



**TUNGSTEN KARBÜR KAPLANMIŞ PERLİTİK
RAY ÇELİĞİNİN AŞINMA VE KOROZYON
DAYANIMLARININ İNCELENMESİ**

Abdulkadir ORAK

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN**

**TUNGSTEN KARBÜR KAPLANMIŞ PERLİTİK RAY ÇELİĞİNİN
AŞINMA VE KOROZYON DAYANIMLARININ İNCELENMESİ**

Abdulkadir ORAK

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN**

**KARABÜK
Aralık 2021**

Abdulkadir ORAK tarafından hazırlanan “TUNGSTEN KARBÜR KAPLANMIŞ PERLİTİK RAY ÇELİĞİNİN AŞINMA VE KOROZYON DAYANIMLARININ İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 30/06/2021

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Doç. Dr. Fuat KARTAL (KÜ)
Üye : Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN (KTÜN)
Üye : Dr. Öğr. Üyesi Abdullah UĞUR (KBÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Abdulkadir ORAK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TUNGSTEN KARBÜR KAPLANMIŞ PERLİTİK RAY ÇELİĞİNİN AŞINMA VE KOROZYON DAYANIMLARININ İNCELENMESİ

Abdulkadir ORAK

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN

Aralık 2021, 72 sayfa

Bu çalışmada ray çeliklerinin tribolojik performansına tungsten karbür (WC) kaplamanın etkisi kuru ve saf su ortamlarında gerçekleştirilen roller on plate aşınma deneyleri ve potansiyodinamik polarizasyon korozyon testleri ile araştırılmıştır. Tungsten karbür kaplamanın ray çeliklerinin aşınma performansına etkisi sürtünme katsayısı, hacim kaybı parametreleriyle nicel olarak, SEM ve 2D-3D topoğrafya görüntüleriyle de görsel olarak analiz edilmiştir. Kaplamanın korozyon performansına etkisi korozyon potansiyeli, korozyon akım yoğunluğu ve korozyon hız değerleri ile sayısal olarak, SEM ve EDX görüntüleri ile de elemental-görsel olarak değerlendirilmiştir. Aşınma deneylerinden elde edilen sonuçlara göre tungsten karbür kaplamalı ray çeliklerinin kaplamasız ray çeliklerine kıyasla sürtünme katsayısını 23% oranında azalttığı, aşınma mekanizmalarının daha yüzeysel olduğu belirlenmiştir. Korozyon deneylerinden elde edilen sonuçlara göre tungsten karbür kaplamalı ray

eliklerinin kaplamasız ray çeliklerine kıyasla korozyon hızının daha düşük olduğu, korozyon etkinin daha az bir alana yayıldığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Sözcükler : Tungsten karbür kaplama, wc kaplama, ray çeliği, aşınma, korozyon.

Bilim Kodu : 91419

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF WEAR AND CORROSION RESISTANCE OF TUNGSTEN CARBIDE COATED PERLITIC RAIL STEEL

Abdulkadir ORAK

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN

December 2021, 72 pages

In this study, the effect of tungsten carbide (WC) coating on the tribological performance of rail steels was investigated by roller on plate wear tests and potentiodynamic polarization corrosion tests performed in dry and pure water environments (In this study, the effect of tungsten carbide coating on the tribological performance of rail steels was investigated by roller on plate wear tests in dry and pure water environments. Additionally, the potentiodynamic polarization tests performed for analyzing tungsten carbide coating and corrosion interaction.) The effect of tungsten carbide coating on the wear performance of rail steels was analyzed quantitatively with friction coefficient and volume loss parameters, and visually with SEM and 2D-3D topography images. The effect of the coating on the corrosion performance was evaluated numerically with corrosion potential, corrosion current density and corrosion rate values, and elemental-visually with SEM and EDX images. According to the results obtained from the wear tests, it was determined that the

tungsten carbide coated rail steels decreased the friction coefficient by 23% compared to the uncoated rail steels, and the wear mechanisms were more superficial (According to the results obtained from the wear tests, it was determined that the tungsten carbide coated rail steels decreased the friction coefficient by 23% compared to the uncoated rail steels and the wear mechanisms were more superficial.). According to the results obtained from the corrosion tests, it was concluded that the corrosion rate of tungsten carbide-coated rail steels is lower than that of uncoated rail steels, and the corrosive effect spreads over a lesser area.

Key Word : WC coating, rail steel, wear, corrosion, tungsten carbide coating.

Science Code : 91419

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren, yüksek lisans eğitimim boyunca maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, her fırsatta benim bilgilenmemi ve gelişmemi sağlayan çok kıymetli sayın hocam Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimine başladığım günden itibaren bana her zaman yardımda bulunan ve destek veren hocam Öğr. Gör. Şeyma KORKMAZ'a da teşekkürlerimi sunarım.

Üniversite hayatım süresince karşılaştığım sorunlarda çözüme ulaşmamda yardımcı olan, akademik kariyer hedeflerimde her zaman destek veren, iyi ve kötü her türlü süreçte yanımda olduklarını hissettiğim dostlarım; Abdullah Mustafa KIRAN, Muhammed Raşit KARAKOCA ve Kadir Ulaş ATALAY'a teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca maddi manevi hiçbir desteği esirgemeyen ve her koşulda bana güvenen, destek olan, başarılarımın en büyük paydaşları olan başta annem ve babam olmak üzere tüm aile bireylerime sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	13
RAY ÇELİKLERİ.....	13
2.1. RAY ÇELİĞİ TÜRLERİ VE MİKROYAPILARI	13
2.1.1. Perlitik Ray Çelikleri	13
2.1.2. Beynitik Ray Çelikleri	14
2.1.3. Östenitik Ray Çelikleri	14
2.1.4. Temperlenmiş Martenzitik Ray Çelikleri	14
2.2. RAY ÇELİKLERİNİN KİMYASAL YAPISI.....	15
BÖLÜM 3	16
KAPLAMA İŞLEMİ.....	16
3.1. KAPLAMA YÖNTEMLERİ	17
3.1.1. Termal Sprey Kaplama	17
3.1.1.1. Alev Sprey	18
3.1.1.2. Elektrik Ark Sprey	19
3.1.1.3. Plazma Sprey	20
3.1.1.4. Yüksek Hızda Oksi-Yakıt Püskürtme (HVOF)	21

	<u>Sayfa</u>
3.2. KAPLAMA MALZEMELERİ.....	22
3.2.1. WC-Co Kaplama Malzemesi.....	23
3.2.2. WC-CoCr Kaplama Malzemesi.....	24
3.2.3. TiN Kaplama Malzemesi.....	25
3.2.4. TiC Kaplama Malzemesi.....	25
3.2.5. TiCN Kaplama Malzemesi.....	25
3.2.6. CrN Kaplama Malzemesi.....	25
3.2.7. CrC Kaplama Malzemesi.....	26
BÖLÜM 4.....	27
AŞINMA VE AŞINMA MEKANİZMALARI.....	27
4.1. AŞINMA MEKANİZMALARI.....	29
4.1.1. Abratif Aşınma.....	29
4.1.2. Adhezif Aşınma.....	30
4.1.3. Yorulma Aşınması.....	32
4.1.4. Korozyon Aşınması.....	33
BÖLÜM 5.....	34
KOROZYON.....	34
5.1. ÇELİKLERDE KOROZYON OLUŞUMU.....	37
5.2. KOROZYONU ÖNLEME YÖNTEMLERİ.....	38
5.2.1. Katodik Koruma.....	39
5.2.2. Anodik Koruma.....	39
5.2.3. İnhibitör Kullanılması.....	39
5.2.4. Yüzey Kaplamalar İle Koruma.....	40
BÖLÜM 6.....	41
MATERYAL VE METOT.....	41
BÖLÜM 7.....	47
DENEYSEL BULGULAR VE SONUÇLAR.....	47
7.1. TUNGSTEN KARBÜR (WC) KAPLAMA TABAKASININ KARAKTERİZASYONU.....	47

	<u>Sayfa</u>
7.2. TUNGSTEN KARBÜR (WC) TABAKASININ KURU VE SAF SU KOŞULLARINDA TRIBOLOJİK PERFORMANSI	51
7.3. TUNGSTEN KARBÜR (WC) TABAKASININ KURU VE SAF SU KOŞULLARINDA KOROZYON PERFORMANSI	57
BÖLÜM 8	61
SONUÇLAR	61
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	72

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Günümüzde tercih edilen kaplama yöntemleri	17
Şekil 3.2. Termal sprey kaplama işleminin şematik gösterimi	18
Şekil 3.3. Elektrik ark sprey kaplama yönteminin şematik gösterimi.....	20
Şekil 3.4. Plazma sprey kaplama yöntemi şematik gösterimi.....	21
Şekil 3.5. HVOF yöntemi ile kaplama işleminin şematik gösterimi	22
Şekil 3.6. Kaplama malzemelerinin şematik gösterimi.....	23
Şekil 3.7. WC-Co alaşımının genel özellikleri	24
Şekil 4.1. Bir aşınma mekanizması sisteminin şematik gösterimi	27
Şekil 4.2. Aşınma mekanizmalarının örneklendirilmesi	29
Şekil 4.3. Abrasif aşınmanın şematik gösterimi	30
Şekil 4.4. Parçacık yapışması ve transfer işlemi	31
Şekil 4.5. Birbiriyle etkileşime girerek parçacık oluşumunun şematik gösterimi	31
Şekil 4.6. Bir dişli çarkta meydana gelen yorulma aşınması örneği	32
Şekil 4.7. Oksitlenmiş yüzey bölgesinin mikroskopik ortamda gösterimi.....	33
Şekil 5.1. Elektrokimyasal korozyonun basit şekilde anlatım şeması	34
Şekil 5.2. Korozyon mekanizmasının meydana gelme şeması	35
Şekil 5.3. Korozyon türlerinin gruplar halinde gösterimi	36
Şekil 5.4. Homojen dağılımlı korozyonun şematik gösterimi	36
Şekil 5.5. Yerel korozyonun şematik gösterimi	37
Şekil 5.6. Bir çelik malzemenin potansiyodinamik test sonrasındaki görünümü.	38
Şekil 6.1. R260 tipi ray çeliği.	41
Şekil 6.2. Kesilmiş ray çeliği numuneleri.	42
Şekil 6.3. Aşınma tezgahının fotoğrafı.	44
Şekil 6.4. 2D profilometre ile elde edilen aşınma profili örneği.....	45
Şekil 7.1. a) Saf numunenin yüzey kesitinin SEM görüntüsü, b) Kaplamalı numunenin yüzey kesitinin SEM görüntüsü.....	48
Şekil 7.2. a) Saf numunenin yüzeyinin EDX analizleri, b) Kaplanmış numunenin yüzeyinin EDX analizleri.	49
Şekil 7.3. XRD grafiği.	50
Şekil 7.4. Mikrosertlik grafiği.....	51

Sayfa

Şekil 7.5. Sürtünme katsayısı değerleri.	52
Şekil 7.6. a) Kaplamasız kuru, b) Kaplamasız saf su, c) Tungsten karbür (WC) kaplamalı kuru, d) Tungsten karbür (WC) kaplamalı saf su.	54
Şekil 7.7. a) Kaplamasız kuru, b) Kaplamasız saf su, c) Tungsten karbür (WC) kaplamalı kuru, d) Tungsten karbür (WC) kaplamalı saf su.	55
Şekil 7.8. a) Kaplamasız kuru, b) Kaplamasız saf su, c) Tungsten karbür (WC) kaplamalı kuru, d) Tungsten karbür (WC) kaplamalı saf su.	57
Şekil 7.9. Tafel polarizasyon eğrileri.	58
Şekil 7.10. a) Kaplamasız kuru, b) Kaplamasız saf su, c) Tungsten karbür (WC) kaplamalı kuru, d) Tungsten karbür (WC) kaplamalı saf su.	59
Şekil 7.11. Korozyon deneyi sonrasında EDX değerleri.....	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. WC-Co alaşımın toz özelliği.....	24
Çizelge 3.2. WC-Co alaşımının kimyasal kompozisyonu	24
Çizelge 6.1. R260 Ray çeliğinin kimyasal bileşimi.	41
Çizelge 6.2. Numunelerin sertlik değerleri.	44
Çizelge 7.1. Korozyon sonuç değerleri.	58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

WC	: Tungsten karbür
WC-CO	: Tungsten karbür-kobalt
W2C	: Tungsten karbür
WC-CoCr	: Tungsten karbür-kobalt krom
CuSi	: Bakır silisyum
CuNi	: Bakır nikel
CrCuNi	: Krom bakır nikel
NaCl	: Sodyum klorür
C-Mn	: Karbon manganez
Cu-Mo	: Bakır molibden
Cr-Mn	: Krom manganez
TiN	: Titanyum nitrür
TiC	: Titanyum karbür
TiCN	: Titanyum karbonitrür
CrC	: Krom karbon
CrN	: Krom nitrür
Fe	: Demir
Fe3C	: Sementit
Co	: Kobalt
C	: Karbon
Si	: Silisyum
Mn	: Manganez
P	: Fosfor
S	: Kükürt
Cr	: Krom
HV	: Vickers sertliği

°C : Santigrat derece
N : Newton
dev/dak : Bir dakikadaki devir sayısı
µm : Mikrometre
h : Saat
gr : Gram
Ra : Ortalama çizgi değeri
Rt : Maksimum tepe- çukur yüksekliği

KISALTMALAR

SEM : Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskopu)
EDX : Energy Dispersive X-Ray (Enerji Dağılımlı X-Iğını)
XRD : X-ray Diffraction Analysis (X-Iğınları Difraksiyon Analizi)
PVD : Physical Vapour Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
CVD : Chemical Vapor Deposition (Kimyasal Buhar Biriktirme)
AISI : Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
MSS : Martensitic Stainless Steel (Martensitik Paslanmaz Çelik)
UIC : Uluslararası Demiryolu Birliği
HVOF : High Velocity Oxygen Fue (Yüksek Hızda Oksi-Yakıt Püskürtme)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Ulaşımında sürdürülebilirlik, ekonomi ve güvenlik parametrelerinin optimizasyonu ile sağlanabilmektedir [1,2]. Maksimum güvenlik ve minimum maliyet kombinasyonunun elde edilebilmesi için sistem komponentlerinin ömrünün ve çalışma performansının artırılması gerekmektedir [3,4]. Son yıllarda demiryolu ulaşımındaki teknolojik gelişmeler, yük/yolcu kapasitelerinin artışına (aks yükü) ve yüksek hızlara olan talebi arttırmaktadır [3,5–7]. Artan aks yükü ve hıza bağlı olarak teker-ray arayüzündeki gerilmeler artmakta ve sistem bileşenlerinin deforme olmasına neden olmaktadır. Deformasyon sebebiyle çalışma performansı, emniyet ve yolcu konforu olumsuz etkilenmektedir. Ayrıca deformasyona uğrayan parçaların bakım-onarımının ve değişiminin maliyeti arttırmasının yanı sıra bu işlemler esnasında deformasyona uğrayan hattın kullanılamaması da yolcular açısından mağduriyet oluşturmaktadır. Belirtilen sorunlar dikkate alındığında, sistem performansının ve emniyetinin arttırılması için deformasyon oluşumunun minimize edilmesi gerekmektedir. Demiryolu ulaşımında raylarda meydana gelen en yaygın deformasyonlar teker-ray temasına bağlı aşınma, yorulma ve korozyon kaynaklıdır [3,8–12]. Mevcut ray çeliklerinin mekanik özellikleri dikkate alındığında perlitik ray çeliklerinin diğerlerine kıyasla kaynak edilebilirlik kabiliyeti ve yorulma dayanımının yüksek olması tercih edilebilirliğini arttırmıştır [13,14]. Ayrıca optimum mukavemet ve tokluk kombinasyonunu sağlayabilmeleri sebebiyle perlitik yapıdaki ray çelikleri yaygın olarak kullanılmaktadır [6,13]. Literatürde farklı perlitik ray çeliklerinin yorulma, aşınma ve korozyon dayanımlarının incelendiği çalışmalar mevcuttur. Seo vd.[9], iki farklı ray çeliğinin yuvarlanma-kayma temasında yorulma ve aşınma dayanımını araştırmışlardır. UIC60 ve KS60 ray çelikleri farklı kayma oranı (0.1%, 0.3%, 0.5%, 1%, 1.5%) ve temas basıncı (9000, 1100, 1300, 1500 MPa) parametrelerinde çift disk cihazı ile teste tabi tutulmuş, değişken parametrelerin aşınma ve yorulma dayanımına etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kayma oranı arttıkça çukurlaşmanın

arttığı fakat oluşan çatlakların büyümediği görülmüştür. Malzemeler arasında karşılaştırma yapıldığında ise UIC60 çeliğinin KS60 çeliğine kıyasla mukavemet ve sertliğinin daha yüksek olması sebebiyle aşınma dayanımının yüksek olduğu belirlenmiştir. Maya-Johnson vd. [15], perlitik ray çeliğinin yuvarlanma temas yorgunluğu etkisi altında kuru ve yağlayıcı ortam koşullarındaki aşınma dayanımını araştırmışlardır. R370CrHT ray çeliği kuru ve sentetik yağlayıcı ortamında üç farklı çevrimde (9000, 14000, 24000) çift diskli yuvarlanma-kayma test cihazı ile deneye tabi tutulmuş ve kütle kaybı, çatlak derinliği, çatlak açısı ve deformasyon morfolojisi analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre kuru ortamda 9000-14000 çevrim aralığında kuru ve yağlayıcı ortamda kütle kaybı azalırken, 14000-24000 çevrim aralığında kuru ortamda kütle kaybı artmıştır. Ek olarak çevrim sayısı arttıkça çatlak derinliği ve açısının arttığı görülmüştür. Lewis vd.[2], ray sertliğinin ray ve teker aşınmasına etkisini aşınma deneyleri ile araştırmışlardır. Çalışmada üç farklı ray (R260, R350HT, R400HT) ve teker (ER7, ER8, C64M) farklı kayma değerlerinde (1%, 10%, 20%) çift disk aşınma testine tabi tutulmuş, kayma değerlerinin ray ve tekerlerin aşınma oranları analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, 10% kayma değerinde 1% kayma değerine göre aşınma oranının azaldığı, 20% kayma değerinde 10% kayma değerine kıyasla aşınma oranının arttığı belirlenmiştir. Bu durum 20% kayma değerinde teker-ray arasındaki sıcaklık artışına bağlı olarak ray malzemesinin yumuşaması ve aşınma dayanımını azaltması ile ilişkilendirilmiştir. Lyu vd. [16], çevresel koşullar ve demir oksit varlığında teker-ray arasındaki aşınma davranışını deneysel olarak araştırmışlardır. UIC 900A perlitik ray çeliği farklı sıcaklık ve nem koşullarında pin-on-disk aşınma deneyine tabi tutulmuştur. Sıcaklık ve nem değişiminin aşınma oranına etkisi incelenmiş, SEM görüntüleri ile aşınma mekanizmaları belirlenmiştir. Çevresel koşullarda tüm sıcaklık değerlerinde 40% nem oranında adhesiv aşınma, 85% nem oranında oksidatif + adhesiv aşınma mekanizması görülmüştür. Demir oksit varlığında ise tüm sıcaklık değerlerinde 40% nem oranında abrasiv aşınma, 85% nem oranında oksidatif + abrasiv aşınma mekanizmasının oluştuğu belirlenmiştir. Panda vd. [6], alaşım elementleri ilave edilerek geliştirilen ray çeliklerinin korozyon dayanımını araştırmışlardır. Çalışmada farklı alaşım elementleri takviyesiyle geliştirilen dört ray çeliğinin (Cu-Si, Cu-Ni, Cr-Cu-Ni, Cr-Cu-Ni-Si) 3.5% NaCl ortamındaki korozyon dayanımını ağırlık kaybı, Tafel polarizasyonu, FTIR analizi ile incelemişler ve sonuçlar standart ray çelikleri (C-Mn, Cu-Mo, Cr-Mn) ile kıyaslanmıştır. Elde edilen

sonuçlara göre geliştirilen ray çeliklerinin benzer korozyon davranışı gösterdiği belirlenmiştir. Standart ray çelikleri ile kıyaslandığında geliştirilen ray çeliklerinin C-Mn ve Cu-Si ray çeliklerine göre daha yüksek korozyon direnci sağladıkları sonucuna varılmıştır.

Krom-mangan esaslı ray çelikleri yüksek aşınma ve korozyon direnci için geliştirilmiş özel ray çelikleridir [6]. Bu sebeple krom-mangan esaslı perlitik mikroyapılı R260 ray çeliği referans ray olarak belirlenmiş olup günümüzde standart ray olarak kullanılmaktadır [17–19]. R260 ray çelikleri, yapısındaki sert sementit sayesinde yüksek aşınma dayanımına sahiptir [20]. Fakat perlitik yapıdaki ray çeliklerinin iç yapısında bölgesel ısı oluşumuna bağlı olarak sementit lamellerinin küreselleşmesi malzemenin aşınma dayanımını azaltmaktadır [21]. Özellikle tekrarlı ivmelenmeler, karp ve makas bölgelerinde kızaklama, frenleme ve patinaj esnasındaki kayma hareketi sebebiyle sürtünme artmaktadır [3,21]. Sürtünmeden kaynaklı artan ısıya bağlı oluşan termal yükler plastik deformasyona sebebiyet vermektedir. Plastik deformasyonlara bağlı olarak ray yüzeyinde ondülasyon ve zedelenme kusurları meydana gelmektedir [22]. Meydana gelen bu kusurlar, kısa vadede gürültüye sebebiyet vererek yolcu konforunu azaltırken uzun vadede rayın servis ömrünün kısılmasına neden olmaktadır [23]. Aşınma kaynaklı deformasyonlar nedeniyle demiryolu hattının düz kısımlarında 20-25 yıl olan ray ömrünün kurplarda 2-3 yıla kadar düştüğü bilinmektedir [24,25]. Rayların servis ömrüne etki eden önemli faktörlerden biri de korozyon kaynaklı deformasyonlardır [10]. Yağmur ve kar sularının varlığında ağır aks yükü sebebiyle raylarda makroskobik çukurlar oluşmaktadır [26]. İlaveten, denize yakın hatlarda NaCl varlığı ve atmosferik değişime bağlı olarak tünellerde meydana gelen asidik ortam (H_2SO_4) korozyonu arttırarak perlitik ray çeliklerinin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir [8]. Bu sebeple ray yüzeyinde meydana gelen aşınma ve korozyon kusurlarının minimize edilmesi gerekmektedir. Literatürde aşınma ve korozyonun azaltılabilmesi için yüzey işlemleri uygulanmış ray çeliklerinin aşınma ve korozyon dayanımlarının incelendiği çalışmalar mevcuttur. Herian ve Aniolek [27], demiryolu makaslarından elde edilen ray kesitlerinin sıcak haddeleme ve izotermal tavlama işlemleriyle elde edilen farklı perlit morfolojilerinin abrasiv aşınmaya etkisini araştırmışlardır. Çalışmada farklı sıcaklıklarda izotermal tavlama işlemi ile farklı perlit morfolojilerinde elde edilen

R260 ray çeliklerinin mekanik performansı sertlik ölçümü, çekme ve aşınma testleri ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre tavlama sıcaklığı azaldıkça lameller arası mesafe azaldığı ve bu duruma bağlı olarak malzemenin sertliğinin, çekme dayanımının ve aşınma direncinin arttığı belirlenmiştir. Shariff vd.[14], lazer yüzey işlemi uygulanmış perlitik ray çeliğinin aşınma dayanımını kayma aşınma davranışını inceleyerek araştırmışlardır. Çalışmada işlem görmemiş, lazerle eritilmiş ve lazerle sertleştirilmiş T-12 perlitik ray çelikleri kuru koşullarda pin-on-disk aşınma testine tabi tutulmuş ve aşınma dayanımları mikrosertlik, sürtünme katsayısı ve kütle kaybı parametreleri ile analiz edilmiştir. Mikrosertlik ölçüm sonuçlarına göre 340-375 HV sertlikteki T-12 ray çeliğinin, lazerle eritildiğinde 830-900 HV sertlikteyken, sertleştirildiğinde 890-1070 HV sertliğe ulaştığı görülmüştür. İlaveten, en düşük sürtünme katsayısı lazerle eritilen malzemede elde edilmiş, kütle kaybı değerlerinin de lazerle eritilmiş ve sertleştirilmiş malzemede işlem görmemiş malzemeye kıyasla yaklaşık 2 kat azaldığı belirlenmiştir. Dayot vd. [28], perlitik ve beynitik ray çeliklerinin tribolojik performansını aşınma davranışlarını analiz ederek araştırmışlardır. Çalışmada perlitik, ısıtılmış perlitik ve beynitik ray çelikleri roller-on-plate aşınma deneyine tabi tutulmuş, deney sonuçları sürtünme katsayısı değerleri ve SEM görüntüleri değerlendirilerek incelemiştir. Analiz sonuçlarına göre malzemelerin hepsinde eşdeğer sürtünme katsayısı elde edilmiştir. SEM görüntülerine göre ise deformasyon yoğunluğu ve derinliği sıralaması sırasıyla perlitik, beynitik ve ısıtılmış perlitik ray çeliği olarak belirlenmiştir. Bu durum malzemelerin mikroyapısındaki tane boyutu ile ilişkilendirilmiştir. Katıyar vd. [29], farklı mikroyapılardaki C-Mn ray çeliğinin korozyon davranışını araştırmışlardır. Hava soğutma, izotermal dönüşüm, küreselleştirme, temperleme, su verme işlemleri uygulanarak perlitik, beynitik, küreselleştirilmiş, martenzit ve temperlenmiş martenzit mikroyapılarında ray çelikleri elde edilmiştir. Geliştirilen malzemelerin korozyon davranışı 3.5% NaCl çözeltisinde dinamik polarizasyon ve AC empedans spektroskopik testleri ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre perlitik ray çeliğinin korozyon dayanımının diğerlerine kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Gómez–Guarneros vd.[30], perlitik ray çeliğin yağmur suyu ortamında korozyon davranışını araştırmışlardır. Çalışmada R900A ray çeliği lineer polarizasyon ve potansiyodinamik anodik polarizasyon testlerine tabi tutulmuş, korozyon oranı ve

korozyon kaynaklı deformasyon mekanizmaları analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre pitting ve mikroçatlak deformasyon başlangıcının oluştuğu belirlenmiştir.

Literatür çalışmalarına göre farklı yüzey işlemlerinin ray çeliğinin aşınma ve korozyon dayanımını arttırdığı belirlenmiştir [14,27,29,31,32]. Özellikle ray mantarını hızlı soğutarak malzemenin tokluğunu etkilemeden sertlik ve çekme dayanımının artırıldığı ve küçük yarıçaplı kurplarda uygun yüzey işlemleri ile aşınmanın azaltılabildiği kanıtlanmıştır [3,7]. Fakat bu yüzey işlemlerinde ray çeliğinde optimum sertliğin elde edilmesi önem taşımaktadır. Aksi takdirde ray mantarı yüzeyinde mikrosertliğin artışı martenzitik dönüşüme sebebiyet vererek malzemenin gevrekliğini arttırmakta ve aşınma dayanımını azaltmaktadır [17]. Ayrıca ısı işlem uygulanan rayların kullanılması durumunda dalgalı aşınmaya neden olabilecek şekilde ondülasyon oluşabilmektedir [33,34]. Ray çeliğinin korozyon davranışının incelendiği çalışmalar değerlendirildiğinde, mikroyapı değişiminin korozyon dayanımını etkilediği ve perlitik yapının korozyon direncini arttırdığı görülmüştür [29]. Fakat yağmur suyu ve ağır yük koşullarında ray çeliğinde korozyon kaynaklı pitting ve mikroçatlak deformasyonlarının oluştuğu görülmektedir [30]. Bu deformasyonların bakım-onarımının yapılmaması veya yenisiyle değiştirilmemesi durumunda hattın emniyeti azalmakta ve bu durum ciddi mal ve can kaybına sebebiyet vermektedir.

Isıl işlem yöntemlerinin dezavantajları nedeniyle alternatif olarak kaplama işlemi tercih edilmektedir. Ray kaplamasının aşınmaya etkisinin araştırıldığı çalışmalar literatürde mevcuttur. Seo vd. [33], lazer kaplama ile kaplanmış ray çeliğinin aşınma ve yorulma davranışını araştırmışlardır. Çalışma kapsamında, Stellite 21, Inconel 625 ve Hastelloy C kaplamaları ile kaplanmış KS60 ray çeliklerinin (kurplu hatlarda kullanılan) aşınma ve yorulma dayanımlarını çift disk deneyleri ile test ederek sürtünme katsayısı, aşınma oranı değerleri ve yüzey görüntülerini analiz etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre aşınmayı azaltan en etkili kaplamanın Stellite 21 olduğu, aşınma ve optimizasyonu açısından en uygun kaplamanın Hastelloy C kaplaması olduğu belirlenmiştir. Lewis et al. [35], lazer kaplama (çok fazlı manganez çelik varyantı, martenzitik paslanmaz çelik, TWIP çelik, NiCrBSi, Stellite 6, Stellite 12) ile kaplanmış R260 ray çeliğinin aşınma ve yorulma davranışını aşınma oranları ve yüzey altı görüntülerini analiz ederek araştırmışlardır. Analiz sonuçlarına göre kaplanmış

numunelerin tümünün aşınma ve yorulma direncini arttırdığı, yüzey altı deformasyonu azalttığı belirlenmiştir. Guo vd. [36], lazer kaplama ile kaplanmış ray çeliğinin aşınma ve yorulma davranışını araştırmışlardır. Çalışmada kobalt esaslı alaşım ile kaplanmış U71Mn ray çeliğinin aşınma ve yorulma dayanımını yuvarlanma-kayma testleri ile araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre kaplamalı ray çeliğinin kaplamasız malzemeye kıyasla aşınma ve yorulma dayanımını arttırdığı belirlenmiştir. Wang et al.[37], lazer kaplama yöntemi kullanılarak kobalt esaslı alaşım ile kaplanmış ray çeliğinin aşınma ve yorulma davranışını sertlik ölçümü, aşınma oranı değerleri ve SEM görüntülerini analiz ederek araştırmışlardır. Analiz sonuçlarına göre kaplamasız ray çeliğinde adhesiv aşınma ve yorulma çatlakları deformasyon mekanizmalarının baskın olduğu, kaplamalı ray çeliğinin kaplamasız ray çeliğine kıyasla daha yüksek sertlik ve aşınma direnci sağladığı belirlenmiştir.

Güncel literatür çalışmalarında lazer kaplama yöntemiyle kaplanan ray çeliklerinin aşınma ve korozyon direncinin arttığı belirlenmiştir [36,38,39]. Mevcut çalışmalarda kaplama malzemesi olarak çoğunlukla kobalt esaslı Stellite malzeme ve çelik malzemeler kullanılmış, deneyler sadece kuru ortam koşullarında gerçekleştirilmiştir [35,40,41]. Ray çelikleri kuru ortam koşullarının yanı sıra yağmur ve kar sularına da maruz kalmaktadır. Fakat kaplamalı ray çeliklerinin yağmur suyu ortamında aşınma ve korozyon davranışlarının detaylı şekilde araştırıldığı çalışma azdır. Bu çalışmanın özgün değeri, tungsten karbür (WC) kaplamalı perlitik ray çeliklerinin kuru ve saf su ortamında aşınma ve korozyon performansının analiz edilmesidir. Çalışma kapsamında aşınma davranışının analizi için kaplanmamış ve tungsten karbür kaplanmış perlitik yapı R260 ray çelikleri kuru ve saf su ortamında, 40 N yük ve 50 dev/dk hız parametrelerinde ball-on-plate aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar sürtünme katsayısı, aşınma hacmi değerleri kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Saf su ortamında meydana gelen korozyon kaynaklı deformasyonların analizi için korozyon testi gerçekleştirilmiş ve Tafel grafiği elde edilmiştir. Yüzey morfolojisi analizi için aşınmış yüzeylerden elde edilen 3D topoğrafya görüntüleri incelenmiş ve yüzey pürüzlülük değerleri analiz edilmiştir. Ek olarak aşınmış ve korozyona maruz kalmış yüzeylerden elde edilen SEM, EDX ve XRD görüntüleri incelenmiştir.

Literatürde, seramik kaplamalar arasında yüksek mukavemetli ve yüksek dayanıma sahip olarak tungsten karbür (WC) kaplama tekniği öne çıkmaktadır. Rajinikanth ve Venkateswarlu 2011 Hafif çelik ve EN32 çeliğine WC-Co kaplama işlemi uygulayarak Pin-on-disc aşınma mekanizması kullanarak aşınma davranışlarını incelenmiştir. HVOF kaplama yöntemiyle 200 µm kalınlığında hem hafif çeliğe hem de EN32 çeliğine kaplama yapılmıştır. 200 rpm dönme hızında 1 ve 2 kg olmak üzere iki farklı yükte aşınma deneyleri yapılmıştır. SEM ve EDX görüntüleri incelendikten sonra hafif çeliğin yüksek aşınma kaybına uğrarken kaplamalı hafif çeliğinde EN32 çeliğine karşı negatif sonuçlar ve kaplamalı EN32 çeliğine karşı ise pozitif sonuçlar elde edilmiştir [42].

Ma vd. 2018 U71Mn ray malzemesinin düşük sıcaklık koşullarındaki tribolojik performansını deneysel ve görsel olarak araştırmışlardır. Çalışmada, U71Mn ray malzemesi, dört farklı sıcaklıkta (20°C, -15°C, -30°C, -45°C) gerçekleştirilen yuvarlanma-kayma aşınma testine tabi tutulmuş ve sıcaklığa bağlı olarak sertlik, aşınma oranı, adhezyon katsayısı değerlerindeki değişim incelenmiştir. Aşınmış yüzeylerden elde edilen SEM görüntüleri ile aşınma mekanizmaları belirlenmiş, XRD görüntüsü ile yüzeydeki oksit tabakası oluşumu analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre sıcaklık düştükçe sertlik, adhezyon katsayısı ve aşınma oranının arttığı belirlenmiş, bu duruma bağlı olarak malzemenin yorulma direncinin azaldığı ve kırılabilirliğinin arttığı görülmüştür. SEM ve XRD görüntüleri incelendiğinde ise sıcaklık azaldıkça abrasiv aşınma mekanizmasının adhesiv aşınma formuna dönüştüğü ve aşınma miktarının arttığı, oksidasyon oluşumunun azaldığı belirlenmiştir [43].

Yazici ve Yilmaz 2018 yüksek güçlü diyot lazer işlemi uygulanmış ray çeliklerinin farklı işlem sıcaklıkları altında tribolojik davranışları araştırmışlardır. Çalışmada, R260 tipi ray çeliğine 1750 W güç ve 6 mm/s sabit tarama hızı ile farklı sıcaklık koşullarında (1100 °C, 1200 °C, 1300 °C) lazer işleme işlemi uygulanmıştır. Deney sistemi için 10 mm kalınlık, 10 mm genişlik ve 55 mm uzunlukta numuneler frezeleme, tel erozyon ve talaşlı imalat işlemleri uygulanarak hazırlanmıştır. Lazer ile sertleştirme işlemi uygulanmadan önce tüm numuneler Ra cinsinden 0,5 µm pürüzlülüğünde işlenmiştir. Çelik numunelerin yüzeyine; 1100 °C, 1200 °C ve 1300 °C işlem sıcaklıklarında, 1750 W başlangıç lazer gücü ve 6 mm/s sabit tarama hızı ile

20 s üzerinde yüksek güçlü diyot lazer işlemi uygulanmıştır. Aşındırıcı aşınma testlerinde 6 mm çapında Al_2O_3 bilye ile 5N yük uygulanmıştır. Aşınma testinden önce lazer işlemi uygulanmamış numuneye 1200'lük zımpara işlemi uygulanmıştır. Sonuç olarak; işlem uygulanmayan, 1100 °C, 1200 °C, 1300 °C sıcaklıklarda lazer işlemi uygulanmış numunelerin sürtünme katsayıları sırasıyla, 0.4, 0.56, 0.53 ve 0.57 olarak bulunmuştur. Lazer işlemi uygulanmamış numunenin sertlik değeri 277 HV iken lazer işlemi uygulanmış numuneler sıcaklık artışına göre sırasıyla, 836 HV, 851 HV, 889 HV olarak bulunmuştur. İşleme sıcaklığının artışına göre lazerle işlem uygulanmış numunelerin aşınma derinlik değeri her 100 °C artışta yaklaşık %50 derinlik artışı olduğunu göstermiştir (660 μm , 948 μm ve 1.200 μm). EDS sonuçlarına göre lazer işlemi uygulanmış numuneler herhangi bir kimyasal değişim gözlenmezken XRD sonuçlarına göre işlem uygulanmış numunelerin tüm yüzeylerinde oksitlenme oluştuğu görülmüştür [44].

Wu vd. 2020 bilyalı dövme işleminin, silindir malzemelerinin artık gerilmesi, yüzey pürüzlülüğü, mikrosertliği ve mikroyapı değerlerine etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada düşük karbonlu olarak bilinen 18CrNiMo7-6 çelik malzeme kullanılmıştır. Otomatik hava püskürtmeli bilyalı dövme makinesinde; nozul çapı 8 mm ve nozul hareketi 8 mm/s olan, bilyalı dövme basıncı 0,4 MPa ve aşındırıcı akış oranı 10 kg/dk, bilya boyutu 0,6 mm dövme açısı 90° ve nozul ile numune arasındaki mesafenin 150 mm olduğu bir deney düzeneği ile yapılmıştır. Deney esnasında bilyalı dövme hızı 50 m/s, bilyalı dövme süresi %100 seviyesi için 10 saniye ve %200 seviyesi için 20 saniyedir. Sonuç olarak; bilyalı dövme işlemi uygulanmamış numunelerde ölçülen teğetsel yüzey artık gerilimi 102 MPa ile 315 MPa arasında değişmektedir. Aynı koşullarda eksenel yüzey artık gerilimi de ayrı ayrı 420 MPa'dan 630 MPa arasında dalgalanarak ölçülmüştür. %100 kapsamada yapılan bilyalı dövme işlemi sonrasında teğetsel artık sıkıştırma gerilme değeri 549 MPa artarak 750 MPa değerine ulaşırken eksenel yönde sıkıştırma geriliminde 304 MPa artış miktarı sonucunda büyüklük değeri 830 MPa olarak ölçülmüştür. %200 kapsama ortamında yapılan bilyalı dövme işleminde teğetsel sıkıştırma gerilimi ortalama 744 MPa değerinde ve eksenel sıkıştırma gerilimi ortalama 822 MPa değerinde hesaplanmıştır. Bilyalı dövme işlemi uygulanmadan önce numuneler arasındaki hem teğetsel hem de eksenel artık gerilme değerlerinin 325 MPa değerine kadar farklılık gösterirken bilyalı

dövme işleminden sonra (%100 ve %200) sırasıyla 80 MPa ve 78 MPa değer farklılıkları görülmektedir. Bu durum ise bilyalı dövme işleminin sebep olduğu plastik deformasyon etkisiyle açıklanmıştır. Ma vd. 2015 TiN kaplanmış bir çelik malzemenin sürtünme katsayısındaki gelişimi üzerine çalışmışlardır. GCr15 yatak malzemesi olarak kullanılan bir çelik malzeme numunesine katot arkı ve magnetron püskürtme kompozit yöntemi uygulanarak kaplanmıştır. Sürtünme katsayısı ile kaplama parametrelerinin arkasındaki ilişkiyi anlamlandırmak için kaplama malzemesinin mikroyapısı, mikro sertliği, mikro çizilme ve tribolojik davranışları üzerine çalışılmıştır. İyi bir TiN kaplama özelliklerine ulaşmak için vakum odasındaki ortalama sıcaklığın 450 °C'ye kadar artabilen ısıtma sistemi kullanılmıştır. Yapışma mukavemeti, maksimum 50N ve 5 mm maksimum çizilme mesafesi ile bir mikro kazıyıcı test cihazı ile yapılmıştır. Deney esnasında numunelerin tribolojik özelliklerinin, sürtünme katsayısının, aşınma oranının ve aşınma hacmindeki değişimi balon disk tribometre sayesinde kayıt altına alınmıştır. Aşındırıcı olarak 6 mm çapındaki bir WC- %6 Co bilye kullanılmıştır. Aşınma testleri 25 °C sıcaklık ortamında ve %30 bağıl nem olan bir ortamda gerçekleştirilmiştir. Disk üzerindeki bilyenin doğrusal testlerde bağıl kayma hızı 5 mm/s ve kayma mesafesi 10 mm'dir. TiN kaplama malzemesinin pürüzlülüğü ortalama $0.10 \pm 0.005 \mu\text{m}$ 'dir. Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğünün sürtünme ve aşınma özelliklerine etkisi göz ardı edilmiştir. TiN kaplamasının kritik yük değeri $43.7 \pm 0.1 \text{ N}$ olduğundan dolayı TiN kaplamasının bağlanma mukavemetinin endüstriyel deneme uygulamasında yeterli olduğu saptanmıştır. 20 N yük altında mikroyapı sertlikleri ölçülen numunelerde kaplama ana malzemesinin ve TiN kaplı numunenin sırasıyla $500 \pm 8 \text{ HV}$ ve $622 \pm 10 \text{ HV}$ olduğunu gösterir. TiN kaplamanın mukavemeti nano indentasyon ile ölçüldüğünde, 5 ölçüm değerinin ortalaması $32.45 \pm 0.43 \text{ GPa}$ 'dır. 200 N yük altında yapılan testlerde kurulan sisteme göre yapılan incelemede zaman ilerledikçe TiN kaplamalı numunede 3 aşama belirlenmiştir; 1. düşük sürtünme aşınması, 2. sürtünme aşaması ve 3. kaplama parçalanma aşaması. 1. aşamada kaplamadan ayrılan küçük partiküllerin birleşmesiyle deney numunesi ve aşındırıcı arasında bir tabaka oluşturmuştur. 2. seviyede ise bu küçük partiküller daha mukavemetli bir hale gelerek aşındırıcı ve aşınma numunesi arasında dinamik bir bağlantı oluşturmuştur. Bu durum sürtünme katsayısında önemli ölçüde artışa sebep olmuştur. Sürtünme katsayısının artmasından dolayı daha yüksek

kesme gerilmesi olduğu ve kaplama malzemesinin aşınmasına neden olduğu belirlenmiştir [45].

Zhou vd. 2020 3 farklı ray çeliğinin (1 tane ötektoid üstü ray çeliği ve 2 tane ötektoid ray çeliği) oda sıcaklığında ve düşük sıcaklıkta (-40 °C) yuvarlanmalı-kaymalı aşınma testinde aşınma ve hasar davranışını incelemiştir. Bu çalışmada 3 farklı karbon değerine sahip ray çeliği kullanılmış ve aşındırıcı olarak tekerlek malzemesi kullanılmıştır. Test esnasında kullanılan dönme hızları tekerlek ve ray malzemesinde sırasıyla 200 d/dk ve 195.24 d/dk'dır. Tüm testler 1060 N normal yük altında, 1.0 x 105 döngü için 200 r/dk dönme hızıyla gerçekleştirilmiştir. Tekerelek ve ray numunesi arasındaki kayma oranı ise %2.38'dir. Testten sonra numuneler uzunlamasına şekilde tel kesme yöntemi kullanılarak kesilmiş ve sonrasında plastik deformasyon ve yüzey altı hasarlarının optik mikroskop kullanılarak ve bir taramalı elektron mikroskopunda gözlem yapılabilmesi için öğütme, parlatma ve dağlama işlemleri yapılmıştır. Tekerelek numunesinin ise aşınma yüzeyine kimyasal bileşenleri enerji dağıtıcı x-ışını streskopisi ile tespit edilmiştir. Sonuç olarak, ötektoid üstü ray çeliklerin ötektoid ray çeliklerine kıyasla oda sıcaklığı koşullarında daha iyi bir aşınma direncine ve yuvarlanma temas yorulması direncine sahip olduğu belirlenmiştir. Düşük sıcaklık ortamında ise daha iyi bir aşınma direncine sahip olurken daha kötü bir yuvarlanma temas yorulması direnci davranışı göstermiştir. Ek olarak, düşük sıcaklık ortamı oda sıcaklığı koşullarına kıyasla hem ötektoid üstü hem de ötektoid ray çeliklerinde daha iyi bir aşınma direnci davranışı sergilemiştir. Yuvarlanma temas yorulması ötektoid ray çeliklerinde geliştirilirken ötektoid ray çeliklerinde azaltılmıştır. Oda sıcaklığı koşullarında hem tekerlek hem de ray çeliklerinde aşınmış yüzeylerde aşınma çatlakları saptanmıştır. Bunun aksine düşük sıcaklık ortamında hem tekerlek hem de ray çeliklerinin numunelerinde aşınmış yüzeylerde oksitlenme ve üçüncü gövde katmanları oluşmuştur. Hasan vd. 2018 İki tane yeni tasarlanmış düşük karbonlu, sürekli olarak soğutulan, karbür içermeyen beynitik ray çeliğinin perlitik ray çeliğine kıyasla yuvarlanma-kayma aşınma davranışını araştırmışlardır. Deney esnasında aşındırıcı olarak tüm numunelere sertlik değeri 265 HV olan ferrit perlit mikro yapıya sahip tekerlek çeliği numunesi kullanılmıştır. Deney tasarımında ray çeliği üst kısımda ve tekerlek çeliği alt kısımda bulunmaktadır. Alt kısımda bulunan numune 400 rpm seviyesinde dönerken makinede %10 sabit kayma oranı bulunmaktadır. Disklerle

temasta olan bir fırça yardımıyla numunelerde oluşan aşınma kalıntıları düzenli olarak temizlendi. İki diskin birbirine etkilediği radyal kuvvet 170 kgf olarak belirlenmiştir. Deneyde testler 6 saat süre boyunca gerçekleştirilmiştir. Testler yağlayıcı kullanılmadan oda sıcaklığında yapılmıştır. Deney esnasında sabit olarak 170 kg yük uygulanmıştır. Deney için beynitik ray çeliklerinin yanı sıra karşılaştırma yapmak için 880 perlitik ray çeliğinin de aşınma testleri yapılmıştır. Aşınma testindeki ağırlık kayıpları beynitik rayların perlitik raya göre daha az olmuştur ve beynitik raylarda kendi aralarında setliği yüksek olan numunedeki ağırlık kaybı daha az olduğu belirlenmiştir. Aşındırıcı olarak tekerlek çeliği numunesinde ise perlitik ray çeliği ile temasında beynitik ray çeliklerine göre daha fazla ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Fakat beynitik ray çeliklerinin kendi aralarındaki karşılaştırılmasında sertliği yüksek olan ile temas ettiğinde daha fazla kayıp görülmüştür. Beynitik çeliklerin aşınma derinliği perlitik ray çeliklerine göre daha az olduğu saptanmıştır [46].

Mishra vd. 2021 HVOF yöntemiyle WC-12Co, WC-10Co-4Cr ve Cr₃C₂-25NiCr kaplanan AISI 1020 çeliğinin pin-on-disk aşınma deneyinde aşınma davranışının incelemişlerdir. Ø 12 mm × 20 mm boyutlarındaki AISI 1020 çeliğine WC-12Co, WC-10Co-4Cr ve Cr₃C₂- 25NiCr tozları püskürtülerek 300 ± 20 µm kalınlığında bir kaplama işlemi yapılmıştır. Pin-on-disk aşınma yöntemiyle yapılan aşınma testinde sırasıyla 20, 40, 60 N yük, 0,63 m/s dönme hızı ve 40 dk süre ile uygulanmıştır. Yapılan SEM ve XRD görüntüleme sonuçlarına göre WC-12Co kaplamasının diğer kaplama partiküllerine göre daha iyi bir aşınma direnci gösterdiği ve maksimum mikrosertliğe sahip olduğu işaret edilmiştir [47].

Thirumalaikumarasamy vd. 2014 AZ31B Magnezyum alaşımının farklı klorür iyon konsantrasyonlarında, pH değerlerinde ve maruz kalma sürelerinde tuzlu su içerisinde daldırma yöntemi ve potansiyodinamik polarizasyon testleri altında korozyon davranışını karşılaştırmalı incelemişlerdir. Deney sisteminde 16 mm x 4mm boyutlarında ekstrüde edilmiş silindirik bir AZ31B Magnezyum alaşımı numune kullanılmıştır. 20 setli koşuldan oluşan ve 8 nokta, 6 yıldız nokta ve 6 merkez noktadan oluşturulan tekrarlı üç faktörlü faktöriyel tasarımdan meydana gelen deneysel tasarım matrisi kullanılmıştır. Parametreler olarak; pH değeri, iyon klorür konsantrasyonları ve maruz bırakılma süreleri seçilmiştir. Yapılan deney tasarımı AZ31B Magnezyum

alaşımının korozyon davranışının %95 oranında güvenli tahmin etmek için kullanılmıştır. Bu çalışmada AZ31B Magnezyum alaşımın malzemesinin düşük konsantre çözeltide ve daha fazla maruz kalma sürelerinde düşük korozyon dayanım değerleri elde edilmiştir. Ayrıca alkali çözeltilerde, asidik ve nötr çözeltilere göre daha iyi korozyon direnci ortaya koyduğu belirlenmiştir [48].

Gómez–Guarneros vd. 2021 yapay yağmur suyu koşulları altında, ray mantarının korozyon oranı ve mekanizmalarını incelemiştir. 60E2 profilinde R0900A ray çeliği sınıfının aşınmamış ray mantarı test esnasında kullanılmıştır. Korozyon testi için boyutları 15 mm x 15 mm x 5 mm olan numuneler hazırlanmıştır. Ray mantarının çalışma yüzeyi olan üst yüzeyden daha küçük boyutlarda (5 mm x 5 mm x 3 mm) metalografi testleri için numuneler hazırlanmıştır. Her numune 120 dereceli zımpara kağıdı ile zımparalanmış, aseton yardımıyla yüzeydeki yağlardan arındırılmış ve damıtılmış su ile temizlendikten sonra yüzeyi kuru hava ile kurutulmuştur. Ray mantarı tamamen perlitik bir mikro yapı yüzeyinden meydana gelirken, çalışma yüzeyi (üst yüzey) ve yanal yüzeyler belirli bir korozyon direncine sahip perlit+ferrit yapıya sahiptir. Bu yüzden, ferrit yapısının yapay yağmur suyuyla beraber korozyon üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı ortaya çıkarılmıştır. Oluşan korozyon ürünleri hiçbir korozyon davranışını değiştirmedir. Korozyon davranışında büyük değişimler olmadığı görülse de yağmur suyunun, ray mantarı üzerinde korozyon aşınmasından kaynaklı çukurlaşmalar oluşturduğunu göstermiştir [49].

Bu çalışmada; tungsten karbür (WC) kaplanmış ray çeliği numunelerinin aşınma ve korozyon davranışları sabit yük ve hız koşullarında incelenmesiyle birlikte aşınma deneyleri kuru ve saf su ilaveli ortamlar içerisinde gerçekleştirilmiştir. Yüzeyi tungsten karbür (WC) ile kaplanmış numunelerin kaplama tabakasına metalografik incelemeler yapılarak bu kaplama tabakasının aşınma ve korozyon dirençlerine etkisi incelenip kaplanmamış numunelere göre aşınma ve korozyon dayanımları kıyaslanmıştır.

BÖLÜM 2

RAY ÇELİKLERİ

2.1. RAY ÇELİĞİ TÜRLERİ VE MİKROYAPILARI

Demiryolu sistemlerinde kullanılan rayların içerdikleri element miktarına göre sınıflandırma yapılır. Rayların içinde bulunan alaşım miktarları; o rayın sertliğine, yorulma dayanımına ve aşınma direncine etki etmektedir [50]. Rayların ömürleri ise uygulanan kimyasal değişimlerin yanı sıra fiziksel etkilere göre de değişmektedir. Üretim esnasında yapılan ısı işlemler, rayları birleştirmek için yapılan kaynaklar, rayların sahaya yerleştirilme işlemleri, yola serilen rayların yorulma, sürtünme ve aşınma gibi meydana gelen dış etkenler de rayın ömrünü etkilemektedir [51].

Demiryollarında kullanılan raylarda ideal şartlar içerisinde çatlama ve aşınma meydana gelmemesi beklenir. Bu tip durumlara karşı rayın sertliğini arttırarak hem aşınmasını hem de çatlamasını önlemek için kimyasal veya fiziksel (mantar sertleştirme) çalışmaları yapılır [52]. Özellikle ray çeliği mantarının yüzeyini çeşitli sert malzemeler ile kaplayarak yüzeyde oluşan aşınmalar önlenmiştir.

Ray çeliklerinin mikroyapısı genellikle perlitik yapıda oluşur. Buna ek olarak; beynitik, östenitik ve temperlenmiş martenzitik mikroyapılarda ray çelikleri üretilip kullanım alanları oluşturulmuştur [53,54].

2.1.1. Perlitik Ray Çelikleri

Perlitik mikroyapıdaki ray çelikleri, yüksek seviyede sertleşebilme özelliğinden dolayı tüm Avrupa ve Türkiye demiryolu ağlarında en yaygın kullanılan ray çeliği tipidir. Perlitik mikroyapıdaki bir ray çeliği gereksinim duyulan tüm özelliklere sahip bir çelik tipidir [52]. Perlitik ray çeliklerinde karbon oranı %0,50-1,00 arasında değişmektedir.

Ayrıca karbon miktarı arttıkça çeliğin sertlik derecesi de artmaktadır [55]. Perlitik mikroyapıdaki ray çelikleri; yüksek dayanım, yüksek sertlik, aşınma ve yorulmaya karşı yüksek dayanım özelliğine sahiptir [53]. Sertlik, akma ve çekme dayanımı değerlerinin yüksek olmasıyla birlikte perlitik ray çeliklerinin % uzama ile süneklik kabiliyetinde azalmalar meydana gelmektedir. Demiryolunda ray çelikleri kullanım bölgelerine ve taleplerine göre değişiklik gösterse de genellikle %0,7 C oranında ve %90'ın üzerinde perlitik mikroyapıya sahip ray çelikleri tercih edilmektedir [56].

2.1.2. Beynitik Ray Çelikleri

Beynit mikroyapısı; ferrit ve lamelli olmayan sementit (Fe_3C) yapının karışımı ile ortaya çıkan, tok ve sünek bir mikroyapıdır [50]. Beynitik mikroyapıdaki ray çeliklerindeki karbon miktarı; %0,70-0,80 civarında bulunmaktadır. Karbon oranı düşük oranda olsa da kaynak edilebilirliği perlitik yapıdaki çeliklere göre daha iyi olduğu bilinmektedir. Bunun yanı sıra, beynitik mikroyapı çeliklerinin akma dayanımı, yorulma direnci ve aşınma dirençleri de yüksektir [55]. Perlitik mikroyapıya alternatif olabilen beynitik mikroyapıdaki ray çeliklerinin darbelere karşı dayanımları ve toklukları yüksektir [53].

2.1.3. Östenitik Ray Çelikleri

Östenitik yapı; herhangi bir çelik malzemenin üretilme aşamasında o çeliğin yaklaşık $730^{\circ}C$ üzerine ısıtılmasıyla elde edilmektedir [52]. Östenitik mikroyapıdaki ray çelikleri, düşük akma dayanımlarına sahip olduklarından dolayı kırılma dayanımları da çok düşüktür. Yumuşak yapısı, plastik akma etkisi göstermesi ve aşınma ömrünün uzun olmasından dolayı makaslarda tercih edilmektedirler [53,54]

2.1.4. Temperlenmiş Martenzitik Ray Çelikleri

Martenzitik mikroyapı çelikleri, düşük alaşım içeren östenitik mikroyapıda çelik malzemenin $730^{\circ}C$ üzerinde bir seviyedeyken oda sıcaklığına soğutulması sonucunda oluşan bir çelik tipidir. Martenzitik mikroyapı içerisindeki karbon atomlarının yapı içerisine yerleşememelerinden ve sahip oldukları sertlik ve gevreklik özelliklerinden dolayı malzemede gerilme kuvveti oluştururlar. Bu sebepten dolayı martenzitik

mikroyapıdaki çelikler kullanımlarından önce belirli ısı işlemlere tabi tutulabilirler. Isıl işlem gördükten sonra öncesine göre daha yumuşak fakat diğer çeliklere göre daha sert ve kırılğan bir yapıda olurlar. Böylelikle ray çeliklerinden beklenen tokluk özelliklerini karşılayamazlar [52]. Mühendislik uygulama alanları ve mekanik özellikler bakımından her ne kadar üstün özelliklere sahip olsa da martenzitik mikroyapıdaki ray çeliklerinin aşınma dayanımları düşüktür [53].

2.2. RAY ÇELİKLERİNİN KİMYASAL YAPISI

Ray çeliklerinin kimyasal yapısı içerisinde ana element olan demir elementine (Fe) ek olarak; karbon (C), silisyum (Si), manganez (Mn) gibi elementler bu yapının dayanımını arttıran, faydalı elementler olarak adlandırılırken kükürt (S) ve fosfor (P) elementleri ise bu yapıya zarar veren elementler olarak adlandırılır.

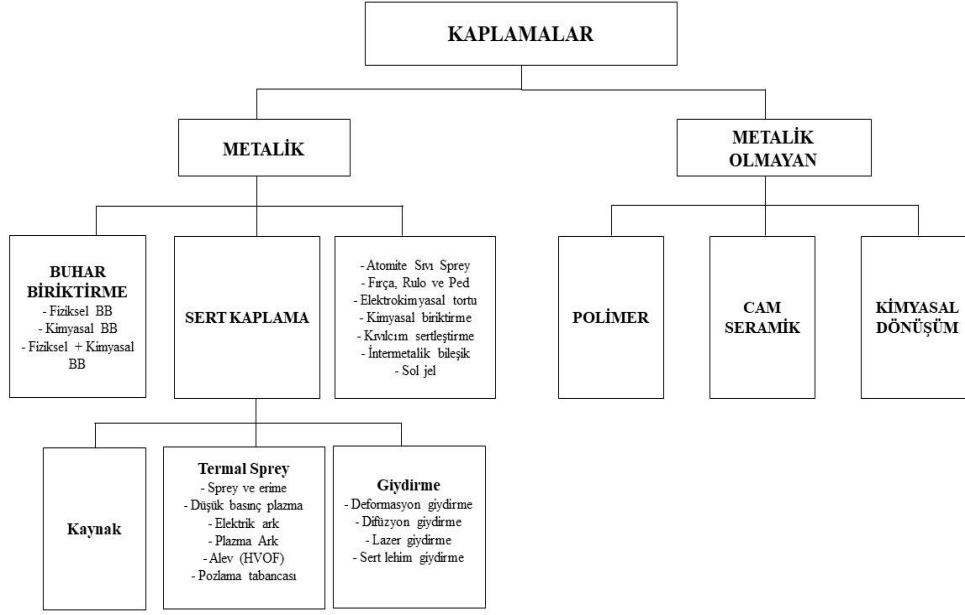
Çelik malzemelerin sertlik ve dayanım değerlerini arttırmada en fazla etki eden element karbon elementidir. Ancak karbon miktarının artması çelik malzemelerde daha gevrek ve kırılğan yapının oluşmasına yol açar. Ray çeliklerinin yapısında genellikle %0,4 ila %0,8 arasında karbon elementi bulunmaktadır. Ray çeliklerinde silisyum değeri %0,35 ile %0,50 değerleri arasında olması istenir. Silisyum elementi, çelik malzemenin içerisindeki oksijeni gidermesi için tercih edilmektedir. Buna ek olarak; silisyum elementi, çelik malzemenin akıcılığını arttırır, daha yoğun olmasını ve homojen dağılmasını sağlar. Ray çeliklerinin içerisinde karbon miktarının yaklaşık 2-3 katı miktarında mangan elementi bulunmaktadır. Bu miktar %0,8 ila %2,4 arasında değişmektedir. Yapı içerisindeki mangan elementi çelik malzemenin dayanımını arttırır. Ray çeliği yapısında %0,03 ile %0,08 arasında fosfor elementi bulunmaktadır. Fosfor elementi miktarının bu değerleri geçmemesi gerekmektedir. Fosfor elementi her ne kadar ray çeliği içerisinde zararlı element olarak görülse de ray çeliğinin korozyon dayanımına olumlu yönde etkisi bulunmaktadır. Kükürt elementi ray çeliği yapısında istenmeyen bir elementtir. Ancak bununla birlikte, ray çeliği yapısı içerisinden çıkartılamayan kükürt miktarı %0,06 değerlerinde olmasına göz yumulmaktadır. Kükürt elementi demir elementi ile bileşik oluşturarak çelik malzemenin daha fazla gevrekleşmesine sebep olmaktadır [53].

BÖLÜM 3

KAPLAMA İŞLEMİ

Uygulama alanlarında veya mühendislik sahalarında kullanılan malzemelerden beklenen özelliklerin artması ve teknolojinin ilerlemesi sonucunda uzun ömürlü, yüksek performanslı ve maliyeti düşük yeni mühendislik malzemeleri ihtiyacı doğmuştur. Var olan malzemelerle bu ihtiyacı karşılamada problem yaşanılması sonucunda yüzey mühendisliği olarak bilinen bir alan ortaya çıkmıştır. Yüzey mühendisliğinde ise bir malzemenin alt yüzeyinden ara yüzeye, ara yüzeyden kaplamaya kadar bir malzemenin fiziksel veya kimyasal özelliğini geliştirmede, yapısında, üretiminde ve kullanımında çalışmalar yapılmaktadır [57].

Kaplama teknolojisinde esas amaç iki farklı malzemenin, ana malzeme ve kaplama malzemesi olarak birleşiminin sonucunda yüzey performansının geliştirilmesidir. Mekanik dayanım ve tokluk özellikleri ana malzeme ile sağlanırken yüzeyde oluşan aşınma, korozyon, kırılma ve çatlama gibi olumsuz etkenleri kaplama yöntemi ile kaplama malzemesinin en az indirilmesi beklenilmektedir [57]. Bir kaplama işleminin uygun olup olmadığı ana malzeme ve kaplama malzemesinin yapışkanlığına göre belirlenir. Eğer iki malzeme arasındaki yapışma iyi bir şekilde gerçekleşmişse oluşan yeni malzemedeki aşınma ve korozyon direnci gibi özelliklerinin artmış olduğu gözlemlenmektedir [58]. Günümüzde kaplama teknolojisi; kullanılan malzemenin fiziksel veya kimyasal özelliklerini iyileştirirken o malzemenin uzun ömürlü olması, mühendislik uygulamasında maliyetleri azaltması, belirli uygulama alanlarında sonucunda kazalara yol açabilecek mühendislik kusurlarını engellemesi, hali hazırda mevcut olan malzemedeki yüksek oranda verim elde edilmesi için tercih edilmektedir. Günümüzde tercih edilen kaplama yöntemleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Günümüzde tercih edilen kaplama yöntemleri [57].

Mühendislik alanında en çok tercih edilen kaplama yöntemi termal sprej kaplama işlemleridir. Termal sprej kaplama yönteminde ise karbürler, metaller, alaşımlar, polimerler, kompozitler ve oksit malzemeler kaplama malzemesi olarak tercih edilmektedir.

3.1. KAPLAMA YÖNTEMLERİ

Günümüz şartlarında kaplama yöntemleri 2 ana bölüme ayrılmaktadır. Metalik ve metalik olmayan diye ayrılan bölümler kendi içlerinde de uygulama alanları, kaplama türleri gibi parametrelere göre gruplara ayrılabilir. Mühendisliğin uygulama alanlarında en çok karşılaşılan kaplama yöntemi ise termal sprej kaplama yöntemidir.

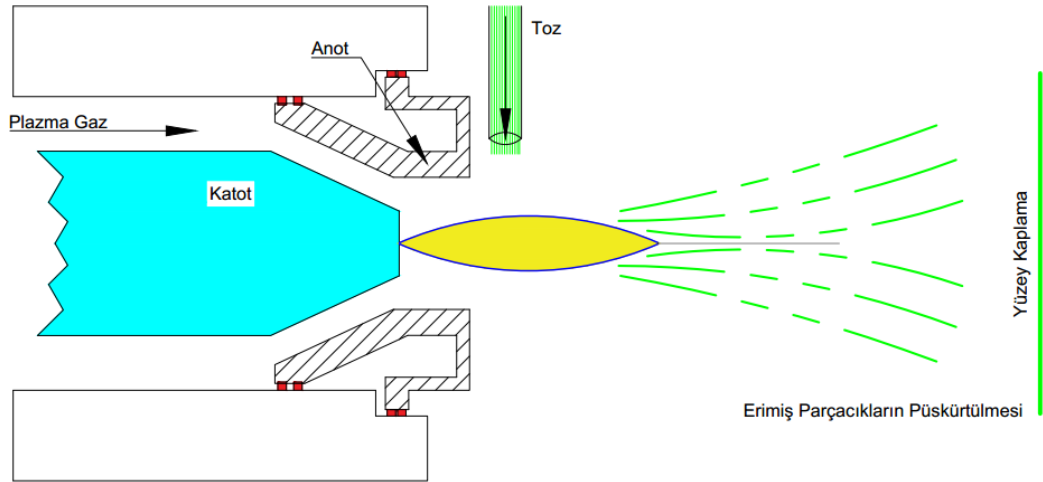
3.1.1. Termal Sprej Kaplama

Termal sprej kaplama yöntemi genellikle metal ve metal olmayan malzemelerin kaplama işlemine denir [59]. Ana çalışma prensibi; çeşitli enerji kaynakları yardımı ile ısıtma veya kısmen eritme işlemi sonucunda kaplama malzemesinin farklı gazların oluşturduğu basınç ile ana malzemenin yüzeyine püskürtülmesidir. Bu yöntemin en önemli avantajı ise çok fazla çeşitte malzemenin kaplama işlemi için kullanılabilir

olmasıdır. Bu malzemelere örnek olarak, tungsten gibi erime noktası çok yüksek olan malzemelerin deforme olmadan istenilen yüzeye kaplanabilmesidir. Kaplama yöntemi seçilirken; kaplanılacak malzeme türü, uygulanacak kaplamanın kalınlığı, ana malzemenin sıcaklığı gibi ana etkenlere dikkat edilmelidir [60].

Termal sprey yöntemi ile kaplama işleminde ana malzeme ve kaplama malzemesinin uyumuna dikkat edilmelidir. Ana malzemenin sertlik değeri ve yüzey pürüzlülüğü oldukça önemli etkenlerdir. Kaplama malzemesinin ana malzeme yüzeyine tutunması için, ana malzeme yüzeyinin kaplama işlemi yapılacak yüzeyinin temizlenmesi ve yüzeyin pürüzlü hale getirilmesi gerekmektedir [57].

Termal sprey kaplama işleminin şematik gösterimi Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Termal sprey işlemi dört farklı yöntem ile gerçekleştirilebilir. Bu yöntemler; alev sprey, elektrik ark spreyi, plazma spreyi ve yüksek hızlı oksijen-yakıt püskürtme (HVOF) olarak uygulanmaktadır.



Şekil 3.2. Termal sprey kaplama işleminin şematik gösterimi [59].

3.1.1.1. Alev Sprey

Termal sprey kaplama işlemlerinin içerisinde en ucuz ve en basit yöntem alev sprey kaplama yöntemidir [60,61]. Bu yöntem ilk kez bir İsviçreli bilim insanı Snoop

tarafından 1910 yılında alevle püskürtme tabancasının keşfiyle bulunduğu yöntemdir [59,60].

Kaplama malzemesi; tel, çubuk ya da toz şekilde elde edildikten sonra bir alev içerisinde belendirilir. Alev içerisinde beslendirilen malzemeye nozulun içinden geçme esnasında oksijen ve kullanılan yanıcı gaz karışımının yardımı ile ergitilme işlemi yapılır. Ergitilen kaplama malzemesi partikülleri alev gazlarının yardımı ile hızlandırılarak ana malzemenin yüzeyine püskürtülür. Ana malzeme yüzeyine yapışan ergimiş maddeler zamanla yüzeyde düzleşir, katılaşır ve kaplama katmanını oluşturur [61].

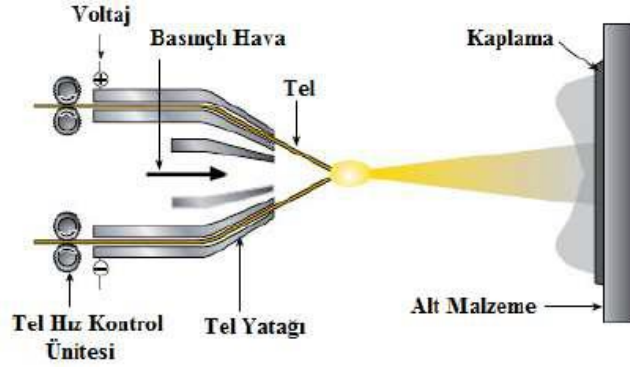
3.1.1.2. Elektrik Ark Sprey

Elektrik ark sprej kaplama işleminde ham madde olarak tel şeklinde bir metal tercih edilmektedir. Bu yöntemin diğer termal sprej kaplama yöntemlerinden farkı ise bir dış ısı kaynağının kullanılmamasıdır [61].

Kaplama işlemi; yüksek akımlı enerji kaynağına bağlanan iki zıt yüklü telin bağlanmasıyla gerçekleşir. Tellerin ucu birbirlerine temas ettikleri zaman bir ark oluşur ve oluşan bu ark tellerin uç kısımlarını ergitir. Kaplama tabancasının içinden gelen basınçlı hava sayesinde bu ergimis metal parçacıklar ana malzemenin kaplanacak yüzeyine püskürtülerek yapılır [59].

Elektrik ark sprej kaplama yöntemi ana malzemenin aşınma ve korozyon dayanımını arttırmak için kullanılırken öte yandan dekoratif amaçlarla da tercih edilmektedir [60].

Şekil 3.3'te elektrik ark sprej kaplama yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Elektrik ark sprej kaplama yönteminin şematik gösterimi [60].

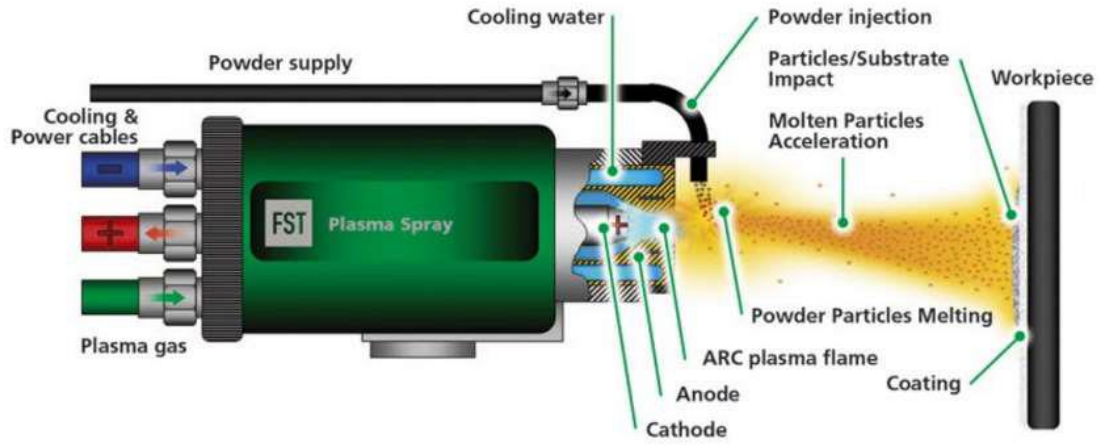
3.1.1.3. Plazma Sprej

Termal sprej yöntemlerinden birisi olan plazma sprej kaplama işleminde; ergimiş veya yarı ergimiş olan metalik, seramik, karbür, oksit ve kompozit gibi tozların eritilmesi ve sonrasında kaplanacak malzemenin yüzeyine çöktürme işlemi yapılır [59,61].

Hava ile temas edebileceği ortamlarda yapılabilmesinden dolayı bu kaplama yöntemine atmosferik plazma sprej kaplama yöntemi de denilir [59].

Plazma sprej kaplama işleminde; plazma yöntemi ile çok yüksek derecelerde enerji temin edilirken (7000°C - 20000°C) bu yöntemde sıcaklıktan dolayı oluşabilecek olumsuz durumlar için su soğutması kullanılır. Plazma sprej kaplama işlemlerinde çok yüksek sıcaklıkta çalışıldığı için yoğunluk seviyesi de oldukça yüksektir. Bu yöntemle kaplama yapıldıktan sonra uygulanan kaplamanın yapısı ince ve tabakalı olur [60].

Şekil 3.4'te plazma sprej kaplama yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



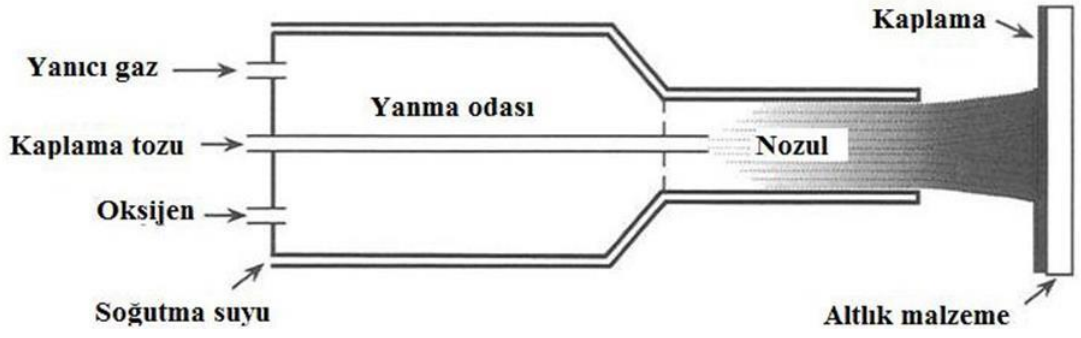
Şekil 3.4. Plazma sprej kaplama yöntemi şematik gösterimi [60].

3.1.1.4. Yüksek Hızda Oksi-Yakıt Püskürtme (HVOF)

Yüksek hızda oksji-yakıt püskürtme (HVOF) ile kaplama işlemi; kaplama malzemesi olarak belirlenen hammaddenin yanıcı gazlar ve oksijenin çok yüksek basınçta yakılıp, bu sayede süpersonik seviyede hızlandırılan hali hazırda yanan gaz karışımı içerisinde beslenmesi işlemidir. HVOF kaplama işleminde, hammaddenin toz halinde bulunup, bu hammaddenin ısıtılıp ve hızının yüksek seviyelere çıkarılması için kapalı yanma ve geniş nozul tasarımı tercih edilmektedir [62].

HVOF yönteminde, alev hızı yüksek olduğu için kaplama tabakasının bağ mukavemeti yüksek olur ve porozite (gözeneklilik) düşük seviyede kalır. Bu yöntemle yüksek yoğunlukta, aşınma ve korozyana karşı yüksek dirençli kaplamalar oluşturulur. Ancak bununla birlikte bu kaplama yönteminde diğer kaplama yöntemlerine göre maliyet daha yüksektir ve plastik gibi çabuk eriyen malzemeler kullanılamaz [59,60].

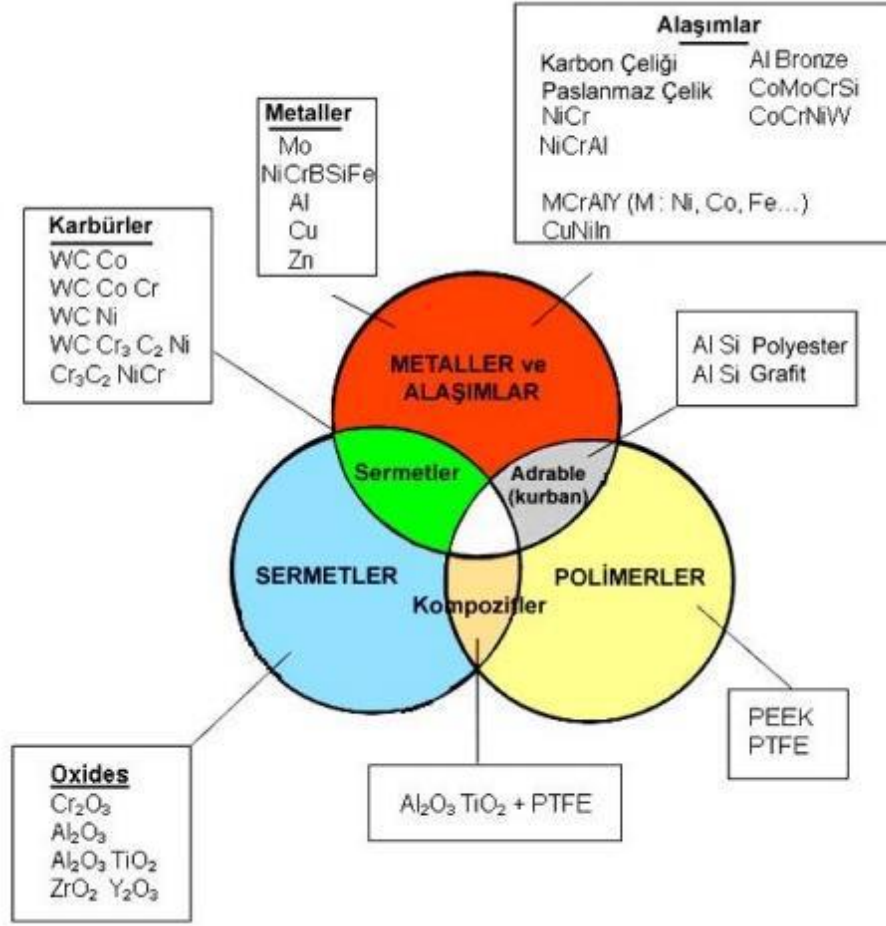
Şekil 3.5'te HVOF yöntemiyle kaplama işlemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.5. HVOF yöntemi ile kaplama işleminin şematik gösterimi [58].

3.2. KAPLAMA MALZEMELERİ

Kaplama malzemeleri; karbürler, metaller, alaşımlar, polimerler, kompozitler ve oksitler gibi 6 grup altında incelenebilir. Fakat genellikle mühendislik uygulama alanlarında karbür veya nitrür kaplamalar yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu kaplama türüne karbürleme veya nitrürleme adı da verilir. Belli başlı kaplama malzemeleri, WC-Co, WC-CoCr, TiN, TiC, TiCN, CrC, CrN olarak gösterilebilir. Şekil 3.6'da kaplama malzemelerinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.6. Kaplama malzemelerinin şematik gösterimi [57].

3.2.1. WC-Co Kaplama Malzemesi

Tungsten karbür (WC) alaşımının %3,5 ile %4,0 değerleri arasında karbon elementi bulunmaktadır. WC ve W₂C alaşımının ergime noktaları çok yüksektir (2610 °C). Bu ergime noktasını azaltmak ve iç yapısındaki dayanımı arttırmak için alaşımın içine Co (kobalt) elementi eklenmektedir [63]. Kaplama malzemesi olarak tungsten karbür alaşımının seçilmesinin sebebi; yüksek aşınma, sertlik ve sıcaklık dayanımı gibi özelliklere sahip olmasıdır. Tungsten karbür alaşımın gevrek bir yapıya sahip olduğundan dolayı içerisine konulan Co elementinin tozu ile sinterleme işlemi yapılmaktadır. Bu işlem sayesinde tungsten karbür tanelerinin arasındaki boşluklar kapanır. WC-Co alaşımının içerisindeki Co elementinin mikroyapı ve miktarına göre mekanik özelliklerinde değişim göstermektedir. Fakat sinterleme işlemi esnasında gereken sıcaklığın çok yüksek olmasından dolayı WC-Co alaşımının üretimi oldukça

zordur. WC-Co kaplama malzemesi titanyum alaşımlarına göre, aşınma ve korozyon nleme, ana malzeme yüzeyine yapışma konusunda daha üstün özelliklere sahiptir [57].

WC-Co alaşımının toz özelliği ve kimyasal kompozisyonu izelge 3.1 ve izelge 3.2’de gösterilmiştir. Ayrıca WC-Co alaşımının genel zellikleri Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. WC-Co alaşımın toz özelliği [60].

Açıklama	Tane Boyutu	Sprey Prosesi	Co	C	W
WC-Co	-45 +15µm	HVOF	12	5,5	Den.

Çizelge 3.2. WC-Co alaşımının kimyasal kompozisyonu [60].

W	Fe	Co	O	Ct	Cf
Dengeli	0,0215	12,00	0,047	5,28	0,03

- HVOF WC/Co 88/12, 20 µm < d < 45 µm
- Gözeneklilik: 1%
- Mikrosertlik : > 1200 HV0.3
- Bağ Mukavemeti: > 70 MPa
- Kaplama Kalınlığı (yaklaşık): 200 µm
- Pürüzlülük: Ra=2-5 µm
- İşlem Sıcaklığı: < 500 °C



Şekil 3.7. WC-Co alaşımının genel zellikleri [60].

3.2.2. WC-CoCr Kaplama Malzemesi

WC-CoCr alaşım malzemesinin; abrazyon, erozyon ve kavitezyon performansları yüksektir. Bu sebepten dolayđı, bu kaplama malzemeleri aşınma ve korozyon direncini arttırmak için termal spre yöntemi kullanılarak kaplama işlemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir. WC-CoCr kaplama malzemesi yüksek sertlik ve adezyon özelliğine

sahiptir. Bir malzemenin çalışma yüzeyi WC-CoCr alaşım malzemesiyle kaplandığında o yüzeyin ömründe artış meydana gelmektedir [57].

3.2.3. TiN Kaplama Malzemesi

Bilinen en eski kaplama türüdür. Demir, çelik gibi metallerde, takım uçlarında, aşınmaya maruz kalan metal yüzeylerde ve dekoratif parçalarda çeşitli amaçlar için kaplama kullanılır [64]. Altın sarısı bir renge sahip ve n çok tercih edilen kaplama malzemelerinden biridir. 2900 HV sertlik derecesine sahiptir. Fiziksel (PVD) ve kimyasal buhar çöktürme (CVD) kaplama yöntemleriyle kaplama yapılabilir [65].

3.2.4. TiC Kaplama Malzemesi

Gri bir renge sahiptir. Sertliği oldukça yüksek bir kaplama malzemesidir. Bu sebepten dolayı mekanik sürtünme davranışlarında uç kısım aşınmalarında geciktirme özelliğine ve yaklaşık olarak 3000 HV sertlik derecesine sahiptir [65].

3.2.5. TiCN Kaplama Malzemesi

Bu kaplama malzemesi; en yüksek sertlik derecesi, en düşük yüzey pürüzlülüğü ve sürtünme katsayısına sahiptir [64,65].

TiCN kaplama malzemesi yüksek sertlik ihtiyacı duyulan mühendislik uygulamalarında, yüksek hızla çalıştırılan freze veya torna takımlarında iyi kaplama performansı göstermektedir. Bu kaplama malzemesi; yüksek sertlik, iyi yapışma, yüksek aşınma direnci ve yüksek ısı iletkenliği gibi özelliklere sahiptir [64].

3.2.6. CrN Kaplama Malzemesi

Oldukça yumuşak bir yapıya sahip olan bu kaplama malzemesinin sertlik değeri 1800 HV dir. Diğer kaplama malzemelerine göre ana malzeme üzerindeki kaplama kalınlığı daha ince bir yapıdadır ve korozyon dayanımı daha yüksektir [65].

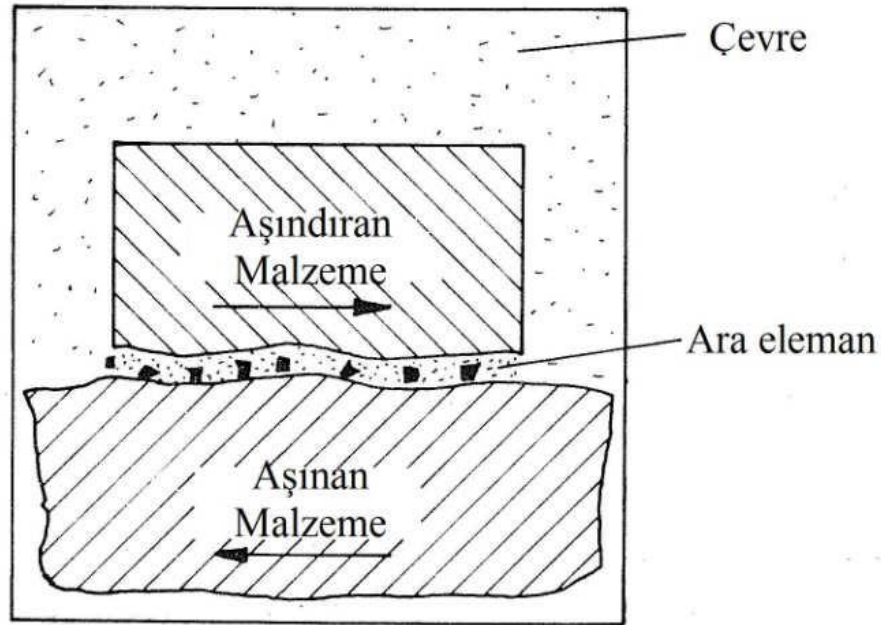
3.2.7. CrC Kaplama Malzemesi

Bu kaplama malzemesi diğer kaplama malzemelerine göre çok düşük bir sertlik derecesine sahiptir (149 HV). Ayrıca yağlama kalitesi de oldukça düşüktür. Genellikle bakır, zirkonyum, nikel ve titanyum alaşımlarını işleme yöntemlerinde tercih edilir. 1300°F seviyesinde harika bir termal kararlılık özelliği gösterir [65].

BÖLÜM 4

AŞINMA VE AŞINMA MEKANİZMALARI

Aşınma genel olarak, kullanılan malzemenin diğer (katı, sıvı ve gaz) malzemelerle temas etmesinden sonra mekanik veya kimyasal etkenlerden dolayı malzeme yüzeyinden küçük parçacıkların ayrılması ve yüzeylerde farklılıklar meydana gelmesidir [66,67]. Bir sistemin aşınma mekanizması olarak belirlemek için o system içerisinde; aşınan malzeme (ana malzeme), aşındırıcı malzeme (karşı malzeme), ara malzeme, yük ve hareket gibi diğer faktörlerin tespit edilmesi gerekmektedir [53,54,68]. Şekil 4.1’de bir aşınma mekanizması sistemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Bir aşınma mekanizması sisteminin şematik gösterimi [68].

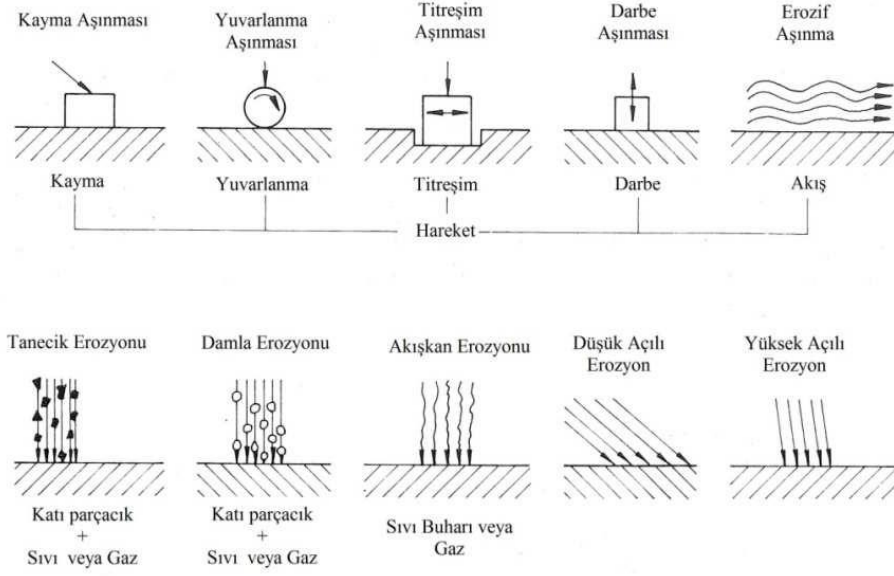
Aşınmanın en düşük seviyede olması; mühendislik, malzeme bilimi ve özellikle insanlık için çok önemli bir durumdur. Örnek olarak; malzemenin yeniden tedarik edilme masrafı, servis için geçirilen zaman, doğal kaynakların hızlı tüketilmesi ve son olarak da insan sağlığına olumsuz etkileridir. Malzemenin temas yüzeylerinde oluşan

hasar mekanizmasına aşınma denir. Aşınmanın oluşması için, malzeme yüzeylerinin birbirlerine bağlı olarak hareket halinde olması, temas halinde olan mazerleme yüzeylerinin en az birisinden istenmeyerek mekanik veya kimyasal olarak malzeme kaybetmesi gerekmektedir [59].

Aşınmanın sonucunda malzemelerin yüzeylerindeki parçacıkların kopmasından dolayı yüzey formları değişir ve malzeme yüzeyi işlevselliğini kaybeder. Bu durumlara örnek olarak; mühendisliğin uygulama alanlarında birbirine temas halinde olan makine elemanlarının arızalanması, yapı elemanlarının temas bölgelerinde zamanla yüke bağlı olarak aşınma davranışı sergilemesini gösterebiliriz. Bu gibi aşınmadan kaynaklı problemler; kaplama, yağlama, filtreleme, daha dayanıklı malzeme seçimi, tasarımsal düzeltmeler gibi yöntemlerle azaltılmaya çalışılsa da hiçbir zaman önlenemeyecektir. Aşınmanın oluşma koşulları, malzeme seçimleri, aşınan ve aşındırıcı malzeme türleri gibi etkenlere göre aşınma mekanizmaları belirlenmektedir. Bu aşınma mekanizmaları:

- Abrazif Aşınma
- Adhezif Aşınma
- Yorulma Aşınması
- Korozyon Aşınması, olarak dört ana grupta incelenmektedir [54].

Aşınma mekanizmaları çeşitli laboratuvar deneyleri ve sonrasındaki gözlemlene işlemleri sonucunda belirlenmektedir. Belirlenen bu aşınma mekanizmasına göre onu önleme veya aşınmayı minimuma indirme yöntemleri uygulanmaktadır. Şekil 4.2’de aşınma mekanizmalarının örneklendirilmesi gösterilmiştir.

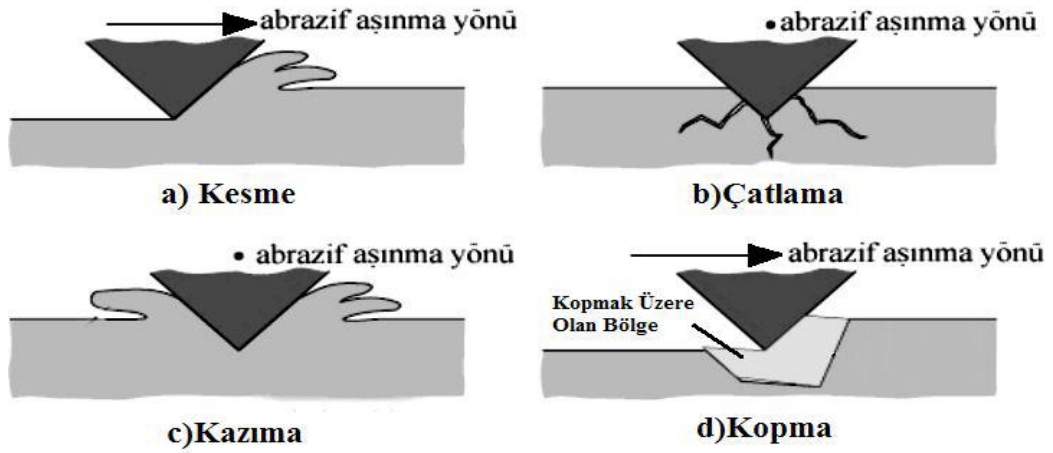


Şekil 4.2. Aşınma mekanizmalarının örneklendirilmesi [68].

4.1. AŞINMA MEKANİZMALARI

4.1.1. Abrazif Aşınma

Birbirine bağlı olarak hareket eden malzemelerden biri diğerine göre daha sert ve pürüzlü olan malzemenin ona göre daha yumuşak olan malzemenin yüzeyinden mikro veya makro seviyede parça koparmasına abrazif aşınma denir. Temas halinde olan malzemelerin yüzeyine etkiyen yük miktarını azaltarak abrazif aşınma hızı düşürülebilir [57]. Aşındırıcının partiküllerinin şekli, boyutu ve miktarının yanı sıra aşındırıcı malzemenin oluşum fazlarının abrazyon özellikleri de abrazif aşınma miktarını etkilemektedir. Eğer numune sertliği aşındırıcı malzemenin sertliğinden daha büyükse bu durum aşınma miktarındaki düşüşe sebep olur. Aşındırıcı malzeme partikülleri ile metal malzemenin yüzeyi arasındaki sertlik farkı ve bu malzemeler arasındaki teması oluşturan basıncın büyüklüğü abrazif aşınmayı oluşturan iki temel faktördür [66]. Şekil 4.3'te abrazif aşınmanın şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.3. Abrazif aşınmanın şematik gösterimi [67].

Abrazif aşınmayı önlemek veya minimum seviyeye indirmek için malzemenin çalışma yüzeyine çeşitli ısı işlem veya sert kaplama yöntemleri uygulanabilmektedir. Bu gibi yöntemler uygulandıktan sonra bazı durumlarda aşındırıcı ve aşınan malzeme karakteristikleri yer değiştirebilmektedir. Bu sebepten dolayı abrazif aşınma mekanizma şartlarını belirlemek ve aşınma problemini minimuma indirme işlemleri uygulamak için çalışılan malzemeler arasında bol tekrarlı aşınma deneylerinin yapılması ve sonuçlarının kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir.

4.1.2. Adhezif Aşınma

Aşınma mekanizmaları arasında en çok karşılaşılan aşınma türü adhezif aşınmadır. Bu aşınma mekanizmasında birbiriyle temas halinde olan metal malzemelerin yüzeylerinde oluşan temas ve bu temas sonucunda ortaya çıkan yüksek sıcaklık ile metal yüzeyler arasında kaynama oluşur. Bu kaynayan (birbirine yapışan) parçaların kopması ve metal malzemelerden ayrılmasıyla adhezif aşınma meydana gelmektedir [59].

Genellikle birbirleri üzerinde birbirleri üzerinde kayma hareketi yapan katı malzeme yüzeylerinde oluşmaktadır [59,68].

Birbirlerine temas ederek hareket eden iki metal malzeme her ne kadar pürüzsüz de olsa yüzeylerinde bulunan en ufak pürüzlülükler, uygulanan yük ve oluşan temastan

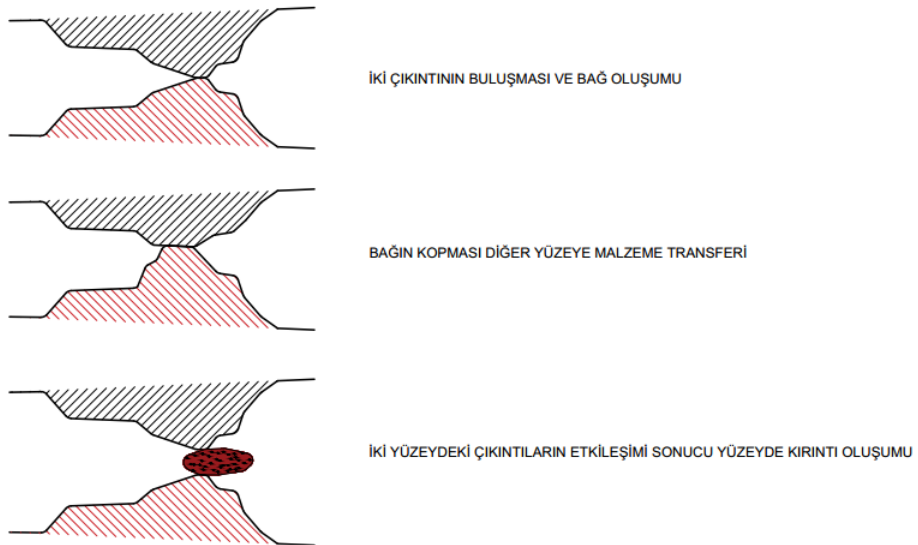
dolayı kaynaklanan sıcaklık sonucunda bir adhezif aşınmaya ve plastik deformasyona sebep olabilmektedir [59].

Metalik malzemelerde yüksek seviyede adhezif aşınmalar oluşabilir. Metal malzemeler ile yapılan aşınma deneylerinde, metal çiftlerinden yumuşak malzeme yüzeyinden sert malzemenin yüzeyine temas bölgesinin yapılabildiği ve parça transferinin gerçekleştiği tespit edilmiştir. Yumuşak malzeme parçacıklarının bir kısmı sert malzeme yüzeyine yapışırken bir kısmı da kendi yüzeyinde kalmıştır [67]. Bu parçacık yapışması ve transferi işlemi Şekil 4.4'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Parçacık yapışması ve transfer işlemi [67].

Bazı temas durumlarında ise iki parçacık, oluşan kayma hareketi sonucunda etkileşime girip tek bir parça haline geldikten sonra yüzeyden koparak adhezif aşınmayı oluşturmaktadır [59]. Bu parçacık oluşumu Şekil 4.5'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Birbiriyle etkileşime girerek parçacık oluşumunun şematik gösterimi [59].

4.1.3. Yorulma Aşınması

Temas halinde olan yüzeylerde meydana gelen tekrarlı yüklerin sonucunda metal yüzeylerde, yorulma çatlaklarının veya kırılmaların oluşması durumuna yorulma aşınması denir. Aşınma mekanizmaları genelde malzeme yüzeyinde görülen, aşınmanın büyüklüğü ise zaman ve konum faktörlerine bağlı olduğundan yorulma aşınması birçok aşınma mekanizmasında görülebilir [53,66,67]. Yorulma aşınması içerisinde, temas halindeki yüzeylerde mikro boyutta ortaya çıkan aşınmaya delaminasyon aşınması denir. Temas halindeki yüzeylere uygulanan basınç ile yüzeyin hemen altında çatlak oluşumu gözlemlenebilir. Yükün ve basıncın artması ile çatlaklar çoğalır ve çatlak yolları birleşir. Bunun sonucunda plaka halinde yüzeyden malzeme kopması meydana gelmektedir. Bu aşınma türü; rulmanlar, dişli çarklar gibi çeşitli aktarım elemanları ile birçok makine elemanlarının çalışma yüzeylerinde küçük çukurlar oluşturan bir aşınmadır [67]. Şekil 4.6'da bir dişli çark üzerinde oluşan yorulma aşınması örneği gösterilmiştir.

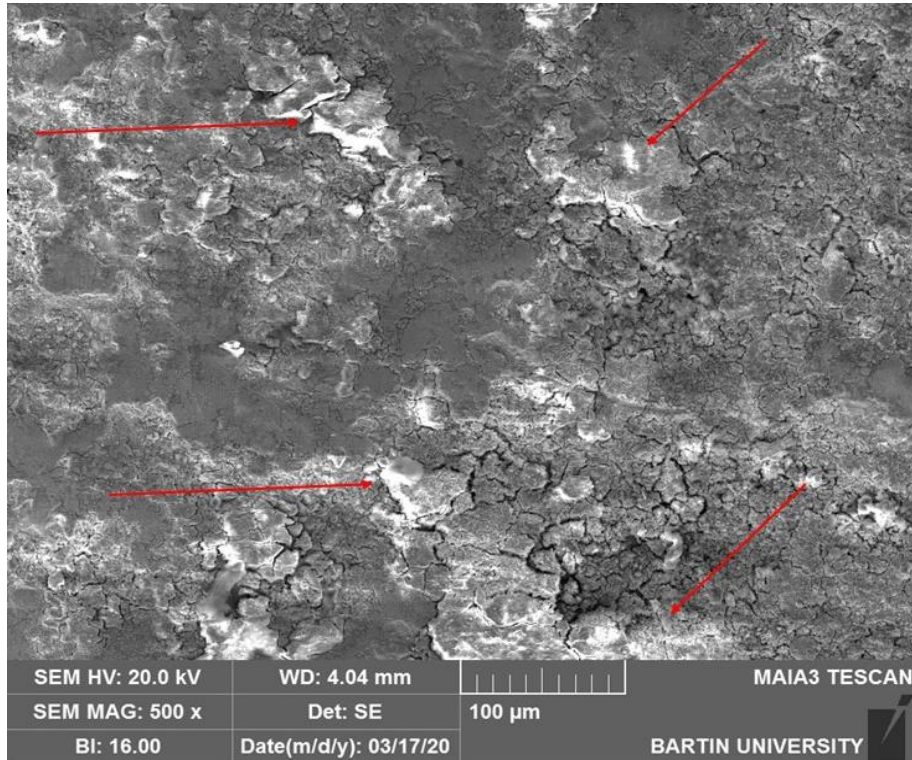


Şekil 4.6. Bir dişli çarkta meydana gelen yorulma aşınması örneği [67].

4.1.4. Korozyon Aşınması

Korozyon aşınması; kimyasal olarak oluşan bir aşınma mekanizması çeşididir. Kullanılan metal veya alaşım malzemelerin koroziv bir ortam içerisinde çevre ile kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyona girmesiyle oluşur. Bu reaksiyon sonrasında çeşitli bileşikler olur ve oluşan bu yeni bileşikler zamanla ana malzemeden koparak korozyon aşınmasını meydana getirir. Korozyon aşınması, metal malzemelerde hem korozyonu hem de aşınmayı oluşturan bir aşınma mekanizmasıdır [56,59].

Korozyon aşınma mekanizmasında, metal veya alaşım malzemesinin koroziv ortamda çalışması esnasında veya çalışma sonrasında oksijenle teması ile malzeme yüzeyinde oksit tabakası oluşabilmektedir. Bu oksit tabakası korozyonun derecesine göre gözle görülebilir olabilirken bazı şartlarda mikroskobik ortamlarda belirlenebilir. Mühendislik uygulama alanında istenmeyen fakat sıklıkla karşılaşılan bir aşınma türüdür. Şekil 4.7’de bir koroziv ortamda aşınma deneyi uygulanmış metal malzemenin yüzeyinde oluşan oksit tabakası mikroskobik ortamda gösterilmiştir. Beyaz ve parlayan bölgeler; oksitlenmenin meydana geldiği bölgelerdir.

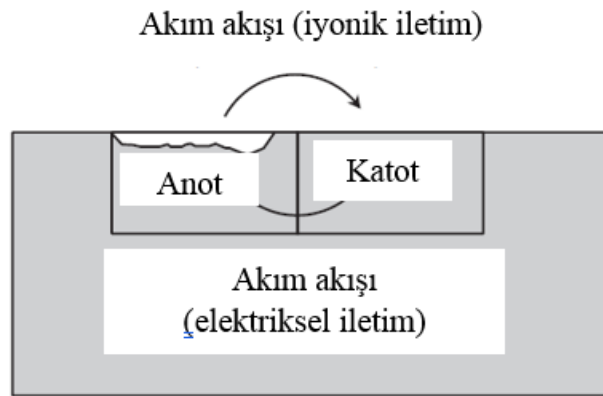


Şekil 4.7. Oksitlenmiş yüzey bölgesinin mikroskobik ortamda gösterimi.

BÖLÜM 5

KOROZYON

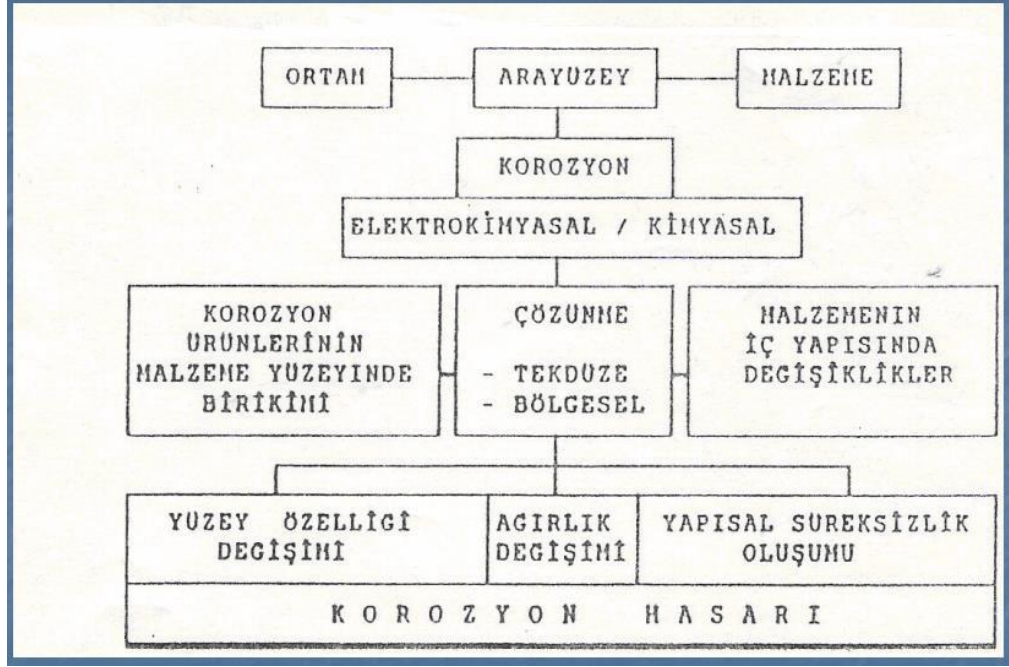
Metal malzemelerin buldukları ortam ile belirli bir süre geçtikten sonra kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyona girmesi sonucu yüzeyinde oluşan hasarlara korozyon denir. Metal malzeme kuru ortamdan bulunuyorsa kimyasal korozyon meydana gelmektedir. Reaksiyon sonucu oluşan gaz, metal malzeme yüzeyinde oksit tabakası oluşturur ve bu tabaka elektriksel olarak iletken bir yapı değildir. Eğer metal malzeme ıslak bir ortamda bulunuyorsa elektrokimyasal korozyon oluşur ve metal malzeme yüzeyinde paslanma meydana gelmektedir. Elektrokimyasal korozyon mekanizması için anot ve katot elektrotları, iletken özelliğe sahip sıvı bir ortam oluşturulup anot ve katot arasındaki elektrik akımı sağlanmalıdır. Burada meydana gelen bölüme korozyon bölümü (galvanic bölüm) denir. Bu sebepten dolayı, malzeme seçimi, kaplama tekniği, anodic ve katodik koruma ve çevresel etken kontrolü gibi durumlar korozyonu etkileyen parametrelerdir [69]. Şekil 5.1’de elektrokimyasal korozyonunu basit şekilde anlatım şeması gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Elektrokimyasal korozyonun basit şekilde anlatım şeması [53].

Mühendislik alanında kullanılan çeliklerin büyük bir bölümü korozyona uğrayarak zarar görmektedir. Sadece çelik malzemeler değil; metal esaslı malzemeler,

polimerler, seramik malzemeler de korozyona uğramaktadır [70]. Şekil 5.2’de korozyon mekanizmasının meydana gelme şeması gösterilmiştir.

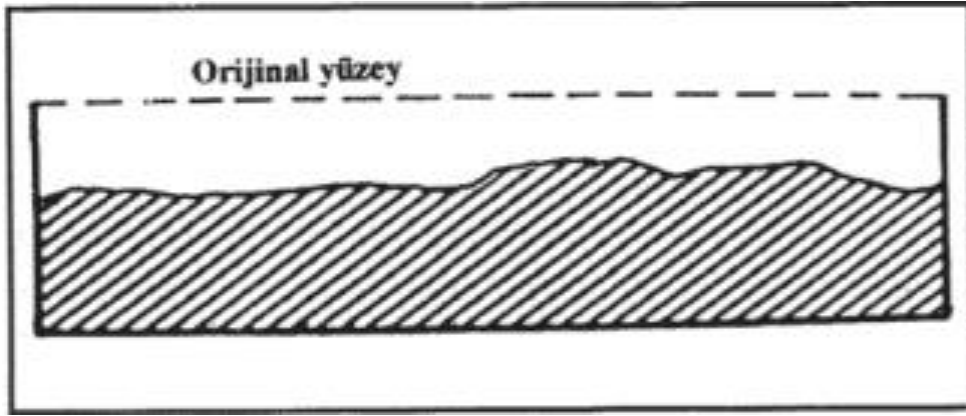


Şekil 5.2. Korozyon mekanizmasının meydana gelme şeması [70].

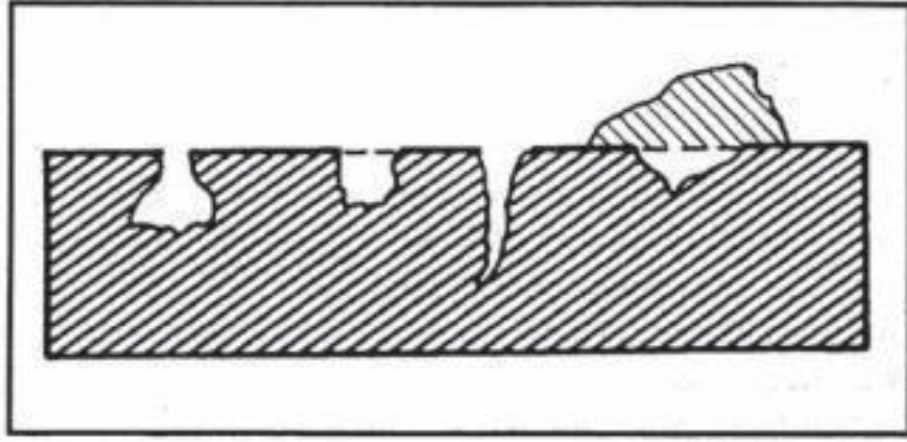
Metallerde buldukları ortama ve koşullara göre korozyon durumları çeşitlenebilir. Metal malzemelerde meydana gelen korozyon türleri; homojen (uniform) dağılımlı ve yerel korozyon olmak üzere iki ana grupta incelenir. Homojen dağılım korozyonlar kimyasal ve elektrokimyasal korozyonlar olarak gösterilir ve yerel korozyon ise makroskobik ve mikroskobik olmak üzere iki alt gruba ayrılır. Makroskobik korozyon türleri; galvanik, erozyon, kavitasyon, aralık ve delik korozyonları olarak belirtilir. Mikroskobik ise; seçici, taneler arası, gerilmeli ve yorulmalı korozyonlar olarak gösterilir [70–72]. Bu korozyon türleri gruplar halinde Şekil 5.3’te gösterilmiştir. Şekil 5.4’te homojen dağılımlı korozyon ve Şekil 5.5’te de yerel korozyon şematik olarak gösterilmiştir.

Homojen (uniform) Korozyon	Yerel Korozyon	
	Makroskobik Korozyon	Mikroskobik Korozyon
<ul style="list-style-type: none"> - Kimyasal Korozyon - Elektrokimyasal Korozyon 	<ul style="list-style-type: none"> - Galvanik Korozyonu - Erozyon Korozyonu - Kavitasyon Korozyonu - Aralık Korozyonu - Delik Korozyonu 	<ul style="list-style-type: none"> - Seçici Korozyon - Taneler Arası Korozyon - Gerilmeli Korozyon - Yorulmalı Korozyon

Şekil 5.3. Korozyon türlerinin gruplar halinde gösterimi [71].



Şekil 5.4. Homojen dağılımlı korozyonun şematik gösterimi [73].



Şekil 5.5. Yerel korozyonun şematik gösterimi [73].

5.1. ÇELİKLERDE KOROZYON OLUŞUMU

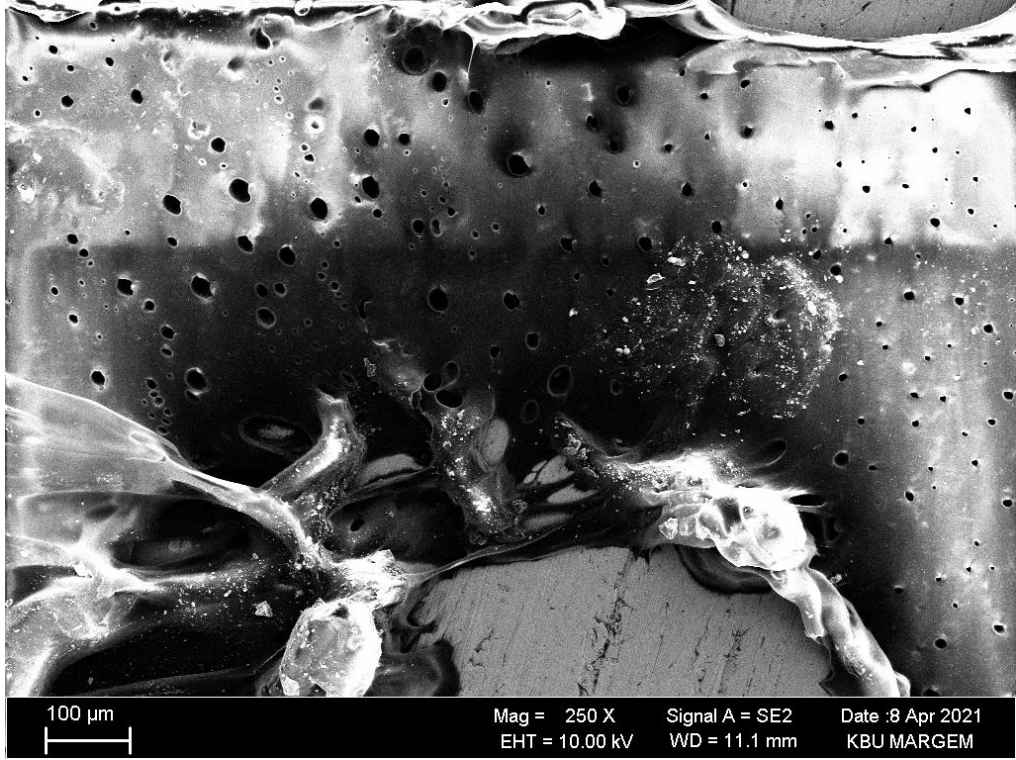
Bir çelik malzeme; yüzeyindeki nem, daldırıldığı elektrot türü ve yüzeyindeki düzensizlikten dolayı yüzey alanında elektriksel potansiyel farkına maruz kalır. Korozyon hücrelerinin içindeki potansiyel farktan dolayı negative yüklenen elektronlar anottan katoda hareket etmesi sonucunda anot bölgesinde bulunan demir atomları pozitif yüklü iyonlar oluşturur. Bu pozitif yüklü iyonlar ile negative yüklü hidroksil iyonlarının reaksiyona girmesinden sonra demir oksit veya pas tabakası oluşur.

Çelik malzemelerde anot ve katot bölgelerindeki korozyon mekanizmaları makroskobik boyutta oluşur. Korozyon anot bölgede oluşur. Anot bölgesinin paslanması halinde farklı yapı ve oluşumdaki yeni malzemelerde paslanma meydana gelir.

Bir elektrolit düzeneğinde çinko elementi ve çelik etkileşime girdiği zaman, elektrik potansiyel farkı meydana gelir ve bir elektriksel hücre gözlemlenir. Çinko elementi çeliğe göre daha fazla elektrokimyasal aktiflik özelliğine sahiptir. Çinko, tüm çelikler için anot görevini görür ve çelik malzemede anodik ve katodik bölgenin oluşmasını engeller.

Bu durumlarda, anot yüzeydeki pozitif çinko iyonları elektrolitte bulunan negative hidroksil iyonları ile tepkimeye girmesi sonucunda çinko yavaş yavaş kendini tüketir.

Çeliğin korozyona uğrama durumunda çinko kaplamasında bozulmalar olur ve çeliği koruyarak paslanmaya maruz kalır. Çinko elementi çelik malzemeleri elektrokimyasal korozyondan korumak için başlıca tercih edilen bir elementtir [69]. Şekil 5.6'da bir çelik malzemenin potansiyodinamik korozyon testi sonunda mikro ortamdaki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.6. Bir çelik malzemenin potansiyodinamik test sonrasındaki görünümü.

5.2. KOROZYONU ÖNLEME YÖNTEMLERİ

Malzemelerde korozyon oluşumunu önlemek için korozyon hücrelerinden en az birinin (anot, katot, elektrolit, electron iletkeni) korozyon mekanizmasından çıkarılması gerekmektedir. Korozyon oluşumunu engellemek için yapılacak işlemlerden bazıları şu şekildedir; katodik koruma, anodic koruma, inhibitor kullanılması, yüzey kaplamalarıyla koruma [69,71,72].

5.2.1. Katodik Koruma

Katodik koruma, korozyon oluşumunu engellemede en etkili yöntemdir. Uygulama alanları şu şekilde örneklendirilebilir; toprak altına gömülen su taşıma boru hatları, tuzlu su ile sürekli temas halinde olan deniz taşıma araçları, su içerisinde kalan köprü ayakları.

Katodik koruma yönteminde korozyona maruz kalan metal malzemenin katot olarak polarizasyon oluşturması gerekir. Bu yöntemde, metal malzemeyi daha aktif bir metal malzemeyle eşleşme yaparak sağlanırken dış bir etki ile akım uygulama yöntemiyle de oluşturulabilir [69,71].

5.2.2. Anodik Koruma

Anodik koruma, korozyon oluşumunu engellemede kullanılan başlıca yöntemlerden biridir. Metal malzemenin potansiyel değeri korozyon potansiyel değerine göre daha anodik değerde olması sağlanarak korozyon hızı düşürülebilir. Anodik koruma, metal malzemenin potansiyellere polarizasyon ile etkileşimi olarak açıklanabilir. Bu durumda korunacak malzeme anot malzemedir ve yardım edecek bir katot malzeme ile pasiflik potansiyel değerine ulaşan metalin bu potansiyel değerde kalması beklenir [69,71].

5.2.3. İnhibitör Kullanılması

İnhibitör kullanılması korozyon oluşumunu önleme yöntemlerinden birisidir. İnhibitör kimyasal bir maddedir. Düşük konsantrasyon seviyelerinde ortama korozyon hızını düşürmek için ilave edilirler. İnhibitör maddeler hem anodik hem de katodik bölgeleri etkiledikleri için anodik ve katodik inhibitörler şeklinde iki ana gruba ayrılır. Korozyon mekanizmasını pasifleştirmek için kullanılan inhibitörlerin konsantrasyonu kontrol altında tutulmalıdır. Eğer konsantrasyon seviyesi azalırsa korozyon hızında artış meydana gelebilir [69].

5.2.4. Yüzey Kaplamalar İle Koruma

Metal veya alaşımlı malzemelerin yüzeylerinde korozyon oluşumunu engellemek için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri de yüzeyi bir başka malzeme ile kaplamaktır. Bu kaplama malzemeleri; metalik kaplama, seramik kaplama, inorganik ve organik kaplama malzemeleridir.

Korozyon hücresi olan anot veya katodu devre dışı bırakmak için metal kaplama yöntemi kullanılabilir. Genellikle daha soy metaller veya pasifleşebilen metaller kaplama yönteminde kullanılır. Çelik malzemenin korozyona uğramasını önlemek için korozyona karşı direnci yüksek; kalay, nikel, bakır veya kurşun malzemeler ile kaplanır. Buna ek olarak çelik sac malzemelerde; çinko, alüminyum veya krom kaplama yöntemleri tercih edilmektedir. Kaplamadaki pasif tabaka tamamen metali koruma görevindedir [69,71].

BÖLÜM 6

MATERYAL VE METOT

Deneyleerde R260 tipi ray çeliği kullanılmış ve Çizelge 1’de kimyasal bileşenleri verilmiştir. Hem günümüzde en yaygın kullanıma sahip ray malzemesi olması hem de diğer ray çeliklerine kıyasla daha üstün tribolojik performans sergilemesi sebebiyle çalışmada R260 ray çeliği tercih edilmiştir [17,40]. R260 ray çeliği perlitik yapıya sahip, aşınma ve korozyon direnci yüksek, krom-mangan esaslı ray çelikleridir [6]. Perlitik yapı içerisindeki sementit fazının ısı etkisi altında küreselleşmesi rayın aşınma direncini azaltmaktadır [21]. Bu sebeple çalışma kapsamında R260 ray çeliğinin aşınma dayanımı WC-Co kaplama ile arttırılmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonuçların diğer ray çelikleri için de referans olacağı öngörülmüştür. Aşınma deneyleri rayın mantar bölgesinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.1-6.2). Kaplama işlemi ve aşınma deneylerinden önce yüzeydeki oksit tabakasını kaldırmak için, numune yüzeyleri 200-400-800-1000 numaralı zımpara kağıtları kullanılarak temizlenmiştir.

Çizelge 6.1. R260 Ray çeliğinin kimyasal bileşimi.

Element	C	Mn	Si	Cr	Mo	S	P	Fe
Ağırlıkça %	0.74	1.25	0.35	0.12	0.035	0.018	0.015	Balance



Şekil 6.1. R260 tipi ray çeliği.



Şekil 6.2. Kesilmiş ray çeliği numuneleri.

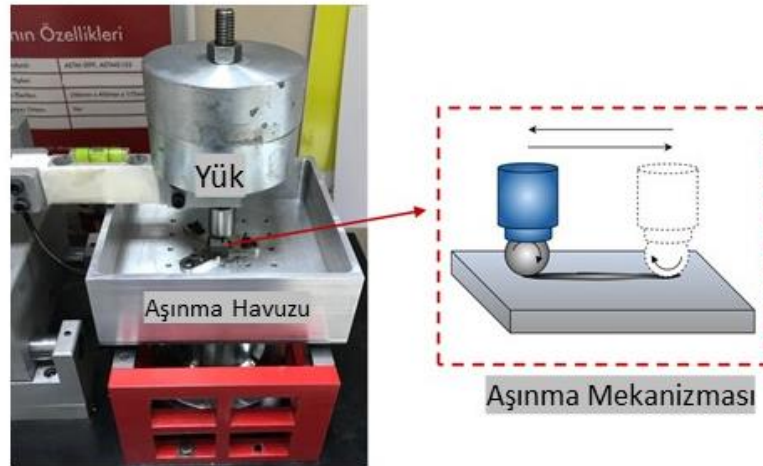
Aşınma numuneleri 30 mm x 10 mm x 5 mm boyutlarında hazırlanmıştır. R260 ray çeliğinin tribolojik performansının artırılması için rayın mantar bölgesi tungsten karbür malzeme ile kaplanmıştır. Tungsten karbür, malzemelerin sertliğini arttırmasının yanı sıra aşınma ve korozyon direncini de arttırması sebebiyle, özellikle kayma aşınmasına maruz endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [45,74]. Teknolojik gelişmelerle birlikte demiryolu taşımacılığında yolcu/yük kapasitesinin ve seyir hızının artması, ray malzemesi deforme olma ihtimalini arttırmaktadır [3,5–7]. Tungsten karbür (WC) malzemesinin yüksek mekanik ve tribolojik özellikleri sebebiyle, ray yüzeyinde meydana gelen aşınma ve korozyon kaynaklı deformasyonların minimizasyonu için kaplama malzemesi olarak tungsten karbür tercih edilmiştir. Tungsten karbür ile ray çeliği arasında yeterli yapışmanın sağlanabilmesi için bağlayıcı malzeme olarak kobalt (Co) kullanılmıştır [75,76]. Kobalt, 6. grup elementlerinin karbürleri ile iyi etkileşim sağlayabilmekte ve yüzeyde yüksek ıslatılabilirlik ve çözünürlük performansı sağlamaktadır [77]. Tungsten karbür malzemesine takviye edilen sünek yapıdaki Co sayesinde yüzeyde kırılma tokluğu, sertlik ve korozyon direnci yüksek kaplama tabakası oluşmaktadır [75,78–81]. Kaplamanın istenilen tribolojik performansı sağlayabilmesi için bağlayıcı malzemenin takviye oranı da önem taşımaktadır. Kobalt miktarı arttıkça gözeneklilik azalmakta ve kaplama ile baz malzeme arasındaki kohezyon kuvveti artmaktadır [82]. Ek olarak kobalt miktarı arttıkça sertlik artmakta fakat belirli bir orandan sonra kobalt miktardaki artış sertliği ve sertliğe bağlı olarak malzemenin termal yorulma direncini azaltmaktadır [76]. Bu durum malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz

etkilemektedir. Schubert et al [76]. çalışmalarında 12%, 17% ve 25% oranlarında kobalt (Co) takviyeli tungsten karbür (WC) kaplamaların tribolojik performansını sertlik ölçümü, kümülatif kütle kaybı ölçümü, sürtünme katsayısı değerleri ile analiz ederek, Co oranının sürtünme ve aşınma direncine etkisini araştırmışlardır. Analiz sonuçlarına göre kobalt oranı 12%'den 17%'ye arttıkça sertliğin arttığı 17%'den 25%'e yükseldiğinde sertliğin azaldığı belirlenmiştir. Kümülatif kütle kaybının 12% ve 17% oranlarında yakın değerlerde olduğu fakat 25% oranında 12% ve 17% oranlarına kıyasla daha yüksek kütle kaybı değerleri elde edildiği görülmüştür. Sürtünme katsayısı değerlerinin tüm oranlarda yakın değerlerde olduğu sonucu elde edilmiştir. Takviye edilen Co oranı literatür çalışmaları ve endüstriyel uygulamalarda dikkate alınarak 12% olarak belirlenmiştir [75,76,81,83,84]. Sertlik değeri 261 HV olan ray çeliğinin yüzeyine yüksek hızlı oksit-yakıt (HVOF) kaplama yöntemiyle 160 ± 40 µm kalınlığında WC-Co kaplama işlemi uygulanmıştır. Termal püskürtme yöntemleri genellikle yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen bir proses olup, proses esnasında tungsten karbür (WC) oksidasyona uğrayarak W_2C , Co-WC fazlarına ayrılmaktadır [81]. Bu durum kaplamanın mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. HVOF yönteminin yüksek darbe hızı ve düşük sıcaklık koşullarında gerçekleştirilen bir yöntem olması diğer termal püskürtme yöntemlerine kıyasla dekarbürizasyonu azaltmaktadır [74,81,83–85]. Ayrıca HVOF ile gerçekleştirilen kaplama prosesleri düşük gözeneklilik, yüksek tokluk, korozyon direnci özelliklerini sağlamanın yanı sıra oluşturdıkları kalıntı basma gerilimi sayesinde yüksek sertlik, mukavemet ve aşınma direncine sahip seramik kaplamalar elde edilmesine olanak sağlamaktadır [86]. Düşük maliyetle gerçekleştirilebilmesi ve ekolojik açıdan olumsuz etkisinin olmaması da endüstriyel uygulamalardaki kullanımını arttıran önemli etkenlerdir [87]. Mevcut çalışmada tribolojik ve mekanik performans, ekonomik ve çevresel etkenler göz önünde bulundurularak HVOF yöntemi tercih edilmiştir. Numunelerin mikro sertlik değerleri Bruker UMT Universal sertlik ölçüm cihazı ile ölçülmüş ve elde edilen değerler Çizelge 6.2'de verilmiştir. Sertlik değerleri altı ölçüm yapıldıktan sonra ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.2. Numunelerin sertlik değerleri.

Numune Türü	Sertlik Değeri (Vickers)
Saf Numune	261 ± 40 HV
WC-Co Kaplanmış Numune	1075 ± 110 HV

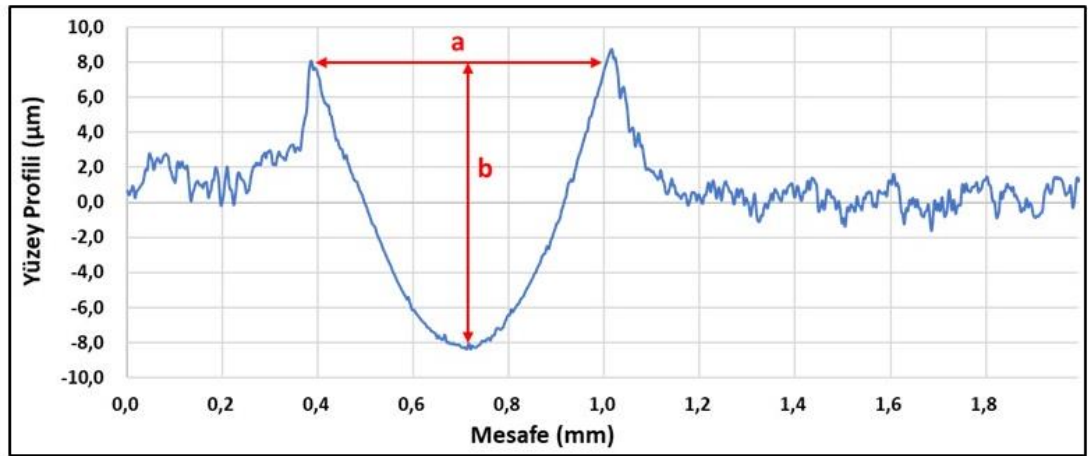
Deneylerde roller-on-plate tipi tribometre kullanılmıştır. Deney parametreleri ve aşınma tezgahının fotoğrafları Çizelge 6.2 ve Şekil 6.3'te gösterilmiştir. Roller on plate sisteminde aşındırıcı bilya yuvarlanma hareketi yapacak şekilde serbest bırakılmış ve ray-teker sürtünmesi simüle edilmeye çalışılmıştır [28]. Kaplamasız ve tungsten karbür (WC) kaplanmış rayın aşınma deneylerinde aşındırıcı malzeme olarak ~700 HV sertlikte 6 mm çapında küresel 100Cr6 (AISI 52100) kullanılmıştır. 40 N yük ve 0.03 m/s hız parametrelerinde toplam 16667 çevrim sayısında (1000 m) aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yük ve hız parametreleri literatür verileri ve ön deneyler dikkate alınarak belirlenmiştir [32,88–90]. Deneyler kuru ve atmosfer koşullarını simüle edebilmek amacıyla saf su ortamında gerçekleştirilmiştir. Deneyin yapıldığı ortam sıcaklığı ve deneylerde kullanılan saf su sıcaklığı ~23°C'dir. Deneyler boyunca yapılan ölçümlerde ortam ve su sıcaklığının ihmal edilebilecek seviyede değişim gösterdiği belirlenmiştir. Deneylerin yapıldığı saf su hacmi 300 ml'dir. Deney sisteminde aşındırıcı malzeme olarak; 50 HRC sertliğinde olan 100Cr6 çelik bilye kullanılmıştır.



Şekil 6.3. Aşınma tezgahının fotoğrafı.

Kaplanmış numunelerin karakterizasyonu için, SEM görüntüleme, elemental analiz (EDX) ve mikro sertlik ölçümü yöntemleri kullanılmıştır. EDX analizinde çizgisel yöntem ve haritalama metodu kullanılmıştır. Sürtünme katsayısı ölçümü için ± 0.1 N hassasiyetinde dinamometre kullanılmıştır. Yüzey morfolojisi analizi için SEM (CARL ZEISS GEMINI FESEM), EDX ve 3D topoğrafya (Phase View Optical Profilometer) görüntüleme yöntemleri kullanılmıştır. Yüzeyde oluşan deformasyonların nicel analizi için 2D profilometre ile elde edilen aşınma profili görüntülerinden aşınma izinin genişlik (a) ve derinlik (b) değerleri belirlenmiş, stroke mesafesi (c) kumpas yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 6.4). Elde edilen genişlik, derinlik ve stroke mesafesi değerleri kullanılarak Eq.1’de verilen bağıntı yardımıyla aşınma hacmi değerleri hesaplanmıştır.

$$V = \frac{2}{3}.a.b.c \quad (6.1)$$



Şekil 6.4. 2D profilometre ile elde edilen aşınma profili örneği.

Tungsten karbür (WC) kaplamanın korozyon direncine etkisini analiz etmek için kaplamasız ve tungsten karbür (WC) kaplamalı numuneler potansiyodinamik polarizasyon (Tafel yöntemi) testine tabi tutulmuştur. Tafel yöntemi ile korozyon potansiyeli ve korozyon akım yoğunluğunun kolay ve hızlı şekilde belirlenebilmekte, düşük korozyon hızlarında bile güvenilir sonuçlar elde edilebilmektedir [91]. Bu sebeple mevcut çalışmada Tafel yöntemi tercih edilmiştir. Testler, 3.5% NaCl çözeltisi içerisinde ve oda sıcaklığında Parstat 4000 model elektrokimyasal empedans

spektroskopisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Polarizasyon ölçümlerinde referans elektrot, karşı elektrot ve çalışma elektrodu olarak sırasıyla Ag/AgCl, platin ve üç elektrotlu hücre kullanılmıştır. Polarizasyon eğrileri 1 mV/s tarama hızı ve ± 0.25 V potansiyel aralığında uygulanan döngüsel ölçümler ile elde edilmiştir. Ölçümler sonucunda oluşturulan “yarı logaritmik akım yoğunluğu-potansiyel” grafiklerindeki eğriler yardımıyla korozyon potansiyeli ve korozyon akım yoğunluğu değerleri belirlenmiş (Tafel ekstrapolasyon yöntemi), korozyon hızı değeri doğrudan cihazdan elde edilmiştir.

BÖLÜM 7

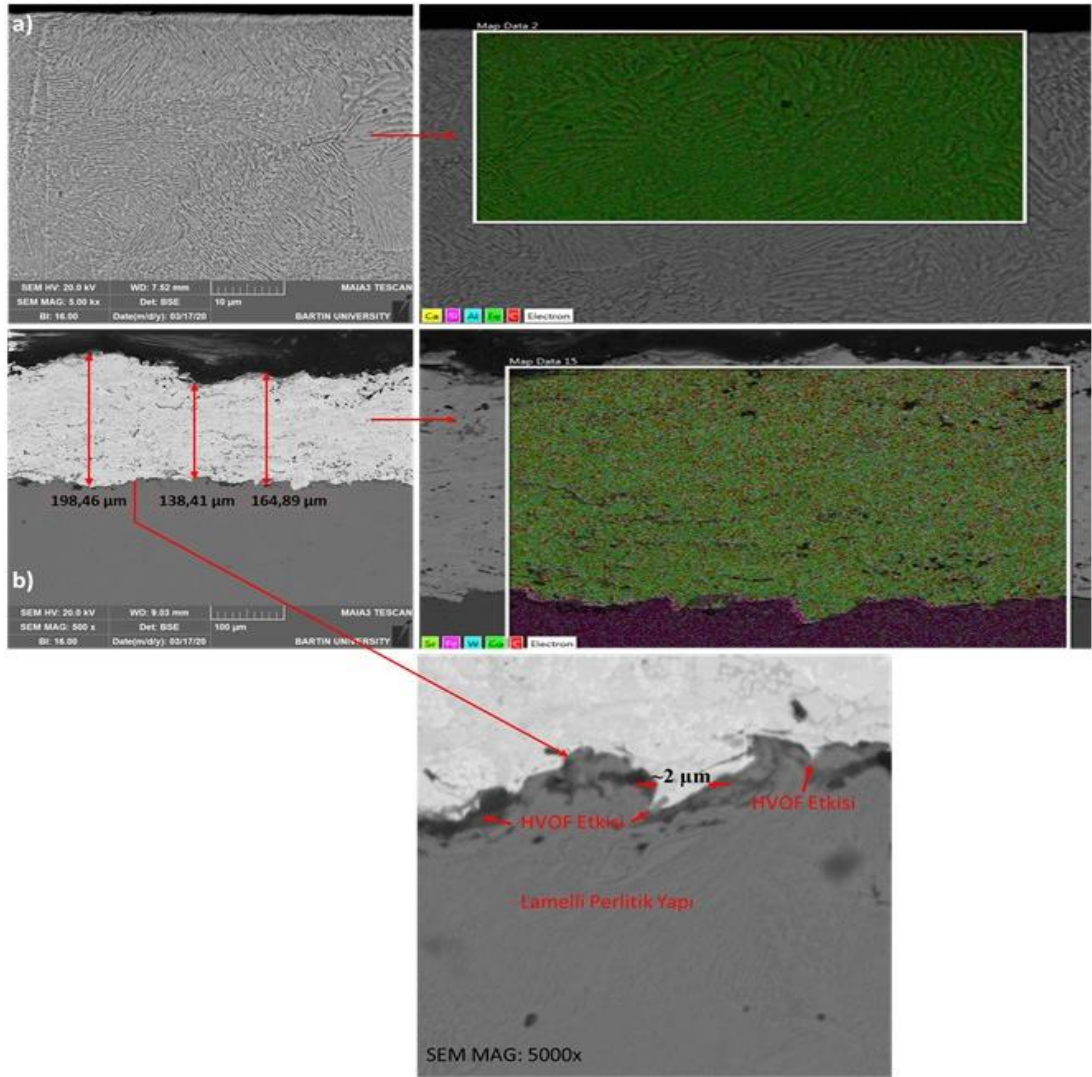
DENEYSEL BULGULAR VE SONUÇLAR

Sonuçlar WC-Co kaplanmış rayların metalurjik ve tribolojik karakterizasyonu olmak üzere iki aşamada incelenmiştir. Metalurjik karakterizasyonda sertlik ölçümü ve SEM, XRD, EDX (çizgi ve haritalama) görüntüleri analiz edilmiştir. WC-Co kaplamının korozyon davranışına etkisinin incelenmesi için potansiyodinamik yöntem ile elde edilen Tafel polarizasyon eğrileri incelenmiş, yüzeydeki korozyon etkisi SEM görüntüleri ile analiz edilmiştir. Tribolojik karakterizasyonda aşınma deneyleri süresince elde edilen sürtünme katsayısı değerleri ve aşınma sonrasında oluşan hacim kaybı değerleri analiz edilmiş, ek olarak SEM ve 3D topoğrafya görüntüleri ile yüzey morfolojisi incelenmiştir.

7.1. TUNGSTEN KARBÜR (WC) KAPLAMA TABAKASININ KARAKTERİZASYONU

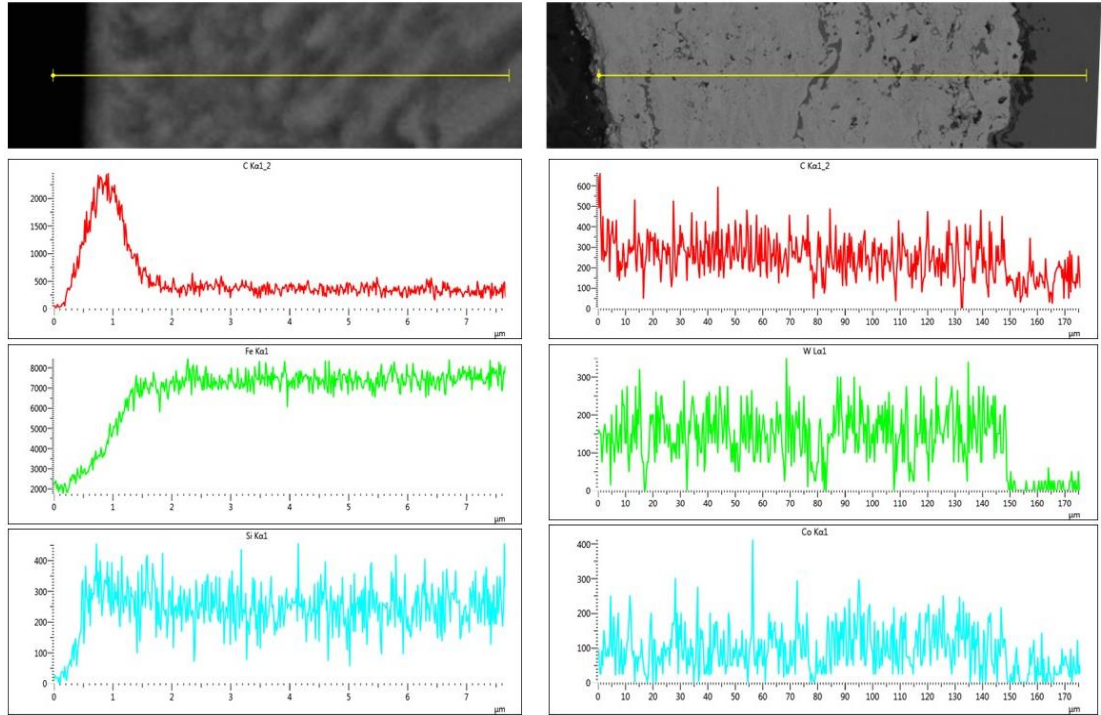
Mühendislik malzemelerinin yüzey özelliklerinin geliştirilmesinde karbür esaslı kaplamalar dikkat çekmektedir. Karbonun ~ 0.071 nm'lik atom yarıçapı sayesinde oluşan arayer katı çözeltiler, yüksek sertlik özellikleriyle aşınmaya maruz malzemelerin tribolojik performanslarını arttırabilmektedir [92]. Kaplama prosesinin stabilitesine bağlı olarak da homojen kaplama kalınlıkları elde edilebilmektedir. R260 ray çeliğine HVOF ile kaplanmış WC-12%Co malzemenin kesit görüntüsü Şekil 7.1'de verilmiştir. Şekil 7.1.a'da perlitik mikroyapı, Şekil 7.1.b'de ise perlitik yapı üzeri ortalama 165 μm tungsten karbür (WC) kaplanmış kesit görülmektedir. Kaplamanın yüksek kalınlıkta olması sebebiyle dalgalı bir yüzey formu oluşturduğu görülmektedir. Literatürde de WC kaplanmış yüzeylerde benzer formların oluştuğu görülmüştür [93]. HVOF yönteminin püskürtme hızına bağlı olarak yüzeyde dalgalı bir form oluştuğu söylenebilir. HVOF yöntemindeki yüksek püskürtme hızı bilyalı dövme etkisi yaparak yüzey formunu dalgalı hale getirmiştir. Fakat iç yapıda bilyalı

dövme işlemlerinde görülen ince taneli yapı oluşumu gözlenmemiştir. HVOF işlem süresinin kısa olması ve işlem süresince yüzeyde tungsten karbür (WC) katmanı oluşması sebebiyle mikroyapı değişimi oluşmamıştır. SEM görüntüsüne göre kaplama tabakasında minimum miktarda çatlak, boşluk ve yırtılma kusurlarının olduğu belirlenmiştir. Kaplama tabakasının kalınlığı dikkate alındığında oluşan kusurların ihmal edilebilir seviyede olduğu iddia edilebilir. Şekil 7.1.b'de 12% oranındaki kobalt matriks içerisinde homojen dağılmış tungsten karbür (WC) partikülleri görülmektedir. Tungsten karbür (WC) partiküllerinin topaklanma eğilimlerinin yüksek olmasına rağmen kobalt bağlayıcısı sayesinde homojen bir dağılım sağlandığı elemental haritalama görüntüsünden anlaşılmaktadır.

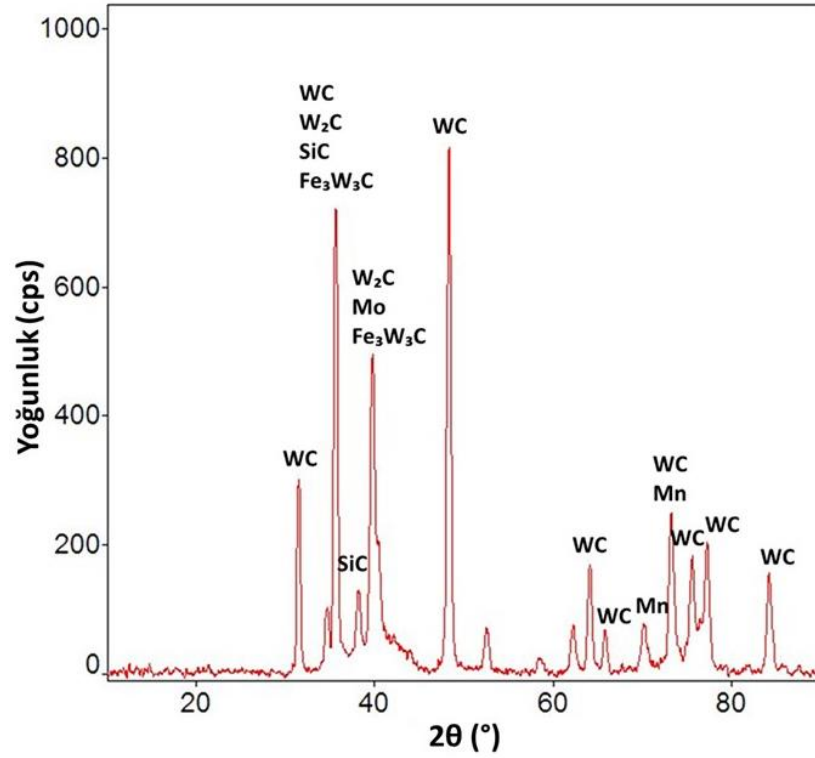


Şekil 7.1. a) Saf numunenin yüzey kesitinin SEM görüntüsü, b) Kaplamalı numunenin yüzey kesitinin SEM görüntüsü.

Kaplama kalitesinin analizi için yapılan EDX analizleri Şekil 7.2’de verilmiştir. Şekil 7.2.a’da kaplanmamış numunenin yüzeyinde oksit tabakası kaynaklı yoğun karbon piki görülmüştür. Kaplama işleminden sonra ray malzemesi yüzeyinde karbon dağılımının homojenleştiği görülmektedir. Kaplama prosesindeki basınç ve sıcaklığa bağlı olarak ve dekarburizasyon etkisiyle oksit tabakasının dağıldığı söylenebilir. Şekil 7.2.b’de görülen baskın elementler (C, W, Co) kaplama tabakası boyunca homojen dağılmıştır. Bu duruma bağlı olarak kaplamanın spektral açıdan yeterli kalitede olduğu iddia edilebilir. Kaplamanın elemental homojenitesinin yanında baz malzeme ile oluşturduğu bağ da önem taşımaktadır (In addition to the elemental homogeneity of the coating, the bond it forms with the base material is also important). Baz malzeme ile oluşan katı hal çözeltisine bağlı olarak Fe_3W_3C alaşımının oluştuğu Şekil 7.3’deki XRD grafiğinde görülmektedir. Alaşımın kübik kristal kafes yapısı sayesinde kararlı bir bağ oluşumunun gerçekleştiği iddia edilebilir. Şekil 7.3’de görülen WC ve W_2C piklerinin oluşumu tungsten kaplı alaşımlar için beklenen bir durumdur.

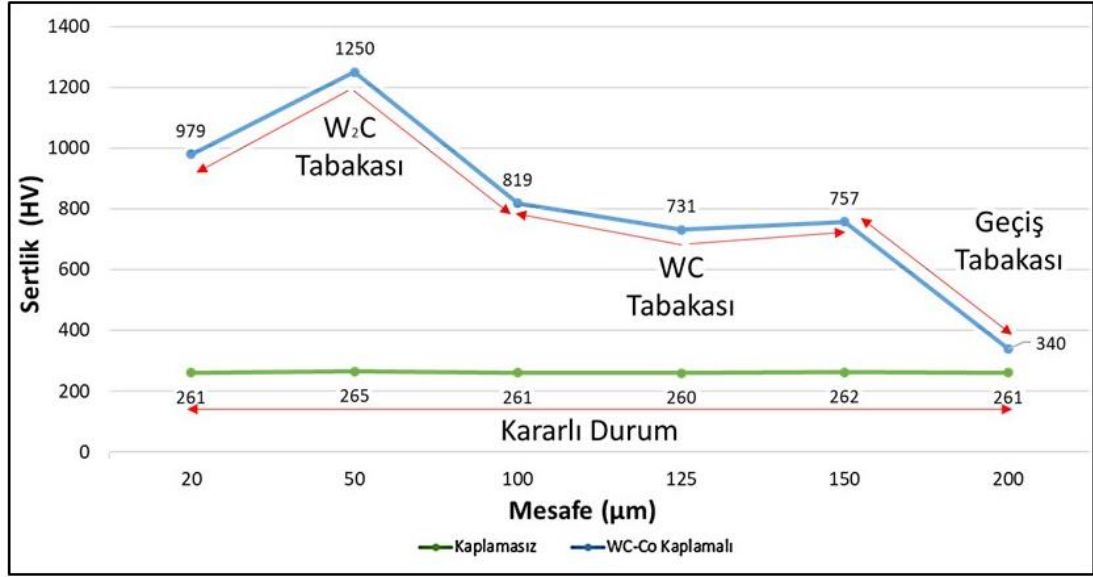


Şekil 7.2. a) Saf numunenin yüzeyinin EDX analizleri, b) Kaplanmış numunenin yüzeyinin EDX analizleri.



Şekil 7.3. XRD grafiği.

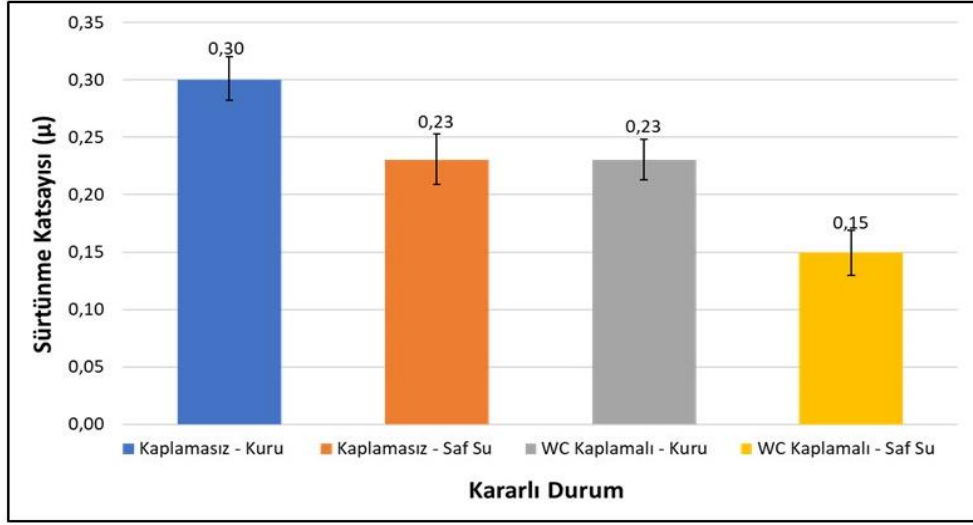
Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de verilen kaplama görüntülerinde WC ve W₂C için renk değişimi veya ton farkı oluşmadığı görülmektedir. Fakat Şekil 7.4’de verilen mikrosertlik grafiğine göre malzeme yüzeyinde öncelikle ~750 HV sertliğinde WC tabakasının oluştuğu, sonra oksidasyona bağlı olarak maksimum 1250 HV sertlik değerine ulaşan W₂C tabakasının oluştuğu gözlenmektedir. WC tabakası boyunca sertlik değerinde değişim gözlenmezken, W₂C tabakasında sertlik değeri önce artmış sonra azalmıştır. Oksitlenme hızı ve HVOF parametrelerine bağlı olarak sertlik tabakasında değişkenlik oluştuğu söylenebilir. Sertlik grafiğinde dikkat çeken bir diğer durum ise geçiş bölgesinin ~50 µm’lik bir mesafede gerçekleşmiş olmasıdır. Bu bölgede sertlik değeri 750 HV’den 250 HV’ye lineer bir trend oluşturarak kontrollü bir şekilde düşmüştür. Bu trend kaplama mukavemeti açısından olumlu bir durum olarak değerlendirilebilir. Kontrollü düşüş sayesinde, malzeme içerisindeki kuvvet akışı esnasında, sertlik değişimi kaynaklı oluşabilecek gerilme yığılmaları minimize edilerek kaplama tabakasının kullanım ömrünün uzaması sağlanacaktır.



Şekil 7.4. Mikrosertlik grafiği.

7.2. TUNGSTEN KARBÜR (WC) TABAKASININ KURU VE SAF SU KOŞULLARINDA TRIBOLOJİK PERFORMANSI

Tribolojik performans analizi için ilk olarak sürtünme katsayısı verileri incelenmiştir. Şekil 7.5'te göre kaplanmamış ray numunesinin saf su ortamındaki sürtünme katsayısı kuru ortama kıyasla 23% oranında azalmıştır. Bu durum saf suyun aşınma arayüzeyindeki pürüzlülük bölgesinde oluşturduğu film tabakası ile açıklanabilir. Film tabakasıyla sürtünme esnasında oluşan basma ve kayma gerilmeleri azalmış ve sürtünme katsayısı düşmüştür. Rayların sürekli su ortamında çalışma ihtimalinin olmaması ve frenleme açısından su ortamının negatif etkisi dikkate alındığında sürtünme katsayısındaki azalma, çalışmanın kapsamı açısından anlamlılık ifade etmemektedir. Fakat su ortamında elde edilen değerler kaplamanın etkisini analiz etmek için önem taşımaktadır. Tungsten karbür (WC) kaplanmış numunenin kuru ortam sürtünme katsayısı değeriyle kaplanmamış numunenin saf su ortamındaki sürtünme katsayısı değerinin aynı olduğu belirlenmiştir. Bu durum ~750 HV sertlik artışının sıvı film tabakası etkisi oluşturduğunu göstermektedir. Kaplama ile sertliğin 260 HV'den ortalama 1000 HV değerine çıkmış olması sürtünme katsayısının 23% oranında düşük çıkmasını sağlamıştır. Sürtünme katsayısında elde edilen düşüş, tungsten karbür (WC) kaplamanın raylardaki sürtünme miktarını azaltmak için etkili ve uygulanabilir olduğunu göstermektedir.



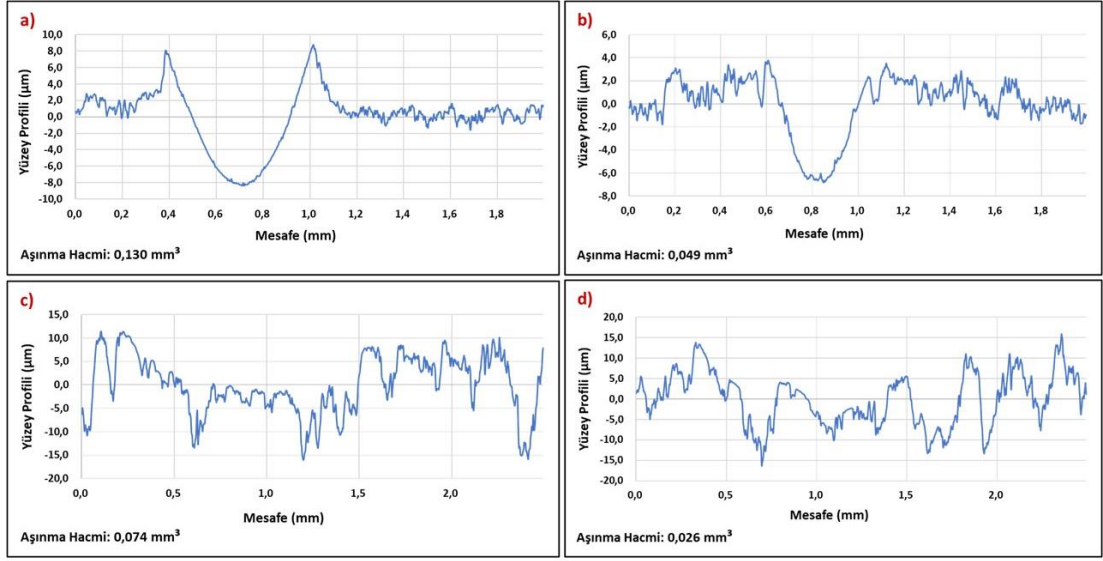
Şekil 7.5. Sürtünme katsayısı değerleri.

Tungsten karbür (WC) kaplama sonucu sürtünme katsayısının düşmesi ray-teker arasındaki aderans açısından anlamlı değildir. Tekerin raya tutunma kabiliyetini ifade eden aderans değerinin, sürtünme katsayısının düşmesiyle birlikte azalması beklenir [94]. Bu sebeple tungsten karbür (WC) kaplama, teknik ve ekonomik zorunluluklar nedeniyle ray hattı boyunca uygulanamamaktadır. Fakat ray üzerinde yuvarlanma sürtünmesinin değil de kayma sürtünmesinin olduğu bölgelerde tungsten karbür (WC) kaplama uygulanabilir. Özellikle makas geçişi ve kurplarda kayma sürtünmesinin yoğun olması sebebiyle katastrofik deformasyonlar oluşabilmektedir [95]. Bu bölgelerde tungsten karbür (WC) kaplama ile sürtünme katsayısının düşürülmesi deformasyonların minimize edilmesi açısından önem taşımaktadır.

Tungsten karbür (WC) kaplama hegzagonal sıkı paket yapıya (hsp), ray çeliği ise hacim merkezli kübik (hmk) kristal kafes yapısındadır [96,97]. Nitelikli alaşım oluşturabilen mühendislik malzemelerinin büyük çoğunluğu hsp ve hmk kristal yapıya sahiptir. Özellikle basınç ve sıcaklık altında yani malzemeye yüksek enerji girişinin olduğu ortamlarda hsp ve hmk yapıları arasındaki bağ oluşumu hızlanmaktadır [98]. Trenin demiryolu hattına sürekli teması sonucunda, ray-teker arasındaki artan basınç ve sıcaklık sebebiyle kaplama ile ray çeliği arasındaki bağ kuvvetinin artacağı iddia edilebilir. Kayma sürtünmesinin olduğu tungsten karbür (WC) kaplamalı bölgelerde artan sıcaklık ve basınç, tungsten karbür (WC) kaplamanın bağ kuvvetini artırarak aşınma direncine ilave bir katkı sağlayabilir. Bu sayede mühendislik malzemelerinin

ikincil aşınma süreleri artacaktır. Ray deformasyonunun yoğun olduğu bölgelerde tungsten karbür (WC) kaplama ile sürtünme katsayısının düşürülmesi ve kaplamanın, tren geçişi esnasındaki enerji girişi sayesinde ikincil aşınma süresini uzatması rayın kullanım ömrünün arttırılması açısından anlamlıdır. Fakat uzun vadede kaplama yüzeyinde oluşan deformasyonlara bağlı olarak kaplama kalınlığı azalacaktır.

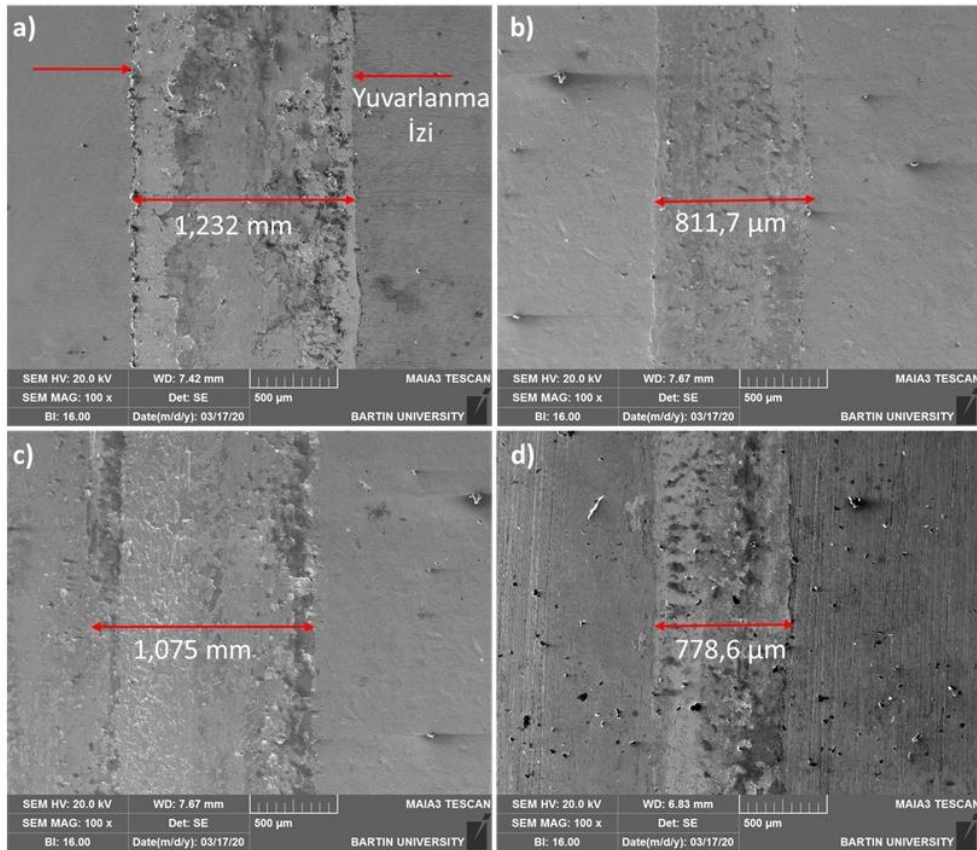
Aşınma hacmi analizi için 2D profilometre ile elde edilen pürüzlülük görüntüleri Şekil 7.6'da verilmiştir. Kaplanmamış numunelerde belirgin bir aşınma çukuru oluşumu gözlenirken, tungsten karbür (WC) kaplanmış numunelerde belirgin bir aşınma izi oluşmadığı görülmüştür. Fakat, kaplanmış numunelerdeki aşınma izi derinliğinin kuru ve saf su ortamlarında 15 µm değerine kadar ilerlediği belirlenmiştir (Şekil 7.6.c ve Şekil 7.6.d). ~150 µm'lik ortalama kaplama kalınlığı dikkate alındığında %10'luk aşınma derinliğinin oluştuğu görülmektedir. Kaplanmış numunelerin yüzeyindeki aşırı sertlik nedeniyle gevrek kırılma formunda deformasyon oluştuğu ve çatlak ilerlemesi sebebiyle derinliğin 15 µm değerine ulaştığı iddia edilebilir. Bu derinlikten sonra W₂C'nin oluşturduğu yüksek sertlik değerlerinin başladığı ve çatlak ilerlemesinin durduğu kabul edilebilir (Şekil 7.4). Diğer taraftan kaplanmış numunelerdeki aşınma genişlikleri kaplanmamış numunelere göre minimum seviyededir. Bu durum aşındırıcı bilyanın kaplamaya yüzeysel seviyede nüfuz edebildiğini göstermektedir. Fakat yukarıda da belirtildiği gibi sert tabakada basınç etkisiyle oluşan kılcal çatlaklar tekrarlı yük altında malzemenin derinliklerine doğru ilerlemiştir. Bu etki toplam kaplama kalınlığı dikkate alındığında ihmal edilebilir seviyededir. Kaplanmamış numunelerdeki düzgün aşınma formları, aşındırıcı malzemenin ray malzemesini abrasiv formda aşındırdığını düşündürmektedir (Şekil 7.6.a ve Şekil 7.6.b). Oluşan form, ray sertliğiyle (260 HV) aşındırıcı bilyanın sertlikleri (505 HV) kıyaslandığında beklenen bir durumdur. Şekil 7.6.b'deki aşınma profili hattında oluşan pürüzlülükler ise su filminin basınç etkisiyle kesintiye uğradığı noktalar olarak ifade edilebilir (Yarı sıvı sürtünme hali). Şekil 7.6.c ve d'ye göre kaplanmış numunelerde oluşan aşınma mekanizması hızlı yorulma aşınması olarak tanımlanabilir. Sertliğe bağlı olarak tekrarlı yük altında oluşan çatlaklar çok hızlı bir şekilde ilerlemiştir. Bu durum her ne kadar katastrofik bir deformasyon hali olarak gözükse de alt tabakada çatlak ilerlemesini durdurucu mekanizmalar sayesinde kaplamanın güvenilirliği açısından herhangi bir problem oluşmamıştır.



Şekil 7.6. a) Kaplamasız kuru, b) Kaplamasız saf su, c) Tungsten karbür (WC) kaplamalı kuru, d) Tungsten karbür (WC) kaplamalı saf su.

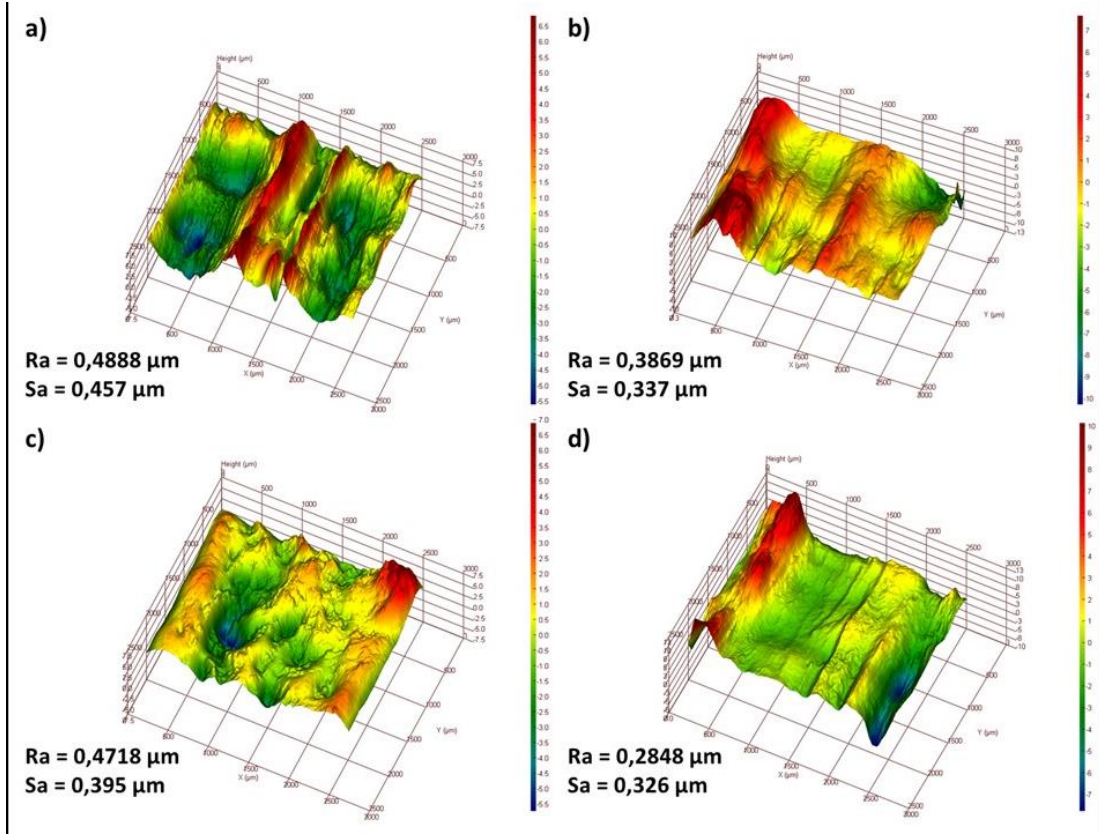
Aşınma mekanizmalarının analizi için elde edilen SEM görüntüleri Şekil 7.7'de verilmiştir. Şekil 7.7'de kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin kuru ortamda mm seviyesindeki aşınma izi genişliklerinin, saf su ortamında μm seviyesine düştüğü görülmektedir. Suyun oluşturduğu tribofilm tabakası sayesinde aşındırıcı bilya ile ray malzemesi arasındaki temas noktaları azalmıştır. Malzemeler arasındaki temasın azalması aşınma izi genişliğini sınırlandırmıştır. Şekil 7.7.a'da verilen kaplanmamış numunenin SEM görüntüsünde agresif bir abrasiv aşınma mekanizmasının olduğu görülmektedir. Aşınma izinin merkezinde düzenli bir sürtünme izi oluşumu gözlenirken, izin kenar bölgelerinde düzensiz oluşumlar gözlemlenmiştir. Bu düzensiz oluşumlar, merkez bölgeden kopan parçacıkların oluşturduğu adhesiv etki ve ploughing etkisi ile açıklanabilir. Kuru sürtünme ortamında aşırı entropi nedeniyle birden fazla aşınma mekanizmasının etkili olduğu fakat merkez izdeki kararlı sınırlar nedeniyle aşınmanın abrasiv ağırlıklı olduğu iddia edilebilir. Şekil 7.7.b'de sıvı film etkisiyle kuru ortama (Şekil 7.7.a) kıyasla daha yüzeysel bir abrasiv aşınma mekanizmasının olduğu görülmektedir. Şekil 7.7.c ve Şekil 7.7.d'de verilen WC kaplanmış numune görüntülerinde yüzeyde pullanma mekanizmalarının olduğu görülmektedir. Pullanma aşınması ray tekerlek sistemlerinde yorulmaya bağlı olarak sıklıkla gözlenen bir mekanizmadır [15,99]. Ray yüzeyindeki teğetsel ve radyal kuvvetlerin etkisiyle oluşan kılcal çatlaklar tekrarlı yüke bağlı olarak genişleyerek pullanma mekanizmasının oluşumunda etkili olmaktadır [1]. Fakat, Şekil 7.7.c'de

oluşan pullanmanın literatürdeki pullanma görsellerine nazaran daha yüzeysel olduğu görülmektedir. Tungsten karbür (WC) kaplamanın etkisiyle oluşan sertlik artışı malzemenin plastik şekil değişimini zorlaştırdığı için pullanma azalmıştır. Bu durum tungsten karbür (WC) kaplanmış rayların kullanım ömürlerinin artacağını göstermektedir. Şekil 7.7.d’de verilen görüntüye göre saf su altında tungsten karbür (WC) kaplanmış ray numunesinde pullanma kusurunun arttığı görülmektedir. Her ne kadar aşınma izi genişliği sıvı etkisiyle azalsa da yarı sıvı film tabakası oluşumu nedeniyle pullanmalar belirginleşmiştir. Film tabakasının yırtıldığı noktalarda oluşan aşırı basınç kaynak oluşumuna sebebiyet vermiş ve bu sebeple yüzey renk tonu koyulaşmıştır. Mikron boyutlardaki kaynak noktalarına etki eden teğetsel kuvvetler kaynağı kopararak daha geniş pullanma tabakalarının oluşmasına sebebiyet vermiştir. Bu duruma bağlı olarak tungsten karbür (WC) kaplanmış yüzeylerin yarı sıvı film tabakası nedeniyle su ortamında daha fazla deforme olacağı iddia edilebilir.



Şekil 7.7. a) Kaplamasız kuru, b) Kaplamasız saf su, c) Tungsten karbür (WC) kaplamalı kuru, d) Tungsten karbür (WC) kaplamalı saf su.

Şekil 7.8’de aşınma bölgelerinden elde edilen topoğrafya görüntüleri verilmiştir. Topoğrafya görüntüleri, sürtünme katsayısı, hacim kaybı ve SEM görüntülerinden elde edilen sonuçları doğrulamak için dikkate alınmıştır. Şekil 7.8’de verilen Ra ve Sa değerleri diğer analiz parametreleri ile uyumluluk göstermektedir. Ra ve Sa’nın sayısal olarak küçük değerlerde elde edilmiş olması ($< 0.4 \mu\text{m}$), aşındırıcı bilya ve ray malzemesi arasında abrasiv mekanizma ağırlıklı deformasyonun gerçekleştiğini. Şekil 7.8’de kırmızı bölgeler pik noktaları, mavi bölgeler dip noktaları, sarı ve yeşil bölgeler ise minimum yüzey pürüzlülüğünü ifade etmektedir. Şekil 7.8.a’nın morfolojisi ray çeliğinin kayma sürtünmesi altında yoğun deformasyona maruz kaldığını göstermektedir. Kırmızı bölgeler, SEM görüntülerine göre iddia edilen adhezyon ve plouhing mekanizmalarının varlığını doğrular niteliktedir. Yine SEM görüntüleriyle belirlenen agresif abrazyon görüntüsü şeklin orta hattında göze çarpmaktadır. Kaplanmamış ray çeliğinin saf su altındaki morfolojisi düzlemsel formda abrasiv aşınma mekanizmasının varlığını göstermektedir (Şekil 7.8.b). Şekil 7.8.c’de kuru aşınma koşulları sebebiyle pürüzlü yüzey formunun olduğu görülmektedir. SEM görüntülerine göre iddia edilen pullanma mekanizmaları 3D topoğrafya görüntülerinde belirgin olarak görülememiştir. Fakat kırmızı ve mavi tonlamaların azlığı tungsten karbür (WC) kaplamanın aşınma direncini arttırdığını ve malzeme kaybını azalttığını göstermektedir. Şekil 7.8.d’de saf su koşulu altındaki tungsten karbür (WC) kaplanmış ray çeliğinin yüzeyinde minimum deformasyon olduğu görülmektedir. Kaplamanın sertliği ve sıvı film tabakası sayesinde yüzey yeşil ve sarı tonlama ile düzlemsel olarak gözükmemektedir. Yüzeyde oluşan dalgalanmanın sıvı film tabakasının süreksizliği sebebiyle olduğu iddia edilebilir. Sıvı filminin kesildiği bölgelerde sürtünme sebebiyle oluşan yapışma problemi ve yüksek ısı yüzeyde mikron seviyede dalgalanmalara sebebiyet vermiştir.

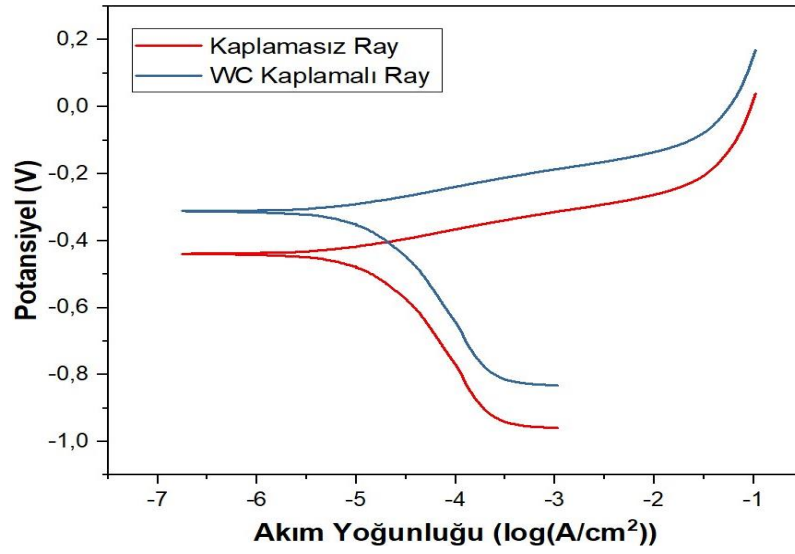


Şekil 7.8. a) Kaplamasız kuru, b) Kaplamasız saf su, c) Tungsten karbür (WC) kaplamalı kuru, d) Tungsten karbür (WC) kaplamalı saf su.

7.3. TUNGSTEN KARBÜR (WC) TABAKASININ KURU VE SAF SU KOŞULLARINDA KOROZYON PERFORMANSI

%3.5 NaCl çözeltisinde korozyon testine tabi tutulmuş kaplamasız ve tungsten karbür (WC) kaplamalı ray çelikleri için elde edilen Tafel polarizasyon eğrileri Şekil 7.9'da verilmiştir. Polarizasyon grafiklerinden elde edilen korozyon akım yoğunluğu (i_{corr}), korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon oranı değerleri Çizelge 7.1'de verilmiştir. Şekil 7.9'e göre kaplamasız numunede tungsten karbür (WC) kaplamalı numuneye kıyasla polarizasyon eğrisinin katodik bölgeye daha yakın olduğu görülmektedir. Polarizasyon eğrilerinin nicel olarak kıyaslanabilmesi için Çizelge 3'te verilen E_{corr} , i_{corr} ve korozyon oranı değerleri analiz edilmiştir. Çizelge 3'e göre tungsten karbür (WC) kaplamalı numunenin kaplamasız numuneye kıyasla E_{corr} değerinin daha yüksek olduğu, i_{corr} ve korozyon oranı değerlerinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Düşük i_{corr} ve korozyon oranı ile yüksek E_{corr} değerleri korozyon direncinin yüksek olduğunu ifade etmektedir [97]. Çizelge 7.1'deki değerler dikkate alındığında tungsten karbür

(WC) kaplamalı numunenin kaplamasız numuneye kıyasla korozyon direnci yüksek olduğu belirlenmiştir. WC-Co kaplamalı numunelerde korozyon mekanizması, kobalt matris-karbür arayüzünde meydana gelen aktif elektrokimyasal reaksiyonla oluşmaktadır [100]. Literatürde WC-12Co kaplamada, karbür partiküllerinin homojen dağılımı sayesinde korozyon direncinin arttığı belirlenmiştir [101]. Mevcut çalışmada da kaplama tabakasında karbür partiküllerinin homojen dağılımının (Şekil 7.1) kobalt matris-karbür arayüzünün minimizasyonunu sağladığı ve bu durumun kaplamanın korozyon direncini arttırdığı iddia edilebilir.



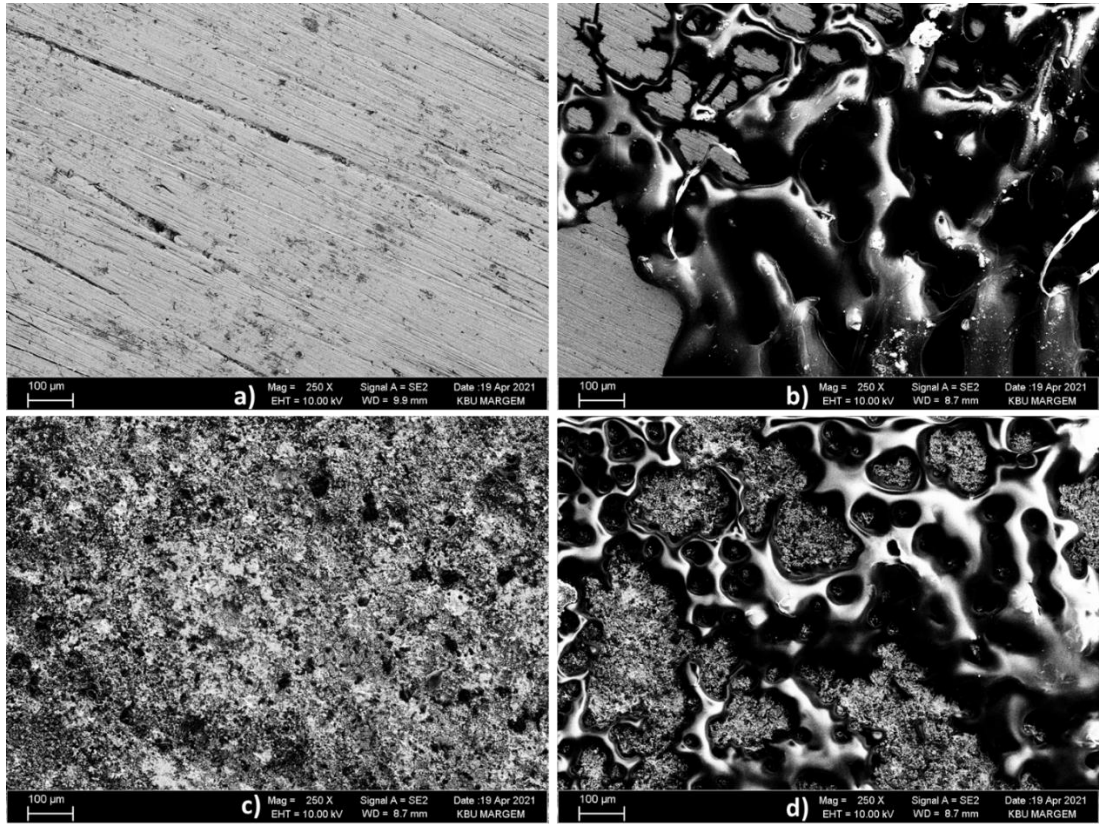
Şekil 7.9. Tafel polarizasyon eğrileri.

Çizelge 7.1. Korozyon sonuç değerleri.

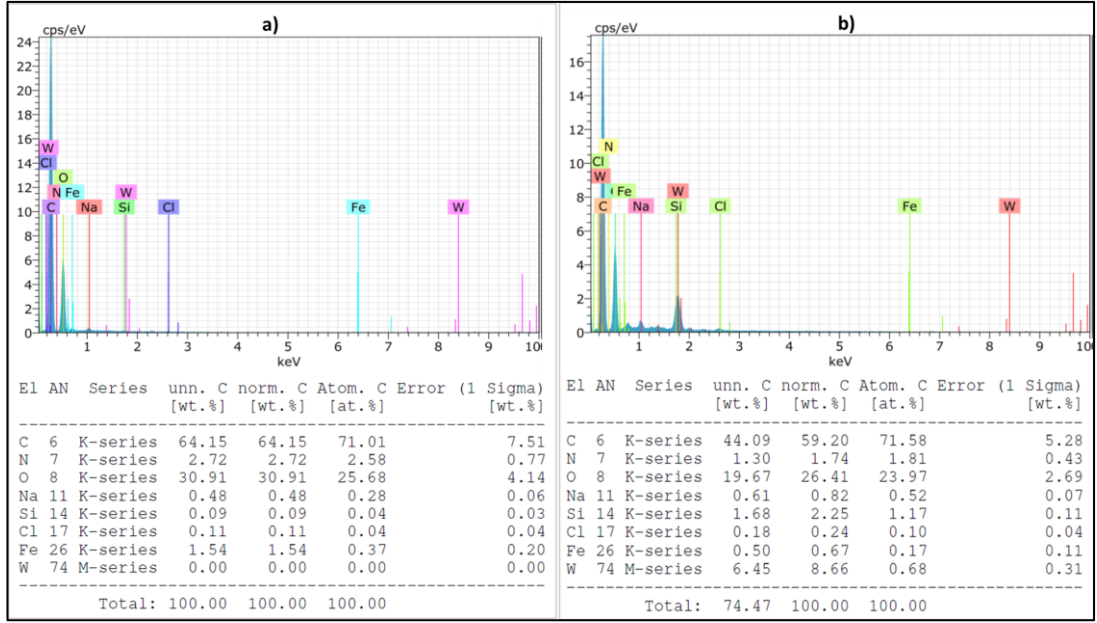
Materials	E_{corr} (mV)	Corrosion Rate (mm / year)	i_{corr} ($\mu A/cm^2$)
Uncoated Rail	-438.7	0.106	13.75
WC Coated Rail	-358.5	0.093	12.08

Korozyon sebebiyle oluşan deformasyonların analizi için potansiyodinamik test sonucunda elde edilen SEM görüntüleri Şekil 7.10'da verilmiştir. Kaplamasız numunede tungsten karbür (WC) kaplamalı numuneye göre korozyona maruz kalan alanın daha geniş olduğu görülmektedir. Literatürde perlitik yapıya sahip ray çeliklerinin diğer mikroyapılardaki ray çeliklerine kıyasla korozyon direnci yüksek olduğu belirtilmiştir [29]. Mevcut çalışmada perlitik ray çeliklerinin yüksek korozyon direncine rağmen NaCl etkisi altında malzeme yüzeyinde yoğun oksit tabakası

oluşumu görülmektedir (Şekil 7.10.b). Tungsten karbür (WC) kaplamalı numune yüzeyinde HVOF kaplama yöntemi ile her ne kadar düşük poroziteye sahip kaplama tabakaları elde edilse de porozite oluşumunun tamamen engellenmesi mümkün değildir [76,81]. Kaplama tabakasının süreksizliği sebebiyle sadece porozite bölgelerinde korozyon mekanizmalarının meydana geldiği düşünülmektedir (Şekil 7.10.d). Porozite bölgeleri haricindeki alanlarda korozif etkinin oluşmaması veya yüzeysel şekilde oluşması, tungsten karbür (WC) kaplamanın korozyon direnci ile açıklanabilir. Kaplama sayesinde malzeme yüzeyinin saflığı azaltılmakta ve bu durum korozyon direncini arttırmaktadır. Düşük saflıkta olan malzemelerde oksit tabakasının ikincil fazlarla karşılaşması sonucu süreklilik sağlanamadığı literatürde belirtilmiştir[87]. Süreksizlik sayesinde korozif etkiye maruz yüzey alanı azalmaktadır. Kaplamalı ve kaplamasız numunelerin EDX görüntülerindeki oksijen miktarları da tungsten karbür (WC) kaplamanın korozyon direncini artırarak oksit tabakası oluşumunu azalttığına yönelik iddiaları kanıtlar niteliktedir (Şekil 7.11).



Şekil 7.10. a) Kaplamasız kuru, b) Kaplamasız saf su, c) Tungsten karbür (WC) kaplamalı kuru, d) Tungsten karbür (WC) kaplamalı saf su.



Şekil 7.11. Korozyon deneyi sonrasında EDX değerleri.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR

Bu çalışmada, WC-Co kaplamanın ray çeliklerinin aşınma ve korozyon direncine etkisi araştırılmıştır. Kaplama karakterizasyonu SEM, EDX, XRD görüntülerinin analizi ve sertlik ölçümleri ile gerçekleştirilmiştir. Kaplamalı ve kaplamasız numunelerin aşınma deneyleri sonuçlarının analizi için sürtünme katsayısı ile 2D profilometre, SEM ve 3D topoğrafya görüntüleri incelenmiştir. Korozyon deneylerinden elde edilen sonuçların analizi için polarizasyon grafiğinden elde edilen korozyon potansiyeli, korozyon akım yoğunluğu ve korozyon hızı değerleri ile SEM ve EDX görüntüleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Kaplama yüzeylerinden elde edilen SEM görüntüleri incelendiğinde kaplama kalınlığının $\sim 165\mu\text{m}$ olduğu, yüzeyde minimum seviyede boşluk ve çatlak kusurlarının olduğu belirlenmiştir. EDX görüntülerine göre baskın elementler C, W ve Co olarak belirlenmiş, elemental haritalama görüntülerine göre elementlerin homojen dağıldığı sonucuna varılmıştır.
- Kaplama yüzeyi ve içerisindeki fazların belirlenmesi için yapılan XRD analizi sonucuna göre matris malzeme ile oluşan katı hal çözeltisi sonucu $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ alaşımının olduğu, WC ve W_2C fazlarının yoğun olduğu belirlenmiştir. Mikrosertlik ölçüm sonuçlarına göre WC ve W_2C fazlarının olduğu bölgelerde sırasıyla sertlik değerlerinin ~ 750 HV ve ~ 1250 HV olduğu sonucu elde edilmiştir.
- Kuru ve saf su koşullarında gerçekleştirilen aşınma deneylerinden elde edilen sürtünme katsayısı sonuçlarına göre, kaplamasız numunenin saf su ortamındaki sürtünme katsayısının kuru ortama kıyasla %23 daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu durum sıvı film tabakasının basma ve kayma gerilmelerini

azaltması ile ilişkilendirilmiştir. Kaplamasız numunenin saf su ortamındaki sürtünme katsayısı (0.023) ile kaplamalı numunenin kuru ortamdaki sürtünme katsayısı (0.023) değerlerinin eşit olduğu belirlenmiştir. Bu durum kaplama tabakasıyla artan sertliğin, saf su etkisi oluşturması ile açıklanmıştır.

- Aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin 2D profilometre görüntülerinden elde edilen sonuçlara göre kaplanmamış numune yüzeylerinde kaplanmış numunelere kıyasla belirgin aşınma çukuru olduğu görülmüştür. İlâveten, kaplanmış numunelerde aşınma izi derinliğinin maksimum 15µm derinliğine kadar ilerlediği belirlenmiş ve bu durum yüksek sertlikteki W₂C tabakasının varlığıyla açıklanmıştır.
- Aşınma deneyleri sonrası elde edilen SEM görüntülerine göre aşınma izi genişliğinin kuru koşullarda mm seviyesinde, saf su koşullarında µm seviyesinde olduğu belirlenmiştir. Saf su koşullarında kuru ortam koşullarına kıyasla daha yüzeysel abrasiv aşınma mekanizması olduğu görülmüştür. Kaplamalı numunelerde pullanma mekanizmasının olduğu fakat sertliğin artışına bağlı olarak kaplamasız numunelere kıyasla daha yüzeysel aşınma mekanizmasının olduğu sonucu elde edilmiştir. Aşınma yüzeylerinden elde edilen 3D topoğrafya görüntülerine göre kaplamasız numunelerde pürüzlülüklerin fazla olması sebebiyle kırmızı ve mavi renk tonlarının fazla olduğu, kaplamalı numunelerde deformasyonun azalması sebebiyle sarı ve yeşil renk tonlarının yoğun olduğu belirlenmiştir. 3D topoğrafya görüntülerinden elde edilen sonuçlar SEM görüntülerinden elde edilen sonuçlarla uyumluluk göstermektedir.
- Tafel yöntemiyle elde edilen polarizasyon grafiklerinden elde edilen E_{corr} , i_{corr} ve korozyon oranı değerlerine göre kaplamasız numunelerin kaplamalı numunelere kıyasla korozyon potansiyelinin daha düşük, korozyon hızının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Kaplamalı yüzeylere kıyasla kaplamasız yüzeylerin SEM görüntülerinde görülen yoğun oksit tabakası ve EDX görüntülerindeki oksijen oranları, Tafel grafiklerinden elde edilen sonuçları destekler niteliktedir.

KAYNAKLAR

1. Pan, J., Chen, L., Liu, C., Zhang, G., and Ren, R., "Relationship Between the Microstructural Evolution and Wear Behavior of U71Mn Rail Steel", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 30 (2): 1090–1098 (2021).
2. Lewis, R., Christoforou, P., Wang, W. J., Beagles, A., Burstow, M., and Lewis, S. R., "Investigation of the influence of rail hardness on the wear of rail and wheel materials under dry conditions (ICRI wear mapping project)", *Wear*, 430–431 (May): 383–392 (2019).
3. Yazici, O. and Yilmaz, S., "Investigation of effect of various processing temperatures on abrasive wear behaviour of high power diode laser treated R260 grade rail steels", *Tribology International*, 119 (November 2017): 222–229 (2018).
4. Deters, L. and Proksch, M., "Friction and wear testing of rail and wheel material", *Wear*, 258 (7–8): 981–991 (2005).
5. Hasan, S. M., Chakrabarti, D., and Singh, S. B., "Dry rolling/sliding wear behaviour of pearlitic rail and newly developed carbide-free bainitic rail steels", *Wear*, 408–409 (May): 151–159 (2018).
6. Panda, B., Balasubramaniam, R., and Moon, A., "Microstructure and mechanical properties of novel rail steels", *Materials Science And Technology*, 25 (11): 1375–1382 (2009).
7. Stock, R. and Pippan, R., "RCF and wear in theory and practice-The influence of rail grade on wear and RCF", *Wear*, 271 (1–2): 125–133 (2011).
8. Samal, S., Bhattaacharyya, A., and Mitra, S. K., "Study on Corrosion Behavior of Pearlitic Rail Steel", *Journal Of Minerals And Materials Characterization And Engineering*, 10 (07): 573–581 (2011).
9. Seo, J. W., Jun, H. K., Kwon, S. J., and Lee, D. H., "Rolling contact fatigue and wear of two different rail steels under rolling-sliding contact", *International Journal Of Fatigue*, 83: 184–194 (2016).
10. Panda, B., Balasubramaniam, R., Dwivedi, G., and Mahapatra, S., "Corrosion of novel rail steels in 3.5 % NaCl solution", *Transactions Of The Indian Institute Of Metals*, 61 (2–3): 177–181 (2008).
11. Mazzù, A., Solazzi, L., Lancini, M., Petrogalli, C., Ghidini, A., and Faccoli, M., "An experimental procedure for surface damage assessment in railway wheel and rail steels", *Wear*, 342–343: 22–32 (2015).

12. Donzella, G., Faccoli, M., Ghidini, A., Mazzù, A., and Roberti, R., "The competitive role of wear and RCF in a rail steel", *Engineering Fracture Mechanics*, 72 (2): 287–308 (2005).
13. Sahay, S. S., Mohapatra, G., and Totten, G. E., "Overview of pearlitic rail steel: Accelerated cooling, quenching, microstructure and mechanical properties", *Journal Of ASTM International*, 6 (7): (2009).
14. Shariff, S. M., Pal, T. K., Padmanabham, G., and Joshi, S. V., "Sliding wear behaviour of laser surface modified pearlitic rail steel", *Surface Engineering*, 26 (3): 199–208 (2010).
15. Maya-Johnson, S., Felipe Santa, J., and Toro, A., "Dry and lubricated wear of rail steel under rolling contact fatigue - Wear mechanisms and crack growth", *Wear*, 380–381: 240–250 (2017).
16. Lyu, Y., Zhu, Y., and Olofsson, U., "Wear between wheel and rail: A pin-on-disc study of environmental conditions and iron oxides", *Wear*, 328–329: 277–285 (2015).
17. Nikas, D., Meyer, K. A., and Ahlström, J., "Characterization of deformed pearlitic rail steel", *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 219 (1): (2017).
18. Khan, A. R., Shengfu, Y., and Wang, H., "Influence of Heat Input and Preheating on Microstructure and Mechanical Properties of Coarse Grain Heat-Affected Zone of Metal Arc Gas-Welded Pearlitic Rail Steel", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 28 (12): 7676–7686 (2019).
19. Stock, R. and Pippan, R., "Rail grade dependent damage behaviour - Characteristics and damage formation hypothesis", *Wear*, 314 (1–2): 44–50 (2014).
20. Alwahdi, F. A. M., Kapoor, A., and Franklin, F. J., "Subsurface microstructural analysis and mechanical properties of pearlitic rail steels in service", *Wear*, 302 (1–2): 1453–1460 (2013).
21. Nikas, D., Ahlström, J., and Malakizadi, A., "Mechanical properties and fatigue behaviour of railway wheel steels as influenced by mechanical and thermal loadings", *Wear*, 366–367: 407–415 (2016).
22. Çelik, A., "Demiryolu Ray ve Kusurlarını Tespit Etmek İçin Geliştirilen İki Yeni Yöntem", *Demiryolu Mühendisliği*, (12): 52–63 (2020).
23. Sevim, M. A., Çelt, A. C., Kabar, S., and Akgünlü, Ö., "Demiryollarında Raylara Uygulanan Tahribatsız Muayene Yöntemleri", *Demiryolu Mühendisliği*, (11): 60–74 (2020).
24. Kalyoncuoğlu, B., "Mantarı Sertleştirilmiş Rayların Kırılma Mekanizması ve Özelliklerinin İncelenmesi", *Karabük Üniversitesi*, (2016).

25. Altun, S., "Isıl İşlem Görmüş Ray çeliğinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", *Mersin Üniversitesi*, (2019).
26. Donzella, G., Mazzù, A., and Petrogalli, C., "Competition Between Wear and Rolling Contact Fatigue at the Wheel-Rail Interface: Some Experimental Evidence on Rail Steel", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part F: Journal Of Rail And Rapid Transit*, 223: 31–44 (2009).
27. Herian, J. and Aniolek, K., "Abrasive Wear of Railway Sections of Steel With a Different Pearlite Morphology in Railroad Switches", *Journal Of Achievements In Materials And Manufacturing Engineering*, 43 (1): 236–243 (2010).
28. Dayot, C., Saulot, A., Godeau, C., and Berthier, Y., "Tribological behaviour of Pearlitic and Bainitic steel grades under various sliding conditions", *Tribology International*, 46 (1): 128–136 (2012).
29. Katiyar, P. K., Misra, S., and Mondal, K., "Comparative Corrosion Behavior of Five Microstructures (Pearlite, Bainite, Spheroidized, Martensite, and Tempered Martensite) Made from a High Carbon Steel", *Metallurgical And Materials Transactions A: Physical Metallurgy And Materials Science*, 50: 1489–1501 (2019).
30. Gómez-Guarneros, M. A., Godínez-Salcedo, J. G., Gallardo-Hernández, E. A., Farfán-Cabrera, L. I., and Vite-Torres, M., "Corrosion Rate and Mechanisms of a Rail Head Surface Under Artificial Rainwater Conditions", *Materials Letters*, 287: 1–6 (2021).
31. Viáfara, C. C., Castro, M. I., Vélez, J. M., and Toro, A., "Unlubricated Sliding Wear of Pearlitic and Bainitic Steels", *Wear*, 259: 405–411 (2005).
32. Sharma, S., Sangal, S., and Mondal, K., "Wear behaviour of bainitic rail and wheel steels", *Materials Science And Technology*, 32 (4): 266–274 (2016).
33. Seo, J. W., Kim, J. -C, Kwon, S. J., and Jun, H. K., "Effects of Laser Cladding for Repairing and Improving Wear of Rails", *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, 20: 1207–1217 (2019).
34. Saulot, A., Descartes, S., Desmyter, D., Levy, D., and Berthier, Y., "A Tribological Characterization of the “Damage Mechanism” of Low Rail Corrugation on Sharp Curved Track", *Wear*, 260: 984–995 (2006).
35. Lewis, S. R., Fretwell-Smith, S., Goodwin, P. S., Smith, L., Lewis, R., Aslam, M., Fletcher, D. I., Murray, K., and Lambert, R., "Improving Rail Wear and RCF Performance Using Laser Cladding", *Wear*, 366–367: 268–278 (2016).
36. Guo, H. ming, Wang, Q., Wang, W. jian, Guo, J., Liu, Q. yue, and Zhu, M. hao, "Investigation on Wear and Damage Performance of Laser Cladding Co-Based Alloy on Single Wheel or Rail Material", *Wear*, 328–329: 329–337 (2015).

37. Wang, W. J., Fu, Z. K., Guo, J., Zhang, Y. Q., Liu, Q. Y., and Zhu, M. H., "Investigation on Wear Resistance and Fatigue Damage of Laser Cladding Coating on Wheel and Rail Materials under the Oil Lubrication Condition", *Tribology Transactions*, 59 (5): 810–817 (2016).
38. Fu, Z. K., Ding, H. H., Wang, W. J., Liu, Q. Y., Guo, J., and Zhu, M. H., "Investigation on Microstructure and Wear Characteristic of Laser Cladding Fe-Based Alloy on Wheel/Rail Materials", *Wear*, 330–331: 592–599 (2015).
39. Wang, W. J., Hu, J., Guo, J., Liu, Q. Y., and Zhu, M. H., "Effect of Laser Cladding on Wear and Damage Behaviors of Heavy-Haul Wheel/Rail Materials", *Wear*, 311: 130–136 (2014).
40. Clare, A. T., Oyelola, O., Abioye, T. E., and Farayibi, P. K., "Laser Cladding of Rail Steel with Co-Cr", *Surface Engineering*, 29 (10): 731–736 (2013).
41. Seo, J. W., Kim, J. –C, Kwon, S. J., and Jun, H. K., "Effects of Laser Cladding for Repairing and Improving Wear of Rails", *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, 20 (7): 1207–1217 (2019).
42. Rajinikanth, V. and Venkateswarlu, K., "An investigation of sliding wear behaviour of WCCo coating", *Tribology International*, 44 (12): 1711–1719 (2011).
43. Ma, L., Shi, L. B., Guo, J., Liu, Q. Y., and Wang, W. J., "On the wear and damage characteristics of rail material under low temperature environment condition", *Wear*, 394–395 (October 2017): 149–158 (2018).
44. Yazici, O. and Yilmaz, S., "Investigation of effect of various processing temperatures on abrasive wear behaviour of high power diode laser treated R260 grade rail steels", *Tribology International*, 119 (October 2017): 222–229 (2018).
45. Qiao, L., Wu, Y., Hong, S., Long, W., and Cheng, J., "Wet Abrasive Wear Behavior of WC-Based Cermet Coatings Prepared by HVOF Spraying", *Ceramics International*, 47: 1829–1836 (2021).
46. Zhou, L., Wang, W. J., Hu, Y., Marconi, S., Meli, E., Ding, H. H., Liu, Q. Y., Guo, J., and Rindi, A., "Study on the wear and damage behaviors of hypereutectoid rail steel in low temperature environment", *Wear*, 456–457 (May): (2020).
47. Mishra, T. K., Kumar, A., and Sinha, S. K., "Experimental investigation and study of HVOF sprayed WC-12Co, WC-10Co-4Cr and Cr₃C₂-25NiCr coating on its sliding wear behaviour", *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 94 (July 2020): 105404 (2021).
48. Thirumalaikumarasamy, D., Shanmugam, K., and Balasubramanian, V., "Comparison of the corrosion behaviour of AZ31B magnesium alloy under immersion test and potentiodynamic polarization test in NaCl solution", *Journal Of Magnesium And Alloys*, 2 (1): 36–49 (2014).

49. Gómez-Guarneros, M. A., Godínez-Salcedo, J. G., Gallardo-Hernández, E. A., Farfán-Cabrera, L. I., and Vite-Torres, M., "Corrosion rate and mechanisms of a rail head surface under artificial rainwater conditions", *Materials Letters*, 287: 10–15 (2021).
50. Turan, Ş., "Ray çeliklerine östemperleme ısıl işleminin uygulanması ve yakma alın kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin araştırılması", *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2005).
51. Kondul, B. and Cetin, M. H., "Increasing the wear resistance of railway switches with boron coating and analysis of tribological performance by ANOVA method", *Wear*, 488–489 (October 2021): 204132 (2022).
52. Kalyoncuoğlu, B., "Mantarı sertleştirilmiş rayların kırılma mekaniği özelliklerinin incelenmesi", *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2016).
53. Işık, Y., "Perlitik ray çeliklerinde yüzey pürüzlülüğünün abrasiv aşınmaya etkisi", *Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2013).
54. Kondul, B., "Borlama ile yüzeyi sertleştirilmiş ray çeliğinin aşınma davranışının incelenmesi", *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2020).
55. Yıldız, M., "Ray çeliğine uygulanan haddeme işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi", *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2018).
56. Altun, S., "Isıl işlem görmüş ray çeliğinin aşınma davranışlarının incelenmesi", *Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).
57. Şahin, Ş., "Taguchi yöntemi kullanılarak wc/co, wc/cocr hvof kaplamanın optimizasyonu ve aşınma özelliklerinin belirlenmesi", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).
58. Pehlivanoğlu, M., "Wc ve ticn kaplanmış sıcak hadde merdanelerinin kuru ve bor yağı ortamında aşınma davranışlarının incelenmesi", *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2020).
59. Terkeşli, M. H., "Aps yöntemi ile üretilen wc ve mo kaplamaların aşınma davranışlarının incelenmesi", *Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2017).
60. Zeybek, Ü., "Paslanmaz çelikler üzerine hvof yöntemi ile wc kaplamasının özelliklerinin incelenmesi", *Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2017).
61. Atabay, E. N., "Havacılık uygulamalarında krom kaplama alternatiflerinin incelenmesi", *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2011).
62. Baştan, F. E., "Termal püskürtülebilir stronsiyum iyon değişimli hidroksiapatit tozunun püskürtme kurutma ile üretilmesi ve karakterizasyonu", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2018).

63. Sağır, Ü., "Plazma sprey yöntemi ile tungsten karbür kaplanmış greyder bıçaklarının mikroyapı ve sertliklerinin incelenmesi", *Bayburt Üniversitesi*, (2019).
64. Yıldız, M., "AISI 4140 ıslah çeliğinin TiAlN kaplı frezelerle işlenmesi sırasında oluşan yüzey pürüzlülüğü ve titreşimin deneysel olarak incelenmesi", *Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, .
65. Oyman, E., "Kaplama türünün ve kesme parametrelerinin talaş şekli üzerindeki etkisinin araştırılması", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2012).
66. Ulutan, M., "AISI 4140 çeliğinin yüzey sertleştirme işlemleri ve kaplama yöntemleri sonrası mekanik davranışlarının araştırılması", *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi*, (2007).
67. Teber, M., "Yüzey kaplama ile Ti6Al4V alaşımının aşınma ve korozyon direncinin artırılması", *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2015).
68. Kosa, E., "Çeliklerin erozif-abrazif aşınmasında aşındırıcı tane büyüklüğünün aşınma direncine etkisi", *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2016).
69. Gülçelik, A. G., "Elektrolitik çinko kaplamalı plakalarda hızlandırılmış korozyon testi uygulaması", *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).
70. Aktaş, G. R., "Plazma nitrürlenmiş 17-4 ph paslanmaz çeliğin mekanik ve korozyon özelliklerinin incelenmesi", *Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2005).
71. Uyanık, M., "SiC nanopartikül ilaveli asitli çinko kaplama banyolarında yapılan kaplamaların malzemenin korozyon direnci ve mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması", *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2012).
72. Tunçay, B., "Ti-Zr-Mo alaşımlarının elektrokimyasal korozyon davranışlarının incelenmesi", *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2021).
73. Erge, H., "Kaynaklı 5086-h32 alüminyum alaşımının korozyon ve korozyonlu yorulma davranışlarına ultrasonik darbe işleminin etkisi", *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, (2021).
74. Federici, M., Menapace, C., Moscatelli, A., Gialanella, S., and Straffelini, G., "Effect of Roughness on the Wear Behavior of HVOF Coatings Dry Sliding Against a Friction Material", *Wear*, 368–369: 326–334 (2016).
75. Mishra, T. K., Kumar, A., and Sinha, S. K., "Experimental Investigation and Study of HVOF Sprayed WC-12Co, WC-10Co-4Cr and Cr3C2-25NiCr Coating on Its Sliding Wear Behaviour", *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 94: 1–15 (2021).

76. Schubert, J., Houdková, Š., Kašparová, M., and Česánek, Z., "Effect of Co Content on the Properties of HVOF Sprayed Coatings Based on Tungsten Carbide", *METAL 2013 - 22nd International Conference On Metallurgy And Materials, Conference Proceedings*, 1100–1105 (2013).
77. Basak, A. K., Celis, J. P., Vardavoulias, M., and Matteazzi, P., "Effect of Nanostructuring and Al Alloying on Friction and Wear Behaviour of Thermal Sprayed WC-Co Coatings", *Surface And Coatings Technology*, 206 (16): 3508–3516 (2012).
78. Rajinikanth, V. and Venkateswarlu, K., "An Investigation of Sliding Wear Behaviour of WC-Co Coating", *Tribology International*, 44 (12): 1711–1719 (2011).
79. Yang, Q., Senda, T., and Hirose, A., "Sliding Wear Wehavior of WC-12% Co Coatings at Elevated Temperatures", *Surface And Coatings Technology*, 200: 4208–4212 (2006).
80. Somasundaram, B., Navinesh, B. C., Jegadeeswaran, and Mamatha, M. P., "Wear Behavior of HVOF Sprayed WC-Co/NiCrAlYSi (35–65%) and WC-Co/NiCrAlYSi (80–20%) Coatings on Turbine SS316 Steel", *Materials Today: Proceedings*, 20: 103–107 (2020).
81. Xie, M., Zhang, S., and Li, M., "Comparative Investigation on HVOF Sprayed Carbide-Based Coatings", *Applied Surface Science*, 273: 799–805 (2013).
82. Sahraoui, T., Guessasma, S., Ali Jeridane, M., and Hadji, M., "HVOF Sprayed WC-Co Coatings: Microstructure, Mechanical Properties and Friction Moment Prediction", *Materials And Design*, 31 (3): 1431–1437 (2010).
83. Chivavibul, P., Watanabe, M., Kuroda, S., and Shinoda, K., "Effects of Carbide Size and Co Content on the Microstructure and Mechanical Properties of HVOF-Sprayed WC-Co Coatings", *Surface And Coatings Technology*, 202 (3): 509–521 (2007).
84. Wang, Q., Chen, Z. H., and Ding, Z. X., "Performance of Abrasive Wear of WC-12Co Coatings Sprayed by HVOF", *Tribology International*, 42 (7): 1046–1051 (2009).
85. Vashishtha, N., Khatirkar, R. K., and Sapate, S. G., "Tribological behaviour of HVOF sprayed WC-12Co, WC-10Co-4Cr and Cr₃C₂-25NiCr coatings", *Tribology International*, 105 (June 2016): 55–68 (2017).
86. Mateen, A., Saha, G. C., Khan, T. I., and Khalid, F. A., "Tribological behaviour of HVOF sprayed near-nanostructured and microstructured WC-17wt.%Co coatings", *Surface And Coatings Technology*, 206 (6): 1077–1084 (2011).
87. Jalali Azizpour, M. and Tolouei-Rad, M., "The Effect of Spraying Temperature on the Corrosion and Wear Behavior of HVOF Thermal Sprayed WC-Co Coatings", *Ceramics International*, 45 (11): 13934–13941 (2019).

88. Viesca, J. L., González-Cachón, S., García, A., González, R., and Hernández Battez, A., "Tribological behaviour of microalloyed and conventional C–Mn rail steels in a pure sliding condition", *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part F: Journal Of Rail And Rapid Transit*, 232 (9): 2201–2214 (2018).
89. Ozsarac, U. and Aslanlar, S., "Wear behaviour investigation of wheel/rail interface in water lubrication and dry friction", *Industrial Lubrication And Tribology*, 60 (2): 101–107 (2008).
90. Faccoli, M., Petrogalli, C., and Ghidini, A., "A Pin-on-Disc Study on the Wear Behaviour of Two High-Performance Railway Wheel Steels", *Tribology Letters*, 65 (4): 1–7 (2017).
91. Popov, B. N., "Corrosion Engineering: Principles and Solved Problems", Corrosion Engineering: Principles and Solved Problems, *Elsevier*, South Carolina, (2015).
92. Callister, W. D. and Rethwisch, D. G., "Materials Science and Engineering: An Introduction", Wiley, (2018).
93. Korkmaz, S., Pehlivanoglu, M., Orak, A., and Cetin, M. H., "Investigation of Wear Behavior of Carbide Based Coated Rolling Roll Materials Under Dry and Lubricated Conditions", *Surface Topography: Metrology And Properties*, 9 (1): 12–14 (2021).
94. Wang, W. J., Shen, P., Song, J. H., Guo, J., Liu, Q. Y., and Jin, X. S., "Experimental Study on Adhesion Behavior of Wheel/Rail Under Dry and Water Conditions", *Wear*, 271: 2699–2705 (2011).
95. Franklin, F. J., Weeda, G. J., Kapoor, A., and Hiensch, E. J. M., "Rolling Contact Fatigue and Wear Behaviour of the Infrastar Two-Material Rail", *Wear*, 258 (7–8): 1048–1054 (2005).
96. Liu, J. P., Zhou, Q. Y., Zhang, Y. H., Liu, F. S., Tian, C. H., Li, C., Zhi, X. Y., Li, C. G., and Shi, T., "The Formation of Martensite During the Propagation of Fatigue Cracks in Pearlitic Rail Steel", *Materials Science And Engineering A*, 747: 199–205 (2019).
97. He, X., Song, R. G., and Kong, D. J., "Microstructure and Corrosion Behaviour of Laser-Cladding Al-Ni-TiC-CeO₂ Composite Coatings on S355 Offshore Steel", *Journal Of Alloys And Compounds*, 770: 771–783 (2019).
98. Celik, E., Culha, O., Uyulgan, B., Azem, N. F. A., Ozdemir, I., and Turk, A., "Assessment of Microstructural and Mechanical Properties of HVOF Sprayed WC-Based Cermet Coatings for a Roller Cylinder", *Surface And Coatings Technology*, 200: 4320–4328 (2006).
99. Eden, H. C., Garnham, J. E., and Davis, C. L., "Influential Microstructural Changes on Rolling Contact Fatigue Crack Initiation in Pearlitic Rail Steels", *Materials Science And Technology*, 21 (6): 623–629 (2005).

100. Guilemany, J. M., Nin, J., Lorenzana, C., Miguel, J. M., and Miguel, J. R., "Tribology of Cermet/NiCrBSi Coatings Sprayed by HVOF", *Boletín De La Sociedad Española De Cerámica Y Vidrio*, 43 (2): 483–487 (2004).
101. Reyes-Mojena, Miguel Ángel Sagaro-Zamora, Roberto Carvajal Fals, Hipólito Domingo Ferraresi, V. A. and Lima, C. R. C., "Tribocorrosion Behaviour of Cemented Carbide Coatings Obtained by High Velocity Oxygen Fuel Spraying", *International Journal Of Surface Science And Engineering*, 9 (6): 561–573 (2015).

ÖZGEÇMİŞ

Abdulkadir ORAK ilk ve orta öğrenimini Ankara’da tamamladı. Selahattin Akbilek Anadolu Lisesi’nden 2013 yılında mezun oldu. 2014 yılında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Raylı Sistemler Programı’nda lisans eğitimine başlamıştır. 2019 yılında 3,07 not ortalaması ile mezun olmuştur. Aynı yıl Karabük Üniversitesi’nde Lisansüstü Eğitim Enstitü’sünde Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine başlamıştır. “Tungsten karbür Kaplanmış Perlitik Ray Çeliğinin Aşınma ve Korozyon Dayanımlarının İncelenmesi” konusu üzerine yüksek lisans tez çalışması yapmıştır.