



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GEMİ DEMİRLEME ZİNCİRLERİNİN TRİBOKOROZYON
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

MUTTALİP ALTINOK

DANIŞMAN

DOÇ. DR. BİLAL KURŞUNCU

BARTIN-2023



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GEMİ DEMİRLEME ZİNCİRLERİNİN TRIBOKOROZYON
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muttalip ALTINOK

BARTIN-2023

KABUL VE ONAY

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Bilal KURŞUNCU danışmanlığında hazırlamış olduğum “GEMİ DEMİRLEME ZİNCİRLERİNİN TRİBOKOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

25.08.2023

Muttalip ALTINOK

ÖNSÖZ

Bilimsel bir araştırma süreci, sadece düşünce, zaman ve çaba gerektiren bir yoldan ibaret değil, aynı zamanda profesyonel deneyim ve rehberliğin de olmazsa olmaz bir parçasıdır. Bu tezin ortaya çıkmasında gösterdikleri engin tecrübe, yardımseverlik ve esirgemez destek için danışmanlarım Doç. Dr. Bilal KURŞUNCU ve Dr. Öğr. Üyesi Sabri ALKAN'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde bana maddi ve manevi destek veren, değerli bilgi ve deneyimlerini paylaşan, akademik yolculuğumda rehberlik eden Prof. Dr. Mustafa Sabri GÖK, Doç. Dr. Abid USTAOĞLU ve Dr. Öğr. Üyesi Mahir GÜLEN hocalarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasında gemi demirleme zincirlerinin temini konusunda yardımlarını esirgemeyen ve zincir malzemeleri hakkında değerli bilgilerini paylaşan Evren Zincir firmasının yetkililerine, özellikle Makina Mühendisi Adnan TAN'a teşekkür ederim. Ayrıca tez sürecinde bana destek olan Yüksek Metalurji ve Malzeme Mühendisi Okan ODABAŞI, Makine Mühendisi Süheyl Bilal SUNGUR arkadaşlarıma teşekkür ederim. Bu tez çalışmasının hazırlanmasında bana akademik ve kişisel olarak destek olan tüm arkadaşlarıma ve hocalarıma teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde bana katkı sağlayan, sabır ve anlayışla beni destekleyen, her zaman güven ve motivasyon veren değerli aileme en içten sevgi, saygı, teşekkür ve hürmetlerimi sunarım.

Muttalip ALTINOK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GEMİ DEMİRLEME ZİNCİRLERİNİN TRIBOKOROZYON DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Muttalip ALTINOK

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Bilal KURŞUNCU

İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sabri ALKAN

Bartın-2023, sayfa: 84

Tribokorozyon, bir elektrolit içinde iki yüzeyin sürtünmesi sonucu oluşan mekanik aşınma ile korozyonun birleşiminden kaynaklanan bir malzeme bozunum sürecidir. Denizcilik sektöründe, özellikle gemi demirleme zincirlerinin baklaları arasında meydana gelen tribokorozyon, çukurcuk oluşumu, kazımalı aşınma gibi ciddi hasarlara yol açabilmektedir. Bu birleşik etki, demirleme zincirlerinde karmaşık bir aşınma ve korozyon mekanizmasının eş zamanlı oluşumuna sebebiyet vermektedir. Bu nedenle gemi demirleme zincirlerinde ortaya çıkan tribokorozyon davranışlarının anlaşılması ve önlenmesi önemlidir.

Gemi demirleme zincirlerinde imalatının kolay olması ve ekonomikliği nedeniyle yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (HSLA) çelikler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte HSLA çeliklerin deniz suyu ortamındaki tribokorozyon davranışları konusunda oldukça sınırlı bir literatür söz konusudur. Bu nedenle HSLA çeliklerin tribokorozyon davranışlarının belirlenmesi ortaya çıkabilecek hasarların önlenmesi açısından önemlidir. Bu çalışmada, akma dayanımları uygulanan ısıtılmış neticesinde farklılık gösteren Grade 2 ve Grade 3 olarak isimlendirilen, iki farklı kalitede HSLA demirleme zinciri çeliklerinin tribokorozyon ve kuru kayma aşınma davranışları incelenmiştir.

Tribokorozyon testleri, ileri-geri hareket eden (ball-on-disc) tribometre cihazına entegre edilmiş üç elektrotlu bir potansiyostat sistemi kullanılarak yapılmıştır. Aşınma deneylerinde karşı cisim olarak 6 mm çapında (Al_2O_3) seramik bilya kullanılmıştır. Testler yüksüz (korozyon) ve 5 N' luk yük altında (tribokorozyon) gerçekleştirilmiştir. Korozyon ve tribokorozyon deneylerinde, deniz suyunu simule etmek için distile su kullanılarak içerisinde %3,5 oranında NaCl bulunan bir çözelti hazırlanmış ve kullanılmıştır. Çalışmada incelenen malzemelerin tribokorozyon davranışlarını anlamak amacıyla açık devre potansiyeli (OCP), potansiyostatik ve potansiyodinamik yöntemler olmak üzere üç farklı elektrokimyasal test yöntemi kullanılmıştır. Potansiyodinamik taramalar -2 V ile 0,5 V potansiyel aralığında ve 1 mV/s tarama hızında yapılmıştır. Ayrıca zincir çeliklerinin OCP altındaki tribokorozyon davranışlarıyla birlikte (-1,5) V katodik ve 0,3 V anodik gerilimler altında potansiyostatik tribokorozyon davranışları da incelenmiştir. Demirleme zincir çeliklerinin atmosferik koşullardaki aşınması kuru kayma testleriyle belirlenmiştir. Tribokorozyon deneylerinden sonra aşınma izlerinin boyutları 3D-optik profilometre yardımıyla ölçülmüştür. Aşınan yüzeylerin morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Enerji Dağılımı Spektroskopisi (EDS) cihazı kullanılarak farklı büyütmelerde yüzey morfolojisi analiz edilmiştir.

0,3 V anodik potansiyelde çukurcuk korozyonunun oluşumunda bir artış gözlemlenmiştir. Ayrıca, Cl iyonlarının mekanik etkiler sonucu oluşan çatlaklara sızmasına bağlı olarak ortaya çıkan tribokorozyon hasarları da gözlemlenmiştir. Çalışmada -1.5 V katodik potansiyel altında katodik koruma başarıyla sağlandığından korozyon ihmal edilebilir seviyelere indirgenmiş ve sadece saf mekanik aşınma nedeniyle malzeme kaybı azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gemi demirleme zincirleri, tribokorozyon, aşınma, korozyon, kuru kayma aşınma, deniz suyu

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF TRIBOCORROSION BEHAVIOR OF SHIP MOORING CHAINS

Muttalip ALTINOK

Bartın University

Graduate School

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Bilal KURŞUNCU

Thesis Advisor: Assist.Prof. Sabri ALKAN

Bartın-2023, Number of Pages: 84

Tribocorrosion is a material degradation process resulting from the combination of mechanical wear and corrosion caused by the friction of two surfaces in an electrolyte. In the maritime industry, tribocorrosion, especially between the links of ship mooring chains, can cause severe damage, such as pitting and abrasive wear. This combined effect leads to the simultaneous formation of a complex wear and corrosion mechanism in mooring chains. Therefore, it is essential to understand and prevent tribocorrosion behavior in ship mooring chains.

High strength low alloy (HSLA) steels are widely used in ship mooring chains due to their ease of fabrication and economy. However, there is limited literature on the tribocorrosion behavior of HSLA steels in seawater environments. Therefore, it is vital to determine the tribocorrosion behavior of HSLA steels to prevent damage. This study investigated the tribocorrosion and dry sliding wear behaviors of two different grades of HSLA mooring chain steels, Grade 2 and Grade 3, whose yield strengths differ due to the heat treatment applied.

Tribocorrosion tests were carried out using a three-electrode potentiostat system integrated into a ball-on-disc tribometer. A 6 mm diameter (Al₂O₃) ceramic ball was used as a counter body in the corrosion tests. The tests were carried out without load (corrosion) and under a load of 5 N (tribocorrosion). In the corrosion and tribocorrosion tests, a solution containing 3.5% NaCl was prepared using distilled water to simulate seawater. Three different electrochemical test methods, namely open circuit potential (OCP) and potentiostatic and potentiodynamic methods, were used to understand the tribocorrosion behavior of the studied materials. Potentiodynamic scans were performed in the potential range of -2 V to 0.5 V and at a scan rate of 1 mV/s. In addition to the tribocorrosion behavior of the chain steels under OCP, potentiostatic tribocorrosion behavior under (-1.5) V cathodic and 0.3 V anodic voltages was also investigated. Dry sliding tests determined the corrosion of mooring chain steels under atmospheric conditions. After the tribocorrosion tests, the dimensions of the wear scars were measured using a 3D-optical profilometer. Scanning electron microscopy (SEM) examined the corroded surfaces' morphology. Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) was used to analyze the surface morphology at different magnifications.

At 0.3 V anodic potential, an increase in the formation of pitting corrosion was observed. In addition, tribocorrosion damage due to the infiltration of Cl ions into the cracks formed due to mechanical effects was also observed. Since cathodic protection was successfully achieved at -1.5 V cathodic potential, corrosion was reduced to negligible levels, and material loss due to pure mechanical wear was reduced.

Keywords: Ship mooring chains, tribocorrosion, abrasion, corrosion, dry sliding wear, seawater

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|------|
| KABUL VE ONAY..... | ii |
| BEYANNAME | iii |
| ÖNSÖZ | iv |
| ÖZET | v |
| ABSTRACT | vii |
| İÇİNDEKİLER..... | ix |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | xi |
| TABLolar DİZİNİ..... | xiii |
| SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ..... | xiv |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. TRİBOLOJİ..... | 6 |
| 2.1. Sürtünme | 6 |
| 2.2. Aşınma | 8 |
| 2.3. Yağlama | 14 |
| 3. TRİBOKOROZYON..... | 16 |
| 3.1. Denizcilik Endüstrisinde Tribokorozyon..... | 17 |
| 3.2. Tribokorozyon Sistemi | 20 |
| 3.3. Tribokorozyonda Aşınma-Korozyon Sinerjisi..... | 25 |
| 3.4. Tribokorozyonda Elektrokimyasal Yaklaşımlar | 28 |
| 4. LİTERATÜR ÖZETİ..... | 35 |
| 5. DENEYSEL ÇALIŞMA | 42 |
| 5.1. Malzeme ve Numune Hazırlama | 42 |
| 5.2. Deneysel Altyapı ve Deney Tasarımı..... | 43 |
| 5.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM- Scanning Elektron Microscopy)..... | 45 |
| 5.4. Noktasal Analiz Çalışmaları (EDS- Energy Dispersive Spectroscopy)..... | 45 |
| 5.5. 3D Optik Profilometre İncelemeleri..... | 46 |
| 5.6. Aşınma (Kuru Ortam) Testlerinin uygulanması | 46 |
| 5.7. Yapılan Deneysel Aşamaların Yöntemleri | 46 |
| 6. BULGULAR VE TARTIŞMA..... | 48 |
| 6.1. Potansiyodinamik Polarizasyon Eğrileri | 48 |
| 6.2. Açık Devre Potansiyeli Altında Tribokorozyon Davranışı | 54 |
| 6.3. Potansiyostatik Gerilim Altındaki Tribokorozyon Davranışı | 59 |

| | |
|--|----|
| 6.3.1. 0,3 V Gerilim | 59 |
| 6.3.2 (-1,5) V Gerilim | 61 |
| 6.4. Kuru Kayma Aşınması..... | 64 |
| 6.5. Değerlendirmelerin ve Bulguların Karşılaştırılması (Tartışma)..... | 67 |
| 6.5.1. Potansiyodinamik Polarizasyon Eğrilerinin Karşılaştırılması | 67 |
| 6.5.2. Farklı Gerilimler Altındaki Tribokorozyon Davranışları | 68 |
| 6.5.3. Aşınma Korozyon Sinerjisi | 72 |
| 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 75 |
| 7.1. Sonuçlar | 75 |
| 7.2. Öneriler..... | 78 |
| KAYNAKLAR | 79 |
| ÖZGEÇMİŞ | 84 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| Şekil No | Sayfa No |
|---|-------------|
| 1.1: Tribokorozyon sistemini oluşturan ve etkileyen bileşenler..... | 2 |
| 1.2: Şamandıralar için kullanılan demirleme zincirlerinin tipik hasar morfolojisi.(a) Korozyon; (b) aşınma (titanyum, TC4); (c) tribokorozyon, düşük karbonlu çelik..... | 3 |
| 2.1: Sürtünme Çeşitleri (a) Kuru, (b) Sınır , (c) Sıvı..... | 7 |
| 3.1: Tribokorozyon çalışmalarında temel parametreler ve deney düzeneği..... | 21 |
| 3.2: Çift yönlü kayma testi için tribokorozyon hücre..... | 23 |
| 3.3: Tribokorozyon sisteminin şematik gösterimi..... | 24 |
| 3.4: Kayma temasında karşıt cisimlerin temas geometrileri a) bilya (ball-on -disk), b) koni, c) pim (pin-on-disk) | 25 |
| 3.5: Tribokorozyon Sinerjisi | 26 |
| 3.6: a) Potansiyostat ve tribokorozyon ölçümünün şematik gösterimi, b) Örnek bir aşınma potansiyostatik test ölçümü | 33 |
| 5.1: Tribokorozyon deney düzeneği ve bileşenleri | 44 |
| 6.1: Grade 2 zincir çeliğinin yüksüz ve 5N yük altındaki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri..... | 48 |
| 6.2: Grade 3 zincir çeliğinin yüksüz ve 5N yük altındaki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri | 49 |
| 6.3: Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin 5N yük altındaki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri..... | 50 |
| 6.4: Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin 5 N yükün potansiyodinamik polarizasyonunda sürtünme katsayıları | 51 |
| 6.5: Grade 2 -5N yük altındaki kayma aşınma izi ve aşındırılmamış bölgedeki aşınma iz dışı SEM görüntüleri | 52 |
| 6.6: Grade 2 yüksüz durumdaki, kayma olmayan, aşınma izi SEM görüntüleri..... | 52 |
| 6.7: Grade 3 -5N yük altındaki kayma aşınma izi ve aşındırılmamış bölgedeki aşınma iz dışı SEM görüntüleri | 53 |
| 6.8: Grade 3 yüksüz durumdaki, kayma olmayan, aşınma iz SEM görüntüleri..... | 53 |
| 6.9: 5N yük altında Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin açık devre potansiyeli | 55 |
| 6.10: Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin 5 N yük altında deniz suyu içindeki sürtünme katsayısı..... | 56 |

| | |
|---|----|
| 6.11: Grade 2 zincir çeliğinin 5 N yükteki ve OCP altında aşınma faktörünün SEM görüntüleri (a) aşınma izi görüntüsü, (b) aşınma izi genişliği, (c) aşınma izi yapısı.. | 57 |
| 6.12: Grade 3 zincir çeliğinin 5 N yükteki ve OCP altında aşınma izinin SEM görüntüleri (a) aşınma izi genel görüntüsü, (b) aşınma izi genişliği,(c) aşınma izi yapısı | 57 |
| 6.13: OCP altındaki Grade 2 zincir çeliğinin EDS analizi ve aşınma izi görüntüsü | 58 |
| 6.14: OCP altındaki Grade 3 zincir çeliğinin EDS analizi ve aşınma izi görüntüsü..... | 58 |
| 6.15: 5 N yük ve 0,3 V potansiyostatik gerilim altında akımın zamanla değişimi..... | 59 |
| 6.16: 5 N yükteki ve 0,3 V akımda potansiyostatik gerilim altındaki sürtünme katsayıları | 60 |
| 6.17: 0,3 V anodik potansiyel altındaki SEM görüntülerinin aşınma izi | 61 |
| 6.18: 5 N yükteki ve (-1,5) V potansiyostatik gerilim altında akımın zamanla değişimi.... | 62 |
| 6.19: 5 N yükteki ve (-1,5) V akımda potansiyostatik gerilim altındaki sürtünme katsayıları | 63 |
| 6.20: (-1,5) V anodik potansiyel altındaki SEM görüntülerinin aşınma izi | 64 |
| 6.21: Kuru kayma aşınması durumundaki sürtünme katsayıları | 65 |
| 6.22: Grade 2 kuru kayma aşınması aşınma izi SEM görüntüsü..... | 65 |
| 6.23: Grade 2 kuru kayma aşınması EDS görüntüleri..... | 66 |
| 6.24: Grade 3 kuru kayma aşınması aşınma izi SEM görüntüsü..... | 66 |
| 6.25: Grade 3 kuru kayma aşınması EDS görüntüleri..... | 67 |
| 6.26: Grade 2 ve Grade 3'ün 5 N yük altındaki sürtünme katsayıları..... | 71 |
| 6.27: Grade 2 zincir çeliğinin a) katodik b) açık devre ve c) anodik potansiyeller altındaki optik profilometre görüntüleri..... | 73 |
| 6.28: Grade 3 zincir çeliğinin a) katodik b) açık devre ve c) anodik potansiyeller altındaki optik profilometre görüntüleri..... | 74 |

TABLolar DİZİNİ

| Tablo | Sayfa |
|--|--------------|
| No | No |
| 5.1: S355J2 malzemesin ağırlıkça elementsel bileşim oranlar..... | 43 |
| 5.2: Deney parametreleri | 45 |
| 6.1: Tafel ekstrapolasyonu ile %3,5 NaCl içinde Grade 2 ve Grade 3 çeliği için korozyon ve tribokorozyon koşulları altındaki polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal veriler. | 54 |

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|--------------------------------|---------------------|
| Al ₂ O ₃ | : Alüminyum oksit |
| Cl | : Klor |
| Cu | : Bakır |
| Fe | : Demir |
| M | : Molar |
| mV | : mili Volt |
| N | : Newton (Kuvvet) |
| NaCl | : Sodyum klorür |
| Ni | : Nikel |
| S | : Kayma mesafesi |
| SiC | : Silisyum karbür |
| Ti6Al4V | : Titanyum Grade 23 |
| V | : Volt (Gerilim) |

KISALTMALAR

| | |
|------|-------------------------------------|
| ağ . | : ağırlık |
| AISI | : Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü |
| ASTM | : Amerikan Test ve Malzeme Kuruluşu |
| CE | : Karşıt Elektrot |
| COF | : Sürtünme Katsayısı |
| EDS | : Enerji Dağılımlı İzgeölçümü |
| HSLA | : Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşım |
| MPa | : Mega paskal |
| OCP | : Açık Devre Potansiyeli |
| PDP | : Potansiyodinamik Polarizasyon |
| RE | : Referans Elektrot |
| rpm | : Dakikadaki Devir Sayısı |
| SEM | : Taramalı Elektron Mikroskobu |
| SWE | : Doğal deniz suyu ortamı |
| WE | : Çalışma Elektrotu |

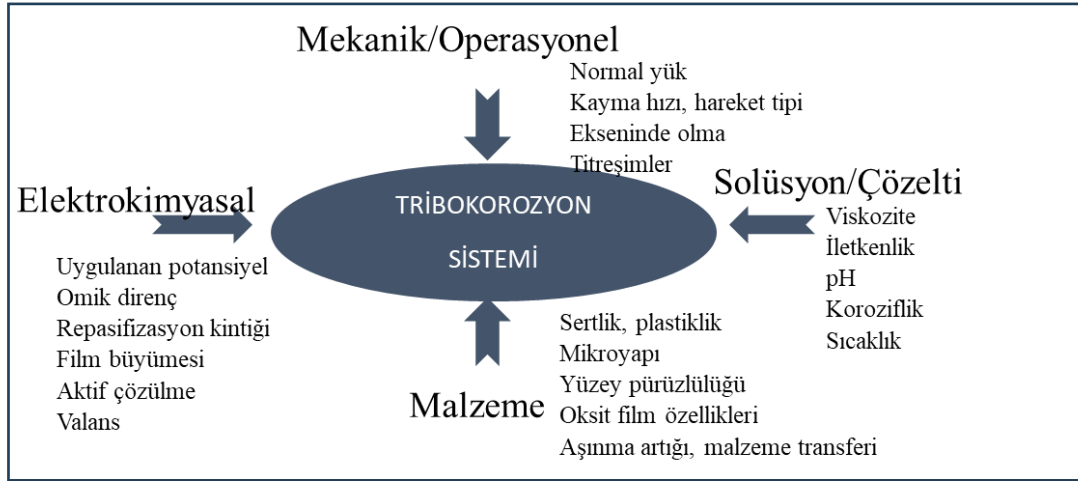
1. GİRİŞ

“Tribokorozyon” terimi, triboloji (sürtünme, aşınma ve yağlama ile ilgilenen bilim dalı) ve korozyon fenomenlerinin birleşimine atıfta bulunur. Tribokorozyon, malzemenin aynı anda hem mekanik aşınma (örneğin sürtünme) hem de kimyasal/biyokimyasal korozyon etkilerine maruz kaldığı durumları ifade eder. Tribokorozif etki, malzeme yüzeyinin hem mekanik aşınma kuvvetleri hem de agresif kimyasal ortamlar tarafından aşındırılması sonucu meydana gelir. Bu iki etki bir araya geldiğinde, her bir etkinin tek başına oluşturduğu hasardan daha büyük bir hasar oluşturabilir. Tribokorozif etkiler, genellikle belirli endüstriyel uygulamalar, biyomedikal implantlar ve deniz yapıları gibi alanlarda önemli bir sorun olabilmektedir. Bu tür durumlar, malzemenin hem yüksek sürtünme kuvvetlerine hem de korozyonu teşvik edebilecek kimyasallara maruz kaldığı yerlerde görülür.

Triboloji ve korozyon bilimlerinden oluşan tribokorozyon, aşınma ve korozyonun eşzamanlı etkisinden kaynaklanan bir malzeme bozulması veya dönüşümüdür. Tribokorozyon hasarı, ayrı ayrı hareket eden her bir faktörün basit bir şekilde birbirine eklenmesinden çok daha şiddetli olmaktadır. Aşınma ve korozyon, sırasıyla mekanik ve elektrokimyasal etkileşimler sonucunda artan malzeme kaybı nedeniyle yüzey hasarına yol açan iki işlemdir (Celis ve Ponthiaux, 2012). Tribokorozyon, malzemelerin durgun koşullar altındakinden daha yüksek bir oranda aşınmasına ve korozyon nedeniyle gelişmiş aşınma süreçlerine neden olan elektrokimyasal süreçlerle mekanik olarak indüklenen etkileşimler arasındaki tribolojik etkileşimi içerir (Wood, 2017). Tribokorozyon, deniz ortamında metalik bileşenlerin aynı anda elektrokimyasal korozyona ve sürtünme aşınmasına maruz kalmasıdır (Sui vd., 2018). Tribokorozyon, bir malzemenin sürtünme ile temas ettiği agresif bir ortamda kimyasal-mekanik bir bozulma süreci olarak da tanımlanabilir. Bu süreç, malzemenin yüzeyindeki pasif filmi hasara uğratarak malzemenin elektrolite maruz kalan alanı arttırabilmektedir (Wang vd., 2020).

Kimyasal ve elektrokimyasal yaklaşımların yanı sıra mekanik ve metalurjik prensipleri etkin kullanmazsak günümüz korozyon sorunlarına çözüm bulmak mümkün değildir. Bu sebeple tribokorozyon şartlarında toplam malzeme kaybını belirlemek için sadece aşınma testleri veya sadece korozyon testleri yeterli değildir (Robert, 2002). Tribokorozyon davranışı elektrokimyasal kontrol altındaki birçok faktöre bağlıdır, en önemlileri Şekil

1.1'de görülmektedir. Elektrokimyasal olarak kontrol edilen tribokorozyon sistemlerinin performansı, dört tip parametrenin etkisindedir: (i) ekipman tasarımı ve iletimi ile ilgili mekanik zorlamalar, (ii) sürtünen metal yüzeylerde hâkim olan elektrokimyasal koşullar, (iii) temastaki çözelti özellikleri ve (iv) ortam ile numune arasındaki karşıt etkinlik (Landolt vd., 2001).



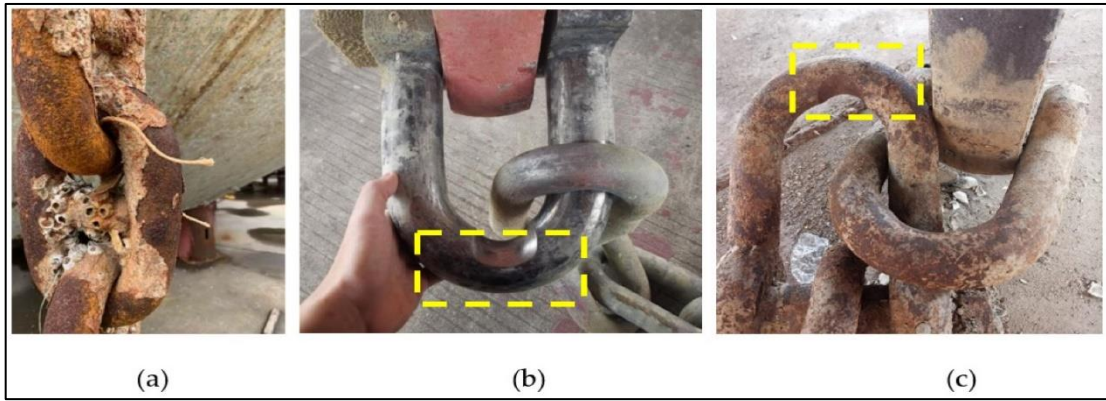
Şekil 1.1: Tribokorozyon sistemini oluşturan ve etkileyen bileşenler (Landolt vd., 2001)

Metalik bileşenlerin sürekli sürtünmesi, fiziksel özelliklerin hızla bozulmasına ve geri dönüşü olmayan hasarlara yol açabilmektedir. Bu süreç mikroskobik düzeyde başlayan ve daha sonra ciddi bir hal alarak nihayetinde kısa sürede makroskobik hasar oluşumuna yol açabilmektedir. Bu süreç sonucunda metalik bileşenlerin yapısal bütünlüğü kaybolur ve mekanik performansı azalır (Zhang vd., 2016).

Deniz suyunun doğal elektrolit özelliğinden dolayı tribokorozyon denizcilik endüstrisi için dikkate alınması gereken oldukça önemli bir problemdir (López vd., 2018a). Denizcilik sektöründe kullanılan ekipmanlar ve sistemler tribokorozyona maruz kalır ve bunun sonucunda performansları ve ömürleri azalır. Örneğin, açık deniz sondaj milleri, rüzgâr ve akıntı türbin dişlileri, ankrajlar, demirleme zincirleri, vinçler, pervaneler, miller, valfler gibi ekipmanlar, soğutma, balast, yakıt devreleri gibi sistemler tribokorozyondan etkilenen parçalardır.

Mekanik yükleme ile birlikte tribokorozyon, denizcilik endüstrisinde farklı demirleme zinciri ve aksesuarlarının hasar görmesinin önemli nedenlerinden biridir (Alkan, 2022).

Demirleme zincirlerinde tribokorozyon zararı, istenmeyen bir sonuç olmasına rağmen, kaçınılmaz bir durumdur. Demirleme zincirinde ortaya çıkan tipik hasar morfoloji Şekil 1.2’de gösterilmiştir (Wang vd., 2022). Şekil 1.2 (a)’da demirleme zincirlerindeki korozyon hasarı, Şekil 1.2 (b)’de atmosferik şartlarda ortaya çıkan saf mekanik aşınma etkileri ve Şekil 1.2 (c)’de ise tribokorozyon etkileri görülmektedir. Tribokorozyondan etkilenen kritik bileşenlerden biri, bir gemiyi sabit bir noktaya bağlamak ve demirlemek için kullanılan gemi demirleme zinciridir. Demirleme zinciri, korozif bir ortamda döngüsel hareketiyle yükleme ve boşaltmanın yanı sıra kayma ve çarpma hareketlerine maruz kalır. Bu faktörler zincirin mekanik özelliklerinin ve performansının bozulmasına yol açabilmektedir. Sonuçta demirleme sistemi yapının güvenliğini ve güvenilirliğini tehlikeye atabilmektedir. Bu nedenle, gemi demirleme zincirlerinin farklı koşullar altındaki tribokorozyon davranışını araştırmak ve malzeme kaybı ve hasarını yöneten mekanizmaları anlamak önemlidir.



Şekil 1.2: Şamandıralar için kullanılan demirleme zincirlerinin tipik hasar morfolojisi.(a) korozyon; (b) aşınma (titanyum, TC4); (c) tribokorozyon, düşük karbonlu çelik (Wang vd., 2022)

Gemi demirleme zincirlerinde yaygın olarak kullanılan yüksek mukavemetli düşük karbon oranlı (HSLA) çelikler, deniz suyu koşullarında aşınma ve korozyon dirençleri açısından yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle, HSLA alaşımların tribokorozyon direncini araştırmak ve deniz suyu temasında dayanıklılıklarını artırmak önemlidir.

López vd., (2018a) açık deniz uygulamalarında kullanılan HSLA çeliklerin korozyon ve tribokorozyon davranışları üzerinde sıcaklığın etkisi incelenmiştir. Çelik numuneler, farklı sıcaklıklarda ASTM 1141 standartına göre sentetik deniz suyu çözeltisinde elektrokimyasal testlere tabi tutulmuştur. Ayrıca, tribokorozyon testleri için bir pim-disk cihazı kullanılmıştır.

Bu çalışma, açık deniz uygulamalarında kullanılan HSLA çeliklerin korozyon ve tribokorozyon performansını iyileştirmek için sıcaklık kontrolünün önemini vurgulamaktadır.

López vd. (2015) sentetik deniz suyunda tek yönlü kayma altında yüksek mukavemetli düşük alaşımlı R4 ve R5 kalite demirleme zincirlerinin tribokorozyon davranışlarını ölçmüştür. Çalışmada aşınma-korozyon sinerjisi ASTM G119 standardına göre ölçülmüştür. Potansiyodinamik testler -1000 mV ila 400 mV arasında 1 mV/s tarama hızı, potansiyostatik testler ise 5 N sabit yükte ve 100 dev/dak'da, 2400 s sürtme süresinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, kaymanın aşınmamış alandaki korozyonu teşvik ettiği ve sürtünme katsayısının korozyon ürünleri ve potansiyelden etkilendiğini göstermiştir.

Wang vd. (2016) yaptıkları çalışmada, Cu-9 ağı. % Ni-6 ağı. % Sn alaşımının, deiyonize su ve ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisi ortamlarında farklı yükler altındaki tribokorozif davranışını araştırmışlardır. Kayma süreçlerinde aşınma ve korozyon süreçleri arasındaki sinerji, bir pin-disk tribometre ile disk üzerinde kayan temaslarda incelenmiştir. Ayrıca, alaşım levhanın mikroyapısı ve tabaka oluşumu, ağırlıkça %3,5 NaCl çözeltisi altında 5 N yük ile detaylı olarak araştırılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda sürtünme katsayısı NaCl çözeltisinde en düşük, kuru kaymada ise en yüksek olmuştur.

Aşınma ve korozyon genellikle malzeme yüzeyiyle doğrudan ilişkili olduğundan alaşımın bileşimini ve yüzeyini incelemek bu sorunları çözmeye yardımcı olabilmektedir. Metal alaşımların tribokorozif özelliklerini geliştirmek amacıyla bu alaşımların yüzey modifikasyonları üzerine yapılan çalışmalar son 20 yılın popüler konularındandır. Literatürde yapılmış çalışmaların çeşitli malzemelerin yüzeylerinin deniz suyu ile etkileşimlerinden dolayı metal alaşımlarının aşınma ve korozyon direnç davranışları önemli ölçüde değiştiği görülmüştür.

Gemi demirleme zincirlerinin performansı, denizcilik sektöründe kritik bir konudur. Bu zincirler, deniz suyu, tuz gibi faktörlerle sürekli yük altında çalışırken, bu ortamın etkileri zamanla zincirlerin yıpranmasına ve performansının düşmesine yol açmaktadır. Dolayısıyla, bu zincirlerin malzeme seçimi, tasarımı ve bakımı, gemi operasyonlarının güvenliği ve etkinliği açısından büyük önem taşımaktadır. Deniz suyu, tuz gibi etmenlerin etkileri, gemi demirleme zincirlerinin mekanik ve korozyon etkiler sebebiyle oluşan kimyasal süreçlerini

olumsuz yönde etkileyebilmekte, bu da malzemenin tribokorozyon yoluyla aşınmasına ve ömrünün kısılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, gemi demirleme zincirlerinde meydana gelen aşınma ve tribokorozyon davranışlarının incelenmesi, daha güvenilir ve uzun ömürlü zincirlerin tasarlanmasına imkân tanımaktadır.

Bu çalışmada Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin tribokorozyon aşınma davranışları incelenmiştir. Numuneler 5 N yük altında ve yüksüz olarak aşınma ve korozyona maruz bırakılmıştır. Korozyon potansiyelinin, katodik korumanın, anodik çözünmenin korozyon davranışına etkisi değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin tribokorozyon ve aşınma davranışları arasında önemli farklar olduğu gözlenmiştir.

2. TRİBOLOJİ

Triboloji, Yunanca “tribos” kelimesinden türetilmiş olan ve sürtünme anlamına gelen bir kelime olup, gerçek çevirisi “sürtme bilimi”dir. Bu nedenle, İngilizce’de popüler olarak kullanılan alternatif terimler sürtünme, aşınma veya yağlama bilimidir. Ancak ikinci terim, triboloji tam olarak kapsamamaktadır (Bhushan, 2013). Triboloji, görelî hareket halindeki yüzeylerin sürtünme, aşınma ve yağlama gibi etkileşimlerini inceleyen bir bilim dalıdır. Triboloji, malzeme bilimi, fizik, kimya, mühendislik ve nanoteknoloji gibi çeşitli disiplinleri içeren interdisipliner bir alandır. Triboloji, sürtünme kuvvetlerinin oluşumunu, sürtünme olaylarının nedenlerini, aşınma mekanizmalarını ve yüzeyler arasındaki etkileşimleri anlamayı amaçlar. Bu bilgi, malzeme seçiminde, tasarımda, yağlama sistemlerinin optimize edilmesinde ve aşınma direnci artırma yöntemlerinin geliştirilmesinde kullanılır. Otomotiv endüstrisi, denizcilik, havacılık, enerji üretimi, madencilik, metalurji, tıbbi cihazlar ve işleme gibi birçok sektör triboloji prensiplerini kullanılmaktadır.

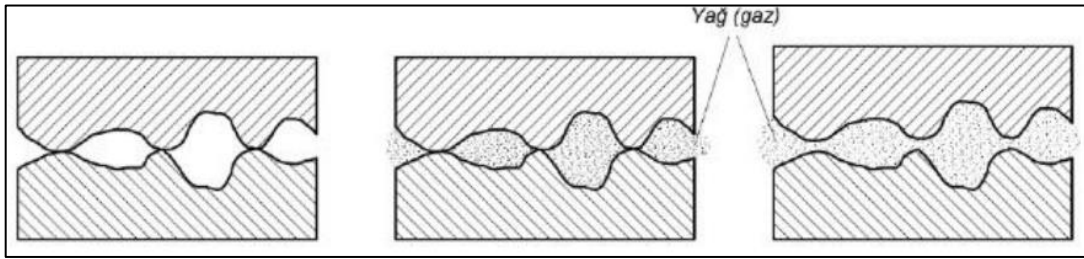
2.1. Sürtünme

Sürtünme kuvveti, iki katı yüzeyin birbirine temas edip biri diğeri üzerinde kaydığında veya yuvarlandığında ortaya çıkan kuvvettir. Sürtünme kuvveti, hareketin tersi yönde etki eder ve hareketi zorlaştırır veya durdurur. Sürtünme kuvvetinin büyüklüğü iki faktöre bağlıdır: İki yüzey arasındaki tepki kuvveti ve iki yüzeyin cinsine göre belirlenen sürtünme katsayısı. Sürtünme kuvvetinin iki temel türü vardır: Kuru sürtünme ve akışkan sürtünmesi. Kuru sürtünme, “Coulomb” sürtünmesi olarak da bilinir ve iki kuru yüzey birbirine göre hareket ettiğinde veya etmeye çalıştığında oluşan sürtünme kuvvetidir. Akışkan sürtünmesi, bir akışkanın içinde hareket eden bir cisim veya akışkanın farklı katmanları arasında oluşan sürtünme kuvvetidir (Bhushan, 2013). Sürtünme türlerinin belirlenmesi, yüzeylerin yağlama koşullarına (ki bunlar yüzey koşulları olarak ifade edilir) ve yüzeylerin birbirine nazaran hareket durumlarına (bu da dinamik koşullar olarak tanımlanır) bağlıdır.

Sürtünme fenomeni, yüzeyler arasında izafi hareketin olup olmamasına ve bir yağlayıcı maddenin varlığına veya yokluğuna bağlı olarak kuru, sınır ve sıvı olmak üzere üç aşamada ele alınır (Owsalou, 2012). Kuru sürtünme, genellikle doğrudan temasta olan ve birbirine göre hareket eden iki yüzey arasında meydana gelen sürtünmeyi ifade eder (Şekil 2.1.a). Bir yağlayıcı maddenin yüzeyler arasına eklenmesiyle, iki durum görülebilir ve asıl sürtünme

yağlayıcı maddenin katmanları arasında gerçekleşir. Bu durumda, sürtünme “sıvı sürtünme” olarak adlandırılır (Şekil 2.1.c). İkinci durumda, yani yüzeyler tamamen ayrılmadığında, bu durum “sınır sürtünmesi (yarı sıvı sürtünme)” olarak adlandırılır (Şekil 2.1.b).

Kuru ya da katı sürtünme, yağsız ve temas eden iki yüzey arasında meydana gelir ve genellikle yüzeylerin pürüzlülüğünden kaynaklanmaktadır. Kuru sürtünme hem kayma hem de yuvarlanma sürtünmesini içerir, yani iki parça birbirine göre hareket ettiğinde, temas yüzeylerindeki pürüzlülük nedeniyle sürtünme oluşur. Araştırmalar, yağlama bölgesindeki yüzey pürüzlülüğünün artmasının, sürtünmeyi artırdığını göstermiştir (Çuvalcı ve Baş, 2004; Güngör, 2016).



Şekil 2.1: Sürtünme Çeşitleri (a) Kuru, (b) Sınır , (c) Sıvı (Akkurt, 1982)

Kuru sürtünme, birbirine dokunan iki yüzey arasındaki direnç türüdür. Bu direnç, hareketi zorlaştırır veya durdurur. Kuru sürtünme genellikle "statik sürtünme" ve "kinetik sürtünme" olarak iki türe ayrılır. Statik sürtünme, nesnelere harekete başlamadan önceki sürtünmeyi temsil ederken, kinetik sürtünme, nesnelere zaten hareket halindeyken oluşan sürtünmeyi temsil etmektedir.

Sınır sürtünme olarak adlandırılan teorik durum, kuru sürtünme ve film sürtünmesi arasındaki bölgeyi tanımlar. Bu alanın kesin sınırları olmamakla birlikte, sınır sürtünmesi ve yarı sıvı sürtünme bölgeleri olarak iki kısma ayrılabilir, ancak literatürde 'sınır sürtünme' terimi kullanılmaktadır. Sınır sürtünme, iki metal yüzey arasına özel bir madde eklenir -bir yağlayıcı- ve belirli yük ve kayma hızı koşullarında sürekli bir yağlayıcı film oluşmadığı varsayılmaktadır (Cesur, 2008).

Sınır sürtünme, yağlayıcı maddenin miktarı ve kalitesine, yüzeylerin sıcaklığına, yüzeylerin basınç ve hız koşullarına ve yüzeylerin malzeme özelliklerine bağlı olarak

değişebilmektedir. Bu nedenle, sınır sürtünme durumunu kontrol etmek ve optimize etmek makine tasarımı ve bakımında önemli bir zorluktur.

Yüzeyler arasında bir yağlayıcı varlığında sürtünme kuvvetinin azaldığı deneylerle kanıtlanmıştır. En uygun tribolojik durum, iç sürtünmesi çok düşük olan ve kesintisiz bir ara katman oluşumuyla gerçekleşmektedir. Bu koşullarda, birbirine göre hareket eden yüzeyler arasında potansiyel olarak oluşabilecek deformasyon ve adeziv dirençler minimize edilir. Doğru yağlayıcı, yani ara tabaka seçimi, sürtünme ve aşınmanın kontrol edilebilir bir duruma getirilmesini sağlamaktadır (Kurtuluş, 2010). Bu film tabakası, geminin hareketine karşı direnci azaltır ve aynı zamanda zincirlerin servis ömrünü uzatmaktadır. Ancak, bu yağlayıcıların düzenli olarak uygulanması ve bakımının yapılması önemlidir, çünkü deniz suyu ve diğer çevresel faktörler zamanla yağlayıcıların etkinliğini azaltarak bozabilmektedir. Film sürtünmesinin anlaşılması ve yönetilmesi, gemi operasyonlarında önemli bir rol oynar ve gemi bakımı ve operasyonlarının kritik bir parçasıdır.

2.2. Aşınma

Aşınma, iki katı yüzeyinin birbirine göre hareket etmesi, yuvarlanması veya çarpışması sonucunda yüzey hasarının veya malzeme kaybının ortaya çıktığı bir olgudur. Çoğu durumda, aşınma yüzeyler arasındaki etkileşimler sonucunda oluşur. Bir sürtünme etkisi gibi aşınma, malzeme özelliği değil, sistem yanıtıdır ve işletme koşulları arayüz aşınmasını etkiler. Yüksek sürtünmeli arayüzlerin yüksek aşınma oranlarına sahip olduğu varsayımı yaygındır, ancak bu her zaman geçerli değildir. Bu varsayım, sürtünme katsayısının aşınmayı belirleyen tek faktör olduğu yanılgısına dayanmaktadır. Oysa aşınma, malzeme özellikleri, yüzey pürüzlülüğü, yük, hız ve sıcaklık gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Bu nedenle, yüksek sürtünmeli arayüzlerin her zaman yüksek aşınma oranlarına sahip olması gerekmemektedir (Bhushan, 2013).

Aşınma olumlu ya da olumsuz olabilmektedir. Kalemle yazma, makineyle işleme, parlatma, tıraş olma gibi kontrollü aşınmayı gerektiren durumlar olumlu aşınma örnekleridir. Aşınma, makine uygulamalarının çoğunda kaçınılması gereken bir sorundur. Rulmanlar, contalar, dişliler, gemi zincirleri ve kamalar gibi parçalar aşınmaya maruz kaldığında performansları ve ömürlerini azalmaktadır. Bileşenler, yüzey aşırı derecede pürüzlü hale geldiğinde veya nispeten az miktarda malzeme çıkarıldığında değiştirilmesi gerekir. Tribolojik sistemler iyi

tasarlandığında, malzeme kaybı çok yavaş ama istikrarlı ve devamlı bir şekilde gerçekleşir. Aşınma parçacığı oluşumu ve dolaşımı, özellikle boşlukların aşınma parçacığı boyutuna göre küçük olduğu makine uygulamalarında, asıl aşınma miktarından daha fazla sorun olabilmektedir (Bhushan, 2013).

Aşınma, aynı zamanda bir malzemenin hizmet ömrünü belirleyen kritik bir faktördür, dolayısıyla aşınmayı etkileyen faktörler üzerine yapılan akademik araştırmalar, mühendislik ve malzeme bilimi alanlarında büyük önem taşımaktadır (Hutchings, 1999; Stachowiak ve Batchelor, 2013).

Aşınmanın etkilerini azaltmak ve kontrol etmek için kullanılan diğer teknikler arasında yüzey mühendisliği bulunur. Yüzey mühendisliği, bir malzemenin yüzey özelliklerini değiştirerek aşınma direncini artırmayı amaçlamaktadır. Örneğin, bir metal yüzeyin sertleştirilmesi, aşınma direncini artırabilmektedir. Bu, yüzeye ısı uygulayarak veya kimyasal bir bileşenle kaplayarak gerçekleştirilir (Stachowiak ve Batchelor, 2013).

Aşınma, mühendislik tasarımlarında ve malzeme seçimlerinde dikkate alınması gereken önemli bir faktördür. Aşınmayı anlamak ve yönetmek, bir malzemenin ömrünü uzatabilmekte ve genel olarak bir sistemin verimliliğini ve güvenilirliğini artırabilmektedir. Bu nedenle, aşınmayı azaltma stratejileri üzerindeki araştırmalar, mühendislik ve malzeme bilimleri alanlarında önemli bir odaktır (Hutchings, 1992).

Aşınma, mekanik ve/veya kimyasal yollarla gerçekleşir ve sürtünmeyle oluşan ısı (veya termal yollar) tarafından hızlandırılır. Aşınma, ortak bir noktaya sahip olan altı ana ve oldukça farklı olguyu içerir. Bunlar:

- Abraziv aşınma,
- Adeziv aşınma,
- Yorulma aşınması,
- Eroziv aşınma,
- Korozyon aşınması,
- Elektrik arkının neden olduğu aşınma.

Yaygın olarak bilinen aşınma biçimleri sürtünme ve sürtünme korozyonunu içerir. Bunlar, aşınmanın adeziv, korozyon ve abrasiv karışımları olup, ayrı mekanizmalar değillerdir. Bazı tahminlere göre, endüstriyel durumlarda görülen aşınmanın üçte ikisi adeziv ve abrasiv aşınma mekanizmalarından kaynaklanmaktadır. Yorgunluk aşınma mekanizması hariç tüm mekanizmalar, malzemenin adım adım çıkarılması yoluyla aşınmaya neden olmaktadır (Bhushan, 2013).

Abrasiv aşınma, iki yüzey arasında hareketin meydana geldiği durumlarda bir malzemenin yüzeyindeki malzemenin sert ve çıkıntılı parçaların veya yüzey üzerindeki yabancı parçacıkların çizilmesi ve çıkarılmasıdır. Bu tip aşınma, malzeme üzerinde çizikler, yivler veya oyuklar şeklinde görünür. Abrasiv aşınma hem mikro hem de makro ölçekte gerçekleşmektedir. Abrasiv aşınma yüksek temas basınçları ve aşırı hareket koşulları altında da gerçekleşmektedir (Bhushan, 2002).

Abrasiv aşınma, bir yüzey üzerindeki yüzey pürüzlülükleri aracılığıyla gerçekleşen bir malzeme kaybı biçimidir. Bu süreç, daha sert bir yüzeyin, daha yumuşak bir yüzey üzerinde hareket etmesi ile meydana gelmektedir. Abrasiv aşınma, iki alt türü içerir: "iki cisim aşınması" ve "üç cisim aşınması". İki cisim aşınmasında, malzeme kaybı, doğrudan iki yüzeyin (biri diğerinden daha sert olan) birbirine sürtünmesi sonucu meydana gelmektedir. Üç cisim aşınmasında ise, bir veya daha fazla sert partikül, iki yüzey arasına girer ve bu yüzeyler arasında hareket ederken malzeme kaybına neden olur. Abrasiv aşınmanın seviyesi, sürtünen malzemelerin sertliği, yüzeyin pürüzlülüğü, yüzeyler arasındaki kuvvet ve hız, ortamın kimyasal yapısı ve sıcaklık gibi bir dizi faktörden etkilenebilmektedir (Stachowiak ve Batchelor, 2005).

Abrasiv aşınma malzemenin erken bozulmasına neden olur ve istenmeyen bir durumdur. Ancak, bazı durumlarda, örneğin taşlama, kesme veya diğer malzeme şekillendirme işlemlerinde, kontrollü bir şekilde kullanılmaktadır. Abrasiv aşınmayı azaltmanın çeşitli yolları vardır. Bunlar arasında malzeme seçimi, yüzey işlemleri, doğru yağlama ve yüksek aşınma direncine sahip malzemelerin kullanılması bulunmaktadır.

Büyük kuvvetlerin iki cismin arayüzüne uygulandığında, arayüz malzemeleri plastik deformasyon geçirir ve yoğun bir biçimde deformasyona uğrayarak pul benzeri bir yapı

oluştururlar. Bu tür aşınma olayına adeziv aşınma adı verilir. Aşırı miktarda yapışma kuvvetleri, sınırlı sayıda temas noktasında soğuk kaynak oluşumunu tetikleyebilmektedir. Soğuk kaynaklanan parça, lokal materyali de koparabilmektedir. Adeziv aşınma, yağlamanın bulunmadığı veya yetersiz olduğu durumlarda, metalden üretilmiş yatak yüzeylerinde ortaya çıkabilmektedir (Katiyar vd., 2020).

İki düzlemsel katı madde -yağlanmış olup olmadıkları fark etmeksizin- birbirleri üzerinde kayarken adhezyon ortaya çıkabilmektedir. Adhezyon, yüzeylerin temas ettiği noktalarda meydana gelir ve yüzey pürüzlülükleri dış kuvvetlere maruz kaldığında plastik şekilde deforme olurlar. Bu, sıvı veya gaz molekülleri ve oksit katmanlarının yüzeyden ayrılmasına neden olmaktadır. Bu temas noktalarında mikro kaynak bağları kurulur. Bu bağlar, kayma hareketi sırasında kopar ve bir yüzeyden ayrılan parçacıkların diğer yüzeye yapışmasına sebep olmaktadır. Kayma devam ettikçe, bu transfer edilen parçacıklar yüzeyde birikir. Bu parçacıklar, transfer edilenlerden, geri transfer edilenlerden veya başka yollarla oluşan gevşek aşınma parçacıklarıdır. Bazıları, tekrarlanan yüklemeler ve gevşek parçacıkların oluşması sonucu ortaya çıkan deşarj sürecinde yorulma kırılması yaşarlar (Rigney vd., 1984).

Adeziv aşınma, iki yüzey arasındaki mekanik temasın sonucu olarak ortaya çıkan bir aşınma türüdür. Bu sürtünme türünde daha yumuşak olan malzemeden mikroskobik parçalar kopar ve daha sert olan yüzeye yapışır veya çevreye dağılır. Adeziv aşınma yüzeyler arasında göreceli bir hareket olduğunda oluşmaktadır. İki yüzey birbirine sürtündüğünde, yüzey pürüzleri birbirine bağlanabilmektedir. Bu bağlanma yüzeyler arasındaki mekanik kuvvetlerin etkisi altında gerçekleşir. Bağlanan pürüzler, yüzeyler arasındaki göreceli hareket devam ettikçe kopma oluşur. Kopan pürüzler daha yumuşak olan yüzeyden gelir ve daha sert olan yüzeye yapışarak çevreye dağılmaktadır.

Bu aşınma türünün derecesi, malzemelerin sertliği, yüzey pürüzlülüğü ve yüzeyler arasındaki mekanik kuvvetlerin büyüklüğü gibi bir dizi faktöre bağlıdır. Ayrıca, yüzeyler arasında bir yağlama madde varsa veya bir koruyucu kaplama uygulanmışsa, adeziv aşınma önemli ölçüde azaltılabilmektedir. Adeziv aşınma makinelerin hareketli parçaları ve yüksek sürtünmeli sistemlerde, örneğin motorlarda, dişli kutularında ve rulmanlarda önemli bir sorundur. Bu tür durumlarda, adeziv aşınma parçaların hızlı bir şekilde aşınmasına ve sonuçta ekipmanın arızalanmasına yol açabilmektedir.

Sonuç olarak, adeziv aşınma, malzemelerin birbirine bağlanması ve sonrasında kopması ile karakterize edilen bir aşınma türüdür. Bu aşınma türü, yüzeyler arasında göreceli bir hareket olduğunda ve bu yüzeyler arasındaki mekanik kuvvetlerin etkisi altında gerçekleşmektedir. Adeziv aşınmanın derecesi, bir dizi faktöre bağlıdır ve bu aşınma türü hareketli parçaları ve yüksek sürtünmeli sistemlerde önemli bir sorun oluşturabilmektedir.

Yorulmalı aşınma, tekrarlanan stres veya yük döngülerinin bir sonucu olarak meydana gelen bir aşınma türüdür. Bu süreç, yüksek yüzey streslerinin ve stres yoğunlaşmalarının bulunduğu durumlarda, yüzeyden başlar. Yorulmalı aşınma üç aşamada gerçekleşir: çatlak oluşumu, çatlak büyümesi ve son olarak çatlak nedeniyle parçanın kırılması. Çatlakların başlangıcı yüzeydeki asperiteler veya mikro yapısal kusurlar oluşmaktadır. Bu çatlaklar daha sonra, her yükleme ve sonrasındaki gevşeme ile malzeme içinde ilerler. Son aşamada, çatlak boyutu malzemenin yorulma dayanımını aşarsa, malzemenin büyük bir bölümü kırılır ve aşırı yüzey aşınması oluşmaktadır. Yorulmalı aşınma yüksek yük altındaki yüzeylerde ve hareketli makine elemanlarında meydana gelmektedir. Yüzey işlemleri ile malzeme yüzeyinin mukavemetini artırmak, daha iyi yağlama sağlamak veya daha düşük stres seviyelerinde çalışmak bu aşınma türünü azaltmanın yolları arasında yer almaktadır (Waterhouse, 1984; Menezes vd., 2008 ;Suresh, 1998).

Yüzey altı ve yüzey yorgunluğu, tekrarlayan yuvarlanma (dikkate alınmayacak kadar küçük sürtünme) ve kayma durumlarında meydana gelmektedir. Sürekli tekrarlanan yüklemeye ve boşaltmaya maruz kalan malzemelerde, yüzeyde veya yüzey altında çatlaklar oluşmakta, bu da belirli bir döngü sayısının ardından yüzeyin kopmasına ve büyük parçaların ayrılmasına neden olmaktadır. Bu, yüzeyde geniş çukurların oluşmasına ve oyuklaşma neden olmaktadır. Bu kritik noktaya kadar, yüzlerce, binlerce veya hatta milyonlarca döngü boyunca, abrasiv veya adeziv mekanizmalardan kaynaklanan aşınmaya kıyasla önemsiz bir aşınma görülür. Bu sebeple, yorgunluk aşınması sonucu çıkarılan malzeme miktarı, kullanışlı bir ölçüm parametresi değildir (Bhushan, 2013).

Yorulma süreci, yüzeydeki ilk hasarla tetiklenir ve mekanik elemanlar titreşimli yükleme veya sürtünme nedeniyle tekrarlanan gerilmelere tabi tutulduğunda, yüzeylerde mikro çatlaklar veya küçük çukurlar meydana gelebilmektedir. Bu durum, değişken yüklere dayanan dişliler, kam milleri, rulmanlar gibi döner elemanlarda yaygın olarak görülür.

Uygulanan yüklerin etkisindeki temas alanları çok küçüktür ve bu yüzeylerde yüksek Hertz basınçları ortaya çıkabilmektedir. Bu basınç, yüzeylerin alt katmanlarında kayma kuvvetleri oluşturmaktadır. Dinamik gerilme koşullarında, malzeme yüzeyinde yorgunluk süreci oluşur. Maksimum kayma gerilmesinin olduğu yerlerde plastik deformasyonlar ve dislokasyonlar nedeniyle minik boşluklar oluşur. Zamanla, bu boşluklar elemanın yüzeyine doğru ilerler ve büyür, yüzeyde küçük oyuklar oluşturur. Bu tür aşınmayı önlemek için malzeme yüzeyini sertleştirmek etkili olmaktadır (Koç, 2007; Başoğul, 2014).

Aşınma mekanizmalarını anlamak ve bu tür yorulma aşınmasını önlemek için mühendisler malzeme seçiminde, tasarımda ve bakımda dikkatli olmalıdırlar. Örneğin, yorulma aşınması bir malzemenin yorulma dayanımı olarak bilinen bir özelliğe bağlıdır. Bu özellik, bir malzemenin ne kadar tekrarlanan stres altında kalabileceğini ve ne kadar süreyle performansını sürdürebileceğini belirlenmelidir. Ayrıca, mühendisler yorulma aşınmasını azaltmak veya önlemek için düzenli bakım ve muayeneler yapmalıdırlar (Callister ve Rethwisch, 2007).

Yorulmalı aşınma malzemeyi düşük verimlilikle çalışmaya zorlar ve ciddi durumlarda, arızalara veya malzeme başarısızlığına neden olabilmektedir. Yorulma, uçak kanatları, otomobil süspansiyon sistemleri ve gemi zincirleri gibi sürekli veya tekrarlayan yükler altında çalışan çeşitli uygulamalarda ortaya çıkan önemli bir sorundur. Gemi zincirleri oldukça yoğun yükler altında çalışır ve sürekli olarak hareket eden, yoğun ve yük altında değişken gerilimler yaşarlar. Bu zincirlerin altındaki mikro çatlakların biçimlerine neden olabilmektedir.

Eroziv aşınma, bir nesnenin yüzeyine katı veya sıvı parçacıklarının çarpması sonucu meydana gelen bir aşınma türüdür. Bu tür aşınma çeşitli makinelerde ortaya çıkar ve tipik örnekleri arasında uçakların toz bulutları arasında uçarken gaz türbini kanatlarının hasar görmesi ve mineral bulamaç işleme sistemlerindeki pompa pervanelerinin aşınması yer almaktadır. Eroziv aşınmanın önlenmesi veya azaltılması için, malzeme özelliklerinin detaylı bir şekilde incelenmesi gerekmektedir, çünkü mekanik dayanıklılık yalnızca aşınma direncini garanti etmemektedir (Stachowiak ve Batchelor, 2013).

Erozyon olarak da bilinen eroziv aşınma, bir malzeme yüzeyinin, sert partiküller taşıyan bir gaz veya sıvı akımının etkisiyle yıpranmasıdır. Eroziv aşınma, malzeme yüzeyindeki kinetik

enerji farkından kaynaklanan temas gerilimlerinin artmasıyla oluşan ve farklı bir yapı gösteren bir abrasiv aşınma türüdür (Tevrüz, 1999; Gelmez, 2012). Bu tür erozyon, abraziv aşınmaya benzer şekilde, ısı ve sentetik yakıt elde etmek için kömür öğütme, dizel, gaz, buhar ve dizel türbinler, akışkan yataklar ve madencilikte kum/su çamuru taşıma gibi işlemlerde yüksek onarım ve yenileme maliyetlerine yol açmaktadır. Partikül hızı ve büyüklüğü, çarpışma erozyon aşınmasının kinetik enerjisini saptar ve bu da aşınma oranının hıza bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Aşınan yüzey ince taneli bir görünüm sergiler ve gevrek kırılma oluşur. Çarpışma açıları düşük olduğunda, kesici aşınma gerçekleşir ve yüzey sertliği aşınmaya karşı önemli bir etken olur. Büyük açılarda ise, aşınma deformasyona bağlıdır ve mekanizma daha karmaşıktır, bu nedenle yumuşak bir malzeme daha uygun olabilmektedir (Gelmez, 2012).

Korozyon aşınması, bir kimyasal aşınma türüdür. Bu aşınma, kayan veya yuvarlanan yüzeyler arasında küçük ve plastik olarak deforme olan temas bölgelerinde meydana gelmektedir. Plastik deformasyon, kristal kafesin bozulmasına ve yüzeyin kimyasal olarak aktif hale gelmesine neden olabilmektedir. Bu da yüzeyin ortamdaki oksijen ile tepkimeye girerek oksitlenmesine yol açmaktadır. Oluşan oksit tabakası, hareketin devam etmesiyle kırılır ve kopan oksit parçacıkları da aşınmaya neden olmaktadır. Sürtünme yüzeylerinin aşınmasını korozyon (oksidasyon) etkileyebilmektedir. Sıcaklık yükseldikçe ve sürtünme oksit tabakasını kopardıkça oksidasyon süreci hızlanır. Sürtünme, yeni oksit tabakası oluşsa bile oksit tabakasının devamlı kaldırılmasına neden olmaktadır. Sert oksit parçacıkları, hareketli döner yüzeyler arasına girer ve yüzeyden uzaklaştırılmaktadır (Güngör, 2016).

2.3. Yağlama

Yağlama, triboloji alanında önemli bir konudur. Yağlama, iki yüzey arasındaki sürtünmeyi azaltmak, aşınmayı önlemek ve parçaların ömrünü uzatmak için kullanılan bir tekniktir. Yağlama bir yağ veya gresin kullanılmasıyla gerçekleştirilir. Yağlama, sürtünme yüzeylerine bir yağ filmi uygulayarak, yüzeyler arasındaki doğrudan teması azaltarak sürtünmeyi azaltmaktadır.

Temiz katı yüzeyler arasında kayma düşük sertlik, yüksek yüzey enerjisi, reaktivite ve karşılıklı çözünürlük gibi yüzeylerin spesifik özelliklerinden dolayı yüksek sürtünme katsayısı ve şiddetli aşınma ile karakterize edilmektedir. Temiz yüzeyler, çevrede bulunan

organik bileşikler gibi yabancı maddelerin kalıntılarını kolaylıkla adsorbe edebilmektedirler. Yeni oluşan yüzeyler temiz yüzeye göre çok daha düşük sürtünme ve aşınma katsayısına sahiptir. Bir kayma işlemi sırasında bir arayüzde yabancı bir madde tabakasının varlığı garanti edilemez; bu nedenle, düşük sürtünme ve aşınma sağlamak için yağlayıcılar bilinçli bir şekilde uygulanır. "Yağlama" terimi iki farklı duruma uygulanır: katı yağlama ve sıvı (sıvı veya gaz) film yağlama (Bhushan, 2013).

Doğru yağlama, uygulamaya ve uygulandığı duruma göre seçilir. Yağlayıcıların ana işlevleri sürtünme ve aşınmayı, arayüzey sıcaklığını ve korozyonu kontrol etmektir. Ayrıca, ara yüzey arasındaki istenmeyen parçacıkların uzaklaştırılması ve sürtünme ve aşınmayı azaltmak için bir sıvı filmi oluşturmak için kullanılabilir. Yağlayıcının hareketini etkileyen çeşitli parametreler vardır. Bunlar fiziksel, kimyasal ve reolojik özellikleridir. Bunun dışında, yüzey sıcaklığı, kontaklar arasındaki basınç ve bağıl hız gibi bazı harici parametrelere de bağlıdır (Katiyar vd., 2020).

Gemi zincirlerinde yağlamanın amacı, zincirlerin aşınmasını, korozyonunu ve gürültüsünü azaltmaktır. Yağlama, zincirlerin hareketli parçaları arasında bir film tabakası oluşturarak sürtünmeyi ve ısınmayı önler. Sürtünme ve ısınma, zincirlerin kopma veya gevşeme riskini artırmaktadır. Ayrıca, yağlama, zincirlerin su ve tuz gibi dış etkenlere karşı korunmasını sağlar. Su ve tuz, zincirlerin metal yapısını zayıflatabilmektedir. Yağlama, gemi zincirlerinin ömrünü uzatır ve performansını artırır.

3. TRİBOKOROZYON

Tribokorozyonun tarihçesi, ilk olarak 19. yüzyılda metalik malzemelerin aşınma ve korozyon davranışlarının incelenmesiyle başlar. 20. yüzyılda ise tribokorozyonun temel fiziksel ve kimyasal prensipleri ortaya konmuş ve tribokorozyon test yöntemleri geliştirilmiştir. Tribokorozyon, birçok endüstriyel ve biyomedikal alanda görülen bir olgudur. Örneğin, denizcilik, enerji üretimi, madencilik, otomotiv, havacılık, diş hekimliği ve ortopedi gibi alanlarda tribokorozyonun önemli bir sorun olduğu bilinmektedir.

Tribokorozyon, yüzeylerin aşınması ve korozyonu arasındaki etkileşimi ifade eden bir terimdir. Tribokorozyon, malzeme kaybına, mekanik özelliklerin bozulmasına ve yüzey kalitesinin azalmasına neden olabilmektedir. Aşınma ve korozyon, sırasıyla mekanik ve elektrokimyasal işlemler sonucunda artan malzeme kaybı nedeniyle yüzey hasarına yol açan iki işlemdir. Bu iki bozunma süreci aynı anda meydana geldiğinde tribokorozyon olarak adlandırılır. Tribokorozyon, bir malzemenin tribolojik bir temas sırasında hem fiziksel hem de kimyasal yüzey değişimlerine maruz kalması sonucu oluşan kalıcı bir değişimdir. Tribokorozyon olaylarını araştırmak için elektrokimyasal yöntemler çok uygundur, çünkü korozif çevrenin etkisini sabit bir potansiyel uygulayarak simüle edebilirler. Ayrıca, anodik akımın kaydedilmesi, mekanik aşınma yoluyla değil, oksidasyon yoluyla kaybedilen malzeme miktarını saptama imkânı sağlar (Celis ve Ponthiaux, 2017; Landolt ve Mischler, 2011; López vd., 2015; Siddaiah vd., 2021).

Tribokorozyon, endüstriyel alanlardan günlük hayata kadar geniş bir yelpazede etkisini gösteren önemli bir fenomen olarak karşımıza çıkmaktadır. Malzemelerin sürtünme ve aşınma sonucunda yüzeylerinde meydana gelen deformasyonlar, çeşitli faktörlerin etkisiyle gerçekleşir ve uzun vadede malzeme performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle, tribokorozyonun temel prensiplerini anlamak ve bu alanda etkin önlemler almak, malzeme dayanıklılığı açısından büyük bir önem taşımaktadır.

Tribokorozyon, mühendislik ve malzeme bilimi açısından incelenen bir fenomen olup, sürtünme ve aşınma sonucunda malzemelerin yüzeylerinde ortaya çıkan deformasyonlar ve bozulmaları ifade eder. Tribokorozyon, endüstriyel sistemlerdeki parçaların performansını ve ömrünü etkileyen, dolayısıyla da araştırma ve geliştirme çalışmalarına ihtiyaç duyulan önemli bir alandır.

Tribokorozyon, mekanik yüklerin etkisi altında gerçekleşirken, çeşitli faktörlerin bir araya gelmesi sonucunda ortaya çıkar. Bunlar arasında yüzeylerin temas basıncı, hareket hızı, sıcaklık, yağlama ve koruyucu kaplamalar gibi faktörler bulunur. Tribokorozyonun sonuçları arasında malzeme kaybı, yüzey pürüzlülüğünde artış, sürtünme kuvvetlerinde artış ve hatta sistem arızaları yer alabilmektedir. Tribokorozyonun etkilerini anlamak ve önlemek için malzeme seçimi, yağlama teknikleri, kaplama yöntemleri ve tasarım optimizasyonu gibi stratejiler kullanılır. Bununla birlikte, tribokorozyonun karmaşık bir olay olması nedeniyle, sürekli olarak yeni araştırmalar yapılmakta ve daha etkili çözümler geliştirilmektedir. Bu nedenle, tribokorozyon konusunda derinlemesine bir anlayışa sahip olmak ve güncel gelişmeleri takip etmek, mühendislik uygulamalarında ve endüstriyel sistemlerde daha dayanıklı ve verimli çözümler sunmak açısından önemlidir.

3.1. Denizcilik Endüstrisinde Tribokorozyon

Tribokorozyon, denizcilik, havacılık ve biyomedikal gibi çeşitli alanlarda karşılaşılan ve üzerinde dikkatle durulması gereken önemli bir olaydır. Özellikle deniz ortamında, tribokorozyonun zararlı etkileri daha fazla hissedilmektedir. Denizcilik endüstrisinde kullanılan metal malzemeler, deniz suyu ile sağlanan elektrolit ortamında sürekli olarak tribokoroziye koşullara maruz kalmaktadır. Bu koşullar, malzeme kaybına, hasara, arızaya, kazaya, çevre kirliliğine ve yüksek işletme maliyetlerine neden olabilmektedir. Bu nedenle, tribokorozyonun nasıl çalıştığını, denizcilik sektöründe hangi alanlarda tribokorozyon meydana geldiğini ve bununla nasıl mücadele edilebileceğini anlamak büyük önem taşımaktadır. Denizcilik sektöründe tribokorozyonun en çok görüldüğü alanlardan bazıları şunlardır: Pompalar, gemi demirleme zincirleri, pervaneler, valfler, borular, bağlantı elemanları ve gemi gövdeleri. Bunların yanı sıra, tribokorozyon denizaltılar, sondaj platformları, rüzgâr türbinleri, deniz canlıları ile temas eden deniz enerjisi sistemleri ve biyomedikal implantlar gibi diğer uygulamalarda da karşılaşılan bir sorundur (Landolt ve Mischler, 2011; Mischler, 2008).

Deniz suyu tribokorozyonu kimyasal, fiziksel ve biyolojik etmenlerin bir araya gelmesiyle oluşan karmaşık bir süreçtir. Bu etmenlerden en önemlileri şunlardır:

Çözünmüş oksijen konsantrasyonu: Aktif metallerin korozyon oranını yükseltirken, pasif metallerin koruyucu oksit tabakasının hasar görmesine neden olur. Çözünmüş oksijen

konsantrasyonu, deniz suyunun sıcaklığına, tuzluluğuna ve akış hızına bağlı olarak değişir. Genellikle sıcaklık arttıkça çözülmüş oksijen azalır, tuzluluk arttıkça çözülmüş oksijen artar, akış hızı arttıkça çözülmüş oksijen yüzeye daha fazla taşınır.

Biyofilm oluşumu: Deniz suyunda yaşayan mikroorganizmaların yüzeye yapışmasıyla oluşur. Yüzeydeki pürüzlülüğü ve sürtünmeyi artırarak veya mikrobiyolojik reaksiyonlarla korozyona katkıda bulunur. Biyofilm oluşumu, deniz suyunun sıcaklığına, tuzluluğuna, pH seviyesine ve besin maddelerine bağlı olarak değişir. Sıcaklık arttıkça biyofilm oluşumu artar, tuzluluk azaldıkça biyofilm oluşumu artar, pH seviyesi nötre yaklaştıkça biyofilm oluşumu artar, besin maddeleri arttıkça biyofilm oluşumu artar.

Sıcaklık: Hem çözülmüş oksijen konsantrasyonunu hem de biyofilm oluşumunu etkileyerek korozyon üzerinde rol oynar. Sıcaklık arttıkça kimyasal reaksiyon hızları da artar, bu da korozyonu hızlandırır. Sıcaklık ayrıca malzemenin mekanik özelliklerini de değiştirir, örneğin gerilme direncini ve elastikiyet modülünü azaltır, bu da malzemenin korozyona karşı dayanımını düşürür.

Akış hızı: Tribokorozyon mekanizmalarına bağlı olarak erozyon korozyonu, sıvı darbesi, kavitasyon gibi durumlarda malzeme kaybının ana sebebidir. Akış hızı arttıkça yüzeydeki aşınma da artar, bu da koruyucu oksit tabakasının hasar görmesine ve metalin daha fazla maruz kalmasına neden olur. Akış hızı ayrıca çözülmüş oksijen taşınmasını ve biyofilm oluşumunu da etkiler.

Tuzluluk: Deniz suyunun iyonik aktivitesi, korozyon mekanizmalarının anlaşılmasında önemli bir parametre olarak kabul edilir. Tuzluluk arttıkça, deniz suyunun elektriksel iletkenliği de artar, bu da elektrokimyasal reaksiyonları hızlandırabilmektedir. Bununla birlikte, tuzluluk, çözülmüş oksijen konsantrasyonunu ve biyofilm oluşumunu da etkileyerek, bu faktörlerin korozyon üzerindeki kompleks etkileşimlerini daha da karmaşık hale getirebilmektedir.

Deniz suyu, içinde bulunan iyonlar sebebiyle temas ettiği malzemeleri yıpratıcı ve aşındırıcı bir şekilde etkilemektedir. Bu durum, gemilerin demirleme zincirleri ve petrol platformları gibi deniz suyu ile sürekli ilişki içinde olan yapılar için önemli bir sorundur. Bu yıpratıcı

etkinin sonucunda malzemelerde hasarlar ve kayıplar oluşmakta, bu da ciddi ekonomik maliyetlere neden olabilmektedir.

Deniz ortamı, gemilerin malzeme yapısını bozan korozif bir etkiye sahiptir. Gemiler hem genel hem de bölgesel olarak yıpranırlar. Bu problemlerden kurtulmak için gemilerde anotlar gibi çözümler uygulanır, fakat malzeme türü de çok kritiktir.

Gemi demirleme zincirlerinde, deniz suyu ile temas eden metal yüzeylerde aşınma, korozyon ve bunların birleşimi olan tribokorozyon olayları görülmektedir. Tribokorozyon, yüzeydeki mekanik ve kimyasal etkileşimler sonucunda malzemenin hacim ve ağırlık kaybına uğramasıdır. Gemi demirleme zincirlerinde tribokorozyon, zincirin mukavemetini azaltmakta, ömrünü kısaltmakta ve güvenlik riski oluşturmaktadır. Bu problemin çözümü için, tribokorozyon mekanizmalarının anlaşılması, doğru zincir malzemesinin seçimi, uygun yüzey işlemleri ve koruyucu kaplamalar gibi yöntemler geliştirilmelidir.

Gemi demirleme zincirlerinde tribokorozyon, sürtünme ve korozyonun birlikte oluşturduğu bir yıpranma mekanizmasıdır. Bu mekanizma, zincirlerin demirleme esnasında temas halinde olduğu yüzeyler arasındaki sürtünme ve hareketten kaynaklanmaktadır. Sürtünme, yüzeylerde aşınmaya ve metal parçacıklarının kopmasına sebep olurken, bu parçacıklar oksijen ve su ile reaksiyona girerek korozyona uğrarlar.

Tribokorozyon, gemi demirleme zincirlerinde çeşitli sorunlara yol açabilmektedir. Bunlar şunlardır:

Malzeme Kaybı: Sürtünme ve korozyonun etkisiyle, zincirlerin metal yüzeyinde malzeme kaybı meydana gelir. Bu, zincirlerin mukavemetini düşürür ve ömrünü kısaltır.

Zayıflama: Tribokorozyon, zincirlerin yapısal bütünlüğünü bozarak sürtünme ve korozyon sonucu oluşan çatlaklar ve aşınmalar, zincirlerin zayıflamasına ve kopmasına neden olabilmektedir.

Güvenlik Riski: Tribokorozyon nedeniyle zayıflayan zincirler, demirleme sırasında başarısızlık gösterebilmekte ve geminin güvenliğini riske atabilmektedir. Bu, demirleme esnasında istenmeyen kazalara ve gemi hasarına sebep olabilmektedir.

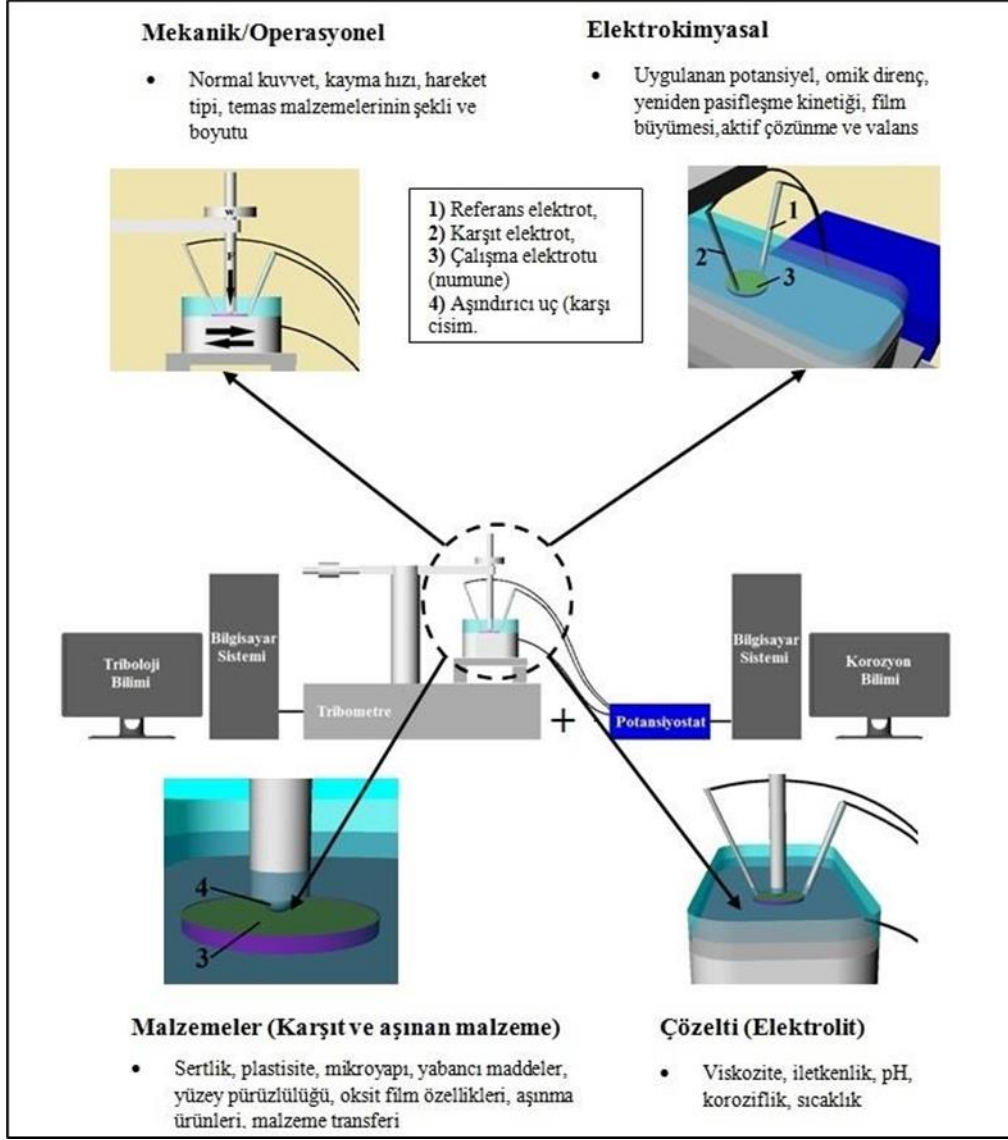
3.2. Tribokorozyon Sistemi

Elektrokimyasal, mekanik/operasyonel, malzeme ve elektrolit özellikleri tribokorozyon çalışmalarında önemli bir rol oynar ve farklı karmaşık parametrelerin incelenmesini gerektirir. Tribokorozyon araştırmalarında kayma temaslı aşınma koşullarında kullanılan temel parametreler ve deneysel kurulum Şekil 3.1'de sunulmuştur.

Tribokorozyon olayı, bir malzemenin çalışma ortamında aşınma ve korozyon mekanizmalarının aynı anda etkileşerek yapısının bozulmasına ve hasara uğramasına neden olan olay olarak tanımlanabilmektedir. Tribokorozyon, mekanik yüklerin ve kimyasal faktörlerin bir arada olduğu çalışma ortamlarında ekipman ve parçaların çevresiyle etkileşerek hasar oluşumuna yol açan bir mekanizmadır. Tribokorozyonda malzemeler yalnızca aşınma veya yalnızca korozyon mekanizmalarına maruz kalmazlar, aynı zamanda her iki mekanizmaya da aynı anda maruz kalırlar (Landolt ve Mischler, 2011; Ponthiaux ve Celis, 2021; Siddaiah vd., 2021).

Tribokorozyon sistemi, yüzeydeki malzemenin aşınma ve korozyon etkileri altındaki kaybını tanımlayan bir terimdir. Tribokorozyon sistemi, malzemenin mekanik ve kimyasal özelliklerini, yüzeydeki gerilimleri, ortamın kimyasal bileşimini ve sıcaklığını, temas halindeki cisimlerin hareketini ve yükünü içeren karmaşık bir olaydır.

Tribokorozyon mekanizmaları, yüzeydeki malzemenin kimyasal olarak çözünmesi, mekanik olarak aşınması veya her ikisinin birleşmesi şeklinde olmaktadır. Kimyasal çözünme, malzemenin ortamda çözünebilir ürünlere dönüşmesi veya pasif bir film oluşturmasıdır. Mekanik aşınma, yüzeydeki malzemenin temas halindeki cisimler tarafından koparılması veya sürtünmesidir. Kimyasal ve mekanik etkiler birlikte çalışarak tribokorozyonu hızlandırabilmekte veya yavaşlatabilmektedir.



Şekil 3.1: Tribokorozyon çalışmalarında temel parametreler ve deney düzeneği (Alkan, 2019)

Tribokorozyon, triboloji ve korozyonun birleşiminden oluşan bir aşınma ve korozyon hasarı mekanizmasıdır. Tribokorozyon, metalik malzemelerin yüzeylerinde, özellikle sürtünme ve aşınma koşullarının etkili olduğu ortamlarda meydana gelir.

Tribokorozyon mekanizması, şu şekilde gerçekleşir:

Aşınma: İki yüzey birbirine sürtündüğünde, mekanik aşınma meydana gelir. Bu süreçte, malzeme yüzeyindeki atomlar veya moleküller kopabilmekte, yüzeydeki topografya değişerek ve malzeme kaybı oluşmaktadır.

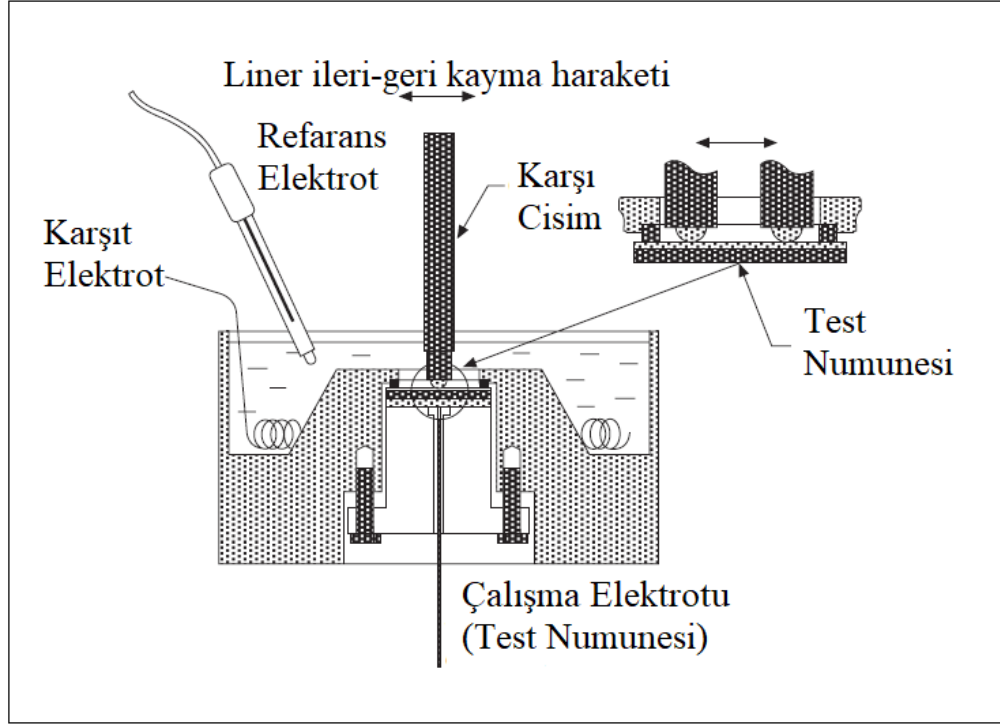
Korozyon: Sürtünme ve aşınma sonucunda, malzeme yüzeyi açığa çıkar ve korozyon etkenlerine daha kolay maruz kalır. Ortamdaki nem, oksijen, asitler, tuzlar gibi korozyon etkenleri, açığa çıkan yüzeyde kimyasal reaksiyonlara neden olarak malzemeyi korozyona uğratmaktadır.

Pasif Film Tabakası: Pasif film tabakası, metalik malzemelerin yüzeyinde doğal olarak oluşan ve korozyona karşı koruyucu bir etkiye sahip olan ince bir oksit tabakasıdır. Tribokorozyon koşullarında, sürtünme ve aşınma nedeniyle bu tabaka hasar görerek malzemenin korozyon direnci azalabilmektedir.

Sonuç olarak, tribokorozyon mekanizması, sürtünme ve aşınma nedeniyle metalik malzemenin yüzeyinde oluşan kayıpları artırırken, korozyonun da hızlı bir şekilde etkisini göstermesine neden olur. Bu tür mekanizma özellikle endüstriyel ekipmanlar, makine parçaları ve sürtünmeli sistemler gibi uygulamalarda önemli bir sorun olarak malzeme ömrünü ve performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Metalik malzemelerde, tribokorozyon mekanizması aşınma ve korozyon hasarlarına yol açmaktadır. Bu mekanizma, malzemenin yüzeyindeki pasif film tabakasının kısmen aşınması ve bu aşınmış bölgelerin hızlı bir şekilde korozyona uğramasıyla ortaya çıkmaktadır. Korozyon mekanizması başladıktan sonra, yüzeyde yeniden pasif tabaka oluşur. Ancak, korozyon sonucu oluşan pasif oksit tabakası kırıldığında, seramik içerikli parçacıklar aşındırıcı etki yapar, böylece aşınmayı hızlandırır ve malzeme kaybını artırır. Bununla da kalmaz, aşınma sürecinde, karşı yüzeyden kopan parçacıklar korozyon mekanizmasının hızında azalmaya neden olabilmektedir (Ponthiaux ve Celis, 2021; Siddaiah vd., 2021).

Tribokorozyon, malzeme kaybına, yüzey özelliklerinin değişmesine ve performansın düşmesine neden olabilmektedir. Tribokorozyon test yöntemleri, tribokorozyonun meydana geldiği ortamları ve koşulları taklit ederek, malzemelerin tribokorozyon davranışlarını ölçmek için kullanılır. Tribokorozyon test yöntemleri, tribolojik parametreleri (örneğin sürtünme kuvveti, aşınma oranı, yüzey pürüzlülüğü) ve elektrokimyasal parametreleri (örneğin potansiyel, akım, korozyon oranı) bir arada kaydedebilir. Tribokorozyonun önlenmesi veya azaltılması için, tribokorozyona dayanıklı malzemeler seçmek ve yüzey işlemleri uygulamak önemlidir. Malzeme seçimi, tribokorozyon ortamının özelliklerine, malzemenin mekanik ve kimyasal özelliklerine ve malzemenin uygulama alanına göre yapılmalıdır. Yüzey işlemleri, yüzeyin sertliğini, pürüzlülüğünü, kimyasal bileşimini ve

morfolojisini değiştirerek tribokorozyon direncini artırabilmektedir. Yüzey işlemleri arasında kaplama, alaşımlama, ısıl işlem, lazer işlem, iyon implantasyonu gibi yöntemler bulunmaktadır.



Şekil 3.2: Çift yönlü kayma testi için tribokorozyon hücre (Azzi ve Sapieh,2011)

Tribokorozyon sisteminin Şekil 3.2’de de şematik gösterimi, triboloji ve korozyonun birleştiği karmaşık bir süreci ifade etmektedir. Bu şematik gösterim tribokorozyon mekanizmasının temel özelliklerini ve etkileşimlerini göstermeye yöneliktir. Şematik olarak gösterildiğinde, aşağıdaki unsurlar yer almaktadır:

Tribosistem: Tribokorozyon, tribosistem olarak adlandırılan bir mekanizma içinde gerçekleşir. Tribosistem, sürtünme ve aşınma koşullarının bulunduğu yüzeyler, temas eden malzemeler ve aralarında oluşan etkileşimleri içerir.

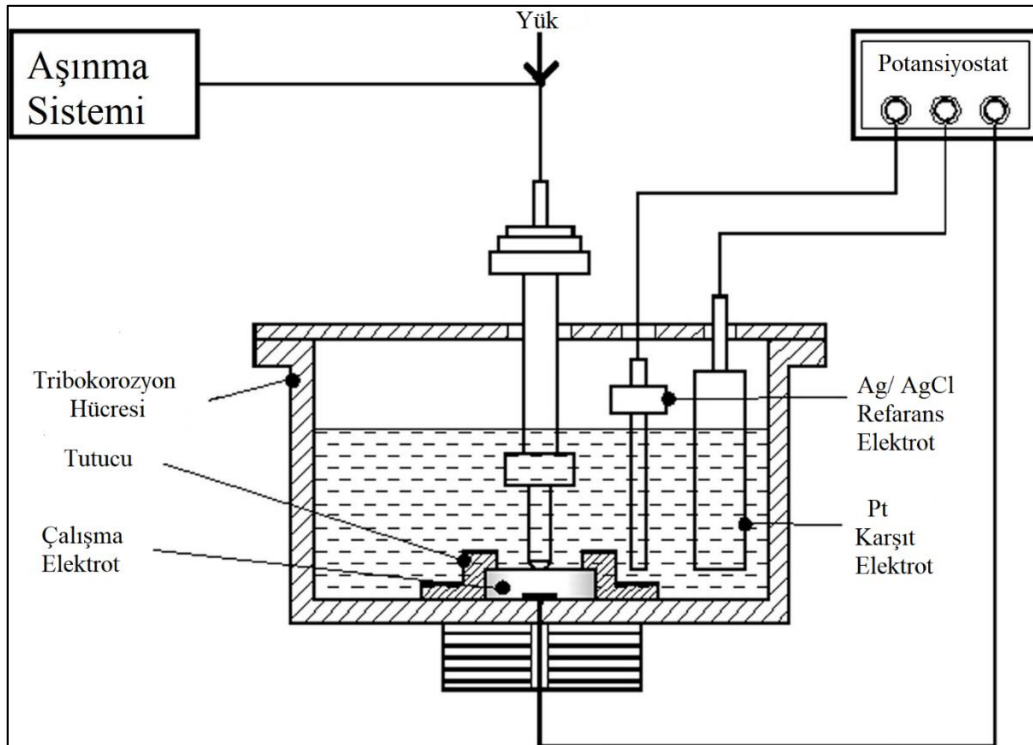
Mekanik Etkiler: Şematik gösterimde, tribosistemde uygulanan mekanik etkiler temsil edilir. Bu mekanik etkiler, sürtünme, yük altında kayma, çarpma veya sürtünme yüzeylerinin teması gibi faktörleri içermektedir.

Elektrokimyasal Ortam: Tribokorozyon, elektrokimyasal bir ortamda gerçekleşir. Bu elektrokimyasal ortam, malzemelerin temas ettiği ortamdaki korozyon etkenlerini ve kimyasal reaksiyonları ifade eder. Suya maruz kalma, asitler, tuzlar ve diğer kimyasal bileşenler bu etkenlere örnek olarak verilebilir.

Aşınma: Tribosistemdeki mekanik etkiler sonucunda malzeme yüzeyinde aşınma meydana gelir. Bu süreçte, malzemenin yüzeyindeki atomlar veya moleküller koparak malzeme kaybı oluşturmaktadır.

Korozyon: Elektrokimyasal ortamda malzeme yüzeyinde korozyon gerçekleşir. Korozyon, malzemenin kimyasal olarak çözünerek zarar görmesine neden olmaktadır.

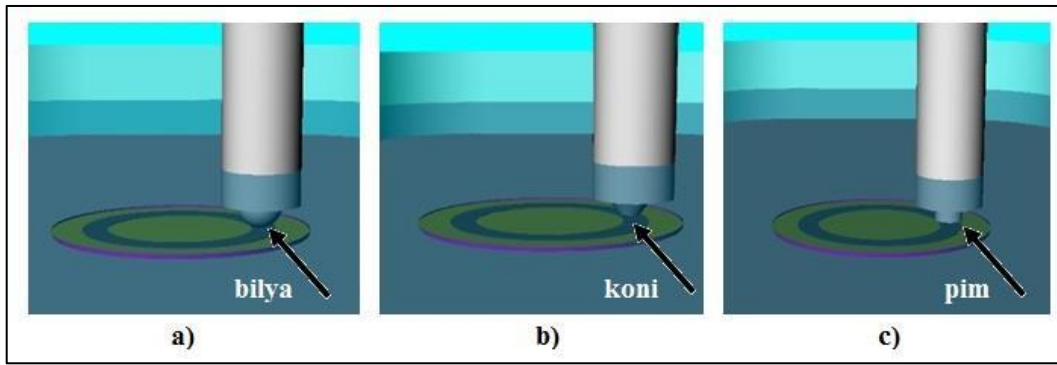
Tribokorozyon Etkileşimi: Tribokorozyon, aşınma ve korozyonun birbirleriyle etkileşim içinde olduğu bir mekanizmadır. Aşınma sonucu ortaya çıkan seramik içerikli partiküller, korozyon sürecini hızlandırarak aynı zamanda aşınmayı artırabilmektedir. Bu etkileşim tribokorozyonun karakteristik özelliğidir.



Şekil 3.3: Tribokorozyon sisteminin şematik gösterimi (Priya vd., 2014)

Şekil 3.3'teki şematik gösterim, tribokorozyonun temel işleyişini anlamak ve bu mekanizmanın neden olduğu hasarları incelemek için kullanışlı bir araçtır. Ayrıca, malzeme tasarımı, kaplama teknikleri ve tribokorozyon önleme stratejileri gibi alanlarda araştırmalar için temel bir başlangıç noktası sağlar.

Tribokorozyon çalışmalarında, bu farklı geometrilerin kullanılması sonuçları etkileyebilmekte ve farklı aşınma ve korozyon davranışlarına neden olabilmektedir. Bu nedenle, karşıt cismin seçimi ve geometrisi dikkatlice düşünülmelidir ve çalışma elektrotu ile uyumlu olacak şekilde alümina gibi inert malzemeler tercih edilmelidir. Bu sayede, tribokorozyon çalışmalarında daha güvenilir sonuçlar elde edilebilmekte ve malzeme performansı ve dayanıklılığı hakkında daha doğru bilgiler elde edilmektedir. Şekil 3.1'de farklı karşıt cisim geometrileri verilmiş, bunlar bilya, koni ve pim şeklindedir (Alkan, 2019).



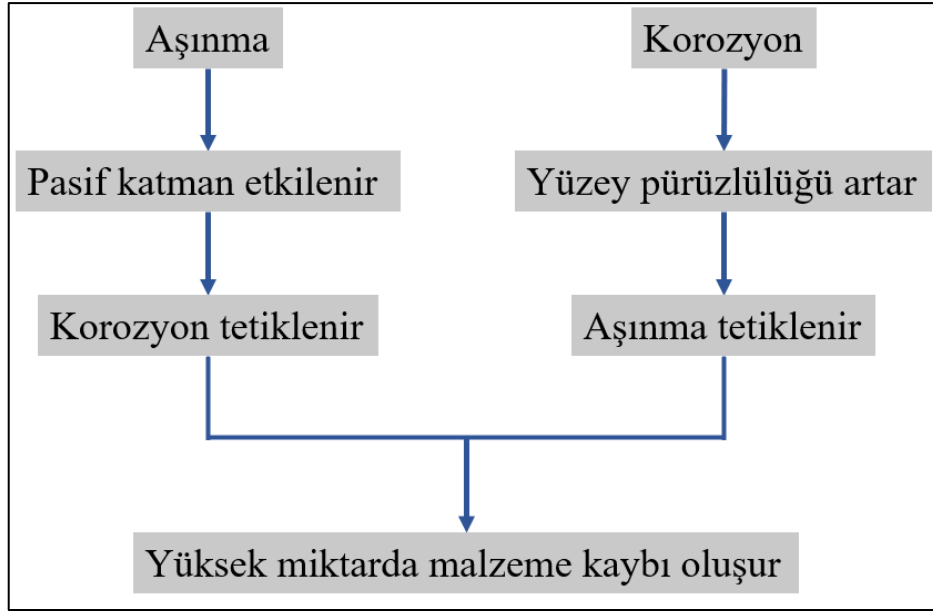
Şekil 3.4 : Kayma temasında karşıt cisimlerin temas geometrileri a) bilya (ball-on-disk), b) koni, c) pim (pin-on-disk) (Alkan, 2019)

3.3. Tribokorozyonda Aşınma-Korozyon Sinerjisi

Tribokorozyon çalışmalarında, malzeme, elektrokimyasal, mekanik/operasyonel ve elektrolit özellikleri arasındaki etkileşimlerin birleşmesiyle karmaşık bir tribokorozyon sistemi oluşur. Tribokorozyon sisteminde, elektrokimyasal korozyonun ve mekanik aşınmanın birbirleriyle etkileşimi, "sinerji" olarak adlandırılan ekstra malzeme kaybına yol açmaktadır (Alkan, 2019).

Tribokorozyon sinerjisi, iki malzemenin korozif bir ortamda birbirine sürtünmesi durumunda, yüzey özelliklerini değiştirerek mekanik aşınma ve korozyon davranışlarını etkiler. Bu süreçte, değişen korozyon, aşınma sürecini değiştirmektedir. Aktif-pasif bir

malzemede tribokorozyon süreci şu şekildedir. Yüzeydeki pasivasyon tabakasını etkileyen mekanik aşınma, korozyonu desteklerken, aynı zamanda korozyon da yüzeyi daha pürüzlü hale getirir ve bu durum mekanik aşınma için daha ciddi bir durum oluşturmaktadır. Sonuç olarak, her iki etkileşim de birleşerek önemli miktarda malzeme kaybına yol açmaktadır (Beadling vd., 2021; Kuiry, 2012).



Şekil 3.5: Tribokorozyon Sinerjisi (Özekinci, 2022)

Tribokorozyonda aşınma-korozyon sinerjisi, iki veya daha fazla yüzeyin birbirine sürtünmesi sonucu oluşan aşınma ile kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan tribokorozyonun bir arada gerçekleşmesi durumudur. Bu durum, yüzeylerin malzeme kaybını ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Tribokorozyon, birçok endüstriyel uygulamada karşılaşılan bir sorundur. Örneğin, deniz suyu altında çalışan makine parçaları, biyomedikal implantlar, enerji üretim sistemleri ve madencilik ekipmanları tribokorozyona maruz kalmaktadır. Bu uygulamalarda tribokorozyonun neden olduğu malzeme hasarı, performans düşüklüğü, güvenlik riski ve ekonomik kayıplara yol açabilmektedir. Tribokorozyonun mekanizmalarını, etkileyen faktörleri ve önlenmesi için alınabilecek tedbirleri anlamak, malzeme seçimi, tasarım ve bakım açısından önemlidir. Tribokorozyon, metalik malzemelerin yanı sıra polimerler, seramikler ve kompozitler gibi diğer malzeme sınıflarını da etkileyebilmektedir.

Tribokorozyonun mekanizmaları, etkilenen malzemenin türüne, yüzey özelliklerine, sürtünme koşullarına ve çevresel faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Tribokorozyonun önlenmesi veya azaltılması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları şunlardır:

Malzeme seçimi: Tribokorozyona karşı dirençli malzemelerin kullanılması, örneğin paslanmaz çelikler, alüminyum alaşımları, titanyum alaşımları, nikel alaşımları, seramikler veya kompozitler.

Yüzey işlemleri: Yüzeyin tribokorozyona karşı koruyucu bir tabaka ile kaplanması, örneğin anotlama, galvanizleme, krom kaplama, boyama, kaplama.

Tasarım optimizasyonu: Sürtünme kuvvetlerinin ve temas alanlarının azaltılması, örneğin uygun şekil, boyut, tolerans ve hizalama seçimi.

Sürtünme ortamının iyileştirilmesi: Korozyonu önleyici veya inhibe edici katkı maddeleri içeren yağlayıcılar, soğutucular veya koruyucu gazlar kullanılması (Landolt ve Mischler, 2011).

Tribokorozyonun, düşük mekanik sürtünme şartları altında meydana geldiği ve pasivasyon tabakasının zarar görmediği hafif aşınma koşullarında da oluştuğu düşünülmektedir. Hafif aşınma şartlarında, pasivasyon süreci, pasivasyon tabakasının zarar görmesi ve ardından yeniden oluşmasını içeren dinamik bir süreç olarak açıklanmaktadır. Pasivasyon tabakasının bozulması ve yeniden oluşması arasındaki enerji farkı, pasivasyon tabakasının büyümesini ve özelliklerini belirlemektedir (Özekinci, 2022).

Tribokorozyonda malzeme kayıplarının belirlenmesi için dört ana veri analizi yaklaşımı oluşturulmuştur: Sinerjik yaklaşım, mekanik yaklaşım, üçüncü cisim yaklaşımı ve nanokimyasal aşınma yaklaşımı. Sinerjik yaklaşım, tribokorozyon deney verilerini analiz etmek için en iyi ve en yaygın olarak kabul edilen yöntemdir. ASTM G119 standardı bu teorik yaklaşımı temel almaktadır.

3.4. Tribokorozyonda Elektrokimyasal Yaklaşımlar

Tribokorozyonun elektrokimyasal yaklaşımları, tribokorozyon sürecini anlamak ve kontrol etmek için elektrokimyasal ölçümler ve modeller kullanır. Elektrokimyasal yaklaşımlar, tribokorozyonun etkilediği malzemelerin elektrokimyasal potansiyelini, akımını, direncini, empedansını ve gürültüsünü ölçerek tribokorozyon oranını, mekanizmasını ve parametrelerini belirlemeye çalışır. Elektrokimyasal yaklaşımlar, tribokorozyonun farklı ortamlarda, farklı yüklerde ve farklı malzemelerde nasıl davrandığını göstererek tribokorozyona karşı malzeme seçimi, tasarımı ve korumasına yardımcı olabilmektedir.

Tribokorozyon alanında kullanılan elektrokimyasal yöntemler, aşınma olmadığında malzemelerin korozyon özelliklerini karakterize etmek için uygulananları ve aşınma veya erozyon koşulları altındaki uygulananları içermektedir. Ana sorunlardan biri, bir deneyin hem mekanik hem de elektrokimyasal koşullarını yakından kontrol etmemize izin vermesi gereken deney ekipmanının tasarımıdır (Barril vd., 2004).

Dört farklı test yöntemi kullanılarak malzemelerin tribokorozyon davranışları incelenmektedir. Bu yöntemler şu şekildedir: Galvanik hücre tekniği, korozyon potansiyeli ölçümü, potansiyodinamik testler ve potansiyostatik deneyler. Bu yöntemler genel olarak tribokorozyon araştırmalarında yaygın bir şekilde kullanılmakta ve malzemelerin aşınma ve korozyon davranışlarının anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Malzeme yüzeylerinin elektrokimyasal etkileşimleri hakkında önemli bilgiler sunan bu testler, tribokorozyon süreçleri ve malzeme performansı hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır.

Tribolojik testlerle elektrokimyasal tekniklerin birleştirilmesi için iki farklı yöntem kullanılmaktadır: İlki, kayma aşınmasının açık devre potansiyelinde (OCP) incelenmesidir; ikincisi ise dış akım kullanılarak kontrol altındaki bir potansiyelde kayma aşınmasının incelenmesidir. Bu iki yaklaşımın her birinin uygulanabilirliği ve sınırları hakkında bilgi sahibi olmak önemlidir (Alkan, 2019).

Potansiyodinamik polarizasyon yöntemi, korozyonun ölçülmesinde sıkça başvurulan bir test metodudur. Bu yöntemde, referans ve çalışma elektrotları arasına, anodik ve katodik bölge arasındaki potansiyel farkı sabit bir hızla değiştirerek bir potansiyel uygulanır. Bu testlerde, çalışma elektrotunun yüzeyindeki, yani korozyona uğrayan elektrolitle temas eden metalde

gerçekleşen katodik veya anodik reaksiyonların miktarı akım olarak gösterilmektedir. Kaydedilen akım çalışma elektrotunun birim yüzey alanına düşen akım, yani akım yoğunluğu olarak ifade edilmektedir. Bu yöntem, metalin yüzeyinde oluşan çukurlaşma eğilimi, pasif tabaka oluşumu ve bir elektrokimyasal sistemin katodik davranışı gibi çeşitli korozyon olayları hakkında bilgi vermektedir. Malzemelerin farklı potansiyellerdeki aktif/pasif davranışlarını inceleyerek devam eden reaksiyonların hızlarını yani korozyon hızını belirlemek için en uygun yöntemdir (López vd., 2018b; Muñoz vd., 2010; Baboian, 2013; Celis, 2017; Ponthiaux vd., 2004).

Potansiyodinamik polarizasyon (PDP) yöntemi, incelenen metalin akım yoğunluğu ile potansiyeli arasındaki ilişkiyi geniş bir potansiyel aralığında göstermektedir. Bu yöntemle malzemenin anodik ve katodik davranışları hakkında ayrıntılı bilgi elde edilebilmektedir. PDP eğrileri, malzemenin detaylı analizi için uygun anodik ve katodik potansiyellerin seçilmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca, incelenen metalde pasifleşme özelliği mevcutsa, pasif bölgenin başlangıç ve bitiş potansiyelleri PDP eğrileri ile belirlenebilmektedir. Bunun yanında, paslanmaz çeliklerde çukurcuk korozyonunun oluşumuna neden olan kritik potansiyel değeri olan çukurcuk potansiyeli de PDP eğrileri ile saptanabilmektedir. Bu sebeplerle PDP eğrileri korozyon ve tribokorozyon çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Alkan, 2019).

Potansiyodinamik polarizasyon testleri, korozyon davranışını incelemek için kullanılan önemli elektrokimyasal test yöntemlerinden biridir. Bu testler, bir metalin korozyona karşı tepkisini, yani anodik ve katodik reaksiyonlarının hızlarını ve korozyon hızını belirlemeye yönelik bilgileri sağlamak için kullanılmaktadır.

Bu testlerde, bir çalışma elektrotu ve bir referans elektrotu kullanılır. Referans elektrotu, elektrokimyasal potansiyelin ölçüldüğü bir referans noktası olarak işlev görür. Çalışma elektrodu ise, korozyon davranışı incelenmek istenen malzemedir.

Testin temel adımları şunlardır:

1.Başlangıç koşullarının sağlanması: Teste başlamadan önce, elektrotlar ve çözelti hazırlanmalı ve uygun başlangıç potansiyeli belirlenmelidir.

2.Potansiyel taraması: Test sırasında, referans ve çalışma elektrotları arasına, belirli bir potansiyel aralığında sabit bir tarama hızı ile potansiyel uygulanır. Bu tarama hızı genellikle milivolt/saniye cinsinden ifade edilmektedir.

3.Akım kaydı: Potansiyel taraması sırasında akım kaydedilir. Bu akım, çalışma elektrotunun yüzeyinde meydana gelen anodik ve katodik reaksiyonların oranını temsil etmektedir.

4.Analiz ve yorumlama: Elde edilen akım-potansiyel verileri analiz edilerek korozyon davranışı değerlendirilmektedir. Bu analiz, çukurlaşma duyarlılığı, pasif tabaka oluşumu ve katodik davranış gibi farklı korozyon süreçleri hakkında bilgi sağlamaktadır

Potansiyodinamik polarizasyon eğrileri, potansiyodinamik polarizasyon testlerinin sonuçlarının grafiksel olarak temsil edildiği eğrilerdir. Bu eğriler, elektrokimyasal potansiyel (voltaj) ve akım yoğunluğu (akım birim alan başına) arasındaki ilişkiyi göstererek korozyon davranışını anlamak için önemli bilgiler sağlamaktadır. Potansiyodinamik polarizasyon testlerinde, belirli bir potansiyel aralığında sabit bir tarama hızıyla potansiyel uygulanırken akım kaydedilmektedir. Bu tarama süreci, genellikle negatif potansiyelden başlayarak pozitif potansiyele doğru gerçekleştirilir. Bu süreçte, akım değeri potansiyeldeki değişikliklere bağlı olarak ölçülür ve veriler kaydedilir.

Elde edilen veriler, tipik olarak potansiyel (voltaj) ekseninde ve akım yoğunluğu (akım birim alan başına) ekseninde bir grafikte temsil edilmektedir. Grafikte, potansiyel arttıkça akım yoğunluğunun nasıl değiştiği gösterilir. Eğer bir korozyon süreci meydana geliyorsa, eğri iki farklı bölümden oluşur:

1. Aktif bölge: Aktif bölgede, potansiyel yükseldikçe akım yoğunluğu artar. Bu bölge, metalin aktif korozyon hızına denk gelir.

2. Pasif bölge: Pasif bölgede, potansiyel yükseldikçe akım yoğunluğu neredeyse sabit kalır veya azalır. Bu bölge, metal yüzeyinde pasif bir oksit tabaka oluştuğunu ve korozyonun önemli ölçüde azaldığını gösterir.

Potansiyodinamik polarizasyon testleri, malzemelerin koruyucu kaplamaların korozyona karşı dayanıklılığını değerlendirmek ve belirlemek için kullanılmaktadır. Ayrıca, korozyon hızını ölçmek ve çeşitli metallerin korozyon potansiyellerini karşılaştırmak için de kullanılabilir önemli bir araştırma yöntemi olarak kullanılmaktadır.

Açık devre potansiyeli (OCP), bir elektrokimyasal sistemde anodik ve katodik arasındaki reaksiyonların meydana geldiği çalışma ve referans elektrotları arasındaki doğal potansiyel farkıdır. Bu parametre elektrokimyasal reaksiyon hızıyla ilgili değildir, ancak bir malzemenin belirli bir elektrolit ortamında pasif veya aktif durumda olup olmadığını belirtir. Açık devre potansiyelinde tribokorozyon testleri, bir malzemenin belirli bir elektrolit çözeltisine batırıldıktan sonra, herhangi bir anodik veya katodik potansiyel uygulaması olmaksızın, kayma kuvveti altında aşınmaya maruz bırakılmasını kapsar (Celis vd., 2006; Landolt ve Mischler, 2011; López vd., 2018b; Mischler, 2008).

OCP, metalin korozyon potansiyelini ifade eder. Bu potansiyel, malzemenin bir elektrolit içinde daldırıldığı durumda, metal ile elektrolit arasında herhangi bir dış akımın olmadığı durumdaki denge potansiyelidir. Yani, metal yüzeyine herhangi bir dış akım uygulanmaz ve yüzeyin koruyucu bir potansiyelde olduğu varsayılır. Aşınma, malzeme yüzeyinin fiziksel olarak zarar görmesi ve parçacıkların yüzeyden ayrılması sürecidir.

Korozyon, metalin çevresiyle kimyasal etkileşime girerek bozunması sürecidir. Koruyucu atmosfer altında, metal yüzeyinde biriken koruyucu oksit tabakası aşınmayı azaltabilmektedir. Ancak, OCP altındaki korozyon süreci, metal yüzeyinin mikro yapısında, mekanik özelliklerinde ve oksit tabakasında değişikliklere neden olabilmektedir.

OCP altında aşınmanın temel sebepleri şunlardır:

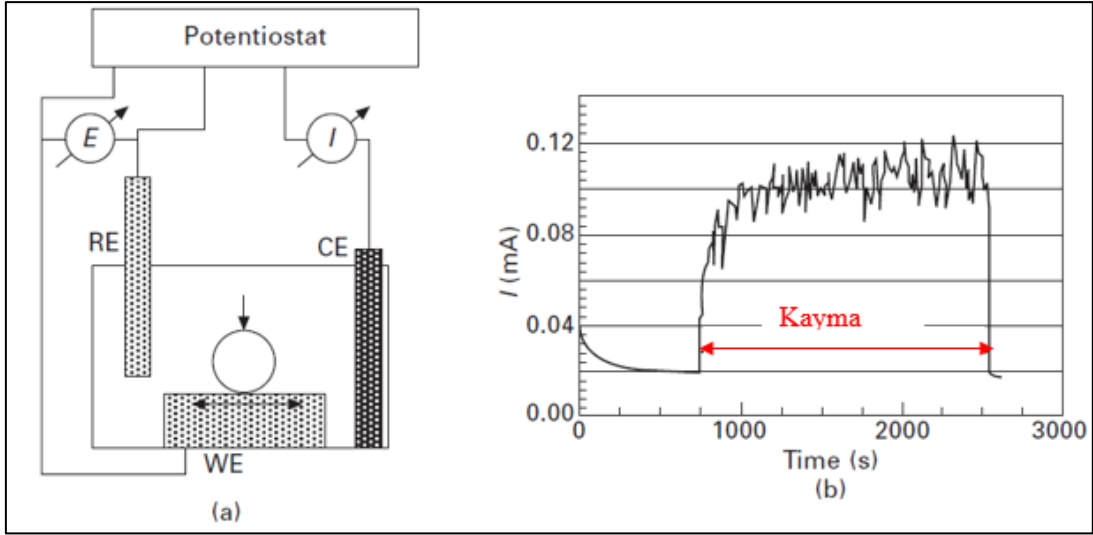
Oksit tabakasının kırılması: Korozyon süreci, metal yüzeyinde ince bir oksit tabakasının oluşmasına neden olabilmektedir. Bu tabaka, aşınma ve tribolojik süreçler sırasında zarar görebilir kırılabilir. Böylece OCP altında, yüzey daha fazla aşınmaya maruz kalır.

Elektrokimyasal reaksiyonlar: Metal yüzeyinde meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar, yüzeyin yapısını değiştirerek aşınmaya katkıda bulunabilmektedir. Özellikle koruyucu oksit tabakasının kalınlığı ve yapısı bu süreci etkileyebilmektedir.

OCP, metalin pasif oksit tabakası gibi koruyucu özelliklerinin performansını değerlendirmek için kullanılmakta ve korozyon oranını tahmin etmeye yardımcı olmaktadır.

Potansiyostatik test ölçümünün şematik gösterimi Şekil 3.6-a)'da sunulmuştur. Ölçüm işlemi; üç elektrotlu bir sistemde taban malzeme çalışma elektrotu (WE), platin malzeme veya grafit çubuk referans elektrot (RE) ve karşı elektrot (CE) olarak kullanılarak, belirli bir elektrik potansiyelinin uygulanması ve potansiyel farkın ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. RE ve CE, WE çözelti içerisinde temas etmeksizin yakın konumlandırılmalıdır. Elektrokimyasal kinetiğin değişimlerini belirlemek için akım, işlem süresince sabit potansiyelde zamanın fonksiyonu olarak ölçülmektedir (Landolt ve Mischler, 2011; Siddaiah vd., 2021).

Potansiyostatik test sonuçlarına göre, akımın zamanla nasıl değiştiği Şekil 3.6-b)'de görülmektedir. Aşınma başladığında, yüzeydeki pasif film tabakası abrazyon nedeniyle bozulur ve metalik malzeme çözelti ile temas ederek oksitlenir. Bu da akım değerlerinin yükselmesine neden olur. Aşınma durduğunda, metalik malzeme üzerinde yeniden pasif film tabakası oluşur ve akım değeri eski seviyesine yaklaşır. Şekil 3.6-b) deki kayma bölgesi, pasif filmin aşınması ve metal yüzeyin çözelti ile reaksiyona girmesi sonucu ortaya çıkan korozyon mekanizmasını göstermektedir. Aşınma süresince korozyon mekanizması devam ettiği için bu bölgede akım yükselişi görülür. Tribokorozyon testlerinde, sürtünme kuvvetini ölçmek için tribometre ölçüm cihazları kullanılmaktadır (Landolt ve Mischler, 2011; Siddaiah vd., 2021).



Şekil 3.6: a) Potansiyostat ve tribokorozyon ölçümünün şematik gösterimi, b) Örnek bir aşınma potansiyostatik test ölçümü (Landolt ve Mischler, 2011)

Potansiyostatik polarizasyon aşınma, bir malzemenin veya yüzeyin, belirli bir potansiyel seviyesi sabit tutularak (potansiyostatik koşullar altında) aşınma sürecinin incelenmesidir. Bu tür aşınma, elektrokimyasal aşınma olarak da adlandırılır ve elektrokimya ve triboloji (sürtünme, aşınma ve yağlama bilimi) alanlarının kesişiminde yer alır.

Potansiyostatik polarizasyon aşınma, bir potansiyostat cihazı kullanılarak gerçekleştirilir. Potansiyostat, bir elektrokimyasal hücrede belirli bir potansiyeli (gerilimi) kontrol edebilen bir cihazdır. Aşınma deneyleri sırasında, malzeme yüzeyi belirli bir potansiyelde tutulur ve bu potansiyelde elektrokimyasal reaksiyonlar gerçekleşmektedir.

Bu süreçte, iki temel elektrokimyasal mekanizma nedeniyle aşınma meydana gelmektedir:

Elektrokimyasal Korozyon: Potansiyostatik koşullar altında, metal yüzeyler çevreleyen ortamın kimyasal etkileşimleri sonucu korozyona uğrarlar. Bu süreçte metal yüzeyler çözünerek veya reaksiyona girerek aşınır.

Elektrokimyasal Aşındırma: Potansiyostatik polarizasyon altında, yüzeyde oluşan pas veya koruyucu tabakaların mekanik etkilerle kırılması sonucu aşınma meydana gelmektedir.

Potansiyostatik polarizasyon aşınma deneyleri, malzemelerin dayanıklılığını ve aşınma direncini anlamak, aşınma mekanizmalarını araştırmak ve aşınma ile ilgili önlem ve geliştirmeler yapmak için kullanılır. Bu tür deneyler, endüstriyel uygulamalarda malzeme seçimine, kaplama tekniklerine ve sürtünme azaltma stratejilerine yönelik önemli bilgiler sağlayabilmektedir.

4. LİTERATÜR ÖZETİ

Watson vd. (1995) öncülüğünde yapılan çalışmalar, aşınma ve korozyonun pek çok mekanik ve kimyasal mekanizmayı içerdiğini ve birlikte harekete geçirilmesinin sık sık karşılıklı etkileşimlere yol açtığını ortaya koymuştur. Bu tür etkileşimleri incelemek için daha sonraki araştırmacılar da korozyon ve aşınma arasındaki nitel etkileşimlere odaklanmışlardır. Amerikan Maden Ofisi, aşınma, korozyon ve aşınma-korozyon testlerinin sonuçlarını standart bir formatta sunmayı ve bu verileri herhangi bir tribosistem için kullanışlı mühendislik kıstaslarına dönüştürmeyi hedeflemiştir. Bu amaç doğrultusunda, aşınma ve korozyon süreçlerini, aynı zamanda aşınma-korozyon etkileşimini (sinerjisi) nicelleştirmek için nüfuz etme oranı denklemleri geliştirilmiştir. Bu sayede, malzeme dayanıklılığını ve performansını değerlendirmek ve ilgili uygulamalarda kullanmak için daha somut ve ölçülebilir verilere ulaşılmıştır.

Tribokorozyon, tribolojik bir etkileşimde, maddenin eş zamanlı fiziko-kimyasal ve mekanik yüzey etkileşimleri sonucunda geri dönüşü olmayan bir dönüşüme uğramasıdır. Elektrokimyasal yöntemler, tribokorozyon olaylarının incelenmesi için oldukça uygun bir yaklaşımdır, çünkü çevrenin korozif etkisini taklit etmek için sabit bir potansiyel sağlarlar. Ayrıca, anodik akımın ölçülmesi, mekanik aşınmadan ziyade oksidasyonla meydana gelen materyal miktarını belirlemeyi mümkün kılar. Landolt vd. (2001) tarafından yapılan çalışmada, tribolojide elektrokimyasal yöntemlerin deneysel ve teorik yönleri üzerine tartışılmıştır. Bu çalışmada, laboratuvarında metallerin pasifleştirilmesiyle elde edilen en sonuçlar sunulmuştur. Mekanik parametrelerin ve kontak geometrisinin kontrol edilmesinin önemi vurgulanmış ve bu parametrelerin tribokorozyon sisteminin elektrokimyasal tepkisini önemli ölçüde etkilediği gösterilmiştir

Tribokorozyonun incelenmesi aşınma testlerinde kimyasal şartların düzenlenmesini talep etmektedir. Bu, sulu elektrolitlerde farklı elektrokimyasal aşınma deneyleriyle (triboelektrokimyasal testler olarak bilinir) gerçekleştirilir. Mischler (2008) çalışması, pasif metallerin yer aldığı sürtünme ve kayma durumlarına odaklanarak, tribokorozyon araştırmalarında kullanılan temel elektrokimyasal tekniklerin ve değerlendirme metodlarının kritik bir incelemesini sunar. Kaygan yüzeylerde, elektriksel olarak iletken solüsyonlara daldırılmış materyallerin korozyon aşınması, elektrokimyasal yöntemlerle doğrudan (in situ)

incelenebilir. Bu yöntemler arasında açık devre potansiyel analizi, potansiyel enerji polarizasyon testleri ve elektrokimyasal empedans ölçüm teknikleri bulunur (Ponthiaux vd. 2004).

Tribokorozyon, genellikle metal bileşenlerde karmaşık ve zarar verici bir süreç olup, tribolojik temasın mekanik yapısı, elektrokimyasal nitelikler, temas halindeki malzemelerin özellikleri ve çevrenin fizikokimyasal niteliklerine bağlı olarak değişir. Zhang vd. (2016) çalışmalarında, pim disk (pin-on-disk) tribometre kullanarak korozif ortamların sürtünme ve aşınma etkileri, korozyon davranışları ve bu faktörler arasındaki birleşik etkiler ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır. Bu çalışmada, damıtılmış su kullanılmış ve elektrokimyasal korozyon tespit edilmemiştir. Ek olarak, damıtılmış suyun yağlama kapasitesinin yetersiz olduğu saptanmıştır. Ayrıca, çözeltinin pH seviyesinin malzeme yıkımının belirlenmesinde önemli bir etkiye sahip olduğu da göz ardı edilmemelidir.

Chen vd. (2015) yapay deniz suyunda Al_2O_3 bilyaya karşı kayan Monel K500 alaşımının elektrokimyasal ve tribokorozyon davranışlarını incelemek için sistematik bir araştırma yapmışlardır. Açık devre potansiyelinin katodik kayması ve kayma nedeniyle oluşan akım yoğunluğunun iki kat arttığı gözlemlenmiştir. Toplam tribokorozyon hacim kaybı, uygulanan potansiyelin artmasıyla birlikte artmaktadır. İlginç bir şekilde, 0.5 V ve 0.9 V'luk uygulanan potansiyeldeki toplam malzeme kaybı, aşınma ile korozyon arasındaki sinerjiyi teyit eden saf mekanik aşınma altındaki miktarın üç katından fazladır. Aşınmaya bağlı korozyonun (ΔK_c) ve korozyon kaynaklı aşınmanın (ΔK_w) katkısı, özellikle yüksek uygulanan potansiyelde baskındır.

Erozyon-korozyon mekanizmalarını ve kaplama bütünlüğünü izlemek için tasarlanan elektrokimyasal teknikler hem erozyon hem de korozyon aynı anda hareket ettiği zaman ortaya çıkan sinerjistik terimleri nicelleştirmek için kullanılır (Wood, 2006).

Assi vd. (1999) tribokorozyon özelliklerinin araştırılması için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde %3.5 NaCl bulunan ortamda farklı paslanmaz çeliklerin aşınması, polarizasyonu ve potansiyostatik ölçümleri yeni geliştirilen bir tribometre ile incelenmiştir. Çalışmanın en önemli amacı ise yüzey pasifleşmesi ve bu pasif tabakanın bozunması sonucu metal duyarlılığının belirlenmesidir. Koruyucu oksit filmin tekrar oluşma durumu, metalin saldırgan bir çevreye maruz kalıp kalmadığıyla ilgilidir. Böylece Assi ve

Bohni (1999) çalışmalarının sonucunda pasif ve saldırı yapılan yüzey alanları arasındaki etkileşimin yanı sıra tribokorozyon sistemlerinde elektrokimyasal ve mekanik aşınma etkileşimini de ortaya koymuşlardır.

Jemmely vd. (2000) yeniden pasifleşme davranışı ve tribokorozyon arasındaki ilişkiyi sülfirik asit içinde bulunan ve bir demir-krom alaşımı olan AISI 430 kullanılarak araştırmışlardır. Pasif bölgede sabit bir potansiyel uygulanmış ve strok periyotları boyunca akım değişimi, uygulanan potansiyel ve strok frekansının bir fonksiyonu olarak ölçülmüştür.

Stemp vd. (2003) çalışmalarında kullanılan pim malzemesinin ve aşınma hareketine maruz kalan ferritik paslanmaz çeliğin (AISI 430) sülfirik asit içinde tribokorozyon davranışını incelemiştir. Çalışmada temas konfigürasyonları değiştirilerek aşınma davranışları ve temas yüzeylerindeki aşınma miktarları belirlenmeye çalışılmıştır. Toplam metal çıkarma oranı lazer profilometri ile ölçülmüş, aşınma izi morfolojisi taramalı elektron mikroskobu ile araştırılmış ve toplam aşınmaya elektrokimyasal katkı Faraday yasası kullanılarak ölçülen anodik akımdan hesaplanmıştır.

Yin vd. (2007) çalışmalarında aşınma-korozyon sinerjisinin gerinim hızından önemli ölçüde etkilenebileceğini göstermiştir. Elektrokimyasal kayma aşınma tekniği kullanılarak seyreltik sodyum klorür çözeltisi içindeki AISI 1045 çeliğinin aşınma-korozyon sinerjisi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yüksek gerilme hızlarında aşınmanın korozyona korozyonunda aşınmaya etkisi olduğu, yüksek gerilme hızlarında deformasyon sonucu oluşan mikro çatlaklar gibi kusurların ortaya çıktığı belirlenmiştir.

Huttunen-Saarivirta vd. (2016) çalışmalarında 440B (martensitik) ve 304 (östenitik) paslanmaz çeliğin bir korozyon hücresi ile teçhiz edilmiş bir pedin içinde bir dizi tribokorozyon testi uygulanarak, 5 N'ye kadar yükler altında 0.01 M NaCl çözeltisinde davranışını incelemiştir. Tribokorozyon testlerinden elde edilen sonuçlara göre uygulanan yük altındaki malzemelerin açık devre potansiyeli negatif yönde kaymıştır ve ölçülen akım yoğunluğu buna bağlı olarak artmıştır. Bununla birlikte, korozyon saldırısı yerel olarak tespit edildi ve aşınma-korozyon sinerji üzerinde çarpıcı etkilere neden oldu.

Jun vd. (2014) çalışmalarında yapay deniz suyundaki Al_2O_3 'e karşı kayan AISI 316 paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşımlarının korozyon ve tribokorozyon davranışları pimli

disk üstü test teçhizatı kullanılarak araştırmışlardır. Çalışmada korozyon ve aşınma arasındaki sinerjik etki de vurgulanarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, her iki alaşımın açık devre potansiyellerinin sürtünmeden dolayı daha negatif bir değere düştüğünü göstermektedir. Tribokorozyon koşullarında elde edilen korozyon akım yoğunlukları, korozyona karşı durumdaki koşullardan çok daha yüksektir. Sürtünme, alaşımların korozyonunu hızla artırmaktadır. Her iki alaşımın aşınma kaybı, deniz suyunda saf sudaki aşınma kaybından daha fazladır. Aşınma kaybı aşikâr bir şekilde korozyonla hızlanmıştır. AISI 316 paslanmaz çelik Ti6Al4V alaşımına göre kayma hasarına karşı daha az dayanıklıdır. Aşınma ve korozyon arasındaki sinerjik etki, tribokorozyonda malzeme kaybı için önemli bir faktördür.

Obadele vd. (2016) AISI 310 ve AISI 316 paslanmaz çeliklerin,% 3.5'lik NaCl çözeltisinde, tribokorozyon davranışları elektrokimyasal kontrol için bir potansiyostat ile birleştirilmiş disk tribometre kullanılarak karşılıklı kayma koşulları altında incelenmiştir. 60 rpm'lik sabit devir hızında farklı kayma yükleri kullanıldı. Sonuçlar kayma yükünün her iki malzemenin tribokorozyon davranışında belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. İki malzemedeki de sinerjik etki açısından korozyon-aşınma etkisinin aşınmayı artırmasının aşınma-korozyon etkisinden daha baskın olduğu yönündedir. Bununla birlikte, Bununla birlikte, düşük kayma yükünde, AISI 316'da anodik çözünme ve çukur oluşumu aşınmaya bağlı korozyona neden olan kayma hareketi ile hızlandırılmıştır.

AISI 316 paslanmaz çeliğin alümina bilyeye karşı doğal deniz suyu ortamında 5 N yükler altında kaymalı tribokorozyon davranışları incelenmiştir. OCP (açık devre potansiyeli), potansiyostatik (-1 V ve 0.3 V) ve potansiyodinamik ölçümler, kayma aşınması ve elektrokimyasal potansiyelin deniz suyu ortamında AISI 316 paslanmaz çeliğin tribokorozyon davranışları üzerindeki etkisini anlamak için uygulandı. Tribokorozyon deneyleri, üç elektrotlu potansiyostat ile entegre edilmiş disk üzerinde bilye tipi ileri geri hareket eden bir tribometre ile gerçekleştirilmiştir (Alkan ve Gök, 2021).

Anderson vd. (1992) deniz suyunda kayma teması tribokorozyon ile metallerin yok edilmesi oldukça yüksektir. Aşınma-korozyonun (tribokorozyon) deniz suyunda bir kısmı, atmosferik ortamda bir kısmı kalan çapa zinciri üzerindeki etkileri açıkça görülmektedir. Sonuç olarak, gemi zincirleri deniz suyundayken hem zincir baklalarının birbirine sürtünmesinden dolayı malzeme kaybına hem de korozyona maruz kalmaktadır.

Demirleme zincirleri ve bağlantı ekipmanları, açık deniz yapılarının işlevsel ömürleri boyunca dengede ve güvenli bir konumda kalabilmesi için hayati öneme sahiptir. Deniz endüstrisinde, sondaj ve depolama kapasitesine sahip gemiler, petrol ve doğalgaz platformları ile yüzer rüzgâr türbinleri gibi yapılar, demirleme zincirlerinde meydana gelebilecek aşınma ve korozyon problemleriyle karşılaşmaktadır. Bu tür sorunlar, tüm yapının bütünlüğünü ve güvenliğini tehlikeye atabilecek kritik faktörler olarak ortaya çıkmaktadır (Villa-Caro vd., 2018). Yüzer açık deniz yapılarının demirleme sistemlerinde meydana gelen hasarların yaklaşık %14'ü zincirlerden ve %19'u ise bağlantı ekipmanlarından kaynaklanmaktadır. Zincirler ve ilgili aksesuarlarda meydana gelen hasar mekanizmalarının detaylı bir incelemesi, bu hasarların çoğunlukla korozyon (%20), yorulma (%17) ve yorulmaya bağlı korozyon (aşınma vd. kaynaklı) (%19) kaynaklandığını ortaya koymuştur (Ma vd., 2019).

Deniz korozyonu, özellikle yerel korozyon, mekanik yüklemeye ile birlikte demirleme zinciri hasarlarının ana nedenidir (López vd., 2018a; Ma vd., 2013; Zhang ve Hoogeland, 2019). Laboratuvar ortamında deniz suyu ve bakteri eklenmiş deniz suyu ortamlarında R4 çelik üzerinde yapılan araştırmada her iki ortamda da lokal korozyon etkilerinin görüldüğü, bakteri oluşumunun korozyonu ve lokal korozyon oluşumunu artırdığı belirlenmiştir (Witt vd., 2016; Zhang ve Hoogeland, 2019). Deniz suyu içinde bakterilerin demirleme zincirleri üzerindeki korozif etkileri üzerine benzer bir çalışma Witt vd. (2016) tarafından yapılmıştır. Witt ve arkadaşları, bakterilerin hidrojen sülfür oluşumunu hızlandığını ve bu nedenle de büyük çukurcuklar şeklinde korozyon oluşumuna neden olduklarını tespit etmiştir. Açık deniz demirleme zincirlerinin çekme dayanımlarının tavlama sıcaklığına bağlı olarak değişimi Cheng vd. (2015) tarafından incelenmiş ve tavlama sıcaklığının malzeme dayanımını artırdığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte tavlama sıcaklığının artışı çelikte hidrojen kırılabilirliğine yol açmıştır. Lotfollahi ve Melchers (2015) tarafından yapılan çalışmada korozyona uğramış ve uğramamış demir zinciri numuneleri kuru ve ıslak ortamda 1000, 750 ve 500 kg yük altında yorulma testine tabi tutulmuştur. Uygulanan aksenal kuvvetle birlikte aşınma artmış, ancak aşınma miktarı doğrusal bir artış göstermemiştir. Bu durum temas alanının değişmesiyle açıklanmıştır. Aynı çalışmada tatlı su ile yapılan ıslatmalı aşınmada su yağlayıcı gibi davranmış ve aşınma oranı %25 azalmıştır. Bununla birlikte çalışmada korozyon ve tribokorozyon davranışlarının deniz suyu içinde sürekli gerçekleşmesinin ne gibi sonuçlar doğuracağından bahsedilmemiştir.

Gotoh vd. (2019) tarafından yüzer açık deniz rüzgâr türbinlerinin demirleme sistemlerinin deniz suyundaki aşınma performansını geliştirmek için R3 ve R3S sınıfı çelik üzerinde yapılan çalışmada malzeme kaybında aşınma ve korozyonun karşılıklı etkileşimi ihmal edilmiştir. Aşınma miktarı üzerinde, zincir halkaları arasındaki çekme kuvvetinin belirleyici bir rol oynadığı, Gotoh vd. (2019) tarafından da ortaya konmuştur.

Zhang ve Hoogeland (2019) laboratuvar ortamında incelen çalışmada, deniz suyunda demirleme zinciri çeliği üzerindeki yerel korozyon mekanizmasını incelemektir. R4'sınıfı zincir çeliğinin korozyon davranışı, bir laboratuvar ortamında toplanan yapay deniz suyu ve mikroorganizmalar içeren yapay deniz suyunda incelenmiştir. Deneylerde elde edilen sonuçlar, kalıcı uzamanın çeliğin deniz korozyon direncini olumsuz yönde etkilediğini göstermiştir (Zhang ve Hoogeland, 2019).

Demirleme zinciri mekanizmalarının aşınma, korozyon ve tribokorozyon davranışları 5N yük altında deniz suyu ortamında incelenmiştir. López vd. (2015), López vd. (2018a), López-Ortega vd. (2018c), López vd. (2018d), López vd. (2019) ve López vd. (2020) tarafından yapılan çalışmalarda R4 ve R5 sınıfı çeliklerin termal spreyle kaplanmalı ve kaplamasız örneklerinin farklı sıcaklıklardaki aşınma, korozyon ve tribokorozyon davranışları incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda termal spreyle kaplamanın R4 ve R5 çeliklerin sürtünme katsayısını azalttığı, korozyon ve tribokorozyon davranışlarını iyileştirdiği tespit edilmiştir. Yapay deniz suyu ortamında potansiyeldeki artışla birlikte toplam malzeme kaybında artış gerçekleştiği, R4 ve R5 çeliğin aktif karakterinden dolayı paslanmaz çelikler gibi pasif malzemelerden farklı davranış sergiledikleri elektrokimyasal testlerle ortaya konmuştur. R4 çeliğin tribokorozyon testlerinde aşınmayan bölge ile aşınan bölge arasında galvanik bir ikilinin oluştuğu ve bunun da korozyonu artırıcı bir etkisi olduğu López vd. (2020) tarafından tartışılmıştır. Açık deniz demir zincirlerinin deniz suyu ortamındaki tribokorozyon davranışlarında test sıcaklıklarının etkisi incelenmiş ve sıcaklık artışının R4 ve R5 çeliklerin korozyondan kaynaklı olarak malzeme kayıplarını artırdığı belirlenmiştir.

Du vd. (2021) Bağlama zinciri çeliği 22MnCrNiMo numunelerinin sürtünme aşınma davranışları, oda sıcaklığında 2 saat boyunca 500 µm genliğe sahip düz bir pim konfigürasyonu kullanılarak saf su ve yapay deniz suyunda değerlendirildi. Aşınma derecesinin artmasıyla, korozyon derecesi de arttı, bu da aşınma oluşumunun korozyonu

desteklediğini gösteriyor (Du vd., 2021). Bu aynı zamanda, bu çeliğin sürtünmeli korozyon ve aşınma süreçlerinde korozyon ve aşınma arasındaki pozitiften negatife etkileşimlerin dönüşümünü de göstermiştir. Sonuçta, Temas gerilmelerinin karşılaştırılması, kayma hızları, deniz ortamında sürtünme çiftlerinin tribokorozyon davranışı üzerinde daha büyük etkiye sahipti.

Birçok araştırmacı gemi demirleme zincir ve aksesuarlarının aşınma, korozyon mekanik ve elektrokimyasal davranışlarının geliştirilmesi için farklı çalışmalar gerçekleştirmiştir. Tez çalışmamda S355J2 çeliğinden üretilen Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin tribokorozyon ve kuru kayma aşınma deneyleri yapılacaktır. Farklı şartlar altındaki deniz suyunda demirleme zincir ve aksesuarlarının aşınma ve korozyon davranışlarını ne ölçüde değiştiği incelenecektir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada, S355J2 çeliğinden üretilen Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin tribokorozyon ve kuru kayma aşınmasının deneysel aşamaları anlatılacaktır.

5.1. Malzeme ve Numune Hazırlama

S355J2 çeliği, gemi, uçak, otomobil ulaşım araçları, inşaat ve ağır sanayi sektörlerinde yaygın olarak kullanılan dayanıklı ve yüksek mukavemetli bir malzemedir.

S355J2 çeliğine Grade 2 kalite sınıfı elde etmek için normalizasyon ısıl işlemi uygulanırken, Grade 3 kalite sınıfı elde etmek içinse su verme ve menevişleme ısıl işlemleri uygulanmaktadır. Normalizasyon ısıl işlemleri, çeliğin tane boyutunu azaltmakta ve mekanik özelliklerini geliştirerek kalite seviyelerini yükseltmektedir. Su verme ve menevişleme ısıl işlemleri ise, çeliğin sertlik ve aşınma direnci parametrelerini iyileştirmektedir. S355J2 çeliği, bu ısıl işlemlerden geçirildiğinde farklı boyutlardaki zincirler için test ve kopma yükleri kriterlerine göre Grade 2 veya Grade 3 sınıflarına gelmektedir. Gemilerde demirleme zincirleri olarak Grade 2 ve Grade 3 kaliteli zincirlerin kullanımı tercih edilmektedir.

Bu çalışmada Grade 2 ve Grade 3 zincir numunelerinin yüksüz durumda korozyon ve 5 N yük altında alümina bilyaya karşı kayma teması davranışlarını anlamak için tribokorozyon deneyleri yapılmıştır. Korozyon ve tribokorozyon deneyleri -1,5 V, OCP, 0,3 V potansiyeller altında, deniz suyu ortamı koşullarında yapılmıştır. Ayrıca zincir çeliklerinin atmosferik şartlardaki aşınma davranışını anlamak için kuru kayma aşınma testleri de yapılmıştır.

Bu çalışma, düşük karbonlu S355J2 çeliğinin Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin tribokorozyon davranışını araştırmak amacıyla yapılmıştır. Bu çalışmanın deneysel aşamasında, 20 mm çapındaki Grade 2 ve Grade 3 zincir çelikleri, çubuklar 10 mm kalınlığında numuneler halinde kesilmiştir. Her bir numune (\emptyset 20x10 mm), SiC kağıtları kullanılarak sırasıyla 320, 800, 1000, 1200 kum zımparalar ile ayna benzeri yüzey elde edilinceye kadar zımparalanmıştır ve ardından aseton ve etanolde temizlenmiştir. Korozyon ve kontaminasyonu önlemek için numunelerin yüzeyleri etanol içinde temizlenmiştir. Numunelerin sadece üst yüzeylerinin elektrolit ile temas etmesini sağlamak için

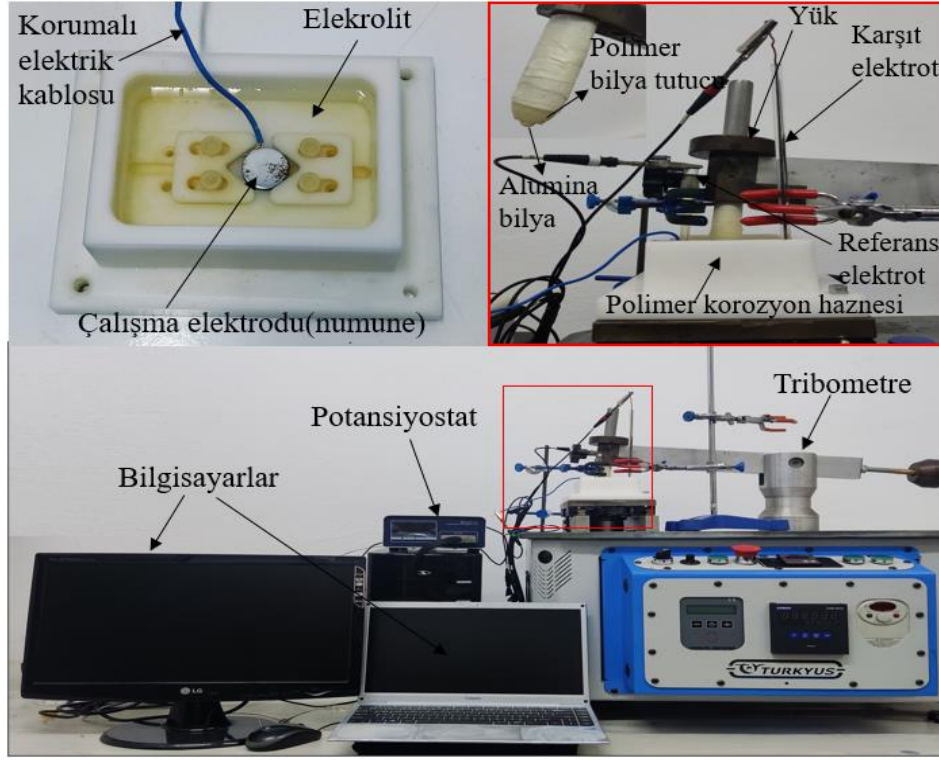
tribokorozyon hücresine daldırılmadan önce yüzeylerin geri kalan kısmı oje ile kapatılmıştır. Ölçümler sırasında korozyon etkileşimlerini önlemek için elektrolit ile temas halinde 2,68 cm² 'lik bir alan açıkta bırakılmıştır. Akım ve potansiyel verilerini kaydetmek için örneklerin yan tarafına kılıflı bir bakır kablo lehimlenmiştir. S355J2 malzemesinin kimyasal özellikleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1: S355J2 malzemesin ağırlıkça elementsel bileşim oranları

| Elementsel Ağırlık Bileşim Oranları (% wt) | | | | | | | | | | |
|--|------|---------------|---------------|------|-------|--------------|-----|------|---------------|---------------|
| C | Cr | Mn | Si | Mo | Al | P | Ni | Sn | S | Cu |
| 0,17- 0,22 | 0,17 | 1,03- 1,06 | 0,23- 0,05 | 0,04 | 0,026 | 0,08- 0,3 | 0,1 | 0,01 | 0,04- 0,03 | 0,18- 0,55 |

5.2. Deneysel Altyapı ve Deney Tasarımı

Şekil 5.1'te görülen deneysel altyapı, tribokorozyon deneyleri yapmak için kurulmuştur. Deneysel altyapı, aşınma cihazı (Turkyus marka - ball on disk tribometre), potansiyostat (Zive, SP1) ve verilerin kaydedildiği bilgisayar sisteminden oluşmaktadır.



Şekil 5.1: Tribokorozyon deney düzeneği ve bileşenleri

Aşınma cihazı için standart bir tribokorozyon deney düzeneği bulunmadığı için cihazda bazı modifikasyonlar yapılmıştır. Bu amaçla cihazın bilya tutucu metal ucu korozyon etkisini ortadan kaldırmak için polimer malzemeden (delrin) imal edilmiş uçla değiştirilmiştir. Aynı şekilde korozyon hücresi de polimer malzemeden (delrin) yapılmış ve cihaza entegre edilmiştir. Aşındırıcı malzeme olarak 6 mm çapında alümina bilya, referans elektrot olarak doymuş kalomel elektrot ve karşıt elektrot olarak da platin tel seçilmiştir. Deneysel ortam sıcaklığı şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Korozyon hücresi 150 ml deniz suyu ile doldurulduktan sonra içerisine çalışma elektrotu, karşıt elektrot ve referans elektrot yerleştirilmiştir. Çalışma elektrotu, korozyon testine tabi tutulan metal numunedir. Karşıt elektrot, çalışma elektrotu ile elektriksel devreyi tamamlayan ve korozyon hızını etkilemeyen bir metaldir. Referans elektrot, çalışma elektrotunun potansiyelini ölçmek için kullanılan sabit potansiyele sahip bir metaldir. Elektrolit çözeltisi, deniz suyunu simüle eden %3,5 NaCl çözeltisidir.

Korozyon hücresindeki deney koşullarının sonuçları etkilememesi için dikkat edilmesi gereken bazı noktalar vardır. Bunlardan biri, korozyon hücresindeki tek metal yüzeyinin çalışma elektrotu olmasıdır. Bu nedenle çalışma elektrotunun, korozyon haznesinde sadece

incelenecek yüzeyinin elektrolitle temas halinde olması için harici alanlar oje ile kapatılır. Diğer bir nokta ise, çalışma elektrotunun temas ettiği yüzey alanının sabit olmasıdır. Bu sayede korozyon hızının yüzey alanına bağlı değişimi engellenir. Bu çalışmada çalışma elektrotunun elektrolite temas ettiği yüzey alanı 2,68 cm² olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada S355J2 malzemesinin korozyon ve tribokorozyon davranışlarının anlaşılabilmesi için yüklü ve yüksüz şartlar ve farklı potansiyellerde deneyler yapılmıştır. Farklı potansiyel değerlerinde ve uygulanan yük miktarında deneysel tasarım koşulları belirlenmiştir. Aşınma deneylerinde kullanılan parametrelerin seçiminde literatürdeki önceki çalışmalar göz önünde bulundurulmuştur. Bu amaçla literatürdeki değerlerden yararlanılmıştır. Deneylerde kullanılan parametreler Tablo 5.2 de sunulmuştur.

Tablo 5.2:Deney parametreleri

| Malzeme | Yük | Potansiyel | Elektrolit | Frekans | Aşınma iz boyu | Karşıt cisim |
|---------|---------------|------------------------|---------------------------|------------------|----------------|--|
| S355J2 | Yüksüz 5 N | -1,5 V OCP 0,3 V | %3,5 NaCl çözeltisi | 74 devir/dak. | 6 mm | 6 mm Alümina bilya (Al ₂ O ₃) |

5.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM- Scanning Elektron Microscopy)

Tribokorozyon testlerinden sonra numunelerin yüzeyleri TESCAN marka, MAIA3 XMU modeli SEM cihazı ile görüntülenmiştir. Bu görüntüler numune yüzeylerindeki aşınma mekanizmalarının belirlenmesine yardımcı olmuştur.

5.4. Noktasal Analiz Çalışmaları (EDS- Energy Dispersive Spectroscopy)

EDS modülü, TESCAN marka MAIA3 XMU modeli SEM cihazının bir ünitesinden oluşmaktadır. Numunelerin istenen noktalarında noktasal, bölgesel ve çizgisel analizler gerçekleştirmiştir. Bu analizler, numunelerin yüzey morfolojisi, kimyasal bileşimi ve kristal yapısı hakkında bilgi sağlamıştır. EDS modülü, elektron-örnek etkileşimleri sonucu üretilen karakteristik X-ışınlarını tespit etmek için kullanılmıştır.

5.5. 3D Optik Profilometre İncelemeleri

Çalışmada aşınma izlerinin morfolojisinin çıkarılması için 3D optik profilometre (Filmetrics Profilm 3D) kullanıldı. 3D optik profilometre tribokorozyon deneylerinden sonra numunelerdeki hacim kayıplarının saptanmasında ve yüzey profillerinin tespitinin elde edilmesinde kullanılmıştır.

5.6. Aşınma (Kuru Ortam) Testlerinin uygulanması

İşlem görmüş S355J2 malzemesine ait numunelerin kuru kayma aşınma performansları Turkyus marka ball-on-disk tribometre tipi aşınma cihazında gerçekleştirildi. Aşındırıcı olarak 6 mm çapında Al₂O₃ sinterlenmiş seramik bilye kullanılmıştır. Deneyler sırasında çelik numunelere 5 N'luk yük uygulanmıştır. Gemi demirleme zincirlerinin atmosferik ortamdaki aşınma davranışını anlamak için kuru kayma testleri yapılmıştır. Deneylerde kayma hızı olarak 0.015 m/s uygulanmıştır. Aşınma yolu mesafesi olarak 53,3 metrelik yol ön görülmüştür. Test sonuçlarından elde edilecek verilerin kesinliğini artırmak için her deney üçer kez tekrarlandı ve ortalama değerler kullanıldı. Testler sırasında numunelerin sürtünme katsayılarındaki değişim sürekli olarak kaydedildi.

5.7. Yapılan Deneysel Aşamaların Yöntemleri

Deniz suyu gibi korozif bir ortamda tribokorozyon testleri yapmak için %3,5 NaCl çözeltisi hazırlanmıştır. Bu çözelti, deniz suyunun ortalama tuzluluk oranını simüle etmektedir. Tribokorozyon testleri, aşınma ve korozyonun eşzamanlı etkilerini incelemek için potansiyodinamik, potansiyostatik ve açık devre potansiyelinde gerçekleştirilmiştir.

Deniz suyu ile temas halindeki metalik malzemelerin tribokorozyon davranışlarını incelemek için OCP ölçümleri yapılmıştır. OCP ölçümlerine başlamadan önce, numuneler deniz suyu içinde 1 saat bekletilerek korozyon potansiyelinin dengeye gelmesi sağlanmıştır. Daha sonra, OCP değerleri 1800 saniye boyunca yüksüz olarak kaydedilmiştir. Ardından, aşınmanın OCP üzerindeki etkisini görmek için numuneler 3600 saniye boyunca aşındırılmıştır. Aşındırma işlemi durdurulduktan sonra, numunelerin potansiyellerinin yeniden dengeye gelmesi için 1800 saniye daha OCP ölçümleri devam ettirilmiştir. OCP ölçümlerinin sonuçları, numunelerin tribokorozyon davranışlarını ve pasifleşme özelliklerini

göstermektedir. Sürtünme temasının başlamasıyla birlikte OCP değerlerinde belirgin bir değişim görülmektedir. Bu değişim, aşınma sonucu oluşan yüzey hasarının ve korozyon ürünlerinin potansiyel dağılımını etkilediğini göstermektedir. Ayrıca, aşındırma işlemi durdurulduktan sonra OCP değerlerinin yeniden eski seviyelerine dönmesi, numunelerin pasifleşme yeteneğinin olduğunu göstermektedir.

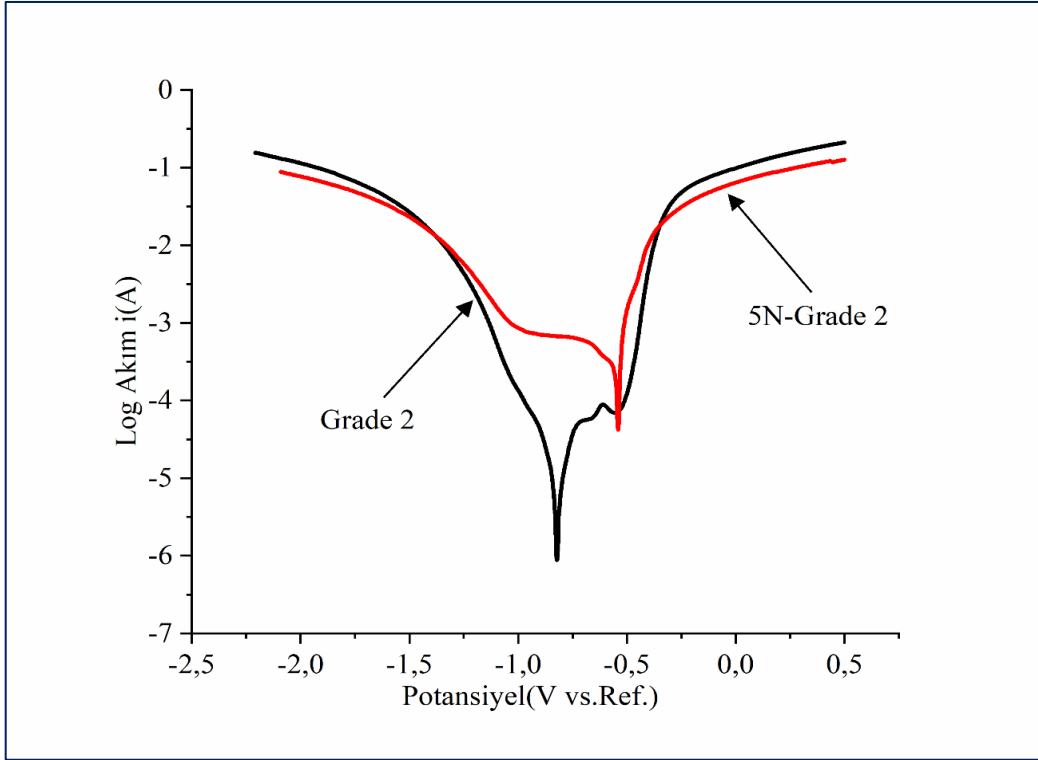
Potansiyodinamik polarizasyon eğrileri ile malzemelerin katodik bir potansiyelden anodik bir potansiyele doğru değişen potansiyeller altında taranması ile yapılmıştır. Bu çalışmada, katodik korumanın mutlak olarak uygulandığı -2 V potansiyelinden başlayarak, anodik davranışın geniş bir aralıkta incelenebileceği 0,5 V gerilime kadar potansiyodinamik tarama gerçekleştirilmiştir. Potansiyodinamik taramalar 1 mV/s tarama hızında referans elektroda karşı yapılmıştır. Potansiyodinamik taramalardan önce, numuneler deniz suyu içinde 1 saat süreyle beklemeye bırakılmıştır. Böylelikle, numune yüzeyi dengeli bir potansiyel değerine ulaşmış ve daha sonra da polarizasyon işlemine uğratılmıştır. Polarizasyon deneyleri, malzemenin katodik ve anodik korozyon davranışlarını belirlemek için yüksüz (korozyon koşulları) ve yük altında (tribokorozyon koşulları) uygulanmıştır.

Bu çalışmada, anodik ve katodik koşullarda malzemenin tribokorozyon davranışını belirlemek için 0,3 V ve -1,5 V sabit gerilimler uygulanarak potansiyostatik testler gerçekleştirilmiştir. Potansiyostatik testler, elektrotun bir referans elektroda göre sabit bir potansiyelde tutulduğu elektrokimyasal bir yöntemdir. Potansiyostatik testlerde de numune yüzeyinin dengeli bir potansiyel değerine ulaşması için 1 saat deniz suyu içerisinde bekletilmiştir. Daha sonra yük altında 3600 saniye boyunca numune aşındırılarak, potansiyostatik polarizasyon taramaları yapılmıştır.

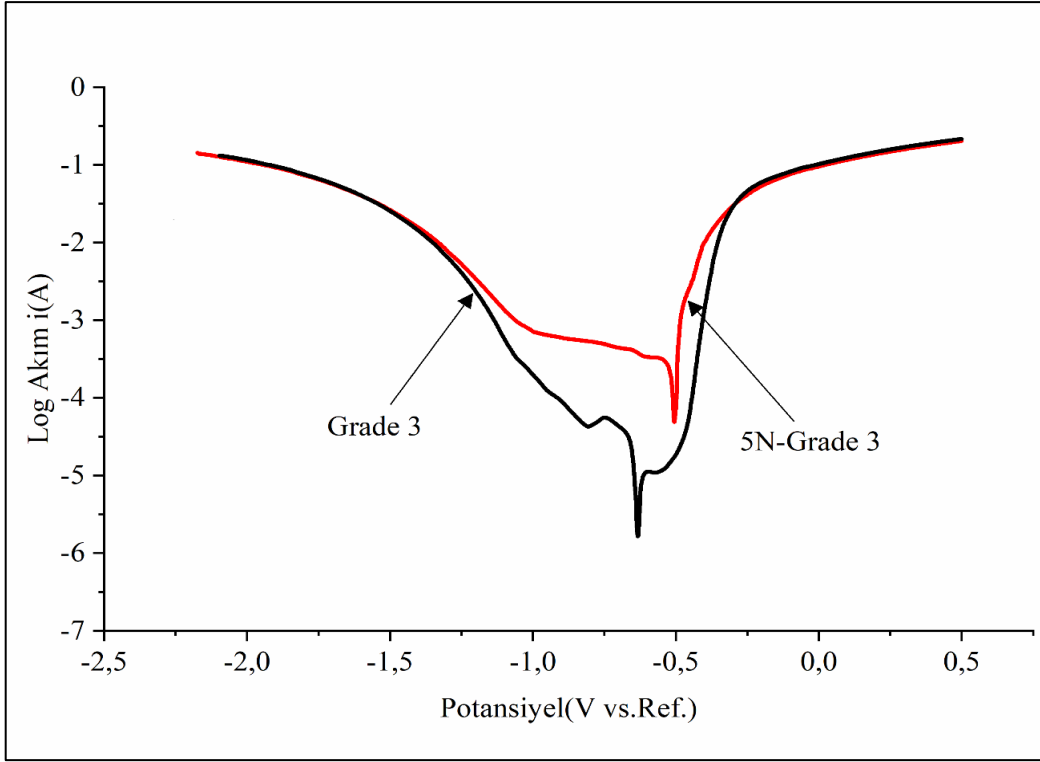
6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. Potansiyodinamik Polarizasyon Eğrileri

S355J2 çelik malzemesinin Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliğinin üzerinde yüksüz ve 5N yük altında potansiyodinamik polarizasyon testleri uygulanmıştır. Testlerin sonuçları Şekil 6.1-6.2’de sunulmuştur. Yüksüz durumdaki polarizasyon eğrisi, malzemenin sadece korozyona maruz kalma durumunu, yüklü polarizasyon eğrisi ise tribokorozyona maruz kalma durumunu yansıtmaktadır. Şekil 6.1-6.2’ye göre, korozyon potansiyeli ve akım yoğunluğunu artırmıştır. Bu sonuçlar, pasif malzemelere göre farklılık göstermektedir. Paslanmaz çelikler, titanyum gibi pasif malzemelerde aşınma etkisi ile iz içindeki pasif oksit film bozunmakta ve potansiyel düşerken karbon çeliklerinde bu durum tam tersi şekilde gerçekleşmektedir (López vd., 2015; Alkan ve Gök, 2022).

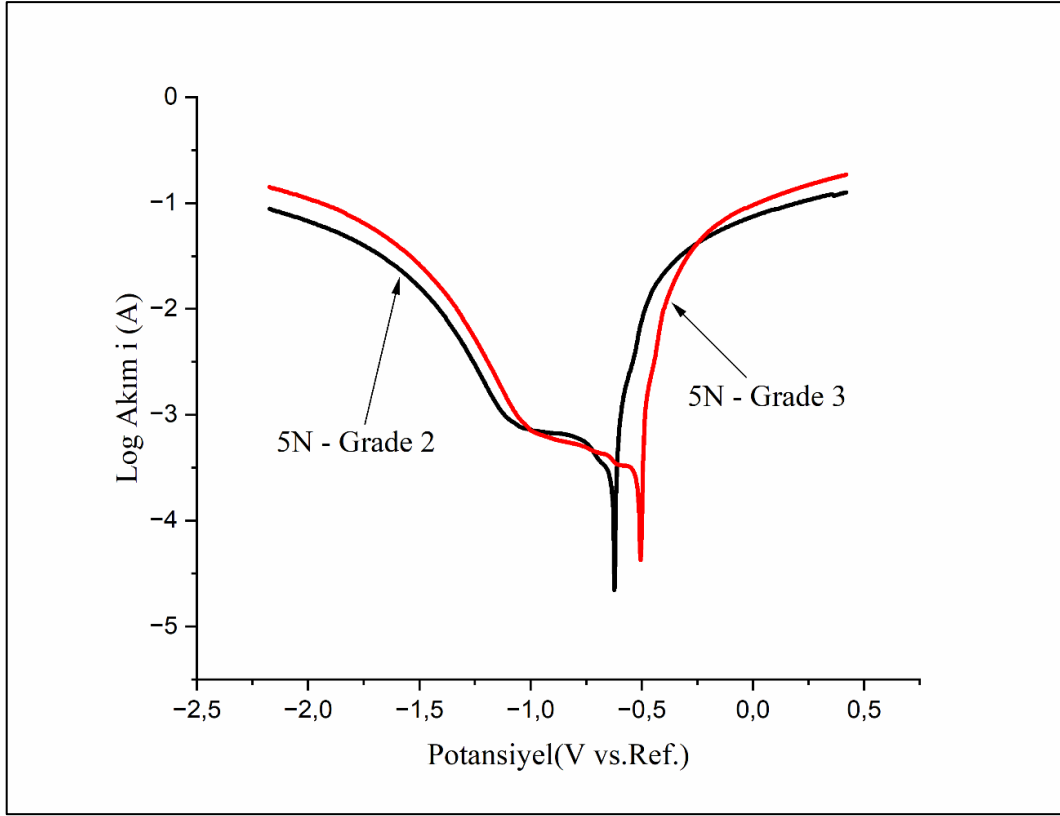


Şekil 6.1: Grade 2 zincir çeliğinin yüksüz ve 5N yük altındaki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri



Şekil 6.2: Grade 3 zincir çeliğinin yüksüz ve 5N yük altındaki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri

Şekil 6.3'te, 5N yük altındaki Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri sunulmuştur. Kayma durumundaki tribokorozyon şartlarında Grade 2 zincir çeliğinin korozyon potansiyeli, Grade 3 zincir çeliğinin korozyon potansiyeline kıyasla daha düşüktür. Bu sonuç neticesinde Grade 2 zincir çeliğinin korozyon direncinin Grade 3 zincir çeliğinden daha iyi olduğunu göstermiştir.

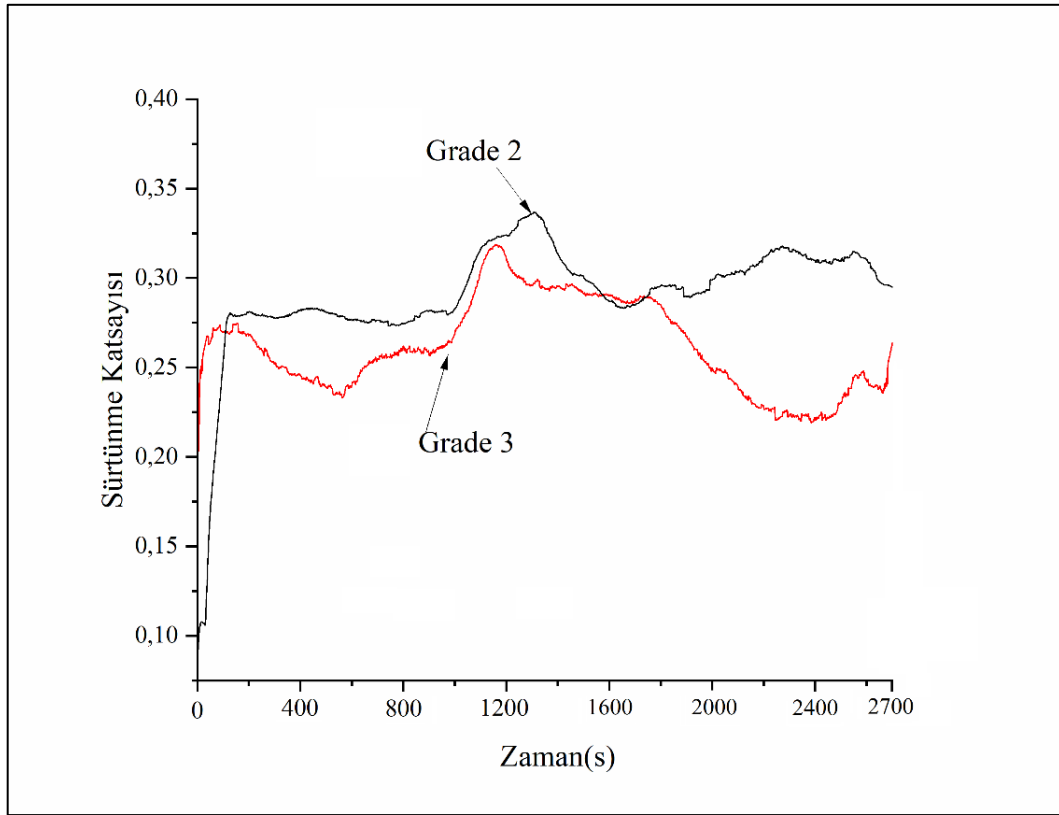


Şekil 6.3: Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin 5N yük altındaki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri

Şekil 6.4'te Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin 5N yük altındaki potansiyodinamik polarizasyonu sonucunda elde edilen sürtünme katsayıları verilmiştir. Şekil 6.4'teki Grade 2 zincir çeliğinin COF değeri incelendiğinde kaymaya başlama (run-in) mekanizmasında yüzeydeki pürüzler nedeniyle COF değerinin ani bir artış gösterdiği ve bu durumun ilk 1500 s zaman dilimine kadar devam ettiği görülmektedir. Buradan sonra COF değerinin stabil kaldığı 900 saniyelik zaman diliminden sonra ani bir yükselişe geçtiği 1300 saniyede pik yaptığı daha sonra ise düşerek 1700 saniyelerde stabil hale ulaştığı görülmektedir.

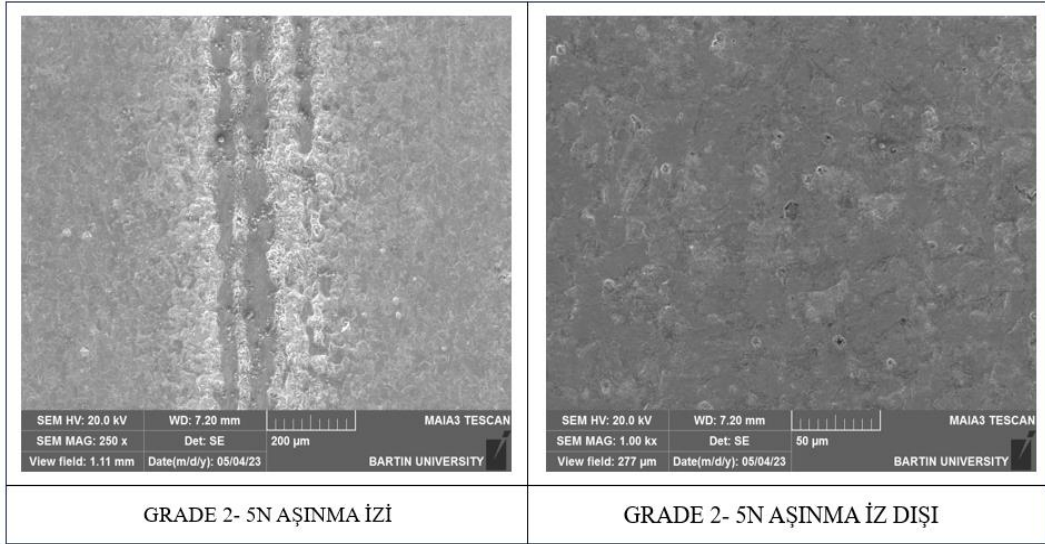
Şekil 6.4'teki Grade 3 zincir çeliğinin ise COF değerindeki dalgalanmaların daha kararsız olduğu görülmektedir. SEM mikroyapı analizlerine göre bu dalgalanmaların sebebi aşınma sonucunda Grade 3 zincir çeliğinde oluşan oksidasyon ve kırılmalar olabilir. Şekil 6.7'de Grade 3 zincir çeliğinin üzerindeki pürüzlenmeler açıkça görülmektedir. Bunun sebebi ise şöyle açıklanabilir: Grade 3 zincir çeliği sertleştirildikten sonra yüksek bir gerginliğe sahip olmaktadır. Grade 3 zincir çeliği için her ne kadar menevişleme işlemine tabi tutularak bu

gerginlik giderilmeye çalışılsa da mikro yapısında kalıntı bulunan gerilmelerin Grade 3 çeliğin polarizasyon şartlarında daha çok korozyona uğramasına neden olmuştur.

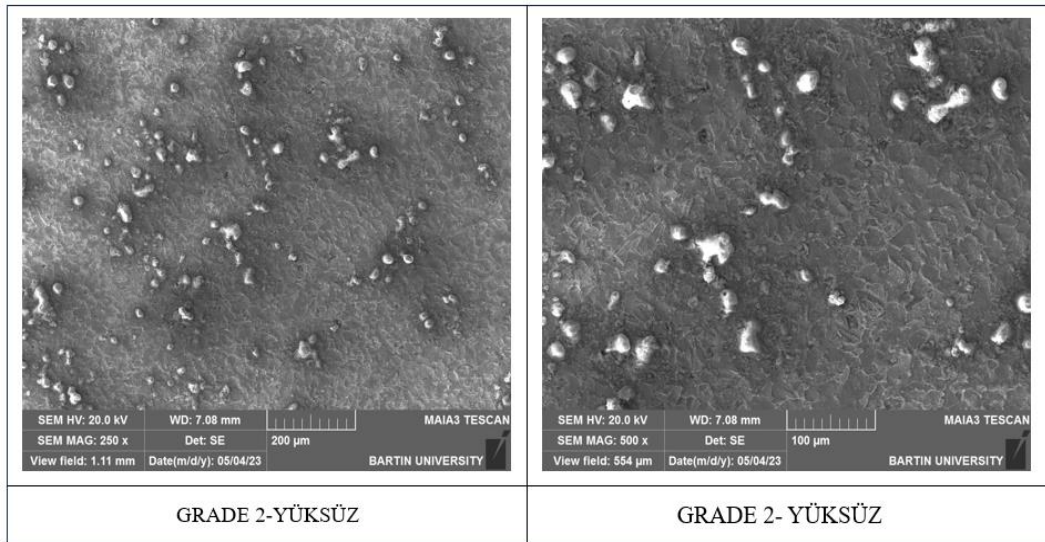


Şekil 6.4: Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin 5 N yükün potansiyodinamik polarizasyonunda sürtünme katsayıları

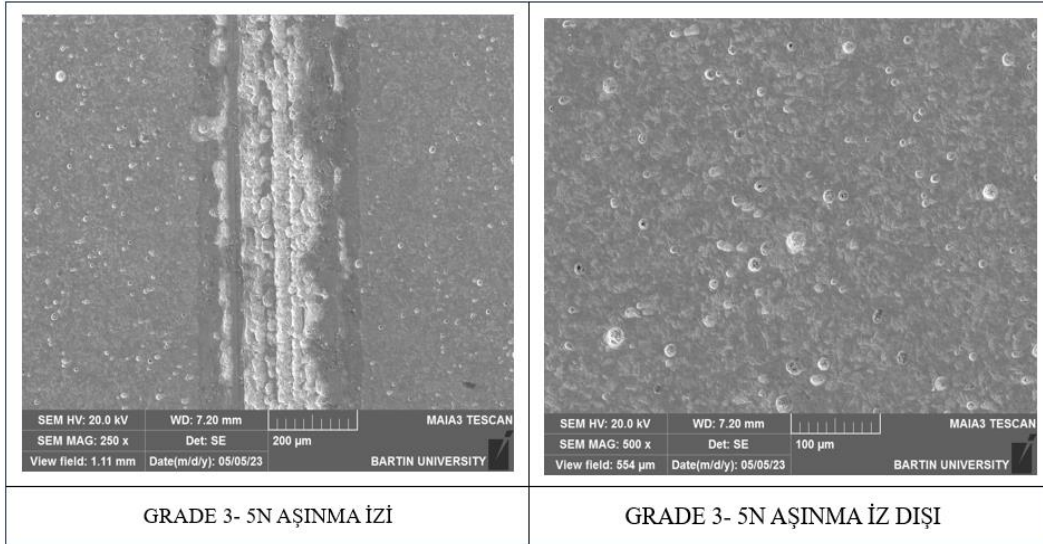
Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin potansiyodinamik polarizasyon deneyinde kayma aşınması testlerinden sonra aşınma yüzeyinden alınmış SEM görüntüleri ile aşındırılmamış alandaki korozif yüzey görüntüsü beraber verilmiştir (Şekil 6.5-6.7). Bu şekillerde gösterilen SEM görüntüleri, Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin yüzeyi boyunca genel korozyonun ve çukurçuklar şeklinde bazı lokalize korozyonun varlığını ortaya koymaktadır. Kayma altında test edilen numunelerde aşınma izinde oksidasyon mekanizması yanında plastik deformasyon mekanizması görülmektedir. Ayrıca aşınma atıkları ve kısmen klor partikülleri yüzeyde görülebilir. Aşınma izinin dışında kalan bölgelerde ise korozyonun etkisine bağlı olarak yüzeyde 5-15 μm çapında çukurçuklar ve yüzeye yapışmış klor iyonlarının varlığı görülmektedir Şekil 6.6-6.8'de.



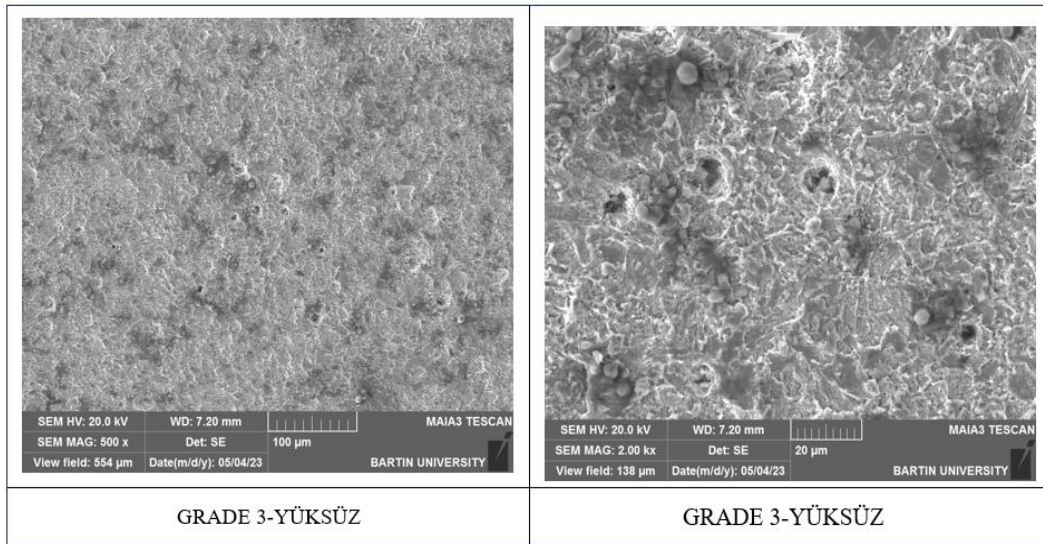
Şekil 6.5: Grade 2 -5N yük altındaki kayma aşınma izi ve aşındırılmamış bölgedeki aşınma iz dışı SEM görüntüleri



Şekil 6.6: Grade 2 yüksüz durumdaki, kayma olmayan, aşınma izi SEM görüntüleri



Şekil 6.7: Grade 3 -5N yük altındaki kayma aşınma izi ve aşındırılmabölgedeki aşınma iz dışı SEM görüntüleri



Şekil 6.8 : Grade 3 yüksüz durumdaki, kayma olmayan, aşınma iz SEM görüntüleri

Tablo 6.3, %3,5 NaCl'de korozyon ve tribokorozyon koşulları altında Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin standart Tafel polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal verileri göstermektedir. Tablo 6.3'e göre Grade 3 zincir çeliği için elde edilen korozyon potansiyeli Grade 2 zincir çeliğine göre korozyon şartlarında yaklaşık 1 kat daha fazla ve tribokorozyon koşullarında ise birbirine yakın çıkmıştır. Grade 3 zincir çeliğinin akım yoğunluğu Grade 2 zincir çeliğine göre korozyonda 2 kat daha fazla ve tribokorozyon koşullarına göre birbirine yakın çıkmıştır. Tablo 6.3'e göre Grade 2 zincir çeliğinin Grade 3 zincir çeliğine kıyasla korozyon durumunda iken daha düşük korozyon akımları, daha

yüksek korozyon direnci ve daha düşük korozyon hızları göstermektedir. Grade 2 zincir çeliği Grade 3 zincir çeliğine kıyasla tribokorozyon durumunda ise birbirine yakın korozyon akımları, korozyon direnci ve korozyon hızları göstermektedir. Tablo 6.3'teki sonuçlar değerlendirildiğinde; korozyon ortamında Grade 2 zincir çeliğinin performansı Grade 3 zincir çeliğinin performansından daha yüksektir. Tribokorozyon ortamında Grade 3 zincir çeliğinin performansı Grade 2 zincir çeliğinin performansıyla eş değer çıkmıştır.

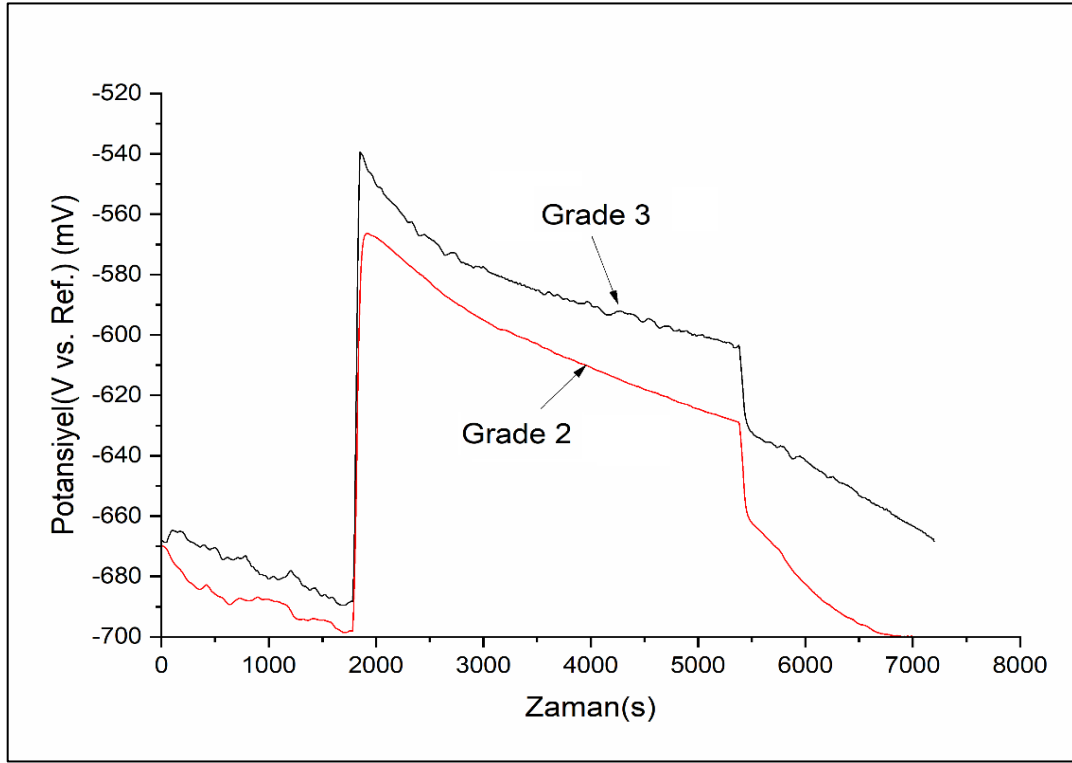
Tablo 6.3: Tafel ekstrapolasyonu ile %3,5 NaCl içinde Grade 2 ve Grade 3 zincir çelikleri için korozyon ve tribokorozyon koşulları altındaki polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal veriler

| | Korozyon | | Tribokorozyon | |
|--------------------|----------|---------|---------------|---------|
| | Grade 2 | Grade 3 | Grade 2 | Grade 3 |
| $E_{corr}(mV)$ | -818 | -633 | -539 | -509 |
| $I_{corr}(A/cm^2)$ | 2.86E-6 | 5.61E-6 | 1,47E-4 | 1,5E-4 |
| Corr Rate(mmpy) | 0,0656 | 0.1286 | 3,3722 | 3,4261 |

6.2. Açık Devre Potansiyeli Altında Tribokorozyon Davranışı

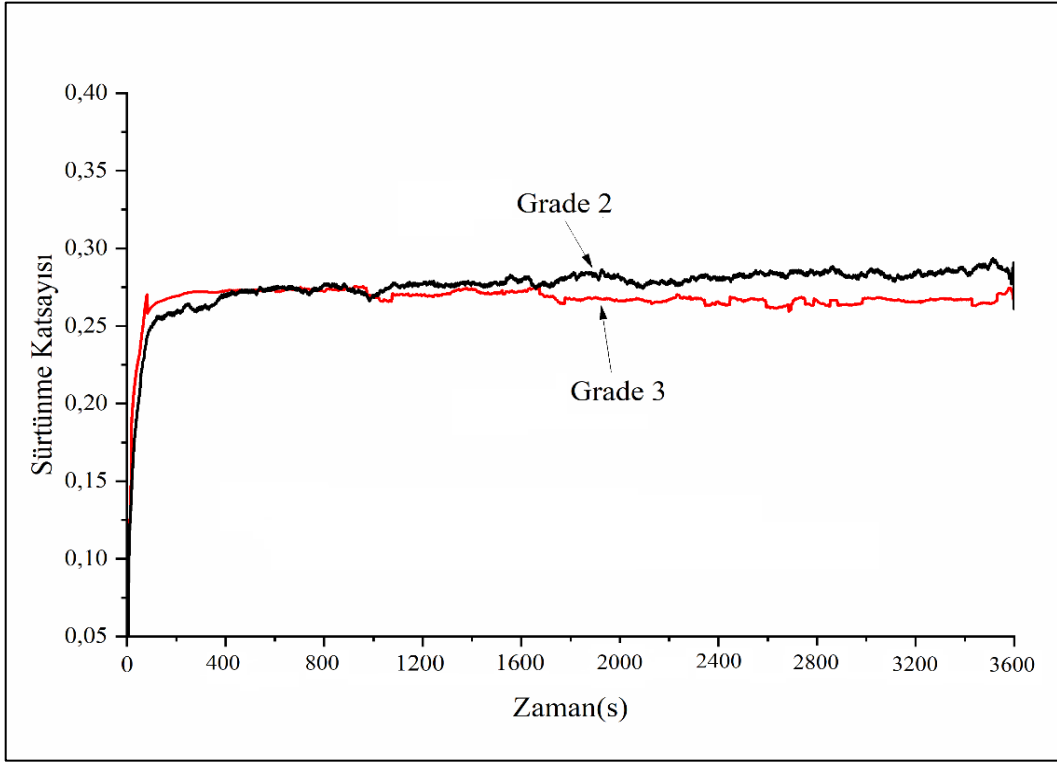
S355J2 malzemesinin Grade 2 ve Grade 3 zincir çelikleri numunelerinin doğal korozyon potansiyellerini belirlemek için açık devre potansiyeli yöntemi kullanılarak tribokorozyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında, numuneler 3600 saniye süreyle elektrolit ortamda bekletilerek denge potansiyeline ulaşmıştır. 1800 s boyunca yüksüz OCP değerleri kaydedilmiştir. Daha sonra, numunelere 5 N yük uygulanarak 3600 s boyunca deniz suyu içerisinde aşındırma işlemine tabi tutulmuştur. Aşındırma işlemi sonlandırıldığında numunelerin potansiyellerinin dengeye gelmesi için 1800 s daha OCP ölçümleri devam ettirilmiştir. Şekil 6.9'da gösterildiği gibi, aşınma işlemi başladığında potansiyel değerinde hızlı bir yükselme meydana gelmiş, ardından potansiyel değeri azalarak daha sabit bir seviyeye gelmiştir. Aşınma işlemi sonlandırıldığında, 5400 s sonra potansiyel değerinde tekrar bir azalma ve zamanla kararlı bir potansiyel görülmüştür. Aktif malzemeler, pasif

malzemelerden farklı olarak, tribokorozyon koşullarında aşınma ile birlikte açık devre potansiyelinde yükselme göstermiştir. Bu yükselmenin nedeni, aşınmaya maruz kalmayan bölgede çok sayıda mikro anodik alanın oluşması ve aşınma izinin ise büyük ölçekli bir katot gibi davranmasıdır. Bu sonuç literatürdeki diğer sonuçlar ile uyumludur (Alkan ve Gök 2021).



Şekil 6.9: 5N yük altında Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin açık devre potansiyeli

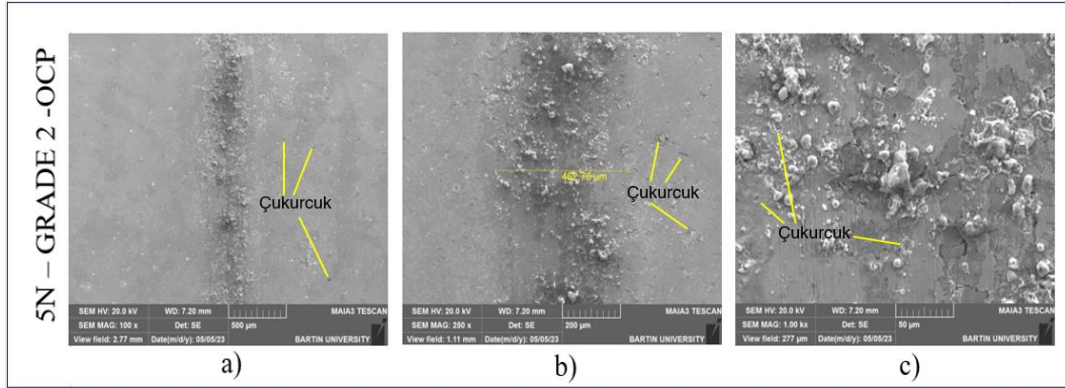
Grade 2 ve Grade 3 zincir çelikleri malzemesinin OCP altındaki sürtünme katsayısının zaman içinde nasıl değiştiği Şekil 6.10'da gösterilmiştir. Testler sırasında kaydedilen sürtünme katsayıları (COF), her iki Grade çelikleri için de çok benzerdir. Sürtünme katsayısının aşınma başlangıcında ani bir yükseliş göstermesi, zaman içinde daha az bir oranda devam etmiştir. Açık devre potansiyelinin yüksek olduğu ilk 1000 s aşınma sürecinde sürtünme katsayısının hızlı yükselişi, korozyon potansiyeli ile aşınma arasındaki güçlü bağlantıyı göstermektedir. Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin deney öncesinde 1 saat ve açık devre ölçümleri için 30 dakika deniz suyu bekletilmesi, yüzeylerinde pas tabakasının oluşmasına sebep olmuştur. Sürtünme katsayısının baştaki yükselişine bu pas tabakası etki etmiştir. % 3,5 NaCl ortamında ölçülen sürtünme katsayısı değerleri, literatürdeki diğer çalışmalarla uyumlu bulunmuştur (López vd., 2015).



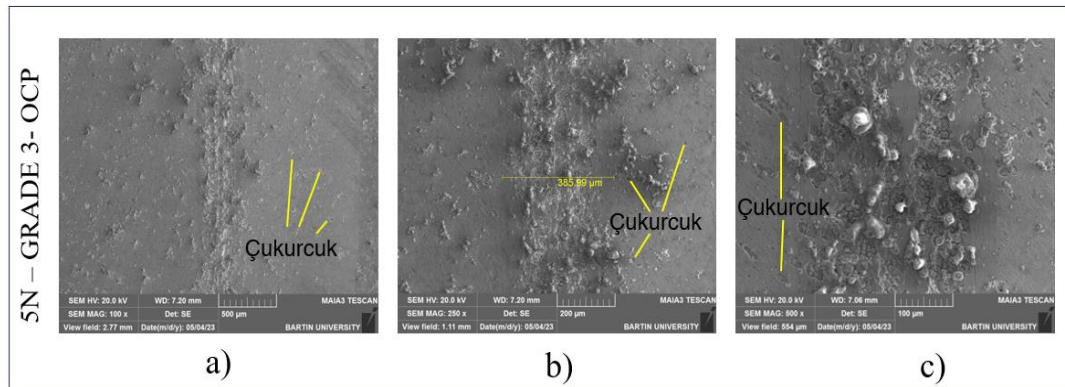
Şekil 6.10: Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin 5 N yük altında deniz suyu içindeki sürtünme katsayısı

Tribokorozyon davranışının incelenmesinde mikro analizler önemli bir rol oynamaktadır. Bu analizler aşınma izi ve çevresinin durumu hakkında fikir vermektedir. Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin Şekil 6.11-6.12'de OCP altında, 5 N yüklü durumdaki oluşan aşınma izinin SEM görüntüleri sunulmuştur. SEM görüntülerinde OCP altındaki korozyon süreçleri sonucunda malzeme kopması açıkça görülmektedir. Şekil 6.11-6.12.a'da aşınma izinin yüzeyi pürüzlü bir yapıya sahip olduğu gözükmemektedir. Şekil 6.11-12.c'de görüldüğü gibi, iz içindeki malzeme aşınması olarak kopmalar görülmüştür; korozyon ürünleri olarak ise çukurculaşma mevcuttur. Korozyon ürünleri, aşınma izinin kenarları ve aşınmamış yüzey üzerinde yoğunlaşmıştır; bu da bu bölgede artmış anodik çözünme eğilimi olduğunu işaret etmektedir. Şekil 6.11-12.b'de de görüleceği üzere, aşınma izi ve aşınmamış alanlardaki korozyon davranışı hakkında önemli veriler elde edilmiştir. Aşınmamış alanda şiddetli çukurlaşma oluşumu gözlenmiştir, bu da bu alandaki anodik çözünmenin yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. SEM görüntüleri ve EDS spektrum analizleri birlikte değerlendirildiğinde, yüzeyde bulunan Cl iyonlarının çukurlaşma korozyonunu tetikleyen başlıca unsur olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, aşınma alanında aşınma izinden kaynaklanan

malzeme kopmaları nedeniyle üçüncü cisimler oluştuğu saptanmıştır. Benzer sonuçlar diğer araştırmalarda da gözlemlenmiştir (Alkan ve Gök, 2021; Alkan, 2022a; Alkan, 2022b; Alkan, 2023).



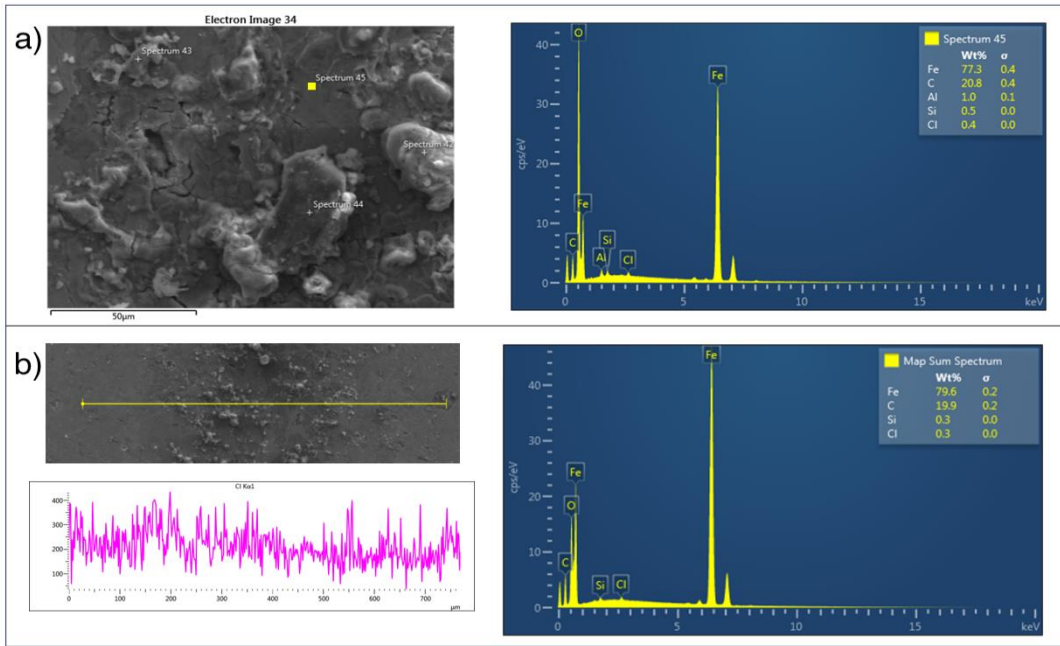
Şekil 6.11: Grade 2 zincir çeliğinin 5 N yükteki ve OCP altında aşınma faktörünün SEM görüntüleri (a) aşınma izi görüntüsü, (b) aşınma izi genişliği, (c) aşınma izi yapısı



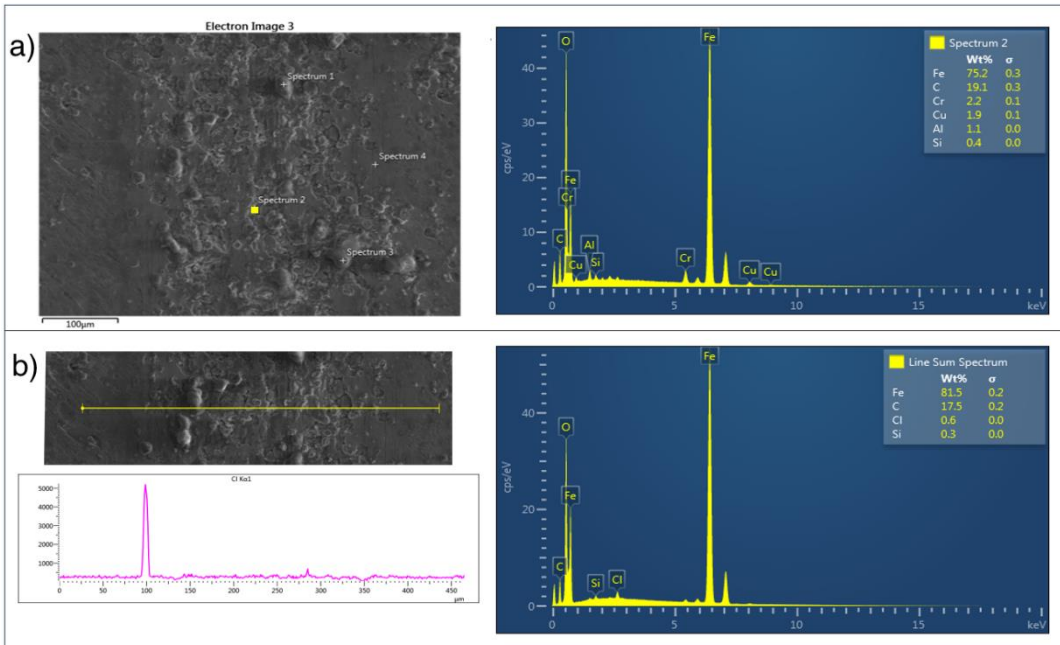
Şekil 6.12: Grade 3 zincir çeliğinin 5 N yükteki ve OCP altında aşınma izinin SEM görüntüleri (a) aşınma izi genel görüntüsü, (b) aşınma izi genişliği, (c) aşınma izi yapısı

Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin OCP deneyleri sonucunda elde edilen aşınma izi görüntüsü üzerinden noktasal ve çizgisel olarak alınan EDS analizleri Şekil 6.13.a-b-6.14.a.b'de sırası ile verilmiştir. Şekil 6.13.a-6.14.a da verilen noktasal EDS sonuçları incelendiğinde aşınma izi ve üzerinde Cl iyonu varlığı açıkça gözükmektedir. Bunun dışında elementler çeliğin mikro yapısına (kimyasal yapısına) aittir. Aşınma izi SEM görüntüleri üzerinde oluşan mikro çukurlar ve bunların etrafında meydana gelen mikro çatlaklar

görülmektedir. Şekil 6.13.b ve 6.14.b de çizgisel EDS analizinden elde edilen görüntülerde Cl varlığı görülmektedir.



Şekil 6.13: OCP altındaki Grade 2 zincir çeliğinin EDS analizi ve aşınma izi görüntüsü



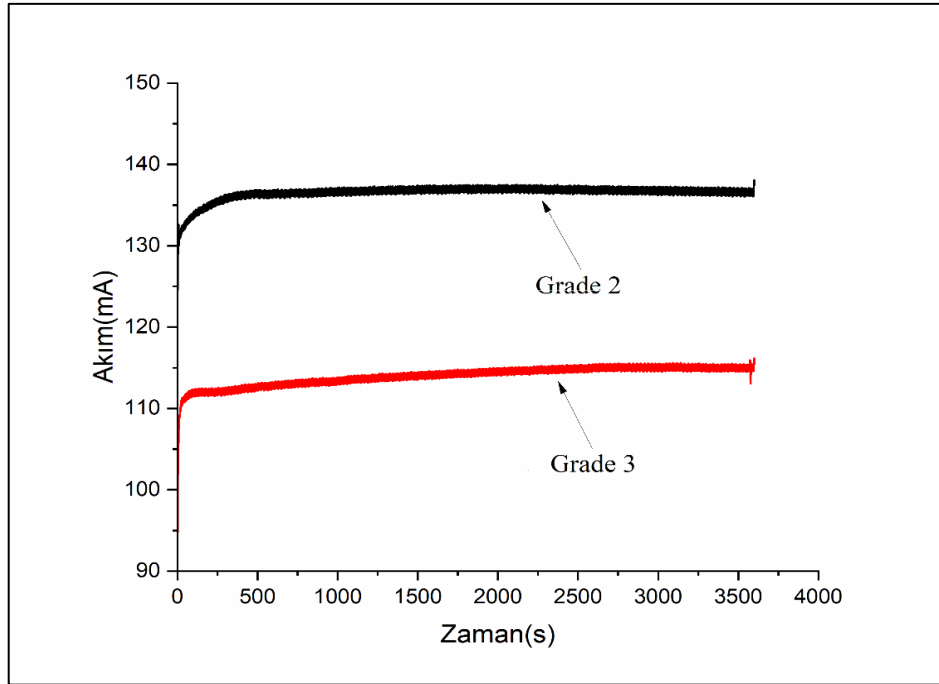
Şekil 6.14: OCP altındaki Grade 3 zincir çeliğinin EDS analizi ve aşınma izi görüntüsü

6.3. Potansiyostatik Gerilim Altındaki Tribokorozyon Davranışı

6.3.1. 0,3 V Gerilim

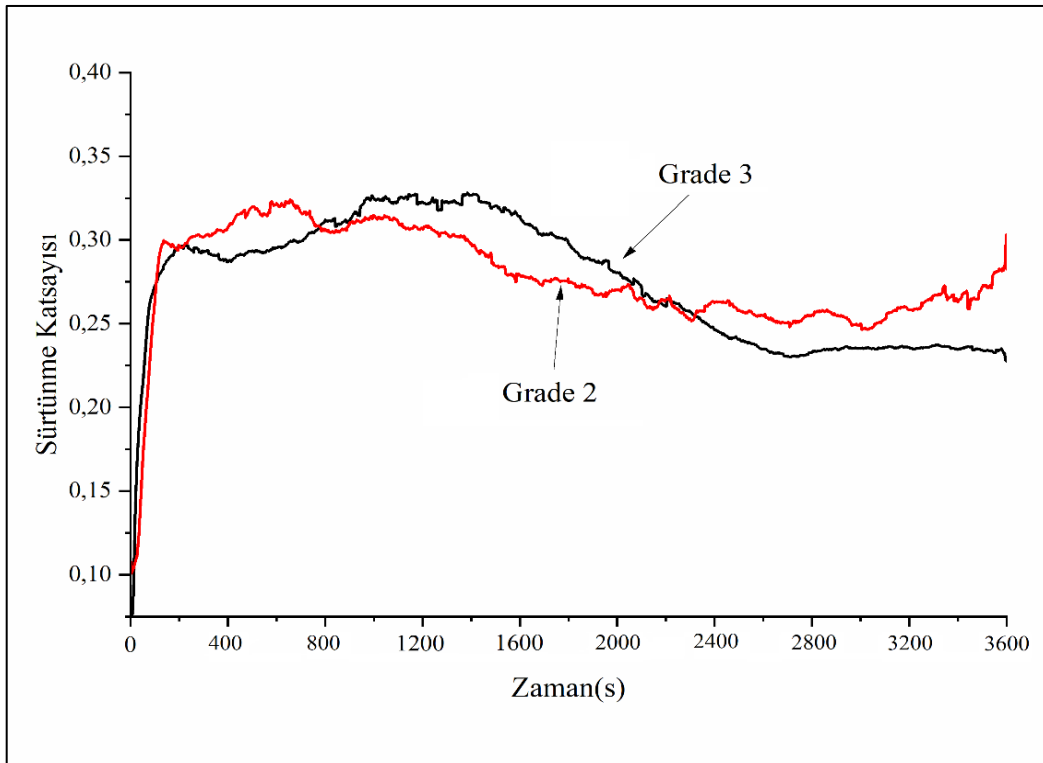
Tribokorozyon araştırmalarında, malzeme bozunum mekanizmalarını anlamak için potansiyostatik gerilim (sabit bir gerilim) uygulamak önemlidir. Açık devre potansiyeli ve potansiyodinamik tarama değerlerine göre anodik tarafta kalacak şekilde 0,3 V sabit bir gerilim seçilmiştir. Bu amaç doğrultusunda, 0,3 V anodik gerilimde Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliğlerinin tribokorozyon deneyleri gerçekleştirilmiştir.

şekil 6.15'te 0,3 V sabit gerilimde ve 5N yük altındaki durumda potansiyostatik polarizasyon deneyi yapılmıştır. şekil 6.15'te sunulan verilere göre, zamanla aşınma etkileriyle birlikte akım değerleri artmıştır. Akım değeri Grade 2 zincir çeliğinin Grade 3 zincir çeliğine göre daha yüksek gözlemlenmiştir. Akım yoğunluğundaki artış, korozyon kaynaklı malzeme bozunumunun arttığına işaret etmektedir. Dolayısıyla, daha yüksek akım yoğunluğuna sahip malzemeler daha fazla korozyona maruz kalmaktadır. Korozyon oranı yüksek olan malzeme Grade 2 zincir çeliği olarak belirlenmiştir. Grade 3 zincir çeliğinin korozyon oranı ise Grade 2 zincir çeliğine göre daha dūřüktür.



şekil 6.15: 5 N yük ve 0,3 V potansiyostatik gerilim altında akımın zamanla değişimi

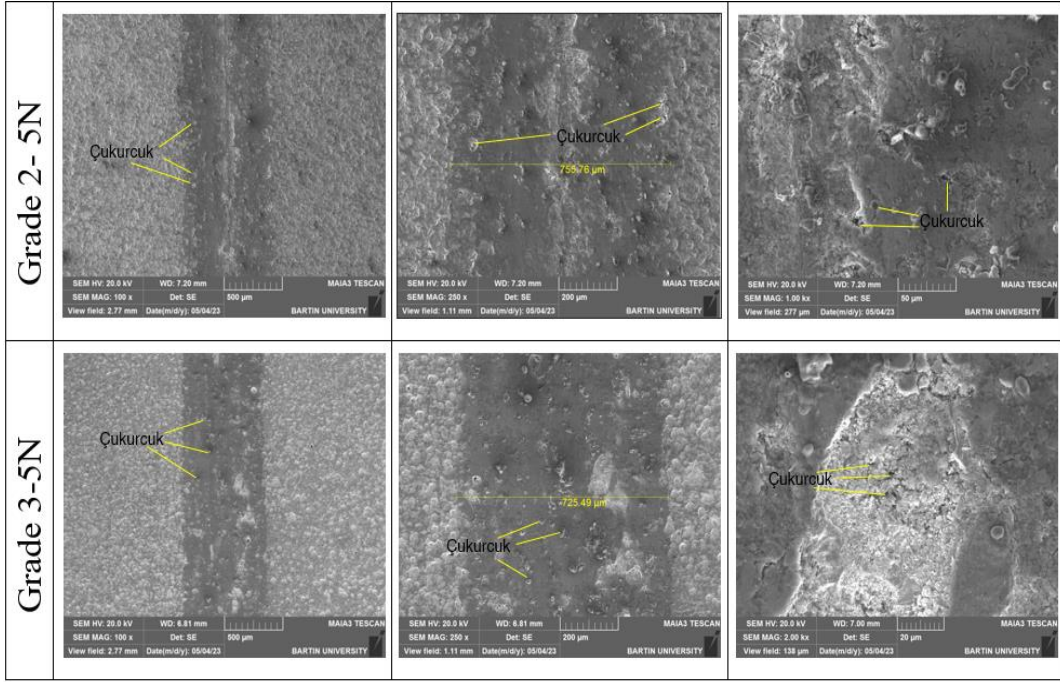
Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin 0,3 V gerilim ve yüklü durumdaki ortalama sürtünme katsayıları kaydedilmiş, Şekil 6.16'da gösterilmiştir. Grade 2'nin COF grafiği yorumlandığında yaklaşık 500 saniyelik değere kadar COF değerinin arttığı, buradan 2400 saniyelik zaman dilimine kadar sürekli düştüğü ve bundan sonra dalgalanmalar olsa da stabil kaldığı gözükmemektedir. Bu durumu daha iyi açıklayabilmek için Şekil 6.17'de verilen Grade 2 zincir çeliğinin yüklü durumdaki SEM aşınma izi görüntüleri incelenmiştir. Şekil 6.17'de yüzeyde kesif bir oksidasyon tabakasının varlığı hem renk kontrastından hem de yapılan EDS sonuçlarından oksidasyon tipi bir aşınmanın gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Zamanla oluşan bu yapı katı yağlayıcı görevi üstlenerek aşınma direncinin yükselmesine, sürtünme katsayısının düşmesine neden olmaktadır. Grafikte görülen dalgalanmalar ise yine Şekil 6.7 Grade 2-5N bakıldığında yüzeyde oluşan çukurcuklar ve aşınma bozulmaları buna sebeptir. Aynı durum biraz farklılık göstermekle birlikte Grade 3 zincir çeliği için de geçerlidir.



Şekil 6.16: 5 N yükteki ve 0,3 V akımda potansiyostatik gerilim altındaki sürtünme katsayıları

Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin 0,3 V sabit gerilim ve 5 N yüklü durumdaki tribokorozyon testlerine maruz kaldıkları süreçte oluşan yüzey hasarlarının SEM görüntüleri Şekil 6.17'de sunulmuştur. SEM görüntülerinde aşınma izi ve dışında, mikro ve makro

ölçekte çukurcuk korozyonlarının olduğu gözlemlenmiştir. Bu tür hasar mekanizmaları, farklı araştırmacılar tarafından da gözlemlenmiştir (López vd., 2018a; Alkan, 2019; Alkan ve Gök, 2021; Alkan ve Gök, 2022). Ayrıca anodik potansiyel altındaki aşınma izi üzerindeki çatlakların yanında oksidasyon tabakası anodik çözünmeyi kanıtlar (Alkan, 2022a). Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin anodik gerilim altında hasar oluşumu benzer bir şekilde izlenmiştir.



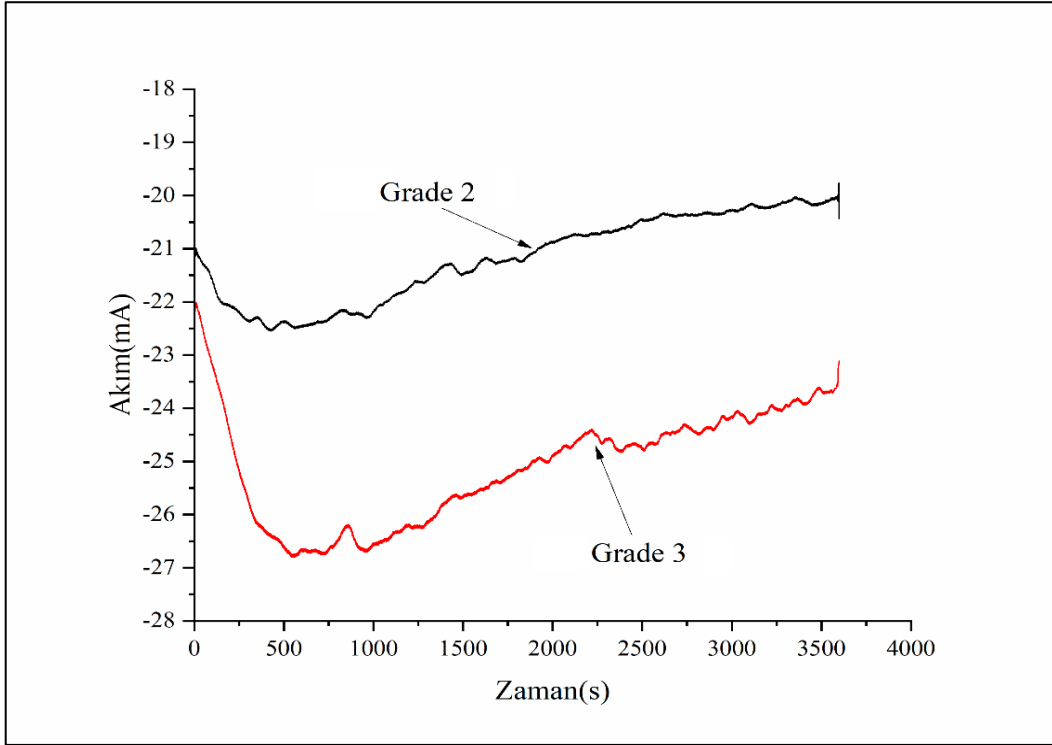
Şekil 6.17: 0,3 V anodik potansiyel altındaki SEM görüntülerinin aşınma izi

6.3.2 (-1,5) V Gerilim

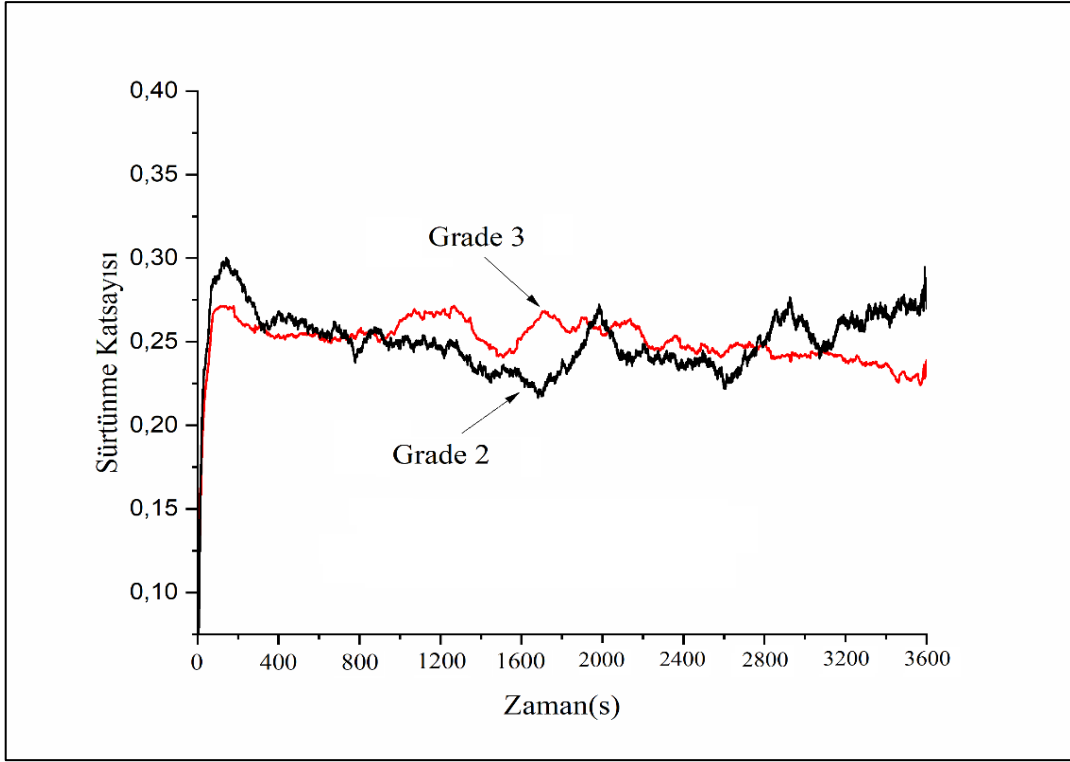
İkinci potansiyostatik deney, (-1,5) V katodik potansiyel geriliminde yapıldı. Açık devre potansiyeli ve potansiyodinamik değerlerine göre katodik tarafta kalacak şekilde (-1,5) V sabit bir gerilim seçilmiştir. Bu potansiyel, her iki Grade'teki zincir çelikleri için yüksüz ve 5N yüklü durumlarda saptanan potansiyellerden daha düşüktür, bu yüzden numune katodik olarak korunmaktadır. Bu sayede, korozyon oluşumu önlenir ve saf mekanik aşınmanın aşınma izindeki toplam malzeme kaybına etkisi belirlenebilmektedir.

Şekil 6.18'de Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin tribokorozyon deneylerinde (-1,5) V gerilim ve 5N yüklü durumdaki akım yoğunluğunun zamanla nasıl değiştiğini göstermektedir. Katodik koruma sağlamak için akımın negatif değerde olması

gerekmektedir. Şekil 6.18’de incelendiğinde Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin bu durumu başarılı bir şekilde gerçekleştirdikleri görülmektedir. Bu nedenle tribokorozyon deneylerinde meydana gelen malzeme kayıplarının korozyon kaynaklı değil de sadece mekanik etkilerden kaynaklandığı anlaşılmaktadır.



Şekil 6.18: 5 N yükteki ve (-1,5) V potansiyostatik gerilim altında akımın zamanla değişimi

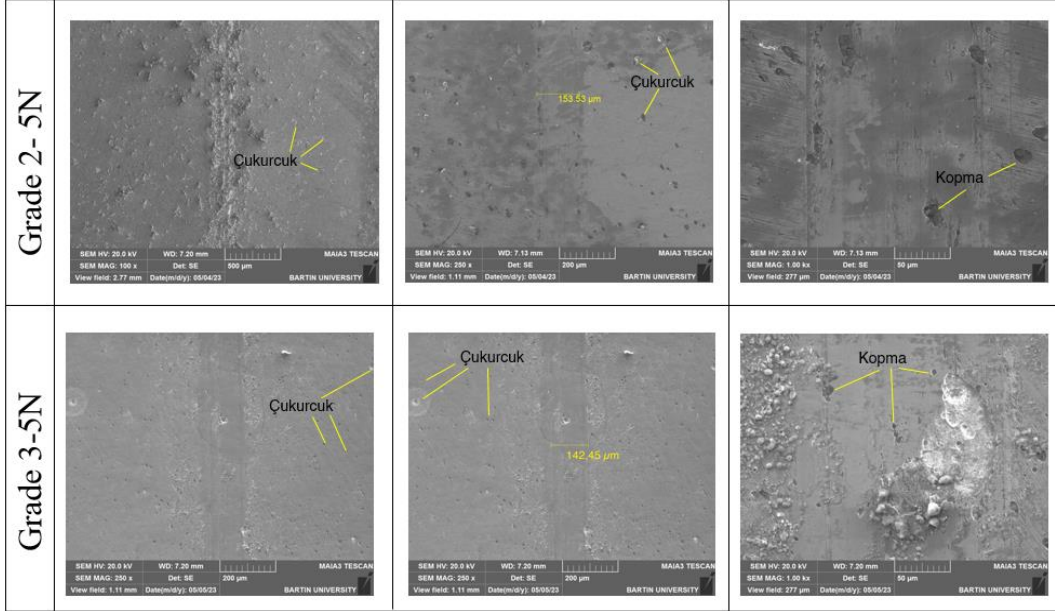


Şekil 6.19: 5 N yükteki ve (-1,5) V akımda potansiyostatik gerilim altındaki sürtünme katsayıları

Katodik gerilim altındaki sürtünme katsayılarındaki değişim kayıt altına alınmıştır. Şekil 6.19'da (-1,5) V gerilim ve 5N yüklü durumdaki Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin ortalama sürtünme katsayıları verilmektedir. Şekil 6.19'da Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin sürtünme katsayıları grafikte dalgalı ve birbirine çok yakın bir seyir izlemektedir. Şekil 6.19'da Grade 2 zincir çeliğinin sürtünme katsayısı Grade 3 zincir çeliğinin sürtünme katsayısına kıyasla daha yüksek bir değerle başlar ve daha yüksek bir değerle biter.

Şekil 6.20'de Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin tribokorozyon şartlarındaki potansiyostatik polarizasyon deneyinde (-1,5) V katodik potansiyel ve 5N yüklü durumdaki malzemelerin aşınma izi SEM görüntüleri verilmiştir. Katodik potansiyel altındaki SEM görüntüleri, aşınma yolunda, karşı gövdenin aşınmadan dolayı malzeme kopması, kazıma, keskin çizilme ve adezyon gibi saf mekanik etkiler belirgindir. Ayrıca aşınma yolunda korozyon ürünleri yoktur, alt tabaka ve karşı yüzey arasındaki yapışma-kayma davranışı malzeme kopmalarına neden olmuştur. Aşınma yolunda paralel oluk tespit edilmiştir (Alkan 2022a; Alkan ve Gök, 2021). (-1,5 V) katodik potansiyelde aşınma izleri, saf mekanik

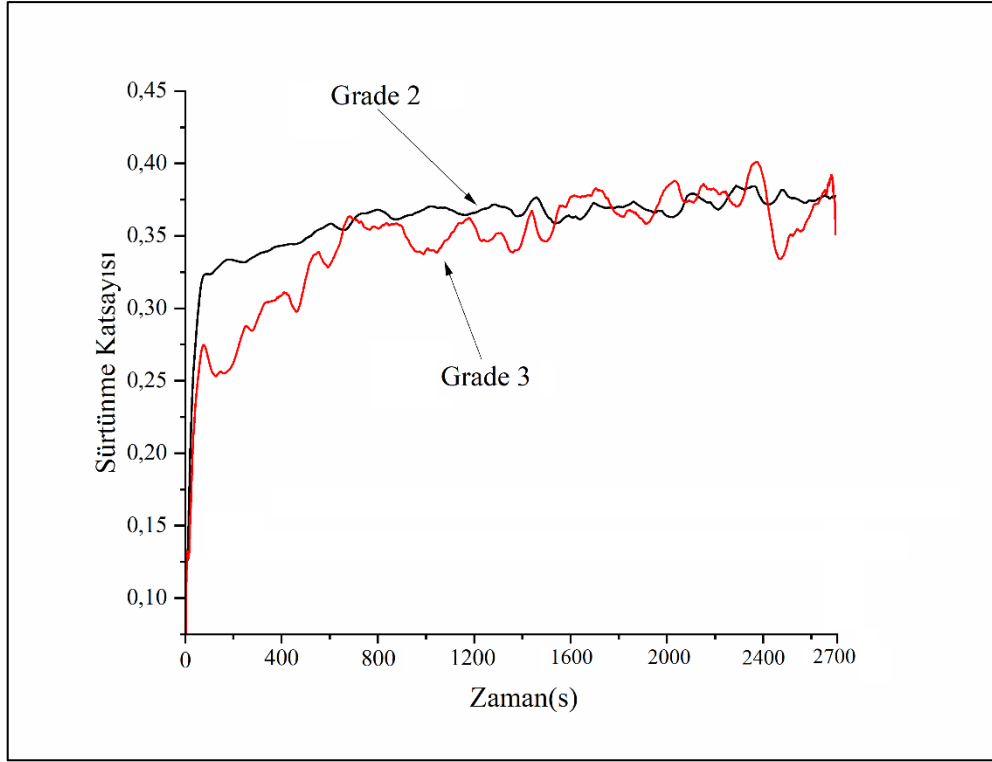
aşınma nedeniyle 0,3 V anodik potansiyelden daha dar ve daha inceydi (Alkan, 2021). Aşınma yolunun dışında ise, yüzeyde çukurcuk oluşumu gibi lokal korozyon etkileri görülmüştür.



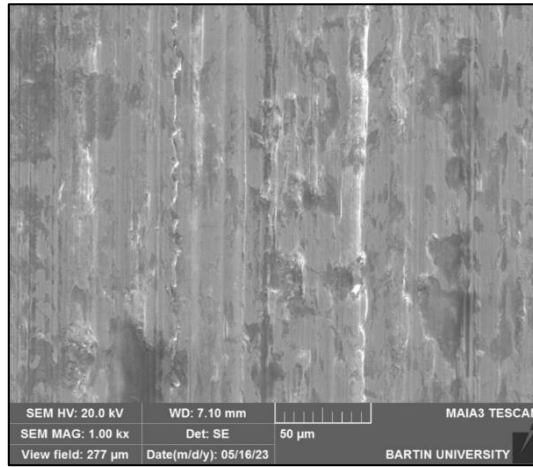
Şekil 6.20: (-1,5) V anodik potansiyel altındaki SEM görüntülerinin aşınma izi

6.4. Kuru Kayma Aşınması

Bu çalışmada, gemi demirleme zincirlerinin atmosferik koşullardaki tribolojik davranışları da incelenmiştir. Kuru kayma aşınması testi ile Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin sürtünme katsayıları belirlenmiştir. Şekil 6.21’de Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin 5N yük altında, 45 dakika süreyle kuru kayma aşınmasına maruz kaldıktan sonra elde edilen sürtünme katsayılarının zamanla değişimi gösterilmektedir. Grade 2 zincir çeliğinin başlangıçtaki sürtünme katsayısı Grade 3 zincir çeliğinden daha yüksek olmasına rağmen, daha sonra aradaki fark azalmıştır. Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin sürtünme katsayıları zamanla yaklaşık olarak sabit bir dalgalanma ile devam etmiştir. Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin sürtünme katsayısı atmosferik koşullarda deniz suyu ortamına göre daha yüksek çıkmıştır. Bu bulgular neticesinde, kuru kayma aşınması ile deniz suyu ortamındaki sürtünme katsayıları incelendiğinde, suyun sürtünme katsayısını azaltarak yağlayıcı etki gösterdiği ve aşınma mekanizmasının kuru kaymadan farklı olduğu söylenebilir.

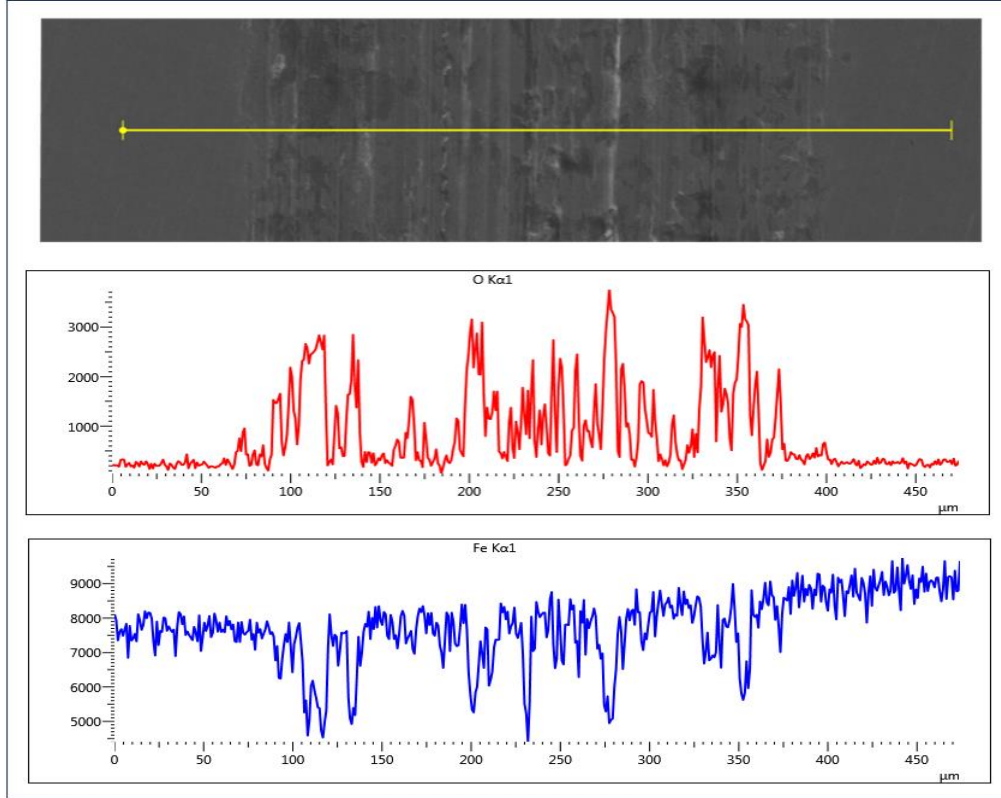


Şekil 6.21:Kuru kayma aşınması durumundaki sürtünme katsayıları



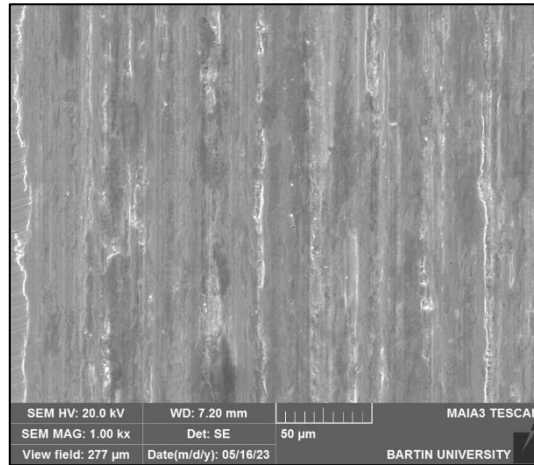
Şekil 6.22: Grade 2 kuru kayma aşınması aşınma izi SEM görüntüsü

Kuru kayma deneylerinden sonra Grade 2 zincir çeliğinin aşınma izi SEM görüntüsü Şekil 6.22’de verilmiştir. Aşınma yüzeyinin morfolojisinde oksidasyon, mikro çizilme olarak iki baskın mekanizma görülmektedir.



Şekil 6.23: Grade 2 kuru kayma aşınması EDS görüntüleri

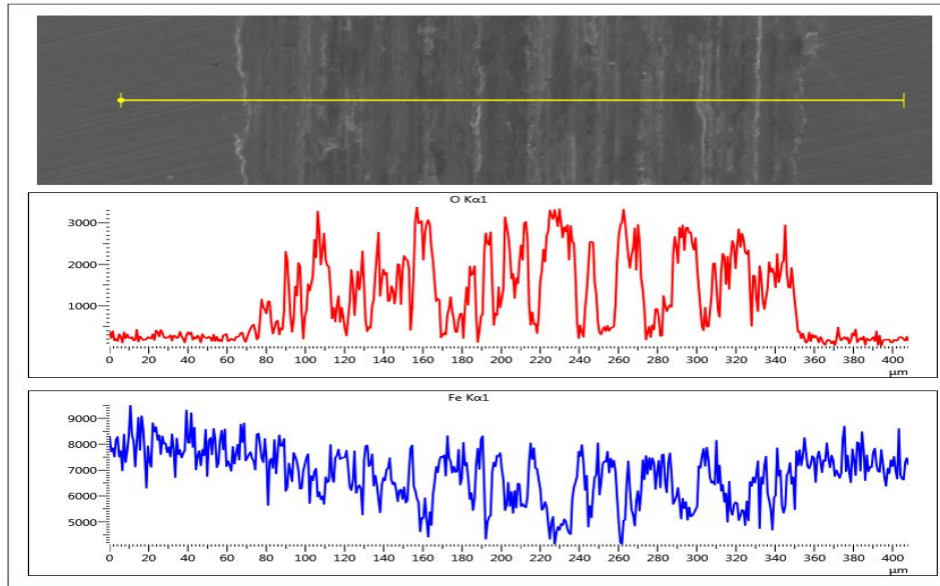
Grade 2 zinciri çeliğinin Şekil 6.22-23 SEM, EDS analizi incelendiğinde aşınma izi üzerinde meydana gelen oksit tabakasının varlığı görülmektedir.



Şekil 6.24: Grade 3 kuru kayma aşınması aşınma izi SEM görüntüsü

Kuru kayma deneylerinden sonra Grade 3 numunesinin aşınma izi SEM görüntüsü incelendiğinde (Şekil 6.24) aşınma yüzeyinin morfolojisinde oksidasyon ve mikro oluklanmalar tespit edilmiştir. Yüzeyin nisbeten daha pürüzsüz olduğu aşınma yüzey

görüntüsünden sertliğin bu duruma sebep olduğu düşünülebilir. Yine oksitce zengin bölgeleri gösteren EDS analizi Şekil 6.25 de görülmektedir.



Şekil 6.25: Grade 3 kuru kayma aşınması EDS görüntüleri

6.5. Değerlendirmelerin ve Bulguların Karşılaştırılması (Tartışma)

6.5.1. Potansiyodinamik Polarizasyon Eğrilerinin Karşılaştırılması

S355J2 çelik malzemesinin Grade 2 ve Grade 3 numunelerine yüksüz ve 5 N yük altında potansiyodinamik polarizasyon testleri yapılmıştır. Bu testler, malzemenin korozyon ve tribokorozyon durumlarındaki elektrokimyasal davranışını incelemeye yöneliktir. Potansiyodinamik testler akım yoğunluğunun potansiyele bağlı olarak değişimini değerlendirmeye yardımcı olmaktadır.

Şekil 6.1-6.2'de verilen potansiyodinamik polarizasyon eğrilerine göre, aşınmanın korozyon potansiyelini arttırdığı ve akım yoğunluğunu yükselttiğini göstermektedir. Yani, aşınma eğilimi olan malzemelerde korozyon riski artmaktadır.

Şekil 6.3'te tribokorozyon durumunda Grade 2 zincir çeliğinin korozyon direncinin Grade 3 zincir çeliğinden daha iyi olduğu anlaşılmaktadır. Bunun sebebi ısıtılma neticesinde atomlar arasındaki gerilmelerin Grade 2 zincir çeliğinde Grade 3 zincir çeliğinden daha az

olması olarak açıklanabilir. Bu da Grade 2 zincir çeliğinin Grade 3 zincir çeliğine kıyasla daha az korozyona uğramasına sebep olmuştur.

Şekil 6.4'te gösterilen verilere göre, Grade 2 zincir çeliğinin Grade 3 zincir çeliğine göre daha yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğunu ve bu nedenle daha fazla aşınmaya uğradığını göstermiştir.

Şekil 6.5-6.6-6.7-6.8'deki SEM görüntüleri, her iki alaşım çeliğinin Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinde genel korozyonun ve çukurcuklar şeklinde bazı lokalize korozyonun varlığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, kayma altında test edilen numunelerde aşınma izinde korozyon ürünleri oluşumu gözlenmektedir. Korozyon ürünleri kayma altında test edilen numunenin aşınmamış alanında daha belirgindir, bu da kaymanın aşınma yolunun dışındaki korozyon kinetiğini hızlandırdığını göstermektedir.

Potansiyodinamik polarizasyon grafiği, SEM görüntüleri ve sürtünme katsayıları Grade 2 ve Grade 3 çeliklerinin elektrokimyasal davranışını ve aşınma-korozyon etkileşimini anlamamıza yardımcı olmuştur. Aşınmanın korozyon potansiyelini yükselttiği ve kayma altında aşınmanın korozyonu arttırdığı gözlenmiştir. Sürtünme katsayılarına göre Grade 2 zincir çeliğinin Grade 3 zincir çeliğine kıyasla kayma altında daha fazla malzeme kaybına maruz kaldığı gözlenmiştir. Bu sonuçlara göre polarizasyon durumunda, Grade 2 zincir çeliğinin korozyon şartlarında Grade 3 zincir çeliğine kıyasla daha iyidir. Grade 3 zincir çeliği ise aşınma durumunda Grade 2 zincir çeliğine göre daha iyi dayanım göstermiştir.

6.5.2. Farklı Gerilimler Altındaki Tribokorozyon Davranışları

Farklı gerilimler (-1,5) V, OCP, (0,3V) ve 5 N yük altındaki tribokorozyon davranışlarını karşılaştırarak değerlendirmesi yapılmıştır.

Tribokorozyonun açık devre potansiyeline etkisini; Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin OCP değerleri Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Grade 2 zincir çeliğinin en düşük, Grade 3 zincir çeliğinin ise en yüksek OCP'ye sahip olduğu belirlenmiştir. Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin OCP davranışları benzerdir. Şekil 6.9'da gösterilen açık devre potansiyeli, aşınma işleminin başladığı anda hızlı bir yükselme ile başlar ve daha sonra potansiyel değeri azalarak sabit bir seviyeye gelmektedir. Aşınma işlemi sonlandırıldığında ise potansiyel

değerinde tekrar bir azalma görülmüştür. Bu gözlem, tribokorozyon koşullarında aktif malzemelerde aşınma ile birlikte potansiyelde yükselme olduğunu doğrulamaktadır.

Pasif malzemelerin tersine, karbon çelikleri gibi aktif malzemeler aşınma izinden değil aşınmayan bölgeden daha fazla malzeme kaybına uğrar. Pasif malzemelerde aşınma izindeki oksit tabakası kırıldığından bu bölgede potansiyel düşer, akım artar. Dolayısıyla da mekanik aşınmaya ek olarak aşınma izinden korozyon nedeniyle de malzeme kaybında artış olur. Bu durum aktif malzemelerde ise tam tersi şekilde gerçekleşir (Alkan, 2022; López, 2015). Aktif malzemelerde korozyon kaybı galvanik etkiler nedeniyle daha yüksek oranda iz dışından gerçekleşir. Bu durum OCP altında yapılan tribokorozyon deneylerinde Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin korozyon potansiyelinin kaymanın başlamasıyla artmasından (Şekil 6.9) açıkça anlaşılabilir. Oysaki pasif malzemelerde OCP altındaki tribokorozyon deneylerinde aşınma başladığında potansiyel düşmektedir. Bu da iz içindeki korozyon aktivitesinin hızlandığını göstermektedir (Alkan ve Gök, 2021).

OCP şartlarında Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin deney öncesinde 1 saat ve açık devre ölçümleri için 30 dakika deniz suyunda bekletilmesi, yüzeylerinde pas tabakasının oluşmasına sebep olmuştur. Aşınmanın başlaması, pas tabakasının etkisiyle açık devre potansiyelinin yükselmesine sebep olmuştur. Deniz suyu ortamında ölçülen açık devre potansiyeli, literatürdeki diğer çalışmalarla uyumlu bulunmuştur (López vd., 2015).

Şekil 6.10'daki OCP şartlarında sürtünme katsayısı değerleri, Grade 2 zincir çeliğinin Grade 3 zincir çeliğine göre daha fazla aşındığını göstermiştir. Bu durum, Grade 3 zincir çeliğinin daha yüksek sertliğe ve daha yüksek mukavemete sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

OCP şartlarındaki SEM görüntüleri ve EDS analizleri, aşınma izinin iç ve dış bölgelerinde deformasyonlar, çukurcuklar ve malzeme çıkıntıları olduğunu göstermiştir. Bu da aşınma sürecinin karmaşık ve lokalize bir olay olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 6.11-6.12'de görüntülerden anlaşıldığı üzere, Grade 2 zincir çeliğinin aşınma izi genişliği Grade 3 zincir çeliğinden daha büyüktür. Bu durum da Grade 2 zincir çeliğinin daha fazla aşındığını desteklemektedir. Aşınma izi içerisinde lokal deformasyonlar, malzeme çıkıntıları, kopma ve çukurluklar tespit edilmiştir. Bu bulgular, tribokorozyonun hem mekanik hem de kimyasal etkilerden kaynaklandığını doğrulamaktadır.

Şekil 6.13-6.14'te OCP durumdaki EDS analizlerinin aşınma izleri üzerindeki element dağılımını göstermektedir. Her iki zincir çeliğinin de aşınma izi yüzeylerinde yüksek miktarda Fe (demir) ve Cl (klor) elementleri tespit edilmiştir. Cl iyonunun deniz suyunda korozyonu artırıcı özelliği olduğu bilinmektedir, bu da tribokorozyon sürecinde korozyonu hızlandırdığını desteklemektedir.

OCP koşullarında Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin tribokorozyon performansları arasında önemli farklılıklar bulunmuştur. Grade 2 daha düşük korozyon potansiyeli nedeniyle daha az korozyona uğramış ve düşük sertlik nedeniyle daha fazla aşınmaya maruz kalmıştır. Grade 3 ise daha yüksek korozyon potansiyeli nedeniyle daha fazla korozyona uğramıştır ve daha yüksek sertlik ve daha iyi aşınma direnci sayesinde daha az aşınmıştır.

Tribokorozyonun sabit gerilim altındaki etkisini anlamak için 0,3 V potansiyostatik gerilim altındaki yapılan deneylerde akım değerleri zamanla artmıştır. Bu artış, korozyon kaynaklı malzeme bozunumunun arttığına işaret etmektedir. Daha yüksek akım yoğunluğuna sahip malzemelerin daha fazla korozyona maruz kaldığı belirlenmiştir. Bu deneylerde, Grade 2 zincir çeliğinin Grade 3 zincir çeliğine kıyasla daha yüksek korozyon oranına sahip olduğu tespit edilmiştir.

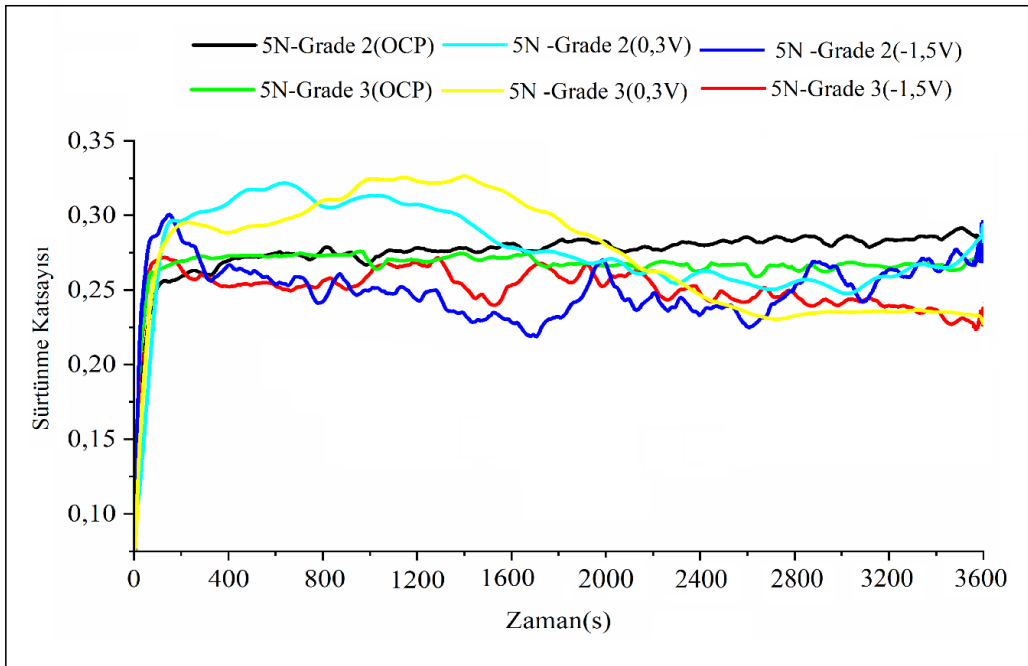
Şekil 6.17'de 0,3 V sabit gerilim altındaki SEM görüntüleri incelendiğinde, her iki zincir çeliğinde de anodik çözünme nedeniyle çukurcuk korozyonu gibi lokal korozyon mekanizmalarının belirgin olduğunu göstermiştir. Bu mekanizmalar literatürde benzer şekilde gözlemlenmiştir (López vd., 2018a; Alkan, 2019; Alkan ve Gök, 2021; Alkan ve Gök, 2022).

Tribokorozyonun gerilim altındaki etkisini anlamak için ikinci olarak, (-1,5) V katodik potansiyel gerilim altında yapılan deneylerde katodik koruma olabilmesi için akım değerleri negatif tarafta çıkması gerekmektedir. Şekil 6.181'de akım değerleri negatif taraftadır ve katodik olarak koruma sağlanmıştır. Grade 2 zinciri çeliğinin Grade 3 zincir çeliğine göre daha fazla saf mekanik aşınmaya uğramıştır. Bu deneylerde, malzeme kayıplarının sadece mekanik etkilerden kaynaklandığı ve korozyon oluşumunun engellendiği tespit edilmiştir.

Şekil 6.20'de (-1,5) V katodik potansiyel ve 5 N yüklü durumdaki zincir çeliklerinin aşınma izi SEM görüntüleri incelenmiştir. SEM görüntülerinde katodik koruma etkisi ile aşınma

yolunda malzeme kopması, kazıma, oluklanma gibi saf mekanik etkiler belirgindir. Saf mekanik aşınma etkisinden dolayı aşınma yolu içinde korozyon ürünlerinin oluşumu yoktur (Alkan 2022a; Alkan ve Gök, 2021). (-1,5 V) katodik potansiyelde aşınma izleri, saf mekanik aşınma nedeniyle 0,3 V anodik potansiyelden daha dar ve daha inceydi (Alkan, 2021).

Şekil 6.26’da Grade 2 ve Grade 3 malzemelerinin 5N yüklü durumdaki OCP, (-1,5V ve 0,3V) potansiyel gerilim değerlerinde sürtünme katsayıları incelenmiştir. Şekil 6.26’daki verilerden anlaşıldığı üzere, Grade 2 zincir çeliğinin 0,3 V koşullarındaki sürtünme katsayısı diğer potansiyel değerlerine kıyasla en yüksek seviyededir. Öte yandan, Grade 2 (-1,5) V zincir çeliğinin potansiyel değerindeki sürtünme katsayısı diğer potansiyel değerlerine kıyasla en düşük seviyededir. OCP değerindeki potansiyel ise diğer potansiyellere kıyasla ortalama bir değerdedir. Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin sürtünme katsayıları ise birbirine yakın değerler göstermektedir. Bu bulgular iki malzemenin de mekanik özellikler açısından benzerlik göstermesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.26: Grade 2 ve Grade 3’ün 5 N yük altındaki sürtünme katsayıları

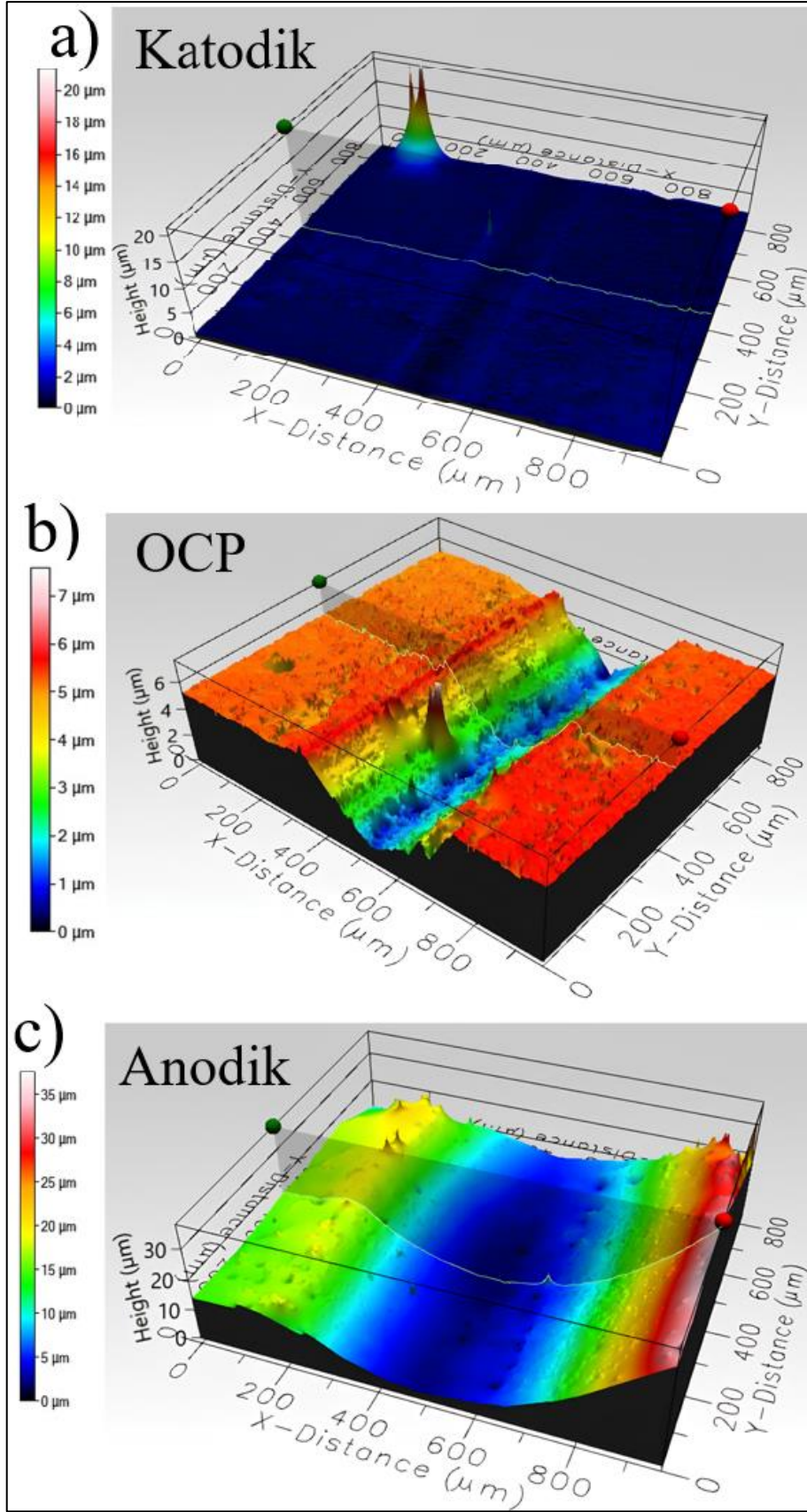
6.5.3. Aşınma Korozyon Sinerjisi

Tribokorozyon çalışmalarının kritik sonuçlarından biri, aşınma ve korozyonun birbirini nasıl etkilediğini, yani sinerjistik etkileşimlerini belirlemektir. Bu, çeşitli potansiyeller altında aşınma izlerinin oluşturduğu materyal kayıplarını analiz ederek gerçekleştirilmektedir. Bu bağlamda, tribokorozyon testlerinin ardından, aşınma izlerinin kesit alanları 3D optik bir profilometre kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir.

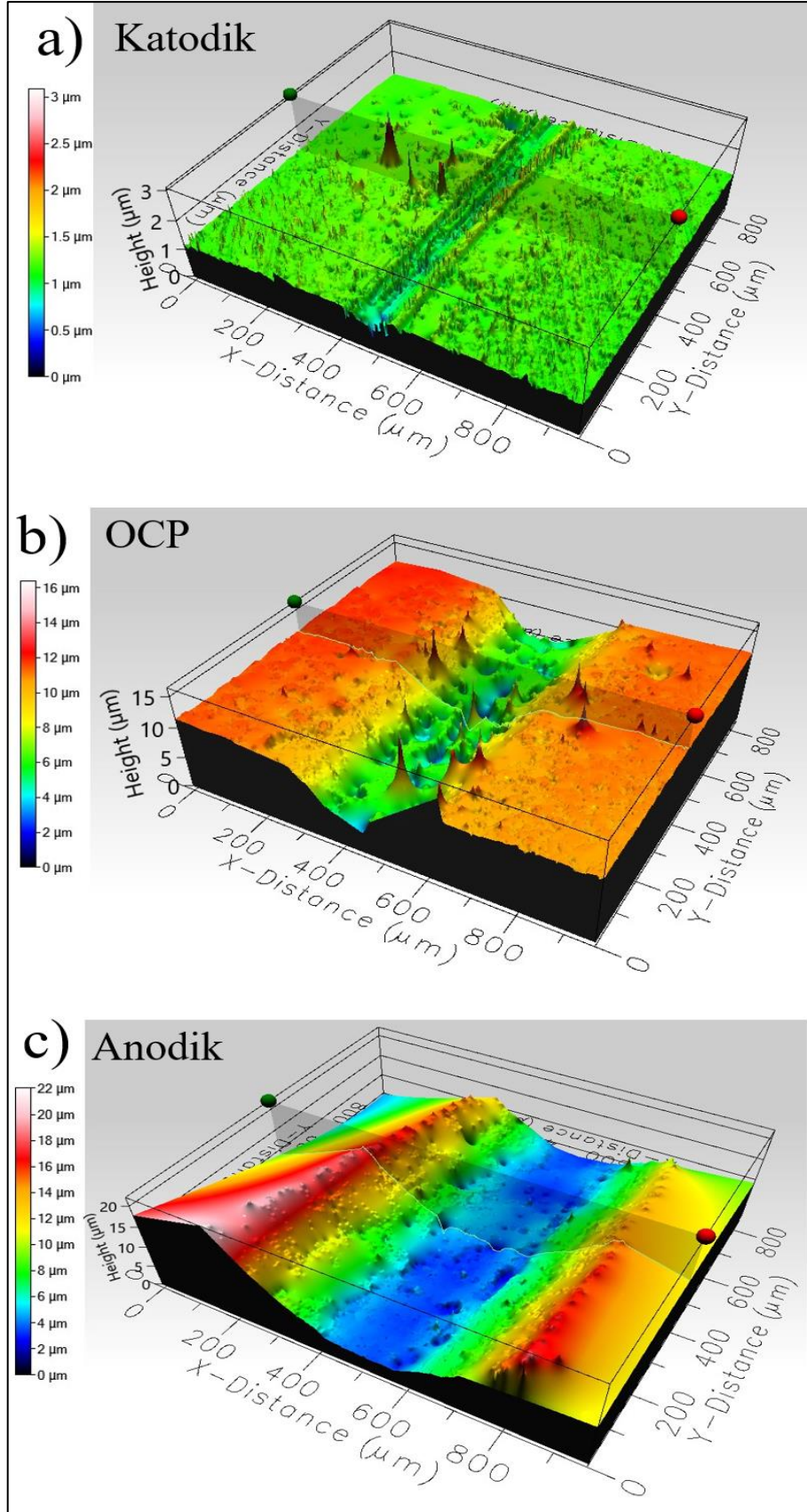
Gözlemler, Grade 2 ve Grade 3 zinciri çeliklerinin tribokorozyon testlerine maruz kaldıktan sonra yüzey morfolojilerinde önemli değişiklikler olduğunu ortaya koymaktadır. Optik profilometre görüntüleri, katodik, OCP ve anodik koşullar altında bu değişikliklerin belirgin farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır. Şekil 6.27'deki Grade 2 zinciri çeliğinin, Şekil 6.28'deki Grade 3 zinciri çeliği ile karşılaştırıldığında farklı aşınma ve korozyon boyutlarına sahip olduğunu göstermektedir.

OCP koşullarındaki Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin optik profilometre görüntülerinde, aşınma izinin oluşmadığı bölgede çok sayıda çukurcuk olduğu görülmüştür, Şekil 6.27-6.28'de gösterilmiştir. Bu durum, aşınmanın iz bölgesi haricindeki bölgede korozyon sürecini hızlandırdığını gösteren bir bulgudur (López vd., 2015; Alkan ve Gök, 2022; Alkan, 2023).

Şekil 6.27-28'deki Grade 2 ve Grade 3 zinciri çelikleri arasında belirgin farklılıklar gözlemlenmektedir. Katodik koşullarda, sadece saf mekanik etkilerle birlikte, daha az aşınma görülmüştür. OCP koşullarında, doğal potansiyel akımında herhangi bir gerilimin olmadığı durumda, anodik ve katodik koşullara kıyasla ortalama bir korozyon ve aşınma seviyesi tespit edilmiştir. Anodik durumda ise, malzemenin anodik çözünme ile birlikte korozyona ve aşınmaya maruz kaldığı gözlemlenmiş olup, bu koşullarda daha yoğun aşınma ve korozyon meydana gelmektedir. Anodik ve katodik durumlarda ise, aşınma izi dışında kalan bölgelerdeki çukurluklar ve lokal korozyonlar görülebilmektedir (Alkan ve Gök, 2021; Alkan, 2022b; Alkan, 2022a). Bu sonuçlar, Grade 2 ve Grade 3 zinciri çeliklerinin farklı elektrokimyasal koşullar altında nasıl davrandığını ve bu koşulların malzemenin aşınma ve korozyon karakteristikleri üzerindeki etkisini anlamamıza yardımcı olmaktadır.



Şekil 6.27: Grade 2 zinc çeliğinin a) katodik b) açık devre ve c) anodik potansiyeller altındaki optik profilometre görüntüleri



Şekil 6.28 Grade 3 zincir çeliğinin a) katodik b) açık devre ve c) anodik potansiyeller altındaki optik profilometre görüntüleri

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, S355J2 çelik alaşım malzemesinin Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin tribokorozyona ve kuru kayma aşınmasına, maruz kaldıklarında gösterdikleri davranışlar, farklı parametreler altında incelenmiştir. Deneysel veriler ışığında aşağıdaki sonuçlar ve önerilere ulaşılmıştır.

7.1. Sonuçlar

- Potansiyodinamik polarizasyon testlerine göre, Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinde aşınmanın potansiyeli ve akım yoğunluğunu yükselttiği belirlenmiştir. Aşınma ve korozyon arasında doğrudan bir ilişki bulunmuştur.
- Potansiyodinamik polarizasyon testleri, Grade 2 zincir çeliğinin Grade 3 zincir çeliğine göre daha yüksek bir korozyon direncine sahip olduğunu ortaya koymuştur.
- Potansiyodinamik polarizasyon deneyi sonrasında alınan SEM görüntüleri, her iki zincir çelik kalitesinde de genel ve lokalize korozyonun varlığını doğrulamıştır. Kayma altında test edilen numunelerde, aşınma izleri boyunca korozyon ürünleri gözlemlenmiştir. SEM görüntüleri sonucunda bozunma ve korozyon ürünlerinin varlığı, kayma altında test edilen numunenin aşınmamış alanında daha belirgindir, bu da kaymanın aşınma yolunun dışındaki korozyon kinetiğini hızlandırdığını göstermektedir.
- Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin OCP (açık devre potansiyel) değerleri, tribokorozyon koşullarında aşınma ile birlikte potansiyelde yükselme olduğunu doğrulamaktadır. Deniz suyu koşulunda bekletildikten sonra oluşan pas tabakası, aşınma başladığında açık devre potansiyelinin yükselmesine etki etmiştir.
- Açık devre potansiyeli deneyi neticesinde, Grade 2 zincir çeliği, Grade 3 zincir çeliğine kıyasla daha fazla aşınmaya maruz kalmaktadır. Grade 3 zincir çeliği, Grade 2 zincir çeliğine kıyasla daha fazla korozyona maruz kalmaktadır.

- Açık devre potansiyeli deneyinde Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin SEM ve EDS analizleri, aşınma sürecinin karmaşık ve lokalize olduğunu ve hem mekanik hem de kimyasal etkilerden kaynaklandığını ortaya koymaktadır.
- Tafel ekstrapolasyonu Grade 2 ve Grade 3 zincir çelikleri için korozyon ve tribokorozyon koşulları altındaki polarizasyon eğrilerinden elde edilen elektrokimyasal verilere göre; Grade 2 zincir çeliğinin korozyona performansı Grade 3 zincir çeliğine kıyasla daha iyi çıkmıştır. Grade 3 zincir çeliğinin tribokorozyon şartlarındaki performansı Grade 2 zincir çeliğine kıyasla eş değer çıkmıştır.
- 0,3 V potansiyostatik gerilim altında yapılan deneylerde anodik şartlarda, hem aşınma hemde korozyonunun olduğu durumda, Grade 3 zincir çeliğinin korozyon oranı Grade 2 zincir çeliğine göre daha düşüktür.
- (-1,5) V katodik potansiyel gerilim altında yapılan deneylerde, Grade 3 zincir çeliğinin saf mekanik aşınması Grade 2 zincir çeliğine kıyasla daha iyi çıkmıştır.
- Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin 5N yük altında sürtünme katsayıları, farklı potansiyel değerlerinde farklılık göstermiştir. Grade 3 zincir çeliğinin (-1,5) V katodik durumdaki ortalama sürtünme katsayısı diğer potansiyel değerlerine göre daha düşük çıkmıştır. Grade 2 zincir çeliğinin 0,3 V anodik durumdaki ortalama sürtünme katsayısı en fazla çıkmıştır.
- Kuru kayma aşınma deneyinde elde edilen 45 dakikalık sürtünme katsayıları, açık devre potansiyeli deneyinde aynı zaman diliminde ölçülen sürtünme katsayılarına kıyasla daha yüksek değerler göstermektedir. OCP deneylerinde zincir çeliklerinin su içerisinde sürtünme katsayılarının daha az olduğu gözlemlenmiştir, bu durum suyun bu deneyde kullanılmasının yağlayıcı bir etki oluşturduğuna işaret etmektedir.
- 3D optik profilometre kullanılarak yapılan incelemeler, anodik koşullar altında her iki Grade zincir çeliklerinin katodik koşullarına göre daha az aşınma oluşmuştur. OCP koşulları altında, Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinde de diğer potansiyellere (-1,5 V ve 0,3 V) kıyasla ortalama aşınma seviyesi görülmüştür.

- 3D optik profilometrede korozyon ürünlerinin, özellikle aşınma izinin kenarında ve aşınmamış yüzeyde görülebildiği, bu durumun daha fazla anodik çözünmeyi gösterdiği anlaşılmaktadır. Aşınmamış bölgedeki yoğun çukurlaşma, bu bölgede anodik çözünmenin yoğun olduğunu göstermektedir.
- Grade 3 zincir çeliğinin Grade 2 zincir çeliğine göre daha yüksek aşınma direncine sahiptir.
- Grade 3 zincir çeliğinin, korozyon durumunda Grade 2 zincir çeliğinden daha yüksek bir elektrokimyasal aktiviteye sahiptir.

Sonuç olarak, yapılan deneyler ve analizler, S355J2 malzemesinin Grade 2 ve Grade 3 gemi zincir çeliklerinin farklı gerilimler altında, yüksüz ve 5 N yüklü durumdaki tribokorozyon davranışının önemli olduğunu ve zincir çeliklerinin yüzeylerinde önemli değişikliklere neden olduğunu göstermektedir. Ayrıca, aşınma ile korozyon arasında güçlü bir bağlantının olduğu ve aşınma izi çevresinde korozyon sürecinin hızlandığı görülmektedir. Grade 2 zincir çeliği, Grade 3 zincir çeliğine kıyasla kayma altında daha fazla aşınmıştır. Grade 2 zincir çeliği korozyon durumunda ise Grade 3 zincir çeliğine kıyasla daha iyi bir performans göstermiştir. Grade 2 zincir çeliğinin yüksek aşınma durumlarına daha az maruz kaldığı ve korozyona maruz kaldığı uygulamalarda tercih edilmelidir. Grade 3 zincir çeliği ise, Grade 2 zincir çeliğine kıyasla kayma altında daha az aşınma gösterdiği için yüksek aşınma koşullarının yaşandığı uygulamalarda tercih edilmelidir. Özetle, Grade 3 zincir çeliği tribokorozyon şartlarında Grade 2 zincir çeliğine kıyasla tercih edilmelidir. Grade 2 zincir çeliği ise koroziif şartlarda Grade 3 zincir çeliğine kıyasla tercih edilmelidir. Netice olarak, her iki Grade zincir çeliklerinin de uygulamaları, özellikle aşınma ve korozyon koşulları, çeliğin genel özellikleri ve uygulamanın özel gereksinimleri doğrultusunda belirlenmelidir. Bu bilgiler ışığında, doğru Grade zincir çeliğini seçmek, performansı optimize etmek ve malzemenin ömrünü uzatmak için önemlidir.

7.2. Öneriler

Bu tez çalışmasının neticesinde, deniz suyu ortamında Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin kullanıldığı S355J2 alaşımının tribokorozyon davranışları hakkında önemli bilgiler sağlanmıştır. Bu bulgular, gelecekteki araştırmalara ışık tutmak adına önem taşıırken, aynı zamanda bu konu üzerine daha fazla araştırma yapılmasını teşvik etmek amacıyla aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

- Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin tribokorozyon davranışları yüzey modifikasyonları kaplama yöntemleri ile nasıl değiştirilebileceğini kapsamlı olarak incelemek, bu zincirlerin tribokorozyona karşı dayanıklılığına mikro ve makro ölçekte aydınlatılmasına fayda sağlayabilir.
- Sürtünmeyi ve dolayısıyla aşınmayı azaltmak için, Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin yüzeylerinde daha uygun bir yağlayıcı kullanılabilir. Yağlayıcı bir ortamda tribokorozyon deneyleri yapılarak nasıl bir etkileşim ve davranış gösterdiği incelenebilir.
- Tribokorozyon davranışlarının tuzluluk ve sıcaklık gibi çevresel parametrelere bağlı olarak sistematik bir şekilde incelenmesi, Grade 2 ve Grade 3 zincir çeliklerinin malzeme özellikleri ile çevre arasındaki etkileşim mekanizmalarını daha iyi anlamamızı sağlayabilir. Bu çalışma, zincirlerin yapısal bütünlüğünü etkileyen çeşitli çevresel faktörlerin birbirleriyle olan ilişkilerinin daha ayrıntılı bir şekilde ortaya konmasına imkan tanır.

KAYNAKLAR

- Akkurt, M. (1982). *Makine Elemanları Cilt II. İstanbul, Birsen Kitapevi Yayınları.*
- Alkan, S., (2019). Nitrür esaslı seramik ince film kaplamaların deniz suyu ortamındaki tribokorozyon davranışlarının incelenmesi.
- Alkan, S., ve Gök, M. S. (2021). Effect of sliding wear and electrochemical potential on tribocorrosion behaviour of AISI 316 stainless steel in seawater. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(2), 524-532.
- Alkan, S., Enhancement of marine corrosion and tribocorrosion resistance of offshore mooring chain steel by aluminizing process. *Brodogradnja*. 73(4), 131–159, 2022(a).
- Alkan, S., Evaluation of pitting susceptibility and tribocorrosion behaviors of AISI 304 stainless steel in marine environments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 237(4), 808-823, 2022(b).
- Alkan S., Gök M.S., Influence of plasma nitriding pre-treatment on the corrosion and tribocorrosion behaviours of PVD CrN, TiN and AlTiN coated AISI 4140 steel in seawater. *Lubrication Science*, 34(2), 67–83, 2022.
- Alkan, S. Effect of Boron-Aluminide Coating Applied on R4 Grade Offshore Mooring Chain Steel on Pitting and Tribo-Corrosion Behaviour. *Journal of Materials and Mechatronics: A*, 4(1), 302-317.2023.
- Anderson, Vd., 1992. (1992). *Anderson, A. E., Arnold, W. K., Avitzur, B., Bayne, S. C., Blatchley, C. C., Blau, P. J., ... ve Glaeser, W. A. Publication Information and.*
- Assi, F., & Bohni, H. (1999). Study of wear – corrosion synergy with a new microelectrochemical. *Wear*, 233-235.
- Azzi, M., ve Klemberg-Sapieha, J.-E. (2011). Tribocorrosion test protocols for sliding contacts. *Tribocorrosion of Passive Metals and Coatings*, 222-238.
- Barril, S., Mischler, S., Wear, D. L.-, (2004). Influence of fretting regimes on the tribocorrosion behaviour of Ti6Al4V in 0.9 wt.% sodium chloride solution. *Elsevier*.
- Başoğul, Y. (2014). Mikro ark oksidasyon yöntemi ile kaplanmış AA6082 alaşımının farklı yağlama şartlarında tribolojik özelliklerinin incelenmesi.
- Beadling, A. R., Bryant, M. G., Dowson, D., ve 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.
- Bhushan, B. (2002). *Introduction to Tribology*.
- Bhushan, B. (2013). *Introduction to Tribology, Second Edition. İçinde Introduction to Tribology, Second Edition.* John Wiley and Sons.

- Callister, W., ve Rethwisch, D. (2007). *Materials science and engineering: an introduction*.
- Celis, J. P., Ponthiaux, P., & Wenger, F. (2006). Tribo-corrosion of materials: Interplay between chemical, electrochemical, and mechanical reactivity of surfaces. *Wear*, 261(9), 939-946.
- Celis, J. P., ve Ponthiaux, P. (2012). Testing tribocorrosion of passivating materials supporting research and industrial innovation: A handbook. İçinde *Testing Tribocorrosion of Passivating Materials Supporting Research and Industrial Innovation: A Handbook*.
- Cesur, İ. (2008). Farklı yakıt karışımlarının segman-silindir çifti arasındaki sürtünme ve aşınma özelliklerine etkisinin incelenmesi.
- Chen, J., Wang, J., Yan, F., Zhang, Q., International, Q. L.-T., (2015). Effect of applied potential on the tribocorrosion behaviors of Monel K500 alloy in artificial seawater. *Elsevier*.
- Cheng, X. Y., Zhang, H. X., Li, H., ve Shen, H. P. (2015). Effect of tempering temperature on the microstructure and mechanical properties in mooring chain steel. *Materials Science and Engineering: A*, 636, 164-171.
- Çuvalcı, H., ve Baş, H. (2004). Investigation of the tribological properties of silicon containing zinc–aluminum based journal bearings. *Tribology International*, 37(6), 433-440.
- Du, C., Bai, X., ve Yuan, C. (2021). Fretting tribocorrosion behaviors of marine mooring chain steel 22MnCrNiMo in artificial seawater. *Journal of Tribology*, 143(7).
- Gelmez, H. (2012). Uv Işınlarıyla Sertleşebilen Hibrit Kaplamaların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi.
- Ghasemi Owsalou, R. (2012). Aşınmaya maruz parçaların aşınma dayanımlarının araştırılması.
- Gotoh, K., Ueda, T., Murakami, K., ve Utsunomiya, T. (2019). Wear Performance of Mooring Chain in Wet Environment With Substitute Ocean Water. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 4.
- Güngör, K. (2016). Sinterlenmiş bronz esaslı kaymalı yataklarda polimer kullanımının tribolojik özelliklere etkisi.
- Hutchings, I. M. (1992). *Tribology: friction and wear of engineering materials*.
- Huttunen-Saarivirta, E., Kilpi, L., Hakala, T. J., Carpen, L., ve Ronkainen, H. (2016). Tribocorrosion study of martensitic and austenitic stainless steels in 0.01 M NaCl solution. *Tribology International*, 95, 358-371.
- Jemmely, P., Mischler, S., Wear, D. L., (2000), Electrochemical modeling of passivation phenomena in tribocorrosion. *Elsevier*.

- Jun, C., Zhang, Q., Li, Q., Fu, S., China, J. W. N. M. S. of, (2014), Corrosion and tribocorrosion behaviors of AISI 316 stainless steel and Ti6Al4V alloys in artificial seawater. *Elsevier*.
- Katiyar, J. K., Ramkumar, P., Rao, T. V. V. L. N., ve Davim, J. P. (Ed.). (2020). *Tribology in Materials and Applications*.
- Koç E., 2007. *Makine Elemanları Cilt 2, Nobel Yayınevi, 425 s. Adana*.
- Kuiry, S. (2012). Evaluation of Wear-Corrosion Synergy Through Tribocorrosion Studies. *Bruker*, 1-24.
- Kurtuluş, E. (2010). Bazı termoplastik kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi.
- Landolt, D., & Mischler, S. (2011). Tribocorrosion of Passive Metals and Coatings. İçinde *Tribocorrosion of Passive Metals and Coatings*.
- Landolt, D., Mischler, S., & Stemp, M. (2001). Electrochemical methods in tribocorrosion: A critical appraisal. *Electrochimica Acta*, 46(24-25), 3913-3929.
- López, A., Bayón, R., Pagano, F., Igartua, A., Arredondo, A., Arana, J. L., ve González, J. J. (2015). Tribocorrosion behaviour of mooring high strength low alloy steels in synthetic seawater. *Wear*, 338-339, 1-10.
- López-Ortega, A., Bayón, R., Arana, J. L., Arredondo, A., ve Igartua, A. (2018a). Influence of temperature on the corrosion and tribocorrosion behaviour of High-Strength Low-Alloy steels used in offshore applications. *Tribology International*.
- López-Ortega, A., Arana, J., of, R. B.-I. J., (2018b). Tribocorrosion of passive materials: a review on test procedures and standards. *hindawi.com A López-Ortega, JL Arana, R Bayón International Journal of Corrosion*,.
- López-Ortega, A., Arana, J. L., Rodríguez, E., ve Bayón, R. (2018c). Corrosion, wear and tribocorrosion performance of a thermally sprayed aluminum coating modified by plasma electrolytic oxidation technique for offshore submerged components protection. *Corrosion Science*, 143(July), 258-280.
- López-Ortega, A., Bayón, R., ve Arana, J. L. (2018d). Evaluation of protective coatings for offshore applications. Corrosion and tribocorrosion behavior in synthetic seawater. *Surface and Coatings Technology*.
- López-Ortega, A., Areitioaurtena, O., Alves, S. A., Goitandia, A. M., Elexpe, I., Arana, J. L., ve Bayón, R. (2019). Development of a superhydrophobic and bactericide organic topcoat to be applied on thermally sprayed aluminum coatings in offshore submerged components. *Progress in Organic Coatings*, 137, 105376.
- López-Ortega, A., Arana, J. L., ve Bayón, R. (2020). On the comparison of the tribocorrosion behavior of passive and non-passivating materials and assessment of the influence of agitation. *Wear*.

- Lotfollahi Yaghin, A., ve Melchers, R. E. (2015). Long-term inter-link wear of model mooring chains. *Marine Structures*, 44, 61-84.
- Ma, K., Shu, H., Smedley, P., & Hostis, D., ve Duggal, A. (2013). *A Historical Review on Integrity Issues of Permanent Mooring Systems*.
- Ma, K., Luo, Y., Kwan, C., ve Wu, Y. (2019). *Mooring system engineering for offshore structures*.
- Menezes, P., Kishore, undefined, Engineering, S. K.-. (2008). Studies on friction and formation of transfer Layer in HCP metals. *asmedigitalcollection.asme.org*.
- Mischler, S. (2008). Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion: A comparative evaluation. *Tribology International*, 41(7), 573-583.
- Muñoz, A., Acta, L. J.-E., (2010). Influence of electrochemical potential on the tribocorrosion behaviour of high carbon CoCrMo biomedical alloy in simulated body fluids by electrochemical. *Elsevier*.
- Musa Cenk Özekinci, 2022. (2022). Nikel ve mangan alüminyum bronz alaşımlarının tribokorozyon davranışlarının incelenmesi.
- Obadele, B. A., Andrews, A., Shongwe, M. B., & Olubambi, P. A. (2016). Tribocorrosion behaviours of AISI 310 and AISI 316 austenitic stainless steels in 3.5% NaCl solution. *Materials Chemistry and Physics*, 171, 239-246.
- Ponthiaux, P., Wenger, F., Drees, D., & Celis, J. P. (2004). Electrochemical techniques for studying tribocorrosion processes. *Wear*, 256(5), 459-468.
- Ponthiaux, P., ve Celis, J. (2021). *Mechanical and Electro-chemical Interactions Under Tribocorrosion: From Measurements to Modelling for Building a Relevant Monitoring Approach*.
- Priya, R., Mallika, C., ve Mudali, U. K. (2014). Wear and tribocorrosion behaviour of 304L SS, Zr-702, Zircaloy-4 and Ti-grade2. *Wear*, 310(1-2), 90-100.
- R. Baboian Ed, (2013). *ASTM corrosion tests and standards, ISBN: 0-8031-2098-2, ASTM International, 2013*.
- Robert Bosch , “Automotive Handbook”, GmbH, p329, (2002).
- Rigney, D. A., Chen, L. H., Naylor, M. G. S., & Rosenfield, A. R. (1984). Wear processes in sliding systems. *Wear*, 100(1-3), 195-219.
- Siddaiah, A., Ramachandran, R., & Menezes, P. (2021). *Tribocorrosion: fundamentals, methods, and materials*.
- Stachowiak GW, Batchelor AW (2005) *Engineering tribology*, 3rd edn. Elsevier, Oxford
- Stachowiak, G., ve Batchelor, A. (2013). *Engineering tribology*.

- Stemp, M., Mischler, S., Science, D. L.-C., (2003). The effect of contact configuration on the tribocorrosion of stainless steel in reciprocating sliding under potentiostatic control. *Elsevier*.
- Sui, X., Xu, R., Liu, J., Zhang, S., Wu, Y., Yang, J., ve Hao, J. (2018). Tailoring the Tribocorrosion and Antifouling Performance of (Cr, Cu)-GLC Coatings for Marine Application. *ACS Applied Materials and Interfaces*.
- Suresh, S. (1998). *Fatigue of materials*.
- Tevrüz, T. (1999). Tribological behaviours of bronze-filled polytetrafluoroethylene dry journal bearings. *Wear*, 230(1), 61-69.
- Villa-Caro, R., Carral, J. C., Fraguera, J. Á., López, M., & Carral, L. (2018). A Review Of Ship Mooring Systems. *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, 69(1), 123-149.
- Wang, Y., Zhang, L., Xiao, J., Chen, W., Feng, C., Gan, X., ve Zhou, K. (2016). The tribocorrosion behavior of Cu-9 wt% Ni-6 wt% Sn alloy. *Tribology International*, 94, 260-268.
- Wang, Y., Zhang, J., Zhou, S., Wang, Y., Wang, C., Wang, Y., Sui, Y., Lan, J., ve Xue, Q. (2020). Improvement in the tribocorrosion performance of CrCN coating by multilayered design for marine protective application. *Applied Surface Science*.
- Wang, H., Liu, T., Zhang, Y., Zhu, Y., Liu, F., & Wang, T. (2022). A Fully Coupled Tribocorrosion Simulation Method for Anchor Chain Considering Mechano-Electrochemical Interaction. *Lubricants*.
- Waterhouse, R. B. (1984). Fretting wear. *Wear*, 100(1-3), 107-118.
- Watson, S., Friedersdorf, F., Madsen, B., Wear, S. C.-, (1995). Methods of measuring wear-corrosion synergism. *Elsevier*.
- Witt, D., Ma, K. T., Lee, T., Gaylarde, C., Celikkol, S., Makama, Z., ve Beech, I. (2016). Field studies of microbiologically influenced corrosion of mooring chains. *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, 4, 2910-2927.
- Wood, R. J. K. (2006). Erosion–corrosion interactions and their effect on marine and offshore materials. *Wear*, 261(9), 1012-1023.
- Wood, R. J. K. (2017). Marine wear and tribocorrosion. *Wear*.
- Yin, S., Li, D. Y., ve Bouchard, R. (2007). Effects of the strain rate of prior deformation on the wear–corrosion synergy of carbon steel. *Wear*, 263(1-6), 801-807.
- Zhang, Y., Wang, J. Z., Yin, X. Y., ve Yan, F. Y. (2016). Tribocorrosion behaviour of 304 stainless steel in different corrosive solutions. *Wiley Online Library* Zhang, JZ Wang, XY Yin, FY Yan *Materials and Corrosion*, 2016•Wiley Online Library, 67(7), 769-777.
- Zhang, X., ve Hoogeland, M. (2019). Influence of deformation on corrosion of mooring chain steel in seawater. *Materials and Corrosion*, 70(6), 962-972.

ÖZGEÇMİŞ