



**17CrNiMo6 ÇELİĞİNİN PLAZMA NİTRÜRLEME SONRASI
OKSİDASYON İŞLEMİNİN AŞINMA ÜZERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yusuf ŞAHİN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Eylül 2025

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**17CrNiMo6 ÇELİĞİNİN PLAZMA NİTRÜRLEME SONRASI
OKSİDASYON İŞLEMİNİN AŞINMA ÜZERİNE ETKİSİ**

Yusuf ŞAHİN

Danışman
Dr.Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Eylül 2025

TEZ ONAY SAYFASI

Yusuf ŞAHİN tarafından hazırlanan “Tez Onay Sayfası” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 26 / 09 / 2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER

Başkan : Prof. Dr. Yusuf KAYALI
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Teknoloji Fakültesi İmza

Üye : Doç. Dr. Ali ERÇETİN
Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi,
Denizcilik Fakültesi İmza

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER
Afyon Kocatepe Üniversitesi,
Teknoloji Fakültesi İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

26 / 09 / 2025

İmza

Yusuf ŞAHİN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

17CrNiMo6 ÇELİĞİNİN PLAZMA NİTRÜRLEME SONRASI OKSİDASYON İŞLEMİNİN AŞINMA ÜZERİNE ETKİSİ

Yusuf ŞAHİN

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr.Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER

Bu çalışmada, 17CrNiMo6 çeliğinin üzerinde uygulanan 480 °C’de 20 saat süreyle %25 H₂-%75 N₂ gaz karışımında plazma nitrürleme ve ardından gerçekleştirilen 500 °C’de %25 O₂-%75 H₂, %50 O₂-%50 H₂ gaz karışımlarında 0,5, 1 ve 1,5 saat süreyle plazma oksidasyon işlemlerinin tribolojik ve mikroyapısal özelliklere etkisi araştırılmıştır. Yüzey karakterizasyonu XRD, SEM, EDS analizleri ve bilya-disk aşınma testleri ile gerçekleştirilmiştir. Mikroyapısal incelemelerde, plazma nitrürleme sonrası baskın Fe₃N fazının oluştuğunu, oksidasyonla birlikte Fe₂O₃ ve Fe₃O₄ fazlarının ortaya çıktığını göstermiştir. Mikroyapı incelemelerinde kısa süreli oksidasyonların kompakt ve homojen tabakalar oluşturduğu, uzun süreli işlemlerde ise tabaka bütünlüğünün bozulduğu belirlenmiştir. Tribolojik testlerde işlemsiz numune en yüksek aşınma değerlerini gösterirken, %25 O₂ 1h ve %50 O₂ 1h koşullarında en düşük aşınma hızları ve optimum yüzey performansı elde edilmiştir. Sertlik ölçümlerinde en yüksek değer %25 O₂ 0,5h numunesinde bulunmuş, uzun süreli oksidasyonda ise sertlik belirgin şekilde azalmıştır. Elde edilen sonuçlar, plazma nitrürleme sonrası kontrollü plazma oksidasyon uygulamalarının 17CrNiMo6 çeliğinin yüzey performansını önemli ölçüde iyileştirebildiğini göstermektedir.

2025, x + 87 sayfa

Anahtar Kelimeler: Plazma nitrürleme, Plazma oksidasyon, Aşınma, 17CrNiMo6.

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

EFFECT OF OXIDATION PROCESS AFTER PLASMA NITRIDING ON WEAR BEHAVIOR OF 17CrNiMo6 STEEL

Yusuf ŞAHİN

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Şükrü ÜLKER

In this study, the effects of plasma nitriding and subsequent plasma oxidation processes on the tribological and microstructural properties of 17CrNiMo6 steel were investigated. Plasma nitriding was performed at 480 °C for 20 hours in a gas mixture of 25% H₂-75% N₂, followed by plasma oxidation at 500 °C for 0,5, 1 and 1,5 hours in gas mixtures of 25% O₂-75% H₂ and 50% O₂-50% H₂. Surface characterization was conducted using XRD, SEM, EDS and ball-on-disk wear tests. Microstructural examinations revealed the dominant formation of the Fe₃N phase after plasma nitriding, while plasma oxidation led to the appearance of Fe₂O₃ and Fe₃O₄ phases. It was observed that short oxidation times produced compact and homogeneous oxide layers, whereas prolonged oxidation caused deterioration of layer integrity. Tribological tests indicated that the untreated specimen exhibited the highest wear values, while the specimens oxidized for 1 hour under 25% O₂ and 50% O₂ conditions achieved the lowest wear rates and optimum surface performance. Hardness measurements showed the highest value in the 25% O₂ 0,5h specimen, whereas prolonged oxidation resulted in a significant decrease in hardness. The obtained results demonstrate that controlled plasma oxidation processes following plasma nitriding can significantly improve the surface performance of 17CrNiMo6 steel.

2025, x + 87 page

Keywords: Plasma nitriding, Plasma oxidation, Wear, 17CrNiMo6.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübesiyle yol gösteren, desteğini, anlayışını ve zamanını esirgemeyen değerli tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER'e saygı ve şükranlarımı sunarım. Kendilerinin rehberliği, yapıcı yönlendirmeleri ve akademik katkıları bu çalışmanın şekillenmesinde önemli rol oynamıştır.

Hayatımın her anında sevgiyle yanımda olan, beni bugünlere getiren değerli babam Kadir ŞAHİN'e ve fedakârlıklarıyla daima arkamda duran sevgili annem İkbâl ŞAHİN'e minnettarım. Ayrıca bu zorlu süreçte sabrıyla, sevgisiyle ve sonsuz desteğiyle en büyük güç kaynağım olan değerli eşim Dilek ŞAHİN'e ve varlıklarıyla hayatıma anlam katan biricik kızlarım Nehir ŞAHİN ile Zeynep Ela ŞAHİN'e kalpten teşekkür ederim.

Yusuf ŞAHİN
Afyonkarahisar 2025

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
RESİMLER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Plazma	2
1.1.1 Plazmanın Elde Edilmesi.....	3
1.1.2 Plazmanın Özellikleri	5
1.2 Nitrürleme.....	6
1.2.1 Sıvı Nitrürleme	7
1.2.2 Gaz Nitrürleme	7
1.2.3 Plazma Nitrürleme.....	8
1.2.3.1 Plazma Nitrürleme Mekanizması ve İç Yapılar.....	10
1.2.3.2 Plazma Nitrürleme Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları.....	13
1.3 Plazma Oksidasyon İşlemi ve Sistem Mekanizması	14
1.4 Aşınma ve Aşınma Mekanizmaları	16
1.4.1 Sürtünme.....	16
1.4.2 Aşınma.....	18
1.4.2.1 Aşınmayı Etkileyen Faktörler.....	19
1.4.2.2 Aşınma Mekanizmaları.....	19
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	24
3. MATERYAL VE METOT	30
3.1 Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Numunelerin Hazırlanması.....	30
3.2 Plazma Nitrürleme İşlemi.....	30
3.3 Plazma Oksidasyon İşlemi.....	31
3.4 Aşınma Deneyi	31
3.5 Metalografik İşlemler	31
3.6 XRD Analizi.....	32

3.7 Mikrosertlik Ölçümleri	32
3.8 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDX Analizi	32
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	33
4.1 Mikro Yapısal Özellikler.....	33
4.2 XRD Analizleri ve Sonuçları.....	39
4.3 Mikro Sertlik Sonuçları.....	41
4.4 Aşınma Analizleri ve Sonuçları	42
4.5 Aşınma Bölgelerinin SEM ve EDX Analizleri	49
4.6 Aşınma ve Sürtünme Deney Sonuçları	73
5. SONUÇLAR.....	75
6. KAYNAKLAR.....	77
ÖZGEÇMİŞ	87

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al	Alüminyum
Ar	Argon
°C	Santigrat derece
Cr	Krom
E	Elektrik alan
e ⁻	Elektron
ε	Demir nitrür (Fe_2N - Fe_3N)
F	Aşınma yükü
Fe	Demir
Fs	Sistemi harekete başlatan kuvvet
H	Hidrojen
I	Anot – Katot arası uzaklık
Mo	Molibden
mm	Milimetre
μk	Kinetik sürtünme katsayısı
μm	Mikrometre
μs	Sürtünme katsayısı
N	Azot
Ni	Nikel
P	Fosfor
Q	Aktivasyon enerjisi
q	Elektron yükü
S	Kükürt
Si	Silisyum
Ti	Titanyum
U	Anot – Katot arasına uygulanan gerilim
V	Vanadyum
γ'	Demir nitrür (Fe_4N)

Kısaltmalar

AISI	American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
EDX	Enerji Dağıtıcı X ışını
HRC	Rockwel sertliği
HV	Vickers sertliği
PN	Plazma Nitrüleme
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
XRD	X-Işını kırınım ölçer
%25 O ₂ 0,5h	%25O ₂ + %75H ₂ gaz karışımında 0,5 saat plazma oksidasyon
%25 O ₂ 1h	%25O ₂ + %75H ₂ gaz karışımında 1 saat plazma oksidasyon
%25 O ₂ 1,5h	%25O ₂ + %75H ₂ gaz karışımında 1,5 saat plazma oksidasyon
%50 O ₂ 0,5h	%50O ₂ + %50H ₂ gaz karışımında 0,5 saat plazma oksidasyon
%50 O ₂ 1h	%50O ₂ + %50H ₂ gaz karışımında 1 saat plazma oksidasyon
%50 O ₂ 1,5h	%50O ₂ + %50H ₂ gaz karışımında 1,5 saat plazma oksidasyon

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Maddenin halleri.....	3
Şekil 1.2 Farklı boşalma tiplerinin voltaj-akım karakteristiği.....	4
Şekil 1.3 Plazma nitrürleme prensip şeması.....	9
Şekil 1.4 SAE 1050 çeliğiden imal edilmiş dişlilerin plazma nitrürleme fırınında işlem sırasındaki görüntüsü.....	9
Şekil 1.5 Plazma nitrürleme işleminin mekanizması.....	10
Şekil 1.6 Modifiye tabakada mikrosertlik değişimi.....	12
Şekil 1.7 Plazma nitrürleme sonrasında oluşan tabakaların şematik görüntüsü.....	13
Şekil 1.8 Plazma oksidasyon işleminin metalik malzemeler için mekanizması.....	16
Şekil 1.9 Sürtünme çeşitleri.....	17
Şekil 1.10 Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi.....	18
Şekil 1.11 Adhezif aşınmanın temel mekanizması.....	20
Şekil 1.12 İki ve üç elemanlı abrazif aşınma mekanizması.....	20
Şekil 1.13 Yorulma aşınması mekanizması.....	21
Şekil 1.14 Eroziv aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi.....	23
Şekil 4.1 Plazma nitrürlenmiş 17CrNiMo6 çeliğinin a) optik mikroskop görüntüsü, b) SEM görüntüsü, c) SEM görüntüsü üzerinde EDX çizgi analizi, d) c şeklindeki görüntünün EDX sonucu.....	33
Şekil 4.2 %25 O ₂ 0,5h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numunenin a) optik mikroskop görüntüsü, b) SEM görüntüsü, c) SEM görüntüsü üzerinde EDX çizgi analizi, d) c şeklindeki görüntünün EDX sonucu.....	34
Şekil 4.3 %25 O ₂ 1h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numunenin a) optik mikroskop görüntüsü, b) SEM görüntüsü, c) SEM görüntüsü üzerinde EDX çizgi analizi, d) c şeklindeki görüntünün EDX sonucu.....	35
Şekil 4.4 %25 O ₂ 1,5h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numunenin a) optik mikroskop görüntüsü, b) SEM görüntüsü, c) SEM görüntüsü üzerinde EDX çizgi analizi, d) c şeklindeki görüntünün EDX sonucu.....	36
Şekil 4.5 %50 O ₂ 0,5h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numunenin a) optik mikroskop görüntüsü, b) SEM görüntüsü, c) SEM görüntüsü üzerinde EDX çizgi analizi, d) c şeklindeki görüntünün EDX sonucu.....	37
Şekil 4.6 %50 O ₂ 1h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numunenin a) optik mikroskop görüntüsü, b) SEM görüntüsü, c) SEM görüntüsü üzerinde EDX çizgi analizi, d) c şeklindeki görüntünün EDX sonucu.....	38
Şekil 4.7 %50 O ₂ 1,5h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numunenin a) optik mikroskop görüntüsü, b) SEM görüntüsü, c) SEM görüntüsü üzerinde EDX çizgi analizi, d) c şeklindeki görüntünün EDX sonucu.....	39
Şekil 4.8 Plazma nitrürlenmiş (PN), %25 O ₂ 1h ve %50 O ₂ 1h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numunelere ait XRD grafikleri.....	40

Şekil 4.9 İşlemsiz 17CrNiMo6 numunesine ait sürtünme katsayısı-süre grafiği.....	42
Şekil 4.10 Plazma Nitrülenmiş (PN) numuneye ait sürtünme katsayısı-süre grafiği....	43
Şekil 4.11 %25 O ₂ 0,5h şartlarındaki numuneye ait sürtünme katsayısı-süre grafiği.....	44
Şekil 4.12 %25 O ₂ 1h şartlarındaki numuneye ait sürtünme katsayısı-süre grafiği.....	45
Şekil 4.13 %25 O ₂ 1,5h şartlarındaki numuneye ait sürtünme katsayısı-süre grafiği.....	46
Şekil 4.14 %50 O ₂ 0,5h şartlarındaki numuneye ait sürtünme katsayısı-süre grafiği.....	47
Şekil 4.15 %50 O ₂ 1h şartlarındaki numuneye ait sürtünme katsayısı-süre grafiği.....	47
Şekil 4.16 %50 O ₂ 1,5h şartlarındaki numuneye ait sürtünme katsayısı-süre grafiği.....	48
Şekil 4.17 Plazma nitrülenmiş (PN), işlemsiz ve farklı plazma oksidasyon parametrelerinin uygulandığı numunelerin aşınma hızı-sürtünme katsayısı karşılaştırmalı grafiği.....	49
Şekil 4.18 Plazma Nitrülenmiş (PN) numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.....	50
Şekil 4.19 %25 O ₂ 0,5h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.....	53
Şekil 4.20 %25 O ₂ 1h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.....	56
Şekil 4.21 %25 O ₂ 1,5h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.....	59
Şekil 4.22 %50 O ₂ 0,5h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.....	63
Şekil 4.23 %50 O ₂ 1h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.....	66
Şekil 4.24 %50 O ₂ 1,5h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.....	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 17CrNiMo6 sementasyon çeliğinin ısıtıl işlem özellikleri.....	1
Çizelge 1.2 17CrNiMo6 sementasyon çeliğinin kimyasal bileşimi.....	2
Çizelge 1.3 17CrNiMo6 sementasyon çeliğinin mekanik özellikleri.....	2
Çizelge 1.4 Ticari olarak uygulanan nitrürleme prosesleri.....	7
Çizelge 3.1 17CrNiMo6 çeliğinin kimyasal yapısı.....	30
Çizelge 4.1 Numunelerin sertlik (HV _{0.3}) ölçüm sonuçları.....	41
Çizelge 4.2 Plazma Nitrürlenmiş (PN) numunenin bölgesel element % ağırlık oranları.....	52
Çizelge 4.3 %25 O ₂ 0,5h şartlarındaki numunenin bölgesel element % ağırlık oranları.....	55
Çizelge 4.4 %25 O ₂ 1h şartlarındaki numunenin bölgesel element % ağırlık oranları...	58
Çizelge 4.5 %25 O ₂ 1,5h şartlarındaki numunenin bölgesel element % ağırlık oranları.....	62
Çizelge 4.6 %50 O ₂ 0,5h şartlarındaki numunenin bölgesel element % ağırlık oranları.....	65
Çizelge 4.7 %50 O ₂ 1h şartlarındaki numunenin bölgesel element % ağırlık oranları...	68
Çizelge 4.8 %50 O ₂ 1,5h şartlarındaki numunenin bölgesel element % ağırlık oranları.....	72
Çizelge 4.9 Aşınma derinliği ve alanı sonuçları.....	74

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 3.1 Ø30 mm 17CrNiMo6 sementasyon çeliği.	30
--	----



1. GİRİŞ

Son yıllarda sanayide kullanılmaya başlanan plazma nitrüleme yöntemi azot difüzyonu sonucu yüzeyde nitrür fazlarının oluşmasıyla malzemenin tribolojik performansını iyileştiren klasik nitrüleme yöntemiyle benzer işlevsellik göstermektedir. Bu yöntemin temel prensibi azot gazı ya da azot içeren gaz karışımlarının yüksek voltajlı doğru akım uygulanarak iyonlaştırılması ve bunun sonucunda gerçekleşen termokimyasal bir yüzey modifikasyon sürecidir. Nitrür fazlarının oluşabilmesi için gerekli aktivasyon enerjisi, fırın duvarı ile iş parçası arasında oluşan yüksek gerilim farkı sayesinde azot iyonlarının ivmelenerek malzeme yüzeyine çarpması yoluyla sağlanmaktadır. Plazma nitrüleme diğer yüzey sertleştirme tekniklerine kıyasla daha yeni bir yöntem olup son yıllarda birçok endüstriyel uygulamada yaygın şekilde tercih edilmektedir. Bu yaygınlığın başlıca nedeni geleneksel yüzey sertleştirme yöntemlerine göre daha üstün nitelikler sunmasıdır. Bu nitelikler arasında en dikkat çekici olanı ise yalnızca malzemenin ısıtılmasıyla benzer yüzey sertliklerinin elde edilebilmesine rağmen işlem süresinin oldukça kısa olması sayesinde sağladığı önemli düzeyde enerji verimliliğidir (Ayaz 2023).

Yüzey sertleştirme uygulamalarından biri olan sementasyon işlemi, %0,1-0,25 oranında karbon içeren alaşımlı veya alaşımsız çeliklere uygulanmaktadır. Yüzeyin karbon ile zenginleştirilmesinin ardından gerçekleştirilen sertleştirme işlemi sayesinde, kullanım amacına uygun özelliklere sahip malzemelerin üretimi sağlanabilmektedir (Özsaraç vd. 2001). Sanayi sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu kullanım alanları arasında miller, dişliler, pervaneler, eksantrik miller, rulman yatakları, krank milleri ve benzeri yüksek yüzey dayanımı gerektiren parçalar bulunmaktadır (Şen 2023). 17CrNiMo6 sementasyon çeliğinin ısıtılma özellikleri Çizelge 1.1’ de verilmiştir.

Çizelge 1.1 17CrNiMo6 sementasyon çeliğinin ısıtılma özellikleri (Şen 2023).

Malzeme No	DIN Normu	SAE-AISI	Sıcak Şekil. Sıcaklığı (°C)	Yumuşak Tavlama Sıcaklığı (°C)	Sementasyon Sıcaklığı (°C)	Çekirdek Sertleş. Sıcaklığı (°C)	Ara Tavlama Sıcaklığı (°C)
1.6587	17CrNiMo6	-	1150-850	670-700	900-950	840-870	630-650

17CrNiMo6 sementasyon çeliği, sertleştirme ve menevişleme işlemleriyle bilinir. Bu süreçte çeliğe yüksek sıcaklıkta ısıtılma işlemi uygulanır. Bu işlem çelik yüzeyindeki karbon miktarının artırılmasıyla yüzeyin sertleşmesini sağlar ve böylece daha yüksek bir yüzey sertliği elde edilir. Sementasyon çelikleri, yüksek mukavemetleri ve aşınmaya karşı üstün dirençleriyle bilinir. Uygulanan işlemler sonucunda çeliğin yüzeyi sertleşir ve aşınma dayanımı önemli ölçüde yükselir (Şen 2023). Çizelge 1.2’de 17CrNiMo6 sementasyon çeliğinin kimyasal bileşimi, Çizelge 1.3’de ise mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1.2 17CrNiMo6 sementasyon çeliğinin kimyasal bileşimi (Şen 2023).

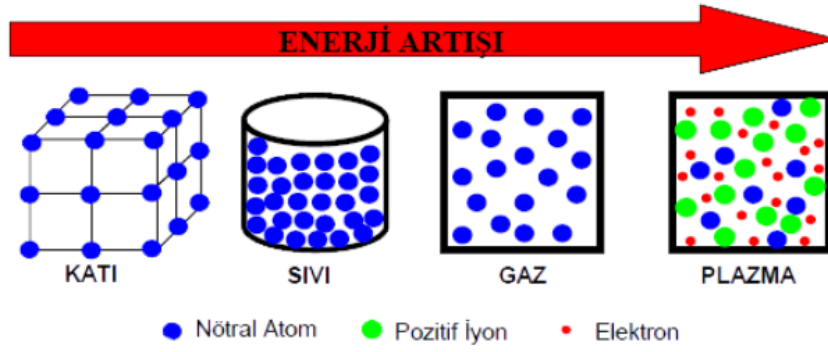
Malzeme No	DIN Normu	SAE-AISI	C	Si	Mn	P max	S max	Cr	Mo	Ni
1.6587	17CrNiMo6	-	0.14-0.21	0.04	0.50-0.90	0.035	0.035	1.50-1.80	0.25-0.35	1.40-1.70

Çizelge 1.3 17CrNiMo6 sementasyon çeliğinin mekanik özellikleri (İnt.Kyn.1).

Kalite	Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Uzama	Kesit Daralma	Darbe Enerjisi
	Ø30	Ø30	Ø30	Ø30	Ø30
	N/mm ²	N/mm ²	%	%	joule
17CrNiMo6	835	1180-1420	7	30	41

1.1 Plazma

Maddenin kendine özgü nitelikleri bulunan katı, sıvı, gaz ve plazma olmak üzere dört farklı hali mevcuttur. Bu haller arasındaki temel fark sahip oldukları enerji seviyeleridir. Başka bir deyişle bir maddenin enerji miktarını değiştirerek onu farklı bir hale dönüştürmek mümkündür. Örneğin katı halde bulunan bir maddeye belirli bir enerji uygulanarak sıvı hale, sıvı fazına ek enerji verilerek gaz hale ve gaz fazına yeterli miktarda enerji aktararak plazma haline getirmek mümkündür (Şekil 1.1). Aynı şekilde bu süreç tersine çevrilebilir; yani verilen enerjinin geri çekilmesiyle plazmadan gaz, gazdan sıvı ve sıvıdan tekrar katı hale dönüş sağlanabilir (Denktaş 2009).



Şekil 1.1 Maddenin halleri (Ayaz 2023).

Bazı moleküller enerji alarak kendi atomlarına ayrışabilir. Başka bir deyişle yüksek enerjili ve eşleşmemiş elektronlar ait oldukları molekül ya da atomlardan ayrılabilir. Bu tür eşleşmemiş elektronlar “radikal” olarak adlandırılır. Radikaller son yörüngelerinde oldukça reaktif bir yapıdadır. Bu bahsedilen radikaller aşındırma ve kimyasal buhar biriktirme süreçleri açısından büyük önem taşır. Moleküllere yeterli miktarda enerji aktarıldığında bazı atomlar veya moleküllerin dış yörüngelerinden koparak gaz fazındaki iyonlaşma süreci başlar. Bu olay maddeyi uyararak iyonizasyon ve ayrışma mekanizmalarının devreye girmesine neden olur ve böylece maddenin dördüncü hali olan plazma meydana gelir (Akan 2006).

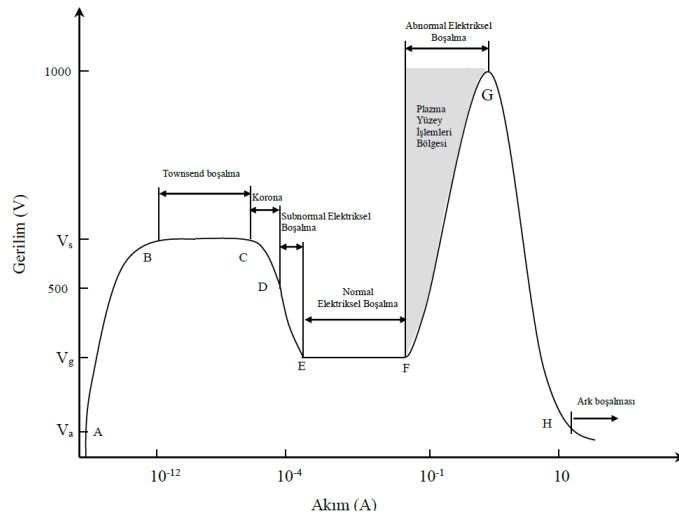
1.1.1 Plazmanın Elde Edilmesi

Plazma oluşturma yöntemleri; ısı enerjisi sağlanarak, elektrik boşalması ile ve ışın kullanılarak plazma üretme olarak sınıflandırılabilir. Bu yöntemler arasında en etkili ve en yaygın kullanılan yöntem elektrik boşalması yoluyla plazma üretimidir. Elektrik boşalması normalde elektrik akımını iletmeyen bir malzeme üzerinden elektrik akışının sağlanmasıdır. Böyle bir deşarj sürecinde iyonize olmuş bir gaz veya buhar plazmasındaki elektronlar aracılığıyla akım iki elektrot arasında taşınır. Elektronlar hareketli atomlar ve iyonlarla gerçekleşen çarpışmalar nedeniyle belirli bir hareket kısıtlamasına uğrar. Plazmanın sürekliliğini sağlamak açısından kritik olan bu çarpışmaların bazıları atomları iyonize edebilir. Yüklü parçacıkların ve onların hareketlerinin ortak etkisi, elektriksel ve manyetik alanların oluşmasına neden olabilir. Bu alanlar da plazma parçacıklarının hareketini ve yoğunluğunu etkileyebilir. Sonuç olarak negatif ve pozitif yüklerin

dengesizliğinden kaynaklanan bu etkileşim plazmayı nötr hale getirme eğiliminde olan bir elektrik alanının oluşmasına yol açar ve plazmanın nötralitesini korumasını sağlar (Soylu 2006).

Elektriksel boşalma süreçlerinde plazmanın elektrotlar ve odacık duvarlarıyla olan etkileşimi büyük bir rol oynar. Sınır katmanları ya da kılıflar elektrotlardan geçen akımı düzenler ve plazmada oluşan elektrik alanından çok daha yüksek bir elektrik alanının oluşmasına aracılık eder. Nötr metal atomları saçılma veya buharlaşma yoluyla elektrotlardan ya da odacık duvarlarından yayılabilir. Ayrıca plazmaya dayalı termokimyasal işlemler genellikle yüksek güç seviyelerinde gerçekleşir ve bu süreçler olağan dışı, kararsız ve yoğun akıma sahip elektriksel boşalma bölgelerinde meydana gelir (Edenhofer 1974).

Plazma ile oksidasyon işlemi abnormal elektriksel boşalma bölgesinde gerçekleşir. Gazın molekül ve atomlarının iyonizasyonu, sisteme uygulanan potansiyel fark sayesinde meydana gelir ve bu sayede elektriksel boşalma olgusu ortaya çıkar. Bu süreçte dikkat edilmesi gereken en önemli nokta uygulanan gücün belirli bir eşik değeri olan G noktasını aşmamasıdır. Eğer G noktası aşılsa ark boşalması oluşarak malzemenin zarar görmesine yol açabilir (Edenhofer 1974). Farklı boşalma tiplerinin voltaj-akım karakteristiği Şekil 1.2’de gösterilmiştir.



Şekil 1.2 Farklı boşalma tiplerinin voltaj-akım karakteristiği (Edenhofer 1974).

Bir elektrik arkında üreticinin pozitif (+) kutbuna bağlı iletken anot, negatif (-) kutbuna

bağlı iletken ise katot olarak adlandırılır. Bu iki kutup arasına uygulanan gerilim sonucunda anot ile katot arasında

$$E = \frac{U}{l} \quad (1.1)$$

ile ifade edilen bir elektrik alanı oluşur. Bu elektrik alanı ark içindeki yüklü parçacıklara

$$F = Q.e \quad (1.2)$$

formülüyle belirtilen bir kuvvet uygular. Bu kuvvet tek yüklü iyonlar için

$$F_{iyon} = q.E \quad (1.3)$$

elektronlar için ise

$$F_e = -q.E \quad (1.4)$$

şeklinde tanımlanabilir. Uygulanan kuvvetin etkisiyle elektronlar katottan anota doğru, iyonlar ise anottan katoda doğru hareket eder. Elektronlar kütle ile hız arasındaki ters orantı nedeniyle iyonlara kıyasla çok daha hızlı ilerler. Bunun temel sebebi elektronların hem kütle hem de hacim açısından iyonlara göre çok daha küçük olmasıdır (Çelik 2014).

1.1.2 Plazmanın Özellikleri

- Plazmada pozitif ve negatif yüklü parçacıkların sayısı birbirine eşittir, bu da plazmanın dış etkenlere karşı elektriksel olarak nötr olmasını sağlar.
- Plazma rotasyon eksenel simetriye sahip bir form sergiler. Bu simetrik yapının kaynağı katottan çıkarak anoda ulaşan ve sürekliliğini koruyan plazma akışıdır.
- Plazma içinde disosiyasyon (ayrışma), iyonizasyon ve bunların tersi olan rekombinasyon süreçleri sürekli olarak gerçekleşir. Bu süreçler plazma içerisinde birbirleriyle etkileşim halinde olup dinamik bir denge oluşturur.
- Plazmadaki atomlar yüksek ısı ve elektrik iletkenliğine sahiptir ve aynı zamanda enerji taşıyıcılarıdır.

- Plazma, manyetik ve elektrik alanlar tarafından etkilenebilir.
- Plazmaya termik ve manyetik sıkıştırma uygulamak plazmanın sıcaklığını ve enerji yoğunluğunu artırır (Boyarbay 2007).

1.2 Nitrürleme

Nitrürleme, malzemelerin aşınma direncini ve korozyona karşı dayanıklılığını artırmanın yanı sıra yüksek yüzey sertliği kazandıran bir termokimyasal ısıtma işlemi yöntemidir. Genellikle azot elementi ile nitrür bileşikler oluşturabilen düşük ve orta karbonlu çeliklere uygulanan bir yüzey sertleştirme tekniğidir. Nitrürleme sürecinde çeliğin yüzeyine difüzyon yoluyla azot nüfuz ettirilerek malzemenin yüzey özellikleri iyileştirilebilir (Stephen 1991).

Nitrürleme işleminin temel avantajı, ferritten östenite ve östenitten martensite geçişte faz dönüşümüne ihtiyaç duymamasıdır. Başka bir ifadeyle çelik işlem boyunca ferrit fazında (veya alaşım bileşimine bağlı olarak sementit fazında) kalır. Bu durumda ferritin (hacim merkezli kübik veya yüzey merkezli kübik) kristal yapısı değişmez ve karbürleme gibi geleneksel yüzey sertleştirme yöntemlerinde görülen östenit fazına (yüzey merkezli kübik kafes yapısı) dönüşüm yaşanmaz. Ayrıca işlem sırasında hızlı bir soğuma yerine yalnızca serbest soğuma gerçekleşir ve bunun sonucunda östenitten martensite dönüşüm meydana gelmez (Pye 2003).

Günümüzde nitrürleme teknolojisi uygulama yöntemine göre genel olarak aşağıdaki gibidir.

- Sıvı nitrürleme
- Gaz nitrürleme
- Plazma nitrürleme

Bu yöntemler çelik yüzeyine azot taşınma mekanizmasına göre birbirinden ayrılmaktadır (Korkmaz 2020). Ticari olarak uygulanan nitrürleme prosesleri Çizelge 1.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 1.4 Ticari olarak uygulanan nitrürleme prosesleri (Erözek 2014).

Nitrürleme						
Proses Türü	Sertleşme Mekanizması	Proses Sıcaklığı (°C)	Sertlik Derinliği	Sertlik (HRC)	Uygulandığı Çelikler	Özellikler
Gaz	Yayındırılmış N, N bileşikleri	480-590	12µm-0.75 mm	50-70	Alaşımli çelik, nitrürlenebilir çelik, paslanmaz çelik	En yüksek sertlik nitrürlenebilir çelikten elde edilir, su vermek gerekli değil, düşük çarpılma, proses yavaş, yığın prosesi
Sıvı	Yayındırılmış N, N bileşikleri	510-565	2.5µm-0.75 mm	50-70	Ferro metallerin büyük çoğunluğu, dökme demir	İnce sert yüzeyler için (<25 µm) ideal, bileşik tabakası yok, genellikle kullanıcıya özel proses
Plazma	Yayındırılmış N, N bileşikleri	340-565	75µm-0.75 mm	50-70	Alaşımli çelik, nitrürlenebilir çelik, paslanmaz çelik	Gaz nitrürlemeden hızlı, bileşik tabakası yok, ekipman maliyeti yüksek, yüzey sertliğinin kontrolü

1.2.1 Sıvı Nitrürleme

Sıvı nitrürleme işlemi eritilmiş bir tuz banyosu içinde gerçekleştirilir. Karbonlu çelikler, düşük alaşımlı çelikler, takım çelikleri, paslanmaz çelikler ve dökme demirler için uygulanabilir. Yüzey sertleştirme işlemi azot içeren siyanür veya siyanat bazlı bir tuz banyosu ortamında yapılır. İşlem sırasında iş parçasının boyutsal kararlılığı belirli bir ölçüde korunabilir, bu da işlenmesi tamamlanmış parçaların nitrürlenmesine olanak tanır (Yang 2012).

1.2.2. Gaz Nitrürleme

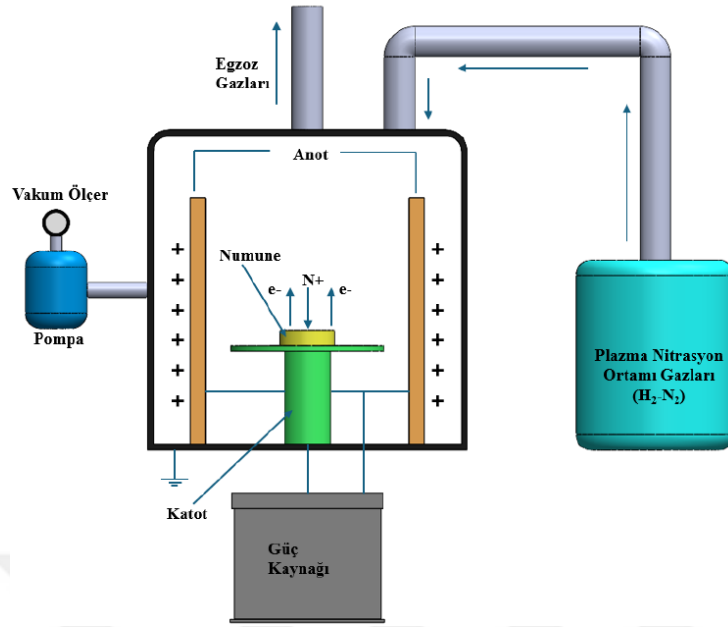
Gaz nitrürleme işlemi 490-560 °C sıcaklık aralığında ve 100 saate kadar sürebilen bir işlemdir. Bu yöntemde, proseste kullanılan amonyak gazı parçalanarak atomik halde azot açığa çıkar ve oluşan yüksek sıcaklık sayesinde bu azot işlenen malzemenin yüzeyine difüze olur. Malzemedeki azot miktarı, sıcaklık ve işlem süresi parametreleri doğrultusunda sürekli olarak kontrol edilir. Difüzyon süreci sırasında azot malzemenin

kimyasal bileşiminde nitrür oluşturan alaşım elementleri ile etkileşime girerek nitrür çökeltilerinin oluşmasına neden olur. İşlem sonucunda yüzeyde bir nitrür tabakası meydana gelir. Malzeme yüzeyinde oluşan ve "beyaz tabaka" olarak da adlandırılan demir nitrür tabakası, nitrürleme işlemiyle birlikte ortaya çıkar ve malzemenin aşınma direncini artırarak korozyona karşı daha dayanıklı hale gelmesini sağlar. Çekirdek ile beyaz tabaka arasında yer alan ve yoğun nitrür çökeltileri içeren bölge ise difüzyon tabakası olarak adlandırılır. Difüzyon tabakası malzemenin aşınma direncini iyileştirirken aynı zamanda yorulma dayanımını da artırır (Ayaz 2023).

1.2.3 Plazma Nitrürleme

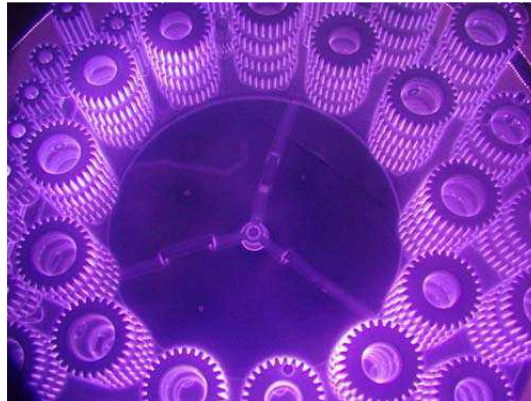
Plazma nitrürleme, belirli sıcaklık ve sürelerde malzeme yüzeyine azotun difüzyonuyla gerçekleştirilen bir termokimyasal yüzey sertleştirme yöntemidir. Elde edilen yüzey sertliği ve nitrürleme tabakasının kalınlığı; işlem süresi, sıcaklık, gaz bileşimi ve malzemenin kimyasal yapısına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Çelik malzemeler nitrürleme işlemine tabi tutulduğunda azot malzeme içinde yayılarak bileşiminde bulunan Al, Cr, Fe gibi elementlerle reaksiyona girerek bir nitrür tabakası oluşturur. Yüzey sertliği ise ince şekilde yayılan nitrürlerin kristal yapıya yerleşmesi sonucu matriste oluşan artık gerilmelerin dislokasyon hareketlerini kısıtlamasıyla meydana gelmektedir (Edenhofer 1974, Yıldız 2005).

Plazma nitrürleme yöntemi malzeme yüzeyine iyonize azotun difüzyonunu sağlamak için elektriksel boşalma (glow discharge) koşullarında aktif ve reaktif plazma kullanılmasıyla diğer nitrürleme tekniklerinden ayrılmamaktadır. Bu yöntemde işlem ortamında genellikle N_2 veya NH_3 gazları kullanılırken, H_2 , Ar gibi yardımcı gazlar da eklenerek yaklaşık 350-590°C sıcaklık aralığında nitrürleme işlemi gerçekleştirilir. Nitrürlenecek malzemenin bileşiminde Al, Cr, Mo, Ti ve V gibi alaşım elementlerinin bulunması yüzey sertliğinin daha da artmasına katkı sağlayacaktır (Ayaz 2023). Plazma nitrürleme prensip şeması Şekil 1.3’de gösterilmiştir.



Şekil 1.3 Plazma nitrürleme prensip şeması (Karamanlı 2024).

Plazma nitrürleme sürecini etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. Bunlar; nitrürleme gaz bileşimi, işlem sıcaklığı, süre, ortam basıncı ve plazma gücü şeklinde sıralanabilir. Plazma nitrürleme işleminde genellikle %25 N₂-%75 H₂ oranında bir gaz karışımı tercih edilmektedir. Karışımdaki azot oranı %50 seviyesine çıkarıldığında nitrürleme hızı da artış göstermektedir. Ancak azot miktarının aşırı yükselmesi bileşik tabakanın kalınlığının artmasına yol açabilmektedir. Plazma nitrürleme sıcaklığı özellikle difüzyon derinliği üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Uygulama sıcaklığı genellikle 350-580 °C arasında değişmektedir. Alaşımlı çeliklerde bu sıcaklık karbon çeliklerine kıyasla daha düşük seviyelerde tutulmaktadır (Karamanlı 2024).

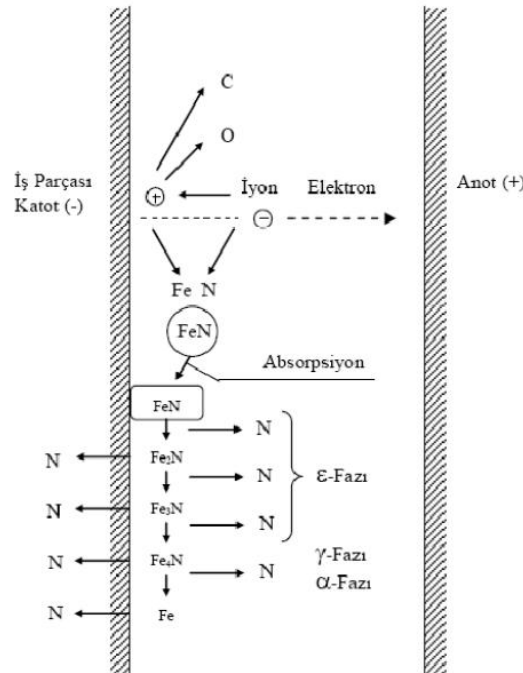


Şekil 1.4 SAE 1050 çeliğinden imal edilmiş dişlilerin plazma nitrürleme fırınında işlem sırasındaki görüntüsü (Topçu 2010).

1.2.3.1 Plazma Nitrürleme Mekanizması ve İç Yapılar

Elektriksel boşalma koşulları altında azot gazı iyonize olur ve ortaya çıkan azot iyonları elektrostatik alanın etkisiyle hızlanarak katoda bağlı iş parçasının yüzeyine çarpar. Yüzeye ulaşan iyonlar temas noktasında yüksek sıcaklıklar oluşturarak malzemenin yüzeyinde buharlaşmaya neden olur. Bunun sonucunda iş parçası yüzeyindeki demir ve diğer alaşım elementleri, metalik olmayan element atomları (karbon, oksijen, azot) ile elektronlar yüzeyden uzaklaşır. Bu duruma saçılma denir (Ayaz 2023).

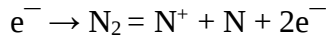
Yüzeye ulaşan iyonların yalnızca küçük bir kısmı iş parçasına nüfuz ederek doğrudan implantasyon gerçekleştirir. Ancak büyük bir bölümü saçılma sürecine katkı sağlar. Saçılan demir atomları yüksek enerjili azot atomlarıyla etkileşime girerek yüzeyde FeN bileşiği oluşturur ve metal yüzeyinde birikir. Ancak FeN sıcak metal yüzeyinde kararlı değildir ve zamanla daha kararlı nitrür bileşiklerine (Fe_2N , Fe_3N , Fe_4N) dönüşür (Şekil 1.5). Dönüşüm sürecinde açığa çıkan serbest azot atomları ya metale difüze olur ya da plazma ortamına geri döner. Saçılma ve birikim süreçleri büyük ölçüde kullanılan gaz türüne bağlıdır. Bunun yanı sıra basınç ve voltaj gibi diğer işlem parametrelerinin ayarlanması da bu süreçler üzerinde belirleyici bir rol oynar (Şengül 2011).



Şekil 1.5 Plazma nitrürleme işleminin mekanizması (Edenhofer 1974).

İyon nitrürleme sürecinin temel reaksiyon mekanizması daha önce açıklandığı gibi, saçılan demir atomlarının gaz halindeki atomik azot ile etkileşime girmesiyle başlar. Bunun sonucunda Şekil 1.5’de şematik olarak gösterildiği gibi serbest azot atomları ortaya çıkar ve kararsız FeN bileşiği oluşur. Bu süreç dört temel aşamada gerçekleşmektedir.

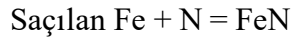
1.Aşama: Azot atomlarının iyonizasyonu



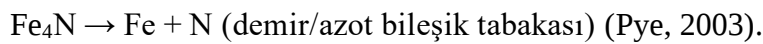
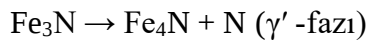
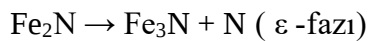
2. Aşama: Saçılma olarak bilinen süreç, iş parçası yüzeyindeki yabancı maddelerin uzaklaştırılmasını sağlar. Oluşan kirlilik vakum pompası yardımıyla sistemden tahliye edilir ve iyonize azot tarafından Fe atomlarının saçılması



3.Aşama: Saçılan Fe atomlarının iş parçası yüzeyine çarpmasıyla nitrür tabakasının oluşumu sağlanır. Bu aşamada atomların yüzeye etkisiyle gerçekleşen hassas yüzey temizleme işlemi, atomik düzeyde bilyalı dövme olarak da adlandırılabilir.



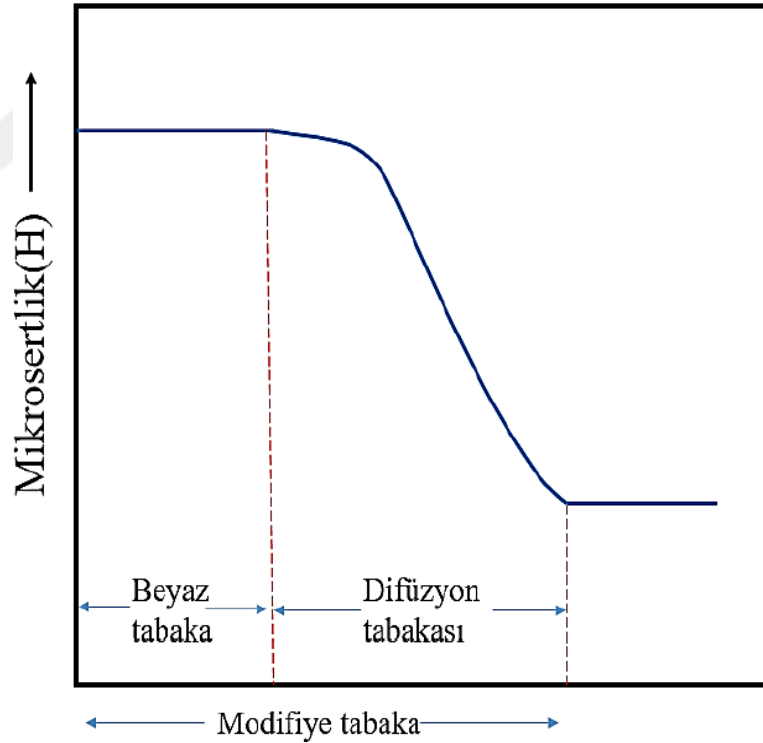
4.Aşama: Katot yüzeyi sürekli plazma bombardımanı altında FeN bileşiğini oluşturmaya başlar. Plazma başlangıçta ϵ fazına dönüşerek süreci başlatır ardından γ' fazının meydana gelmesini sağlar ve nihayetinde demir/azot bileşik tabakasının oluşumuna yol açar. Bu süreç, FeN’in kararsız hale gelmesine neden olur (Şekil 1.5).



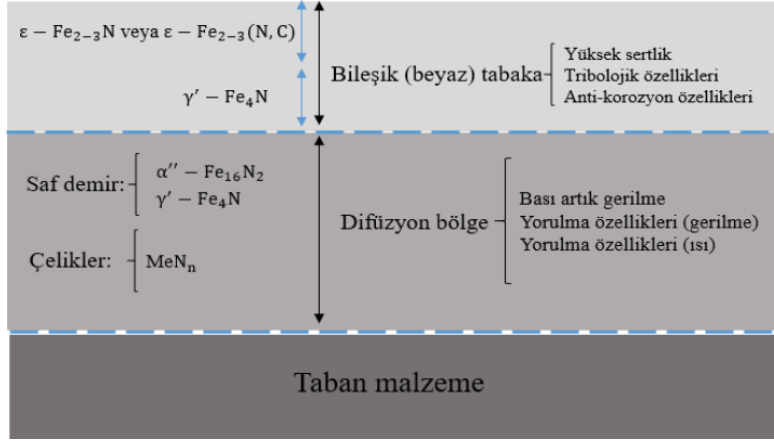
Genellikle azot oranı %5’in altında olan temel gaz karışımlarında beyaz tabaka oluşumu gözlenmez. Bu tür karışımlarda demir nitrürlerin beyaz tabakası meydana gelmez. Parça

yüzeyi krom, molibden, alüminyum, vanadyum ve titanyum gibi alaşım elementlerinin nitrür çökeltilerinin oluşturduğu bir difüzyon tabakasıdır. Genellikle %15-30 azot içeren temel gaz karışımlarında γ' fazı ortaya çıkar. Bu karışım ağırlıklı olarak ince bir tek fazlı γ' kristal (Fe_4N) bileşik tabakasından oluşur. Yaklaşık %60-70 azot, %1-3 metan içeren temel gaz karışımları ise genellikle ϵ fazının oluşmasına yol açar. Bu karışım çoğunlukla tek fazlı ϵ kristal yapıyı (Fe_{2-3}N) oluşturur. Parçanın fırında kalma süresi arttıkça beyaz tabaka daha kalın hale gelir ve difüzyon tabakasının derinliği artar. Daha yüksek sıcaklıklar, daha kısa sürede daha kalın bir beyaz tabaka oluşmasına sebep olur (Başaran 2007).

Şekil 1.6'da mikrosertlik ve modifiye tabaka arasındaki ilişki gösterilmiştir (O'Brien ve Goodman 1991, Yılan 2022). Ayrıca Şekil 1.7'de plazma nitrüleme sonrasında oluşan tabakaların şematik görünümü verilmiştir (Andersson 2018).



Şekil 1.6 Modifiye tabakada mikrosertlik değişimi (O'Brien ve Goodman 1991, Yılan 2022).



Şekil 1.7 Plazma nitrürleme sonrasında oluşan tabakaların şematik görüntüsü (Andersson 2018).

1.2.3.2 Plazma Nitrürleme Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Plazma nitrürleme, geleneksel gaz ve sıvı nitrürleme yöntemlerine kıyasla sunduğu önemli avantajlar nedeniyle endüstride giderek daha fazla tercih edilmektedir. Bu yöntemin metalurjik, teknik, ekonomik ve çevresel faktörler açısından üstünlükleri bulunmaktadır. Bunlar;

- Parçayı tamamen saran parlak deşarj (glow discharge) sayesinde iş parçasının uniform bir şekilde plazma nitrülenmesi sağlanabilmektedir.
- Bağımsız ve çeşitli işlem parametrelerinin rahatlıkla kontrol edilebilmesi sayesinde tek fazlı ve son derece hassas bir bileşik tabaka içeren yüzey elde etmek mümkün hale gelmektedir.
- İşlem parametrelerinden bağımsız olması sebebiyle plazma nitrürleme 350°C ile 1000°C arasındaki geniş sıcaklık aralıklarında uygulanabilmektedir.
- Zorunlu ısıtma ve soğutma süreçleri sayesinde iş parçası yüzeyinde eşit sıcaklık dağılımı sağlanabilmektedir.
- Saçılma mekanizmasının denetlenebilmesi sayesinde yüksek düzeyde boyutsal stabilite elde edilir.
- Mekanik maskeleme tekniği uygulanarak numunenin belirlenen bölgesi nitrürlenebilir.
- Derin delikler, kanallar ve yivler kolaylıkla nitrürleme işlemine tabi tutulabilir.
- Yaklaşık %50 oranında zaman tasarrufu elde edilebilir.

- Düşük basınçlarda işlem yapıldığı için gaz nitrürlemeye kıyasla gaz tüketimi %95 oranında daha düşüktür.
- İşlem sırasında yalnızca parça ısındığı için büyük oranda enerji tasarrufu sağlanır. Diğer yöntemlerin aksine işlem fırınının tamamını ısıtmaya gerek duyulmaz. Bu da üretim maliyetinin %52 oranında daha düşük olmasını sağlar.
- İşlem fırınının içinde hareketli parça bulunmadığı için bakım maliyetleri düşüktür.
- Kullanılan gazlar korozyon oluşturmaz.

Tüm bu avantajlarına rağmen dezavantajları oldukça sınırlıdır. Bunlar ise;

- İlk yatırım maliyeti yüksektir.
- Benzer boyutlara sahip parçaların nitrürlenmesi mümkündür fakat farklı boyutlardaki parçaların nitrürlenmesi mümkün değildir.

Yöntemin avantajlarının dezavantajlarına göre çok daha fazla olduğu görülmektedir. Kontrol edilebilirliği sayesinde termokimyasal yöntemlere göre daha üstün olduğu açıktır (Gerçekçioğlu 1998).

1.3 Plazma Oksidasyon İşlemi ve Sistem Mekanizması

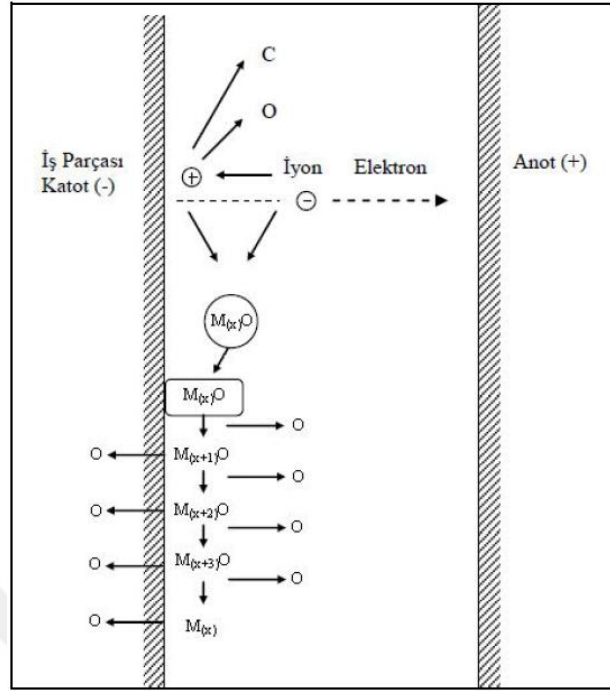
Oksidasyon işlemi, difüzyon temeline dayanan bir termokimyasal işlem olarak tanımlanabilir. Malzeme yüzeyindeki değişiklik ısı destekli difüzyon yoluyla atomların taşınmasıyla sağlanır ve bu süreçte katı hal işlemlerinin iki türü ortaya çıkar. Bunlar termokimyasal işlemler olarak bilinir. İlk türde yüzeye gönderilen küçük atom çaplarının difüzyonuyla ana malzeme üzerinde arayer katı çözelti oluşur ve bu durumda bazen çok ince çökelti şeklinde kimyasal bileşikler meydana gelir. Karbürizasyon ve karbonitrürleme bu tür işleme örnek olarak verilebilir. İkinci türde ise ana malzeme atomları ile difüzyona uğrayan atomlar arasında kimyasal reaksiyonlar gerçekleşir ve bu da yüzeyde farklı bir tabakanın oluşmasına yol açar. Bu tür işleme nitrürleme, nitrokarbürleme, borlama ve oksidasyon örnek olarak verilebilir (Aslan 2011).

Plazma oksidasyon işlemi atmosferdeki havanın ortamdan çıkarılıp yerine oksijen

bakımından zengin bir gaz ya da gaz karışımının verilmesiyle yapılır. Oksijen plazması pozitif ve negatif iyonlar, ozon, yarı kararlı atomlar ile atomik ve moleküler oksijen içerir. Elektron-molekül reaksiyonları elektriksel boşalma ile iyonizasyon ve ayrışma süreçleriyle bağlantılıdır (Knight vd. 1992).

Oksit filminin yüzeye tutunma derecesi oksidasyon sıcaklığına bağlıdır. Oksidasyon sıcaklığı oluşan oksit filminin morfolojisi üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Yoğun ve iyi tutunan bir oksit filmi elde edebilmek için oksidasyon sıcaklığı belirli bir kritik seviyenin altında tutulmalıdır. Oksidasyon sıcaklığı arttıkça oksit filmi gözenekli hale gelir. Yoğun ve güçlü bağlanan bir oksit filmi nispeten daha düşük sıcaklıklarda oluşturulabilir. Taban malzemenin alaşım elementleri de oksit filminin morfolojisi ve kalınlığında önemli bir rol oynar. Alaşım elementlerinin miktarı arttıkça oksit filminin büyüme hızı azalır. Alaşımli çeliklerde oluşan oksit filmleri daha incedir ve sade karbon çeliklerinde oluşan oksit filmine kıyasla daha gözenekli yapıya sahiptir (Denktaş 2009).

Plazma oksidasyon işleminin mekanizması, elektriksel boşalma koşulları altında oksijen gazı iyonlaşarak elektrostatik alan doğrultusunda ivmelenen oksijen iyonları katoda bağlı iş parçasına çarparak yüzey bombardımanı oluşturur. Yüzeye ulaşan iyonlar yerel sıcaklık artışına neden olarak yüzeyde buharlaşma etkisi yaratır. Bunun sonucunda iş parçasının yüzeyindeki alaşım elementleri, metal dışı atomlar (karbon, oksijen, azot) ve serbest elektronlar yüzeyden uzaklaşır. Bu süreç "saçılma" olarak adlandırılır. Yüzeye ulaşan iyonların yalnızca küçük bir bölümü iş parçasına doğrudan nüfuz ederken büyük bir kısmı saçılma olayına katkıda bulunur. Saçılan metal atomları ile yüksek enerjili oksijen atomları, yüzey bölgesinde birleşerek metal oksit tabakasını oluşturur. Eğer oluşan oksitler sıcak yüzeyde kararsız yapıdaysa daha kararlı oksit bileşiklerine dönüşür. Bu süreçte serbest kalan oksijen atomları ya metalin içine yayılır ya da tekrar plazmaya döner. Saçılma ve yoğunlaşma mekanizması büyük ölçüde kullanılan gaz türüne bağlıdır. Bunun yanı sıra işlem sırasında uygulanan basınç ve gerilim gibi parametreler değiştirilerek bu süreçler üzerinde kontrol sağlanabilir. Şekil 1.8'de metalik malzemeler üzerinde gerçekleştirilen plazma oksidasyon işleminin mekanizması şematik olarak gösterilmektedir (Aslan 2011).



Şekil 1.8 Plazma oksidasyon işleminin metalik malzemeler için mekanizması (Aslan 2011).

1.4 Aşınma ve Aşınma Mekanizmaları

İstenmeden gerçekleşen aşınma, makineler ve ekipmanlar kullanılırken kırılma kadar kritik bir sorun olmasa da ciddi ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Bu durum makine tasarımlarında büyük önem taşımaktadır. Çünkü temas eden yüzeyler arasındaki sürtünme kuvvetleri enerji kaybına, aşınma ise işleme hassasiyetinin bozulmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle aşınma dikkate alınması gereken en önemli faktörlerden biridir (Ülker 2006).

1.4.1 Sürtünme

Bilindiği gibi birbiriyle temas eden iki yüzeye bir kuvvet uygulandığında bu yüzeyler arasında bir hareket meydana gelir. Bu hareketin oluşumuna karşı gösterilen direnç ise sürtünme olarak adlandırılır. İlgili sistemde hareketi başlatan sürtünme kuvveti (F_s) ile yüzeye etki eden normal kuvvet (P) arasındaki ilişki aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$F_s = \mu_s \cdot P \quad (1.5)$$

Bu formülde μ_s durağan sürtünme katsayısını ifade eder. Kayma hareketi başladıktan sonra sürtünme kuvveti azalmaya başlar ve aşağıdaki eşitlikle gösterilir:

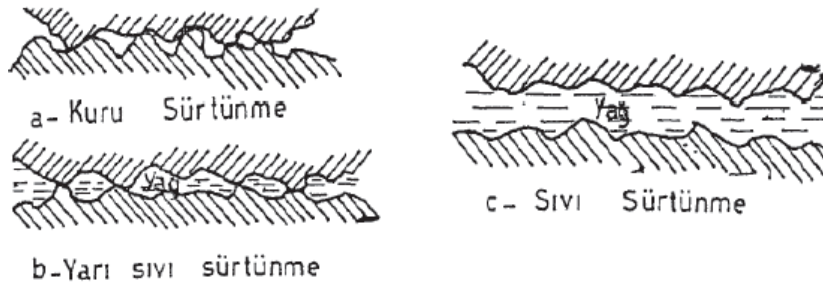
$$F_k = \mu_k.P \quad (1.6)$$

Bu formülde μ_k kinetik sürtünme katsayısını ifade eder ve genellikle μ_s 'den daha küçüktür. Yukarıdaki eşitlikler temas halindeki malzemeler arasındaki sürtünmenin temas alanına bağlı olmadığını ancak malzemeleri birbirine bastıran normal kuvvetle doğru orantılı olduğunu göstermektedir (Selçuk 1994).

Sürtünme üç şekilde meydana gelmektedir;

- Sıvı sürtünme
- Kuru sürtünme
- Sınır sürtünme (Yarı sıvı sürtünme)

Kuru sürtünme, iki yüzey arasında herhangi bir yağlayıcı madde bulunmadığında ve yüzeylerin doğrudan temas halinde hareket etmesiyle oluşur. Sıvı sürtünme ise sürtünen yüzeyler arasında kayganlaştırıcı işlevi gören bir sıvının varlığıyla meydana gelir ve sürtünme yüzeyler yerine bu sıvı tabakası üzerinden gerçekleşir. Yarı sıvı (sınır) sürtünme durumunda ise yüzeyler arasında bir yağlayıcı bulunsun da tam anlamıyla ayrılmaları sağlanamaz ve yüzeyler kısmen birbiriyle temas ederek sürtünme oluşur (Ayaz 2023). Şekil 1.9'da sürtünme çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 1.9 Sürtünme çeşitleri (Develi 2010).

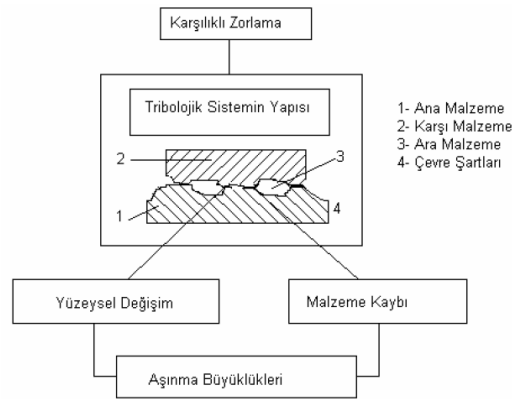
1.4.2 Aşınma

Aşınma, temas eden yüzeylerde mekanik etkiler sonucunda malzeme yüzeyinden meydana gelen kayıp olarak tanımlanır. Katı yüzeyler arasındaki temas sırasında malzeme kaybı üç farklı mekanizma ile gerçekleşebilir; bölgesel erimeler, kimyasal çözünme ve yüzeyden fiziksel yollarla gerçekleşen ayrılmalar (Develi 2010).

Bir aşınma sisteminde;

- Ana malzeme (aşınan),
- Karşı malzeme (aşındıran),
- Ara malzeme,
- Yük,
- Hareket,

aşınmanın temel unsurlarıdır. Tüm bu unsurların bir araya gelmesiyle oluşan sistem teknik literatürde tribolojik sistem olarak adlandırılır. Bu sistemin standartlara uygun şematik gösterimi Şekil 1.10'da sunulmuştur. Aşınma sisteminde önemli etkenlerden biri de çevresel koşullardır. Sistem elemanlarının nem ve korozyon etkilere maruz kalması aşınma sürecini hızlandırır. Birbirleriyle temas eden malzemelerde sürtünme; uygun yağlama, filtreleme, doğru malzeme seçimi ve optimum tasarım gibi faktörlerle minimuma indirilebilir ancak tamamen ortadan kaldırılamaz. Aşınma çeşitli yönleriyle korozyona benzer. Korozyon gibi bir yüzey olayı olduğu için yüzeyi etkileyen her faktör aşınma davranışını da doğrudan etkiler (Gürkan 2007).



Şekil 1.10 Bir tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi (Gürkan 2007).

1.4.2.1 Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Aşınmayı etkileyen çeşitli faktörler farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Bu faktörler genel olarak dört ana grup altında incelenmektedir:

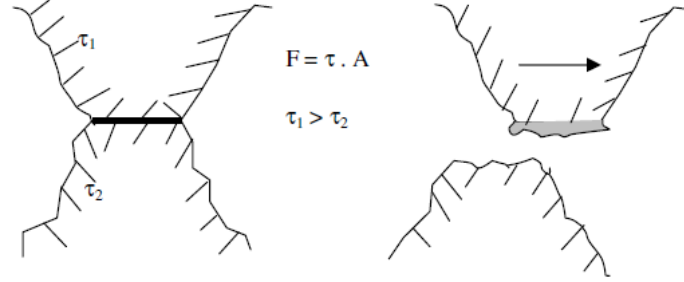
1. Ana malzemeye bağlı faktörler;
 - a) Elastisite modülü
 - b) Yüzey pürüzlüğü
 - c) Malzemenin kristal yapısı
 - d) Deformasyon davranışı
 - e) Malzemenin sertliği
 - f) Malzemenin boyutu
2. Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi
3. Ortamın etkisi
 - a) Atmosfer
 - b) Nem
 - c) Sıcaklık
4. Servis şartları
 - a) Basınç
 - b) Kayma yolu
 - c) Hız (Develi 2010)

1.4.2.2 Aşınma Mekanizmaları

- **Adhezif Aşınma**

Adhezif aşınma, birbirine göre relatif hareket eden iki yüzey arasında gerçekleşen malzeme transferi olarak tanımlanabilir. Bu aşınma türünde temas eden yüzeylerden birinden kopan parçacıklar diğer yüzeye yapışarak malzeme kaybına yol açar. Basınç altında temas eden yüzeylerdeki pürüzler sürtünme ile oluşan ısı ve soğuk kaynak etkisiyle birbirlerine bağlanır. Yüzeylerin göreceli kayma hareketi bağ kuvvetinin en zayıf olduğu noktada kopmalara neden olur. Bunun sonucunda Şekil 1.11'de gösterildiği

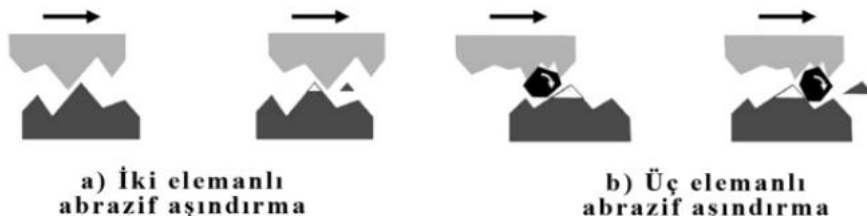
gibi bir yüzeyden diğerine malzeme taşınması meydana gelir (Holberg ve Matthews 1994).



Şekil 1.11 Adhezif aşınmanın temel mekanizması (Holberg ve Matthews 1994).

- **Abrazif Aşınma**

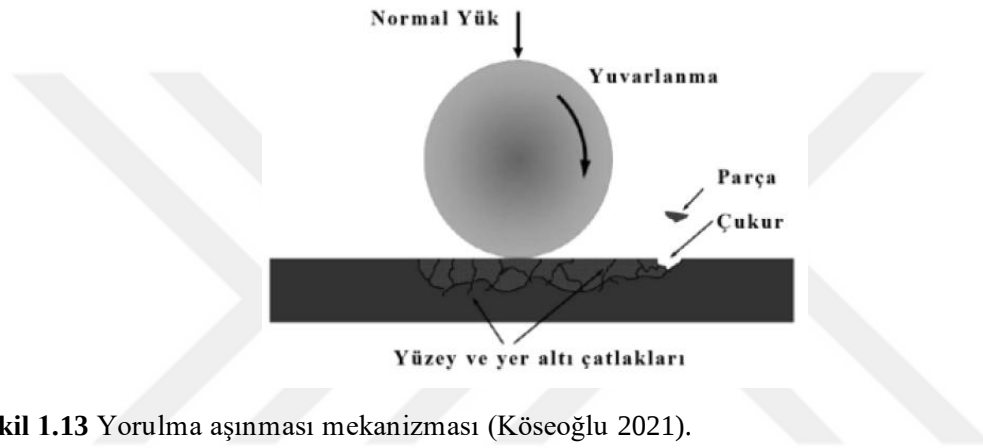
Abrazif aşınma, çizilme veya yırtılma aşınması olarak da adlandırılır ve genellikle daha sert bir parçacığın basınç altında malzeme yüzeyinden talaş kaldırmasıyla meydana gelir. Bu aşınma türü sistemde hızlı hasara yol açarak yüzeyin bozulmasına neden olur. Eğer aşınma temas eden iki malzeme arasındaki sertlik farkından kaynaklanıyorsa iki elemanlı aşınma, dışarıdan gelen aşındırıcı parçacıkların da sürece dahil olması durumunda ise üç elemanlı aşınma olarak adlandırılmaktadır. Abrazif aşınmayı önlemek için yüzey sertliğinin artırılması, uygun kaplama işlemlerinin uygulanması ve aşındırıcı parçacıkların sistemden uzaklaştırılması gibi önlemler alınabilir (Kiraz 2019). Şekil 1.12’de abrazif aşınma mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 1.12 İki ve üç elemanlı abrazif aşınma mekanizması (Abdelbary 2020).

- **Yorulma ve Delaminasyon Aşınması**

Yorulma aşınması değişken ve tekrarlayan yüklemeler sonucunda ortaya çıkar. Tribolojik zorlanmalar genellikle yüzeyde zamanla değişen mekanik gerilmelerin etkisiyle olduğundan yorulma aşınması birçok aşınma mekanizmasında kendini gösterir. Bunun sonucunda malzeme yüzeyinde çatlaklar meydana gelir ve bu çatlakların ilerlemesiyle yüzeyden parçacıklar koparak çukur ve oyuk oluşumuna neden olur (Ülker 2006). Şekil 1.13’de yorulma aşınması mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 1.13 Yorulma aşınması mekanizması (Köseoğlu 2021).

Delaminasyon aşınması birbirine temas eden yüzeylerin kayma hareketi sırasında mikroskobik ölçekte ortaya çıkan özel bir yorulma aşınması türüdür. Temas bölgesinde oluşan basınç nedeniyle yüzeyin hemen altında mikro çatlaklar meydana gelir. Yükün artması ve çatlakların ilerlemesi bu çatlakların birleşmesine ve büyümesine yol açar. Çatlak ilerlemesi yüzeye paralel bir şekilde gerçekleşir ve sonunda yüzeyden plakalar halinde kopmalar meydana gelir (Holberg ve Matthews 1994).

- **Oksidasyon Aşınması**

Oksidasyon aşınması en sık karşılaşılan kimyasal aşınma süreçlerinden biridir. Metallerin yüzeylerinde genellikle ince bir oksit tabakası oluşur. Bu oksit tabakası aynı zamanda sürtünme ve aşınmaya karşı koruyucu bir özellik de taşıyabilir (Güneş 2006).

Oksidasyon aşınması teorisine göre birbirine sürtünen iki yüzey arasında oluşan ısı, metal

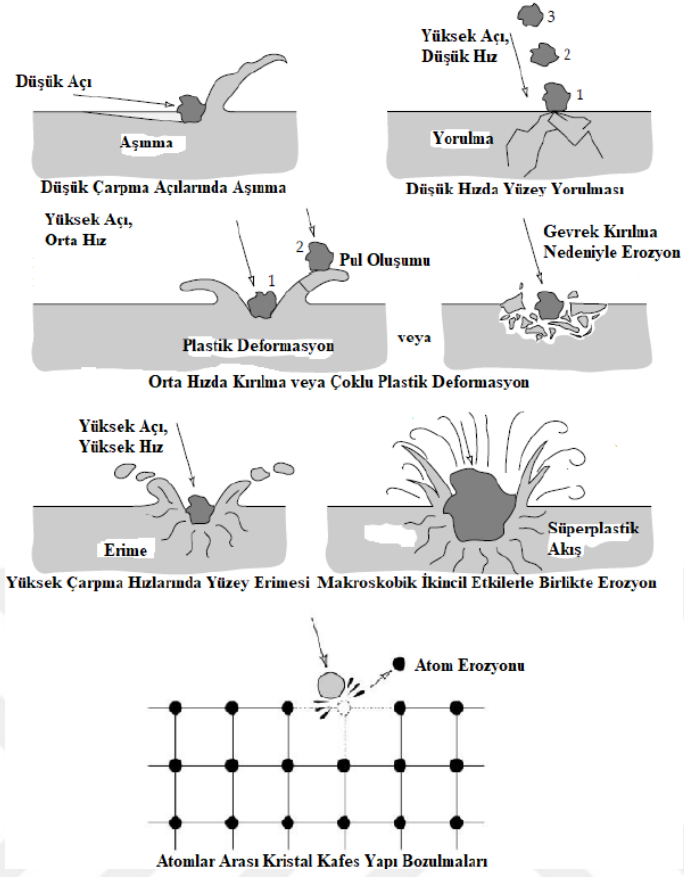
yüzeyinde oksit tabakasının kalınlaşmasına neden olabilecek bir enerji kaynağı sağlayabilir. Oksit tabakası belirli bir kritik kalınlığa ulaştığında yüzeydeki çıkıntılar kırılarak aşınma parçacıkları oluşturur. Bu yığıntılar abrazif aşınmayı tetikleyebilir. Oksidasyon aşınmasının adhezif aşınmaya kıyasla daha düşük seviyede olduğu düşünülmektedir. Aşındırıcı parçacıkların oluşma ihtimali; temas basıncı, kayma hızı, sıcaklık ve çevresel faktörler gibi aşınma ortamının özellikleriyle birlikte, korozyon eğilimi, oksidasyon hızı, metalin oksijenle etkileşime girme eğilimi, dayanıklılığı ve sertliği gibi metalin kendi özelliklerine bağlıdır. Eğer koşullar ince, sert ve yapışkan bir oksit tabakasının oluşumuna olanak sağlarsa aşınma hızı temas eden yüzeyler arasındaki adhezyonun azalmasına bağlı olarak düşebilir (Elder vd. 1988).

- **Erozif Aşınma**

Erozif aşınma, katı ya da sıvı parçacıkların bir yüzeye çarpması sonucu meydana gelen aşınma türüdür. Aşınma hızı ve miktarı; çarpan parçacıkların malzeme özellikleri, çarpma açısı, darbe hızı gibi birçok faktöre bağlı olarak değişiklik gösterir. Eğer aşındırıcı parçacıklar sert katılardan oluşuyorsa aşınma mekanizması abrazif aşınmaya benzerlik gösterir. Sıvı parçacıkların aşındırıcı olduğu durumlarda ise tekrarlanan darbeler sonucunda yüzeyde gerilmeler oluşarak aşınma meydana gelir. Erozif aşınmada aşınma mekanizması aşındırıcı parçacıkların hızına, çarpma açısına ve malzemeler arasındaki sertlik farkına bağlı olarak farklılık göstermektedir (Karamanlı 2024). Erozif aşınma mekanizmaları;

1. Düşük çarpma açılarında aşınma,
2. Düşük hızlarda yüzey yorulması,
3. Orta hızlarda kırılma ve plastik deformasyon,
4. Yüksek çarpma hızlarında yüzey erimesi,
5. Makroskobik ikincil etkilerle birlikte erozyon,
6. Atomik etkilerle kristal kafes yapılarında meydana gelen deformasyonlar

olarak sınıflandırılabilir (Stachowiak ve Batchelor 2013). Aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi Şekil 1.14’de verilmiştir.



Şekil 1.14 Erozif aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi (Karamanlı 2024).

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Gerçekleştirilen literatür taramasında 17CrNiMo6 sementasyon çeliğine yönelik plazma nitrüleme ve plazma oksidasyon işlemlerini birlikte ele alan detaylı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tez kapsamında 17CrNiMo6 sementasyon çeliğine plazma nitrüleme ve ardından çeşitli ortam ve sürelerde plazma oksidasyon uygulanarak aşınma davranışı üzerindeki etkileri araştırılacaktır. Böylelikle çalışmanın literatüre katkı sunması beklenmektedir. Bu tez çalışmasına temel oluşturacağı düşünülen bazı araştırmalar aşağıda özetlenmiştir.

Miyamoto ve Abraha (2019), AISI H13 takım çeliğine plazma nitrüleme uygulamışlardır. Çeşitli işlem sürelerinin, sert ancak kırılabilir yapıdaki bileşik tabakanın oluşumu üzerindeki etkisini ve malzeme yüzeyinde meydana gelen tribolojik değişimleri birlikte incelemişlerdir. Yaptıkları deneylerde 500 °C’de 6 saat süresince nitrüleme uygulanan takım çeliğinin işlenmemiş numuneye göre yüzde birin altında özgül aşınma oranı olduğunu belirlemişlerdir. Buna karşılık nitrüleme işlemi, takım çeliğinin yüzeyinde pürüzlü ve kırılabilir bir bileşik tabaka oluşturmuştur. Bileşik tabaka içeren numuneler bileşik tabaka içermeyenlere kıyasla daha düşük bir sürtünme katsayısı sergilediğini gözlemlemişlerdir.

Rolinski vd. (2000), %3 Cr-Mo-V içeriğine sahip DIN 39CrMoV13.9 çeliğinin plazma nitrüleme işlemini 538 °C, 510 °C ve 483 °C’de gerçekleştirmişlerdir. Yapılan incelemeler sonucunda toplam sertleşmiş tabaka derinliği açısından işlemin parabolik bir difüzyon yasasına uyduğu ancak efektif sertleşmiş tabaka derinliği oluşumunun parabolik hızdan daha yavaş ilerlediği tespit etmişlerdir. Yeniden nitrüleme (re-nitriding) kinetiğinin önceden oluşmuş tabakanın büyümesinin bir devamı niteliğinde olduğu belirlemişlerdir. Nitrüleme sıcaklıklarına uzun süre maruz kalmanın çeliğin sertliği üzerinde olumsuz bir etki yarattığı sonucuna varmışlardır.

Guillen vd. (2020), AISI D2 takım çeliğine plazma nitrüleme işlemini 470 °C’de 4 saat ve 550 °C’de 5 saat, ardından post-oksidasyon işlemini 500 °C’de 1 saat uygulamışlardır. İşlemsiz numunelerde 596 HV sertlik değerini, plazma nitrüleme uygulanan

numunelerde 1411 HV olarak elde etmişlerdir. Post-oksidasyon uygulanmış numunelerde ise demir oksit fazlarının oluşumu nedeniyle plazma nitrülenmiş numunelere kıyasla mikrosertlik değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Post-oksidasyon uygulaması ile beyaz tabakanın olumsuz tribolojik etkilerinin azaltılabileceğini saptamışlardır. Post-oksidasyon sonucunda hematit ve manyetit fazlarının oluşması aşınma mekanizmasını olumlu yönde etkilediğini görmüşler, ayrıca elde edilen yüzeylerin döngüsel yükler altında çatlamaya karşı daha dirençli olduğunu tespit etmişlerdir.

Erdoğan vd. (2024), AISI 4140 çeliği farklı iki şiddette bilyalı dövme işlemine ve 520 °C’de 12 saat plazma nitrasyon işlemlerine tabi tutmuşlardır. Plazma nitrüleme sonucunda yüzeyde oluşan ilave katmanın demir nitrür fazları olduğu görmüşler bununla beraber bilyalı dövme işlemlerinden sonra herhangi bir faz değişimi meydana gelmediğini gözlemlenmiştir. Tüm işlemlerle birlikte numunelerin yüzey sertliklerinde artış sağlanmış ve plazma nitrüleme ile yüzeyde 700 HV’ye varan sertlik artışı görmüşlerdir. Sonuç olarak en iyi aşınma dayanımı plazma nitrüleme işlemi ile olduğunu saptamışlardır. Bilyalı dövmede beklenen etkinin görülmemesi ise yüzeyde oluşan pürüzlülüğe atfetmişlerdir.

He vd. (2024), 42CrMo çeliğine plazma nitrüleme işlemi uygulama esnasında fırın içerisine FeAl ilavesi yaparak nitrüleme tabakasının verimliliği artırmak istemişlerdir. Geleneksel plazma nitrüleme yöntemi ile karşılaştırıldığında işlem verimliliğinin 5 kattan fazla arttığını ve 520 °C’de 4 saat süreyle gerçekleştirilen işlemde efektif sertleşmiş tabaka kalınlığının 224 µm’den 1246 µm’ye yükseldiği sonucunu elde etmişlerdir.

Shen ve Wang (2019), AISI 5140 düşük alaşımlı çeliğe 540 °C’de 4 saat süresince plazma nitrüleme işlemi uygulamışlar, ardından 450 °C’de saf havada ve farklı oranlarda hava-amonyak karışımları içeren ortamda 1 saat süreyle post-oksidasyon işlemi gerçekleştirmişlerdir. Plazma post-oksidasyonu sonrası nitrür tabakasının üzerinde 1,6-1,8 µm kalınlığında ince bir oksit tabakasının oluştuğunu görmüşlerdir. Saf hava ortamında gerçekleştirilen post-oksidasyon sonucunda oluşan oksit tabakası ağırlıklı olarak Fe₃O₄ fazından ve az miktarda Fe₂O₃ fazından oluştuğunu, %25 hava-%75 NH₃ ve %50 hava-%50 NH₃ gaz karışımlarıyla yapılan post-oksidasyon işlemleri sonrası ise

yalnızca Fe_3O_4 fazını gözlemlemişlerdir. Hava ortamına amonyak ilavesi Fe_3O_4 oluşumunu destekleyerek işlem görmüş numunelerin üstün korozyon direnci kazanmasına katkı sağladığını saptamışlardır. Ayrıca saf hava ve hava-amonyak karışımlarıyla yapılan post-oksidasyon işlemleri sayesinde nitrürlenmiş numunelerin sürtünme katsayılarında belirgin bir azalma tespit etmişlerdir.

Molinari vd. (1999), farklı krom içeriği ve mikroyapıya sahip Fe-Cr-Mo ve Fe-Cr-Mo-C alaşımlarına plazma nitrüleme işlemi uygulamışlardır. Karbon katkılı alaşımın sinterlenmiş hali nitrürlendiğinde aşınma direnci ve darbe dayanımının arttığını gözlemlemişlerdir. Benzer sonuçlar konvansiyonel su verme ve gerilim giderme işlemleriyle de sağlamışlardır. Her iki ısıtım işlem yönteminde yorulmaya maruz kalan sinterlenmiş bileşenlerin üretiminde alternatif çözümler olarak değerlendirilebileceği sonucuna varmışlardır.

Alves vd. (2006), 1020 çeliği ve 316 paslanmaz çeliğini doğru akım plazma nitrüleme ve katodik plazma nitrüleme işlemine tabi tutmuşlardır. 1020 ve 316 paslanmaz çeliği numunelerini sırasıyla 3 saat ve 5 saat boyunca 773 K sıcaklıkta ve 360 Pa basınç altında uygulama yapmışlardır. Doğru akım plazma nitrüleme yöntemiyle nitrürlenmiş tüm numunelerde plazmaya maruz kalan yüzeyde erozyon halkaları gözlemlemişlerdir. Buna karşılık katodik plazma nitrüleme yöntemiyle nitrürlenmiş numunelerde bu erozyon halkalarının tamamen ortadan kalktığını tespit etmişlerdir. Nitrürlü tabakada oluşan farklı fazlarda herhangi bir mekanik özellik kaybı gözlemlememişlerdir.

Ayaz (2023), yaptığı çalışmada işlem görmemiş ve sementasyon+su verme işlemi uygulanmış AISI 8620 çelik numunelere 450, 480 ve 520 °C de 10 ve 20 saat işlem sürelerinde plazma nitrüleme işlemi uygulamıştır. İşlemsiz numunelerde 220 HV yüzey sertlik değeri, 450 °C ve 10 saat işlem süresi uygulanan numunelerde 690 HV, sementasyon+su verilmiş numunelerde ise 731 HV elde ederek yüzey sertliğinin önemli ölçüde arttığını sonucuna varmıştır.

Akşit (2008), Inconel 718 alaşımına plazma nitrüleme işlemini 550 °C sıcaklıkta sırasıyla 1, 4, 9 ve 16 saat sürelerle uygulamıştır. Ayrıca Inconel 718'in oksidasyon

kinetiğini incelemek amacıyla numuneleri 1000 °C, 1075 °C ve 1150 °C sıcaklıklarda; 1, 6, 12, 24, 48, 72, 96, 120 ve 144 saatlik çevrimli oksidasyon testlerine tabi tutmuştur. Nitrürleme işlemi sonrasında yüzeyde meydana gelen CrN tabakasının oksijenin yüzeye difüzyonunu engellediği, nitrürleme süresi arttıkça CrN tabakasının kalınlığının da arttığı ve buna bağlı olarak oksidasyon direncinin yükseldiğini belirlemiştir. Sonuç olarak plazma nitrürleme işleminin Inconel 718'in oksidasyon direncini kısa süreli oksidasyon koşullarında yaklaşık %15 oranında iyileştirdiğini tespit etmiştir.

Çelik (2014), saf titanyum numunelere akımsız Ni-B kaplama, plazma nitrürleme ve her iki yöntemin kombinasyonundan oluşan dubleks yüzey işlemleri uygulamıştır. Yüzey modifikasyonları sonrasında numuneler 400 °C sıcaklıkta 1 saat süreyle ısıtılma işlemine tabi tutmuştur. Akımsız Ni-B kaplama işlemleri 95 °C sıcaklığındaki banyoda 1 saat süreyle, plazma nitrürleme işlemleri ise 500 °C, 600 °C ve 700 °C sıcaklıklarda 4 saat süreyle gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda uygulanan tüm yüzey işlemlerinin saf titanyumun düşük aşınma direncini iyileştirdiği belirlemiştir. Yaptığı değerlendirmeler sonucunda, hem korozyon hem de aşınma direnci açısından en başarılı sonuçların plazma nitrürleme uygulanan numunelerde elde edildiği tespit etmiştir.

Topçu (2010), yapmış olduğu çalışmada ostenitik AISI 304, martenzitik AISI 420 ve ferritik AISI 430 paslanmaz çelik numunelerine farklı nitrürleme yöntemleri uygulamıştır. Numunelere sırasıyla 570 °C'de 90 dakika tuz nitrürleme, 570 °C'de 13 saat gaz nitrürleme, 450 °C'de 8 saat plazma nitrürleme ve 520 °C'de 8 saat plazma nitrürleme işlemleri uygulanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, en yüksek sertlik değerinin 520 °C'de plazma nitrürleme uygulanan AISI 430 numunesinde elde edildiği belirlemiştir. Aşınma dayanımı açısından ise en iyi sonucun AISI 430 numunesinde 570 °C'de gerçekleştirilen tuz nitrürleme işleminde sağlandığı, korozyon dayanımı bakımından ise en yüksek dayanımın 450 °C'de plazma nitrürleme uygulanan AISI 304 numunesinde gerçekleştiğini tespit etmiştir.

Liu vd. (2014), AISI 4140 çeliğine uygulanacak olan doğru akım plazma nitrürleme işleminden önce atmosfer ortamında ön oksidasyon işlemi gerçekleştirmişlerdir. 300 °C sıcaklıkta ve 30 dakika süreyle yapılan ön oksidasyon sonucunda yüzeyde homojen

dağılmış nano boyutlu demir oksit parçacıkları oluştuğunu ve serbest yüzey enerjisinde belirgin bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu durumun sonraki yapılacak olan plazma nitrürleme işlemi sırasında oksitlerin nitrür fazına daha kolay dönüşmesini sağladığını ve tabaka kalınlığının ön oksidasyon uygulanmamış numunelere kıyasla iki katından fazla arttığını belirlemişlerdir. Bu iyileştirici etkinin, yüzeyde meydana gelen homojen dağılımlı nano demir oksit parçacıkları ile birlikte oluşan mikro çatlaklar ve gözeneklerin etkisiyle ortaya çıktığını belirtmişlerdir.

Atapour ve Ashrafizadeh (2012), DIN 1.4871 östenitik valf çeliğinin plazma nitrürleme sonrası çevrimsel oksidasyon davranışını incelemişlerdir. %25 N₂ ve %75 H₂ gaz ortamında, 450 °C’de 7 saat süreyle gerçekleştirdikleri nitrürleme işleminin ardından numunelerin 750 °C’de çevrimsel oksidasyon direncini değerlendirmişlerdir. Bu çalışma sonucunda plazma nitrürlemenin numunelerin oksidasyon direncini önemli ölçüde etkilediği belirlemişlerdir. Oksidasyonun Cr ve Fe elementlerinin dışa difüzyonu ve yüzeyde oksijenle reaksiyonu yoluyla gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir.

Ebrahimi vd. (2010), plazma nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğinin oksidasyon öncesi ve sonrası korozyon davranışı incelenmişlerdir. Plazma nitrürleme işlemini %80 N₂ ve %20 H₂ gaz atmosferinde sırasıyla 530 °C, 570 °C ve 630 °C sıcaklıklarda 5 saat süreyle gerçekleştirmişlerdir. Nitrürleme sonrası %50 O₂ ve %50 H₂ içeren gaz karışımı ortamında 450 °C’de 1 saat süreyle plazma post-oksidasyon işlemi uygulamışlardır. 570 °C’de nitrürleme ve ardından yaptıkları post-oksidasyon işleminin, tüm işlem koşulları arasında en yüksek korozyon direncini sağladığı sonucuna varmışlardır.

Naeem vd. (2022), AISI 1045 çeliğine uygulanan yüksek sıcaklıkta plazma nitrürleme ve ardından gerçekleştirilen post-oksidasyon işleminin yüzey sertliği ve aşınma direnci üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nitrürleme sonucunda yaklaşık 1050 HV seviyesine ulaşan önemli bir sertlik artışı sağlamışlar fakat oksidasyon sonrasında sertlikte hafif bir düşüş gözlemlemişlerdir. Plazma post-oksidasyon işleminin nitrür tabaka kalınlığını artırdığı, aşınma direncini önemli ölçüde iyileştirdiği ve sürtünme katsayısında azalma sağlanarak yüzey performansı geliştirdiği sonucuna varmışlardır.

Rovani vd. (2011), plazma nitr rl nmiş AISI 1045  eliğine plazma post-oksidasyon işlemi uygulamışlar ve oksit tabakası kalınlığının sıcaklıkla birlikte arttığını gözlemlemişlerdir. En yüksek sıcaklık olan 550  C’de oluşan oksit tabakasının homojen olmadığını ve 480-500  C sıcaklıklarda elde edilenlere kıyasla daha düşük sertlik gösterdiğini saptamışlardır. Bu nedenle 480-500  C aralığı daha kompakt, homojen ve sert oksit tabakalarının oluşumu için daha uygun sıcaklıklar olduğu sonucuna varmışlardır.

Tekdir (2019), yürüttüğü çalışmada seçici lazer ergitme yöntemiyle 316L paslanmaz  elik taban malzemesini üretmiş ve ardından aynı yöntemle 316L yapının  zerine Ti6Al4V tabaka oluşturmuştur. Üretilen 316L/Ti6Al4V tabakalı yapının tribolojik özelliklerini geliştirmek amacıyla plazma oksidasyon işlemi uygulamıştır. Ti6Al4V y zeyeye sahip numuneler %100 O₂ gaz atmosferinde, 650  C ve 750  C sıcaklıklarda, 1 ve 4 saat sürelerle plazma oksidasyonuna tabi tutmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, en iyi aşınma performansı, korozyon direnci ve oksit tabaka kalınlığı değerlerine 750  C’de 4 saatlik oksidasyon işlemiyle ulaşmıştır.

Yetim vd. (2012), CoCrMo alaşımının aşınma direncini artırmak amacıyla malzeme yüzeyine farklı sıcaklıklarda plazma oksidasyon işlemi uygulamışlardır. %100 O₂ gaz ortamında, 5×10² Pa basınç altında, 600  C ve 800  C sıcaklıklarda, 1 ve 5 saat süreyle oksidasyon işlemleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan incelemeler sonucunda, plazma oksidasyon işlemine bağlı olarak yüzey sertliğinin yaklaşık 2-3 kat arttığı belirlenmişlerdir. Ayrıca işlem uygulanmamış CoCrMo alaşımının adhezif aşınma davranışı sergilediğini gözlemlemişler, plazma oksidasyon sonrası ise yüzeyde adhezif bağlanma eğiliminin azaldığı ve buna bağlı olarak aşınma direncinin önemli ölçüde iyileştiği tespit etmişlerdir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada deney malzemesi olarak 17CrNiMo6 (1.6587) çeliği Önerler Çelik ve Isıl İşlem (Bursa) firmasından temin edilmiştir. Çelik çubuk halinde alınan malzeme CNC torna makinesinde kesilerek Ø30x10mm ebatlarına getirilmiştir (Resim 3.1). Çeliğin kimyasal yapısı Çizelge 3.1’de verilmiştir.



Resim 3.1 Ø30 mm 17CrNiMo6 sementasyon çeliği.

Çizelge 3.1 17CrNiMo6 çeliğinin kimyasal yapısı (%).

	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo
17CrNiMo6	0.17	0.26	0.61	0.006	0.023	0.022	1.57	1.47	0.27

3.2 Plazma Nitrürleme İşlemi

Plazma nitrürleme uygulaması Ermir Plazma Teknolojileri ve Makine Sanayi (Bursa) firmasında 480 °C sıcaklıkta ve 20 saatlik bir süre boyunca gerçekleştirilmiştir. Kullanılan gaz karışımı %25 H₂-%75 N₂ oranında sabit tutulmuştur. Nitrürleme işlemi çan tipi bir fırın içerisinde yapılmış olup numuneler alkol ile arındırıldıktan sonra taban

plakasına yerleştirilmiş ve ardından üst kapağı kapatılan kazan, vakum pompası aracılığıyla 0,1 mbar basınca kadar vakumlanmıştır. Akabinde taban plakasına negatif, kazan gövdesine pozitif gerilim uygulanacak şekilde 10 kHz frekansında çalışan puls jeneratörü ile 400 V doğru akım (DC) verilmiştir. Numuneler kazan gövdesinde yer alan harici ısıtıcılar ve plazma enerjisinin etkisiyle hedef sıcaklığa kadar ısıtılmış, bu ısınma sürecinde belirlenen oranlardaki azot ve hidrojen gazları ile sürekli olarak ortam beslenmiştir. Vakum pompası sürekli çalıştırılarak kazan iç basıncının 2 mbar seviyesinde sabit kalması sağlanmıştır.

3.3 Plazma Oksidasyon İşlemi

Plazma oksidasyon uygulaması Afyon Kocatepe Üniversitesi Yüzey İşlemleri Laboratuvarında 500 °C’de %25 O₂-%75 H₂ ve %50 O₂-%50 H₂ gaz ortamlarında 0,5, 1 ve 1,5 saat sürelerde uygulanmıştır. Vakum basıncı $8,4 \times 10^{-2}$ mbar, çalışma basıncı 4,8 mbar olarak uygulanmıştır.

3.4 Aşınma Deneyi

Afyon Kocatepe Üniversitesi Yüzey İşlemleri Laboratuvarında bulunan bilye disk aşınma cihazı ile aşınma testleri yapılmıştır. İşlem öncesinde numuneler alkol ile temizlenmiştir. Aşınma deneylerinde 30 mm çapındaki 17CrNiMo6 çelik numuneler, İtimat Rulman’dan alınan 8 mm çapında ve ortalama 1895 HV sertliğinde WC-Co bilyelerle oda sıcaklığında aşındırma işlemine tabi tutulmuştur. Deneyler bilye-disk düzeneği kullanılarak kuru ortamda, sabit 382 dev/dk dönme hızı, 10 N yük, 0,3 m/sn kayma hızı ve 500 metre kayma mesafesiyle gerçekleştirilmiştir. Aşınma hızları formül 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Aşınma\ Hızı = \frac{Aşınma\ alanı \times \pi \times d}{Kayma\ mesafesi \times Uygulanan\ yük} \quad (3.1)$$

3.5 Metalografik İşlemler

Yapılan işlemler sonrası numunelerin kesitleri alınarak bakalitleme işlemine tabi

tutulduktan sonra sırasıyla 180, 240, 320, 400, 600, 800 ve 1000 grid'lik SiC zımparalar ile zımparalanmıştır. Daha sonra 1µm alümina solüsyon ile parlatma işlemi uygulanmıştır. Dağlama işlemi için %3 içerikli nital dağlayıcı kullanılmıştır. Zımparalama ve parlatma işlemi Tronic EcoPol 200 Polisher markalı cihazda yapılmıştır. Mikro yapı incelemesi Nikon Eclipse MA100 optik mikroskobu ile yapılmıştır.

3.6 XRD Analizi

Plazma nitrüleme ve plazma oksidasyon işlemi uygulanmış numunelerin tabaka faz analizleri, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi Laboratuvarı'nda (TUAM) bulunan Shimadzu XRD-6000 cihazı kullanılarak CuK α (1,544 Å) radyasyonu ile 2θ açısında 20-90° aralığında gerçekleştirilmiştir.

3.7 Mikrosertlik Ölçümleri

Mikrosertlik ölçümleri SHIMADZU – HMV-2L cihazı ile numune yüzeyine 5 noktadan 10 sn sürede 300 gr yük uygulanarak vickers yöntemiyle yapılmıştır.

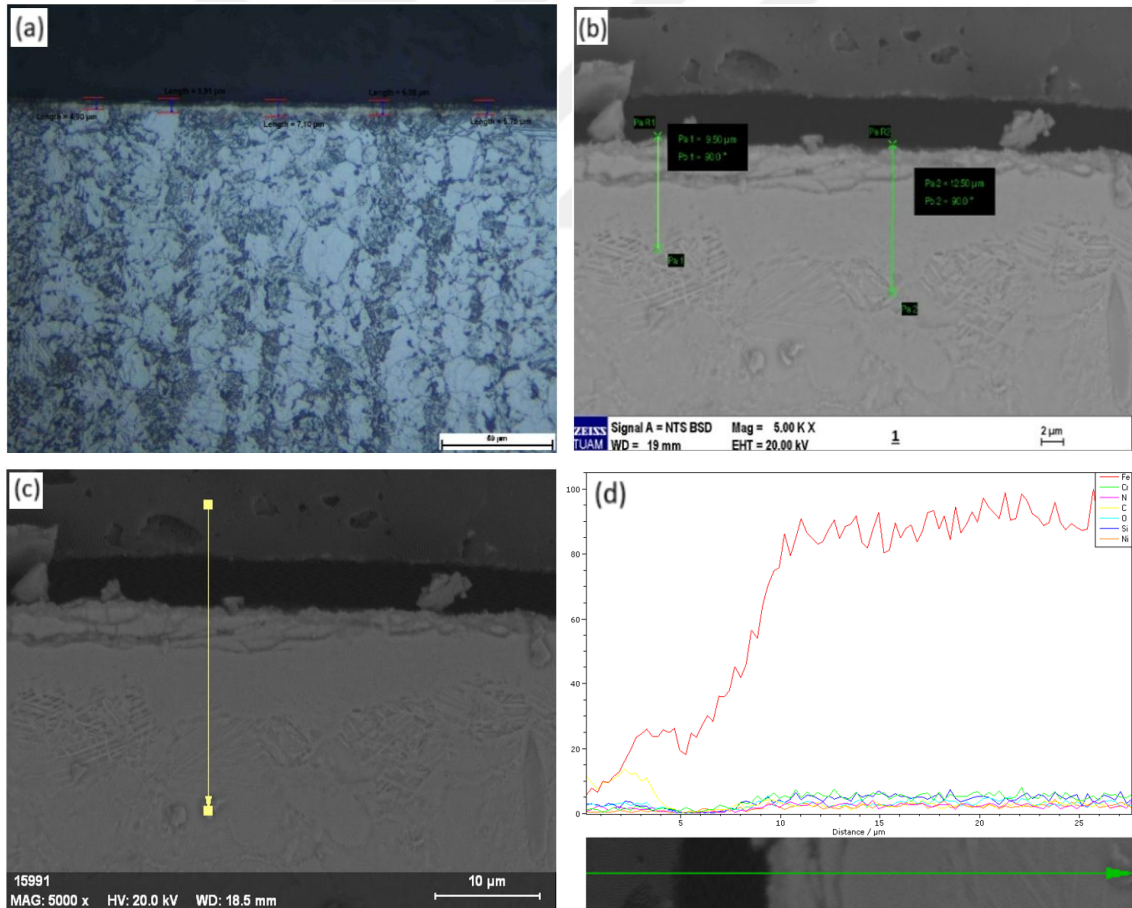
3.8 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDX Analizi

Numunelerin aşınma izi analizleri SEM ve EDX analizleri Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknolojiler Merkezi (İLTİM) bünyesinde bulunan Nova Nanosem 650 cihazı ile 10 kV gerilimde yapılmıştır. Numunelerin kesit mikro yapı analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi Laboratuvarı'nda (TUAM) bulunan LEO 1430 VP model SEM cihazı ile yapılmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

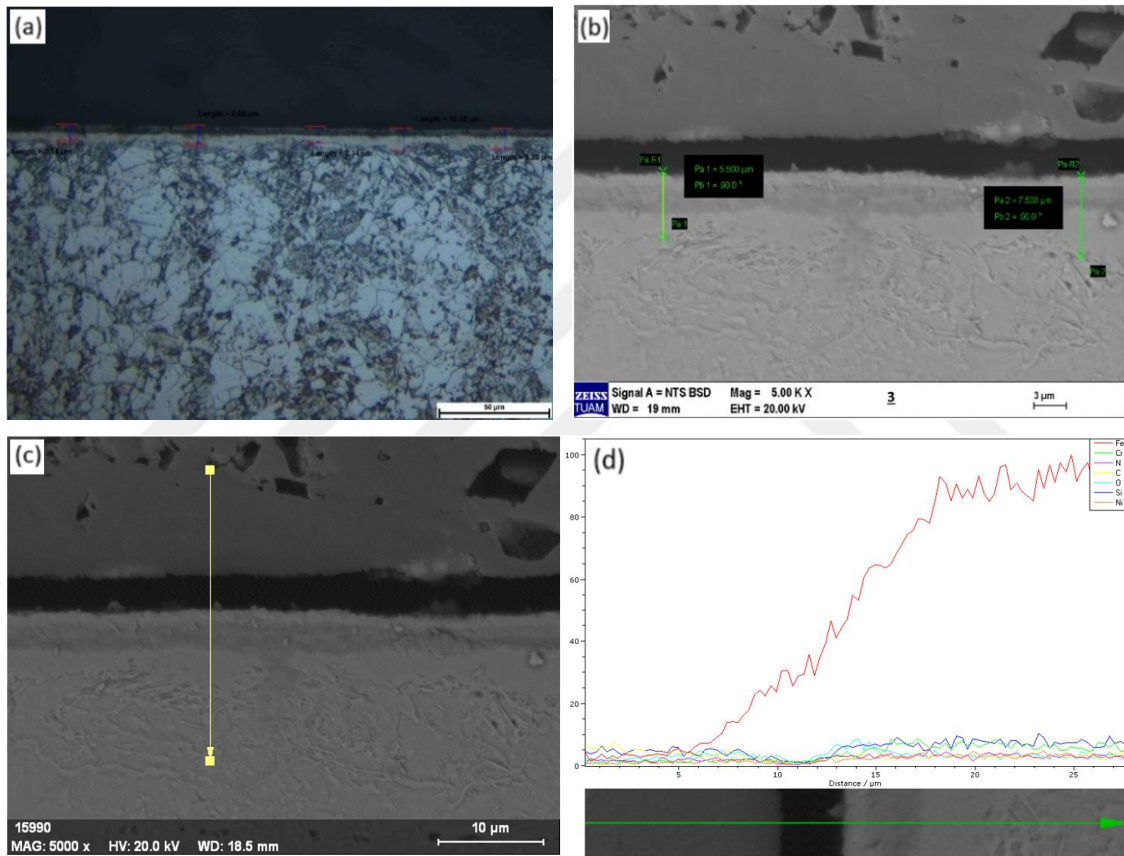
4.1 Mikro Yapısal Özellikler

Plazma nitrüleme (PN) işlemi uygulanan 17CrNiMo6 çeliğine ait kesit mikro yapı görüntüsü ve EDX analiz sonuçları Şekil 4.1’de verilmiştir. SEM görüntüsü üzerinde yapılan kalınlık ölçümlerine göre tabakanın ortalama kalınlığı yaklaşık 11 μm olarak belirlenmiştir. Literatürde belirtilen kalınlıklarla uyumludur (Lu vd. 2023, Küçük vd. 2021). Tabakanın üst kısmı nispeten kompakt görünüme sahipken, alt bölgelerde iğnemi morfolojiler nitrür difüzyon bölgelerini göstermektedir. Homojen ve sürekli bir beyaz tabaka oluşumu net bir şekilde gözlemlenmiştir. Bu tabakanın varlığı, yüzey sertliğini artırarak aşınma ve yorulma direncini iyileştirmektedir (Küçük vd. 2021, Sun vd. 2020).



Şekil 4.1 Plazma nitrülenmiş 17CrNiMo6 çeliğinin a) optik mikroskop görüntüsü, b) SEM görüntüsü, c) SEM görüntüsü üzerinde EDX çizgi analizi, d) c) şeklindeki görüntünün EDX sonucu.

Şekil 4.2’de plazma nitrüleme sonrası %25 O₂ 0,5h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numuneye ait kesit mikro yapısı ve EDX analiz sonuçları görülmektedir. SEM kesit görüntüsünde yüzeyde ortalama yaklaşık 3,5 µm kalınlığında oksit + beyaz tabaka ve toplamda ortalama yaklaşık 6,5 µm tabaka kalınlığı tespit edilmiştir. Oksit tabakası kompakt ve homojen bir morfoloji sergilemekte olup, yüzey ile ana metal arasında süreklilik göstermektedir. Literatür incelendiğinde yapılan kısa süreli oksidasyon uygulamalarında oluşan oksit tabakasının bütünlüğü büyük oranda korunduğu görülmektedir ve burada da benzer bir yapı oluşmuştur (Abedi vd. 2010).

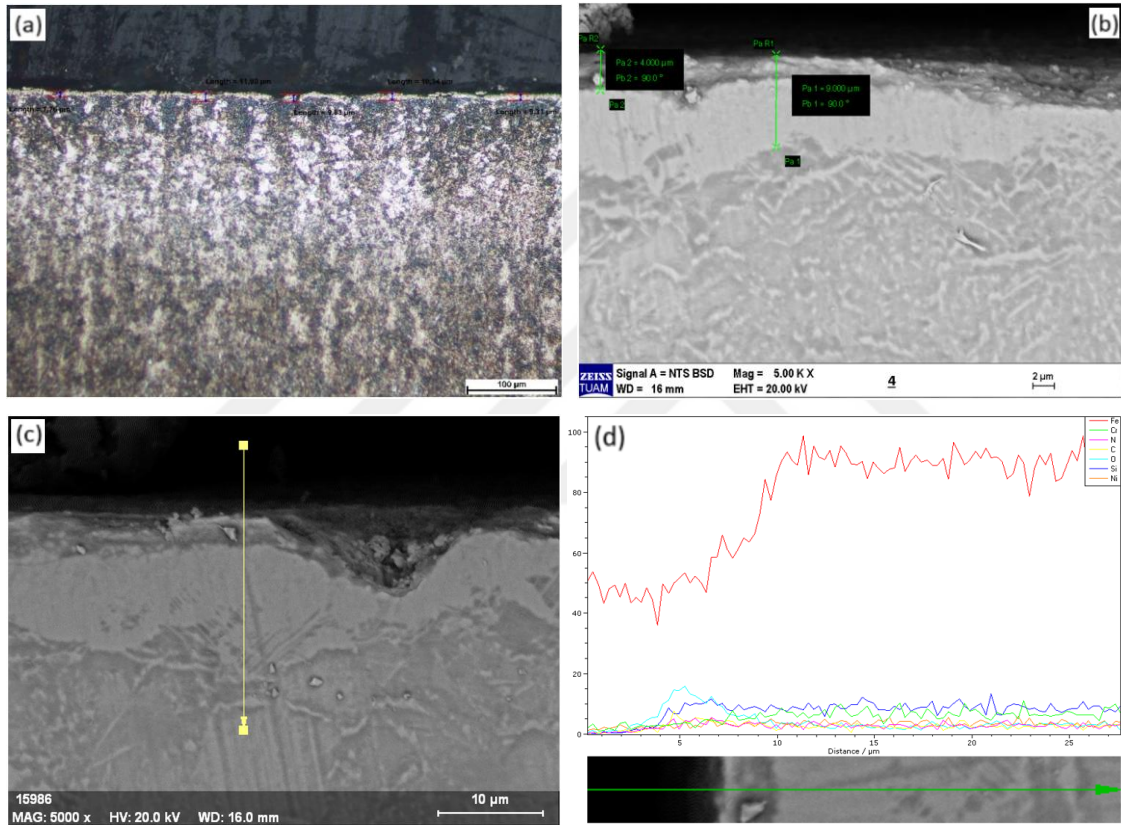


Şekil 4.2 %25 O₂ 0,5h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numunenin a) optik mikroskop görüntüsü, b) SEM görüntüsü, c) SEM görüntüsü üzerinde EDX çizgi analizi, d) c şeklindeki görüntünün EDX sonucu.

Şekil 4.3’de plazma nitrüleme sonrası %25 O₂ 1h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numuneye ait kesit mikro yapısı ve EDX analiz sonuçları görülmektedir. SEM görüntüsü üzerinde yapılan kalınlık ölçümlerine göre oksit + beyaz tabakanın ortalama kalınlığı yaklaşık 4 µm, toplam tabaka ortalama kalınlığı ise yaklaşık 9 µm olarak belirlenmiştir. Oksit tabakası 0,5 saate kıyasla daha kalın ve sürekli. Bu yapı

orta süreli plazma oksidasyon işlemlerinde beklenen optimum tabaka karakteristiğini göstermektedir (Lu vd. 2023, Yıldız vd. 2022).

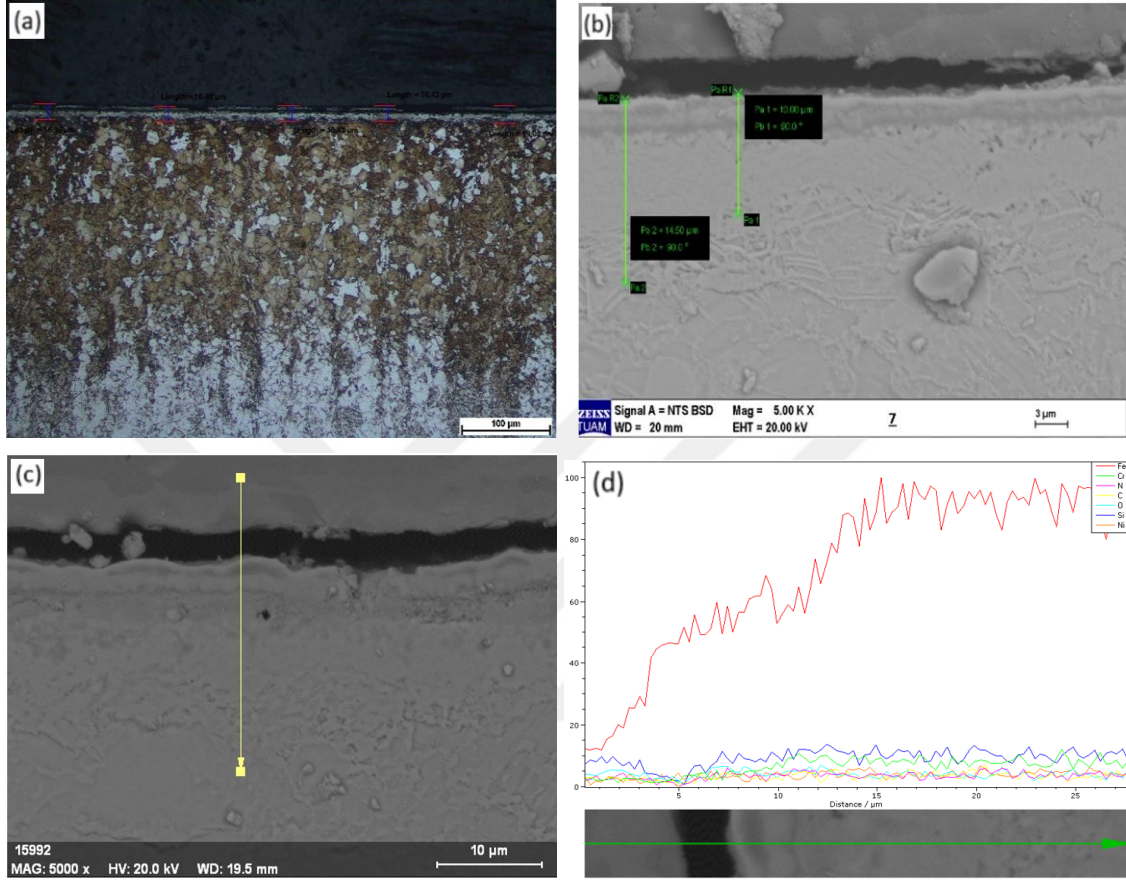
Mikro yapı incelemesinde, oksit tabakanın yüzey boyunca homojen ve sürekli bir yapı oluşturduğu görülmektedir. Literatürde belirtildiği gibi orta süreli oksidasyon işlemleri kompakt ve dayanıklı tabakalar oluşturarak aşınma direncini artırıcı etki göstermektedir (Yıldız vd. 2022, Grigoriev vd. 2024).



Şekil 4.3 %25 O₂ 1h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numunenin a) optik mikroskop görüntüsü, b) SEM görüntüsü, c) SEM görüntüsü üzerinde EDX çizgi analizi, d) c şeklindeki görüntünün EDX sonucu.

Şekil 4.4’de plazma nitrüleme sonrası %25 O₂ 1,5h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numuneye ait kesit mikro yapısı ve EDX analiz sonuçları görülmektedir. SEM kesit görüntüsünde toplam tabaka kalınlığı yaklaşık 10 μm, bunun içinde oksit + beyaz tabaka ortalama kalınlığı ise yaklaşık 3 μm olarak ölçülmüştür. 1 saatlik numuneye kıyasla oksit tabakasının incelindiği ve sürekliliğinde bozulmalar görüldüğü dikkat çekmektedir. Bu durum, uzun süreli oksidasyon işlemlerinde tabakanın bütünlüğünün

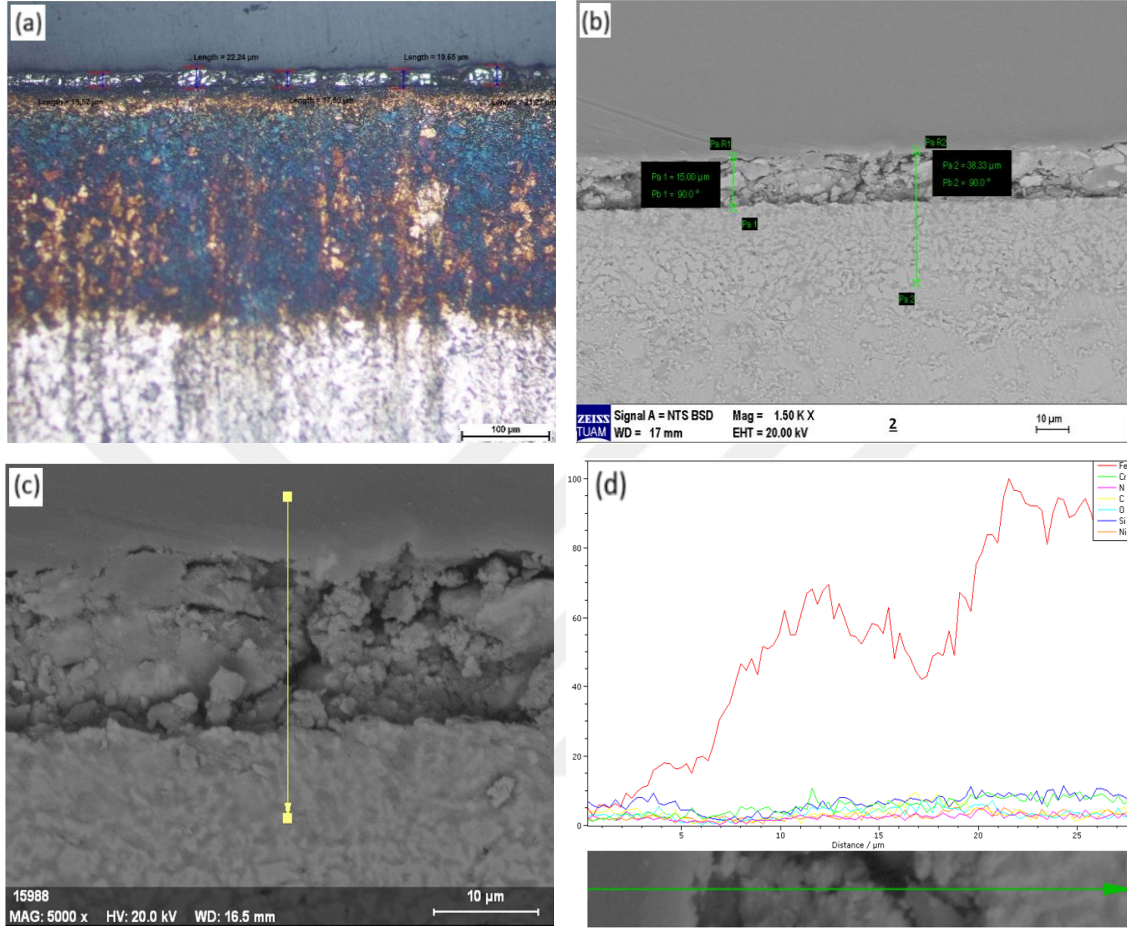
bozulması, gözeneklilik ve mikro çatlak oluşumları ile açıklanabilir. Literatürde de uzun süreli plazma oksidasyon işlemlerinin tabaka bütünlüğünü bozarak tribolojik özellikleri olumsuz etkilediği belirtilmektedir (Grigoriev vd. 2024).



Şekil 4.4 %25 O₂ 1,5h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numunenin a) optik mikroskop görüntüsü, b) SEM görüntüsü, c) SEM görüntüsü üzerinde EDX çizgi analizi, d) c şeklindeki görüntünün EDX sonucu.

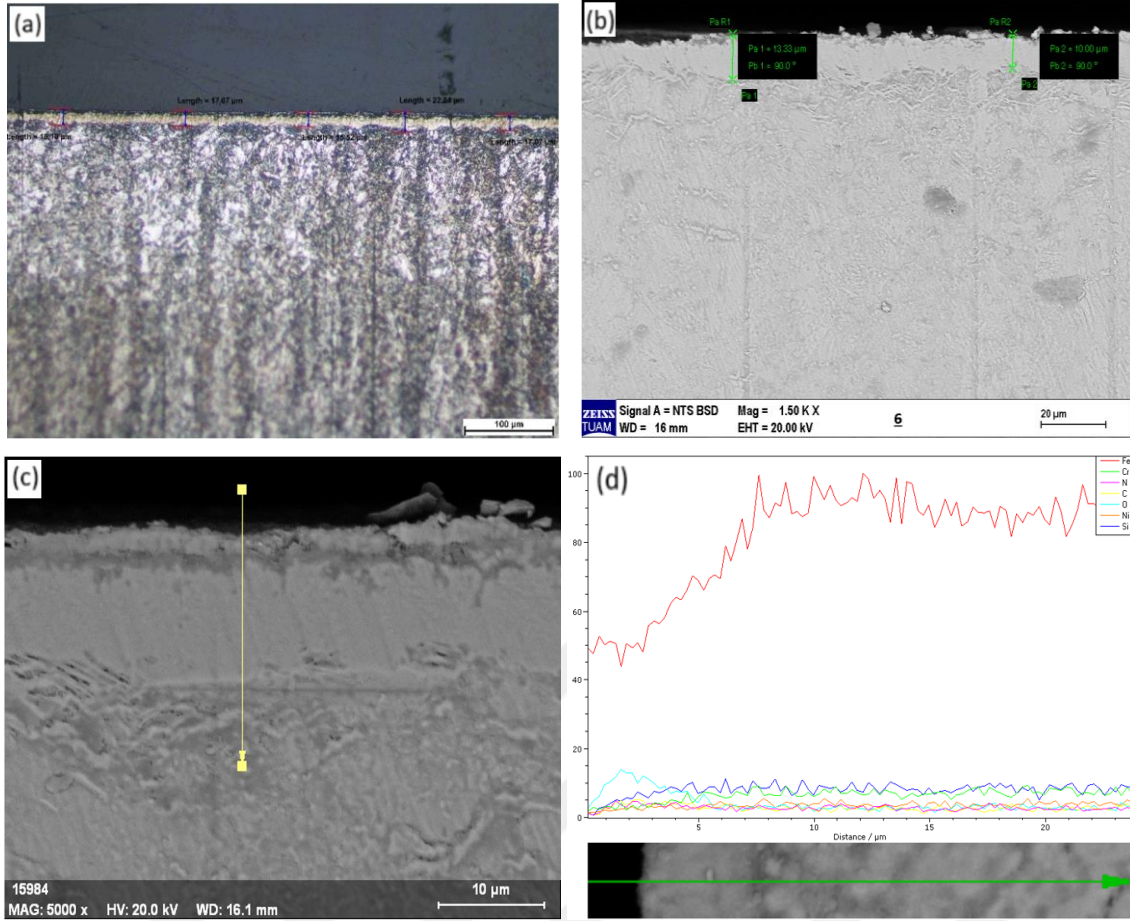
Şekil 4.5’de plazma nitrüleme sonrası %50 O₂ 0,5h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numuneye ait kesit mikro yapısı ve EDX analiz sonuçları görülmektedir. SEM görüntüsünde yüzeyde ortalama yaklaşık 15 µm kalınlığında tabaka ve bunun altında ortalama yaklaşık 23 µm genişliğinde difüzyon bölgesi tespit edilmiştir. Tabaka genel olarak süreklilik arz etmekte ve altlıkla iyi bir bağlanma göstermektedir. Bu yapı, koruyucu tabakanın yüksek yoğunluklu olarak geliştiğini göstermektedir (Aksöz vd. 2023). Bu morfoloji, kısa süreli yüksek oksijenli plazma oksidasyonun tabaka kalınlığını artırıcı etkisini ortaya koymakta ve yüzeyin koruyuculuğunu güçlendirmektedir. Literatürde de yüksek oksijen oranlarında kısa süreli plazma oksidasyonun kompakt

tabakalar oluşturarak aşınma ve sertlik özelliklerini iyileştirdiği belirtilmektedir (Yıldız vd. 2022, Lu vd. 2023, Grigoriev vd. 2024).



Şekil 4.5 %50 O₂ 0,5h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numunenin a) optik mikroskop görüntüsü, b) SEM görüntüsü, c) SEM görüntüsü üzerinde EDX çizgi analizi, d) c şeklindeki görüntünün EDX sonucu.

Şekil 4.6’da plazma nitrürleme sonrası %50 O₂ 1h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numuneye ait kesit mikro yapısı ve EDX analiz sonuçları görülmektedir. SEM görüntüsünde toplam ortalama tabaka kalınlığı yaklaşık 11,6 µm, bunu içinde oksit + beyaz tabaka ortalama kalınlığı yaklaşık 2,5 µm olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde literatürde de orta süreli plazma oksidasyon işlemlerinin ince fakat kompakt oksit tabakaları oluşturduğu, bunun aşınma performansını iyileştirirken sürtünme etkileşimini artırabileceği belirtilmektedir (Yıldız vd. 2022, Aksöz vd. 2023).

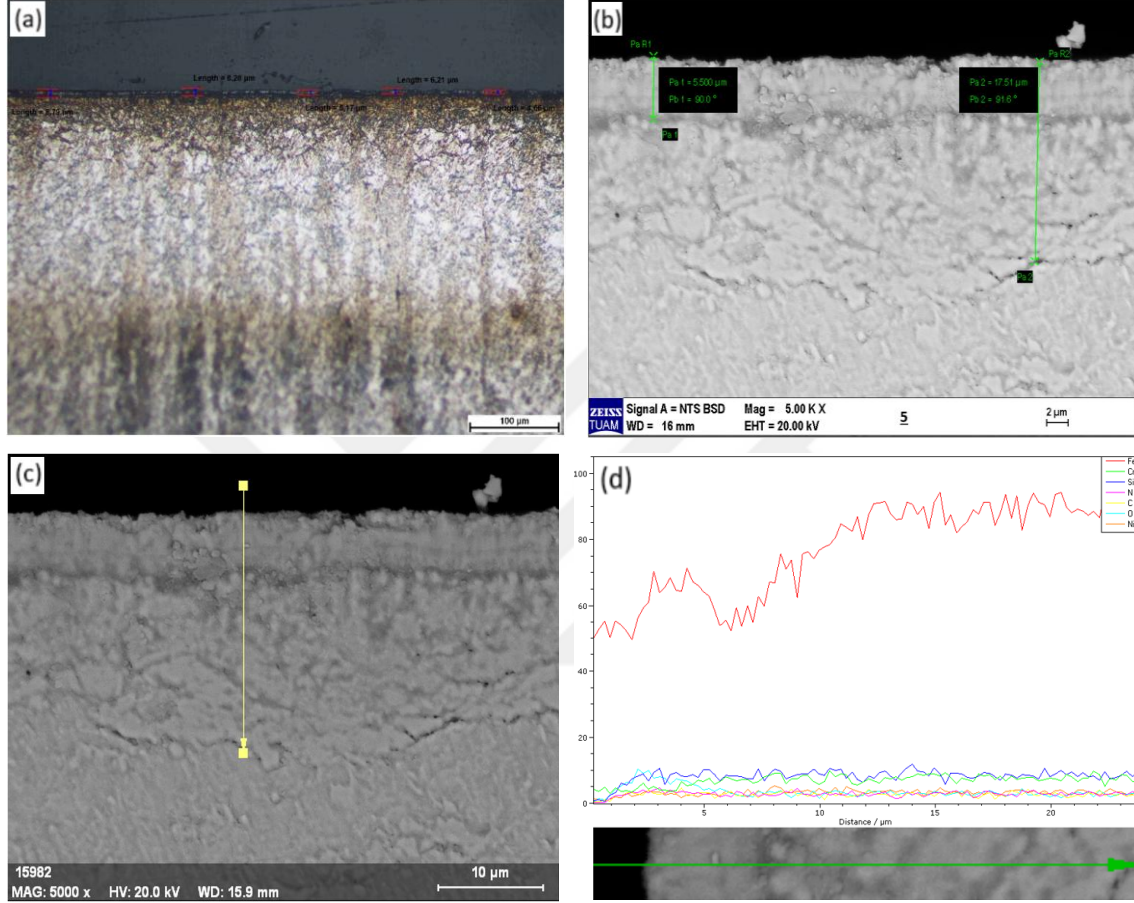


Şekil 4.6 %50 O₂ 1h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numunenin a) optik mikroskop görüntüsü, b) SEM görüntüsü, c) SEM görüntüsü üzerinde EDX çizgi analizi, d) c şeklindeki görüntünün EDX sonucu.

Şekil 4.7’de plazma nitrüleme sonrası %50 O₂ 1,5h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numuneye ait kesit mikro yapısı ve EDX analiz sonuçları görülmektedir. SEM kesit görüntüsünde yüzeyde ortalama yaklaşık 5,5 μm kalınlığında oksit + beyaz tabaka, bunun altında ise ortalama yaklaşık 10 μm derinliğinde difüzyon bölgesi tespit edilmiştir. Tabaka kalınlığı önceki 0,5 ve 1 saatlik oksidasyon sürelerine kıyasla belirgin bir şekilde azalmıştır.

Uzun süreli oksidasyon, oksit tabakasında mikro çatlak oluşumunu ve yapısal bütünlük kaybını hızlandırarak tabakanın koruyucu özelliğini sınırlamaktadır. Buna ek olarak literatürde benzer şekilde, uzun süreli oksidasyon işlemlerinin termomekanik gerilmeler nedeniyle oksit tabakalarda gerilim birikimine yol açarak mikro çatlak ve lokal soyulmalar oluşturabileceği bildirilmiştir (Sun vd. 2004, Dong vd. 2005). Bu mikro

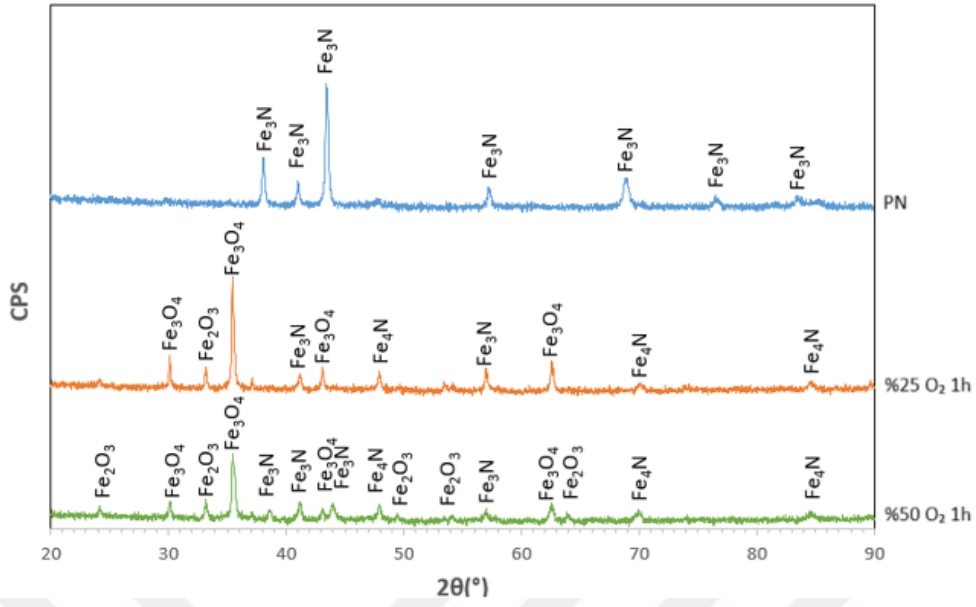
yapısal bozulmalar, tabakanın net kalınlığının düşmesine katkı sağlayabilmektedir. Sonuç olarak %50 O₂ 1,5h şartlarındaki oksidasyon işlemi, artık oksit tabaka kalınlığı açısından doyum bölgesine yaklaşıldığını ve süre uzamasının kalınlık artışı yerine yapısal bütünlüğün bozulmasına neden olabileceğini göstermektedir.



Şekil 4.7 %50 O₂ 1,5h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numunenin a) optik mikroskop görüntüsü, b) SEM görüntüsü, c) SEM görüntüsü üzerinde EDX çizgi analizi, d) c şeklindeki görüntünün EDX sonucu.

4.2 XRD Analizleri ve Sonuçları

17CrNiMo6 çeliğine uygulanan plazma nitrürleme (PN) işlemi ile birlikte farklı oksijen oranlarında gerçekleştirilen plazma oksidasyon işlemlerine ait X-ışını difraksiyon (XRD) grafikleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8 Plazma nitrülenmiş (PN), %25 O₂ 1h ve %50 O₂ 1h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numunelere ait XRD grafikleri

Grafikte görüldüğü gibi yalnızca nitrüleme işlemine tabi tutulan numunede, yüksek şiddetli ve belirgin Fe₃N fazlarına ait piklerin varlığı gözlemlenmiştir. Buda nitrüleme işleminin başarıyla gerçekleştiğini ve yüzeyde kompakt bir demir nitrür tabakasının oluştuğunu göstermektedir. Plazma nitrüleme sonrası %25 O₂ 1h şartlarında plazma oksidasyon işlemi uygulanan numunede nitrür fazlarının (Fe₃N, Fe₄N) yanında Fe₃O₄ (magnetit) ve Fe₂O₃ (hematit) gibi oksit fazları da belirgin şekilde tespit edilmiştir. Bu durum oksijenin yüzeyle etkileşime girerek üst yüzeyde bir oksit tabakası oluşturduğunu ancak alt katmanlardaki nitrür fazlarının kısmen korunabildiğini göstermektedir. Plazma nitrüleme sonrası %50 O₂ 1h şartlarında plazma oksidasyon işlemi uygulanan numunede nitrür fazlarının şiddetlerinde belirgin bir düşüş meydana gelmiş, bununla birlikte oksit fazlarının baskın hale geldiği gözlenmiştir. Özellikle hematit (Fe₂O₃) ve magnetit (Fe₃O₄) fazlarının artışı, yüksek oksijen oranının nitrür tabakasını büyük oranda oksitleyerek yüzeyde yeni faz dönüşümlerine neden olduğunu göstermektedir.

XRD analizlerinde PN numunesinde baskın şekilde Fe₃N fazı tespit edilmiş, Fe₄N fazına rastlanmamıştır. Bu durum, uygulanan nitrüleme parametrelerinin (480 °C’de 20 saat) Fe₃N fazının oluşumu için uygun olduğunu göstermiştir. Bu sonuç literatürde düşük sıcaklık ve uzun süreli nitrüleme işlemleriyle benzer şekilde ifade edilen Fe₃N fazının kararlı yapısını desteklemektedir (Menthe vd. 1995, Bell vd. 2002).

4.3 Mikrosertlik Sonuçları

Numunelerin yüzeyinden alınan mikrosertlik sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, plazma nitrürleme (PN) işlemi uygulanan numunenin ortalama sertliği 527 HV_{0.3} olarak bulunmuştur. Bu değer işlemsiz numunelere kıyasla belirgin bir artış göstermekte olup nitrürleme işlemi ile yüzeyde oluşan sert nitrit fazlarının yüzey dayanımını artırdığı literatürde de vurgulanmaktadır (Apelfeld vd. 2021, Mindivan 2022).

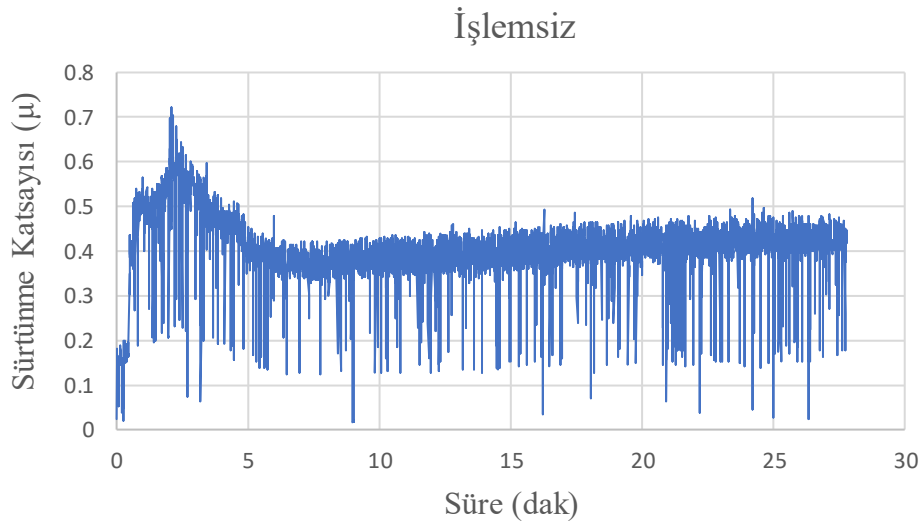
Plazma oksidasyon (PO) işlemi uygulanan numuneler değerlendirildiğinde, özellikle %25 O₂ 0,5h koşulunda ortalama 671 HV_{0.3} sertlik değeri ile en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Bu durum oksit tabakasının oluştuğunu, bu tabakanın da yüzey sertliğini artırdığını göstermektedir. Literatürde, plazma oksidasyon uygulamalarının hem sertlik hem de bütünlüğü iyileştirdiği belirtilmiştir (Sun vd. 2023). İşlem süresinin artmasıyla sertlik değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Örneğin %25 O₂ 1h numunesinin ortalama sertliği 509 HV_{0.3}, %25 O₂ 1,5h numunesinin ise 477 HV_{0.3} sertlik değerine düşmüştür. Benzer eğilim %50 O₂ koşullarında da görülmektedir. Özellikle %50 O₂ 1,5h numunesinde ortalama 307 HV_{0.3} sertlik değerine kadar gerilemiştir. Bu durum uzun süreli oksidasyon işlemlerinde oksit tabakanın bütünlüğünü kaybetmesi, gevrekleşmesi ve mikro çatlak oluşumuna bağlı olarak yüzey sertliğinde düşüş yaşandığı şeklinde yorumlanabilir. Literatürde de uzun süreli oksidasyonun tabaka stabilitesini bozarak sertlik üzerinde olumsuz etkilere yol açabileceği bildirilmiştir (Apelfeld vd. 2021).

Çizelge 4.1 Numunelerin sertlik (HV_{0.3}) ölçüm sonuçları.

Numune	Ortalama
PN	526,74
%25 O ₂ 0,5h	670,94
%25 O ₂ 1h	509,39
%25 O ₂ 1,5h	477,49
%50 O ₂ 0,5h	475,07
%50 O ₂ 1h	515,10
%50 O ₂ 1,5h	306,77

4.4 Aşınma Analizleri ve Sonuçları

Şekil 4.9’da işlemsiz 17CrNiMo6 numunesinin sürtünme katsayısının zamana bağlı değişim grafiği görülmektedir. Testin başlangıç aşamasında sürtünme katsayısında ani bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum karşı yüzeyle ilk temasın gerçekleştiği alıştırma (run-in) dönemine karşılık gelmektedir. Bu aşamada temas yüzeyindeki mikro düzensizlikler, oksit birikintileri ve yüzey pürüzlülüğünden kaynaklı olarak yüksek sürtünme değerleri meydana gelmektedir (Zambrano vd. 2024). İlk birkaç dakika içerisinde bu ani yükselişi takiben sürtünme katsayısında hızlı bir düşüş gerçekleşmiş ve sistem belirli bir süre sonra yaklaşık 0,4 civarında kararlı bir rejime ulaşmıştır. Ancak bu kararlılık sınırlı düzeyde kalmış, test süresince ani dalgalanmalar ve mikro seviyede keskin düşüşler gözlenmiştir. Bu dalgalı yapı, yüzeydeki aşınma birikintileri, lokal yapışma-kopma olayları (stick-slip etkisi) ve yüzeyde oluşan mikroskobik hasarların sürekliliğinden kaynaklanmış olabilir. Bu bağlamda elde edilen grafik işlemsiz numunenin kararsız bir sürtünme davranışı sergilediğini dolayısıyla yüksek sürtünme katsayısı ve düzensiz yüzey etkileşimlerinin tribolojik performansı olumsuz etkilediğini ortaya koymaktadır (Kolawole vd. 2024, Yao vd. 2024).

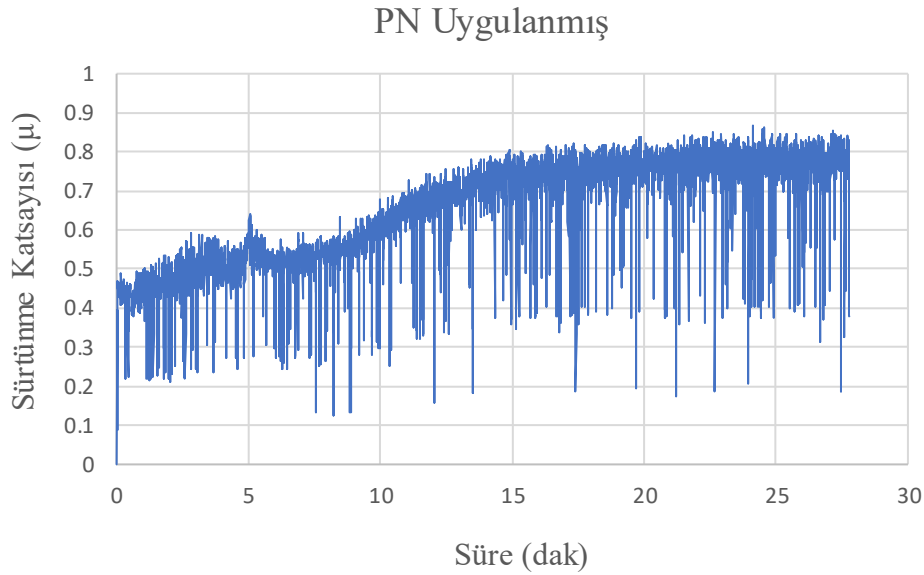


Şekil 4.9 İşlemsiz 17CrNiMo6 numunesine ait sürtünme katsayısı-süre grafiği.

Şekil 4.10’da sunulan grafikte plazma nitrürleme (PN) işlemine tabi tutulmuş 17CrNiMo6 numunesinin sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi verilmiştir.

Sürtünme katsayısı testin başlangıcında 0,5 seviyelerindeyken zaman ilerledikçe bir artış göstermekte ve test sonuna doğru 0,8 seviyelerine kadar ulaşmaktadır. Genel eğilim sürtünme katsayısında artış gösterdiği yönündedir.

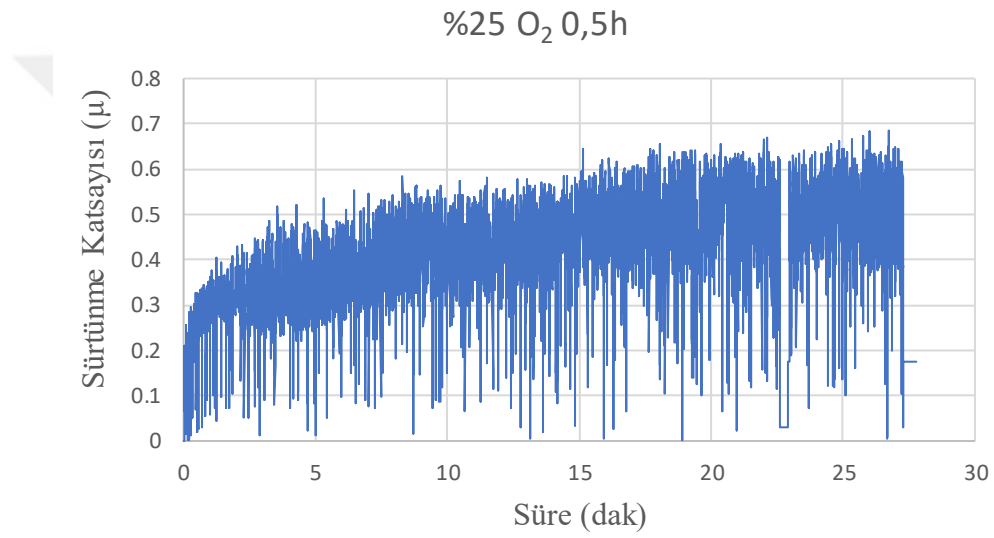
Plazma nitrüleme işlemi sonrası yüzeyde oluşan Fe_3N fazları yüzey sertliğini artırmakta ve aşınma direncini iyileştirmektedir (Manova vd. 2024). Ancak bu sert fazların yüzeyde oluşturduğu kırılgenlik sürtünme esnasında mikro çatlamlar ve parçalanmalara neden olabilmektedir (Zambrano vd. 2024). Bu da grafikte görülen ani düşüşlerin nedeni olabilir. Burada dikkat çeken nokta 5-15 dakika arasında sürtünme katsayısında belirli bir artış varken sonrasında stabil devam etmesidir. Bu bağlamda plazma nitrüleme sonrası yüzeydeki mikroskobik çıkıntılar, aşınma kalıntıları, yüzeyde oluşan Fe_3N fazları buna sebep olmuş olabilir (Yao vd. 2024, Cui vd. 2025).



Şekil 4.10 Plazma Nitrülenmiş (PN) numuneye ait sürtünme katsayısı-süre grafiği.

Şekil 4.11’de verilen grafikte plazma nitrüleme (PN) sonrası %25 O_2 0,5h şartlarında plazma oksidasyon işlemi uygulanmış numunenin sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi verilmiştir. Grafikte başlangıçtaki sürtünme katsayısı yaklaşık 0,2-0,3 aralığında olup test süresince düzenli ve kontrollü bir artış göstererek yaklaşık 0,6-0,7 bandına kadar yükselmiştir. Testin ilk 5 dakikası boyunca sürtünme katsayısı değerlerinde hızlı fakat stabil bir artış söz konusudur. Bu durum, yüzeyde nitrüleme sonrasında oluşan ince oksit

tabakasının ilk temasta aşınarak yeniden düzenlenmesi ve temas yüzey alanının artışı ile ilişkilendirilebilir (Liu vd. 2024). Bu alıştırma aşamasının ardından 5-15 dakika arasında sürtünme katsayısı değerlerinde artış devam etmiş, ancak artış hızı göreceli olarak azalarak daha kararlı bir seyir izlemiştir. Testin son aşamasında 15-25 dakika arasında sürtünme katsayısı değerleri genellikle sabit seviyelere ulaşarak tribolojik dengenin sağlandığını göstermektedir. Bu durum plazma nitrürleme sonrası kontrollü kısa süreli oksidasyon işlemi ile yüzeyde ince fakat yeterince dayanıklı bir oksit katmanının oluştuğunu göstermektedir (Manova vd. 2024).

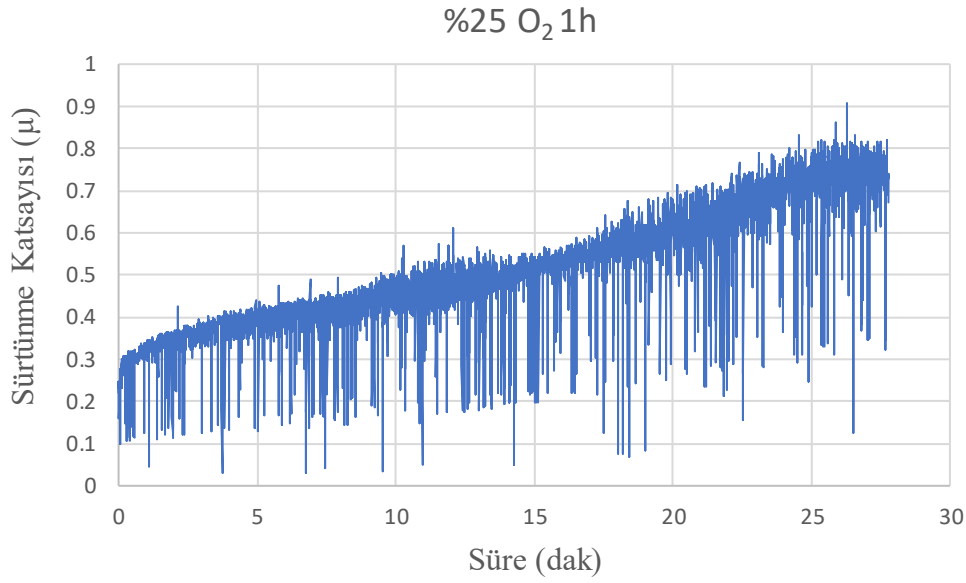


Şekil 4.11 %25 O₂ 0,5h şartlarındaki numuneye ait sürtünme katsayısı-süre grafiği.

Şekil 4.12’de yer alan grafikte plazma nitrürleme sonrası %25 O₂ 1h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numuneye ait sürtünme katsayısı-süre değişimi verilmiştir. Sürtünme katsayısı testin başlangıcında yaklaşık 0,3-0,35 seviyelerindedir ve zaman ilerledikçe sürekli bir artış eğilimi göstermekte, testin sonuna doğru 0,8 seviyelerine ulaşmaktadır. Bu artış bir önceki işlem parametresine (%25 O₂ 0,5h) kıyasla daha belirgin ve daha dik eğimli bir seyir izlemektedir.

Grafikte sürtünme katsayısının yaklaşık 30 dakikalık test süresi boyunca sürekli olarak artması, yüzeyde meydana gelen değişimlerin tribolojik performans üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. 1 saatlik oksidasyon süresi, 0,5 saate göre daha kalın bir

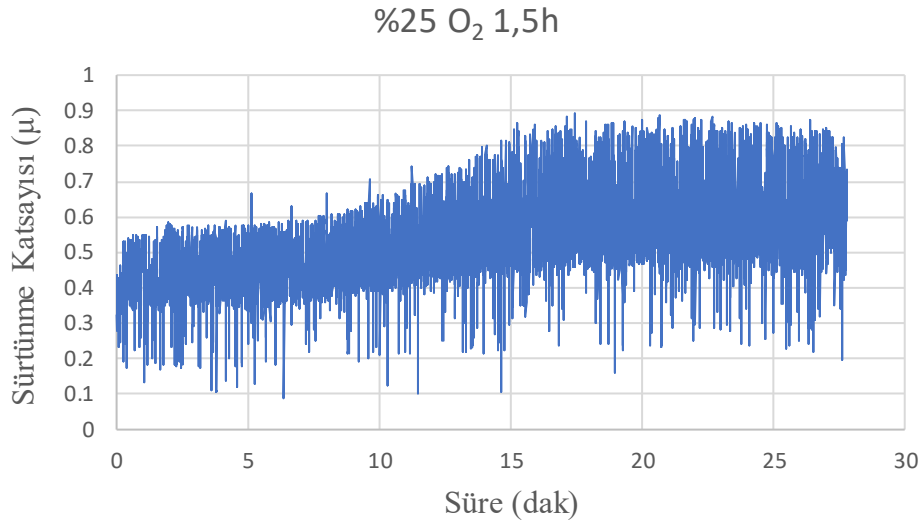
oksit tabakası oluşumuna neden olmuş olabilir (Liu vd. 2024). Bu kalınlaşan tabaka başta koruyucu gibi davranmakta ancak ilerleyen dakikalarda bu tabakanın mikro çatlamlarla zayıflaması veya aşınması sonucu yüzey altındaki sert nitrür fazlarına erişilmesiyle birlikte sürtünme katsayısında artış meydana gelmektedir (Figuerola vd. 2023). Ayrıca daha uzun süreli oksidasyon işlemiyle oluşan Fe_3O_4 ve Fe_2O_3 fazlarının faz oranları değişebilir. Özellikle hematit (Fe_2O_3) oranı arttıkça yüzeyin gevrekliği artmakta ve bu durum sürtünme sırasında kırılmalara neden olabilmektedir (Zambrano vd. 2024, Yao vd. 2024). Bu süreç sürtünme katsayısının düzensiz yükselişine ve sistemdeki stabilitenin zamanla bozulmasına yol açar. Bir önceki işlem koşulu ile kıyaslandığında, 1 saatlik oksidasyonun daha yüksek sürtünme katsayısı ve daha az tribolojik kararlılık sağladığı görülmektedir.



Şekil 4.12 %25 O₂ 1h şartlarındaki numuneye ait sürtünme katsayısı-süre grafiği.

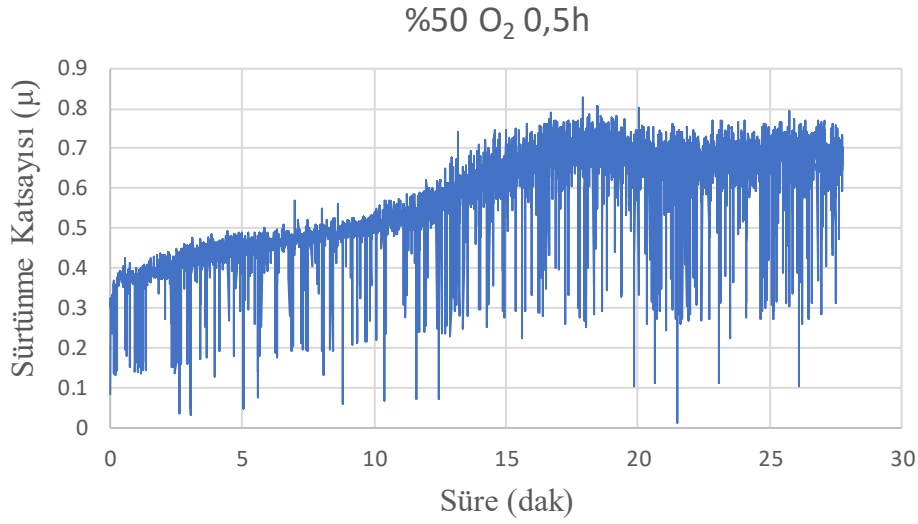
Şekil 4.13’de gösterilen grafikte plazma nitrüleme sonrası %25 O₂ 1,5h şartlarında plazma oksidasyon uygulanan numuneye ait sürtünme katsayısının zamanla değişimi verilmiştir. Testin başlangıcında sürtünme katsayısı yaklaşık 0,45-0,50 seviyelerindedir ve zaman ilerledikçe kademeli olarak artarak 0,8 seviyelerine ulaşmakta, ardından testin sonlarına doğru dalgalı ama nispeten dengeli bir eğilim göstermektedir.

İki işlem koşuluyla (%25 O₂ 0,5h ve %25 O₂ 1h) karşılaştırıldığında başlangıçta daha yüksek bir katsayı ile başladığı görülmektedir. Bu verilerden, 1,5 saatlik oksidasyon süresinin yüzeyde daha kalın bir oksit tabakası oluşumuna yol açtığı ancak bu tabakanın bir süre sonra kısmen stabilize olarak tribolojik anlamda dengeye ulaştığı anlaşılmaktadır (Cui vd. 2025). Bu kalın tabakanın daha kırılğan olması, testin orta kısmında ani dalgalanmaların sıkça görülmesine neden olmuştur.



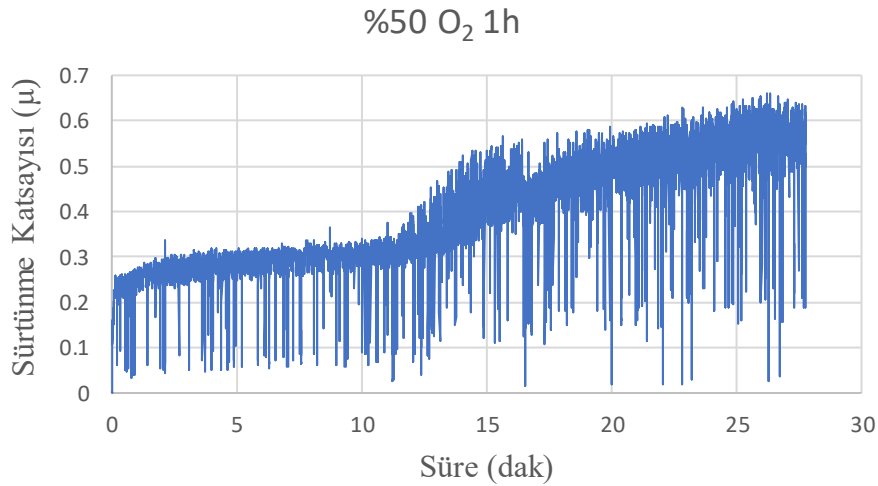
Şekil 4.13 %25 O₂ 1,5h şartlarındaki numuneye ait sürtünme katsayısı-süre grafiği.

Şekil 4.14’de sunulan grafikte plazma nitrürleme işleminden sonra %50 O₂ 0,5h şartlarında plazma oksidasyon uygulanan numuneye ait sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi görülmektedir. Testin başlangıç aşamasında sürtünme katsayısı yaklaşık 0,35-0,4 seviyesindedir. Zamanla kademeli bir artış göstererek 15. dakikadan sonra yaklaşık 0,75 seviyesine ulaşmakta ardından testin sonuna kadar bu seviyelerde kalmaktadır. Bu davranış yüzeyde oluşan oksit tabakanın mekanik olarak dengeli ve kararlı bir yapı sergilediğini göstermektedir. Sürtünme katsayısının 15. dakikadan sonra dengelenmesi yüzey ile karşı yüzey arasında istikrarlı bir temas yüzeyi oluştuğunu göstermektedir (Yao vd. 2024). Bu da optimum oksit faz dağılımı ve yüzey sertliğinin doğru oranda geliştiğine işaret etmektedir.



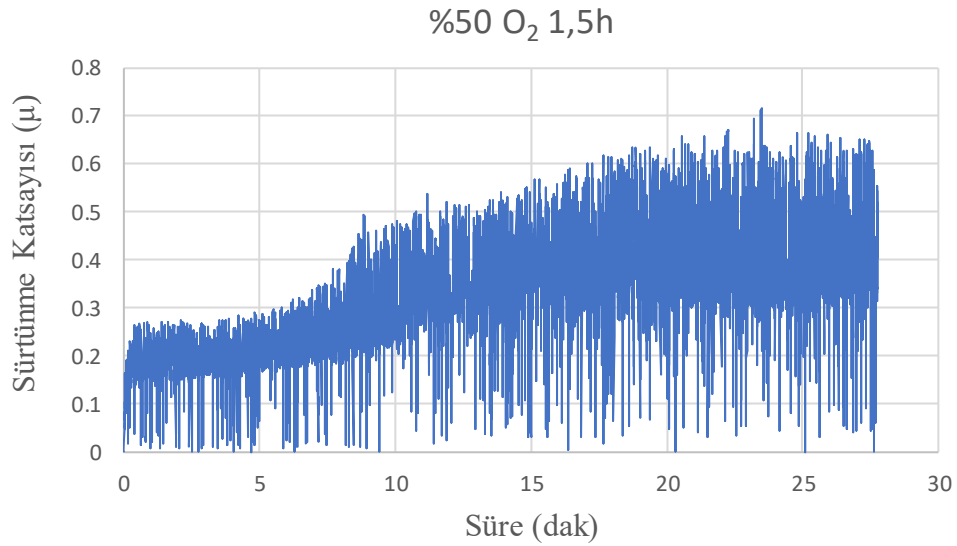
Şekil 4.14 %50 O₂ 0,5h şartlarındaki numuneye ait sürtünme katsayısı-süre grafiği.

Şekil 4.15’de yer alan grafikte plazma nitrüleme işleminden sonra %50 O₂ 1h şartlarında plazma oksidasyon uygulanmış numunenin sürtünme katsayısına göre zamana bağlı olarak incelenmiştir. Sürtünme katsayısı başlangıçta yaklaşık 0,25-0,30 aralığında başlamış, 10-15. dakikalar arasında belirgin bir artış eğilimi göstermiş, ardından yaklaşık 0,6 seviyelerine ulaşmış testin sonuna kadar kararlı bir rejime geçmiştir. 10-15. dakikalarda meydana gelen artışa, yüzeydeki oksit tabakanın aşınmaya başlaması, aşınma kalıntılarının artması, oksit tabakasının altındaki fazlara geçiş gibi nedenler sebep olmuş olabilir (Park vd. 2023, Luo vd. 2025).



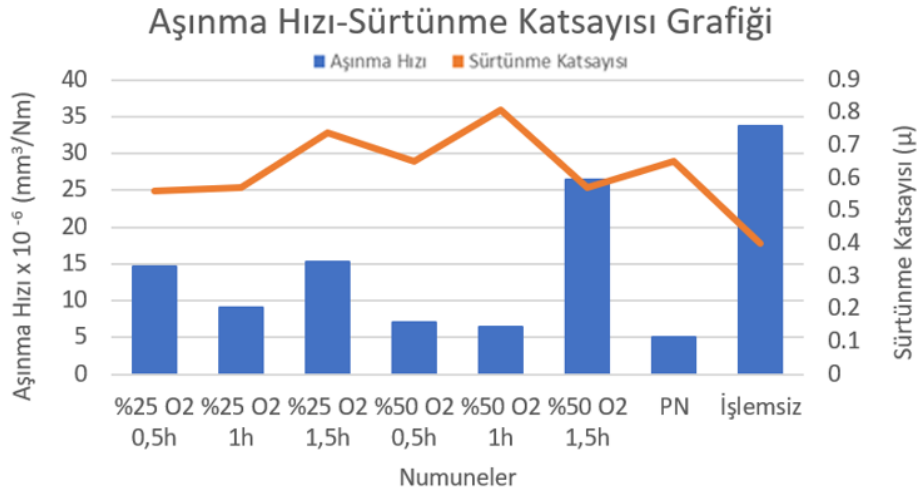
Şekil 4.15 %50 O₂ 1h şartlarındaki numuneye ait sürtünme katsayısı-süre grafiği.

Şekil 4.16’da yer alan grafikte plazma nitrürleme işleminden sonra %50 O₂ 1,5h şartlarında plazma oksidasyon işlemi uygulanmış numuneye ait sürtünme katsayısının zamana bağlı değişimi görülmektedir. Sürtünme katsayısı testin başında yaklaşık 0,25-0,30 aralığında olup, 5. dakikadan sonra belirgin bir artış eğilimi göstermektedir. 15. dakikadan sonra ise değerler 0,55-0,65 aralığında nispeten dengelenmekte ancak dalgalı bir yapı sergilemektedir. Bu eğilim, oksidasyon süresinin uzamasına bağlı olarak yüzeyde daha kalın ve gözenekli bir oksit tabakası oluştuğunu göstermektedir (Park vd. 2023, Luo vd. 2025). Özellikle Fe₂O₃ sert ve gevrek fazlardır bu nedenle test sırasında bu tabaka çatlayarak yüzeyde mekanik bütünlük kaybına neden olabilir (Zhou vd. 2024, Liu vd. 2024). Bu tür kırılğan yapıların varlığı grafikte gözlemlenen düzensiz ve sık dalgalanmalarla sebep olabilir (Figueroa vd. 2023).



Şekil 4.16 %50 O₂ 1,5h şartlarındaki numuneye ait sürtünme katsayısı-süre grafiği.

Plazma nitrürlenmiş (PN), işlemsiz ve farklı plazma oksidasyon parametrelerinin uygulandığı numunelerin aşınma hızı-sürtünme katsayısı karşılaştırmalı grafiği Şekil 4.17’de verilmiştir.

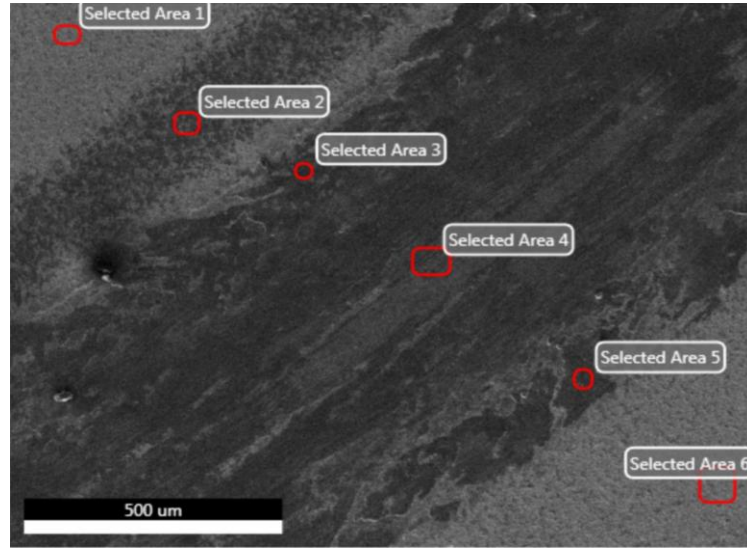


Şekil 4.17 Plazma nitrülenmiş (PN), işlemsiz ve farklı plazma oksidasyon parametrelerinin uygulandığı numunelerin aşınma hızı-sürtünme katsayısı karşılaştırmalı grafiği.

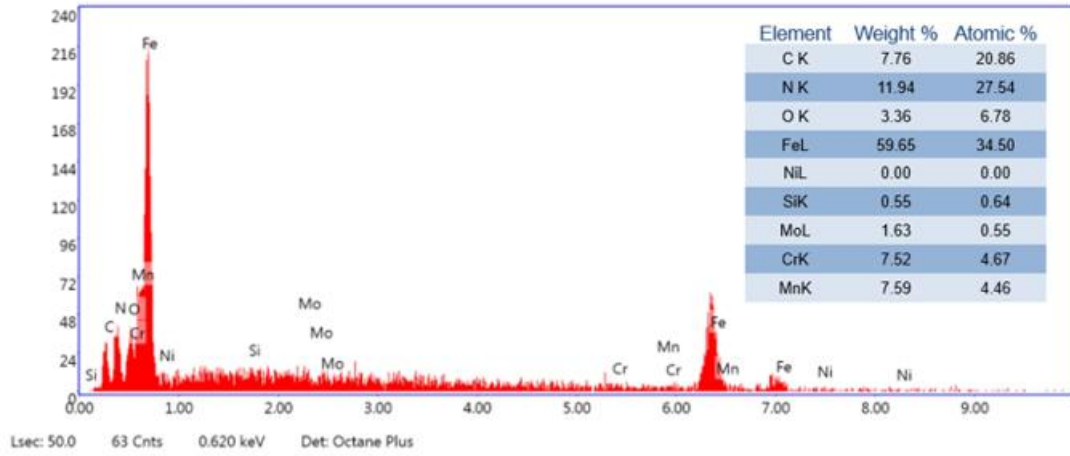
Grafik incelendiğinde işlemsiz numunenin en yüksek aşınma hızına ($\sim 3.4 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) sahip olduğunu ve düşük sürtünme katsayısı (~ 0.45) ile en zayıf performansı sergilediğini göstermiştir. Plazma nitrüleme (PN) sonrası aşınma hızı belirgin biçimde azalmış ($\sim 0.5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$), bu da nitrür fazlarının yüzey dayanımını artırdığını ortaya koymuştur (Tao vd. 2021). %25 O₂ ile plazma oksidasyon işlemlerinde özellikle 1 saat sürede en düşük aşınma değerleri ($\sim 0.9 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$) elde edilmiştir. Bu durum kompakt oksit filmin koruyuculuğu ile ilişkilendirilmekte ve literatürde de orta süreli oksidasyonun optimum sonuçlar sağladığı belirtilmektedir (Grigoriev vd. 2024). Ancak 1,5 saatlik uygulamada film bütünlüğü bozulmuş, aşınma hızı ve sürtünme artmıştır. %50 O₂ koşullarında da 0,5 ve 1 saatlik işlemler düşük aşınma hızları ile öne çıkarken, 1,5 saat sonrası tabaka stabilitesinin azalması sonucu aşınma değerleri tekrar yükselmiştir (Chekalova ve Zhuravlev 2021). Genel olarak %25 O₂ 1h ve %50 O₂ 1h parametreleri optimum tribolojik performans koşulları olarak belirlenmiş, bu sonuçlar orta süreli oksidasyonun aşınma direncini en etkin şekilde artırdığına dair literatür bulgularıyla uyumludur (Tao vd. 2021, Grigoriev vd. 2024).

4.5 Aşınma Bölgelerinin SEM ve EDX Analizleri

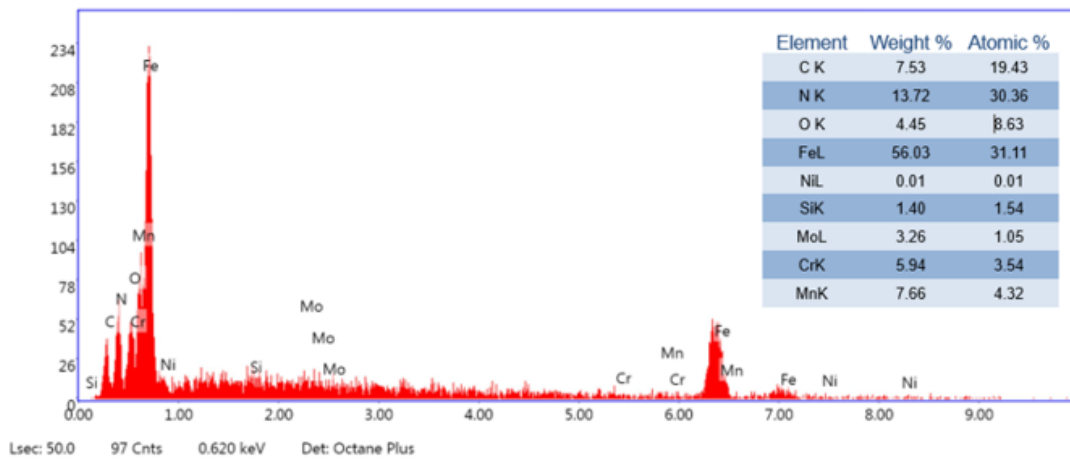
Plazma Nitrülenmiş (PN) numunenin SEM mikroskobu ile alınan aşınma izi görüntüsü ve bu iz çevresindeki EDS verileri Şekil 4.18’de verilmiştir.



Selected Area 1 - EDS

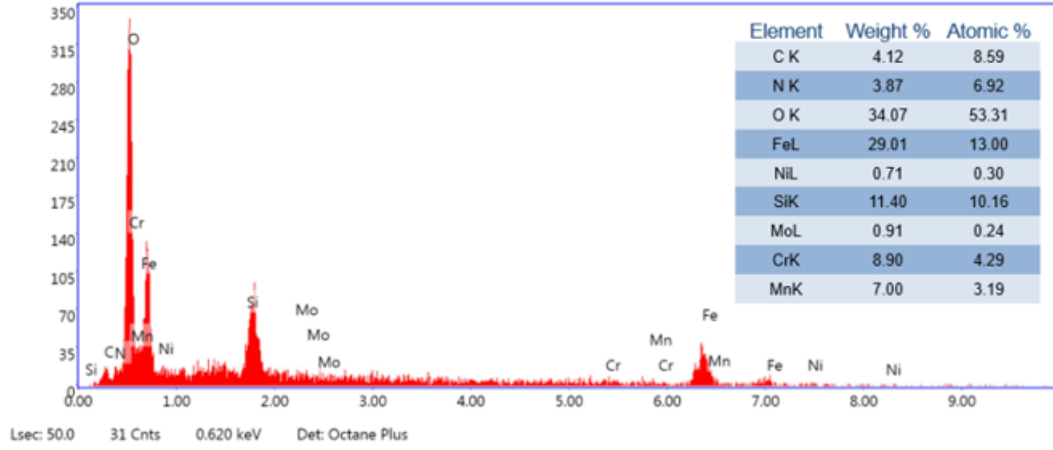


Selected Area 2 - EDS

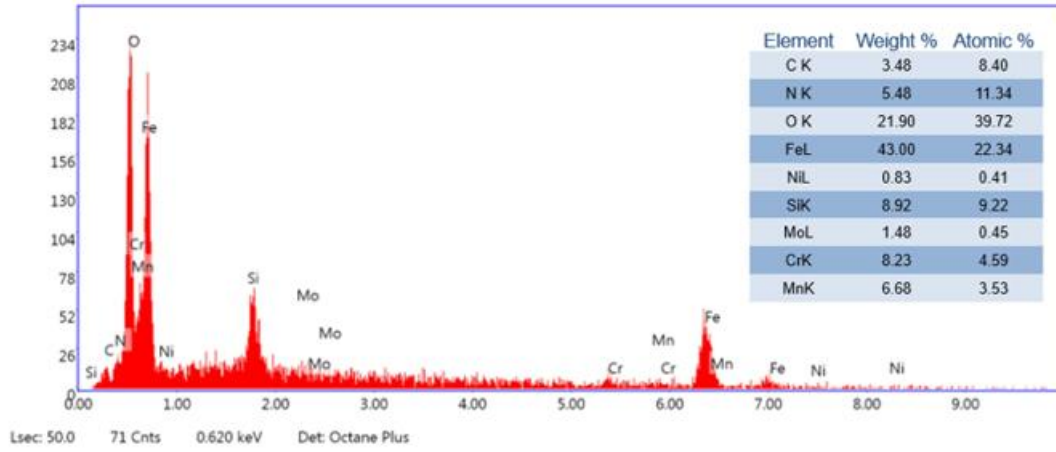


Şekil 4.18 Plazma Nitrülenmiş (PN) numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.

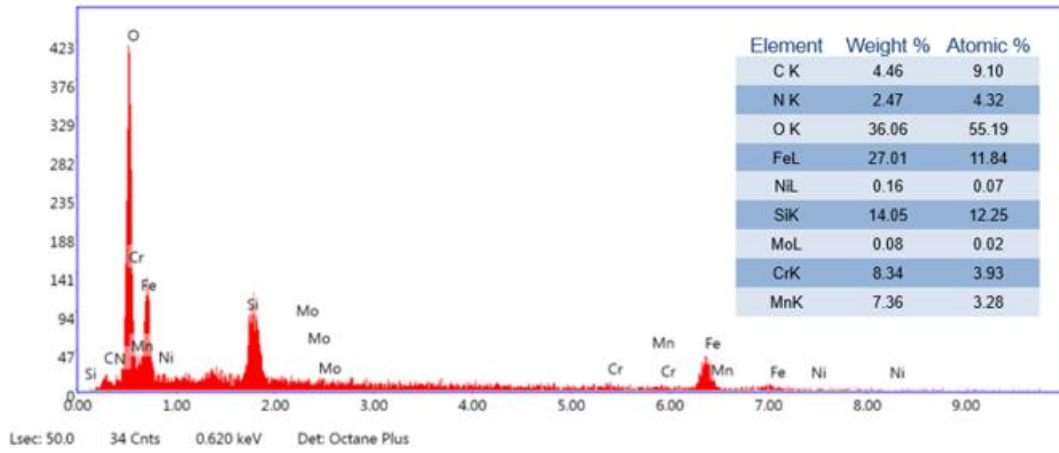
Selected Area 3 - EDS



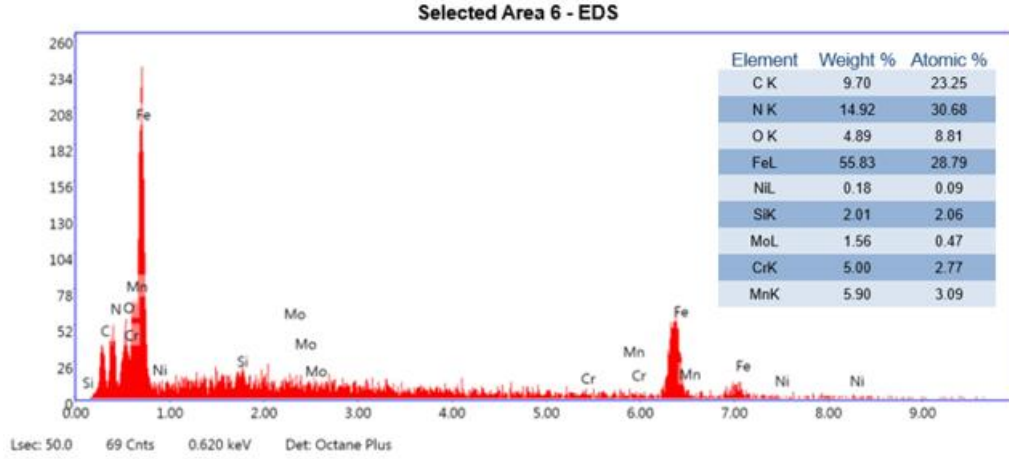
Selected Area 4 - EDS



Selected Area 5 - EDS



Şekil 4.18 (Devam) Plazma Nitrülenmiş (PN) numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.



Şekil 4.18 (Devam) Plazma Nitrülenmiş (PN) numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.

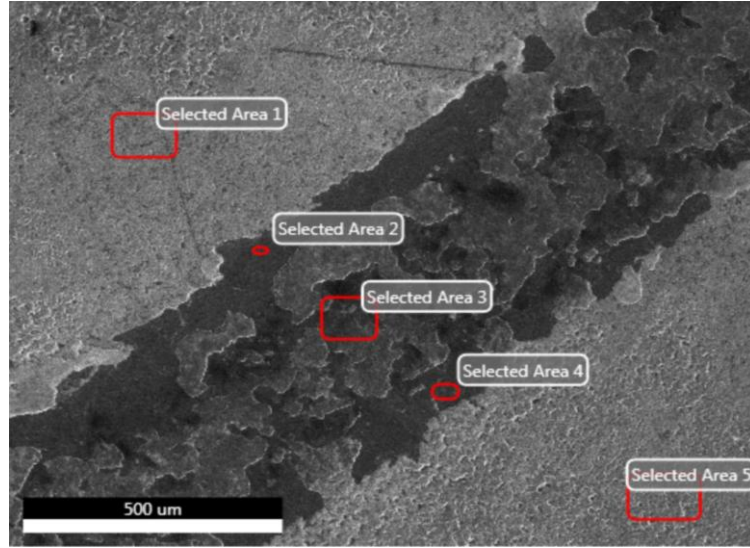
Şekil 4.18’de verilen plazma nitrüleme (PN) uygulanmış numune yüzeyinde birden fazla aşınma mekanizmasının eş zamanlı olarak etkili olduğunu söylenebilir. Görüntüde gözlenen yönlenmiş ve paralel çizik izleri, yüzeyde belirgin bir abrazif aşınma etkisi göstermektedir. Bazı bölgelerde yüzeyin düzleşmiş yapısı ve hafif malzeme yığılmaları, temas yüzeyinde meydana gelen soğuk kaynaklama ve kopmaların sonucu olarak adheziyif aşınmayı göstermektedir.

Çizelge 4.2 Plazma Nitrülenmiş (PN) numunenin bölgesel element % ağırlık oranları.

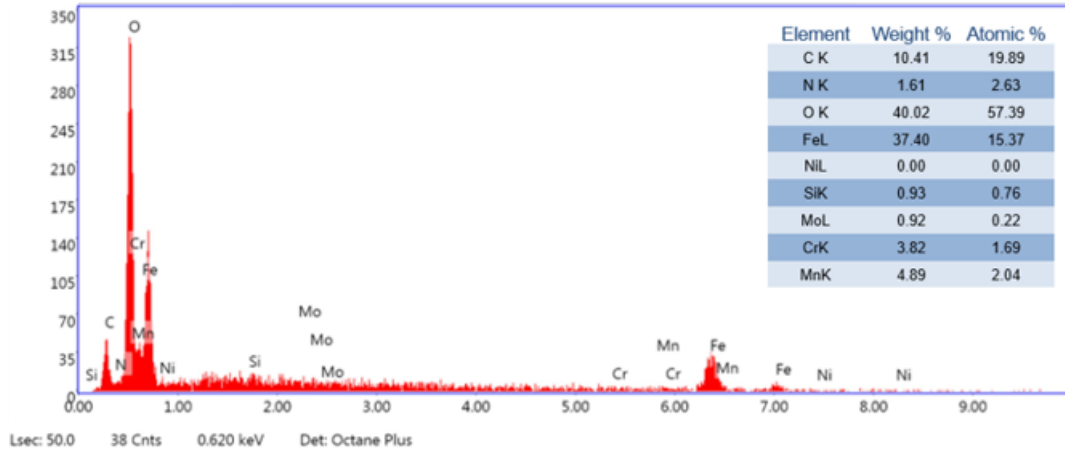
Elementler (% Ağırlık)									
Bölge	C	N	O	Fe	Ni	Si	Mo	Cr	Mn
1	7.76	11.94	3.36	59.65	0	0.55	1.63	7.52	7.59
2	7.53	13.72	4.45	56.03	0.01	1.40	3.26	5.94	7.66
3	4.12	3.87	34.07	29.01	0.71	11.40	0.91	8.90	7.00
4	3.48	5.48	21.90	43.00	0.83	8.92	1.48	8.23	6.68
5	4.46	2.47	36.06	27.01	0.16	14.05	0.08	8.34	7.36
6	9.70	14.92	4.89	55.83	0.18	2.01	1.56	5.00	5.90

Çizelge 4.2’deki verilere göre özellikle 3, 4 ve 5 bölgelerinde tespit edilen yüksek oksijen içeriği bu bölgelerde sürtünme esnasında yüzey sıcaklığının artmasıyla lokal oksitlenme gerçekleşip oksidatif aşınma oluşturmıştır.

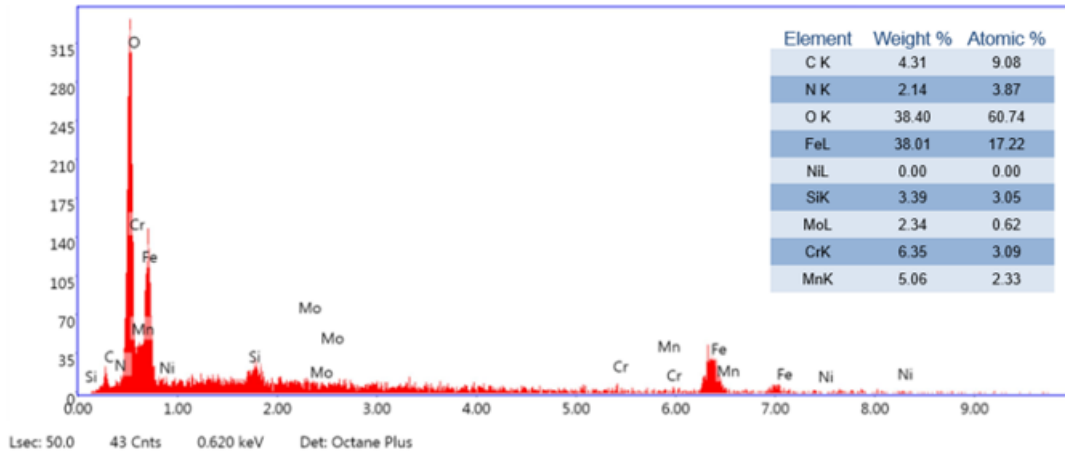
%25 O₂ 0,5h şartlarındaki numunenin SEM mikroskobu ile alınan aşınma izi görüntüsü ve bu iz çevresindeki EDS verileri Şekil 4.19’da verilmiştir.



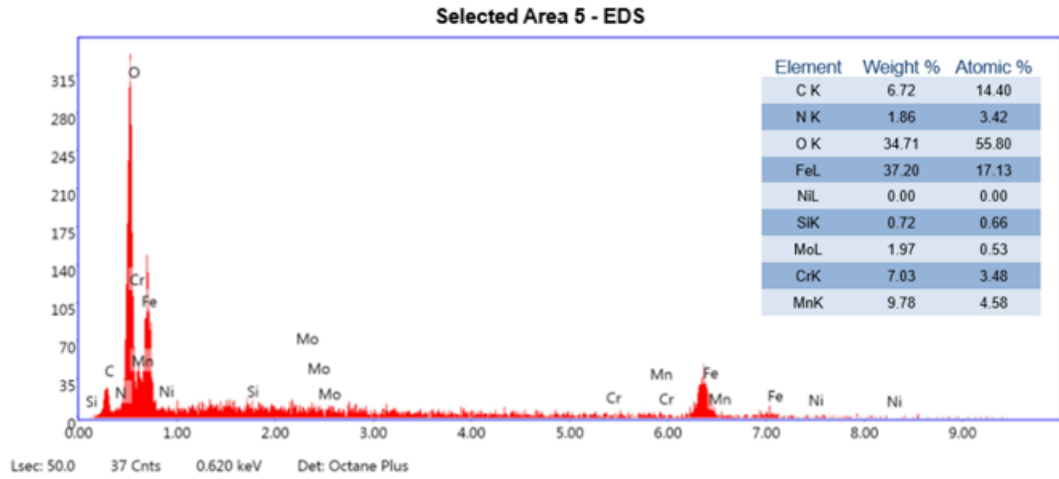
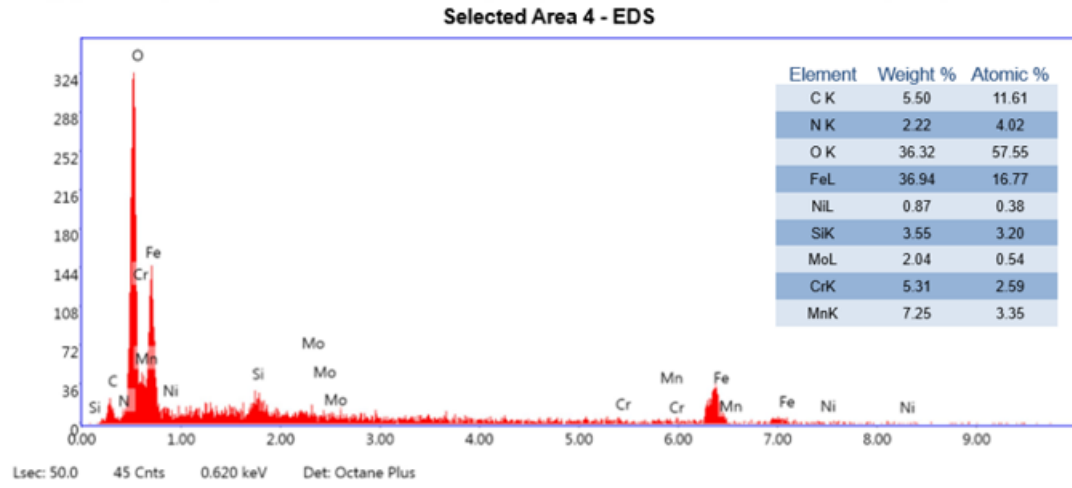
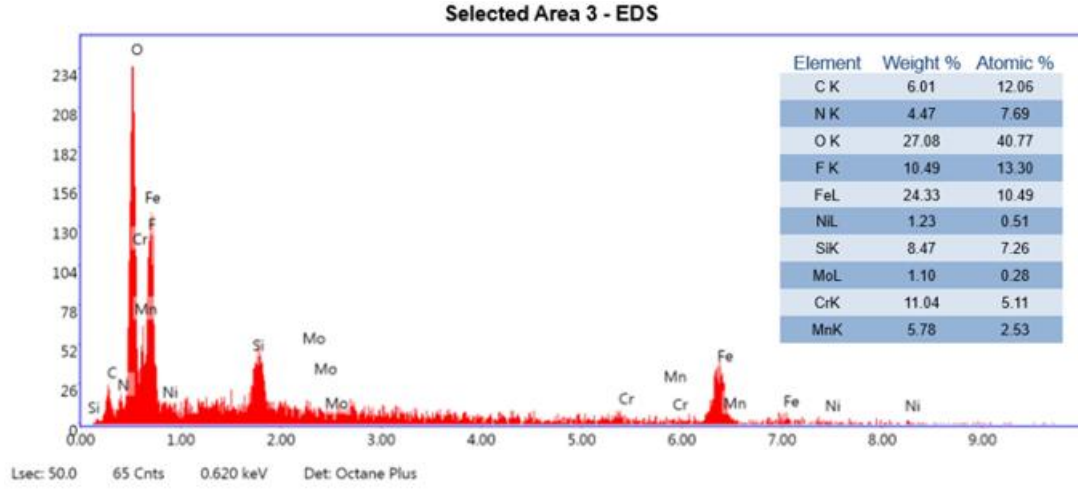
Selected Area 1 - EDS



Selected Area 2 - EDS



Şekil 4.19 %25 O₂ 0,5h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.



Şekil 4.19 (Devam) %25 O₂ 0,5h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.

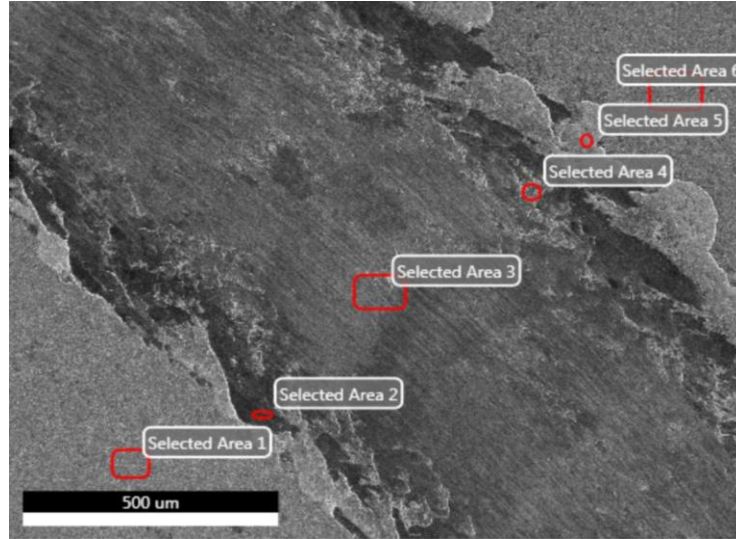
Şekil 4.19’da yüzeyde farklı kontrastlara sahip alanlar belirgin şekilde seçilebilmektedir. Bu durum mikroyapıda faz farklılıklarının veya oksit oluşumlarının mevcut olduğunu göstermektedir. Özellikle merkezi kısımlarda gözlenen daha koyu bölgeler, oksit fazların yoğunlaştığı yerlerdir. Sınır bölgelerinde ise aşınma izleri, pullanma ve mikro çatlaklar dikkat çekmektedir.

Çizelge 4.3 %25 O₂ 0,5h şartlarındaki numunenin bölgesel element % ağırlık oranları.

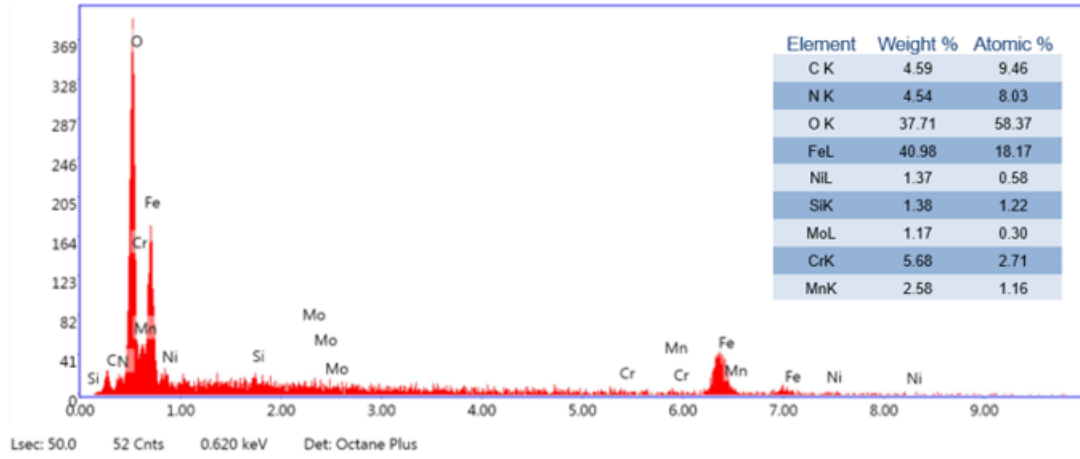
Bölge	Elementler (% Ağırlık)								
	C	N	O	Fe	Ni	Si	Mo	Cr	Mn
1	10.41	1.61	40.02	37.40	0	0.93	0.92	3.82	4.89
2	4.31	2.14	38.40	38.01	0	3.39	2.34	6.35	5.06
3	6.01	4.47	27.08	24.33	1.23	8.47	1.10	11.04	5.78
4	5.50	2.22	36.32	36.94	0.87	3.55	2.04	5.31	7.25
5	6.72	1.86	34.71	37.20	0	0.72	1.97	7.03	9.78

Çizelge 4.3’de elde edilen veriler yüzeyin kimyasal kompozisyonundaki değişimi açıkça ortaya koymaktadır. Tüm analiz noktalarında yüksek oksijen içeriği tespit edilmiştir. Bu oranlar yüzeyde Fe₃O₄ veya Fe₂O₃ gibi demir oksit fazlarının oluştuğuna işaret etmektedir. Literatürde, Eshkabilov vd. (2023) nitro-oksidasyon sonrası Fe₃O₄ dış katmanı ve Fe₂O₃’ün üst yüzeye yakın bölgelerde oluştuğunu, Aryanto vd. (2016) ise iç ve dış katmanlarda sırasıyla Fe₃O₄ ve Fe₂O₃ oluşumunun bölgeler arası EDS analizlerle doğrulandığını bildirmiştir. Ayrıca düşük seviyede de olsa azot elementine rastlanması nitrüleme sonrası yüzeyde kalan nitrür fazlarının plazma oksidasyon işlemine rağmen tamamen ortadan kalkmadığını göstermektedir. Yüzeydeki oksit yapılar SEM görüntüsünde yer yer pullanma ve çatlama izleriyle örtüşmekte, bu da plazma oksidasyon sonucu oluşan oksit tabakasının belirli alanlarda gevreklediğini ve aşınma sırasında yerinden kopmaya başladığını göstermektedir.

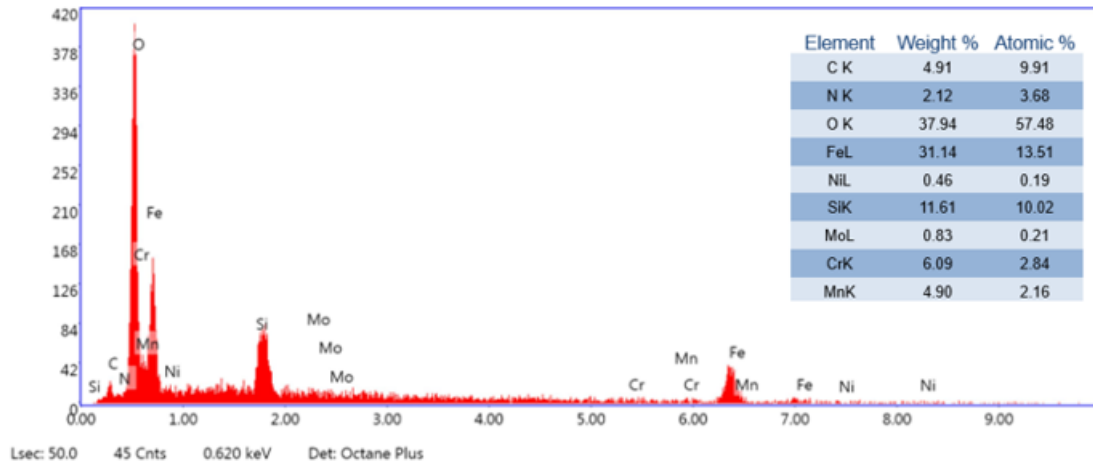
%25 O₂ 1h şartlarındaki numunenin SEM mikroskobu ile alınan aşınma izi görüntüsü ve bu iz çevresindeki EDS verileri Şekil 4.20’de verilmiştir.



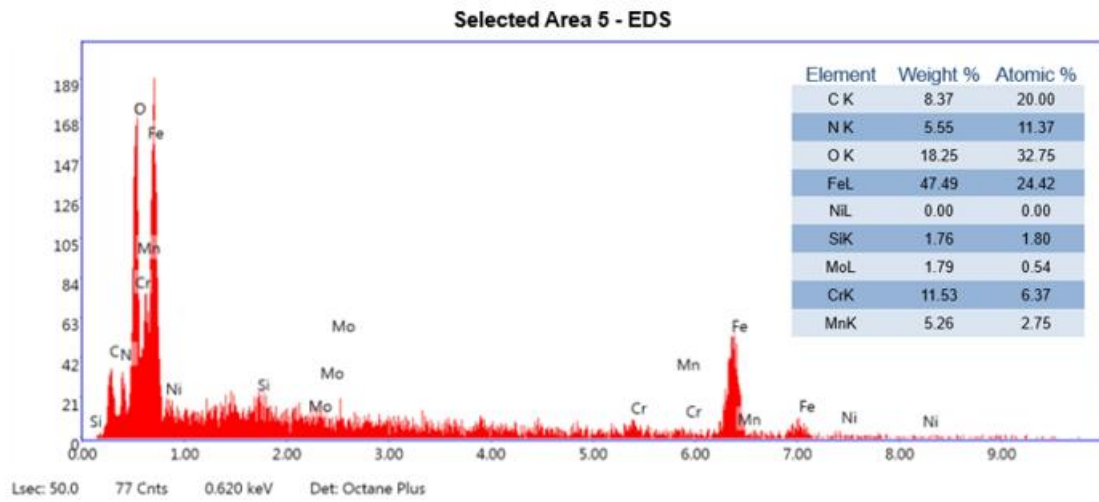
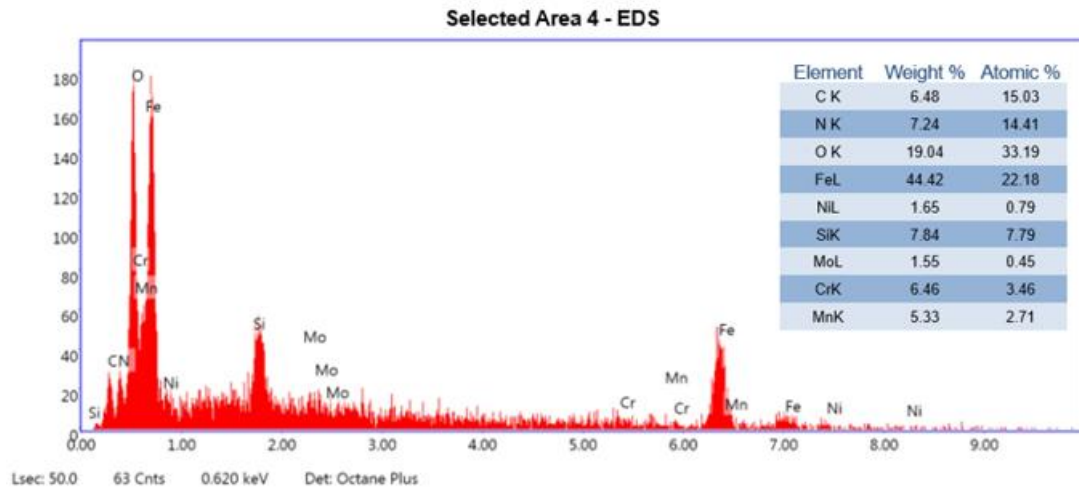
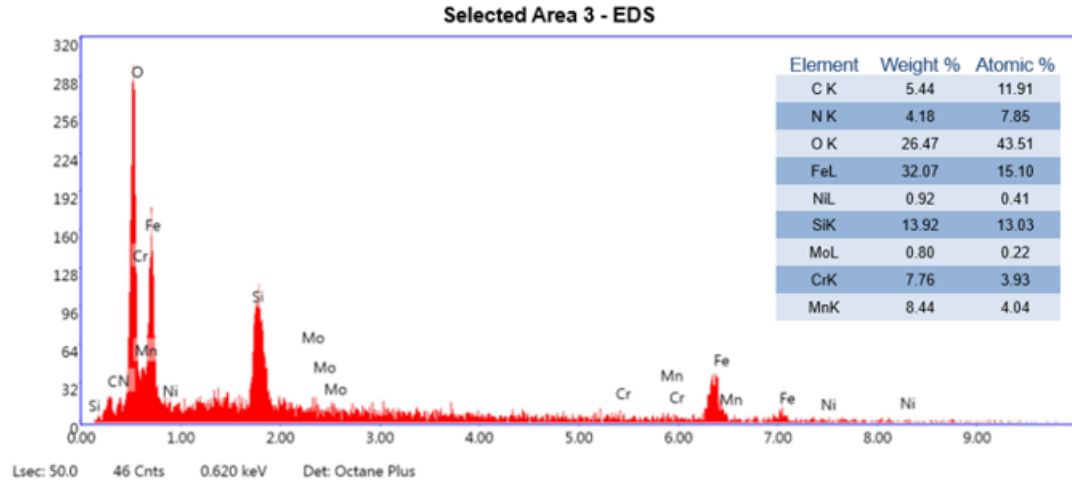
Selected Area 1 - EDS



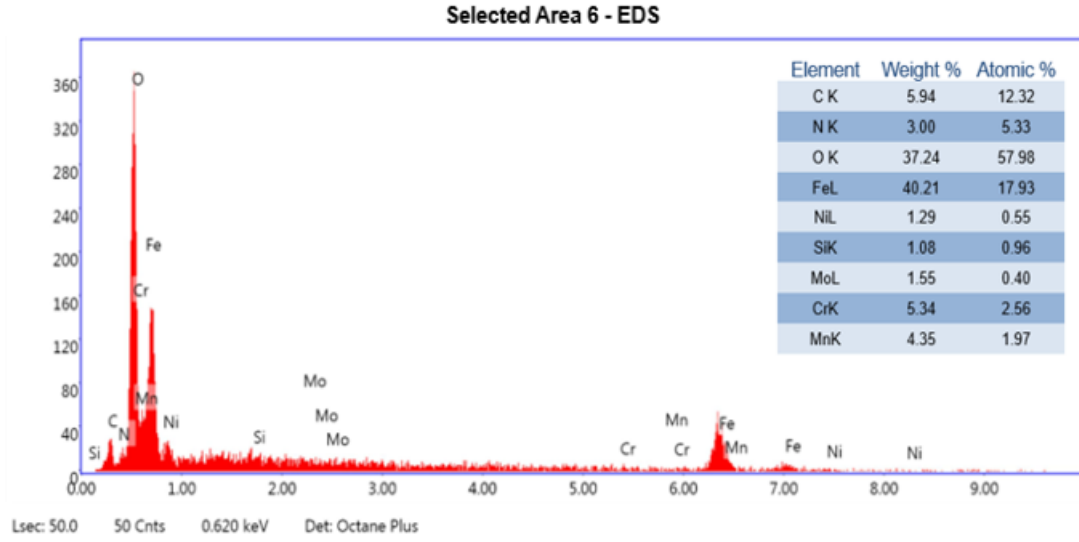
Selected Area 2 - EDS



Şekil 4.20 %25 O₂ 1h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.



Şekil 4.20 (Devam) %25 O₂ 1h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.



Şekil 4.20 (Devam) %25 O₂ 1h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.

Şekil 4.20’de verilen görüntü önceki örneklerle kıyasla daha düzensiz aşınma izlerine ve yoğun mikro hasar izlerine sahiptir. Yüzeydeki çatlak benzeri yapılar oksit tabakanın yer yer kopmaya uğradığını ve belirli bölgelerde gevrekleşmeye bağlı oksit delaminasyonu gerçekleştiğini göstermektedir.

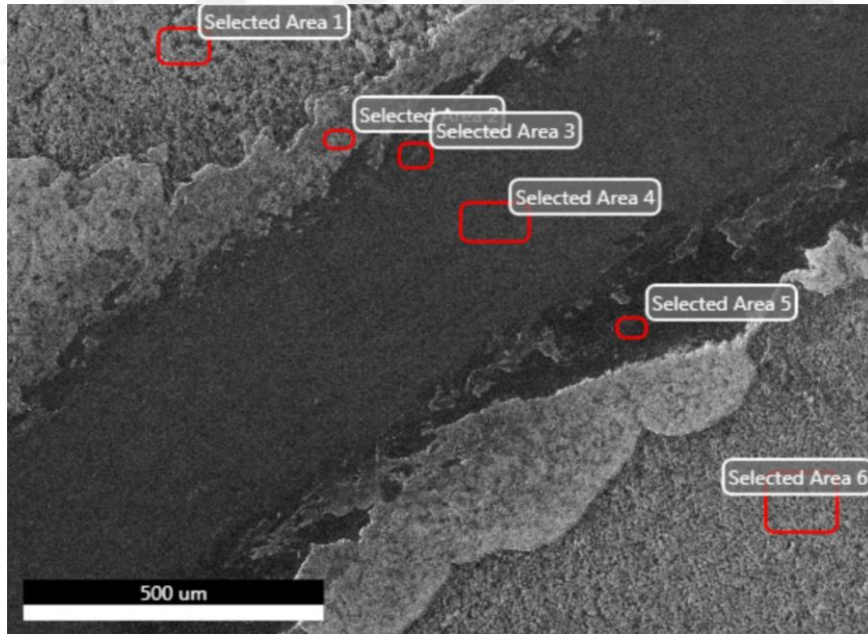
Çizelge 4.4 %25 O₂ 1h şartlarındaki numunenin bölgesel element % ağırlık oranları.

Elementler (% Ağırlık)									
Bölge	C	N	O	Fe	Ni	Si	Mo	Cr	Mn
1	4.59	4.54	37.71	40.98	1.37	1.38	1.17	5.68	2.58
2	4.91	2.12	37.94	31.14	0.46	11.61	0.83	6.09	4.90
3	5.44	4.18	26.47	32.07	0.92	13.92	0.80	7.76	8.44
4	6.48	7.24	19.04	44.42	1.65	7.84	1.55	6.46	5.33
5	8.37	5.55	18.25	47.49	0	1.76	1.79	11.53	5.26
6	5.94	3.00	37.24	40.21	1.29	1.08	1.55	5.34	4.35

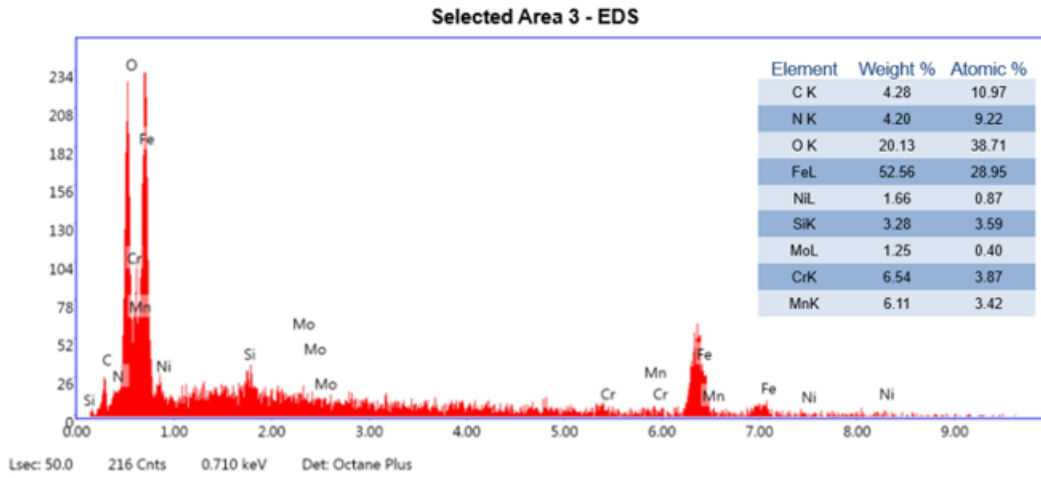
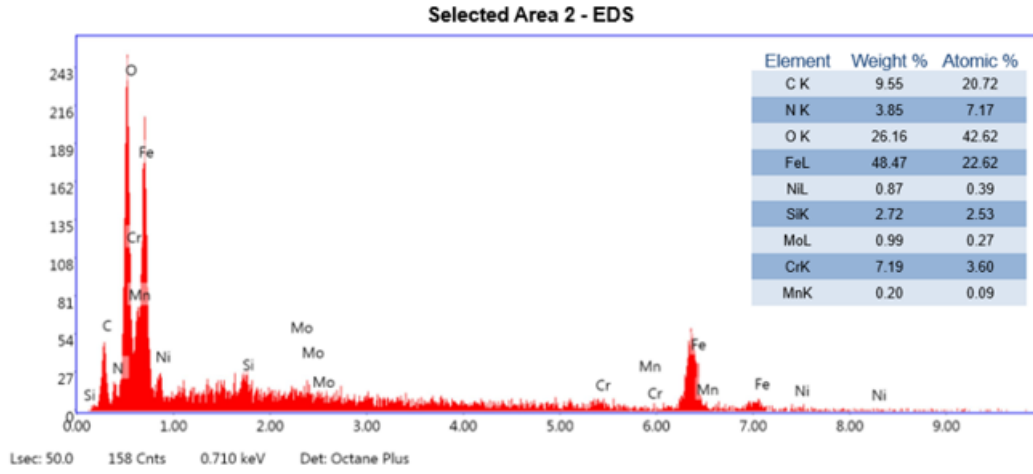
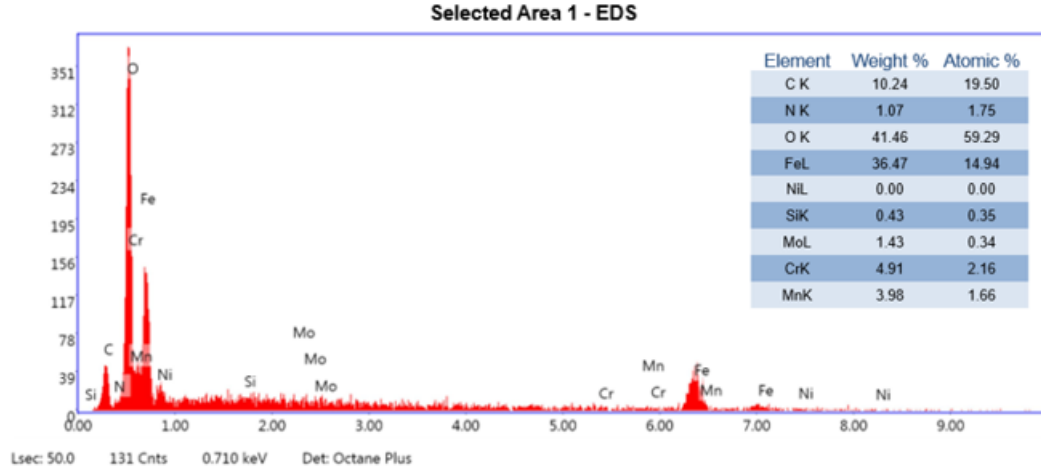
Çizelge 4.4’deki veriler değerlendirildiğinde, tüm bölgelerde yüksek seviyede oksijen tespit edilmiş olup, bu değerler yüzeyde oluşan demir oksit fazlarının varlığını doğrulamaktadır. Bu oksit yapıların oluşumu bazı bölgelerde kalınlaşma sonucu çatlama ve dökülmeye neden olmuştur. Bölge 1, 2 ve 6’da nispeten yüksek oksijen ve demir oranı, bu alanlarda Fe₃O₄ oluşumunun baskın olduğunu düşündürmektedir. Buna karşılık 3, 4 ve 5 bölgelerinde azot oranının göreceli olarak daha yüksek tespit edilmesi, nitrür fazlarının plazma oksidasyon işleminden tamamen etkilenmediğini ve yüzeyin alt

bölgelerinde varlığını sürdürdüğünü göstermektedir. Bu durum, çok fazlı (nitrür + oksit) yapının korunduğuna işaret etmektedir. Ayrıca bölge 3, 4 ve 5'te dikkat çeken yüksek Si ve Cr içeriği, yüzeyde Cr_2O_3 ve SiO_2 gibi kompleks oksit fazlarının da oluşabileceğini göstermektedir. SEM görüntüsünde görülen çatlamlar, EDS analizlerindeki yüksek oksijen seviyeleri ile birlikte düşünüldüğünde, yüzeyde oluşan oksit tabakasının belirli bölgelerde mekanik dayanımını kaybederek delaminasyonların oluştuğu ve test sırasında yüzeyden ayrıldığı değerlendirilmiştir. Bu mekanizmalara benzer şekilde literatürde Fe_3O_4 ve Fe_2O_3 fazlarının oksit tabakasında baskın olduğunu ve tabaka sürekliliğinin uzun sürede çatlaklar ve soyulmalarla bozulduğunu bildirmiştir (Yılmaz vd. 2021). Ayrıca Cr ve Si katkılarının oksit fazlarının karışık oluşumuna ve mekanik stabilitenin bölgesel farklılık göstermesine yol açtığı rapor edilmiştir (Boynazarov ve Razzokov 2023).

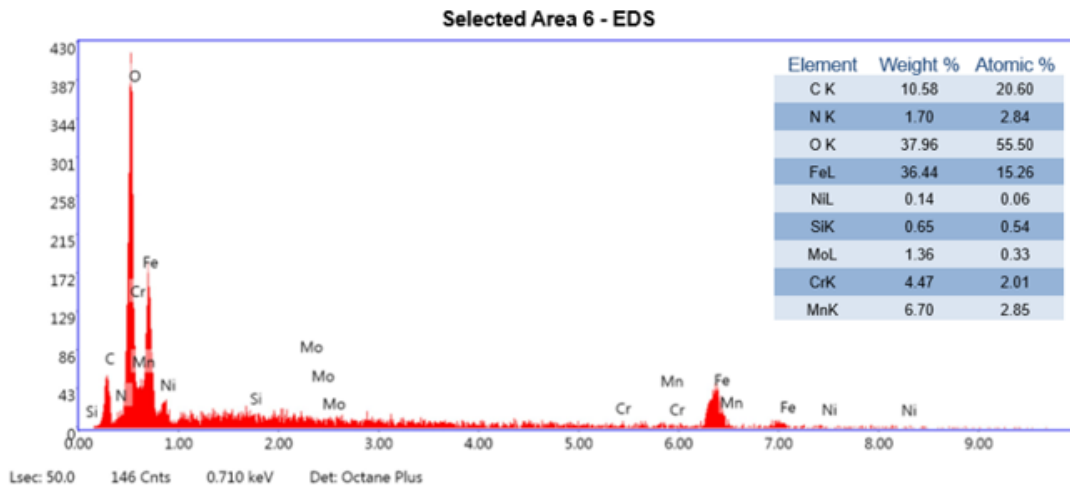
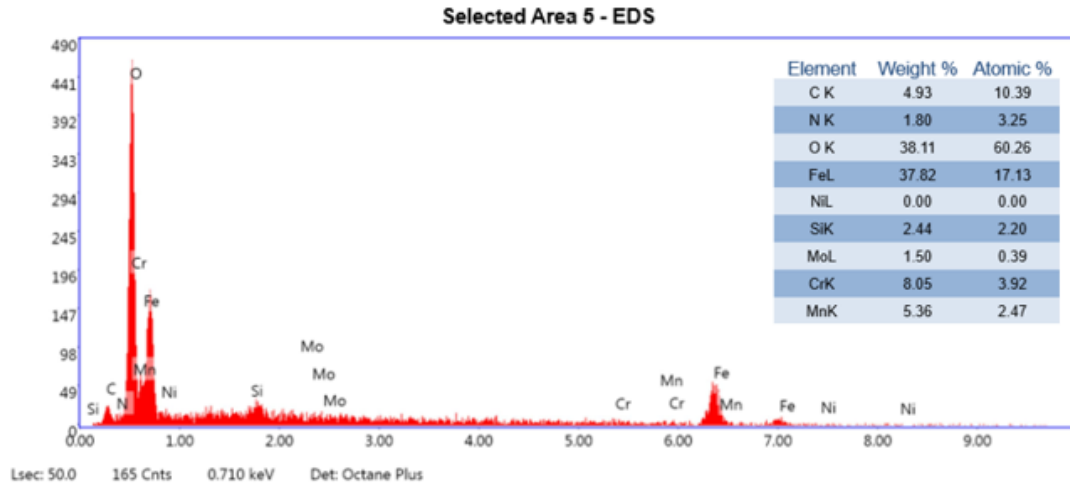
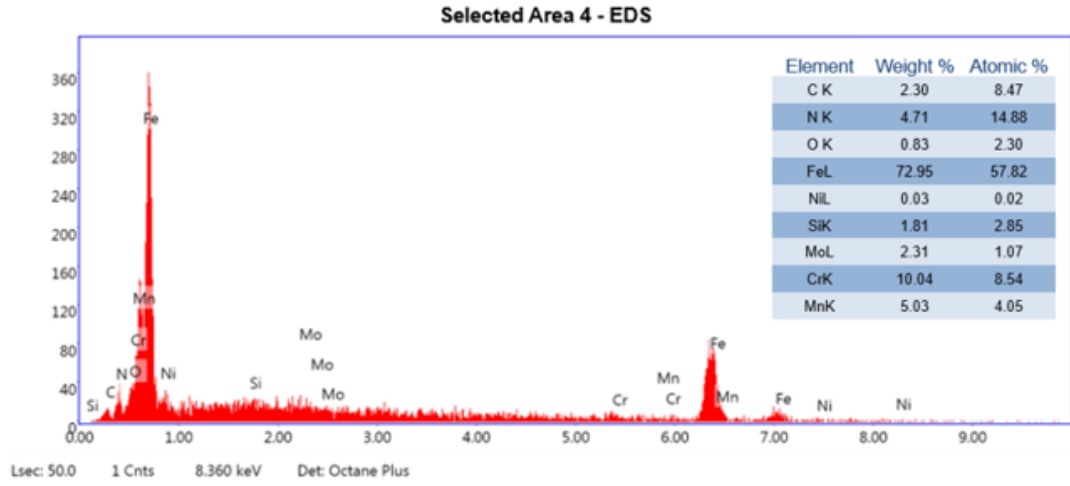
%25 O_2 1,5h şartlarındaki numunenin SEM mikroskobu ile alınan aşınma izi görüntüsü ve bu iz çevresindeki EDS verileri Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21 %25 O_2 1,5h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.



Şekil 4.21 (Devam) %25 O₂ 1,5h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.



Şekil 4.21 (Devam) %25 O₂ 1,5h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.

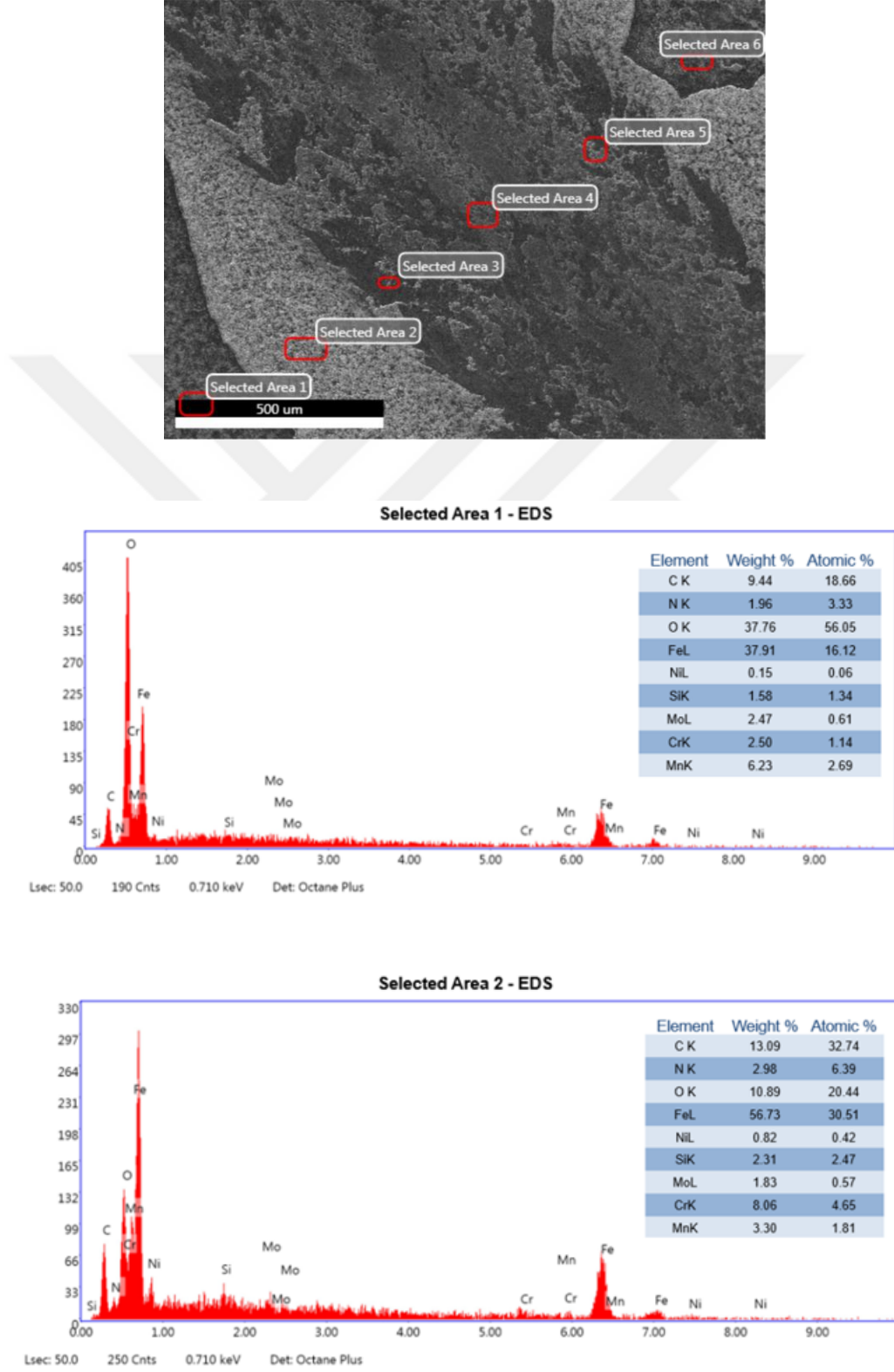
Şekil 4.21’de yüzeyde gözlenen çatlaklar, yıgılmalar ve tabaka düzensizlikleri dikkat çekmektedir. Bu yapılar, özellikle oksit tabakasının kalınlaşmasıyla birlikte artan gevreklik ve oksidasyonla ilişkili gerilmeler nedeniyle oluşan delaminasyon ve yüzey kırılmalarıyla açıklanabilir. Kopan oksit parçacıklarının yüzeye sürtünme sırasında tekrar temas etmesiyle gelişen çizik benzeri izler ve yırtılmalar ise abrazif aşınmanın etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle çatlakların başladığı noktalarda gözlenen tabaka halinde ayrılmalar, aşınma sırasında tekrar eden gerilimlerin etkisiyle yorulma çatlaklarına ve yüzey yorgunluğuna işaret etmektedir.

Çizelge 4.5 %25 O₂ 1,5h şartlarındaki numunenin bölgesel element % ağırlık oranları.

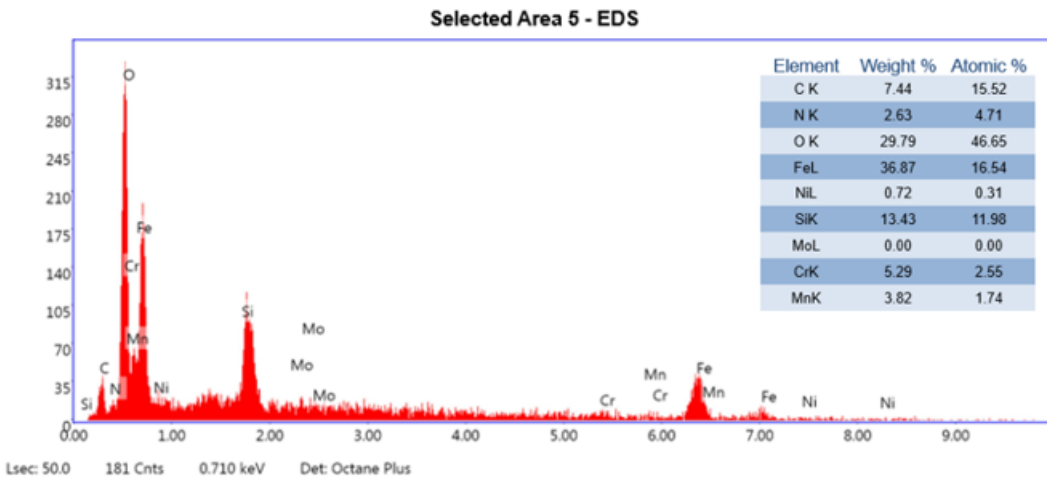
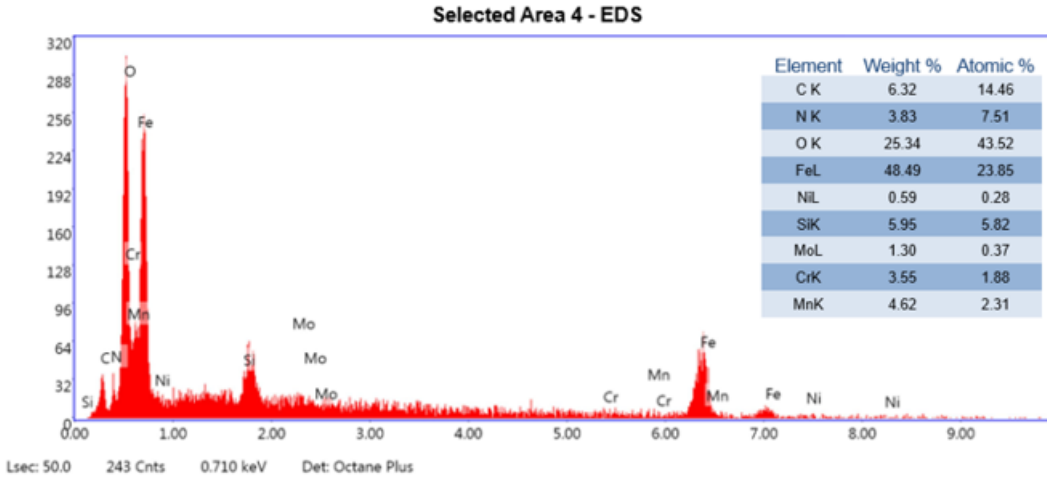
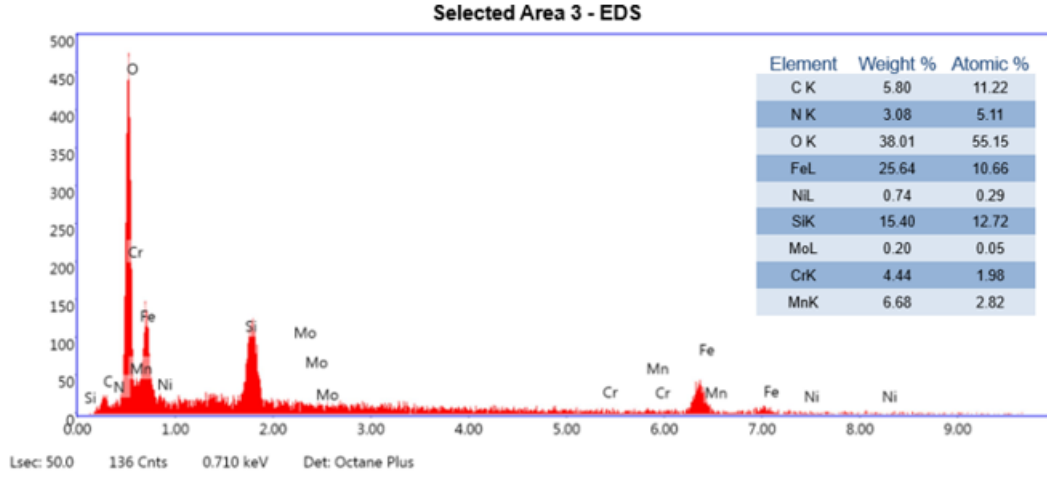
Bölge	Elementler (% Ağırlık)								
	C	N	O	Fe	Ni	Si	Mo	Cr	Mn
1	10.24	1.07	41.46	36.47	0	0.43	1.43	4.91	3.98
2	9.55	3.85	26.16	48.47	0.87	2.72	0.99	7.19	0.20
3	4.28	4.20	20.13	52.56	1.66	3.28	1.25	6.54	6.11
4	2.30	4.71	0.83	72.95	0.03	1.81	2.31	10.04	5.03
5	4.93	1.80	38.11	37.82	0	2.44	1.50	8.05	5.36
6	10.58	1.70	37.96	36.44	0.14	0.65	1.36	4.47	6.70

Çizelge 4.5’te elde edilen verilere göre bazı bölgelerde yüksek azot ve demir oranlarının varlığını sürdürmesi, nitrür fazlarının alt yapıda hâlâ korunduğunu ve bu sayede tabakanın mekanik dayanımının tamamen kaybolmadığını göstermektedir. Bununla birlikte bazı lokal bölgelerde (bölge 4) oksit tabakanın aşındığı ve alttaki metal yüzeyin açığa çıktığı anlaşılmakta, bu alanlarda karşı yüzeyle doğrudan metal temasının oluşmasıyla zaman zaman lokal adhezif aşınmanın da devreye girdiği değerlendirilmektedir. Bu duruma benzer şekilde Yılmaz vd. (2023), nitrokarbürleme sonrası oksidasyon işlem süreleri uzadıkça nitrür tabakalarının kompozisyonunda düşüş görülmesine rağmen bazı numunelerde nitrür fazlarının yüzey altındaki bölgelerde kalmaya devam ettiği bildirmişlerdir. Ayrıca Abakay (2023) çalışmasında, nitrür kaplama yapılan numunelerde kaplama bölgesindeki nitrür bileşiklerinin özellikle kısa süreli kullanımda mekanik dayanım üzerinde olumlu katkı sağladığı, oksit tabakanın aşınması veya soyulması durumlarında ise lokal metal metalle temasının adhezif aşınma mekanizmasını tetiklediğini belirtilmiştir.

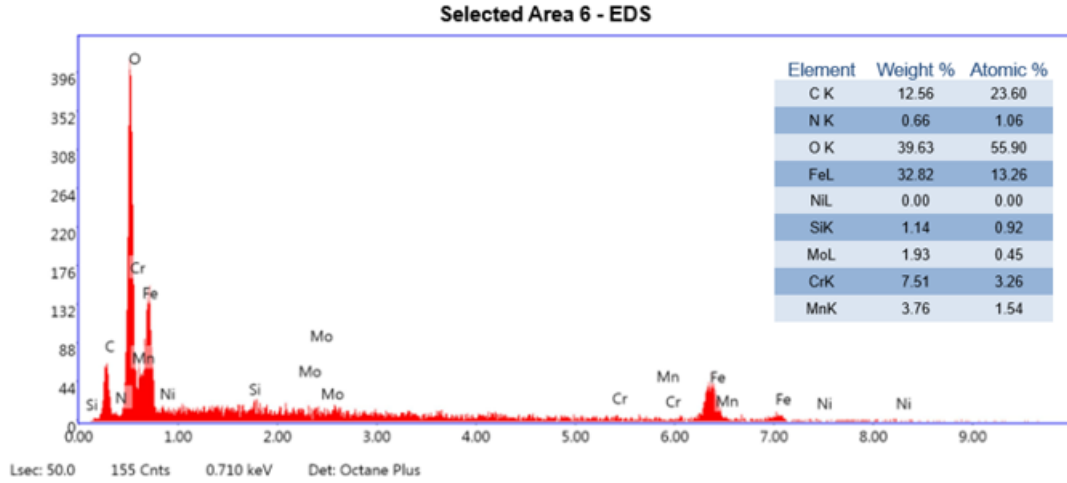
%50 O₂ 0,5h şartlarındaki numunenin SEM mikroskobu ile alınan aşınma izi görüntüsü ve bu iz çevresindeki EDS verileri Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.22 %50 O₂ 0,5h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.



Şekil 4.22 (Devam) %50 O₂ 0,5h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.



Şekil 4.22 (Devam) %50 O₂ 0,5h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.

Şekil 4.22’de görüntüde yer yer düzgün yüzey alanlarının yanı sıra, çatlamaya eğilimli, parçalanmış ve hafif oyulmuş bölgeler dikkat çekmektedir. Bu yapısal düzensizlikler yüzeyde nispeten ince ancak yoğun bir oksit tabakası oluştuğunu ve bu tabakanın sürtünme etkisiyle yer yer parçalandığını göstermektedir.

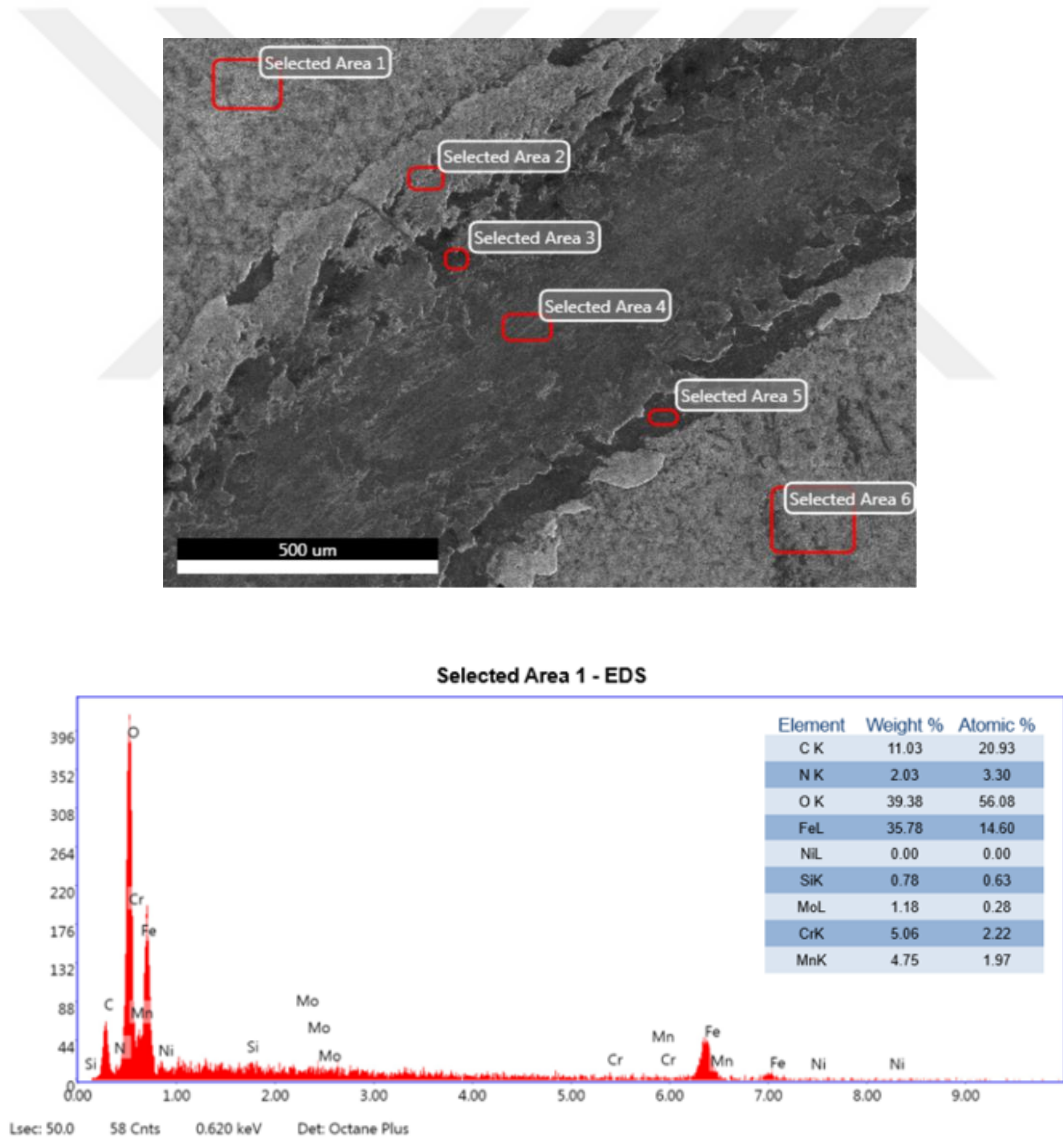
Çizelge 4.6 %50 O₂ 0,5h şartlarındaki numunenin bölgesel element % ağırlık oranları.

Bölge	Elementler (% Ağırlık)								
	C	N	O	Fe	Ni	Si	Mo	Cr	Mn
1	9.44	1.96	37.76	37.91	0.15	1.58	2.47	2.50	6.23
2	13.09	2.98	10.89	56.73	0.82	2.31	1.83	8.06	3.30
3	5.80	3.08	38.01	25.64	0.74	15.40	0.20	4.44	6.68
4	6.32	3.83	25.34	48.49	0.59	5.95	1.30	3.55	4.62
5	7.44	2.63	29.79	36.87	0.72	13.43	0	5.29	3.82
6	12.56	0.66	39.63	32.82	0	1.14	1.93	7.51	3.76

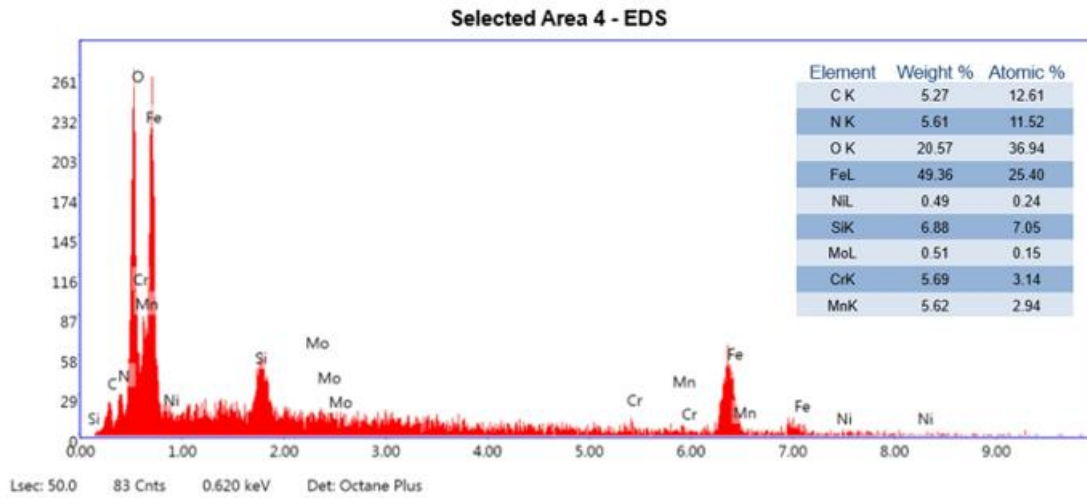
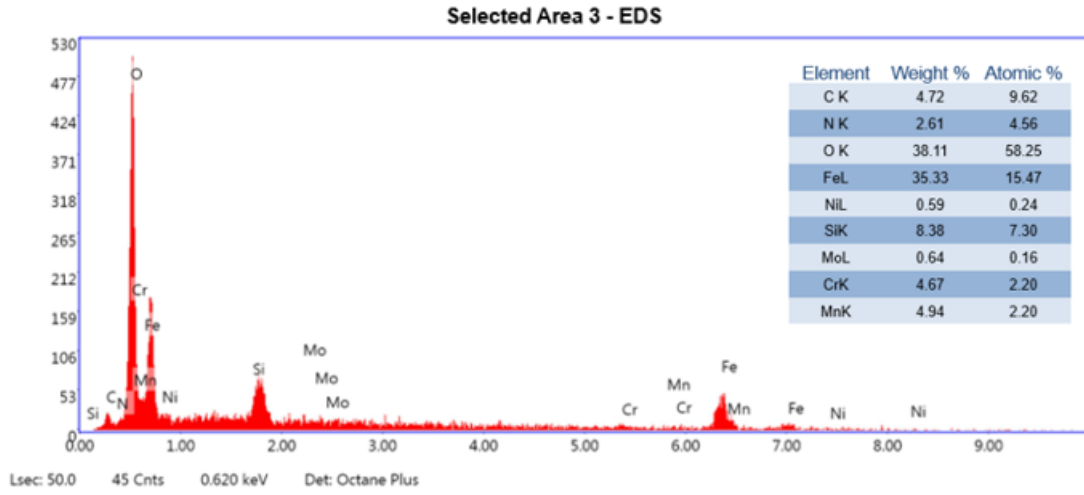
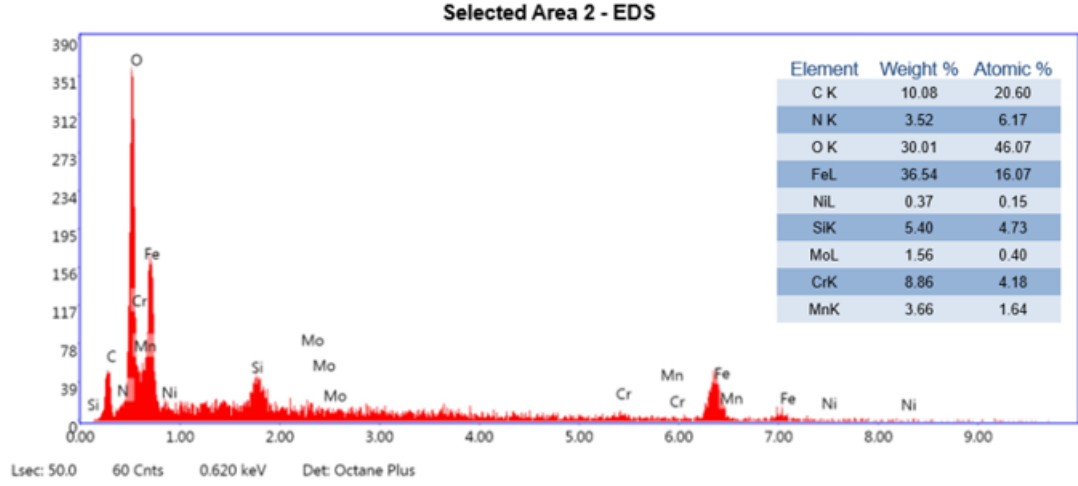
Çizelge 4.6’da elde edilen veriler göre yüzeyde belirgin şekilde oksit fazlar bulunmaktadır. Özellikle 1, 3 ve 6 bölgelerinde ortaya çıkan yüksek oksijen içeriği ve eşlik eden düşük demir oranları, bu alanlarda daha yoğun bir oksit faz birikimi olduğunu ve bu bölgelerin aşınma sırasında daha fazla koruyucu etki sağladığını düşündürmektedir. Buna karşılık bölge 2’deki gibi demir oranının %55’in üzerinde olması, oksit tabakanın aşındığı ve taban metale ulaşıldığını göstermektedir. Bu tür yüzey açılmaları, karşı yüzeyle doğrudan metal temasının oluşmasına yol açarak adhezif aşınmanın yerel olarak devreye girmesine neden olmuş olabilir. SEM görüntüsündeki bazı yönlenmiş çizikler ve

yarıklar, muhtemelen yüzeyden kopan oksit parçalarının yeniden yüzeye etki etmesiyle gelişmiş ve bu da abrasif aşınmanın etkili olduğunu göstermiştir. Yüzeyde yer alan hafif çatlak benzeri yapıların ve tabakadan ayrılmış küçük parça izlerinin varlığı, yüzey yorgunluğu mikro delaminasyon ihtimalini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde Sun vd. (2025) oksidatif aşınma ile birlikte delaminasyon ve abrasif mekanizmaların çelik yüzeylerde eşzamanlı rol oynadığını, Teng vd. (2023) ise oksit tabakalarının soyulması ve yüzey-film arası temasın aşınmayı hızlandırdığını rapor etmiştir.

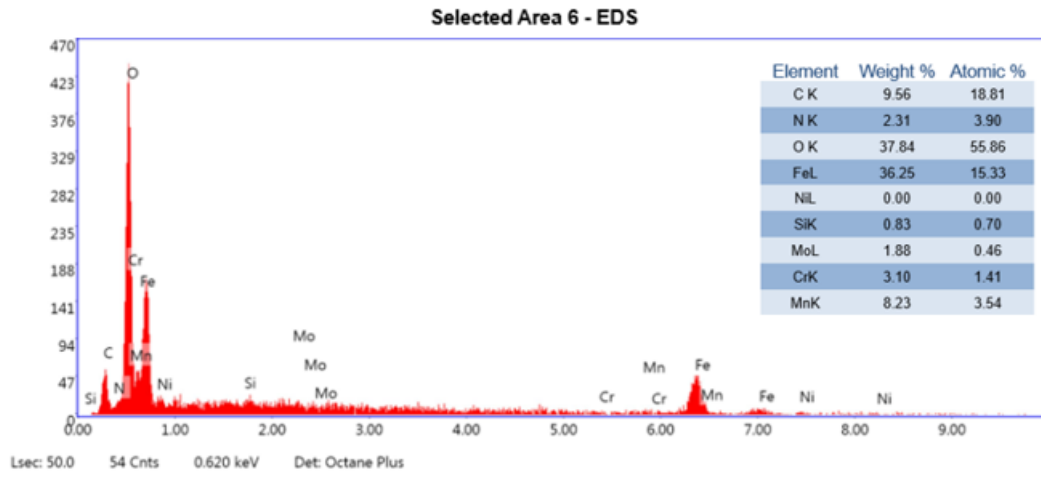
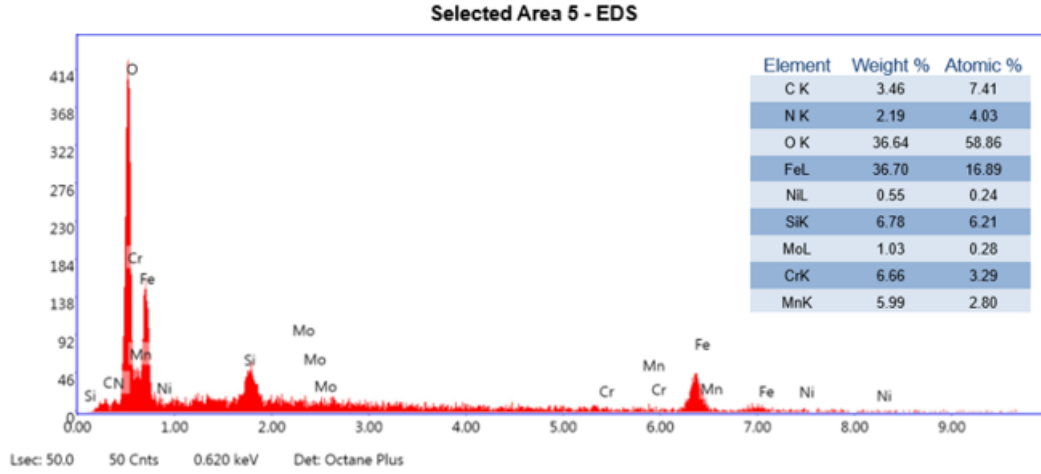
%50 O₂ 1h şartlarındaki numunenin SEM mikroskobu ile alınan aşınma izi görüntüsü ve bu iz çevresindeki EDS verileri Şekil 4.23’de verilmiştir.



Şekil 4.23 %50 O₂ 1h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.



Şekil 4.23 (Devam) %50 O₂ 1h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.



Şekil 4.23 (Devam) %50 O₂ 1h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.

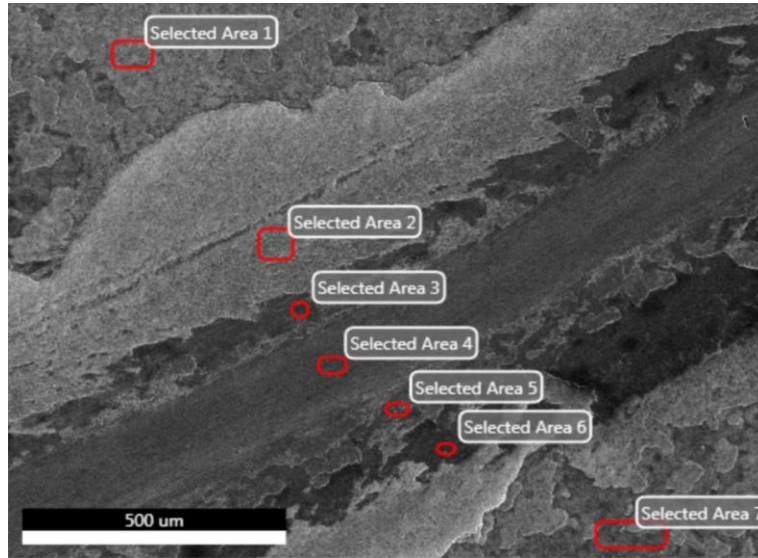
Şekil 4.23’de yüzeyin genel olarak daha homojen ancak mikroskobik düzeyde çatlaklara sahip bir yapıda olduğunu görülmektedir. Bu yapısal görünüm, yüzeyde oluşan oksit tabakanın plazma nitrüleme sonrası meydana gelen sert fazlarla birlikte daha dengeli geliştiğini fakat mekanik zorlamalar altında kısmen gevrekleştiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.7 %50 O₂ 1h şartlarındaki numunenin bölgesel element % ağırlık oranları.

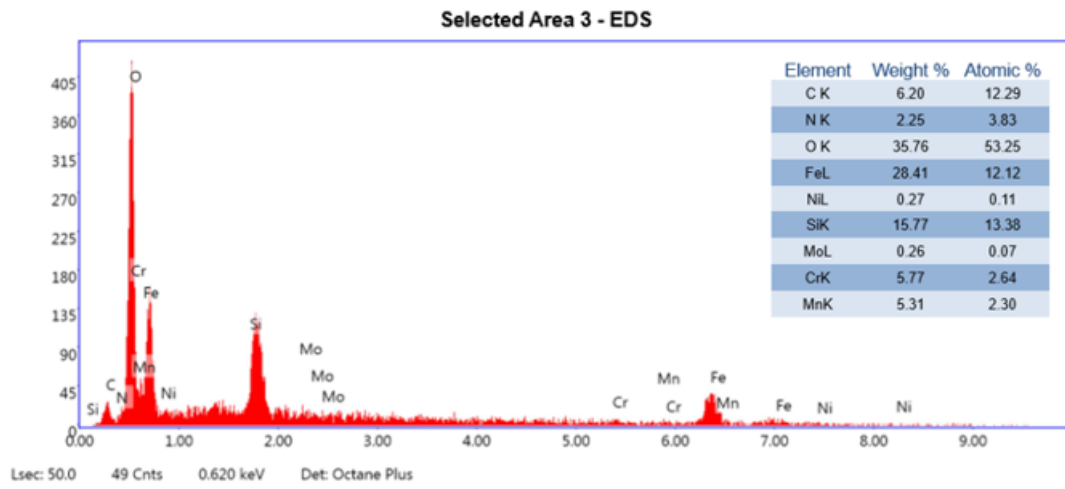
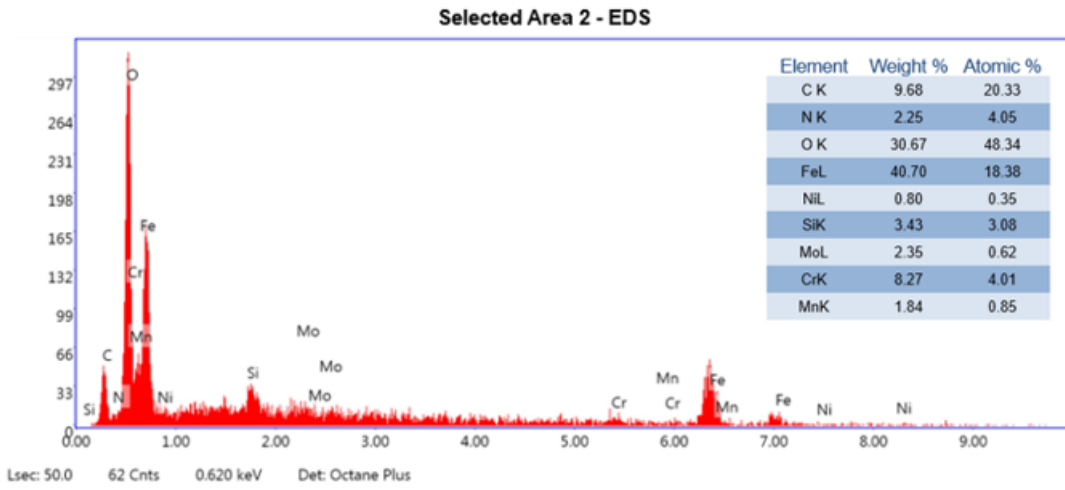
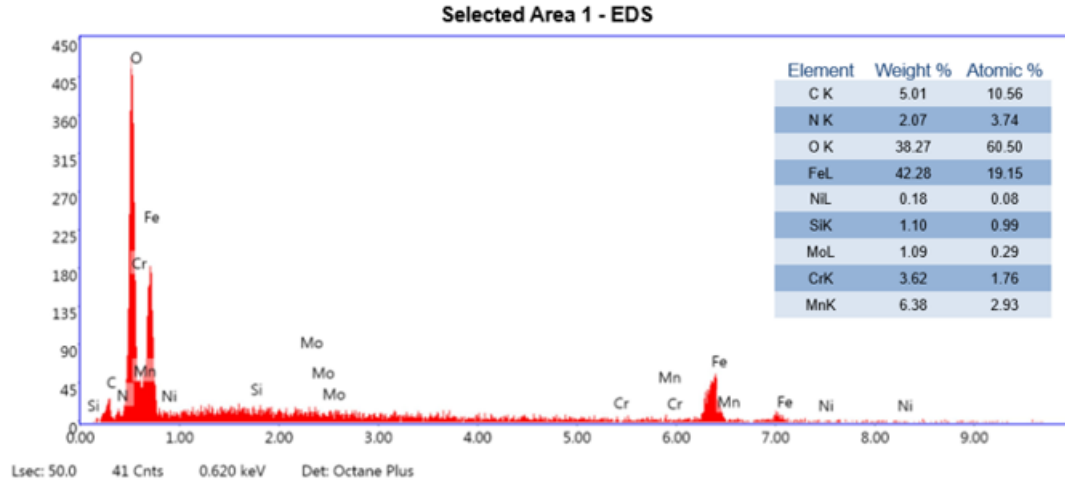
Elementler (% Ağırlık)									
Bölge	C	N	O	Fe	Ni	Si	Mo	Cr	Mn
1	11.03	2.03	39.38	35.78	0	0.78	1.18	5.06	4.75
2	10.08	3.52	30.01	36.54	0.37	5.40	1.56	8.86	3.66
3	4.72	2.61	38.11	35.33	0.59	8.38	0.64	4.67	4.94
4	5.27	5.61	20.57	49.36	0.49	6.88	0.51	5.69	5.62
5	3.46	2.19	36.64	36.70	0.55	6.78	1.03	6.66	5.99
6	9.56	2.31	37.84	36.25	0	0.83	1.88	3.10	8.23

Çizelge 4.7’de elde edilen verilere göre çoğu bölgede oksijen oranının yüksek ölçülmesi, yüzeyde iyi gelişmiş demir oksit fazlarının bulunduğunu kanıtlamaktadır. Oksit fazların bu kadar yaygın olması, oksidatif aşınmanın bu numune belirleyici bir mekanizma olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte özellikle 3, 4 ve 5 bölgelerinde gözlenen çatlak benzeri yapılar ve yer yer soyulmuş bölgeler, oksit tabakanın mekanik etkilere karşı yeterince dirençli olmadığını ve yüzey yorgunluğu ile gelişen delaminasyon davranışlarının başladığını düşündürmektedir. Çatlak uçlarının ilerleme yönüne paralel ince çizikler, zamanla oksit parçacıklarının koparak yeniden yüzeye temas ettiğini ve bu nedenle abrazif aşınmanın da katkı sağladığını göstermektedir. SEM görüntüsünde yer alan bazı pürüzsüz alanlar ise, oksit tabakanın yer yer aşındığını ve alt taban metale ulaşıldığını işaret etmektedir. Bu alanlar, karşı yüzeyle doğrudan temasın meydana geldiği ve lokal adhezif aşınmanın devreye girdiği bölgeler olarak yorumlanabilir. Literatürde Sun vd. (2023) arayüz çatlakları ve oksit tabaka soyulmalarının sürtünme ve aşınma katsayısında artışa yol açtığını, Du vd. (2023) ise oksit tabaka içi gözeneklenme ve boşlukların tabaka stabilitesini bozduğunu ve delaminasyon mekanizmasını tetiklediğini bildirmiştir.

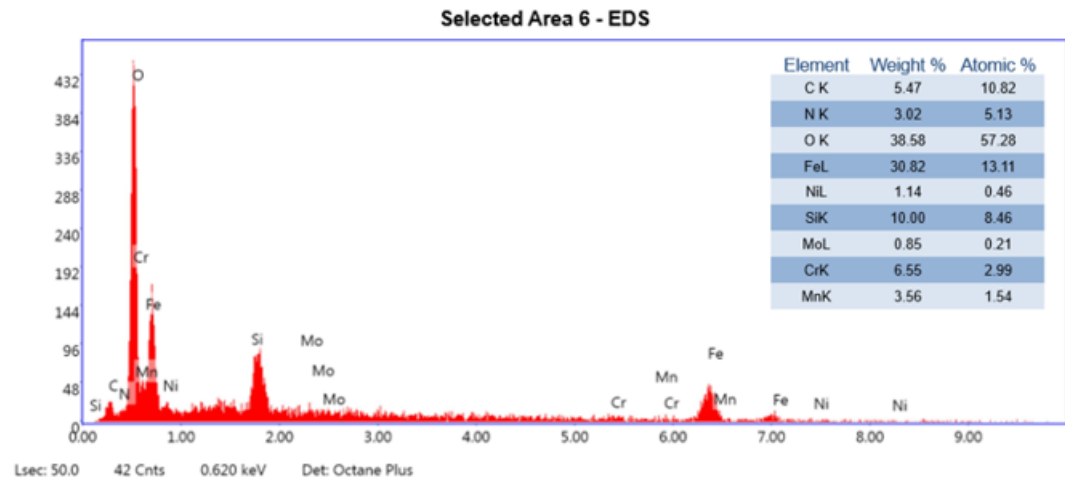
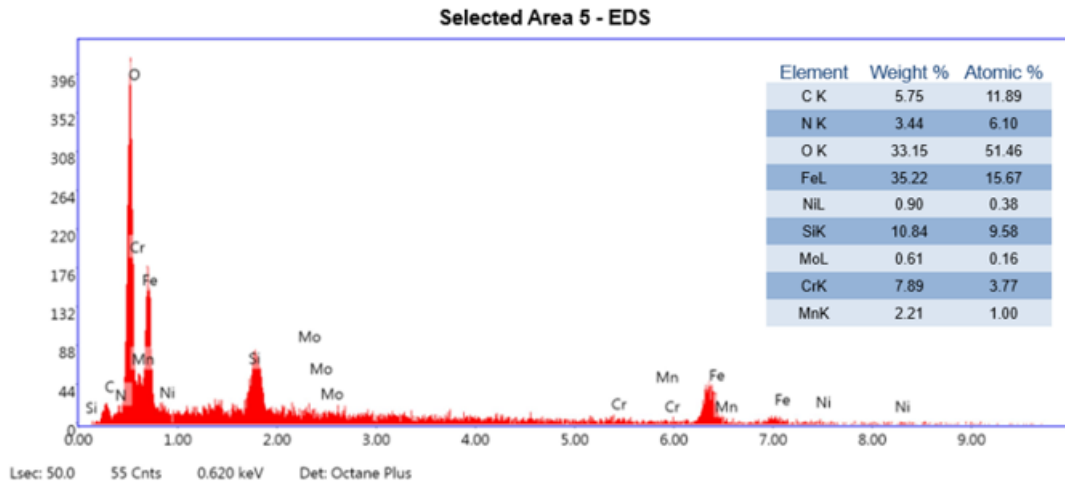
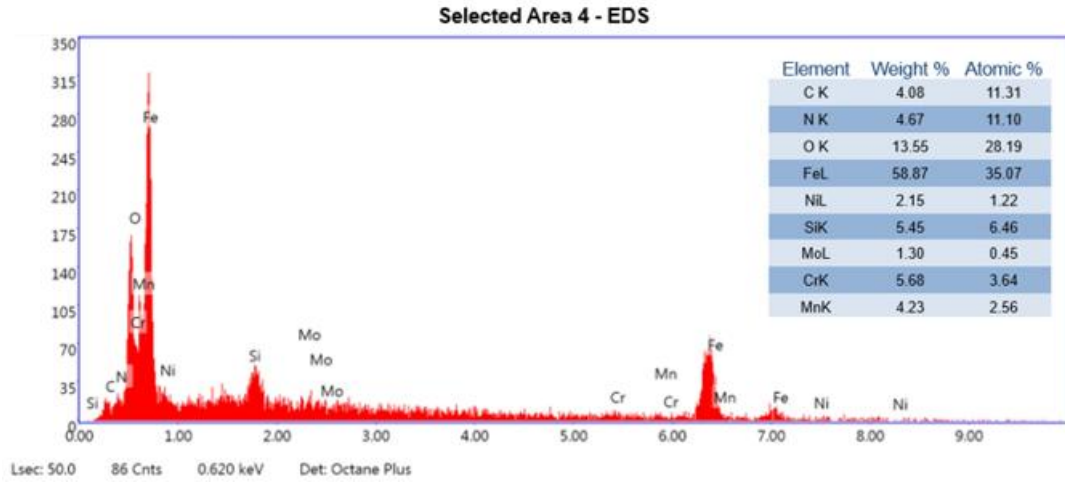
%50 O₂ 1,5h şartlarındaki numunenin SEM mikroskobu ile alınan aşınma izi görüntüsü ve bu iz çevresindeki EDS verileri Şekil 4.24’te verilmiştir.



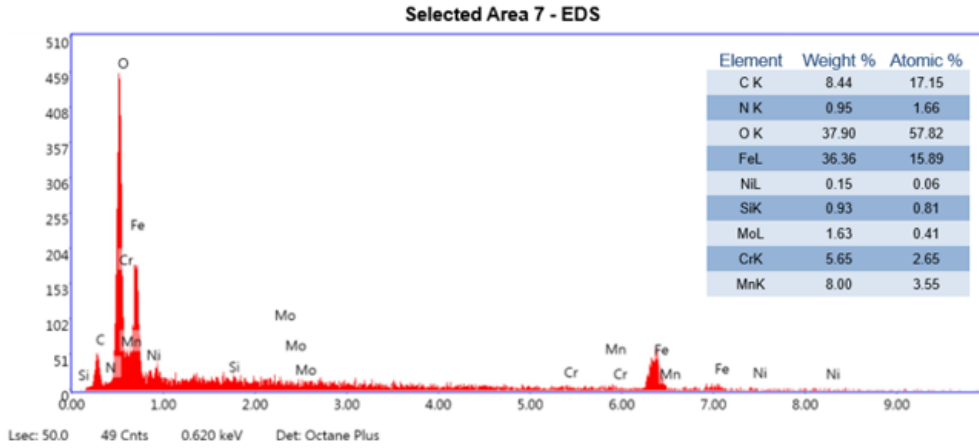
Şekil 4.24 %50 O₂ 1,5h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.



Şekil 4.24 (Devam) %50 O₂ 1,5h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.



Şekil 4.24 (Devam) %50 O₂ 1,5h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.



Şekil 4.24 (Devam) %50 O₂ 1,5h şartlarındaki numunenin SEM görüntüsü ve EDS analiz grafikleri.

Şekil 4.24'te sunulan SEM görüntüsünde, numunenin yüzeyinde homojen yapıda gelişmiş, parçalanma göstermeyen nispeten kararlı bir oksit tabakası gözlenmektedir. Bu yapısal bütünlük, işlem süresinin 1,5 saate çıkarılmasıyla yüzeyde daha kalın ve dengeli bir oksit fazın oluştuğunu işaret etmektedir.

SEM görüntüsünde gözlemlenen düzgün yüzey morfolojisi ve çatlakların azlığı, bu oksit tabakasının önceki örneklerle kıyasla daha az delaminasyon eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, yüzeyin test sırasında yüksek gerilmelere karşı daha dirençli olduğunu ve yüzey yorgunluğu kaynaklı çatlak oluşumunun sınırlı kaldığını düşündürmektedir. Bazı bölgelerde (bölge 4 gibi) daha düşük oksijen oranları ve artan demir oranları gözlenmiştir. Bu lokal değişimler zamanla oluşabilecek mikro abrazyon aşınma izlerine zemin hazırlamış olabilir, özellikle test süresince kopan sert oksit parçacıklarının yüzeye geri dönerek çizik oluşturduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.8 %50 O₂ 1,5h şartlarındaki numunenin bölgesel element % ağırlık oranları.

Elementler (% Ağırlık)									
Bölge	C	N	O	Fe	Ni	Si	Mo	Cr	Mn
1	5.01	2.07	38.27	42.28	0.18	1.10	1.09	3.62	6.38
2	9.68	2.25	30.67	40.70	0.80	3.43	2.35	8.27	1.84
3	6.20	2.25	35.76	28.41	0.27	15.77	0.26	5.77	5.31
4	4.08	4.67	13.55	58.87	2.15	5.45	1.30	5.68	4.23
5	5.75	3.44	33.15	35.22	0.90	10.84	0.61	7.89	2.21
6	5.47	3.02	38.58	30.82	1.14	10.00	0.85	6.55	3.56
7	8.44	0.95	37.90	36.36	0.15	0.93	1.63	5.65	8.00

Çizelge 4.8’de elde edilen veriler göre özellikle 1, 3, 5, 6 ve 7 bölgelerinde oksijenin oranının yüksek olması yüzeyde oksit fazların yaygın biçimde ve etkin şekilde oluştuğunu ortaya koymaktadır. Bu da oksidatif aşınmanın kontrol altına alındığını ve yüzeyi koruyucu bir katmanın geliştiğini göstermektedir.

4.6 Aşınma ve Sürtünme Deney Sonuçları

Çizelge 4.9’da numunelerin aşınma derinliği ve aşınma alanı değerleri verilmiştir. İşlemsiz numune 8,95 μm aşınma derinliği ve 3588 μm^2 aşınma alanı ile en yüksek aşınma değerlerini göstermektedir. Bu durum, yüzey sertliğinin düşük olması nedeniyle karşı yüzeyle temas sırasında yüksek malzeme kaybının gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Benzer bir durum literatürde, nitrülenmemiş çeliklerin mikrosertliğinin düşük olmasıyla ilişkili aşınma kayıpları bağlamında da vurgulanmıştır (Krella ve Ratajski 2025).

Plazma nitrüleme (PN) işlemi sonrasında aşınma derinliğinin 1,96 μm ’ye, aşınma alanının ise 537 μm^2 ’ye düştüğü görülmektedir. Bu iyileşme nitrüleme ile oluşan sert Fe_3N fazlarının yüzey dayanımını artırmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde plazma nitrülemenin çelik yüzeylerinde aşınma direncini büyük oranda iyileştirdiği ve tribolojik performansı artırdığı ifade edilmektedir (Lu vd. 2023). %25 O_2 ile gerçekleştirilen plazma oksidasyon işlemlerinde, 1 saatlik işlem en düşük aşınma değerlerini (derinlik: 1,98 μm , alan: 971 μm^2) vermiştir. Literatürde plazma oksidasyon ile oluşan kompakt ve sürekliliği yüksek oksit tabakalarının sürtünme ve aşınma direncini önemli ölçüde artırdığı belirtilmiştir (Grigoriev vd. 2024). Ancak 1,5 saatlik işlemde aşınma değerlerinin arttığı gözlenmiştir (derinlik: 3,07 μm , alan: 1619 μm^2). Bu durum oksit tabakanın bütünlüğünün bozulması ve gevrekleşme eğilimiyle açıklanabilir. Nitekim literatürde de uzun süreli oksidasyon işlemlerinde tabaka üzerinde termomekanik gerilme birikimi sonucu mikro çatlakların oluşabileceği ve bunun aşınma direncini olumsuz etkilediği belirtilmiştir (Chekalova ve Zhuravlev 2021).

%50 O_2 ortamında 0,5 ve 1 saat süreleri düşük aşınma alanı değerleri göstermiş (sırasıyla 752 μm^2 ve 675 μm^2), ancak 1,5 saat işlemde aşınma alanı 2802 μm^2 ’ye yükselmiştir. Bu

bulgu literatürde de belirtildiği üzere, uzun süreli oksidasyon işlemlerinde tabaka stabilitesinin azaldığını ve mikro çatlak oluşumlarının aşınma performansını düşürdüğünü teyit etmektedir (Wei vd. 2015).

Çizelge 4.9 Aşınma derinliği ve alanı sonuçları.

Numune	Ortalama Tabaka Kalınlığı (μm)	Ortalama Aşınma Derinliği (μm)	Ortalama Aşınma Alanı (μm^2)
İşlemsiz	-	8,95	3588
PN	11	1,96	537
%25 O ₂ 0,5h	6,5	3,83	1023
%25 O ₂ 1h	9	1,98	971
%25 O ₂ 1,5h	10	3,07	1619
%50 O ₂ 0,5h	15	3,21	752
%50 O ₂ 1h	11,6	1,34	675
%50 O ₂ 1,5h	5,5	4,05	2802

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada 17CrNiMo6 çeliğine plazma nitrürleme işlemi ve sonrasında çeşitli ortam ve sürelerde plazma oksidasyon işlemi uygulanmıştır. Uygulanan bu işlemlerin aşınma üzerine etkisi araştırılmıştır. Mikro yapısal özellikler, XRD analizleri, aşınma analizleri, SEM ve EDX analizleri, mikrosertlik ölçümleri incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Plazma nitrürleme işlemi sonrası XRD analizlerinde baskın olarak Fe_3N fazı tespit edilmiş Fe_4N fazı oluşmamıştır. Bu sonuç 480 °C’de 20 saatlik işlem parametrelerinin Fe_3N fazının kararlı oluşumu için uygun olduğunu göstermiştir.
- %25 O_2 koşullarında, tabaka kalınlığı 0,5 saatte $\sim 6,5 \mu m$ ’den 1 saatte $\sim 9 \mu m$ ’ye çıkmış, 1,5 saatte ise $\sim 10 \mu m$ civarında sabitlenmiş ancak uzun sürede mikro çatlak ve gözenekler ortaya çıkmıştır.
- %50 O_2 koşullarında, 0,5 saatte kalın ve yoğun bir tabaka ($\sim 15 \mu m + 23 \mu m$ difüzyon bölgesi) oluşmuştur. 1 saatte üst tabaka incelerek $\sim 2,5 \mu m$ ’ye düşmüş, toplam kalınlık $\sim 11,6 \mu m$ olmuştur. 1,5 saatte ise tabaka $\sim 5,5 \mu m$ ’ye çıkmasına rağmen çatlak ve porozite nedeniyle stabilite kaybı gözlenmiştir.
- Aşınma bölgelerinin SEM/EDS analizlerinde, PN numunesinde yoğun N ve Fe oranları, PO numunelerinde ise O elementinin baskın hale geldiği belirlenmiştir.
- Tribolojik deneylerde işlemsiz numune en yüksek aşınma hızı ($\sim 3,4 \times 10^{-5} mm^3/Nm$) ve düşük sürtünme katsayısı ($\sim 0,45$) ile en zayıf performansı göstermiştir. PN sonrası aşınma hızı ($\sim 0,5 \times 10^{-5} mm^3/Nm$) belirgin biçimde azalmıştır.
- %25 O_2 1h şartlarındaki numune en düşük aşınma hızını ($\sim 0,9 \times 10^{-5} mm^3/Nm$) sergileyerek optimum tribolojik performans göstermiştir. Buna karşın 1,5 saat süreli işlemde tabaka bütünlüğü bozulmuş ve aşınma artmıştır.

- %50 O₂ ortamında 0,5 ve 1 saat süreli işlemler düşük aşınma değerleri vermiştir. 1,5 saat süre sonunda tabaka stabilitesinin bozulması ile aşınma hızları tekrar yükselmiştir.
- Aşınma derinliği ve alanı açısından işlemsiz numune (8,95 µm ve 3588 µm²) en zayıf performansı göstermiştir. PN numunesinde bu değerler belirgin şekilde düşmüş (1,96 µm ve 537 µm²), %25 O₂ 1h koşulu ise en düşük değerlerle optimum performansı sağlamıştır.
- Mikro sertlik ölçümlerinde PN sonrası yüzey sertliği 527 HV_{0.3} olarak bulunmuş, bu değer işlemsiz numuneye göre artış göstermiştir. En yüksek sertlik değeri %25 O₂ 0,5h numunesinde 671 HV_{0.3} olarak ölçülmüştür. Ancak süre uzadıkça sertlikte düşüş meydana gelmiş, %50 O₂ 1,5h numunesinde 307 HV_{0.3} değerine kadar gerilemiştir.
- Genel olarak %25 O₂ 1h ve %50 O₂ 1h koşulları optimum tribolojik performansı sağlamış, kısa süreli oksidasyon sertlik açısından en iyi sonuçları vermiş, uzun süreli oksidasyonlarda ise tabaka bütünlüğü bozulduğu için performans kayıpları yaşanmıştır.

6. KAYNAKLAR

- Abakay E, 2023, Vanadyum nitrür kaplamalar ile çeliklerin yüksek korozyon dayanımının sağlanması ve kaplama-nitrür-altlık üç bölgesinin incelenmesi, BŞEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 10(2), 345-355.
- Abdelbary A, 2020, Extreme Tribology: Fundamentals And Challenges, Taylor & Francis Group, London, 72-86.
- Abedi H, Salehi M, Yazdkhasti M, Hemmasian A, 2010, Effect of high temperature post-oxidizing on tribological and corrosion behavior of plasma nitrided AISI 316 austenitic stainless steel, Vacuum, 84(9), 1141-1148.
- Aghajani H, Behrangi S, 2017, Plasma Nitriding of Steels, First. Baskı, Springer, 3-7.
- Akan T, 2006, Maddenin 4. Hali Plazma ve Temel Özellikleri, Elektronik Çağdaş Fizik Dergisi, 4.
- Aksöz S, Kaya T, Erdemir A, 2023, High-temperature oxidation behavior of nitrided and oxidized steels. Vacuum, 214, 112207.
- Akşit İ, 2008, Plazma Nitrülenmiş İnconel 718' in Yüksek Sıcaklık Oksidasyonu, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
- Alves C, Araújo F O, Ribeiro K J B, Costa J A P, vd., 2006, Use of Cathodic Cage in Plasma Nitriding, Surface and Coatings Technology, Elsevier BV, 2450-2454.
- Andersson O, 2018, Comparison of different nitriding processes on PM materials and their effect on properties, Presented at EURO PM in Bilbao, October 14-16.
- Apelfeld A, Borisov A, Dyakov I, Grigoriev S, Krit B, Kusmanov S, vd., 2021, Enhancement of medium-carbon steel corrosion and wear resistance by plasma electrolytic nitriding and polishing, Metals, 11(10), 1599.
- Aryanto D, Wibowo R A, Widharto T, 2016, Structure and high temperature oxidation of mechanical alloyed steels, AIP Conference Proceedings, 1717(1), 020008.

- Aslan M, 2011, İmplant Malzemesi Olarak Kullanılan CoCrMo Malzemesinin Plazma Oksidasyonu, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
- Atapour M, Ashrafizadeh F, 2012, Cyclic Oxidation Behavior of Plasma Nitrided Valve Steel, Elsevier BV, Physics Procedia 32, 853-860.
- Ayaz T, 2023, Plazma Nitrürleme Yönteminin AISI 8620 Çeliğinin Aşınma Direncine Etkisi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- Başaran A, 2007, Toz Metal Parçalara Isıl ve Mekanik Yüzey İşlemlerin Birlikte Uygulanabilirliğinin Araştırılması, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Isparta.
- Bell T, Sun Y, Lei M K, 2002, Plasma surface engineering of low alloy steel, Materials Science and Engineering, A, 140, 15-23.
- Birks N, Meier G H, Pettit F S, 2006, Introduction to the High-Temperature Oxidation of Metals. Cambridge University Press.
- Boyarbay B, 2007, Plazma Nitrürleme ile Si (100) Yüzeyi Üzerine Büyütülen Ara yüzey Tabakasının Schottky Diyot Parametreleri Üzerine Etkisi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri.
- Boynazarov U R, Razzokov T K, 2023, Formation of diffusion nitride-oxide coatings, E3S Web of Conferences, 410, 04025.
- Chekalova E A, Zhuravlev A V, 2021, Increased wear resistance of high-speed tools due to diffusion discrete oxidation, MATEC Web of Conferences, 346, 02014.
- Cui X, Zhang H, Wang Y, Chen Y, 2025, Experimental and numerical studies on the tribological behavior of 20GrNi2MoV steel under dry sliding conditions, Coatings, 15(5), 506.
- Çelik İ, 2014, Akımsız Ni-B Kaplanmış ve Plazma Nitrülenmiş Saf Titanyumun Yapısal, Tribolojik ve Elektrokimyasal özelliklerinin İncelenmesi, Atatürk Üniversitesi,

Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum.

Develi F, 2010, Plazma Nitrürleme ve Borlama İle Çift Yüzey İşlem Uygulanmış AISI 8620 Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar.

Dong H, Sun Y, Bell T, 2005, Enhanced wear resistance of steels by dual surface engineering, *Surface and Coatings Technology*, 200(7), 2167-2173.

Du H, He L, Wu C, Liu J, Chen X, 2023, Study on the growth mechanism of the internal oxide layer, *Frontiers in Materials*, 10, 1218875.

Ebrahimi M, Sohi M H, Raouf A H, Mahboubi F, 2010, Effect of Plasma Nitriding Temperature on The Corrosion Behavior of AISI 4140 Steel Before and After Oxidation, *Elsevier BV, Surface & Coatings Technology* 205, 261-266.

Edenhofer B, 1974a, Physical and Metallurgical Aspect of Ionitriding, *Heat Treatment of Metals*, 2, 23-28.

Elder J E, Thamburaj R, Patnaik P C, 1988, Optimising Ion Implantation Conditions for Improving Wear, Fatigue and Fretting Fatigue of Ti-6Al-4V, *Internationals Materials Reviews*, Vol. 33, No. 6, pp. 289-312.

Erdoğan A, Ünal O, Gök M S, Özdemir S, Alkan S, 2024, Bilyalı Dövme ve Plazma Nitrürleme İşlemlerinin AISI 4140 Çeliğinin Aşınma Dayanımına Etkisi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 12, 1126-1135.

Erözek M E, 2014, Gaz Nitrürlemede Yıkama Kimyasallarının Yüzey Nitrürleme Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul*.

Eshkabilov Y, Muminov N, Kholmurodov S, 2023, Structural-phase transformations during nitro-oxidation of steels at elevated temperatures, *E3S Web of Conferences*, 431, 03014.

Figuerola C A, Ybarra G, Schneider J, 2023, Plasma nitriding of Fe–Cr–Ni steels: Phase

composition and tribological behavior. Surface & Coatings Technology, 469, 129104.

Gerçekçioğlu E, 1998, Plazma Nitrülenmiş ve Beyaz Tabakası Kaldırılmış AISI H13 ve 722 M24 Çeliklerinin Farklı Sıcaklıklarda Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri.

Grigoriev S N, Tambovskiy I V, Mukhacheva T L, Kusmanova I A, Podrabinnik P A, vd., 2024, Features of increasing the wear resistance of 90CrSi tool steel surface under various electrophysical parameters of plasma electrolytic treatment, Metals, 14(9), 994.

Guillen J C, Naeem M, Garcia H M, Davila J L, Guillen M R, vd., 2020, Duplex Plasma Treatment of AISI D2 Tool Steel by Combining Plasma Nitriding (with and without white layer) and Post-oxidation, Elsevier BV, Surface & Coatings Technology 385, 125420.

Güneş İ, 2006, Plazma Nitrüleme ile Çelikler Üzerinde Kompleks Kaplamaların Oluşturulması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar.

Gürkan M, 2007, Ostenitik ve Martensitik Paslanmaz Çeliklerin Yüksek Sıcaklık Aşınma Davranışları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar.

Haseeb A S M A, Hasan S, Masjuki, H H, 2007, The effect of oxidation on the wear characteristics of DLC-coated steel, Wear, 262(11-12), 1253-1258.

He Z, Jia W, Liu X, Wang D, Hu J, 2024, The Effect of Aluminum Addition on Plasma Nitriding For 42CrMo Steel, Materials Letters, Volume 377, 15 December 2024, 137440.

Karakan M, 2004, Plazma Nitrokarbürülen AISI 4140 Ve 1020 Çeliklerinin Yapısal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin Araştırılması, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum.

- Karamanlı İ A, 2024, Plazma Nitrüleme ve İndüksiyonla Sertleştirilmiş GGG60 Malzemenin Aşınma Davranışının İncelenmesi, Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Doktora Tezi, Karabük.
- Kiraz A T, 2019, Polimer Matrisli Demir Oksit Takviyeli Kompozit Malzemenin Kuru Kayma Aşınma Davranışı, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bartın.
- Knight J M, Wells R K, and Badyal, J P S, 1992, Plasma Oxidation of Coppersilver Alloy Surfaces, Chemical Materials, 4 (3), 640-641.
- Kolawole S A, Gajic I, Tanovic L, 2024, Statistical models for predicting wear and friction coefficient of valve tappet materials, Tribology in Industry, 46(2), 151-165.
- Korkmaz K, 2020, Gaz Nitrüleme Sonucu Oluşan Beyaz Tabakanın Nitrasyon Çeliğinin Aşınma Davranışına Etkisi, Gebze Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli.
- Köseoğlu B, 2021, Nitrülenmiş ve Borlanmış AISI 316L Paslanmaz Çeliğin Yapısal, Tribolojik ve Elektrokimyasal Özelliklerinin İncelenmesi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzincan.
- Krella A K, Ratajski J, 2025, The influence of plasma nitriding on the resistance of X20Cr13 steel. Elsevier BV, Wear, 564–565.
- Küçük A, Demir B, Şahin Y, 2021, Effect of plasma nitriding on microhardness and wear behavior of steels, Surface and Coatings Technology, 405, 126627.
- Liu H, Li J, Sun F, Hu J, 2014, Characterization and Effect of Pre-oxidation on D.C. Plasma Nitriding for AISI4140 Steel, Elsevier BV, Vacuum 109, 170-174.
- Liu Y, Li P, Wang S, 2024, Influence of plasma oxidation parameters on the microstructure and tribological performance of nitrided steels, Journal of Materials Research and Technology, 28, 4864-4876.

- Lu J, Dou H, Zhou Z, Li H, Wang Z, Jiang M, vd., 2023, Effect of Rapid Hollow Cathode Plasma Nitriding Treatment on Corrosion Resistance and Friction Performance of AISI 304 Stainless Steel, *Materials*, 16(24), 7616.
- Luo K, Chen L, Zhang P, Wang Y, 2025, Evolution of friction products and wear mechanism under oxidative conditions, *Wear*, 556, 206175.
- Manova D, Biederman H, Mändl S, 2024, Recent advances in plasma nitriding of steels: Microstructure–property correlations. *Vacuum*, 223, 112075.
- Menthe E, Rie K T, Schultze D, Simson S, 1995, Structure and properties of plasma nitrided stainless steel, *Surface and Coatings Technology*, 74-75, 412-416.
- Miyamoto J, Abraha P, 2019, The effect of plasma nitriding treatment time on the tribological properties of the AISI H13 tool steel, *Surface and Coatings Technology*, Cilt 375, ss. 15-21.
- Mindivan F, 2022, Influence of plasma nitriding on dry wear, corrosion and tribocorrosion performance of 17-4 precipitation hardening stainless steel, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 53(8), 963-978.
- Molinari A, Bacci T, Campestri P, Pellizzari M, Tesi B, 1999, Plasma nitriding of Fe-Cr-Mo sintered steels, *Powder Metallurgy*, Informa UK Limited, Vol.42, 119-125.
- Naeem M, Guillen J C, Khalid A, Flores I, Arroyo R, vd., 2022, Improved Wear Resistance of AISI-1045 Steel by Hybrid Treatment of Plasma Nitriding and Post-oxidation, *Elsevier BV, Tribology International* 175, 107869.
- O'Brien J M, Goodman D, 1991. Plasma (Ion) Nitriding, *Metals Handbook* (10th ed.), Heat treatment, Vol.4, ASM International, Metals Park OH.
- Özsaraç U, Yılmaz R, Ekerer F A, Uzun H, 2001, Sementasyon İşlemi Yapılan Çeliklerde Mikro Sertlik ve Mikroyapı Değişiminin İncelenmesi, *Metalurji Dergisi*, Aralık, 34-38.
- Park H, Lee J, Kim S, Chung C, 2023, Effect of plasma oxynitriding temperature on wear

and friction behaviour of steels, International Journal of Applied Ceramic Technology, 20(7), 4211-4223.

Pye D, 2003, Practical Nitriding And Ferritic Nitrocarburizing, 1st Edition, ASM International.

Rolinski E, LeClaire F, Clubine D, Sharp G, Boyer D, Notman R, 2000, Kinetics of Plasma Nitriding and Renitriding of 3% Cr-Mo-V Steel, ASM International, 9:457-462.

Rovani A C, Crespi A E, Sonda V, Cemin F, Echeverrigaray F G, vd., 2011, Plasma Post-oxidation Mechanisms of Nitrided Ferrous Alloys, Elsevier BV, Surface & Coatings Technology 205, 3422-3428.

Selçuk B, 1994, Borlanmış AISI 1020 ve 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri.

Şengül A B, 2011, Plazma Nitrüleme Yapılmış Çelik Malzemenin Değişken Yük Altındaki Davranışı, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum.

Shen H, Wang L, 2019, Oxide Layer Formed on AISI 5140 Steel by Plasma Nitriding and Postoxidation in a Mixture of Air and Ammonia, Elsevier BV, Journal of Alloys and Compounds 806, 1517-1521.

Soylu M, 2006, Atmalı Katodik Vakum Ark Depolama Sistemiyle Üretilen ZnO'nun Elektrik İletkenliği ve Isıl İşleme Değişimi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Adana.

Stachowiak G, Batchelor A W, 2013, Engineering tribology, First. Baskı, Butterworth-Heinemann, 483-593.

Stephen M C, 1991, ASM Handbook Volume 4: Heat Treatment, ASM International, Detroit.

- Sun Q, Liu Z, Wang T, Zhang H, 2025, Comparative study on fretting wear damage mechanisms: oxidation, delamination and abrasion in steel contacts, *Wear*, 523-524, 205266.
- Sun Y, Bell T, Waugh D G, 2002, The oxidation behaviour of plasma nitrided and post-oxidised AISI 316 austenitic stainless steel, *Corrosion Science*, 44(10), 2075-2091.
- Sun Y, Li X Y, Bell T, 2004, Sliding wear behaviour of surface engineered AISI 316 austenitic stainless steel, *Wear*, 256(9-10), 852-861.
- Sun Y, 2010, Tribological behaviour of surface engineered ferrous alloys. *Wear*, 267, 1-7.
- Sun Y, Liu J, Li H, Liu J, Wang Y, 2023, Effect of oxide layers formed by thermal oxidation on the dry sliding friction and wear behavior, *Tribology International*, 186, 108597.
- Tao X, Li X, Dong H, Leyland A, Matthews A, Leyland A, 2021, Evaluation of the sliding wear and corrosion performance of triode-plasma nitrided stainless steels, *Surface and Coatings Technology*, 409, 126890.
- Tekdir H, 2019, Seçici Lazer Ergitme (SLE) ile Üretilen 316L/Ti6Al4V Tabakalı Yapıların Tribolojik Özelliklerinin Plazma Oksidasyon ile İyileştirilmesi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
- Teng H, Li X, Zhu Y, Wu J, 2023, The oxide layer of 10Mn5 medium manganese steel for hot-stamping conditions: Composition, adhesion, and wear mechanisms, *Coatings*, 13(3), 570.
- Topçu Ş, 2010, Farklı Sartlarda Plazma Nitrülenmiş Çeliklerin Aşınma Davranışının Belirlenmesi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa.

- Ülker Ş, 2006, Puls Nitrürleme Cihazının Tasarımı ve AISI 52100 Çeliğinin Plazma Nitrürlemesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyonkarahisar.
- Wei R, Wilbur P J, Davis J A, 2015, Long-term oxidation behaviour of plasma modified steels, Surface and Coatings Technology, 272, 71-79.
- Yang M, 2012, Nitriding-Fundamentals, Modeling and Process Optimization, Doctoral Thesis, Worcester Polytechnic Institute, Worcester.
- Yao H, Liu S, Xu Z, 2024, Study on friction and wear performance of sliding metallic pairs under dry and lubricated conditions, Metals, 14(6), 1162.
- Yetim A F, Aslan M, Yıldız F, Hacısalihoğlu İ, Bayrak Ö, 2012, CoCrMo İmplant Alaşımının Plazma Oksidasyon İşlemi ile Aşınma Direncinin İyileştirilmesi, TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 53, sayı 628, s.37-43.
- Yılan F, 2022, Çentikli Parçaların Yorulma Özelliklerinin Plazma Nitrürleme İle İyileştirilmesi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
- Yıldız F, 2005, Nitrürlenmiş AISI 4140 Çeliğinin Plazma Ortamında Yaşlanma Davranışı, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Erzurum.
- Yıldız F, Karabıyık M, Öztürk O, 2022, Tribological and mechanical performance of plasma oxidized steels. Journal of Materials Research and Technology, 20, 1428-1440.
- Yılmaz F, Açıkgöz M, Açıkgöz E, 2021, Plazma nitrürlenmiş ve nitrülenip oksitlenmiş AISI 1040 çeliğinin aşınma davranışının incelenmesi, Düzce University Journal of Science and Technology, 9(2), 1161-1171.
- Yılmaz Ü T, Pehlivanlı B, Erkan A, 2023, Nitrokarbürleme ve son oksidasyon proseslerinin AISI 4140 çeliğinin mikroyapı ve yüzey özellikleri üzerine etkisi Politeknik Dergisi, 26(4), 1405-1412.

Young D J, 2016, High Temperature Oxidation and Corrosion of Metals, Elsevier Science

Zambrano O A, Sánchez J, Herrera C, 2024, Running-in period during sliding wear of austenitic steels: mechanisms and surface evolution, Tribology Letters, 72(4), 11867.

Zhou T, Wang J, Zhang C, 2024, Microstructural evolution and tribological response of oxide films formed on Fe-Cr alloys under plasma oxidation, Surface and Coatings Technology, 476, 129610.

İnternet Kaynakları

1- www.comertcelik.com/sementasyon-celikleri/Urunler/17crnimo6, 11.04.2025