



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KALIP ŞARTLANDIRICI SERPANTİNİNDE OLUŞAN
KOROZYONUN İNHİBİTÖR KULLANIMIYLA ENGELLENMESİ**

İBRAHİM SARIOĞLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. HÜSNÜ GERENGİ**

DÜZCE, 2021

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KALIP ŞARTLANDIRICI SERPANTİNİNDE OLUŞAN
KOROZYONUN İNHİBİTÖR KULLANIMIYLA ENGELLENMESİ**

İbrahim SARIOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Hüsnü GERENGİ
Düzce Üniversitesi

Jüri

Prof. Dr. Hüsnü GERENGİ
Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Oktay ELKOCA
Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet Lütfi YOLA
Hasan Kalyoncu Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 11/06/2021

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

11 Haziran 2021

İbrahim Sarıoğlu



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Hüsnü Gerengi' ye en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca desteklerini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Mert Kılınçel, Dr. Mine Kurtay, Dr. Marziya Rızvı ve Öğr. Gör. Mesut Yıldız'a şükranlarımı sunarım.

Tezin araştırması ve geliştirilmesinde verdiği fikirlerden dolayı Prof. Dr. İlyas Uygur, Doç. Dr. Savaş Kaya, Öğr. Gör. Zafer Cingiz ve Öğr. Gör. Mustafa Ketrez 'e saygılarımı sunarım.

Elektro kimyasal deneylerin yapımında ve deney sonrası elde edilen verilerin yorumlanması için yardımcı olan Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Korozyon Araştırma Laboratuvarı ekip arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Çalışma sürecim boyunca tez çalışmam için gerekli olan deney düzeneğinin hazırlanmasında sağladığı destek için ISI-TAN Isıtma Soğutma San. Tic. Ltd. Şti çalışanlarına teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca maddi ve manevi anlamda bana destek olan sevgili anneme, babama ve kardeşlerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP- 2020.06.05.1076 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

11 Haziran 2021

İbrahim Sarıoğlu

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
KISALTMALAR.....	x
SİMGELER	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. BAKIR.....	6
1.2. ISI DEĞİŞTİRİCİ.....	9
1.2.1. Isı Değiştiricilerin Sınıflandırılması	9
1.2.1.1. Levhalı Isı Değiştirici.....	9
1.2.1.2. Borulu Isı Değiştirici	10
1.2.1.3. Kanatlı Isı Değiştirici.....	12
1.2.1.4. Rejeneratör Isı Değiştirici	12
1.2.2. Isı Değiştirici Seçiminde Etkili Parametreler	13
1.3. KALIP ŞARTLANDIRICI	15
1.3.1. Sıcaklık Kontrol Cihazı	15
1.3.2. Chiller (Su Soğutma Cihazı)	17
1.4. KOROZYON.....	19
1.4.1. Bakırda Korozyon Mekanizması.....	20
1.4.2. Soğutma Suyu Sistemlerinde Korozyon.....	21
1.4.2.1. Genel Korozyon	22
1.4.2.2. Çukur Korozyonu	22
1.4.2.3. Çatlak Korozyonu	23
1.4.2.4. Galvanik Korozyon	23
1.4.2.5. Erozyon Korozyonu.....	23
1.4.2.6. Aralık Korozyonu	23
1.5. İNHİBİTÖRLER	23
1.5.1. Organik İnhibitör	25
1.5.2. İnorganik İnhibitör	26
1.5.3. Sodyum Nitrit	27
1.6. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	29
1.6.1. Sodyum Nitritle İlgili Yapılan Çalışmalar	29
1.6.2. Isı Değiştirici Korozyonu ile İlgili Yapılan Çalışmalar	30
1.6.3. Bakır Korozyonu ile İlgili Yapılan Çalışmalar	30
2. MATERYAL VE YÖNTEM	32
2.1. MATERYAL	32
2.1.1. Deneyde Kullanılan Materyal ve Deneyin Yapılışı	32
2.1.1.1. Yapay Ortamda Soğutma Suyu Kullanılarak Korozyonun Ölçülmesi.....	32
2.1.1.2. Alternatif Akım İle Korozyon Ölçümünün Uygulanması.....	34
2.1.1.3. Elektrokimyasal Yöntemle Yüzey Analizi	34
2.2. YÖNTEM	35
2.2.1. Korozyon Ölçme Yöntemleri	35

2.2.1.1. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi	35
2.2.1.2. Dinamik Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi	36
2.2.2. Yüzey Analizi	36
2.2.2.1. SEM ve EDS Analizi	36
2.2.2.2. AFM Analizi	38
2.2.2.3. Optik Profilometri	38
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	39
3.1. SODYUM NİTRİT İNHİBİTÖRÜNÜN BAKIR PLAKA KOROZYONUNA ETKİSİNİN ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ	39
3.1.1. Elektro Kimyasal Yöntemler (EIS-DEIS-İZOTERM)	39
3.1.1.1. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS)	39
3.1.1.2. Dinamik Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (DEIS)	42
3.1.1.3. Adsorpsiyon izotermi	45
3.1.2. Yüzey Analizi	50
3.1.2.1. AFM	50
3.1.2.2. SEM/EDS	52
3.1.2.3. Optik profilometre (OP)	56
3.2. SODYUM NİTRİT İNHİBİTÖRÜNÜN BAKIR SERPANTİN KOROZYONUNA ETKİSİNİN YÜZEY ANALİZ YÖNTEMLERİYLE İNCELENMESİ	59
3.2.1. AFM Analizi	60
3.2.2. SEM-EDS Analizi	69
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	88
5. KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ	99

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Isı değiştiricide korozyondan koruma yöntemleri.	3
Şekil 1.2. Korozyona uğramış bir ısı değiştirici [16].	4
Şekil 1.3. Bakırın kullanıldığı alanlar [16].	6
Şekil 1.4. Dünyada bakır üretim oranı.	7
Şekil 1.5. Korozyona uğramış farklı bakır bazlı endüstrilerin şematik gösterimi [38]. ...	8
Şekil 1.6. Yapısal özelliklerine göre ısı değiştiricilerin sınıflandırılması.	9
Şekil 1.7. Levhalı Isı Değiştiriciler.	10
Şekil 1.8. Borulu ısı değiştirici.	11
Şekil 1.9. Helisel borulu ısı eşanjör uygulaması.	11
Şekil 1.10. Kanatlı ısı değiştiriciyle imal edilmiş kuru soğutucu.	12
Şekil 1.11. Sıcaklık kontrol cihazının şematik çizimi.	16
Şekil 1.12. 9 KW'lık su ısıtma kapasitesine sahip (TCU).	17
Şekil 1.13. Su soğutma cihazı şeması [61].	18
Şekil 1.14. Tipik bir su soğutma cihazı ve eşanjörü.	18
Şekil 1.15. Bakırda çukurcuk korozyonu.	22
Şekil 1.16. Korozyon inhibitörlerinin sınıflandırılması [83].	25
Şekil 1.17. İnhibisyon sürecinde metalik yüzey ile inhibitörlerin etkileşimi [87].	27
Şekil 1.18. Katı halde bulunan sodyum nitrit.	28
Şekil 1.19. Sodyum nitritin yapısı.	28
Şekil 2.1. Deneyde kullanılan bakır serpantin.	32
Şekil 2.2. Deney seti akış şeması.	33
Şekil 2.3. Kullanılan deney seti.	33
Şekil 2.4. Deney düzeneği ve deneyde kullanılan numuneler.	34
Şekil 2.5 Alternatif akım ile korozyon ölçme yöntemleri.	35
Şekil 2.6. SEM-EDS görüntüleme cihazı.	37
Şekil 2.7. AFM görüntüleme cihazı.	38
Şekil 3.1. Farklı NaNO ₂ konsantrasyonları tarafından inhibe edilen SCW'deki bakır örneklerinin Nyquist grafikleri.	39
Şekil 3.2. SCW'de farklı NaNO ₂ konsantrasyonları tarafından inhibe edilen bakır numunesi için Bode faz grafikleri.	40
Şekil 3.3. EIS ve DEIS için uygulanan eşdeğer devre modeli.	41
Şekil 3.4. 24 saat boyunca 2000 ppm NaNO ₂ ilaveli (b) ve ilavesiz (a) SCW ortamına maruz bırakılan bakır numunelerin DEIS spektrumları.	42
Şekil 3.5. 24 saat boyunca inhibe edilmemiş ve inhibe edilmiş SCW'ye batırılmış bakır numuneleri için R _{ct} -zaman grafiği.	44
Şekil 3.6. SCW'ye batırılmış bakır numunesi için 2000 ppm NaNO ₂ ile inhibe edilen adsorpsiyon izotermeleri (a-b-c).	48
Şekil 3.7. AFM görüntüleri: (a) deney öncesi bakır numunesi, (b) SCW'de aşınmış bakır numunesi, (c) SCW + 2000 ppm NaNO ₂ 'de aşınmış bakır numunesi.	51
Şekil 3.8. SEM ve EDS görüntüleri: (a), (b) deney öncesi bakır numunesi, (c), (d) SCW'de aşınmış bakır numunesi, (e), (f) SCW + 2000 ppm NaNO ₂ 'de aşınmış bakır numunesi.	53
Şekil 3.9. Optik profilometrik görüntüler: (a) deney öncesi bakır numunesi, (b) SCW'de aşınmış bakır numunesi, (c) SCW + 2000 ppm NaNO ₂ 'de aşınmış bakır numunesi.	57
Şekil 3.10. 21 gün boyunca farklı ortamlarda korozyona maruz bırakılmış bakır	

serpantinler; (a) SCW, (b) SCW+NaNO ₂	59
Şekil 3.11. 21 gün sonunda bakır serpantinlere ait AFM görüntüleri.....	61
Şekil 3.12. 21 gün sonunda SCW ortamındaki bakır serpantinlere ait SEM görüntüleri.	71
Şekil 3.13. 21 gün sonunda SCW+NaNO ₂ ortamındaki bakır serpantinlere ait SEM görüntüleri.	79



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. Yapay soğutma suyunun kimyasal içeriği.....	33
Çizelge 3.1. Oda sıcaklığında farklı NaNO_2 konsantrasyonları tarafından inhibe edilen SCW'deki bakır numuneleri için EIS parametreleri	41
Çizelge 3.2. 2-24 saati kapsayan zaman aralıklarında inhibe edilmiş ve inhibe edilmemiş SCW'ye batırılmış bakır numuneleri için DEIS Nyquist grafiğinin analizi.	43
Çizelge 3.3. Oda sıcaklığında 2 saat NaNO_2 tarafından inhibe edilen SCW'deki bakır numuneleri için elde edilen adsorpsiyon değerleri.....	45
Çizelge 3.4. SCW'de 2000 ppm NaNO_2 tarafından inhibe edilen bakırın optik profilometre sonuçları	58
Çizelge 3.5. İnhibitör ilaveli SCW ortamında elde edilen AFM sonuçlarının kıyaslanması.	69
Çizelge 3.6. İnhibitör ilaveli SCW ortamında elde edilen EDS sonuçlarının kıyaslanması.	87

KISALTMALAR

AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
DEIS	Dinamik Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi
EDS	Enerji Dağılımlı X-Ray Spektroskopisi
EIS	Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi
GSYİH	Gayri Safi Yıllık Hasıla
Hz	Hertz
kHz	Kilo Hertz
mHz	Mili Hertz
NACE	Ulusal Korozyon Mühendisleri Derneği
NaNO ₂	Sodyum Nitrit
NO ⁻	Nitroksit
NO ₂ ⁻	Nitrit
OCP	Açık Devre Potansiyeli
OP	Optik Profilometri
SCW	Yapay Soğutma Suyu
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SFE	Sabit Faz Elemanı
TCU	Sıcaklık Kontrol Ünitesi

SİMGELER

$\%IE$	İnhibitör Etkinliği Yüzdesi
$\sim$	Yaklaşık
E_{corr}	Korozyon Potansiyeli
I_{corr}	Korozyon Akım Yoğunluğu ($\mu A/cm^2$)
K_{ads}	Adsorpsiyon Katsayısı
mV	Milivolt
n	Pürüzlülük
N/mm ²	Newton/milimetrekaare
nm	Nanometre
ppm	Milyonda bir (mg/l)
Q	Sabit Faz Elemanı
R_{ct}	Yük Transfer Direnci
R_m	Ortalama Pürüzlülük (nm)
R_p	Polarizasyon Direnci ($\Omega.cm^2$)
R_s	Çözelti Direnci ($\Omega.cm^2$)
R_v	Ortalama Vadi Derinliği
R_z	On Noktanın Ortalama Pürüzlülüğü
s	Saniye
Y_o	Çift Katmanlı Kapasitans Artışı ile İlişkili Elektriksel Parametre
Z	Empedans (Ω)
ΔG_{ads}	Adsorpsiyon Serbest Enerjisi
μm	Mikrometre
χ^2	Ki-Kare
ω	Frekans
Ω	Ohm

ÖZET

KALIP ŞARTLANDIRICI SERPANTİNİNDE OLUŞAN KOROZYONUN İNHİBİTÖR KULLANIMIYLA ENGELLENMESİ

İbrahim SARIOĞLU

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Hüsnü GERENGİ

Haziran 2021, 98 sayfa

Korozyon bir malzemenin bulunduğu ortamla kimyasal veya elektrokimyasal etkileşime girmesi sonucunda fiziksel ve kimyasal özelliklerini ve işlevini kaybetme olayıdır. Soy metaller hariç metallerin büyük bir kısmı atmosferik ve doğal koşullarda zamanla korozyona uğramaktadır. Metallerde korozyonu önlemek için çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemlerden biri de uygulaması kolay ve ekonomik bir yöntem olan korozyon inhibitörü kullanımıdır. Serpantin, bir sıvıdaki ısıyı başka sıvıya aktarmaya yarayan ısı değiştiricidir. Isı değiştiriciler, genellikle metal malzemelerden yapıldıkları için ısı transferi yaptığı sıvıyla etkileşime girerek korozyona uğramaktadır. Korozyona uğrayan serpantinde zamanla; ısı transferi kaybı, serpantinde birikinti, basınç kaybı, metal malzeme kaybı ya da düzensiz sıvı akışı durumları gözlemlenmektedir. Bu çalışmada; serpantin olarak kullanılan %99,9 saflıktaki bakır ısı değiştiricisinin yapay soğutma suyu (SCW) etkisiyle oluşan korozyon mekanizmasına korozyon inhibitörü olarak NaNO_2 etkisi Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) ve Dinamik Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (DEIS) yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır. Elektrokimyasal deneyler sonrası korozyona uğramış metal numunelerin yüzeyi Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM), Enerji Dağılımlı X-Ray Kırınımı (EDS), Optik Profilometri (OP) analizi ve Atomik Kuvvet Mikroskopu (AFM) ile incelenmiştir. Elektrokimyasal sonuçlar, inhibitör konsantrasyonu arttıkça bakırın korozyon direncinin arttığını ortaya çıkarmıştır. DEIS sonuçları, bakır korozyon mekanizmasının, 1000 ppm NaNO_2 konsantrasyonu ile 24 saatlik bir aradan sonra bile %50 engellenebileceğini göstermiştir. 2000 ppm NaNO_2 kullanımı ile %61,8'e varan inhibisyon etkinliği elde edilmiştir.

Anahtar sözcükler: İnhibitör, Korozyon, NaNO_2 , Serpantin, Yapay soğutma suyu.

ABSTRACT

PREVENTING CORROSION IN THE MOLD CONDITIONER SERPENTINE BY USING AN INHIBITOR

İbrahim SARIOĞLU

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical
Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Hüsnü GERENGİ

June 2021, 98 pages

Corrosion is the event that a material loses its physical-chemical properties and function as a result of chemical or electrochemical interaction with its environment. Except for the noble metals, most of the metals corrode over time under atmospheric and natural conditions. There are various methods to prevent corrosion in metals. One of these methods is the use of corrosion inhibitors, which is an easy to apply and economical method. A serpentine is a heat exchanger that transfers heat from one liquid to another. Since heat exchangers are generally made of metal materials, they are subject to corrosion by interacting with the liquid they transfer heat to. Over time, heat transfer loss, deposition in the serpentine, pressure loss, metal material loss or irregular fluid flow are observed in the corroded serpentine. In this study, the effect of NaNO_2 as a corrosion inhibitor on the corrosion mechanism caused by the effect of simulated cooling water (SCW) of a copper heat exchanger with 99.9% purity used as a serpentine was investigated by using Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) and Dynamic Electrochemical Impedance Spectroscopy (DEIS) methods. After electrochemical experiments, the surface of corroded metal samples was examined by Scanning Electron Microscope (SEM), Energy Dispersive X-Ray Diffraction (EDS), Optical profilometry (OP) analysis and atomic force microscope (AFM). Electrochemical results revealed that the corrosion resistance of copper increased as the inhibitor concentration increased. DEIS results showed that the copper corrosion mechanism can be inhibited by 50% even after a 24-hour break with a NaNO_2 concentration of 1000 ppm. With the use of 2000 ppm NaNO_2 , inhibition efficiency up to 61.8% was obtained.

Keywords: Corrosion, Inhibitor, NaNO_2 , Serpentine, Simulated cooling water.

1. GİRİŞ

Korozyon, metallerin çevre ile kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyona girerek termodinamik olarak en kararlı yapıya geçmesi sonucu bozulmasıdır [1]. Soy metaller hariç, tüm metaller zamanla bulunduğu ortama bağlı olarak korozyona uğramaktadır. Metallerin korozyona uğraması metalin yararlı ömrünü kısaltmaktadır. Dolayısıyla korozyon, çeşitli sanayi alanlarında ve ekonomide çok önemli bir rol oynamaktadır [2]. Korozyona uğrayan cihazların bozulması/arızalanması sonucu endüstriyel üretimin durması, korozyonun insan sağlığına, çevreye ve ekonomiye olumsuz etkisinin iyice anlaşılması gibi sebeplerden dolayı korozyon her zaman hayatımızda önemli bir problem olmuştur [3]. Metallerin ve alaşımların korunması bu nedenle önemlidir.

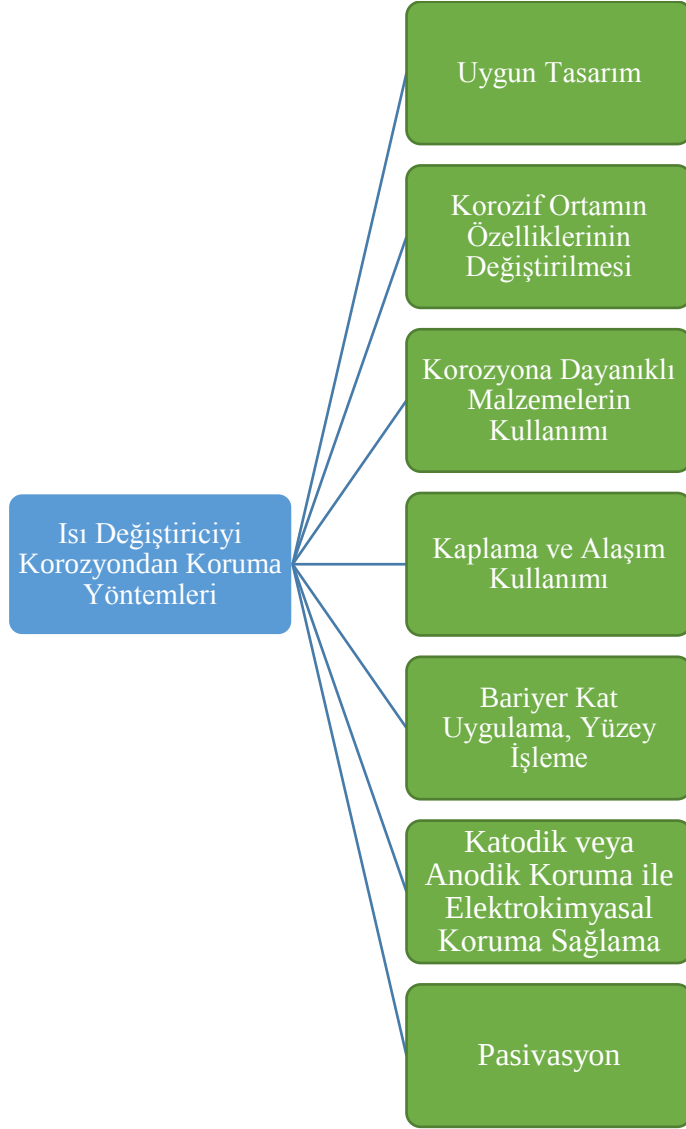
Plastik endüstrisi, dünyanın en hızlı büyüyen endüstrilerinden biridir. Günlük yaşamda kullanılan hemen hemen her ürün plastik kullanımını içermekte ve bu ürünlerin çoğu plastik enjeksiyon kalıplama yöntemi ile üretilmektedir [4]. Plastik enjeksiyon kalıbında ürünün düzgün çıkması için yüzeyinin ısıtılması, ürünün nihai şeklini alması için de soğutulması gerekmektedir. Isıtma işlemi için sıcaklık kontrol cihazı kullanılmaktadır. Plastik ham maddenin son şeklini alabilmesi için su ile soğutulması gerekmektedir ve soğutma işlemi chiller cihazıyla yapılmaktadır. Kalıbın sıcaklığını ayarlayabilmek için (şartlandırmak) chiller cihazı ve sıcaklık kontrol cihazına ihtiyaç vardır [5]. Plastik enjeksiyon kalıplama işlemi döngüsel bir işlemdir. Süreçte dört önemli aşama vardır. Bu aşamalar doldurma, paketleme, soğutma ve fırlatmadır. Soğutma işlemi, bir enjeksiyon döngüsünde döngü süresinin yaklaşık üçte ikisini kaplamaktadır. İşlem bir chiller veya soğutma kulesinde, su soğutma işlemi yapıp pompa vasıtasıyla kalıba gitmektedir [6].

Sıcaklık kontrol üniteleri plastik ve kauçuk endüstrilerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda, kalıp çalışma sıcaklığına kadar önceden ısıtılır ve seri üretim sırasında malzemenin ürettiği ısıyı dağıtır. Böylece aletin aşırı ısınması ve ürüne zarar vermesi önlenmektedir. Diğer uygulama alanları kimya ve ilaç endüstrilerinde, yiyecek, içecek ve ambalaj endüstrilerinde, metal ve ahşap işleme süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [7].

Enjeksiyon makinasının ve yüzeyinin ısıtılması, birçok imalat işleminde yaygın bir prosedürdür. Termoplastik kompozit bantların otomatik bant sargısı veya döşenmesi ile işlenmesinde kalıp yüzey ısıtmasına ihtiyaç vardır. Cihazın ısıtma işlemi sıcaklık kontrol cihazı vasıtasıyla yapılmaktadır. Sıcaklık kontrol cihazı, sistemdeki sıvıyı ısıtmak için daldırma bir elektrikli ısıtıcı kullanarak çalışmaktadır, soğutmak için ise cihazda bulunan ısı eşanjörü vasıtasıyla eşanjörden soğuk su geçerek soğutma gerçekleşmektedir. Sıcaklığı ayarlanmış su, cihazdan tezgâhlara ve kalıba göndermektedir.

Chiller (su soğutma cihazı) soğutucu akışkan sıvıyı kompresör vasıtasıyla sıkıştırarak, kondenser vasıtasıyla sıkıştırılmış soğutucu akışkanın sıcaklığını dış ortama vererek, kısılma vanası yardımıyla soğutarak eşanjör vasıtasıyla suyun soğutulmasını sağlayan makinadır. Chiller cihazı ısının kontrolünün gerektiği hastane, otel, alışveriş merkezi, iş merkezi, havalimanları gibi yaşam alanlarının konfor amaçlı soğutulmasında, veri merkezi gibi hassas yerlerin soğutulmasında, endüstride kalıp ve makinelerin sıcaklık kontrolü için soğutulmasında kullanılmaktadır [8].

Chiller ve sıcaklık kontrol cihazında su sıcaklığının kontrol edilebilmesi için ısı değiştiriciye ihtiyaç vardır. Birçok endüstri ve süreçte, ısı değiştiriciler ısıyı bir sıvıdan diğerine aktarmak için kullanıldığından hayati öneme sahiptir. Bu sıvılar, genellikle metalik malzemelerden yapılmış ısı eşanjörleri için aşındırıcı olabilmektedir. Isı eşanjörlerinin korozyon arızaları genellikle yüksek bakım ve onarım maliyetlerini içermektedir. Isı değiştirici borularının yüzeylerinde korozyon ürünleri ile karıştırılmış inorganik tortular oluşmaktadır, bu tortular ısı transferi ve akışkan-akış kütlelerinin etkinliğini azaltmaktadır [9], [10]. Ayrıca, bu tortular korozyona neden olmakta ve serpantinin ömrünü tehlikeye atmaktadır [11]. Sonuç olarak, bu endüstrilerdeki işletme maliyetleri artmaktadır ve üretimin durdurulması gerekmektedir [12]. 2001 yılında Amerika Birleşik Devletleri'ndeki her türlü korozyonun doğrudan maliyetinin yıllık olarak ülkenin gayri safi yurtiçi hasılasının (GSYİH) %3,1'ine denk geldiği hesaplanmıştır. Isı eşanjörlerinin de sıkça kullanıldığı elektrik enerjisi üretimi için, aynı çalışmada yıllık korozyon maliyetinin 6,9 milyar \$ olduğu tahmin edilmektedir. NACE International (2016) tarafından yapılan daha yeni bir çalışmada, yıllık küresel korozyon maliyetinin 2,5 trilyon \$ olduğu hesaplanmıştır [13].



Şekil 1.1. Isı değiştiricide korozyondan koruma yöntemleri.

Bu yöntemlerin her biri için avantajlar, dezavantajlar ve en ekonomik kullanım alanları vardır. Tüm korozyon problemleri için tek bir yöntem evrensel bir çözüm değildir [14] (Şekil 1.1). Korozyon kontrol önlemi uygulanmadan önce her problem ayrı ayrı incelenmelidir. Bu sorunlara en uygun teknik çözüme tesis kullanıcısı tarafından maliyet-fayda analizi yapılarak karar verilmelidir.

Soğutma sistemlerinde soğutma sıvısı olarak su kullanımı, endüstriyel bölgelerde bulunması, toksit olmaması, nispeten yüksek ısı kapasitesi ve termal iletkenlik nedeniyle yaygındır. Öte yandan, soğutma suyu sistemlerinin çalışmasında en önemli sorun metal parçanın korozyona uğramasıdır. Metal parçanın korozyonu aynı zamanda, kireç oluşumu ve mikrobiyolojik kirlenme, ısı eşanjörlerinin ısı transferini ve verimini azaltması sorunlarıyla cihazın çalışmasını etkilemektedir (Şekil 1.2) [15].



Şekil 1.2. Korozyona uğramış bir ısı değiştirici [16].

Bakır ve alaşımları, mükemmel elektriksel ve termal iletkenlikleri, makul derecede iyi mukavemeti, yüksek sünekliği ve mükemmel korozyon direnci nedeniyle önemli mühendislik malzemeleridir [17]–[19]. Bakır endüstride; bina inşaatı, enerji üretimi ve iletimi, elektronik ürün üretimi ve endüstriyel makine ve ulaşım araçlarının üretiminde kullanılmaktadır. Bakır elektrik tesisatı, ısıtma ve soğutma sistemleri telekomünikasyon bağlantılarının ayrılmaz bir parçasıdır. Bakır ve bakır alaşımları, korozyon direnci ve kolay şekil alabilme yeteneği ve yüksek ısı iletiminden dolayı ısı değiştiricilerde yaygın olarak kullanılmaktadır [20]. Bakır ve alaşımları, asit ve güçlü alkali çözeltilerde kolayca korozyona uğrarken, atmosfer şartlarında asil bir metaldir. Bulunduğu ortamdaki iyon yoğunluğu, pH, amonyak konsantrasyonu gibi diğer soğutma suyu özellikleri de soğutma sistemlerinde bakır alaşımlarının korozyonunu etkilemektedir. Örneğin, deniz suyu ve klorürlü ortamda önemli oranda korozyon gerçekleşmektedir [21]. Bakırın korozyona uğraması sonucu ısı değiştiricide; delinmeler, verim kaybı, toksik kimyasallar ortaya çıkmaktadır. Ayrıca hem işletme için hem de cihaz için büyük bir sorun teşkil etmektedir. Bakırın korozyonunu önleyebilmek için çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemler içinde bakır serpantini korumak için inhibitör kullanmak etkili bir yöntemdir [19].

Tarihsel olarak, inhibitörler mükemmel korozyon önleyici özelliklerinden dolayı endüstrilerde kabul görmektedir. İnhibitörler, düşük konsantrasyon da korozif ortama eklendiklerinde metalin bulunduğu ortamla reaksiyonunu etkili bir şekilde kontrol eden, korozyonu önleyen veya en aza indiren kimyasallardır [22]. Genellikle inhibitörlerin mekanizması; kimyasal yapısına göre (organik veya inorganik), etki mekanizmasına göre (anodik, katodik veya anodik katodik bir karışım olarak) ve özelliklerine göre (oksitleyici veya oksitleyici olmayan bileşikler) üç şekilde sınıflandırılmaktadır [23]. Metal yüzeyin tahrip olmasını veya bozulmasını önlemek için inhibitörler, korozyon korumasının en iyi

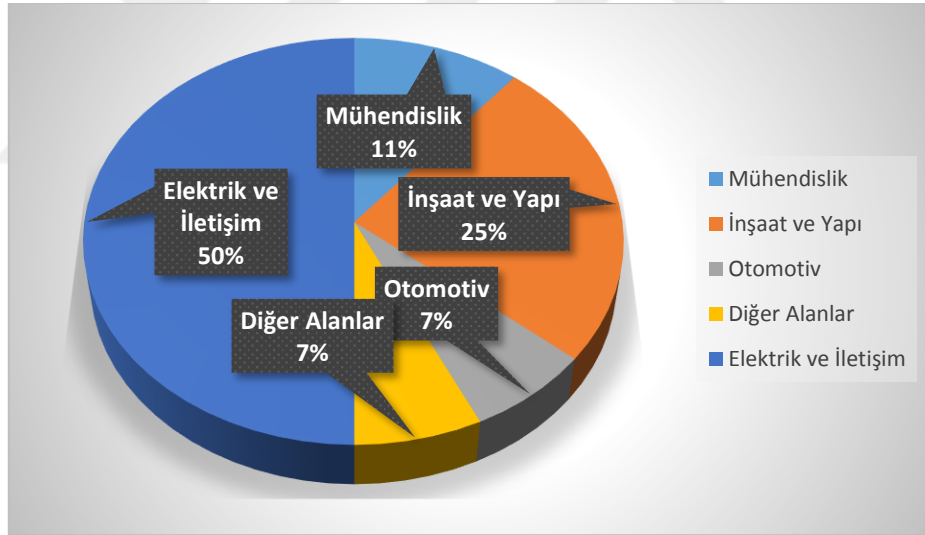
bilinen ve en yararlı yöntemlerinden biridir. Yöntem düşük maliyet ve geniş uygulama alanı nedeniyle korozyonu önlemek için endüstride başarıyla uygulanmaktadır [22].

Soğutma sistemleri, rafineri üniteleri, boru hatları, kimyasallar, petrol ve gaz üretim üniteleri, kazanlar ve su işleme, boyalar, pigmentler, yağlayıcılar vb. gibi inhibitörlerin uygulanabilir olduğu birçok endüstriyel sistem ve ticari uygulama vardır. Ancak metalleri etkili korumalarına karşın çevreye zarar vermemeleri bakımından ekolojik inhibitörler tercih edilmektedir [22]. Dolayısıyla (NO^- , WO^- , Mo) düşük toksisite dereceleri nedeniyle çevre dostu yeşil inorganik korozyon inhibitörleri endüstride daha fazla kullanılmaya başlanmıştır [24]. NaNO_2 anodik ve inorganik bir inhibitördür. Adından da anlaşılacağı gibi, anodik inhibitörler anodik korozyona (metal çözünmesi) müdahale etmekte ve metal yüzeyde pasif bir film oluşumu veya anodik reaksiyonu baskılayarak korozyon oranını azaltmaktadır. NaNO_2 , düşük maliyeti ve nispeten iyi korozyon önleme performansı nedeniyle literatürde büyük ilgi çekmektedir. Ayrıca, NaNO_2 diğer inhibitörlerle birlikte iyi bir performans (örneğin molibdat) göstermektedir [25].

Yapılan bu tez çalışmasında, sıcaklık kontrol ve chiller cihazlarında ısı değiştirici olarak kullanılan bakır serpantin suyla olan korozyon mekanizması incelenmiş ve ekolojik bir inhibitör olarak bilinen NaNO_2 'nin bakır serpantine olan koroziif etkisi elektrokimyasal yöntem olan Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) ve Dinamik Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (DEIS) yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır. Elektrokimyasal ölçümler sonrası kullanılan metal numunelerin yüzey morfolojisindeki değişim Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Enerji Dağılımlı X-Ray Spektroskopisi (EDS), Optik Profilometri (OP) ve Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) yöntemleri ile incelenmiştir.

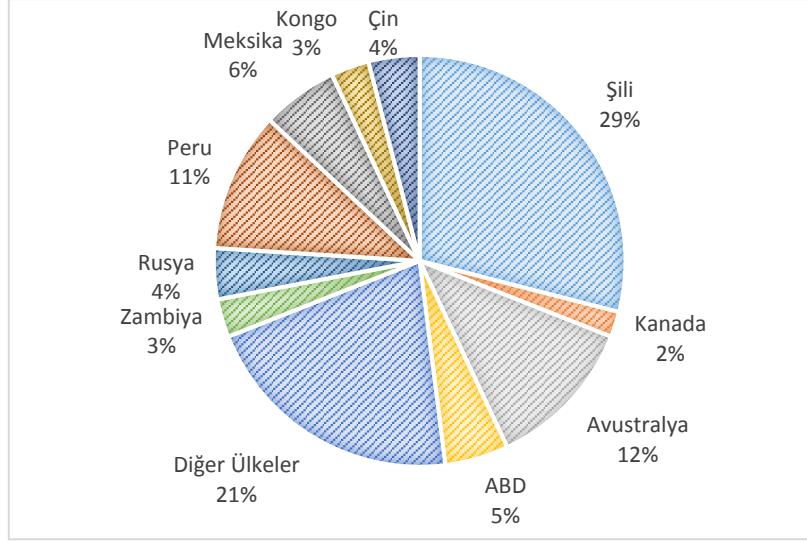
1.1. BAKIR

Atmosferik koşullar altında metalik gri olmayan iki metalden biri olan bakır, M.Ö 500 yılından beri bilinmektedir. İlk olarak Mısırlılar tarafından kullanılan bakır, M.Ö. 3000 yılından beri mekanik özelliklerini geliştirmek için alaşımlandırma yapılarak Anadolu, Yunanistan ve Hindistan’da kullanılmaktadır [26]. Diğer metaller gibi bakır da Dünya üzerinde sınırlı bir kaynaktır. Bakırın, modern toplum için en önemli metallerden biri olduğu, altyapı ve teknoloji açısından demir ve alüminyumdan sonra en önemli metal olduğu bilinmektedir [27]. Bakır ve alaşımları üstün fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, yüksek ısı iletkenlikleri, mükemmel korozyon dirençleri (özellikle taze ve tuzlu su soğutma sularında) ve üretim kolaylıkları nedeniyle ısı değişim uygulamasında kullanımı yaygındır [28]–[31]. ABD’de tüketilen miktarlar bakımından bakır ve alaşımları, elektronik endüstrilerinde, denizcilik endüstrilerinde, elektrik santrallerinde, ısı eşanjörlerinde ve soğutma kulelerinde tel, levha ve boru hatlarının üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 1.3) [32], [33].



Şekil 1.3. Bakırın kullanıldığı alanlar [16].

ABD Jeolojik Araştırmadan elde edilen en son verilere göre (Şekil 1.4), Dünya’da en çok bakır üreten ülkeler Şili, Avustralya ve Peru’dur [34].



Şekil 1.4. Dünyada bakır üretim oranı.

Türkiye’de ortalama blister bakır talebi 250.000 ton/yıldır. Yıllık 60.000 ton metal bakır eşdeğeri ve 350.000 ton cevher bakır konsantresi üretilmektedir. İzabe tesislerinde her yıl yerli cevher konsantrelerinden yaklaşık 35.000 ton bakır üretilmektedir. Türkiye’nin ihtiyaçlarını karşılamak için yılda 300-350 bin ton bakır metal ithal etmesi gerekmektedir [35]. Türkiye için bakırın korozyona uğraması GSYİH azalması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla bakır korozyondan korumak bakır ithal eden ülkeler için çok daha önemlidir.

Bakır, atmosferin ve birçok kimyasalın etkisine karşı dirençlidir, ancak sulu ortamda korozyona duyarlı olduğu bilinmektedir [19]. Bakır, serbest klorlu ev suyundan bile korozyona uğramaktadır [36]. Bakır veya diğer metaller çeliğin paslanmasına benzer bir şekilde oksitlenmektedir. Bu durum besleme hatlarındaki su akışını azaltmaktadır ve su kontrol yüzeylerini tahrip etmektedir. Isı değiştirici ve vanaların içinde-dışında sızıntılar oluşturmaktadır [37]. Bununla birlikte, çevre koşullarına bağlı olarak, oksijenin bulunduğu ortamda bakır yüzeyinde, klorür ve sülfat iyonları gibi agresif anyonlar sayesinde çukurcuk korozyonu meydana gelmektedir [38]. Bakırın yüzeyinde korozyon ve oksit tabakasının oluşması bakırdan yapılmış bir sistemin performansını olumsuz yönde etkilemektedir ve verimliliğini düşürmektedir (Şekil 1.5) [39]. Sızıntı, pas ve kir soğutma suyunda kullanılan bakır serpantininin performansını olumsuz şekilde etkilemektedir. Serpantin tıkanması veya delinmesi durumunda kalıp şartlandırıcı cihazının çalışması durmaktadır. Bu yüzden cihazın serpantinini değiştirmesi gerekmekte bu da işletmenin durması ayrıca işletme için maliyet demektir.



Şekil 1.5. Korozyona uğramış farklı bakır bazlı endüstrilerin şematik gösterimi [38].

Her yıl bakıra olan talep gittikçe artmaktadır. Dünya’da bakır rezervleri kısıtlı olduğu için bakırın korozyonunun önemi gün geçtikçe artmaktadır. Korozyonu önlemede ucuz ve uygulaması kolay bir yöntem olan inhibitörler, bakırın korozyon hızını azaltmak için kullanılan etkili bir yöntemdir [38]–[41]. Korozif ortamlarda veya klorür, sülfat gibi aşındırıcı iyonların varlığında bakır yüzeyinde pasif film oluşumu olasılığı düşük olduğu için agresif ortamlarda korozyon inhibitörleri kullanılmaktadır [38].

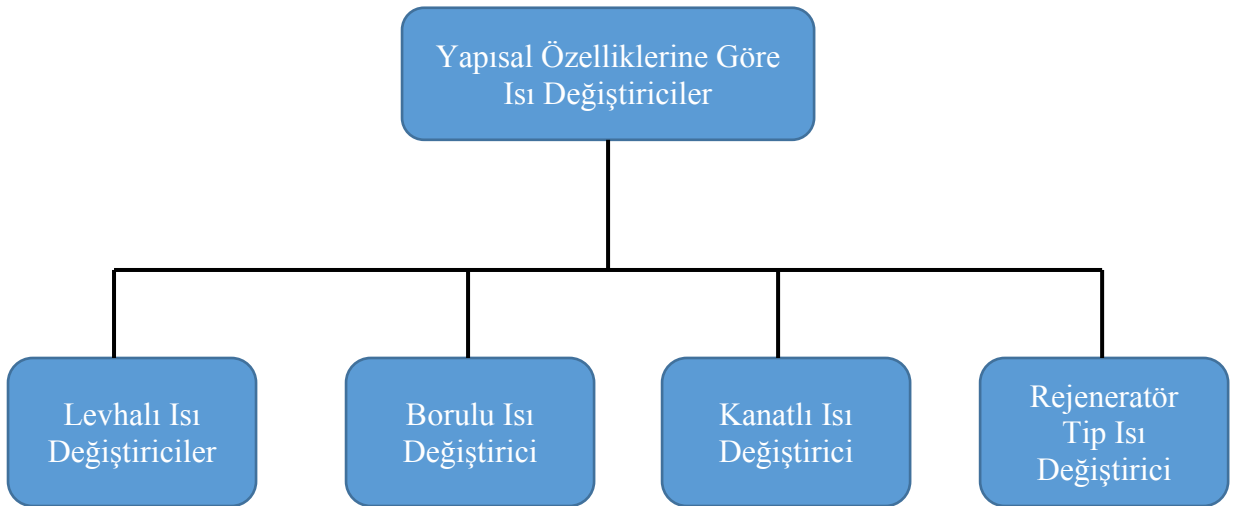
1.2. ISI DEĞİŞTİRİCİ

Isı değıştirciler, farklı sıcaklıklarda iki veya daha fazla sıvı akışı arasında ısı transferi için kullanılan cihazlardır [42]–[45]. Soğutma, konut ısıtma, elektronik soğutma, enerji üretimi, atık su arıtma ve ısı geri kazanımı ve yanma gibi işlemlerde ısıtma veya soğutma amacıyla iki veya daha fazla sıvı arasında ısı transferi yapabilmek için ısı eşanjörleri kullanılmaktadır [46].

Isı eşanjör yapımında ısıl iletkenliği yüksek bakır, titanyum, paslanmaz çelik, alüminyum gibi malzemeler kullanılmaktadır. Bakır; yüksek şekil alabilme yeteneği, yüksek ısı iletim kapasitesi ve mükemmel korozyon direnci sayesinde ısı değıştirci yapımında en çok kullanılan malzemelerden biridir.

1.2.1. Isı Değıştircilerin Sınıflandırılması

Isı değıştircilerin çeşitli şekilde sınıflandırılmaları vardır. Yapısal özelliklerine, akışkan fazlarına ısı transfer mekanizmalarına, akışkan sayısına, ısı geçiş yüzeyinin ısı geçiş hacmine oranına (kompaktlık), akışkan sayısına göre sınıflandırılmaktadır. Yapısal özelliklerine göre ısı değıştirciler dörde ayrılmaktadır (Şekil 1.6).



Şekil 1.6. Yapısal özelliklerine göre ısı değıştircilerin sınıflandırılması.

1.2.1.1. Levhalı Isı Değıştirci

Plakalı ısı eşanjörleri genellikle ince plakalardan yapılmaktadır. Plakalar düz veya oluklu tabakalardan oluşmaktadır. Levhalı ısı değıştirciler kabuk ve borulu ısı eşanjörlerinden önemli ölçüde daha az yer gerektirmektedir ve bu nedenle daha az ağırlığa sahiptirler

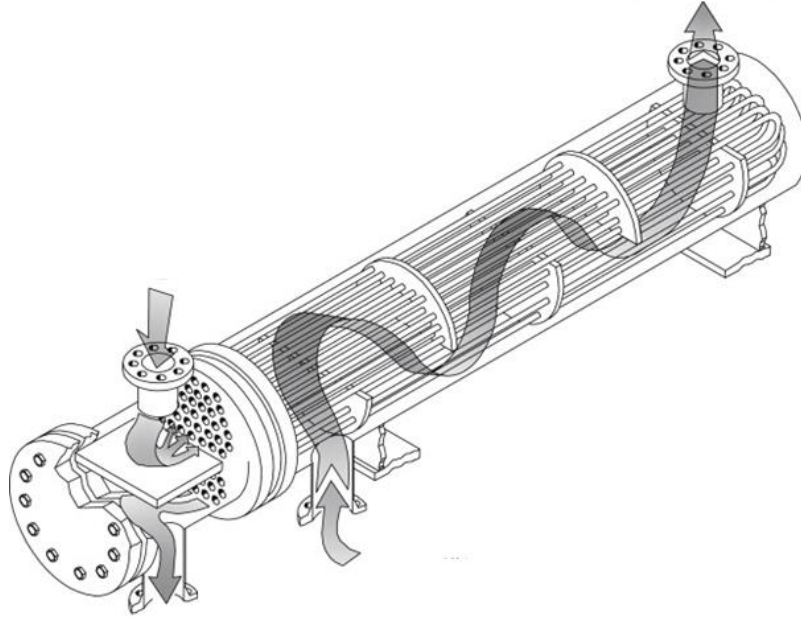


Şekil 1.7. Levhalı Isı Değiştiriciler.

Ancak, bu eşanjörlere çok yüksek basınçlara, sıcaklıklara ve sıcaklık farklılıklarına uyum sağlayamazlar. Ayrıca yüksek akış hızları ve korozyif ortamlarda plakalı ısı eşanjörleri korozyona karşı dayanıksızdır (Şekil 1.7) [47].

1.2.1.2. Borulu Isı Değiştirici

Borulu eşanjörler yaygın olarak kullanılmaktadır ve birçok boyutta, akış düzeninde ve tipte üretilmektedir. Çok çeşitli çalışma basınçlarına ve sıcaklıklarına uyum sağlamaktadır. İmalat kolaylığı ve nispeten düşük maliyetleri, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmalarının temel nedenleri olmuştur. Bu eşanjörler genellikle dairesel tüplerden yapılmaktadır, ancak bazı uygulamalarda eliptik, dikdörtgen veya yuvarlak/düz bükülmüş tüpler de kullanılmaktadır (Şekil 1.8). Bu tür ısı değiştiriciler çift-boru, gövde-boru ve spiral boru (serpantin) olarak üç çeşittir.



Şekil 1.8. Borulu ısı değıştirici.

Sarmal bobin ısı eşanjörleri, kapalı bir kabuk içinde birkaç kat sarmal tüpten oluşan kompakt bir kabuk ve tüp tasarımıdır (Şekil 1.9) [48]. Helisel borular, kompakt ısı eşanjörleri, kazanlar, buzdolapları, nükleer reaktörler, kimyasal tesislerin yanı sıra gıda, ilaç ve kriyojenik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sarmal bobinlerdeki ısı aktarım hızları düz borulara göre daha yüksektir, bu da endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır [49]. Bakır boru bobin daldırma ısı eşanjörü, düşük akış oranları için kabuk ve boru eşanjörlerinden daha verimlidir [50].



Şekil 1.9. Helisel borulu ısı eşanjör uygulaması.

1.2.1.3. Kanatlı Isı Değiştirici

Boru ve plakalı ısı eşanjörlerinde, kompaktlık ve termal iletkenliği arttırmak için ısı transfer katsayısının küçük olduğu sıvı tarafına kanat adı verilen ısıtma yüzeylerini genişleten çıkıntılar eklenmektedir. Bu şekilde, küçük bir hacimde daha büyük ısı transferi elde edilmektedir. Ancak, eklenen kanatlardan ek basınç düşüşlerine neden olduğu not edilmelidir. Bu bağlamda, kanat profillerini yapıcı bir şekilde seçmek önemlidir. Kanatların profillerine göre kanatlı kanatçık ısı değiştiricileri ve boru şeklinde kanatçık ısı değiştiricileri olarak iki kısma ayrılmaktadır. Düz, delikli, tırtıklı ve zikzak biçimli kanatlar, plaka fin ısı eşanjörlerinde paralel plakalar arasındaki yüzeylerin mekanik preslenmesi, lehimlemesi veya kaynaklanmasıyla belirlenmektedir. Boru kanadı ısı eşanjörlerinde, yüksek basınçlı sıvı (sıvı) dairesel veya oval kesite sahip bir borudan geçirilmektedir (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. Kanatlı ısı değiştiriciyle imal edilmiş kuru soğutucu.

1.2.1.4. Rejeneratör Isı Değiştirici

Rejeneratör tip ısı değiştirici depolama tip bir ısı değiştiricidir. Döner bir rejeneratörde, atık gazlar ve yanma havası zıt yönlerde hareket ederken, sürekli dönen bir eleman her iki akışı da kesmektedir. Havadan havaya ısı eşanjörü, özellikle HVAC veya buhar santralinde yanma havasını veya rejenerasyon havasını ön ısıtmak için kullanılan

rejeneratif tipte bir ısı eşanjörüdür. Sıcak gaz ve soğuk hava kanalları hem baca gazının hem de giriş havasının aynı anda hava ön ısıtıcısından akmasını sağlayacak şekilde düzenlenmiştir.

1.2.2. Isı Değiştirici Seçiminde Etkili Parametreler

Isı değiştiricilerde korozyon akan sıvıların ve temas halindeki ortamın agresif etkisi altında ısı eşanjör yüzeylerinin yapı malzemelerinin mekanik bozulmasını temsil etmektedir. Korozyona ek olarak malzemeye zarar veren etmenler arasında sürtünme (titreşim ve kaymaya maruz kalan yükler altındaki metaller arasındaki temas alanlarında meydana gelen korozyon) gibi ısı değiştirici tasarımı ve çalışması için önemlidir. Korozyon, ısı eşanjörünün çalışmasına etki eden bir unsurdur dolayısıyla hem yeni bir ısı eşanjörünün tasarımı hem de mevcut bir eşanjörün çalışması için dikkate alınmalıdır.

Bakır, termal olarak verimli ve dayanıklı ısı eşanjörleri için arzu edilen birçok özelliğe sahiptir. Her şeyden önce, bakır mükemmel bir ısı iletkenidir. Isı eşanjörlerinde bakırın diğer arzu edilen özellikleri arasında korozyon direnci, biyolojik kirlenme direnci, iç gerilmelere ve basınca karşı dayanımı, sünme kopma mukavemeti, yorulma mukavemeti, sertlik, termal genleşme, özgül ısı, antimikrobiyal özellikler, gerilme mukavemeti, akma dayanımı, yüksek erime noktası, iyi bir alaşım özelliği, imalat kolaylığı ve birleştirme kolaylığı özelliklerinden dolayı bakır ısı değiştiricilerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Eşanjör seçimi aşağıdaki yedi farklı özellikten oluşmaktadır;

- **Kullanılabilirlik:** Malzeme kullanılabilirliği sorunu, mühendisler ve tasarımcılar tarafından yıllar boyunca birçok kez ele alınan bir konudur ve birçok üretim düzeyiyle ilgili bir sorundur. Bir malzemenin ısı eşanjörün de kullanılabilmesi için; yüksek şekil alabilirlik, yüksek ısı iletkenliği ve korozyon direnci yüksek olmalıdır.
- **Sürdürülebilirlik:** Sürdürülebilirlik, endüstriyel kullanımda üretim süreçlerinin başarılması için önemlidir ve ürünün kullanılabilirliğini doğrudan etkilemektedir.
- **Mekanik stabilite:** Yorulma ömrü ve malzemenin hasara karşı mukavemeti ile ilgilidir. Bakır borulu helisel serpantin ısı eşanjör mekanik stabilitesi bakırın mekanik yüksek mekanik stabilitesi sayesinde yüksek mekanik stabilite göstermektedir.

- **Termal iletkenlik:** Belirli bir sıcaklık farkı için içinden ne kadar ısı iletileceğini belirleyen bir malzemenin özelliğidir. Bununla birlikte hem katı malzeme hem de gaz içerecek olan lifli veya gözenekli bir yalıtım ile ısı transferi, iletim, konveksiyon ve termal radyasyonun bir kombinasyonudur. Termal iletkenlik, malzeme seçiminde anahtar bir kriterdir. Isı değiştiricilerde; bakır, alüminyum, karbon çelik, paslanmaz çelik, nikel alaşımları ve titanyum gibi ısı iletkenliği yüksek malzemelerden imal edilmektedir [51].
- **Korozyon direnci:** Isı eşanjörlerinde en büyük problemlerden biri levhaların korozyonudur. Sonuç olarak; yeterli korozyon direnci veya korozyon payı olmadan, malzemeler genellikle beklenen tasarım ömrünün altında kalmaktadır. Buna göre korozyon direnci, malzeme seçiminde en önemli genel kriterlerden biridir.
- **Kirlenme direnci:** İşleme endüstrilerindeki ısı eşanjörlerinin kirlenmesi, enerji geri kazanımını ve belki de çevresel refahı tehlikeye atan kronik bir çalışma problemidir. Kirlenme oluşumunun hafifletilmesi, kirlenmenin eşanjör ısı transferi ve basınç düşüşü üzerindeki dinamik etkileri hakkında niceliksel bilginin olmaması nedeniyle sıklıkla engellenmektedir. Temiz ısı transfer yüzeylerinin korunması, güvenilir ve verimli enerji geri kazanımı için hayati öneme sahiptir.
- **Maliyet etkinliği:** Malzemelerin maliyet etkinliği, ürünleri yaygın kullanımında önemli bir faktördür. Bu faktör başlangıç maliyetinden etkilenmektedir. Belirli bir işi yapacak en az maliyetli malzeme ve ömrü boyunca, tam yaşam döngüsü maliyetinin üretici tarafından tespit edilebileceği şekilde belirlenmektedir [52].

Isı eşanjörleri ve diğer bileşenler için malzemeler yeterli mukavemet (uzun süreli ve kısa süreli), iyi termal yaşlanma özellikleri, ıslanma bozulmasına karşı direnç, üretilebilirlik ve iyi korozyon direnci göstermelidir.

1.3. KALIP ŞARTLANDIRICI

Yüksek verimlilik, iyi stabilite, ürünlerin geometrik esnekliği, parça üretim kalitesi özelliklerinden dolayı enjeksiyon kalıplama teknolojisi plastik parçaların üretimi için en yaygın kullanılan işlemlerden biri haline gelmiştir. Elektronik, otomotiv, medikal endüstrileri ve günlük ihtiyaçlar için parça üretiminde plastik enjeksiyon yöntemi kullanılmaktadır. Enjeksiyon kalıplama, kalıbın ısıtılması, kalıba ergimiş plastik ham maddenin doldurulması, paketlenmesi, soğutulması, kalıptan çıkarılması işlem aşamalarından oluşan döngüsel bir işlemdir. Soğutma işlemi en önemli süreçtir çünkü reçine eriyiği boşluğa akacak ve nihai ürün şeklini alacaktır. Hammaddeye şekil vermek için etkili olan parametreler; malzeme, parça ve kalıp tasarımlarının faktörlerinin yanı sıra, kalıp sıcaklığı, basınç ve enjeksiyon hızı gibi diğer parametreler parça kalitesinde önemli bir etkinliğe sahiptir. Parça kalitesini tüm bu süreçler etkilemektedir. Bu nedenle, kalıp sıcaklığının kontrolü kalıplama işlemi ve ürünlerin kalitesi için önemlidir [53].

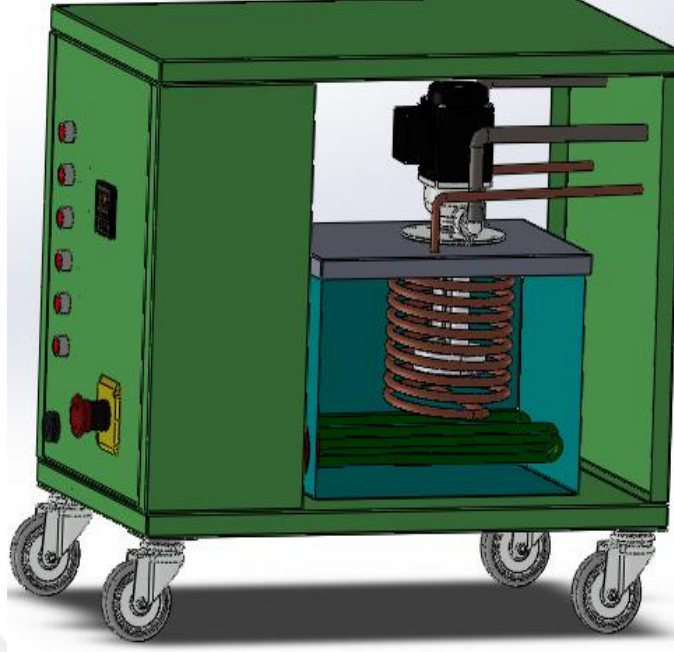
Ham maddeden en iyi performansı alabilmek için kalıbın ısıtma ve soğutma sistemleri hassas olmalıdır. Bu faktörü sağlayabilmek için kalıp şartlandırıcı cihazlarını kullanmak büyük avantaj sağlamaktadır [54]. Enjeksiyon makinasının kalıp sıcaklığını ayarlayabilmesi için 2 tip cihaza ihtiyaç vardır.

- Sıcaklık Kontrol Cihazı
- Chiller (Su Soğutma) Cihazı

2 cihazda sistemde pompa vasıtasıyla su dolaştırarak ham maddenin olması gereken sıcaklığına getirerek sistemdeki suyun sıcaklığı ayarlanmaktadır [55].

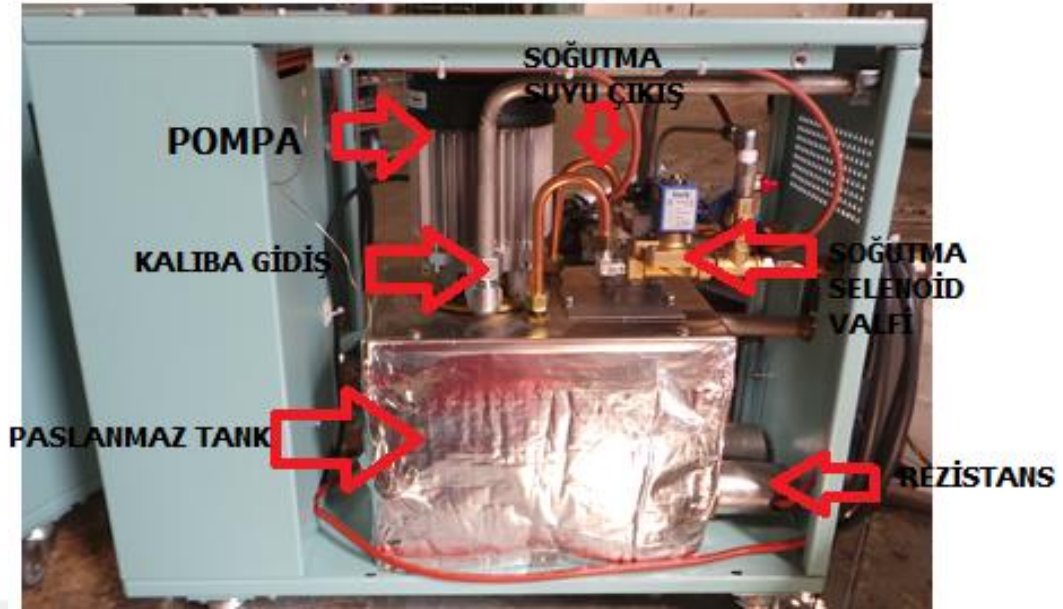
1.3.1. Sıcaklık Kontrol Cihazı

Sıcaklık kontrol cihazı, (TCU) tipik olarak endüstriyel bir işlemi önceden ısıtmak ve istenen sıcaklığı korumak için kullanılmaktadır. Bir TCU, sistemdeki sıvıyı ısıtmak için daldırma veya sürekli bir elektrikli ısıtıcı kullanarak çalışmaktadır, daha sonra sıcaklığı ayarlamış su TCU'dan tezgâhlara ve kalıba göndermektedir. Kullanılan sıvı, sıcaklık aralığına bağlı olarak su, basınçlı su veya yağdır. Genellikle bu $T < 95\text{ }^{\circ}\text{C}$ ise su, $T < 150\text{--}160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ise basınçlı su ve $T < 200\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasındaki yağdır [56].



Şekil 1.11. Sıcaklık kontrol cihazının şematik çizimi.

Şekil 1.11’ da görülen kalıplama aletlerinin, özellikle kalıpların, yüzeyin ısıtılması, birçok imalat işleminde yaygın bir prosedürdür. Örneğin, polimer dökümde kullanılan enjeksiyon kalıpları (enjeksiyon kalıplama dahil) genellikle ısıtılmaktadır ve tekrar soğutulmaktadır [57]. Kalıpların yüzeyini ısıtmak için bir dizi olasılık vardır. Örneğin, kalıp yüzeyinin içini veya dışını konveksiyon ile ısıtmak için bir termal sıvı kullanılmaktadır. Diğer yöntemler arasında radyant ısıtıcıların, kartuş ısıtıcılar gibi elektrik dirençli ısıtıcıların veya endüktif ısıtma elemanlarının kullanımı yer almaktadır [5]. Fakat, çalışmak için büyük miktarda elektrik tüketmektedir ve soğutma ekipmanı mevcut değildir. Doğal enerji tasarrufu, yüksek sıcaklık spektrumu, hassas sıcaklık kontrolü ve hızlı sıcaklık kontrolü nedeniyle (TCU), diğer sistemlere göre çok sayıda avantaj sunmaktadır [58]. Kalıptaki ısıtma ve soğutma kanalları, Şekil 1.12’de gösterildiği gibi, plastik işlemede döküm kalıplarının ısıtılması ve soğutulması için en basit ve en yaygın kullanılan yöntemdir [5]. Hammadde doldurma aşamasında kalıp sıcaklığının yükselmesi enjeksiyon kalıplamada kalıp sıcaklığını koruyarak, akış iletkenliği artırmaktadır [59]. Yüksek kalıp sıcaklığına ulaşmanın en ucuz yolu, 95 °C kadar yüksek sıcaklıklarda su çalıştırmaktır [54].



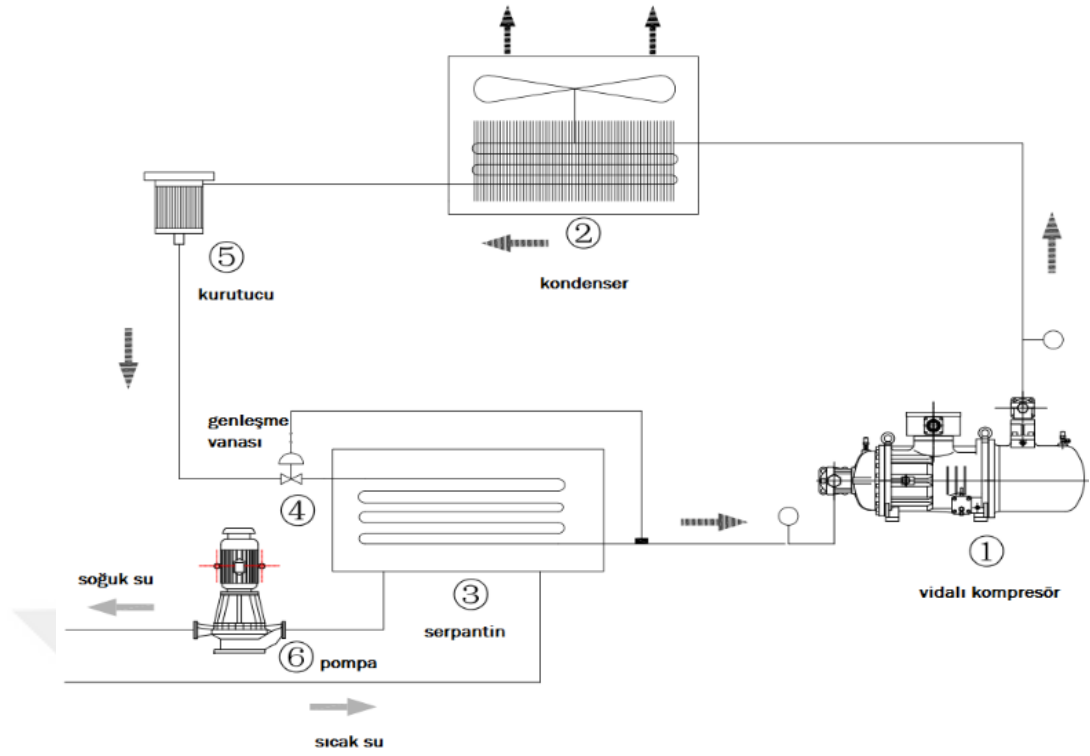
Şekil 1.12. 9 KW'lık su ısıtma kapasitesine sahip (TCU).

1.3.2. Chiller (Su Soğutma Cihazı)

Chiller cihazı; Su soğutucu, hava veya su soğutmalı kondansatörü içeren genel bir paketi tanımlayan geniş bir terimdir.

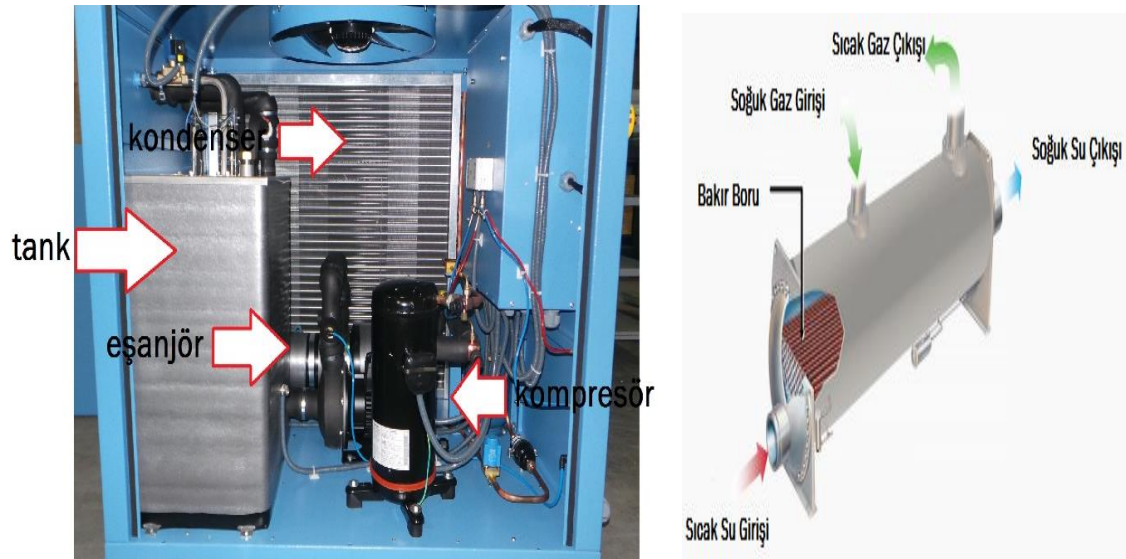
Chiller, kompresör tarafından buhar-sıkıştırma ya da soğurma soğutma çevrimi yoluyla, sudan ısıyı uzaklaştıran bir makinedir (Şekil 1.18). Sistemde sırayla şu işlemler gerçekleşmektedir.

1. Sıkıştırma: Kompresör cihazıyla düşük basınçlı soğutucu gaz sıkıştırılmaktadır, böylece mekanik enerji harcanarak basıncı arttırılmaktadır. Artan basınç ile sıcaklık da artmaktadır.
2. Yoğunlaşma: Yüksek basınçlı, yüksek sıcaklıklı gaz, kondensere gönderilerek dış ortam havası veya bir “soğutucu” görevi gören su ile soğutulmaktadır ve yüksek basınçta sıvı bir forma yoğunlaşmaktadır.
3. Genişletme: Yüksek basınçlı sıvı genişleme valfindeki bir çukurdan geçmektedir ve böylece basınç azalmaktadır. Basıncı azaltılan soğutucu gazın sıcaklığı düşmektedir.
4. Buharlaşma: Düşük basınçlı soğutucu gaz, eşanjöre girerek iç ortamdaki suyu soğutmaktadır ve gaz veya buhar formuna buharlaşmaktadır. Düşük basınçlı buhar kompresöre yönelmektedir ve işlem tekrar etmektedir [60].



Şekil 1.13. Su soğutma cihazı şeması [61].

Soğutucu gaz tarafından ısı değiştiricide soğutulan su pompa makinasıyla sirküle edilmektedir (Şekil 1.19) [62]. Cihazda soğutulan su; orman ürünleri, plastik sanayisi, çelik, petrol, kimyasallar ve gıda işleme endüstrilerinde kullanılmaktadır [63].



Şekil 1.14. Tipik bir su soğutma cihazı ve eşanjörü.

1.4. KOROZYON

Metaller doğada cevher halinde termodinamik olarak kararlı bir yapıda bulunmaktadır (FeO, CuO, Al₂O₃...). Metal cevheri bir dizi işleme tabii tutarak saf metal elde edilmektedir (Fe, Cu, Al ...). Ancak saf metal atmosferik ortamda kararsızdır. Bu yüzden metal bulunduğu ortamla kimyasal veya elektrokimyasal etkileşime girmesi sonucu daha kararlı bir yapıya dönüşerek özelliğini ve işlevini kaybetmektedir. Soy metaller (platin, altın, paladyum) hariç metallerin büyük bir kısmı atmosferik ve doğal koşullarda zamanla az veya çok korozyona uğramaktadır.

Korozyonun etkilediği 3 ana etmen vardır: Ekonomi, güvenlik ve çevre.

- Boruların, tankların, makinelerin metal bileşenlerinin, gemilerin, köprülerin korozyonu, malzeme ve beraberindeki ekonomik kayıplara neden olmaktadır.
- Basıncılı kaplar, kazanlar, toksik kimyasallar için metalik kaplar, türbin kanatları ve rotorlar, köprüler, uçak parçaları ve otomotiv direksiyon mekanizmalarının arızalanmasına (felaketle sonuçlanan) neden olarak cihazın güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Güvenlik, nükleer santraller için ekipman tasarımında ve nükleer atıkların bertaraf edilmesinde kritik bir husustur.
- Korozyon nedeniyle metal kaybı, sadece metalin değil, aynı zamanda metal yapıları üretmek ve imal etmek için kullanılan enerji, su ve insan çabasının israfıdır. Buna ek olarak, aşınmış ekipmanların yeniden inşası, metal, enerji, su ve insan için tüm bu kaynakların daha fazla yatırılmasını gerektirmektedir [64].

Metalleri korozyondan korumak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

Bu yöntemler;

- Elektrokimyasal yöntemler; katodik ve anodik koruma
- Kimyasal yöntemler; ortama inhibitör ilavesi, söz konusu ortama dayanıklı bir metal veya alaşımın seçilmesi
- Ortam şartlarının kimyasal bileşiminin değiştirilmesi

Bu yöntemler arasında inhibitör kullanımı; ucuz ve uygulaması en kolay yöntemlerden biridir [65], [66]. Korozyon önleyici olan inhibitörler korozyon hızının kabul edilebilir bir seviyeye düşürülmesiyle sonuçlanan kimyasal bir maddedir [38], [67].

1.4.1. Bakırda Korozyon Mekanizması

Bakır, korozyona karşı direnç özelliklerine rağmen, halojenürler, sülfatlar, vb. gibi birçok agresif iyonun neden olduğu sulu korozyona maruz kalmaktadır. Soğutma sistemlerindeki inhibitör uygulaması, yalnızca agresif iyonlara karşı değil, aynı zamanda uzun süre soğutma suyu sistemlerindeki mikroorganizmalar tarafından kirlenmenin de neden olduğu korozyona karşı etkilidir [68]. Ekipmanın çalışma ömrü ve ısı eşanjörünün etkinliği, bakırın korozyona karşı korunmasına bağlıdır.

Yapay soğutma suyu (SCW); kazanlar, kondansatörler, ısı eşanjörleri, boru hatları, ekonomizörler vb. endüstriyel birimlerin ayrılmaz bir parçasıdır. Düşük ve yüksek pH değerleri, aşınmaya neden olmaktadır. Bakır oldukça inört bir metaldir ancak SCW'deki klorür, sülfat, karbonatlar ve bikarbonatlar gibi agresif iyonlar bakırın bozulmasına ve aşınmasına neden olmaktadır. Bakır korozyon inhibitörleri ile ilgili son yıllarda artan araştırma yayınları bu konunun önemini göstermektedir (Denklem 1.1, Denklem 1.2) [69].

Anodik Çözünme :



Bakır klorür, seyreltilmiş sodyum klorürde hafifçe çözünmekte ve bakır oksit üretmek için reaksiyona girmektedir. Bu da bakır oksit (Cu_2O , kalın ölçeklerin ana bileşeni) olarak da adlandırılmaktadır ve suda çözünmüş tuzların varlığında daha sonra bakır hidroksite ($CuO/Cu(OH)_2$), atasamit ($Cu_2(OH)_3Cl$) veya malakite ($CuCO_3.Cu(OH)_2$) dönüşmektedir. SCW'deki çözünmüş tuzlar sadece korozyona değil aynı zamanda kireçlenme ve birikimlere de yol açmaktadır. Normalde, soğutma sistemlerindeki bakır, daha sonra $CuO/Cu(OH)_2$ 'ye dönüşen koruyucu bir pasif Cu_2O tabakası oluşturma eğilimindedir ve bu, elektrokimyasal işlemin potansiyelini ve bakırın pH'ını kontrol ederek doğrulanabilmektedir [70], [71]. Daha yüksek sıcaklıklar, $Cu(OH)_2$ 'nin tamamen CuO 'ya dönüşmesine yol açmaktadır, ancak analiz oda sıcaklığında yapıldığından pasif tabakada baskın bir $Cu(OH)_2$ varlığı beklenmektedir.

Klorür, temel pH değerlerinde bile bakır için özellikle aşındırıcıdır. Klorür ve sülfatların bakırın bozunmasını aksi olarak hızlandırdığı iyi bilinmektedir. Küçük agresif anyonlar

bu filminden yüksek pozitif yük yoğunluğuna sahip alanlara geçmektedir. İki değerlik yüklü oksijen türleri için tek değerlikli klorür türlerinin ikamesi, toplu çözelti içinde Cu^{2+} iyonlarının salınmasına (korozyon) yol açarak gerçekleşebilmektedir. SCW’de bulunan bikarbonat iyonları ile kalsiyum ve magnezyum çökeltilmiş bir film oluşturarak bakırı biriktirirken ve korurken, bu birikmiş tabakaların altında da bölgesel korozyon meydana gelebilmektedir. Bu nedenle, bu senaryolarda bakır metalinde çukur korozyonunun bolca meydana gelmesi beklenmektedir.

Bakır korozyonunun üstesinden gelmek için, korozyon önleyiciler en uygun ve ekonomik seçeneklerdir. Korozyon inhibitörleri inorganik veya organik bileşikler ve bunların azoller, aminler ve amino asitler gibi türevleri, bakır ve alaşımlarına etkili koruma sağlamaktadır. Bu koruma, kimyasal bileşiğin şelasyon etkisine ve/veya inhibitör ile metal yüzey arasında metal reaksiyonunu ve çözünmesini önleyen bariyer tabakasının oluşumuna atfedilmektedir. Bariyer tabakası, bakır atomunda azot, kükürt gibi elektron bağışlayan atomlarla koordinatif bağlar oluşturan boş d orbitallerinin varlığına veya inhibitörün heterosiklik kısmı aracılığıyla aromatik halkalar arasındaki güçlü π -etkileşimine atfedilmektedir. Sodyum, soğutma suyu sistemlerinin korozyonunda etkisi fark edilemeyen nötr bir türdür. Bir araştırma makalesinde, SCW’de bakırın korozyonu üzerindeki etkisini kontrol etmek için sodyum nitrit kullanılmıştır. Nitritin bakırın anodik çözünmesini baskılayacağı varsayılmış ve kanıtlanmıştır [71]. Mevcut araştırma makalesinin yazarları, SCW’de bakırın korozyon inhibisyonunda sodyum nitritin oynadığı kesin rolü açıklamaya çalışmışlardır. Bir başka çalışmada açıklanan nitrit iyonunun inhibisyon mekanizması, nitritin bakır yüzeyine adsorpsiyonu yoluyla ilerlediğini ve ardından oksijen iyonlarının oluşumuna yol açan bir indirgeme reaksiyonuna girdiğini göstermektedir (Denklem 1.3) [69], [72].



Nitrit iyonlarının indirgenmesi, bakır iyonlarının bakıra oksitlenmesini uyaran O^{2-} iyonları formunda oksijen oluşumuyla sonuçlanmaktadır. Alkali bir çözeltide, metal yüzey üzerinde kararlı pasif CuO/Cu(OH)_2 filminin oluşmasına neden olmaktadır.

1.4.2. Soğutma Suyu Sistemlerinde Korozyon

Soğutma suyu sistemleri çevreye atık olarak verilen ısıнын önlenmesi için kullanılmaktadır. Soğutma suyu sistemleri; kuleler, sirkülasyon suyu pompaları, boru

hatları ve ısı eşanjör şebekesinden oluşmaktadır [73]. Soğutma suyu sistemleri petrol rafinelerinde ve kimyasal tesislerde, ayrıca evlerde, fabrikalarda ve kamu binalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [74].

Bakır, mükemmel elektriksel ve termal iletkenliği nedeniyle çeşitli soğutma suyu sistemlerinde sıklıkla kullanılan en önemli metallerden biri olarak kabul edilmektedir [75], [76]. Bakır, yarı soy bir metaldir, ancak agresif ortamda korozyona duyarlı olduğu bilinmektedir [77]. Zamana bağlı olarak soğutma sistemlerinde bakırın farklı korozyon tipleri görülmektedir [78]. Soğutma suyu sistemlerinde bakırda görülen korozyon tipleri;

1.4.2.1. Genel Korozyon

Genel korozyon, bir yüzeyden çevreye düzgün bir metal çözünmesidir. Soğutma suyu sistemlerinde bakır, soğutma suyu pH'ına ve agresif iyonların varlığına bağlı olarak genel korozyona maruz kalabilmektedir.

1.4.2.2. Çukur Korozyonu

Bakırın yüzeyinde korozyondan koruyan ince oksit tabaka oluşmaktadır. Bu oksit tabaka kırılırsa, sudaki agresif iyonların varlığı veya pasif tabakalarda ya da ortamda heterojenlik nedeniyle hızlı bir noktasal saldırı meydana gelmektedir. Bu saldırı şekli, malzemede hızla yayılabilen ve birkaç ay içinde bir tüpü delebilen bir çukur yaratmaktadır (Şekil 1.15).



Şekil 1.15. Bakırda çukurcuk korozyonu.

1.4.2.3. *Çatlak Korozyonu*

Soğuk işlem veya kaynak işlemi görmüş ve zorlu agresif ortamda çalışan metal çatlamlara neden olabilir. Soğutma suyu amonyak içerdiğinde bakır gerilme korozyonu çatlamasına karşı hassastır.

1.4.2.4. *Galvanik Korozyon*

Farklı elektrot potansiyellerine sahip iki metal iletken bir aşındırıcı çözeltiye daldırıldığında, elektrik akımı daha az asil metalden (anot) daha asil metale (katot) akacak ve daha az asil metalin korozyonuna neden olmaktadır. Bakır, soğutma suyu sisteminde yaygın olarak kullanılan karbon çeliğine göre genellikle daha asil bir metaldir. Karbon çeliği, alüminyum veya çinko gibi daha az asil alaşımların çözünmesine neden olabilirler.

1.4.2.5. *Erozyon Korozyonu*

Bakır, kendini çevreden koruyan ince bir pasif tabakaya sahiptir. Soğutma sistemindeki sıvı hızı, pasif tabakayı kesme kuvvetleri tarafından kaldırarak kadar yüksek olduğunda, altındaki metal suya korunmasız bırakılmakta ve metal çözünmesi meydana gelmektedir. Ardından yeni pasif tabakanın oluşumu ve sıvının kesme kuvvetleri tarafından tekrar çıkarılmaktadır. Bu işlemler doğada mekanik ve elektrokimyasal olup, her ikisi de metalin bozulmasına katkıda bulunmaktadır. Soğutma suyu sistemlerinde, yanlış tasarım veya üretim sorunları aşırı su akışına ve ardından erozyon-korozyona neden olmaktadır [79].

1.4.2.6. *Aralık Korozyonu*

Bakır borunun bir kısmı, soğutma suyundan tortular veya büyük mafsallara ya da lastik conta gibi mühendislik sorunları ile korunduğunda, bu alanda yerel olarak aralık korozyonu oluşmaktadır [80].

Soğutma suyu sistemlerinde bakırın korozyonu ciddi bir sorundur ve bakır korozyon oranının düşürülmesi için su sistemleri yoluyla korozyon inhibitörlerinin kullanımı çok önemlidir. İnorganik inhibitörlerin kullanımı, soğutma sistemlerinde bakırın korunması için en pratik ve etkili yöntemlerden biridir [78].

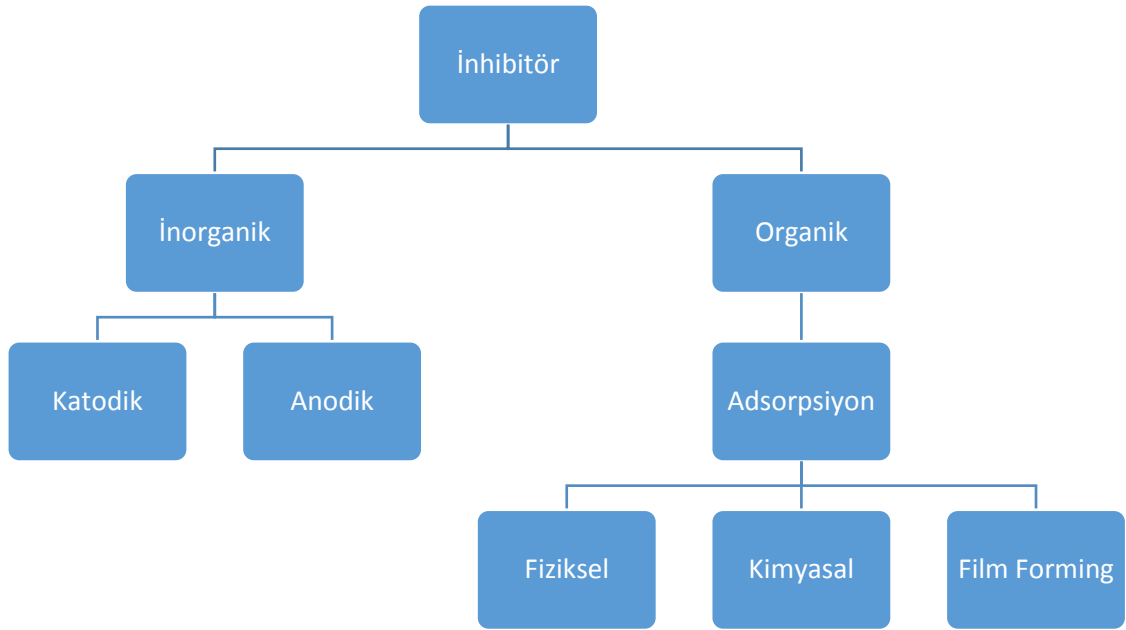
1.5. İNHİBİTÖRLER

Metallik yüzeylerin korozyonu, korozif ortama kimyasal bileşikler eklenerek kontrol edilebilmekte veya azaltılabilmektedir. Bu korozyon kontrolü formuna inhibisyon denir ve eklenen bileşikler korozyon inhibitörleri olarak bilinir [1]. İnhibitörler; korozyonu

önleme kolaylığı, etkinlik ve tekniğin uygun maliyetli olması nedeniyle, metal kaybını azaltmada korozyon inhibitörlerinin kullanımına büyük önem verilmektedir. Metal korozyon inhibitörleri, aşındırıcı ortama az miktarda eklendiğinde metal çözünme oranını baskılayan maddelerdir. Bu maddeler, metalde geçirimsiz bir tabaka (inorganik inhibitörler) oluşturmak üzere oksitlenmesiyle veya metal yüzeyinde heteroatomlar ve/veya çift bağ (organik inhibitörler) yoluyla adsorbe ederek, ortamda bulunan agresif iyonların metal yüzeye erişmesini engelleyen bir hidrofobik tabaka oluşturmasıyla işlev görmektedir. Bununla birlikte, metal korozyon inhibitörü olarak nitelendirilen tüm maddeler her korozi ortamda inhibitör olarak kullanılamaz. Metal korozyon inhibitörünü seçmek için belirli kriterler vardır. Temel olarak, metal korozyon inhibitörü olarak kullanılacak bir madde, metal yüzey üzerinde geçirimsiz olmayan, ancak korozi iyonların metal yüzeye erişmesini engelleyecek kadar sert ve kompakt olan koruyucu film oluşumunu indükleyebilmelidir [81]. Bunun yanı sıra, az miktarda ortama eklenen inhibitör korozi etkiyi durdurmalıdır. Ayrıca; düşük maliyetli ve ekosistem için zararsız olmalıdır. Ne yazık ki, iyi engelleyici özelliğe sahip olduğu tespit edilen inhibitörlerin çoğu, çevresel konular veya yüksek fiyatları dolayısıyla kullanışlı değildir [82].

Inhibitörler, organik veya inorganik bileşikler olarak sınıflandırılmaktadır ve genellikle sulu ortamlarda çözülür. En etkili inorganik inhibitörlerden bazıları karbonatlar, kromatlar, nitritler, silikatlar ve fosfatlardır. Organik inhibitörler, aminler, azot bileşikleri, tioeterler, tioalkoller, tioamidler, tiyüre ve hidrazin gibi kükürt bileşiklerini içermektedir.

Ayrıca, metale ilişkin elektrokimyasal reaksiyon ve bunların çevre korozyon inhibitörleri (inorganik inhibitörler) üzerindeki etkilerine istinaden anodik, katodik veya karma korozyon inhibitörleri olarak da sınıflandırılmaktadır (Şekil 1.16).



Şekil 1.16. Korozyon inhibitörlerinin sınıflandırılması [83].

1.5.1. Organik İnhibitör

Organik inhibitörlerin genellikle heteroatomları vardır. O, N ve S'nin daha yüksek bazikliğe ve elektron yoğunluğuna sahip olduğu ve bu nedenle korozyon önleyici olarak işlev gördüğü bilinmektedir. O, N ve S, metal yüzeyinde adsorpsiyon prosesi için aktif merkezlerdir. İnhibisyon etkinliği, $O < N < S < P$ dizisini takip etmelidir. Mevcut veriler, organik inhibitörlerin çoğunun yüzeydeki su moleküllerini değiştirerek ve kompakt bir bariyer oluşturarak metal yüzeye adsorbe ettiğini göstermektedir. İnhibitör moleküllerinde bağlanmamış (yalnız çift) ve p-elektronların mevcudiyeti, inhibitörden metale elektron transferini kolaylaştırmaktadır. İnhibitörden metal yüzeye elektronların transferini içeren bir koordinat kovalent bağı oluşturulabilir [84].

Organik bir inhibitörün performansı, fonksiyonel gruplar gibi bileşiğin kimyasal yapısı ve fizikokimyasal özellikleri, verici atomdaki elektron yoğunluğu, p-orbital karakteri ve molekülün elektronik yapısı ile ilgilidir. İnhibisyon, (i) moleküllerin veya iyonlarının anodik ve/veya katodik sahalarda adsorpsiyonuna, (ii) katodik ve/veya anodik aşırı voltajda artmasına ve (iii) koruyucu bir bariyer filmin oluşumuna bağlı olmaktadır. İnhibitörlerin etkisine katkıda bulunan bazı faktörler;

- Zincir uzunluğu,
- Molekülün büyüklüğü,
- Bağlanma, aromatik/konjugat,

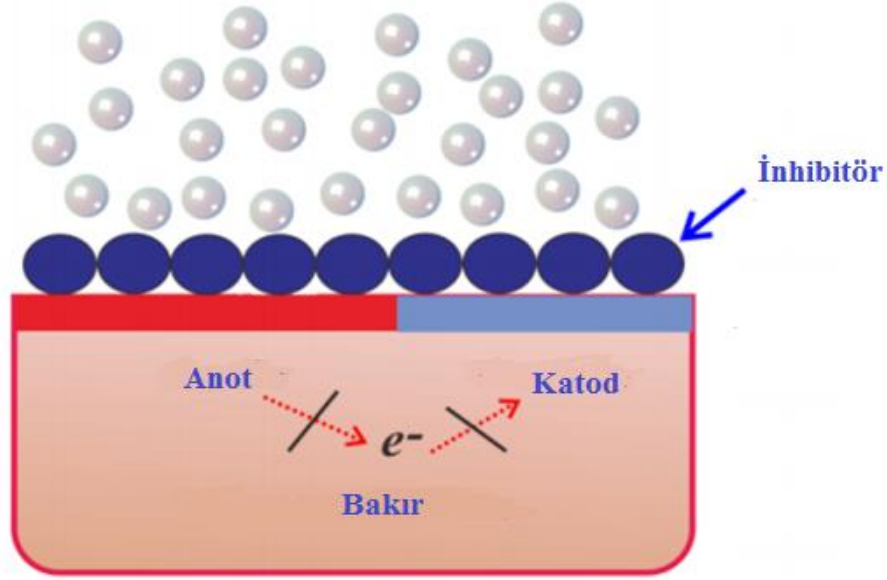
- Substrata bağlanma gücü,
- Çapraz bağlama kabiliyeti
- Ortamdaki çözünürlük.

İnhibitörlerin rolü, asit saldırısına karşı bir veya birkaç moleküler tabakanın bariyerini oluşturmaktır. Bu koruyucu eylem genellikle adsorbe edilen maddenin yükünde bir değişiklik ve yükün bir fazdan diğerine aktarılmasını içeren kimyasal ve/veya fiziksel adsorpsiyon ile ilişkilidir. Alternatif korozyon inhibitörleri arasında, konjüge sistemde azot, kükürt ve/veya oksijen ile polar fonksiyonlar içeren organik maddelerin iyi inhibe edici özellikler sergilediği bilinmektedir. Bu tür bileşiklerin inhibe edici karakteristikleri, polar grup, adsorpsiyon prosesi için reaksiyon merkezi olarak işlev görürken moleküllerinin adsorpsiyon yeteneğinden kaynaklanmaktadır. Elde edilen adsorbe edilmiş film, metali korozyondan ayıran bir bariyer görevi görmektedir ve inhibisyonun etkinliği, belirli koşullar altında oluşturulan adsorpsiyon katmanlarının mekanik, yapısal ve kimyasal özelliklerine bağlıdır [85].

1.5.2. İnorganik İnhibitör

İnorganik inhibitörler, farklı koroziyon ortamlarında korozyonun metalik-endüstriyel ekipman üzerindeki etkilerini azaltmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bir anodik inhibitör, anodik polarizasyonu artırır ve bu nedenle korozyon potansiyelini katodik yöne doğru hareket ettirir dolayısıyla pasifleştirici inhibitörler olarak da adlandırılır. Kromatlar, fosfatlar, tungstatlar ve yüksek oksijen içeriğine sahip geçiş elementlerinin diğer iyonları gibi anodik inhibitörler, yeni üretilen bir metal iyonu ile az çözünür bir bileşik oluşturarak anotta meydana gelen korozyon reaksiyonunu bastırmaktadır. Anodik inhibitörler, anot boyunca ince bir koruyucu film oluşturarak ve potansiyellerini arttırarak korozyon reaksiyonunu yavaşlatmaktadır. Bu inhibitörlere; kromat, molibdat, nitrit, vb. örnek verilebilir [86].

Katodik inhibitörler genellikle indirgeyici parçaların yüzeye yayılmasını önlemek için katodik reaksiyonu yavaşlatarak veya katodik bölgeler üzerinde çökeltirerek (seçici olarak) çalışmaktadır. Yani, anottan katoda elektron akışını kesintiye uğratırlar ve katodik bölgelerde seçici olarak çöken reaksiyon ürünleri üretirler. Katodik inhibitörlere; çinko sülfat, nikel sülfat, aminoetilen ve polifosfat örnek olarak verilebilir.



Şekil 1.17. İnhibisyon sürecinde metalik yüzey ile inhibitörlerin etkileşimi [87].

Bu inhibitörler, anodik oksidasyon, katodik indirgeme veya her ikisinin oranını azaltmaktadır (Şekil 1.17). Korozyon inhibitörünün korozif ortama eklenmesi anodik çözünmesini azaltırsa, korozyon inhibitörü anodik inhibisyon sağlarken, katodik korozyon inhibitörleri bakır yüzeyindeki katodik reaksiyonların (oksijen veya hidrojen azaltma) oranını azaltmaktadır. Karma tip korozyon inhibitörü, hem anodik hem de katodik reaksiyonların hızını aynı anda kontrol etmektedir (Şekil 1.17) [88].

1.5.3. Sodyum Nitrit

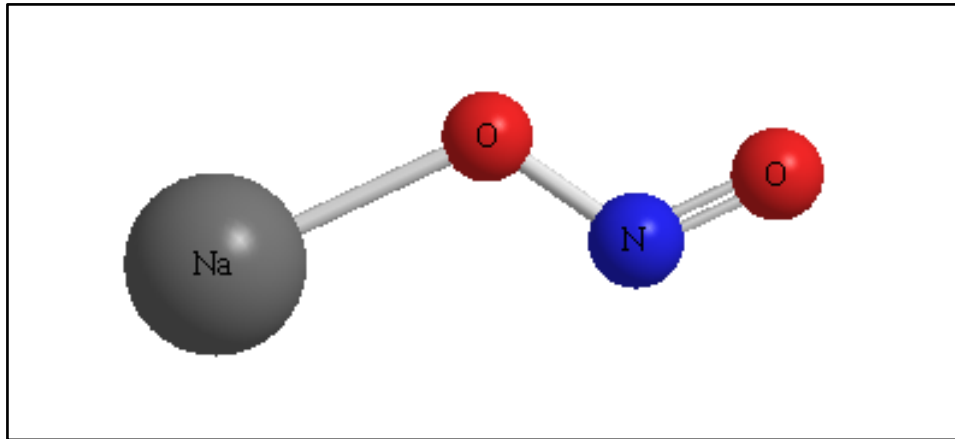
Bağıl yoğunluğu ($2,68 \text{ gr/cm}^3$), ergime noktası 271°C ve saf halde renksiz veya sarı bir kristal olan NaNO_2 suyla karıştığında alkali bir çözelti oluşturmaktadır. Sodyum nitrit indirgeme ve oksidasyon özelliklerine sahiptir (Şekil 1.9). Esas olarak oksidasyon (yükseltgenme) özelliğine sahiptir. Kükürt, fosfor, organik madde ve diğer sürtünme veya darbe ile yanmaya veya patlamaya neden olmaktadır. Sodyum nitrit başta gıda koruyucu olmak üzere korozyon inhibitörü ve ilaç olarak kullanılmaktadır (Şekil 1.10).

İnorganik bir inhibitör olarak NO_2^- ; düşük maliyeti, çevreye zarar vermemesi ve nispeten iyi performans göstermesi nedeniyle inorganik inhibitörler arasında büyük ilgi görmektedir. Nitrit, korozyon akımını azaltan ve en yaygın kullanılan anodik inhibitörlerden biridir [89]. NaNO_2 inhibitör mekanizması, agresif iyonları metal yüzeylerde, metal iyonlarına oksitleyerek anodik alanlarda çok ince bir yapışık metal oksit filmi üretmektedir. Oluşan oksit film metali agresif iyonlara karşı koruyan kalkan görevi yapmaktadır [90].



Şekil 1.18. Katı halde bulunan sodyum nitrit.

Bir korozyon inhibitörü olarak, NaNO_2 1940’larda petrol endüstrisi, benzin ve diğer petrol ürünlerinde çelik boru hatlarındaki iç korozyonu önlemek için test edilmiştir [91]. Deneyler, %0,1 (1000 ppm) konsantrasyonlarda, NaNO_2 ’nin oldukça etkili olduğunu göstermiştir. 1945 yılındaki çalışmasından iki yıl sonra, ürün ABD’deki benzin boru hatlarının üçte birinden fazlasında kullanılmıştır [91]. NaNO_2 sulu ortamda korozyon inhibitörü olarak başarıyla kullanılmaktadır [92]–[94]. Belirgin inhibisyon için ihtiyaç duyulan NaNO_2 , koşulların durumuna, suyun pH ve bileşimine göre değişmektedir. NaNO_2 , NaCl çözeltilerinde ve sulu alkol çözeltilerinde çeliği korozyona karşı önleyebilmektedir. Ayrıca pas ile kaplanmış çelik üzerinde de etkilidir [91], [93].



Şekil 1.19. Sodyum nitritin yapısı.

1.6. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Isı değiştiricilerde bakırda oluşan korozyonun önlenmesi için yapılan çalışmalar 3 grupta incelenmiştir.

1.6.1. Sodyum Nitritle İlgili Yapılan Çalışmalar

NaNO_2 konsantrasyonunun, tuz çözeltisi içindeki klorür iyonları üzerindeki etkisi, döner silindir elektrot sistemi kullanılarak kontrollü kütle transferi koşulları altında karbon çeliğinin korunması için araştırılmıştır. Rotor hızı ile molar oranı arasındaki doğrusal olmayan ilişki olduğu saptanmıştır. Dolayısıyla NaNO_2 'nin inhibisyon etkinliği üzerindeki etkisini geliştirmek için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu belirlenmiştir [95].

Yumuşak çeliğin 3,5 M NaCl ve 0,3 M Na_2S ortamında, çeşitli konsantrasyonlarda K_2CrO_4 ve NaNO_2 kullanılarak korozyon inhibisyonu, geleneksel kütle kaybı ölçüm yöntemi kullanılarak çalışmada araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, K_2CrO_4 her iki ortamda da NaNO_2 'ye göre daha iyi bir inhibisyon performansı ürettiğini göstermiştir [96].

NaNO_2 konsantrasyonunun API-5L X65 ve mikro alaşımlı çeliklerin bozunması üzerindeki etkisi araştırılmıştır. En yüksek inhibitör etkinliği, X65 çeliği üzerinde 0,2 g/L NaNO_2 ile olduğu gözlemlenmiştir. Sadece mikro alaşımlı çelikte NaNO_2 konsantrasyonundaki artışla birlikte hafifçe geliştirilmiş korozyon direnci gözlenmiştir. Ek olarak, NaNO_2 inhibitörü olan ve olmayan iki çeliğin bozulma davranışı arasında anlamlı bir fark olmadığı tespit edilmiştir [97].

Bir başka çalışmada, tuzlu sudaki pas önleyicilerin bakırın korozyon davranışları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Benzotriazol (BTA), Sodyum Benzoat ($\text{C}_7\text{H}_5\text{NaO}_2$) ve Sodyum Nitrit (NaNO_2) ile üç tip çözelti kullanılarak gerçekteştirilmiştir. 25 °C'deki daldırma testinde, penetrasyon oranındaki (P) fark, araştırılan üç çözelti arasında önemsizdir. 60 °C'de, hem sodyum benzoat hem de sodyum nitrit çözeltileri, benzotriazol çözeltisinde hafifçe artmasına rağmen, 80 °C'de önemli ölçüde artmıştır, tüm çözeltilerde Pincreas değeri ve her çözeltinin Pincreas sırası Benzotriazol ($\text{C}_6\text{H}_5\text{N}_3$) < Sodyum Benzoat ($\text{C}_7\text{H}_5\text{NaO}_2$) < Sodyum Nitrit (NaNO_2) olarak görülmüştür [98].

1.6.2. Isı Değiştirici Korozyonu ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Yapılan bir çalışmada arızalanan bir ısı eşanjörünün ne gibi sebeplerden dolayı arıza verebileceği araştırılmıştır. Çalışmada 5 yıla yakındır çalışan ısı değiştiricinin arıza sebepleri incelenmiştir. Arıza sebebi, tüpün dış kabukta oluşan çukurlardan kaynaklanmıştır. Soğutulan suyun kimyasal yapısı incelendiğinde pH değeri 4 ila 7 arasında olduğu gözlemlenmiş ayrıca suda sülfat ve klor iyonlarının varlığı saptanmıştır. Sızdıran tüpler standart metalografik incelemeye, sertlik ölçümüne, tarama elektron mikroskobu ve X-ışını enerji dağılım analizine tabi tutulmuştur. Tüp hasarının erozyon korozyonundan kaynaklandığı belirlenmiştir [99].

Yapılan çalışmada, ilk çalıştırma sırasında ısı eşanjöründe çatlama gerçekleştiği gözlenmiştir. Çatlamanın sebep olacağı faktörler arasında; ekipmanın çalışma geçmişi, boru malzemesi ve korozyon ürünlerinin kimyasal bileşimlerinin analizi, çatlaklı örneklerin metalografik testi ile çatlama türü, östenitik paslanmaz çeliğin gerilme korozyon çatlamasına neden olacağı sonuçlarına ulaşılmıştır. Test sonuçlarının neticesinde ısı eşanjörü tüpünün çatlamasına stres korozyon çatlamasının neden olduğu gözlenmiştir [100].

Orta ölçekli tekstil fabrikasında, açık devre soğutma suyu tarafından sık sık delinme ve kirlenme gerçekleşen 316L paslanmaz çelik ısı eşanjör plakasının nedenini araştırmak için güç üretim sistemindeki birincil ve ikincil döngü su örnekleri araştırılmıştır. Ayrıntılı çalışmada, su örneklerinin kimyasal analizi, 316L plakaların metalurjik ve elektrokimyasal testleri sistem hatasını belirlemek için yapılmıştır. Yapılan araştırma sonucunda açık devre besleme suyunda bulunan klorür içeriğinin ve sistem parametrelerinin incelenmesi ve kontrolü sonucunda uzman olmayan yaklaşımın bu başarısızlığın temel nedeni olduğu tespit edilmiştir. Elektrokimyasal döngüsel polarizasyon ve potansiyostatik test sonuçları, 316L SS plakaların yüksek miktarda çukur korozyonuna uğradığı tespit edilmiştir [101].

1.6.3. Bakır Korozyonu ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Doğal balın 0.5 M sodyum klorür çözeltisinde bakırın korozyonu üzerindeki inhibisyon etkisi, kütle kaybı ölçümleri ve katodik polarizasyon yöntemiyle değerlendirilmiştir. İnhibitör konsantrasyonunun artışına bağlı olarak artan iyi bir inhibisyon verimi gözlemlenmiştir. Bir süre sonra, ortamda mikroorganizmaların büyümesi nedeniyle inhibisyon verimliliği azalmıştır. Tafel eğimi doğal balın varlığında

belirgin bir şekilde değişmiştir. Doğal balın nötr klorür  z ltisinde bakır yüzeyine adsorpsiyonunun Langmuirs adsorpsiyon izotermine uyduğu gözlemlenmiştir [102].

1 M nitrik asitte *Ceratonia siliqua*  z t n n etkisi sulu bakır ve pirincin korozyonu ağırlık kaybı, potansiyodinamik polarizasyon, elektrokimyasal empedans spektroskopisi ve elektrokimyasal frekans modülasyon teknikleri ile incelenmiştir. Yüzey morfolojisi, taramalı elektron mikroskobu ve enerji dağıtıcı X-ışını teknikleri kullanılarak analiz edilmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon eğrileri, bitki özütünün katodik inhibitör olarak davrandığını göstermiştir. Sonuçlar, bitkinin ekstrakt  z ltisinin nitrik asit ortamında bakır ve pirincin korozyonu için etkili bir inhibitör görevi görebileceğini göstermiştir. Sıcaklık arttı ca, inhibisyon yüzdesi azalmıştır. Adsorbe edilmiş inhibitörün yüzey kaplama derecesi ağırlık kaybı tekniği ile belirlenmiş ve sonuçların Langmuir adsorpsiyon izotermine uyduğu belirtilmiştir [103].

0.6 M NaCl ve 1.0 M HCl’de bakır metal için toksik olmayan bir korozyon önleyici olarak Sisteinin etkinliği elektrokimyasal çalışmalarla araştırılmıştır. Sisteinin bakırın korozyon inhibisyonu üzerindeki etkisini incelemek için potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri ve EIS kullanılmıştır. Klorür solüsyonlarında yaklaşık %84’l k inhibisyon etkinliği elde edilmiştir. Cu^{2+} varlığı iyonlar inhibisyon etkinliğini %90’a çıkarmıştır. Potansiyodinamik polarizasyon ölçümleri, asidik ve nötr klorür  z ltilerinde Sistein varlığının esas olarak katodik süreci etkilediğini ve korozyon akımını büyük ölçüde azalttığını ve korozyon potansiyelini daha negatif değerlere kaydırđıęını göstermiştir. DeneySEL empedans verileri, elektrot/elektrolit ara yüzü için önerilen eşdeğer devre modeline göre analiz edilmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon ve empedans ölçümlerinden elde edilen sonuçlar birbirleriyle uyumludur. Nötr ve asidik klorür  z ltilerinde Cu yüzeyinde sisteinin adsorpsiyonu, Langmuir adsorpsiyon izotermi izler. Cu  zerinde Sisteinin adsorpsiyon serbest enerjisi ($\sim -25 \text{ kJ mol}^{-1}$) metal yüzey üzerinde inhibitörün güçlü bir fiziksel adsorpsiyonunu ortaya çıkarmıştır [104].

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. MATERYAL

2.1.1. Deneyde Kullanılan Materyal ve Deneyin Yapılışı

2.1.1.1. Yapay Ortamda Soğutma Suyu Kullanılarak Korozyonun Ölçülmesi

Bu çalışmada, korozyon deneyleri için Bulgaristan Sofia Med Ad'dan [105] temin edilen %99,9 saflıktaki bakır serpantinler iki farklı ortama maruz bırakılmıştır [106]. Ayrıca 8 boğumdan oluşan bakır serpantinler yukarıdan aşağıya doğru 1'den 8'e kadar numaralandırılmıştır (Şekil 2.1).

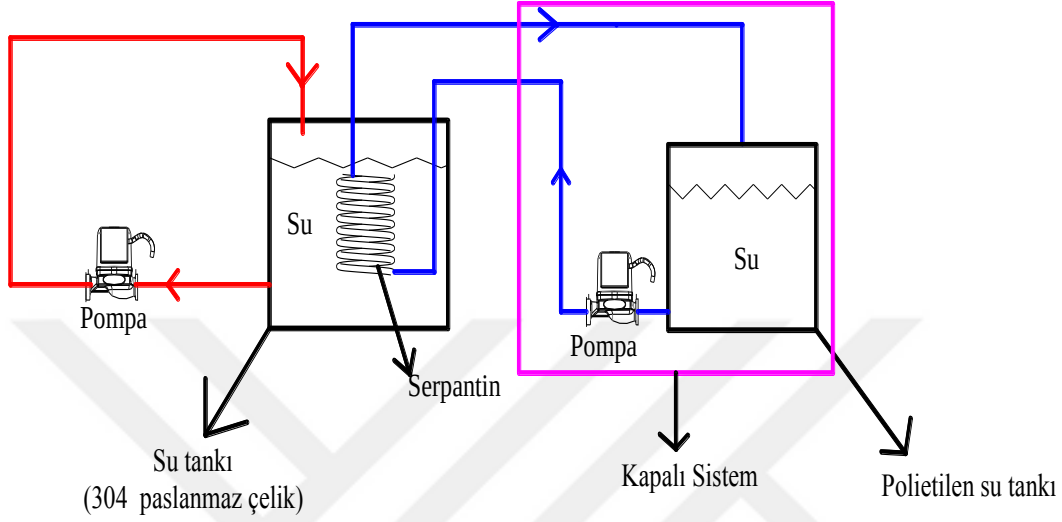


Şekil 2.1. Deneyde kullanılan bakır serpantin.

Birinci ortamda; serpantin yapay soğutma suyuyla hazırlanmış ortama maruz bırakılmış ve serpantin hem iç hem de dış yüzeyinde sirkülasyonu sağlanmıştır. İkinci ortamda ise sistemin her iki tankında da SCW+1000 ppm NaNO₂ kullanılarak sistem çalıştırılmıştır. Deneylerin yapıldığı yapay soğutma suyuna (pH=7.9) ait kimyasal içeriği Çizelge 2.1'de gösterilmiştir [107]. Korozyon deneylerinin araştırılması için oluşturulmuş sistem ve sistemin işleyişine ait görseller Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 2.1. Yapay soğutma suyunun kimyasal içeriği

Kimyasal madde	NaCl	NaHCO ₃	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄	CaCl ₂
mmol/L	7.50	2.00	3.50	0.25	0.50



Şekil 2.2. Deney seti akış şeması



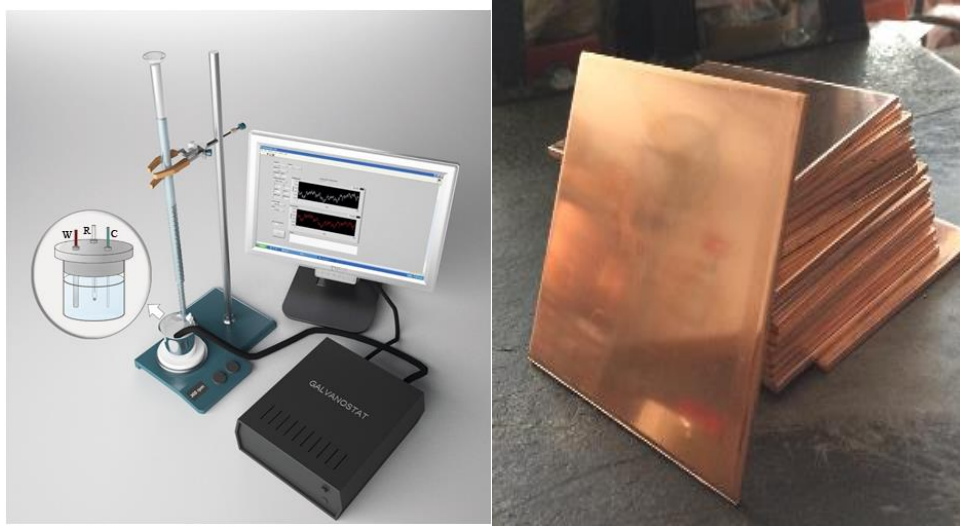
Şekil 2.3. Kullanılan deney seti

Şekil 2.3'te görülen 5 numaralı pompa plastik tanktan aldığı suyu bakır (Cu %99,99) serpantine (eşanjöre) göndermektedir ve serpantin sistemdeki suyun soğumasını sağlamaktadır [106]. 2 numaralı pompa ise paslanmaz tanktan aldığı suyu tankın içinde sirküle etmektedir. Oluşturulan sistem bu prosesle 21 gün boyunca durmadan çalıştırılmıştır. Deney sonrası bakır numunelerin yüzeyinde meydana gelen değişimler

AFM (Park system XE-100E model cihaz) ve SEM-EDS (Quanta FEG 250 (FEI, Holland) model cihaz) yüzey analizi yöntemleri kullanılarak incelenmiştir.

2.1.1.2. Alternatif Akım İle Korozyon Ölçümünün Uygulanması

Bulgaristan Sofia Med Ad'dan temin edilen %99,99 saflıkta bakır numuneler test numunesi olarak kullanılmıştır (Şekil 2.4). Test numunelerinin çalışma yüzeyi, 400-2000 tane arasında değişen SiC kağıtlarıyla aşındırılmış, alkolle temizlenmiş ve ardından her testten önce distile suyla yıkanmıştır. Yapay soğutma suyu, saf suda NaCl (7.5 mmol/L), NaHCO₃ (2.0 mmol/L), Na₂SO₄ (3.5 mmol/L), MgSO₄ (0.25 mmol/L) ve CaCl₂ (0.50 mmol/L) çözülerek hazırlanmıştır [107].



Şekil 2.4. Deney düzeneği ve deneyde kullanılan numuneler.

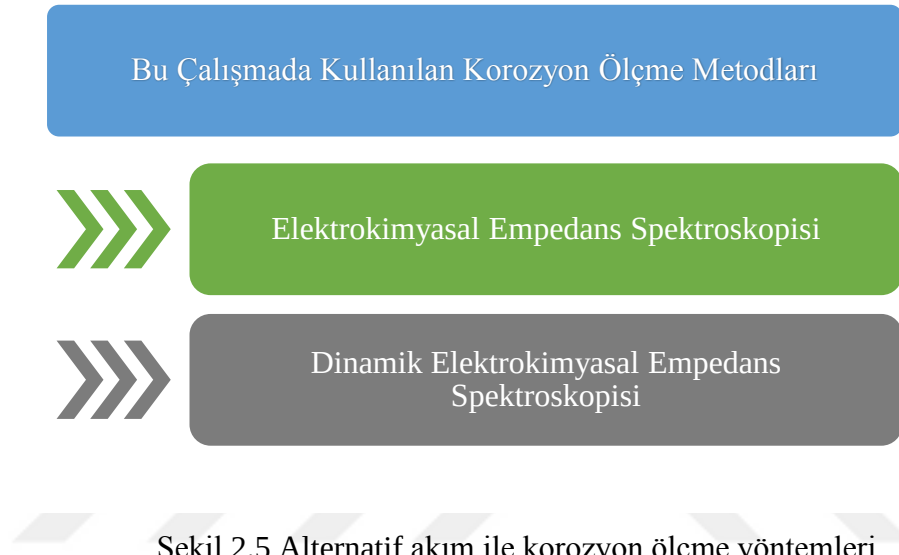
2.1.1.3. Elektrokimyasal Yöntemle Yüzey Analizi

Korozif çözelti içine daldırılmış test numunelerinin yüzeyinde (yüzey heterojenliği / pürüzlülüğü açısından) meydana gelen hasarın boyutunun görselleştirilmesi, AFM ve SEM/EDS gibi tekniklerin kesinliğini ve doğruluğunu gerektirir. Mevcut çalışmada testler, oda sıcaklığında 1000 ppm NaNO₂ konsantrasyonu içeren ve NaNO₂ içermeyen bakır numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Temassız modda (9.09 x 9.09) µm² test kuponu alanını incelemek için test numuneleri 0.2 Hz'de 1 µm optik çözünürlükle taranmıştır.

2.2. YÖNTEM

2.2.1. Korozyon Ölçme Yöntemleri

Korozyonun yapısına ve şekline göre farklı korozyonu ölçmek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Tek bir yöntem korozyonu inceleme de yetersiz kalabilmektedir. Dolayısıyla farklı korozyon ölçüm yöntemleri gelişmiştir [108]. Şekil 2.5'te yer alan tabloda korozyon ölçmek için kullanılan yöntemlere yer verilmiştir.



2.2.1.1. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi

Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS), yüzyılı aşkın süredir birçok kurum tarafından korozyon analizi, moleküllerin adsorpsiyon özellikleri (arayüz davranışı) gibi amaçlarla kullanılan ve aynı zamanda diğer birçok uygulamanın yanı sıra pillerin ve yakıt hücrelerinin çalışmasını izlemek için kullanılan bir tekniktir.

EIS ölçümü, EIS işlevlerine sahip potansiyostatlar gibi cihazlar kullanılarak gerçekleştirilen oldukça basit bir prosedürdür. Mikrobiyal yakıt hücreleri, ölçümün amacına bağlı olarak üç elektrotlu modda veya iki elektrotlu modda bir potansiyostata bağlanmaktadır. Üç elektrot modu, tek bir elektrotu analiz etmek için kullanılmaktadır. Anot veya katot, çalışma elektrotu olarak kullanılırken, diğer elektrot bir karşı elektrot işlevi görmektedir. Üçüncü elektrot, anot ve/veya katot bölmesine yerleştirilmiş bir referans elektroda (örneğin, Ag / AgCl) bağlanmaktadır [109].

Korozyon deneylerinde Ag/AgCl referans elektrodu, bir platin karşı elektrodu (Pt) ve 0.785 cm² yüzey alanına sahip çalışma elektrodu olarak hazırlanmış bir bakır numunesi

kullanılmıştır. Kararlı durum (OCP), her elektrokimyasal testten önce test çözeltisine numune 2 saat daldırıldıktan sonra elde edilmiştir. EIS, 10 mHz ila 100 kHz frekans aralığında 10 mV tepeden tepeye korozyon potansiyeli (E_{corr}) genlik sinyalinde gerçekleştirilmiştir [110]. Elde edilen veriler ZsimpWin 3.21 yazılımı ile analiz edilmiştir. % İnhibisyon etkinliği " IE ", Denklem 2.1'e göre R_{ct} değerleriyle hesaplanmıştır.

$$IE(\%) = \frac{R_{ct}^{(i)} - R_{ct}}{R_{ct}^{(i)}} \times 100 \quad (2.1)$$

$R_{ct}^{(i)}$, $NaNO_2$ varlığında yük transfer direncidir, R_{ct} ise $NaNO_2$ yokluğundaki değeri ifade etmektedir.

2.2.1.2. Dinamik Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi

Dinamik Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (DEIS) yöntemi malzemeye çoklu sinüs sinyali gönderilerek elektriksel bozulmasının hesaplandığı bir ölçüm tekniğidir. İncelenmekte olan malzemenin, aynı genliğe ancak farklı frekanslara sahip bir dizi sinüs voltajı veya akım sinyali gönderilerek bozulması sağlanmaktadır. Malzemenin bozulması, tüm ölçüm süresi boyunca sürekli olarak kaydedilmektedir.

DEIS, metal yüzeyindeki adsorbe edilmiş molekül tabakası pertübasyonunun gerçek zamanlı değerlendirilmesini sağlayan, test ortamının akım ve voltaj bozulmalarını kaydeden National Instrument Ltd PCI-4461 dijital analog kart yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Galvanostatik koşullar, ek olarak bir akım-voltaj dönüştürücü olarak görev yapan Slepiski Galvanostat ekipmanı tarafından sağlanmıştır [111]. Pertübasyon kaynağı olarak 20 temel akım sinüzoid seti kullanılmıştır. Örneklem frekansı 12,8 kHz ve frekans aralığı 300 mHz ile 4,5 kHz arasındadır. DEIS sonuçları, EIS verilerini yorumlayan aynı programla elde edilmiştir.

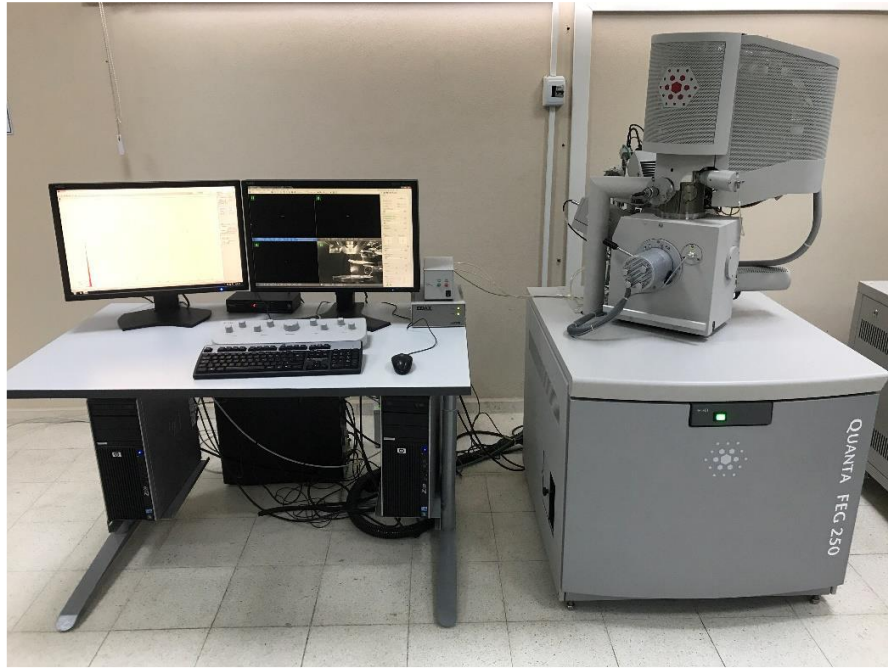
2.2.2. Yüzey Analizi

2.2.2.1. SEM ve EDS Analizi

Taramalı elektron mikroskobu ve Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM / EDS), yüzey analitik tekniklerinin en iyi bilinen ve en yaygın kullanılanıdır. Mükemmel alan derinliğine sahip yüzey topografyasının yüksek çözünürlüklü görüntüleri, yüksek düzeyde odaklanmış, taramalı (birincil) elektron ışını kullanılarak üretilmektedir [112].

SEM, odaklanmış bir elektron ışınıyla tarayarak bir numunenin görüntülerini üreten bir tür elektron mikroskobudur. Elektronlar numunedeki atomlarla etkileşime girerek tespit edilebilen ve numunenin yüzey topografyası ve bileşimi hakkında bilgi içeren çeşitli sinyaller üretmektedir.

EDS analizi aynı zamanda enerji dağıtıcı X-ışını analizi veya enerji dağıtıcı X-ışını mikro analizi olarak da adlandırılmaktadır. Bir numunenin elementel analizi veya kimyasal karakterizasyonu için kullanılan analitik bir tekniktir. Analiz edilen malzemenin temel bileşimini karakterize etmek için bir elektron ışını tarafından bombardıman sırasında numuneden yayılan x-ışınlarını tespit eder. 1 μm veya daha küçük kadar küçük özellikler veya fazlar analiz edilmektedir [113].



Şekil 2.6. SEM-EDS görüntüleme cihazı

Korozif çözelti içine daldırılmış test numunelerinin yüzeyinde (yüzey heterojenliği / pürüzlülüğü açısından) meydana gelen hasarın boyutunun görselleştirilmesi, AFM ve SEM / EDS gibi tekniklerin kesinliğini ve doğruluğunu gerektirmektedir.

Mevcut çalışmada testler, oda sıcaklığında optimum NaNO_2 konsantrasyonu içeren ve NaNO_2 içermeyen bakır numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. SEM/EDS çalışması, yukarıda şekilde görülen (Şekil 2.6) EDS ekli Quanta FEG250 (FEI, Hollanda) kullanılarak yapılmıştır.

2.2.2.2. AFM Analizi

Atomik kuvvet mikroskobu, yüzeyi ince bir uçla tarayarak malzeme yüzeylerinin üç boyutlu topografik görüntülerini alır. Her tür katı malzeme (seramik, metal, polimer, yarı iletkenler, biyomateryal) için farklı yüzey özellikleri (sürtünme, yüzey morfolojisi ve pürüzlülüğü, tribolojik özellikler, atom düzeyinde yüzey kuvvetleri, vb.) ve küçük boyutlu nanoyapıların ve nano malzemelerin fiziko-kimyasal yüzey özellikleri elde edilmektedir. AFM, katı hal fiziği, yarı iletken teknolojisi, moleküler mühendislik, polimer fiziği ve kimyası, yüzey kimyası, moleküler biyoloji, hücre biyolojisi ve tıp gibi doğa bilimleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Şekil 2.7) [114].



Şekil 2.7. AFM görüntüleme cihazı

İnhibitörlü ve inhibitörsüz bakır numunelerin AFM görselleştirmesini gerçekleştirmek için kullanılan cihaz, Park Systems XE-100E modelidir. Temassız modda (9.09 x 9.09) μm^2 test kuponu alanını incelemek için test numuneleri 0.2 Hz'de 1 μm optik çözünürlükle taranmıştır.

2.2.2.3. Optik Profilometri

Profilometri, bir yüzeyden topografik verileri çıkarmak için kullanılan bir tekniktir. Bu tek bir nokta, bir çizgi taraması veya üç boyutlu bir tarama olabilir. Profilometrinin amacı yüzey morfolojisi, adım yükseklikleri ve yüzey pürüzlülüğü elde etmektir. Ölçüm, fiziksel bir prob veya ışık kullanılarak yapılabilir [115].

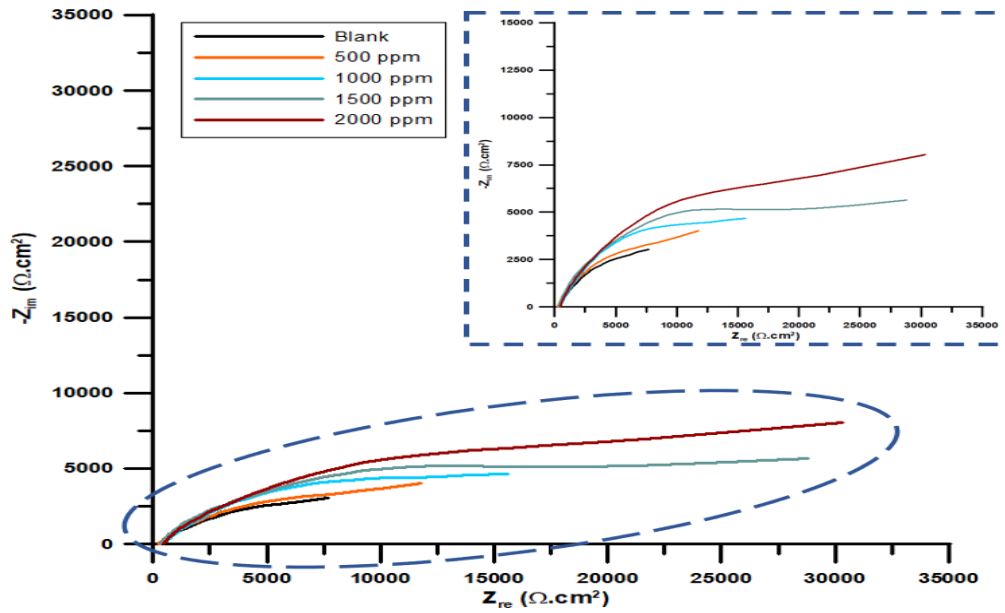
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. SODYUM NİTRİT İNHİBİTÖRÜNÜN BAKIR PLAKA KOROZYONUNA ETKİSİNİN ELEKTROKİMYASAL YÖNTEMLERLE BELİRLENMESİ

3.1.1. Elektro Kimyasal Yöntemler (EIS-DEIS-İZOTERM)

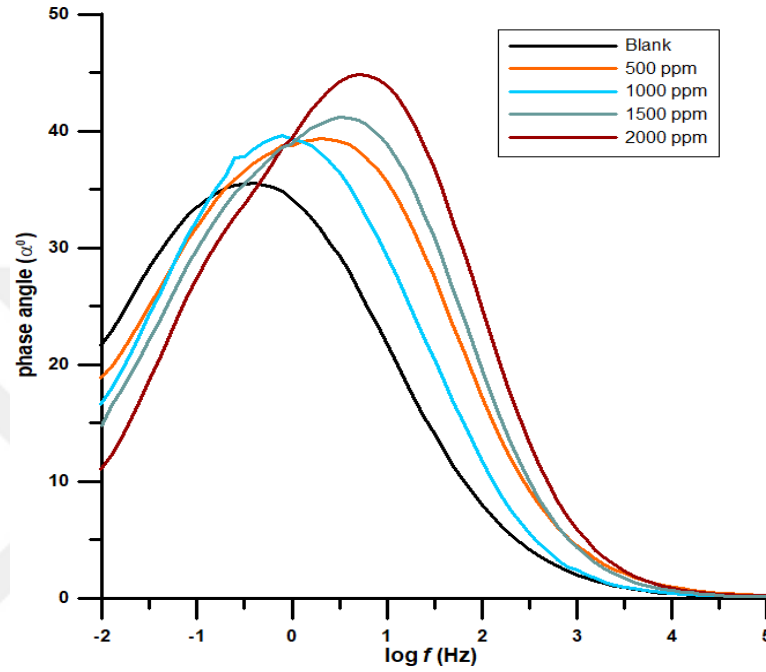
3.1.1.1. Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS)

Empedans spektroskopisi, bir metal ile bir korozif ortam arasındaki direnç reaksiyonunu tahmin etmek için gerçekleştirilen yaygın bir uygulamadır. (Şekil 3.1), SCW'de çeşitli NaNO_2 konsantrasyonlarına tabi tutulan bakır numunelerinin EIS verilerini göstermektedir. Nyquist çizimleri, spektrumların kapasitif davranışını göstermektedir; bu, bakır elektrotun korozyon sürecinin yük transfer direncini içerdiği anlamına gelir. Kapasitif yarım dairenin çapı, artan NaNO_2 konsantrasyonları ile artmıştır, bu da bakırın korozyon koruyucu davranışının, inhibitör konsantrasyonunun artırılmasıyla iyileştirildiğini ima etmektedir.



Şekil 3.1. Farklı NaNO_2 konsantrasyonları tarafından inhibe edilen SCW'deki bakır örneklerinin Nyquist grafikleri

Bode faz grafikleri, empedans spektrumunda, yine genellikle yük aktarım işlemiyle ilişkilendirilen tek bir sabiti gösterir (Şekil 3.2). EIS grafikleri, bakır yüzeyinin SCW'de bulunan koroziyon iyonlarının saldırısını önleyen pasif bir tabaka olan ince bir filmle kaplandığını göstermiştir. Faz açısı diyagramları ayrıca SCW'de NaNO_2 konsantrasyonu her arttırıldığında maksimum faz açısının arttığını göstermiştir. Bu, NaNO_2 ilavesinin koruyucu bariyerin büyümesine faydalı olduğunu bir kez daha kanıtlamaktadır.



Şekil 3.2. SCW'de farklı NaNO_2 konsantrasyonları tarafından inhibe edilen bakır numunesi için Bode faz grafikleri.

Bu, bakır yüzeyini kaplayan pasif oksit tabakasının veya ince Cu^{+2} inhibitör kompleksinin artan inhibitör konsantrasyonu ile kalınlaştığının veya geliştiğinin bir göstergesi olabilir. Aynı durum, çift katmanlı kapasitansın büyümesi ile ilişkili Y_0 değerleri ile gösterilebilir. R_{ct} değerleri artan konsantrasyonlarla yükselirken, R_s değerlerinde de bir artış kaydedildi. Genellikle, film oluşturucu inhibitörler metale absorbe edilir ve R_s azalma eğilimindedir. NaNO_2 durumunda, genellikle bakır yüzeyde ince bir koruyucu oksit tabakası oluşturmaya yardımcı olan anodik bir inhibitör olarak kabul edilir [72]. Bu, yüzeydeki oksit bariyeri nedeniyle bakır ve yığın çözelti arasındaki iyon transferinin inhibitör konsantrasyonu her arttığında azaldığını ve bunun da R_s 'de bir artışa neden olduğuna işaret etmektedir. Empedans verileri Çizelge 3.1'de listelenmiştir.

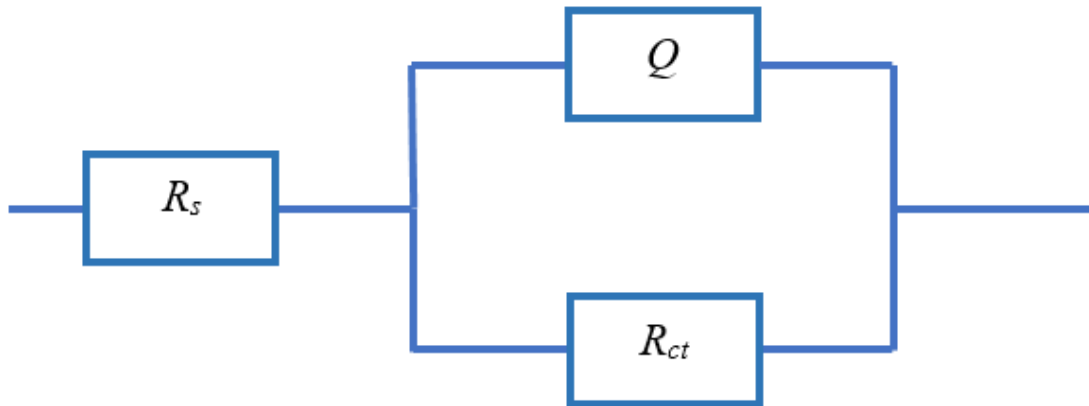
Çizelge 3.1. Oda sıcaklığında farklı NaNO₂ konsantrasyonları tarafından inhibe edilen SCW'deki bakır numuneleri için EIS parametreleri

Konsantrasyon	R_s	$Y_o \times 10^{-4}$	n	R_{ct}	IE	$\chi^2 \times 10^{-3}$
	($\Omega \text{ cm}^2$)	($\mu\Omega \text{ s}^n \text{ m}^{-2}$)		($\Omega \text{ cm}^2$)	(%)	
İnhibitörsüz	279.4	4.4	0.56	9250	0	0.7
500 ppm	178.8	2.6	0.57	11500	19.5	0.2
1000 ppm	266.7	1.8	0.60	14660	36.9	1.3
1500 ppm	349.7	1.1	0.61	20370	54.5	9.6
2000 ppm	367.4	0.9	0.59	24230	61.8	6.6

Empedans değerleri, klasik $R(QR)$ devresi kullanılarak $\chi^2 \times 10^{-3}$ değerlerine dayalı bir şekilde tam olarak modellenmiştir (Şekil 3.3). Bu eşdeğer devrede; R_s çözelti direnci, R_{ct} yük transfer direnci ve Q ise çalışan elektrotun ideal olmayan davranışlarını hesaba katmak için çift katmanlı kapasitans yerine kullanılan sabit faz elementidir (CPE) [116]. CPE aşağıdaki denklem kullanılarak modellenenabilir.

$$Z_{CPE} = [Q(j\omega)^n]^{-1} \quad (3.1)$$

Z_{CPE} empedansı gösterir, $[j]$, (-1) 'in karekökünü ifade eder, ω frekansı temsil eder, (Q) kapasitansdır ve n , değeri $0 < n < 1$ aralığında olabilen kapasitörün homojen olmayışının nicelleştirilmesidir.



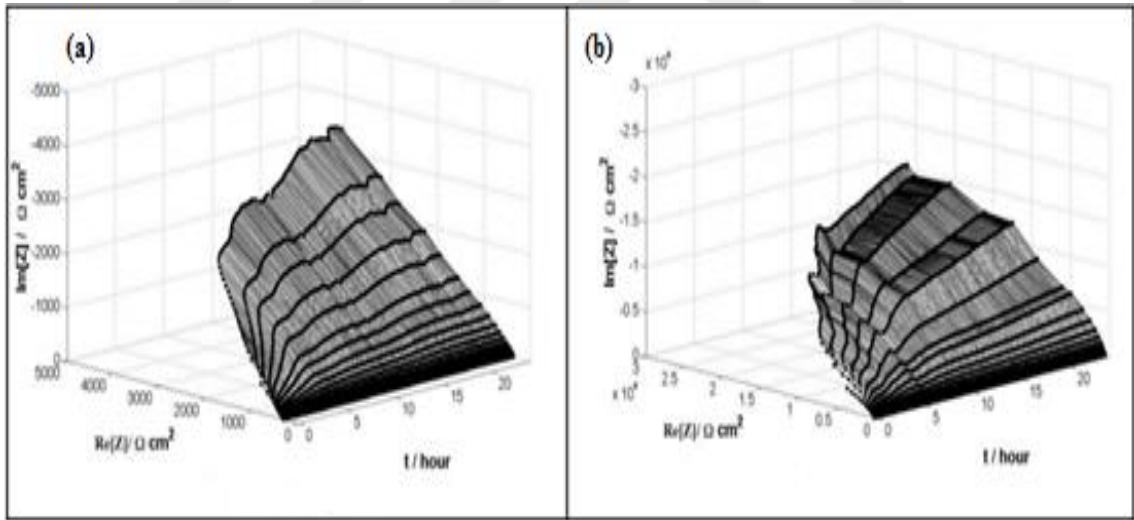
Şekil 3.3. EIS ve DEIS için uygulanan eşdeğer devre modeli.

Çizelge 3.1, R_{ct} değerlerinin NaNO₂ konsantrasyonu ile arttığını açıkça göstermektedir.

R_{ct} değerleri, metal / elektrolit arayüzünde esas olarak adsorbe edilmiş su molekülleri ve diğer iyonlardan kaynaklanan inhibe edilmemiş çözeltiden elde edilmiştir. Bunlar daha sonra inhibitör türleri tarafından değiştirilmiştir. 7,9 pH değerine karşılık gelen 0,2 V-Ag / AgCl potansiyeli, inhibe edilmemiş elektrolitik çözeltide bir süre sonra CuO / Cu(OH)₂ 'ye dönüşen ilk Cu₂O oluşumuna atfedilebilir. Bununla birlikte, EIS analizinden elde edilen sonuçlara göre, inhibe edilen çözeltide, bir Cu⁺² inhibitörüne de dönüşebilir [71] . 2000 ppm konsantrasyonda, NaNO₂, empedans ölçüm sonuçlarına göre %61,8 daha verimli hale gelmiştir.

3.1.1.2. Dinamik Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (DEIS)

NaNO₂ inhibe edilmiş ve inhibe edilmemiş ortamlarda oda sıcaklığında farklı zaman aralıklarında SCW'ye daldırılan bakır numuneleri için DEIS analizi yapılmıştır. SCW'de bakır yüzeyinde adsorbe edilmiş nitrit önleyici filmdeki değişiklikleri izlemek için analiz 24 saate kadar gerçekleştirilmiştir. Kararlı bir açık devre potansiyeli (OCP) elde ettikten sonra oda sıcaklığında test edilen bakır numuneleri için 24 saatin üzerindeki DEIS spektrumlarını göstermektedir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. 24 saat boyunca 2000 ppm NaNO₂ ilaveli (b) ve ilavesiz (a) SCW ortamına maruz bırakılan bakır numunelerin DEIS spektrumları.

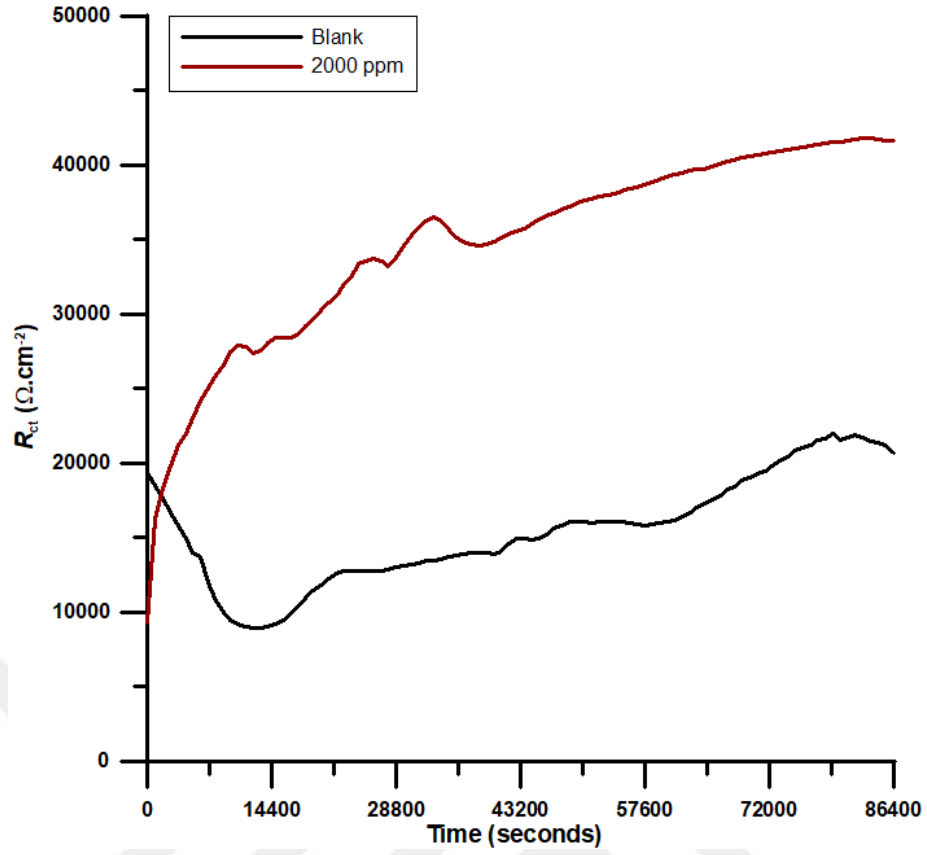
Bakır yüzeyinde Cu⁺² iyonlarının oluşumunun çözünme şeklini daha iyi anlamak ve SCW'de sodyum nitrit ile korozif reaksiyonun önlenmesini sağlamak amacıyla tüm ortamlar için 24 saatlik DEIS deneyleri yapılmıştır. R_{ct} 'nin inhibitörün artan konsantrasyonla daha iyi bir performans göstererek zamanla iyileştiği gözlemlenmiştir.

DEIS analizinde kullanılan eşdeğer devre, EIS analizinde kullanılabilecek benzerdir. Her zaman olduğu gibi, en iyi uyum 10^{-3} aralığındaki düşük χ^2 değerlerine göre belirlenmiştir. Bu şekilde elde edilen DEIS parametrelerinin 2, 6, 12 ve 24 saat sonundaki değerleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. 2-24 saati kapsayan zaman aralıklarında inhibe edilmiş ve inhibe edilmemiş SCW'ye batırılmış bakır numuneleri için DEIS Nyquist grafiğinin analizi.

Zaman Aralığı	İlk		2h		6h		12h		24h	
/	spektrumlar									
Konsantrasyon	Y_o	R_{ct}	Y_o	R_{ct}	Y_o	R_{ct}	Y_o	R_{ct}	Y_o	R_{ct}
İnhibitörsüz	951.7	19406	315.8	11532	156.1	12620	133.6	14930	112.3	20730
2000 ppm	97.7	9297	32.09	25070	17.67	31200	11.47	35770	8.09	41610
% IE	-	-	-	54.01	-	59.55	-	58.26	-	50.18

Sodyum nitritin maksimum inhibe edici konsantrasyonunun SCW'ye eklenmesinin etkisi, Şekil 3.5'teki yük transferine karşı zaman grafiğine bakılarak açıkça anlaşılabılır. DEIS kullanımının ardından 2 saatlik aralıktan sonraki R_{ct} değerleri gerçekleştirilen testlerin tutarlılığını gösteren maksimum inhibitör konsantrasyonunun EIS sonuçları ile çakışmaktadır. İnhibitör eklenmemiş (inhibitörsüz) çözelti durumunda, SCW'deki agresif iyonların ilk saldırısı ile ilişkilendirilebilen R_{ct} 'nin başlangıçta 0-14400 s düştüğü gözlemlenmiştir. 14400'ten sonra, agresif çözeltiye karşı dirençli olan R_{ct} değerlerinde çok kademeli ve sürekli bir artış olmuştur. SCW'de 2000 ppm sodyum nitrit ile inhibe edilen bakır numunelerinde, bakırın çözünmesini engelleyen nitrit iyonlarının sunduğu inhibisyon nedeniyle R_{ct} değerlerinde herhangi bir düşüş görülmemektedir. Ayrıca klorür iyonlarının sulu çözeltilerde bakır yüzeylerde oluşan pasif oksit tabakasını tahrip etmesi de engellenmiştir. Bununla birlikte, inhibe edilen çözeltiye daldırıldıktan hemen sonra elde edilen ilk spektrumlar için yük transfer değeri, inhibitörsüz SCW çözeltisinininkinden daha düşüktür.



Şekil 3.5. 24 saat boyunca inhibe edilmemiş ve inhibe edilmiş SCW'ye batırılmış bakır numuneleri için R_{ct} -zaman grafiği.

Nitrit iyonunun farklı ortamlarda bakır ve oksitlerine karşı davranışı üzerine yapılan önceki çalışmalar, bakır yüzeyinde başlangıçta oluşan Cu_2O 'nun direnç artışının nitrit iyonu tarafından engellendiği sonucuna varmıştır; ancak bir süre sonra Cu_2O , $\text{Cu}_2\text{O} + \text{CuO} / \text{Cu}(\text{OH})_2$ 'ye evrildiğinde, nitrit iyonları $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ile reaksiyona girerek oksit filmin sunduğu direncin büyümesine yardımcı olmaya başlamaktadır [70], [71]. İnhibitör eklenmemiş çözeltide nitrit iyonlarının yokluğunda, başlangıçta bakır numunesi üzerinde oluşan Cu_2O filmi bir miktar direnç göstermiştir ve ardından agresif iyonların saldırısı oksijenin yerini almış ve anodik çözünmeye yol açmıştır. Bununla birlikte, ilginç bir şekilde, inhibitör içeren nitrit iyonu inhibitörsüz SCW çözeltisine eklendiğinde, yüzeydeki bakır oksit tabakasının büyümesini engellemiştir ve bu da SCW iyonlarının yüzeyde korozyona neden olan saldırısını kolaylaştırmıştır. Bu nedenle, R_{ct} , inhibitörsüz çözeltiden daha düşük olan ilk spektrumdaki değerlerden evrilmeye başlamıştır. Bununla birlikte, tam olarak 14400 s sonra, bakır oksitle birlikte bakır (II) hidroksit gelişimi, yüzeyde bakır nitrit oluşumu yoluyla korozyon korumasını desteklemiştir. 2 saat sonra bu, R_{ct} 'nin boş çözeltiden daha yüksek değerlere yükselmesine yol açmıştır. 24 saatlik bir

süre boyunca %50-59 aralığında sabit %IE gözlenmiştir. 2 saatlik aralıklarla, nitrit iyonu tarafından pasif oksit tabakasının büyümesinin hızlanmasına bağlı olabilen %54 IE elde edilmiştir. 6. saatte, %IE maksimum %59,5'e ulaşmıştır. 12 saatte, %IE- %58'e düşmüş ve 24 saatlik aralıkta %50,5'e kadar gerilemiştir. Genel olarak, nitrit iyonunun pasif tabakanın büyümesine yardımcı olmaya devam etmesi ve %IE 'nin 24 saate ulaşana kadar artış eğilimini sürdürmesi beklenmiştir. %IE 'nin bu düşüşü, nitrit iyonunun kendisinin bakır yüzeyinde bir reaksiyona karıştığını gösterebilir. Fizisorpsiyon süreci belirli bir süre sonra böyle bir ilişkiye dahil edilmiş olsaydı, %IE 'deki düşüş, sonraki bölümde tartışılacak olan ilgili adsorpsiyon modu ile açıklanabilirdi. 14400 s sonra nitrit iyonu bakırın anodik çözünmesine müdahale etmeye devam etti ve inhibitörsüz SCW çözeltisine kıyasla daha yüksek bir R_{ct} değeri elde edilmiştir. Bu analizin sonuçları, SCW'de bakır korozyonunun önlenmesinde sodyum nitritin etkili olduğunu göstermektedir.

3.1.1.3. Adsorpsiyon izotermi

Nitrit iyonunun bakır yüzey üzerinde adsorpsiyon sürecini tasvir eden izotermeler, mevcut durumda korozyon inhibisyonunun daha iyi anlaşılmasını sağlar. Adsorpsiyon işlemi, bütüne yakın olması gereken korelasyon (χ^2) değerlerine dayalı olarak modifiye edilmiş Langmuir adsorpsiyon izotermine, Freundlich adsorpsiyon izotermine ve Frumkin adsorpsiyon izotermine uyma eğilimindedir. Bu şekilde elde edilen adsorpsiyon parametreleri Çizelge 3.3'te listelenmiştir.

Çizelge 3.3. Oda sıcaklığında 2 saat NaNO_2 tarafından inhibe edilen SCW'deki bakır numuneleri için elde edilen adsorpsiyon değerleri

Adsorpsiyon izotermi	Eğim	Kesişim	χ^2	K_{ads}	ΔG_{ads} kJ mol ⁻¹	Etkileşim Parametresi Çarpanı
El- Awady	0.7091	3.1436	0.9944	27108.34	-24.86	1/y=1.4
Freundlich	1.1532	3.5098	0.9897	3962.78	-20.18	n=1.1
Frumkin	0.7477	5.9139	0.9755	368.97	-14.39	a=0.4

DeneySEL veriler en iyi, inhibitörün bakır yüzey üzerindeki adsorpsiyon davranışını uygun şekilde temsil edebilen El-Awady izotermi olarak bilinen Langmuir izoterminin değiştirilmiş formuna uydurulmuştur (Şekil 3.6-a) [117].

El-Awady izotermi,

$$\log \left(\frac{\theta}{1-\theta} \right) = \log K + y \log C \quad (3.2)$$

olarak verilir. Burada y , bir aktif bölgeyi işgal eden inhibitör moleküllerinin sayısıdır, θ yüzey kapsamıdır, C konsantrasyondur ve K_{ads} , adsorpsiyon sürecinin denge sabiti ile ilgili sabittir.

$$K_{ads} = K^{1/y} \quad (3.3)$$

Birden küçük olan $1/y$ değerleri, çok katmanlı adsorpsiyon anlamına gelir. Mevcut çalışmada, elde edilen $1/y$ değerleri birden fazla ($1/y = 1.4$) olup, adsorpsiyon işlemine dahil olan inhibitörün her molekülünün bakır yüzeyinde birden fazla aktif bölgeye bağlandığını göstermektedir. Bunun nedeni, anodik bölge ile ilişkili iki hidroksit veya iki nitrit iyonunun varlığı olabilir. Adsorptif denge sabiti (K_{ads}) (adsorpsiyon izotermelerinin grafiklerinin kesişiminden hesaplanır), Denklem (3.4) 'e göre standart adsorpsiyon serbest enerjisinin (ΔG_{ads}) türetilmesine yol açar. Su molekülü konsantrasyonu 1000 g/L'dir, R evrensel gaz sabitidir ($R = 8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) ve T , mevcut analizde oda sıcaklığı olan mutlak sıcaklığına (K) karşılık gelir.

$$K_{ads} = \frac{1}{C_{H_2O}} \exp \frac{-\Delta G_{ads}}{RT} \quad (3.4)$$

Burada su molekülü konsantrasyonu 1000 g/L'dir, R evrensel gaz sabitidir ($R = 8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) ve T , mevcut analizde oda sıcaklığı olan mutlak sıcaklığına (K) karşılık gelir.

Freundlich izotermi, aşağıdaki denklemlere göre olan adsorpsiyonları ve etkileşimleri önermektedir: Denklem (3.5), (3.6).

$$\theta = KC^n \quad (3.5)$$

$$\log \theta = \frac{1}{n} \log C + \log K_{ads} \quad (3.6)$$

$1/n = 1.15$, adsorbe edilen molekülün özelliklerine bağlı olan bir sabittir ve K_{ads} ($3.2 \times 10^3 \text{ ppm}^{-1}$), adsorbe edilmiş katmandaki etkileşimin gücünü ifade eden adsorpsiyon-desorpsiyon dengesi sabitidir. Aslında sıfıra yakın bir değer heterojen bir yüzeyi belirtirken, bütünün altındaki bir değer güçlü bir adsorpsiyon (kemisorpsiyon) anlamına

gelmektedir ve bütünün üstü, orta dereceli bir (kapsamlı / karışık) adsorpsiyonun göstergesidir. $1/n$ değeri bütünden biraz daha fazladır, bu da bakır yüzeyinde orta derecede bir fiziksel adsorpsiyon olduğunu gösterir. Freundlich izoterm grafiği için korelasyon katsayısı 0,98 dir [118].

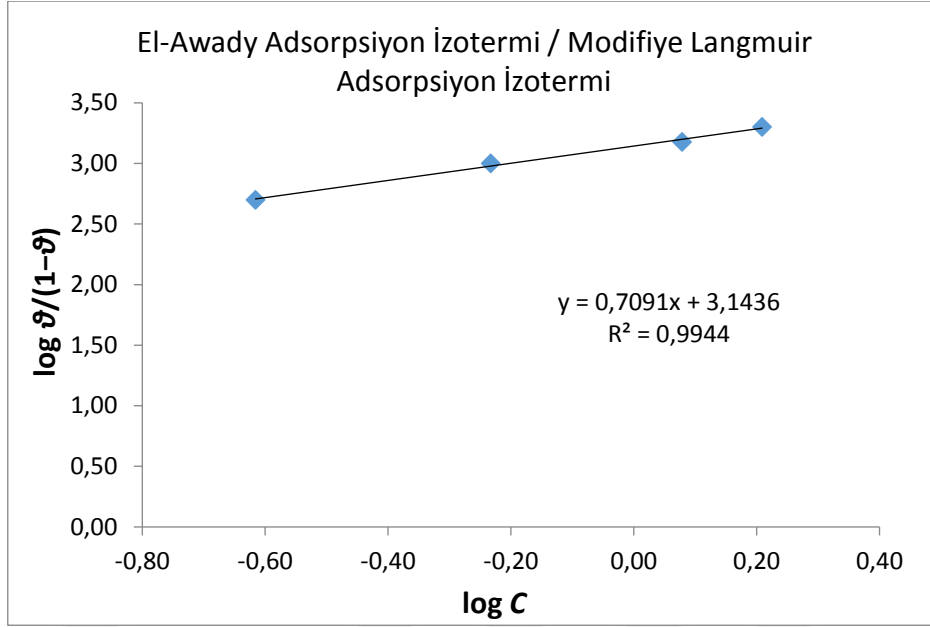
Frumkin adsorpsiyon izotermi, bakır yüzeyinin heterojen olduğunu ve aşağıdaki denklem (3.6) ya göre adsorbe edilen moleküller arasındaki etkileşimi varsaymaktadır:

$$\log \frac{\theta}{(1-\theta).C} = K_{ads} C e^{2\alpha\theta} \quad (3.7)$$

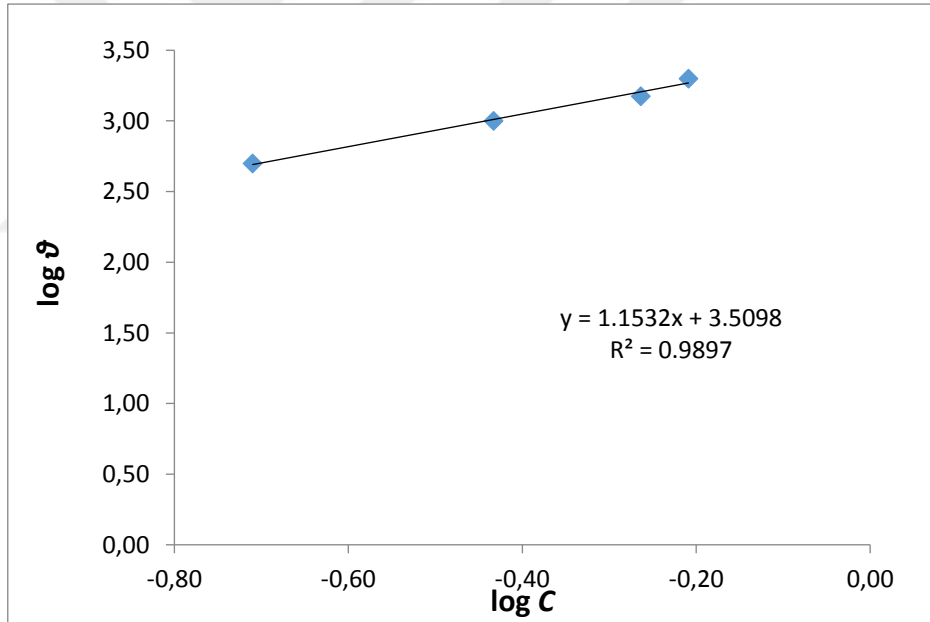
Denklem (3.7) şu şekilde yeniden düzenlenmiştir:

$$\log \frac{\theta}{(1-\theta).C} = 2.303 \log K_{ads} + 2\alpha\theta. \quad (3.8)$$

Denklem 3.8’de α (0.37), adsorbe edilmiş katmandaki moleküler etkileşimi tanımlayan etkileşim parametresidir ve Frumkin izoterm grafiğinin eğiminden hesaplanır. Adsorbe edilen türler arasındaki çekme ($\alpha > 0$), itme ($\alpha < 0$) ve etkileşimsizlik ($\alpha = 0$) hesaba katıldığında, izoterm Langmuir izoterminin eşdeğeri olur. $+\alpha$ adsorpsiyonunda enerji θ ile artar, negatif α adsorpsiyonunda ise enerji θ ile azalır. α değeri yüzeyde adsorbe edilen türler arasında hafif bir etkileşim olduğunu düşündürmektedir [119]. Burada K_{ads} (368.97 ppm⁻¹) adsorpsiyon-desorpsiyon sabitidir.

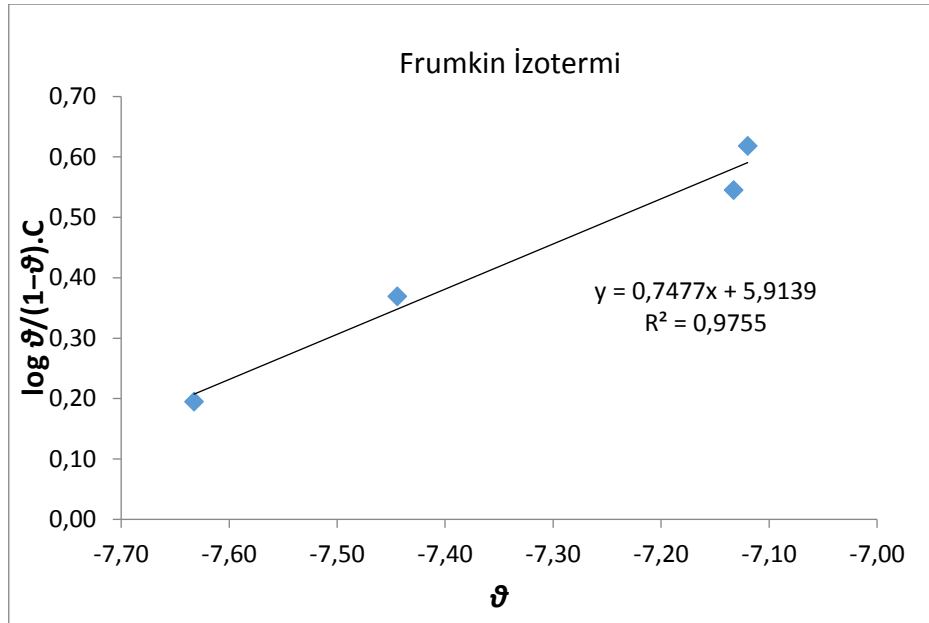


(a)



(b)

Şekil 3.6. SCW'ye batırılmış bakır numunesi için 2000 ppm NaNO₂ ile inhibe edilen adsorpsiyon izotermi (a-b-c).



(c)

Şekil 3.6. (devam) SCW'ye batırılmış bakır numunesi için 2000 ppm NaNO₂ ile inhibe edilen adsorpsiyon izotermi (a-b-c).

$$\omega = \chi^2 / 2\eta = \mu^2 / 2\eta \quad (3.9)$$

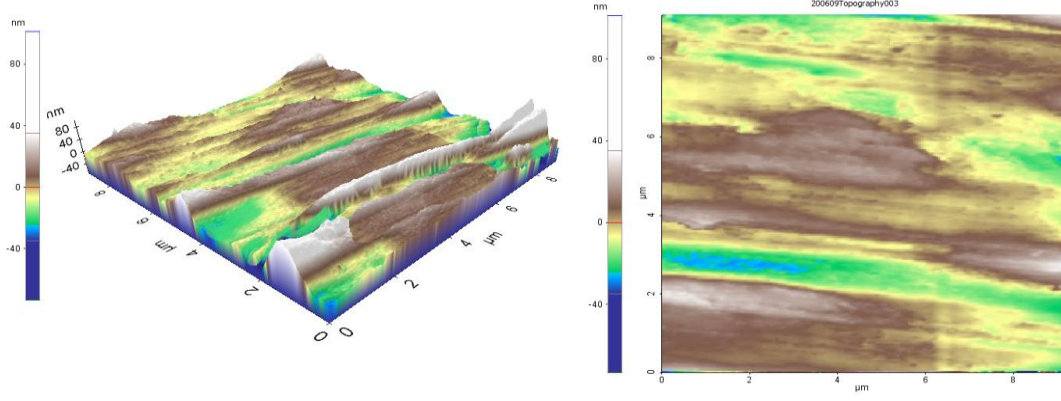
Denklem (3.9) 'a göre türetilen ΔG_{ads} negatif değerleri, adsorpsiyon sürecinin spontanlığını ve metal yüzeydeki adsorbe edilen tabakanın stabilitesini sağlamıştır. Genel olarak, -20 kJ mol⁻¹'e kadar ΔG_{ads} değerleri, yüklü moleküller ve yüklü metal arasındaki elektrostatik etkileşimlerle tutarlıdır (fiziksel adsorpsiyon). Oysa ki -40 kJ mol⁻¹ veya daha yüksek olanlar, bir koordinat tipi bağ (kemisorpsiyon) oluşturmak için elektronların inhibitör moleküllerinden metal yüzeye paylaşılması veya aktarılmasının bir sonucu olarak kemisorpsiyon ile ilişkilidir [120]. Çizelge 3.3'te listelenen ΔG_{ad} değerlerinin tümü negatiftir, bu da inhibitörün bakır yüzeyinde kendiliğinden adsorpsiyonunu düşündürür. Değerlerin aralığı fiziksel emilimin baskın rolünü göstermektedir. Bununla birlikte, El-Awady izotermi, bakır yüzeyinin korunmasında doğrudan rol oynayan iki heteroatom N ve O varlığında meydana gelebilecek kapsamlı adsorpsiyon tipinin rolünü gösterir. Özetle, adsorpsiyon analizi, birden fazla inhibitör türünün bakır yüzey üzerindeki her bir aktif bölge ile ilişkili olduğunu ve adsorbe edilen türlerin birbiriyle etkileşime girdiğini gösterebilir. Bakırın yüzeyinde 2 saat sonra CuO / Cu(OH)₂ oluşmuştur. Nitrit iyonunun bakır yüzeyine adsorpsiyonundan bir yer değiştirme reaksiyonunun sorumlu olma ihtimali de vardır.

3.1.2. Yüzey Analizi

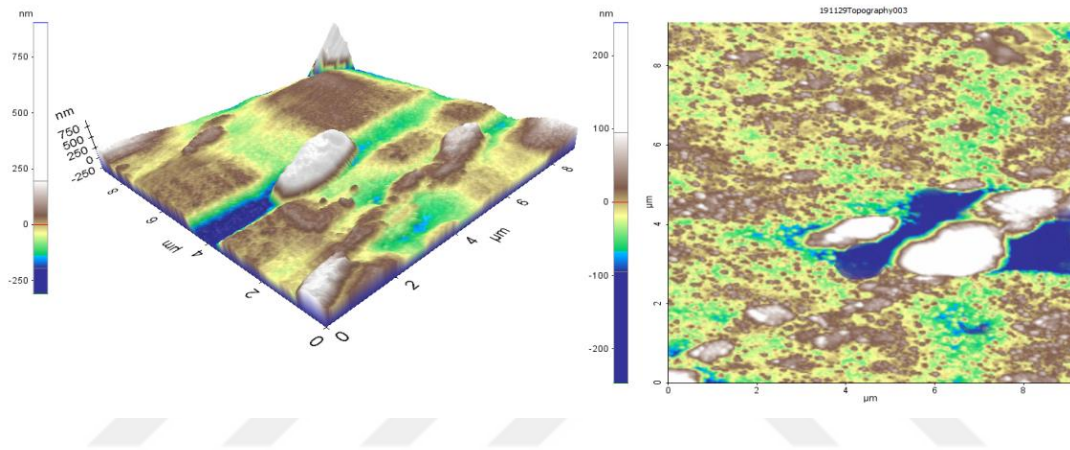
Yüzey analizi, bir inhibitörün SCW'de bir bakır yüzey üzerindeki adsorpsiyon davranışı hakkında önemli çıkarımlara rehberlik eder. Yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi ve bakır numunelerine adsorbe edilen moleküllerin kantitatif ve kalitatif yargısı ancak yüzey analizi ile anlaşılabilir. İnhibe edilen numunelerin yüzey bileşimi çalışmasının önemli amaçlarından biri, adsorpsiyonun yalnızca oksijene bağlı olup olmadığını veya nitrojenin bakır yüzeyle de ilişkili olup olmadığını ortaya çıkarmaktır.

3.1.2.1. AFM

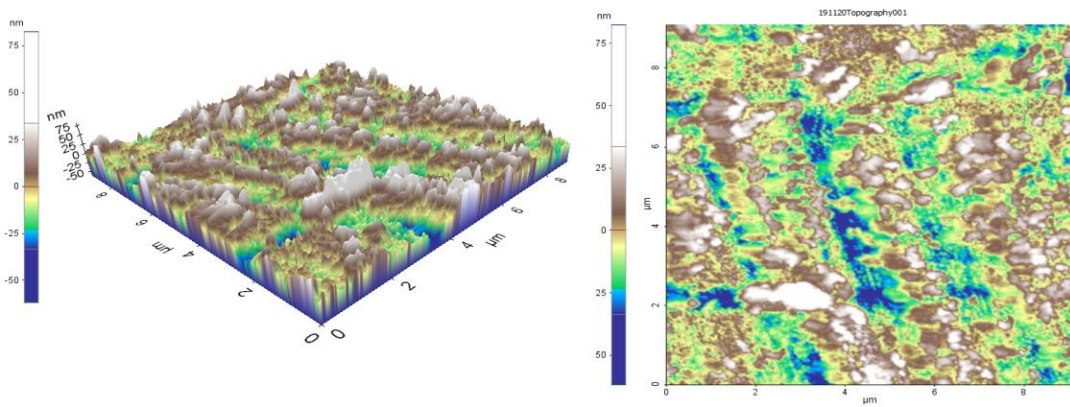
NaNO_2 'nin SCW'ye daldırıldığında bakır yüzeyin homojenliği sürdürmedeki ve korozyonu önlemedeki etkinliğini ve rolünü değerlendirmek için, AFM aracılığıyla her numune için elde edilen 3D ve 2D görüntüler incelenmiştir. Yeni cilalanmış bakır numunesi, 27,4 nm'lik bir ortalama pürüzlülük faktörüne (R_m) sahiptir (Şekil 3.7-a). Bu cilalanmış numune 2 saat boyunca SCW'ye daldırıldığında, pürüzlülük $R_m = 246,8$ nm'ye düşürülmüştür (Şekil 3.7-b). Deney öncesi bakır numunede gözlemlenen aşınma çizgilerinin SCW'ye batırılmış numunede çözüldüğü oldukça açıktır. İnhibe edilmiş çözelti içindeki aşınmış numune ayrıca 2B görünümde mavi renkli bölgeler göstermiştir, bu da klorür iyonlarının neden olduğu çukurlaşmaya atfedilebilir (Şekil 3.7-a). Görüntülerin renk skalasına göre mavi bölgeler, metalin korozyonla çıkarıldığı alanları göstermektedir. Lokal korozyon, aşınmış numunede çok açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 3.7-b). 2000 ppm NaNO_2 ile inhibe edilen bir SCW çözeltisine daldırıldığında numunenin pürüzlülüğü azalmış ve mavi bölgelerde azalma gözlenmiştir. Ortalama pürüzlülük $R_m = 32,9$ nm'ye yükselmiştir (Şekil 3.7-c)'de inhibe edilen numunenin 2D görüntüsünde az sayıda mavi bölge (çukurlar) belirgindir, bu daha az çukurlaşma ve düşük korozyon anlamına gelir. Sodyum nitrit ilavesi, bakır numunesinin yüzey pürüzlülüğünü açıkça iyileştirmiştir ki bu AFM görüntülerinde çok belirgindir.



(a) $R_m = 27.4 \text{ nm}$



(b) $R_m = 246.8 \text{ nm}$

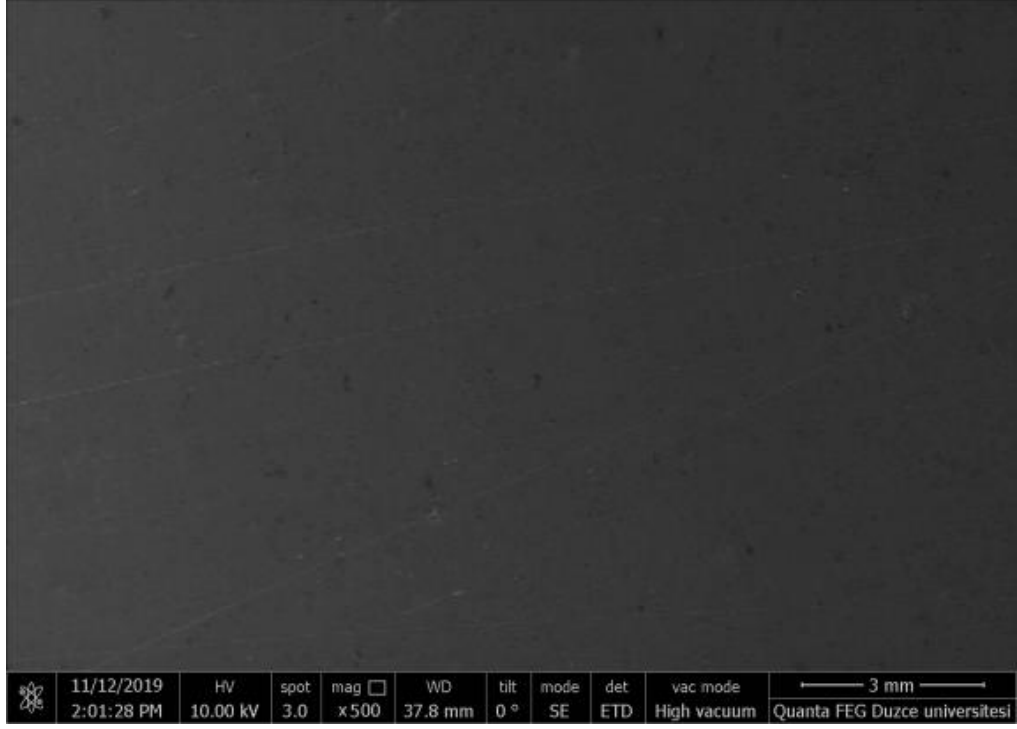


(c) $R_m = 32.9 \text{ nm}$

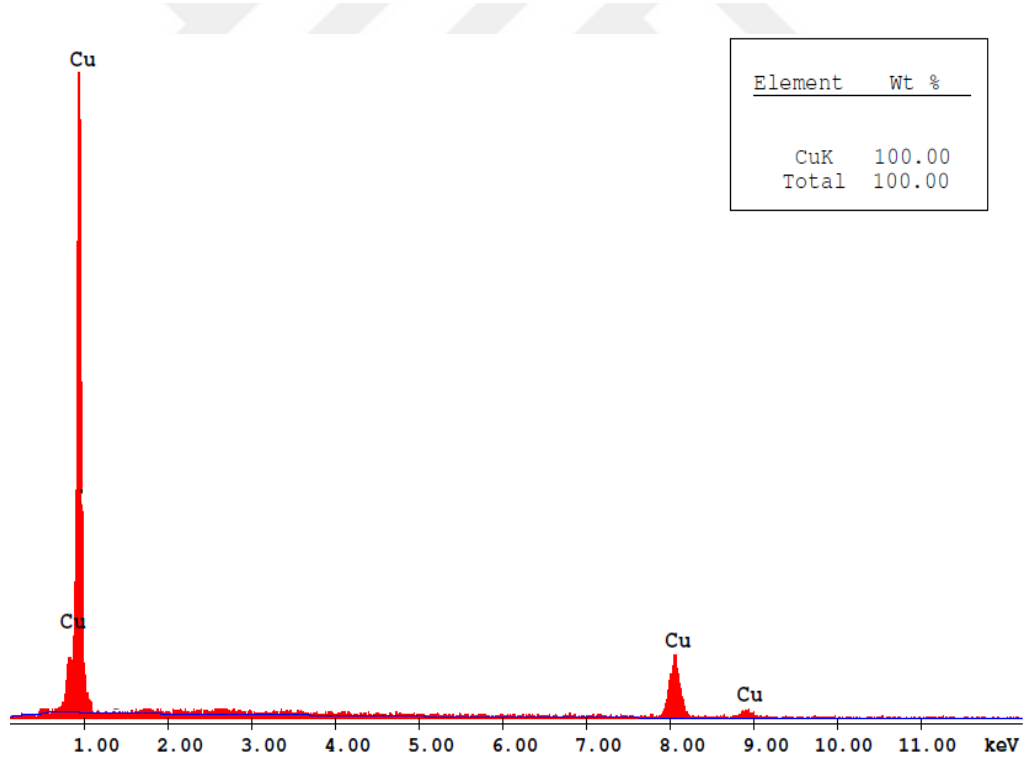
Şekil 3.7. AFM görüntüleri: (a) deney öncesi bakır numunesi, (b) SCW'de aşınmış bakır numunesi, (c) SCW + 2000 ppm NaNO_2 'de aşınmış bakır numunesi

3.1.2.2. SEM/EDS

Deney öncesi, inhibitörsüz ve 200 ppm NaNO_2 ilaveli ortamdaki korozyon ile metal yüzeyinde meydana gelen morfolojik değişim SEM ve EDS analizleriyle incelenmiştir (Şekil 3.8 (a-f)). Bakır yüzeyde meydana gelen değişiklikler SEM ile elde edilen görüntülerden anlaşılır ve yüzeyin elementel bileşimi EDS ile gösterilir. (Şekil 3.8-a)'daki deney öncesi bakırın SEM görüntüsü, SiC kâğıdı kullanılarak yüzey hazırlığına atfedilebilecek birkaç aşındırma çizgisine sahip, aşınmamış, oldukça pürüzsüz bir yüzey göstermektedir. İlgili EDS grafiği, yüzeyde herhangi bir korozyon ürünü olmadığını ve saf bir bakır numunesi olduğuna işaret etmektedir (Şekil 3.8-b). (Şekil 3.8-c)'de SCW'ye daldırılan bakır numunesinin SEM'i, EDS spektrumlarında klorür, kükürt ve oksijen sinyallerinin varlığıyla ilişkilendirilebilen önemli ölçüde aşınmış ve çukurlu bir yüzey göstermektedir (Şekil 3.8-d). Aşınmış numunenin yüzeylerinde, bir miktar homojen korozyonla birlikte bölgesel korozyon daha belirgindir. Yüzeydeki klorür ve sülfür iyonlarının miktarı, SCW'deki düşük milimolar konsantrasyonları nedeniyle düşük bir sinyal ile temsil edilmektedir. Bununla birlikte, bu tür konsantrasyonlarda bile bu agresif iyonların bakır yüzeyinde önemli yerel hasara neden olduğunu ifade etmek oldukça ilginçtir. Oksijen sinyali, klorür sinyalinden daha belirgindir ve ağırlık yüzdesi klorürünkünden daha yüksektir, bu da paslanmış yüzeyde oksitlerin, özellikle inhibe edilmemiş numune durumunda bakır oksit varlığını göstermektedir.

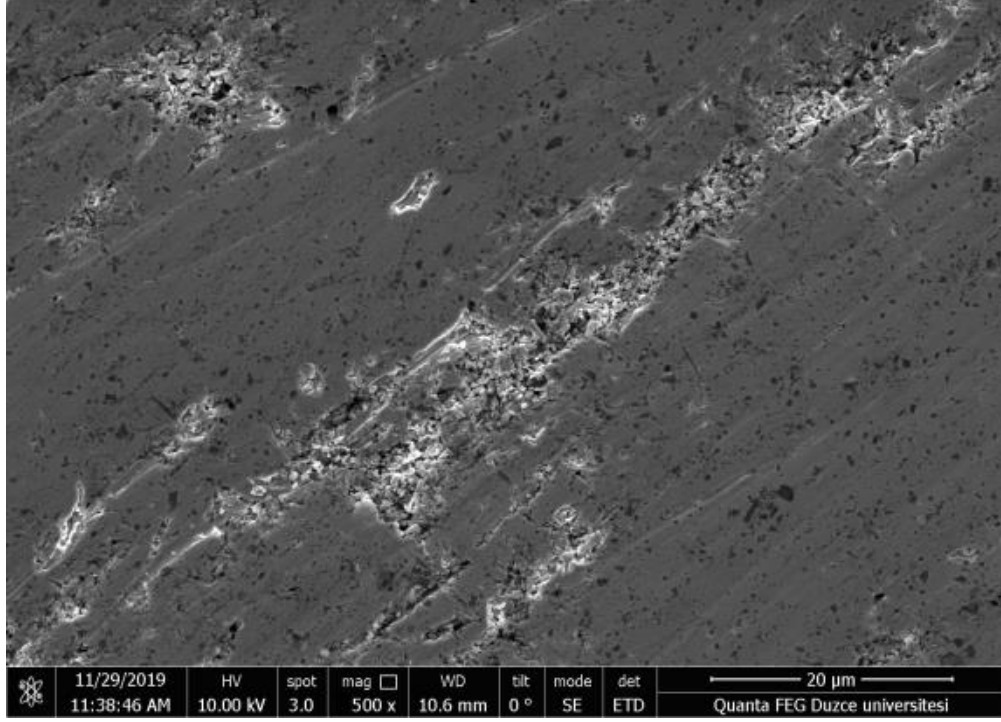


(a)

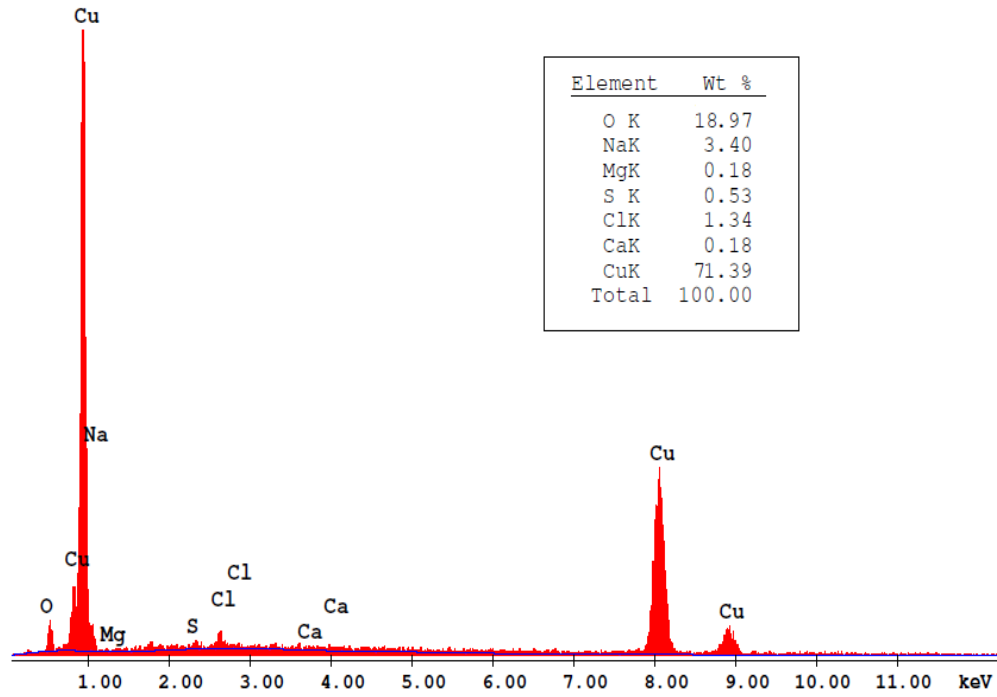


(b)

Şekil 3.8. SEM ve EDS görüntüleri: (a), (b) deney öncesi bakır numunesi, (c), (d) SCW'de aşınmış bakır numunesi, (e), (f) SCW + 2000 ppm NaNO_2 'de aşınmış bakır numunesi.

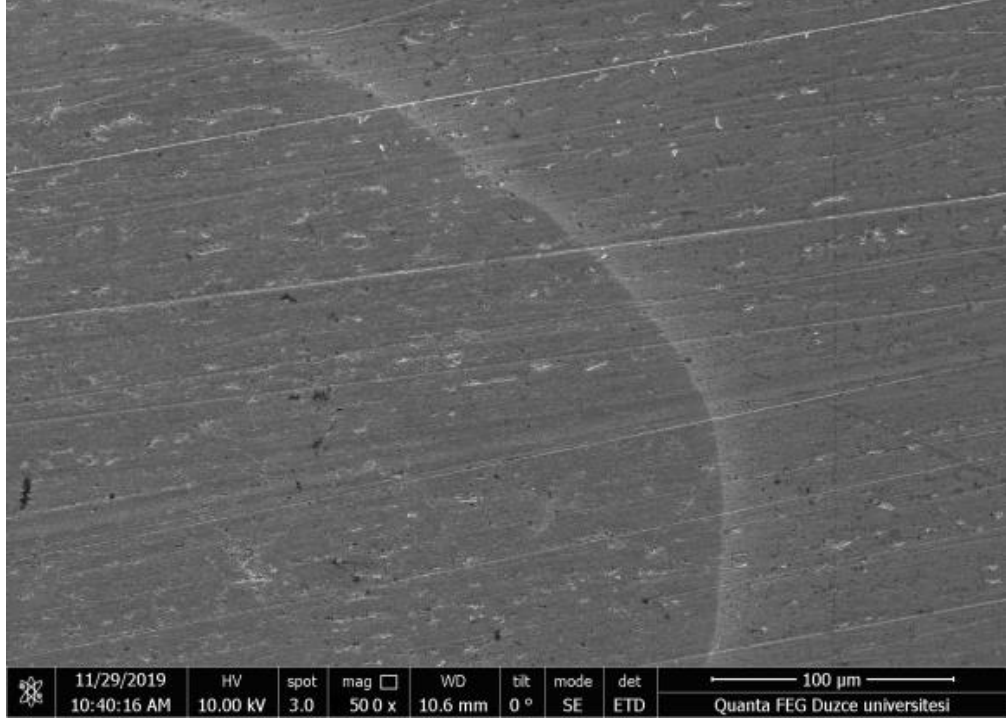


(c)

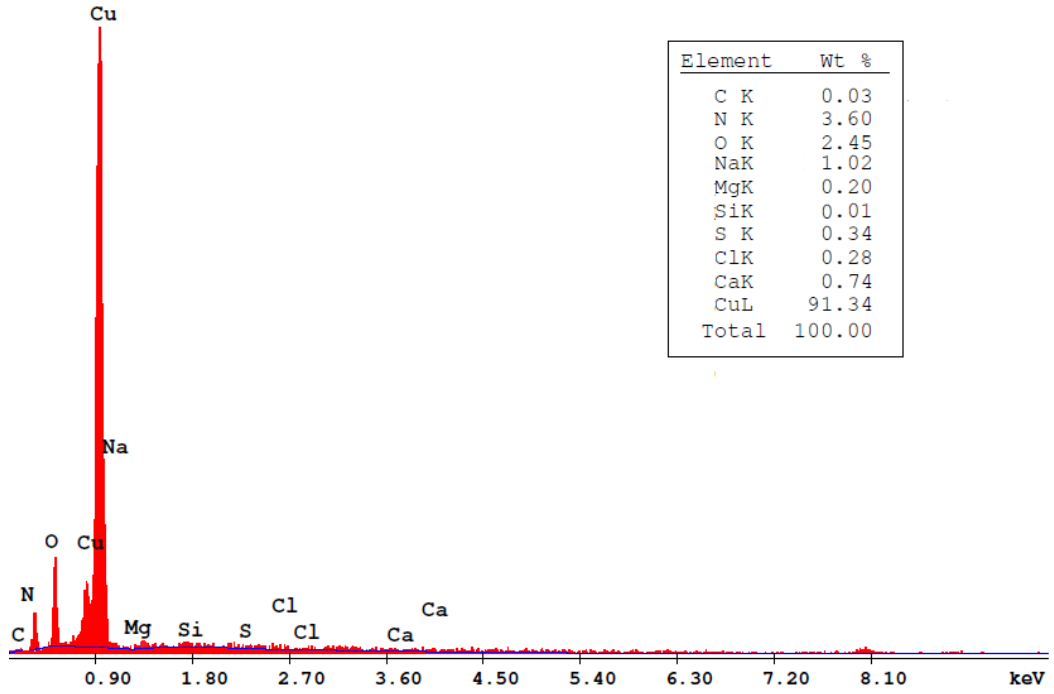


(d)

Şekil 3.8. (devam) SEM ve EDS görüntüleri: (a), (b) deney öncesi bakır numunesi, (c), (d) SCW'de aşınmış bakır numunesi, (e), (f) SCW + 2000 ppm NaNO₂'de aşınmış bakır numunesi.



(e)



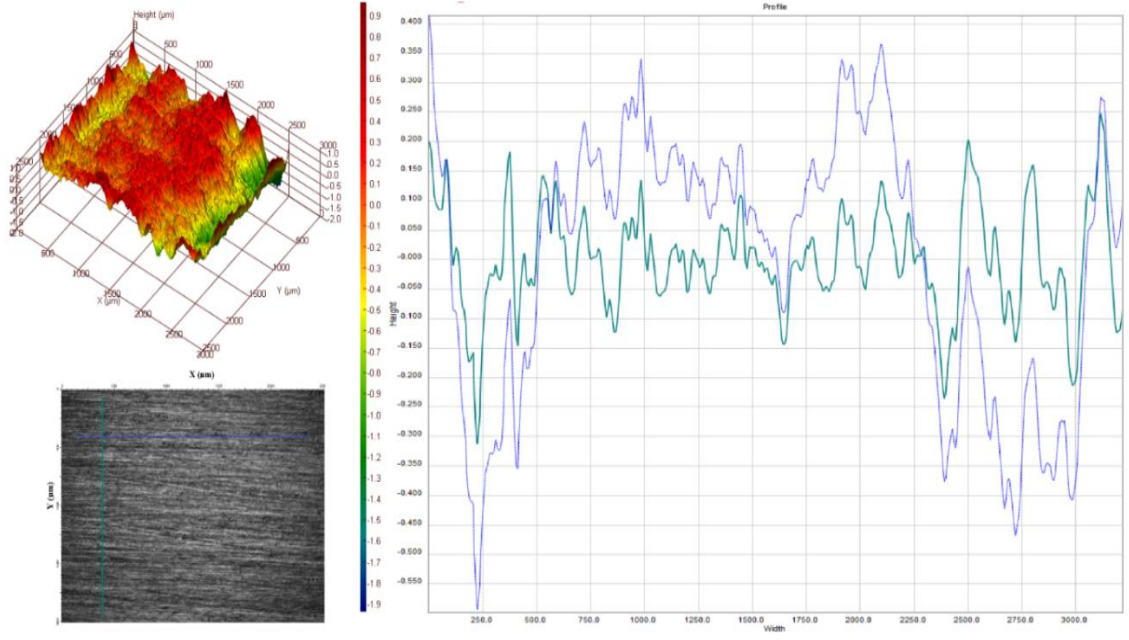
(f)

Şekil 3.8. (devam) SEM ve EDS görüntüleri: (a), (b) deney öncesi bakır numunesi, (c), (d) SCW'de aşınmış bakır numunesi, (e), (f) SCW + 2000 ppm NaNO₂'de aşınmış bakır numunesi.

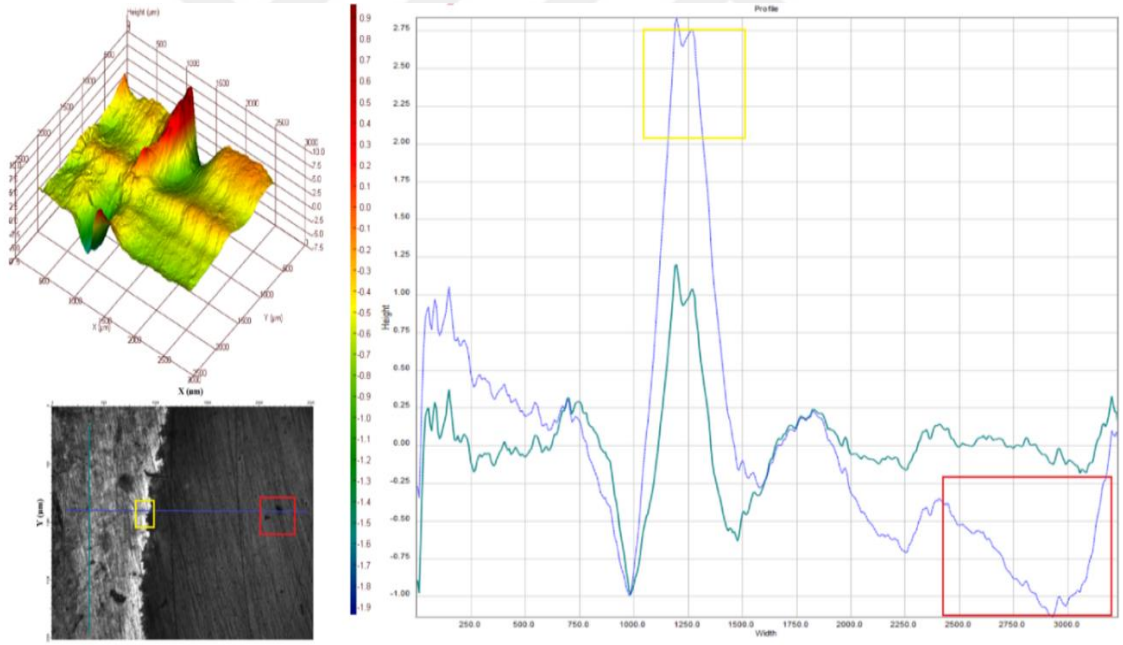
(Şekil 3.8-e)'de 2000 ppm NaNO_2 tarafından inhibe edilen bakır numunesinin SEM görüntüsünde fark edilen birincil özellik, daha önce gözlemlenen önemli korozyon ve oyulmanın (delinme), SCW'de aşınan inhibe edilmemiş numuneye kıyasla artık oldukça azalmış olmasıdır. Bakır yüzeyinde bulunan, önemli miktarda N ve O ve eser miktarda S'nin varlığını gösteren elementlerin EDS değerlerinde daha açık bir yorum görülmektedir. EDS grafiğine (Şekil 3.8-f)'ye göre inhibe edilen yüzeyde Cl^- iyonlarının miktarı azalmaktadır, bu da nitrit iyonlarının klorürün bakır yüzeyle birleşmesini açıkça engellediğini gösterir. Oksijen sinyali, inhibe edilen örnekte oldukça düşüktür çünkü sodyum nitrit, bakır yüzeyinde bakır oksit ve hidroksitlerin oluşumuna daha uygundur, bu da inhibitör molekülleri tarafından yer değiştirilebilir ve dolayısıyla oksijen için düşük bir sinyal elde edilmiştir. EDS spektrumu ayrıca inhibe edilen örnekteki bakır yüzdesinde bir iyileşme gösterir.

3.1.2.3. Optik profilometre (OP)

Bakır yüzeydeki yüzey pürüzlülük değerlerini, malzeme kaybını ve çukurları tespit etmek ve SCW ile inhibitörün etkisini belirlemek için optik profilometre yapılmıştır. 3D görüntü, cilalanmış numunedeki kırmızı (aşınmamış) bölgeleri (Şekil 3.9-a) ve inhibe edilmemiş SCW'de aşındırılmış numunedeki aşınmamış kırmızı alanları çok açık bir şekilde göstermektedir (Şekil 3.9-b). Öte yandan inhibe edilmiş SCW'deki örnek, 3 boyutlu görüntüde aşınmış alanların yanı sıra daha fazla korunan alanları da göstermektedir (Şekil 3.9-c).

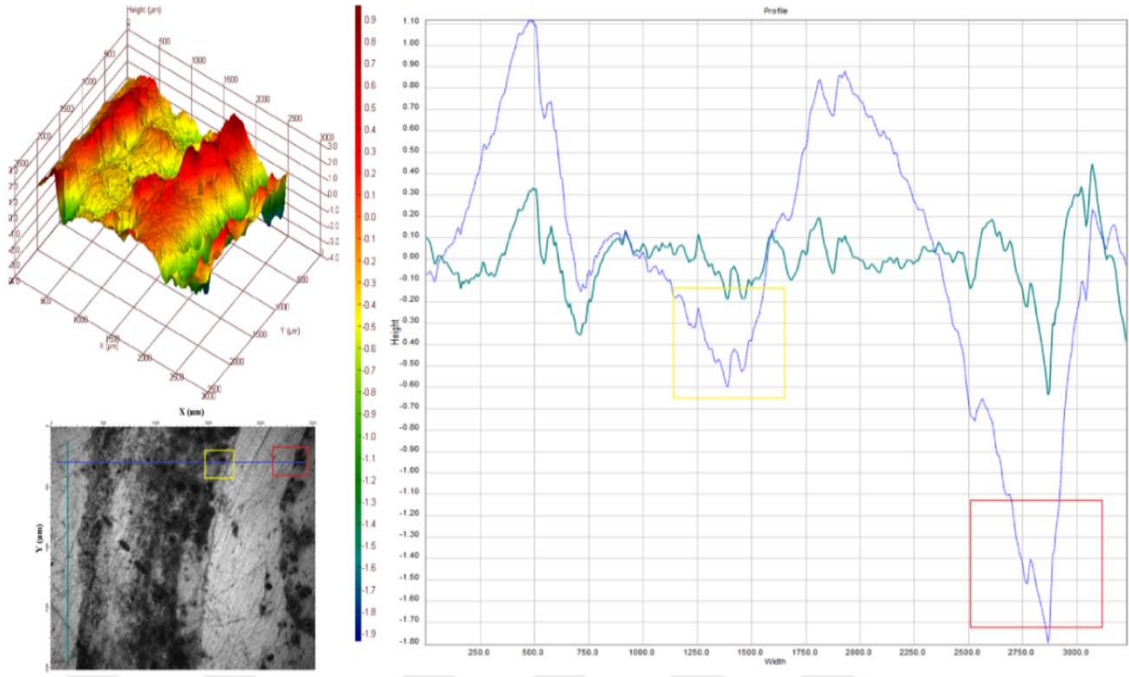


(a)



(b)

Şekil 3.9. Optik profilometrik görüntüler: (a) deney öncesi bakır numunesi, (b) SCW'de aşınmış bakır numunesi, (c) SCW + 2000 ppm NaNO_2 'de aşınmış bakır numunesi



(c)

Şekil 3.9. (devam) Optik profilometrik görüntüler: (a) deney öncesi bakır numunesi, (b) SCW'de aşınmış bakır numunesi, (c) SCW + 2000 ppm NaNO₂'de aşınmış bakır numunesi

2D görüntü ve yükseklik profili, SCW'ye daldırılmış aşınmış numunedeki lokalize ve çukur korozyonu net bir biçimde göstermektedir (Şekil 3.9-b). SCW'deki 2000 ppm NaNO₂ tarafından inhibe edilen numune, tüm numunenin vadi-derinlik oranında ve ortalama pürüzlülüğünde bir iyileşme göstermektedir (Şekil 3.9-c). Nicel veriler Çizelge 3.4'te sunulmuştur.

Çizelge 3.4. SCW'de 2000 ppm NaNO₂ tarafından inhibe edilen bakırın optik profilometre sonuçları

Numuneler	Ortalama Pürüzlülük R_a (μm)	Ortalama Doku Derinliği R_t (μm)	Pürüzlülük Derinliği R_z (μm)	Ortalama Vadi Derinliği R_v (μm)	Ortalama Tepe Yüksekliği R_p (μm)
Deney öncesi bakır numune	0.06	0.57	0.38	-0.31	0.24
İnhibitörsüz	0.21	2.23	1.16	-1.01	1.23
2000 ppm NaNO ₂	0.11	1.09	0.55	-0.51	0.45

3.2. SODYUM NİTRİT İNHİBİTÖRÜNÜN BAKIR SERPANTİN KOROZYONUNA ETKİSİNİN YÜZEY ANALİZ YÖNTEMLERİYLE İNCELENMESİ

21 gün süreyle farklı ortamlara (SCW ve NaNO₂ ilaveli SCW) maruz bırakılan bakır serpantinlerde meydana gelen korozyon davranışları Şekil 3.10 'da gösterilmiştir. Bakır serpantinlerin deney sonrası yüzeyinde meydana gelen değişimler AFM ve SEM-EDS analizleri ile belirlenmiştir.



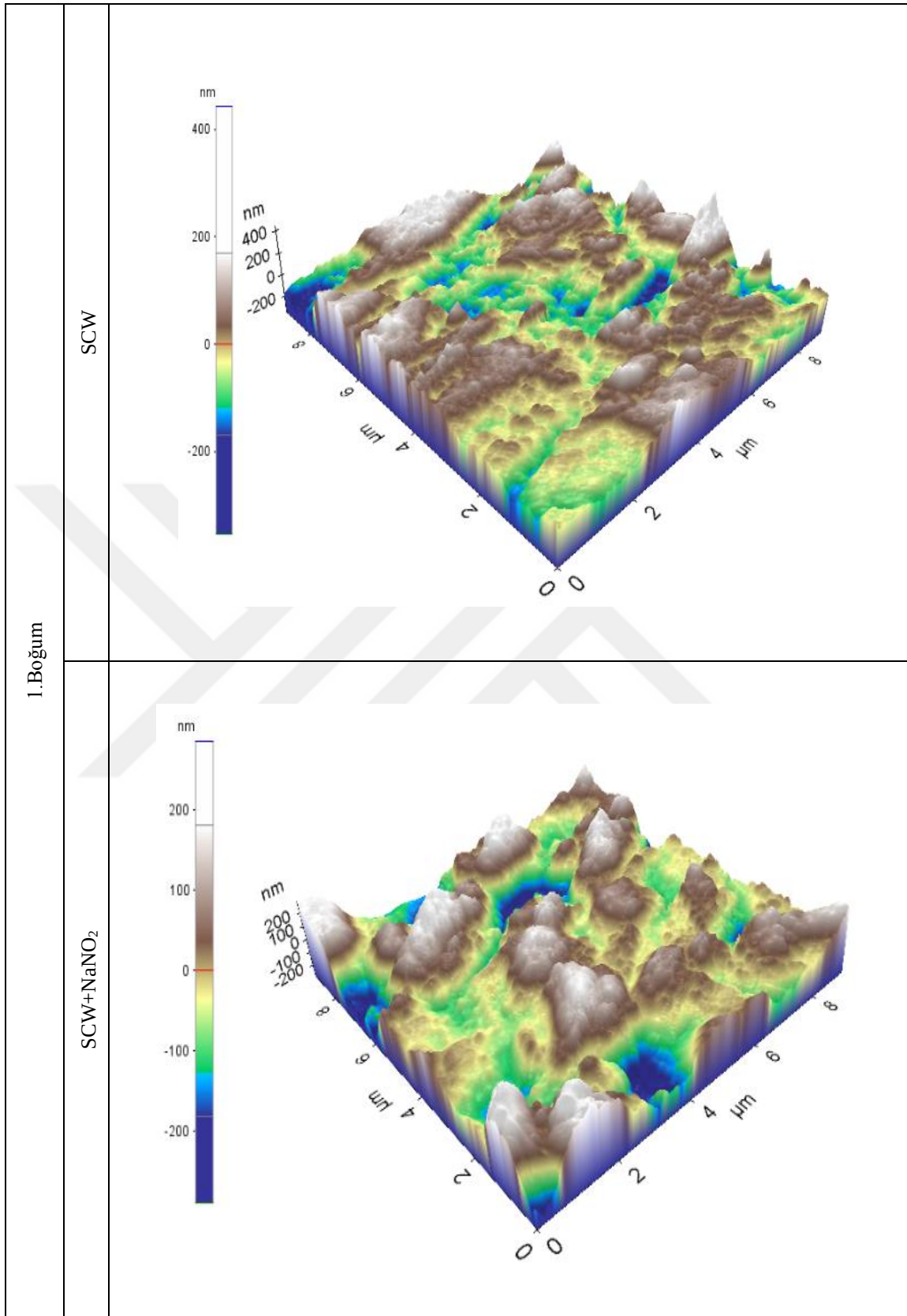
Şekil 3.10. 21 gün boyunca farklı ortamlarda korozyona maruz bırakılmış bakır serpantinler; (a) SCW, (b) SCW+NaNO₂.

Şekil 3.10'da 21 gün sonunda deney düzeneğinden alınan bakır serpantinlere ait korozyon görüntüleri yer almaktadır. Şekil 3.10-(a)'da görüldüğü üzere serpantinin yüzeye yakın ilk 3 boğumunda oluşan yeşil renk bakırın korozyona uğraması sonucu yüzeyde oluşan karakteristik Cu_2O tabakasının oluştuğunu göstermektedir. Serpantinın kalan diğer boğumlarının (4-8) yüzeylerinde SCW yapısında bulunan tuzların etkisiyle tabaka oluşumu görülmektedir. Ayrıca SCW'nin pH'ı maksimum inhibitör konsantrasyonunda 7,07'den 7,90'a yükselmiştir.

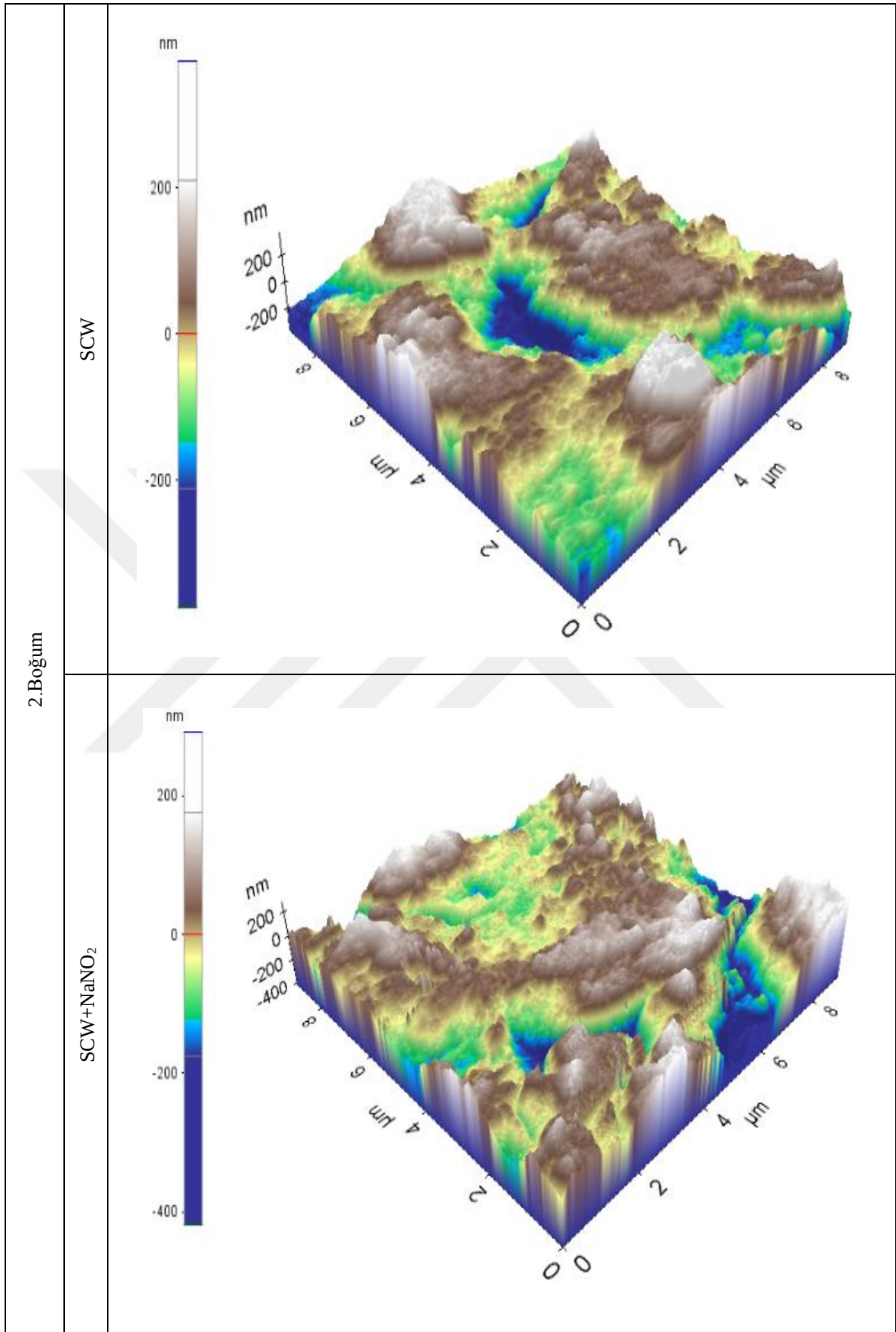
Şekil 3.10-(b)'de 21 gün sonunda oluşan görüntü Şekil 3.10-(a)'dan farklı olduğu açıkça görülmektedir. Serpantin yüzeyinde oluşan siyah renk; yüzeyde CuO tabakasının oluştuğunu kanıtlamaktadır. Anodik inhibitör olarak kullanılan [95] NaNO_2 sayesinde serpantinın yüzeyinde kireçlenmeye bağlı tabaka oluşumu gözlemlenmemiştir. Isı transfer sistemlerinde, metal yüzeyinde oluşan kireç tabakaları cihazların çalışma verimlerinde azalmaya neden olan en önemli faktörlerden biridir. Oluşan kireç tabakası metali bir müddet korozyona karşı korusa da zamanla oluşacak kabuk altı korozyon cihazın servis dışına çıkmasına neden olabilmektedir.

3.2.1. AFM Analizi

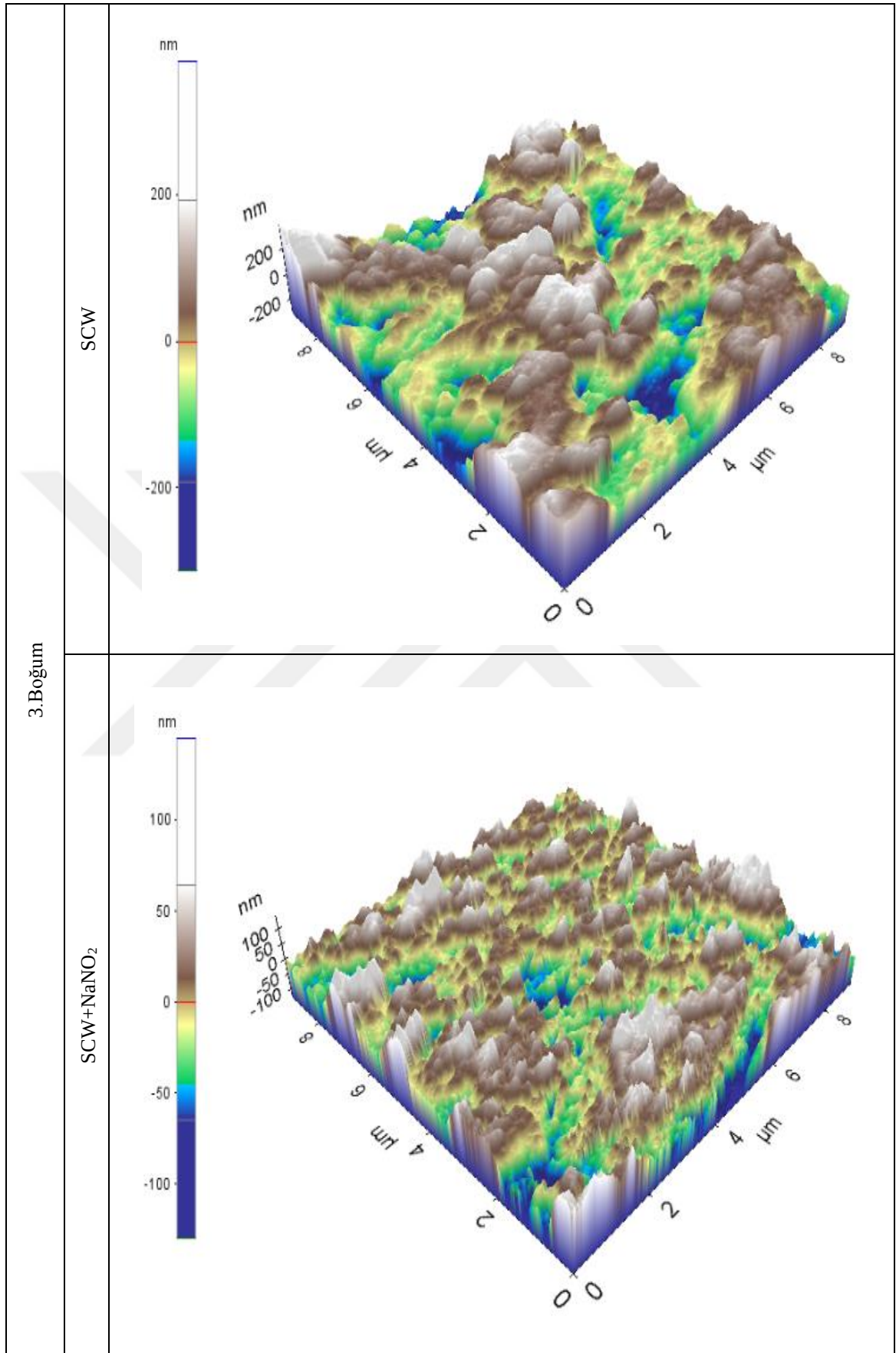
Deney sonrası ortamdan alınan bakır serpantinlerin korozyon davranışlarının daha detaylı incelenmesi amacıyla yapılan AFM analizleri Şekil 3.8'de gösterilmiştir. 8 boğumdan oluşan bakır serpantinler yukarıdan aşağıya olacak şekilde 1'den 8'e kadar numaralandırılarak her boğuma ait görüntü analizleri ayrı ayrı belirlenmiştir.



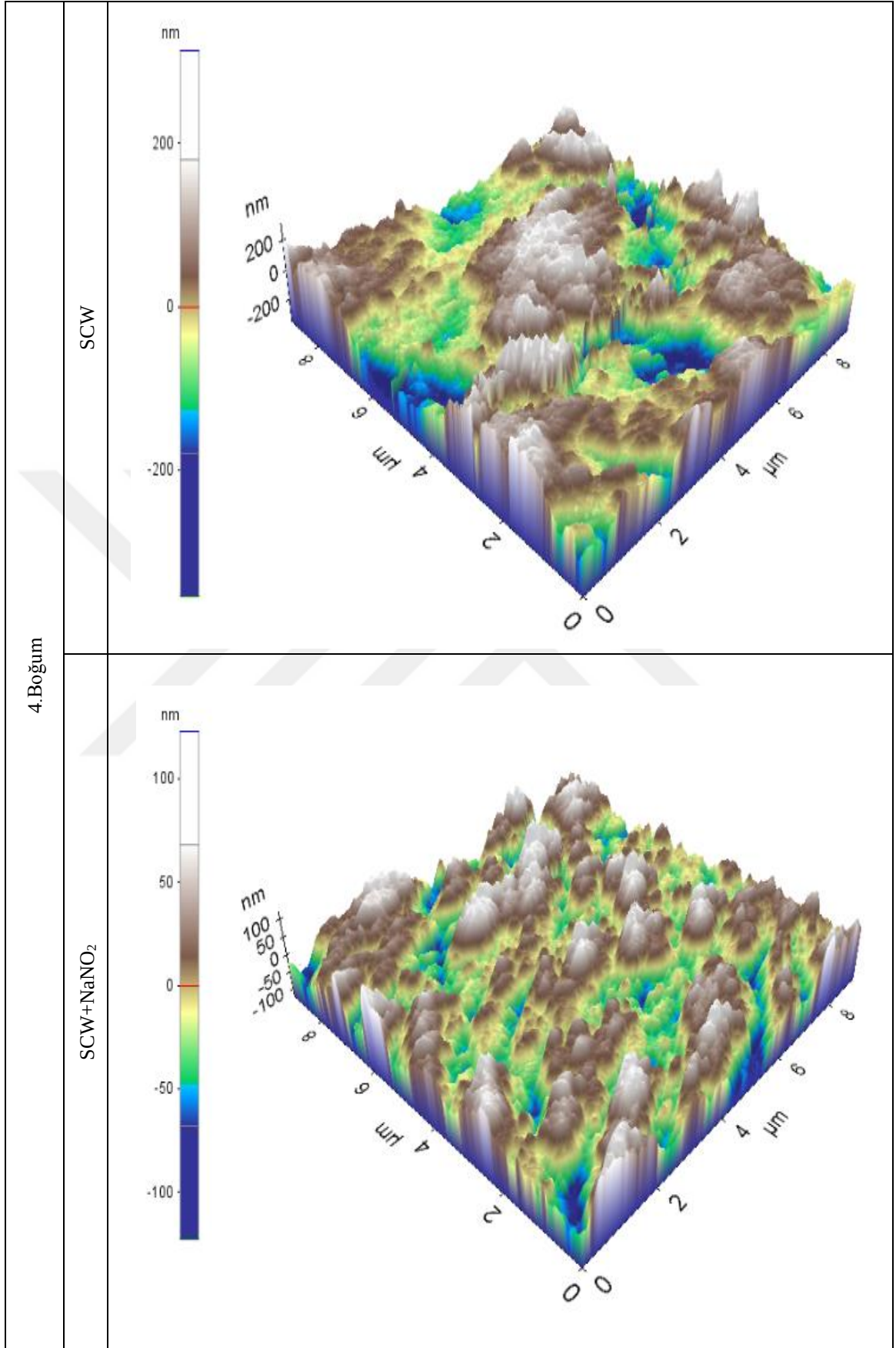
Şekil 3.11. 21 gün sonunda bakır serpantinlere ait AFM görüntüleri.



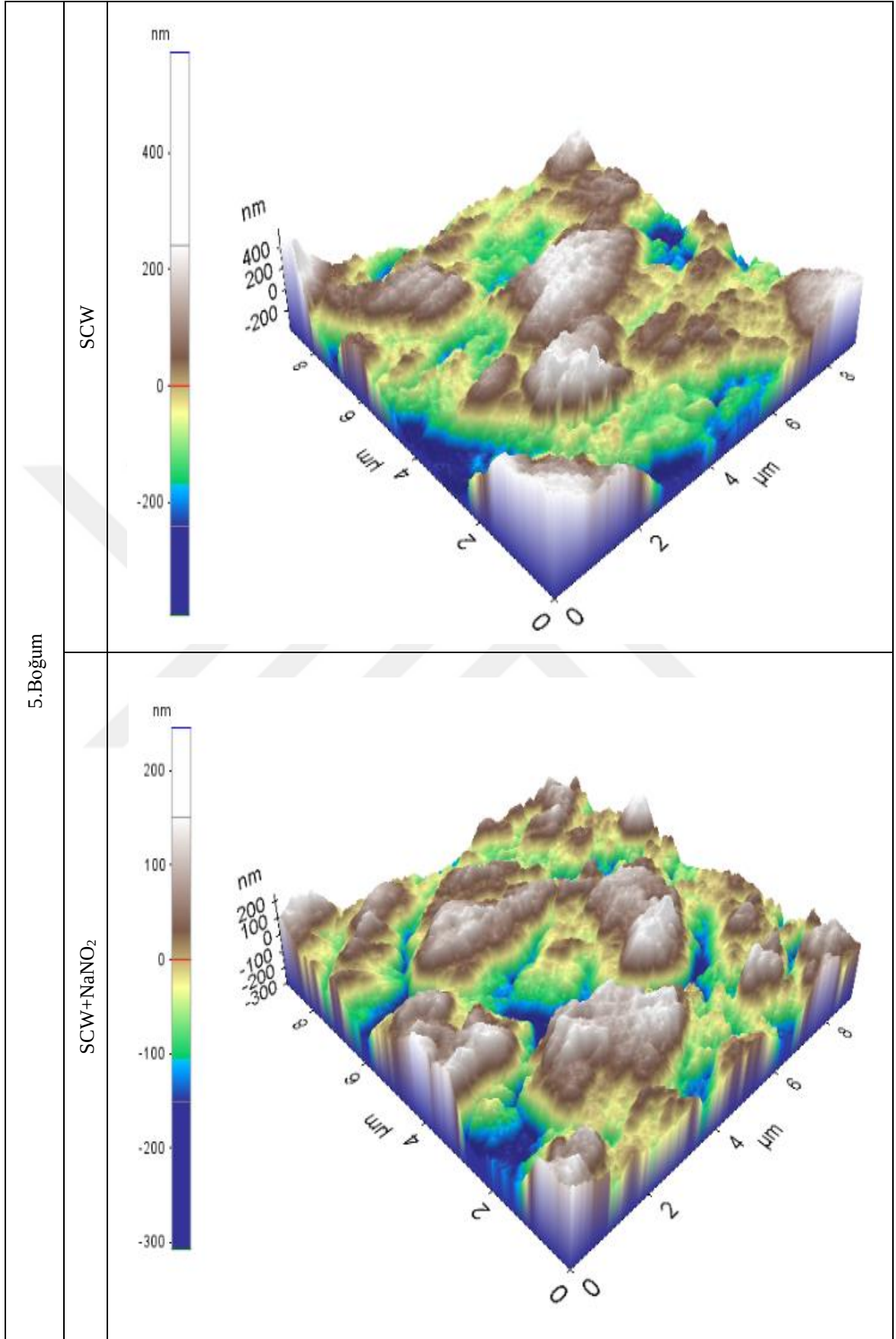
Şekil 3.11. (devam) 21 gün sonunda bakır serpantinlere ait AFM görüntüleri.



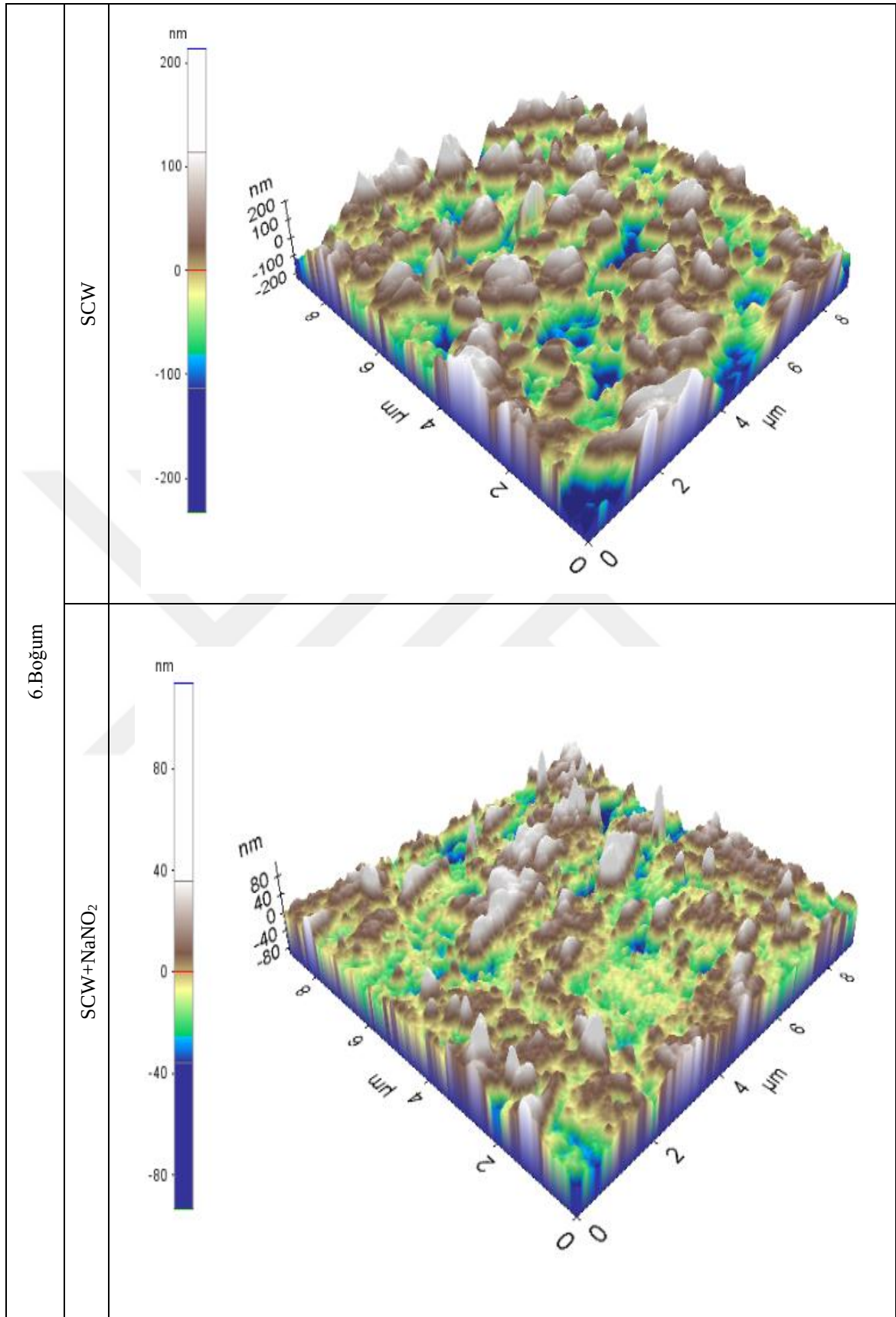
Şekil 3.11. (devam) 21 gün sonunda bakır serpantinlere ait AFM görüntüleri.



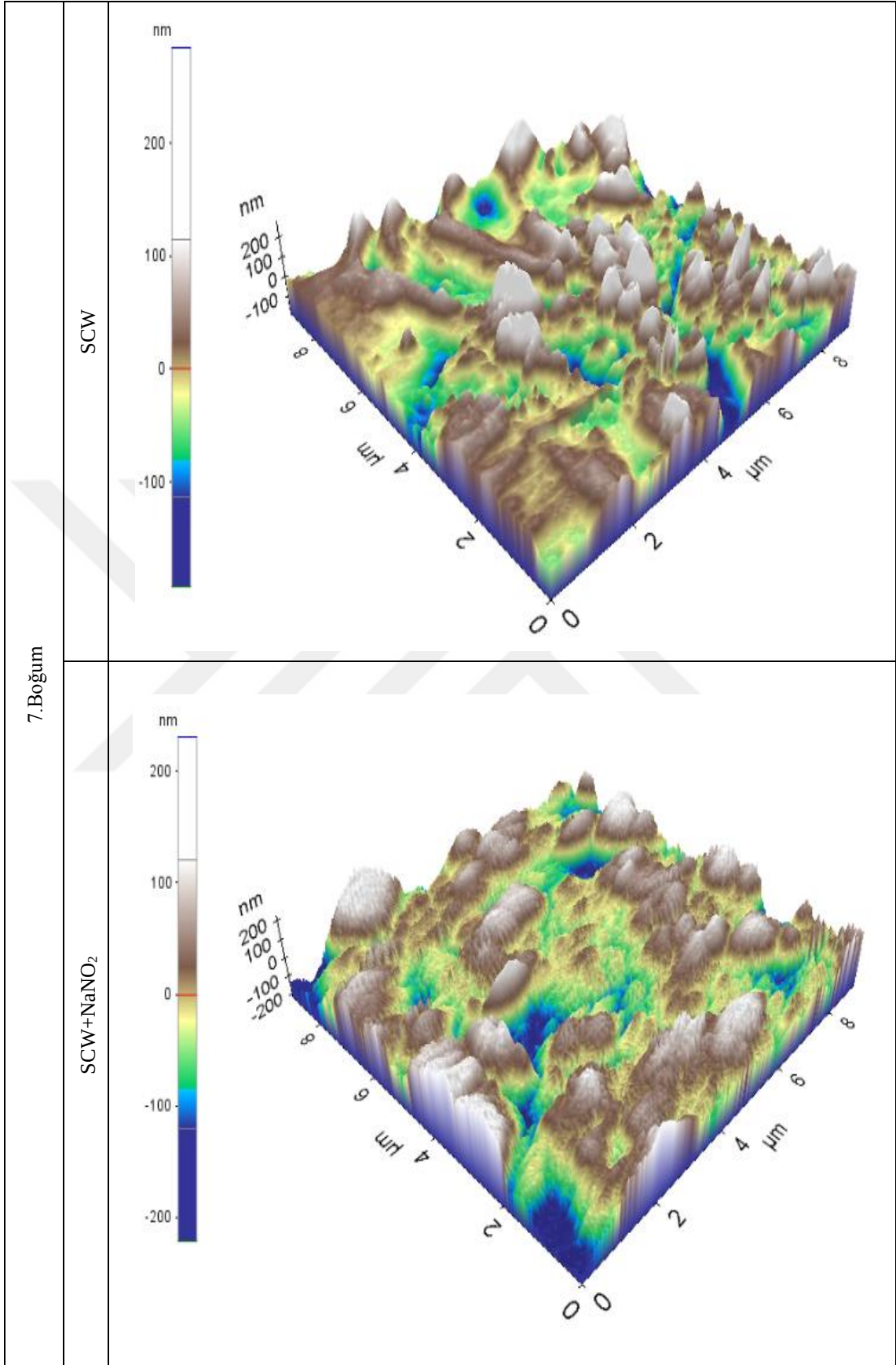
Şekil 3.11. (devam) 21 gün sonunda bakır serpantinlere ait AFM görüntüleri.



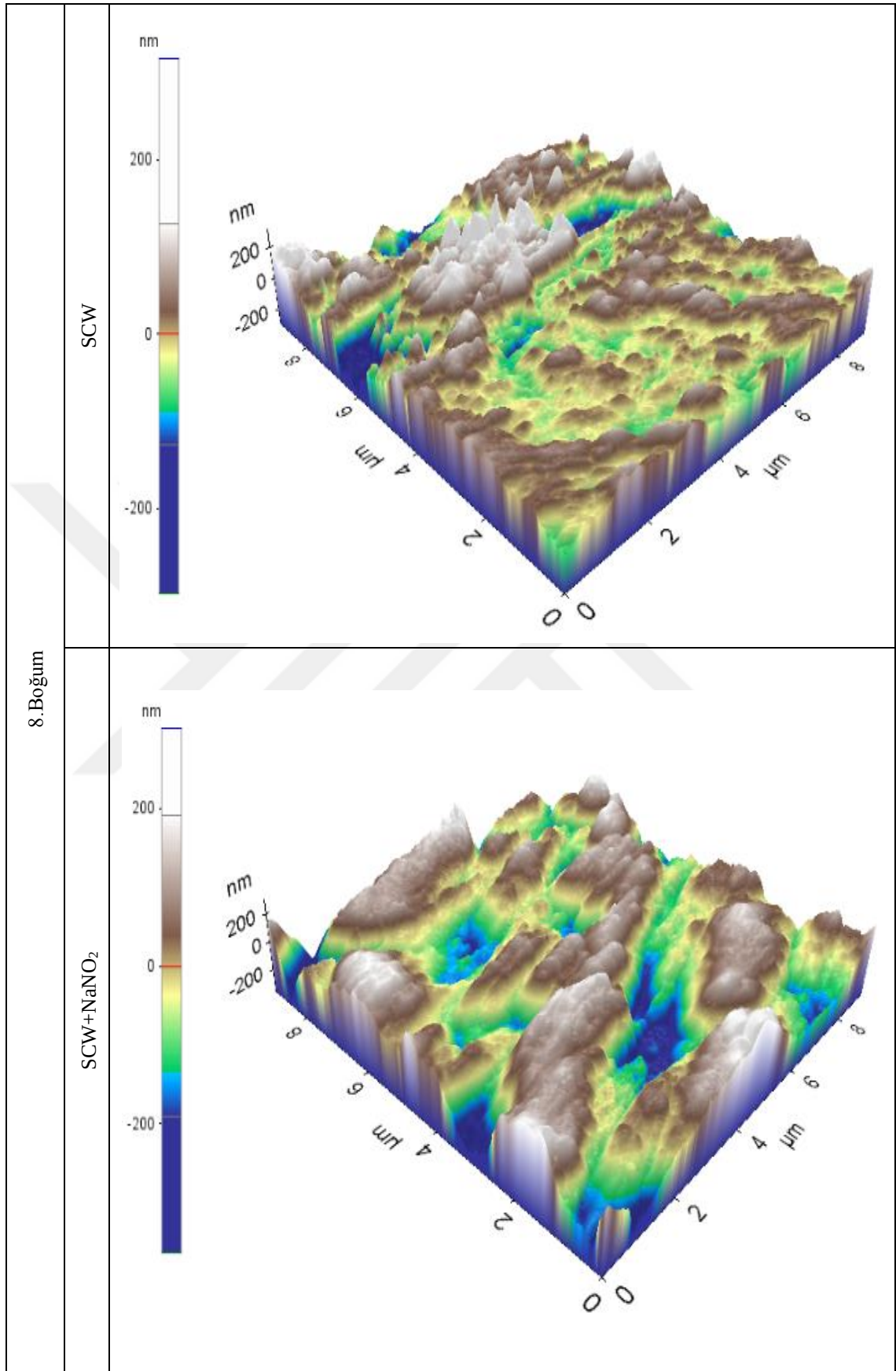
Şekil 3.11. (devam) 21 gün sonunda bakır serpantinlere ait AFM görüntüleri.



Şekil 3.11. (devam) 21 gün sonunda bakır serpantinlere ait AFM görüntüleri.



Şekil 3.11. (devam) 21 gün sonunda bakır serpantinlere ait AFM görüntüleri.



Şekil 3.11. (devam) 21 gün sonunda bakır serpantinlere ait AFM görüntüleri.

Şekil 3.11’de yer alan AFM görüntülerinde 21 gün süreyle inhibitörlü ve inhibitörsüz ortama maruz bırakılan bakır serpantinlerin yüzey şekillerinin değiştiği görülmektedir. Ayrıca yapay soğutma suyu ortamına ilave edilen NaNO_2 ’nin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin araştırılması için uygulanan AFM yöntemine ait sonuçlar Çizelge 3.5’te verilmiştir. R_a yüzeyde gözlemlenen pürüzlülük değerlerinin ortalamasını; R_z ise on noktadan alınan yüksekliklerin ortalamasını ifade etmektedir [121].

Çizelge 3.5. İnhibitör ilaveli SCW ortamında elde edilen AFM sonuçlarının kıyaslanması.

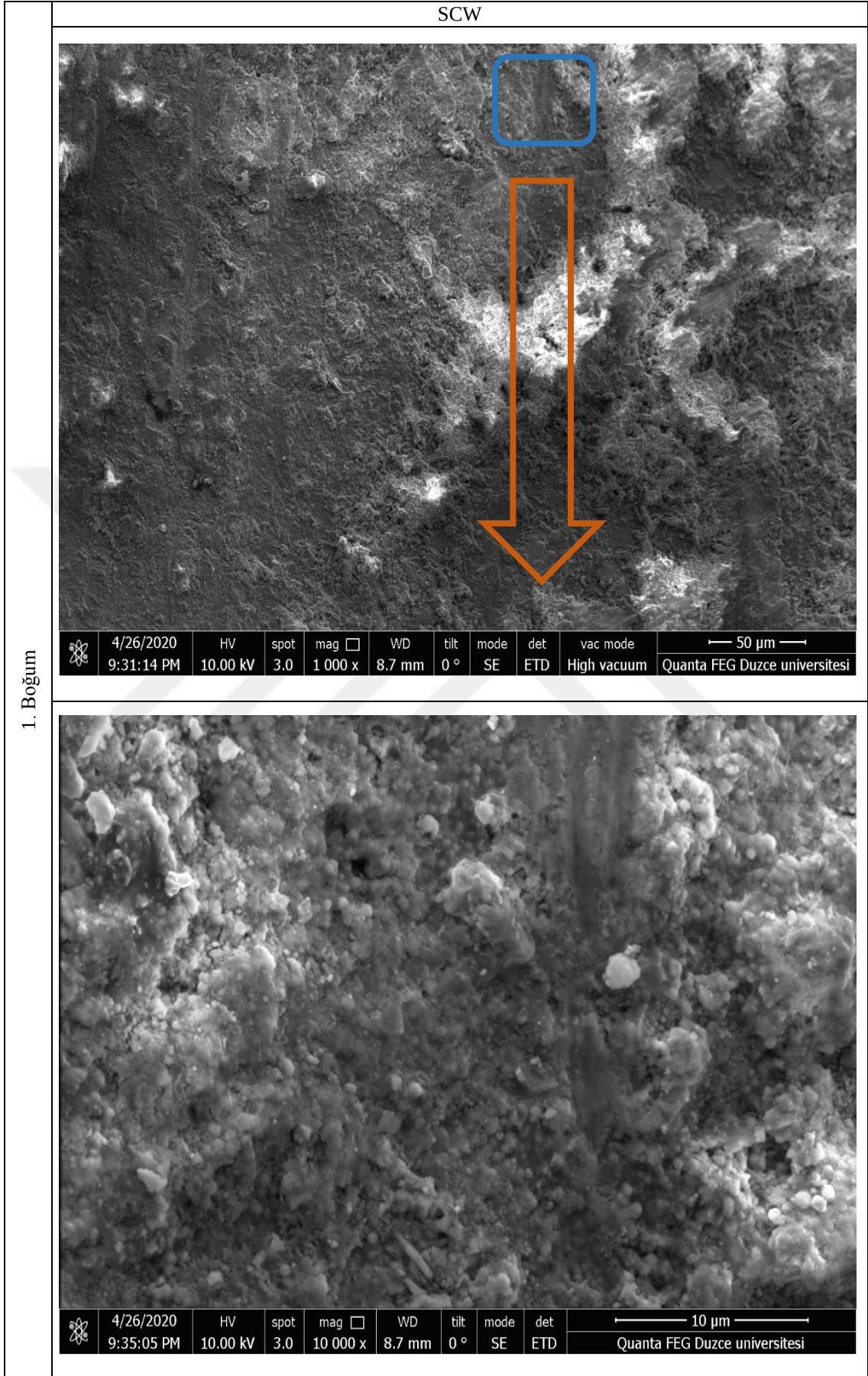
Boğum No	SCW	SCW+ NaNO_2	R_a değişim SCW / SCW+ NaNO_2	SCW	SCW+ NaNO_2	R_z değişim SCW / SCW+ NaNO_2
	R_a (nm)	R_a (nm)	R_a değerinde % Azalış	R_z (nm)	R_z (nm)	R_z değerinde % Azalış
1	96,265	79,715	17,19	960,213	692,083	27,92
2	83,286	72,452	13,01	732,387	651,179	11,09
3	78,635	68,11	13,38	731,193	568,842	22,20
4	73,816	61,462	16,74	656,93	533,586	18,78
5	68,575	48,243	29,65	629,797	441,265	29,94
6	48,114	28,165	41,46	586,552	269,995	53,97
7	46,167	25,838	44,03	451,889	236,335	47,70
8	44,913	13,555	69,82	421,898	195,32	53,70

Çizelge 3.5’de yer alan pürüzlülük değerleri incelendiğinde SCW ortamına ilave edilen 1000 ppm NaNO_2 ’nin R_a ve R_z değerlerini azalttığı görülmektedir. Örneğin bakır serpantin 1 nolu boğumu için SCW ortamında R_a değeri 96,265 nm; R_z değeri 960,213 nm iken; inhibitör ilavesi ile R_a değeri 79,715 nm; R_z değeri ise 692,083 nm olduğu belirlenmiştir. İnhibitör ilavesi ile R_a değerinde meydana gelen % azalış değerlerinin 6 ve 7. boğumlarda yaklaşık %40; 8. boğumda ise %70 oranında meydana geldiği görülmüştür. Benzer şekilde R_z değerlerinde meydana gelen yüzdece değişim inhibitör ilavesi ile 6, 7 ve 8. boğumlarda yaklaşık %54 olarak belirlenmiştir. Pürüzlülük değerlerinin her iki ortamda da 1 nolu boğumdan 8 nolu boğuma doğru azaldığı görülmektedir. İnhibitörlü ortam elde edilen R_a ve R_z değerleri inhibitörsüz ortama kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir.

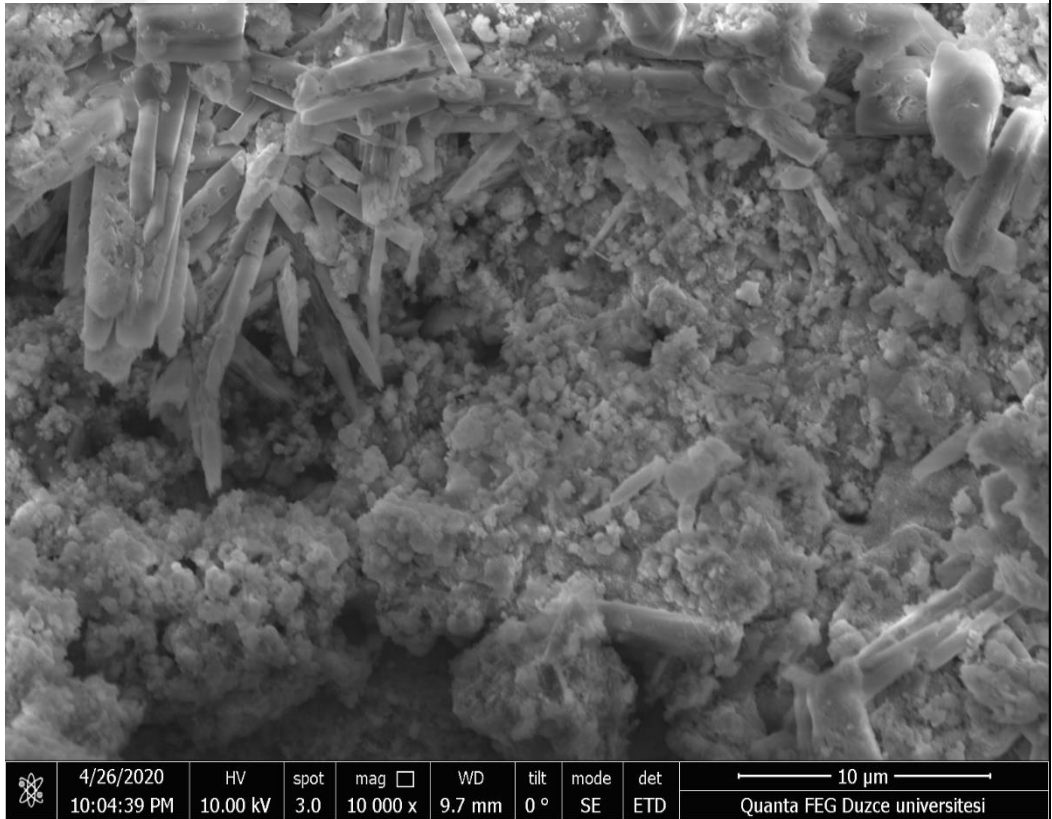
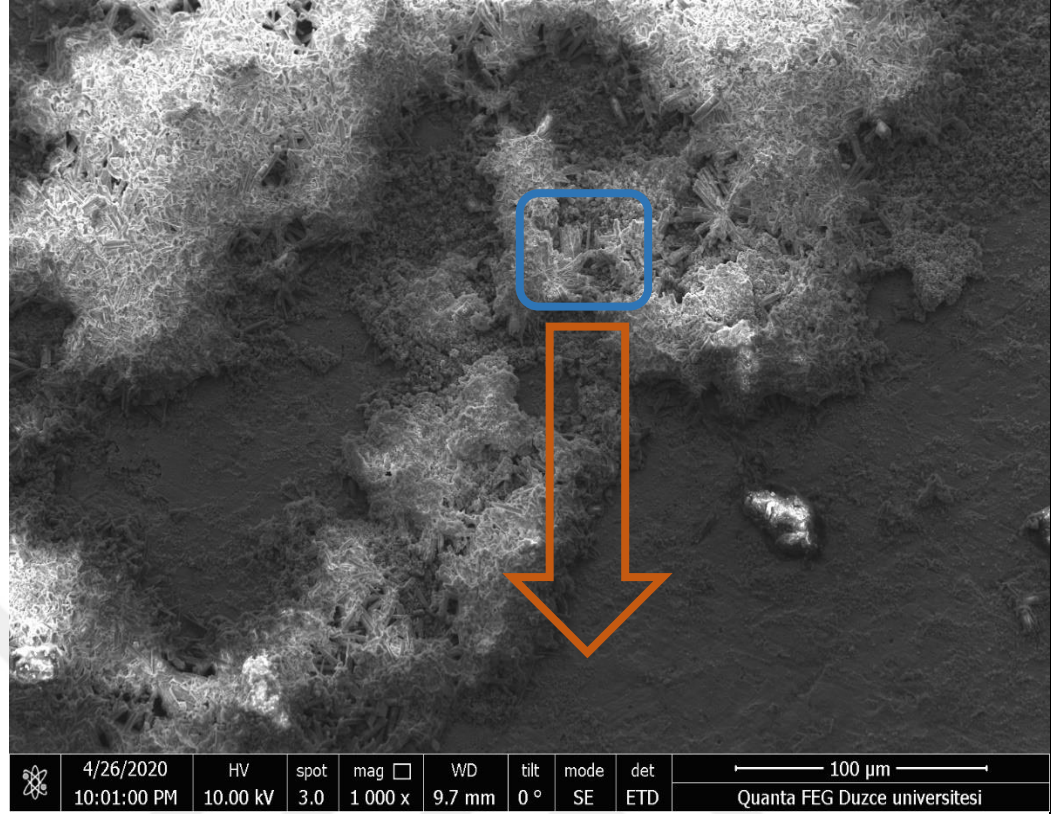
3.2.2. SEM-EDS Analizi

İnhibitörlü ve inhibitörsüz yapay soğutma suyu (SCW) ortamlarına 21 gün süreyle maruz bırakılan bakır serpantinlerin yüzeylerinde oluşan morfolojik değişiklikler SEM ile incelenmiştir (Şekil 3.12-3.13). Her boğumun (1-8) ayrı ayrı SEM ile incelendiği noktalarda ayrıca genel EDS analizi yapılmıştır (Çizelge 3.6). Bakır serpantin 21 gün sonunda SCW ortamının etkisiyle korozyona uğradığı açıkça Şekil 3.12’de

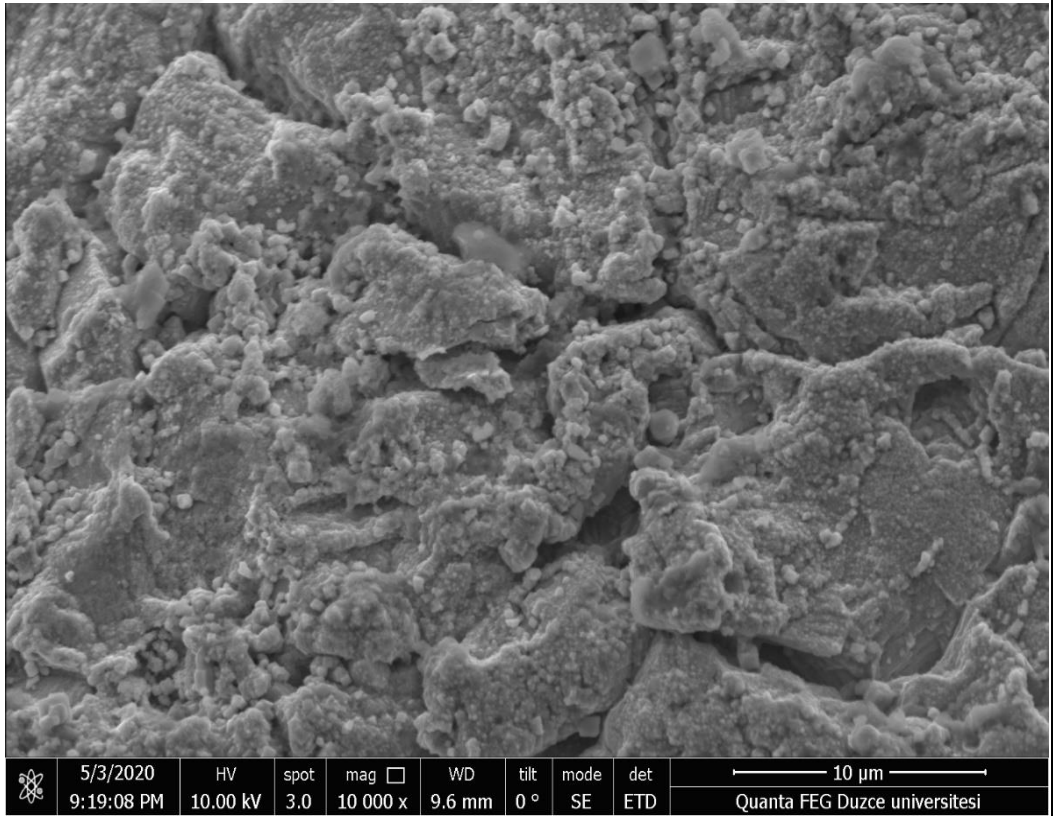
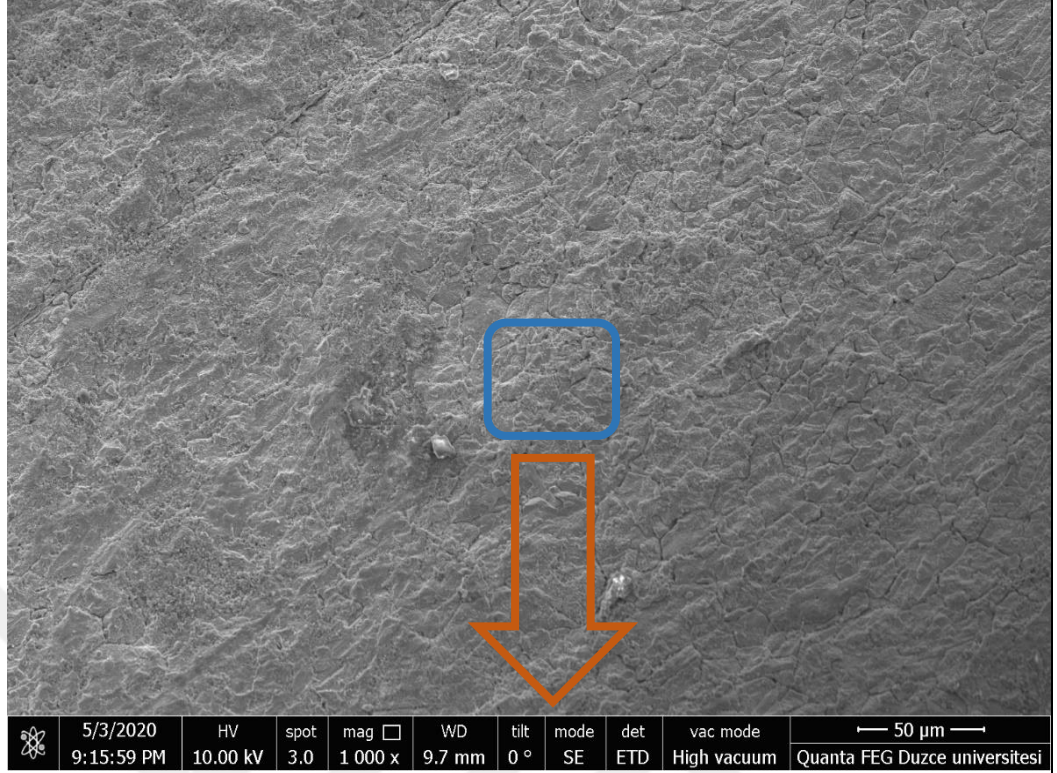
görülmektedir. Serpantin konulduğu 304 paslanmaz çelik tankındaki su seviyesinden aşağıya indikçe, Şekil 3.12’de görüldüğü üzere 4-8 boğumlarında daha az korozyon ürününün metal yüzeyinde oluştuğu görülmektedir. Çünkü yüzeye yakın serpantin 1-3 boğumları daha çok oksijene maruz kalarak diğer boğumlara kıyasla yüzeylerinde daha kalın yeşil oksit tabaka oluşturmuştur [30]. Şekil 3.12’de görüleceği üzere SCW etkisiyle serpantin 7 ve 8. boğumlarında çukurcuk korozyonunun oluştuğu görülmüştür.



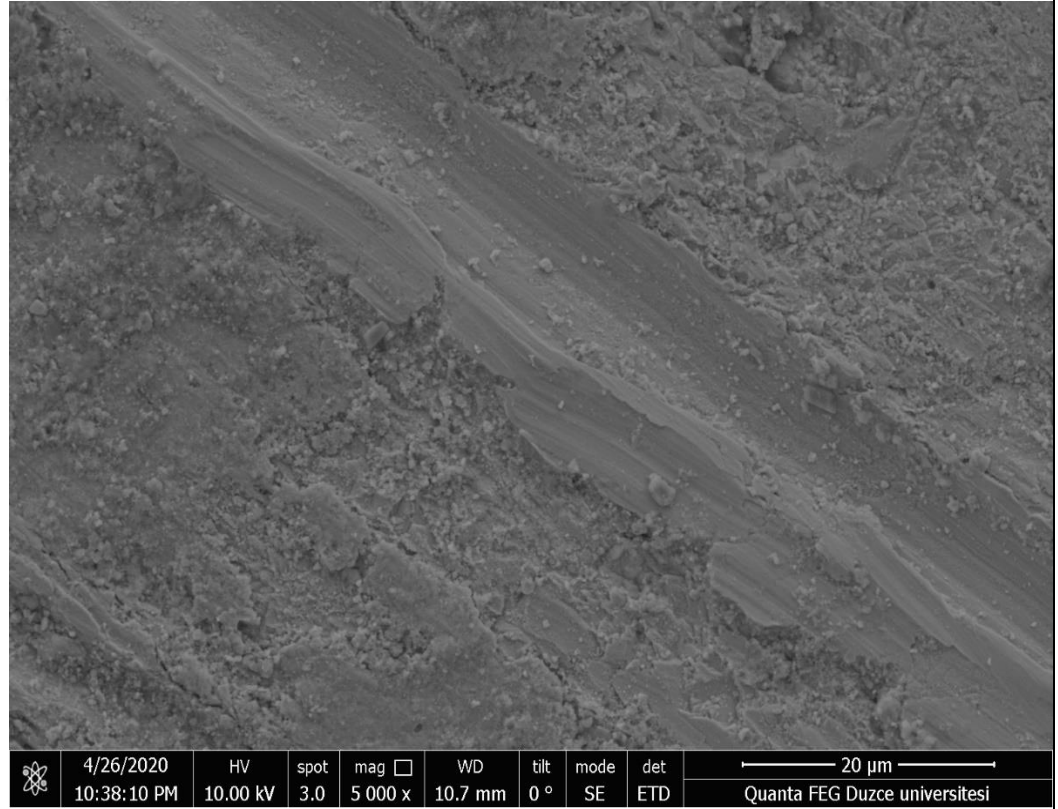
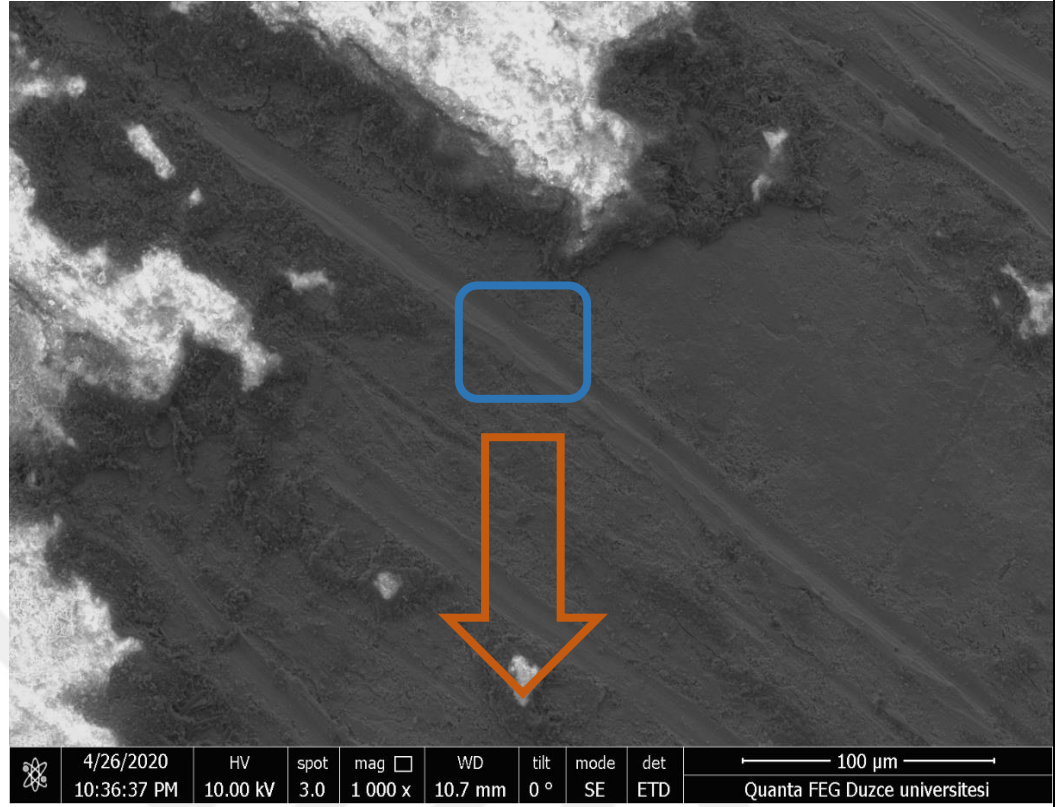
Şekil 3.12. 21 gün sonunda SCW ortamındaki bakır serpantinlere ait SEM görüntüleri.



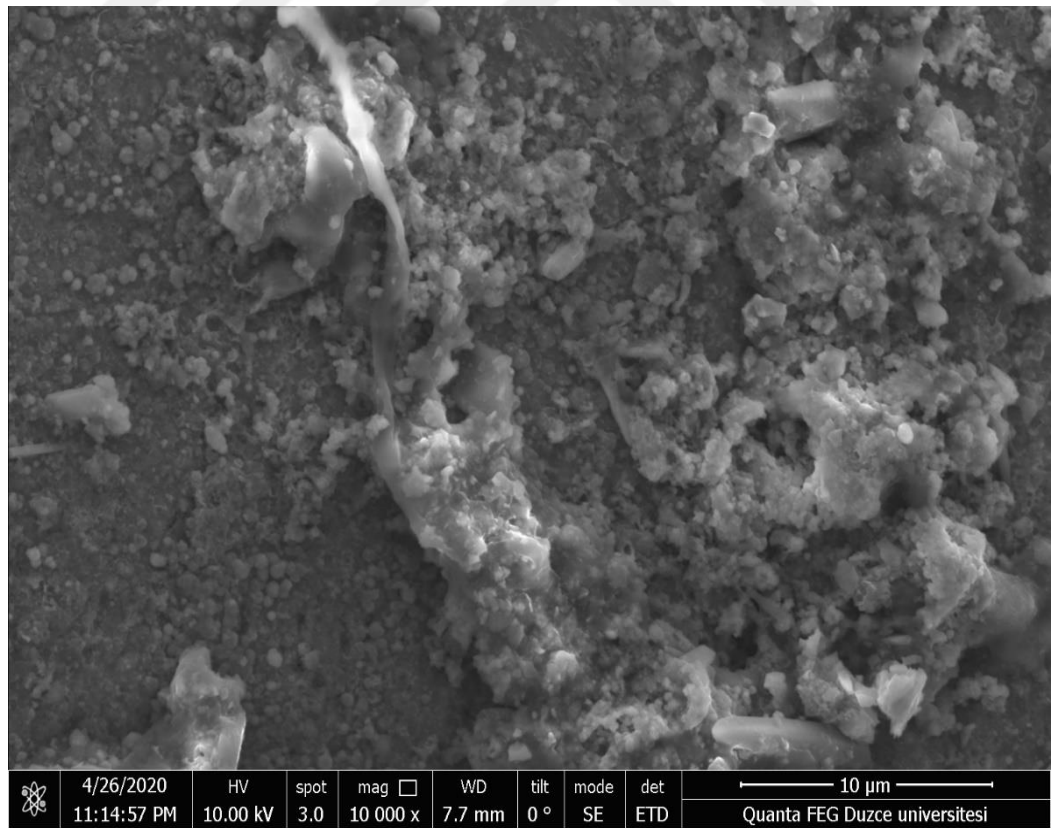
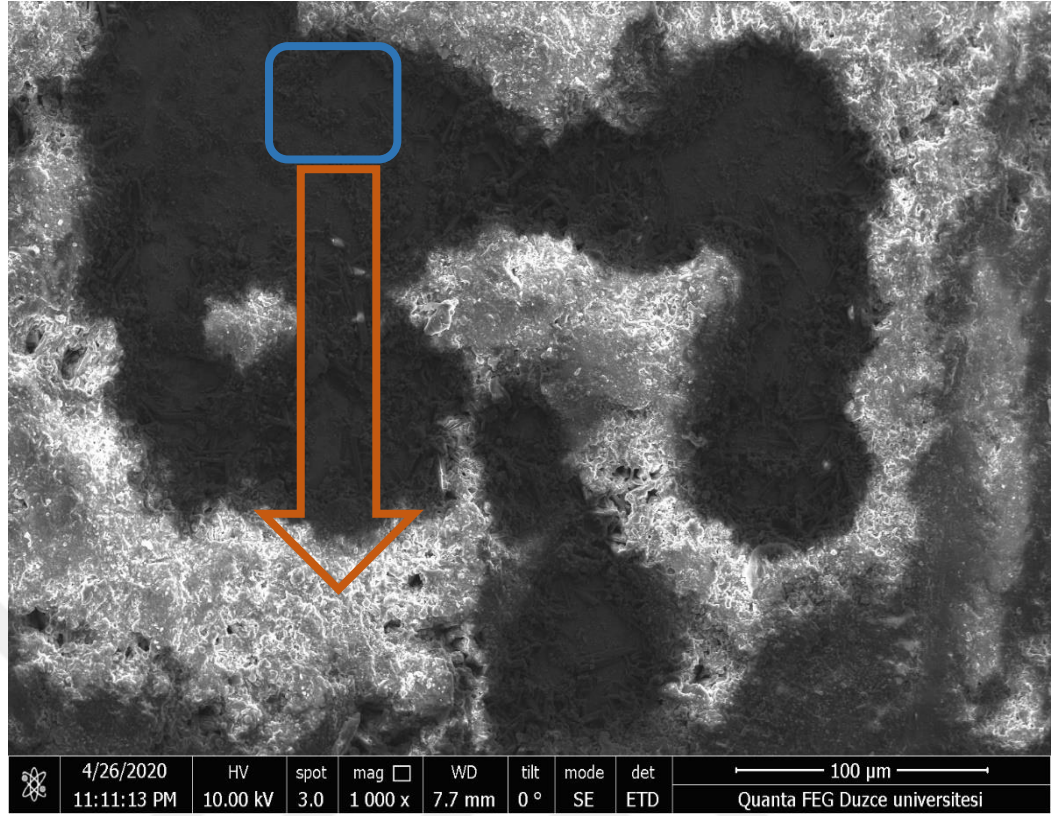
Şekil 3.12. (devam) 21 gün sonunda SCW ortamındaki bakır serpantinlere ait SEM görüntüleri.



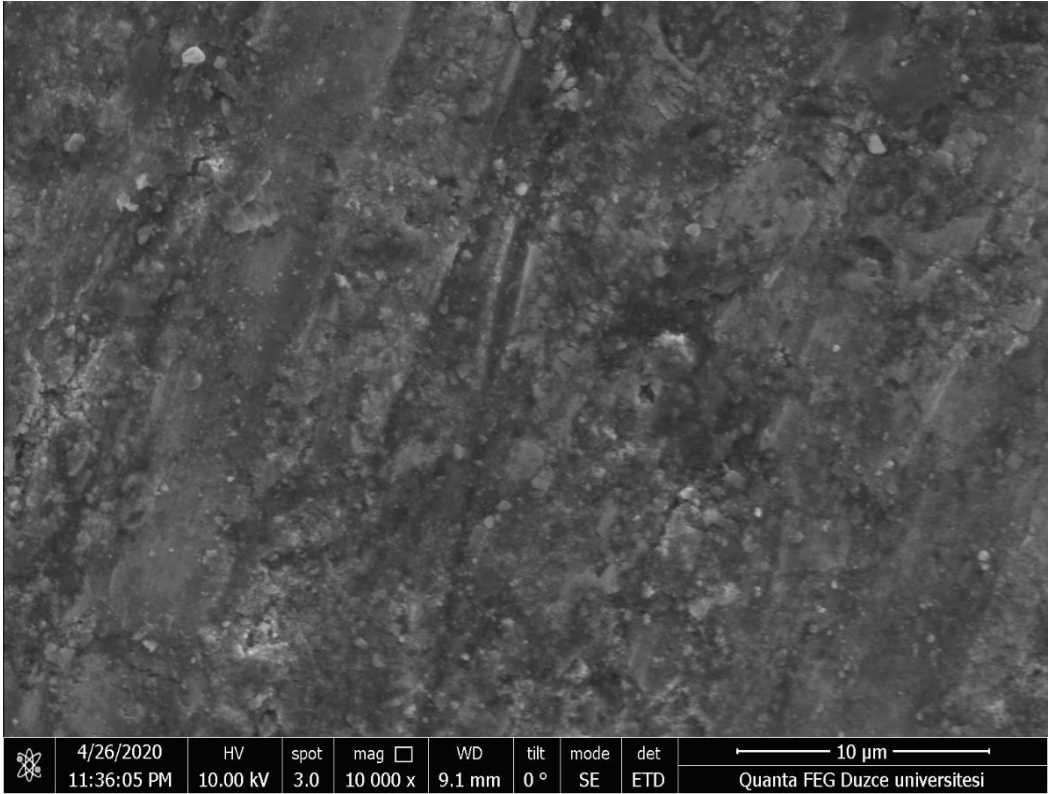
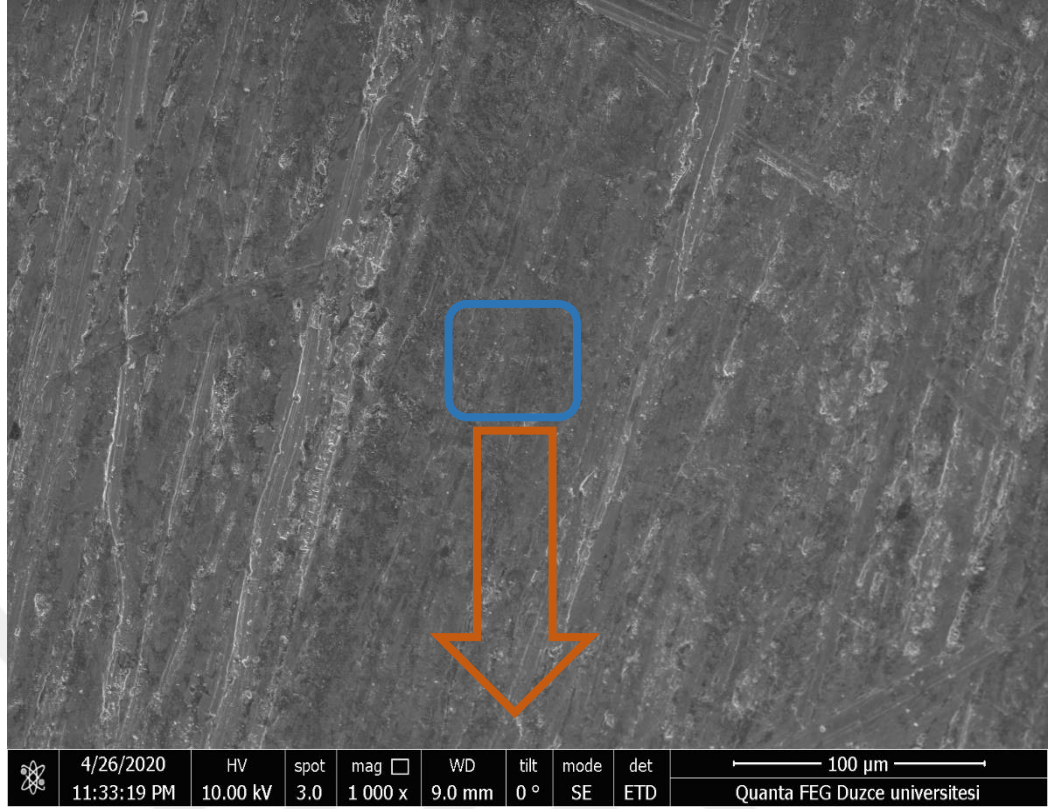
Şekil 3.12. (devam) 21 gün sonunda SCW ortamındaki bakır serpantinlere ait SEM görüntüleri.



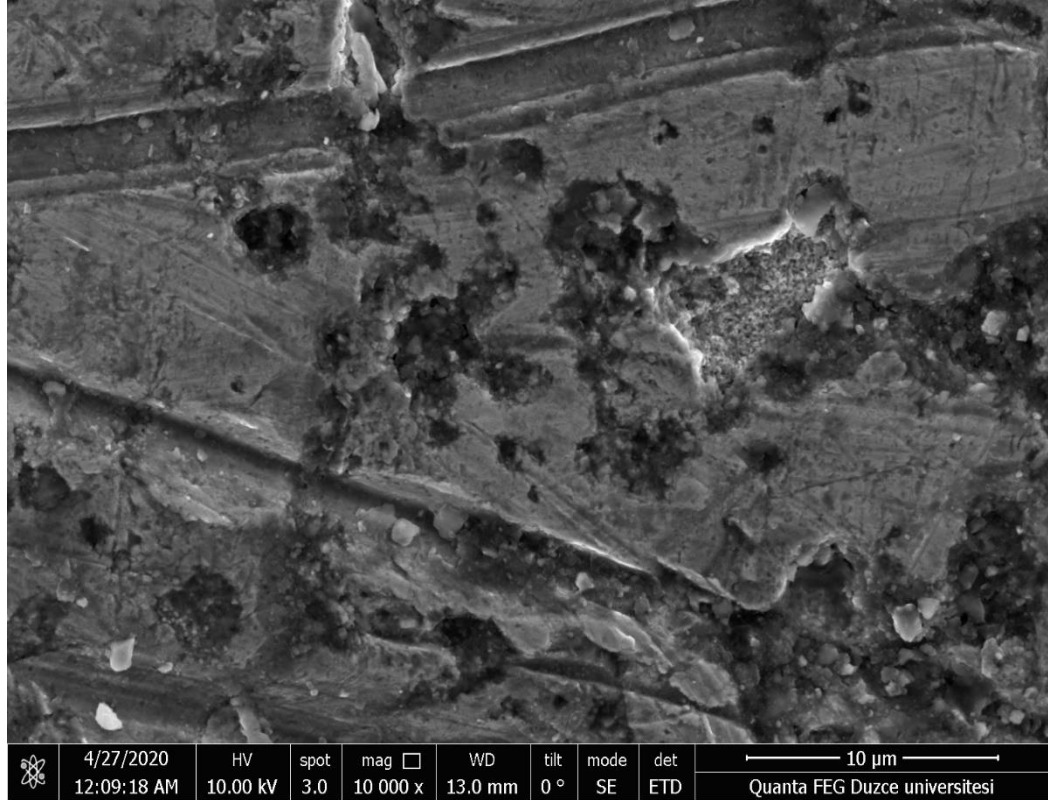
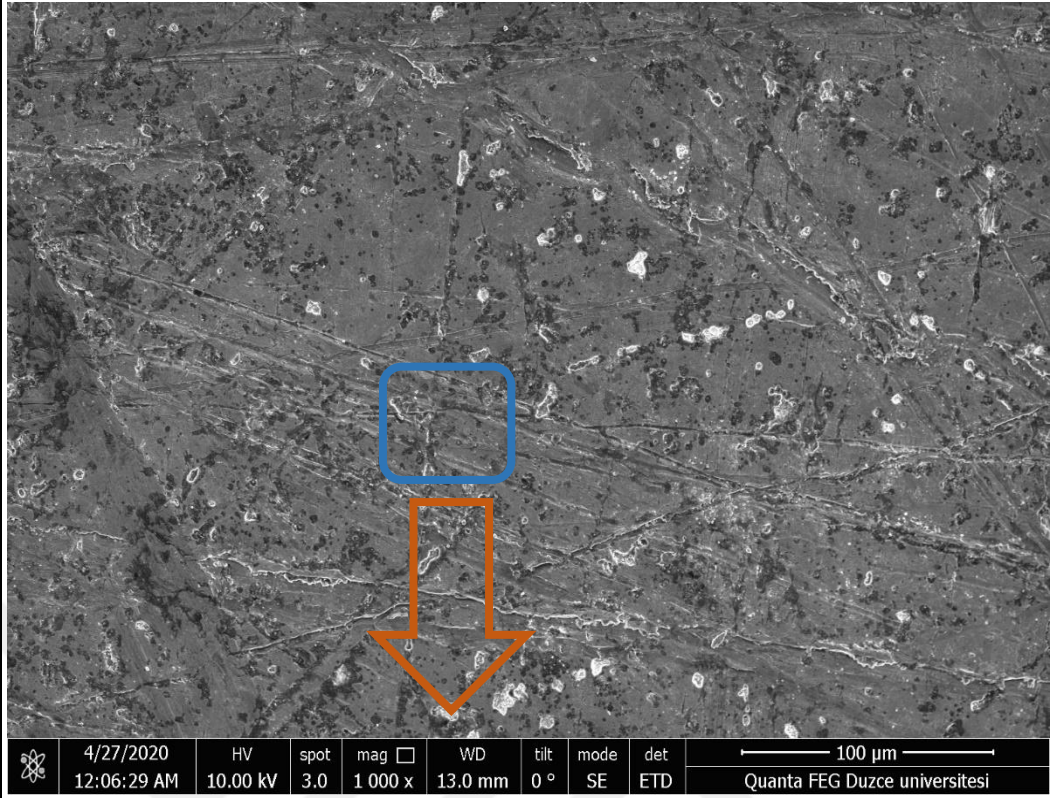
Şekil 3.12. (devam) 21 gün sonunda SCW ortamındaki bakır serpantinlere ait SEM görüntüleri.



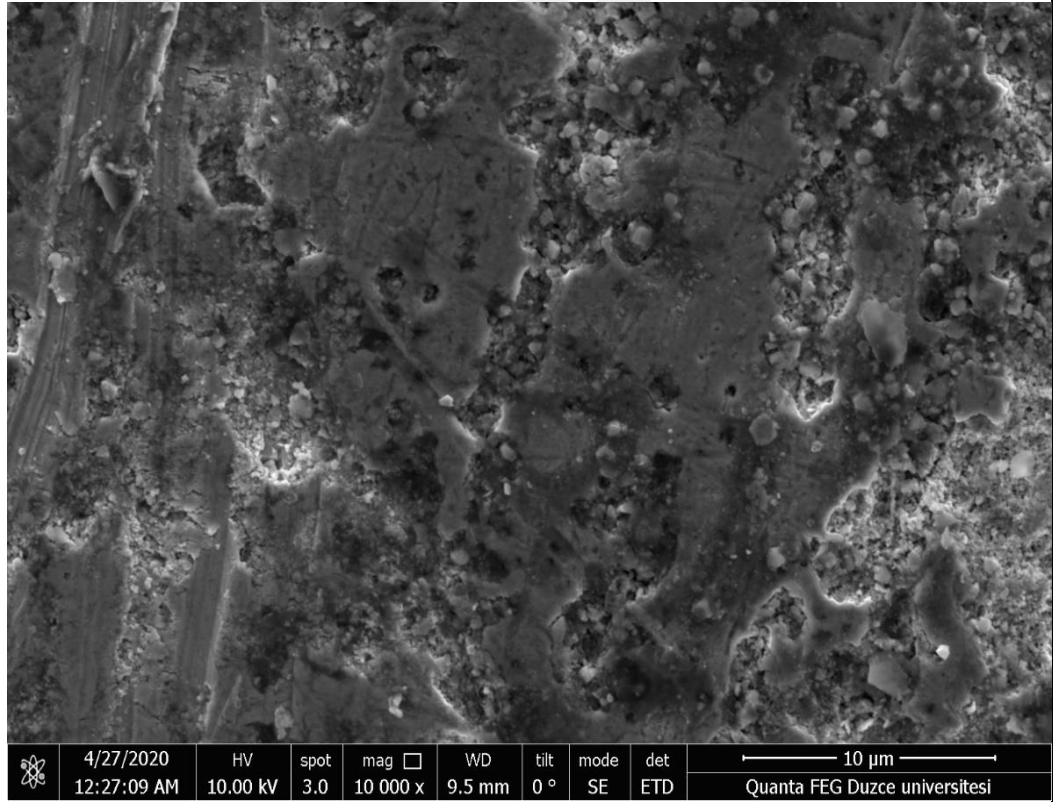
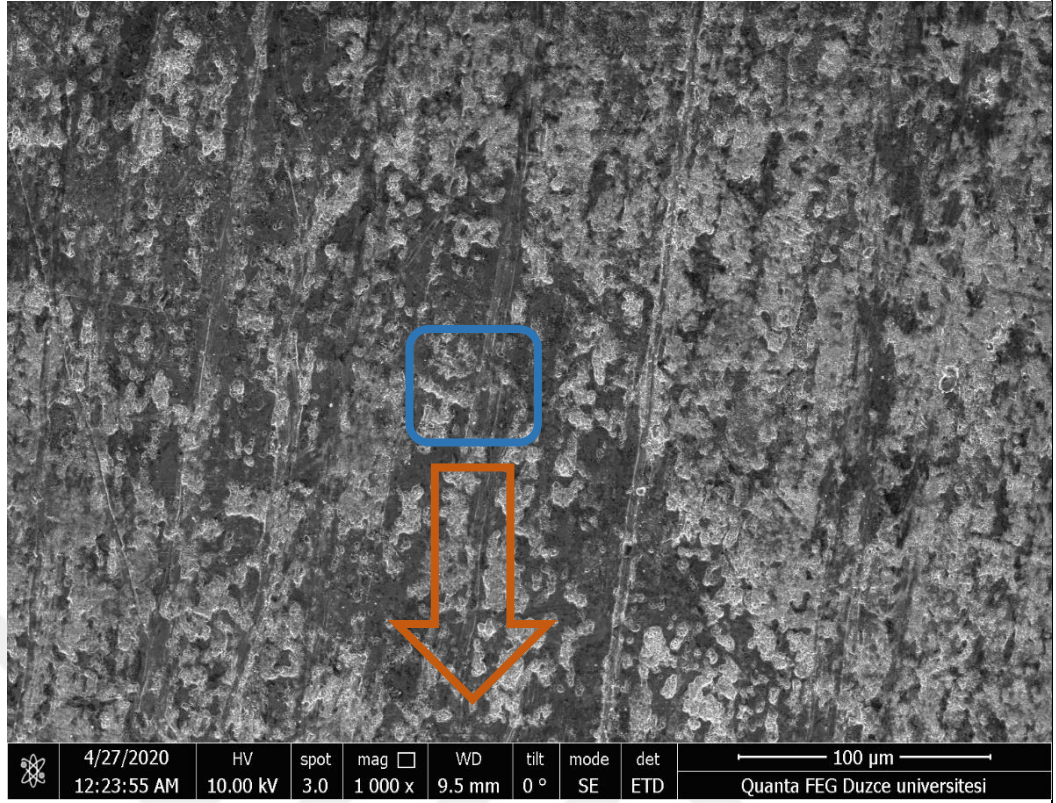
Şekil 3.12. (devam) 21 gün sonunda SCW ortamındaki bakır serpantinlere ait SEM görüntüleri.



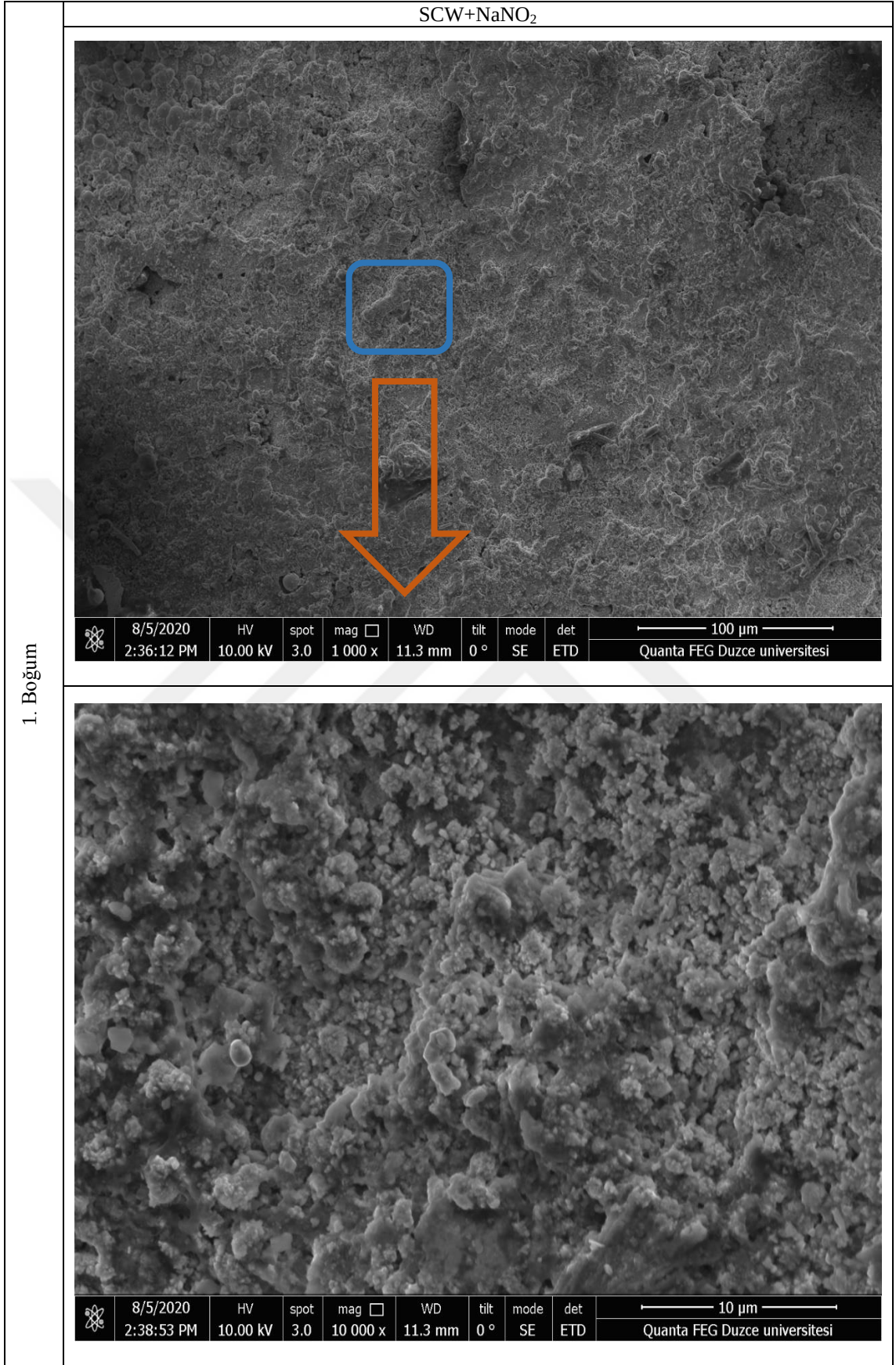
Şekil 3.12. (devam) 21 gün sonunda SCW ortamındaki bakır serpantinlere ait SEM görüntüleri.



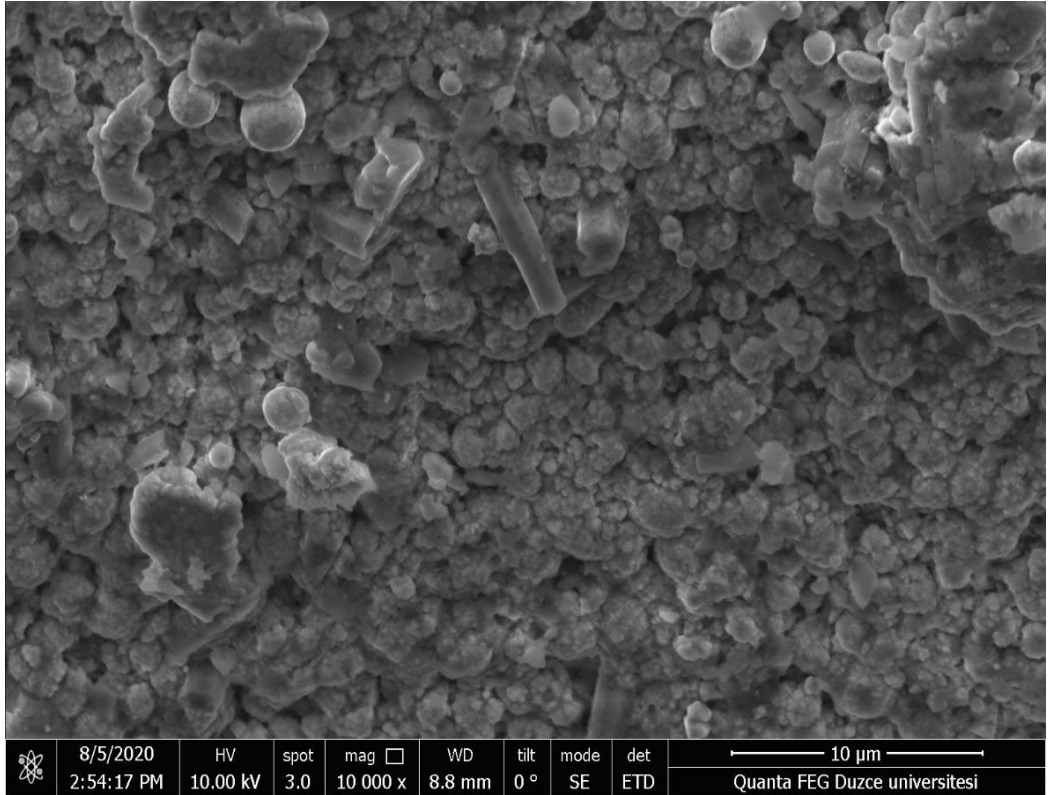
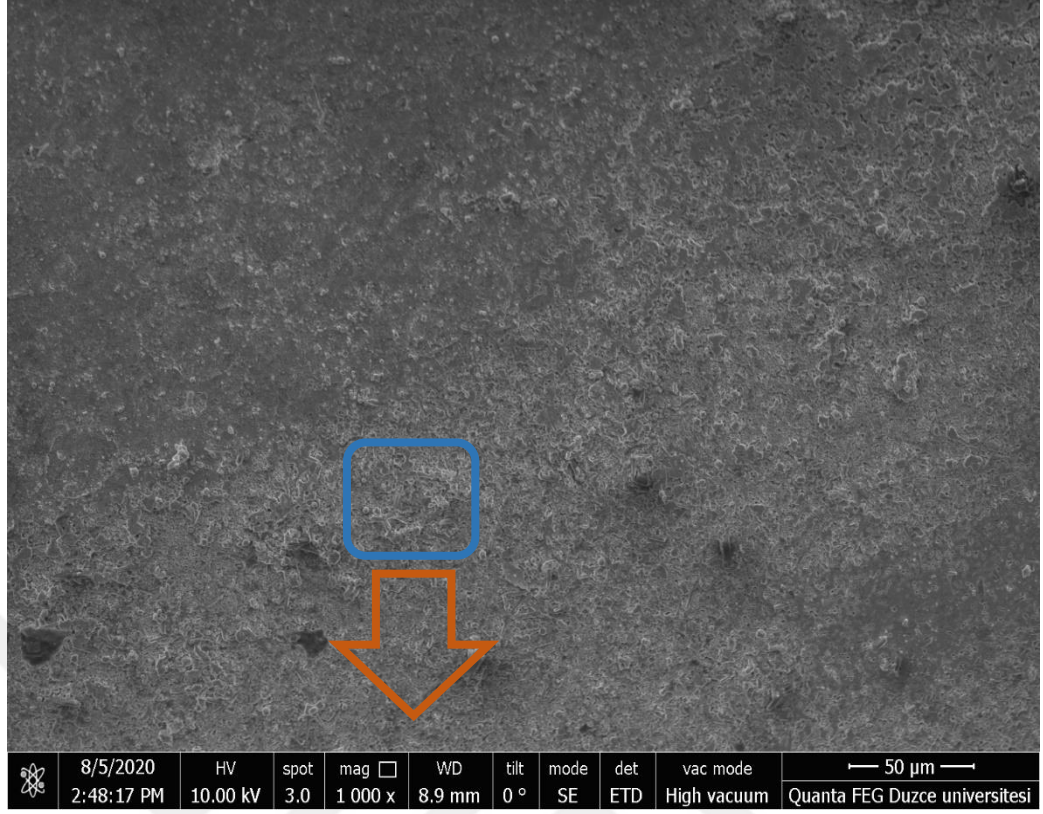
Şekil 3.12. (devam) 21 gün sonunda SCW ortamındaki bakır serpantinlere ait SEM görüntüleri.



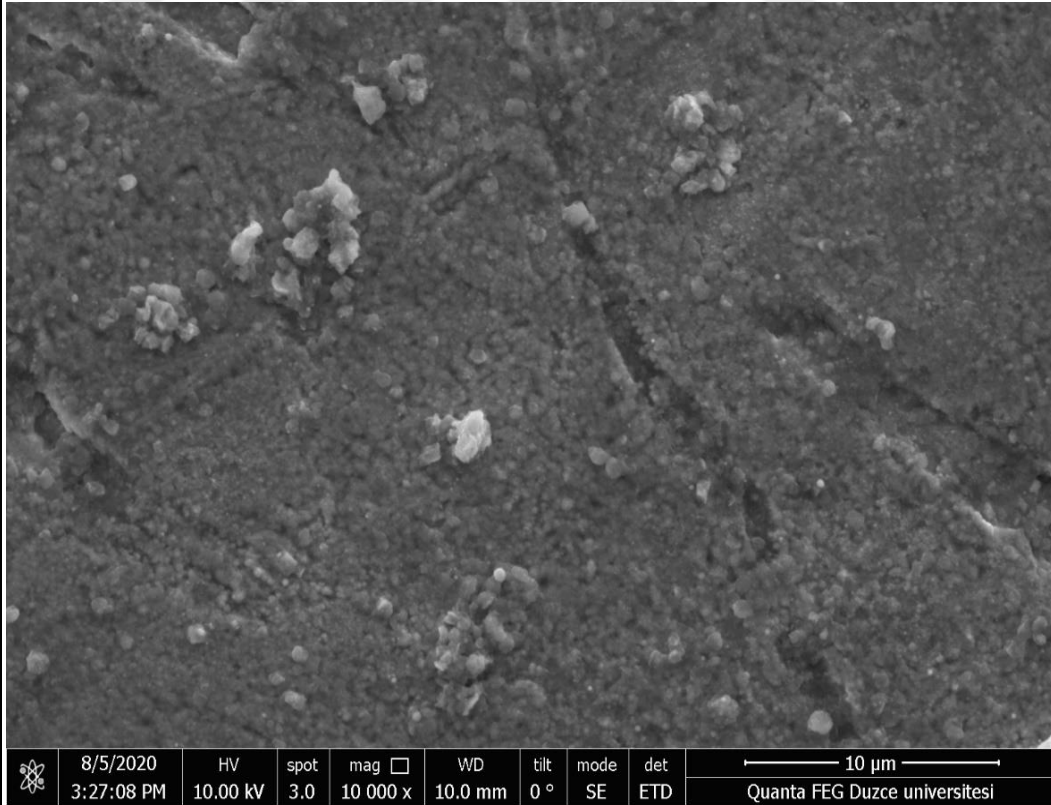
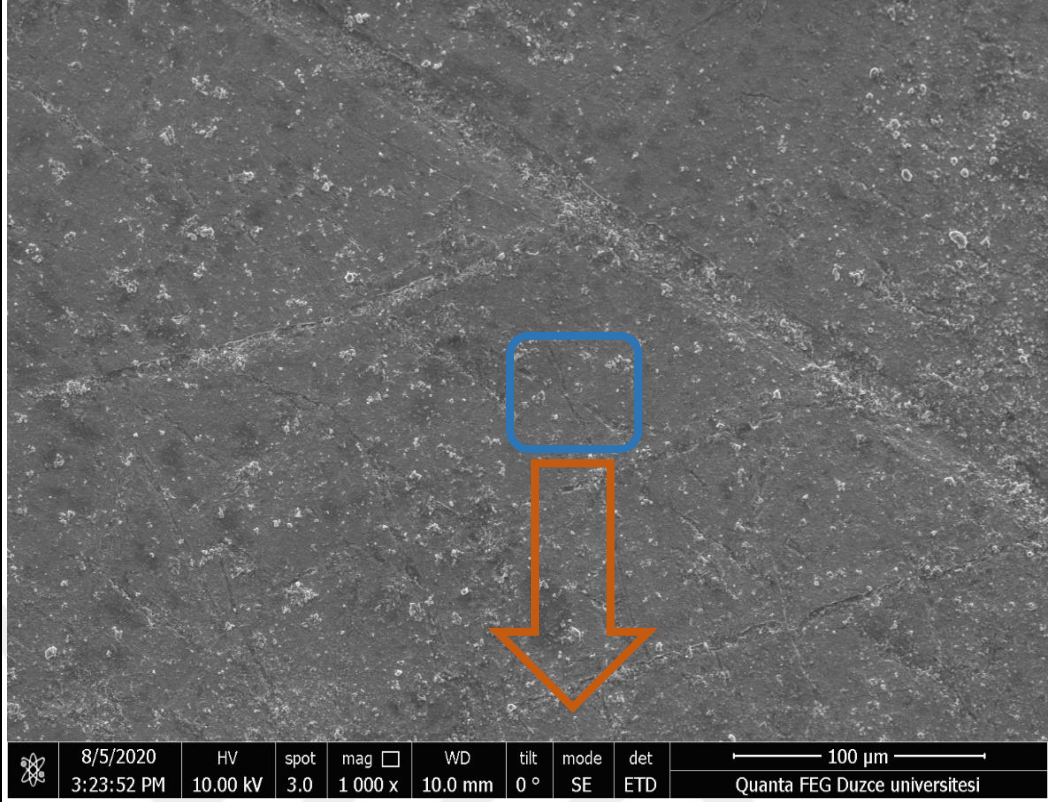
Şekil 3.12. (devam) 21 gün sonunda SCW ortamındaki bakır serpantinlere ait SEM görüntüleri.



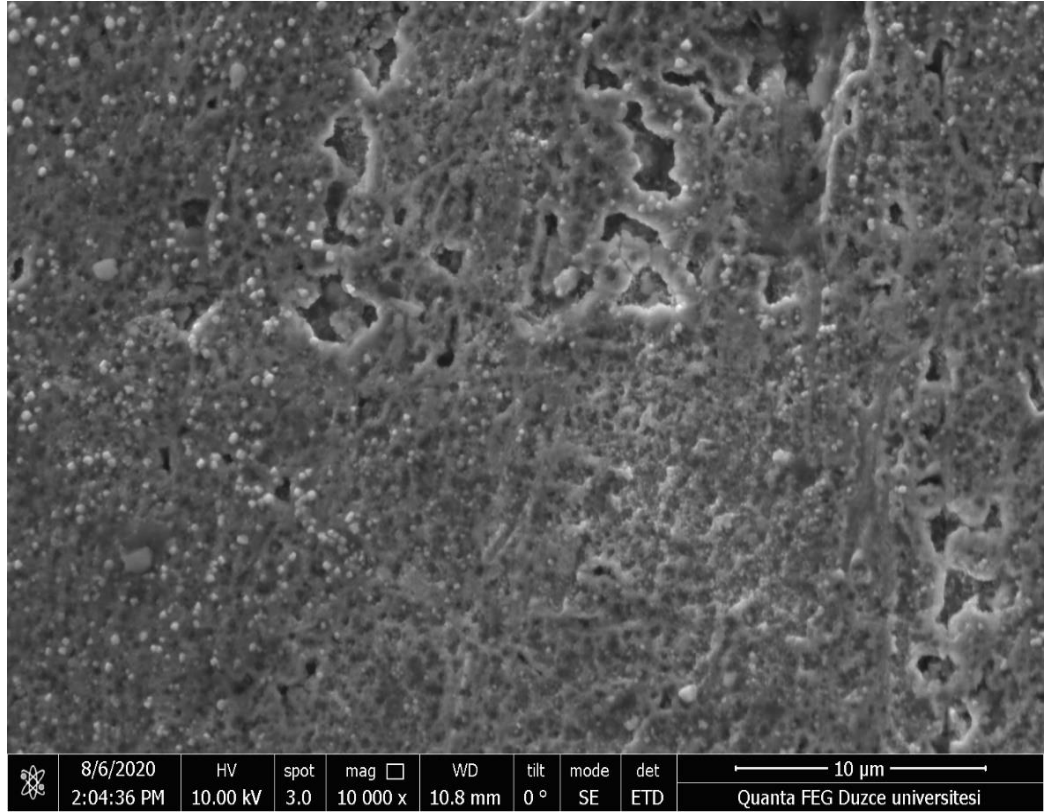
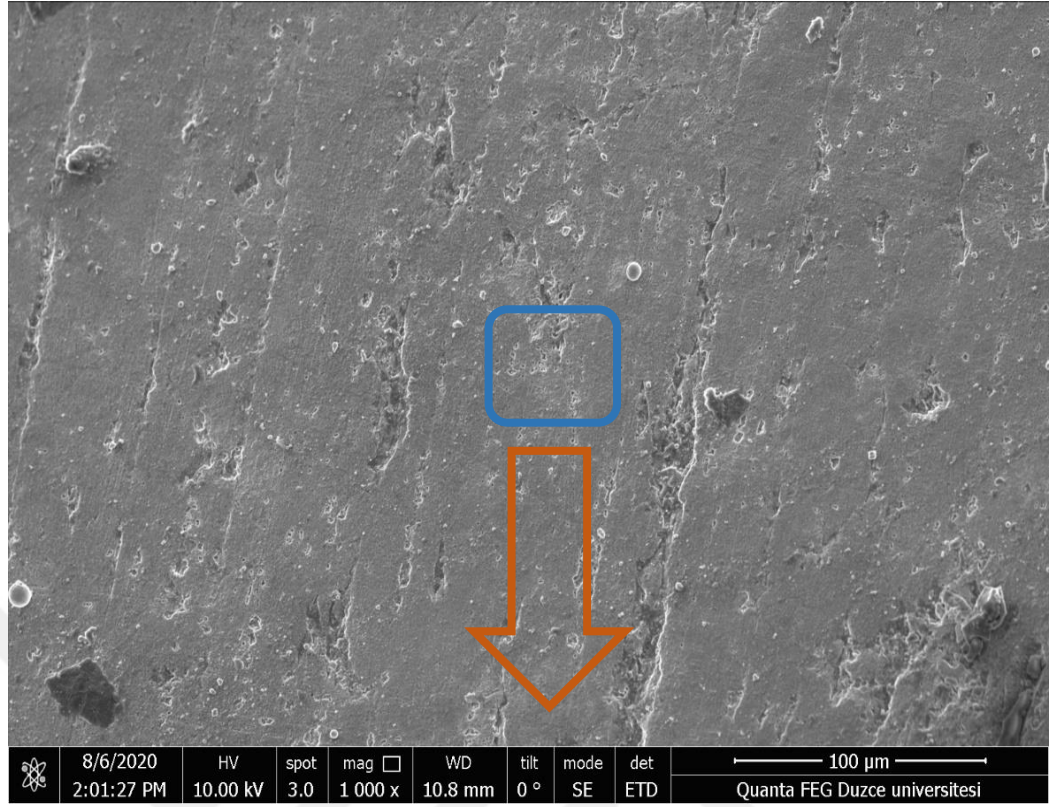
Şekil 3.13. 21 gün sonunda SCW+NaNO₂ ortamındaki bakır serpantinlere ait SEM görüntüleri.



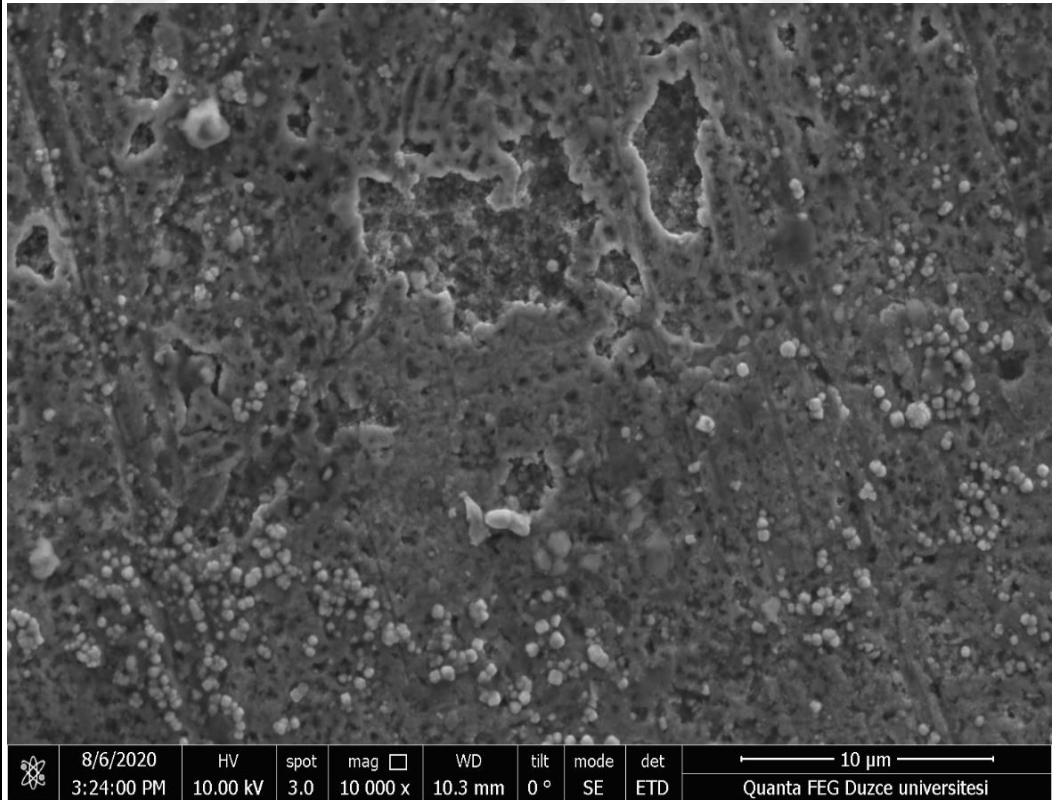
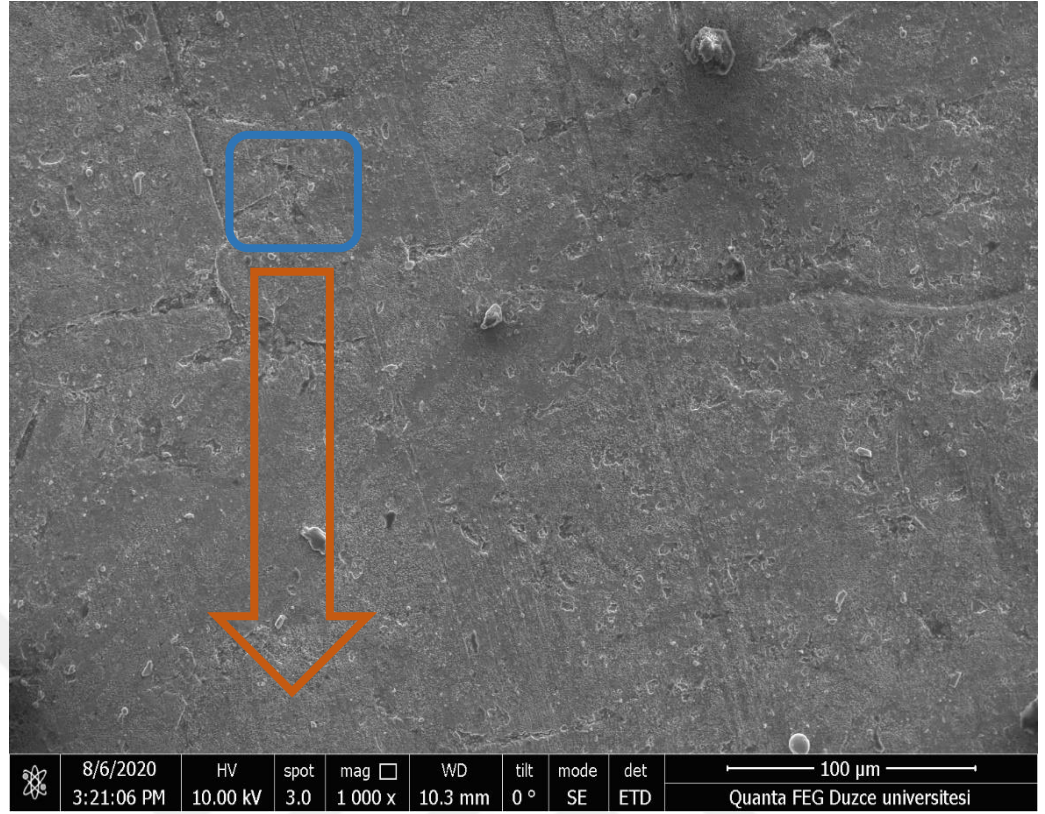
Şekil 3.13. (devam) 21 gün sonunda SCW+NaNO₂ ortamındaki bakır serpantinlere ait SEM görüntüleri.



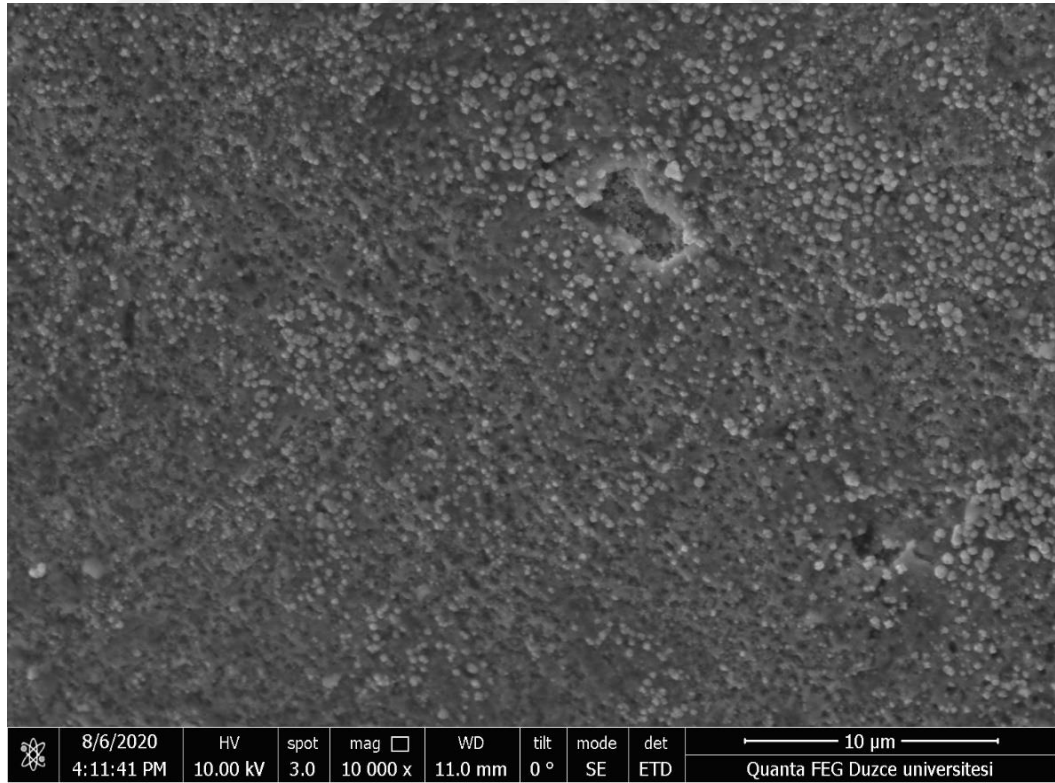
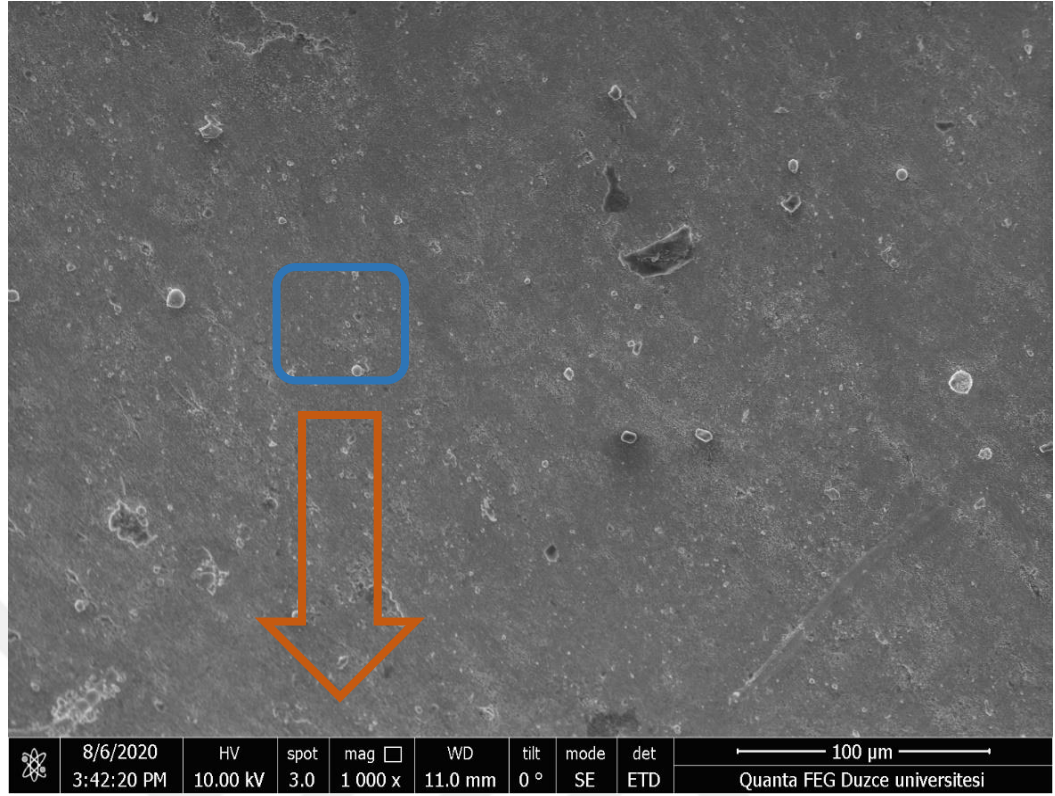
Şekil 3.13. (devam) 21 gün sonunda SCW+NaNO₂ ortamındaki bakır serpantinlere ait SEM görüntüleri.



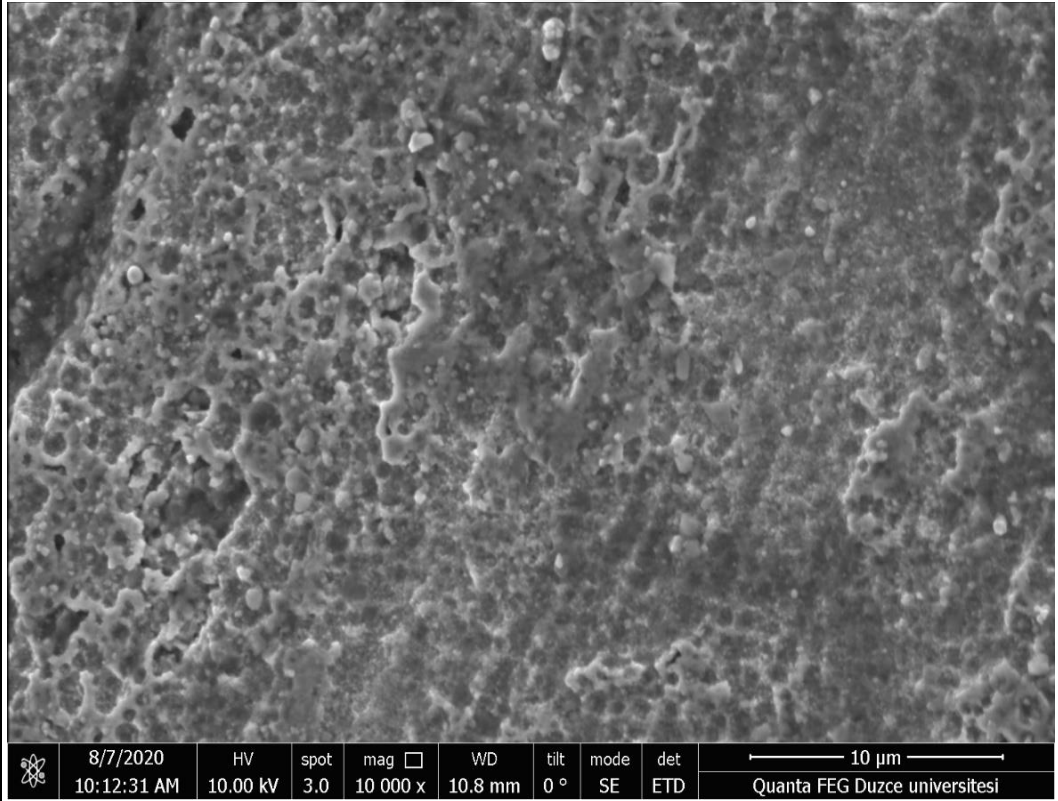
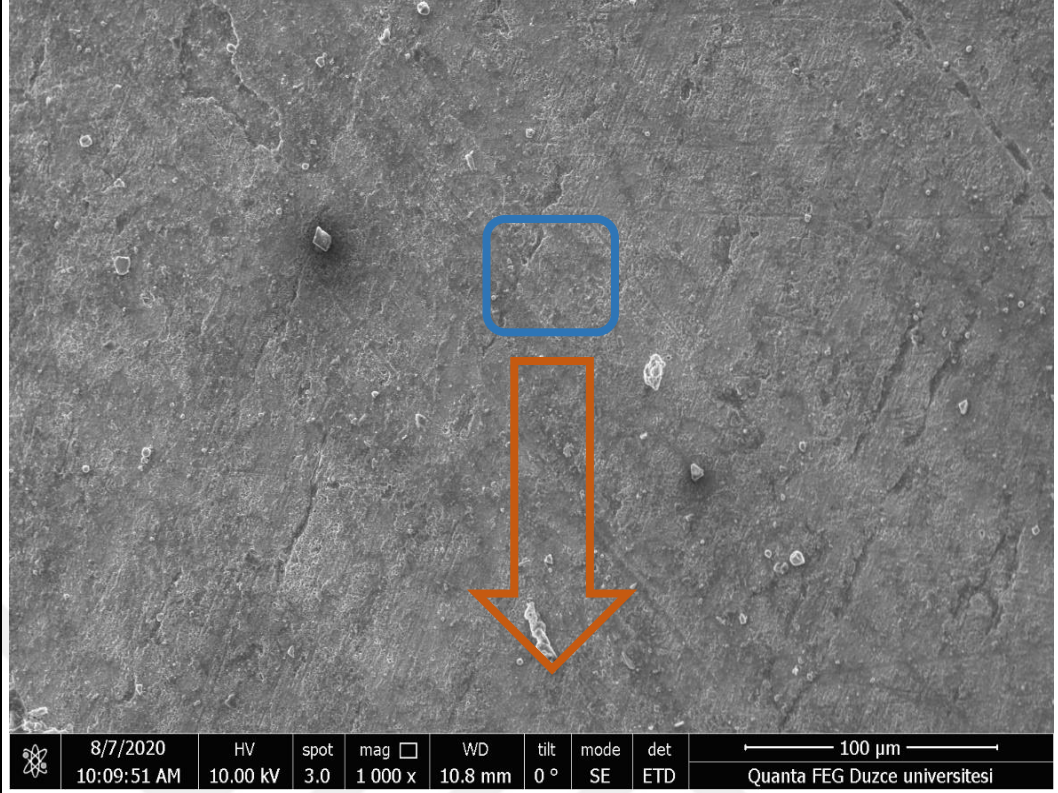
Şekil 3.13. (devam) 21 gün sonunda SCW+NaNO₂ ortamındaki bakır serpantinlere ait SEM görüntüleri.



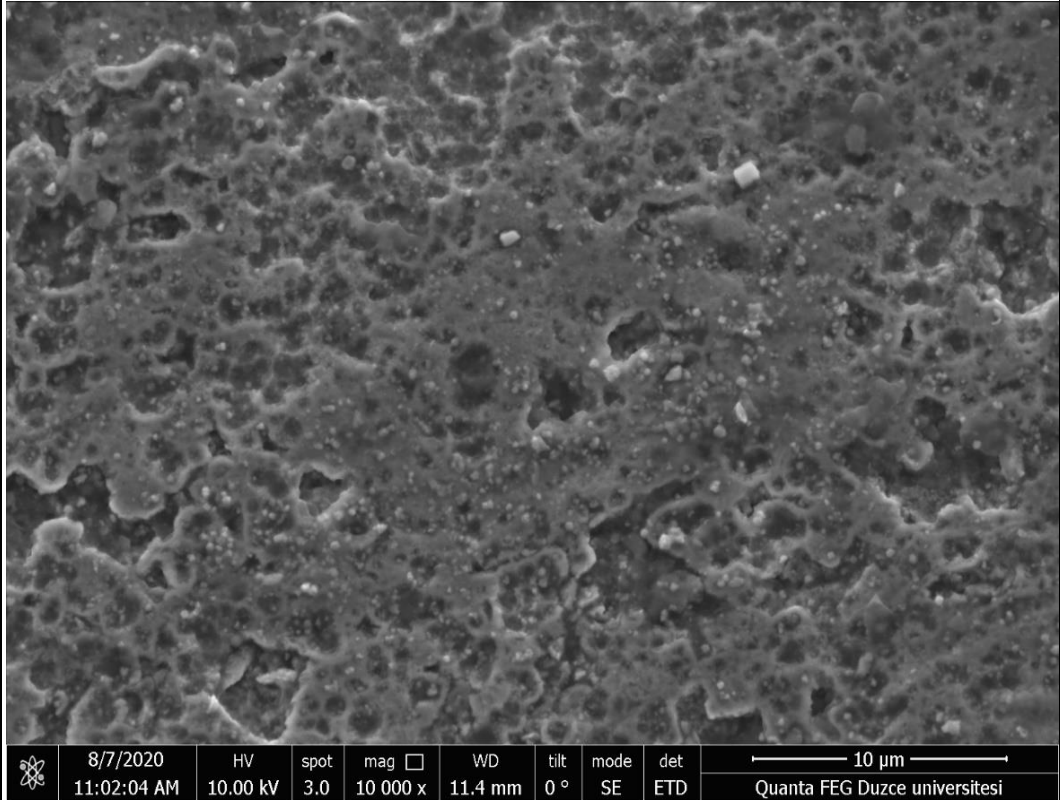
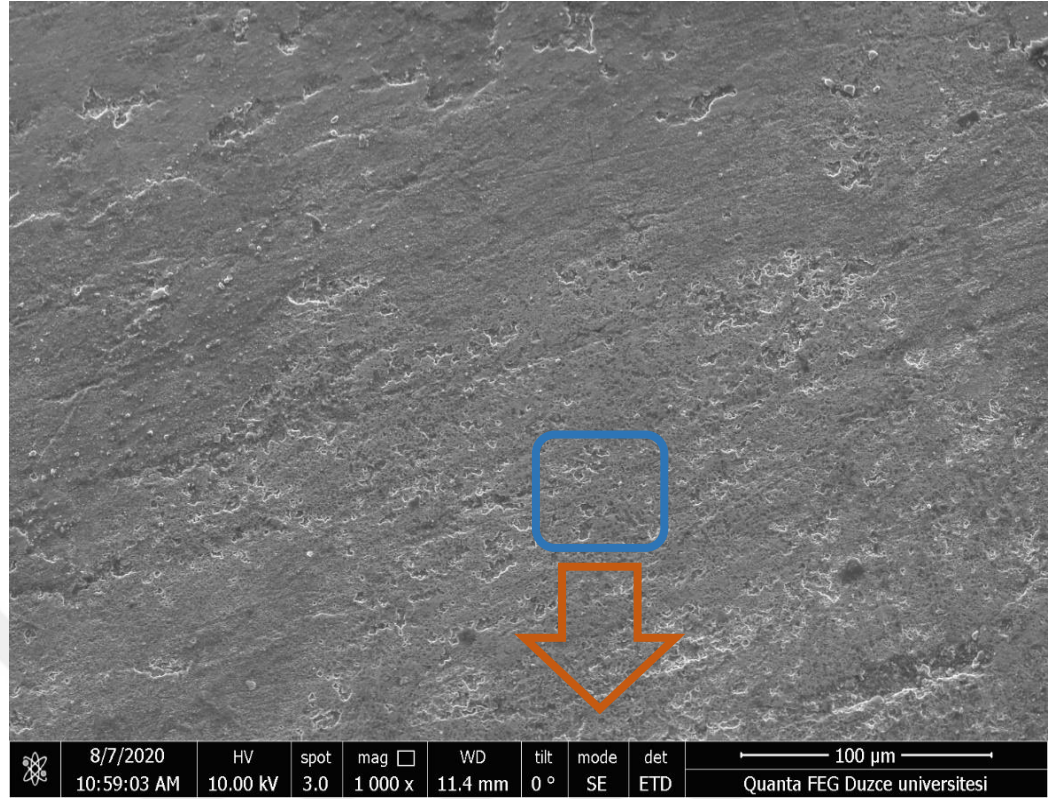
Şekil 3.13. (devam) 21 gün sonunda SCW+NaNO₂ ortamındaki bakır serpantinlere ait SEM görüntüleri.



Şekil 3.13. (devam) 21 gün sonunda SCW+NaNO₂ ortamındaki bakır serpantinlere ait SEM görüntüleri.



Şekil 3.13. (devam) 21 gün sonunda SCW+NaNO₂ ortamındaki bakır serpantinlere ait SEM görüntüleri.



Şekil 3.13. (devam) 21 gün sonunda SCW+NaNO₂ ortamındaki bakır serpantinlere ait SEM görüntüleri.

Çizelge 3.6. İnhibitör ilaveli SCW ortamında elde edilen EDS sonuçlarının kıyaslanması.

SCW								
Element Wt %	1	2	3	4	5	6	7	8
C	6.17	8.55	7.79	8.23	13.42	6.31	4.87	3.09
O	23.46	25.57	19.24	27.32	13.23	5.03	4.02	5.11
Mg	0.64	x	0.09	0.24	0.33	0.21	0.18	0.24
Al	0.92	0.19	0.60	0.41	0.63	0.44	0.24	0.37
Si	2.14	0.92	0.71	0.62	0.66	0.32	0.30	0.45
S	0.19	0.23	0.10	0.19	0.17	0.47	0.24	0.33
Cl	0.95	0.85	0.87	0.75	1.21	0.83	0.75	1.11
Ca	3.97	18.00	12.01	26.91	7.38	0.56	0.37	0.46
Fe	2.37	1.61	1.54	1.46	1.56	0.53	1.24	0.83
Cu	59.19	44.07	57.06	33.87	61.38	85.3	87.8	88.01
Na	x	x	x	x	x	x	x	x
SCW+NaNO ₂								
Element Wt%	1	2	3	4	5	6	7	8
C	8.89	5.13	11.59	10.88	6.66	6.76	8.82	12.24
O	11.64	8.17	9.24	6.26	6.42	5.37	6.43	8.90
Mg	0.22	0.11	0.08	0.11	0.22	0.10	x	0.15
Al	0.44	0.54	0.92	0.36	0.26	0.44	0.35	x
Si	0.41	0.33	0.30	0.35	0.37	0.31	0.28	0.16
S	0.21	0.16	0.19	0.20	0.30	0.34	0.20	0.29
Cl	0.45	0.20	1.32	0.65	0.59	0.67	0.68	0.81
Ca	0.91	2.31	0.27	0.24	0.37	0.25	0.41	0.33
Fe	1.70	2.79	1.70	1.29	0.68	0.87	1.19	0.92
Cu	74.60	78.90	73.52	79.64	84.11	84.35	81.00	75.83
Na	0.53	1.37	0.88	0.00	0.00	0.55	0.65	0.37

Korozyon ürünlerinin temel bileşimleri; çalışma numunesinin esas bileşeni olan Cu ve metal yüzeyinde oluşan oksit filmi tanımlayan oksijen elementidir (Çizelge 3.6). Bakır yüzeydeki Cu ve O'nun atomik yüzdeleri sırasıyla %53,33 ve %30,87'dir. Farklı bölgeler için EDS sonuçları incelendiğinde 1 numaradan 8 numaraya doğru gidildikçe O elementinin atomik yüzdesinin azaldığı, Cu elementinin yüzdesinin ise arttığı görülmektedir. Şekil 3.13'de inhibitör ilaveli SCW ortamındaki bakır serpantinlere ait görüntüler incelendiğinde korozyon ürünlerinin azaldığı görülmektedir. İnhibitör ilavesiyle 1 numaralı bölgeye ait EDS analizlerinde Cu ve O elementlerine ek olarak NaNO₂ varlığında bulunan N elementi de yüzeyde gözlemlenmektedir. İnhibitör ilaveli ortamda elde edilen EDS verileri incelendiğinde bakır serpantin yüzeyinde yer alan Cl⁻ elementlerinin atomik yüzdelерinin NaNO₂ ilavesiyle azaldığı görülmektedir. Bu durum metal yüzeyinde inhibitörün adsorblandığını ifade etmektedir. SEM-EDS analizleri sonucunda elde edilen verilerin AFM analizleri ile tutarlı olduğu görülmektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında bakır korozyonunu incelemek için inhibitörlü ve inhibitörsüz ortamda hazırlanan yapay soğutma suyuna maruz bırakılan bakır plakaların 2000 ppm derişimde korozyona maruz bırakılması sonucu bakırda oluşan korozyon mekanizması (EIS, DEIS, SEM/EDS, OP, AFM) yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır. Ayrıca bakır serpantin 1000 ppm derişimde korozyona maruz bırakılması sonucu korozyon mekanizması (SEM/EDS, AFM) yöntemleri kullanılarak araştırılmıştır.

- EIS yöntemi sonucunda SCW ortamına maksimum oranda (2000 ppm) ilave edilen NaNO_2 ile inhibisyon yüzdesi %61,8 olarak belirlenmiştir. EIS parametreleri, inhibitör konsantrasyonundaki artışla iyileşen ince bir oksit film oluşumunu göstermiştir. EIS analizleri, 2000 ppm'de maksimum NaNO_2 konsantrasyonunun korozyonun %61,8'ini önleyebileceğini göstermiştir. EIS parametreleri, artan inhibitör konsantrasyonu ile iyileşen ince bir bariyer film oluşumunu önermektedir. İlk çıkarılan sonuç, nitrit iyonlarının bakır yüzeyinde pasif oksit tabakasının büyümesini teşvik ettiğidir.
- DEIS analizi, SCW 'de bakır korozyonunun engellenmesinde nitrit iyonunun rolü hakkında bazı önemli bilgiler sağlamıştır. Nitrit iyonu, Cu_2O 'dan oluşan ilk oksit tabakasının büyümesini azalmıştır. Bununla birlikte, tam olarak 2 saat sonra, bakırın inhibisyonu DEIS ile belirlendiği üzere 14400 s sonrası $\text{Cu}_2\text{O} + \text{Cu}(\text{OH})_2$ oluştuğunda iyileşmiştir. Önleme etkisi aralığı, 24 saatlik süre boyunca %50-59'dur. 12 ve 24 saatlerde %IE değerlerinin azalması, 6 saatte iyi koruma (%59,5) sağlayan nitrit iyonlarının bakır yüzeyindeki fiziksel adsorpsiyon yollu kayıp ile ilişkilendirilebilir. Bu tür NaNO_2 davranışı, yalnızca EIS aracılığıyla tespit edilemez veya açıklanamaz, bu da DEIS'in korozyon ölçümlerindeki önemini artırmaktadır.
- Adsorpsiyon çalışmaları SCW'de bakır için sodyum nitrit tarafından sunulan korozyon inhibisyonunda spontan ve baskın fizisorpsiyonun önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Adsorpsiyon çalışmaları ayrıca, bakır yüzey üzerindeki her aktif bölgenin birden fazla adsorbe edici tür ile ilişkili olduğunu ima etmektedir. Bu, $\text{Cu}(\text{OH})_2$ veya $\text{Cu}(\text{NO}_2)_2$ oluşumuna bağlanabilir. Çalışmalar

ayrıca adsorbe edilen türler arasında daha az etkileşim olduğunu göstermektedir. El-Awady izotermının gösterdiği kapsamlı adsorpsiyon tipi, oksijen veya azot kullanılarak bir [Cu/İnhibitör] kompleksinin oluşumu olabilen süreçte kemisorpsiyonun rolünü göstermiştir.

- NaNO_2 inhibitörü, AFM ve OP analizleri ile belirlendiği üzere yüzey homojenliğinin iyileştirilmesinde son derece etkilidir.
- En ilginç sonuçlardan biri 2000 ppm de SEM / EDS analizlerinden elde edilmiştir. Gözlenen inhibisyon, yalnızca pasif $\text{Cu}_2\text{O} + \text{CuO}/\text{Cu}(\text{OH})_2$ tabakasının oluşumuna atfedilemez. İnhibe edilen numunede EDS analizi ile tespit edilen önemli miktarlardaki azot ve oksijen, nitrit iyonunun bakır yüzey ile ilişkisini gösterebilir.
- Yapay soğutma suyunda bakır serpantinlerde gözlemlenen korozyonun NaNO_2 ilaveli ortama kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür.
- AFM analizleri incelendiğinde yüzeyde meydana gelen pürüzlülük değerlerinin (R_a ve R_z) SCW ortamına inhibitör ilave edilmesiyle azaldığı belirlenmiştir.
- SEM ve EDS analizleri incelendiğinde yapay soğutma suyu ortamlarına maruz bırakılan bakır serpantinlerin yüzeyinde meydana gelen korozyon ürünlerinin inhibitör ilavesiyle azaldığı ve NaNO_2 'nin bakır yüzeyinde tutulduğu gözlenmiştir.
- Metal yüzeyinde meydana gelen korozyonun belirlenmesi amacıyla uygulanan yüzey analizi yöntemleri (AFM ve SEM-EDS) ile elde edilen bütün verilerin birbirlerini destekler nitelikte olduğu görülmüştür.
- Kapalı devre sistemlerinin korozyona karşı korunmasında inhibitör kullanımının oldukça etkili bir yöntem olduğu ve sadece yüzey görüntüleme metotları kullanılarak da bu etkinliğin belirlenebileceği bu çalışma ile ortaya konulmuştur.

5. KAYNAKLAR

- [1] P. A. Schweitzer, *Fundamentals Of Corrosion-Mechanisms, Causes And Preventative Methods*, 1. baskı , Boca Rotan, USA: Taylor & Francis, 2013, ss. 1-65.
- [2] M. Finšgar ve I. Milošev, "Inhibition of copper corrosion by 1,2,3-benzotriazole: A review," *Corrosion Science*, c. 52, sayı 9. ss. 2737–2749, 2010.
- [3] H. Gerengi, H. Bilgiç ve H. İ. Şahin, "Ekolojik inhibitör olarak fındıkkabugu, nar ve karalahananın % 5'lik NaCl çözeltisindeki çinko levha korozyonuna etkisi", *Ormancılık Dergisi*, c. 6, sayı 2, ss. 1–22, 2010.
- [4] S. H. Tang, Y. M. Kong, S. M. Sapuan, R. Samin ve S. Sulaiman, "Design and thermal analysis of plastic injection mould", *Journal of Materials Processing Technology*, c. 171, sayı 2, ss. 259–267, 2006.
- [5] T. Oppelt, J. Schulze, H. Stein ve B. Platzer, "Comparison of methods for mould surface heating-part 1: Review", *International Polymer Science and Technology*, c. 39, sayı 12, ss. 518–523, 2012.
- [6] S. K. Das ve K. Bhojak, "Oil cooler selection for hydraulic system of plastic injection moulding machine", *International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN*, c. 6,14, ss. 2266–2271, 2013.
- [7] R. E. Samin, L. M. Jie ve M. A. Zawawi, "PID implementation of heating tank in mini automation plant using programmable logic controller (PLC)", *International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering*, Kuantan, Malaysia, 2011, ss. 515–519.
- [8] Y. Erşahin, "Soğutma yüküne bağlı olarak set sıcaklığı değişen hava soğutmalı soğutma grubunun performansının deneysel incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2017.
- [9] M. R. Malayeri ve M. R. Jalalirad, "Mitigation of crystallization fouling in a single heated tube using projectiles of different sizes and hardness", *Heat Transfer Engineering*, c. 35, sayı 16–17, ss. 1418–1426, 2014.
- [10] H. Al ve I. Haj, *Inverse Heat Conduction And Heat Exchangers*, 1. baskı, Santander, İspanya: World's largest Science, Technology & Medicine, Intechopen, 2012, böl. 5, ss. 506–540.
- [11] W. W. Frenier, "20 years of advances in technology for chemically cleaning industrial equipment: a critical review", *OnePetro*, c. 5, sayı 2, ss. 20–26, 1998.
- [12] I. B. Obot, A. Meroufel, I. B. Onyeachu, A. Alenazi ve A. A. Sorour, "Corrosion inhibitors for acid cleaning of desalination heat exchangers: Progress, challenges and future perspectives", *Journal of Molecular Liquids Journal*, c. 296, sayı 296, ss. 1-13, 2019.
- [13] V. S. Sastri, E. Ghali ve M. Elboudjaini, *Corrosion Prevention And Protection:*

- Practical Solutions*, 2. baskı, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2012, böl. 12, ss. 80-90.
- [14] C. G. Munger ve D. Louis, *Vincent Corrosion Prevention By Protective Coatings*, 1.baskı, Houston, USA: National Association of Corrosion Engineers International, 1984, böl. 36, ss. 35-60.
 - [15] D. J. Choi, S. J. You ve J. G. Kim, “Development of an environmentally safe corrosion, scale, and microorganism inhibitor for open recirculating cooling systems”, *Materials Science and Engineering* , c. 335, sayı 1–2, ss. 228–235, 2002.
 - [16] L. Gavrilă, D. Gavrilă, A. Simion ve C. C. Martin, “Galvanic corrosion in cooling water environments”, *Scientific Study & Research*, c. 3, sayı 1-2, ss. 93–108, 2002.
 - [17] R. N. Caron ve A. Sharif, “Copper alloys: properties and applications”, *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 1. baskı, New Haven, USA: Elsevier, 2017, böl. 1, ss 387-398.
 - [18] E. S. M. Sherif, R. M. Erasmus ve J. D. Comins, “Corrosion of copper in aerated synthetic sea water solutions and its inhibition by 3-amino-1,2,4-triazole”, *Journal of Colloid and Interface Science*, c. 309, sayı 2, ss. 470–477, 2007.
 - [19] Ž. Z. Tasić, M. B. Petrović Mihajlović, M. B. Radovanović ve M. M. Antonijević, “New trends in corrosion protection of copper”, *Chemical Papers*, c. 73, sayı 9, ss. 2103–2132, 2019.
 - [20] F. J. Cornwell, G. Wildsmith ve P. T. Gilbert, “Pitting corrosion in copper tubes in cold water service”, *British Corrosion Journal*, c. 8, sayı 5, ss. 1–8, 1973.
 - [21] M. N. El-Haddad, “Chitosan as a green inhibitor for copper corrosion in acidic medium”, *International Journal of Biological Macromolecules*, c. 55, ss. 142–149, 2013.
 - [22] M. Aliofkhazraei, *Developments In Corrosion Protection*, 3. baskı, Theran, Iranian: Intechopen, 2014, böl. 16, ss. 365-408.
 - [23] E. Hart, *Corrosion Inhibitors: Principles, Mechanisms And Applications*, 1. baskı, , London, England: Nova Science Publishers, 2016, böl. 5, ss. 42-56.
 - [24] I. H. Farooqi, P. A. Saini ve M. A. Quraishi, “Recent trends in cooling water Inhibitors” *OnePetro*, c. 332, sayı 2000, ss. 1-6, 2000.
 - [25] H. Khani ve R. Arefinia, “Inhibition mechanism of nitrite on the corrosion of carbon steel in simulated cooling water systems”, *Materials and Corrosion*, c. 69, sayı 3, ss. 337–347, 2018.
 - [26] S. T. Güldem, K. Aybars, G. Özgenur, K. “Metallerin çevresel etkileri-ii” *Metalurji Dergisi*, c. 6, sayı 138, ss. 1-3, 2004.
 - [27] H. U. Sverdrup, K. V. Ragnarsdottir ve D. Koca, “On modelling the global copper mining rates, market supply, copper price and the end of copper reserves”, *Resources, Conservation and Recycling*, c. 87, ss. 158–174, 2014.
 - [28] A. J. Farrell, B. Norton ve D. M. Kennedy, “Corrosive effects of salt hydrate phase change materials used with aluminium and copper”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 175, sayı 1–3, ss. 198–205, 2006.
 - [29] P. T. Gilbert, “Corrosion resisting properties of 90/10 copper-nickel-iron alloy with particular reference to offshore oil and gas applications”, *British Corrosion*

- Journal*, c. 14, sayı 1, ss. 20–25, 1979.
- [30] L. Núñez, E. Reguera, F. Corvo, E. González ve C. Vazquez, “Corrosion of copper in seawater and its aerosols in a tropical island”, *Corrosion Science*, c. 47, sayı 2, ss. 461–484, 2005.
- [31] I. Gurrappa, “Cathodic protection of cooling water systems and selection of appropriate materials”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 166, sayı 2, ss. 256–267, 2005.
- [32] M. A. Amin ve K. F. Khaled, “Copper corrosion inhibition in O₂-saturated H₂SO₄ solutions”, *Corrosion Science*, c. 52, sayı 4, ss. 1194–1204, 2010.
- [33] L. Yazan ve A. Özmerih, “Bakır ve bakır ürünleri kullanım alanları”, *Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü Teknoloji Şubesi*, c. 13, sayı 5, ss. 43–47, 2006.
- [34] D. A. Singer, “Future copper resources”, *Ore Geology Reviews*, c. 86, ss. 271–279, 2017.
- [35] İ. H. Ünal, S. Tuncel, M. B. Yücel, B. Yoleri, M. Arslan, "Türkiye ve dünyada bakır," Maden Tetkik ve Arama Enstitüsü teknoloji Şubesi, Türkiye, Rap. 09, 2006.
- [36] B. Cantor, M. J. Goringe ve J.A Eades, “Series in materials science and engineering series,” *Microscopy and Microanalysis*, 1. baskı, Bristol, UK: Institute of Physics Publishing, 2015, böl. 9, ss. 278-281 .
- [37] M. L. McFarland, Tony L. Provin ve Diane E. Boellstorff. (2020, 20 Kasım). *Drinking water problems : corrosion*, Texas A&M Agrilife Extension [Online]. Erişim: <https://agrilifeextension.tamu.edu/library/water/drinking-water-problems-corrosion/>
- [38] A. Fateh, M. Aliofkhazraei ve A. R. Rezvanian, “Review of corrosive environments for copper and its corrosion inhibitors”, *Arabian Journal of Chemistry*, c. 13, sayı 1, ss. 481-485, 2017.
- [39] D. Q. Zhang, L. X. Gao ve G. D. Zhou, “Inhibition of copper corrosion in aerated hydrochloric acid solution by amino-acid compounds”, *Journal of Applied Electrochemistry*, c. 35, sayı 11, ss. 1081–1085, 2005.
- [40] M. Scendo, “Inhibition of copper corrosion in sodium nitrate solutions with nontoxic inhibitors,” *Corrosion Science*, c. 50, sayı 296, ss. 1584–1592, 2008.
- [41] G. Kear, B. D. Barker ve F. C. Walsh, “Electrochemical corrosion of unalloyed copper in chloride media--a critical review”, *Corrosion Science*, c. 46, sayı 1, ss. 109–135, 2004.
- [42] R. W. Serth ve T. G. Lestina, “Heat Exchangers”, *Process Heat Transfer: Principles, Applications And Rules Of Thumb*, 2. baskı, Texas USA: Academic Press, 2014, 3. böl. ss. 67-92.
- [43] I. Teke, Ö. Ağra, Ş. Ö. Atayılmaz ve H. Demir, “Determining the best type of heat exchangers for heat recovery”, *Applied Thermal Engineering*, c. 30, sayı 6–7, ss. 577–583, 2010.
- [44] G. N. Xie, B. Sunden ve Q. W. Wang, “Optimization of compact heat exchangers by a genetic algorithm”, *Applied Thermal Engineering*, c. 28, sayı 8–9, ss. 895–906, Haz. 2008.

- [45] I. Dincer ve O. Siddiqui, “Heat transfer aspects of energy”, *Comprehensive Energy Systems*, 1. baskı. Oshawa, Canada: Elsevier, 2018, böl. 1, ss. 422–477. -
- [46] A. G. Yazicioğlu, S. Aradağ, E. Ayli, G. Gülben ve S. Kakaç, “Heat exchangers”, *Comprehensive Energy Systems*, 1. baskı, Anakara, Turkey: Elsevier Inc., 2018, böl. 4, ss. 40–69.
- [47] H. U. Zettler, M. Wei, Q. Zhao ve H. Müller-Steinhagen, “Influence of surface properties and characteristics on fouling in plate heat exchangers”, *Heat Transfer Engineering*, c. 26, sayı 2, ss. 3–17, 2005.
- [48] C. J. Messa, A. S. Foust ve G. W. Poehlein, “Shell-side heat transfer coefficients in helical coil heat exchangers”, *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, c. 8, sayı 3, ss. 343–347, 1969.
- [49] K. Srisawad ve S. Wongwises, “Heat transfer characteristics of a new helically coiled crimped spiral finned tube heat exchanger”, *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, c. 45, sayı 4, ss. 381–391, 2009.
- [50] N. Ghorbani, H. Taherian, M. Gorji ve H. Mirgolbabaei, “Experimental study of mixed convection heat transfer in vertical helically coiled tube heat exchangers”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, c. 34, sayı 7, ss. 900–905, 2010.
- [51] C. H. Oh ve Eung S. Kim, “Heat exchanger design options and tritium transport study for the vhttr system”, Idaho National Lab, USA, Rap. 09, 2008.
- [52] K. Cicek ve M. Celik, “Selection of porous materials in marine system design: The case of heat exchanger aboard ships”, *Materials and Design*, c. 30, sayı 10, ss. 4260–4266, 2009.
- [53] W. Guilong, Z. Guoqun, L. Huiping ve G. Yanjin, “Analysis of thermal cycling efficiency and optimal design of heating/cooling systems for rapid heat cycle injection molding process”, *Materials and Design*, c. 31, sayı 7, ss. 3426–3441, 2010.
- [54] S. C. Chen, W. R. Jong ve J. A. Chang, “Dynamic mold surface temperature control using induction heating and its effects on the surface appearance of weld line”, *Journal of Applied Polymer Science*, c. 101, sayı 2, ss. 1174–1180, 2006.
- [55] M. K. Fadzly, M. M. Mardhiati, W. T. Foo ve W. N. Fakhira, “Design and development of thermoelectric cooler to control mold temperature in injection molding machine”, *AIP Conference Proceedings*, c. 2129, sayı 1, ss. 020148, 2019.
- [56] R. Kent, “Processing”, *Energy Management in Plastics Processing*, Guildford, UK: Elsevier, 2018, böl.5, ss. 211–318.
- [57] G. Beresheim, “Thermoplast-Tapelegen - ganzheitliche prozessanalyse und -entwicklung”,Doktora tezi, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, Almanya, 2002.
- [58] K. Petrykowski ve J. Fisher, “A study comparing electric, oil and pressurised water heating for composite moulding”, *JEC Composites Magazine*, c. 49, sayı 75, ss. 42–47, 2012.
- [59] R. Hill, “Dynamic temperature control in injection molding with new conformal heating / cooling system”, Department of Manufacturing Engineering University of Galati, Canada, Rap. 07, 2010.

- [60] H. W. Stanford III, HVAC Water Chillers And Cooling Towers: Fundamentals, Application, And Operation, 2. baskı, Boca Raton, USA: CRC Press, 2016, böl. 2, ss. 31-47.
- [61] Top Chiller. (2020, Ocak 12). *Screw chiller manufacturer and supplier over 20 years in China* [Online]. Erişim: <https://www.topchiller.com/screw-chiller/>.
- [62] Course Hero. (2019, Aralık 29). *Switch on the main pump and cool switches on the chiller insert the fixed* [Online]. Erişim: <https://www.coursehero.com/file/p274put/Switch-on-the-MAIN-PUMP-and-COOL-switches-on-the-chiller-Insert-the-fixed/>.
- [63] M. Ellis ve S. Dillich, “Industrial water use and its energy implications”, U.S. Department of energy-Office of Industrial Technologies Nancy Margolis, USA, Rap. 2009.
- [64] R. W. Revie ve H. H. Uhlig, “Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering” 4. baskı, Ottawa, Canada: John Wiley & Sons, 2008, böl.15, ss. 285-287.
- [65] B. E. A. Rani ve B. B. J. Basu, “Green inhibitors for corrosion protection of metals and alloys: An overview”, *International Journal of Corrosion*, c. 2012. ss. 23-34, 2012.
- [66] P. B. Raja ve M. G. Sethuraman, “Natural products as corrosion inhibitor for metals in corrosive media - A review”, *Materials Letters*, c. 62, sayı 1, ss. 113–116, 2008.
- [67] V. S. Sastri, “Electrochemical principles and corrosion monitoring”, *Green Corrosion Inhibitors*, 1. baskı, New York, USA: John Wiley & Sons, 2011, böl. 2, ss. 29–102.
- [68] L. Elhousni, M. Galai, F. Z. ElKamraoui, N. Dkhireche, R. Touir ve M. Ebn Touhami, “Corrosion and scale studies of copper used in Moroccan industrial cooling water systems”, *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, c. 2, sayı 1, ss. 1–13, 2017.
- [69] M. Rizvi, H. Gerengi, S. Kaya, I. Uygur, M. Yıldız ve I. Sarioglu, “Sodium nitrite as a corrosion inhibitor of copper in simulated cooling water”, *Scientific Reports*, c. 11, ss. 1–16, 2021.
- [70] J. Piippo, T. Saario ve T. Laitinen, “The effect of nitrite ion on the electric properties of oxide films on copper,” Statens Karnkraft Inspektion - Swedish Nuclear Power Inspectorate”, Sweden, Rap. 12, 1996.
- [71] M. Pourbaix, *Altas Of Electrochemical Equilibria In Aqueous Solutions*, 1. baskı, Oxford, UK: Pergamon Press Ltd. 1966, böl.4, ss. 384-406.
- [72] H. Khani ve R. Arefinia, “Inhibition mechanism of nitrite on the corrosion of carbon steel in simulated cooling water systems”, *Materials and Corrosion*, c. 69, sayı 3, ss. 337–347, 2018.
- [73] K. Rahmani, R. Jadidian ve S. Haghtalab, “Evaluation of inhibitors and biocides on the corrosion, scaling and biofouling control of carbon steel and copper–nickel alloys in a power plant cooling water system”, *Desalination*, c. 393, ss. 174–185, 2016.
- [74] Z. Foroulis, “ Inhibition of corrosion in cooling water systems with mixtures of

- gluconate salts and silicate salts”, U.S. Patent 3 711 246, 16 Ocak, 1973.
- [75] E. Stupnišek-Lisac, A. L. Božić ve I. Cafuk, “Low-toxicity copper corrosion inhibitors”, *Corrosion*, c. 54, sayı 9, ss. 713–720, 1998.
 - [76] R. Gašparac, C. R. Martin ve E. Stupnišek-Lisac, “In situ studies of imidazole and its derivatives as copper corrosion inhibitors. I. Activation energies and thermodynamics of adsorption”, *Journal of The Electrochemical Society*, c. 147, sayı 2, s. 548, 2000.
 - [77] E. M. Schneider, M. Zeltner, N. Kränzlin, R. N. Grass ve W. J. Stark, “Base-free knoevenagel condensation catalyzed by copper metal surfaces”, *Chemical Communications*, c. 51, sayı 53, ss. 10695–10698, 2015.
 - [78] M. A. Deyab, R. Essehli ve B. El Bali, “Inhibition of copper corrosion in cooling seawater under flowing conditions by novel pyrophosphate”, *RSC Advances*, c. 5, sayı 79, ss. 64326–64334, 2015.
 - [79] W. Faes, S. Lecompte, Z. Ahmed, J. Van Bael, R. Salenbien, K. Verbeken ve M. De Paepe, “Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers”, *Corrosion Reviews*, c. 37, sayı 2, ss. 131–155, 2019.
 - [80] G. Kol ve A. Groysman, “Water chemistry for copper and stainless steel cooling water systems: Corrosion and scaling prevention”, *The Israel Chemist and Engineer*, c. 3, sayı 5757, ss. 13-19, 2014.
 - [81] S. A. Umoren ve M. M. Solomon, “Synergistic corrosion inhibition effect of metal cations and mixtures of organic compounds: A Review”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, c. 5, sayı 1, ss. 246–273, 2017.
 - [82] F. Ivušić, O. Lahodny-Šarc, H. O. Ćurković ve V. Alar, “Synergistic inhibition of carbon steel corrosion in seawater by cerium chloride and sodium gluconate”, *Corrosion Science*, c. 98, sayı 98, ss. 88–97, 2015.
 - [83] M. Taghavikish, N. K. Dutta ve N. R. Choudhury, “Emerging corrosion inhibitors for interfacial coating”, *Coatings*, c. 7, sayı 12, ss. 2-28, 2017.
 - [84] B. E. A. Rani ve B. B. J. Basu, “Green inhibitors for corrosion protection of metals and alloys: An overview”, *International Journal of Corrosion*, c. 2012, sayı 380217, ss 1-12, 2011.
 - [85] G. A. Salensky, M. G. Cobb ve D. S. Everhart, “Corrosion-inhibitor orientation on steel”, *Industrial and Engineering Chemistry Product Research and Development*, c. 25, sayı 2, ss. 133–140, 1986.
 - [86] G. Palanisamy, “Corrosion inhibitors”, *Inhibitors*, 1. baskı, Londra:UK: IntechOpen, 2019, böl. 11, ss 1-11, 2019.
 - [87] I. B. Obot, K. Haruna ve T. A. Saleh, “Atomistic simulation: a unique and powerful computational tool for corrosion inhibition research”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, c. 44, sayı 1, ss. 1–32, 2019.
 - [88] K. F. Khaled ve N. Hackerman, “Investigation of the inhibitive effect of ortho-substituted anilines on corrosion of iron in 1 M HCl solutions”, *Electrochimica Acta*, c. 48, sayı 19, ss. 2715–2723, 2003.
 - [89] I. G. Murgulescu, O. Radovici ve S. Ciolac, “The effect of some oxidizing substances on the behaviour of some aluminium alloys”, *Corrosion Science*, c. 4, sayı 1–4, ss. 353–361, 1964.

- [90] J. Beecher, C. Dinkel ve S. Corwin, “Corrosion inhibition with sodium nitrite”, *American Water Works Association*, c. 51, sayı 9, ss.1-6, 1959.
- [91] A. Wachter, “Sodium nitrite as corrosion inhibitor for water”, *Industrial and Engineering Chemistry*, c. 37, sayı 8, ss. 9–11, 1945.
- [92] J. Zuo, B. Wu, C. Luo, B. Dong ve F. Xing, “Preparation of MgAl layered double hydroxides intercalated with nitrite ions and corrosion protection of steel bars in simulated carbonated concrete pore solution”, *Corrosion Science*, c. 152, ss. 120–129, 2019.
- [93] I. M. Dmytrakh, R. L. Leshchak ve A. M. Syrotyuk, “Influence of sodium nitrite concentration in aqueous corrosion solution on fatigue crack growth in carbon pipeline steel”, *International Journal of Fatigue*, c. 128, ss. 105192, 2019.
- [94] J. K. Das ve B. Pradhan, “Effect of cation type of chloride salts on corrosion behaviour of steel in concrete powder electrolyte solution in the presence of corrosion inhibitors”, *Construction and Building Materials*, c. 208, ss. 175–191, 2019.
- [95] M. Hayyan, S. A. Sameh, A. Hayyan ve I. M. Alnashef, “Utilizing of sodium nitrite as inhibitor for protection of carbon steel in salt solution”, *International Journal of Electrochemical Science, Malaysia*, Rap. 08, 2012.
- [96] A. S. Afolabi, “Synergistic inhibition of potassium chromate and sodium nitrite on mild steel in chloride and sulphide media”, *Leonardo*, sayı 11, ss. 143–154, 2007.
- [97] O. O. Joseph, S. Sivaprasad ve O. S. I. Fayomi, “Comparative study on the effect of NaNO₂ in corrosion inhibition of micro-alloyed and API-5L X65 steels in E20 simulated FGE”, *Energy Procedia*, c. 119, ss. 953–960, 2017.
- [98] K. Higuchi, I. Shohji, T. Ando, S. Koyama, Y. Mizutani ve Y. Inoue, “Effect of rust inhibitor in brine on corrosion properties of copper”, *Procedia Engineering Sempozyumu’nda sunuldu, Muroran*, 2017.
- [99] K. Ranjbar, “Effect of flow induced corrosion and erosion on failure of a tubular heat exchanger”, *Materials and Design*, c. 31, sayı 1, ss. 613–619, 2010.
- [100] S. Xu, C. Wang ve W. Wang, “Failure analysis of stress corrosion cracking in heat exchanger tubes during start-up operation”, *Engineering Failure Analysis*, c. 51, ss. 1–8, 2015.
- [101] K. M. Deen, M. A. Virk, C. I. Haque, R. Ahmad ve I. H. Khan, “Failure investigation of heat exchanger plates due to pitting corrosion”, *Engineering Failure Analysis*, c. 17, sayı 4, ss. 886–893, 2010.
- [102] A. Y. El-Etre, “Natural honey as corrosion inhibitor for metals and alloys. I. Copper in neutral aqueous solution”, *Corrosion Science*, c. 40, sayı 11, ss. 1845–1850, 1998.
- [103] A. S. Fouda, K. Shalabi ve A. A. Idress, “Ceratonia siliqua extract as a green corrosion inhibitor for copper and brass in nitric acid solutions”, *Green Chemistry Letters and Reviews*, c. 8, sayı 3–4, ss. 17–29, 2015.
- [104] K. M. Ismail, “Evaluation of cysteine as environmentally friendly corrosion inhibitor for copper in neutral and acidic chloride solutions”, *Electrochimica Acta*, c. 52, sayı 28, ss. 7811–7819, 2007.
- [105] ISI-TAN. (2020, 15 Kasım). *Isı Kontrol Sistemleri* [Online]. Erişim:

<https://www.isitan.com.tr/>.

- [106] M. G. Lavastrou, P. General ve A. Mendoza, *Quality certificate*, Bulgaria: Home Sofia Med, 2008.
- [107] J. Sha, H. Ge, C. Wan, I. Wang S.Xie, X. Meng ve Y. Zhao., “Corrosion inhibition behaviour of sodium dodecyl benzene sulphonate for brass in an Al₂O₃ nano fluid and simulated cooling water”, *Corrosion Science*, c. 148, sayı 2018, ss. 123–133, 2019.
- [108] V. S. Agarwala, P. L. Reed ve S. Ahmad, “Corrosion Detection and Monitoring - A Review”, *Paper presented at the CORROSION 2000*, Orlando, Florida, 2000,
- [109] E. P. Randviir ve C. E. Banks, “Electrochemical impedance spectroscopy: An overview of bioanalytical applications”, *Analytical Methods*, c. 5, sayı 5. ss. 1098–1115, 2013.
- [110] H. Gerengi, M. M. Solomon, S. Öztürk, A. Yıldırım, G. Gece ve E. Kaya, “Evaluation of the corrosion inhibiting efficacy of a newly synthesized nitron against St37 steel corrosion in acidic medium: Experimental and theoretical approaches”, *Materials Science and Engineering* , c. 93, ss. 539–553, 2018.
- [111] H. Gerengi, “The use of dynamic electrochemical impedance spectroscopy in corrosion inhibitor studies”, *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, c. 54, sayı 3, ss. 536–540, 2018.
- [112] R. D. Holbrook, A. A. Galyean, J. M. Gorham, A. Herzing ve J. Pettibone, “Overview of nanomaterial characterization and metrology”, *Frontiers of Nanoscience*, 1. baskı. Gaithersburg, USA: Elsevier Ltd, 2015, böl. 2, ss. 47–87.
- [113] G. C. Wang, “Slag processing”, *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction*, 1. baskı. North Carolina, USA: Elsevier, 2016, böl. 5, ss. 87–113.
- [114] N. K. Myshkin, A. Y. Grigoriev, S. A. Chizhik, K. Y. Choi ve M. I. Petrokovets, “Surface roughness and texture analysis in microscale”, *Wear*, c. 254, sayı 10, ss. 1001–1009, 2003.
- [115] A. Gujrati, S. R. Khanal, L. Pastewka ve T. D. B. Jacobs, “Combining TEM, AFM, and profilometry for quantitative topography characterization across all scales”, *ACS Applied Materials and Interfaces*, c. 10, sayı 34, ss. 29169–29178, 2018.
- [116] M. M. Solomon, H. Gerengi, T. Kaya ve S. A. Umoren, “Performance evaluation of a chitosan/silver nanoparticles composite on St37 steel corrosion in a 15% HCl solution”, *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, c. 5, sayı 1, ss. 809–820, 2017.
- [117] A. A. El-Awady, B. A. Abd-El-Nabey ve S. G. Aziz, “Kinetic-Thermodynamic and adsorption isotherms analyses for the inhibition of the acid corrosion of steel by cyclic and open-chain amines”, *Journal of The Electrochemical Society*, c. 139, sayı 8, ss. 2149–2154, 1992.
- [118] X. Li, S. Deng ve H. Fu, “Sodium molybdate as a corrosion inhibitor for aluminium in H₃PO₄ solution”, *Corrosion Science*, c. 53, sayı 9, ss. 2748–2753, 2011.
- [119] M. Christov, “Adsorption characteristics of corrosion inhibitors from corrosion rate measurements”, *Corrosion Science*, c. 46, sayı 7, ss. 1613–1620, 2004.
- [120] M. Mobin, M. Rizvi, L. O. Olasunkanmi ve E. E. Ebenso, “Biopolymer from tragacanth gum as a green corrosion inhibitor for carbon steel in 1 m HCl solution”,

ACS Omega, c. 2, sayı 7, ss. 3997–4008, 2017.

- [121] M. Kurtay, “Beton karışım suyu ve boşluk suyuna katılan ekolojik inhibitörlerin donatı korozyonuna etkisinin araştırılması”, Doktora tezi, Makine Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2020.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : İbrahim SARIOĞLU

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Müh.	Düzce Üniversitesi	2021
Lisans	Makine ve İmalat Müh.	Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi	2016
Lise	Fen Bilimleri	Canip Baysal Anadolu Lisesi	2011

YAYINLAR

B. N. Daldal, İ. Sarıoğlu, G. Özel Erol, E. Açikkalp ve H. Yamık, “Optimum insulation thickness for cooling applications through exergy analysis and environmental methods”, *Green Energy and Technology*, Atina, Yunanistan, 2015, ss. 339–347.

İ. Sarıoğlu, M. Kurtay, M. Yıldız, M. Ketrez, H. Gerengi, “Kalıp şartlandırıcı serpantininde oluşan korozyonun inhibitör kullanımıyla engellenmesi,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 9, sayı 2, ss. 971–986, Nis. 2021.

M. Rizvi, H. Gerengi, S. Kaya, İ. Uygur, M. Yıldız, İ. Sarıoğlu, Z. Cingiz,” Role of sodium nitrite as a corrosion inhibitor of copper in simulated cooling water”, *Scientific Reports*, c. 11, sayı 1, s. 8353, 2021.