

**PLAZMA  
NİTRÜLENMİŞ 17-4 PH PASLANMAZ ÇELİĞİN  
MEKANİK VE KOROZYON ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ  
Gözde Rabia AKTAŞ**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Plazma Nitrülenmiş 17-4 PH Paslanmaz Çeliğin Mekanik ve Korozyon  
Özelliklerinin İncelenmesi**

**Gözde Rabia AKTAŞ**  
<http://orcid.org/0000-0002-6087-3837>

Prof. Dr. Ali BAYRAM  
(Danışman)  
[Hhttps://orcid.org/0000-0001-7311-8358](https://orcid.org/0000-0001-7311-8358)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2019

## TEZ ONAYI

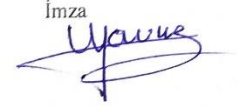
Gözde Rabia AKTAŞ tarafından hazırlanan ""Plazma Nitrülenmiş 17-4 PH Paslanmaz Çeliğin Mekanik ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi"" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Ali BAYRAM

**Başkan** : Prof. Dr. Ali BAYRAM  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik  
Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza 

**Üye** : Prof. Dr. Nurettin YAVUZ  
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik  
Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza 

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Celalettin YÜCE  
Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa  
Bilimleri Fakültesi,  
Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza 

Yukarıdaki sonucu onayla tum

  
Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN  
Enstitü Müdürü  
.....

**U.Ü. 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 yararlanması 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.**

04/09/2019.

**Gözde Rabia AKTAŞ**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### PLAZMA NİTRÜRLENMİŞ 17-4 PH PASLANMAZ ÇELİĞİN MEKANİK VE KOROZYON ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

**Gözde Rabia AKTAŞ**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Ali BAYRAM

Plazma nitrüleme (PN) işlemi bir termo-kimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Diğer yüzey sertleştirme işlemlerine göre pek çok üstün özelliklere sahip olmasından dolayı birçok alanda uygulanmaktadır. Bu çalışma için, 17-4 PH (AISI 630) paslanmaz çeliği seçilmiştir. 17-4 PH çeliği çökeltme sertleşmesi özelliğine sahip bir paslanmaz çeliktir. 17-4 PH çeliğinden üretilmiş numunelere 400, 450 °C'de 12 saat süreyle, 3 : 1 (%75 N<sub>2</sub>-%25 H<sub>2</sub>) N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> gaz oranı şartlarında PN uygulanmıştır. PN işlemi sonrasında deney numunelerinin sertlikleri ölçülmüş ve ball-on-disk aşınma test cihazı ile aşınma testleri yapılmıştır. Ayrıca nitrürlenmiş numuneler tuzlu sis testine tabi tutulmuştur. Sertlik ölçümleri sonucunda PN450, PN400 kodlu numunelerin sertlikleri yaklaşık olarak sırasıyla 1130 HV<sub>0.025</sub>, 1042 HV<sub>0.025</sub> bulunmuştur. Temel malzeme sertliği ise 361 HV<sub>1</sub>'dir. Aşınma deneyi sonucunda, PN450 kodlu numune en iyi aşınma davranışını göstermiştir. PN işlemi uygulanan numunelerin tuzlu sis testi sonucunda korozyona uğradıkları gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Plazma nitrüleme, yüzey sertleştirme işlemleri, sertlik, aşınma, korozyon **2019, x + 82 sayfa**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

### **INVESTIGATION OF MECHANICAL AND CORROSION PROPERTIES OF PLASMA NITRIDED 17-4 PH STAINLESS STEEL**

**Gözde Rabia AKTAŞ**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Prof. Dr. Ali BAYRAM

Plasma nitriding (PN) is a thermo-chemical surface hardening process. Since it has many superior properties compared to other surface hardening processes, it is applied in many areas. 17-4 PH (AISI 630) stainless steel has been selected for this study. 17-4 PH stainless steel has the property of precipitation hardening. PN was applied to samples produced from 17-4 PH stainless steel at 400, 450 ° C for 12 hours under the conditions of 3 : 1 (75% N<sub>2</sub>- 25% H<sub>2</sub>) N<sub>2</sub> / H<sub>2</sub> gas ratio. After the PN process, the hardness of the test samples were measured and the wear tests were performed with the ball-on-disc tribometer. The nitrided samples were also subjected to salt fog tester. As a result of hardness measurements, the hardness values of PN450 and PN400 samples were found to be approximately 1130 HV<sub>0.025</sub>, 1042 HV<sub>0.025</sub> respectively. The untreated material hardness is 361 HV<sub>1</sub>. In consequence of wear test, the PN450 coded samples showed the best wear behavior. It was observed that the samples treated with PN had corroded as a result of salt fog test.

**Key words:** Plasma nitriding, surface hardening processes, hardness, wear, corrosion  
**2019, x + 82 pages**

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının yürütülmesinde; destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Ali Bayram'a, deneyler ve tez yazımı sırasında görüş ve yönlendirmelerinden faydalandığım mesai arkadaşım Arş. Gör. Oğuz Tunçel'e teşekkürlerimi sunarım.

Numunelerin hazırlanmasında ve aşınma deneylerin yapılmasında destek veren; Er&Mir Tekstil ve Makine San. Tic. Ltd. Şti. ve Dr. Ersin Eser Korkmaz'a teşekkürlerimi sunarım.

Korozyon deneylerinin yapılmasında yardımcı olan İsmail Yaşar'a ve Coşkunöz Holding'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu zamana kadar her anımda yanımda olan ve desteklerini bir an bile esirgemeyen biricik anneme ve babama, ayrıca beni her anımda motive eden canım kardeşlerime teşekkürlerimi sunarım.

Gözde Rabia AKTAŞ  
04/09/2019

## İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	3
2.1. Paslanmaz Çelikler .....	3
2.2. Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması .....	3
2.2.1. Ostenit Paslanmaz Çelikler .....	4
2.2.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler .....	5
2.2.3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler .....	5
2.2.4. Dubleks (Çift Fazlı) Paslanmaz Çelikler .....	6
2.2.5. Çökeltme Sertleşmeli Paslanmaz Çelik .....	6
2.3. Yüzey Sertleştirme Yöntemleri .....	8
2.4. Termo-Kimyasal İşlemler .....	9
2.5. Nitrürleme .....	10
2.5.1. Plazma Nitrürleme .....	12
2.5.2. Alaşım Elementlerinin Etkisi .....	16
2.5.3. Plazma Nitrürlemenin Avantajları .....	17
2.5.4. Plazma Nitrürlemenin Dezavantajları .....	18
2.6. Aşınma .....	19
2.6.1. Abratif Aşınma .....	20
2.6.2. Aderif Aşınma .....	20
2.6.3. Hertz Noktasal Temas Basıncı .....	22
2.6.4. Aşınma Test Cihazı .....	24
2.7. Korozyon .....	25
2.8. Korozyon Biçimleri .....	26
2.8.1. Kimyasal Korozyon .....	27
2.8.2. Elektrokimyasal Korozyon .....	27
2.9. Korozyon Türleri .....	29
2.9.1. Genel ( Üniorm ) Korozyon .....	30
2.9.2. Galvanik Korozyon .....	31
2.9.3. Tanelerarası Korozyon .....	32
2.9.4. Oyuklu (Çukur) Korozyonu .....	33
2.9.5. Aralık Korozyonu .....	35
2.9.6. Gerilmeli Korozyon .....	36
2.10. Paslanmaz Çeliklerin Pasifleşmesi .....	37
2.11. Korozyon Deneyleri .....	38
2.11.1. Tuz Püskürtme Testi .....	39
2.11.2 Tuzlu Sis Testi .....	39
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	41
3.1. Materyal .....	41
3.2. Yöntem .....	42
3.2.1. Plazma Nitrürleme İşlemi .....	42



3.2.2. Sertlik Ölçümleri .....	43
3.2.3. Aşınma Testleri .....	44
3.2.4. Mikroyapı çalışmaları .....	46
3.2.5. Korozyon Deneyi .....	46
4. BULGULAR ve TARTIŞMA .....	47
4.1. Mikro yapı Sonuçlarının Yorumlanması .....	47
4.2. Sertlik Sonuçlarının Yorumlanması .....	50
4.3. Aşınma Testinin Yorumlanması .....	52
4.4. Korozyon Deneyinin Yorumlanması .....	71
5. SONUÇ .....	77
KAYNAKLAR .....	79
ÖZGEÇMİŞ .....	82

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$\mu$	Sürtünme katsayısı
r	Yarıçap
$\mu\text{m}$	Mikrometre
$\sigma$	Standart sapma
X	Aritmetik ortalama

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
AISI	American Iron and Steel Institute
AMS	Aerospace Material Standarts
ASTM	American Society for Testing and Materials
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	EuroNorm
EMF	Elektro Motor kuvvet serisi
HV	Hardness Vickers
ISO	International Organization for Standardization
PH	Precipitation Hardening
PN	Plazma Nitrüleme
SCC	Stress corrosion cracking
UNS	Unified numbering system
W-Nr	Werkstoffnummer (Material Number)

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2. 1. Cr ve Ni miktarına göre paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması .....	4
Şekil 2. 2. Paslanmaz çelik gruplarının avantaj ve dezavantaj yönünden karşılaştırılması .....	7
Şekil 2. 3. Nitrürlenmiş yüzeyin sertlik profil şeması .....	11
Şekil 2. 4. Nitrürlenmiş demir/çelik malzemenin yüzeyinde oluşan difüzyon ve beyaz tabakanın şematik görüntüsü .....	12
Şekil 2. 5. Plazma nitrüleme mekanizması .....	15
Şekil 2. 6. Plazma nitrürlenmiş bir parçanın iç yapı ve şematik gösterimi <b>Hata! Yer işareti tanımlanmamış.</b>	
Şekil 2. 7. Alaşım elementlerinin çeliğin nitrasyonu sonrası sertliğe etkisi .....	17
Şekil 2. 8. Sistem aşınmasının sürtünme kuvvetine etkisi .....	21
Şekil 2. 9. İki küre arasındaki temas .....	23
Şekil 2. 10. Ball-on-disc test cihazı prensip şeması .....	24
Şekil 2. 11. Korozyon hasarının oluşum şeması .....	26
Şekil 2. 12. Lokal korozyonun makroskobik ve mikroskobik formları .....	27
Şekil 2. 13. Galvanik hücre .....	28
Şekil 2. 14. Korozyon hücresi .....	29
Şekil 2. 15. Paslanmaz çeliklerde sıklıkla karşılaşılan korozyon türleri.....	30
Şekil 2. 16. Üniform Korozyon .....	31
Şekil 2. 17. Galvanik ilişkinin korozyona etkisi .....	31
Şekil 2. 18. Paslanmaz çelik içinde taneler arasında biriken krom karbür çökeltisi .....	33
Şekil 2. 19. Çukur korozyonun oluşma mekanizması .....	34
Şekil 2. 20. Çukurlaşma Faktörünün Belirlenmesi .....	35
Şekil 2. 21. Gerilmeli korozyon çatlaması oluşması için olması gereken faktörler .....	36
Şekil 2. 22. Işık mikroskopuyla çekilmiş gerilmeli korozyon çatlağı fotoğrafı.....	37
Şekil 3. 1. Ball-on-disc aşınma test cihazı .....	44
Şekil 4. 1. PN400 kodlu numunenin x200 görünümü.....	48
Şekil 4. 2. PN400 kodlu numunenin x500 görünümü.....	48
Şekil 4. 3. PN450 kodlu numunenin x200 görünümü.....	49
Şekil 4. 4. PN450 kodlu numunenin x500 görünümü.....	49
Şekil 4. 5. BM, PN400 ve PN450 kodlu numunelerin sertlik dağılımları .....	51
Şekil 4. 6. 0.7 kg yükte gerçekleştirilen aşınma deney numuneleri ağırlık kaybı.....	54
Şekil 4. 7. 1 kg yükte gerçekleştirilen aşınma deney numuneleri ağırlık kaybı.....	54
Şekil 4. 8. 1 kg yük ve 15 mm/s hızda yapılan aşınma deney sonuçları .....	55
Şekil 4. 9. 1 kg yük ve 5 mm/s hızda yapılan aşınma deney sonuçları.....	55
Şekil 4. 10. 0.7 kg yük ve 15 mm/s hızda yapılan aşınma deney sonuçları.....	56
Şekil 4. 11. 0.7 kg yük ve 5 mm/s hızda yapılan aşınma deney sonuçları.....	56
Şekil 4. 12. BM kodlu numunenin 0.7 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100. ....	59
Şekil 4. 13. BM kodlu numunenin 0.7 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100. ....	59
Şekil 4. 14. BM kodlu numunenin 1 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100.....	60
Şekil 4. 15. BM kodlu numunenin 1 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100.....	60

Şekil 4. 16. PN400 kodlu numunenin 0.7 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100. ....	61
Şekil 4. 17. PN400 kodlu numunenin 0.7 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100. ....	61
Şekil 4. 18. PN400 kodlu numunenin 1 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100. ....	62
Şekil 4. 19. PN400 kodlu numunenin 1 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100. ....	62
Şekil 4. 20. PN450 kodlu numunenin 0.7 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100. ....	63
Şekil 4. 21. PN450 kodlu numunenin 0.7 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100. ....	63
Şekil 4. 22. PN450 kodlu numunenin 1 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100. ....	64
Şekil 4. 23. PN450 kodlu numunenin 1 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100. ....	64
Şekil 4. 24. BM kodlu numunenin 0.7 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200. ....	65
Şekil 4. 25. BM kodlu numunenin 0.7 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200. ....	65
Şekil 4. 26. BM kodlu numunenin 1 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200. ....	66
Şekil 4. 27. BM kodlu numunenin 1 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200. ....	66
Şekil 4. 28. PN400 kodlu numunenin 0.7 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200. ....	67
Şekil 4. 29. PN400 kodlu numunenin 0.7 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200. ....	67
Şekil 4. 30. PN400 kodlu numunenin 1 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200. ....	68
Şekil 4. 31. PN400 kodlu numunenin 1 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200. ....	68
Şekil 4. 32. PN450 kodlu numunenin 0.7 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200. ....	69
Şekil 4. 33. PN450 kodlu numunenin 0.7 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200. ....	69
Şekil 4. 34. PN450 kodlu numunenin 1 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200. ....	70
Şekil 4. 35. PN450 kodlu numunenin 1 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200. ....	70
Şekil 4. 36. BM korozyon numunelerinin tuz sis testi sonrası genel görünüşü .....	72
Şekil 4. 37. PN400 korozyon numunelerinin tuzlu sis testi sonrası genel görünüşü .....	73
Şekil 4. 38. PN450 korozyon numunelerinin tuzlu sis testi sonrası genel görünüşü .....	73
Şekil 4. 39. PN450 korozyon numunelerinin tuzlu sis testi sonrası oluşan oyuklu korozyonun genel görünümü .....	74
Şekil 4. 40. PN400 korozyon numunelerinin tuzlu sis testi sonrası oluşan oyuklu korozyonun genel görünümü .....	74

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3. 1. 17-4 PH çeliğinin diğer standartlardaki karşılığı .....	41
Çizelge 3. 2. 17-4 PH paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi .....	41
Çizelge 3. 3. 17-4 PH paslanmaz çeliğin oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri .....	41
Çizelge 3. 4. Tungsten karbür bilyenin özellikleri .....	42
Çizelge 3. 5 Numune Kodları.....	42
Çizelge 3. 6. PN işlem parametreleri .....	43
Çizelge 3. 7. Aşınma deneyi değişkenleri .....	44
Çizelge 3. 8. Temas basıncının hesaplanmasında kullanılan veriler.....	45
Çizelge 3. 9. Değişik yükler için temas basınçları sonuçları .....	46
Çizelge 4. 1. Başlangıç numune sertlikleri.....	50
Çizelge 4. 2. PN400 numunesinin sertlik dağılımı .....	51
Çizelge 4. 3. PN450 numunesinin sertlik dağılımı .....	51
Çizelge 4. 4 Aşınma deneyinden önce ve sonra ölçülen numune ağırlıkları .....	52
Çizelge 4. 5. PN400 numunelerinin korozyon deneyi öncesinde ve sonrasında alınan ağırlık değerleri .....	71
Çizelge 4. 6. PN450 numunelerinin korozyon deneyi öncesinde ve sonrasında alınan ağırlık değerleri .....	72

## 1. GİRİŞ

Makine parçaları fonksiyonlarını yerine getirirken birçok farklı yüke maruz kalırlar. Makine parçalarının üzerine gelen yükleri karşılayabilmesi için, makine parçalarına uygulanan işlemlerden biriside ısı işlemlerdir. Sürtünmeye maruz kalan makine elemanlarının aşınma dirençlerini arttırmak için yüzey sertleştirme işlemleri uygulanmaktadır. Genellikle malzemelere uygulanan yüzey işlemleri sonrasında malzemelerin dış yüzeyleri daha sert bir yapıya sahip olurken, iç (çekirdek) kısmının daha tok ve sünek bir yapıya sahiptir. Yüzey işlemleri sonrasında malzemenin aşınma direnci artarken, parçanın yorulma ömrünü artmaktadır. Plazma nitrüleme yöntemi 1960'lı yıllarda uygulanmaya başlanmıştır. Plazma nitrüleme ile yüzeyi sertleştirilmiş çelikler özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında günümüzde çok farklı alanlarda geniş uygulama alanı bulmaktadır. Plazma nitrüleme işleminin avantajlarından biri de yüzeyde düşük sürtünme katsayılarıyla nedeniyle iyi tribolojik özellikler göstermektedir (Özdemir ve Muzaffer 2003). Bu nedenden dolayı, bu yöntemle malzemelerin tribolojik özelliklerindeki değişimlerin incelenmesi araştırılması gereken önemli bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır.

17-4 PH martenzitik çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelik; mukavemet, tokluk, korozyon direnci ve imalat kolaylığı özelliklerinin iyi kombinasyonundan dolayı endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, 17-4 PH çeliğin düşük yüzey sertliği ve zayıf tribolojik özelliklerine sahiptir, bu da temas ve aşınmanın söz konusu olduğu alanlarda kullanımını sınırlandırabilir. Plazma nitrüleme, gaz nitrüleme, plazma daldırma, iyon implantasyonu gibi birçok yüzey modifikasyon yöntemleri 17-4 PH çeliğinin özelliklerini daha iyi hale getirmek için araştırılmakta ve araştırılmaya devam ettirilmektedir (Liu ve Yan 2010).

Bu tip bir çeliğin mekanik özellikleri ısı işlemleriyle iyileştirilebilmesine rağmen, aşınma direncini ve korozyon direncini kaybetmeksizin yorulma direncini daha iyi hale getirmek için yüzey sertliğini arttırmanın gerekliliği hala mevcuttur. Aşınma direnci ve korozyon direncini kaybetmeksizin yorulma direncinin daha iyi hale gelmesi çoğunlukla yüzey özellikleri ile ilgili olması nedeniyle, yüzeyin bu iki özelliğe karşı etkili olması

beklenmektedir. Yüzey işlemlerinden biri olan nitrürleme yöntemiyle, yüksek yüzey sertlikleri elde edilebilmektedir.(Riazi ve ark . 2017)

Bu çalışmada, PH 17-4 paslanmaz çeliğine farklı sıcaklıklarda (400, 450 °C), 12 saat süreyle, 3:1 (%75 N<sub>2</sub>- %25 H<sub>2</sub>) N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> gaz oranı şartlarında, 1.2 mbar işlem basıncında gerçekleşen plazma nitrürleme işlemi sonucunda aşınma ve korozyon davranışları değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda, yüzey sertlikleri ve sertlik dağılımları incelenmiştir. Ball-on-disk aşınma cihazıyla farklı yüklerde uygulanan aşınma testleriyle sürtünme katsayı değişimi incelenmiştir. Mikro yapı fotoğrafları ve aşınma numunelerinin optik mikroskop görüntüleri incelenmiştir. Bununla birlikte, PN işleme tabi olmuş PH 17-4 çeliğinden üretilmiş numuneler tuzlu sis testine tabi tutulmuş, numunelerin plazma nitrürleme işleminden sonra korozyon davranışları yorumlanmıştır.

## **2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI**

### **2.1. Paslanmaz Çelikler**

Paslanmaz çelikler minimum % 12 serbest Cr içeren demir bazlı alaşımlardır. Bazı paslanmaz çelikler ise % 30'dan fazla Cr ve % 50 den az demir içerir. Çeliklerin paslanmaz özelliğini krom yönünden zengin bir oksit film tabakası oluşturarak kazanırlar. Paslanmaz çeliğe farklı özellikler kazandırmak için nikel, manganez, molibden, bakır, titanyum, silisyum, niyobyum, alüminyum, kükürt ve selenyum gibi birçok farklı element eklenebilir. (International 1987)

### **2.2. Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması**

Paslanmaz çelikler mikro yapıya göre sınıflandırılmış ve temel olarak beş grupta incelenmiştir.

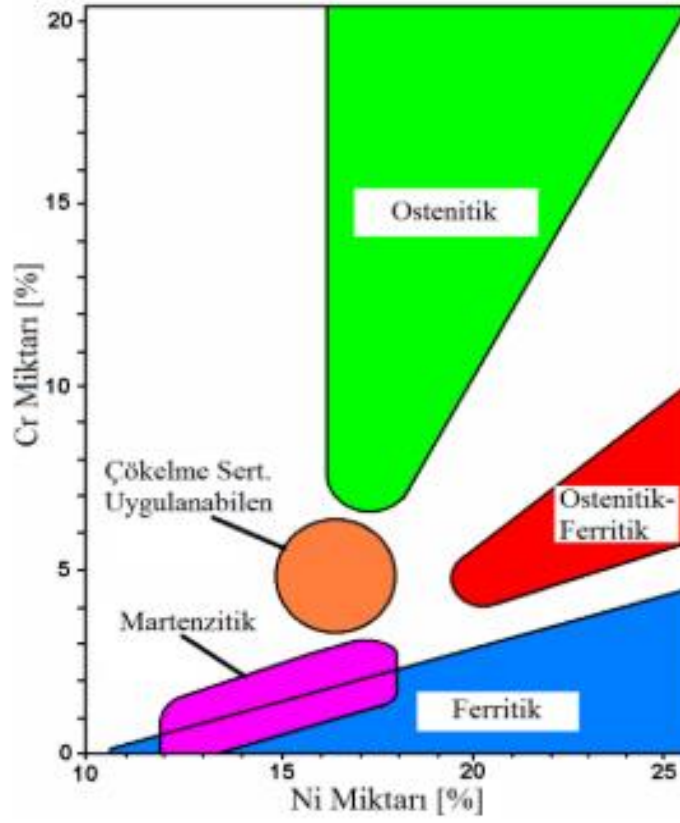
Bunlar:

- ostenitik,
- marteolitik,
- ferritik,
- dubleks (ostenitik + ferritik) olarak tanımlanmıştır.

Ek olarak, beşinci grup ise çökelme sertleştirilmesi uygulanabilen (PH) paslanmaz çeliklerdir. (International 1987)

Krom ve nikel miktarına göre paslanmaz çeliklerde mikro yapı değişmektedir. Nikel ostenit bölgesini genişletirken, krom ise ters etki yaparak daraltır. Krom ve nikel miktarına göre paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması Şekil 2.1' de gösterilmiştir. (Türkan 2013)





**Şekil 2. 1.** Cr ve Ni miktarına göre paslanmaz çeliklerin sınıflandırılması (Euro Inox 1993, Türkan 2013)

### 2.2.1. Ostenit Paslanmaz Çelikler

Ostenitik paslanmaz çelikler, diğer paslanmaz çeliklere göre oldukça fazla kullanılır ve üretilir. Bu oran tüm paslanmaz çelikler içerisinde %70'e tekabül etmektedir. Diğer paslanmaz çeliklere göre en yaygın kullanılan çelikler olmakla birlikte korozyon direnci açısından da diğerlerine göre oldukça iyidir (Altan Özbek ve ark. 2017).

AISI 300 ostenitik paslanmaz çelik serisinde başlıca alaşım elemanı olarak demir-krom-nikel bulunmaktadır. 304 bunlar arasında en yaygın olarak kullanılanlardandır. 304 (18-8) tipi paslanmaz çelik, genellikle % 16 -26 Cr, % 10-22 Ni ve onunla birlikte molibden, titanyum, niyobyum, azot gibi küçük miktarlarda diğer alaşım elementleri içerir. AISI200 ostenitik paslanmaz çelik serisinde başlıca alaşım elemanları demir-krom-mangan-

nikeldir. Bu alaşımlarda, manganez (% 5-18) nikelin bir kısmı ile yer değiştirir. (International 1987).

Geniş bir sıcaklık skalasında iyi derecede tokluk ve yüksek dayanıma sahip olmasından dolayı diğer paslanmazlara göre öne çıkmaktadırlar. Bununla birlikte 540 °C'ye kadar sıcaklıklarda korozyona karşı dayanım özelliklerini kaybetmezler. Bu grupta sıklıkla tercih edilen malzemeler arasında 302, 304, 310, 316, 321 ve 347 paslanmazlar vardır (Özbek ve ark. 2017).

### **2.2.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler**

Ferritik paslanmaz çelikler faz dönüşümü göstermediği için sertleştirilemezler. Ferritik çelikler, % 11-30 Cr % 0.20 ye kadar karbon ve az miktarda da olsa Al, Nb, Ti ve Mo gibi alaşım elementleri içerir. Son zamanlarda, daha yüksek krom (% 30'a kadar), molibden (% 4' e kadar) ve nikel (% 2' ye kadar) içeren düşük karbon / azot sınıfları geliştirmiştir. Gerilmeli korozyon çatlamaına karşı mükemmel direnç sergileyen bu tip malzemelere süper ferritik çelikler denir. Ferritik paslanmaz çelikler tüm sıcaklıklarda ferritik yapıda olmasından dolayı, ostenit oluşturamazlar, bu nedenden dolayı sertleştirilemezler. 405, 409, 430, 442 ve 446 tip paslanmaz çelikler, ferritik paslanmaz çelikler arasında en çok tercih edilenleridir (International 1987, Odabaş 2007).

### **2.2.3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler**

Martenzitik paslanmaz çelikler bileşim olarak ferritik gruba benzerdirler. Fakat, ısıl işleme sertleşmeye izin verilebilsin diye ferritik gruba oranla daha çok karbon içerirken daha az krom içermektedir. Standart 400 serisi % 11 den % 18 e kadar Cr , % 1.2 ye kadar da C ve bununla birlikte bir miktar nikel ve mangan içermektedir. (International 1987) Martenzitik paslanmaz çeliklerin korozyon direnci genellikle ostenitik ve ferritik paslanmaz çelikler kadar iyi değildir. AISI 420,431, 440A, 440B, 440C tipi martenzitik çelikler korozyon direnci ve yüksek sertliğe ihtiyaç duyulduğunda kullanılır. 410 paslanmaz çelik ise martenzitik paslanmazlar arasında en çok kullanılanıdır (Günay 1999).

#### **2.2.4. Dupleks (Çift Fazlı) Paslanmaz Çelikler**

Çift fazlı paslanmaz çelikler yaklaşık olarak %22-25 Cr, %5-7 Ni, maksimum %4 molibden ve az miktar da olsa azot, bakır ve tungsten içermektedir. Ostenit ve ferritik fazların bir arada bulunduğu paslanmaz çeliklerdir (International 1987). Bahse konu çelikte dupleks yapıyı oluşturmak için, çelik 1000–1050°C sıcaklıkta tavlınır ve daha sonra hızlı bir şekilde soğutulur. Dupleks paslanmaz çelik ostenit ve ferritik fazları bir arada bulundurur ve bu iki fazın en iyi özelliklerini içerisinde barındırır. Dupleks (çift fazlı) çelikler en fazla oyuklu (pitting) korozyondan etkilenmektedir. Dupleks paslanmaz çelikler bileşimlerinde molibden içermeleri korozyon ve oyuklu korozyona karşı direncini artırır (Soncu 2008).

#### **2.2.5. Çökelme Sertleşmeli Paslanmaz Çelik**

Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler demir-krom-nikel esaslı alaşımlardır. Bu çelikler alüminyum, bakır ve titanyum gibi alaşım elementleri içerir. Bahse konu alaşım elementlerinin çelik içerisinde çökelti partikülleri oluşturmaktadır. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler uçak, uzay ve savunma sanayisinde yüksek mukavemet/ağırlık ve yüksek korozyon direnci gereğinden dolayı geliştirilmişlerdir. Temel olarak üç alt grupta incelenebilirler. Bunlar martenzitik, yarı ostenitik ve ostenitik çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler olarak isimlendirilirler.

Çökelme sertleşmesinin temeli şu şekilde açıklanabilir. Çökelen faz tanecikleri dislokasyon hareketlerini engelleyerek çeliğin mukavemetini arttırlar. Bu tip çeliklerde yüksek mukavemet ve tokluk, tavlama ve yaşlandırma işleminden sonra elde edilebilir. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler ilk olarak 1940'larda geliştirilmiştir ve o zamandan beri, üstün özelliklerinden dolayı çeşitli uygulamalarda çokça tercih edilmiştir. Bu özelliklerden en önemlisi, imalat kolaylığı, yüksek mukavemet, nispeten iyi süneklik ve mükemmel korozyon direncidir (Hsiao et al. 2002).

Deneysel çalışmalarda kullandığımız 17-4 PH (AISI 630) paslanmaz çeliği ağırlıkça yaklaşık % 3 oranında bakır içermektedir. Bakırca zengin çökeltilerin homojen bir şekilde martenzit fazı içerisinde dağıtılmasıyla çelik mukavemetlendirilir. Bu alaşım diğer çökeltme sertleşmeli paslanmaz çeliklerden daha çok yaygın olarak kullanılır. Çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelik olan 17-4 PH iyi mekanik özelliklerinin yüksek mukavemet, nispeten iyi süneklik ve muhteşem korozyon direncinin kombinasyonu nedeniyle petrol sahası vana parçaları, kimyasal işlem ekipmanları, hava taşıt parçaları, bağlantı elemanları, pompa, şaftlar, nükleer reaktör bileşenleri, dişliler, kağıt fabrikası ekipmanları, füze bağlantı parçaları, jet motor parçaları ve santrifüj kompresör rotorları gibi alanlarda geniş uygulamalarda kullanılmaktadır (Kochmański ve Nowacki 2006).

Paslanmaz çeliklerin mekanik ve fiziksel özellikleriyle birlikte avantaj ve dezavantajlarını ayrıca uygulama alanlarını gösteren tablo Şekil 2.2’de verilmiştir.

Çelik Tipi	Bileşim	Mekanik Özellikler	Fiziksel Özellikler	Avantajlar	Dezavantajlar	Uygulamalar
<b>Ostenitik</b>	15-27 % Cr 8-35% Ni 0-6 Mo, Cu, N (Mn ve/veya N,Ni yerini alabilir)	Çekme dayanımı: 490-860 MPa Akma Sımrı: 205-575 Mpa 50mm’de Uzama: 30-60 %	- Isıl işlem uygulanamaz  - Manyetik değil	- Düşük sıcaklıkta iyi süneklik - İyi genel korozyon direnci - Yüksek sürtünme dayanımı - İyi kaynak kabiliyeti - Yüksek tokluk	- Yüksek maliyet - Sınırlı dayanım - Yerel korozyon eğilimi	- Genel uygulamalarda geniş kullanım alanı bulur
<b>Ferritik</b>	11-30 % Cr 0-4 % Ni 0-4 % Mo	Çekme dayanımı: 415-650 MPa Akma Sımrı: 275-550 Mpa 50mm’de Uzama: 10-25 %	- Isıl işlem uygulanamaz  - Manyetik	- Çok yüksek olmayan maliyet - Gerilmeli korozyon çatlamasına karşı direnç	- Sınırlı dayanım - Tane büyümesi eğilimi	- Gerilmeli korozyon ve genel korozyona iyi direnç gerektiren parçalar - Deniz uygulaması
<b>Martenzitik</b>	11-18 %Cr 0-6 %Ni 0-2 %Mo	Çekme dayanımı: 480-1000 MPa Akma Sımrı: 272-860 Mpa 50mm’de Uzama: 14-30 %	- Isıl işlem ile sertleştirilebilir	- Makul maliyet - Yüksek sertlik ve dayanım	- Sınırlı korozyon direnci - Sınırlı kaynak kabiliyeti	- Yüksek dayanımlı parçalar - Pompalar, valfler ve kağıt makineleri
<b>Dubleks</b>	18-27% Cr 4-7 % Ni 2-4 % Mo, Cu, N	Çekme dayanımı: 680-900 MPa Akma Sımrı: 410-900 Mpa 50mm’de Uzama: 10-48 %	- Isıl işlem uygulanamaz	- Ostenitik çeliklerden daha iyi mekanik özellikler - Korozyon direnci	- $\sigma$ fazı oluşması nedeniyle 475°C sıcaklığa hassasiyet	- Doğalgaz tesislerinde - Kimya endüstrisinde - Isı değiştirgeçleri
<b>Çökeltme Sertleşmesi Uygulanabilir</b>	12-28 % Cr 4-7 % Ni 1-5 % Mo, Al, Ti, Co	Çekme dayanımı: 895-1100 MPa Akma Sımrı: 276-1100 Mpa 50mm’de Uzama: 10-35 %	- Isıl işlem ile sertleştirilebilir	Çok yüksek dayanım ve korozyon direnci	- Karmaşık ısıl işlem gerektirir.	- Çok yüksek dayanım ve korozyon direnci gerektiren parçalar

**Şekil 2. 2.** Paslanmaz çelik gruplarının avantaj ve dezavantaj yönünden karşılaştırılması (Soncu 2008)

### 2.3. Yüzey Sertleştirme Yöntemleri

Yüzey sertleştirme yöntemleri, çeliğin içerdiği karbon oranına göre ikiye ayrılır:

#### **Doğrudan sertleştirilebilen çeliklerde yüzey bölgesi sertleştirilmesi;**

- 1) Alevle Sertleştirme
- 2) Daldırma ile Sertleştirme
- 3) İndüksiyonla Sertleştirme
- 4) Elektron ışınlarıyla ve lazer ışınlarıyla sertleştirme

Doğrudan sertleştirilebilen çeliklerde yüzey bölgesi sertleştirilmesi işlemi  $\% C \geq 0.3$  karbon içeren tüm demir esaslı malzemelere uygulanabilir. Yapılan işlem parçanın yüzey bölgesine yoğun ısı verilerek ve hızlı bir soğutma yapılarak malzemenin sadece ısıtılan derinlikte yüzey bölgesinin sertleştirilmesidir. Bu işlemde malzemenin yüzey bölgesinin kompozisyonunu değiştirmez, yapılan işlem mekanizması su verme ile sertleştirme işlemi ile benzerdir.

#### **Suverme ile (doğrudan) sertleştirilemeyen çeliklerde yüzey bölgesi sertleştirilmesi**

Sementasyon ve diğer termokimyasal işlemler:

(Nitrüleme, alüminyumlama, borlama, kromlama, vanadyumlama gibi.)

Bu tip yüzey sertleştirme işlemleri malzemenin yüzey kompozisyonu değiştirme esasına dayanır. Termo-kimyasal işlemler genellikle sertleştirmeyi sağlayacak olan elementlerin isimleriyle adlandırılır. Örneğin; borlama , vanadyumlama , kromlama gibi.

Sementasyonla sertleştirme işlemi termokimyasal işlemler arasında en önemlilerinden biridir. Temel olarak malzeme yüzeyine karbon difüze ettirilerek veya yüzeyi karbonca zenginleştirilerek elde edilen yüzey sertleştirme yöntemidir.

Termo-kimyasal işlemlerde malzemenin istenilen derinliğine (max. 3 mm) kadar sertleştirilmesinin kontrolü mümkünken, doğrudan sertleştirilebilen çeliklerde yüzey

sertleştirme yöntemlerinde bu mümkün değildir. Termo-kimyasal yöntemler birçok avantaja neden olmasından dolayı günümüzde çokça tercih edilmektedir. Termo-kimyasal işlemlerin birçoğu katı, sıvı, gaz ortamlarında gerçekleşmektedir (Çelik et al. 2002). Bunun yanı sıra, gaz ortamında gerçekleşen termo-kimyasal işlemlerden faydalanarak plazma ortamında gerçekleştirilen termo-kimyasal işlemler geliştirilmiştir. Örneğin; yapılan termo-kimyasal işlemin hangi derinlikte sertleştirme yapılacağı tahmin edilebilirliğini ve tekrarlanabilirliğini arttırmak için, geleneksel gaz nitrürleme işlemi geliştirilerek alternatif iyon (plazma) nitrürleme tekniği kullanılmaya başlanmıştır (Czerwinski 2018).

Plazma ortamında gerçekleştirilen yüzey sertleştirme işlemlerinin başlıca avantajları şu şekilde sıralanabilir. Bunlar;

çevre dostu olması,

otomasyona uygun olması,

çarpılmanın minimum derecede olması yada olmaması,

mikro yapının değişiminin kontrol altında tutulabilir olması,

seri imalata uygun olması ve böylelikle daha ekonomik olması,

daha düşük sıcaklıklarda çalışılıyor olması da sayılabilir.

Plazma ortamında gerçekleşen termo-kimyasal yüzey sertleştirme yöntemlerinden biri olan plazma nitrürleme yönteminin birçok avantaja sahip olması nedeniyle bu çalışma kapsamında ele alınmıştır. Bu nedenden dolayı; diğer termo-kimyasal işlemler ayrıntılı bir şekilde anlatılmamış, nitrürleme ve plazma nitrürleme işlemleri üzerinde durulmuştur.

#### **2.4. Termo-Kimyasal İşlemler**

Yüzey mühendisliği, malzemenin yüzey bölgesini geliştirmeyi amaçlayan ekonomik olarak uygun, teknik olarak çekici bir yöntem olarak bilinmektedir. Bir çok uygulamada, malzemenin yüzeyi, malzemenin kullanım ömrünü tayin ettiğinden, malzeme yüzeyini fiziksel, kimyasal, elektrik, elektronik, manyetik veya mekanik özellikler dahil olmak üzere temel malzemeye göre fonksiyonel özelliklerini iyileştirmektedir. Yüzey mühendisliği uygulama alanlarında birisi olan termo-kimyasal işlemler, metal ve metal olmayan atomları, yüzeyin kimyasal ve mikro yapılarını değiştirmek için termal difüzyon

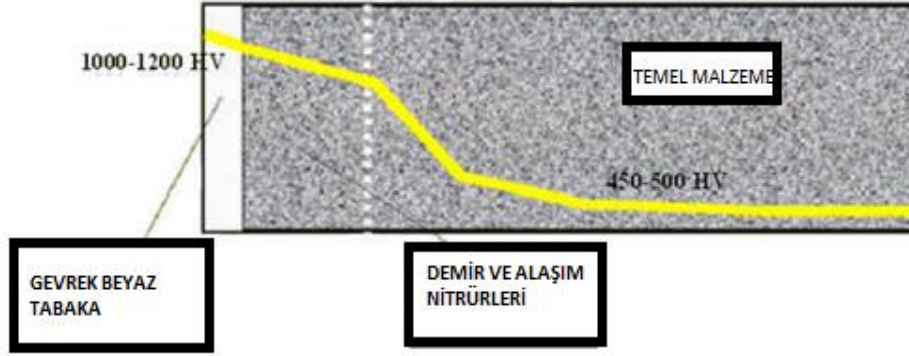
yöntemini kullanarak yüzeye difüze edilmesi işlemidir. Termo-kimyasal işlemlerin esası, karbon ve azot gibi arayer atomlarının malzeme yüzeyinden içeriye doğru difüze olmasıdır. Arayer atomları malzeme içerisinde uygulanan işleme bağlı olarak yeni fazların oluşumuna neden olurlar. Oluşan yeni fazlar malzemeye aşınma ve yorulma direncini artmasına katkı sağlar.

Geçmişte, termo-kimyasal işlemler; makine, otomotiv, alet yapımı, petrol sondajı, madencilik ve savunma gibi sınırlı alanlarda kullanılan işlenmiş parçalara, dövme ve döküm parçalara uygulanan bir yöntemdi. Nitrürleme, karbürleme ve onların kombinasyonları sıklıkla tercih edilen önemli yöntemler arasında yer almaktaydı. Fakat, teknolojinin gelişmesiyle birlikte termo-kimyasal işlemler bir çok uygulamada yer bulmaktadır (Czerwinski 2018).

## **2.5. Nitrürleme**

Nitrürleme,  $A_{c1}$  sıcaklığının altında, 450- 600 °C sıcaklıklarda, çeliğin yüzeyine azot difüze ettirilmesiyle gerçekleşen yüzey sertleştirme işlemidir. Nitrürleme işlemi, martenzit fazını oluşturmak için ostenit fazına kadar ısıtma ve su verme işlemi içermez. Bu nedenden dolayı nitrürlenmiş parçalarda minimum çarpılma ve muhteşem boyut kontrolü sağlanır (Michael ve ark. 2013).

İşlemin amacı; azotu yüzeye difüze edilmesiyle birlikte, farklı alaşım elementleriyle CrN, Fe<sub>3</sub>N, Fe<sub>4</sub>N gibi farklı nitrürler oluşturarak yüzeyin aşınma direncini artırmaktır. Yüzeyin kimyasal bileşimini değiştirmesinden dolayı, nitrürleme işlemi termo-kimyasal bir işlem olarak sınıflandırılabilir. Bu işlem sonucu, nitrürlenmiş dış parçanın yüzeyinin iç çekirdek kısmına göre daha sert olacağı anlamına gelir. Normal nitrürleme derinliği 0.1 ile 0.7 mm arasındadır. Nitrasyon süresi 100 saate kadar yapılabilirken, çeliğin yüzey sertliğinin 1200 HV'e kadar çıkabilmektedir. Şekil 2.3'te nitrürlenmiş bir yüzeyin sertlik profili verilmiştir. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, nitrürleme işlemleri birçok farklı malzemeye uygulanabilir (Grove ve ark. 2003).



**Şekil 2. 3.** Nitrürlenmiş yüzeyin sertlik profil şeması (Grove ve ark. 2003)

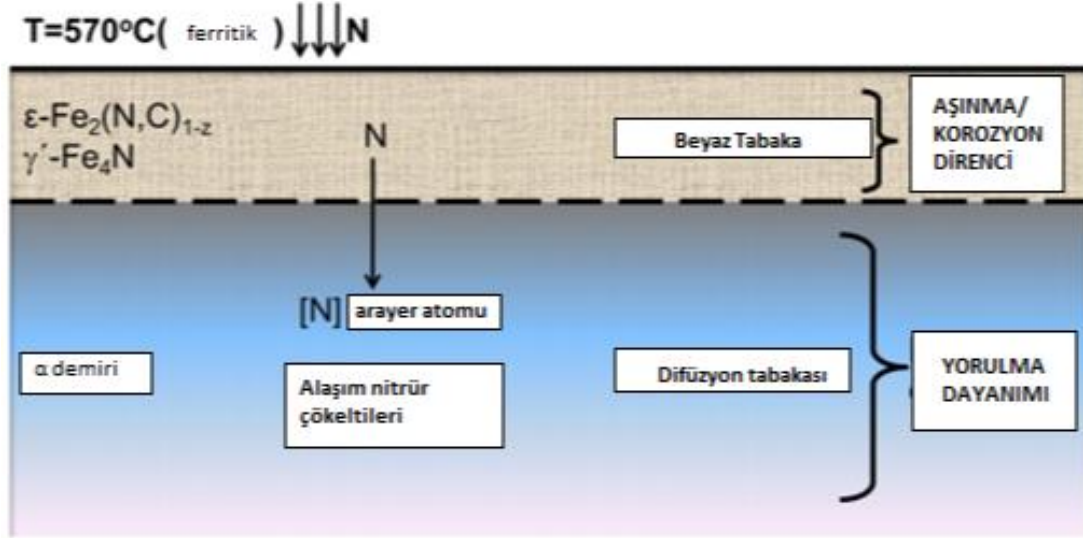
Nitrüleme işlemi, düşük ve yüksek alaşımlı çeliklere, alüminyum, titanyum gibi malzemelere ve dökme demire de uygulanabilen ve parçaların mekanik, metalürjik ve yüzey özelliklerinin geliştirilmesinde yardımcı olan bir yöntemdir (İğdil 2005).

Azot, demir içerisinde kısmi çözünürlüğe sahiptir. Azot miktarı yaklaşık %6' ya kadar ferritle katı çözeltili oluşturabilir. Yaklaşık olarak %6 oranında azot içeren birleşik  $\gamma'$  ile gösterilen  $Fe_4N$  oluşur. Azot içeriği %8'den yüksek ise, denge reaksiyon ürünü  $\epsilon$  ile gösterilen  $Fe_3N$  oluşmaktadır. Nitrürlenmiş yüzeyler çok katmanlıdır. En dış tabaka beyaz tabaka olarak adlandırılır. Beyaz tabaka olarak adlandırılmasının sebebi metalografik olarak hazırlanırken dağlama sonucu beyaz renkte görülmesidir. Beyaz tabaka çok sert ve kırılgan olmasından dolayı pek istenmez. Bu tabaka genel olarak uzaklaştırılır. Özel nitrüleme işlemleri beyaz tabakayı daha az kırılgan ya da bu tabakayı yok etmeye yönelik yapılmaktadır. Dış tabakada oluşturulan  $Fe_3N$  ( $\epsilon$ ) fazı,  $Fe_4N$  ( $\gamma'$ ) fazına göre daha sünektir. Çeliklerde nitrüleme kalınlığı ve tabakanın özellikleri nitrür oluşturan elementlere ve konsantrasyonuna bağlıdır (Michael ve ark. 2013).

Şekil 2.4'te görüldüğü gibi nitrürlenmiş demir esaslı malzemelere uygulanan PN işlemi malzemenin yüzey özelliklerini değiştirmektedir. Beyaz tabaka verilen kısım malzemenin aşınma ve korozyon dayanımını etkilerken, difüzyon bölgesi malzemenin yorulma



dayanımını etkilemektedir. PN işlem parametreleri oluşan fazları ve malzemenin aşınma, korozyon, yorulma davranışlarını etkilediği görülmektedir.



**Şekil 2. 4.** Nitrürlenmiş demir/çelik malzemenin yüzeyinde oluşan difüzyon ve beyaz tabakanın şematik görüntüsü (Yang 2012)

Nitrüleme temel olarak üçe ayrılır. Bunlar tuz banyosunda nitrüleme, gaz nitrüleme ve plazma (iyon) nitrülemedir (Grove ve ark. 2003). Yapılan çalışma kapsamında numunelere plazma nitrüleme işlemi yapıldığı için, plazma nitrüleme konusu ele alınacaktır.

### 2.5.1. Plazma Nitrüleme

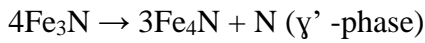
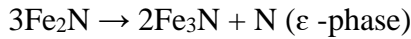
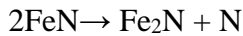
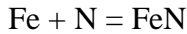
Plazma nitrüleme, çeliğin sertliğini ve aşınma direncini artırabilen bir termo-kimyasal yüzey işlemidir (Kovács ve ark. 2018). Plazma nitrüleme işlemi oldukça geniş yelpazede ürüne uygulanabilir. Bu malzemeler; çelik, dökme demir, düşük ve yüksek alaşımlı çelikler, alüminyum, titanyum ve sinterlenmiş ürünlerdir (Karaoglu ve ark. 2001). Plazma (iyon) nitrüleme işlemi vakum altında gerçekleşir. Sıvı ve gaz ortamında gerçekleşen nitrüleme işlemine göre plazma (iyon) nitrasyon işlemi en çevreci yöntemdir. Ayrıca, mekanik, metalürjik ve yüzey kalitesi yönünden diğer yöntemlere göre oldukça iyi sonuçlar verdiği için günümüzde çokça tercih edilmektedir (Yang

2012). Nitrürleme işlemi kısaca azot atomlarının malzeme içerisine difüze olmasıyla gerçekleşen bir işlemdir. Nitrürleme işlemi 500-600 C° arasındaki sıcaklıklarda gerçekleştirildiği için sementasyon işlemine göre malzemenin çarpılma riski daha düşük olup, boyutsal kararlılık daha iyidir (Agarwal, İğdil 2005).

İşlem süresi, kullanılacak malzeme, nitrürleme yöntemine ve istenen nitrür tabakası kalınlığına göre değişmektedir. Plazma nitrürleme malzemenin aşınma direncini ve korozyon mukavemetini yükseltir.

Plazma (iyon) nitrürleme yöntemi gaz nitrürleme işleminden geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu işlem vakumlu bir ortamda gerçekleşir, azot atomlarına veya gaz karışımına elektrik verilmesiyle iyonlaştırılıp plazma ortamı oluşturulur. İyonlaştırılan azot atomunun katot olarak yerleştirilen malzemeye çarptırılmasıyla plazma (iyon) nitrürleme işlemi gerçekleştirilir (Yang 2012). Plazma; iyon, foton, molekül, elektron, uyarılmış atomu içeren bir karışımdır. Normalde plazma, ısı verilerek parıltılı boşalma ( glow discharge) veya ışınla boşalma ile elde edilir. Parıltılı boşalma bunlardan en yaygın şekilde kullanılanıdır. Plazma ile nitrürleme işlemi glow discharge yani parıltılı boşalma ile yapılır. Şekil 2.6'da şematik olarak nitrürleme mekanizması verilmiştir.

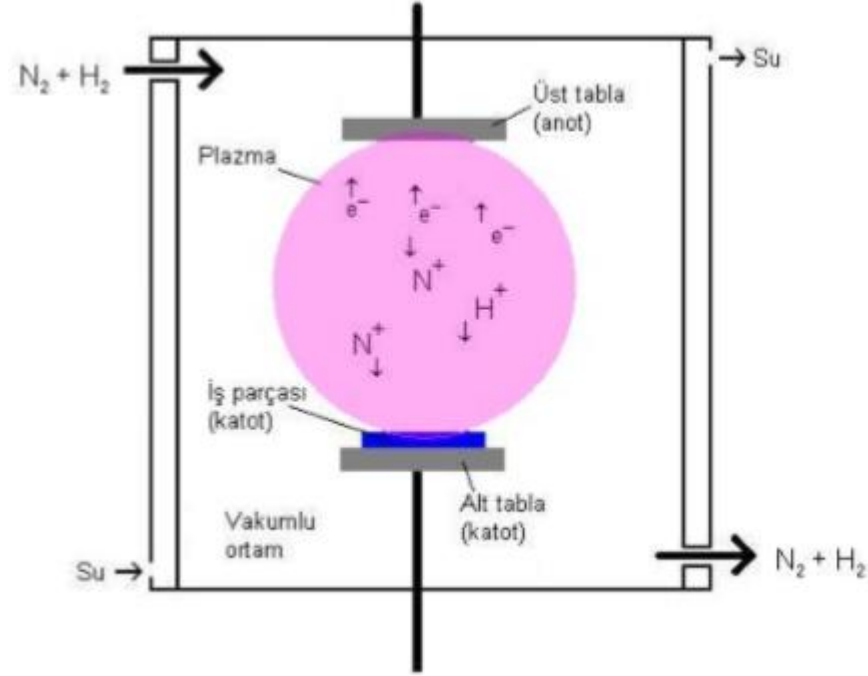
Plazma nitrürleme işlemi sırasında meydana gelen reaksiyonlar aşağıda verilmiştir.



Nitrürleme işleminde, sertliğin artmasının sebebi martenzit fazının oluşmasından dolayı değil, Ac<sub>1</sub> sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda malzeme yüzeyine azotun yayınmasıyla birlikte nitrür fazlarının oluşturmasından dolayıdır. Fe<sub>4</sub>N, Fe<sub>2</sub>N fazları malzemeye gevreklik özelliği sağlamasından dolayı, yüzeyde çatlamlar oluşabilmektedir. Nitrasyon çeliklerin içerisinde bulunan alaşım elementleri demire göre azotla bileşik yapma eğilimindedir (Bargel ve Schulze 1995).

Plazma nitrüleme işlem parametreleri literatürde yapılan bazı çalışmalar referans alınarak belirlenmiştir. Pinedo ve ark. (2016), HP13Cr süper martenzitik paslanmaz çelik malzemeye 350-450 °C arasında, N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> gaz oranları 1/4 olan ve 6 saat süren PN işlemi gerçekleştirmiştir. Farklı sıcaklıklarda farklı fazların oluşumu malzemenin yüzey özelliklerini etkileyen en önemli unsur olduğunu belirtmişlerdir. Li ve ark. (2008) çalışmalarında 350 °C ve 400 °C sıcaklıklarda 5 saat süren plazma nitrüleme işlemi gerçekleştirmişlerdir. 400 °C'deki numunede oluşan nitrüleme tabakasının 350 °C'deki numuneye göre daha kalın ve sert olduğunu belirtmiştir. 400 °C'de nitrülenen numunenin kuru sürtünmeli ortamda daya iyi aşınma gösterdiğini saptamıştır. Ayrıca, nitrülenmiş tabakanın kalınlığı ve sertliği numunelerin kuru sürtünme aşınma direncini etkileyen önemli unsurlardan olduğunu belirtmiştir. Esfandiari ve Dong (2007) ise 350-500 °C arasında, N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> gaz oranları:1/3 olan ve 10 saat süren PN işlemi gerçekleştirmişler ve malzemenin korozyon özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar, nitrülenmiş tabakanın sertlik, aşınma direnci, korozyon davranışı ve korozyon-aşınma davranışı gibi yüzey özelliklerinin işlem koşullarına bağlı olduğunu ve uygun işlem koşullarında aşınma, korozyon, korozyon-aşınma dayanımı gibi özelliklerinin önemli ölçüde iyileştirilebileceğini söylemişlerdir. Riazi ve ark. (2017) de 400-500 °C arasında, N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> gaz oranları: 1/3 olan ve 5-10 saat süren PN işlemi yapmışlardır. Yaşlandırma ve plazma nitrüleme işleminin malzemenin yorulma dayanımına etkisini incelemişlerdir. Yaşlandırma ve nitrüleme işleminin yorulma ömrünü arttırdığını bildirmişlerdir. Riazi ve Ashrafizadeh ve Eslami (2017) başka bir çalışmada 17-4 PH çelik için 400-500 °C arasında ve 5-10 saat süren sıcaklıklarda PN işlemi gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada malzemenin farklı işlem parametrelerinde korozyon davranışını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, nitrüleme işleminin sıcaklık ve zaman parametrelerine bağlı olarak nitrülenmiş tabakada farklı fazlar oluştuğunu ve oluşan bu fazların 17-4 PH paslanmaz çeliğinin genel ve oyuklu korozyon performansını etkilediğini bildirmişlerdir. Plazma nitrasyon yöntemi H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Argon, NH<sub>3</sub> gibi gazlar kullanılarak 350-590 °C aralığında yapılır. Literatürdeki çalışmalar sonucunda; plazma nitrüleme sıcaklığı 400 ve 450 °C olarak karar verilmiş, N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> gaz oranları ise 3/1 olarak seçilmiştir. Bununla birlikte; Riazi ve ark. (2017) çalışmalarında PN işlemi sonucu elde edilen tabaka kalınlığının zamana değil sıcaklığa bağlı olduğunu

bildirmişlerdir. Bu nedenle yapılan bu çalışmada, plazma nitrüleme işleminde sıcaklık değişken olarak seçilirken işlem süresi sabit ve 12 saattir.



**Şekil 2. 5.** Plazma nitrüleme mekanizması (İğdil 2005)

Plazma nitrüleme sonrasında malzemenin yapısı üç bölümde incelenebilir. Bunlar sırasıyla; beyaz tabaka (bileşik tabaka), difüzyon tabakası (yayınım tabakası) ve çekirdek bölgesi ismi verilen temel malzemedir.

Azotun en yoğun şekilde bulunduğu bölge, azotun nitrüleme işlemi sırasında malzemeye nüfuz ettiği en üstteki tabaka olan beyaz tabakadır. Beyaz tabaka diğer bölgelere oranla oldukça sert ve kırılabilir bir bölgedir. Beyaz tabakadan içeriye doğru gidildiğinde karşımıza difüzyon tabakası çıkar. Yüzey bölgesinden içlere doğru ilerledikçe sertlik azalır ve azotun yayınamadığı temel malzemenin bulunduğu çekirdek bölgesine varılır.

Plazma nitrüleme işleminden sonra yüzeyde iki tabaka meydana gelmektedir. Bunlar beyaz tabaka ve difüzyon tabakası olarak isimlendirilir.

## **Beyaz Tabaka**

Beyaz tabaka nitrürlenmiş çeliğin yüzeyden içeri doğru en dış tabakadır. Bu tabaka nitrürleme şartlarına ve süreye bağlı olarak 20 µm kalınlığa kadar oluşabilmektedir. Tabaka sert, aşınmaya karşı dirençli ve gevrekli. Tabaka kalınlığının 20 µm'nin üzerinde olması durumunda tabakada çatlak oluşumları olabilmekte ve yorulma dayanımını düşürmektedir. Beyaz tabaka çoğunlukla  $\gamma'$  ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ) ve  $\epsilon$  ( $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ ) fazlarının karışımlarından oluşmaktadır. Bu fazların kristal yapıları birbirinden farklıdır.  $\gamma'$  fazı ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ) yüzey merkezli kübik yapıya sahipken,  $\epsilon$  fazı ( $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ ) hegzagonal yapıya sahiptir. Beyaz tabakanın kalınlığı ve bu iki fazın oranına bağlı olarak mekanik özellikleri değişmektedir. Her faz birbirinden farklı özellikler göstermektedir. Plazma nitrürleme işleminde seçilen parametreler oluşan beyaz tabakanın mekanik özelliklerini etkiler. Beyaz tabaka ve difüzyon bölgesinin yapısal özellikleri plazma nitrürleme yapılan malzemenin özelliklerini etkileyen en önemli etkenlerdir. Beyaz tabaka, plazma nitrürlenmiş malzemenin korozyon dayanımını ve aşınma direncini artırırken, difüzyon tabakası da malzemenin yorulma direncini ve tribolojik özelliklerinin daha iyi hale gelmesini sağlar. Bu ve bununla birlikte birçok iyi özelliğe sahip olmasından dolayı plazma nitrürleme işlemi çok farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Katı, sıvı ve gaz nitrürleme işlemlerinden farklı olarak plazma nitrürleme işleminde değişkenleri kontrol altında tutma imkanı vardır (Güven et al. 2014, Yang 2012).

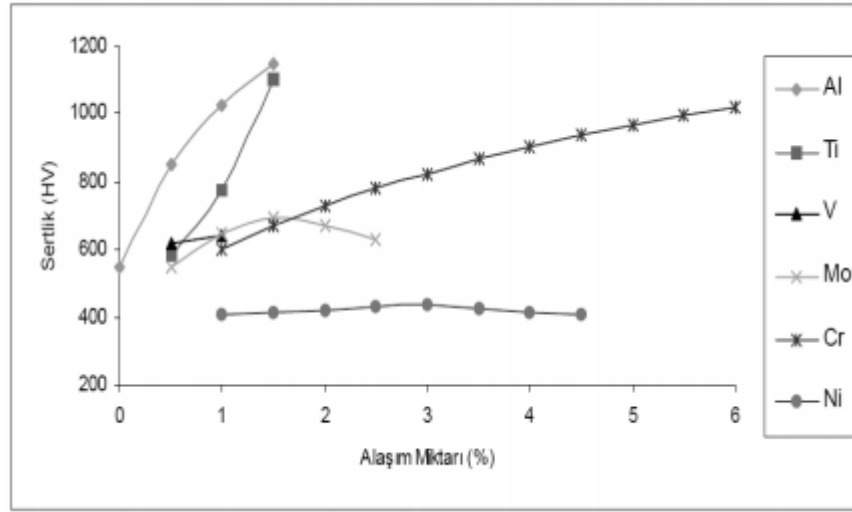
### **2.5.2. Alaşım Elementlerinin Etkisi**

Plazma nitrürleme işleminde azotun nitrürlenmiş parçanın yüzeyine difüze olması ile yüzeydeki alaşım elementlerinin atomları matrix malzemesinin iç bölgelerine yayılmaya başlar. Bu üst bölgelerde kafes yapısında ara yer atomu olarak bulunan alaşım elementlerinin yerlerini azot doldurmaya başlar. Bu bölge azotça zengin fakat alaşım elementleri açısından fakir bir bölgedir. Bu bölge beyaz tabaka adını alır. Beyaz tabakadan iç bölgeye doğru gidildiğinde azotun alaşım elementleriyle nitrür bileşikleri ve nitrür çökeltileri oluşturduğu görülür. Bu bölge ise difüzyon (yayınım) bölgesi olarak isimlendirilir. Difüzyon bölgesinde oluşan sertlik öncelikle alaşım elementlerinin çeşidine ve miktarına bağlı olarak değişmektedir. Alaşım elementlerinden alüminyum sertlik artışına etki gösteren en önemli alaşım elementidir. Alaşım elementlerini sertlik

artışını iyi yönde etkileyenden daha az etkileyene doğru bir sıralama yapılmak istenirse alüminyum (Al), titanyum (Ti), krom (Cr), molibden (Mo ), vanadyum (V) dur.

Karbonun etkisi ise şu şekilde açıklanabilmektedir. Malzemede bulunan karbon miktarı arttığında azotun malzemenin içine doğru kaymasını yavaşlatacaktır. Wolfram (W), Mo, Cr gibi bazı alaşım elementleri hem iyi bir karbür yapıcı hem de nitrür yapıcı elementlerdir. Bu gibi alaşım elementleri serbest olan karbon atomları serbest halde olan alaşım elementleriyle karbürler oluşturur (İğdil 2005).

Kısaca; nitrürlenecek olan çeliğin V, Cr, Al, Ti ve Mo gibi elementler içermesi yüzey sertliğini daha da artıracaktır. Şekil 2.7'de alaşım elementlerinin çeliğin nitrürasyonu sonrası sertliğe etkisi görülmektedir.



Şekil 2. 6. Alaşım elementlerinin çeliğin nitrürasyonu sonrası sertliğe etkisi (Topçu 2010)

### 2.5.3. Plazma Nitrürlemenin Avantajları

Plazma nitrürleme işlemi diğer yöntemlere göre birçok avantaja sahiptir. Bu üstünlükler sırayla şu şekilde sıralanabilir.

- Diğer yöntemlerden farklı olarak sadece malzemenin ısıtılmasından dolayı, enerji tasarrufu sağlanır.

- İşlem süresi diğer nitrasyon yöntemlerine göre, aynı parametrelerle değerlendirildiğinde daha kısadır.
- İşlem süresince boyutsal kararlılık vardır, çarpılma ihtimali çok düşüktür.
- Daha düşük basınçlarda çalıştığı için kullanılan gaz miktarı daha azdır.
- İşlem sonucu elde edilen yüzey oldukça sert ve daha az kırılğan olmasıyla birlikte oldukça temizdir ve bu yüzden işlem sonrası bir yüzey işlemine daha gerek duyulmaz.
- Parçanın her yerine nitrasyon yapılmayacaksa şayet, bu bölgeler izole edilebilir, mümkündür.
- Diğer nitrasyon yöntemleriyle karşılaştırıldığında plazma nitrüleme çevre dostudur. Bu nedenle çevreyi gaz ve başka atıklarla kirletmez.
- Otomasyon sistemine uygundur bu yüzden işlem parametreleri kolaylıkla değiştirilebilir veya kontrol edilebilir.
- İyon bombardımanı yapıldığı için iş parçası üzerindeki tüm noktalara ulaşabilir ve homojen bir azot dağılımı sağlanabilir.
- Parçaların işleme tutulduğu fırında hareketli parça yoktur bu nedenle bakım masrafları oldukça düşüktür.
- Nitrürlenecek olan malzemenin boyutlarının bir önemi yoktur, boyut sınırlaması yoktur.
- İşlem sırasında vakumlu ortamda çalışıldığı için oksijen seviyesi yangın oluşturabilecek seviyenin çok altındadır bu nedenden dolayı yangın riski yoktur.
- Birçok farklı tip malzemenin nitrülenmesine izin verir (Grove et al. 2003, Özdemir ve Muzaffer 2003).

#### **2.5.4. Plazma Nitrürlenmenin Dezavantajları**

Plazma nitrüleme yönteminin bazı dezavantajları vardır, bu dezavantajlardan bazıları aşağıda belirtilmiştir.

- Kullanılan ekipman tuz banyosu ve gaz nitrüleme işlemlerine göre ilk yatırım maliyetleri oldukça pahalıdır. Fakat otomasyona uygun olması dolayısıyla seri üretim için uygun ve ekonomiktir.
- Aynı şarjda sadece boyutsal olarak birbiri ile aynı olan malzemelere uygulanabilmektedir.

- Birçok parametreye bağılı olarak 40kW-1000kW arasında enerji gereksinimine ihtiyaç vardır (Grove ve ark. 2003, Özdemir ve Muzaffer 2003).

## 2.6. Aşınma

Birbirine karşı kayma ya da yuvarlanma gibi izafi hareket yapan ve temas halinde olan yüzeylerden aşamalı olarak malzeme kopmasına aşınma denmektedir (Modern Tribology Handbook 2010).

Katı bir yüzeyden malzeme sadece üç yolla uzaklaştırılabilir. Bunlar ergitilerek, kimyasal çözünerek veya atomların yüzeyden fiziksel olarak ayrılmasıyla yoluyla olarak sayılabilir.

Katılarda Yüzey Hasarları temel olarak üçe ayrılabilir.

1. Malzeme alış-verişinin olmadığı durumda meydana gelen yüzey hasarı: yapısal değişim, plastik deformasyon ve yüzey çatlamları
2. Malzeme kaybıyla meydana gelen yüzey hasarı: aşınma
3. Malzeme kazanımıyla meydana yüzey hasarı: korozyon

Tüm bu tip hasarlar yüzey tabakasını etkilerler (ASM Handbook Vol.18 2016).

Aşınma, mekanik ve / veya kimyasal yollarla oluşur. Genellikle, sürtünme ile ısınma (veya termal yollarla) ile hızlandırılır. Aşınma altı farklı başlık altında incelenmektedir. Bunların tek ortak noktası yüzeyden malzemenin uzaklaştırılması esasına dayanmasıdır.

Bunlar:

- 1 Abrasif
- 2 Adezif
- 3 Yorulma
- 4 Erozyon ve darbe kaynaklı aşınma
- 5 Kimyasal (korozif)
- 6 Elektrik ark kaynaklı aşınmadır.



Malzemelerde meydana gelen aşınmaların birçoğunda özellikle abrazif ve adezif aşınma mekanizmaları etkili olmaktadır (Bhushan 2013). Deneysel çalışmalarımız ball-on-disc aşınma cihazında gerçekleştirildiği için, bu yöntemde abrazif ve adezif aşınmalar ön plana çıktığı için bu iki kavram üzerinde durulacaktır.

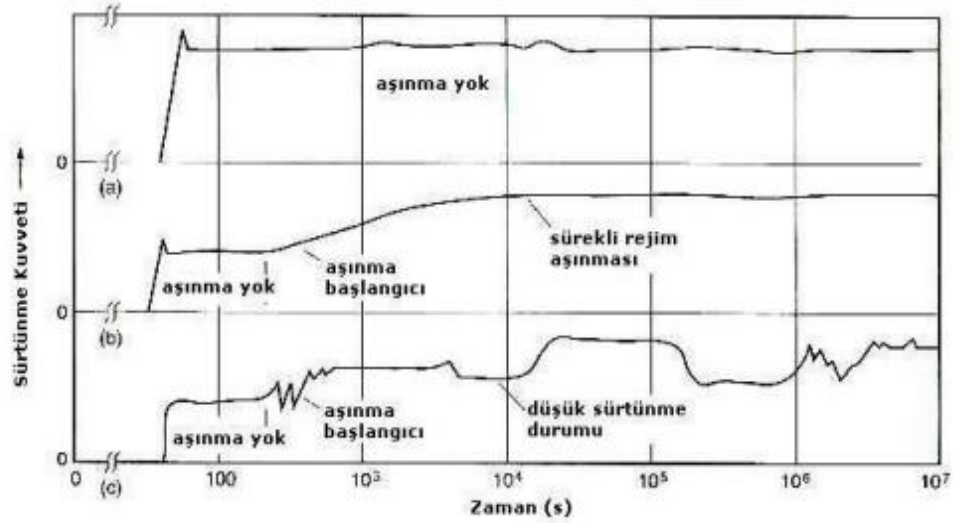
### **2.6.1. Abrazif Aşınma**

Abrazif aşınma, katı bir yüzeyin kendisinden daha sert parçacık ve partiküllerle yüzeyde sürtünmesi sonucunda meydana gelmektedir (Tutar 2011). Aşınma yüzeyden malzeme kaybıdır. Bu husus yüzey hasarı olarak tanımlanmaktadır. Bu hasar ise iki yüzeyin bağlı olarak hareket etmesi neticesinde oluşmaktadır. Aşınma genel olarak temas ortamının yanı sıra temas tiplerine göre de sınıflandırılabilir. Bunlardan ilki, bir aşındırıcı bir yüzey boyunca kaydığında, ikincisi de bir aşındırıcı bir yüzey ile diğeri arasında tutulduğunda meydana gelir. Abrazif aşınmayı malzeme özellikleri etkilemektedir. Bu özellikler sertlik, elastisite modülü, akma dayanımı, erime sıcaklığı, kristal yapı, mikro yapı ve bileşimi içerir. Sertlik ile aşınma ters orantılıdır. Abrazif aşınma kristal yapı ve yönelime bağlıdır. Kübik metaller, hegzagonal yapıya göre yaklaşık olarak iki kat fazla aşınma gösterirler. Eşit sertlikte olan ostenit ve beynitin aşınma dayanımı ferrit, perlit veya martenzite göre daha fazladır. Bu durum, ostenitin yüksek deformasyon sertleşmesi kapasitesi ve sünekliliği nedeni ile ilgilidir. Bununla birlikte, malzemenin kırılma tokluğunun seramikler, beyaz dökme demirler için abrezif aşınmanın belirlenmesinde önemli olduğu bulunmuştur. Alaşımlar malzemenin performansını iyileştirici özelliklere sahiptir. Örneğin; demire karbon ve azot gibi arayer atomları ilave edilmesi abrazif aşınma dayanımını artırmaktadır (ASM Handbook Vol.18 2016).

### **2.6.2. Adezif Aşınma**

Birbirleri ile temas eden yüzeyler de temas yüzeyi noktasal olduğu durumlarda, o noktada yüksek basınçlar oluşmaktadır. Oluşan yüksek basınçtan dolayı, temas noktalarında malzeme akma noktasına ulaşır. Bu noktalarda mikro kaynaklar meydana gelmektedir. Bu sırada yüzeylerin bağlı hareketi nedeniyle bu mikro kaynaklar kopar. Bu ayrılma sonucu katılardan birinin veya ikisinden kopan partikül ve/veya parçalar nedeniyle

aşınmalar ortaya çıkmaktadır. Bu duruma adeziv aşınma denmektedir (Tutar 2011). Adezyon bir aşınmanın sonucu değil , sadece temasın sonucudur. Bu tip bir aşınma temas halindeki yüzeyler kaydığına ya da yerel olarak yapışmış bölgeler ayrıldığında oluşur. Sürtünme bir malzemenin diğer malzemeye göre yaptığı harekete karşı gösterdiği dirençtir. Sürtünme kuvveti sürtünen cisimlere bağlıdır. Sürtünen cisimlerin malzemeleri değişkenlik göstermesinden dolayı sürtünme kuvvetleri doğrudan tahmin edilemez. Malzemeye ait fiziksel, kimyasal ve mikroskobik bilgiler sürtünme mekanizmasını açıklamak ve yorumlamak için kullanılır. Elde edilen veriler aşınma yani adezyon ve abrasif aşınma , yüzey pürüzlülüğünün mekanik etkisi, yüzeyde tabakaların kırılması, yerel plastik deformasyon, iki yüzey arasında kalan parçacıkların etkisi gibi durumlar hakkında bilgi sahibi olmak açısından önemlidir. Sürtünme sırasında oluşan sürtünme kuvvetinin ölçülmesi ile birlikte sürtünme katsayısı tespit edilerek test boyunca sürtünme kuvvetinin sürtünme katsayısına göre değişimi gözlemlenebilir (ASM Handbook Vol.18 2016).



**Şekil 2. 7.** Sistem aşınmasının sürtünme kuvvetine etkisi (ASM Handbook Vol.18 2016, Korkmaz 2009)

Şekil a: Sistem herhangi bir aşınmaya uğramaz veya aşınma olduğunda davranışı değişmeyen sistem.

Şekil b: Sistem sürekli rejim durumuna ulaşana dek sürtünme kuvvetinin arttığı sistem.

Şekil c: Aşınma işleminde sürtünme kuvvetinin her olayla değiştiği sistem gösterilmektedir.

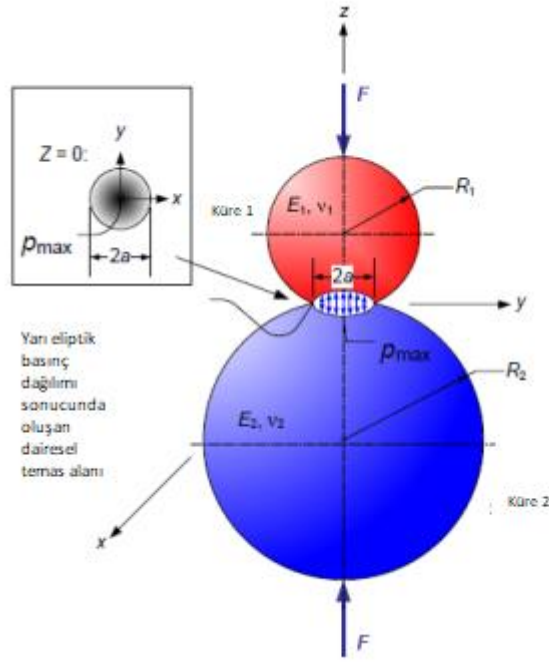
Standart aşınma katsayısı geçici rejim bölgesinde daha yüksek olmaktadır. Bununla birlikte, olması gerekenden fazla aşınma mesafesi aşınma izine zarar verir ve böylelikle aşınma katsayısı yükselir. Aşınma testinde, sürekli rejim aşınma şartlarının sağlanıp sağlanmadığına karar vermek oldukça zordur. Literatürdeki kaynaklarda da aşınma değerleri oldukça farklılık gösterebilmektedir (ASM Handbook Vol.18 2016).

Yapılacak olan aşınma deneyinde, kullanılan tungsten karbür aşındırıcı bilye hazırlanan deney numunelerinin yüzeyine belirli bir yük altında bastırılır ve numune hareket ettirilir. Numunenin yüzeyine noktasal bir kuvvet etki etmesinden dolayı, burada hertz noktasal temas modeli kullanılır (ASM Handbook Vol.18 2016).

### **2.6.3. Hertz Noktasal Temas Basıncı**

Temasta bulunan yüzeyler arasında meydana gelen gerilmeler yüzey gerilmeleri olarak isimlendirilir. Buradaki gerilmeler basınç şeklindedir. Basma gerilmeleri ile yüzey gerilmeleri arasındaki fark şu şekilde açıklanabilir. Basma gerilmeleri bir kuvvet etkisi altında diğer elemanın kesitinde meydana gelmekte iken, yüzey gerilmesi kuvvet etkisi altında temas noktasında ve yüzeylerinde meydana gelmektedir.

Yüzey gerilmeleri; yüzey basıncı ve hertz basıncı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Temas yüzeyleri ve elemanların boyutları birbirine yakın olduğu durumlarda oluşan gerilme yüzey basıncı olarak isimlendirilmektedir. Temas yüzeyleri oldukça küçük olduğu durumda oluşan gerilmeler ise Hertz basıncı olarak isimlendirilmektedir. Hertz temas basıncı genellikle rulmanlı yataklarda, dişli çarklarda meydana gelmektedir (Güllü ve Yılmaz 2018, Taylor 2012).



**Şekil 2. 8.** İki küre arasındaki temas (Taylor 2012)

Temas gerilmesi, temasın olduğu noktada  $2a$  çapında bir eliptik bölgeye dağılmıştır.

Temas alanının yarıçapı  $a$ ;

$$K_a = \left( \frac{3}{8} * \left( \frac{\left( \frac{(1-\nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1-\nu_2^2)}{E_2} \right)}{\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2}} \right) \right)^{1/3} \quad (2.1)$$

$$a = K_a * \sqrt[3]{F} \text{ şeklinde tanımlanır.} \quad (2.2)$$

Burada;

$\nu_1, \nu_2$  : malzeme 1 ve 2'nin poisson oranları,

$E_1, E_2$  : malzeme 1 ve 2 nin elastiklik modülleri,

$R_1, R_2$  : malzeme 1 ve 2 nin çapları.

En yüksek temas basıncı;

$$P_{max} = \frac{3F}{2\pi a^2} \quad (2.3)$$

Olarak ifade edilir. Burada  $F$ ; temas kuvveti,  $a$  ise temas alanının yarı çapıdır .

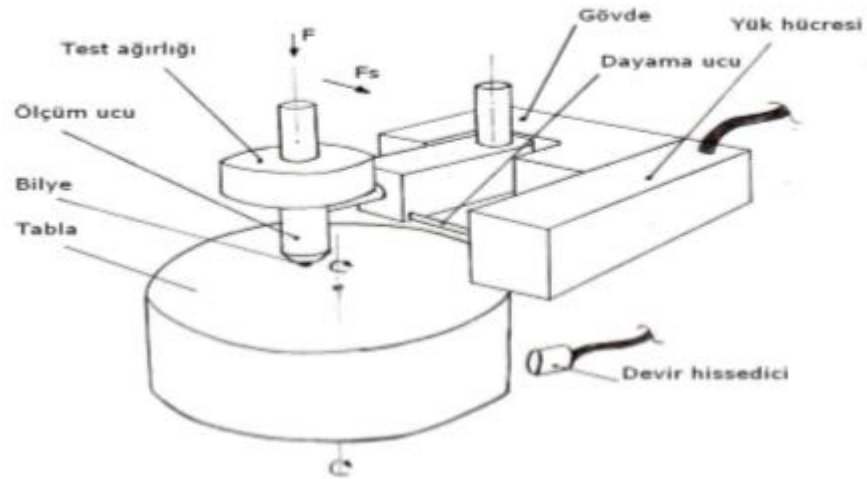
Eğer küre ile bir düzlem teması söz konusu ise;

$$R_1=R_1 \quad R_2=\infty$$

$R=R_1$  alınır (Korkmaz 2009, Taylor 2012).

#### 2.6.4. Aşınma Test Cihazı

Yapılan çalışmada ball-on-disc test cihazı kullanılmıştır. Bu nedenle ball-on-disc test cihazı hakkında bilgiler verilecektir. Ball-on-disc cihazının prensip şemasını gösteren görsel Şekil 2.10'da verilmiştir. Cihazda aşındırıcı olarak tungsten-karbür bilye kullanılmıştır. Teste tabi olacak numuneler kendi ekseninde dönen bir tablaya sabitlenmiştir. Daha sonra yük aşındırıcı bilyeye uygulanarak oluşan sürtünme kuvveti ölçülmüştür. Sürtünme kuvveti yük hücresi tarafından ölçülerek amplifikatör ile bilgisayara iletilmiştir. Her bir testten alınan sonuçlar veri tabanına kaydedilmiştir. Testi başlatabilmek için gerekli bazı bilgiler vardır. Bunlar yük, örnekleme aralığı ve kalibrasyon çarpanıdır. Örnekleme aralığı sürtünme kuvvetinin kaç saniyede bir kayıt edileceğini belirlemek için kullanılır. Yük ise aşındırıcı uca uygulanan kuvvettir. Kalibrasyon çarpanı ise yük hücresinden gelen kuvvet verisini düzeltmeye yarayan bir katsayıdır. Test esnasında, teste ait olan sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı gibi veriler kayıt altına alınır. Ball-on-disc cihazı prensip şeması şekilde verilmiştir (Korkmaz 2009).



Şekil 2. 9. Ball-on-disc test cihazı prensip şeması (Korkmaz 2009).

## 2.7. Korozyon

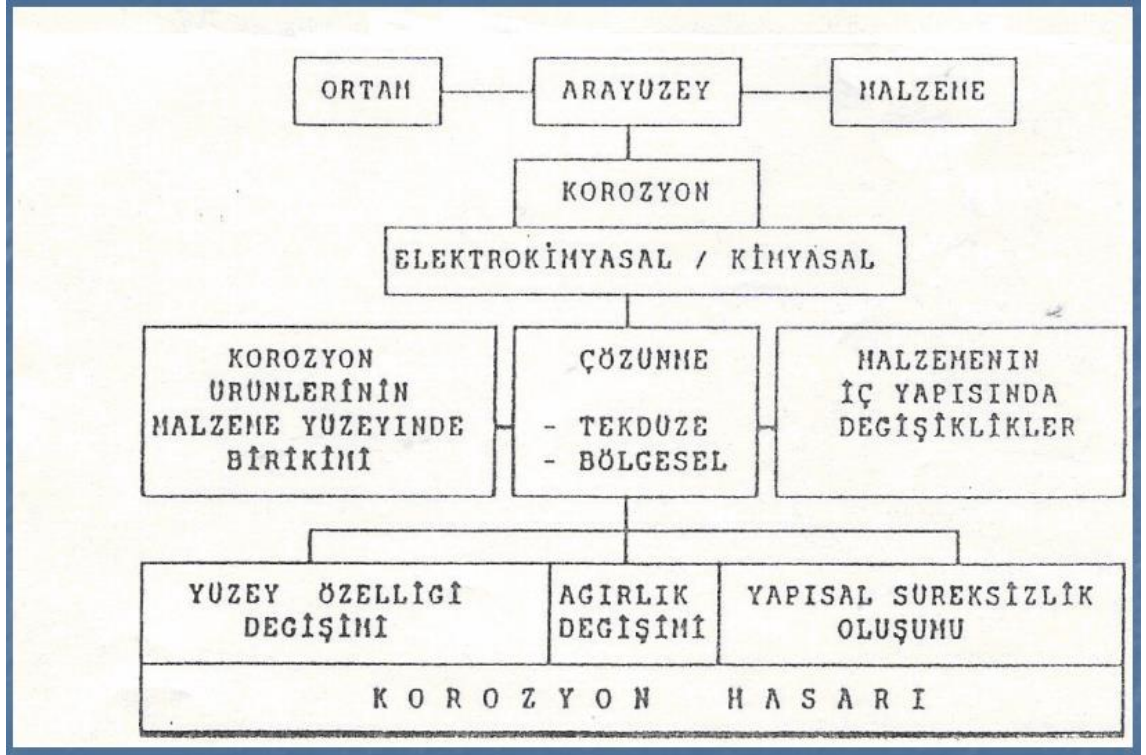
### Korozyonun Tanımı ve Oluşum Nedeni

Gelişen teknoloji ile metal esaslı malzeme kullanımında artış olmasıyla birlikte korozyon sorununun ortaya çıkmıştır. Metaller buldukları ortam ile kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyona girmesiyle fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin olumsuz yönde etkilenmesine korozyon denir. Korozyon çok büyük zararlara neden olur. Korozyon bilimsel anlamda önem taşıdığı gibi ekonomik anlamda da çok önemli bir konudur (Shreir 2010, Uhlig 2015).

Üretilen çeliğin dörtte biri korozyon nedeniyle tahrip olduğu tahmin edilmektedir. Korozyon sadece çelikleri değil buna ek olarak metal esaslıları, polimer, seramik gibi tüm malzemeleri etkilemektedir. Korozyon malzeme ve çevre arasında gerçekleşen kimyasal ve/veya fiziksel etkileşim sonucu oluşmaktadır (Landolt 2013). Korozyon hasarı oluşabilmesi için ortam şartlarını gösteren şema Şekil 2.11’de gösterilmiştir.

Metal içinde bulunduğu ortamdaki bir elementle direkt olarak elektron alışverişindeyse buna kimyasal korozyon ismi verilmektedir. Kimyasal reaksiyonlarda elektrik yüklerinin değişimi zorunludur. (Aran ve Temel 2004).

Metal ve alaşımları doğada buldukları kararlı durum olan bileşik hale dönme eğilimindedirler. Cevher bulunan bileşikler özel metalürjik yöntemler kullanılarak farklı özelliklere sahip yeni metaller haline getirilirler. Fakat bahsedilen metallerin çoğu termodinamik olarak kararlı değildirler. Uygun bir ortamda sahip oldukları enerjiyi vererek minimum enerjiye sahip olmak ve tekrar kararlı hale dönmek isterler. Bu nedenden dolayı korozyon olarak karşımıza çıkmaktadır. Doğada bulunan hemen hemen tüm metaller ve alaşımlar korozyona uğrayabilir (Profile 2014, Türkan 2013).



Şekil 2. 10. Korozyon hasarının oluşum şeması (Akdoğan 2009)

## 2.8. Korozyon Biçimleri

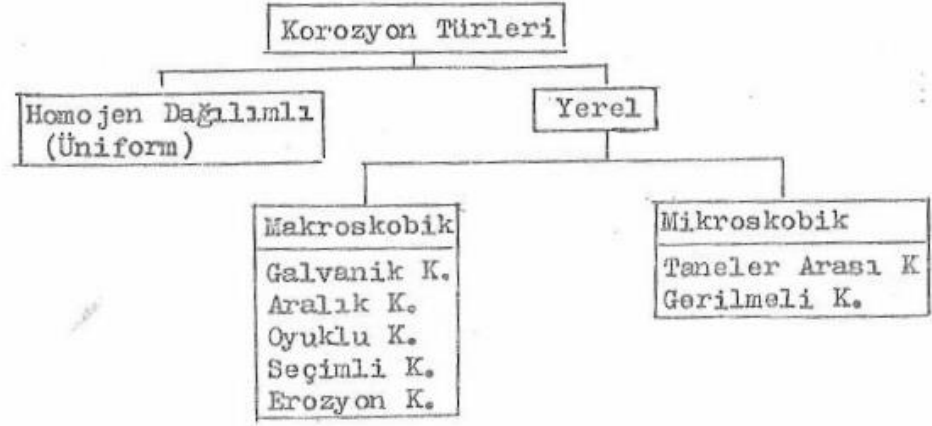
Korozyon, geniş çapta farklı biçimlerde ortaya çıkar. Sınıflandırma genellikle üç faktörden birine dayanır:

**Korozif ortamın yapısı:** Korozyon “ıslak” veya “kuru” olarak sınıflandırılabilir.

**Korozyon mekanizması:** Elektrokimyasal veya doğrudan kimyasal reaksiyonları içerir.

**Korozyona uğramış metalin görünümü:** Korozyon üniform olabilir yani tüm yüzey aynı oranda aşınmış olabilir veya lokal olarak korozyona uğramış olabilir (Şekil 2.12). Bu durumda sadece küçük bölgeler etkilenir (Davis 2000).

Özellikle hasar analizinde faydalı olan görünümle sınıflandırma, çıplak gözle veya büyütme ile korozyon tipini belirlemeye dayanır. Atak morfolojisi korozyon sınıflandırmanın temelidir (Davis 2000).



**Şekil 2. 11.** Lokal korozyonun makroskobik ve mikroskobik formları (Davis 2000, Şengil 1992)

### 2.8.1. Kimyasal Korozyon

Kimyasal korozyonda metal malzeme doğrudan ortamla reaksiyona girer. O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S ve halojenler doğada bulunan en önemli korozif malzemelerdendir. Bir metal oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıklarda oksijen, sülfür, halojen gibi oksitleyici gaza maruz bırakılırsa ortamda sıvı elektrolit olmasa bile korozyon gerçekleşebilir. Bu tip korozyona kimyasal korozyon ya da kuru korozyon olarak isimlendirilir. Kuru korozyon metalin doğal durumuna dönmesine neden olur. Metalin korozyona uğramasıyla yüzeyinde oksitler ve sülfürler oluşur. Ayrıca, kimyasal korozyon yüksek sıcaklıklarda meydana geldiğinden dolayı yüksek sıcaklık korozyonu olarak isimlendirilmektedir (Bensaada et al. 2013, Silman 2011).

### 2.8.2. Elektrokimyasal Korozyon

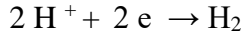
Bir kimyasal dönüşüm elektrot ve elektrolit arasında elektron atarımı olarak gerçekleşiyorsa buna elektrokimyasal reaksiyon ismi verilmektedir. Redoks reaksiyonları olarak isimlendirilen elektrokimyasal reaksiyonlar anodik ve katodik tepkimeleri içermektedir. Aşağıda elektrokimyasal tepkime örneği verilmiştir. 1 numaralı anodik reaksiyon bir yükseltgenme reaksiyonunu gösterirken, 2 numaralı tepkime katodik



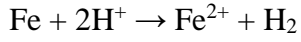
reaksiyon indirgenme reaksiyonudur. 3 numaralı tepkime bir elektrokimyasal reaksiyondur (Landolt 2013).



anodik kısmı reaksiyon (1)

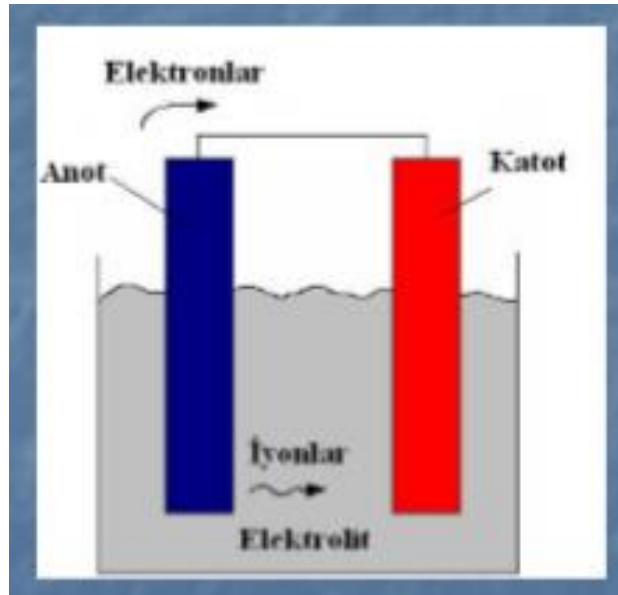


katodik kısmı reaksiyon (2)

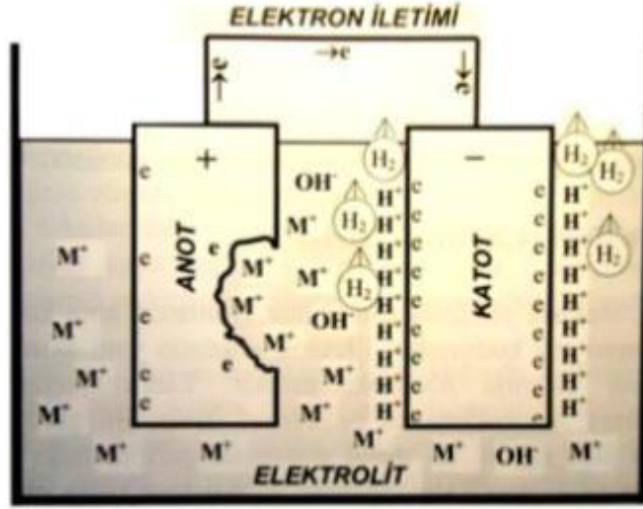


tepkimesi elde edilir. (3) (Landolt 2013).

Elektrokimyasal korozyon gerçekleşebilmesi için elektrolit denilen bir sıvı ortamın bulunması ve aralarında potansiyel fark olan iki metal veya alaşım gerekir. Metal ve alaşımları elektrolit denilen bu sıvı ortamda bozunmasına elektrokimyasal korozyon ismi verilmektedir. Elektrokimyasal reaksiyonlarda malzemelerden biri anot gibi davranırken diğeri katot gibi davranır (Şekil 2.13-14). Kısaca anot olarak davranan malzeme korozyona uğrarken, katot olarak davranan malzeme korozyondan korunmuş olur (Akdoğan 2009).



Şekil 2. 12. Galvanik hücre (Akdoğan 2009).



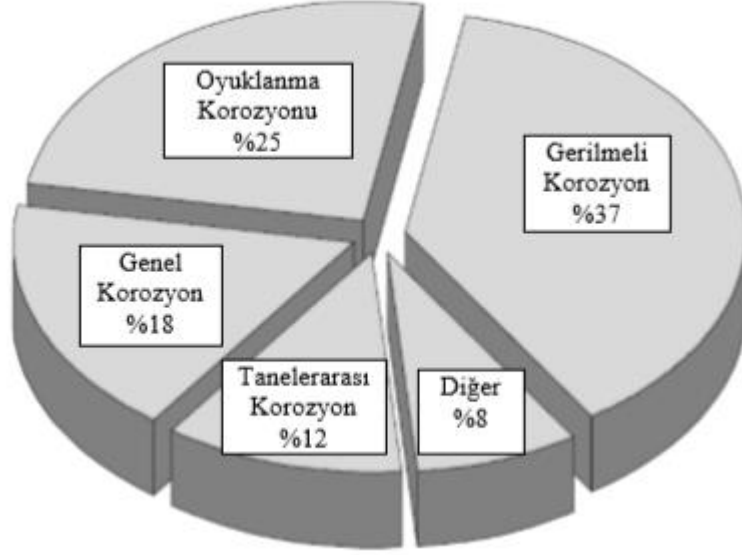
Şekil 2. 13. Korozyon hücresi (Türkan 2013)

## 2.9. Korozyon Türleri

Farklı ortamlarda, değişik etki ve mekanizmalarla oluşan korozyon olayları birbirinden farklıdır. Korozyon geniş çapta farklı etkilerle meydana gelmektedir. Korozyon, metalin yapısına ve geçerli olan çevresel koşullara bağlı olarak birçok farklı yolla metali etkileyebilir (Shreir 2010). Mühendislik malzemelerinin korozyon davranışını birçok farklı faktör etkilemektedir. Bunlar; metalin kimyasal kompozisyonu ve mikro yapısı, çevrenin kimyasal kompozisyonu, sıcaklık, taşınım gibi fiziksel parametreler ile çekme gerilmesi, sürtünme gibi mekanik kuvvetlerdir. Metallerin korozyon davranışı, çoklu parametreler içeren karmaşık etkileşimler tarafından yönetildiği için, çoğu zaman beklenmeyen şekillerde kendini gösterebilir. Çeşitli korozyon tiplerinin geniş bir korozyon sınıflandırılması vardır (Landolt 2013). Ortalama 15 çeşit korozyon vardır fakat burada paslanmaz çeliklerde sıkça rastlanan temel korozyon tipleri açıklanacaktır.

1. Genel korozyon
2. Galvanik korozyon
3. Tanelerarası korozyon
4. Oyuklu (çukur) korozyon
5. Aralık korozyonu
6. Gerilmeli korozyon (Davis 2000).

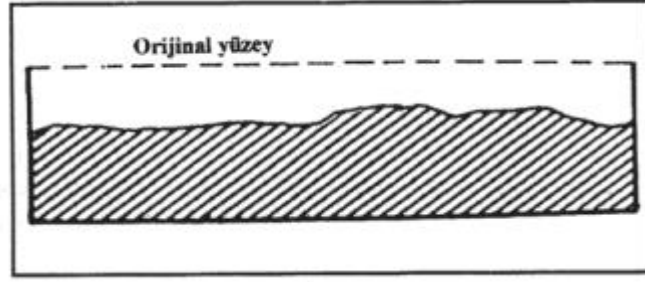
Korozyon tiplerine göre paslanmaz çeliklerde oluşan hasar dağılımı Şekil 2.15 verilmiştir. Kimya sektöründe kullanılan paslanmaz çeliklerde görülen hasarların %92'si korozyondan dolayı oluşmaktadır.



Şekil 2. 14. Paslanmaz çeliklerde sıklıkla karşılaşılan korozyon türleri (Türkan 2013)

### 2.9.1. Genel ( Üni form ) Korozyon

Genel korozyon metalin ve metal alaşımının yüzeyi aynı hızda ve miktarda aşınmaya uğrar. Metalin ve metal alaşımının yüzeyi aynı miktarda incelir (Şekil 2.16). Üni form korozyonda diğ er korozyona göre malzeme kaybı daha fazladır. Üni form korozyon laboratuvar ortamlarında saptanabilmesinden dolayı diğ er korozyon tiplerine göre daha az tehlikelidir. Metal ve metal alaşım hesaplanan ömrüne kadar dayanıklılığ ını korur. Genelde dış yapısında bozukluklar meydana gelir (Shreir 2010, Türkan 2013, Yalç ın ve Koç 1997).

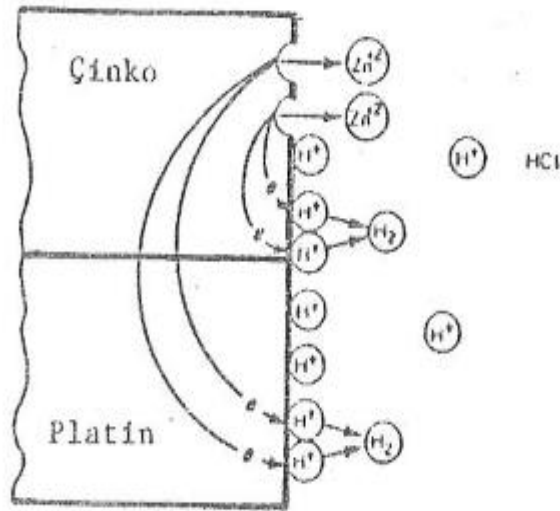


Şekil 2. 15. Üniorm Korozyon (Yalçın ve Koç 1997)

### 2.9.2. Galvanik Korozyon

İletken bir ortama daldırılan iki farklı metal arasında genellikle potansiyel fark mevcuttur. Bu metallerin temas etmesi halinde ya da bu iki metal arasında akım geçişine uygun bir ortam var ise bu iki metal arasında elektron alışverişi başlar. Bu durumda, elektrot potansiyeline bakılarak, elektronegatifliği daha yüksek olan metal anot olarak davranır. Bu farklı iki metal arasındaki potansiyel fark korozyon hızını belirler. Şekil 2.17’de galvanik korozyonun şematik gösterimi verilmiştir.

Bu metallerin aktif ya da pasif olması galvanik seriye bakılarak karar verilir. Galvanik korozyon, korozyon tipleri arasında en yaygın olarak karşımıza çıkan korozyon tipidir (Hack 2010, Şengil 1992).



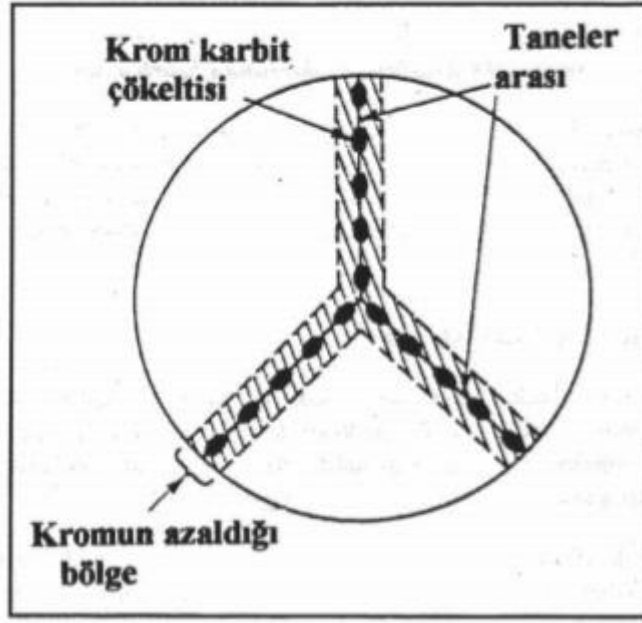
Şekil 2. 16. Galvanik ilişkinin korozyona etkisi (Şengil 1992)

### 2.9.3. Tanelerarası Korozyon

Korozyon olayının tane sınırlarında gerçekleşmesi sonucunda oluşan bozunmaya tanelerarası korozyon ismi verilmektedir. Metaller kristal yapıda bulunurlar, bu yapı içerisinde düzgün bir şekilde dağılmışlardır. Metaller ısıtıldıktan sonra sıvı bir hal alır ve daha sonra soğumaya bırakıldığında kristaller birbirine bitişik halde katılaşır. Taneler çok fazla sayıda kristal kafes içerir ve sınır çizgileri ile birbirinden ayrılır. Burada taneler arasındaki dar alanlarda en düzensiz kristal yapıya sahiptir ve bu bahsedilen bölge korozyon için en tehlikeli ve korozyona en elverişli bölgelerdir (Yalçın ve Koç 1997).

Taneler arası korozyon, korozif saldırının metal yapıdaki tane sınırları boyunca oldukça dar bir yolda gerçekleştiği, özel bir yerel korozyon şeklidir. Genellikle doğru malzeme ve üretim süreci kullanılarak önlenabilir. İnşaat endüstrisi ile ilgili bilinen bir örnek olarak paslanmaz çeliğin duyarlılığı verilebilir. Bu paslanmaz çelik kalitelerinin bazıları bir kaynak işlemi sırasında 500 ° C ila 800 ° C aralığındaki bir sıcaklıkta tutulduğunda, krom bakımından zengin karbürler oluşur ( $Cr_{23}C_6$ ) ve bu da tane sınırlarında kromun tükenmesine sebep olur. Krom karbür bileşikleri çelik içerisinde çözünemez. Bununla birlikte taneler arasında sınır boyunca toplanır. Bahsedilen çelikte % 0.02'den fazla karbon varsa, bu olay gerçekleşir. Ayrıca krom karbür ( $Cr_{23}C_6$ ) bileşiğinin kendisi korozyona uğramaz. Fakat taneler arasındaki bölgede krom azlığı olmasından dolayı bu bölge daha az korozyon direncine sahip olur ve korozif saldırılara karşı etkisiz gelir.

Şekil 2.18' de ise 304 paslanmaz çelik için tane sınırında çökelen krom karbür çökeltisi örneği gösterilmiştir. 304 paslanmaz çelik % 0.06-0.08 arasında karbona sahiptir. Bu yüzden taneler arasında ciddi miktarda krom karbür çökeltisi oluşur (Uhlig 2015, Yalçın ve Koç 1997).



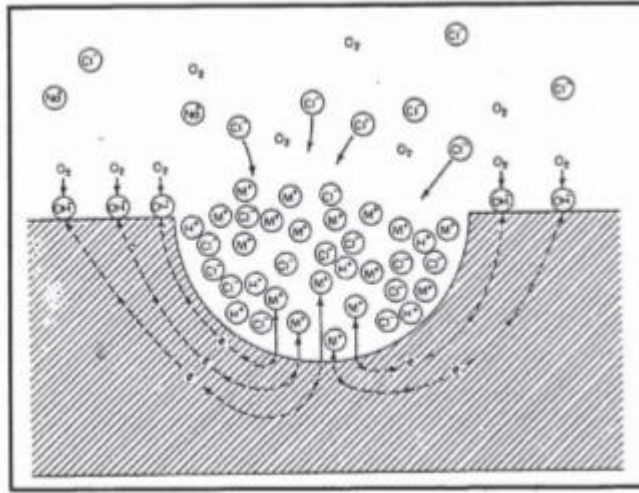
**Şekil 2. 17.** Paslanmaz çelik içinde taneler arasında biriken krom karbür çökeltisi (Yalçın ve Koç 1997)

#### 2.9.4. Oyuklu (Çukur) Korozyonu

Çukur korozyonu, metalde küçük deliklerin veya “çukurların” oluşmasına yol açan yerel bir korozyon şeklidir. Çukur korozyonu, diğer korozyon türlerine göre en sinsi korozyon tipi olarak kabul edilebilir. Korozyona uğrayan alan oldukça küçük olsa bile, oyuklu korozyon sonucu oluşan hasar oldukça önemli olabilir (Landolt 2013). Oluşan çukurlar genel olarak gözle görülmeyecek kadar küçüktürler. Çukur korozyonu diğer korozyon tiplerine göre oldukça tehlikelidir. Çok az malzeme kaybı vardır ve çukurların içleri korozyon ürünleri ile doludur. O yüzden genel (üniform) korozyon gibi kolaylıkla saptanamaz. Bununla birlikte, çukurları ve derinliklerini belirlemek oldukça zordur. Bu korozyon şekli çoğunlukla pasif metallerde bulunur. Alüminyum, titanyum ve paslanmaz çelik gibi pasif metaller ve alaşımlar, korozyon direncini sadece birkaç nanometrelik bir kalınlığa sahip yüzeydeki ince bir oksit tabakasına borçludur. Korozyon başlatma işlemi pasif tabakanın yerel olarak parçalanmasıyla başlar (Uhlig 2015).

Paslanmaz çeliklerde ise pasif tabaka yerel olarak parçalanmasıyla birlikte aktif ve pasif bölgeler oluşur. Bu korozyonda yüzey katot gibi davranırken, oyuk içerisi anot gibi

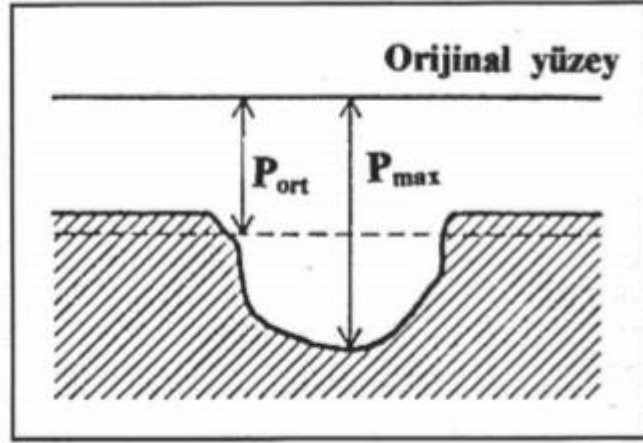
davranmaya başlayarak elektrokimyasal bir reaksiyon oluşur. Çevre ve malzeme uygun ise anodik reaksiyondan sonra bir seri otokatalitik reaksiyonlar birbirini takip eder ve o noktada bir çukur oluşmasına sebep olur. Anod/ katod yüzey oranı küçüktür, çukur içerisindeki çözünme oldukça hızlı ilerler. Şekil 2.19’da çukur korozyonu mekanizması görülmektedir. Bu korozyon tipinde korozyon oyuk içerisine doğru devam eder. Bununla birlikte; klorlu ortamda korozyon hızı oldukça yüksektir (Landolt 2013, Uhlig 2015).



**Şekil 2. 18.** Çukur korozyonun oluşma mekanizması (Yalçın ve Koç 1997)

Çukur korozyonunun hasarının değerlendirilmesi ağırlık kaybı değerlendirilmesi ile yapılması doğru olmaz. Bu korozyon hasarı sonucu oluşan çukur sayısı ve çukur derinlikleri değerlendirilmesi oldukça önemlidir (Landolt 2013). Çukur korozyonunun değerlendirilmesinde ‘çukurlaşma faktörü’ nü kullanılmaktadır.

Çukurlaşma faktörü;  $F_{\text{ç}} = P_{\text{max}} / P_{\text{ort}}$  formülü ile hesaplanmaktadır.  $P_{\text{max}}$ , en büyük beş tane çukurun derinliğinin ortalaması alınarak hesaplanır.  $P_{\text{ort}}$  ise malzemenin kütle kaybından dolayı hesaplanan genel (üniform) korozyon derinliğini göstermektedir. Şekil 2.20 ‘de çukurlaşma faktörünün belirlenmesinde kullanılan  $P_{\text{ort}}$  ve  $P_{\text{max}}$  değerleri gösterilmektedir (Yalçın ve Koç 1997).



**Şekil 2. 19.** Çukurlaşma Faktörünün Belirlenmesi (Yalçın ve Koç 1997)

Korozyon ve metalin bozunması arasındaki ilişki oldukça karmaşıktır. Korozyon hızı, korozyon tipi ve kullanılan metal dikkate alındığında, üniform korozyon gibi tek tip korozyon saldırıları tolere edilebilirken, gerilmeli korozyon çatlama ya da çukur korozyonu gibi korozyonlar tam olarak işlev kaybına yol açmaz (Shreir 2010).

### **2.9.5. Aralık Korozyonu**

Bu korozyon türü aynı ya da farklı türdeki malzemelerin birleştirilmesinde meydana gelmektedir. Özellikle perçin ya da cıvata gibi bağlantıların bağlantı bölgelerinde veya kaplamaların altında karşımıza çıkmaktadır (Akdoğan 2009). Aralık korozyonu, bir pasif metal üzerinde iki bölge arasında oksijen farklılığı nedeniyle oluşan ve elektrokimyasal hücre oluşmasına neden olan bir korozyon tipidir. Bu korozyonun temel nedeni, aralık ile elektrolit arasında oluşan oksijen veya metal iyon konsantrasyonunun farklı olmasıdır. Çatlak ile oksijen fakir olan bölgede korozyon saldırıları görülmektedir (Landolt 2013). Çatlağın yani aralığın dış kısmı katot olarak kabul edilmesinden dolayı o bölgede korozyon görülmez. Bu tip korozyondan kaçınmak için örneğin perçin veya cıvata gibi bağlantılar yerine kaynak bağlantısı kullanılması daha elzemdir. Kaynakla birlikte tüm aralıkların kapatılması ile birlikte korozyon engellenebilmektedir. Paslanmaz çeliklerde aralık ve çukurlaşma korozyonu dayanımları birbirlerine yakındır. Mo, Ni, Cr gibi elementlerin fazla olması aralık korozyonuna karşı direnci artırmaktadır (Türkan 2013).

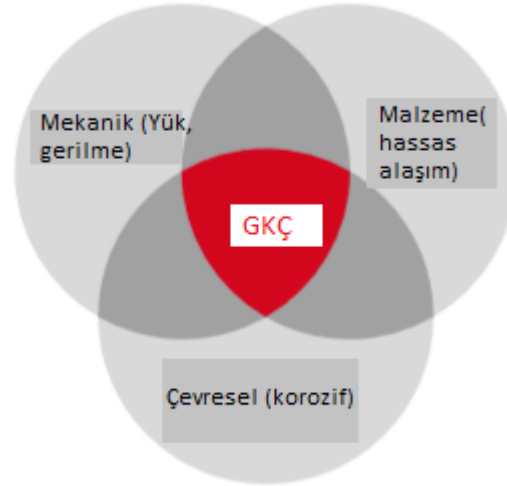


## 2.9.6. Gerilmeli Korozyon

Gerilmeli korozyon, gerilmeli korozyon çatlaması olarak bilinmektedir. Mekanik ve elektrokimyasal korozyon işlemler sonucunda meydana gelen çatlamaya gerilmeli korozyon çatlaması ismi verilmektedir. Paslanmaz çelikler, farklı işlemlerde iç ve dış gerilmeler altında çalışırlar. İlk olarak malzemede uygulanan gerilme veya artık gerilmelerle birlikte küçük bir çukur oluşur ve daha sonra çatlak haline gelir. Gerilmeli korozyon, akma dayanımlarının çok altında gerilme seviyelerine maruz kalan normal sünek metallerin beklenmeyen ani kırılmalıklarına neden olabilir. Bu malzemede iç gerilmeler çatlağın ilerlemesine ve gerilmeli korozyonun oluşmasına neden olabilir.

Gerilmeli korozyon çatlağı yalnızca aşağıdaki üç gereksinimi aynı anda getirmesi durumunda oluşan çok özel bir korozyon tipidir (Şekil 2.21).

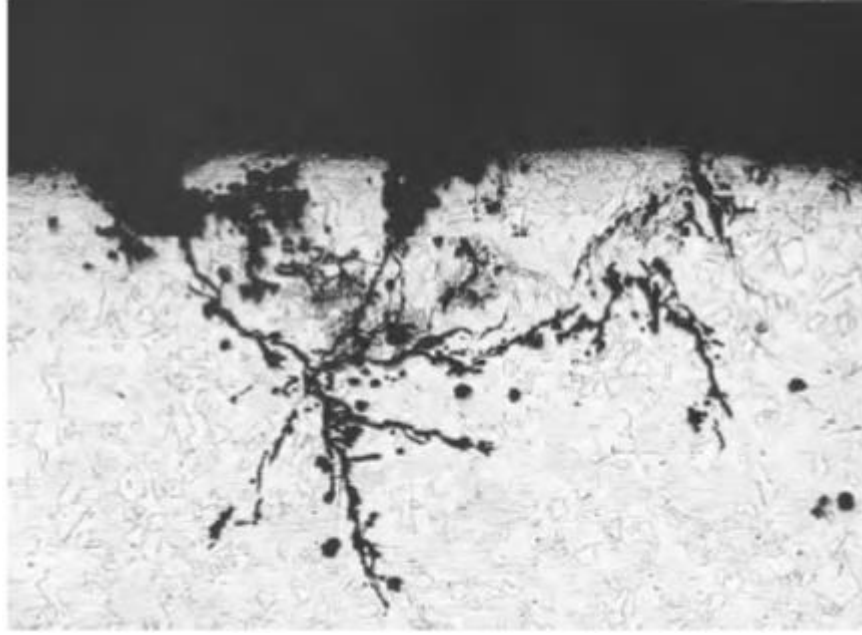
- Mekanik (yük, gerilme)
- Malzeme (hassas alaşım örn: ostenitik paslanmaz çelik)
- Çevre ( oldukça korozyif) (Uhlig 2015).



**Şekil 2. 20.** Gerilmeli korozyon çatlaması oluşması için olması gereken faktörler (Uhlig 2015)

Bazı ostenitik paslanmaz çelik sınıflarının gerilmeli korozyon çatlağına maruz kalabileceği bilinmektedir. Şekil 2.22’de ışık mikroskopuyla çekilmiş gerilmeli korozyon

çatlağı fotoğrafı verilmiştir. Bu vakaların çoğunda pasif tabakaya saldıran kloritler tarafından korozyon başlatılır (Uhlig 2015). Yüksek sıcaklıkta gerilmeli korozyon çatlamasına neden olan bir faktördür. Genellikle 60° C üzerinde görülmekte, daha düşük sıcaklıklarda gerilmeli korozyon çatlaklarına pek rastlanmamaktadır (Şen 2010).



**Şekil 2. 21.** Işık mikroskopuyla çekilmiş gerilmeli korozyon çatlağı fotoğrafı (Şen 2010)

### **2.10. Paslanmaz Çeliklerin Pasifleşmesi**

Pasiflik, bir metal veya alaşımın belirli şartlar altında kimyasal olarak tepki verme yeteneğini kaybetmesi olarak tanımlanabilmektedir. Pasif bir metal EMF serisinde aktif olan fakat çok düşük bir oranda olsa bile korozyona uğrayan metaldir. Pasiflik, alüminyum, nikel ve paslanmaz çelikler dahil olmak üzere birçok yapısal metalin doğal korozyon direncinin altında yatan özelliktir (Silman 2011). Pasif durumda olan bir malzemenin korozyon hızı oldukça düşüktür ve korozyona karşı gösterdiği direnç oldukça yüksektir. Normal şartlar altında paslanmaz çelik pasiftir fakat oksitleyici özelliği düşük olan bazı çözeltilerde aktifleşirler. Bu yüzden pasif durumunun devamı ve sürekliliği için oksijen veren ortamlar gereklidir. Yeterli miktarda krom ve nikel içeren çeliklerin pasiflik filmleri oldukça kuvvetlidir. Paslanmaz çelikler oksitleyici ortamlara

çok dayanıklıdır. Pasifleşme özelliği olan çeliklerde oyuklu (çukur) korozyonuna daha sıklıkla rastlanmaktadır (Yalçın ve Koç 1997).

## **2.11. Korozyon Deneyleri**

Korozyona karşı koruması olsun ya da olmasın metalik malzemelerin korozyonunu bulunduğu ortam, çevresel faktörler ve metalik malzemenin tipi gibi birçok değişken etkilemektedir. Malzemenin korozyon direncini etkileyen tüm bu çevresel faktörlerin dikkate alınacağı hızlı bir korozyon testi tasarlanması imkansızdır. Bu nedenden dolayı laboratuvar testleri metalik malzemelerin korozyon hızını artıran en önemli faktörler göz önüne alınarak tasarlanmıştır (ISO/TC 2013). Korozyondan dolayı oldukça büyük maddi kayıplar oluşmaktadır. Bu nedenden dolayı korozyon konusunda oldukça fazla araştırmalar vardır. Birçok tipte korozyon olmasıyla birlikte, korozyon sayısı kadar da korozyon deneyi vardır. Korozyon hızını ölçmek için birçok türde deney yapılmaktadır. Bunlar; deney numuneleri yere gömmek, atmosferik bir ortamda bekletmek veya belirli parametreler altında endüstriyel bir ortamda bekletmek olabilir. Korozyona neden olan mekanik etkilerde varsa onları ölçmek içinde deney koşulları değiştirilebilir. Günümüzde korozyon hızını saptamak için kullanılan deney yöntemi genellikle belirlenen koşullar altında belirli bir ortamda numuneleri bekletmek ve numunenin yüzey alanında oluşan ağırlık kaybını veya artışını değerlendirmektir. Deneylerden önce numunenin yüzeylerinin oldukça temiz olması, yağdan ve kirden arınmış olması gerekmektedir. Deney numuneleri deneyden önce ve deneyden sonra değerlendirilmek üzere tartılır. Deney numunelerinin değerlendirilmesinde kullanılan kriterlerin çok farklı olmasından dolayı son yıllarda deney değerlendirme kriterleri değişmiştir ve korozyon deneyleri standartlar altına alınmıştır. Uluslararası standartlarda tanımlanan korozyon deneyleri dış mekan iklim koşullarında tuza maruz kalan metalik malzemeler üzerinde çevresel etkileri simüle etmek ve çevresel etkileri optimum şartlara taşımak amacıyla dizayn edilmiştir (ISO/TC 2013, Yalçın ve Koç 1997). Sıklıkla kullanılan uluslararası testlerden ikisi ISO 9220'de belirtilen tuz püskürtme testi ve ISO 14993'de belirtilen tuz sis testidir. Bu çalışmada ise EN ISO 9227 standardına tabi olan bir tuzlu sis testi gerçekleştirilecektir. Korozyon deneylerinin yapılmasının asıl amacı malzemenin kullanılacağı yerdeki dayanma direncini saptamak, daha dayanıklı hale getirmektir. Bu şekilde korozyon

yüzünden meydana gelen para, zaman gibi kayıplar minimuma indirilmiş olunur (Yalçın ve Koç 1997).

## **Korozyon Laboratuvar Deneyleri**

Laboratuvarında yapılan korozyon deneyleri malzeme seçimi esnasında koşullara en uygun malzemeyi seçerken kullanılır. Korozyon deneyleri arasında en yaygın olarak kullanılan iki tip deney vardır. Bunlar; Huey ve Tuz püskürtme testleridir. Tuz püskürtme testi en eski korozyon testidir. Bununla birlikte, birçok avantaj sağlamasından dolayı dünyada kabul görmüş ve sıklıkla kullanılan bir deneydir (International Stainles Steel Forum 2008, Yalçın ve Koç 1997).

### **2.11.1. Tuz Püskürtme Testi**

Tuz püskürtme testi; ASTM deney yöntemi B117 altında gerçekleştirilir. Tuz testi 20. yüzyılın başlarında icat edilen, yaklaşık olarak 100 yıldır kullanılan belirli standartlar altında yapılan bir testtir. Tuz püskürtme testi kontrollü bir aşındırıcı ortamda gerçekleşir. Bununla birlikte, teste maruz kalan metallerin ve kaplanmış metal numunelerin korozyon direnci hakkında bilgi verir. Test kabini içerisinde tuzlu su çözeltisi püskürtme şeklinde atomize edilerek numunelerin üzerine üniform damlacıklar halinde 15-30° açı ile gelmesi sağlanır. Tuzlu su çözeltisi ağırlıkça %5 NaCl içerir. Bu deney deniz atmosferi ortamını simüle etmek için kullanılır. Deniz suyunun yaklaşık tuz oranı en az % 1,8 iken en fazla % 3 tür. Tuzlu su çözeltisinin Ph değeri 6.5-7.2 arasında olmalıdır. Bu deneyde test süresi malzemeye ve kaplamaya göre 8-3000 saat olarak değişir (International Stainles Steel Forum 2008).

### **2.11.2 Tuzlu Sis Testi**

%5'lik tuzlu su çözeltisinden oluşturulan sise karşı boyalı ve kaplamalı yüzeyin direncini ölçmek için kullanılan bir deneydir. Deney tesisatı sis kabini, tuzlu su çözelti tankı ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. EN ISO 9227, DIN EN ISO 7253,50184, ASTM B117, ASTM B368 ve CASS TEST normlarını karşılamaktadır.

Tuzlu sis deneyi değerlendirmeleri řu şekilde yapılmaktadır. Boyalı yzeyler değerlendirilirken atılan çizikten itibaren pas ilerlemesine (dökölme) göre değerlendirilir. Bu kapsamda EN ISO 9227 standartlarından faydalanılır.

Kaplamalı yzeyler değerlendiriliyor ise pas derecesine (paslanma) göre değerlendirme yapılmalıdır. Bu kapsamda EN ISO 4628-3 standartlarından faydalanılır. Önce boyalı/kaplamalı yzeyde paslanma olup olmadığını tespit edilir. Eğer paslanma varsa, EN ISO 4628-3 'da ki fotoğraflarla mukayese edip hangi aralığa uygunluk gösterdiğini tespit edilir.

Pas derecesi (KOT)

- Paslanma yoksa Ri 0 (0)
- Yzeyin %20'si paslanmış ise Ri 1 (1)
- Yzeyin %40'ı paslanmış ise Ri 2 (2)
- Yzeyin %60'ı paslanmış ise Ri 3 (3)
- Yzeyin %80'i paslanmış ise Ri 4 (4)
- Yzeyin %100'ü paslanmış ise Ri 5 (5)

şeklinde ifade edilmektedir.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Deneysel çalışmalarda 17-4 çökelme sertleşmeli paslanmaz çelik (17-4 PH) kullanılmıştır. 17-4 PH çeliğinin diğer standartlardaki karşılığı Çizelge 3.1’de ve kompozisyonu Çizelge 3.2’de verilmiştir. Üretici firma tarafından garanti edilen 17-4 PH çeliğinin mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.3’ te görülmektedir. Bu çalışmada 25 ve 8 mm çapında çelik numuneler kullanılmıştır.

**Çizelge 3. 1.** 17-4 PH çeliğinin diğer standartlardaki karşılığı

AISI No	W-Nr- Standart	DIN	UK	USA-UNS	AMS
17-4 PH	1.4542	X5CrNiCuNb- 17-4	MFESSWP002	S17400	5604-5622- 5643

**Çizelge 3. 2.** 17-4 PH paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi

Element	C	Cr	Ni	Cu	Si	Mn	Nb	P	S	Mo	Ta
Birleşim(%)	0.021	15.72	4.73	3.28	0.31	0.71	0.30	0.02	0.001	0,16	0.004

**Çizelge 3. 3.** 17-4 PH paslanmaz çeliğin oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri

Kalite	630(1.4542)
Kopma Mukavemeti	1090 MPa
Akma Mukavemeti (%0.2)	950 MPa
Sertlik, Rockwell HB	360 max.
Yoğunluk	7.8 kg/dm <sup>3</sup>
Poisson oranı	0.272

Aşınma test cihazında aşındırıcı olarak tungsten karbür bilyeler kullanılmıştır. Çizelge 3.4’ te Tungsten karbür bilyenin özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 3. 4.** Tungsten karbür bilyenin özellikleri

Tungsten Karbür	%93,5- %94,5
Kobalt	%5,5-%6,5
Çap	5 mm
Grade	25
Çekme dayanımı	1517 MPa
Basma dayanımı	5171-5447 Mpa
Elastiklik modülü	~ 634 - 641 GPa
Poisson oranı	0.26
Yoğunluk	14,95 gr/cm <sup>3</sup>

### 3.2. Yöntem

Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan 17-4 PH paslanmaz çeliğe uygulanan ısı işlemler için yapılan kodlamalar Çizelge 3.5’te verilmiştir.

**Çizelge 3. 5** Numune Kodları

NUMUNE KODU	İŞLEM
BM	Başlangıç malzemesi
PN400	PN(400 °C & N2:H2=3/1)
PN450	PN(450 °C & N2:H2=3/1)

#### 3.2.1. Plazma Nitrürleme İşlemi

Deneysel çalışmalarda seçilen 17-4 PH çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliğine çizelge 3.6’da verilen işlem parametrelerine göre plazma nitrürleme işlemi uygulanmıştır. Plazma nitrürleme işlemi Plateg PP60 Puls marka cihazı kullanılarak yapılmıştır.

**Çizelge 3. 6.** PN işlem parametreleri

SICAKLIK	SÜRE	GAZ ORANLARI (N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> )	BASINÇ
400 °C	12 saat	3/1	200 Pa
450 °C	12 saat	3/1	200 Pa

Farklı şartlarda yapılan plazma nitrürleme işlemi sonrası her bir durum için bir adet aşınma testi, bir adette sertlik dağılımı için iki numune bakalite alınmıştır.

### 3.2.2. Sertlik Ölçümleri

Bu çalışma da Vickers yöntemi kullanılarak sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümleri için ilk aşamada hem başlangıç malzemesi hem de plazma nitrürleme işlemi görmüş numuneler bakalite alınmışlardır. Bakalite alınan numuneler metalografik yöntemlerle hazırlanmışlardır (numuneler ilk önce 180, 400, 600, 800, 1000 nolu zımpara kâğıtları kullanılarak zımparalanmış, daha sonra 1 µm ve 0,3 µm'luk alümina parlatma solüsyonları kullanılarak parlatılmışlardır).

Başlangıç malzemesi (BM) sertliği ölçülürken 1kg yük ve 10 s bekleme ile ölçümler alınmıştır. PN işlemine tabi olan numunelerde ise 25 g ile ölçümler yapılmıştır. 10, 20, 40, 60, 100, 150, 200 ve 400 µm'lik aralıklarla sertlikler alınmıştır.

Her bir sertlik değeri için beş farklı ölçüm yapılmış ve bunların aritmetik ortalaması alınmıştır. Bununla birlikte, ölçümlerin istatistik hesaplamaları aşağıda verilen istatistiki yöntem esas alınarak yapılmıştır:

Standart sapma,  $\sigma$  : Veri değerlerinin aritmetik ortalamadan ( $\bar{X}$ ) farklarının karelerinin toplamının ortalamasının kareköküdür ( $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ ).

Standart hata : Aritmetik ortalamada oluşan bir hatanın ölçüsüdür ( $\sigma / \sqrt{n}$ ).

Varyasyon katsayısı : Standart sapmanın ortalamaya göre yüzde kaçlık bir değişim gösterdiğini belirtir ( $\frac{\sigma}{\bar{X}} \cdot 100$ ).

Ranj : Veri değerleri içerisinde en büyük ve en küçük değerler arasındaki farktır ( $X_{\max} - X_{\min}$ ).



### 3.2.3. Aşınma Testleri

Aşınma deneyleri Şekil 3.1’de görülen ball-on-disc aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Aşınma test cihazında aşındırıcı olarak tungsten karbür bilyeler kullanılmıştır (Çizelge 3.4).



Şekil 3. 1. Ball-on-disc aşınma test cihazı

Aşınma deneyi kuru sürtünmeli ortamda yapılmıştır. Sürtünme hızı 5 mm/s ve 15 mm/s şeklinde seçilmiştir. Yük ise 9.81 N ( 1 kg ) ve 6.867 N ( 0.7 kg ) şeklinde seçilmiştir. Veri alma aralığı 4 saniyedir ve iz çapı 22 mm olarak belirlenmiştir. Her aşınma deneyinin öncesinde ve sonrasında numuneler hassas terazide tartılarak test boyunca oluşan kütle kaybı kaydedilmiştir. Çizelge 3.7’de aşınma deney değişkenleri verilmiştir. İşlemler sırasında aşınma ürünü kalıntıları ortamdaki uzaklaştırılmamıştır.

Çizelge 3. 7. Aşınma deneyi değişkenleri

DEĞİŞKENLER	YÜK(kg)	KAYMA MESAFESİ(m)	KAYMA HIZI(mm/s)
I	1	108	15
II	0.7	36	5

Aşınma test yükleri, max. Hertz temas basıncı 1 GPa' ın üzerindedir. Temas basıncının hesaplanmasında kullanılan veriler Çizelge 3.8'de gösterilmiştir.

**Çizelge 3. 8.** Temas basıncının hesaplanmasında kullanılan veriler

Malzeme	v	E (MPa)	Çap (mm)	Yükler (g)	Kuvvet (N)
17-4 PH	0.272	197000	∞	700	6.867
Bilye	0,26	634000	5	1000	9.81

Malzeme 17-4 PH için;

Hertz temas basıncı formülleri kullanılarak her yük (normal kuvvet) için maksimum temas basıncı hesaplanmıştır. Örnek hesaplama aşağıda gösterilmektedir.

Malzeme 17-4 PH ve 700 g yük için:

$$K_a = \left( \frac{3}{8} * \left( \frac{\left( \left( \frac{1-0,26^2}{634000} \right) + \left( \frac{1-0,272^2}{197000} \right) \right)}{\frac{1}{5} + \frac{1}{\infty}} \right) \right)^{1/3} \quad (3.1)$$

$$K_a = \left( \frac{3}{8} * \left( \frac{\left( (1,494 * 10^{-6}) + (4,7 * 10^{-6}) \right)}{0,2} \right) \right)^{1/3}$$

$$K_a = 0,022645$$

$$\text{Buradan, } a = K_a * \sqrt[3]{F} \quad (3.2)$$

$$a = 0,022645 * \sqrt[3]{6,867}$$

a=0.043 bulunur.

$$\text{Son olarak ; } P_{max} = \frac{3F}{2\pi a^2} \quad (3.3)$$

$$P_{max} = \frac{3 * 6,867}{2\pi * 0,043^2}$$

$$P_{max} = 1773,26 \text{ MPa}$$

**Pmax=1,773 GPa** bulunur.

Değişik yükler için elde edilen temas basınçları Çizelge 3.9’da verilmiştir.

**Çizelge 3. 9.** Değişik yükler için temas basınçları sonuçları

Yük(N)	6.867 N	9.81N
Pmax (Gpa)	1,773	1.9929

### 3.2.4. Mikroyapı çalışmaları

Başlangıç malzemesi ve PN işlemi görmüş numuneler yukarıda ifade edildiği gibi metalografik yöntemler kullanılarak parlatılmışlardır. Numuneler HCl (%40) + HNO<sub>3</sub> (%20) + H<sub>2</sub>O (%40) solüsyonu kullanılarak 60 saniye boyunca dağlanmıştır. Nikon LE150 optik mikroskop yardımıyla, mikroyapıların fotoğrafları 200 ve 500 büyütmede, aşınma iz görüntüleri ise 100 ve 200 büyütmede görüntülenmiştir. Clemex görüntü analiz sistemi ile fotoğrafları bilgisayar üzerinden alınmıştır.

### 3.2.5. Korozyon Deneyi

Korozyon deneylerinde 8 mm çap ve 2 cm uzunluğunda numuneler kullanılmıştır. Deney numunelerinin alt ve üst tabanları sırasıyla 180, 400, 600 ve 1000 numaralı zımpara kâğıdı ile zımparalanmıştır. Daha sonra ise 1 µm’lik alümina solüsyonu ile her iki yüzey parlatılmıştır. Deney numunelerinin yanal yüzeylerine hiçbir işlem yapılmamış olup hadde sonrası yüzey muhafaza edilmiştir.

Korozyon deneyi öncesinde ve sonrasında hassas terazide her bir numunenin ağırlığı ölçülmüştür. Korozyon deneyi 400 °C’de ve 450 °C’de 12 saat sürede yapılan plazma nitrülenmiş ve işlem görmemiş yani temel malzeme için gerçekleştirilmiştir. Korozyon deneyleri Erichsen 606 tuzlu sis cihazı ile yapılmıştır. Yapılan tuz testinin karşıladığı normlar şu şekildedir: EN ISO 9227, DIN EN ISO 7253, 50184, ASTM B117, ASTM B368, ‘CASS TEST’.

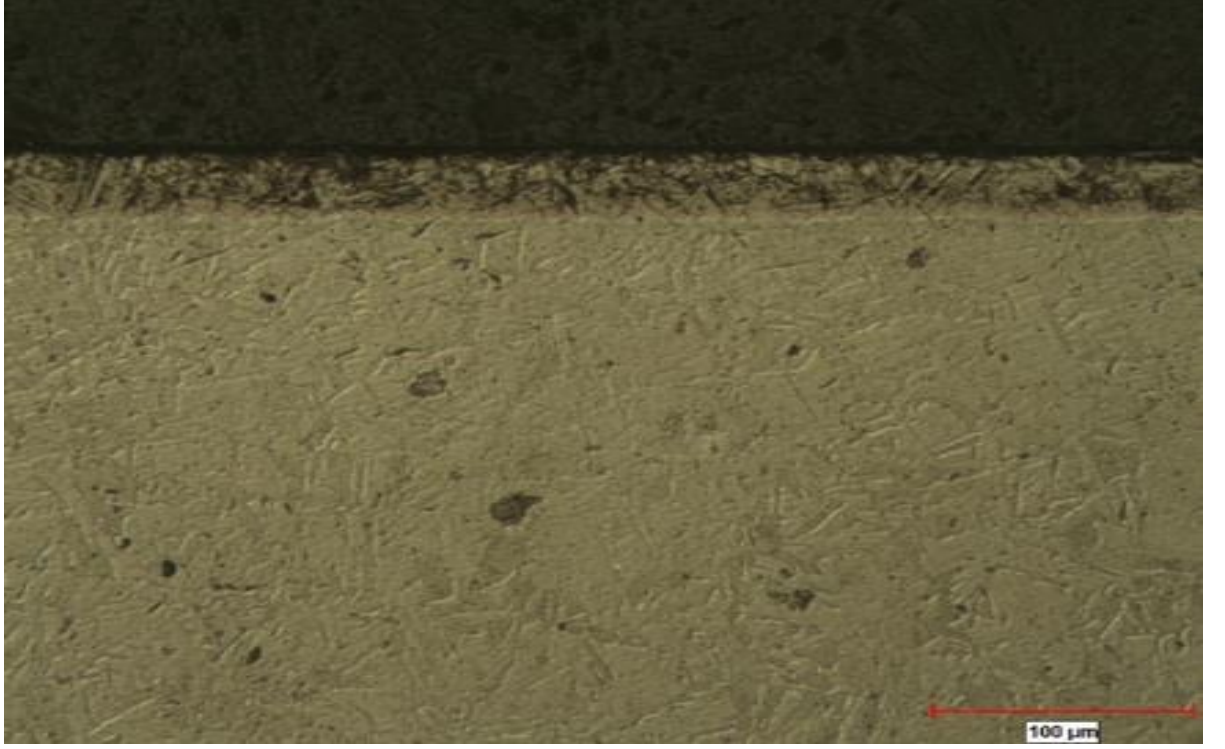
## 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

### 4.1. Mikro yapı Sonuçlarının Yorumlanması

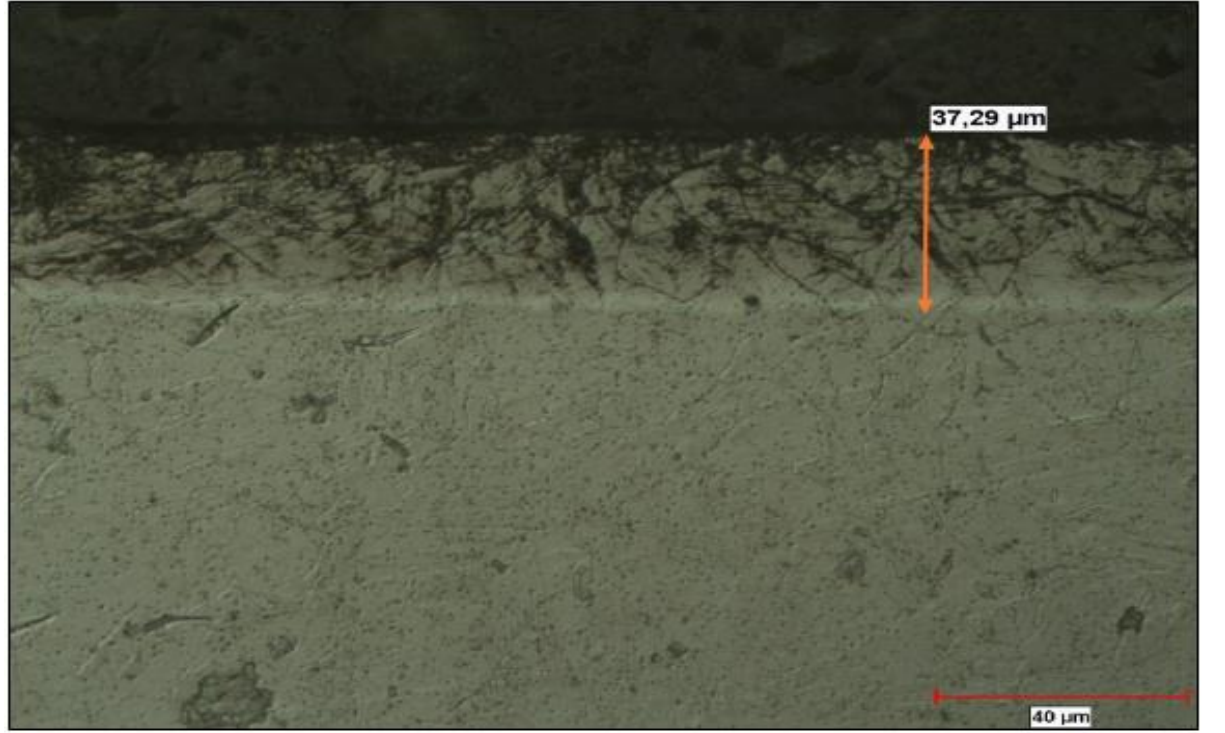
PN400 numunesine ait mikroyapılar incelendiğinde yüzeyden içeri doğru iki farklı bölge gözlenmektedir. (Şekil 4.1- 4.2). Yüzeyden içeri doğru nitrürlenmiş bölge ve matrix bölgesi şeklindedir. Matrix bölgesi martenzitik yapıda olduğu görülmektedir. Matrix bölgesi dikkatlice incelendiğinde iç yapıda çökelti partikülleri gözlenmektedir (Şekil 4.2). İkincil sertleşmiş 17-4 PH paslanmaz çeliklerde çökelen yapının Cu atomlarından oluştuğu bilinmektedir (Kochmanski ve Nowacki 2008, Murayama et al. 2007). PN400 kodlu numuneden optik mikroskoptan alınan görüntülerde nitrürlenme kalınlığı 37,29 µm olarak ölçülmüştür. Nitrürlenmiş tabaka genel olarak CrN ile birlikte expanded martenzit,  $Fe_xN_y$  gibi fazların oluştuğu literatürden bilinmektedir (Esfandiari ve Dong 2007, Li ve ark. 2008, Riazi ve ark. 2017).

PN450 numunesine ait mikroyapılar incelendiğinde ise yüzeyden içeri doğru iki farklı bölge gözlenmektedir ( Şekil 4.3 - 4.4 ). Bu bölgelerin difüzyon tabakası ve matrix bölgesinden oluştuğu görülmektedir. Matrix bölgesi martenzitik yapıya sahip olmakla birlikte çökelti partikülleri de gözlenmektedir (Şekil 4.5). PN450 kodlu numune de nitrürlenmiş tabaka kalınlığı 49,97 µm olarak ölçülmüştür. Nitrürlenmiş tabaka genel olarak CrN ile birlikte expanded martenzit,  $Fe_xN_y$  gibi fazların oluştuğu literatürden bilinmektedir (Esfandiari ve Dong 2007, Li ve ark. 2008, Riazi ve ark. 2017). Difüzyon tabakasının iç yapısının da nitrürlenmiş tabakaya benzer farklı oranlarda expanded martenzit,  $Fe_xN_y$ , CrN gibi fazları oluştuğu bilinmektedir (Riazi ve Ashrafizadeh ve Hosseini ve Ghomashchi 2017b).

PN400 ve PN450 numunelerinde oluşan difüzyon tabakasının kalınlığının farklı olmasının nedeni sıcaklık değişkenidir. Difüzyon hızı sıcaklıkla doğru orantılı olduğu bilinmektedir (Callister 1991). Sıcaklık arttıkça azot atomlarının difüze olduğu tabaka kalınlığının artacağı aşikardır. Yüksek sıcaklıklarda difüze olan azot konsantrasyonu da daha fazladır (Li et al. 2008).

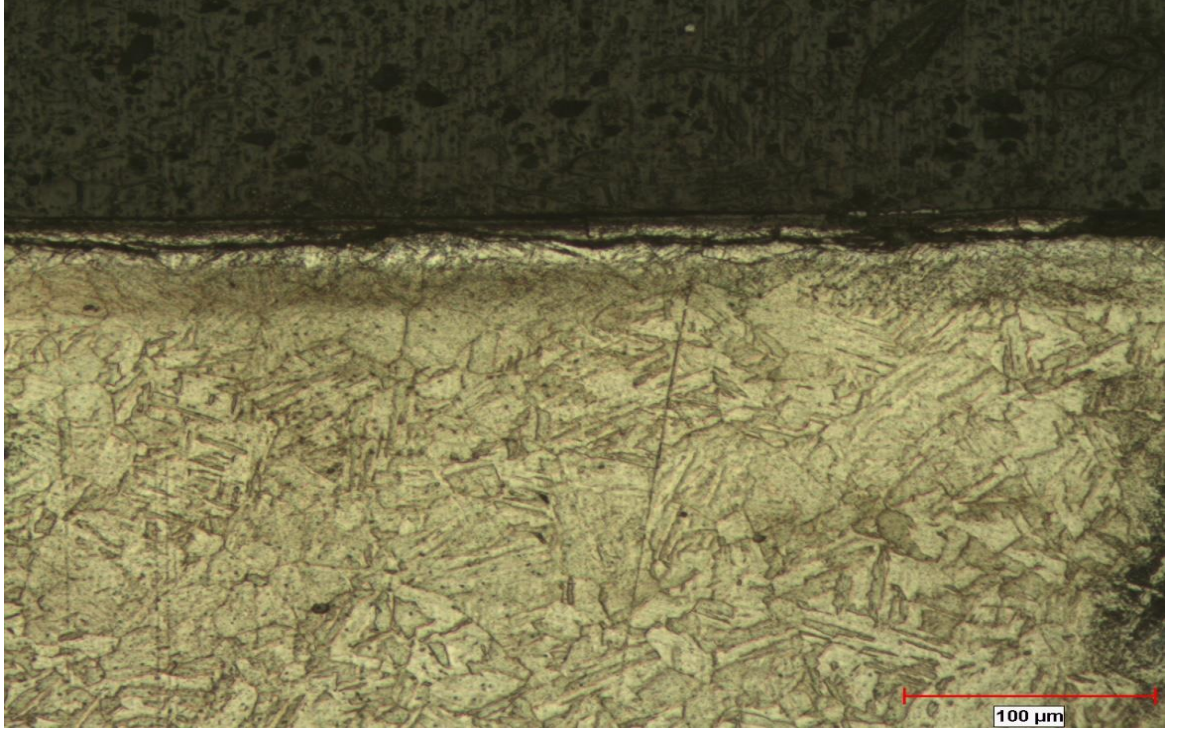


Şekil 4. 1. PN400 kodlu numunenin x200 görünümü

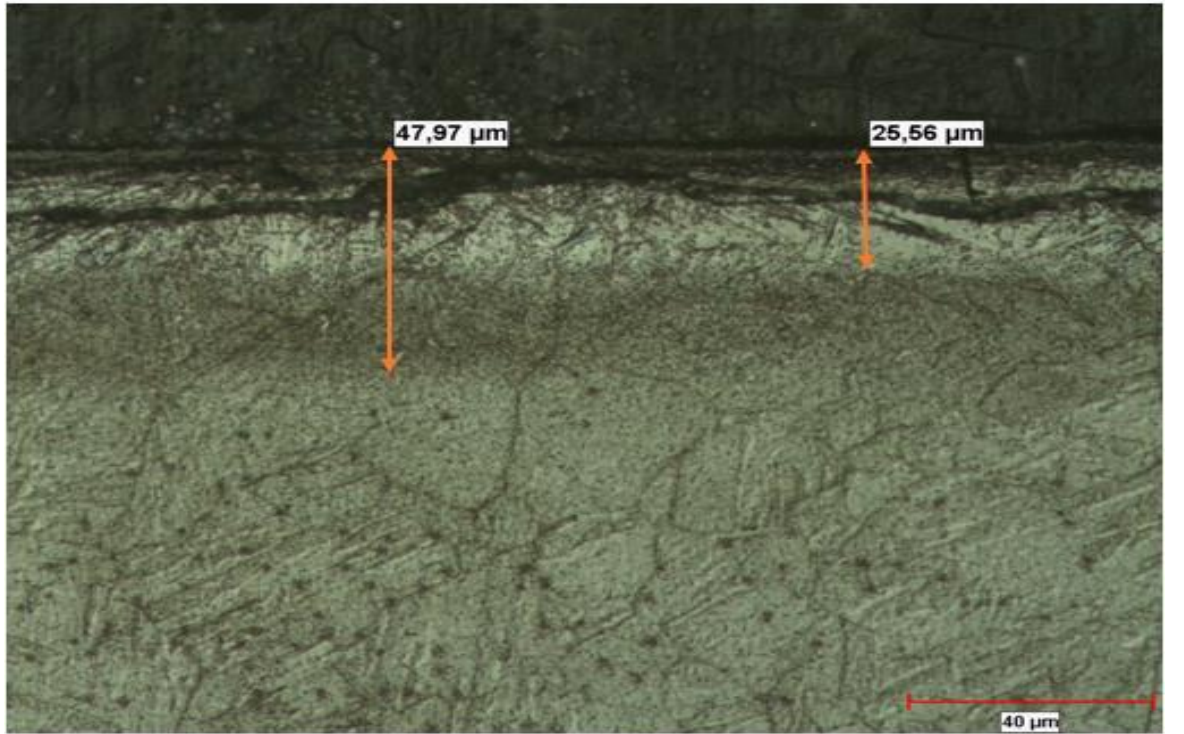


Şekil 4. 2. PN400 kodlu numunenin x500 görünümü





Şekil 4. 3. PN450 kodlu numunenin x200 görünümü



Şekil 4. 4. PN450 kodlu numunenin x500 görünümü

## 4.2. Sertlik Sonuçlarının Yorumlanması

BM kodlu malzeme için 1 kg ağırlıkla 10 s bekleme süresinde 20 ölçüm yapılmıştır. Yapılan ölçümlerle elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır. Bununla birlikte, ölçümlerin istatistik hesaplamaları yapılmıştır.

BM numunesi için yapılan hesaplamaların sonuçları Çizelge 4.1' de verilmiştir. Başlangıç malzemesinin ortalama sertliği 361.71 HV<sub>1</sub> bulunmuştur. Plazma nitrüleme işlemine tabi olan iki numunenin ise yüzeyden itibaren 10 µ uzaklıkta PN400 kodlu olan numunenin sertliği 1042.92 HV<sub>0.025</sub>, PN450 kodlu olan numunenin sertliği ise 1130.08 HV<sub>0.025</sub> ölçülmüştür.

Yüzeyden itibaren 10 µ mesafeden başlayarak değişik aralıklarla yapılan ölçümlerin sonuçları PN400 ve PN450 numuneleri için kesit sertlik dağılımları Çizelge 4.2 ve 4.3'de verilmiştir.

**Çizelge 4. 1.** Başlangıç numune sertlikleri

	Ölçüm	Ölçüm	Ölçüm	Ölçüm	Ölçüm
[1-5]	361,2	372,6	375,2	359,2	354,8
[6-10]	363,2	364,3	359,2	365,3	357,2
[11-15]	370,5	363,2	358,2	364,8	354,3
[16-20]	360,2	355,7	346,6	365,3	363,2
	Ortalama	Std. Sapma	Std. Hata	Varyasyon	Ranj
	361,71	6,654709	1,488038	1,839791	28,6

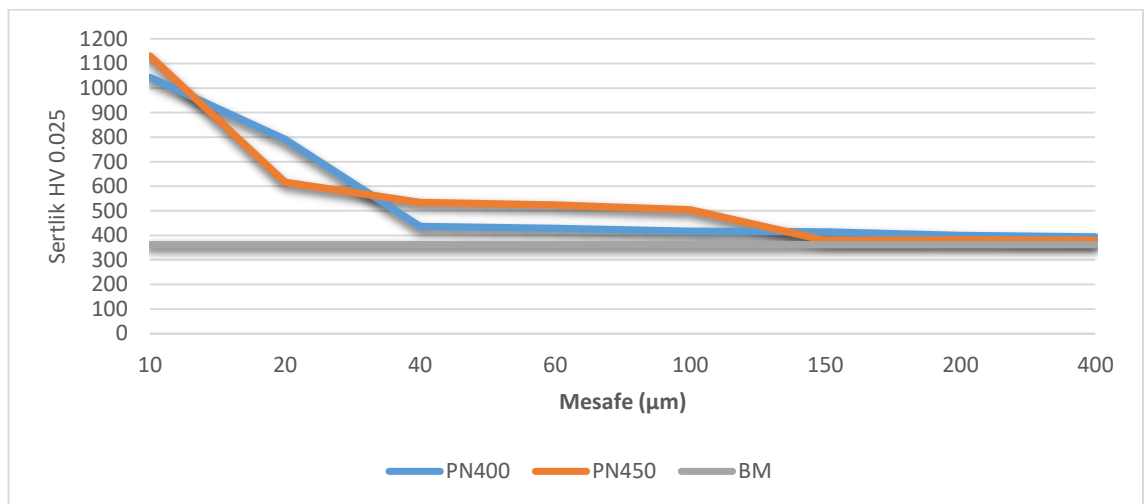
Çizelge 4. 2. PN400 numunesinin sertlik dağılımı

Mesafe	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm5	Aritmetik ort.	Std. sapma	Range	Varyasyon	Std. Hata
10	1032,7	1017,5	1002,6	1064,8	1097	1042,92	38,012195	94,4	3,6447854	16,999571
20	762	882	781,9	792,2	733,5	790,32	55,924476	148,5	7,0761813	25,010186
40	441,3	416,5	450	437	432,8	435,52	12,393829	33,5	2,8457543	5,5426889
60	420,5	428,6	416,5	424,5	454,5	428,92	14,992732	38	3,4954611	6,7049534
100	424,5	424,5	412,6	428,6	393,8	416,8	14,181502	34,8	3,4024717	6,3421605
150	420,5	420,5	408,7	412,6	408,7	414,2	5,9674115	11,8	1,4407077	2,6687076
200	412,6	379,7	408,7	408,7	386,6	399,26	14,992098	32,9	3,7549712	6,70467
400	379,7	379,7	408,7	412,6	386,6	393,46	16,002594	32,9	4,0671462	7,1565774

Çizelge 4. 3. PN450 numunesinin sertlik dağılımı

Mesafe	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 4	Ölçüm5	Aritmetik ort.	Std. sapma	Range	Varyasyon	Std. Hata
10	1168,1	1131,8	1168,1	1149,7	1032,7	1130,08	56,48409	135,4	4,998238	25,26045
20	598,7	619,6	612,5	657	591,9	615,94	25,4278	65,1	4,128292	11,37166
40	513,7	536	513,7	541,8	566	534,24	21,8673958	52,3	4,093178	9,779397
60	508,3	536	519,1	519,1	536	523,7	12,0629598	27,7	2,3034103	5,39472
100	530,3	503	524,7	482,7	477,8	503,7	23,7742508	52,5	4,719923	10,63217
150	372,9	363,1	376,3	363,1	420,5	379,18	27,1272852	13,2	7,154197	12,13169
200	379,7	397,5	363,1	363,1	401,2	380,92	21,341968	38,1	5,6027428	9,544418
400	369,6	372,9	383,1	397,5	379,7	380,56	10,8737298	27,9	2,8572971	4,86288

Şekil 4.5'te değişik şartlarda PN işleminin görmüş numunelerin sertlik dağılımları verilmiştir.



Şekil 4. 5. BM, PN400 ve PN450 kodlu numunelerin sertlik dağılımları



### 4.3. Aşınma Testinin Yorumlanması

Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerin aşınma davranışları ağırlık kaybı yoluyla belirlenmiştir. Bu nedenle numunelerinin ağırlıkları aşınma deney öncesi ve sonrası Sartorius marka hassas terazi yardımıyla ölçülmüştür. Materyal ve yöntem bölümünde belirlenen aşınma deney şartlarında aşınma testine tabi tutulan BM, PN400, PN450 numunelerinin aşınma deney sonuçları Çizelge 4.4'te görülmektedir. Çizelge 4.4 incelendiğinde en yüksek ağırlık kaybı 15 mm/s ve 1 kg yük altında PN400 kodlu numune görülmüştür. En düşük ağırlık kaybı ise PN 450 kodlu numunede 5 mm/s 'de 0.7 ve 1 kg yükte elde edilmiştir. Bununla birlikte, 15 ve 5 mm/s hız ve 0.7 ve 1 kg yük şartlarında BM kodlu numunedeki ağırlıkça aşınma kayıpları PN400 ve PN450 kodlu numunelerden elde edilen değerlere göre arasında kaldığı görülmektedir (Şekil 4.6-4.7).

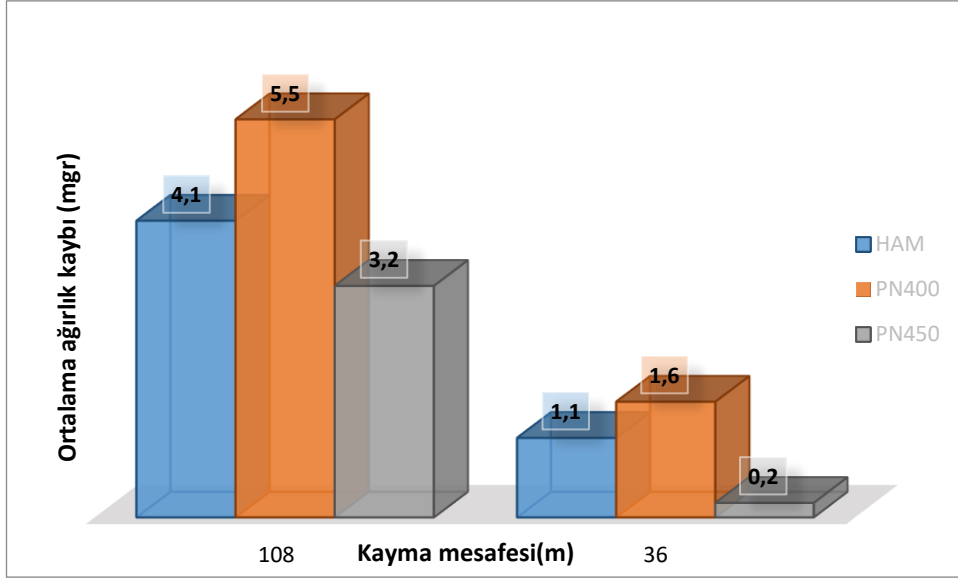
Çizelge 4. 4 Aşınma deneyinden önce ve sonra ölçülen numune ağırlıkları

Kütle Kaybı (gram)		15 mm/s		5 mm/s	
		1 Kg	0,7 Kg	1 Kg	0,7 Kg
BM	ilk	48,2801	49,0394	47,6539	49,7877
	son	48,2743	49,0353	47,6526	49,7866
	fark	<b>0,0058</b>	<b>0,0041</b>	<b>0,0013</b>	<b>0,0011</b>
PN400	ilk	50,3878	49,4987	47,3657	48,2801
	son	50,3816	49,4932	47,3630	48,2785
	fark	<b>0,0062</b>	<b>0,0055</b>	<b>0,0027</b>	<b>0,0016</b>
PN450	ilk	49,6439	49,1912	48,5508	48,1296
	son	49,6401	49,1880	48,5506	48,1294
	fark	<b>0,0038</b>	<b>0,0032</b>	<b>0,0002</b>	<b>0,0002</b>

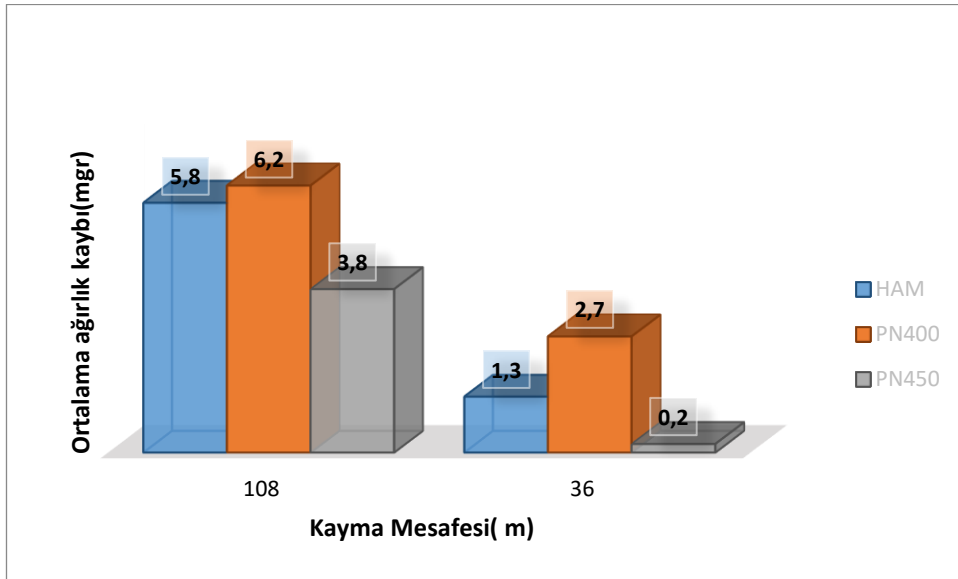
Çizelge 4.4 incelendiğinde bütün numunelerde genel eğilim olarak yük miktarı ve hız miktarı düştükçe aşınma kayıplarının azaldığı dikkat çekmektedir. Yük miktarı düştükçe

birim alan başına düşen noktasal basınç azalacağından abrazif aşınma etkisinin de azalacağı düşünülebilir. Aşınma kayıpları açısından bütün numuneleri bir arada değerlendirdiğimizde PN400 kodlu numunede ağırlıkça aşınma kayıplarının BM ve PN450 kodlu numunelerine göre daha fazla olduğu göze çarpmaktadır. Bu husus ilk bakışta PN400 numunesinin BM numunesine göre daha az aşınma kaybı olacağı beklenmektedir ancak bu durum beklenildiği gibi gerçekleşmemiştir. Bütün numunelerde aşınma deneyleri teknik kuru kayma şartlarında gerçekleştirilmiş ve aşınma ürünleri (partikülleri) ortamdan uzaklaştırılmamıştır. Yukarıdaki şartlarda gerçekleştirilen aşınma deneylerinde abrazif etki ile hem BM numunesinde hem de PN400 numunesinde kırılarak kopan partiküller sistemden uzaklaştırılmadığı için aşınma sisteminin içerisinde bulunarak numunelerin aşınma davranışına etki edeceği açıktır. Bununla birlikte nitrürlenmiş PN400 numunesinden abrazif etki sonucu kopan çok sert partiküller (CrN, Fe<sub>x</sub>N<sub>y</sub>) sistemin aşınmasını arttırıcı yönde etkilediğini düşünmek mümkündür. Bu nedenle PN400 numunesindeki ağırlıkça kayıpların BM numunesine göre aşınma kayıplarının fazla olması beklenir.

PN450 numunesindeki mikro yapısına bakıldığında (Şekil 4.3 - 4.4 ) oldukça sert olan beyaz tabaka ve difüzyon tabakasının varlığı görülmektedir. PN450 numunesindeki sert nitrürlenmiş tabakanın varlığından dolayı teknik kuru sürtünme sonucu oluşan abrazif etkiyi azaltmıştır. Bu sebeple BM ve PN400 numunelerine göre PN450 kodlu numunede daha az ağırlık kaybı görülmektedir.

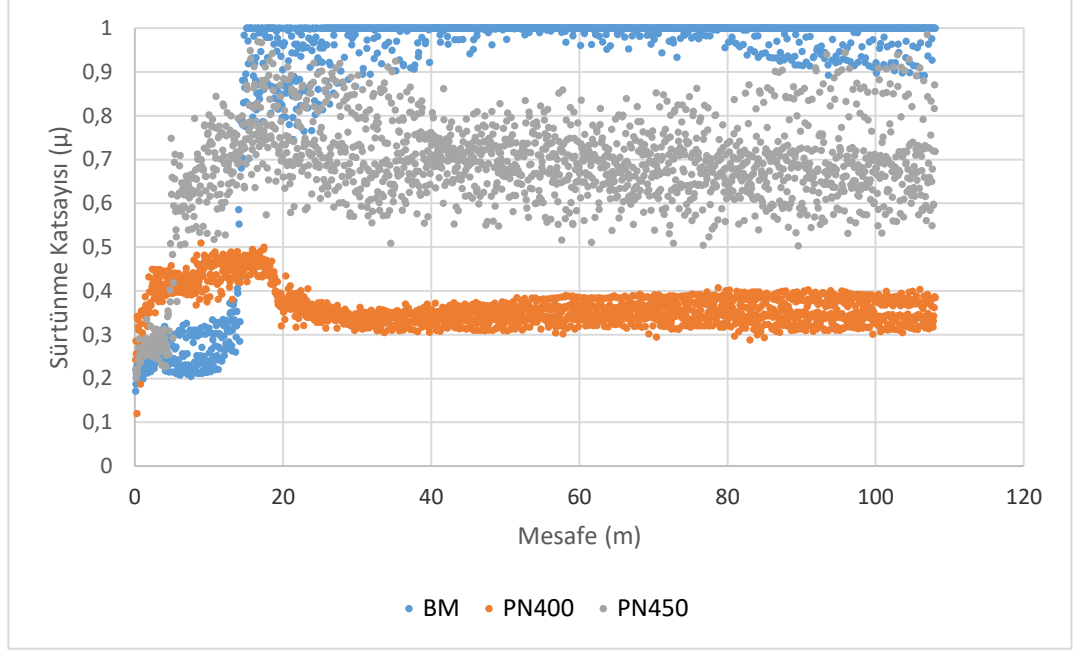


Şekil 4. 6. 0.7 kg yükte gerçekleştirilen aşınma deney numuneleri ağırlık kaybı

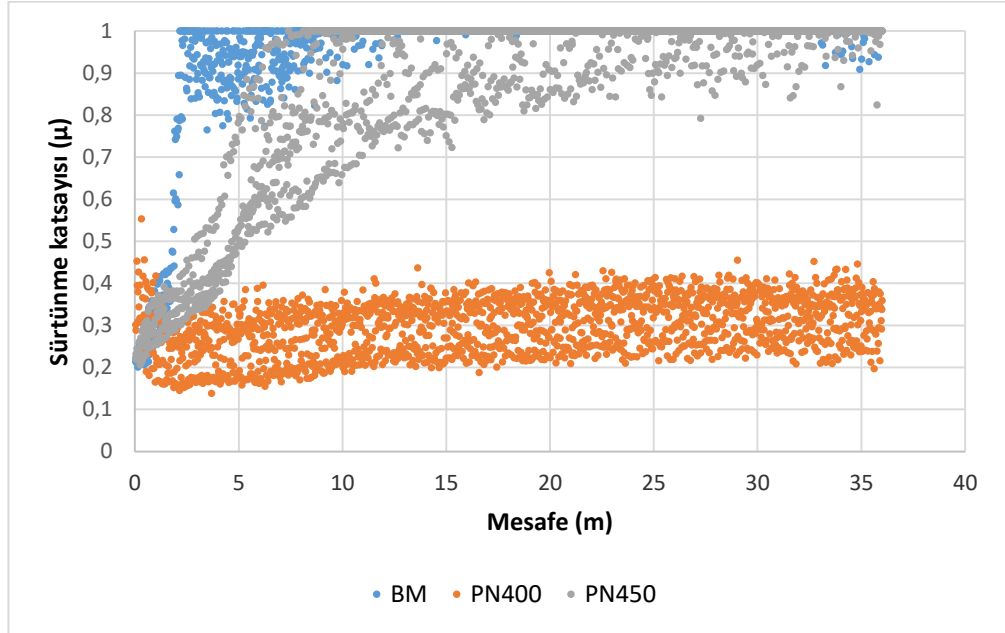


Şekil 4. 7. 1 kg yükte gerçekleştirilen aşınma deney numuneleri ağırlık kaybı

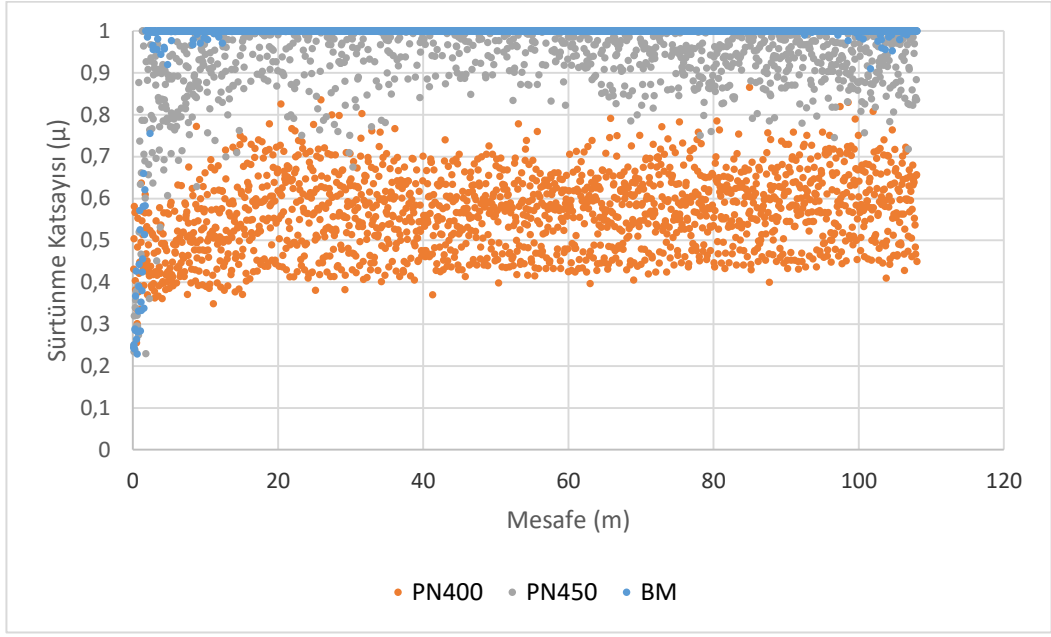
Materyal ve yöntem bölümünde tanımlanan aşınma testleri sonucunda elde edilen verilerden mesafeye bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi şekil 4.8–4.11’de görülmektedir.



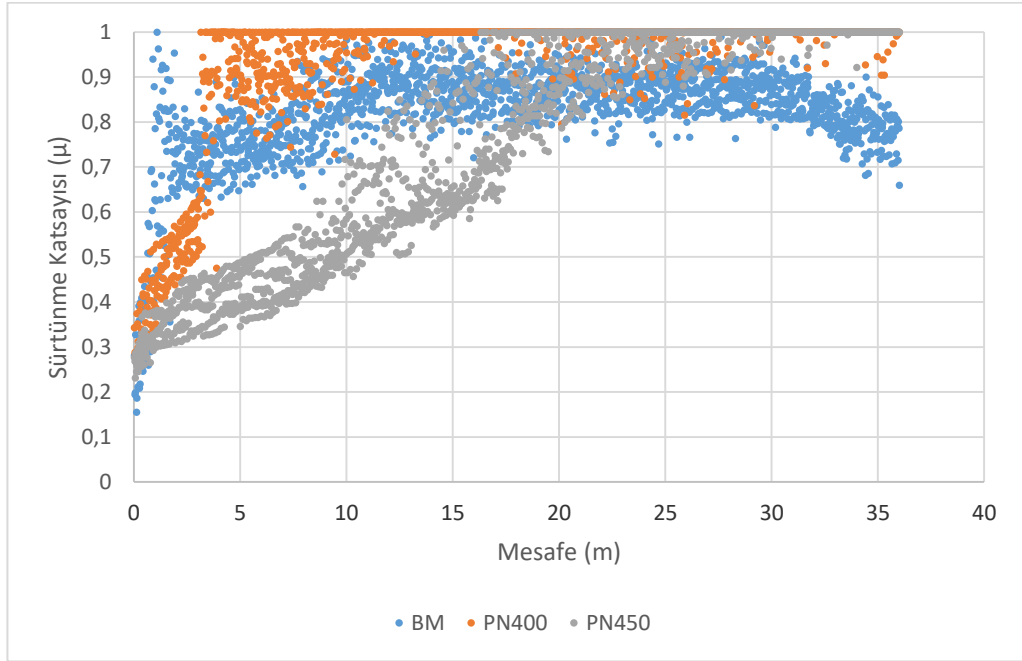
Şekil 4. 8. 1 kg yük ve 15 mm/s hızda yapılan aşınma deney sonuçları



Şekil 4. 9. 1 kg yük ve 5 mm/s hızda yapılan aşınma deney sonuçları



Şekil 4. 10. 0.7 kg yük ve 15 mm/s hızda yapılan aşınma deney sonuçları



Şekil 4. 11. 0.7 kg yük ve 5 mm/s hızda yapılan aşınma deney sonuçları

17-4 PH çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliğin düşük sertliklere ve zayıf tribolojik özelliklere sahip olduğu için bu özelliklerinden dolayı plazma nitrüleme işlemi ile daha iyi hale getirilebileceği Li ve ark. (2008) tarafından söylenmiştir. 1 kg yük 15 mm/s hızda gerçekleştirilen deney sonucunda PN400 kodlu numunenin sürtünme katsayısının 0.4-0.5 seyretmektedir. Bununla birlikte PN450 kodlu numunenin testin başlaması ile birlikte sürtünme katsayısında hızlı bir artış gerçekleşmekte daha sonra 0.5-0.9 bandında sürekli rejim bölgesine geçmektedir. BM kodlu numunede sürtünme katsayısı 0.2-0.3 bandında başladıktan sonra sürtünme katsayısında hızlı bir artış göstermiş olup 1 bandına yerleşmiştir. Plazma nitrüleme neticesinde PN400 ve PN450 kodlu numunelerde sürtünme özelliklerinin iyi duruma geldiği görülmektedir. 1kg yük ile 15 mm/sn gerçekleşen deneyde, işlem basıncının ve kayma hızının fazla olması nedeniyle aşınma miktarının 1kg-5 mm/s ve 0.7 kg -5 ve 15 mm/s şartlarında gerçekleşen deneylere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca plazma nitrüleme işleminin sürtünme özelliklerini iyileştirdiği ancak aşınma karakterinde abrazyon etki oluşturduğu mikroskop görüntülerinden de açıkça görülmektedir ( Şekil 4.12- 4.23).

1 kg yük ve 5 mm/s kayma hızında yapılan deney sonuçları da 1 kg yük ve 15 mm/s kayma hızında gerçekleştirilen deney sonuçları ile benzer özellikler göstermektedir.

PN450 kodlu numunesine uygulanan plazma nitrüleme işlemi malzemenin sürtünme özelliklerini iyileştirdiği görülmektedir. Yapılan deneyler sonucunda PN400 kodlu numunesinde benzer sonuçlar vermesi beklenirdi fakat PN400 numunesinin aşınma kayıpları BM numunesine göre daha fazla olduğu görülmektedir (Çizelge 4.4). PN400 numunesinin aşınma özelliklerinde iyileşmenin beklenildiği gibi olmamasının nedeni; aşınma deneyleri esnasında plazma nitrülenmiş numunelerinin yüzeyinde bulunan bileşik tabaka kırılması sonucu oluşan çok sert parçacıklar temas şartlarını bozarak sürtünme katsayısını arttırıcı yönde değişimine neden olduğu söylenebilir. (Kahraman et al. 2013) ve Korkmaz 2009 çalışmalarında da bu hususa vurgu yapmışlardır.

0.7 kg yük ve 15 mm/s kayma hızında gerçekleştirilen deney sonuçlarında da 1 kg yük, 5 ve 15 mm/s hızlarda gerçekleşen deneylere benzer sonuçlar vermektedir. Sürtünme katsayısı 0.4-0.7 bandında sürekli rejim bölgesinde olduğu görülmektedir. Testin

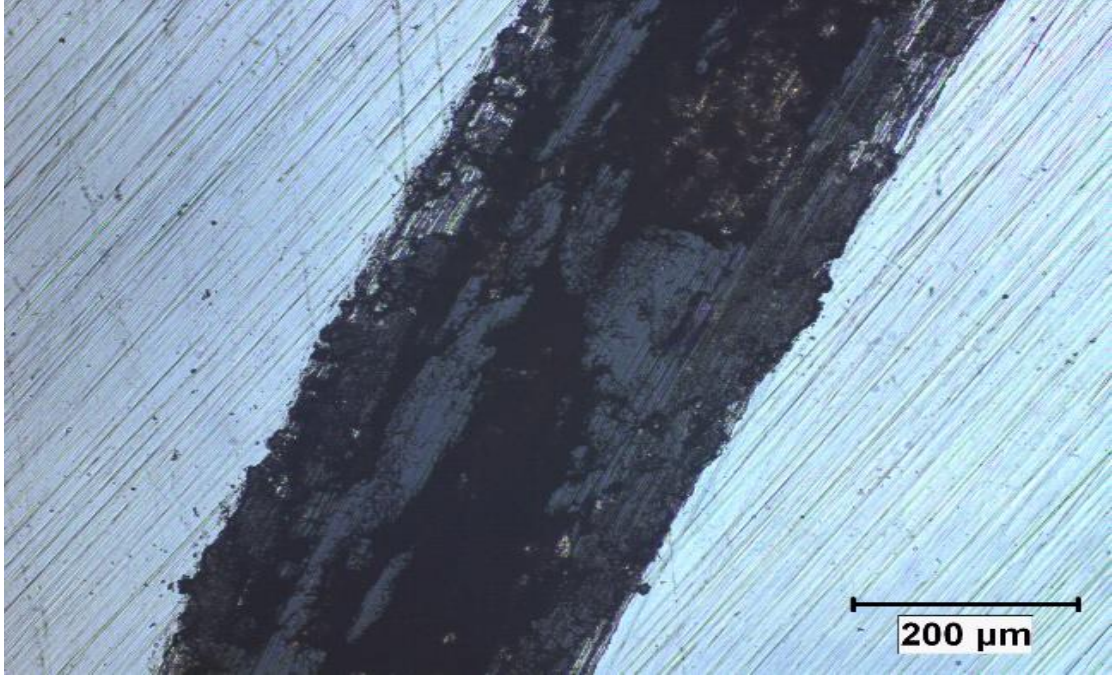
başlaması ile PN450 kodlu numunenin sürtünme katsayısı hızlı bir artış göstermiş. 0.8-1 arasında sürekli rejim bölgesine girmiştir. BM kodlu numune de ise deneyin başlaması ile rodaj süresince sürtünme katsayısında hızlı bir artış göstermektedir.

0.7 kg yük ve 5 mm/s kayma hızında gerçekleştirilen deneyin başlaması ile rodaj süresince her üç numune içinde sürtünme katsayısında bir artış gözükmektedir. BM kodlu numune de sürekli rejim bölgesinde 0.7-0.8 sürtünme katsayısında devam ettiği görülmektedir. PN450 kodlu numunenin de diğer numunelere göre sürtünme katsayısındaki artışı diğer numunelere göre daha yavaş olduğu görülmektedir.

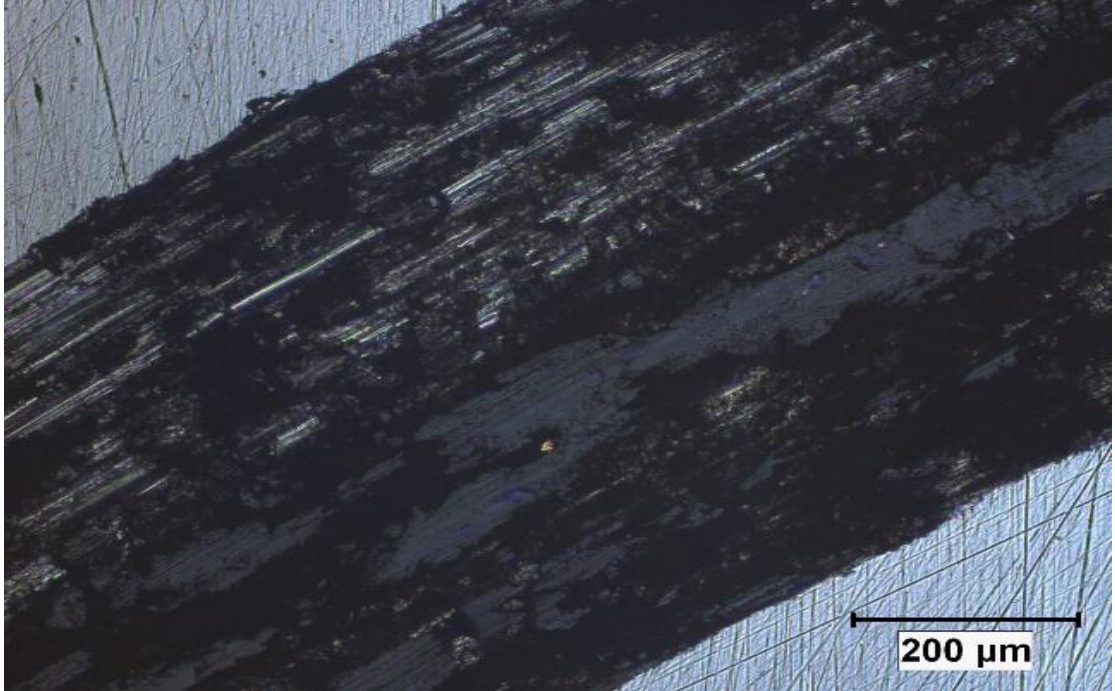
Aşınma deneyleri kuru sürtünmeli ortamda aşınma ürün kalıntıları ortamdan uzaklaştırılmadan gerçekleşmiştir. BM kodlu deney numunesinin mikroskop görüntüleri incelendiğinde adezif aşınmanın yanı sıra abrazif aşınmalarda görülmektedir. Deney numunelerimizden PN400 numunesinin aşınma miktarının BM kodlu numuneye yakın olmasının sebebi şu şekilde açıklanabilir. PN400 numunesi BM numunesine göre daha serttir ( Şekil 4.5 ). Plazma nitrüleme işlemi sonucu yüzeyde çok sert bir difüzyon tabakası oluşmaktadır. Oluşan bu sert ve gevrek yapı uygulanan yük ile birlikte kırılmalara, abrazif parçaların oluşmasına sebep olmuştur. Yoğun şekilde abrazif aşınmanın yanı sıra adezif aşınmanın olduğu da mikroyapı görüntülerinden görülmektedir (Şekil 4.12-15). Ayrıca deney boyunca aşınma ürünleri ortadan uzaklaştırılmadığı için, bahse konu partiküller deney sistemi içerisinde aşınmayı artıracak şekilde davranmıştır. Abrazif etki yapan partiküller deney numunesi üzerinde yer yer oyuk oluşumuna sebep olmuştur. Bu sert partiküllerin deney numunesine yapıştığı gözlenmektedir. PN450 numunesinde aşınma miktarının az olması plazma nitrüleme işleminin malzemenin tribolojik özelliklerine iyi katkılarda bulunduğu görülmektedir.

Şekil 4.12-Şekil 4.23 arasında BM, PN400 ve PN450 kodlu numunelerin optik mikroskopta X100 büyütmedeki fotoğrafları verilmiştir.



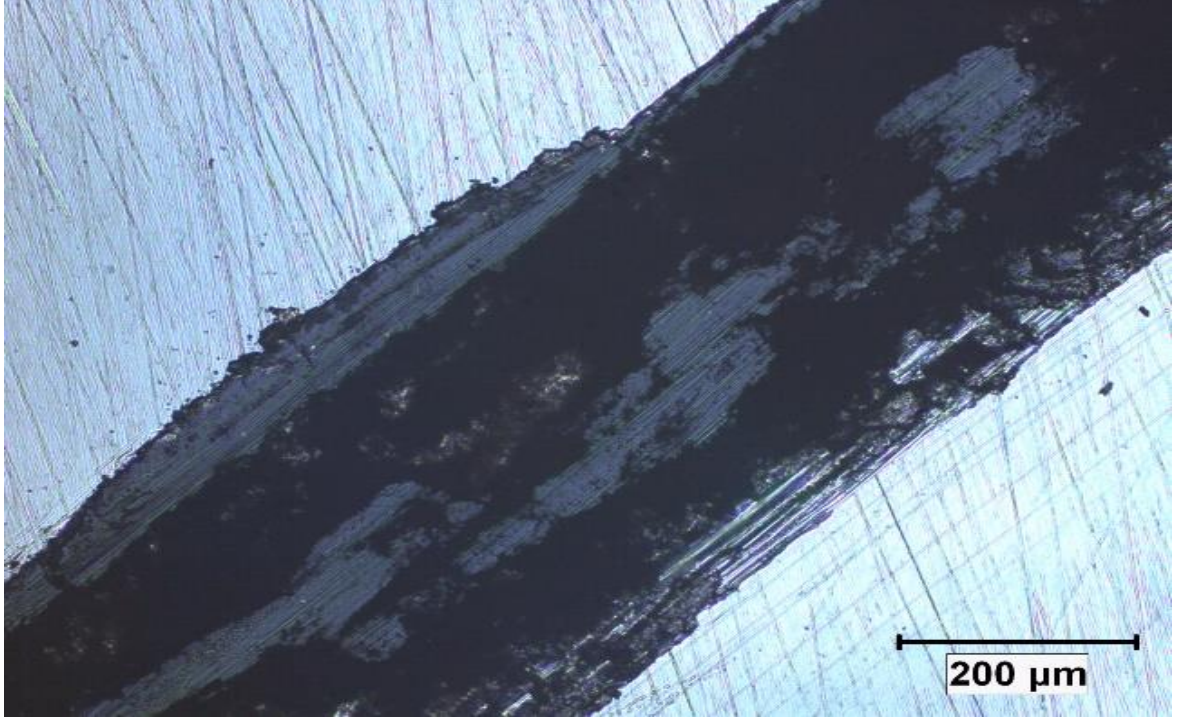


**Şekil 4. 12.** BM kodlu numunenin 0.7 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100.

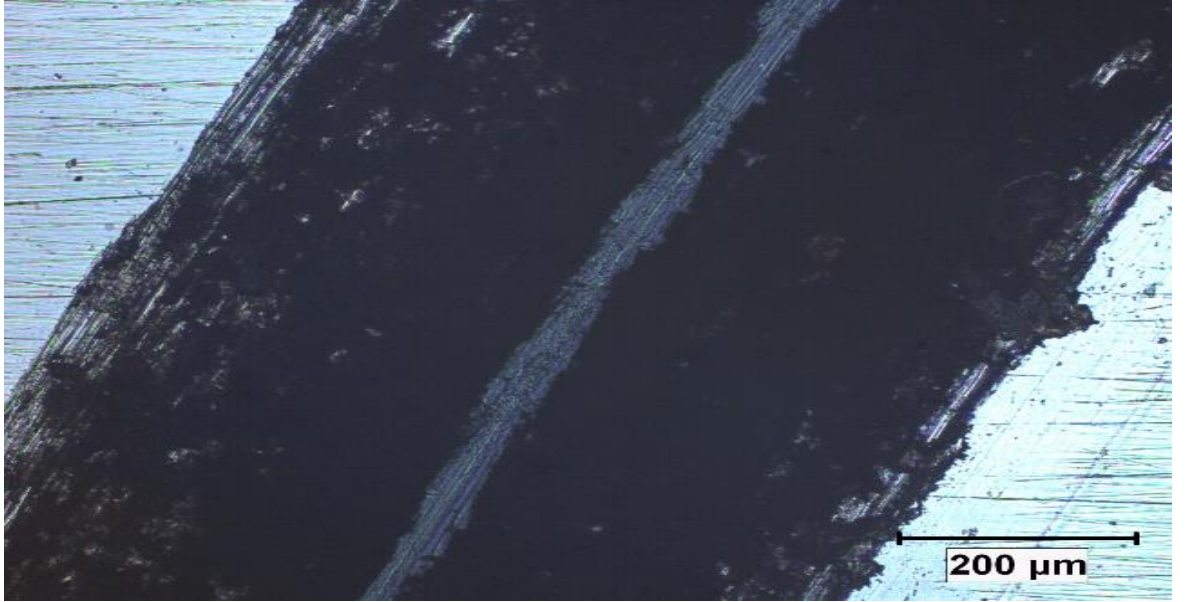


**Şekil 4. 13.** BM kodlu numunenin 0.7 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100.



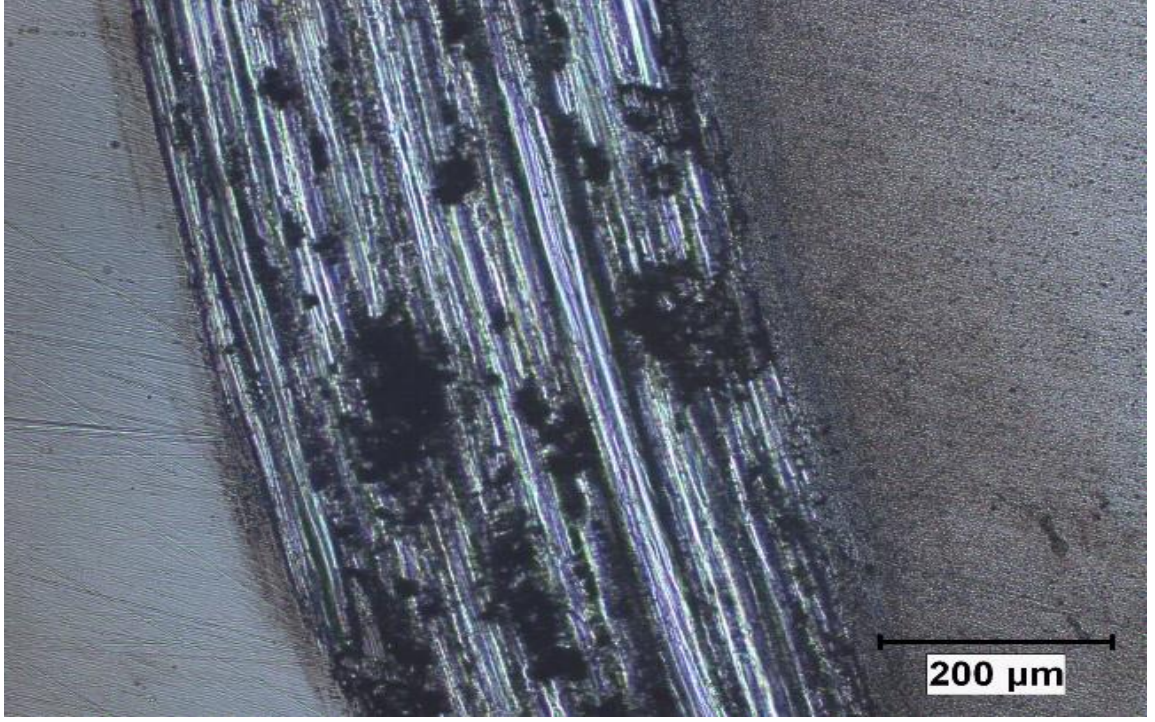


**Şekil 4. 14 .** BM kodlu numunenin 1 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100.

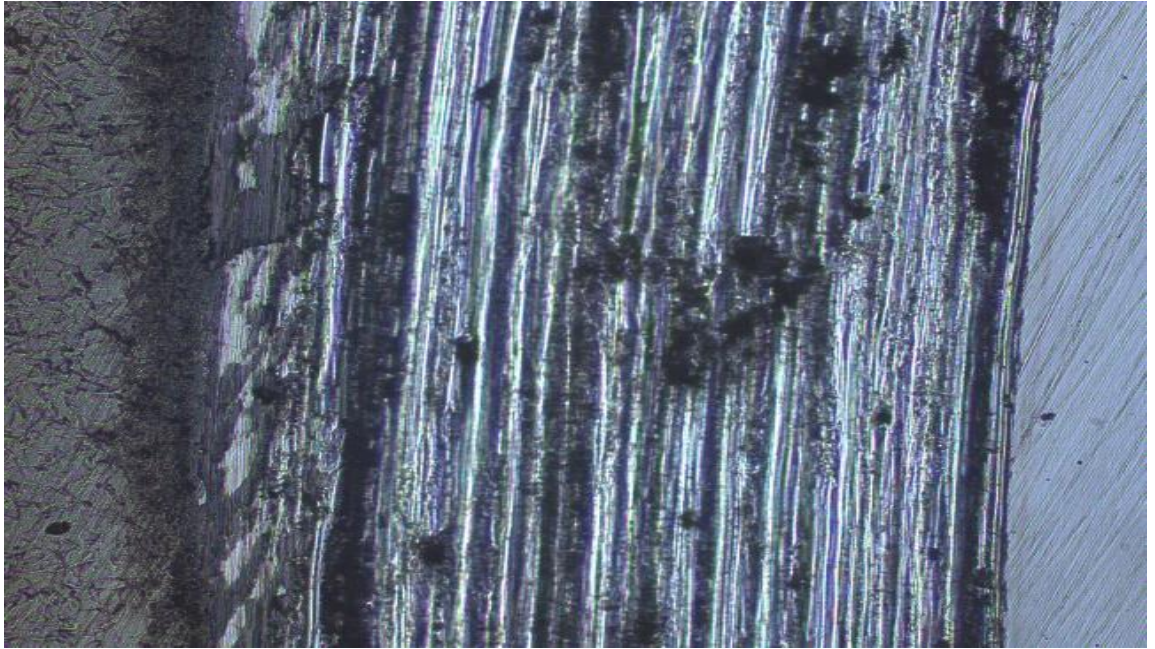


**Şekil 4. 15.** BM kodlu numunenin 1 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100.



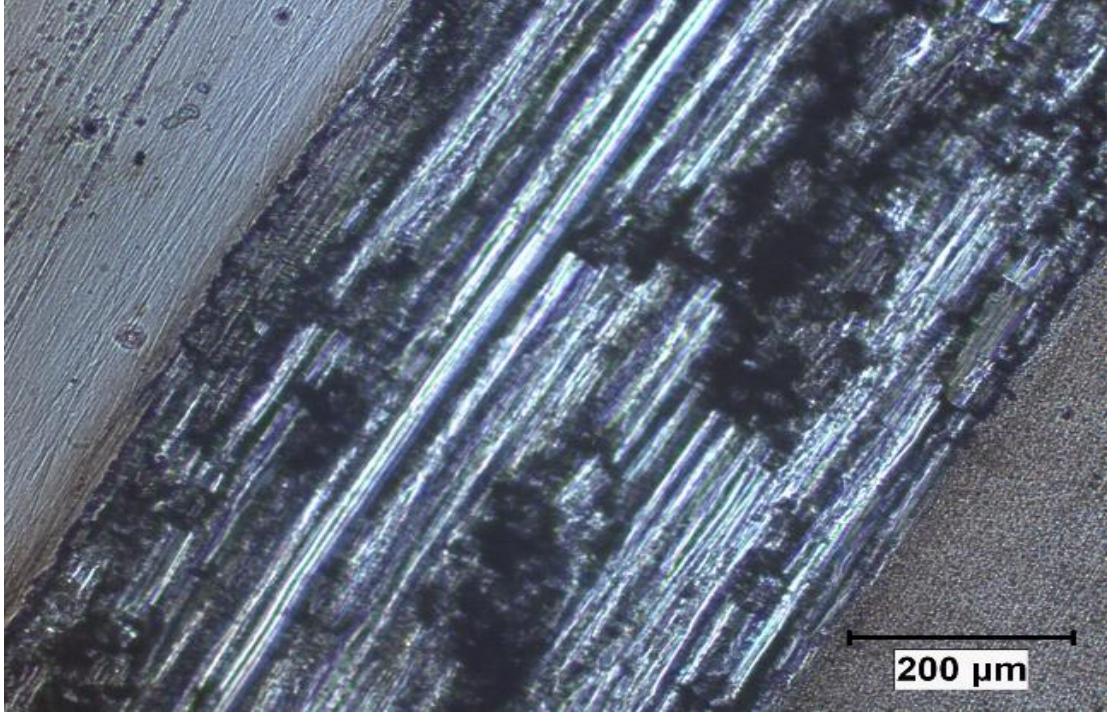


**Şekil 4. 16.** PN400 kodlu numunenin 0.7 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100.

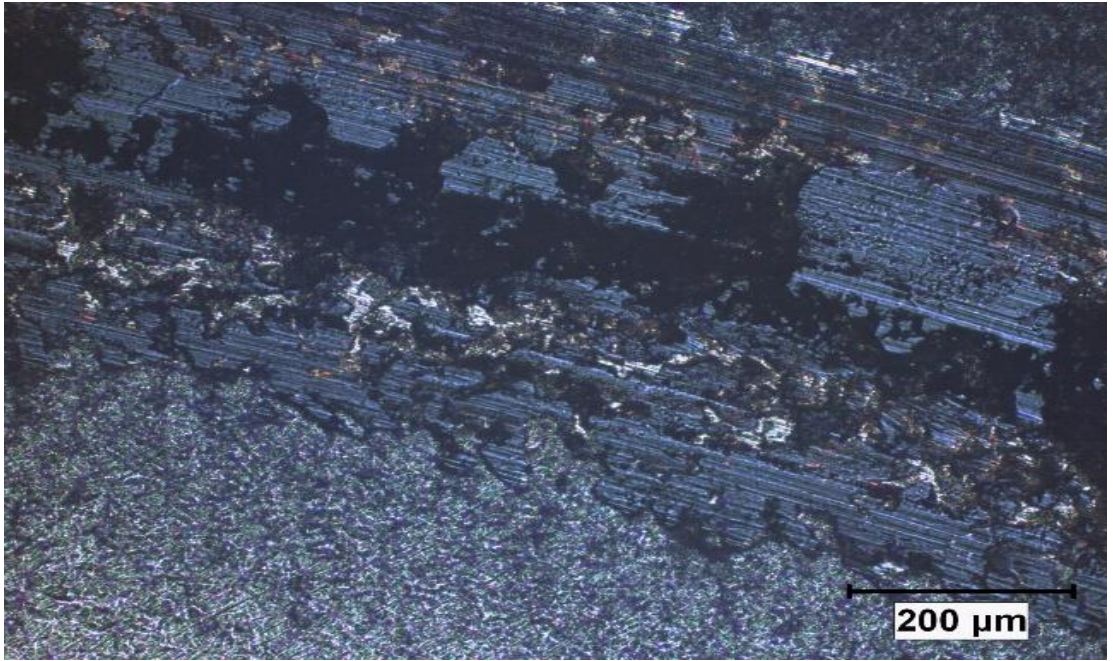


**Şekil 4. 17.** PN400 kodlu numunenin 0.7 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100.





**Şekil 4. 18.** PN400 kodlu numunenin 1 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100.

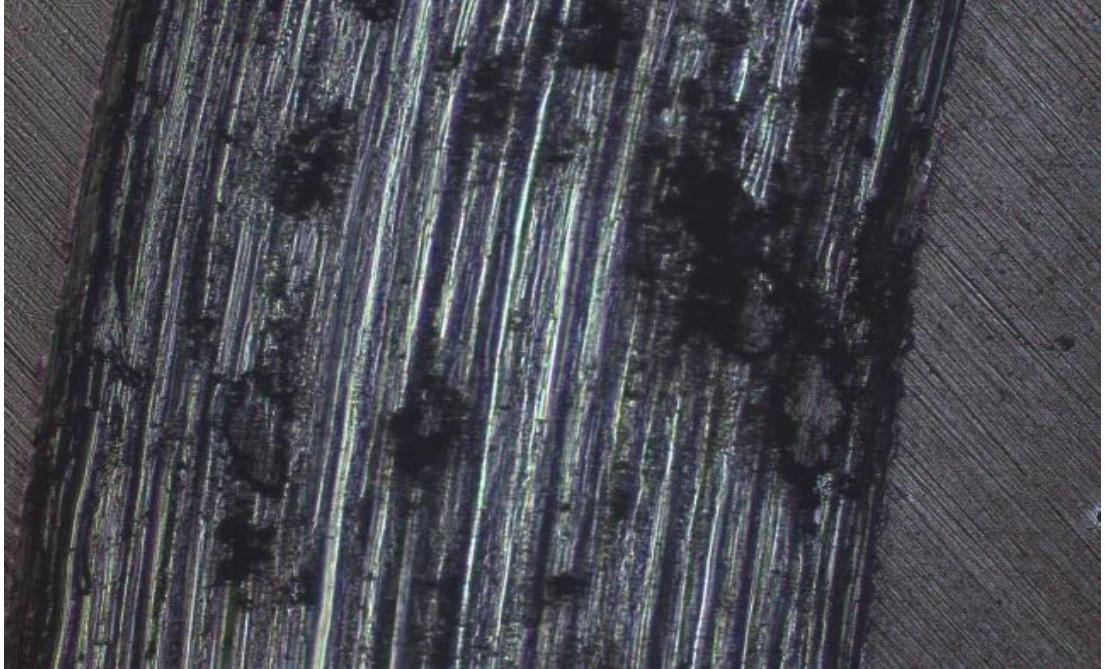


**Şekil 4. 19.** PN400 kodlu numunenin 1 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100.



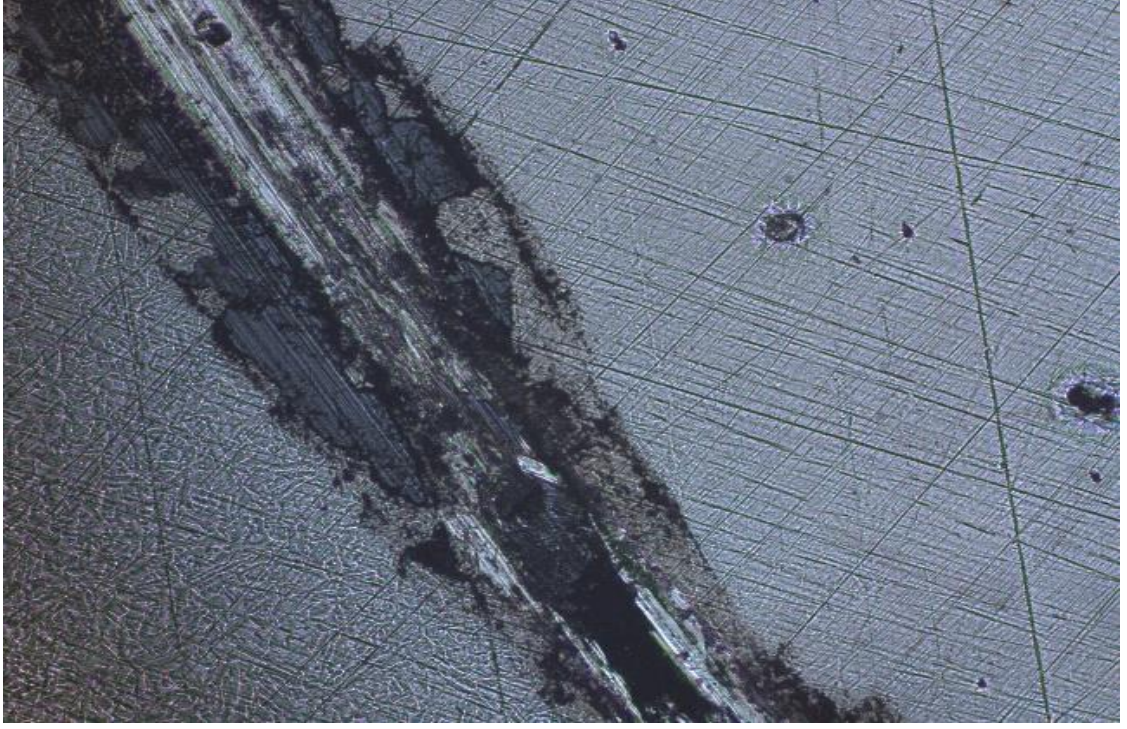


**Şekil 4. 20.** PN450 kodlu numunenin 0.7 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100

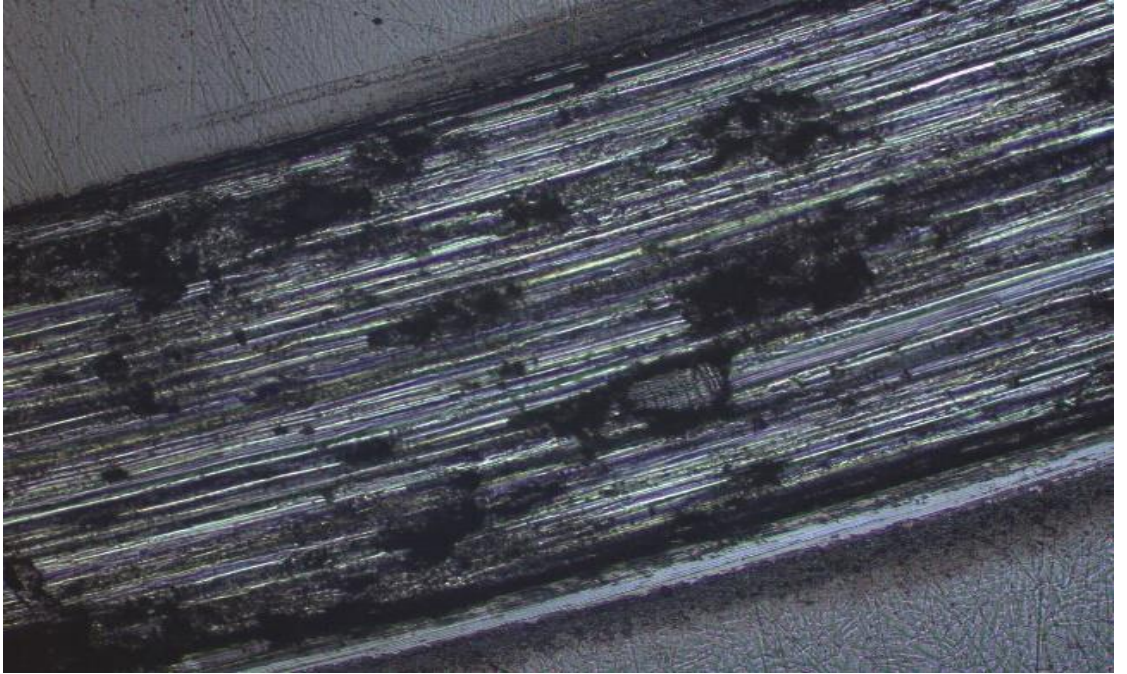


**Şekil 4. 21.** PN450 kodlu numunenin 0.7 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100





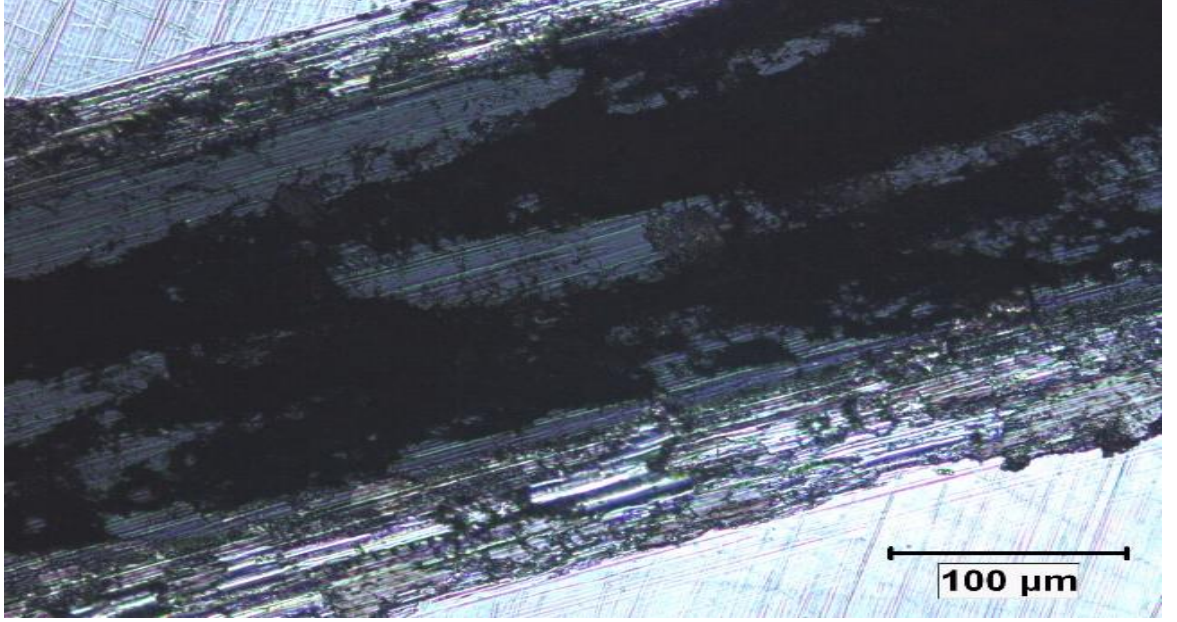
**Şekil 4. 22.** PN450 kodlu numunenin 1 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100.



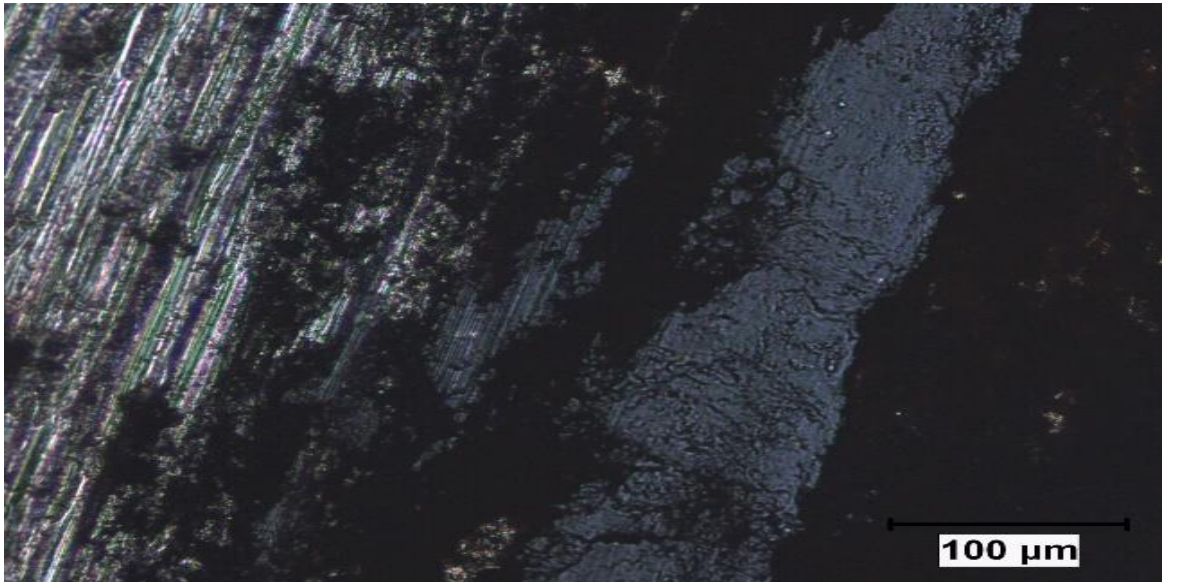
**Şekil 4. 23.** PN450 kodlu numunenin 1 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X100.



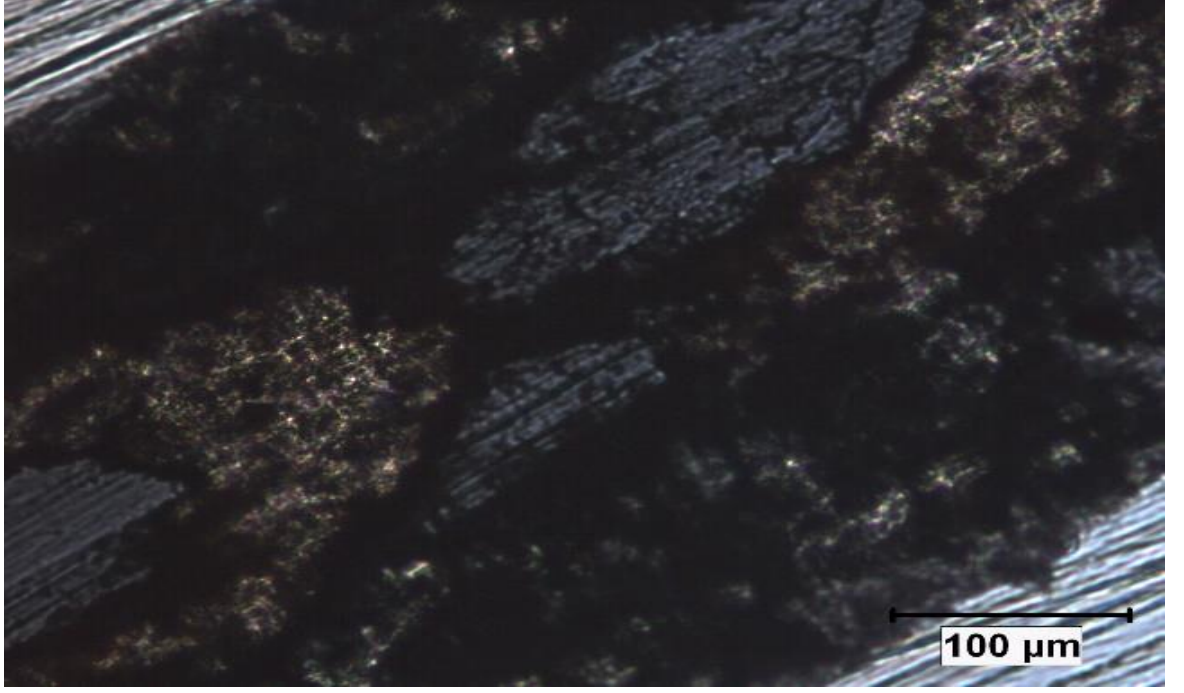
Şekil 4.24 -Şekil 4.35 arasında BM, PN400 ve PN450 kodlu numunelerin optik mikroskopta X200 büyütmedeki fotoğrafları verilmiştir.



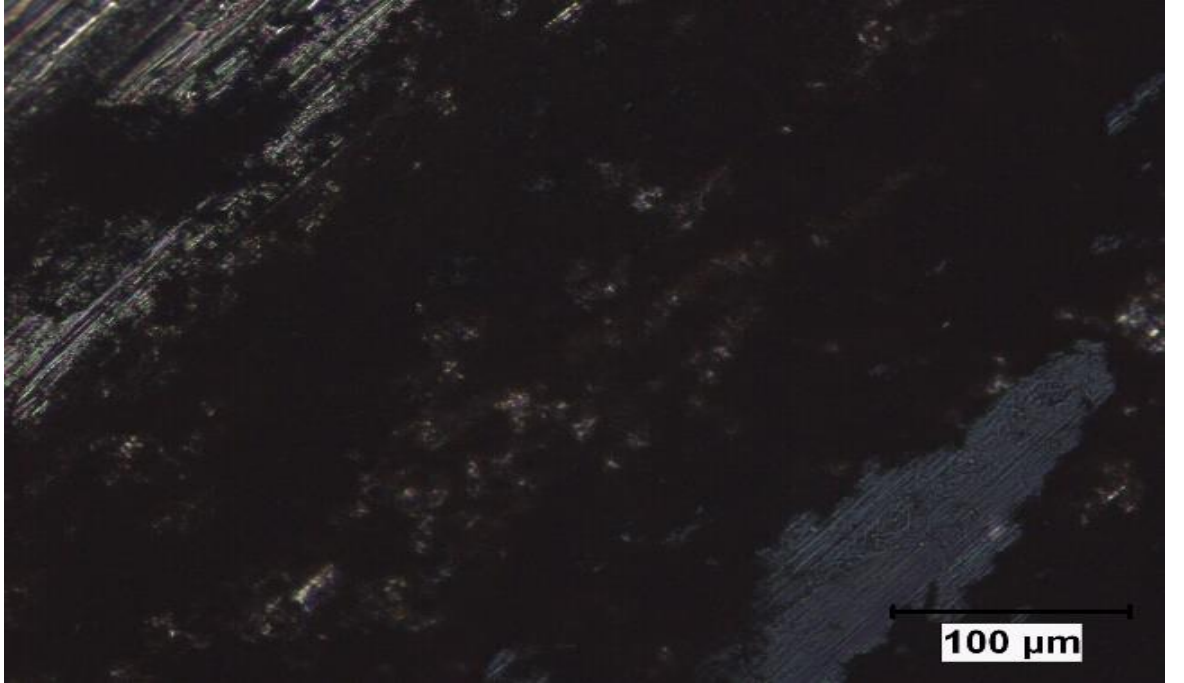
**Şekil 4. 24.** BM kodlu numunenin 0.7 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200.



**Şekil 4. 25.** BM kodlu numunenin 0.7 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200.

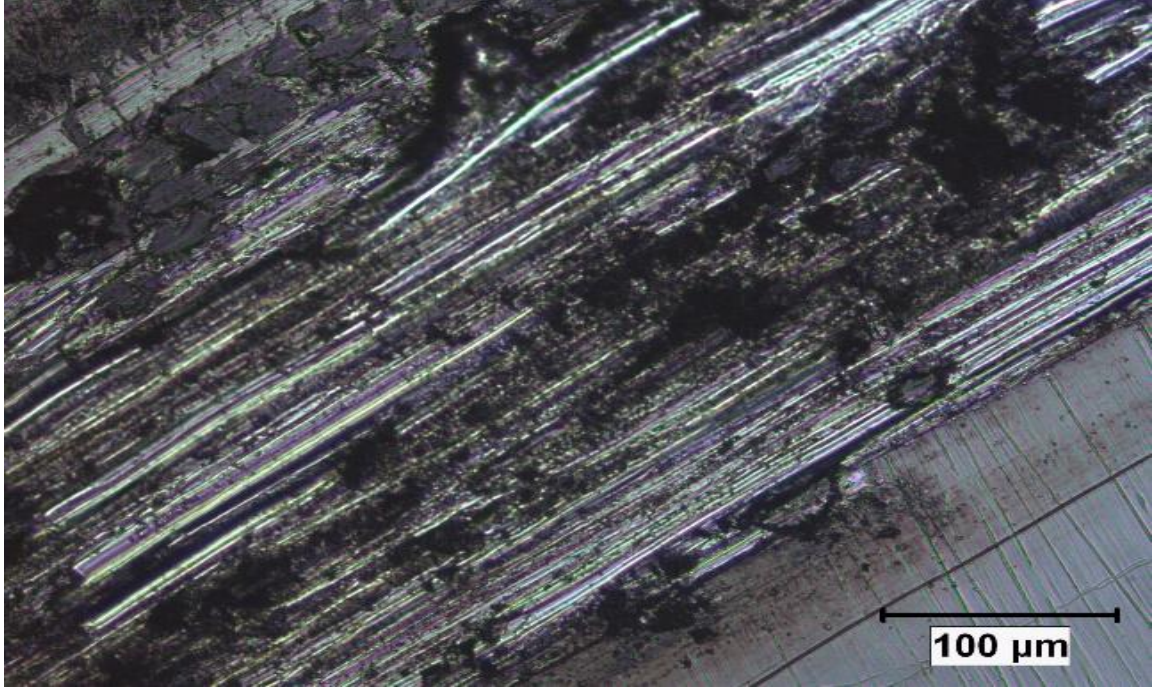


**Şekil 4. 26.** BM kodlu numunenin 1 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200.

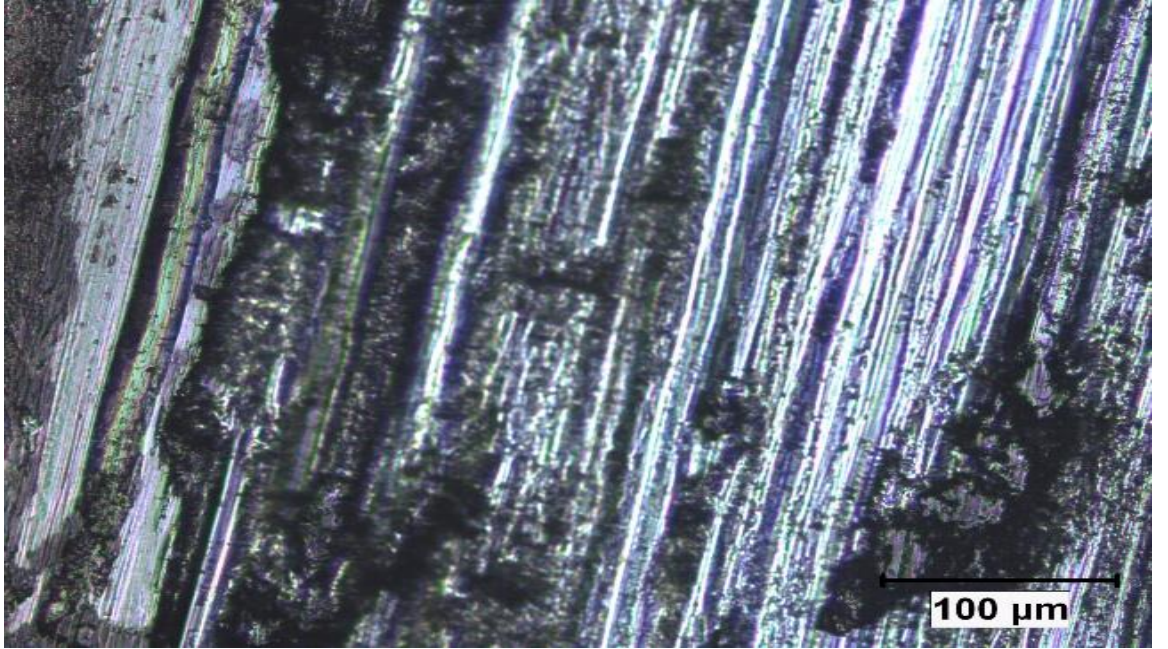


**Şekil 4. 27.** BM kodlu numunenin 1 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200.



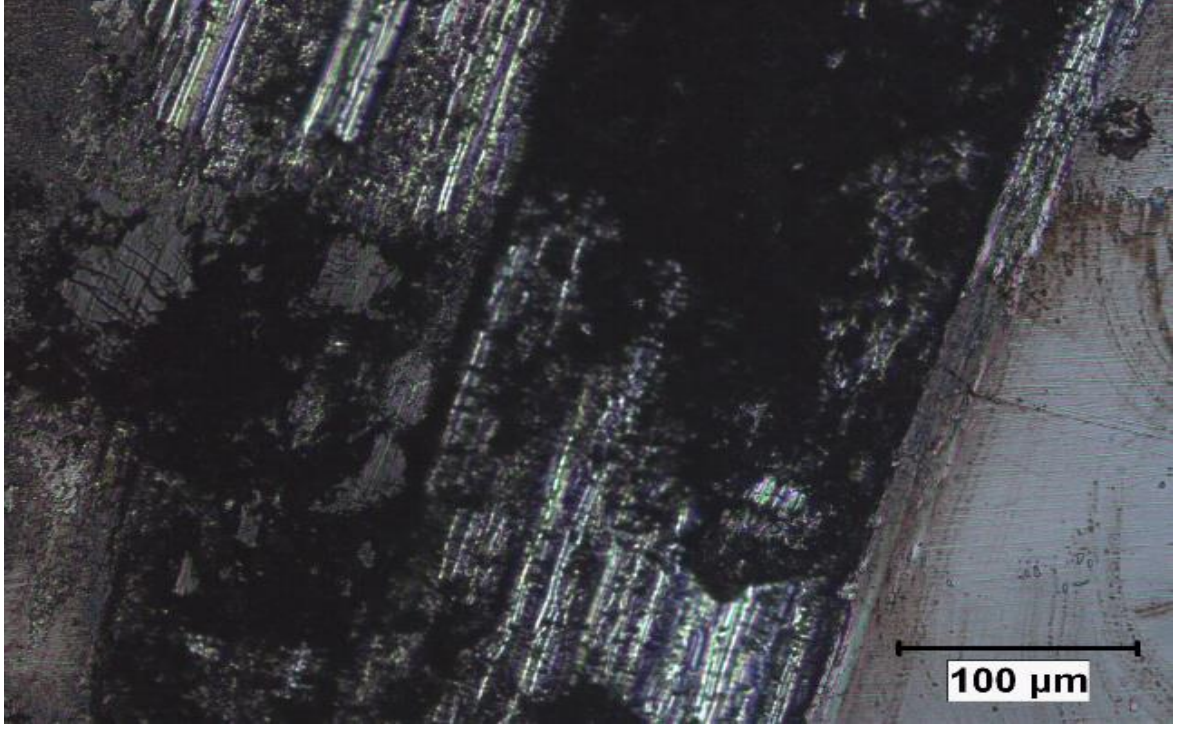


**Şekil 4. 28.** PN400 kodlu numunenin 0.7 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200.

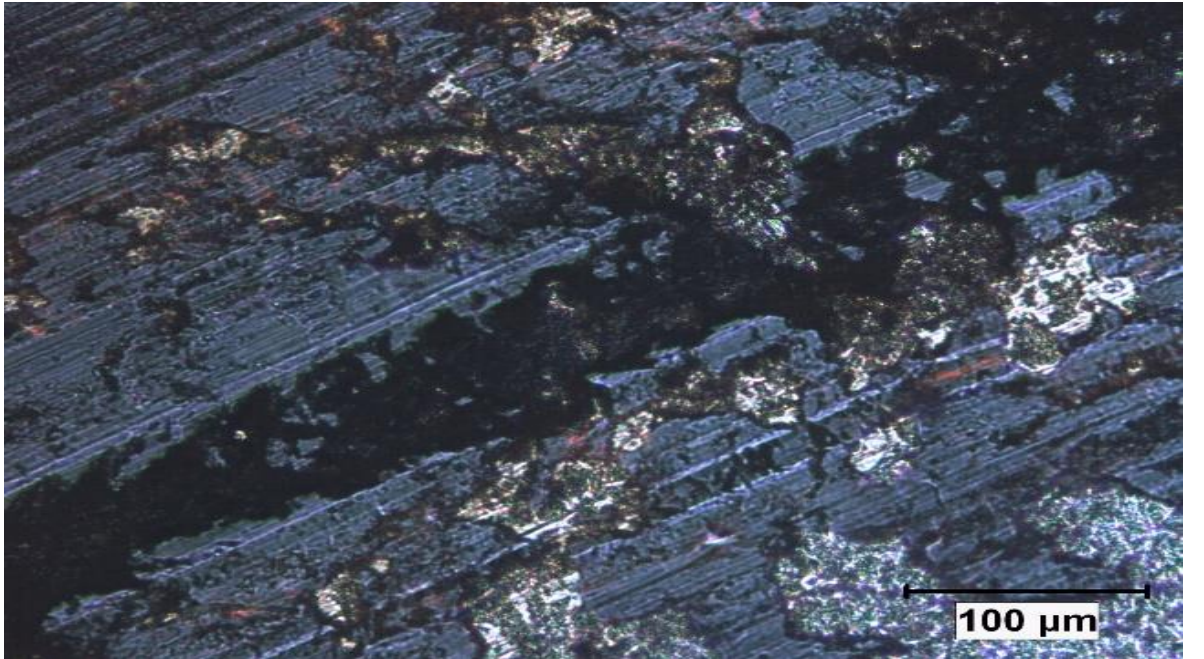


**Şekil 4. 29.** PN400 kodlu numunenin 0.7 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200.



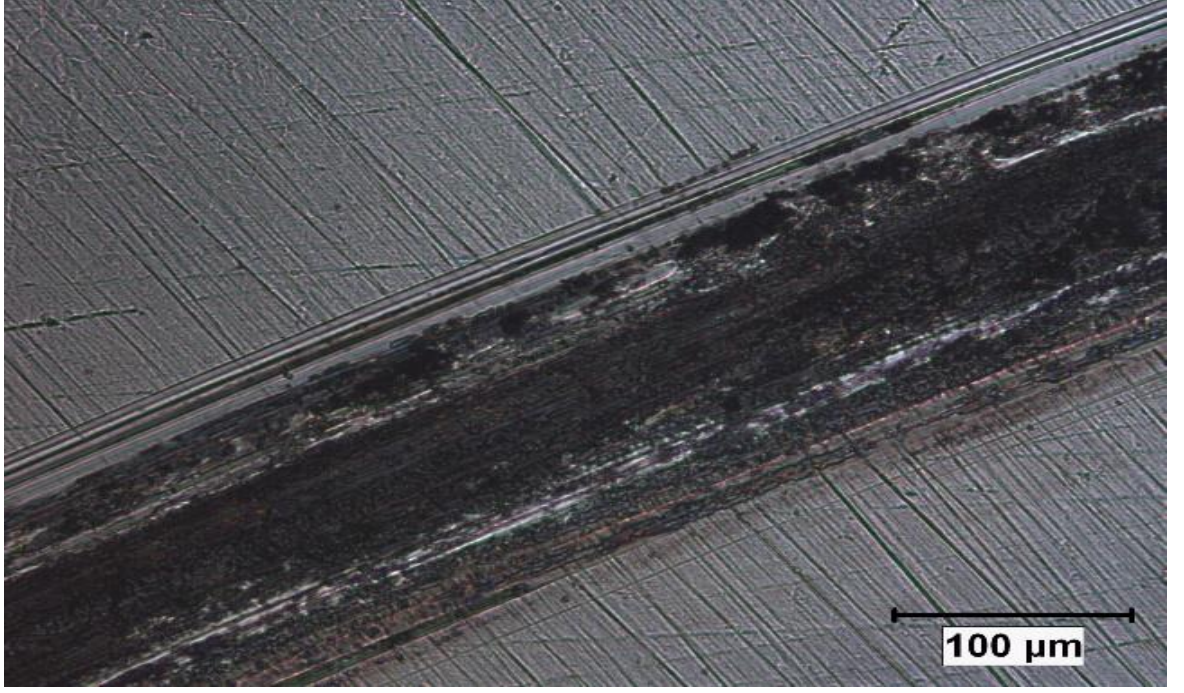


**Şekil 4. 30.** PN400 kodlu numunenin 1 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200.

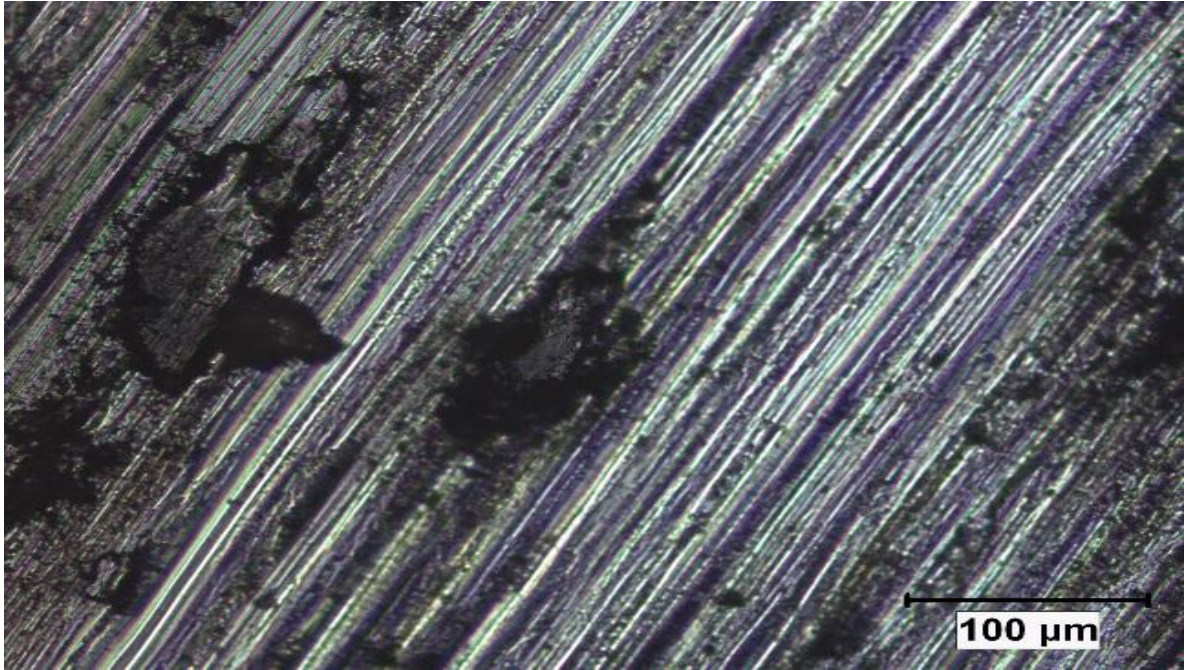


**Şekil 4. 31.** PN400 kodlu numunenin 1 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200.



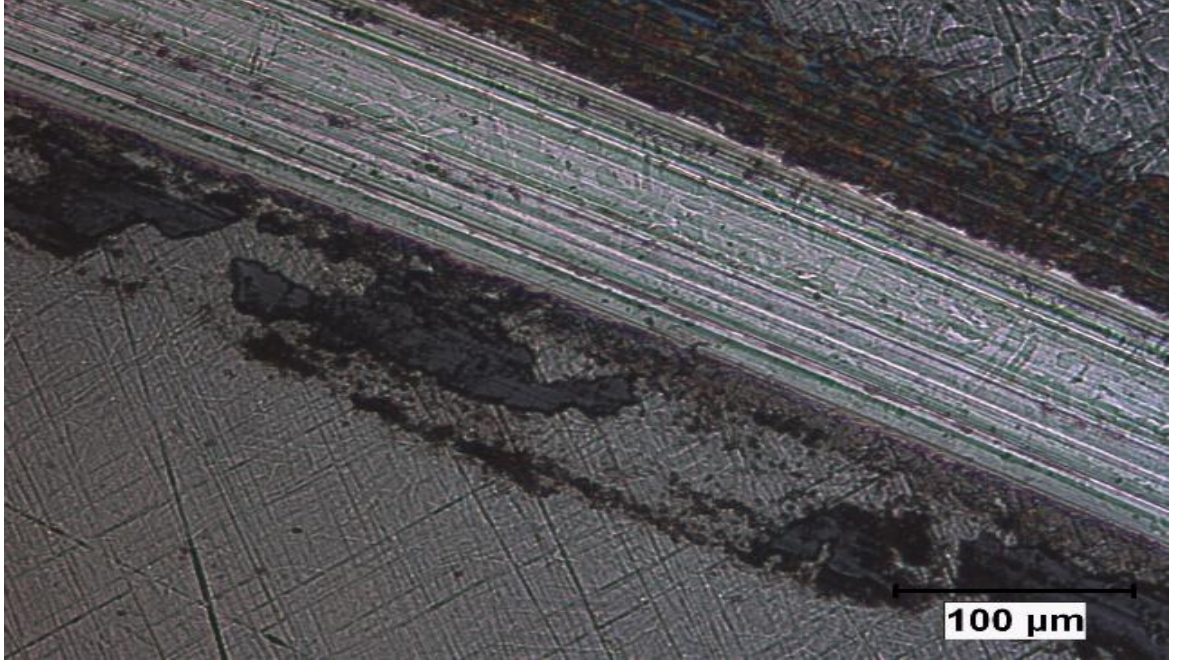


**Şekil 4. 32.** PN450 kodlu numunenin 0.7 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200.

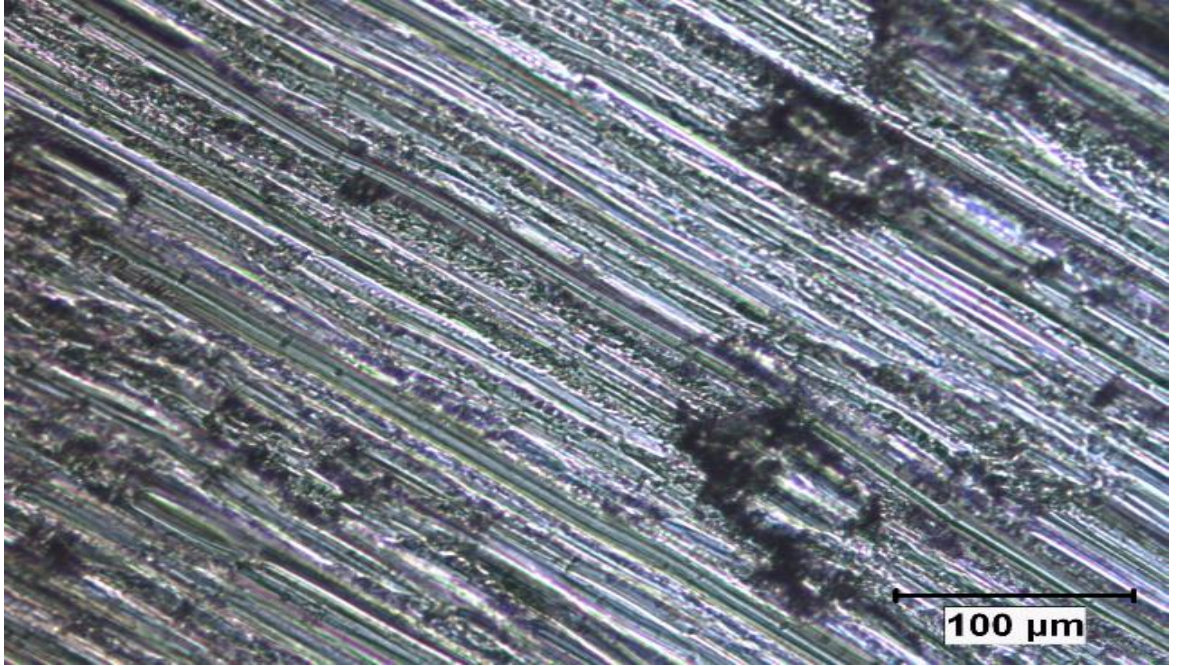


**Şekil 4. 33.** PN450 kodlu numunenin 0.7 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200.





**Şekil 4. 34.** PN450 kodlu numunenin 1 kg yükte 5 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200.



**Şekil 4. 35.** PN450 kodlu numunenin 1 kg yükte 15 mm/s kayma hızında oluşan aşınma optik mikroskop görüntüsü X200

#### 4.4. Korozyon Deneyinin Yorumlanması

Korozyon deneyi öncesinde ve sonrasında Sartorius marka hassas terazi ile tüm deney numunelerin ağırlıkları ölçülmüştür. Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6’da görüldüğü üzere tüm numuneler korozyona uğramış, neredeyse hepsinde korozyon ağırlık kaybı olarak gözlemlenmiştir. Seçilen deney şartlarında BM numunesi 312 saat tutulmasına rağmen numune üzerinde herhangi bir paslanma gözlenmemiştir (Şekil 4.36). Bu husus beklenen bir sonuçtur. Yapılan ölçümlerde herhangi bir ağırlık kaybı gözlenmemiştir. Çünkü, 17-4 PH çeliği paslanmaz çelik olup, bahse konu şartlarda herhangi bir reaksiyon göstermeyeceği bilinmektedir. Seçilen deney şartlarında PN400 ve PN450 numunelerinde 19 saat sonunda paslanma gözlenmiştir (Şekil 4.37 - 4.38). Korozyon deneyleri sonucunda paslanan numuneler tartılmıştır (Çizelge 4.5 - 4.6). Çizelge 4.5 ve 4.6’ya bakıldığında korozyon sonucu en yüksek ağırlık kaybı PN450 numuneleri arasında 0,0055 gram olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte, plazma nitrüleme işleminin malzemenin oyuklu korozyonu üzerinde de etkili olduğu bilinmektedir. Yapılan tuzlu sis deneyleri sonucunda PN400 ve PN450 kodlu numunelerin oyuklu korozyon direnci düştüğü görülmüştür. Şekil 39 ve Şekil 40’ ta numunelerde oluşan oyuklu korozyon örneklerinin genel görünümü verilmiştir.

**Çizelge 4. 5.** PN400 numunelerinin korozyon deneyi öncesinde ve sonrasında alınan ağırlık değerleri

PN400°C 12saat	Numune kodları	İlk ağırlık	Son ağırlık	Fark
	1	7.8094	7.8076	0.0018
	2	8.5573	8.5555	0.0018
	3	7.6947	7.6927	0.0020
	4	8.0777	8.0762	0.0015
	5	7.6307	7.6298	0.0009
	6	7.1279	7.1264	0.0015
	7	7.7001	7.6972	0.0029
	8	7.9601	7.9585	0.0016
	9	7.2935	7.2926	0.0009
	10	7.5868	7.5852	0.0016

**Çizelge 4. 6.** PN450 numunelerinin korozyon deneyi öncesinde ve sonrasında alınan ağırlık değerleri

PN450°C 12saat	Numune kodları	İlk ağırlık	Son ağırlık	Fark
	1	7.8940	7.8920	0.0020
	2	7.8487	7.8468	0.0019
	3	8.4781	8.4774	0.0007
	4	7.9354	7.9341	0.0013
	5	7.6790	7.6790	0.0000
	6	8.3368	8.3313	0.0055
	7	9.1653	9.1636	0.0017
	8	7.7900	7.7885	0.0015
	9	7.5107	7.5086	0.0021
	10	8.3901	8.3893	0.0008



**Şekil 4. 36.** BM korozyon numunelerinin tuz sis testi sonrası genel görünümü





Şekil 4. 37. PN400 korozyon numunelerinin tuzlu sis testi sonrası genel görünümü



Şekil 4. 38. PN450 korozyon numunelerinin tuzlu sis testi sonrası genel görünümü



**Şekil 4. 39.** PN450 korozyon numunelerinin tuzlu sis testi sonrası oluşan oyuklu korozyonun genel görünümü



**Şekil 4. 40.** PN400 korozyon numunelerinin tuzlu sis testi sonrası oluşan oyuklu korozyonun genel görünümü

Esfandiari ve Dong (2007), 17-4 PH çökelme sertleşmeli paslanmaz çelik için 350 °C, 420 °C ve 500 °C ‘de 10 saat süren plazma nitrüleme işlemi yapmışlar. Deney sonucunda malzemenin korozyon ve korozyon aşınma sonuçlarını incelemişlerdir. Bu üç plazma yüzey işlemi malzemenin yüzey sertliğinin önemli derecede arttığını ve aşınma direncini iyileştirdiğini bildirmişlerdir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklarda (420 ve 500 °C) de gerçekleştirilen plazma nitrüleme işleminin oyuklu korozyon direncini önemli derecede arttırırken, düşük sıcaklıkta (350 °C) de gerçekleştirilen plazma nitrüleme işleminin korozyon direncini düşürdüğünü raporlamışlardır. Brühl ve ark. (2010) çalışmalarında plazma nitrüleme işleminin ostenitik paslanmaz çeliklerde aşınma ve korozyon direncini artırırken, martenzitik paslanmaz çeliklerde korozyon direnci konusunda hala bir problem olduğunu bildirmişlerdir. Bu amaçla, yüksek karbon miktarına sahip M 340, N 695 ve Corrax isimli malzemeler üzerinde düşük sıcaklıklarda, plazma nitrüleme işlemi korozyon direncini korumak amacıyla yapmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda, tüm numunelerdeki korozyon direnci kabul edilebilir seviyede olduğu, sadece Corrox’ın iyi korozyon direnci gösterdiği belirtilmiştir. Düşük korozyon direnci sergileme davranışını ise şu şekilde açıklamışlardır. Brühl ve ark. (2010) martenzitik paslanmaz çeliklerde, düşük sıcaklıklarda plazma nitrüleme işlemi gerçekleşse bile, ısıl işlem aşamasında krom karbürler oluştuğunu, nitrüleme işlemi aşamasında ise krom nitrürler oluştuğunu bildirmişlerdir. Oluşan bu yapılardan dolayı düşük Cr içeriğe sahip olan yapının korozyon direnci düşmektedir. Pinedo ve ark. (2016) çalışmalarında, 17-4 PH paslanmaz çeliğine düşük sıcaklıklarda plazma nitrüleme işlemi uygulamışlardır. Yapılan işlem 400°C’de 20 saat boyunca çözeltiye alınan ve çözeltiye alma işleminden sonra yaşlandırılmış iki farklı numune üzerinde yapılmıştır. Çözeltiye alma işlemi ve plazma nitrüleme işleminin düşük sıcaklıklarda gerçekleştirme sebebi olarak CrN çökeltilerinden kaçınmak olduğunu bildirmişlerdir. Plazma nitrüleme işlemi sonucunda oluşan bu nitrür bileşikler paslanmaz malzemelerin korozyon direncini düşürdüğünü ve neden olarakta matriks içerisindeki Cr miktarındaki azalmadan dolayı malzemenin korozyon direncinin düştüğünü raporlamışlardır. Riazi ve Ashrafizadeh ve Eslami (2017) çalışmalarında plazma nitrüleme işleminden sonra yüzeyde bazı nitrür fazları oluştuğunu böylece serbest halde olan krom miktarında azalma meydana geldiğini ve nitrürlenmiş tabakadaki krom içeriğinin azalmasıyla birlikte genel korozyon direnci düştüğünü bildirmektedir. Bu



sonuca benzer olarak, bu çalışmada plazma nitrülenmiş olan numunelerin korozyon direncinin düştüğü yapılan deney sonucunda da açıkça görülmektedir.

## 5. SONUÇ

PH 17-4 paslanmaz çelik numunelere, 400 ve 450 C' de 12 saat boyunca 200 Pa basınç altında ve %75 N<sub>2</sub>/ %25 H<sub>2</sub> gaz karışımı ile birlikte PN işlemi uygulanmıştır. Uygulanan PN işlemi sonrasında malzemenin sertlik, mikroyapı, aşınma ve korozyon davranışları incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

BM kodlu numunenin ortalama sertliği 361.71 HV<sub>1</sub> bulunmuştur. Yapılan PN işlemi sonucunda, en yüksek sertliğe 1130.08 HV<sub>0.025</sub> sahip olan PN450 kodlu numunede elde edilmiştir. PN400 kodlu olan numunenin sertliği 1042.92 HV<sub>0.025</sub> tir.

PN işlemi malzemenin yüzey sertliğini arttırmış, BM numunesine göre yaklaşık üç kat yüzeyde sertlik artışı görülmüştür.

PN450 numunesin de nitrürlenmiş tabaka kalınlığı 49,97 µm olarak ölçülürken, PN400 kodlu numune için nitrürlenme kalınlığı 37,29 µm olarak ölçülmüştür. Sıcaklık artmasıyla azot atomlarının difüze olduğu tabaka kalınlığı da artmıştır.

Aşınma deneyi sonucunda; kayma hızının artması ile BM, PN400 ve PN450 numunelerinin aşınma miktarlarında artış görülmektedir.

BM kodlu numunenin düşük sertliğe sahip olmasından dolayı aşınma direnci oldukça düşüktür. PN450 kodlu numunenin PN işlemi sonrası aşınma direnci artarken, PN400 kodlu numunenin aşınma direnci hem PN450 hem de BM numunesine göre düşmüştür.

Korozyon deneyi sonucunda PN işlemi görmüş PH 17-4 paslanmaz çelik numuneler korozyona uğrayarak paslanmıştır. PN işlemi sonucunda PH 17-4 çeliğinin yüzey bölgesi paslanmazlık özelliğini yitirmiştir.

PN numunelerinin yüzeylerinde yapılan incelemelerde oyuklu korozyon olduğu gözlenmiştir.

PN işlemi görmüş numunelerle aynı şartlarda korozyon deneyine tabi tutulan BM numunelerinin korozyona uğramadığı saptanmıştır.

PN işlem parametrelerinin, malzemelerin sertlik gibi yüzey özelliklerinin yanı sıra aşınma ve korozyon davranışlarını etkileyen en önemli unsur olduğu görülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Agarwal, P. K.** Thermo-chemical surface hardening treatment of steels. , 1–8.
- Akdoğan, A. 2009.** Korozyon 25.02.2009.
- Aran, A. 2004.** Paslanmaz Çelik.  
ASM Handbook Vol.18 2016.
- Bargel&Schulze 1995.** Malzeme Bilgisi II.
- Bensaada, S. et al. 2013.** Phenomenon of corrosion and the industrial safety. *Larhyss Journal*, 7–19.
- Bhushan, B. 2013.** Introduction to tribology, USA, . Retrieved from www.wiley.com.
- Brühl, S. P. et al. 2010.** Corrosion behavior of martensitic and precipitation hardening stainless steels treated by plasma nitriding. *Surface and Coatings Technology*, 204(20):, 3280–3286. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2010.03.036>
- Callister, W. D. 1991.** Materials science and engineering: An introduction (2nd edition). *Materials & Design*. [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(91\)90101-9](https://doi.org/10.1016/0261-3069(91)90101-9)
- Çelik, A. et al. 2002.** Plazma ile termokimyasal yüzey işlemleri. *Mühendis ve Makine Dergisi*, 43(510):, 17–21.
- Czerwinski, F. 2018.** Thermochemical Treatment of Metals. Intech open : Intech open (Vol. 2), 64. <https://doi.org/10.5772/32009>
- Davis, J. R. 2000.** The Effects and Economic Impact of Corrosion. Corrosion Understanding the Basics : Corrosion Understanding the Basics, , 1–21. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(02\)00586-8](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(02)00586-8)
- Esfandiari, M., Dong, H. 2007.** The corrosion and corrosion-wear behaviour of plasma nitrided 17-4PH precipitation hardening stainless steel. *Surface and Coatings Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.06.069>
- Euro Inox 1993.** Design manual for structural stainless steel (first edition) (Vol. 11).
- Grove, B. T. C. et al. 2003.** Investigation on Nitriding with Enphasis in Plasma Nitriding Process, Current, *Technology and Equipment*. Society of Vacuum Coaters, 1(1):, 380–385. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/12/1/304>
- Güllü, E., Yılmaz, T. G. 2018.** Rulmanlı yataklarda etkili olan hertz basınçlarının ve yuvarlanma elemanlarında oluşan deformasyonların analizi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 23(1):, 111–126. <https://doi.org/10.17482/uumfd.417330>
- Günay, H. 1999.** Plazma nitriding behavior of AISI 316 L stainless steel, Dokuz Eylül Üniversitesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir.
- Güven, Ş. Y. et al. 2014.** AISI 4140 Çeliğine Uygulanan İyon Nitrasyon Yüzey Sertleştirme İşleminin Yorulma Dayanımına Etkisi, *SDU Journal of Technical Sciences* : 29-39.
- Hack, H. P. 2010.** Galvanic corrosion. Shreir's Corrosion : Shreir's Corrosion, , 828–856. <https://doi.org/10.1016/B978-044452787-5.00033-0>
- Hsiao, C. N. et al. 2002.** Aging reactions in a 17-4 PH stainless steel. *Materials Chemistry and Physics*, 74(2):, 134–142. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(01\)00460-6](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(01)00460-6)
- İğdil, M. C. 2005.** Düşük Sıcaklıkta Yapılan Plazma Nitrüleme İşleminin 316L Ostenitik Paslanmaz Çeliğinin Malzeme Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- International, A. 1987.** Introduction to Stainless Steel. Journal of Japan Institute of Light Metals : *Journal of Japan Institute of Light Metals* (Vol. 37), , 624–635.

<https://doi.org/10.2464/jilm.37.624>

**International Stainless Steel Forum 2008.** The Salt Spray Test and its Use in Ranking Stainless Steels : The Test And Its Limits. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2013.06.004>

**ISO/TC, T. C. 2013.** Corrosion of metals and alloys, ISO 16539.

**Kahraman, F. et al. 2013.** Investigation of Wear Behaviour Of Plasma Nitrided X40CrMoV5-1., *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(1):, 7–14.

**Karaoğlu, S. et al. 2001.** Investigation of wear behaviour of a plasma nitrided low alloy steel. *DEU Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3(3):, 85–92.

**Kochmanski, P., Nowacki, J. 2008.** Influence of initial heat treatment of 17-4 PH stainless steel on gas nitriding kinetics. *Surface and Coatings Technology*, 202(19):, 4834–4838. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.04.058>

**Kochmański, P., Nowacki, J. 2006.** Activated gas nitriding of 17-4 PH stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 200(22–23 SPEC. ISS.):, 6558–6562. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.11.034>

**Korkmaz, E. E. 2009.** İyon implantasyonu ve plazma nitrüleme yöntemi ile yüzeyi sertleştirilmiş soğuk iş takım çeliklerinin içyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi , Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

**Kovács, D. et al. 2018.** Effects of plasma nitriding on tempered steel. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 426:, 012027. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/426/1/012027>

**Landolt, D. 2013.** Corrosion and surface chemistry of metals (Vol. 45). <https://doi.org/10.5860/choice.45-0897>

**Li, G. jiang et al. 2008.** Microstructure and dry-sliding wear properties of DC plasma nitrided 17-4 PH stainless steel. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 266(9):, 1964–1970. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2008.02.073>

**Liu, R. L., Yan, M. F. 2010.** The microstructure and properties of 17-4 PH martensitic precipitation hardening stainless steel modified by plasma nitrocarburizing. *Surface and Coatings Technology*, 204(14):, 2251–2256. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.12.016>

**Michael, J. S. et al. 2013.** Introduction to Surface Hardening of Steels, Heat Treating. Vol 4A, ASM Handbook, 4:, 390–398. Retrieved from [https://www.asminternational.org/documents/10192/22533690/5344G\\_Sample\\_BuyNow.pdf/96e9ae44-b6a1-420c-abf5-ee32a98280d5](https://www.asminternational.org/documents/10192/22533690/5344G_Sample_BuyNow.pdf/96e9ae44-b6a1-420c-abf5-ee32a98280d5)

**Modern Tribology Handbook 2010.** <https://doi.org/10.1201/9780849377877.ch13>

**Murayama, M. et al. 2007.** Microstructural evolution in a 17-4 PH stainless steel after aging at 400 °C. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30(2):, 345–353. <https://doi.org/10.1007/s11661-999-0323-2>

**Odabaş, C. 2007.** Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı, 13.

**Özbek, A. et al. 2017.** AISI 304 ve AISI 316 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 20(1):, 43–49. <https://doi.org/10.2339/2017.20.1>

**Özdemir, U., Muzaffer, E. 2003.** Plazma (iyon) nitrüleme yöntemi ve malzeme özellikleri üzerindeki etkisi. , *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 1(2):, 41–48.

**Pinedo, C. E. et al. 2016.** Low temperature active screen plasma nitriding of 17–4 PH stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 308:, 189–194.

<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.07.096>

**Profile, S. E. E. 2014.** Occurrences of corrosion : causes and prevention. , (January 2006):, 2–6.

**Riazi, H., Ashrafizadeh, F., Eslami, A. 2017.** Effect of plasma nitriding parameters on corrosion performance of 17-4 PH stainless steel. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 56(3):, 322–331. <https://doi.org/10.1080/00084433.2017.1340542>

**Riazi, H., Ashrafizadeh, F., Hosseini, S. R., Ghomashchi, R. 2017a.** Influence of simultaneous aging and plasma nitriding on fatigue performance of 17-4 PH stainless steel. *Materials Science and Engineering A*, 703(June):, 262–269. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.07.070>

**Riazi, H., Ashrafizadeh, F., Hosseini, S. R., Ghomashchi, R., et al. 2017.** Characterization of simultaneous aged and plasma nitrided 17-4 PH stainless steel. *Materials Characterization*, 133(September):, 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.09.019>

**Şen, M. 2010.** AISI 304 Ostenitik Paslanmaz Çeliklerde Soğuk Şekillendirme Miktarının Korozyon Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

**Şengil, İ. A. 1992.** Korozyon. Korozyon : Korozyon, İstanbul Teknik Üniversitesi: , 106–166.

**Shreir, L. L. 2010.** 1.05 Basic Concepts of Corrosion, *Elsevier B. V.* , 1:, 89–95.

**Silman, H. 2011.** Corrosion and Corrosion Control: *An introduction to corrosion science and engineering* (Vol. 7). <https://doi.org/10.1179/000705972798323134>

**Soncu, M. 2008.** G-X 10 CrNiMoNb 18-10 Ostenitik paslanmaz çeliğin asidik çözeltilerdeki korozyon özelliklerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

**Taylor, B. 2012.** Tutorial on Hertz Contact Stress. *Opti521*, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.athoracsur.2010.06.032>

**Topçu, Ş. 2010.** Farklı Şartlarda Plazma Nitrülenmiş Çeliklerin Aşınma Davranışının Belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

**Türkan, M. 2013.** Kaynaklı ve Kaynaksız Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin Korozif Ortamlardaki Çekme Davranışları. *Yüksek Lisans Tezi*, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli.

**Tutar, M. 2011.** Plazma Nitrülenmiş, PVD Kaplanmış Ve Çift Yüzey İşlemi Uygulanmış Sıcak İş Takım Çeliklerinin Aşınma Davranışlarının Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

**Ufuk, Ö., Erten, M. 2005.** Plazma Nitrüleme Parametrelerinin Değişen Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İstatiksel Analizi. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, Cilt 2(Ocak):, 37–45.

**Uhlig, H. H. E. 2015.** Corrosion Handbook. Corrosion Handbook Online, (iii):, 414–418. <https://doi.org/10.1002/9783527610433>

**Yalçın, H., Koç, T. 1997.** Mühendisler için Korozyon.

**Yang, M. 2012.** Nitriding – Fundamentals, Modeling And Process Optimization. , (April):, 1–134.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Gözde Rabia AKTAŞ  
Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara/1993  
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu  
Lise : Özel Muradiye Fen Lisesi/2011  
Lisans : Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi/2016  
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi/2019

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Bursa Uludağ Üniversitesi/2018-devam ediyor.

İletişim (e-posta) : gozderabia@uludag.edu.tr

Yayınları :

**Aktaş G.R., Erbaş, M.K., Şanver S. , Demir E., Toktaş I. ,Özkan M.T.,** 2016., The Modeling of 3D Tibia Bone Using the CT Images and Printing ,4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science,3-5 Kasım 2016, Antalya

**Erbaş, M.K., Aktaş G.R., Şanver S., Demir E., Toktaş I., Algın O., Oflaz O.,** 2017, Modeling of Brain Vessel from Mr Images and 3D Printing, 2<sup>nd</sup> International Symposium on 3D Printing Technologies,3-4 Nisan 2017, İstanbul

**Aktaş G.R., Emül A., Orhan S.,** 2018, An Artificial Neural Network(ANN) Approach For The Solution of the Transcendental Equation of Longitudinal Vibration,1st International Conference on Advances in Mechanical and Mechatronics Engineering, 8-9 Kasım 2018, Etlik, Ankara

**AKTAŞ, G. R., Emül A., Orhan S.,** 2019. An Artificial Neural Network (Ann) Approach For Solution of the Transcendental Equation Of Longitudinal Vibration. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 24(1):, 161–170. <https://doi.org/10.17482/uumfd.504170>