

**T.C.
MİLLİ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ATATÜRK STRATEJİK ARAŞTIRMALAR VE
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK
LİSANS PROGRAMI**

**NİKEL VE MANGAN ALÜMİNYUM
BRONZ ALAŞIMLARININ
TRİBOKOROZYON DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MUSA CENK ÖZEKİNCİ
19100401**

TEZ DANIŞMANI: DOÇ.DR. DOĞUŞ ÖZKAN

**İSTANBUL
MAYIS 2022**

**T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ATATÜRK STRATEJİK ARAŞTIRMALAR VE
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK
LİSANS PROGRAMI**

**NİKEL VE MANGAN ALÜMİNYUM
BRONZ ALAŞIMLARININ
TRİBOKOROZYON DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MUSA CENK ÖZEKİNCİ
19100401**

TEZ DANIŞMANI: DOÇ.DR. DOĞUŞ ÖZKAN

**İSTANBUL
MAYIS 2022**

**T.C.
MİLLÎ SAVUNMA ÜNİVERSİTESİ
ATATÜRK STRATEJİK ARAŞTIRMALAR VE
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK
LİSANS PROGRAMI**

**NİKEL VE MANGAN ALÜMİNYUM
BRONZ ALAŞIMLARININ
TRİBOKOROZYON DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MUSA CENK ÖZEKİNCİ
19100401**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 06.05.2022
Tezin Savunulduğu Tarih: 29.06.2022**

Tez Oy birliği / Oy çokluğu ile başarılı bulunmuştur.

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Doğuş ÖZKAN
Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Uğur Buğra ÇELEBİ
Doç.Dr. Egemen SULUKAN
Doç.Dr. Doğuş ÖZKAN**

**İSTANBUL
MAYIS 2022**

ÖZGÜNLÜK RAPORU

Tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler ve ç) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 47 sayfalık kısmına ilişkin, 06/Mayıs/2022 tarihinde şahsım tarafından intihal.net ve iTenticate adlı intihal tespit programlarından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan özgünlük raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 6'dır.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç
- 3- 5 kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Millî Savunma Üniversitesi Atatürk Stratejik Araştırmalar ve Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Lisansüstü Tez Çalışması Özgünlük Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Usul ve Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Musa Cenk ÖZEKİNCİ

Tarih:06 Mayıs 2022

ETİK BEYANI

Millî Savunma Üniversitesi Enstitüleri Lisansüstü Tez Hazırlama Kılavuzu'nda yer alan kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir; aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Bu tezdeki düşünce, görüş, varsayım, sav veya tezler bana aittir; Millî Savunma Bakanlığı, Türk Silahlı Kuvvetleri, Deniz Kuvvetleri Komutanlığı, Millî Savunma Üniversitesi Atatürk Stratejik Araştırmalar ve Lisansüstü Eğitim Enstitüsü sorumlu tutulamaz.

Musa Cenk ÖZEKİNCİ

Tarih: 06 Mayıs 2022

Sevgili Eşim, Ailem ve Değerli Arkadaşlarıma



ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım ve yüksek lisans eğitimim boyunca, bilgi tecrübe ve değerli zamanlarını esirgemeyen kıymetli danışman hocam Doç.Dr. Doğuş ÖZKAN'a, eğitimim sırasında her türlü desteklerini esirgemeyen Doç.Dr. Egemen SULUKAN hocama çok teşekkür ederim.

Öğrenim hayatımın tüm aşamalarında beni destekleyen, sabır gösteren sevgili eşim ve değerli aileme teşekkürü borç bilirim.

İstanbul, Mayıs 2022

Musa Cenk ÖZEKİNCİ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZGÜNLÜK RAPORU	
ETİK BEYANI	
İTHAF	
TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	
İÇİNDEKİLER	vii
TABLO LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
SEMBOL LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xii
TÜRKÇE ÖZ	xiii
İNGİLİZCE ÖZ (ABSTRACT)	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tez Konusu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar	2
2. TRİBOLOJİ	4
2.1. Aşınma	4
2.1.1. Adhesif Aşınma.	5
2.1.2. Abrasif Aşınma	6
2.1.3. Yorulma Aşınması	8
2.1.4. Korozyon Aşınması	9
3. TRİBOKOROZYON MEKANİZMASI	10
3.1. Korozyonda Elektrokimya	10
3.2. Tribokorozyonun Temel İlkeleri	15
3.3. Literatürde Tribokorozyon ile İlgili Yapılan Çalışmalar	16
3.4. Mevcut Araştırmalar ve Standartlardaki Sınırlamalar	19
3.4.1. Önceki Deney Yaklaşımlarındaki Sınırlamalar	19
3.4.1.1. Agresif Aşınma Durumu	20
3.4.1.2. Galvanik Reaksiyonun Etkisi	20
3.4.2. Mevcut Teknoloji ve Ekipmanlardaki Sınırlamalar	21
3.4.2.1. Deneysel Yaklaşımda Sınırlama	21
3.4.2.2. Reaksiyonunun Anlaşılmasında Sınırlama	21
3.4.2.3. Mevcut Standartlarda Sınırlama	22
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	23
4.1. Numune Hazırlanması	23
4.2. Tribokorozyon Test ve Koşulları	23
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	26
5.1. Mikroyapı	26
5.2. Tribokorozyon testleri: yüzey işlemleri ve morfoloji	31
6. SONUÇ	46
7. KAYNAKÇA	47
8. ÖZGEÇMİŞ	51

TABLO LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1: Korozyon testlerinde standart elektrokimyasal ölçüm yöntemleri.	11
Tablo 5.1: NAB ve MAB alaşımlarının ağırlıkça % kimyasal bileşimi.	26
Tablo 5.2: NAB alaşımlı numunelerin tane boyutları.	28
Tablo 5.3: NAB alaşımlı numunelerin tane boyutları.	30
Tablo 5.4: NAB ve MAB numunelerin temas yarı çapları ve temas basınçları.	31
Tablo 5.5: NAB ve MAB alaşımlarının yapay deniz suyu ortamında farklı yük koşulları altında elde edilen elektrokimyasal parametreleri.	35
Tablo 5.6: NAB ve MAB alaşımlarının yapay deniz suyu ortamında farklı yük koşulları altında hesaplanan elektrokimyasal parametreleri.	36
Tablo 5.7: NAB ve MAB alaşımlarının 10 ve 15 N yük koşulları altında yapılan OCP ve TAFEL testlerinin optik profilometre ile analizleri sonucu elde edilen aşınma hacmi değerleri.	40

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1: Karşılıklı İki Yüzeyin Pürüz Temasları.....	5
Şekil 2.2: Adhezif Aşınma Mekanizması Oluşumu	6
Şekil 2.3: Abrasif Aşınma mekanizmalarının Elektron Mikroskopu Görüntüleri (a) Kesme, (b) Kama Oluşumu, (c) Kazıma.....	7
Şekil 2.4: İki ve Üç Gövdeli Abrasif Aşınma.....	8
Şekil 2.5: Kayma Gerilmesinin İki Yüzey Arasında Temas Durumlarına Göre Dağılımı	9
Şekil 3.1: (a) Sülfürik Asit İçindeki Çinko ve Bakır Arasındaki Reaksiyon...	10
Şekil 3.2: Açık devre potansiyeli (OCP) deneyi.....	12
Şekil 3.3: Açık devre potansiyeli (OCP) deneyi.	13
Şekil 3.4: Potansiyodinamik polarizasyon (TAFEL) deneyi.	14
Şekil 3.5: Tribokorozyon süreci.	16
Şekil 3.6: Ball-on Disk Tipi Aşınma Test Konfigürasyonu	18
Şekil 3.7: Galvanik Etkinin Gösterimi.	21
Şekil 4.3: Tribokorozyon test düzeneği.	24
Şekil 5.1: a) NAB ve b) MAB numunelerin SEM-EDX analizleri.	26
Şekil 5.2: NAB alaşımının mikro yapısı ve fazlarını içeren SEM görüntüsü..	27
Şekil 5.3: NAB alaşımının XRD analizi grafiği	28
Şekil 5.4: MAB alaşımının mikro yapısı ve fazlarını içeren SEM görüntüsü.	29
Şekil 5.5: MAB alaşımının XRD analizi grafiği.	29
Şekil 5.6: Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile ölçülen a) NAB ve b) MAB numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri ve yüzey topoğrafyası.....	31
Şekil 5.7: NAB açık devre potansiyeli (OCP) testi sonucu.	32
Şekil 5.8: a) NAB, b) MAB alaşımlı numunelerin 10 N ve 15 N yük altındaki mekanik aşınma altındaki açık devre potansiyeli testleri.	32
Şekil 5.9: a) NAB, MAB alaşımlı numunelerin 10 N ve 15 N yük altındaki OCP testi esnasındaki ve b) 10 N ve 15 N yük altındaki TAFEL testi esnasındaki sürtünme katsayılarının değişimi.	33
Şekil 5.10: a) NAB alaşımlı numunelerin, b) MAB alaşımlı numunelerin sürtünmesiz, 10 N ve 15 N yük altındaki mekanik aşınma altındaki TAFEL grafikleri.	35
Şekil 5.11: MAB alaşımlı numunelerin yapılan testler sonrası aşınma izleri ve aşınma hacmi optik profilometre analizi.	38
Şekil 5.12: NAB alaşımlı numunelerin yapılan testler sonrası aşınma izleri ve aşınma hacmi optik profilometre analizi.	39

Şekil 5.13: NAB ve MAB alaşımlı numunelerin 10 N yük ile yapılan OCP ve TAFEL analizlerine ait aşınma oranları	40
Şekil 5.14: NAB ve MAB alaşımlı numunelerin 15 N yük ile yapılan OCP ve TAFEL analizlerine ait aşınma oranları	41
Şekil 5.15: MAB alaşımlı numunelerin 10 N yük ile yapılan OCP testi sonrası SEM-EDX analizi.....	42
Şekil 5.16: MAB alaşımlı numunelerin 15N yük ile yapılan OCP testi sonrası SEM-EDX analizi.....	42
Şekil 5.17: MAB alaşımlı numunelerin 10N yük ile yapılan TAFEL testi sonrası SEM-EDX analizi.....	43
Şekil 5.18: MAB alaşımlı numunelerin 15N yük ile yapılan TAFEL testi sonrası SEM-EDX analizi.....	43
Şekil 5.19: NAB alaşımlı numunelerin 10 N yük ile yapılan OCP testi sonrası SEM-EDX analizi.....	44
Şekil 5.20: NAB alaşımlı numunelerin 15N yük ile yapılan OCP testi sonrası SEM-EDX analizi.....	44
Şekil 5.21: NAB alaşımlı numunelerin 10N yük ile yapılan TAFEL testi sonrası SEM-EDX analizi.....	45
Şekil 5.22: NAB alaşımlı numunelerin 15N yük ile yapılan TAFEL testi sonrası SEM-EDX analizi.....	45

SEMBOL LİSTESİ

E'	: Etkin Elastik Modül
P_{maks}	: Maksimum Kontak Basıncı
R_1	: Ana Yüzey Pürüzlülük Değeri
R_2	: Karşıt Yüzey Pürüzlülük Değeri
A_R	: Aşınma Oranı
η_0	: Kinematik Viskozite
R_q	: Karşıt Yüzeylerin ortalama karekök pürüzlülükleri
S	: Aşınmış Yüzey Alanı
ρ	: Yoğunluk
Z	: Alaşımın Korozyonuna Dahil Olan Değerlik Elektron Sayısı
F	: Faraday Sabiti
e_{corr}	: Korozyon Potansiyeli
i_{corr}	: Korozyon Akım Yoğunluğu
K_{wc}	: Aşınma-Korozyondan Kaynaklanan Toplam Malzeme Kayıp Oranı
K_w	: Toplam Aşınma Hızı
K_c	: Toplam Korozyon Hızı
K_{co}	: Aşınmanın Olmadığı Durumdaki Saf Korozyon Oranı
ΔK_w	: Korozyon Nedeniyle Aşınma Hızındaki Artış
ΔK_c	: Aşınma Nedeniyle Korozyon Hızındaki Artış
K_s	: Mekanik Aşınma ve Elektrokimyasal Korozyon Arasındaki Sinerjinin Neden Olduğu Kayıp Oranı
K_{wo}	: Korozyon Yokluğunda Saf Aşınma Oranı

KISALTMALAR

AKM	: Atomik Kuvvet Mikroskoku
EDX	: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskoku (Scanning Electron Microscope)
XRD	: X ışını Kırınımı (X-ray Diffraction)
XPS	: X-ışını fotoelektron spektrometresi (XPS)
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit
MAB	: Manganez Alüminyum Bronzu
NAB	: Nikel Alüminyum Bronzu
NaCl	: Sodyum Klorür
Al₂O₃	: Alüminyum Oksit

TÜRKÇE ÖZ

NAB ve MAB Alaşımlarının Tribokorozyon Davranışlarının İncelenmesi

Musa Cenk ÖZEKİNCİ

Milli Savunma Üniversitesi, Atatürk Stratejik Araştırmalar ve
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İstanbul, Mayıs 2022

Bu tez çalışmasında, sıvı ile temas halinde çalışan gemi pervanelerinde kullanılan Nikel Alüminyum Bronzu (NAB) ve Mangan Alüminyum Bronzu (MAB) alaşımlarına yönelik en tehlikeli tehditlerden biri olan tribokorozyonun etkileri ve hangi alaşımın tribokorozyon direncinin daha yüksek oluşu incelemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Mekanik sürtünme ve kimyasal korozyonun etkileşimi, oldukça kısa sürede malzemelerin aşınmasına neden olur. Malzemelerin korozif ortamdaki tribolojik davranışlarının incelenmesi için bir deneysel yaklaşım geliştirilmiştir. Deniz suyu içerisindeki numuneye farklı yükler uygulanarak tribometre testleri yapılırken, bir yandan da korozyon test cihazı ile numune yüzeyinde oluşan pasivasyon tabakasının özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Testler neticesinde, malzemelerin korozyon oranları elde edilen grafikler üzerinden hesaplanmış, aşınma hacimleri optik profilometre ile hesaplanmış, optik mikroskop, atomik kuvvet (AKM) mikroskobu ve elektron mikroskopları ile yüzeydeki morfolojik değişimler incelenmiştir. Yüzeylerde korozyonun ve yüksek temas basınçlarının etkisiyle aşınma meydana gelmiştir. Aşınma sonucu oluşan yapılar, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile ölçümler yapılarak analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda aşınma direnci ve korozyon direnci bakımından MAB alaşımının NAB alaşımından daha üstün tribokorozyon davranışları sergilediği tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Tribokorozyon, Alüminyum Bronz, TAFEL Analizi, OCP Analizi.

Bilim Kodu : 91421

Sayfa Sayısı : 64

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Doğu ÖZKAN

İNGİLİZCE ÖZ (ABSTRACT)

Investigation of Tribocorrosion Behaviors of Nickel Aluminum Bronze and Manganese Aluminum Bronze Alloys

Musa Cenk ÖZEKİNCİ

National Defence University, Atatürk Strategic
Studies and Graduate Institute

Istanbul, May 2022

In this thesis, experiments were carried out to examine the effects of tribocorrosion, which is one of the most dangerous threats to Nickel Aluminum Bronze (NAB) and Manganese Aluminum Bronze (MAB) alloys used in ship propellers operating in contact with liquid, and to determine which alloy has higher tribocorrosion resistance. The interaction of mechanical friction and chemical corrosion causes the wear of materials in a very short time. While performing tribometer tests by applying different loads to the sample in seawater, the change in the properties of the passivation layer formed on the sample surface was examined with the corrosion test device. As a result of the tests, the corrosion rates of the materials were calculated on the graphs obtained, the wear volumes were calculated with an optical profilometer, and the morphological changes on the surface were examined with the optical microscope, atomic force (AFM) microscope and electron microscopes (SEM). Wear has occurred on the surfaces due to corrosion and high contact pressures. The structures formed as a result of wear were analyzed by making measurements with scanning electron microscopy (SEM). As a result of the analysis, it was determined that the MAB alloy exhibited superior tribocorrosion behavior than the NAB alloy in terms of wear resistance and corrosion resistance.

Keywords: Tribocorrosion, Aluminum Bronze, TAFEL Analysis, OCP Analysis.

Science Code : 91421

Pages : 64

Supervisors : Assoc.Prof. Doğuş ÖZKAN

1. GİRİŞ

Alüminyum bronzları, alüminyumun ana alaşım elementi olduğu ve demir, nikel, manganez ve silikonun küçük bileşenler olarak dahil edilebildiği bakır bazlı alaşımlardır. Bu alaşımlar, yüksek mukavemet ve mükemmel yorulma performansı ile korozyon ve aşınmaya karşı yüksek dirençleri nedeniyle vanalar ve bağlantı parçaları, gemi pervaneleri, pompa dökümleri ve ısı eşanjör su kutuları gibi çeşitli deniz uygulamalarında kullanım bulur. Deniz suyu ortamındaki korozyon direncinin genellikle hem Cu_2O hem de Al_2O_3 'ten oluşan ve kendi kendini onaran (Richardson,2016) ince oksit filmine dayandığı kabul edilmektedir, ancak gelişimi yavaştır ve genellikle birkaç haftadan aylara kadar sürebilmektedir. (Zhang ve diğ., 2018). Bazı çalışmalarda ise, malzeme için seçici korozyon da bildirilmiştir. Bu, alaşımın çok fazlı mikro yapısı ve ötektoid alanlarda bakırca zengin α fazının tercihli çözünmesi ile bağlantılıdır (Richardson,2016).

Deniz ortamındaki malzemelerin katı parçacıkların çarpması veya temas halindeki yüzeylerin bağıl hareketi gibi tribolojik temaslara maruz kalması sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Bu gibi durumlarda, malzemeler aynı anda mekanik aşınmaya, sürtünme katsayısı gibi tribolojik davranıştaki değişikliklere, elektrokimyasal korozyona maruz kalır. İki malzemeli bozunma sürecinde aşınma ve korozyon etkileşime girmektedir, böylece sinerjik etkiler, statik koşullara kıyasla hızlandırılmış malzeme kaybı oranlarına (veya bazı durumlarda, yavaşlamış bozunma oranlarına) neden olmakta (Wood, 2006) ve malzemenin davranışı tribolojik temele dayalı olarak ve sadece korozyon incelenerek belirlenmemektedir. (Huttunen-Saarivirta ve diğ., 2019). Tribokorozyon koşulları için malzeme seçimi son derece zordur ve kombine bozunma süreçlerine karşı performansı optimize etmeye dayanır ve bu, malzemelerin tribokorozyon davranışı hakkında derin bilgi sahibi olmayı gerektirmektedir. Bu çalışma, deniz suyu gibi NaCl içeren ortamlarda performansı optimize etmek ve uygun tribokorozyon önleme stratejileri tasarlamak için, deniz suyu içerisindeki çalışma koşulları altında alüminyum bronz türlerinden Nikel Alüminyum Bronzu ve Manganez

Alüminyum Bronzu malzemelerinin aşınma ve korozyonunun sinerjik etkilerinin incelenerek ortaya çıkarılması amaçlanmıştır.

1.1. Tez Konusu ile İlgili Yapılmış Çalışmalar

Tuzlu su ve deniz ortamlarında çeşitli alaşımların tribokorozyon davranışı, Huttunen-Saarivirta ve diğ. (2016) tarafından incelendiği üzere alüminyum bronzları her zaman pasif durumda olmamaktadır. Yakın zamana kadar, alüminyum bronzların tribokorozyon davranışı üzerine yapılan çalışmaların çoğu, erozyon-korozyonla, yani tribolojinin katı aşındırıcı parçacıkların etkileriyle meydana gelen aşınmalar kısmı ile ilgilenilmiştir (Rajahram ve diğ., 2009). %3,5 NaCl çözeltisinde, ortalama 300 μm çapındaki ve 7 m/s gibi nispeten düşük bir hızda hareket eden kum parçacıklarının etkilerinin, oksit tabakasının diğer parçacık etkilerine karşı direncini önemli bir oranda iyileştirdiği literatüre kazandırılmıştır (Rajahram ve diğ., 2009). Negatif sinerji, malzemenin pasivasyona uğradığı durumlarda Wu ve diğ. (2015) tarafından erozyon-korozyon koşulları altında da literatüre kazandırılmıştır. Tribokorozyon ile ilgili diğer bir çalışma alanı, pasif filmin kaynağına (hava kaynaklı/su kaynaklı) ve doğasına bağlı olarak sinerjinin malzeme kayıplarının %19-70'ine katkıda bulunduğu kavitasyon (Basumatary, 2020) ile tribokorozyon olmuştur (Basumatary, 2017).

Burada, Basumatary ve Wood (2017), α ve κ fazlarının ara yüzü boyunca yayılan ve ara yüzey boyunca mikro-çatlak yayılmasına katkıda bulunan malzemenin seçici saldırısı sorununu ortaya çıkarmıştır. Yapılan literatür taramasına göre, bu çalışma, alüminyum bronzların mikro yapısının tribokorozyon aşınmasındaki rolünü ele alan ilk çalışmadır.

Yakın zamanda yapılan çalışmalarda (Zhang ve diğ., 2018), Wood, 2017) yapay deniz suyunda kayan tip mekanik sürtünme ile alüminyum bronz alaşımlarının davranışını incelemiş ve kullanılan yüklerin 150 N'a kadar yüksek olması ile dikkat çekmektedir. Zhang ve diğ. (2018), aşınma ve korozyon sinerjisinin, mekanik aşınma durumunda malzemenin korozyon direncini bozduğunu, esasen sinerjik aşınma durumunda saf mekanik aşınma veya saf korozyon altında olduğundan daha fazla malzeme kaybına neden olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Zhang ve diğ. (2018), özellikle 100 N ve daha yüksek yüklerde, α - κ arayüzleri

boyunca α -fazının seçici korozyonunu, çevreleyen alanlara göre daha düşük alüminyum içeriğine bağlı olarak Al_2O_3 tabakası oluşturma eğiliminin azalmasına bağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında, NAB ve MAB alaşımlarının tribokorozyon davranışı, deniz suyunu simüle eden ağırlıkça %3,5'lik NaCl çözeltisinde, 10 N ve 15 N'luk yükler kullanılarak inert bir alüminyum oksit bilyeli karşı gövdeye kayan temas altında incelenmiştir. Karşılaştırma için ilgili deneyler karşı gövde ve mekanik yükün (korozyon) yokluğunda, mekanik yükün malzeme bozulmasındaki rolünü tanımlamak için ve korozyonun meydana gelmediği (aşınma) -0,6 ve 0,4 mV potansiyel değerinde gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, mevcut çalışmalarda kullanılan daha düşük yükler kullanarak malzemelerin tribokorozyon bozulmasında çok fazlı mikro yapının rolünü açıklamak amaçlanmıştır (Zhang ve diğ., 2018), Wood, 2017). Deneyler, bir elektrokimyasal hücre ile donatılmış lineer sürtünme düzeneğinde çalışan tribometrede gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, aşınma ve korozyon etkileşimlerinin kapsamı ve mekanizmalarına odaklanarak bu tez çalışmasında sunularak tartışılmıştır. Tribokorozyon sistemleri için temas mekaniği, diğer yükleme durumlarıyla gelecekteki karşılaştırmaları kolaylaştırmak için de sunulmaktadır.

2. TRİBOLOJİ

Triboloji kelimesi ilk kez bir dönüm noktası olarak Peter (1966) tarafından literatüre kazandırılmıştır. Triboloji kelimesi, sürtünme anlamına gelen Yunanca tribos kelimesi ile bilim anlamına gelen "logia" kelimesinin birleşiminden türetilmiştir, bu nedenle kelime tam anlamıyla “sürtünme bilimi” olarak Türkçeye çevrilebilir. Günümüzdeki anlamı ise, alternatif olarak kullanılan sürtünme, aşınma ve yağlama bilimidir. Sözlükler, tribolojiyi, iki yüzey arasında göreceli olarak gerçekleşen hareketin ve bu hareket ile alakalı konu ve uygulamaları içeren bilim ve teknoloji olarak tanımlar. Triboloji, uzay aracından ev aletlerine kadar uzanan teknik ekipmanın güvenilirliği, bakımı ve aşınması gibi büyük ekonomik öneme sahip sorunlara operasyonel analiz uygulama sanatıdır. Ayrıca günümüzde aşınmanın neden olduğu malzeme kaybının maliyetlerinin ve sürtünme sonucu ortaya çıkan enerji kayıplarının önlenmesi çabaları triboloji bilimin uygulama alanı olup ekonomik olarak dünya üzerindeki kayıpların önüne geçilmesi amacıyla araştırma alanı en güncel konuları oluşturmaktadır.

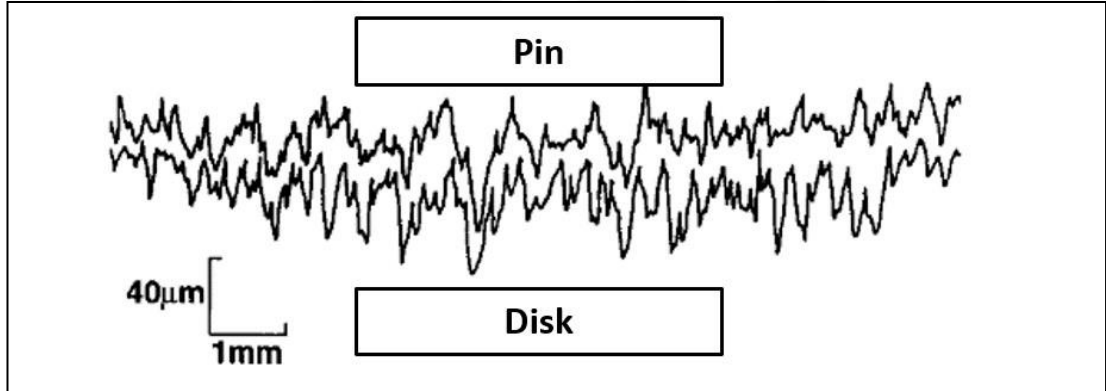
2.1. Aşınma

Aşınma, birbiri üzerinde bağıl olarak kayan karşıt yüzeylerin mekanik ve/veya kimyasal etkiler sebebiyle yaşadıkları malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Neden olduğu malzeme kaybı, yüksek yük ve uzun kayma mesafelerinde oluşturduğu deformasyon nedeniyle aşınma bazı makine elemanlarının ekonomik ömrünü azaltan önemli bir parametreyken talaş kaldırma, kesme, kalemle yazma, yüzey parlatma gibi uygulamalarda da kontrollü aşınmanın olduğu durumlardır. Aşınmayı kontrol edebilmek için bir tribolojik sistemde malzeme özellikleri, çevre ve çalışma koşulları, temas eden gövdelerin geometri ve yüzey yapısı dikkate alınmalıdır (Stolarski, 1990). Ayrıca Ludema kitabında aşınmayı azaltmak için bir tribolojik sistemde dikkat edilmesi gereken hususları aşağıda sıralamıştır;

1. Düşük kontak basınçları,
2. Düşük kayma hızları,

3. Düşük pürüzlülük,
4. Yüksek sıcaklığı engelleme,
5. Sert malzeme kullanımı,
6. Düşük sürtünme katsayılı malzeme tercihi,
7. Yağlayıcı kullanımı (Ludema, 1998).

Şekil 2.1’de iki malzemenin mikroskopik mertebede görülebilecek pürüzlülüklerinin temasları görülmektedir. Bu temas noktalarında yük altında ve kayma hareketi etkisinde mikro kırılmalar, kimyasal etkileşim veya temas ara yüzünde sıcaklık etkisiyle erime yolu ile iki yüzey arasında kaynama ve sonucunda yumuşak malzemeden kopmalar ile malzeme kaybı meydana gelmektedir. Hakim aşınma modu malzeme özellikleri, sürtünme ısınması, kimyasal etkileşim sonucu ile değişebilmekle beraber genel olarak motor parçalarında görülen aşınma türleri adhezyon, abrazyon, korozyon ve yorulma aşınmasıdır (Kato ve Adachi, 2000).



Şekil 2.1: Karşılıklı İki Yüzeyin Pürüz Temasları.

(Kato ve Adachi, 2000)

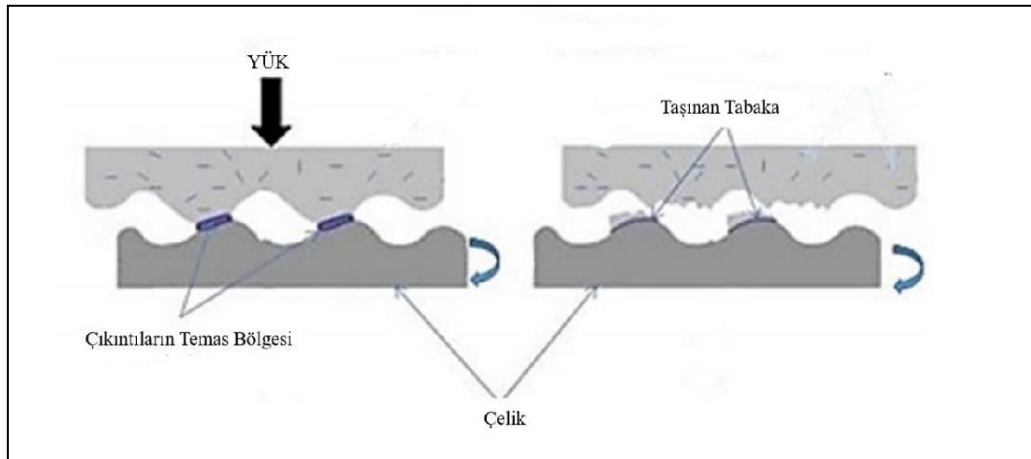
2.1.1. Adhezyon Aşınması

Yapışma aşınması olarak da bilinen adezyon aşınması, karşılıklı yüzey pürüzlülükleri üzerinde temas halinde bulunan cisimlerin kayma hareketi esnasında temas noktalarında meydana gelen yapışma-kaynama neticesinde serbest parça koparılması veya yumuşak yüzeyden kopan malzemenin sert yüzeye transferi şeklinde gerçekleşen aşınma şeklidir (Kato ve Adachi, 2000). Şekil 2.2’de şematik olarak görülen cisimlerin pürüzlülük noktalarında meydana gelen temas alanlarında yük

altında oluşan gerilmeler yüzeyde plastik deformasyon ve kaynak oluşumuna neden olmaktadır. Bu kaynak noktaları kayma esnasında koparak aşınma parçacıklarını veya Şekil 2.2’de görüldüğü gibi malzeme transferini oluşturur. Bu esnada kaynak noktalarındaki metalik bağlardan dolayı sürtünme kuvvetinde de artış meydana gelmektedir. Birbiri üzerinde sürtünen yüzeyler yüksek yük, uzun kayma mesafeleri, aralarındaki sertlik miktarı farkları ve yüksek kayma hızları gibi çalışma şartlarında bu etkenlerin bir veya birkaçının birlikte etkimesiyle beraber yüksek adezyon aşınmalarına uğrarlar (Nosonovsky ve Kailas, 2013). Ayrıca cisimlerin elektronik yapıları, kristal yapıları ve kohezyon mukavemetleri adezyon aşınması üzerinde etkilidir. Örneğin hegzagonal yapıya sahip metallerin hacim ve yüzey merkezli yapıya sahip olan metallere göre adezyon aşınmasına direnç gösterdiği bilinmektedir (Stolarski, 1990). Adezyon aşınmasını önlemek için yüzeyler arasında yağlama filmi oluşturarak pürüzlerin direk temasını kesmek ve karşıt yüzeylerin sertleştirilmesi etkili bir yöntemken, bunların yanısıra yüzeyler arasında oluşan oksit tabakaları da adhezyon aşınmasını azaltmaktadır (Mang and Dresel, 2007).

Sekil 2.2: Adhezyon Aşınma Mekanizması Oluşumu.

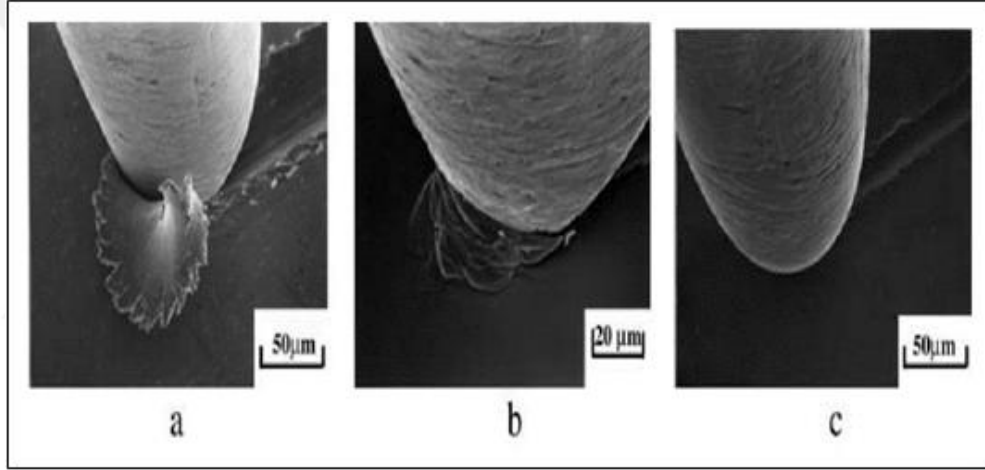
(Kumar 2016)



2.1.2. Abrasyon Aşınması

Abrasyon aşınması, temas halindeki iki yüzey arasında, bir malzemenin diğer malzemeye göre sertliğinin ve pürüzlülüğünün fazla olduğu durumda gerçekleşir (Czichos, 1978). Yük altında sert malzeme yüzeyindeki pürüzler, yumuşak malzeme yüzeyine batar ve plastik deformasyona sebep olur. Kayma hareketi esnasında mikro-

kesme ve mikro-kazıma işlemlerinin bir araya gelmesi ile yumuşak yüzeyden malzeme kaldırılır (Stolarski, 1990). Yük durumuna ve aşınan malzeme özelliklerine bağlı olarak abrazyon aşınma mekanizmaları Şekil 2.3'te görüldüğü gibi genel hatlarıyla, kesme (cutting), kama oluşumu (wedge-formation), kazıma (plowing), olarak sınıflandırılmaktadır. Kazıma, aşınma hafif yüklerde malzemenin bir oyuktan yanlara kaydırılması işlemidir ve gerçek bir malzeme kaybına neden olmaz. Temas yüzeylerinin kayma dayanımının, ana malzemeye göre yeterince yüksek bir seviyeye çıktığında, aşındırıcı uç önünde kama oluşumu meydana gelmektedir. Bu durumda aşınma oyuğundan kaldırılan toplam miktar, kenarlara kaldırılan malzemeden daha büyüktür. Kesme aşınması ise sünek malzemeler için ağır bir aşınma mekanizmasıdır. Kesme aşınmasında aşındırıcı uç bir takım gibi yüzeyden malzeme kaldırır (ASM, 1992).



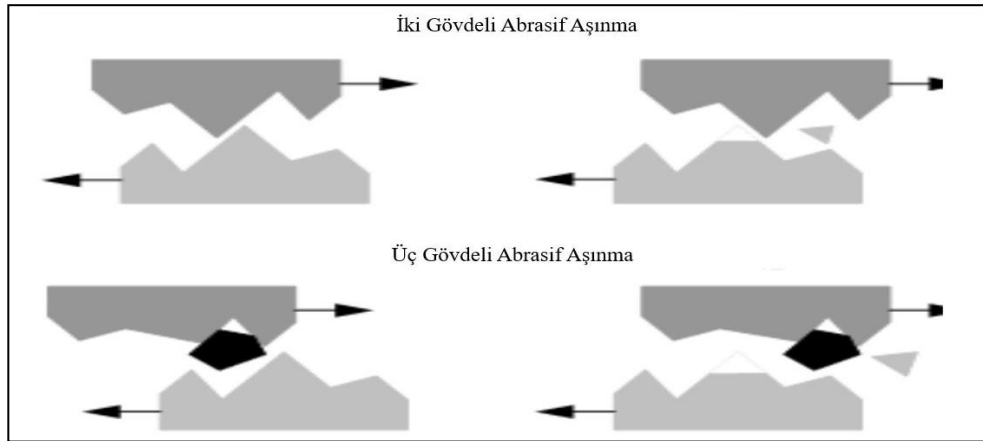
Şekil 2.3: Abrazyon Aşınma Mekanizmalarının Elektron Mikroskopu Görüntüleri (a) Kesme, (b) Kama oluşumu, (c) Kazıma.

(Hokkirigawa ve Kato, 1988)

Ayrıca abrazyon aşınması yüzey temas türüne göre iki gövdeli ve üç gövdeli abrazyon aşınması olarak ikiye ayrılır. İki gövdeli aşınma karşıt yüzeyler arasındaki sertlik farkından oluşan aşınma türüyken, üç gövdeli aşınmada ise karşıt yüzeylerin arasında sert aşındırıcı partiküllerin kayma ve yuvarlanma hareketi söz konusudur (Şekil 2.4)

Abrazyon aşınması birçok makine elemanında önemli bir miktarda malzeme kaybına sebebiyet vermektedir. Bu nedenle aşınmayı önlemek amacıyla temas yüzeylerine binen yükleri azaltmak, malzemenin sertliğini artırıcı uygulamalara başvurmak, yüzey temasını kesecek yağlayıcılar kullanmak

abrazyon aşınmasını engelleyici önlemler arasındadır.

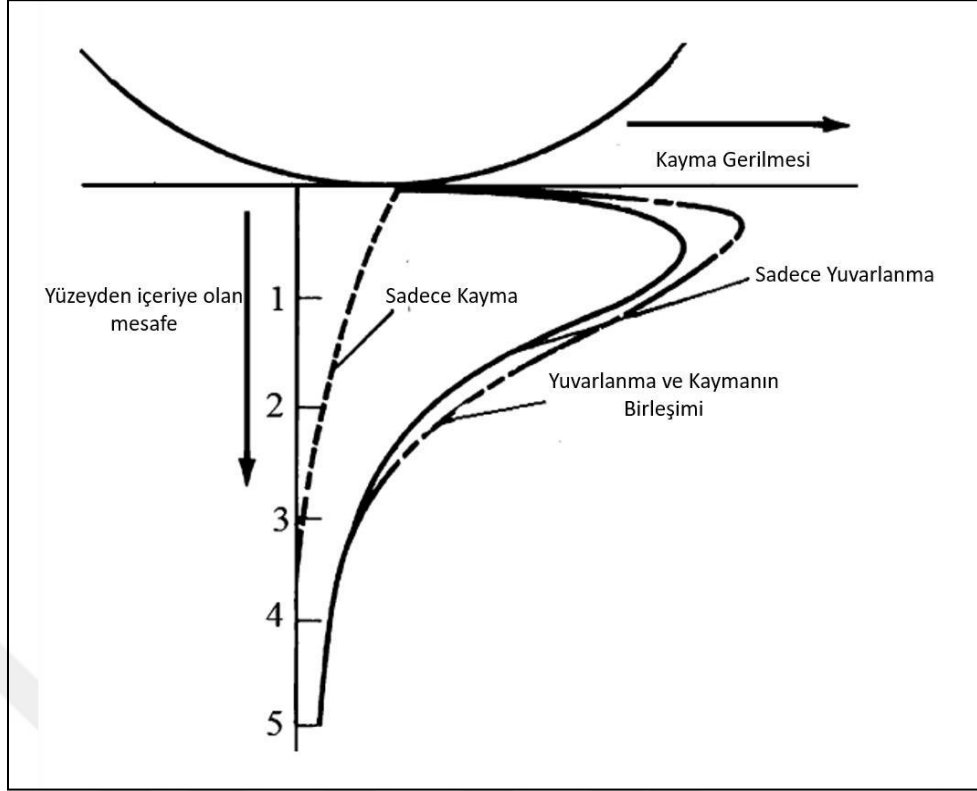


Şekil 2.4: İki ve Üç Gövdeli Abrasyon Aşınması.

(Salot 2019)

2.1.3. Yorulma Aşınması

Sırasıyla tekrarlanan kayma ve yuvarlanma esnasında çeşitli yükler altında yüzeylerde ve yüzey alt kısımlarında yorulmalar meydana gelir. Yorulma aşınması (pitting), malzemelerin belli bir kritik sayıda döngü boyunca maruz kaldığı yükleme ve boşaltma durumlarının oluşturdukları mikro çatlakların zamanla büyüyerek yüzeye çıkarak büyük yüzey kırılmalarına ve pitting adı verilen çukurcuklara neden olan aşınma çeşididir (Bhushan, 2013). Yorulma aşınmasında küçük temas alanlarında yüksek Hertz temas basınçları malzeme içerisinde kayma gerilmelerine sebebiyet vermektedir. Şekil 2.5'te kayma, yuvarlanma ve bunların birleşimi sürtünmelerin kayma gerilmesine etkisi görülmektedir. Böylelikle kayma gerilmesinin en yüksek olduğu noktalarda mikro çatlak oluşumları gerçekleşmektedir.



Şekil 2.5: Kayma Gerilmesinin, İki Yüzey Arasında Temas Durumlarına Göre Dağılımı.

(Nosonovsky ve Kailas, 2013)

2.1.4. Korozyon Aşınması

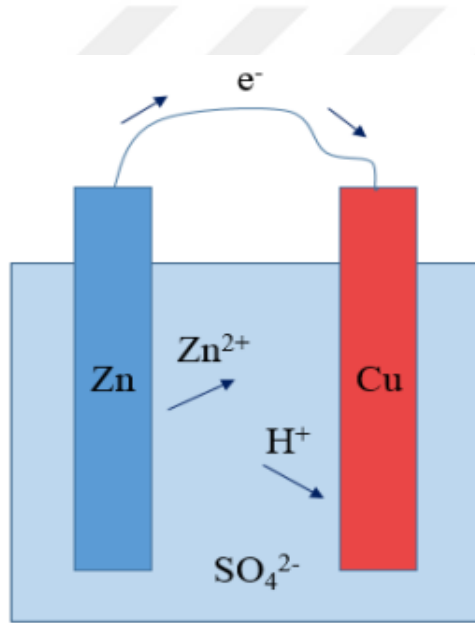
Hem korozyon hem de aşınma mekanizmalarının birlikte dahil olduğu yüzeyde tribo-kimyasal değişikliklere ve malzeme kaybına neden olan aşınma şeklidir. Aşınma ve korozyon kombinasyonunun etkileri, bu mekanizmaların her birinin tek başına neden olduğu etkiden çok daha büyük toplam malzeme kaybına neden olmaktadır (ASM 1992).

Hava bulundurduğu oksijen nedeniyle en baskın korozif ortamlardan biridir ve yüzeyde oksit tabakası oluşumuna neden olur. Kayma sırasında bu tabakada kopma meydana geldiğinde korozyon oluşumu tekrarlanır böylece korozyon aşınması meydana gelir. Fakat oksit tabakasının önemli işlevi ise katı yağlayıcı gibi davranarak kayan yüzeylerde metal-metal temasını önlemesi ve böylece adezyon aşınmalarını azaltmaya yardımcı olmasıdır (Nosonovsky, 2013). Ayrıca yüzeyler arasındaki sürtünme sebep olduğu sıcaklık artımı sebebiyle korozyon hızını arttırmaktadır (Stolarski, 1990).

3. TRİBOKOROZYON MEKANİZMASI

3.1 Korozyonda Elektrokimya

Korozyonun doğasında elektrokimyasal reaksiyon vardır. Korozyon, elektronların anottan katoda aktarıldığı bir süreçtir. Farklı potansiyellere sahip iki malzeme (sırasıyla bir anot ve bir katot) birbirine bağlandığında ve iletken bir elektrolite daldırıldığında korozyon meydana gelir. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, sülfürik asit ortamında daldırılan (H₂SO₄) çinko (Zn) ve bakır (Cu) arasındaki reaksiyonlar düşünüldüğünde;



Şekil 3.1: (a) Sülfürik Asit İçindeki Çinko ve Bakır Arasındaki Reaksiyon.

Reaksiyonlar aşağıdaki gibi denklemler olarak gerçekleşmektedir:



Çinko (Zn, anot) sülfürik asit (H₂SO₄) ile reaksiyona girer ve elektron kaybeder. Bu sırada hidrojen iyonları (H⁺) elektron kazanır ve bakırın (Cu, katot) yüzeyinde kabarcıklar oluşturur. Bu reaksiyonun sonucunda çinko (Zn) korozyona uğramaktadır.

Elektrokimyasal yaklaşımın, 70'lerin sonlarında ve 80'lerin başlarında bilim adamları

tarafından korozyondan korunmada kolaylaştırıcı bir yöntem olduğu keşfedildi. Elektrokimyasal yaklaşım, laboratuvarlarda korozyon çalışmasının yerinde izlenmesinde kullanılabilir. Belirli bir malzemenin korozyon sürecinde sürekli olarak aktarılan elektronlardan potansiyel ve akım ölçülebilir. Korozyon davranışı, potansiyel ve akım analiz edilerek elde edilebilir. Potansiyel, malzemenin aktivitesini, akım ise korozyon oranını göstermektedir.

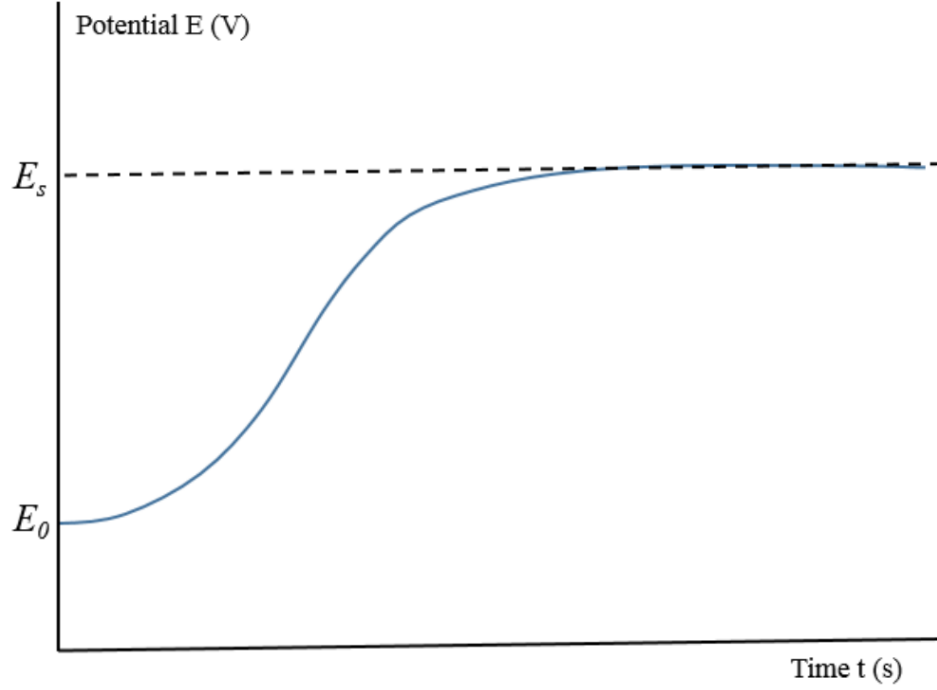
Elektrokimyasal testler için bir dizi deneysel yöntem Ulusal Korozyon Mühendisleri Birliği (NACE) ve Amerikan Test Malzemesi Derneği (ASTM) tarafından standardize edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan standartlar Tablo 3.1’de listelenmiştir.

Tablo 3.1: Korozyon testlerinde standart elektrokimyasal ölçüm yöntemleri.

ASTM G61-86	Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys
ASTM G59-97	Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements
ASTM G71-81	Standard Guide for Conducting and Evaluating Galvanic Corrosion Tests in Electrolyte

ASTM G61-86 (2018), ASTM G59-97(2014), ASTM G71-81(2019)

Açık devre potansiyeli (OCP) deneyleri ve polarizasyon deneyleri, laboratuvarda korozyonu incelemek için iki ana yöntemdir. Açık devre potansiyeli (OCP) deneyinde, Şekil 3.2’te gösterildiği gibi, korozyon potansiyeli (E_{corr}), zamanın (t) bir fonksiyonu olarak kaydedilir. Açık devre potansiyeli, Şekil 2.2’te gösterildiği gibi kararlı bir değere (E_s) ulaşır, bu durum korozyon sisteminin o anda kararlı olduğu anlamına gelir. Herhangi bir elektrokimyasal korozyon deneyinden önce açık devre potansiyel testi gereklidir.

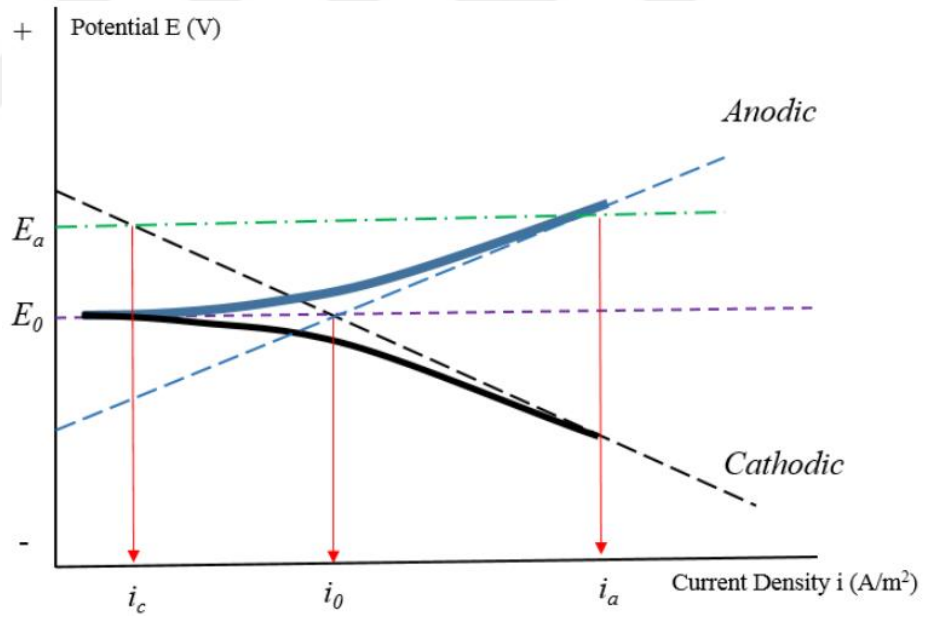


Şekil 3.2: Açık devre potansiyeli (OCP) deneyi.

Polarizasyon deneyi, korozyon hızını hesaplamak için kullanılabilecek korozyon akımı yoğunluğunu belirlemekte kullanılmaktadır. Korozyon reaksiyonunda toplam akım, anodik ve katodik akımın toplamıdır. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, mavi kesikli çizgi bir anodik reaksiyonun mevcut yoğunluğunu temsil eder ve siyah kesikli çizgi, bir katodik reaksiyonun mevcut yoğunluğunu temsil eder. Bu arada mavi yarı eğrisi ve siyah yarı eğrisi toplam akım yoğunluğunu temsil eder. Mavi eğri anodik kısımdır ve siyah eğri katodik kısımdır. Denge durumu olarak tanımlanan E_0 potansiyelinde korozyon meydana geldiğinde, mavi kesikli çizgi siyah kesikli çizgiyi akım yoğunluğunda i_0 değerinde keser. Bu, anodik reaksiyon hızının katodik reaksiyon hızına eşit olduğunu gösterir. Bu nedenle, bir denge durumunda toplam akım yoğunluğu sıfırdır. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, mavi eğri ve siyah eğri mor kesikli çizgide buluştuğunda, toplam akım yoğunluğu sıfırdır. Ancak anodik akım yoğunluğu, anodun korozyon hızını gösterir ve doğrudan E_0 potansiyelinde ölçülemez. Polarizasyon deneyi, E_0 potansiyelinde anodik akım yoğunluğunu elde etmek için bir yöntemdir.

Bir polarizasyon deneyinde, reaksiyonu denge durumundan uzaklaştırmak için elektrot üzerine bir dış potansiyel uygulanır. Test numunesine Şekil 3.3'te E_a olan pozitif bir potansiyel uygulanırsa, reaksiyon mavi eğri olan anodik duruma

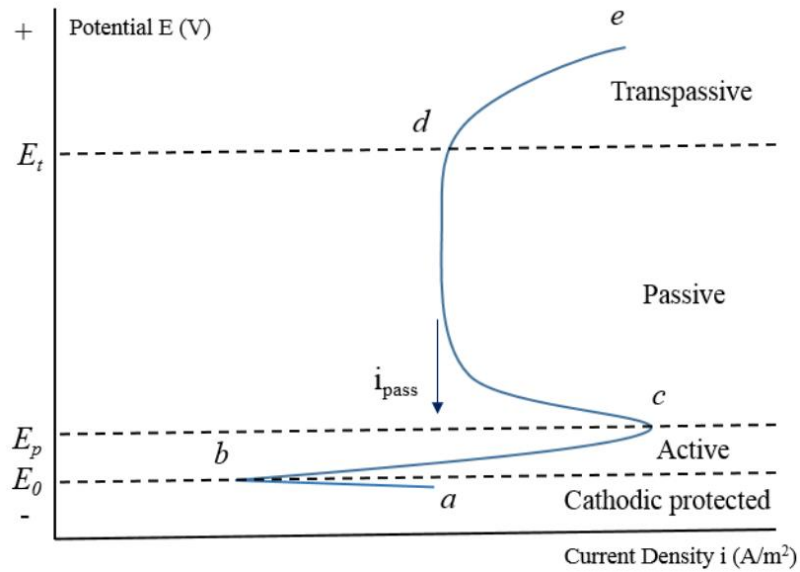
girecektir. E_a 'dan X eksenine paralel olan yeşil bir kesikli çizgi, siyah ve mavi kesikli çizgileri keserek çizilir. Yeşil ve siyah kesikli çizgilerin kesiştiği nokta, katodik akım yoğunluğundaki bir i_c değerini gösterir. Yeşil ve mavi kesikli çizgilerin kesiştiği nokta, anodik akım yoğunluğundaki bir i_a değerini gösterir. E_0 potansiyelindeki akım yoğunluğu ile karşılaştırıldığında, anodik akım yoğunluğu, E_a potansiyelindeki katodik akım yoğunluğundan çok daha yüksektir. Bu, pozitif bir potansiyelin anodik reaksiyonu desteklediğini ve katodik reaksiyonu azalttığını gösterir. Katodik akım yoğunluğu çok sınırlı olduğu için toplam akım yoğunluğu, E_a potansiyelindeki anodik akım yoğunluğu olarak hesaplanabilir. Katodik potansiyel uygulandığında bunun tersi durumlar mevcuttur. Bu nedenle, anodik veya katodik potansiyeldeki toplam akım yoğunluğu, mavi ve siyah eğrilerden oluşabilen bu şekilde elde edilebilir. Mavi ve siyah eğriler elde edildiğinde, mavi ve siyah kesikli çizgilerin kesişme noktası doğrusal bir uydurma ile belirlenebilir. Bu çapraz noktanın X eksenindeki değer, E_0 potansiyelindeki akım yoğunluğudur. Bir polarizasyon eğrisinde lineer uydurmanın yapılmasına Tafel uydurma denir (Jones, D.A., 1996).



Şekil 3.3: Açık devre potansiyeli (OCP) deneyi.

Polarizasyon deneyi ayrıca belirli bir malzemenin korozyon davranışını da belirleyebilir. Tam bir polarizasyon eğrisinin çiziminde, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi, Y eksenini uygulanan potansiyeldir ve X eksenini, test örneğinden yanıtlanan akım yoğunluğudur. Bu grafik, farklı potansiyellere sahip belirli bir malzemenin farklı

korozyon aktivitelerini gösterir. Bir polarizasyon eğrisi genellikle, katodik korumalı bölge, aktif korozyon bölgesi, pasif bölge ve transpasif bölge olmak üzere dört bölge içerir. Şekil 3.4'te a'dan b'ye gösterilen katodik korumalı bölgede, test numunesine bir katodik akım uygulanır. Test numunesi, güç kaynağından elektron kazanacaktır. Bu nedenle test numunesinde bu bölgede korozyon oluşmaz. Pozitif bir potansiyel ($E > E_0$) uygulandığında, test numunesi önce aktif korozyon bölgesine (Şekil 3.4'te b'den c'ye) girer. Aktif korozyon bölgesinde, test numunesi yüksek oranda elektron kaybedecektir. Bu nedenle, uygulanan potansiyel arttıkça test örneğinden yanıtlanan akım yoğunluğu hızla artacaktır. Bu durum test numunesinin yüzeyinin çok aktif olduğunu ve korozyonun yüksek oranda gerçekleştiğini göstermektedir. Pozitif potansiyel arttığında ve Şekil 3.4'te E_p (c noktası) olarak gösterilen kritik bir potansiyele ulaştığında, test örneğinden yanıt veren akım yoğunluğu azalacaktır. Bu kritik potansiyel, pasivasyon potansiyeli olarak tanımlanır. Teorik olarak, Şekil 3.4'te i_{pass} olarak gösterilen, uygulanan potansiyel arttıkça azalan akım yoğunluğu sabit bir değere ulaşacaktır. Bu kararlı akım yoğunluğu, pasivasyon akım yoğunluğu olarak tanımlanır. c ile d arasında değişen potansiyel bölge pasif bölge olarak tanımlanır.



Şekil 3.4: Potansiyodinamik polarizasyon (TAFEL) deneyi.

Grafikteki pasif bölgede, test numunesinin yüzeyinde bir pasivasyon tabakası oluşacaktır. Pasivasyon tabakası ince fakat sıkıdır ve bronz alaşımları yeterli oksijenli bir ortama maruz kaldığında yüzeyde pasivasyon tabakası oluşmaktadır. Pasivasyon tabakası, meydana gelen korozyonu yavaşlatabilen ve iç malzemeye

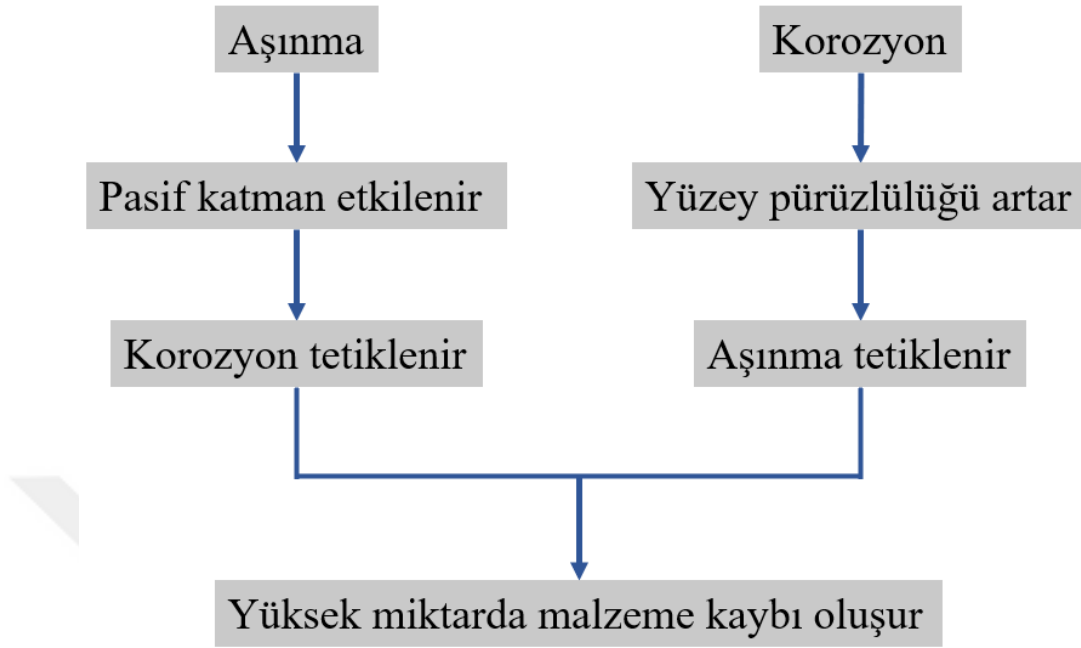
oksijen erişimini önleyen bir bariyer görevi görür. Bir polarizasyon deneyinde, korozyon, uygulanan pozitif potansiyel tarafından tetiklenir. Bu nedenle, pasivasyon potansiyeline ulaşıldığında test numunesinin yüzeyinde bir pasivasyon tabakası oluşacaktır. Pasivasyon tabakası korozyonu yavaşlattığı için test numunesinden alınan akım yoğunluğu azalır. Uygulanan potansiyel, transpasif potansiyel olarak tanımlanan diğer kritik potansiyelin (E_c) üzerine çıktığında, cevap verilen akım yoğunluğu artık düşük seviyede kalmayacaktır. Uygulanan potansiyel arttıkça akım yoğunluğu artacaktır. Şekil 3.4'te d'den e'ye kadar gösterilen bölge transpasif bölge olarak tanımlanmıştır. Transpasif bölgede, pasivasyon katmanı artık kararlı değildir. Uygulanan yüksek potansiyel altında elektrolit ile reaksiyona girecek ve sonunda parçalanacaktır. Pasivasyon tabakasının korumasının olmaması, korozyon tekrar aktif hale gelecektir. Bu nedenle, bir polarizasyon eğrisinde akım yoğunluğu tekrar artacaktır.

3.2 Tribokorozyonun Temel İlkeleri

Literatürde standart korozyon, galvanik korozyon, oyuk korozyonu, çatlak korozyonu, çevresel kaynaklı çatlama, hidrojen hasarı, taneler arası korozyon, ayırma, erozyon ve tribokorozyon gibi en az dokuz korozyon türünde bahsedilmiştir.

Yukarıda listelenen ilk sekiz korozyon türüyle karşılaştırıldığında, tribokorozyon daha az anlaşılır bir konudur. “Tribokorozyon” kelimesi, triboloji ve korozyon olmak üzere iki kısımla birleştirilmiştir. ASTM standardına göre, tribokorozyon, kimyasal korozyon ve mekanik aşınmanın birlikte etkili olduğu bir aşınma türüdür ve ayrı ayrı olduğundan daha önemli bir etkiye yol açmaktadır (ASTM Standard. G119-09, 2016). Bu terim ortaya çıkmadan önce, erozyon-korozyon, aşınma hızlandırılmış korozyon, korozif aşınma ve aşındırıcı korozyon gibi etkileşimli olayları tanımlamak için birçok başka ifade kullanılmıştır. Tribokorozyonun genel oluşum mekanizmaları Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Korozif bir ortamda iki malzeme birbirine sürtüyorsa, mekanik aşınma yüzey özelliğini değiştirecek ve korozyon davranışını etkileyecektir. Bu arada, değişen korozyon aşınma sürecini etkileyecektir. Şekil 3.5 (Kuiy, 2012)'te gösterildiği gibi, aktif-pasif bir malzemede tribokorozyon süreci aşağıdaki gibidir. Mekanik aşınma, yüzeydeki pasivasyon tabakasını etkiler ve korozyonu teşvik eder. Bu arada korozyon, yüzeyi daha pürüzlü hale getirir ve bu da mekanik aşınma için daha ciddi bir durum sağlar. Son olarak, iki yönün etkileşimi büyük miktarda

malzeme kaybına neden olur (Beadling, 2021). Bu karmaşık süreç nedeniyle, tribokorozyon sürecinin ayrıntılı mekanizmaları literatürde halihazırda belirsizdir.



Şekil 3.5: Tribokorozyon süreci.

Bununla birlikte, tribokorozyonun, mekanik sürtünmenin düşük olduğu ve pasivasyon tabakasını tahrip etmeyeceği hafif aşınma koşullarında da meydana geldiğine inanılmaktadır. Hafif aşınma koşullarında tribokorozyonda pasivasyon, pasivasyon tabakasının bozulması ve yeniden pasivasyon tabakası oluşmasını içeren dinamik bir süreç olduğu belirtilmektedir. Pasivasyon tabakasının bozulması ve yeniden pasivasyon tabakasının oluşması arasındaki enerji farkı, pasifleştirme katmanının büyümesini ve özelliğini belirlemektedir.

3.3 Literatürde Tribokorozyon ile İlgili Yapılan Çalışmalar

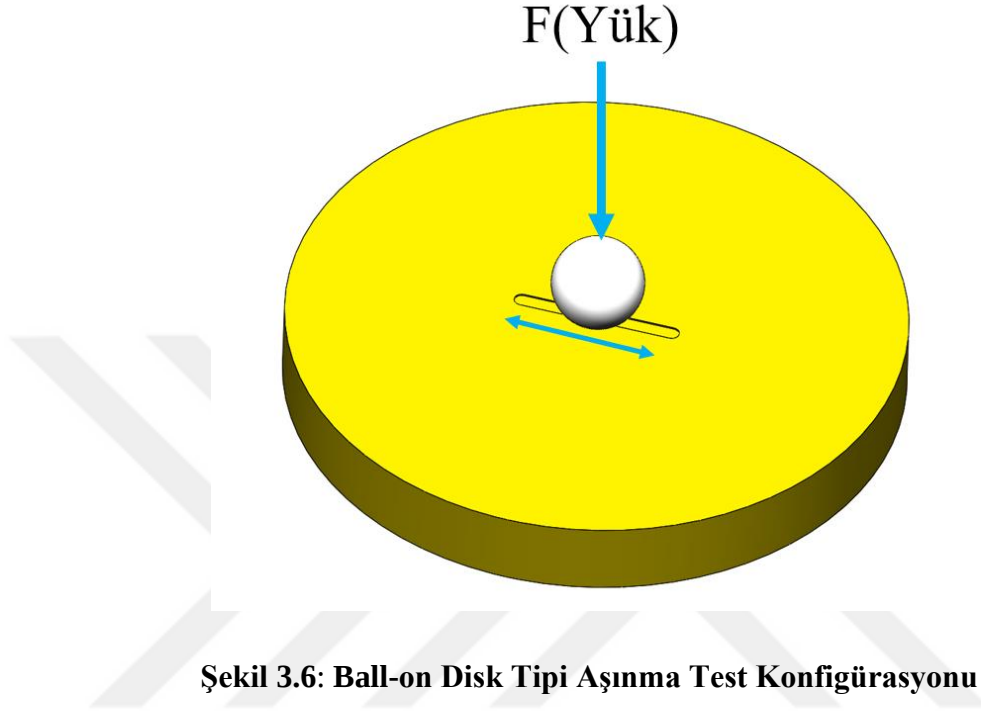
Tribokorozyon ile ilgili araştırmalar, triboloji çalışmalarının başladığı eski zamanlara kadar dayanmaktadır. Hertz ve Reynolds, 20. yüzyılın başında temas mekaniği ve hidrodinamik yağlama için matematiksel formülleri geliştirmişlerdir (Archard, 1953). Yağlama ve tribolojik bileşenlerin tasarımını geliştirmek için, 1960'ların başında İngiliz hükümet komitesi tarafından mekanik, malzeme, kimya ve fizik entegrasyonu önerilmesi sonucunda, tribokorozyon ile ilgili yeni araştırmalara başlamak için farklı alanlardan bilim adamları ve mühendisler bir araya gelmişlerdir. 1970'lerin

sonlarından bu yana, elektrokimyasal ve mekanik aşınmanın ilişkisi hakkında birkaç farklı mekanizma rapor edilmiştir. Tribokimyasal aşınma, oksidasyon aşınması, koroziyon aşınma ve aşınma-korozyon gibi tribokorozyon ile ilgili kelimeler 1970'lerden 1990'ların başlarına kadar literatürde kullanılmıştır. 1990'lardan beri üzerinde çalışılan sürtünme ile aşınma testi yapan tribolojik sistemlere “tribokorozyon” kelimesi eklenmiştir (Peter, 2013).

Son 20 yılda tribokorozyon alanında yapılan çalışmalarda olağanüstü bir artış yaşanmıştır. 2000 yılında mühendisleri ve bilim adamlarını ortak çalışmalar yapmalarını sağlamak için Strathclyde Üniversitesi'nde Dr. Margaret Stack tarafından yönetilen bir tribokorozyon araştırma ağı kurulmuştur. Tribokorozyon araştırmaları esas olarak Avrupa, Kuzey Amerika ve Asya'da yürütülmektedir. Farklı bölgelerdeki araştırma grupları, tribokorozyonun farklı yönlerine ve uygulamalarına odaklanmaktadır. Örneğin, Dr. Mischler ve diğerleri (EPFL, İsviçre), tribokorozyondaki mekanik ve elektrokimyasal bozulma mekanizmasını incelemektedir. Profesör Doktor. Johnsen ve diğerleri (NTNU, Norveç), statik ve döngüsel yükler altında çoklu bozunma mekanizmalarına ve tribokorozyonun modellenmesine odaklanmaktadır (Mischler, 2008). Prof.Dr. Dearnley ve diğerleri (University of Southampton, Birleşik Krallık) deniz ve açık deniz uygulamaları için erozyon-korozyon etkileşimini incelemektedir. (Wood, 2006). Dr. Liang ve diğerleri (Texas A&M Üniversitesi, ABD), kimyasal mekanik düzlemselleştirme (CMP) yöntemini ve CMP sonrası temizleme sürecini incelemektedir (Gao ve Liang, 2012).

Farklı amaçlara göre, tribokorozyon deneylerinde birçok malzeme ve elektrolit kombinasyonu seçilmiştir. Deney uygulamaları temel çalışmayı, kimyasal uygulamayı, kaplama seçimini ve diğerlerini içermektedir. Örneğin, temel bir çalışma için J.O.Bello tarafından aşınma ve korozyonun sinerjik etkilerini incelemek üzere UNS S30403, S31603 ve S32760 paslanmaz çelikler seçilmiştir (J.O.Bello,2007). Yu Yan (Yu YAN 2006) tarafından biyomedikal implantlar için tribokorozyon davranışını incelemek için yüksek karbonlu ve düşük karbonlu Co-Cr-Mo alaşımları kullanmıştır. Plazma nitrür Ti-6Al-4V alaşımı, yüzey işleme çalışması için nötr NaCl çözeltisinde araştırılmıştır (Galliano, 2001). Ni-SiC nanoyapılı kompozitin birleşik korozyon-aşınma bozunması, Benea ve diğerleri (2009) tarafından kaplama malzemesi seçimi için incelenmiştir.

Daha önceki çalışmalarda, deney geometrik modeline Şekil 3.6'da gösterildiği gibi bilyeli disk konfigürasyonu hakimdir. Test numuneleri bir bilye ile sürtülerek aşınma yaptırılmıştır. Tribokorozyon deneyleri sırasında potansiyel, akım ve korozyon direnci ölçülmüştür.



Şekil 3.6: Ball-on Disk Tipi Aşınma Test Konfigürasyonu

Örneğin, Takadoun tarafından (1996) bir tribokorozyon deneyi yapılmıştır. Bu deneyde, sülfürik asit içinde dikey olarak monte edilmiş bir alümina bilyalı pime bir demir plaka ileri geri hareketle sürtülmüştür. Sonuçlar, belirgin aşınma izlerinin ve alt tabakanın deformasyonunun meydana geldiğini göstermiştir. Gözlenen kristalografik aşındırma alanı, pasivasyon tabakasının tahrip olduğunu ve o bölgedeki aktif korozyonu göstermektedir.

Sinerjik yaklaşım, mekanik yaklaşım, üçüncü cisim yaklaşımı ve nanokimyasal aşınma yaklaşımı dahil olmak üzere dört ana veri analizi yaklaşımı oluşturulmuştur. Sinerjik yaklaşım, tribokorozyon deneyinin verilerini analiz etmek için en iyi kurulmuş ve en yaygın olarak kabul edilen yöntemdir. ASTM G119 standardı bu teorik yaklaşım üzerine kurulmuştur.

Aktif-pasif bir malzemede kayan bir sistem için aşınma ve korozyon arasındaki etkileşimi değerlendirmek için sinerjik yaklaşım kullanılır. Sinerjik yaklaşım ilk olarak 1980'lerin ortaları ile 1990'ların başları arasında ABD Maden Bürosu'ndaki bir

grup tarafından denenmiştir. Denklemler ve parametreler aşağıda listelenmiştir (ASTM G119-09, 2016).

$$T = W_0 + C_0 + S \quad (2.1)$$

$$S = \Delta C_w + \Delta W_0 \quad (2.2)$$

$$\text{Toplam sinerji faktörü} = T/T - S \quad (2.3)$$

$$\text{Korozyon arttırma faktörü} = (C_0 + \Delta C_w)/C_0 \quad (2.4)$$

$$\text{Aşınma arttırma faktörü} = (W_0 + \Delta W_w)/W_0 \quad (2.5)$$

“T” toplam tribokorozyon oranıdır; “ W_0 ”, saf mekanik aşınma oranıdır; “ C_0 ” saf kimyasal korozyon hızıdır; S sinerjik faktördür, “ ΔC_w ”, aşınma ile hızlandırılmış korozyondur; “ ΔW_w ” korozyonla hızlandırılmış aşınmadır. Bu yaklaşımın prosedürleri aşağıdaki gibidir:

1. Kütle kaybı yöntemiyle yapılan tribokorozyon testinde T ölçülür.
2. Bir korozyon testinde Faraday Yasası ile C_0 'ı belirlenir.
3. Kütle kaybı yöntemiyle, katodik koruma altında yapılan aşınma testi ile W_0 'ı ölçülür.
4. Bir korozyon testinde Faraday Yasası ile C_w 'yi belirlenir.
5. ΔC_w 'yi C_w 'den C_0 'ı çıkararak hesaplanır.
6. Diğer parametreleri yukarıdaki denklemlerle belirlenir.

3.4 Mevcut Araştırmalar ve Standartlardaki Sınırlamalar

Birçok değerli kazanım elde edilmiş olmasına rağmen, önceki araştırmalarda ve standartlarda hala birçok sınırlama mevcuttur. Sınırlamalar temel olarak deney yaklaşımı, deney teknolojisi ve ekipmanı ve veri analizi yaklaşımı dahil olmak üzere üç açıdan mevcuttur.

3.4.1 Önceki Deney Yaklaşımlarındaki Sınırlamalar

Bölüm 3.2'te bahsedildiği gibi, tribokorozyon çalışmasına bilyeli disk modeli

hakimdir. Bu deney yaklaşımının iki ana sınırlaması vardır: agresif aşınma durumu ve galvanik reaksiyonun etkisi.

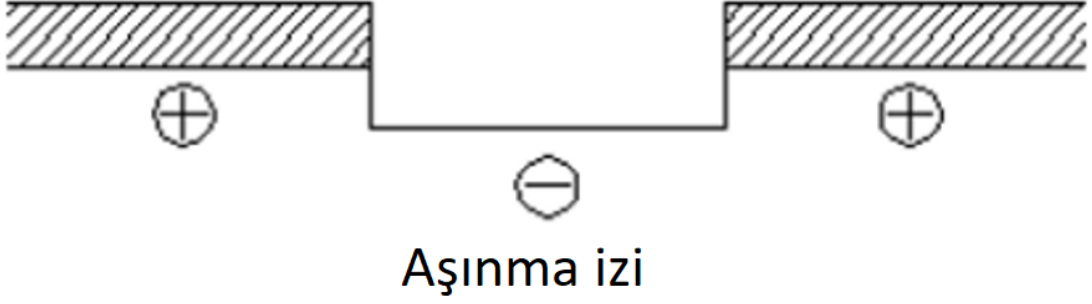
3.4.1.1 Agresif Aşınma Durumu

Disk üzerinde bilye konfigürasyonunda, sınırlı temas yüzeyi alanına yüksek yükler uygulanır. Yüzey ve yüzey altı malzemesinde deformasyona neden olacak yüksek temas basıncına her zaman ulaşılır. Örneğin 1 cm çapında küçük bir bilyalı pim, 10N yük altında 768 MPa'ya kadar temas basıncı sağlayabilir. Yük 20N'ye yükseltirse, temas basıncı 967 MPa'ya ulaşabilir (Espallargas ve diğ., 2013). Bu kadar yüksek temas basıncı, test numunesinin akma mukavemetini aştığında, plastik deformasyon gerçekleşecektir. Aktif-pasif malzemeler için pasivasyon tabakası bu tür agresif aşınma koşulları altında kalamaz. Bununla birlikte, tribokorozyonun, piston çubuğunun ara yüzü ve sızdırmazlık parçaları gibi hafif aşınma koşullarında da meydana geldiğine inanılmaktadır. Aktif-pasif malzemelerde korozyon üzerindeki aşınma etkisi, disk üzerinde top yaklaşımı kullanılarak incelenemez.

3.4.1.2 Galvanik Reaksiyonun Etkisi

Disk üzerinde bilye konfigürasyonunun kullanıldığı deneylerde, ciddi aşınma izleri rapor edilmiştir (Stojadinovic, 2011). Şekil 3.7'de gösterildiği gibi, aktif-pasif bir malzeme aşındırıcı ortama yeterli oksijenle maruz kaldığında yüzeyde bir pasivasyon tabakası oluşacaktır. Tribokorozyon işleminde bu pasivasyon tabakası kaldırılacak ve yenilenmesi zor olacaktır. Hem aşınma hem de korozyon altında aşınma izi oluştuğunda, çıplak malzeme korozif ortama maruz kalacaktır. Şekil 3.7'de gösterildiği gibi, aşınma izindeki malzemenin potansiyeli negatiftir, bu da malzemenin aktif olduğunu gösterir. Bu arada malzemenin potansiyeli pasivasyon bölgesi pozitifdir, bu da malzemelerin asıl olduğu anlamına gelir. Bu potansiyel fark nedeniyle, aşınma izi ile pasivasyon bölgesi arasında bir galvanik hücre oluşacaktır. Aşınma izindeki malzeme anottur ve pasivasyon bölgesindeki malzeme katottur. Galvanik reaksiyonun korozyon üzerinde büyük etkisi vardır. Hızlanan korozyon, aşınma izindeki malzemede meydana gelecek ve bu bölgede daha şiddetli tribokorozyona neden olabilecektir. Bazı araştırma grupları, tribokorozyonda galvanik bağlantı etkisini de incelemiştir (Espallargas ve diğ., 2013).

Pasif Katman



Şekil 3.7: Galvanik Etkinin Gösterimi.

3.4.2 Mevcut Teknoloji ve Ekipmanlardaki Sınırlamalar

Mevcut teknoloji ve ekipmandaki sınırlamalar temel olarak üç açıdandır.

3.4.2.1 Deneysel Yaklaşımda Sınırlama

Birçok farklı deney yapılmasına rağmen, hiçbir deney yaklaşımı, tribokorozyon işleminde ara yüzdeki deformasyonu izlemek için uygun bir yöntem sağlamaz. Yerinde korozyon deneyi, elektrokimyasal yaklaşım kullanılarak gerçekleştirilebilir. Yerinde aşınma deneyi, yüzey pürüzlülüğünün kaydedilmesiyle gerçekleştirilebilir. Bilim adamları tribokorozyon sürecinde yüzey morfolojisini kontrol etmek istiyorlarsa, tek yöntem deneylerden önce ve sonraki yüzey topoğrafyasını karşılaştırmaktır. Tribokorozyon sürecinde bir yüzey kusurunun büyümesini izleyebilen mevcut teknolojiler ile anlık takip ederek bir deney yürütmenin bir yolu yoktur.

3.4.2.2 Reaksiyonunun Anlaşılmasında Sınırlama

Tribokorozyon sürecindeki gerçek ara yüz reaksiyonu hala belirsizdir. Farklı pH ve potansiyel kombinasyonlarında saf bir metalin reaksiyonu, Pourbaix Diyagramlarında izlenebilir. Diğer birçok parametre, sıcaklık, basınç ve benzeri gibi kimyasal reaksiyonları etkiler. Bu nedenle, bir mühendislik malzemesinde ara yüzeydeki gerçek kimyasal reaksiyonu belirlemek çok karmaşıktır. Tribokorozyon meydana geldiğinde aşınma ve korozyon birbirini etkiler. Gerçek ara yüzey reaksiyonu hakkında bilgi eksikliğinden dolayı tribokorozyonun detaylı mekanizmalarına ulaşamaz.

3.4.2.3 Mevcut Standartlarda Sınırlama

Bölüm 3.2'de bahsedildiği gibi, ASTM G119, “Aşınma ve Korozyon Arasındaki Sinerjinin Belirlenmesi için Standart Kılavuz”, aktif-pasif bir malzemede tribokorozyon davranışını değerlendirmek için temel olarak kabul edilen standarttır. Bu kılavuz, artan malzeme kayıp oranını hesaplamak ve sinerjik olarak aşınma ve korozyon ilişkisini sağlamak içindir. Bu yaklaşım sadece sıvı ve bulamaçta tribokorozyon deneyinde uygulanabilir. Gaz veya katı ortamda kullanılamaz. Metalik tribokorozyon deneyleri için bu standart, oksidasyon tabakası gibi korozyon ürünlerinin tribokorozyon sonrası yüzeyde kalacağı sistemlerde kullanılamaz. Tartışıldığı gibi, pasivasyon katmanı tribokorozyon işleminde oluşursa, ASTM G119 artık kullanışlı değildir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

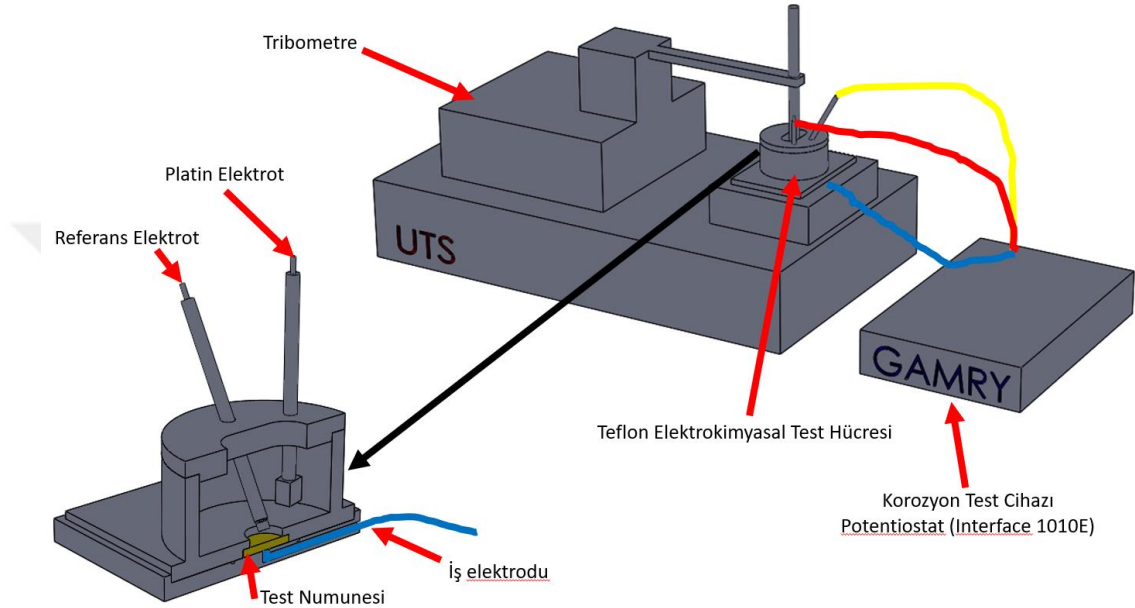
4.1. Numune Hazırlanması

Numuneler 5 mm kalınlığında döküm plakalardan 40 mm çapında disk numuneler kesilerek hazırlanmıştır. Disklerin yüzeyleri, $R_a = 0,4\text{--}0,45\ \mu\text{m}$ yüzey pürüzlülüğü elde edilinceye kadar sırasıyla 120-180-240-400-600-800-1000 grit kumlu zımparalarla kaba olarak taşlanmış daha sonra 1 mikronluk elmas solüsyon ile çuha kullanarak parlatılmıştır. Tribokorozyon testlerinden önce disk numuneleri ultrasonik banyoda izo-propil alkol ve aseton karışımında 5 dakika süreyle temizlenmiştir. Numunelerin mikro yapı analizi Zeiss Ultra Plus Taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak ölçülmüştür. Sertlik ve elastik modülü nanoindenter (Aligent G200) kullanılarak belirlenmiştir. Kaplamaların ortalama pürüzlülüğü (R_a) ve ortalama pürüzlülük karekökü (R_q), atomik kuvvet mikroskobu (AFM; Nanosurf Flex AFM-5) topografi analizi ile ölçülmüştür. Numunelerin fazları, X-ışını kırınımı (XRD), SEM/enerji dağılımlı spektroskopi (EDX; 123 eV çözünürlüklü Bruker XFlash 5010 EDX dedektörü) ile analiz edilmiştir.

4.2. Tribokorozyon Test ve Koşulları

Tribokorozyon çalışması iki farklı test koşulu altında gerçekleştirilmiştir. Birinci test koşulunda karşı gövdeye tribolojik temasın olmadığı sadece korozyon testleri yapılmıştır. İkinci test koşulunda ise bir alümina bilyenin tribometre cihazı ile numune yüzeyini mekanik olarak aşındırması esnasında korozyon testleri (tribokorozyon) yapılmıştır. Tribometre testleri, lineer ileri geri hareket modüllü UTS 10/20 disk üstünde bilye ile yapılmıştır. 6 mm çapında ve 159 nm quadratik yüzey pürüzlülüğüne sahip alümina (Al_2O_3) bilye [S_q atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile ölçüldü], S_q değerleri 8,274 nm, ve 7,6 nm olan NAB ve MAB numunelerine karşı elektrokimyasal inert bir hücre içerisinde test edilmiştir. (Şekil 4.1). Tipik olarak, karşı gövde NAB ve MAB alaşımlarından daha serttir ve karşı gövdeden gelen

elektrokimyasal tepki, NAB ve MAB alaşımlarından elde edilen elektrokimyasal verilerin analizini değiştirmeyecek şekilde inert alümina seçilmiştir. 10 N'luk ve 15 N'luk yük, karşı gövdeye bir manivela mekanizması aracılığıyla uygulanmıştır. Yük miktarının seçimi malzemenin, karşı gövdenin olası yanlış hizalanmasına veya yüzey pürüzlülüğüne uyması beklendiğinden, yükün plastik deformasyona neden olacak kadar yüksek olacağı değere göre seçilmiştir (Copper Development Association Inc., 2021).



Şekil 4.3: Tribokorozyon test düzeneği.

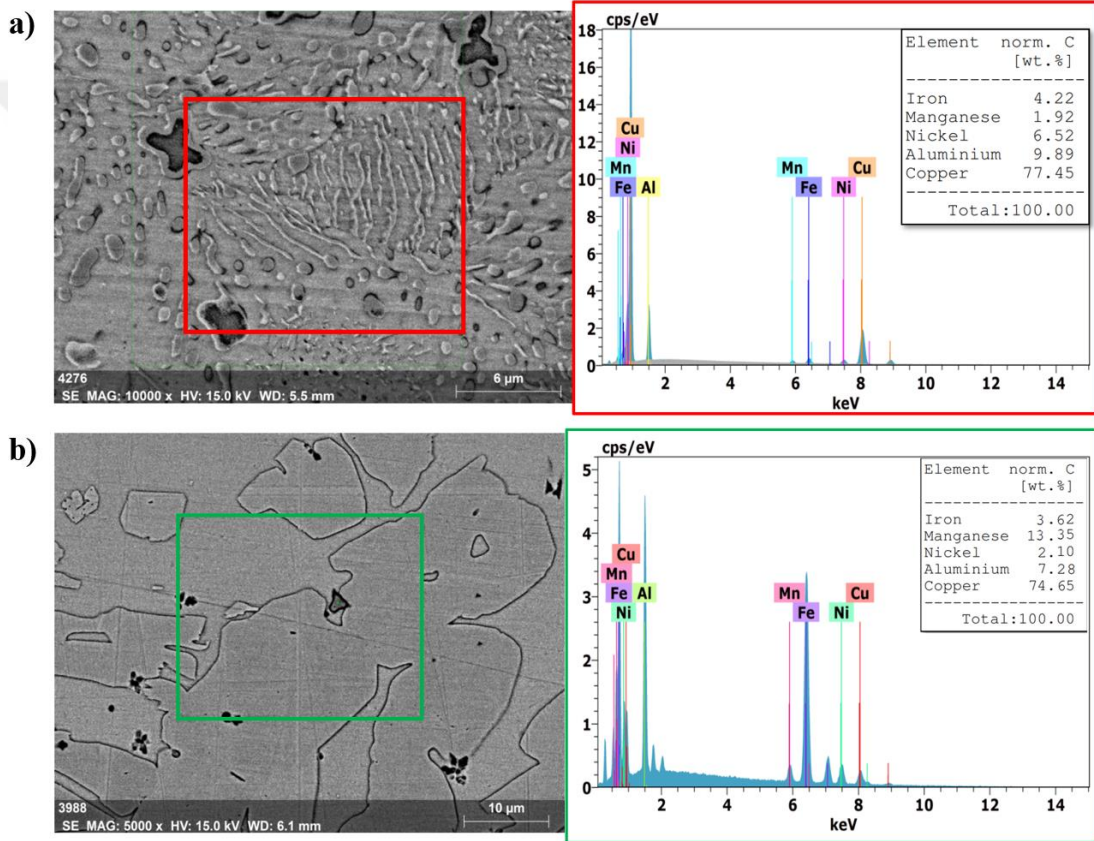
Tribometre kolunun lineer hareket frekansı 2 Hz. olarak bilgisayar tarafından kontrol edilerek 20 mm/s kayma hızına ayarlanmıştır. Tribokorozyon testlerinde aşınma iz uzunluğu 5 mm ve toplam kayma mesafesi 72 m olacak şekilde sistem ayarlanmıştır. Deneyler için disk numuneleri elektrokimyasal hücrenin altına monte edilmiş ve ölçümlerde iş elektrotu (WE) olarak kullanılmıştır. Numunelerin sadece ön yüzeyinin ($2,54 \text{ cm}^2$) elektrolite maruz kalmasını sağlayan hücre ve numune tutucu polimerden yapılmıştır. Ölçümlerdeki referans elektrot (RE), doymuş AgCl (25°C 'de 0.197 V'ye karşı SHE) ile doldurulmuş ve karşı gövdeden 5 mm uzaklıkta konumlandırılmış bir Ag/AgCl'dir. Tez çalışmasında sunulan tüm potansiyeller, doymuş Ag/AgCl elektrotuna karşı verilmiştir. Elektrokimyasal hücrenin içine yerleştirilen platin levhalı polimer çubuk karşı elektrot (CE) olarak kullanılmıştır. Testler sırasında temas, elektrokimyasal hücrede bulunan ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisi (pH 8,2)

içinde gerçekleşmiştir. Çözelti, saf su ve analitik dereceli NaCl kullanılarak hazırlanmıştır. Her test için 100 ml taze elektrolit kullanılmıştır. Her deney üç kez tekrarlanmıştır. Stabilizasyonu sağlamak için 1200 s boyunca açık devre potansiyeli (OCP) ölçümleri yapılmış, ardından 0,5 mV/s tarama hızında -600 mV OCP katodik değerinden 800 mV OCP'ye kadar potansiyodinamik ölçümler yapılmıştır. Potansiyodinamik ölçümlerden elde edilen sonuçlara dayanarak, potansiyostatik testler için -350 mV (Ag/AgCl ye göre) seçilmiştir. Bu çalışmada sıvı içerisindeki numuneler mekanik yük altında sürtünmeli ve sürtünmesiz olarak test edilmiştir. Ayrıca bu deneysel yaklaşım Chen ve diğerleri (2015) tarafından kullanılmıştır. İki saat (7200 s) boyunca potansiyostatik testler yapılmıştır. Elektrokimyasal ölçümler, bir Gamry Interface 1010E potansiyostat/galvanostat/sıfır dirençli ampermetre ve bir Gamry Framework yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Tüm ölçümler, taze numuneler kullanılarak ve 22 ± 1 °C kontrollü sıcaklıkta ve $\%50 \pm 5$ nemde ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Tribokorozyon deneylerinde, testler sırasında BoD Tribometre cihazı ile sürtünme katsayısı ölçülmüş ve bilgisayar tarafından kaydedilmiştir. Potansiyostatik testlerden alınan numuneler kapsamlı bir karakterizasyona tabi tutulmuştur. Aşınma izi morfolojisi ve içindeki olası korozyon ürünlerinin bileşimi FE-SEM ve EDS kullanılarak araştırılmıştır. Uygulanan yük olmadan gerçekleştirilen testlerden alınan numuneler için de ilgili incelemeler yapılmıştır. Aşınma izinde bulunan fazlar, SEM mikroskobu kullanılarak belirlenmiştir. Uyarma lazer dalga boyu 532 nm olarak ayarlanmıştır. Mekanik yük olmadan maruz kalan numunelerde bulunan fazlar, XRD analizleri ile belirlenmiştir. Aşınma izi profilleri, Optik profilometre kullanılarak belirlenmiştir. Bunlara dayanarak, aşınma izinin kesit alanı çevresel uzunluğu ile çarpılarak aşınma izi hacimleri hesaplanmıştır. Aşınma kaybı verileri, her iki paralel deney için ayrı ayrı sunulmuştur.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Mikro Yapı Karakterizasyon Sonuçları

Bu çalışmada test malzemeleri, Nikel Alüminyum Bronz ve Manganer Alüminyum Bronz alaşımlarıdır. Şekil 5.1’de yapılan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM-EDX) ile belirlenen alaşımların tam bileşimi Tablo 5.1’de verilmiştir.

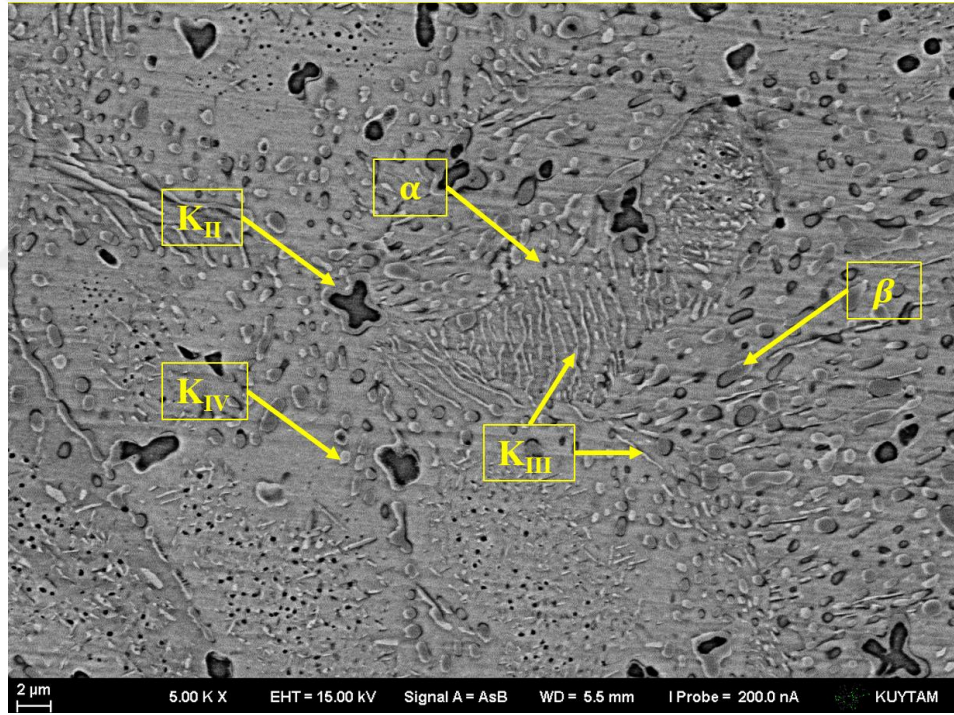


Şekil 5.1: a) NAB ve b) MAB numunelerin SEM-EDX analizleri.

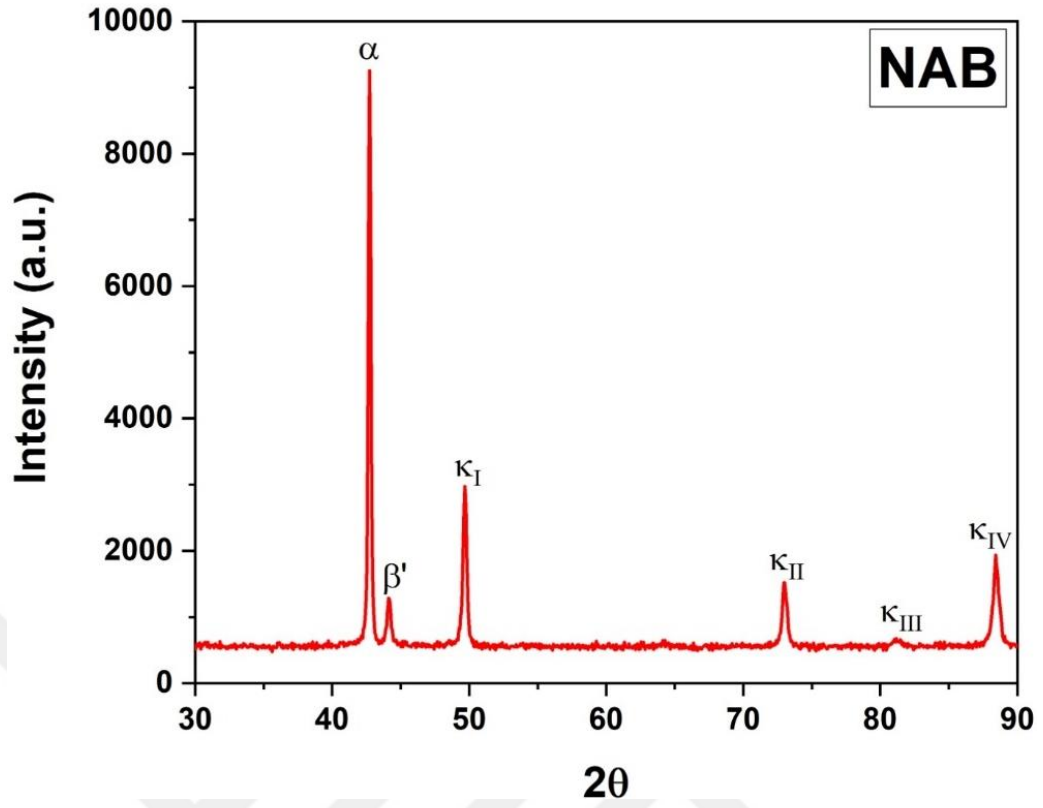
Tablo 5.1: NAB ve MAB alaşımlarının ağırlıkça % kimyasal bileşimi.

Elementler	Ağırlıkça %				
	Al	Fe	Ni	Mn	Cu
NAB	9,89	4,22	6,52	1,92	77,45
MAB	7,28	3,62	2,10	12,35	74,65

Farklı fazlar tanımlanarak NAB alaşımı mikro yapısının SEM görüntüsü Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Özellikle, NAB'nin mikro yapısı α fazı, β' fazı ve dağılımı ve morfolojisi ile ayırt edilebilen üç çeşit intermetalik κ -fazından (κ_{II} , κ_{III} , κ_{IV}) oluşur. Demir içeriğinin ağırlıkça %5'ten az olduğu göz önüne alındığında, bu deneyde kullanılan NAB'de κ_I fazı gözlenmemiştir. α fazı, bakır açısından zengin, yüz merkezli kübik bir katıdır. β' fazı, martensitik bir yapıya sahip katmanlı bir ötektoiddir. κ_{II} fazı dendritik (kelebek benzeri) bir morfoloji olarak görünür. α ve β sınırlarında oluşan κ_{III} çökeltileri katmanlı ötektoid bozunma ürünleridir. Matriks içine gömülü olan κ_{IV} fazı, çoğunlukla ince parçacıklar şeklinde görünür. κ_{II} ve κ_{IV} fazları Fe_3Al 'e dayalı demir açısından zengin çökeltilerdir, κ_{III} ise $NiAl$ 'ın bir formu olan nikel açısından zengin bir fazdır. (Ocejo ve diğ., 2022)



Şekil 5.2: NAB alaşımının mikro yapısı ve fazlarını içeren SEM görüntüsü.

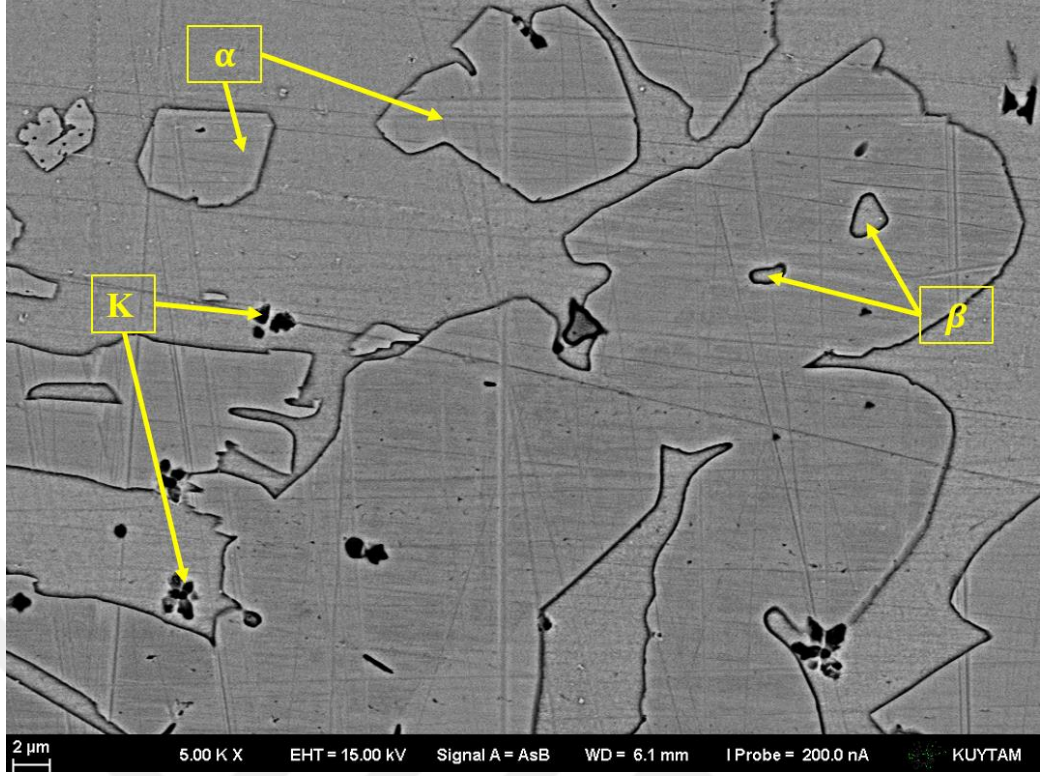


Şekil 5.3: NAB alaşımlarının XRD analizi grafiği.

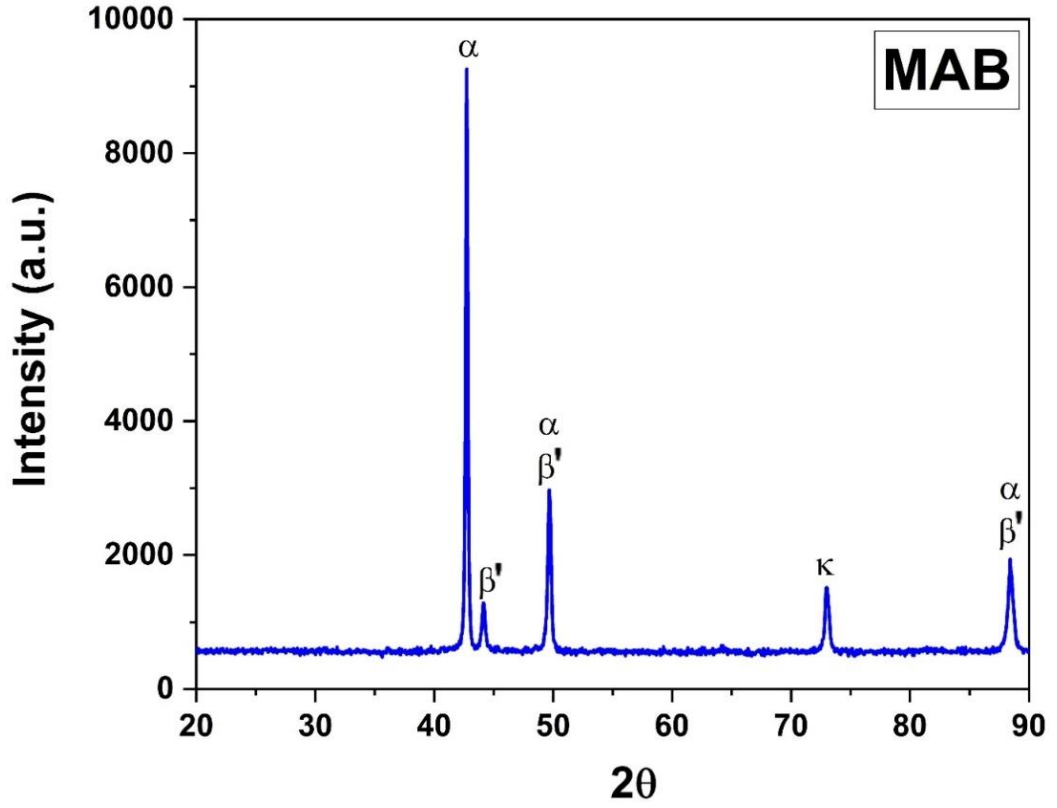
Tablo 5.2: NAB alaşımlı numunelerin tane boyutları.

FAZLAR	TEPE KÖNÜMU	FWHM	TANE BOYUTU (L)	ORTALAMA TANE BOYUTU
α fazı	42,57	0,510	16,72	19,33
β' fazı	44,17	0,375	22,86	
κ_I	45,77	0,475	18,44	
κ_{II}	72,87	0,500	19,75	
κ_{III}	80,97	0,525	19,90	
κ_{IV}	88,32	0,575	19,26	

Fazları tanımlanarak MAB alaşımı mikro yapısının SEM görüntüsü Şekil 5.4'te gösterilmektedir. Özellikle, MAB'nin mikro yapısı heterojendir ve α fazı ve β' fazı içerisinde çözünmüş κ -fazından oluşmaktadır. (Tang ve diğ., 2004)



Şekil 5.4: MAB alaşımasının mikro yapısı ve fazlarını içeren SEM görüntüsü.



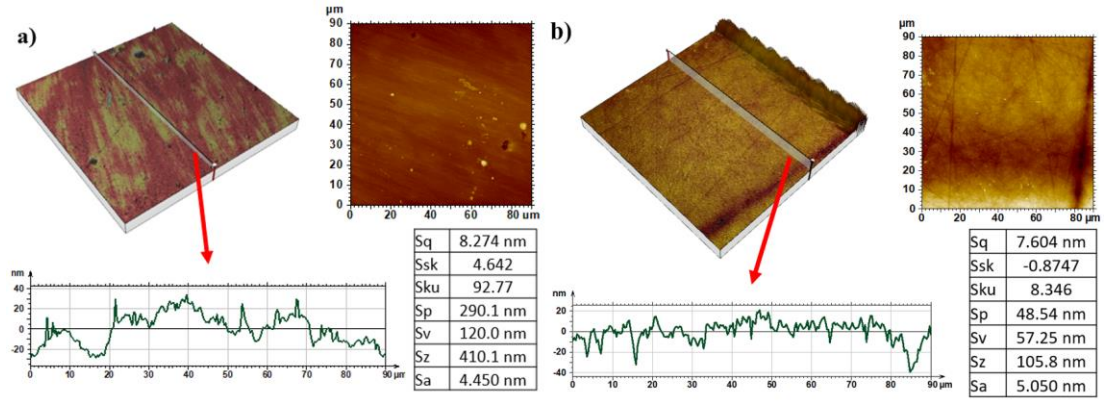
Şekil 5.5: MAB alaşımasının XRD analizi grafiği.

Tablo 5.3: MAB alaşımlı numunelerin tane boyutları.

FAZLAR	TEPE KONUSU	FWHM	TANE BOYUTU (L)	ORTALAMA TANE BOYUTU
α fazı	42,62	0,625	13,64	15,97
	49,77	0,450	19,46	
	88,57	0,750	14,80	
β' fazı	44,02	0,400	21,42	18,56
	49,77	0,450	19,46	
	88,57	0,750	14,80	
κ	73,07	0,490	20,18	23,17

Yüzeylerin parlatma sonrasında elde edilen topoğrafyası atomik kuvvet mikroskopları ile analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.6'da gösterilmiştir. AFM analizlerinde statik mod ile yapılan ölçümlerde elde edilen üç boyutlu ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Ayrıca testler öncesinde her iki numune grubunun sertlik ve elastisite modülleri nanoindentasyon analizleri ile NAB ve MAB numuneler için sırasıyla 1.79/107.6 GPa ve 2.53/142.1 GPa olarak tespit edilmiştir. Tablo 5.2 ve 3 numunelerin XRD analizlerinden elde edilen sonuçlara göre fazların Sherrer yöntemine (denklem 5.1) göre tanecik boyutlarının hesaplama sonuçlarını göstermektedir. Buna göre NAB numunelerinin K fazlarının ortalama tane boyutu 19 nm olarak bulunurken, MAB numunesinde bu fazın tane boyutu 23 nm civarında olduğu görülmüştür. Alfa fazlarının ise NAB ve MAB numunelerinde tane boyutlarının 16.7 ve 15.9 nm ile birbirlerine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Beta fazının MAB numunede tane boyutu 18.5 nm, NAB numunede ise 22.8 nm olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak K ve beta fazlarının MAB numunesinde büyük olması sertlik artışının sebebi olarak tespit edilmiştir. Tanecik boyutu küçüldükçe alaşımın dayanımı artmaktadır.

$$L = \frac{K \times \lambda}{\beta * \cos\theta} \quad (5.1)$$



Şekil 5.6: Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile ölçülen a) NAB ve b) MAB numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri ve yüzey topoğrafyası.

5.2. Tribokorozyon testleri: yüzey işlemleri ve morfoloji

Temas basıncı Hertz kontak basınç formülü ile denklem 5.1 'e göre hesaplanmıştır (ASTM, 2016). Denklem 4.3 ile hesaplanan temas yarıçapları ve temas basınçları Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

$$P_{max} = \frac{3 \times W}{2 \times \pi \times a^2} \quad (5.2)$$

$$a = \left(\frac{3 \times W \times R'}{E'} \right)^{1/3} \quad (5.3)$$

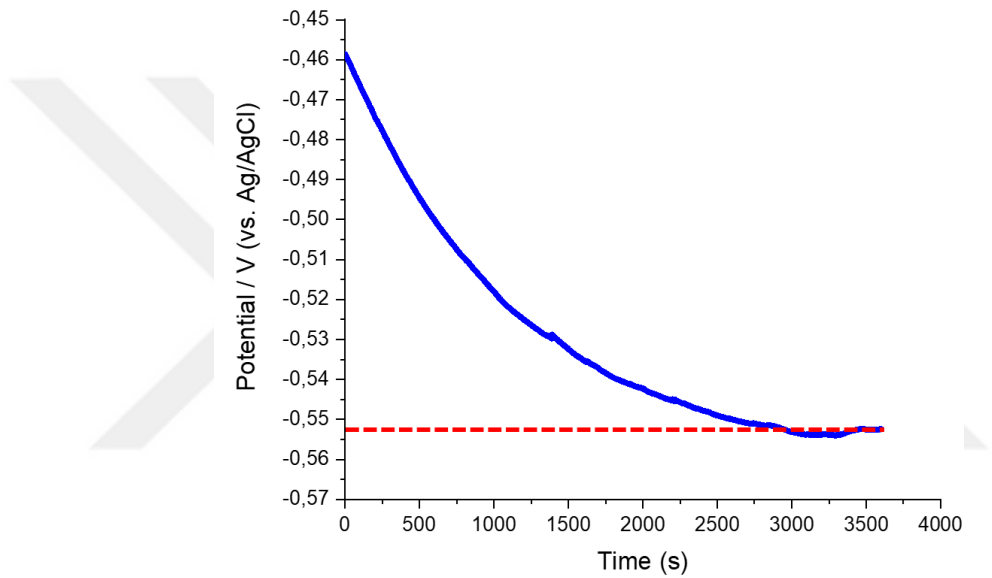
$$z = 0,638 \times a \quad (5.4)$$

Tablo 5.4: NAB ve MAB numunelerin temas yarı çapları ve temas basınçları.

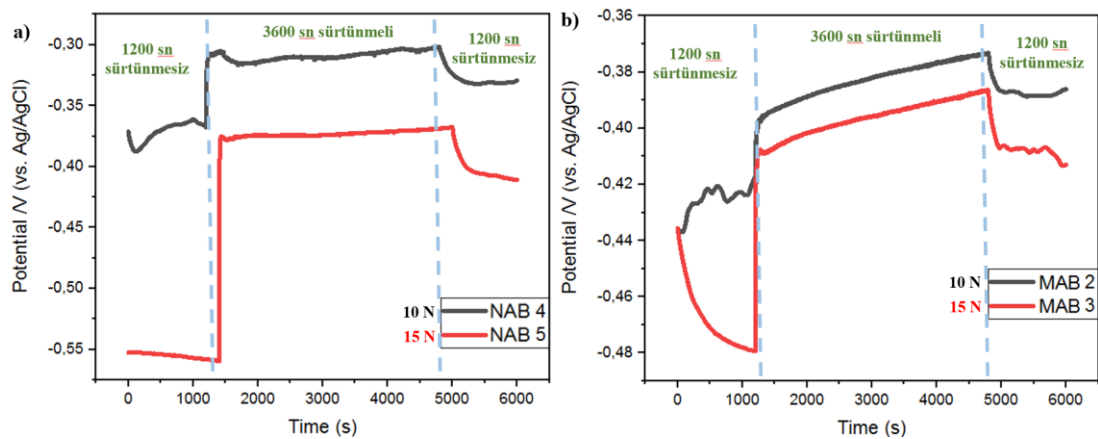
	NAB		MAB	
	10 N	15 N	10 N	15 N
P_{max} (MPa)	1048	1200	1199	1373
z (m)	$4,30 \times 10^{-5}$	$4,92 \times 10^{-5}$	$4,02 \times 10^{-5}$	$4,60 \times 10^{-5}$

Açık devre potansiyeli (OCP) test sonuçları, Şekil 5.7’de, NAB alaşımın potansiyel değerlerinin Ag/AgCl’ye karşı -550 ila -555 mV aralığında stabilize olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, genel OCP oluşumu paralel eğilimler göstererek testin ilk 30-40 dakikalık bölümünde ani bir düşüş görülürken, gerilim -450 mV seviyesinin altına indikten sonra yavaş bir düşüş görülmüştür. Deniz suyuna veya klorür çözeltisine daldırıldıktan sonra havayla oluşan oksit filmin bozulmasının ve ardından bir korozyon ürünü tabakasının gelişmesinin bir sonucu olarak farklı bakır alaşımları

(Zohdy, 2014 ve Badawy, 2014) için benzer davranışlarla ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu gözlemlere göre, deniz suyuna veya genel olarak klorür içeren çözeltilere maruz kalma sırasında alaşımın yüzeylerinde gelişen korozyon ürünleri, alaşımın genel davranışında önemli bir rol oynamaktadır. Korozyon ürünü (patina) oluşumunun arkasındaki neden mevcut koşullar altında Gibbs serbest enerjisinin minimizasyonu eğilimidir (Puigdomenech, 2000) ve NAB ve MAB alaşımlarının özellikle deniz suyu ortamında patina tabakaları oluşturduğu bilinmektedir (Zohdy, 2014). Korozyon ürünlerinin alaşımın yüzey özelliklerini etkilediğinden, alaşımın tribolojik davranışını da etkilemektedir.

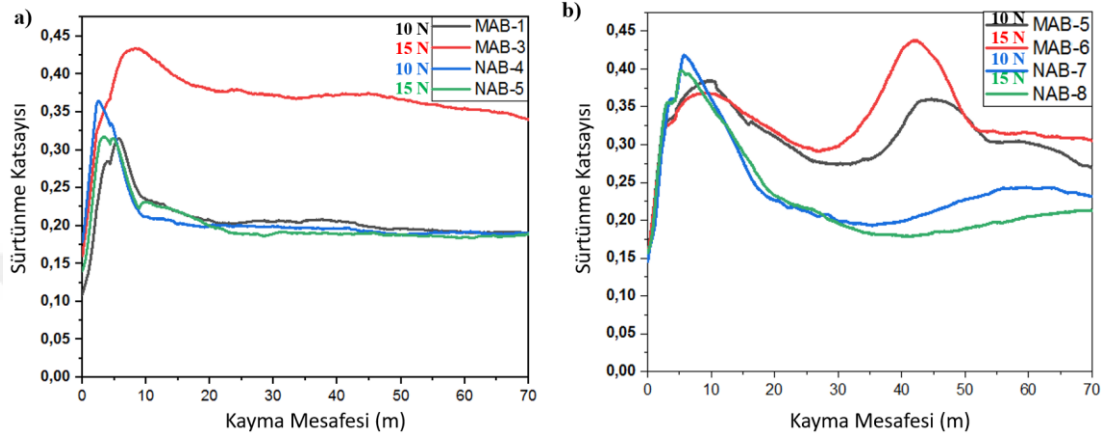


Şekil 5.7: NAB açık devre potansiyeli (OCP) testi sonucu.



Şekil 5.8: a) NAB, b) MAB alaşımlı numunelerin 10 N ve 15 N yük altındaki mekanik aşınma altındaki açık devre potansiyeli testleri.

Şekil 5.8’de görüldüğü gibi her iki alaşımda da mekanik aşınma altında yapılan açık devre potansiyeli testlerinde (OCP) aşınmanın başlaması ile potansiyelde Ag/AgCl elektroda göre 100-160 mV arasında değişen ani değer düşüşleri olmaktadır. Bu potansiyel düşüşü 10 N yüke göre 15 N yük ile daha da artmıştır. Bu potansiyel düşüşü yüzeydeki oksidasyon tabakasının mekanik olarak kaldırılması ve yüzeyin depasivasyon olmasından kaynaklanmaktadır.



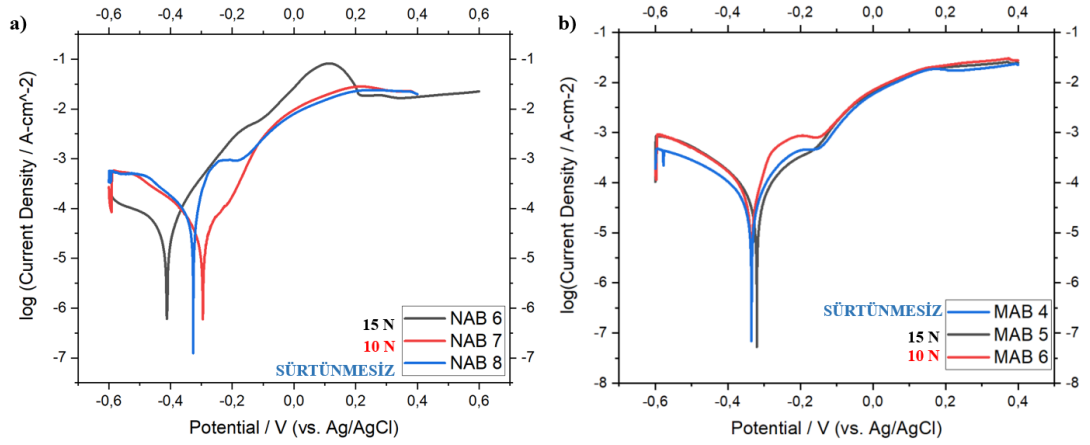
Şekil 5.9: a) NAB, MAB alaşımlı numunelerin 10 N ve 15 N yük altındaki OCP testi esnasındaki ve b) 10 N ve 15 N yük altındaki TAFEL testi esnasındaki sürtünme katsayılarının değişimi.

Korozif ortamlarda (%3,5 NaCl çözeltisi) alaşım yüzeyinde oksit tabakaları oluşmaktadır ve kayan temas yüzeyleri arasında ara tabaka görevi görmektedir ve sürtünme katsayısını daha da düşürmektedir. Şekil 5.9.a’da görüldüğü gibi test öncesinde 1200 s boyunca uygulanan sürtünmesiz OCP testi ile numune yüzeyinde oksit tabakası oluştuğundan test başlangıcında sürtünme katsayısı 0,10-0,15 civarlarında ölçülürken, testin ilk 10 metrelik bölümünde abrasif aşınmaların yüzey pürüzlülüğünü arttırması ile sürtünme katsayısı 0,3-0,35 mertebelerine yükselmiştir. Test süresince oksit tabakaları oluşmaya devam ederken mekanik sürtünme ile oksit tabakaları yüzeyden kaldırılarak repasivasyon-depasivasyon döngüsü oluşmakta ve test sonuna kadar sürtünme katsayısı sabit mertebede kalmaya devam etmektedir.

Şekil 5.9.b’da görüldüğü gibi TAFEL testi öncesinde 600 s boyunca uygulanan sürtünmesiz OCP testi ile numune yüzeyinde oksit tabakası oluştuğundan test başlangıcında sürtünme katsayısı 0,15-0,20 civarlarında ölçülürken, testin ilk 10 metrelik bölümünde abrasif aşınmalar ve korozyona uğrayarak yüzeyden kopan malzemelerin yüzey pürüzlülüğünü arttırması ile sürtünme katsayısı 0,35-0,40

mertebelerine yükselmiştir. Test başlangıcında depasivasyona uğrayan aşınma iz bölgesi tekrar repasivasyona uğrayarak oksit tabakası oluşturarak sürtünme katsayısını MAB numunelerde 0,25-0,30, NAB alaşımlarda 0,15-0,20 değerlerine düşürmektedir. TAFEL testinin devamında yüzeyde oluşan oksidasyona uğramış bölgeler mekanik yük altında numune yüzeyinden koparak sürtünme katsayısını arttırmaktadır. Şekil 5.9.b’de MAB numuneleri sürtünme kuvvetlerinin tekrar artarak 0,35-0,45 değerlerine yükseldiği, NAB numuneleri artış gösterdiği 0,20-0,25 değerlerine göre daha yüksek mertebede olduğu gözlemlenmiştir. Oksidasyon ile sertleşen yüzeyler aşınma direncini arttırmış böylelikle korozyon hasarı aşınma üzerinde sinerjik etki ile daha baskın hale gelmiştir.

E_{corr} , i_{corr} , katodik (β_c) ve anodik Tafel eğimleri (β_a) gibi elektrokimyasal parametreler, ASTM G59 standardına uygun olarak yapılan Tafel ekstrapolasyon yöntemiyle elde edilmiştir (Şekil 5.10). İlk olarak, Tafel eğimleri, korozyon potansiyeli etrafındaki -0,3 V bölgesindeki polarizasyon eğrilerinin lineer kısmındaki çizgi doğrultusunda bir çizgi çekilmiştir. Ardından Tafel çizgilerinin anodik ve katodik bölgelerini teğet geçecek ve ortada çizilen çizgide kesişecek birer çizgi çizilerek bir noktada (E_{corr} , $\log i_{corr}$) kesişim noktası oluşturulmuştur. Tafel eğimlerinin korozyon potansiyeli ile ekstrapolasyonu yoluyla korozyon akımı yoğunluğunun hesaplanmıştır. Bu çalışmada, E_{corr} civarında elde edilen polarizasyon eğrileri analiz edilerek Tafel eğimlerinin belirlenmesi gerçekleştirilmiştir. Tafel eğimleri mümkün olduğunca kesin olarak çıkarılmış olsa da korozyon akımının belirlenmesi için yapılan grafiksel ekstrapolasyon yöntemi yine de hataya yol açabilmektedir. Bu tür bir hata, Tafel eğimlerinin seçiminde bir standart olmamasından dolayı test yönteminin yanlışlığından kaynaklanmaktadır. Testler 3 kez tekrarlanarak sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür. Her iki alaşım üzerinde yapılan analizlerde elde edilen elektrokimyasal parametreler Tablo 5.5’te sunulmuştur.



Şekil 5.10: a) NAB alaşımlı numunelerin, b) MAB alaşımlı numunelerin sürtünmesiz, 10 N ve 15 N yük altındaki mekanik aşınma altındaki TAFEL grafikleri.

Tablo 5.5: NAB ve MAB alaşımlarının yapay deniz suyu ortamında farklı yük koşulları altında elde edilen elektrokimyasal parametreleri.

	NAB			MAB		
	Sürtünmesiz	10 N	15 N	Sürtünmesiz	10 N	15 N
E_{corr} (V _{Ag/AgCl})	-0,3257	-0,4111	-0,4098	-0,3339	-0,3309	-0,3128
i_{corr} (μ A/cm ²)	-4,1010	-4,2245	-4,2245	-4,3098	-4,5336	-4,2543
β_c (mV/dec)	18,18903	7,0297	7,9097	9,2747	25,4366	7,5799
β_a (mV/dec)	-5,24285	-6,7217	-0,9979	-5,4742	-13,9182	-5,8263

Aşınma-korozyon bileşenlerinin hesaplanması, standart ASTM G119-09'a göre yapılmıştır. Toplam malzeme kaybı oranı denklem 5.4 ile ifade edilebilir:

$$K_{WC} = K_W + K_C \quad (5.5)$$

“ K_{WC} ” aşınma-korozyondan kaynaklanan toplam malzeme kayıp oranı olduğunda,

“ K_W ve K_C ” sırasıyla toplam aşınma hızı ve toplam korozyon hızıdır.

Ek olarak;

$$K_W = K_{WO} + \Delta K_W \quad (5.6)$$

$$K_C = K_{CO} + \Delta K_C \quad (5.7)$$

K_{WO} , korozyon yokluğunda saf aşınma oranı; “ K_{CO} ” aşınmanın olmadığı durumdaki saf korozyon oranıdır. “ ΔK_W ” korozyon nedeniyle aşınma hızındaki artıştır ve “ ΔK_C ” aşınma nedeniyle korozyon hızındaki artıştır.

$$K_S = \Delta K_C + \Delta K_W \quad (5.8)$$

$$K_S = K_{WC} - K_{WO} - K_{CO} \quad (5.9)$$

Burada K_S , mekanik aşınma ve elektrokimyasal korozyon arasındaki sinerjinin neden olduğu kayıp oranıdır. K_{WC} ve K_{WO} aşağıdaki denklemlere göre hesaplanabilir:

$$K_{WC} = \frac{m_0 - m_1}{S * \rho * t} \quad (5.10)$$

$$K_{WO} = \frac{m_0 - m_2}{S * \rho * t} \quad (5.11)$$

Burada “ m_0 ” numunenin başlangıç kütlesidir; “ m_1 ” tribokorozyon testinden sonra numunenin son kütlesidir; “ m_2 ” katodik koruma testinden sonra numunenin son kütlesidir, “ S ” aşınmış yüzey alanıdır, “ ρ ” numune yoğunluğudur ve “ t ” test süresidir. Faraday Yasasına göre korozyon hızı, aşağıda gösterildiği gibi penetrasyon hızı cinsinden hesaplanabilir.

$$K_{CO} = \frac{Mi_m}{Z * F * \rho} \quad (5.12)$$

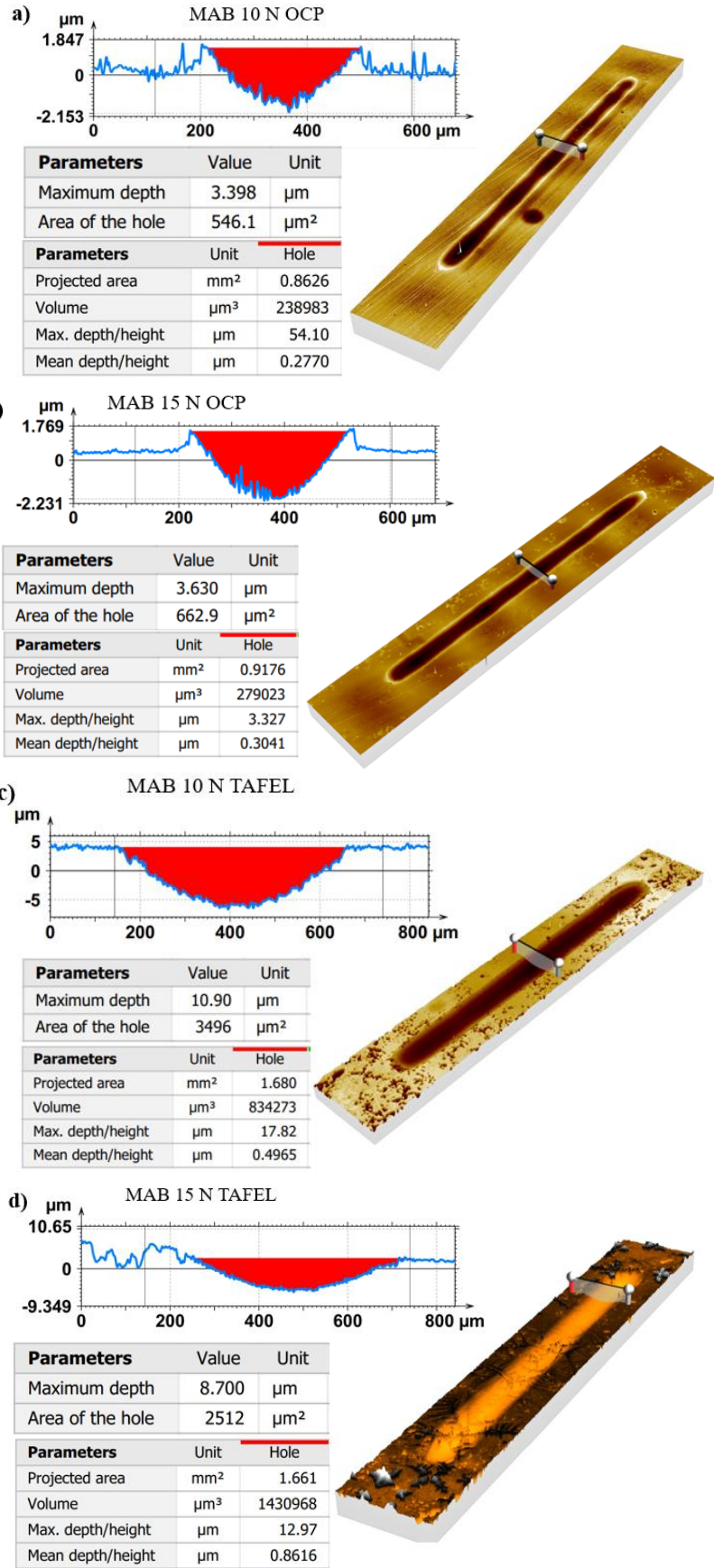
$$K_C = \frac{Mi_w}{Z * F * \rho} \quad (5.13)$$

Burada “ M ” alaşımın atom kütlesidir, “ i_m ” ve “ i_w ” sırasıyla statik korozyon ve tribokorozyon koşulları altında ölçülen korozyon akımı yoğunluğudur, “ Z ” alaşımın korozyonuna dahil olan değerlik elektronlarının sayısıdır, “ F ” Faraday sabitidir ve ρ numune yoğunluğudur. Yapılan analizlerden elde edilen veriler göre yukarıda verilen parametreler hesaplanarak Tablo 5.4’te sunulmuştur.

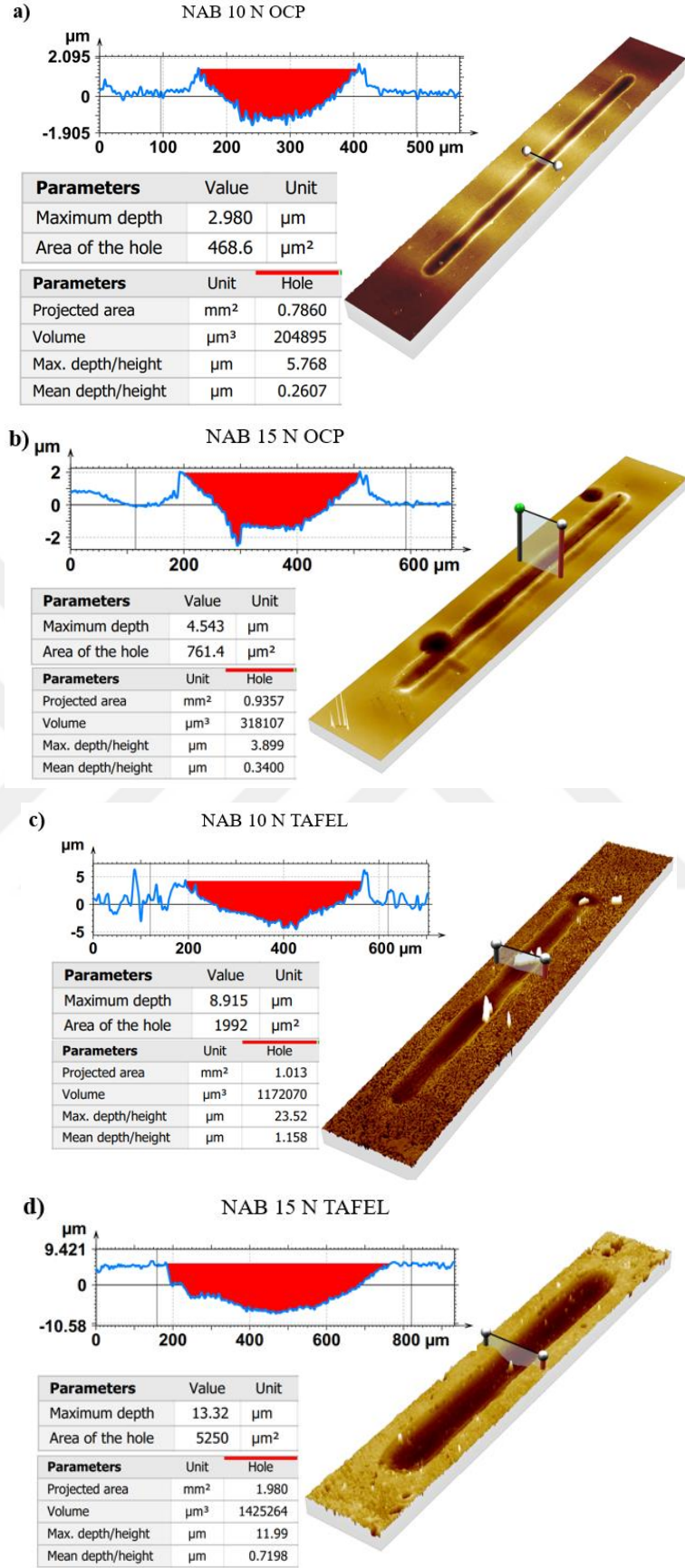
Tablo 5.4’ de görüldüğü gibi ASTM G119-09 standartlarına göre hesaplanarak elde edilen toplam yıllık malzeme kaybı oranı (K_{WC}) MAB alaşımlı numunelerde NAB alaşımlı numunelere göre daha yüksek bir değer hesaplanmıştır ve yük artışı ile malzeme kaybı artışının paralel olarak arttığı gözlenmiştir.

Tablo 5.6: NAB ve MAB alaşımlarının yapay deniz suyu ortamında farklı yük koşulları altında hesaplanan elektrokimyasal parametreleri.

PARAMETRE	ALAŞIM	
K_{WC} (mm/yıl)	NAB 10	0,185
	NAB 15	0,191
	MAB 10	0,063
	MAB 15	0,077
K_{CO} (mm/yıl)	NAB	0,000166
	MAB	0,000158
K_C (mm/yıl)	NAB 10 N	0,000171
	NAB 15 N	0,000171
	MAB 10 N	0,000167
	MAB 15 N	0,000156
K_{WO} (mm/yıl)	NAB 10 N	0,043887675
	NAB 15 N	0,060188811
	MAB 10 N	0,05598732
	MAB 15 N	0,072161434
K_S (mm/yıl)	NAB 10 N	0,141529
	NAB 15 N	0,131497
	MAB 10 N	0,007307
	MAB 15 N	0,004818



Şekil 5.11: MAB alaşımlı numunelerin yapılan testler sonrası aşınma izleri ve aşınma hacmi optik profilometre analizi.



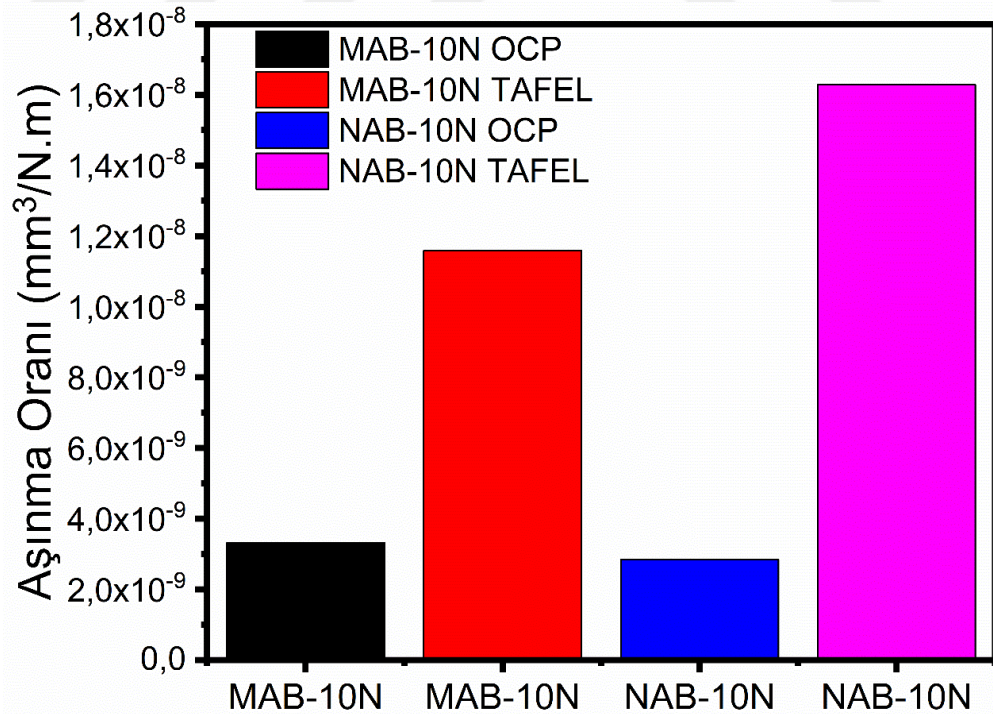
Şekil 5.12: NAB alaşımlı numunelerin yapılan testler sonrası aşınma izleri ve aşınma hacmi optik profilometre analizi.

Tablo 5.7: NAB ve MAB alaşımlarının 10 ve 15 N yük koşulları altında yapılan OCP ve TAFEL testlerinin optik profilometre ile analizleri sonucu elde edilen aşınma hacmi değerleri.

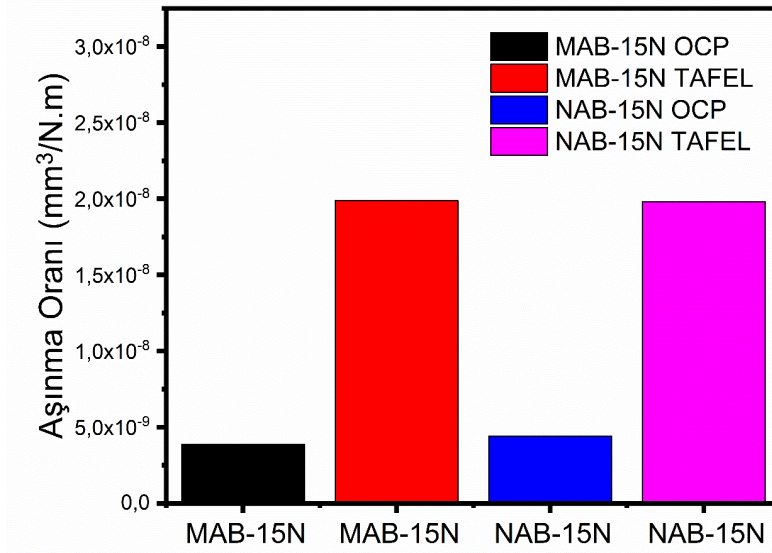
Şekil	TEST CİNSİ	ALAŞIM	AŞINMA HACMI (μm^3)
a)	OCP	MAB 10 N	238983
b)	OCP	MAB 15 N	279023
c)	TAFEL	MAB 10 N	834273
d)	TAFEL	MAB 15 N	1430968
a)	OCP	NAB 10 N	204895
b)	OCP	NAB 15 N	318107
c)	TAFEL	NAB 10 N	1172070
d)	TAFEL	NAB 15 N	1425264

NAB ve MAB numunelerinin aşınma oranları Archard'ın aşınma oranı formülüne göre denklem 5.10'a göre hesaplanmıştır.

$$AR = \frac{V}{F \times D} \quad (5.10)$$



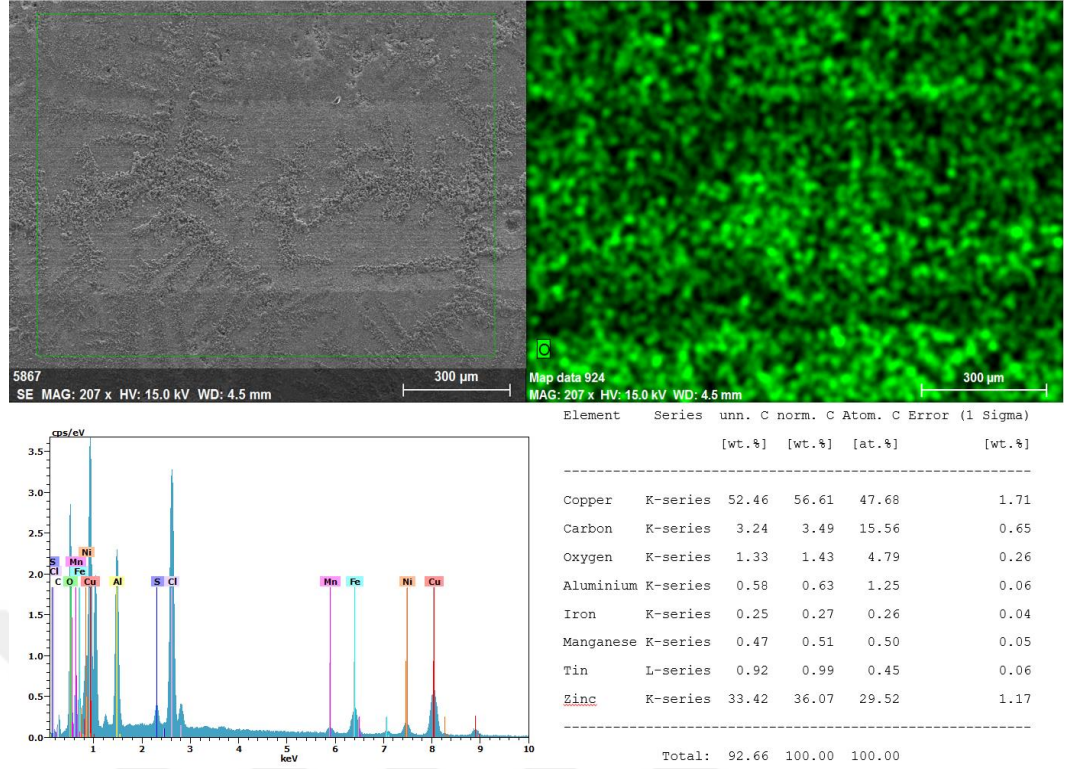
Şekil 5.13: NAB ve MAB alaşımlı numunelerin 10 N yük ile yapılan OCP ve TAFEL analizlerine ait aşınma oranları



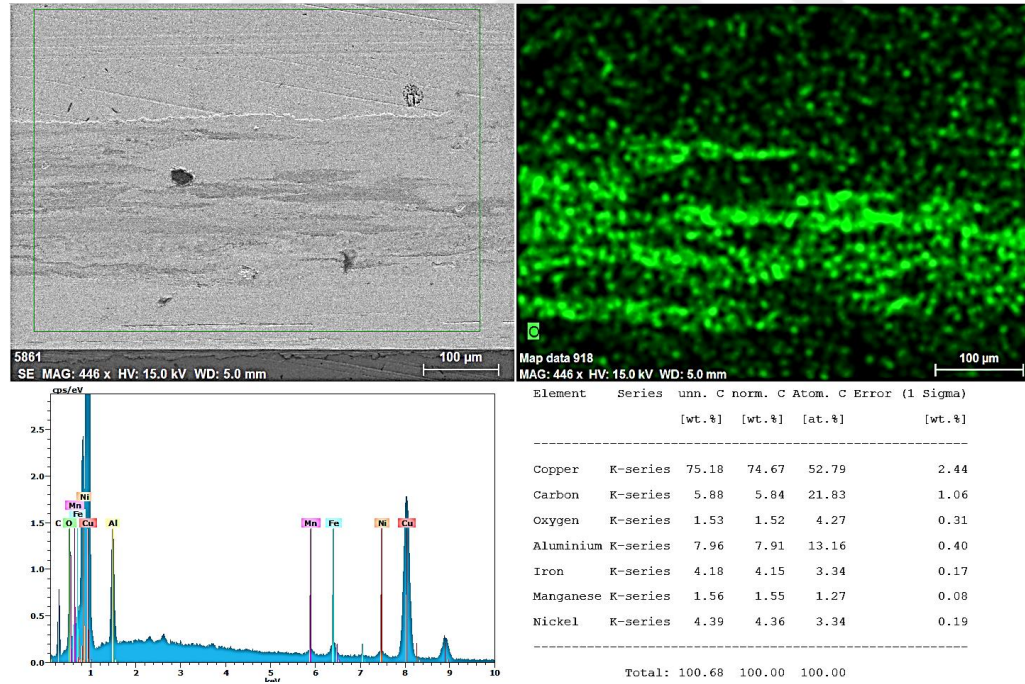
Şekil 5.14: NAB ve MAB alaşımlı numunelerin 15 N yük ile yapılan OCP ve Tafel analizlerine ait aşınma oranları

Şekil 5.13 10 N yük altında NAB ve MAB numunelerinin aşınma oranlarını OCP ve Tafel testleri sonuçlarına göre göstermektedir. Buna göre numunelerin OCP testlerindeki aşınma oranları benzer olup TAFEL testi aşınma oranlarında ise NAB numunesinin daha yüksek aşınma oranına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu aşınma farkı MAB alaşımlının sertliğinin NAB alaşımlına göre daha yüksek olması ve MAB alaşımlının NAB alaşımlına göre korozyon oranının Tablo 5.4'te görüldüğü gibi daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. 15 N testlerinin aşınma oranları incelendiğinde OCP testi aşınma oranlarının birbirine yakın olduğu Şekil 5.14'ten görülmektedir. Tafel testlerinde ise aşınma oranlarının (MAB-15 N: $1,987 \times 10^{-8}$, NAB-15 N: $1,979 \times 10^{-8}$) birbirine OCP testlerindeki gibi yakın olduğu tespit edilmiştir. Karşı gövdenin yüzeye uyguladığı kontak basıncın 15N yük altında Tablo 5.2'de görüldüğü gibi 1200 ve 1373 MPa gibi yüksek mertebelerinde hesaplanmıştır. Bu nedenler 15 N yük ile yapılan Tafel testlerinde yüzeyde oluşan oksidasyon tabakasını yüzeyden kopararak aşındırarak aşınma oranlarının birbirine yakın olarak gözlenmiştir.

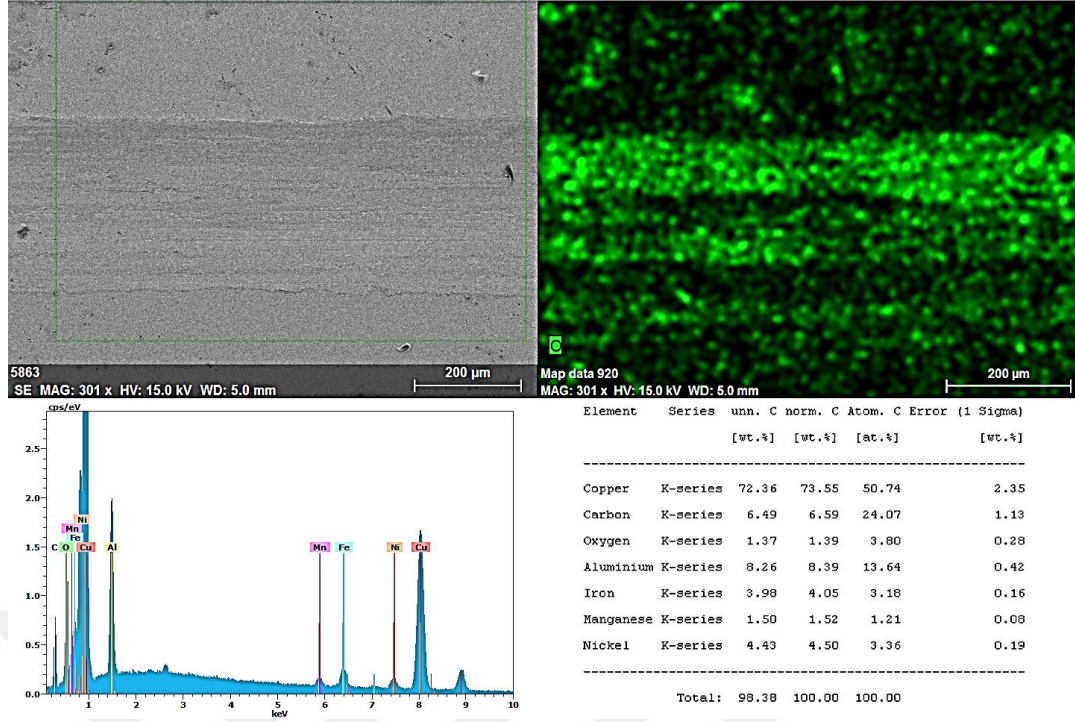
NAB ve MAB alaşımlı numunelere 10 N ve 15 N yük ile yapılan TAFEL ve OCP testlerinin SEM-EDX analizleri Şekil 5.15'ten Şekil 5.22'ye kadar sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre numune yüzeyindeki oksidasyon tabakası şekillerin sol üst kısmında yeşil renkli olarak gösterilmiştir. Analizde aşınma izlerinin içinde yoğun olarak oksidasyon tabakası oluştuğu görülmüştür.



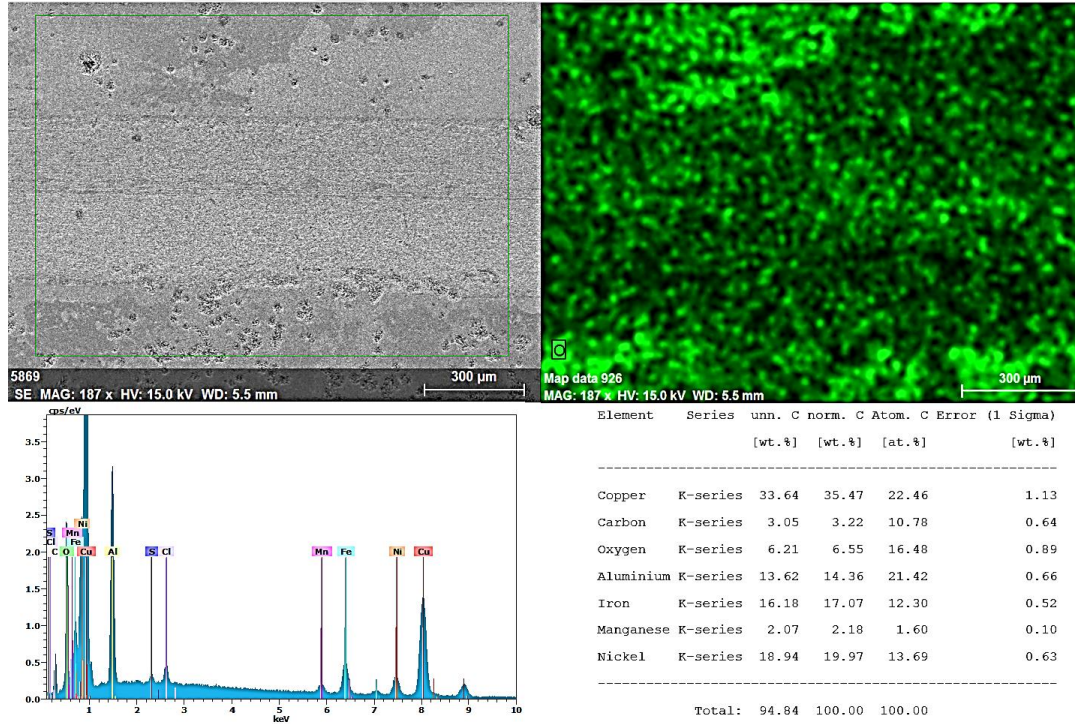
Şekil 5.15: MAB alaşımlı numunelerin 10 N yük ile yapılan OCP testi sonrası SEM-EDX analizi.



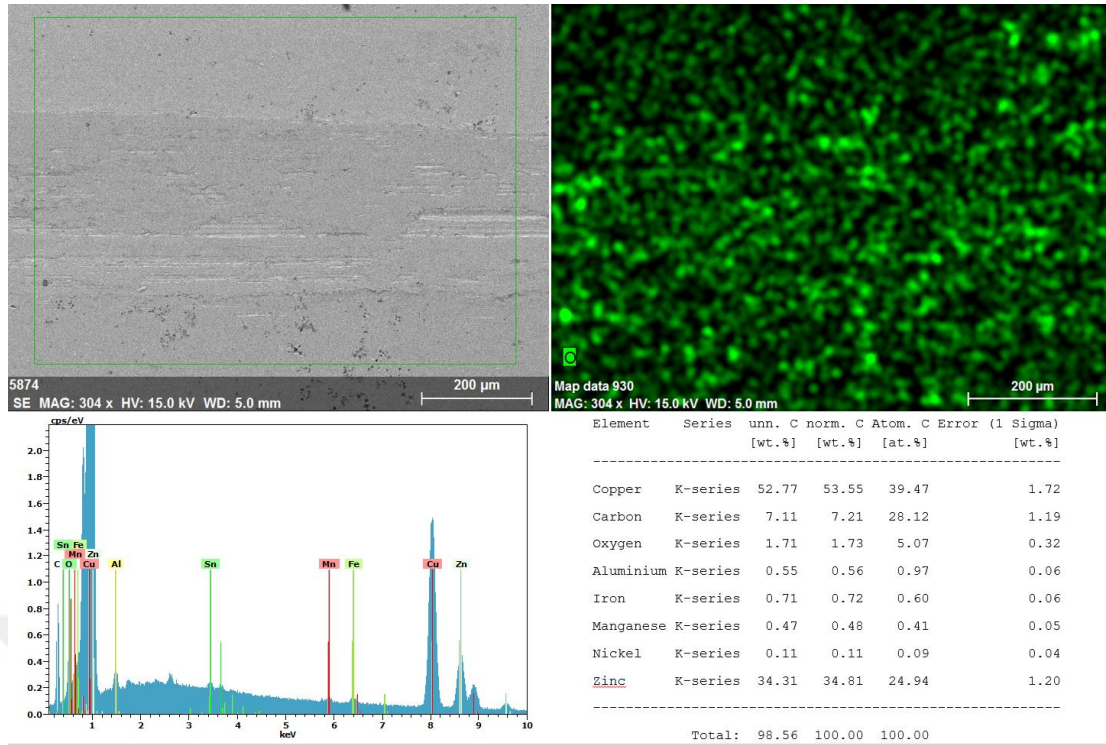
Şekil 5.16: MAB alaşımlı numunelerin 15 N yük ile yapılan OCP testi sonrası SEM-EDX analizi.



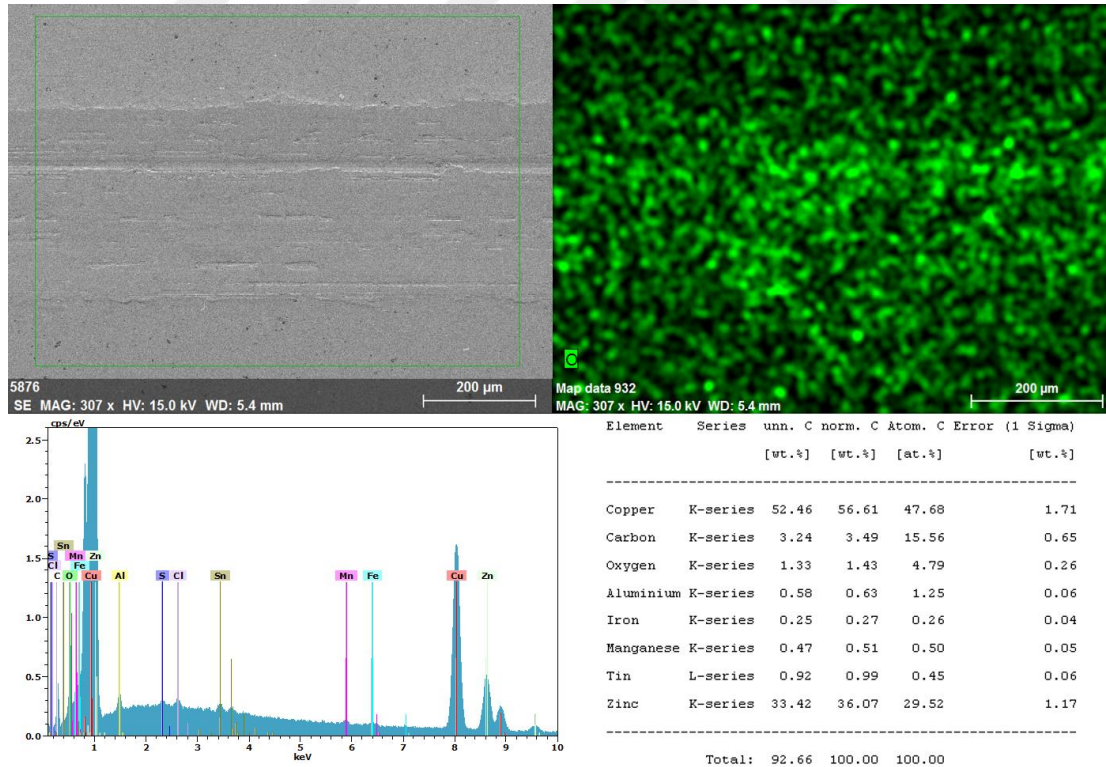
Şekil 5.17: MAB alaşımlı numunelerin 10 N yük ile yapılan TAFEL testi sonrası SEM-EDX analizi.



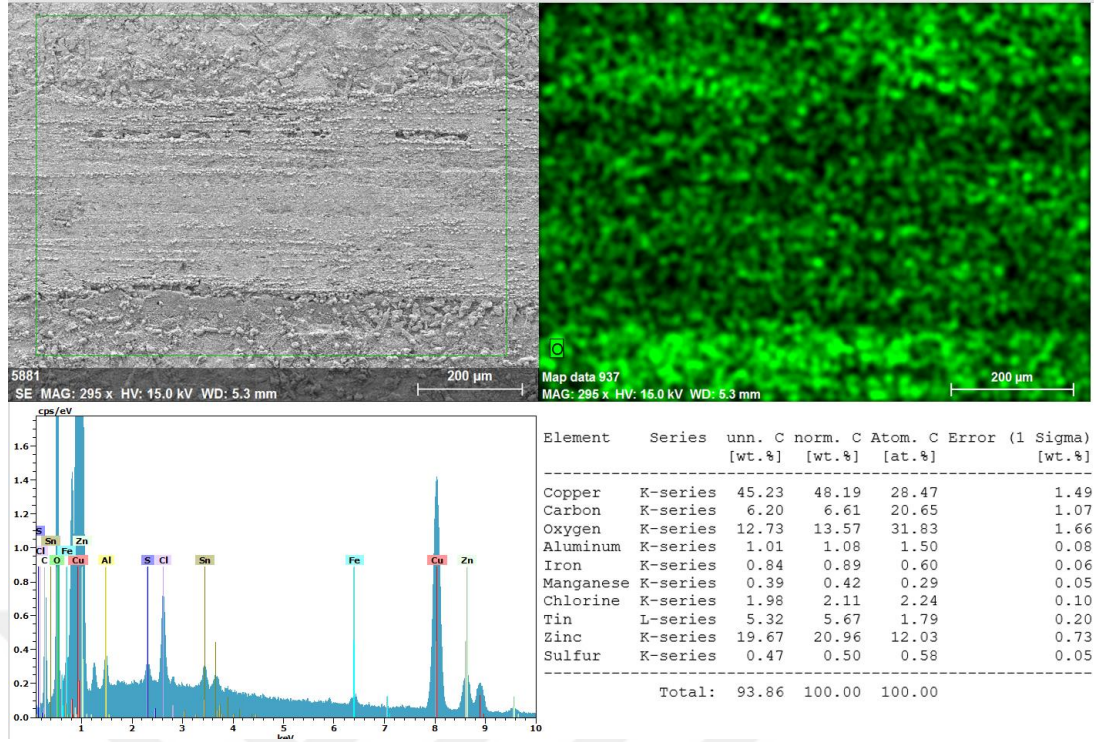
Şekil 5.18: MAB alaşımlı numunelerin 15 N yük ile yapılan TAFEL testi sonrası SEM-EDX analizi.



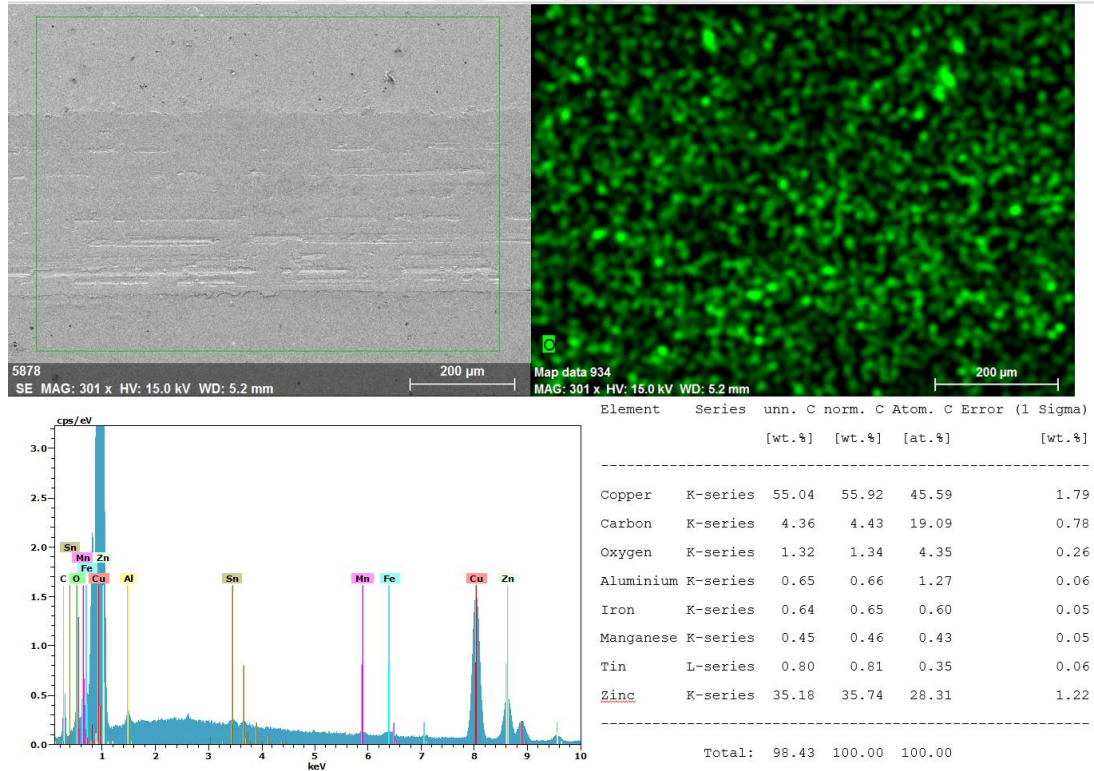
Şekil 5.19: NAB alaşımlı numunelerin 10 N yük ile yapılan OCP testi sonrası SEM-EDX analizi.



Şekil 5.20: NAB alaşımlı numunelerin 15 N yük ile yapılan OCP testi sonrası SEM-EDX analizi.



Şekil 5.21: NAB alaşımlı numunelerin 10 N yük ile yapılan TAFEL testi sonrası SEM-EDX analizi.



Şekil 5.22: NAB alaşımlı numunelerin 15 N yük ile yapılan TAFEL testi sonrası SEM-EDX analizi.

6. SONUÇ

NAB ve MAB alaşımlarının ağırlıkça 3.5% NaCl ve saf su ile oluşturulmuş yapay deniz suyu çözeltisinin içindeki tribokorozyon davranışının incelenmesi için yapılan çalışmalarda edinilen bilgilere göre; sadece korozyona maruz bırakılan numuneler ile korozyon ortamında mekanik yük altında aşındırılan numuneler arasında korozyon oranları karşılaştırılarak tribokorozyonun sinerjik etkisi ile toplam korozyonun sadece mekanik ve sadece korozyona göre daha fazla olduğu yapılan analizler ile saptanmıştır.

Yapılan analizlerde MAB alaşımının tanecik boyutları NAB alaşımının tanecik boyutlarından daha küçük olduğu gözlenmiştir. MAB alaşımının nanoindentasyon test sonuçları da tanecik boyutları ile paralel olarak NAB alaşımından daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir.

Yapılan analizlerle NAB alaşımının MAB alaşımına göre mekanik olarak daha fazla aşındığı tespit edilmiştir. Daha yüksek aşınma oranlarını göz önüne alındığında NAB alaşımının toplam korozyon oranı MAB alaşımının toplam korozyon oranından daha fazla olarak hesaplanmıştır.

MAB ve NAB alaşımlarının deniz suyu ortamındaki tribokorozyon davranışları kıyaslandığında aşınma ve korozyonun sinerjik etkisi altında MAB alaşımının NAB alaşımına göre kullanımın daha uygun olduğu gözlenmiştir.

KAYNAKÇA

- Archard, J.F. (1953) "Contact and Rubbing of Flat Surfaces". *Journal of Applied Physics*, Vol. 24, Issue 8, pp 981-988. <https://doi.org/10.1063/1.1721448>
- ASM. (1992). "Friction", *Lubrication, and Wear Technology*, Vol. 18.
- ASTM G59-97(2014). "Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements". <https://doi.org/10.1520/G0059-97R14>
- ASTM G61-86 (2018). "Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptibility of Iron-, Nickel-, or Cobalt-Based Alloys". <https://doi.org/10.1520/G0061-86R18>
- ASTM G71-81(2019). "Standard Guide for Conducting and Evaluating Galvanic Corrosion Tests in Electrolytes". <https://dx.doi.org/10.1520/G0071-81R19>
- ASTM Standard. G119-09 (2016), "Standard Guide for Determining Synergism Between Wear and Corrosion".
- Badawy, W. A., El-Rabiei, M. M., & Nady, H. (2014). "Synergistic effects of alloying elements in cu-ternary alloys in chloride solutions". *Electrochimica Acta*, 120, 39-45. doi:10.1016/j.electacta.2013.12.043
- Basumatary, J., & Wood, R. J. K. (2017). "Synergistic effects of cavitation erosion and corrosion for nickel aluminium bronze with oxide film in 3.5% NaCl solution". *Wear*, 376-377, 1286-1297. doi:10.1016/j.wear.2017.01.047
- Basumatary, J., & Wood, R. J. K. (2020). "Different methods of measuring synergy between cavitation erosion and corrosion for nickel aluminium bronze in 3.5% NaCl solution". *Tribology International*, 147, doi:10.1016/j.triboint.2017.08.006
- Beadling, A. R., Bryant, M. G., Dowson, D., & Neville, A. (2021). "Adverse loading effects on tribocorrosive degradation of 28 mm metal-on-metal hip replacement bearings". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 235(12), 2664–2674. <https://doi.org/10.1177/13506501211039947>
- Benea, L., Wenger, F., Ponthiaux, P., & Celis, J. P. (2009). Tribocorrosion behaviour of ni-SiC nano-structured composite coatings obtained by electrodeposition. *Wear*, 266(3-4), 398-405. doi:10.1016/j.wear.2008.04.018
- Bhushan, B. (2013). "Introduction to tribology". *John Wiley & Sons, Ltd.*https://doi.org/10.1142/9781786345189_0001
- Blau P., C.J.-P., Drees D., Franek F., (2013). *Tribo-Corrosion: Research, Testing, and Applications.*, Houston, TX: NACE International
- Chen, J., Wang, J., Yan, F., Zhang, Q., & Li, Q. (2015). "Effect of applied potential

- on the tribocorrosion behaviors of monel K500 alloy in artificial seawater". *Tribology International*, 81, 1-8. doi:10.1016/j.triboint.2014.07.014
- Cristiani, P., Perboni, G., & Debenedetti, A. (2008). "Effect of chlorination on the corrosion of Cu/Ni 70/30 condenser tubing". *Electrochimica Acta*, 54(1), 100-107. doi:10.1016/j.electacta.2008.05.081
- Czichos H. (1978) "Tribology.A Systems approach to the science and technology of friction,lubrication and wear". *Tribology series*.
- Dowson, D. (1995). Elastohydrodynamic and micro-elastohydrodynamic lubrication.
- Espallargas, N., Johnsen, R., Torres, C., & Muñoz, A. I. (2013). "A new experimental technique for quantifying the galvanic coupling effects on stainless steel during tribocorrosion under equilibrium conditions". *Wear*, 307(1-2), 190-197. doi:10.1016/j.wear.2013.08.026
- Galliano, F., Galvanetto, E., Mischler, S., & Landolt, D. (2001). "Tribocorrosion behavior of plasma nitrided ti-6Al-4V alloy in neutral NaCl solution". *Surface and Coatings Technology*, 145(1-3), 121-131. doi:10.1016/S0257-8972(01)01309-3
- Gao, F., & Liang, H. (2012). "Effects of potential and mechanical stimulation on oxidation of tantalum during electrochemical mechanical polishing". *Journal of Electronic Materials*, 41(3), 624-631. doi:10.1007/s11664-011-1832-5
- Hokkirigawa, K. and Kato, K. (1988), "An experimental and theoretical investigationof ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear",*Tribology Int.*,21, 1, 51-57
- Huttunen-Saarivirta, E., Isotahdon, E., Metsäjoki, J., Salminen, T., Ronkainen, H., & Carpen, L. (2019). "Behaviour of leaded tin bronze in simulated seawater in the absence and presence of tribological contact with alumina counterbody: Corrosion, wear and tribocorrosion". *Tribology International*, 129, 257-271. doi:10.1016/j.triboint.2018.08.021
- Huttunen-Saarivirta, E., Kilpi, L., Hakala, T. J., Carpen, L., & Ronkainen, H. (2016). "Tribocorrosion study of martensitic and austenitic stainless steels in 0.01 M NaCl solution". *Tribology International*, 95, 358-371. doi:10.1016/j.triboint.2015.11.046
- Jones, D.A. (1996) "*Principles and Prevention of Corrosion*. 2nd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River", New Jersey, 572 pp.
- Kato, K., & Adachi, K. (2000). "Wear mechanisms". *Modern Tribology Handbook: Volume One: Principles of Tribology*, pp 273–300. https://doi.org/10.1142/9789814503945_0011
- Kuiri, S. (2012). "Evaluation of Wear-Corrosion Synergy Through Tribocorrosion Studies". *Bruker*, 1–24.
- Kumar, S., & Panneerselvam, K. (2016). "Akademia Baru Optimization of Friction and Wear of Nylon 6 and Glass Fiber Reinforced (GFR) Nylon 6 Composites against 30wt . % GFR Nylon 6 Disc". *Akademia Baru*, 19(1), 14–32.
- Ludema, K., (1998). "Friction, Wear and Lubrication: A Textbook in Tribology". *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 50. <https://doi.org/10.1108/ilt.1998.01850eae.001>
- Mang T, Dresel W (2006). *Lubricants and lubrication*. Wiley-VCH; John Wiley

[distributor], Weinheim; Chichester

- Mischler, S. (2008). "Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion: A comparative evaluation". *Tribology International*, 41(7), 573-583. doi:10.1016/j.triboint.2007.11.003
- Nosonovsky, M., Kailas, S. V., & Editors, M. R. L. (2013). "Tribology for Scientists and Engineers". *Tribology for Scientists and Engineers*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1945-7>
- Nosonovsky, M., Kailas, S. V., & Editors, M. R. L. (2013). *Tribology for Scientists and Engineers*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-1945-7>
- Ocejo, I. C., Moraleda, M. V. B., & Linhardt, P. (2022). "Corrosion behavior of heat-treated nickel-aluminum bronze and manganese-aluminum bronze in natural waters". *Metals*, 12(3) doi:10.3390/met12030380
- Puigdomenech, I., & Taxen, C. (2000). "Thermodynamic data for copper. implications for the corrosion of copper under repository conditions". *Technical Report*
- Rajahram, S. S., Harvey, T. J., & Wood, R. J. K. (2009). "Erosion-corrosion resistance of engineering materials in various test conditions". *Wear*, 267(1-4), 244-254. doi:10.1016/j.wear.2009.01.052
- Richardson, I. (2016). *Guide to Nickel Aluminium Bronze for Engineers*.
- Salot, M. (2019). "Study on wear resistance of Al-Si alloy using a 3-body dry abrasivewear testing machine".
- Stojadinovic, J., Bouvet, D., Declercq, M., & Mischler, S. (2011). "Influence of chelating agents on the tribocorrosion of tungsten in sulphuric acid solution". *Electrochimica Acta*, 56(20), 7131-7140. doi:10.1016/j.electacta.2011.05.084
- Stolarski, T. A. (1999). "Tribology in Mech Design". *Butterworth-Heinemann*.
- Takadom, J. (1996). "The influence of potential on the tribocorrosion of nickel and iron in sulfuric acid solution". *Corrosion Science*, 38(4), 643-654. doi:10.1016/0010-938X(95)00155-D
- Tang, C. H., Cheng, F. T., & Man, H. C. (2004). "Effect of laser surface melting on the corrosion and cavitation erosion behaviors of a manganese-nickel-aluminium bronze". *Materials Science and Engineering*, 373(1-2), 195-203. doi:10.1016/j.msea.2004.01.016
- Wood, R. J. K. (2006). "Erosion-corrosion interactions and their effect on marine and offshore materials". *Wear*, 261(9), 1012-1023. doi:10.1016/j.wear.2006.03.033
- Wood, R. J. K. (2017). "Marine wear and tribocorrosion". *Wear*, 376-377, 893-910. doi:10.1016/j.wear.2017.01.076
- Wu, Z., Cheng, Y. F., Liu, L., Lv, W., & Hu, W. (2015). "Effect of heat treatment on microstructure evolution and erosion-corrosion behavior of a nickel-aluminum bronze alloy in chloride solution". *Corrosion Science*, 98, 260-270. doi:10.1016/j.corsci.2015.05.037
- Zhang, B., Wang, J., & Yan, F. (2018). "Load-dependent tribocorrosion behaviour of nickel-aluminium bronze in artificial seawater". *Corrosion Science*, 131, 252-263. doi:10.1016/j.corsci.2017.11.028

Zohdy, K. M., Sadawy, M. M., & Ghanem, M. (2014). "Corrosion behavior of leaded-bronze alloys in sea water". *Materials Chemistry and Physics*, 147(3), 878-883. doi:10.1016/j.matchemphys.2014.06.033

