuştur. İnhibitör etkinliği değeri, inhibitörün derişimi ile doğru orantılı çıkıp artmıştır. İnhibitör etkinliği değerleri ise, sıcaklık ile ise ters orantılı çıkıp

sıcaklık değeri artıkça azalmıştır. En yüksek inhibitör derişiminde en büyük polarizasyon direnci Nquist eğrilerinden elde edilip hesaplanmış olup bu değeri 494 Ω çıkmıştır. İnhibisyon verimliliği değeri ise bu derişimde %85,40 olarak belirlenmiştir. PDP sonuçları inhibitörün karma bir inhibitör olduğunu göstermiştir. YÇ yüzeyinde 2-HEI'nin adsorpsiyonun Langmuir izotermine uyduğu ortaya konmuş olup, K_{ads} , ΔG°_{ads} gibi termodinamik parametreler de hesaplanıp tartışılmıştır. Adsorpsiyon serbest enerjisi (ΔG°_{ads}) 2-HEI inhibitörünün -29,87 kJ/mol değeri çıkmıştır.

Dilek (2020), çalışmasında keten tohumundan yararlanmış ve yüzey aktif madde elde etmiştir. Bu madde ile korozyon çalışması gerçekleştirmiştir. Elde edilen bu yüzey aktif maddenin YÇ'nin korozyonuna inhibisyon etkisi farklı derişimlerde inhibitör içeren 1,0 M Hidroklorik asit çözeltisinde EİS ve PDP yöntemleri ile belirlenmiştir. Akım potansiyel eğrilerinde 4000 ppm inhibitör içeren ortamda anodik bölgede -0,4 V ta akım yoğunluğu değeri 10 mA cm⁻² olarak hesaplamıştır. Bu değerin inhibitörsüz ortamda ise 280 mA cm⁻² olduğu belirtilmiştir. YÇ'nin yüzey yapısı SEM ile karakterize edilmiş olup, ayrıca keten tohumunun İE değerleri farklı derişim ve sıcaklıklarda hesaplanmıştır. Sonuçlar, bu inhibitörün 1,0 M Hidroklorik asit çözeltisi içinde YÇ'nin yüzeyinde film oluşturarak korozyonu önlediğini açıklamaktadır. 1,0 M HCl çözeltisinde, inhibitör derişimlerinin artması ile Nyquist eğrilerinden elde edilen basık yarım dairelerdeki polarizasyon dirençleri artış gösterip doğru orantılı çıkmıştır. İnhibitörsüz ortamda polarizasyon direnci 66,00 ohm cm² iken ortama inhibitör eklenmesi ile 33,07 ohm cm² olmuştur. İnhibitör etkinliği 4000 ppm derişimde % 99,9 olarak hesaplanmıştır.

Günbeyi (2020), çalışmada YÇ'nin 0,5 M Na₂SO₄ çözeltisindeki korozyonuna kapari bitkisi tohumundan elde edilen özütün inhibitör etkisi araştırılmıştır. Deneysel verileri elde etmek için farklı pH'da farklı derişimlere bağlı olarak Tafel eğrileri, Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi, temas açısı ve SEM yöntemleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardan özüt derişimi ve pH'a bağlı olarak kapari bitkisi tohumunun inhibitör olma durumlarının değiştiği gözlenmiştir. Yapılan ölçümlerde, inhibitör içeren tüm çözeltelerde korozyon potansiyelinin inhibitör içermeyen çözeltilere göre daha pozitif potansiyele kaydığı belirtilmiştir. En yüksek inhibisyon etkinliği pH 2'de çıkmış olup bu değeri %77 olarak hesaplanmıştır. Sonuçlara göre tüm çözeltelerde inhibitör ilavesi ile korozyon potansiyelinin içerisinde inhibitörsüz çözelti ortamlarına göre daha pozitif potansiyele kaydığı görülmüştür. Kapari bitkisi tohumu ekstraktının pH aralığı 2 ve 4 olduğunda iyi bir inhibitör olarak davrandığı gözlenmiştir.

Ouakki et al., (2021), YÇ korozyonuna karşı karbonitril (PY-2Cl) ve 2-amino-4-(4-klorofenil)-5-okso-4,5-dihidropirano [3,2c] kromen-3-karbonitril (PY4Cl) inhibitörlerinin 1 M HCl ortamında yapılan deneysel araştırmada, EİS, ağırlık kaybı (WL) ve Potansiyodinamik polarizasyon dahil olmak üzere bir dizi teknik kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, PY-2Cl ve PY-4Cl'nin inhibisyon etkinliğinin konsantrasyonları ile arttığını göstermiştir. Polarizasyon sonuçları, PY-2Cl ve PY4Cl'nin karışık tip inhibitör davranışı sergilediğini göstermişlerdir. PY-2Cl ve PY-4Cl'nin inhibisyon etkinlikleri şu sırayı takip etti: %85,8 (PY-4Cl) <%91,2 (PY-2Cl). PY-2Cl ve PY-4Cl YÇ yüzeyinin adsorpsiyon işlemi Langmuir adsorpsiyon modelini izlemiştir. EDX, AFM ve Kızılötesi Spektroskopi (FT-IR) ile birleştirilmiş SEM kullanan yüzey karakterizasyon analizi, YÇ yüzeyini kaplayan bir bariyer tabakasının varlığını desteklemiştir. Ağırlık kaybı ölçümleri ayrıca endüktif olarak birleştirilmiş spektroskopi (ICP) ve UV-vis spektrometrisi (UV-vis) kullanılarak test edilmiştir.

Teng et al., (2021), Kirazlardan elde edilen çevre 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 izotermi uyduğu belirlendi. Yüzey analizi için de taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanıldı. Ayrıca kuantum kimyasal hesaplamalar da yapılarak sonuçlar değerlendirildi.

Mahdi et al., (2022), Geleneksel ağırlık kaybı testlerinin yanı sıra farklı elektrokimyasal teknikler (PD polarizasyon ve EİS) kullanılarak 2,2'-(1,4-fenilenbis(metanilliden)) bis(N-(3-metoksifenil) hidrazinkarbotiyoamid (PMMBMH) 1 M HCl çözeltisinde YÇ için bir inhibitör olarak kullanılması araştırılmış ve 0,0005 M PMMBMH'nin maksimum koruma etkinliği %95' e çıkmıştır. Adsorbe edilen H yerine koruyucu bir adsorpsiyon tabakası oluşturulması nedeniyle adsorbe edilen H₂O molekülleri ve asidik klorür iyonları, araştırılan inhibitörün varlığı korozyon hızını azaltmış ve inhibitör etkinliğini arttırmıştır. İnhibitör konsantrasyonu arttıkça inhibisyon etkinliği artmış, ancak sıcaklık arttıkça azalmıştır. PMMBMH adsorpsiyon modu, yüksek adsorpsiyon-inhibisyon aktivitesi ile Langmuir adsorpsiyon izotermi ile izlenmiştir.

Ayrıca, $\Delta G^{\circ}_{\text{ads}}$ değeri PMMBMH'nin YÇ yüzeyinde fiziksel ve kimyasal adsorpsiyona katkıda bulunduğunu göstermiştir.

Arslanhan (2023), yeni ve yüksek verimli korozyon inhibitörü olarak 2-Amino-1,3,5-triazin-4,6-ditiyol (2-ATD) elektrokimyasal yöntemler kullanılarak 0.5 M HCl çözeltisinde yumuşak çelik (YÇ) korozyonu için çalışma yapmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve kuantum kimyasal hesaplama yöntemleri çalışmada kullanılmıştır. Potansiyodinamik polarizasyon (PDP) eğrileri 2-ATD'nin karışık tip inhibitör olduğunu, korozyon inhibisyon etkinliğinin artan inhibitör konsantrasyonu ile arttığını ve %96,5 değerine ulaştığını ortaya koymuştur. 2-ATD'nin korozyon davranışına karşı maruz kalma süresinin değişimi korozi ortamda incelenmiştir. Korozyon potansiyeli (E_{corr}) daha negatif değerlere kayarken, polarizasyon dirençleri (R_p) korozyon sürecine bağlı olarak 120 saat maruz kalma süresi ile azalmıştır. H_2 gazı hacmi, 120 saat maruz kalma süresi ile inhibitörsüz ve inhibitör eklenmiş çözeltilerde (10 mM 2-ATD) ölçülmüştür. YÇ elektrotta çok düşük hacimde ($3,6 \text{ mL cm}^{-2}$) H_2 gazı elde edilmiştir. 2-ATD'nin tüm yüzeyi kapladığını ve hem YÇ'nin anodik çözünmesini hem de katodik hidrojen çıkışı reaksiyonlarını geciktirdiğini göstermektedir. Adsorpsiyon süreci Langmuir izotermine uyumlu olduğu ortaya konmuştur. Adsorpsiyon ve termodinamik parametreler 2-ATD'nin YÇ yüzeyinde güçlü bir adsorpsiyon etkisine sahip olduğunu ve karışık adsorpsiyon tarzını (Fiziksel ve kimyasal) içerdiğini göstermektedir. Korozyon akım yoğunluğu artan sıcaklıkla artar ve yüksek aktivasyon enerjisi (E_a) 2-ATD'nin YÇ yüzeyinde güçlü adsorpsiyonunu kanıtlamıştır. SEM, EDX ve AFM analizleri elektrokimyasal yöntemlerle elde edilen sonuçları desteklemekte ve koruyucu tabakanın varlığını ve YÇ üzerinde 2-ATD'nin güçlü adsorpsiyonunu doğrulamaktadır.

Karakaya (2023), çalışmasında avokado (*Persea Americana*) yaprağı özütlerinin H_2SO_4 çözeltisi içerisinde bulunan paslanmaz çeliğin korozyonu üzerine inhibitör etkinliği, sıcaklık, derişim ve korozi ortamda bekleme sürelerine bağlı olarak araştırmıştır. Deneysel verilerin elde edilmesinde PDP, lineer polarizasyon direnci, elektrokimyasal impedans spektrometresi (EİS) ve SEM yöntemleri kullanılmıştır. Paslanmaz çeliğin avokado yaprağı özütü olan ve olmayan asidik ortamda inhibisyon etkinliği (%İE), korozyon akımı (i_{corr}) ve polarizasyon direnci (R_p) değerleri elde etmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, özütlü ortamda bekletilme süresi ve özüt derişimi arttırıldığında inhibisyon etkinliğinin arttığı gözlenmiştir. En yüksek inhibitör etkinliğini

(%64) 10 g/L olan en yüksek derişimde elde etmiştir. Farklı sıcaklıklarda (25°C, 35°C, 45°C ve 55°C) elde edilen sonuçlara göre, sıcaklığın arttıkça korozyon direncinin azaldığı belirlenmiştir. Paslanmaz çeliğin yüzey görüntüleri taramalı elektron mikroskobu ile alınarak, yüzeyinde koruyucu bir film tabakası oluştuğu gözlenmiştir. Asidik ortamda inhibitörün Langmuir adsorpsiyon izotermine uyduğu belirlenmiştir. Adsorpsiyon serbest entalpisi (ΔG°_{ads}) değeri hesaplanmış olup inhibitörün fiziksel adsorpsiyonun kendiliğinden gerçekleştiği anlaşılmıştır.

Ökten (2023), Elektrokimyasal impedans spektroskopisi ve lineer polarizasyon direnci testi, 0,5 ile 10,0 mM arasında değişen inhibitör konsantrasyonları için son derece benzer polarizasyon direnci değerleri elde edilmiştir. YÇ sıfır yük potansiyeli hesaplandı ve yüzeyin negatif yüklü olduğu tespit edilmiştir. YÇ yüzeydeki 2-amino-4-metoksi-6-metil-1,3,5-triazinin (AMT) inhibitör aktivitesini değerlendirmek için SEM ve AFM teknikleri kullanıldı. Langmuir adsorpsiyon izotermi, inhibitörün adsorpsiyon özelliklerini YÇ yüzeye en iyi şekilde uyum sağladı. 120 saatlik daldırmadan sonra, inhibe edilmiş çözelti içinde YÇ elektrodu üzerinde çok az miktarda H₂ gazı toplanır. İnhibisyon etkinliği, asit çözeltisi içeren 10,0 mM inhibitörü için %95,7 olan elektrokimyasal empedans spektroskopisi kullanılarak hesaplandı. Ayrıca, K_{ads} ve ΔG°_{ads} gibi deneyle ilişkili termodinamik değişkenler hesaplanmış ve tartışılmıştır.

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), elektrokimyasal impedans spektroskopisi (EİS) 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 inhibitör etkinliğinin 2,5x10⁻³ M S1 çözeltisinde %87 olarak görüldü. Tüm deneysel sonuçlardan S1'in YÇ yüzeyine adsorbe edildiğinin ve böylece yumuşak çeliğin korozyon reaksiyonlarını engellediği tespit edilmiştir. YÇ yüzeyindeki adsorbe olayının Langmuir adsorpsiyon izotermine uyduğu belirlenmiştir.

Arslanhan vd., (2024) çalışmasında yeşil bir inhibitör olarak kuzu kulağı bitki özütü ile yumuşak çelik yüzeyinde oluşan korozyon incelenmiştir. Yeşil kuzu kulağı bitki özütünün yumuşak çeliğin inhibisyonu üzerindeki etkinliği ve potansiyeli korozyonu asidik ortamda araştırılmıştır. Yüksek inhibisyon kabiliyeti elektrokimyasal empedans

spektroskopisi (EİS) ve lineer polarizasyon direnci (LPR) teknikleri ile incelenmiştir. Ayrıca, korozyonu incelemek için Potansiyodinamik (PD) polarizasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen elektrokimyasal testler, kuzu kulağı özütünün yumuşak çelik üzerinde önemli bir inhibisyon etkisine sahip olduğunu göstermiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile kaydedilen yüzey analizi sonuçları ve atomik kuvvet mikroskopisi (AFM), kuzu kulağı bitki özütünün adsorbatif gruplar aracılığıyla çelik yüzeyinde güçlü bir koruyucu tabaka sağladığını göstermiştir. İnhibisyon etkinliği, 120 saat maruz kalma süresinden sonra LPR ve EİS'den %99,7 ve %99,6 olarak hesaplanmıştır. Adsorpsiyon serbest enerjisi (ΔG°_{ads}) değeri $-29.79 \text{ kJ mol}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Ayrıca, elde edilen deneysel bulgular kuantum hesaplamalar yöntemleri ile desteklenmiştir.

Yıldız vd., (2024) çalışmasında potansiyel bir yeşil inhibitör olarak Cyclotrichium niveum bitki özütünü kullanmıştır. Cyclotrichium niveum'un metanol özütünde elli üç fitokimyasal tespit edilmiştir. Adsorpsiyon davranışı Langmuir adsorpsiyonuna uymaktadır. İnhibisyon etkinliği %97,3 değerine kadar ulaşmıştır. İnhibitör varlığında daha yüksek aktivasyon enerjisi elde edilmiştir ve bu da inhibitörün yük ve kütle transfer reaksiyonuna fiziksel bir bariyer oluşturarak etkili bir inhibitör görevi gördüğünü ve korozyon oranında azalmaya yol açtığını göstermektedir. Taramalı elektron ve atomik kuvvet mikroskopları daha düzgün, çatlaksız ve çukursuz yapıyı göstererek, inhibe edilmiş çözelti için YÇ yüzeyi üzerinde koruyucu bir film olduğunu doğrulamıştır. XPS analizi, YÇ yüzeyinde C, O ve Fe atomlarının varlığını onaylamıştır.

İKİNCİ BÖLÜM

MATERYAL ve METOT

2.1. Deney Tasarımı

Deneyde kullanılan materyaller:

Tablo 2. 1. Kullanılan elektrotlar

1.Referans Elektrot	Referans elektrot olarak Gümüş-gümüş klorür elektrodu (Ag/AgCl , Cl^-) tercih edilip kullanılmıştır.
2.Çalışma Elektrodu	İçeriği C (%0,18), Mn (%0,71), Cu (%0,26), P (%0,19), O (%0,41), S (%0,04), N (%0,20), Si (%0,24), ve Fe (%97,77) oranlarından oluşan endüstriyel YÇ tercih edilip kullanılmıştır.
3.Karşı Elektrot	Karşı elektrot olarak yüzey alanı 2 cm^2 olan platin kullanılmıştır.

Kullanılan Cihazlar:

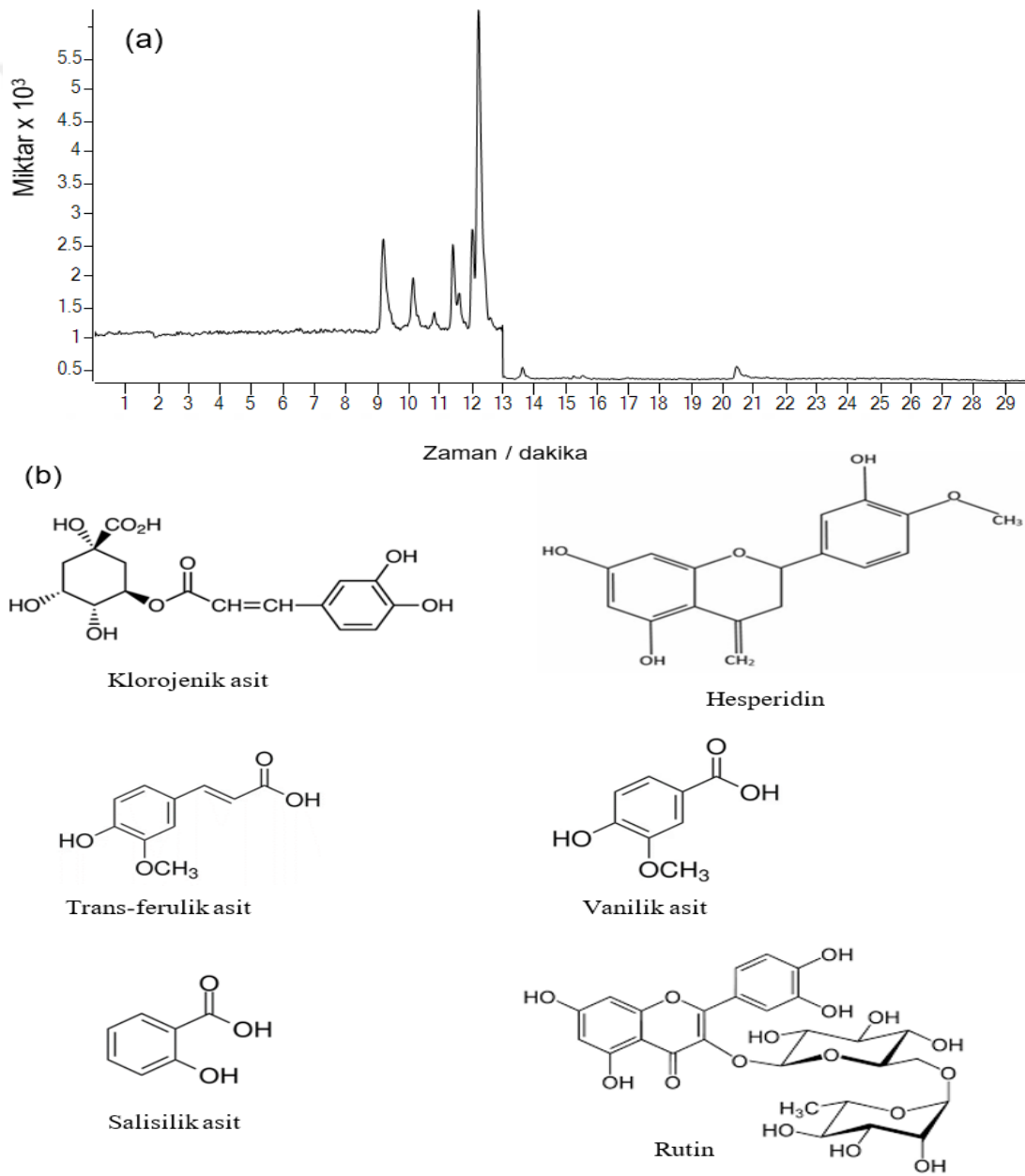
- Elektrokimyasal Analizör (Gamry instruments potentiostat/galvanostat/ZRA/3000)
- SEM (Leo Evo 40)
- AFM (Park system XE-100)
- Termostat

- Metal Parlatıcı (180-1000-1200 grid zımpara kağıdı)
- EDX (Bruker XFlash 6I10)

Kullanılan Kimyasal Maddeler:

- Etanol
- KE özütü
- Hidroklorik asit çözeltisi
- Saf su

Kuş Ekmeği Özütünün Hazırlanma Süreci:



Şekil 2. 1. KE özütünün LC/ESI-MS/MS kromatogramı (a) ve başlıca bileşikleri (b)

Kuş Ekmeği özütünün LC/ESI-MS/MS yönteminden elde edilen kromatogramı ve özütte bulunan başlıca bileşikler Şekil 2.1.' de verilmektedir. Bu bitki Haziran 2021 de Türkiye'nin Kilis bölgesinden toplandı. KE'nin ekstraksiyonu: Toplanan KE, su ve deiyonize su ile birkaç kez yıkandı. Yıkanan KE, oda sıcaklığında bir hafta kurutuldu. Daha sonra 15 g kurutulmuş bitki tartıldı ve bir cam balona yerleştirildi. Üzerine 200 mL metanol ilavesi yapıldı. Kapalı balon yaklaşık 4 gün boyunca kapalı halde tutuldu. Filtreleme işlemi yapıp katı olan kısım uzaklaştırıldı. Kalan sıvı içerisindeki metanol ise buharlaştırıldı. Yapılan bu işlemlerin sonunda 1,385 g'lık bir özüt elde edildi ve korozyon testlerinde kullanılmak üzere 4 °C sıcaklıkta muhafaza edildi.

Elektrotların Hazırlanma süreci:

- i. Yumuşak çeliği, 5 cm olacak şekilde silindirik çubuk haline getirdikten sonra bir ucu bakır olan tel ile aralarında metalik bağlantı oluşturuldu.
- ii. Diğer ucun sadece yüzeyi açıkta kalacak şekilde olmak üzere geri kalan kısımlar polyester ile kaplatıldı.
- iii. Yumuşak çeliğin çalışma için açıkta bırakılan kısmının yüzey alanı 0,5 cm² olup bu alan mekanik parlaticı ile farklı boyutlu zımpara kağıtları kullanılarak parlatma işlemi yapılmıştır.
- iv. Bu işlem her ölçüm öncesinde tekrarlanmıştır.
- v. Parlatma işleminden sonra bu alan saf suyla temizlenip filtre kağıdı yardımıyla kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir.
- vi. Daha sonra çelik, çalışma çözeltisine daldırılmıştır.

2.2. Deneylerin Gerçekleştirilmesi

Tablo 2.2. Çalışma boyunca yapılan deney çeşitleri

DENEY TÜRÜ	OLUŞTURULAN ÇÖZELTİ ORTAMI
Derişim Deneyleri	~25°C sabit sıcaklıkta 1 M HCl çözeltisi ve 100 ppm, 250 ppm, 500 ppm, 750 ppm ve 1000 ppm derişimlerde KE içeren çözelti
Sıcaklık Deneyleri	25-55°C sıcaklık aralığında 1 M HCl çözeltisi ve 1000 ppm sabit derişimlerde KE içeren çözelti
Hidrojen Gazı Deneyleri	~25 °C sabit sıcaklıkta 1 M HCl çözeltisi ve 1000 ppm sabit derişimde KE içeren çözelti
Metal Yüğü Belirleme	~25°C sabit sıcaklıkta 1000 ppm sabit derişimde KE içeren çözelti

Elektrokimyasal ölçümlerin tamamında üç elektrot yöntemi kullanılmıştır. Atmosfere açık alanda korozif çözelti ortamında 1 saat bekletilip çıkartılan YÇ elektrotuyla yapılmıştır.

Yöntemler:

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

Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi (EİS) Yöntemi: Bu teknikte yapılan deneyler, açık devre potansiyelinde 10^5 - 10^{-2} Hz. frekans aralığı ve 5 mV genlik değerleri tercih edilerek ölçümler yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar, Bode ve Nyquist 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 olup tarama hızı ise 1 mV/s olarak ayarlanıp elde edilmiştir. Elde edilen doğruların eğiminden yola çıkarak polarizasyon direnç (R_p) değerleri hesaplanmıştır.

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

- i.YÇ'den 5 cm uzunluğunda kesilen 0,5 cm² alanına sahip silindirik parçaların yüzeyleri, metal parlaticı yardımıyla 180, 1000 ve 1200 gridlik zımpara kağıtları kullanılarak parlatılmıştır.
- ii.Parlatılan silindirik parçalar ise atmosfere açık ortamda olacak şekilde bir tanesi aynı ortamda bulunan 1 M HCl +1000 ppm KE içeren inhibitörlü çözelti ortamına diğeri ise inhibitörsüz 1 M HCl çözeltisine bırakılmıştır.
- iii.Her iki parça SEM-EDX için 120 saat, XPS analizi için 24 saat bekleme sonrasında çözeltilerden çıkarılmış, etüvde yaklaşık 35° derecede, 1 saat kurutulmuş ve analize hazır hale getirilmiştir.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

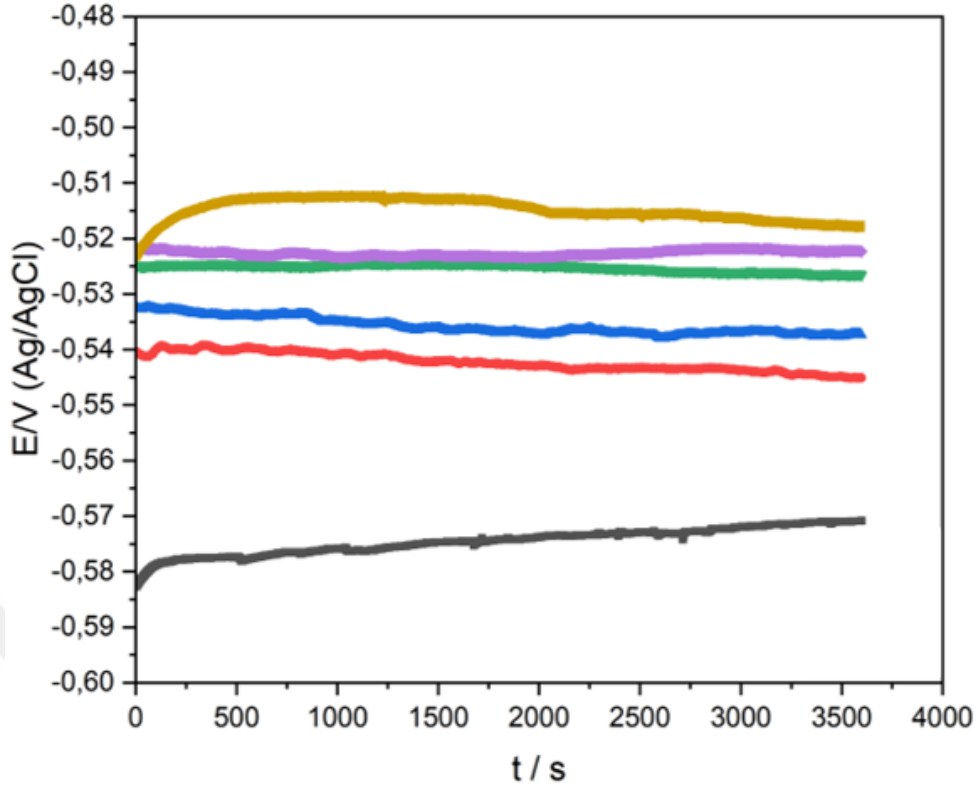
3.1. Derişim Deney Bulgularının Değerlendirilmesi

Açık atmosfer koşullarında 1 M HCl çözeltisi içinde KE özütünün YÇ korozyonuna etkisi elektrokimyasal yöntemler kullanılarak 100 ppm, 250 ppm, 500 ppm, 750 ppm ve 1000 ppm gibi farklı derişimlerde olmak üzere, ortam sıcaklığı 25°C tutularak deneyler yapılmıştır.

3.1.1. Açık devre potansiyeli eğrileri ve değerlendirilmesi

Açık Devre Potansiyeli (OCP), bir metal yüzeyin elektrokimyasal koşullarda, dış bir akım uygulanmadan ölçülen doğal potansiyelidir. Bu potansiyel, metalin çevresel koşullara karşı elektrokimyasal tepkisini ve korozyon eğilimini değerlendirmede önemli bir göstergedir. Korozyon çalışmalarında EİS ölçümleri yapılırken E_{ocp} değerinde başlanıp bu sayede polarizasyon direnci belirlenmiş olur. Aynı şekilde E_{ocp} değerinde LPR ölçümleri de düşük anodik ve katodik aşırı potansiyelleri arasında yapılır (Sığircık vd., 2016).

Daldırma süresi (3600 saniye) ile 1 M HCl çözeltisinde ve 1 M HCl + farklı derişimlerde hazırlanan KE özütleri için E_{ocp} parametrelerin varyasyonu aşağıda sunulmuştur.



Şekil 3.1. 3600 Saniye boyunca 1 M HCl (■) ve 1 M HCl + KE'nin farklı (100 ppm (●), 250 ppm (▼), 500 ppm (▼), 750 ppm (◆) ve 1000 ppm (◆)) derişimlerinde eklenmiş çözeltilerden elde edilen açık devre potansiyel eğrileri

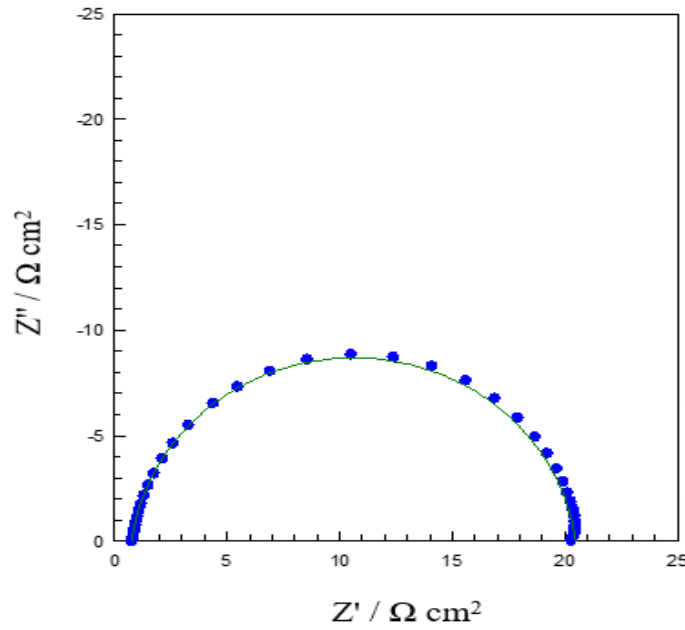
Şekil 3.1.'de, farklı konsantrasyonlardaki KE özütünün çelik üzerindeki açık devre potansiyeli (OCP) değışimleri gösterilmektedir. İnhibitörsüz numune için OCP değeri başlangıçta -0,58 V civarında olup, zamanla hafif bir artış göstererek -0,57 V civarına ulaşmıştır. Bu değışim, deneyin neden 3600 saniye devam ettirildiğini anlatmak için bir gerekçe oluşturmakta olup, daha kararlı sonuçlar çıkma ihtimalini destekler. Burada yer alan çizginin sabit devam etmesi ile çalışma elektrodunda meydana gelen yüzeydeki adsorpsiyon-desorpsiyon süreçlerinin dinamik bir dengeye ulaştığını gösterir (Şahin vd., 2024).

100 ppm, 250 ppm, 500 ppm, 750 ppm ve 1000 ppm KE konsantrasyonları için OCP değeri başlangıçta -0,52 V ile -0,54 V arasında değışmekte ve zamanla sabit bir potansiyel eğilimi göstermektedir. Yine aynı şekilde buradaki çizginin de sabit devam etmesi denge durumunu ifade eder. Çizgiye bakıldığında özellikle 1000 ppm konsantrasyondaki KE özütünün OCP değeri yaklaşık -0,51 V civarında sabitlenmiştir. İnhibitörlü ortamların konsantrasyonu arttıkça E_{ocp} değerinin daha anodik bölgelere doğru kaydığı verilen şekilde pozitif potansiyel değere gitmesinden anlaşılmaktadır. Bu durum,

özütün anodik bölgedeki reaksiyonlara katodik bölgedekilere göre daha fazla etki ettiğini ortaya koyar. Metal çözünme reaksiyonu üzerindeki etkisinin hidrojen oluşum reaksiyonundan daha fazla olduğunu göstermektedir.

3.1.2. 1 M HCl Çözeltisi içinde bulunan yumuşak çeliğin elektrokimyasal davranışı

Elektrokimyasal sistemlerin analizlerinde sıkça kullanılan EİS yöntemiyle elde edilen Nyquist diyagramları, impedans verilerini bize görsel olarak sunar.



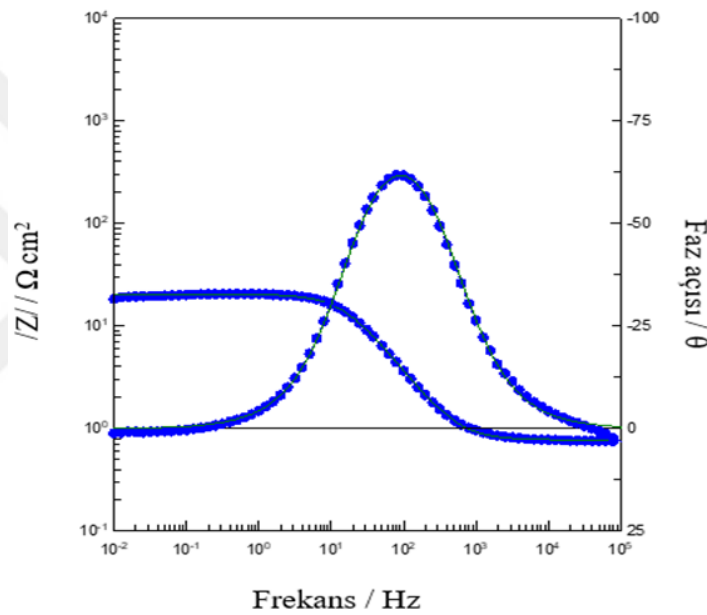
Şekil 3.2. 1 M HCl çözeltisi (●) içinde bulunan YÇ elektrotun açık devre potansiyelinde elde edilen Nyquist eğrisi

Şekil 3.2'.de yumuşak çeliğin 1 M HCl içinde gösterdiği impedans spektrumu, hafif yarım daire formunda bir eğri oluşturmaktadır. Bu eğri, elektrokimyasal bir sistemde karakteristik olarak gözlemlenen tipik bir yarı daire formasyonudur ve genellikle bir direnç-kapasitör devresi (Randles devresi) ile modellenir (Orazem & Tribollet, 2008).

Nyquist diyagramında görülen hafif yarım daire, yumuşak çeliğin yüzeyindeki korozyon süreçlerini anlamamıza yardımcı olur. Yarı dairenin genişliği, polarizasyon direncini (R_p) belirler. Şekil 3.2.'de R_p değeri $18,4 \Omega \text{ cm}^2$ olarak elde edilmiştir. Bu değer, yumuşak çeliğin HCl içindeki korozyon direncini temsil eder ve bu durumda oldukça düşük bir direnç olduğunu gösterir, bu da yüksek korozyon hızını işaret eder (Bard et al.,

2001). Bu veri açık devre potansiyeli -0,570 V değerinde olduğunda iken alınmış olup sabit faz elemanı (CPE_{y0}) değeri ise $675 \times 10^{-6} \text{ s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$ olarak hesaplanmıştır.

Bode diyagramları, bir sistemin frekans cevabını hem genlik (dB cinsinden) hem de faz açısı (derece cinsinden) olarak gösteren logaritmik ölçekte çizilen grafiklerdir (Jones, 1996). Bu diyagramlar, özellikle frekans cevabı analizlerinde kullanılır ve genellikle iki grafik olarak sunulur: Biri genlik-frekans grafiği, diğeri ise faz-frekans grafiği. Korozyon hücrelerinin impedans spektrumunu analiz ederek, korozyon hızının belirlenmesi ve korozyon kontrol stratejilerinin geliştirilmesine yardımcı olur (Mansfeld, 2005).



Şekil 3.3. 1 M HCl çözeltisi (●) içinde bulunan YÇ elektrotun açık devre potansiyelinde elde edilen Bode diyagramı

Şekil 3.3.'de yer alan Bode diyagramı frekansın bir fonksiyonu olarak impedans büyüklüğünü ve faz açısını gösterir. Şekilde iki ayrı eksen kullanılmaktadır: Soldaki logaritmik eksen impedans büyüklüğünü (ohm cinsinden), sağdaki eksen ise faz açısını (derece cinsinden) temsil eder.

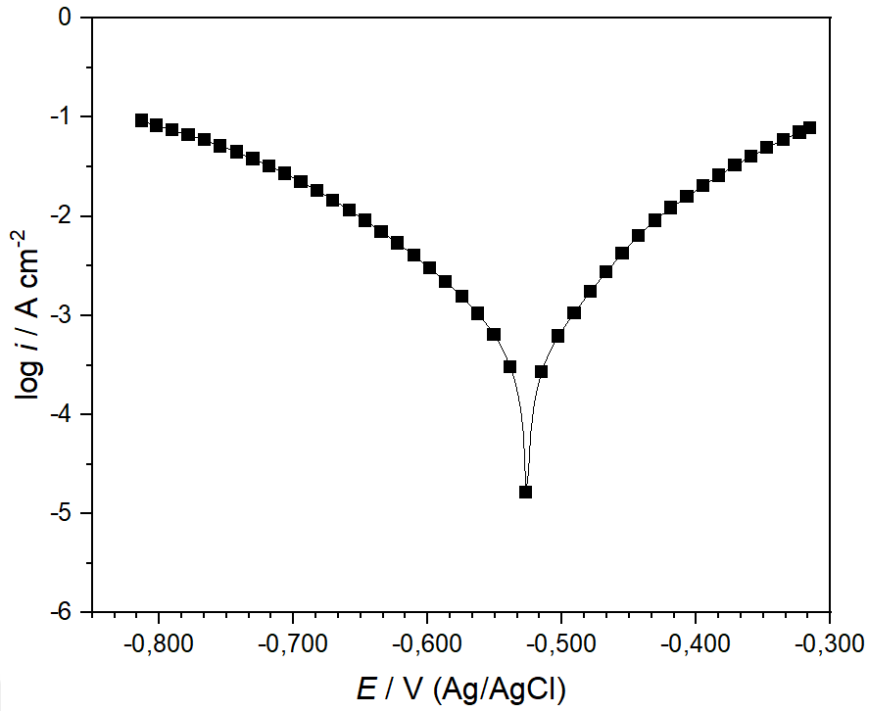
İmpedans büyüklüğü açısından Şekil 3.3.'e bakarsak düşük frekanslarda impedansın yüksek olduğu görülmektedir. Bu, sistemin genel direncinin yüksek olduğunu ve reaksiyonların kinetik olarak sınırlı olabileceğini gösterir. Orta frekans aralığında impedans değeri düşmektedir ve bu durum genellikle çift katman kapasitansı ile

ilişkilendirilir. Yüksek frekanslarda impedans sabit bir değere yaklaşmaktadır, bu da elektrolit direncini gösterir (Macdonald, 2006).

Faz açısının yüksek frekanslarda sıfıra yakın olması, saf dirençli bir davranışı işaret ederken; düşük frekanslarda faz açısının artması kapasitif bir davranışı gösterir. Orta frekanslarda faz açısının maksimuma ulaştığı bir pik görülmektedir. Bu pik, sistemdeki geçiş reaksiyonlarının ve kapasitif davranışın bir göstergesidir (Mansfeld, 2005).

Tafel eğrileri, elektrokimyasal korozyon süreçlerini analiz etmek için kullanılan grafiklerdir. Bu eğriler, bir metalin anot veya katot olarak davrandığı durumlarda akım yoğunluğunun (logaritmik olarak) elektrot potansiyeline karşı nasıl değiştiğini gösterir. Tafel eğrileri, genellikle polarizasyon eğrilerinin logaritmik olarak çizilmesiyle elde edilir ve böylece, anodik ve katodik reaksiyonların kinetik parametrelerinin belirlenmesine olanak tanır (Bard et al., 2001).

Korozyon hızının belirlenmesinde Tafel eğrileri önemli bir rol oynar. Anodik ve katodik Tafel bölgeleri, metal yüzeyinde gerçekleşen oksidasyon ve redüksiyon reaksiyonlarının karakteristiğini verir. Bu eğrilerden elde edilen Tafel eğimleri (β), korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akımı yoğunluğu (i_{corr}) gibi önemli parametrelerin hesaplanmasında kullanılır (Jones, 1996).



Şekil 3.4. 25°C sıcaklıkta bulunan 1 M HCl çözeltisi (■) içerisindeki YÇ'den elde edilen E-I eğrisi

Şekil 3.4.'de, yumuşak çeliğin 1 M HCl içindeki korozyon davranışını göstermektedir. Grafikte potansiyel (E, V) eksenini yatayda, logaritmik akım yoğunluğu ($\log i$, A/cm²) eksenini ise dikeyde gösterilmektedir.

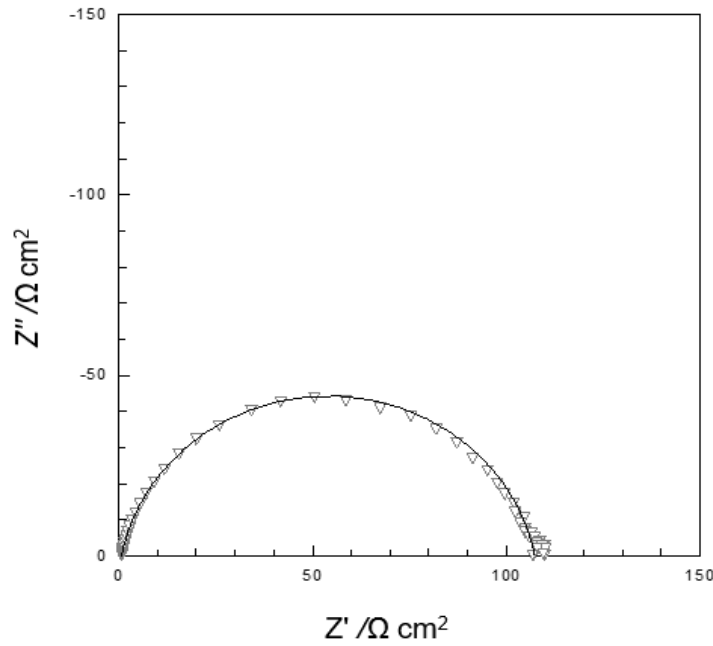
Anodik Bölge: Sağ kol, anodik reaksiyonları temsil eder ve metalin oksidasyonunu gösterir. Bu bölgede metalin yüzeyinde çözünme reaksiyonları gerçekleşir. Grafikte görülen sağ kolun eğimi, anodik Tafel eğimi (β_a) olarak adlandırılır. Bu bölge, metalin korozif ortamda nasıl çözündüğünü ve hangi hızla oksitlendiğini gösterir. Grafiğin sağ tarafında, potansiyelin daha pozitif değerlere kaymasıyla akım yoğunluğunun artışı gözlemlenir. Bu bölgedeki eğim, metal yüzeyinde gerçekleşen anodik oksidasyon reaksiyonlarının kinetiğini yansıtır. Anodik Tafel eğimi (β_a), metalin korozyona uğrama eğilimini ve hızını anlamamıza yardımcı olur (Macdonald, 2006).

Katodik Bölge: Sol kol, katodik reaksiyonları temsil eder ve iyonların veya türlerin redüksiyonunu gösterir. Bu bölgede, çözelti içerisindeki hidrojen iyonlarının (H⁺) indirgenmesi gibi katodik reaksiyonlar gerçekleşir. Grafikteki sol kolun eğimi, katodik Tafel eğimi (β_c) olarak adlandırılır. Bu bölge, korozif ortamda gerçekleşen redüksiyon reaksiyonlarının hızını belirler. Grafiğin sol tarafında, potansiyelin daha negatif değerlere kaymasıyla akım yoğunluğunun artışı gözlemlenir. Bu bölgedeki eğim, metal yüzeyinde

gerçekleşen katodik redüksiyon reaksiyonlarının kinetiğini yansıtır. Katodik Tafel eğimi (β_c), korozyon ürünlerinin indirgenme hızını ve bu reaksiyonların korozyon sürecindeki rolünü anlamamıza yardımcı olur (Mansfeld, 2005).

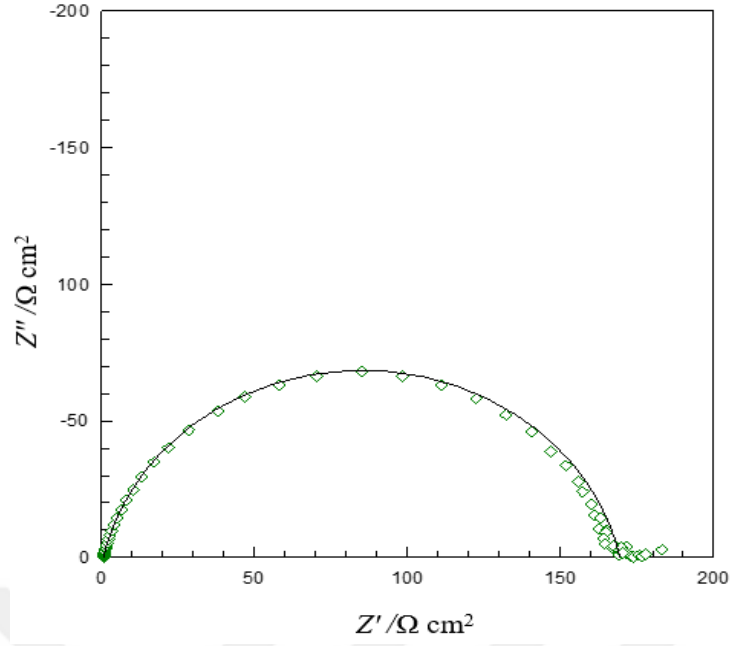
Tafel eğrisinde, anodik ve katodik eğrilerin kesişim noktası, korozyon potansiyelini (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunluğunu (i_{corr}) belirler. Bu parametreler, metalin korozyon direncini ve korozyon hızını hesaplamak için kritik öneme sahiptir. Elde edilen Şekil 3.4.'de yumuşak çeliğin 1 M HCl içindeki korozyon davranışını detaylı bir şekilde analiz etmeye ve uygun koruyucu önlemler geliştirmeye olanak tanır. Grafikten elde edilen korozyon potansiyeli, akım yoğunluğu, eğim gibi sonuçlar sonraki bölümlerde diğer Tafel eğrileri parametreleri ile karşılaştırılmalı olarak ele alınacaktır.

3.1.3. 1 M HCl + KE'nin farklı derişimlerinin bulunduğu ortamlarda yumuşak çeliğin elektrokimyasal davranışı



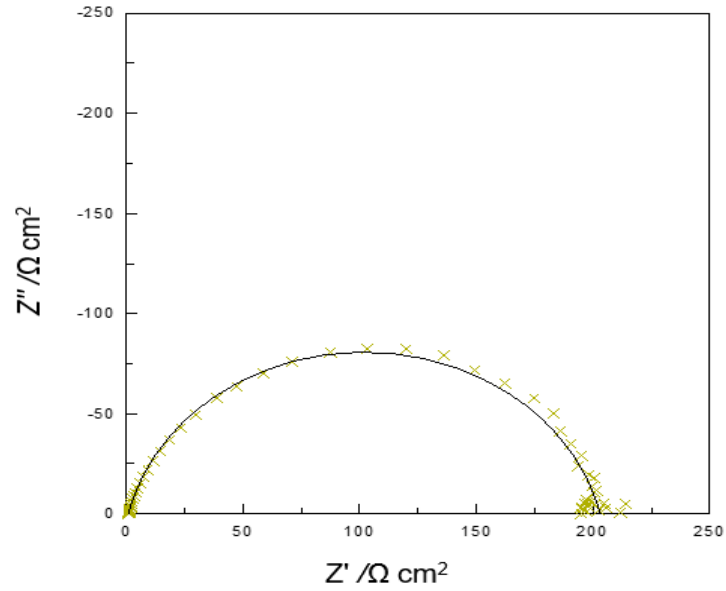
Şekil 3.5. 25°C sıcaklıkta bulunan 1 M HCl + 100 ppm KE özütü içeren çözeltiden (Δ) elde edilen Nyquist diyagramı

100 ppm KE içeren çözeltinin, Nyquist diyagramına (Şekil 3.5.) baktığımızda küçük bir yarım daire gözlemlenmektedir. R_p sonucu 105 $\Omega \text{ cm}^2$ hesaplanmıştır. Bu, inhibitörün korozyon reaksiyonlarını inhibe ettiğini ve metal yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturduğunu gösterir.



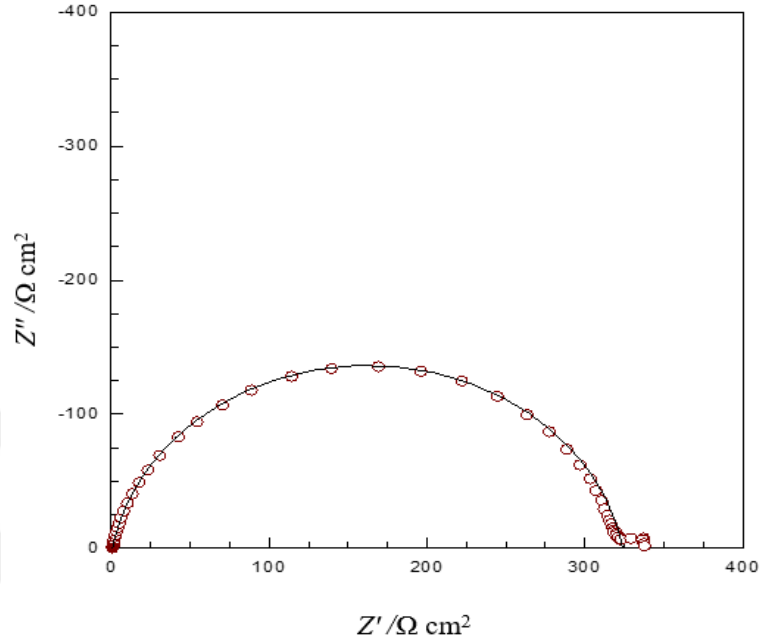
Şekil 3.6. 25°C Sıcaklıkta bulunan 1 M HCl + 250 ppm KE özütü içeren çözeltiden (◇) elde edilen Nyquist diyagramı

Bu konsantrasyonda (Şekil 3.6.), basık yarım dairenin boyutu artmaktadır. R_p sonucu $166 \Omega \text{ cm}^2$ hesaplanmıştır. Bu, inhibitörün etkinliğinin arttığını ve korozyon hızını daha da düşürdüğünü gösterir.



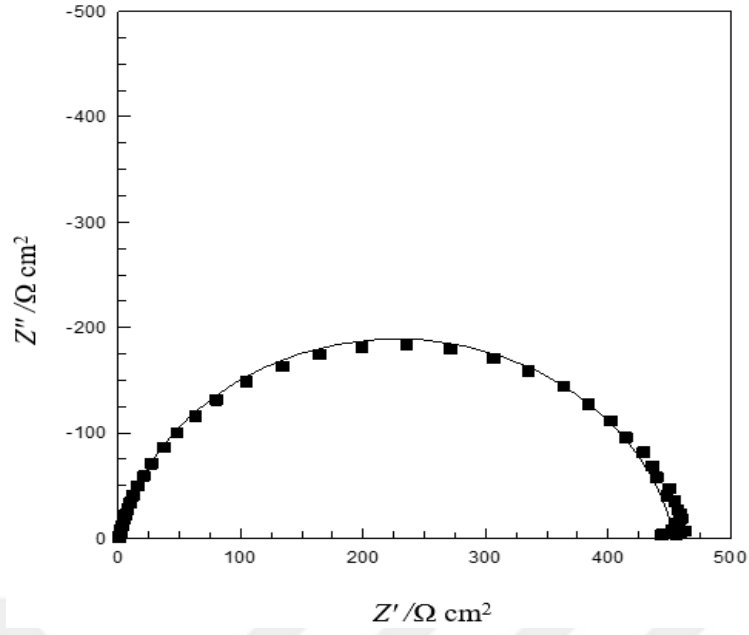
Şekil 3.7. 25°C sıcaklıkta bulunan 1 M HCl + 500 ppm KE özütü içeren çözeltiden (x) elde edilen Nyquist diyagramı

Bu konsantrasyonda (Şekil 3.7.), basık yarım dairenin boyutu daha da artmaktadır. R_p $200 \Omega \text{ cm}^2$ hesaplanmıştır. Bu, inhibitörün metal yüzeyinde daha etkili bir koruyucu tabaka oluşturduğunu ve korozyon hızını önemli ölçüde düşürdüğünü gösterir.



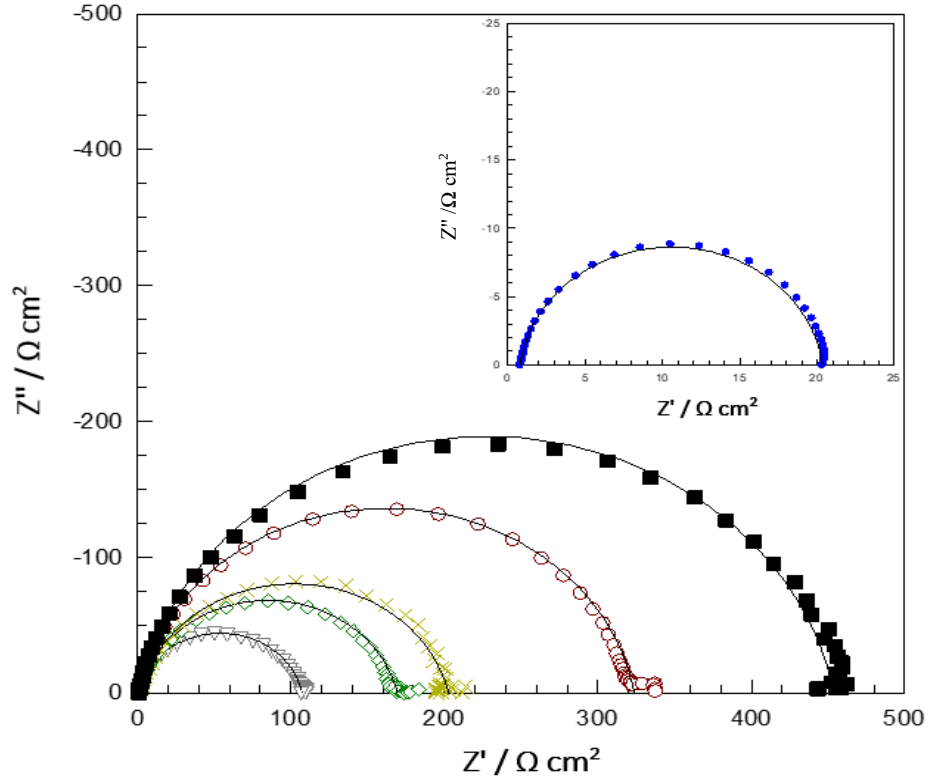
Şekil 3. 8. 25°C sıcaklıkta bulunan 1 M HCl + 750 ppm KE özütü içeren çözeltiden (○) elde edilen Nyquist diyagramı

750 ppm KE içeren çözeltinin Nyquist diyagramında (Şekil 3.8.), basık yarım dairenin boyutu şu ana kadar oluşan en büyük seviyeye ulaştığı görülmektedir. Bu, inhibitörün en yüksek etkinliğe ulaştığını ve bunun sonucu olarak korozyon hızını maksimum düzeyde düşürdüğünü gösterir.



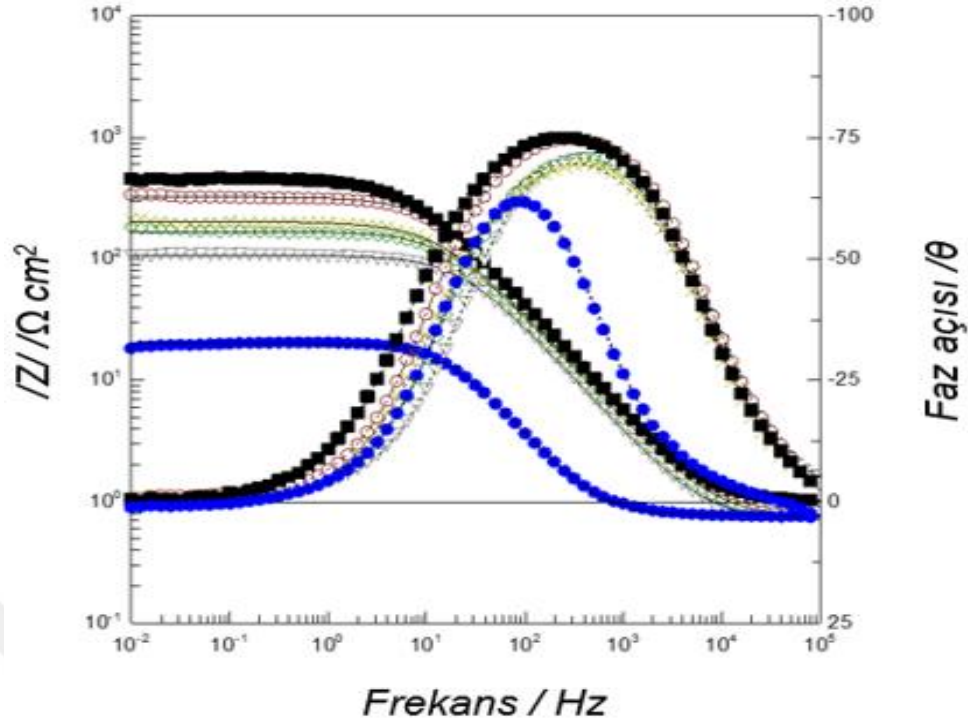
Şekil 3.9. 25°C sıcaklıkta bulunan 1 M HCl + 1000 ppm KE özütü içeren çözeltiden (■) elde edilen Nyquist diyagramı

1000 ppm KE içeren çözeltinin Nyquist diyagramında (Şekil 3. 9.), yarım dairenin boyutu yine büyük seviyede kaldığı, hatta 750 ppm konsantrasyonuna kıyasla etkinlikte daha büyük bir direncin oluştuğunu gösterir.



Şekil 3.10. 25°C sıcaklıkta bulunan 1 M HCl (●) ve 1 M HCl + 100 ppm (Δ), 250 ppm (◇), 500 ppm(x), 750 ppm (○), 1000 ppm (■) farklı derişim değerlerinde KE özütü içeren çözeltilerden elde edilen Nyquist diyagramları

Elde edilen veriler değerlendirildiğinde (Şekil 3.10.) genel olarak, KE özütünün farklı konsantrasyonlarının metal yüzeylerdeki korozyon potansiyelini etkili bir şekilde düşürdüğü ve bunun sonucu olarak korozyon hızını azalttığı söylenebilir. Nyquist diyagramları, inhibitörün konsantrasyonuna bağlı olarak korozyon reaksiyonlarını nasıl etkilediğini açıkça göstermektedir. Yüksek konsantrasyonlarda KE kullanıldığında, korozyon potansiyeli daha negatif değerlere kaymakta ve akım yoğunlukları azalmaktadır (Tablo 3.2.). Bu, inhibitörün metal yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturduğunu ve korozyon hızını düşürdüğünü göstermektedir (Bard et al., 2001; Jones, 1996).



Şekil 3.11. 25°C sıcaklıkta bulunan 1 M HCl (●) ve 1 M HCl + 100 ppm (Δ), 250 ppm (◇), 500 ppm(x), 750 ppm (○), 1000 ppm (■) farklı derişimlerde KE içeren çözeltilerden elde edilen Bode diyagramları

Bode diyagramları, korozyon inhibitörlerinin etkinliğini değerlendirmek için kullanılan önemli araçlardan olup yukarıda verilen şekilde (Şekil 3.11.) ise 1 M HCl + KE özütünün farklı konsantrasyonlarının (1000 ppm, 750 ppm, 500 ppm, 250 ppm ve 100 ppm) ve sadece 1 M HCl içeren çözeltinin korozyon üzerindeki etkileri karşılaştırılmaktadır. Konsantrasyonları genel olarak gruplandırarak yorumlarsak; yüksek konsantrasyonda (1000 ppm KE) en yüksek impedans sonucuna sahip olduğunu söyleyebiliriz. Bu, yüksek konsantrasyonun korozyon inhibitörü olarak daha etkili olduğu sonucunu ortaya çıkarır.

Orta düzey denilebilecek (750 ppm, 500 ppm ve 250 ppm KE) konsantrasyonlarda, impedans değerlerinde kademeli bir azalma olduğu söylenebilir. İnhibitör konsantrasyonunun azalmasıyla birlikte koruma etkinliğinin de azaldığını açıkça ortadadır. Düşük konsantrasyon (100 ppm KE) ve inhibitörsüz grafiklerine baktığımızda ise impedansların en düşük değerleri ile karşılaşılmaktadır. Bu, inhibitör kullanılmadığında veya az konsantrasyon değerinde korozyon hızının diğer sonuçlara göre çok daha yüksek olduğunu sonucunu ortaya çıkarır.

3.1.4. Potansiyodinamik polarizasyon eğrileri ve elektrokimyasal impedans spektroskopisi ölçümleri sonuçları ve değerlendirmeleri

Tablo 3.1. 25 °C sıcaklıkta 1 M HCl ve 1 M HCl + farklı konsantrasyonlarda eklenen KE çözelti ortamlarına ait polarizasyon dirençleri (R_p) Lineer Polarizasyon Dirençleri (LPR) (R_p^*) ve yüzde etkinlik (%İE) değerleri

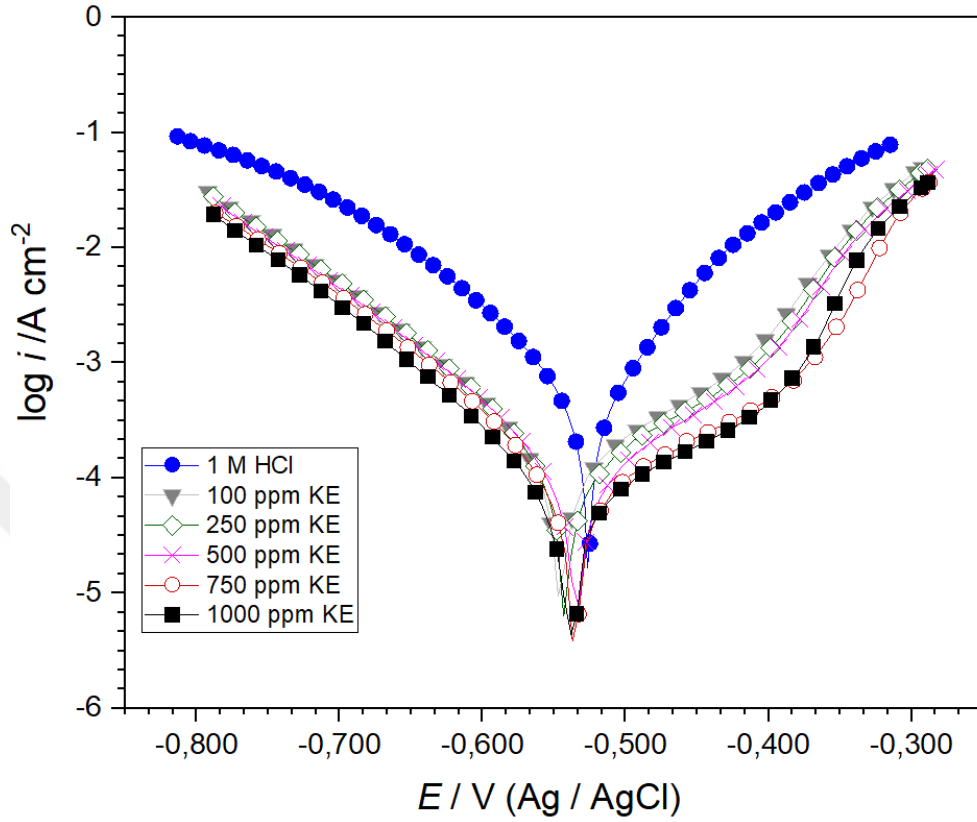
C_{inh} (ppm)	EİS				LPR		
	R_p ($\Omega \text{ cm}^2$)	CPE_{dl} $Y_0(x10^{-6} \text{ s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2})$	n	İE(%)	C_{dl} ($x10^{-6} \text{ s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$)	R_p^* ($\Omega \text{ cm}^2$)	İE(%)
0	18,4	675	0,94	-	518,1	17	
100	105	115	0,88	82,5	64,3	118	85,6
250	166	108	0,88	89,0	62,9	163	89,6
500	200	94	0,88	90,8	56,0	207	91,8
750	324	92	0,87	94,3	54,4	320	94,7
1000	457	85	0,87	96,0	52,7	467	96,4

Tablo 3.1.'deki veriler, KE özütünün farklı konsantrasyonlarının çelik üzerindeki korozyon direncine etkilerinin sayısal değerlerini ifade etmektedir. Tablodaki EİS sonuçları, polarizasyon direnci R_p , kapasitif impedans CPE_{dl} ve çift katman kapasitansı C_{dl} değerlerini göstermektedir. İnhibitörsüz HCl ortamı için R_p değeri 18,4 $\Omega \text{ cm}^2$ iken, 100 ppm KE özütü ile bu değer 105 $\Omega \text{ cm}^2$ 'ye yükselmiştir. KE konsantrasyonu arttıkça, R_p değeri de belirgin bir şekilde artarak, 1000 ppm için 457 $\Omega \text{ cm}^2$ 'ye ulaşmıştır. Bu artış, KE özütünün çelik yüzeyinde korozyon direncini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.

CPE_{dl} ve C_{dl} değerleri de konsantrasyonun artmasıyla birlikte değişmektedir. İnhibitörsüz HCl ortamı için CPE_{dl} değeri $675 \times 10^{-6} \text{ s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$ iken, 100 ppm KE özütü ile bu değer $115 \times 10^{-6} \text{ s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 'ye düşmüştür. Benzer şekilde, C_{dl} değeri de inhibitörsüz ortamda $518,1 \times 10^{-6} \text{ s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$ iken, 100 ppm ile $64,3 \times 10^{-6} \text{ s}^n \Omega^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 'ye inmiştir. Bu düşüşler, KE özütünün çelik yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturarak, çift katman kapasitansını azalttığını ve dolayısıyla korozyon sürecini yavaşlattığını göstermektedir.

Doğrusal polarizasyon direnci (LPR) sonuçları da benzer şekilde değerlendirilebilir. İnhibitörsüz numune için R_p^* değeri 17 $\Omega \text{ cm}^2$ iken, 100 ppm KE özütü ile bu değer 118 $\Omega \text{ cm}^2$ 'ye çıkmıştır. KE konsantrasyonu arttıkça, R_p^* değeri de artarak,

1000 ppm için $467 \Omega \text{ cm}^2$ 'ye ulaşmıştır. Bu sonuç, KE özütünün korozyon inhibitörü olarak etkinliğini bir kez daha doğrulamaktadır.



Şekil 3.12. 25°C sıcaklıkta bulunan 1 M HCl (●) ve 1 M HCl + 100 ppm (▼), 250 ppm (◇), 500 ppm (×), 750 ppm (○), 1000 ppm (■) KE içeren çözeltilerden elde edilen E-I eğrileri

Tafel eğrisi, elektrokimyasal reaksiyon hızını belirlemek için kullanılan bir grafikdir ve akım yoğunluğunun ($\log(i)$) elektrot potansiyeline (E) karşı logaritmik olarak çizilmesiyle elde edilir. Grafikte, farklı konsantrasyonlardaki KE çözeltilerinin (100 ppm, 250 ppm, 500 ppm, 750 ppm ve 1000 ppm KE) ve kontrol grubunun (1 M HCl) eğrileri gösterilmektedir.

Deney sonuçları, KE özütünün farklı konsantrasyonlarının metal yüzeylerdeki korozyon potansiyelini değiştirdiğini göstermektedir. Her bir konsantrasyon için elde edilen Tafel eğrileri, inhibitörün korozyon reaksiyonlarını nasıl etkilediğini anlamak için kullanılır.

Sonuçları (Tablo 3.12.) ayrı ayrı değerlendirecek olursak; 100 ppm KE: Bu konsantrasyonda, Tafel eğrisi kontrol grubuna göre daha düşük akım yoğunlukları

göstermektedir. Bu, inhibitörün korozyon reaksiyonlarını inhibe ettiğini ve metal yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturduğunu gösterir (Jones, 1996).

250 ppm KE: Bu konsantrasyonda, Tafel eğrisi daha da düşük akım yoğunlukları göstermektedir. Bu, inhibitörün etkinliğinin arttığını ve korozyon hızını düşürdüğünü gösterir (Bard et al., 2001).

500 ppm KE: Bu konsantrasyonda, Tafel eğrisi daha düşük akım yoğunlukları ve daha negatif potansiyeller göstermektedir. Bu, inhibitörün metal yüzeyinde daha etkili bir koruyucu tabaka oluşturduğunu ve korozyon hızını önemli ölçüde düşürdüğünü gösterir (Jones, 1996).

750 ppm KE: Bu konsantrasyonda, Tafel eğrisi daha düşük akım yoğunluklarını ve daha negatif potansiyelleri göstermektedir. Bu, inhibitörün en yüksek etkinliğe ulaştığını ve korozyon hızını düşürdüğünü gösterir (Bard et al., 2001).

1000 ppm KE: Bu konsantrasyonda, Tafel eğrisi yine düşük akım yoğunlukları ve negatif potansiyeller göstermektedir. 750 ppm konsantrasyonuna kıyasla daha etkin bir korumanın olduğu sonucuna varılabilir.

Tablo 3. 2. 25 °C sıcaklıkta 1 M HCl ve 1 M HCl + farklı konsantrasyonlarda eklenen ke özütlerin içeren çözelti ortamlarına ait Potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler

C_{inh} (ppm)	E_{corr} (mV, Ag/AgCl)	i_{corr} (mA cm ⁻²)	β_c (mV dec ⁻¹)	CR (mpy)	n (%)
0	-527	0,576	100,8	263,2	-
100	-547	0,1452	97,92	66,37	74,8
250	-543	0,1312	97,18	59,93	77,2
500	-533	0,0971	98,82	44,39	83,1
750	-537	0,0861	96,40	39,34	85,1
1000	-538	0,0583	91,02	26,65	89,8

Tablo 3.2.'nin ilk satırı inhibitör içermeyen kontrol ölçümünü temsil eder. Diğer satırlar, 1 M HCl üzerine eklenmiş ayrı ayrı 100 ppm, 250 ppm, 500 ppm, 750 ppm ve 1000 ppm konsantrasyonlarında KE çözeltileri ile yapılan ölçümleri göstermektedir. Tablo bize, farklı konsantrasyonlardaki inhibitör çözeltilerinin zaman içinde korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}), korozyon potansiyeli (E_{corr}), katodik Tafel eğimi (β_c), korozyon hızı (CR) ve inhibitör verimliliği (n (%)) üzerindeki etkilerini göstermektedir.

Deney sonuçları, inhibitör konsantrasyonunun artmasıyla korozyon potansiyelinin (E_{corr}) daha negatif değerlere kaydığını göstermektedir. Bu, inhibitörün metal yüzeyinde daha koruyucu bir tabaka oluşturduğunu ve korozyon potansiyelini düşürdüğünü gösterir (Jones, 1996). Örneğin, 500 ppm konsantrasyonunda E_{corr} değeri -533 mV iken, 1000 ppm konsantrasyonunda bu değer -538 mV olarak ölçülmüştür.

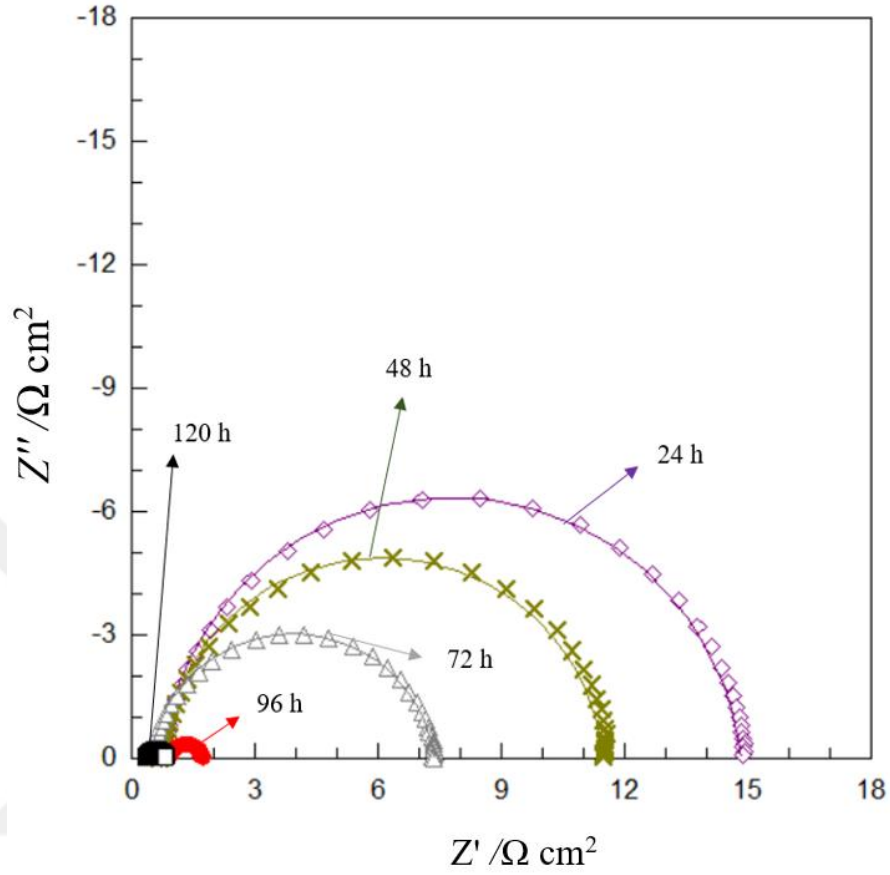
Korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) değerleri de inhibitör konsantrasyonunun artmasıyla azalmaktadır. Bu, inhibitörün korozyon reaksiyonlarını etkili bir şekilde inhibe ettiğini ve metal yüzeyindeki korozyon hızını düşürdüğünü gösterir (Bard et al., 2001). Örneğin, 100 ppm konsantrasyonunda i_{corr} değeri 0,1452 mA cm⁻² iken, 1000 ppm konsantrasyonunda bu değer 0,0583 mA cm⁻² olarak ölçülmüştür.

Katodik Tafel eğimi (β_c) değerleri, inhibitör konsantrasyonuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu değerler, korozyon reaksiyonlarının kinetik özelliklerini anlamak için önemlidir. Örneğin, 100 ppm konsantrasyonunda β_c değeri 97,92 mV dec⁻¹ iken, 1000 ppm konsantrasyonunda bu değer 91,02 mV dec⁻¹ olarak ölçülmüştür.

Korozyon hızı (CR) değerleri de inhibitör konsantrasyonunun artmasıyla azalmaktadır. Bu, inhibitörün metal yüzeyindeki korozyon hızını etkili bir şekilde düşürdüğünü gösterir (Jones, 1996). Örneğin, 100 ppm konsantrasyonunda CR değeri 66,37 mpy iken, 1000 ppm konsantrasyonunda bu değer 26,65 mpy olarak ölçülmüştür.

İnhibitör verimliliği (n%) değerleri, inhibitör konsantrasyonunun artmasıyla artmaktadır. Bu, inhibitörün korozyon önleyici etkinliğinin konsantrasyonla birlikte arttığını gösterir (Bard et al., 2001). Örneğin, 100 ppm konsantrasyonunda (n%) değeri %74,8 iken, 1000 ppm konsantrasyonunda bu değer %89,8 olarak ölçülmüştür.

3.2. 1 M HCl ve 1 M HCl + 1000 ppm KE Çözeltileri İçerisinde Bulunan YÇ'nin Zamanla Elde Edilen Nyquist ve Tafel Eğrilerinin Değerlendirilmesi



Şekil 3.13. 1 M HCl çözeltisinde zamana bağlı olarak oluşan YÇ'den elde edilen Nyquist diyagramları, 24.saat (◇), 48.saat(×), 72.saat(△), 96.saat (●), 120.saat(■)

Bu deney uzun sürede çalışılan inhibitörün nasıl bir koruma etkinliği sağladığını incelemek için yapılmıştır. Şekil 3.13.'de yumuşak çeliğin 1 M HCl çözeltisindeki korozyon davranışını farklı zaman aralıklarında sunmaktadır. Nyquist diyagramında, zamanla birlikte basık yarım dairelerin daraldığı gözlemlenmektedir. Bu, korozyon sürecinin ilerlediğini ve impedansın kademeli olarak azaldığını göstermektedir. Daha uzun süreler, daha küçük yarım daireler ile temsil edilmektedir, bu da korozyon ürünlerinin birikimi ve yüzeydeki değişikliklerin artması anlamına gelir.

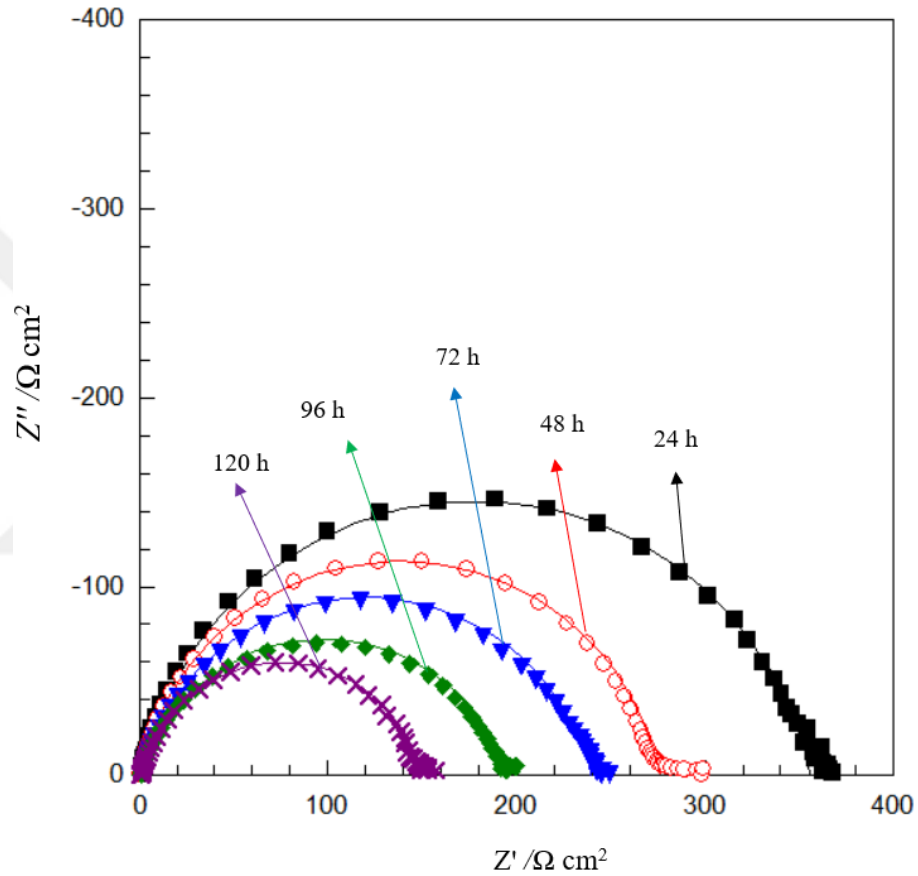
- 24 Saat: Bu süre zarfında, yarım daireler henüz daralmamıştır. YÇ hala korozyona uğramaktadır, ancak etkisi henüz belirgin değildir.

- 48 Saat: Yarım daireler artık daha küçük boyutlara ulaşmıştır. Bu, korozyon sürecinin hızlandığını ve impedansın azaldığını gösterir.

- 72 Saat: Yarım daireler daha da daralmıştır. Korozyon hızı artmıştır ve yüzeyde daha fazla korozyon ürünü birikmiştir.

- 96 Saat: Yarım daireler daha da küçülmüştür. Bu, korozyon sürecinin hızlandığını ve impedansın daha da azaldığını gösterir.

- 120 Saat: Bu süre zarfında yarım daireler en küçük boyutlarına ulaşmıştır. Korozyon hızı maksimum düzeye çıkmıştır ve yüzeyde yoğun bir korozyon tabakası oluşmuştur.



Şekil 3.14. 1 M HCl + 1000 ppm KE içeren çözeltide YÇ'den elde edilip zamana bağlı olarak oluşan Nyquist diyagramları, 24.saat (■), 48.saat (○), 72.saat (◄), 96.saat (◆), 120.saat (×)

Bu grafikte, 1 M HCl + 1000 ppm KE özütü içeren çözeltinin zamana bağlı olarak YÇ üzerindeki korozyon inhibisyonu gösterilmektedir. Nyquist diyagramında, her bir konsantrasyon için basık yarım dairelerin boyutları ve şekilleri görülmektedir. Şimdi hem inhibitörsüz hem de KE içeren çözeltinin EİS ve LPR veri değerleri sonuçlarını Tablo 3.3. verilerine bakılarak değerlendirme yapılırsa;

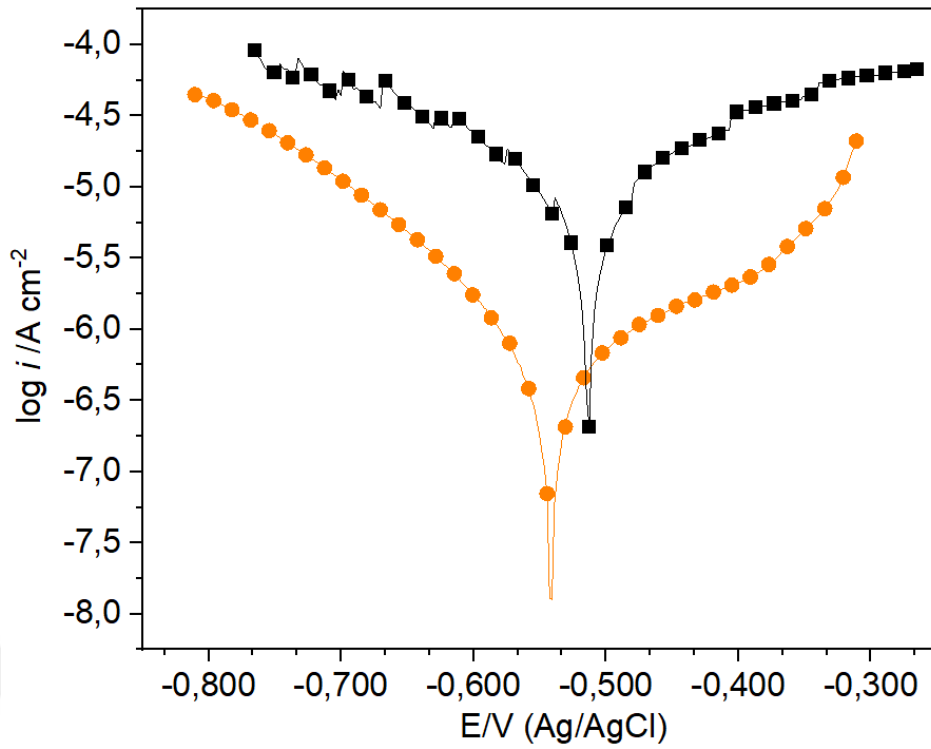
Tablo 3.3. Zamana bağılı elde edilen EİS, LPR ve %n sonuçları

t (saat)	1 M HCl İçeren Çözelti		1 M HCl + 1000 ppm KE İçeren Çözelti			
	EİS R_p (Ω cm^2)	LPR R_p^* ($\Omega \text{ cm}^2$)	EİS R_p ($\Omega \text{ cm}^2$)	%n	LPR R_p^* ($\Omega \text{ cm}^2$)	%n
24	14,1	13,9	354	96,0	347	96,0
48	10,8	10,7	275	96,1	271	96,1
72	6,8	6,9	238	97,1	245	97,2
96	0,71	0,82	194	99,6	196	99,6
120	0,6	0,9	148	99,5	151	99,4

Bu verilerde, KE özütünün zamana bağılı olarak metal yüzeylerdeki korozyon üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Tablo 3.3.'de, farklı zaman dilimlerinde (24, 48, 72, 96 ve 120 saat) KE özütünün korozyon davranışı (EİS ve LPR yöntemleri ile ölçülen R_p değerleri) ve inhibitör verimliliği (%n) üzerindeki etkilerini göstermektedir.

Tablonun ilk satırı, 24 saatlik ölçümleri göstermektedir ve bu ölçümler, inhibitörün başlangıçtaki etkilerini değerlendirmek için kullanılır. Diğer satırlar, 48, 72, 96 ve 120 saatlik ölçümleri göstermektedir.

Deney sonuçları, KE özütünün zamanla metal yüzeyindeki korozyon davranışını nasıl etkilediğini göstermektedir. Örneğin, 24 saatlik ölçümlerde EİS yöntemi ile ölçülen R_p değeri $354 \Omega \text{ cm}^2$ iken, 120 saatlik ölçümlerde bu değer $148 \Omega \text{ cm}^2$ 'ye düşmüş olup inhibitör etkinliği hala yüksek değerde kalmıştır. İnhibisyon etkinliği tüm zamanlarda %96 üstünde seyretmiştir. 120 saate gidildiğinde inhibisyon etkinliğinin %99,5 olması inhibitörün zamanla daha etkili hale geldiğini ve metal yüzeyinde koruyucu bir tabakanın var olduğunu göstermektedir (Jones, 1996).



Şekil 3.15. 120 saat sonunda 1 M HCl (■) ve 1 M HCl + 1000 ppm KE (●) içeren çözeltilerden elde edilen E-I eğrileri

Yukarıda Şekil 3.15.'de verilen Tafel eğrileri KE inhibitörünün zaman geçse de korozyonu önlediği açıkça görülmektedir. Grafiklerden elde edilen parametreler Tablo 3.4.'de verilmiştir.

Tablo 3.4. 120 saat sonunda 1 M HCl ve 1 M HCl + 1000 ppm KE çözeltilerindeki Potansiyodinamik polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal parametreler

C_{inh} (ppm)	E_{corr} (mV, Ag/AgCl)	i_{corr} (mA cm ⁻²)	β_c (mV dec ⁻¹)	CR (mpy)	n (%)
0	-512,7	11,27	286,5	5151	-
1000	-540,8	0,618	100,5	282,6	94,5

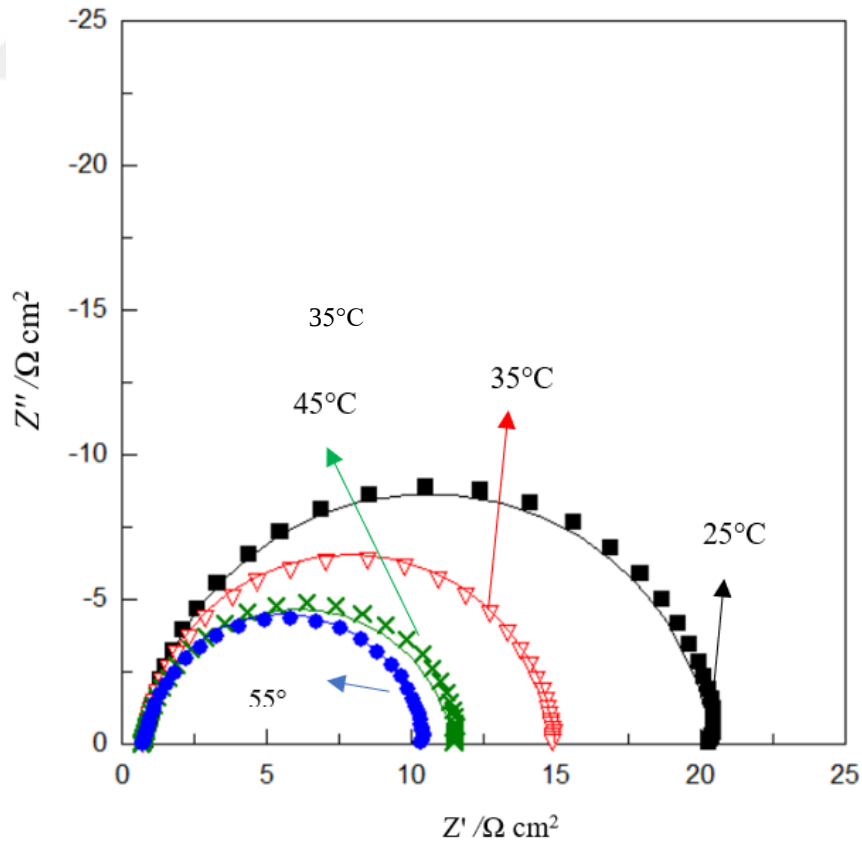
Tablo 3.4.'de, korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}) değerleri de inhibitörün zamanla inhibitörsüz ortama göre daha etkili halde kaldığını göstermektedir. Örneğin, 120 saatlik ölçümlerde inhibitörsüz ortamda ki i_{corr} değeri 11,27 mA cm⁻² iken, inhibitörlü ortamda 0.618 mA cm⁻²'ye düşmüştür. Bu, inhibitörün korozyon reaksiyonlarını etkili bir şekilde inhibe ettiğini ve metal yüzeyindeki korozyon hızını zamanla düşürdüğünü göstermektedir (Bard et al., 2001).

Katodik Tafel eğimi (β_c) değerleri, inhibitörün zamanla inhibitörsüz ortama göre daha düştüğünü göstermektedir. Örneğin, inhibitörsüz ölçümde β_c değeri $286,2 \text{ mV dec}^{-1}$ iken, inhibitörlü ölçümde bu değer $100,5 \text{ mV dec}^{-1}$ 'ye düşmüştür. Bu, inhibitörün korozyon reaksiyonlarının kinetik özelliklerini etkilediğini göstermektedir (Jones, 1996).

Korozyon hızı (CR) değerleri de inhibitörün zamanla inhibitörsüz ortama göre daha etkili halde kaldığını göstermektedir. Örneğin, 120 saatlik inhibitörsüz ölçümde CR değeri 5151 mpy iken, inhibitörlü ölçümde bu değer sadece 282,6 mpy olmuştur. Bu, inhibitörün metal yüzeyindeki korozyon hızını etkili bir şekilde düşürdüğünü göstermektedir (Jones, 1996).

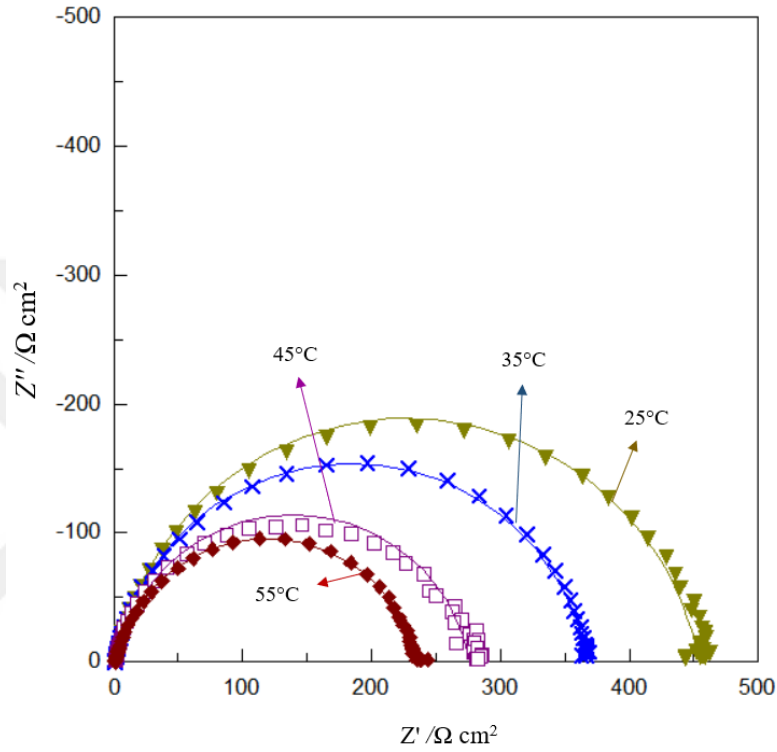
İnhibitör verimliliği (%n) değerleri, inhibitörün zamanla daha etkili halde kalabildiğini göstermektedir. 120 saatin sonunda %94,5 sonucu, inhibitörün korozyon önleyici etkinliğinin zamanla hemen hemen değişmediğini göstermektedir (Bard et al., 2001).

3.3. Sıcaklık Deneyleri



Şekil 3.16. 1 M HCl çözeltisi içerisinde bulunan YÇ'nin farklı sıcaklık ortamları olarak 25°C (■), 35°C (▽), 45°C (x), 55°C (●)'den elde edilen Nyquist diyagramları

Şekil 3.16.'da 25°C ile 55°C arasındaki sıcaklıklarda 1 M HCl çözeltisi içinde bulunan YÇ'den elde edilen Nyquist verilerini göstermektedir. Şekil incelendiğinde her bir sıcaklık için basık yarım daireler elde edilmiştir. Sıcaklık arttıkça yarı dairelerin çapı küçülmektedir, bu da yük transfer direncinin azaldığını ve korozyon hızının arttığını göstermektedir. Bu durum, daha yüksek sıcaklıklarda çeliğin daha hızlı korozyona uğradığını ifade eder (Jones, 1996).

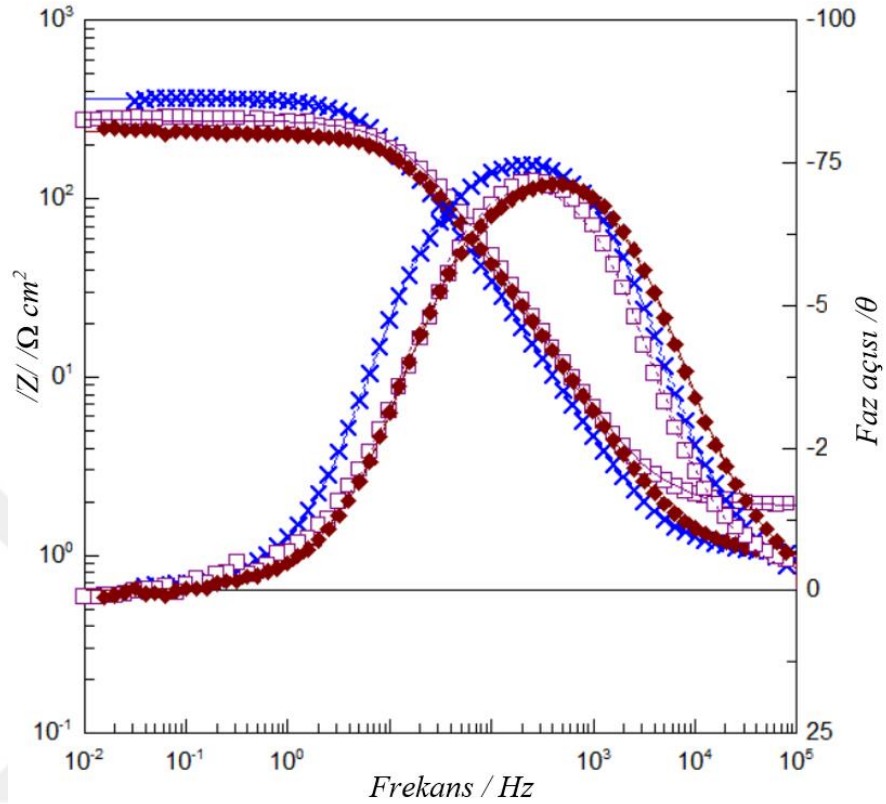


Şekil 3. 17. 1 M HCl +1000 ppm KE içeren çözelti içerisinde bulunan YÇ'nin farklı sıcaklık ortamları olarak 25°C (▼), 35°C (x), 45°C (□), 55°C (◆)'den elde edilen Nyquist diyagramları

Şekil 3.17.'de 1 M HCl+ 1000 ppm KE çözeltisi içinde bulunan YÇ'den elde edilen Nyquist verilerini göstermektedir. Bu çözeltide de deneyler farklı sıcaklık değerlerinde yapılmıştır. Şekil incelendiğinde burada da her bir sıcaklık değeri için birer yarım basık daireler elde edilmiştir. Her bir sıcaklık artışıyla, yarı dairelerin çapı hafifçe azalsa da 1 M HCl çözeltisi ile karşılaştırıldığında çapların çok daha büyük olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, KE özütünün çelik üzerinde önemli bir inhibitör etkisi yaratarak korozyon hızını düşürdüğünü göstermektedir (Shreir, 2000).

KE özütünün kullanıldığı durumda (Şekil 3.17.), yarım dairenin çapı, inhibitörsüz duruma (Şekil 3.16.) kıyasla belirgin şekilde daha fazladır. Bu, inhibitörün çelik yüzeyinde bir koruyucu tabaka oluşturduğunu ve böylece korozyon sürecini

yavaşlattığını gösterir. Sıcaklığın artmasına rağmen, KE, asit çözeltisinde çelik yüzeyinde varlığını korumuş, bu da inhibitörün sıcaklıktan etkilense bile yüksek polarizasyon dirençleri oluşturduğunu göstermektedir (Fontana, 1987).



Şekil 3.18. 1M HCl +1000 ppm KE içeren çözelti içerisinde bulunan YÇ'nin farklı sıcaklık (35°C (x), 45°C (□), 55°C (◆)) ortamlarından elde edilen Bode diyaframı

Şekil 3.18.'de, KE çözeltisinden elde edilen farklı sıcaklıklardaki Bode diyaframlarını temsil etmektedir. Şekilde görüldüğü gibi her sıcaklık için bir zaman sabiti oluşmuştur. Bu da Nyquistte tek basık yarım daireye karşılık gelmektedir. KE çözeltisi ile muamele edilmiş çelik yüzeyi, impedans değerlerinin genel olarak yüksek olduğu görülmektedir. Bu, inhibitörün koruyucu bir tabaka oluşturarak çeliğin korozyona karşı sıcaklık artsa bile direncin artırdığını gösterir. Özellikle düşük frekanslarda impedans değerlerinin yüksek olması, çelik yüzeyinde etkili bir koruyucu tabakanın varlığına işaret eder (Shreir, 2000).

Faz açısı (θ) ile ilgili olarak, KE çözeltisiyle elde edilen faz açı değerleri -74,9 ile -71,3 arasında değişmektedir. Yüksek faz açısı inhibitörün çelik yüzeyinde daha kararlı film tabaka oluşturduğunu ve bu tabakanın frekansa bağımlı olmayan bir özellik sergilediğini gösterir (Jones, 1996).

Tablo 3.5. Farklı sıcaklık ortamlarından elde edilen EİS ve LPR parametreleri

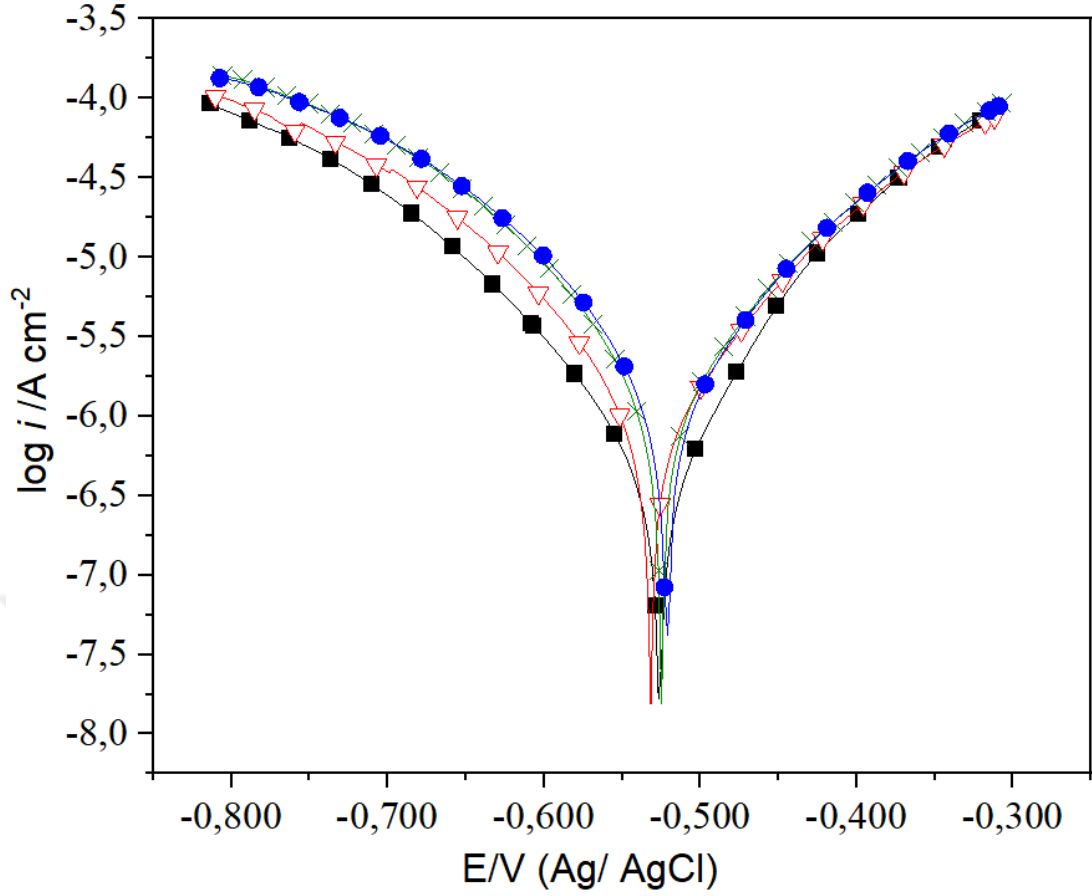
(°C)	1 M HCl İçeren Çözelti		1 M HCl + 1000 ppm KE İçeren Çözelti			
	EİS	LPR	EİS	LPR		
	R_p (Ω cm ²)	R_p^* (Ω cm ²)	R_p (Ω cm ²)	%n	R_p^* (Ω cm ²)	%n
25	18,4	17	457	96,0	467	96,4
35	14,25	16,9	367	96,1	375	95,4
45	10,53	12,6	266	96,0	270	95,3
55	9,5	12,5	231	95,8	251	95,0

Tablo 3.5.'e göre 25°C'de EİS yöntemi ile ölçülen polarizasyon direnci (R_p) 18,4 Ω cm² iken, LPR yöntemi ile 17 Ω cm² olarak hesaplandı. Sıcaklık arttıkça R_p değerlerinde belirgin bir düşüş gözlenmektedir. Örneğin, 55°C'de EİS yöntemiyle elde edilen R_p değeri 9,5 Ω cm²'ye kadar düşmektedir. Bu durum, sıcaklığın artmasıyla birlikte çeliğin korozyona karşı direncinin azaldığını göstermektedir (Popova, 2007).

KE çözeltisi içeren sistemde 25°C'de EİS ile ölçülen R_p değeri 457 Ω cm², LPR ile ölçülen R_p değeri ise 467 Ω cm² olarak belirlenmiştir. Ayrıca, inhibitör etkinliği %n değeri olarak sunulmuştur ve bu değerler 25°C'de %96 civarındadır.

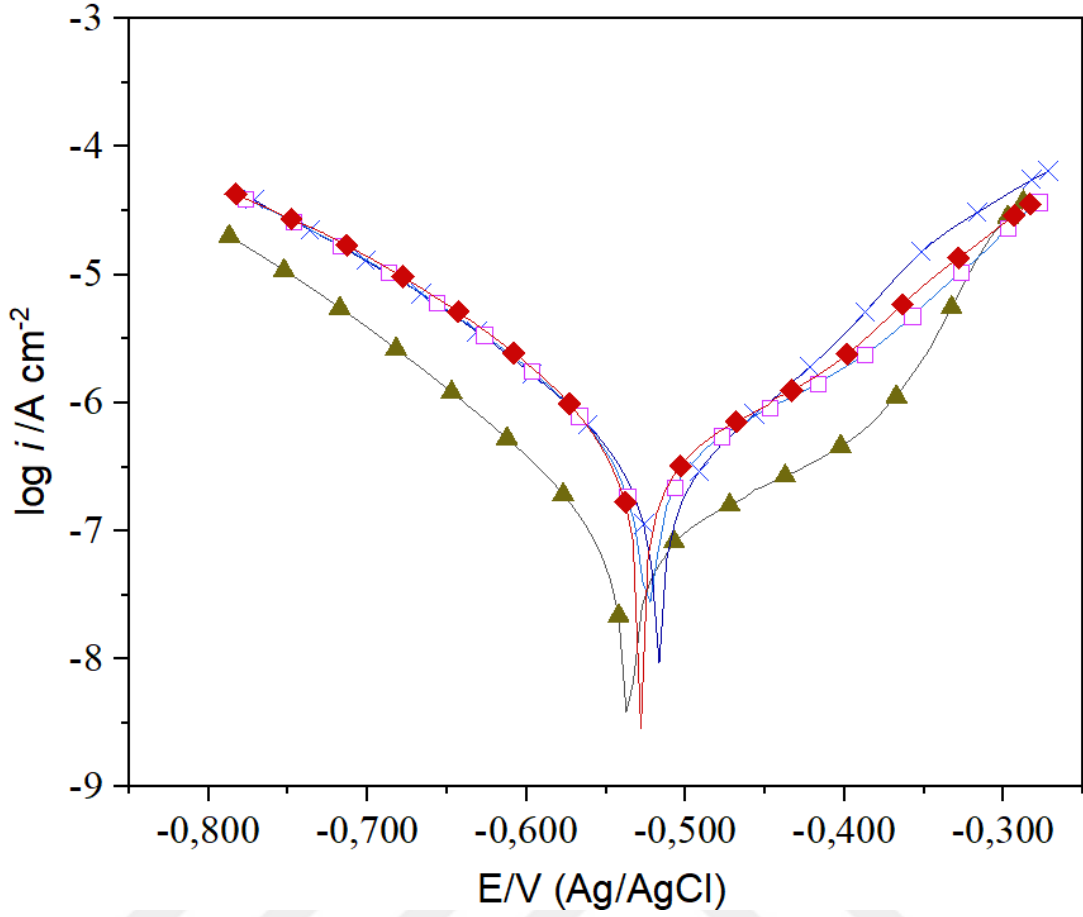
Sıcaklık arttıkça R_p değerlerinde bir azalma olsa da inhibitör etkinlikleri genel olarak yüksek kalmıştır. Örneğin, 55°C'de bile EİS yöntemiyle ölçülen R_p değeri 231 Ω cm², LPR ile ise 251 Ω cm² olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, KE çözeltisinin YÇ üzerinde etkili bir korozyon inhibitörü olduğunu ve sıcaklık artışına rağmen koruyuculuğunu büyük ölçüde koruduğunu göstermektedir (Quraishi, 2010).

KE çözeltisinin 1 M HCl çözeltisine göre çelik üzerinde oldukça yüksek bir koruyucu etkinlik sağladığı görülmektedir. İnhibitör etkinliği %96 dolayında olup, bu da inhibitörün çelik yüzeyinde güçlü bir koruyucu tabaka oluşturduğunu ve bu tabakanın sıcaklık artışıyla bile kısmen kalabildiğini göstermektedir (Fouda, 2005).



Şekil 3.19. 1 M HCl içeren çözeltilerin farklı sıcaklık ortamlarından (25°C (■), 35°C (▼), 45°C (x) ve 55°C (●)) elde edilen E-I eğrileri

Şekil 3.19.'da 1 M HCl içeren çözeltilerin farklı sıcaklık ortamlarından elde edilen Tafel eğrileri verilmiştir. Aşağıda verilen Şekil 3.20.'de ise 1 M HCl + 1000 ppm KE içeren çözeltinin farklı sıcaklık ortamlarından elde edilen Tafel eğrileri verilmiştir.



Şekil 3.20. 1 M HCl +1000 ppm KE içeren çözeltilerin farklı sıcaklık ortamlarından (25°C (▲), 35°C (x), 45°C (□) ve 55°C (♦)) elde edilen E-I eğrileri

Şekil 3.19.'da verilen Tafel eğrileri bize sıcaklık arttıkça korozyonun 1 M HCl ortamında ciddi anlamda arttığını, KE içeren ortamdaki (Şekil 3.20.) ise korozyon akım değerinin özellikle anodik bölgede ciddi anlamda önlendiğini göstermektedir. Burada verilen eğrilerden elde edilen parametreler Tablo 3.6.'da sunulmuştur.

Tablo 3.6. Farklı sıcaklık ortamlarında bulunan 1 M HCl ve 1 M HCl + 1000ppm KE içeren çözeltilerdeki YÇ'den elde edilen korozyon değerleri

C_{inh} (ppm)	Sıcaklık(°C)	E_{corr} (mV, Ag/AgCl)	i_{corr} (mA cm ⁻²)	β_c (mV dec ⁻¹)	CR (mpy)	n (%)
0	25	-527	0,576	108	263,2	-
	35	-532	1,318	111	602	-
	45	-525	1,931	113	882,4	-
	55	-521	2,012	116	919,2	-
1000	25	-538	0,0583	91	26,6	90
	35	-517	0,2877	106	131,4	78
	45	-522	0,365	110	166,8	81
	55	-528	0,4595	112	210	77

Korozyon Potansiyeli (E_{corr}) verilerine bakacak olursak (Tablo 3.6.), 25°C'de inhibitörsüz ortamda -527 mV iken, inhibitör varlığında -538 mV olarak gözlemlenmiştir. 55°C'de ise inhibitörsüz ortamda -521 mV, inhibitör varlığında -528 mV'dir. Bu sonuçlar, inhibitörün korozyon potansiyelini negatif yönde etkilediğini göstermektedir.

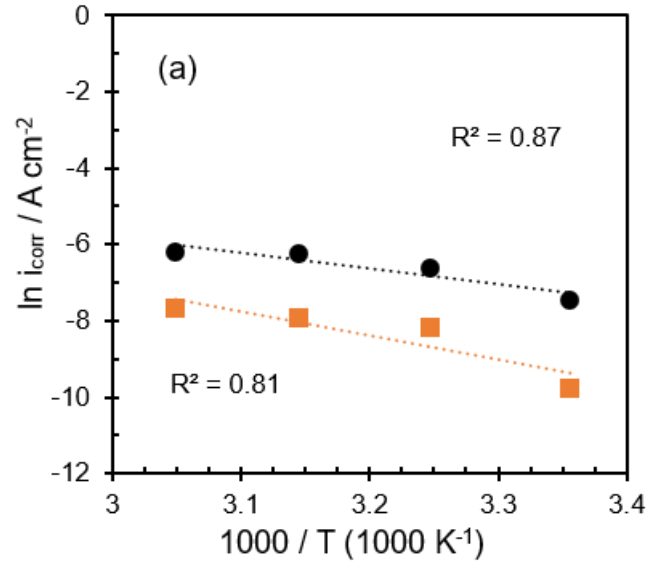
Korozyon Akım Yoğunluğu (i_{corr}) değerleri ise 25°C'de inhibitörsüz ortamda 0,576 mA cm⁻², inhibitör varlığında 0,0583 mA cm⁻² olarak ölçülmüştür. 55°C'de ise inhibitörsüz ortamda 0,2012 mA cm⁻², inhibitör varlığında 0,4595 mA cm⁻²'dir. Bu veriler, farklı sıcaklıkta bulunan inhibitörlü ortamlardan elde edilen i_{corr} değerlerinin, 1 M HCl ortamlarından elde edilen korozyon akım yoğunluklarına göre ciddi anlamda daha düşük düzeylerde kaldığını gösterir. Bu da KE'nin, YÇ yüzeyine adsorbe olarak korozyon olaylarını düşürdüğü sonucu çıkmaktadır.

Korozyon Hızı (CR) ise 25°C'de inhibitörsüz ortamda 263,2 mpy, inhibitör varlığında 26,6 mpy olarak hesaplanmıştır. 55°C'de ise inhibitörsüz ortamda 919,2 mpy, inhibitör varlığında 210 mpy'dir. Bu sonuçlar, inhibitörün korozyon hızını büyük ölçüde düşürdüğünü ortaya koymaktadır.

25°C’de inhibitörün verimliliği %90, 55°C’de ise %77 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, KE’nin sıcaklık artsa da verimliliğini korumaya çalıştığını açıkça ortaya koymaktadır.

Adsorpsiyonun ve inhibisyonun aktivasyonunu anlamak için hem inhibitör hem de inhibitör içermeyen 1 M HCl ortamında aktivasyon enerjileri belirlenmiştir. Bunun için Arrhenius eşitliğinden yararlanılmıştır. Bu eşitlik kullanılarak, $\ln(i_{\text{corr}})$ ’ a karşı $1000/T$ grafiğe geçirilmiş ve bu eşitliğin eğiminden E_a hesaplanmıştır. İlgili eşitlik (Batah et al., 2022) ve grafik aşağıda verilmektedir.

$$\ln(i_{\text{corr}}) = \ln(A) - \frac{E_a}{RT} \quad (3.1)$$



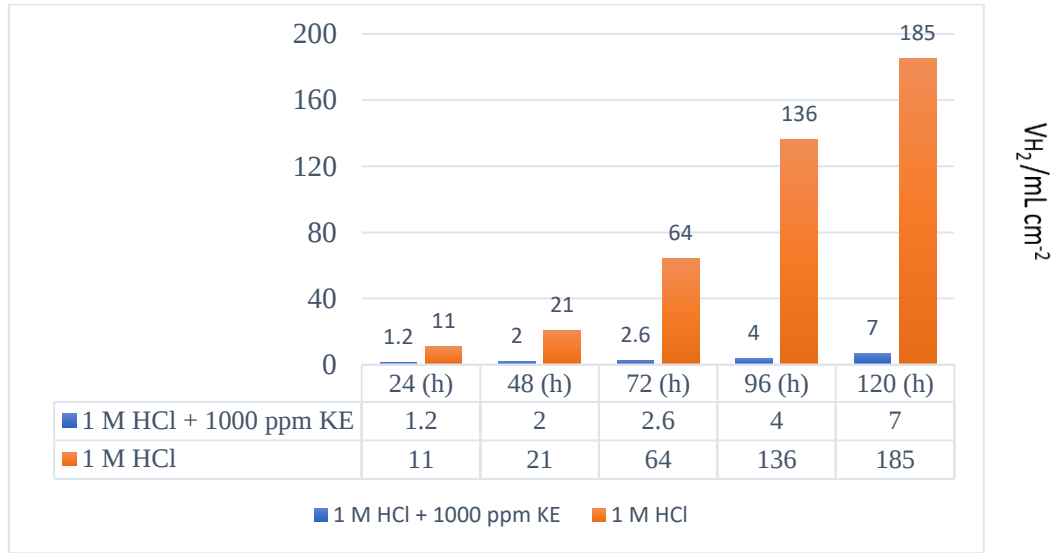
Şekil 3.21. YÇ elektrot üzerinde inhibitör ve inhibitör içermeyen 1 M HCl ortamında elde edilen $1000/T$ - $\ln i_{\text{corr}}$ grafiği

İnhibitörle metali korozyondan korumada belirlenen aktivasyon enerjisi, metalin korozyon esnasında çözünmesine karşı yüksek enerji bariyerine ihtiyaç duyulacağı ile ilişkilendirilebilir (Fernine et al., 2022, Rathod et al., 2022). Bu çalışmada, inhibitörsüz ortama (33.77 kJ/mol) göre inhibitörlü ortamda daha yüksek bir E_a değeri (53.04 kJ/mol) elde edilmiştir. Bu durum, inhibitör moleküllerinin, YÇ yüzeyinde güçlü bir adsorpsiyonun gerçekleştiğini, metal çözünmesinden yüzeyi koruduğunu ve korozyon olayında daha kalın bir çift tabakanın oluştuğunu ifade etmektedir. (Eddahhaoui et al.,

2024). Görüldüğü gibi yüksek aktivasyon enerjisi, YÇ elektrot yüzeyinde asitli ortamda, metali korozyondan koruduğu doğrulanmaktadır.

3.4. Hidrojen Gazı Oluşumu Deneyi ve Sonuçları

Tablo 3.7. 25°C sabit sıcaklıkta 1 M HCl ve 1 M HCl+ 1000 ppm KE özütü içeren çözeltilerden oluşan 120 saat boyunca ölçülen hidrojen gazı hacim grafiği



Bu deneyde (Tablo 3.7.), KE yeşil inhibitörünün zamanla hidrojen gazı oluşumu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hidrojen gazı hacim deneyi, 1000 ppm inhibitör çözeltisi ile inhibitör içermeyen çözeltilerinin zamanla hidrojen gazı üretimini nasıl etkilediğini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Deneyde, 1000 ppm konsantrasyonunda KE inhibitörü kullanılmış ve sonuçlar kontrol grubu (1 M HCl) ile karşılaştırılmıştır.

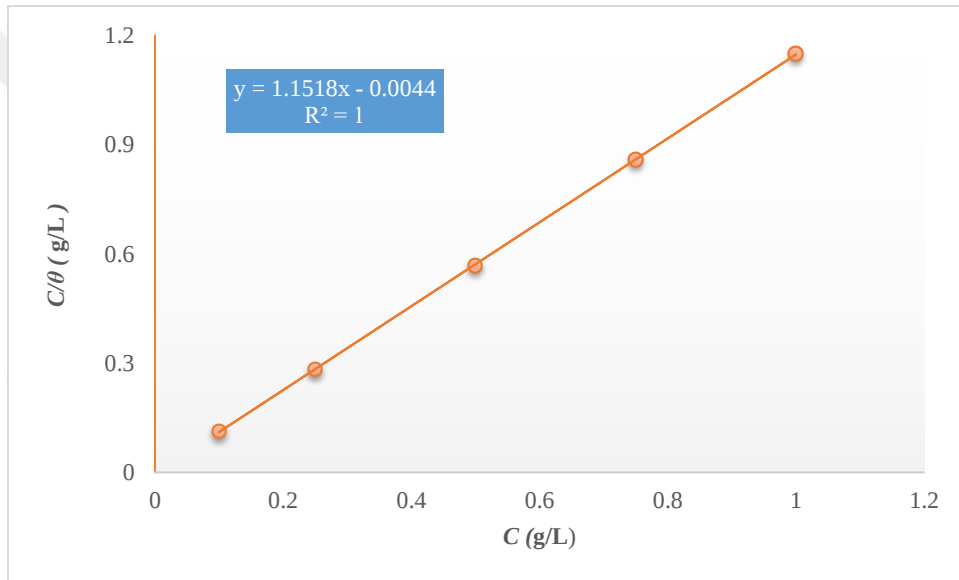
Deney sonuçları, hidrojen gazı hacminin zamanla arttığını göstermektedir. 24 saatten 120 saate kadar olan zaman dilimlerinde inhibitörsüz ortamda hidrojen gazı hacminde belirgin bir artış olurken, 1000 ppm konsantrasyonda inhibitör kullanıldığında, gaz hacmi çok düşük düzeyde gerçekleşmiştir. Bu durum, inhibitörün konsantrasyonunun hidrojen gazı oluşumu üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Hidrojen gazı oluşumu deneyinin mantığı, inhibitörün kimyasal bileşenlerinin yüzey reaksiyonlarını nasıl etkilediğini anlamaya dayanmaktadır. KE yeşil inhibitörü, yüzeydeki koroziyon süreçlere müdahale ederek hidrojen gazı üretimini azaltmaktadır. Bu, inhibitörün yüzeydeki aktif bölgelerle etkileşime girerek, hidrojen oluşum reaksiyon hızını düşürmesiyle açıklanabilir. Deney sonuçları, inhibitörün yüzeydeki reaksiyonları

etkili bir şekilde inhibe ettiğini ve bu sayede hidrojen gazı oluşumunu kontrol altına aldığını ve dolayısıyla korozyon hızını düşürdüğünü göstermektedir.

3.5. Adsorpsiyon İzotermi ve Sonuçları

Yeşil inhibitörler, kimyasal reaksiyonlarda metal yüzeylerle etkileşime giren bileşiklerdir. Bu etkileşim, çözeltideki inhibitör moleküllerinin metal yüzeylere adsorbe olmasıyla gerçekleşir. Adsorpsiyon izotermi, bu adsorpsiyon sürecini incelemek için kullanılır. KE'nin adsorpsiyon biçimini bulmak için inhibitörün etki mekanizmasında farklı izotermi uygulanmış olup Langmuir izotermi ile yüksek seviyeli ($R^2=1$) regresyon katsayısı belirlenmiştir.



Şekil 3.22. Langmuir adsorpsiyon izotermi

Şekil 3.22.'deki grafikte gösterilen denklem $y = 1,1518 x - 0,0044$ şeklindedir. Burada C/θ (y eksen) ve C (g/L) (x eksen) arasındaki ilişki doğrusal olarak ifade edilmiştir. Yüksek Adsorpsiyon sabiti K_{ads} , inhibitörün yüzeye ne kadar güçlü bağlandığını gösterir. Adsorpsiyon sabiti hesaplandığında,

$$K_{ads} = 1/0,004 = 250 \text{ L/g} \quad (3.2)$$

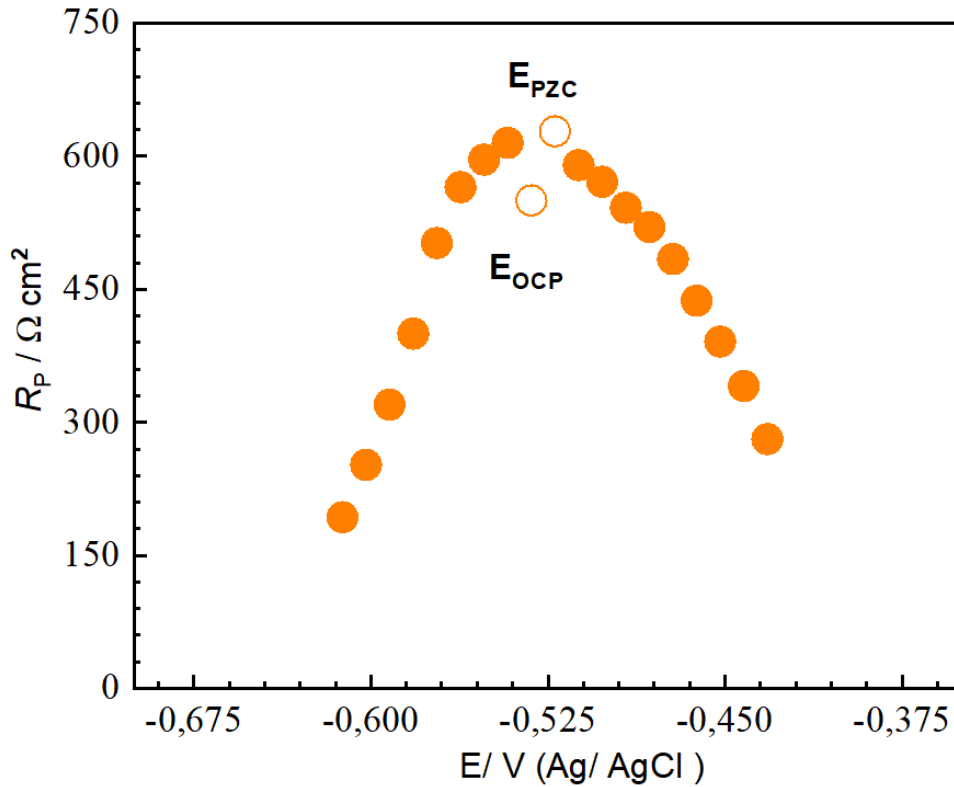
sonucu çıkmıştır. Yüksek bir K_{ads} değeri, inhibitörün yüzeye güçlü bir şekilde adsorbe olduğunu gösterir. Aşağıdaki bağıntıdan ΔG^0_{ads} hesaplandığında

$$\begin{aligned}\Delta G^{\circ}_{\text{ads}} &= -R.T.\ln(K_{\text{ads}}.1000) \\ &= -8,314.298.\ln(250.1000) \\ &= -30,79 \text{ kJ/mol}\end{aligned}\tag{3.3}$$

sonucu çıkmıştır. Bu sonuçla K_{ads} ve $\Delta G^{\circ}_{\text{ads}}$ birbiri ile ilişkilendirilmiştir. Burada R : Evrensel gaz sabiti ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), T: Sıcaklık olarak hesaplanmıştır. Negatif ve büyük bir $\Delta G^{\circ}_{\text{ads}}$ değeri, adsorpsiyonun kendiliğinden ve güçlü olduğunu gösterir.

-30,79 kJ/mol değeri KE için inhibitör molekülleri ve yumuşak çelik yüzeyi arasında güçlü etkileşimler kurulduğu, mekanizmanın kendiliğinden gerçekleşebildiği anlamına gelir.

3.6. Metal Yükünün Belirlenip Sonuçların Değerlendirilmesi



Şekil 3.23. 1 M HCl + 1000 ppm KE çözelti ortamındaki YÇ’ye ait R_p ve elektrot potansiyeli

Şekil 3.23.’de KE yeşil inhibitörünün metal yükü üzerindeki etkileri incelenmiştir. X eksenini -0,700 V ile -0,350 V arasında değişmektedir. Grafikte bir belirgin tepe noktası bulunmaktadır ve bir veri noktası “ E_{pcz} ” olarak işaretlenmiştir. Bu, Antropov’un sıfır yük

potansiyelini ifade eder. Burada E_{pcz} -0,522 V olarak belirlenmiş olup inhibitör ortamında maksimum R_p noktasına denk gelen gerilimdir. Aynı çözelti ortamındaki E_{ocp} değeri ise -0,532 V olarak tespit edilmiştir.

Aşağıda verilen denklem (3.4), açık devre potansiyelinden (E_{ocp}) sıfır yük potansiyelinin (E_{pzc}) çıkarılmasıyla Antropov'un sıfır yük potansiyelinin hesaplamasını göstermektedir. Elde edilen değer -0,01 V'dur.

$$E_r = E_{OCP} - E_{PZC} \quad (3.4)$$

$$=-0,532 - (-0,522)$$

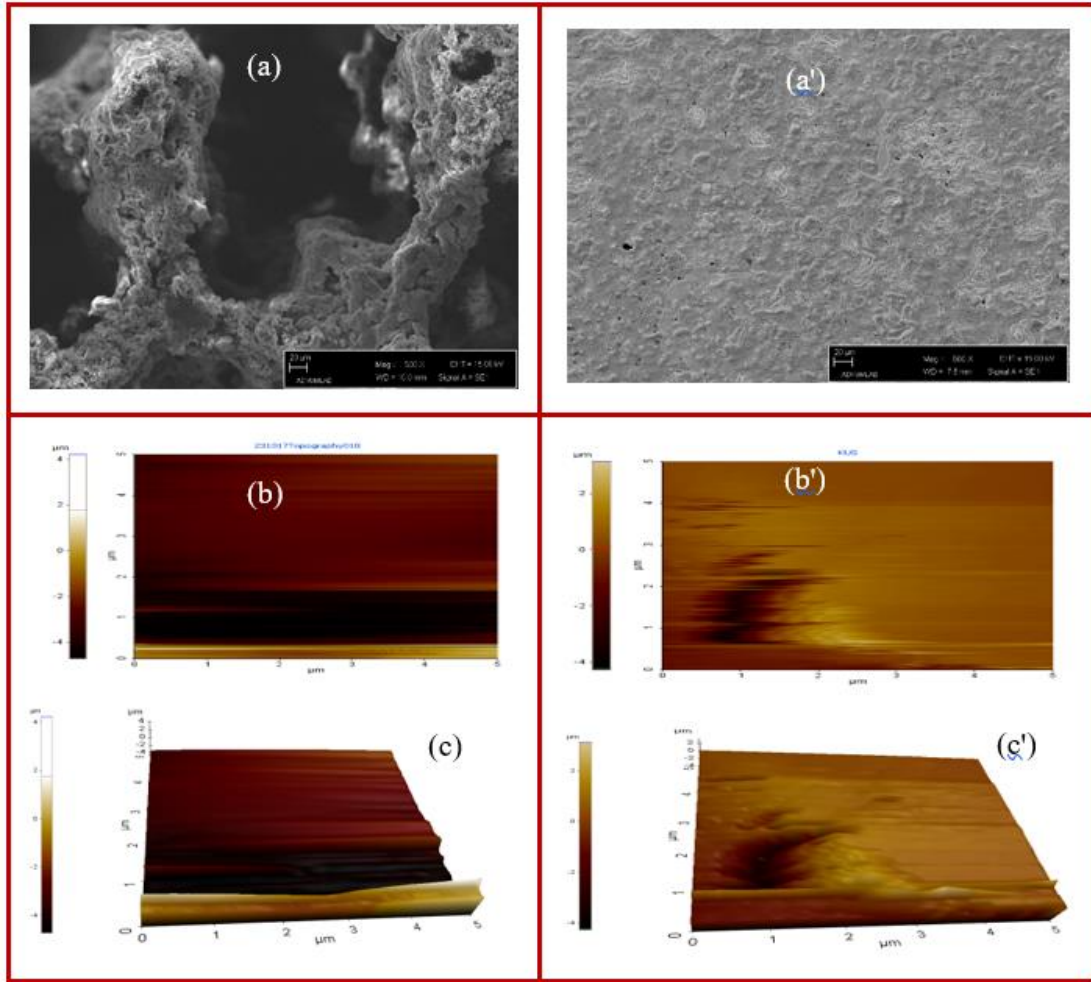
$$= -0,01 \text{ V (Ag/ AgCl)}$$

Elde edilen sonuçların negatif çıkması, KE yeşil inhibitörünün metal yüzeyinde negatif yükle yüklendiğini gösterir. Buna yönelik inhibisyon mekanizması şöyle olabilir: Negatif yüklü metal yüzeyi, katyonik inhibitör molekülleriyle (KEH^+) hem fiziksel olarak hem de kimyasal olarak etkileştiği ve yüzeyde koruyucu bir inhibitör tabakası oluşturduğu söylenebilir. İnhibitör moleküllerinin hidrojen iyonu ile, katyonik inhibitöre dönüşmesi aşağıda verilmektedir.



Negatif yüklü metal yüzeyinin, katyonik inhibitörlerle etkileşmesi fiziksel adsorpsiyon, negatif yüklü metal yüzeyinin, inhibitör molekülündeki heteroatomlarla, yapıdaki konjuge bağlarla ve benzen halkası ile etkileşmesi ise kimyasal adsorpsiyondur (Qiang et al., 2018).

3.7. Element Analizi Verileri ve Yüzey Görüntü Değerlendirmeleri



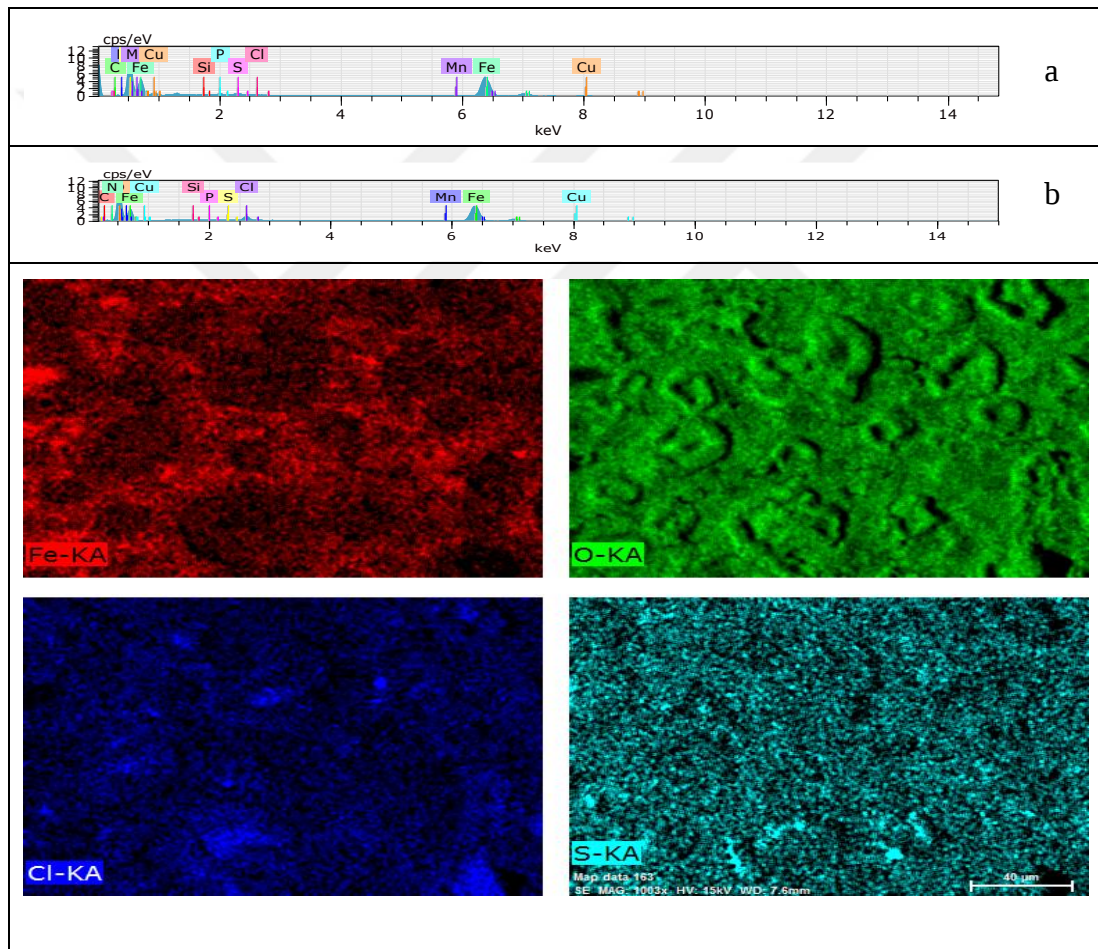
Şekil 3.24. 25°C sabit sıcaklıkta 1 M HCl ve 1 M HCl + 1000 ppm KE çözeltileri içerisinde YÇ'nin zamanla elde edilen SEM (a,a'), AFM-2D (b,b') ve 3D (c,c') görüntüleri

Şekil 3.24.'de 1 M HCl çözeltisinde 120 saat boyunca maruz bırakılmış yumuşak çeliğin yüzey görüntülerini ve morfolojilerini göstermektedir. Şekil 3.24. (a)'da çıplak YÇ yüzeyinin SEM görüntüsü verilmektedir. Görüntü incelendiğinde, YÇ yüzeyi ciddi derecede korozyona uğramış olup, yüzeyde devasa boşluklar ve oyuklar ortaya çıkmıştır. Oyuk olmayan bölgelerde bile çukurlar ve çatlaklar göze çarpmaktadır. Bu şekil, asidik ortamın metale yoğun bir şekilde zarar verdiğini göstermektedir.

Korozif ortama 1000 ppm dolayında KE inhibitörü eklendiğinde, Şekil 3.24. (a')'da görüldüğü gibi yüzey görüntüsünün değiştiği gözlemlenmektedir. İnhibitörlü ortamın yüzeyi çok daha homojen gözükmeyle birlikte yüzey düz, kompakt ve çok daha az korozyona uğramıştır. Yüzeyde hafif korozyon ürünleri varlığını göstermektedir.

Dolayısıyla, inhibitörlü ortamın YÇ korozyonunu önemli ölçüde azalttığı ve yüzeye adsorbe olarak koruyucu bir tabaka oluşturduğu söylenebilir (Timothy, 2023).

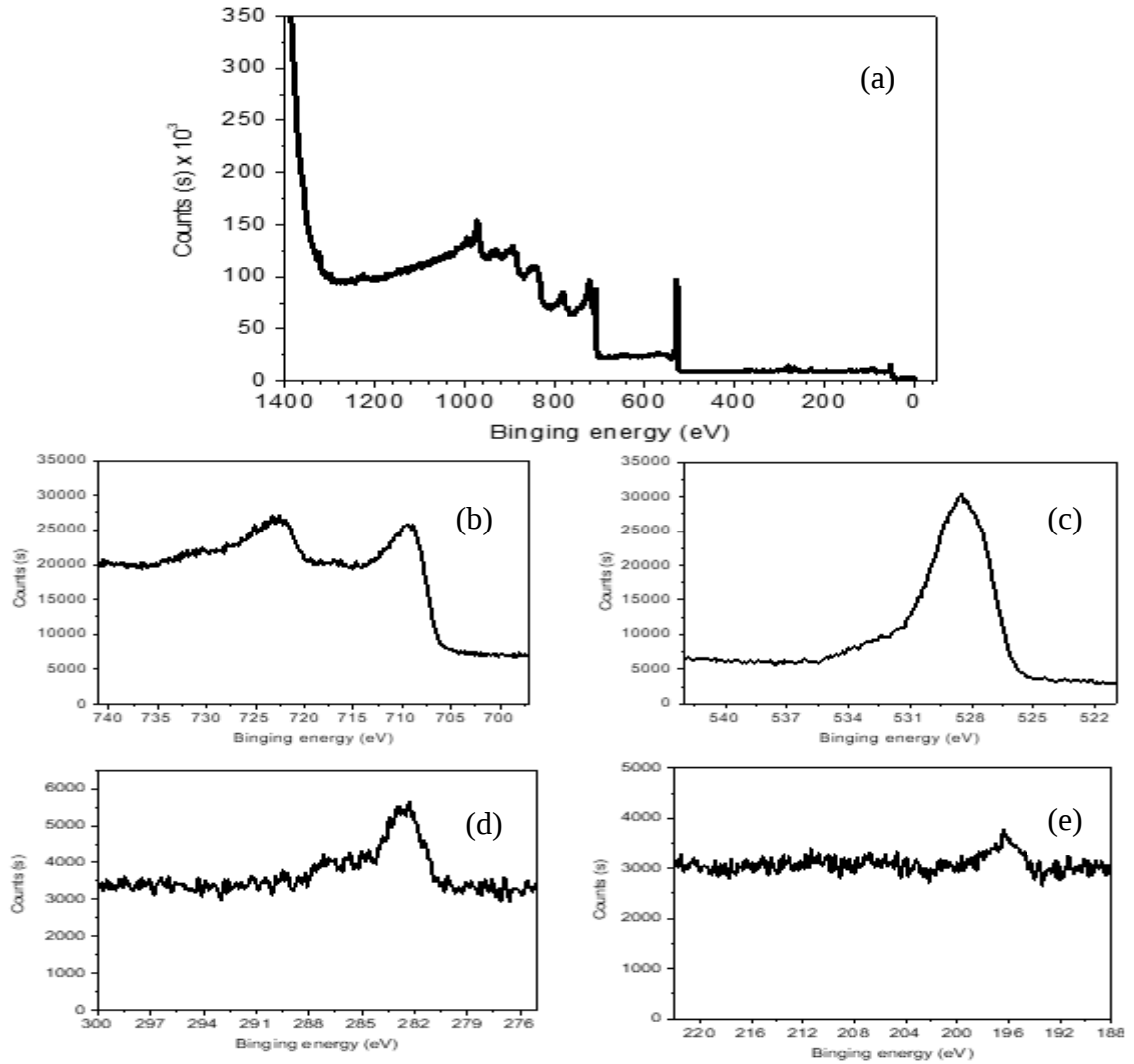
Şekil 3.24. (b ve b'), YÇ elektrotun hem inhibitörlü hem de inhibitörsüz ortamdaki 2 ve 3 boyutlu AFM görüntülerini yansıtmaktadır. İnhibitörsüz ortamda yumuşak çeliğin yüzeyinde ciddi çukurlaşma ve yüzey deformasyonları olduğunu göstermektedir. Yüzey pürüzlülüğü oldukça yüksek, derinlik farkları dikkat çekicidir ve bu da korozyonun ciddi seviyelere ulaştığını doğrulamaktadır. KE inhibitörü eklenmiş ortamda, yüzeydeki topografya daha düzgün ve homojen bir yapıya sahiptir. Yüzeydeki derinlik farklarının azaldığı ve inhibitörün etkili bir koruma sağladığı anlaşılmaktadır (Ghali, 2010).



Şekil 3.25. Sabit sıcaklıkta 1 M HCl (a) ve 1 M HCl + 1000 ppm KE (b) çözeltileri içerisinde YÇ'nin zamanla elde edilen EDX atom dağılımı

Şekil 3.25. (a)'da inhibitör kullanılmadan 1 M HCl çözeltisinde YÇ üzerinde yapılan EDX spekturumu, yüzeyde bulunan elementlerin dağılımını göstermektedir. 3. Bölümde YÇ elektrotun bileşimi verilmiş olup, yapıdaki elementler, EDX spektrumunda ortaya çıkmıştır. Bu elementlerin çoğunluğu Fe, Mn, C, P, Mn, Cu, O, N ve Si'dir. 1 M

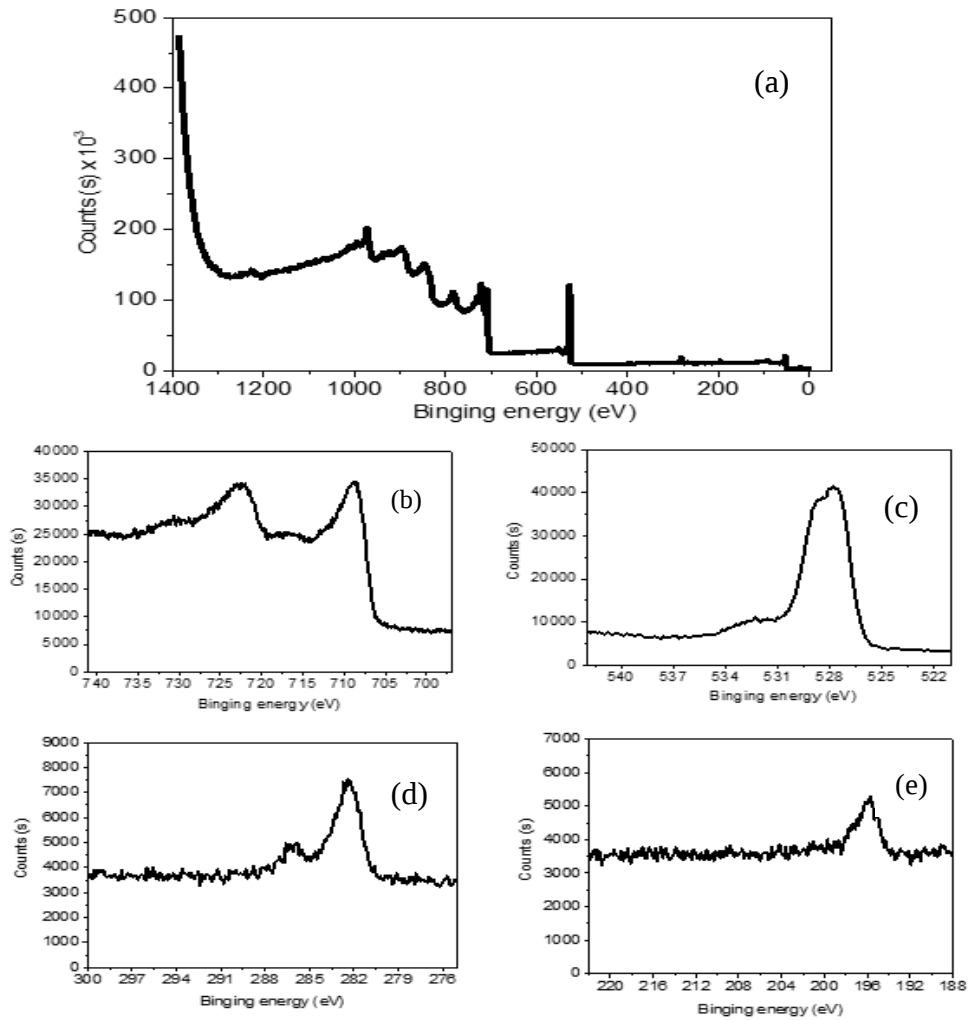
HCl ortamına 1000 ppm KE inhibitörü eklendiğinde ise bu elementler spektrumunda yine gözükmele (Şekil 3.25. (b)) birlikte, başlıca elementlerin yüzde miktarları şu şekilde olmuştur: Fe %36,44, O %58,57, Cl %2.70, N %1.81, Mn %0,22, Cu %0,10 ve S %0,04. Sonuçlar, Fe ve O elementlerinin diğer elementlere oranla daha yüksek olduğunu göstermektedir. Oksijen elementinin yüksek olması, KE bitki özütünde bulunan başlıca moleküllerin (Şekil 2.1) yapısında çokça bulunduğu ve yüzeyde oluşan oksit yapıları korozyon ürünlerine karşılık geldiği söylenebilir (İkhmal, 2024). Dolayısıyla EDX sonuçları, SEM görüntülerini desteklemektedir.



Şekil 3.26. YÇ elektrotun, 1 M HCl ortamında, 24 saat bekletildikten sonra alınan XPS grafikleri, (a) Genel tarama, (b) Fe' nin 2p, (c) O' nin 1s, (d) C' nin 1s ve (e) Cl' nin 2p orbitalleri

Metal yüzeyindeki elementlerin bileşimi ve bağlanma durumlarını araştırmak için XPS analizi yöntemi kullanılır (Long et al., 2024). 1 M HCl ortamında YÇ elektrotun 24

saat bekletildikten sonra elde edilen XPS grafikleri Şekil 3.26.'da verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi YÇ elektrotun yapısında bulunan atomlar gözükmemektedir. Yapıda fazla miktarda (%12,75) Fe bulunduğu için yüksek şiddette pik ortaya çıkarmıştır. Fe piki 709,7 ve 722,9 eV' de iki adet pike ayrılmıştır. Bu pikler Fe'nin 2p orbitallerine karşılık gelmektedir (Şekil 3.26. b). Metal yüzeyinde korozyon olduğu için korozyon ürünlerine karşılık gelen FeO_x 'lerden dolayı oksijende XPS grafiğinde (%71,925) büyük miktarda ortaya çıkmıştır (Şekil 3.26. c). Şekil 3.26. d'de ise yine YÇ elektrotun yapısından kaynaklanan C atomunun 1s orbitaline karşılık gelen grafik görülmektedir (%13,89). Ayrıca korozi ortam HCl olduğu için, asitin Cl piki, az da olsa Şekil 3.26. e'de ortaya çıkmıştır (%1,435).



Şekil 3.27. YÇ elektrotun, 1000 ppm KE içeren 1 M HCl ortamında, 24 saat bekletildikten sonra alınan XPS grafikleri, (a) Genel tarama, (b) Fe' nin 2p, (c) O' nin 1s, (d) C' nun 1s ve (e) Cl' un 2p orbitalleri

1000 ppm KE özütü içeren 1 M HCl ortamında 24 saat bekletildikten sonra elde edilen XPS grafikleri Şekil 3.27.' de verilmektedir. Grafik incelendiğinde YÇ elektrotun XPS grafiğine benzemekte olup, bir miktar farklılaşma göze çarpmaktadır. Bu farklılaşma atomların miktarlarındadır. Şekil 3.27. b'de Fe atomuna karşılık gelen pikler, 708,8 ve 722,6 eV' da ortaya çıkmıştır. İnhibitörlü ortamın Fe içeriği %13,228'dir. Bu pikler metalik Fe, Fe⁺² ve Fe⁺³ yapılarına karşılık gelmektedir (Liu et al., 2022). Şekil 3.27. c' ye göre yapıdaki oksijen içeriği bir miktar azalmıştır (%65,276), ayrıca pik tepe noktasında kısmi bir yarımla görülmektedir, bunlar FeO_x' lere ve C-O-C bağlarına karşılık gelmektedir (Chen et al., 2024). Şekil 3.27. d' de 282 ve 286 eV' da meydana gelen pikler C 1s orbitaline karşılık olup bunlar yapılarda C-C/C-H ve C-OH karşılık gelebilir (Berrissoul et al., 2020). Korozyon ortam HCl olduğu için çok az miktarda Cl elementi (%2,828) yapıda gözükmemektedir. Bu da yüzeyde FeCl₃ gibi yapıların Fe-Cl bağına karşılık geldiği düşünülebilir (Berrissoul, 2022). Görüldüğü gibi XPS analiz sonuçları, YÇ elektrot yüzeyinde kuş ekmeği ekstraktında bulunan bazı moleküllerin yüzeye şüphesiz ki adsorbe olduğunu göstermektedir (Li et al., 2023).

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

1. Yapılan bu tez çalışması, KE özütünün çelik üzerindeki korozyon direncini artırmada etkili olduğunu ve bu etkinin özütün konsantrasyonu ile doğru orantılı olarak arttığını göstermiştir. 100 ppm KE eklenmiş çözeltiden elde edilen İE sonucu %82,5 olup 1000 ppm de ise bu değer %96 değerine ulaşmıştır.
2. OCP deney sonuçlarından hareketle KE'nin OCP potansiyeli üzerinde etkili olup pozitif potansiyellere kaydırması ve düz çizgiler deneyin tepkime daha durgun ve dengede iken yapıldığını göstermektedir. 1 M HCl çözeltisinde OCP değeri -0,57 V çıkmışken, 1000 ppm KE eklenmiş çözeltiden -0,51 V değeri tespit edilmiştir.
3. Genel olarak, KE özütünün farklı konsantrasyonlarının metal yüzeylerdeki korozyon potansiyelini etkili bir şekilde düşürdüğü ve korozyon hızını azalttığı gözlemlenmiştir. Tafel eğrileri, inhibitörün konsantrasyonuna bağlı olarak korozyon reaksiyonlarını nasıl etkilediğini açıkça göstermiştir. Yüksek konsantrasyonlarda KE kullanıldığında, korozyon potansiyeli daha negatif değerlere kaymakta ve akım yoğunlukları azalmaktadır. 100 ppm KE içeren çözelti ortamından i_{corr} değeri $0,1452 \text{ mA cm}^{-2}$ elde edilirken, 1000 ppm KE eklenmiş çözeltiden ise ortaya çıkan i_{corr} değeri $0,0583 \text{ mA cm}^{-2}$ olmuştur. Bu, inhibitörün metal yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturduğunu ve buna bağlı olarak korozyon hızını düşürdüğünü göstermektedir (Jones, 1996).
4. KE özütünün 1 M HCl çözeltisinde YÇ üzerinde önemli bir inhibitör etkisi gösterdiği açıktır. Bu inhibitör, artan sıcaklıklarda bile çeliğin korozyon hızının fazla miktarda artmasının önüne geçerek korozyon direncini inhibitörsüz ortama göre önemli ölçüde artırmıştır. Sıcaklık artışında korozyon hızı değerinin arttığı gerçeğini göz önünde bulundurursak, 55°C 1 M HCl içeren ortamda korozyon hızı 919 mpy olarak hesaplanmış, 1 M HCl + 1000 ppm KE eklenmiş olan çözeltiden elde edilen korozyon hızı ise 210 mpy olarak inhibitörsüz ortama göre korozyon hızı değeri inhibitörsüz ortama göre çok daha düşük artış göstermiştir. Bu bulgular, KE'nin korozyon inhibitörü olarak kullanılabilirliğini desteklemektedir ve bu çözeltinin yüksek sıcaklıklarda bile etkili bir koruma sağladığını göstermektedir (Bentiss, 2001).

5. Bode diyagramı incelemesi, KE'nin 1 M HCl çözeltisine göre YÇ üzerinde etkili bir korozyon inhibitörü olduğunu desteklemektedir. Düşük frekanslarda artan KE konsantrasyonu ile birlikte impedans değerlerinin yükselmesi ve düşük frekansa doğru geldikçe faz açılarının artması, KE'nin çelik yüzeyinde etkili bir koruyucu tabaka oluşturduğunu ortaya koymaktadır (Bentiss, 2001).
6. Hidrojen gazı oluşumu deneyi sonuçları bize, açığa çıkan gazın zamanla inhibitörsüz ortamda çok fazla arttığını ve KE eklenmiş ortamda çok daha az hidrojen gazı ortaya çıktığını göstermektedir. 1. saatten 120 saate kadar olan zaman dilimlerinde inhibitörsüz ortamda hidrojen gazı hacminde belirgin bir artış yaşanırken (185 mL cm^{-2}), 1000 ppm konsantrasyonda inhibitör kullanıldığında gaz çıkışı çok düşük düzeyde (7 mL cm^{-2}) gerçekleşmiştir. Bu durum, inhibitörün konsantrasyonunun hidrojen gazı hacmi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve buna bağlı olarak hidrojen oluşum reaksiyonlarını önemli ölçüde düşürdüğünü göstermektedir. Bu da KE'nin YÇ yüzeyine iyi bir şekilde adsorplandığını ve buna bağlı olarak koruyucu bir tabaka oluştuğunu gösterir.
7. Adsorpsiyon sabitinin 250 L/g gibi yüksek bir değer çıkması, çelik yüzeyinde güçlü bir adsorpsiyon gerçekleştiğini ortaya koyar. Negatif ve büyük bir $\Delta G_{\text{ads}}^{\circ}$ değeri, adsorpsiyonun kendiliğinden ve güçlü olduğunu gösterip, KE için bu değer $-30,79 \text{ kJ/mol}$ olarak hesaplanmıştır. Bu da yüzeye bağlanmanın oldukça güçlü olduğunu göstermiştir. Yumuşak çelik yüzeyi ile inhibitör molekülleri arasında güçlü etkileşimler olduğu yani hem fiziksel hem de kimyasal adsorpsiyon gerçekleşebileceği açıkça ortadadır.
8. Metal yükü belirleme deneyinde elde edilen E_r değeri $-0,01 \text{ V}$ olup, sonuçların negatif çıkması KE yeşil inhibitörünün metal yüzeyinde negatif yükü yüklediğini gösterir. Negatif yüklü metal yüzeyi, katyonik inhibitör molekülleriyle (KEH^+) hem fiziksel olarak hem de kimyasal olarak etkileştiği ve yüzeyde koruyucu bir inhibitör tabakası oluşturduğu söylenebilir.
9. SEM ve AFM analiz sonuçları, KE'nin yüzeye iyi tutunduğunu, korozyonu önleyip inhibitörsüz ortama göre YÇ'nin yüzeyini daha iyi koruduğunu göstermiştir. SEM görüntülerinden YÇ yüzeyinin ciddi derecede korozyona uğradığı, yüzeyde devasa boşluklar ve oyuklar ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. İnhibitörlü ortamın yüzeyi çok daha homojen gözükmeyle birlikte yüzey düz, kompakt ve çok daha az korozyona uğramıştır. AFM sonuçları KE inhibitörü eklenmiş ortamda, yüzeydeki topografya daha düzgün ve homojen bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymuştur.

10. EDX ve XPS analiz sonuçları, Fe ve O elementlerinin diğer elementlere oranla daha yüksek olduğunu göstermektedir. Oksijen elementinin yüksek olması, KE bitki özütünde bulunan başlıca moleküllerin (Şekil 2.1) yapısında çokça bulunduğu ve yüzeyde oluşan oksit yapılı korozyon ürünlerine karşılık geldiği söylenebilir. İnhibitörsüz ortamda yapıda fazla miktarda (%12,75) Fe bulunduğu için yüksek şiddette pik ortaya çıkarmıştır. Buna karşılık inhibitörlü ortamdan elde edilen Fe içeriği %13,228'dir. İnhibitörsüz ortamda korozyon ürünlerine karşılık gelen FeO_x 'lerden dolayı oksijende XPS grafiğinde (%71,925) büyük miktarda ortaya çıkmıştır. Buna karşılık inhibitörsüz ortamda oksijen içeriği bir miktar azalmış olup %65,276 değeri çıkmıştır. Bu sonuçlar SEM görüntülerini destekleyip, KE'nin yüzeye iyi adsorbe olduğunu şüphesiz göstermekte olup korozyon hızını düşürdüğünü ispatlamaktadır.

Atmosfere açık koşullarda farklı sıcaklık ve derişimlerde yapılan deney sonuçları ve görüntüler incelendiğinde, KE inhibitör moleküllerinin YÇ yüzeyine çok iyi bir şekilde tutunup, yüzeyde iyi bir film tabakası oluşturmuştur. Bu sayede koroziv ortamdaki moleküllerle YÇ arasında etkileşimin önemli ölçüde azaldığı ve iyi bir koruma sağladığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlardan yola çıkarak atmosfere açık hidroklorik asit ortamlarında YÇ korozyonunun önlenmesinde KE özütü yeşil bir inhibitör olarak kullanılması tavsiye edilir.

KAYNAKÇA

- Aktürk, K., (2015). 316L Çeliğinin Cl içeren ortamlardaki aralık korozyonunun SO_4 ve NO_3 ile önlenmesi, Yalova Üniversitesi, YÖK Tez Merkezi Tez No: 409095.
- Akyıldız, E., (2013). Hidroklorik asit içerisinde yumuşak çeliğin korozyonuna karşı inhibitör geliştirilmesi, Çukurova Üniversitesi, YÖK Tez Merkezi Tez No: 307684.
- Arslanhan, S., (2023). 2-Amino-1, 3, 5 –triazine -4, 6-dithiol' un (2-ATD) yumuşak çelik üzerine hidroklorik asit çözeltisinde korozyonuna karşı adsorpsiyon ve inhibisyon özelliklerinin incelenmesi, Mardin Artuklu Üniversitesi, YÖK Tez Merkezi Tez No: 804697.
- Arslanhan, S., Yıldız, R., & Döner, A. (2023). Experimental and theoretical investigation of adsorption and inhibition properties of 2-Amino-1, 3, 5-triazine-4, 6-dithiol against corrosion in hydrochloric acid solution on mild steel. *Journal of the Indian Chemical Society*, 100(10), 101087.
- Arslanhan, S., Sığircık, G., Yıldız, R., & Baran, M. F., (2024). Protection of mild steel from corrosion in HCl solution via green Rumex acetosella extract: Experimental and Theoretical studies. *Materials Today Communications*, 109528.
- Bard, A. J., Faulkner, L. R., (2001). *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications* (2nd ed.). Wiley.
- Baş, M., (2013). p-aminoasetanilit ve türevinin 1 M hidroklorik asit içeren ortamda yumuşak çeliğin korozyon davranışına etkilerinin elektrokimyasal ve kuantum kimyasal hesaplamalarla belirlenmesi, Niğde Üniversitesi, YÖK Tez Merkezi Tez No:332259.
- Batah, A., Chaouiki, A., Id El Mouden, O., Belkhaouda, M., Bammou, L., Salghi, R., (2022). Almond waste extract as an efficient organic compound for corrosion inhibition of carbon steel (C38) in HCl solution, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 27, 100677.
- Bayol, E., (2005). Hekzametilentetraminin klorürlü ve sülfatlı ortamlarda çeliğin korozyon davranışına etkilerinin incelenmesi, Niğde Üniversitesi, YÖK Tez Merkezi Tez No:167922.
- Bentiss, F., (2001). Corrosion inhibition of steel by green inhibitors, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 500(1-2), 166-176.
- Berrissoul A., Ouarhach, A., Benhiba, F., Romane, A., Zarrouk, A., Guenbour, A., Dikici, B., Dafali, A., (2020). Evaluation of Lavandula mairei extract as green inhibitor for mild steel corrosion in 1 M HCl solution. Experimental and theoretical approach, *Journal of Molecular Liquids*, 313, 113493.
- Berrissoul, A., Ouarhach, A., Benhiba, F., Romane, A., Guenbour, A., Dikici, B., ... & Dafali, A. (2022). Assessment of corrosion inhibition performance of origanum compactum extract for mild steel in 1 M HCl: Weight loss, electrochemical,

- SEM/EDX, XPS, DFT and molecular dynamic simulation. *Industrial Crops and Products*, 187, 115310.
- Biswas, A., Pal, S., Udayabhanu, G., (2015). Experimental and theoretical studies of xanthan gum and its graftco-polymer as corrosion inhibitor for mild steel in 15% HCl, *Applied Surface Science*, Volume 353, 173–183, 10.1016/j.apsusc.2015.06.128.
- Bıyık, G., (2013). *Katodik koruma sistemleri*, Yıldız Teknik Üniversitesi, YÖK Tez Merkezi Tez No: 343904.
- Chen, M., Chen, S., Pi, J., Chen, S., Wang, Q., & Fu, C. (2024). An investigation of modified dialdehyde starch as a highly efficient green corrosion inhibitor for carbon steel in 1 M HCl medium: Synthesis, experimental and theoretical studies. *Industrial Crops and Products*, 215, 118534.
- Cicek, V., Al-Numan, B., (2011). *Corrosion chemistry*. John Wiley & Sons.
- Cohen, M., (2002). *Corrosion Control: Principles and Practice*. Springer.
- Davis, J. R., (2000). *Corrosion: Understanding the Basics*, A S M International, ProQuest Ebook Central.
- Dilek, S., (2020). *Yumuşak çeliğin 1,0 M HCl ortamındaki korozyonuna keten tohumunun inhibisyon davranışının incelenmesi*, YÖK Tez Merkezi Tez No: 609571.
- Eddahhaoui, F.Z., Najem, A., Elhawary, M., Boudalia, M., Campos, O.S., Tabyaoui, M., Garcia, A.J., Bellaouchou, A., Amin, H.M.A., (2024). Experimental and computational aspects of green corrosion inhibition for low carbon steel in HCl environment using extract of *Chamaerops humilis* fruit waste, *Journal of Alloys and Compounds*, 977, 173307.
- Erbil, M., (2012). *Korozyon İlkeler ve Önlemler*, Korozyon Derneği.
- Fernine, Y., Salim, R., Arrousse, N., Haldhar, R., El Hajjaji, F., Seong-Cheol, K., M.E., Touhami, Taleb, M., (2022). Anti-corrosion performance of ocimum basilicum seed extract as environmental friendly inhibitors for mild steel in HCl solution: Evaluations of electrochemical, EDX, DFT and Monte Carlo, *Journal of Molecular Liquids*, 355, 118867.
- Flory, P. J., (1953). *Principles of Polymer Chemistry*, Cornell University Press.
- Fontana, M. G., (1987). *Corrosion Engineering*, McGraw-Hill.
- Fouda, A. S., Ellithy, A. S., Ahmed, M. I., (2005). Corrosion inhibition of carbon steel by green inhibitors in acidic medium. *Materials Chemistry and Physics*, 93(1), 123-130. 10.1016/j.matchemphys.2005.02.013.
- Freundlich, H., (1907). Über die adsorption in lösungen. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 57(A), 385-470.

- Frumkin, A. N., (1925). Electrocapillary curve of higher fatty acids and the state of the adsorbed layer. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 116, 466-484.
- Ghali, E. (2010). *Corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys: understanding, performance, and testing*. John Wiley & Sons.
- Günbeyi, E., (2020). *Yumuşak çeliğin korozyonu üzerine kapari (Capparis spinosa L.) bitkisinin meyve ekstraktının inhibitör etkisinin araştırılması*, Çukurova Üniversitesi, YÖK Tez Merkezi Tez No: 609987.
- Ikhmal, W.M., Kamaruzzaman, W.M., Shaifudin, M.S. (2024). Experimental, DFT and molecular dynamic simulation of Andrographis paniculata as corrosion inhibitor for mild steel in artificial seawater, *Materials Chemistry and Physics* 312, 128642.
- Jones, D. A., (1996). *Principles and prevention*. Corrosion, 2, 168.
- Jones, D. A., (2012). *Principles and Prevention of Corrosion*, Prentice Hall.
- Karadaş, N., (2010). *Yumuşak çeliğin asidik ortamdaki korozyonuna bazı organik maddelerin inhibitör etkilerinin incelenmesi*, Hacettepe Üniversitesi, YÖK Tez Merkezi Tez No: 270225.
- Karakaya, C., (2023). *Avokado (persea americana) yaprağı özütlerinin paslanmaz çeliğin asidik ortamdaki korozyon davranışı üzerine etkisi*, Mersin Üniversitesi, YÖK Tez Merkezi Tez No: 832956.
- Keleş, H., (2008). *Yumuşak çeliğin asidik ortamdaki korozyonuna bazı organik maddelerin inhibitör etkilerinin incelenmesi*, Çukurova Üniversitesi, YÖK Tez Merkezi Tez No:178650.
- Koluçolak, N., (2019). *Betonarme çeliğinin korozyon davranışlarına polikarboksilat bazlı akışkanlaştırıcı ve kalsiyum nitrit'in etkisinin araştırılması*, Çukurova Üniversitesi, YÖK Tez Merkezi Tez No: 573236.
- Langmuir, I., (1918). The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 40 (9), 1361-1403.
- Liu, Y., & Shi, J. (2022). Corrosion resistance of carbon steel in alkaline concrete pore solutions containing phytate and chloride ions. *Corrosion Science*, 205, 110451.
- Li, Y., Li, Z., Ma, T., Zeng, L., Chen, H., Lei, X., ... & Han, J. (2023). Corrosion mitigation of peanut shell extract as a novel effective corrosion inhibitor for carbon steel in sulfuric acid medium. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 4706-4722.
- Long, W. J., Li, X. Q., Zheng, S. Y., & He, C. (2024). A novel effective carbon dots-based inhibitor for carbon steel against chloride corrosion: From inhibition behavior to mechanism. *Carbon*, 218, 118708.
- Macdonald, D. D., (2006). Reflections on the history of electrochemical impedance spectroscopy. *Electrochimica Acta*, 51(8-9), 1376-1388.
10.1016/j.electacta.2005.02.107.

- Mahdi, B. S., Abbass, M. K., Mohsin, M. K., Al-Azzawi, W. K., Hanoon, M. M., Al-Kaabi, M. H. H., Takriff, M. S., (2022). Corrosion inhibition of mild steel in hydrochloric acid environment using terephthaldehyde based on Schiff base: Gravimetric, thermodynamic, and computational studies. *Molecules*, 27(15), 4857, 10.3390/molecules27154857.
- Mansfeld, F., (2005). Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) as a new tool for investigating methods of corrosion protection. *Electrochimica Acta*, 52(2), 688-720, 10.1016/0013-4686(90)80007-B.
- Miller, S., (2008). *Corrosion Control: A Guide to Understanding Corrosion and its Prevention*, CRC Press.
- Onat, T., (2011). *Asidik ortamda çeliğin korozyonuna karbazol'ün etkilerinin elektrokimyasal olarak incelenmesi*, Niğde Üniversitesi, YÖK Tez Merkezi Tez No: 297581.
- Ongun Yüce, A., (2011). *Kükürt içeren bazı organik maddelerin asidik ortamda yumuşak çeliğin korozyonuna etkilerinin incelenmesi*, Çukurova Üniversitesi, YÖK Tez Merkezi Tez No: 275552.
- Orazem, M. E., Tribollet, B., (2008). *Electrochemical impedance spectroscopy*. New Jersey, 1(906), 383-389.
- Ouakki, M., Galai, M., Benzekri, Z., Aribou, Z., Ech-chihbi, E., Guo, L. & Cherkaoui, M., (2021). A detailed investigation on the corrosion inhibition effect of by newly synthesized pyran derivative on mild steel in 1.0 M HCl: Experimental, surface morphological (SEM-EDS, DRX& AFM) and computational analysis (DFT & MD simulation). *Journal of Molecular Liquids*, 344, 117777, 10.1016/j.molliq.2021.117777.
- Ökten, V., (2023). *Hidroklorik asit çözeltisinde, yumuşak çeliğin korozyonuna, 2-amino-4-metoksi-6-metil-1,3,5-triazin maddesinin inhibisyon etkinliğinin araştırılması*, Mardin Artuklu Üniversitesi, YÖK Tez Merkezi Tez No: 821104.
- Özer, N., (2021). Yapı malzemelerinde korozyon ve korozyondan korunma yöntemleri, *Bursa Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 26, Sayı 3, 1175 s, 10.17482/uumfd.796947.
- Perry, R. H., (2010). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, McGraw-Hill.
- Popova, A., Christov, M., Vasilev, A., (2007). Inhibition of mild steel corrosion in acid media by azoles. *Corrosion Science*, 49(8), 3290-3302. 10.1016/j.corsci.2007.03.033.
- Qiang, Y., Zhang, S., Tan, B., & Chen, S. (2018). Evaluation of Ginkgo leaf extract as an eco-friendly corrosion inhibitor of X70 steel in HCl solution. *Corrosion Science*, 133, 6-16.
- Quraishi, M. A., Ansari, F. A., (2010). Effect of long chain n-alkyl substituted imidazolines on corrosion of mild steel in hydrochloric acid. *Corrosion Science*, 52(4), 1536-1544. 10.1016/j.corsci.2009.12.013.

- Raja, P. B., & Sethuraman, M. G. (2008). Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media—a review. *Materials letters*, 62(1), 113-116.
- Rathod, M.R., Rajappa, S.K., Kittur, A.A., (2022). Garcinia livingstonei leaves extract influenced as a mild steel efficient green corrosion inhibitor in 1 M HCl solution, *Materials Today*, 54, 786–796.
- Sarı, A., (2015). 1-(2-hidroksietil)-2-imidazolidion (2-HEI) 'in yumuşak çelik korozyonuna 0,5 M HCl çözeltisi içinde etkisi, Çukurova Üniversitesi, YÖK Tez Merkezi Tez No:382391.
- Shreir, L. L., (2000). *Corrosion*. Butterworth-Heinemann.
- Sığırcık, G., Tüken, T., & Erbil, M. (2016). Assessment of the inhibition efficiency of 3, 4-diaminobenzonitrile against the corrosion of steel. *corrosion science*, 102, 437-445.
- Smith, L., (2010). *Protective Coatings and Paints*. Elsevier.
- Smith, R., Lee, S., & Brown, T., (2021). Organic inhibitors: Structure-activity relationship and performance, *Progress in Organic Coatings*, 155, 1-20.
- Şahin, E. A., Dursun, Y. A., Geçibesler, İ. H., & Solmaz, R. (2024). Adsorption and corrosion inhibition ability of avocado seed (Persea americana) extract for copper corrosion in 0.5 M H₂SO₄ solution. *Inorganic Chemistry Communications*, 112751.
- Temkin, M. I., Pyzhev, V., (1940). Kinetics of ammonia synthesis on promoted iron catalysts. *Acta Physicochimica URSS*, 12, 327-356.
- 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, 10.1016/j.molliq.2021.117721.
- Timothy, U.J., Ankah, N.K., Umoren, P.S., Solomon, M.M., Igwe, I.O., Umeron, S.A. (2023). Assessment of berlinia grandiflora and cashew natural exudate gums as sustainable corrosion inhibitors for mild steel in an acidic environment, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11, 111578.
- Yalçın, H., Koç, T., (1997). *Mühendisler için korozyon*, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Kimya Mühendisleri Odası, s 3.41.
- Yıldız, R., Arslanhan, S., Döner, A., & Baran, M. F. (2024). Corrosion behavior of mild steel in 1 M HCl with Cyclotrichium niveum as a green inhibitor. *Materials Chemistry and Physics*, 312, 128654.
- Zhang, D., Wang, L., Qian, H., & Li, X. (2016). Superhydrophobic surfaces for corrosion protection: a review of recent progresses and future directions. *Journal of Coatings Technology and Research*, 13, 11-29.

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(1), 100832, 10.1016/j.jics.2022.100832.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	Ahmet KARTAL
Yabancı Dili	İngilizce
Orcid Numarası	0009-0008-5495-4551
Ulusal Tez Merkezi Referans Numarası	10579095
Lise	Bor Akın Gönen Anadolu Lisesi
Lisans	Ege Üniversitesi/ Eğitim Fakültesi/ Fen Bilgisi Öğretmenliği (2021 Mezunu)
Yüksek Lisans	
Mesleki Deneyim	MEB, 2021-2024 Fen Bilimleri Öğretmeni (Halen devam ediyor)
Akademik Çalışmalar	Kartal, A. & Yıldız, R. (2024). Bird Bread (Polygonum aviculare L.) extract as high efficient green corrosion inhibitor for the mild steel, 4.Uluslararası Mühendislik ve Doğa Bilimleri Çalışmaları Kongresi Ankara/ 24/25 Mayıs.

