

**AISI 4140 DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKLERİN  
MODERN YÜZEY İŞLEMLERİ SONRASI  
YORULMA ÇATLAK İLERLEME VE AŞINMA  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**2019  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Mehmet ÖZTÜRK**

**AISI 4140 DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKLERİN MODERN YÜZEY  
İŞLEMLERİ SONRASI YORULMA ÇATLAK İLERLEME VE AŞINMA  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Mehmet ÖZTÜRK**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Ağustos 2019**

Mehmet ÖZTÜRK tarafından hazırlanan “AISI 4140 DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKLERİN MODERN YÜZEY İŞLEMLERİ SONRASI YORULMA ÇATLAK İLERLEME VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Okan ÜNAL

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 26/08/2019

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. M. Sabri GÖK

Üye : Doç. Dr. Okan ÜNAL

Üye : Dr. Öğr. Ü. Ahmet Emrah ERDOĞDU

...../...../2019

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü V.



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

Mehmet ÖZTÜRK

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### AISI 4140 DÜŞÜK ALAŞIMLI ÇELİKLERİN MODERN YÜZEY İŞLEMLERİ SONRASI YORULMA ÇATLAK İLERLEME VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Mehmet ÖZTÜRK

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Okan ÜNAL

Ağustos 2019, 75 sayfa

Bu çalışmada AISI 4140 düşük alaşimli çeliklere farklı tip mekanik ve termal yüzey işlemleri uygulanmıştır. Mekanik yüzey işlemi olarak geleneksel bilyalı dövme (GBD) ve aşırı bilyalı dövme (ABD), termal yüzey işlemi olarak plazma nitrürleme (PN) uygulanmıştır. Mekanik ve termal yüzey işlemleri sonrası malzemenin mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemek amacıyla yorulma çatlak ilerleme, aşınma, XRD, mikrosertlik, yüzey pürüzlülüğü testleri gerçekleştirilmiştir. Yorulma çatlak ilerleme testleri aksel yorulma cihazında gerçekleştirilmiş, ağır çekim (slow motion) kamera ve ekstansometre (COD gauge) ekipmanları kullanılmıştır. Aşınma testleri kuru kayma koşullarında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Yüzey işlemleri sonrası yüzey işlemlerinin etkisini görmek amacıyla numunelerin dik kesit bölgeden optik ve SEM görüntüleri çekilip incelenmiştir. Yapılan incelemelerde tüm yüzey işlemlerinin sertlik değerlerini artırdığı gözlemlenmiştir.

Mekanik yüzey işlemleri GBD ve ABD yorulma çatlak ilerleme parametrelerinde olumlu sonuçlar göstermesi dikkat çekmektedir. Uygulanan mekanik yüzey işlemlerinin malzeme yüzeyinde tane boyutunda değişim gösterdiği, yüzeye uygulanan aşırı plastik deformasyon sonucu mikroyapıda önemli değişimler gösterdiği ve tüm işlemlerin sertlik değerlerinde artışa neden olduğu dikkat çekmektedir.

**Anahtar Sözcükler :** Yorulma çatlak ilerleme, aşınma, geleneksel bilyalı dövme, aşırı bilyalı dövme, plazma nitrüleme

**Bilim Kodu** : 91416



## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF FATIGUE CRACK PROGRESSION AND WEAR BEHAVIOUR OF AISI 4140 LOW ALLOY STEELS AFTER MODERN SURFACE TREATMENT**

**Mehmet ÖZTÜRK**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Doç. Dr. Okan ÜNAL**

**August 2019, 75 pages**

In this study, different types of mechanical and thermal surface treatments were applied to AISI 4140 low alloy steels. Conventional shot peening (CSP) and severe shot peening (SSP) are used as mechanical surface treatment and plasma nitriding (PN) is applied as thermal surface treatment. After mechanical and thermal surface treatments, fatigue crack growth, wear, XRD, microhardness, surface roughness tests were performed to examine the mechanical and tribological properties of the material. Fatigue crack growth tests were performed on axial fatigue device and slowmotion camera and COD gauge equipment were used. Wear tests were performed at room temperature under dry sliding conditions. In order to analysed the effect of surface treatments after the surface treatments, optical and SEM images of the specimens from the vertical cross-sectional region were examined. It was observed that all surface treatments increased the hardness values.

It is important that mechanical surface treatments show positive results in CSP and SSP fatigue crack growth parameters. It is significant that the mechanical surface treatments applied change the grain size on the material surface, show significant changes in the microstructure as a result of severe plastic deformation applied to the surface and all processes cause an increase in the hardness values.

**Key Word** : Fatigue crack growth, wear, conventional shot peening, severe shot peening, plasma nitriding

**Science Code** : 91416



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren Sayın Doç. Dr. Okan ÜNAL Hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Yorulma atlak ilerleme ve aşınma deneylerinin yapılmasında yardımlarını ve yönlendirmelerini esirgemeyen, Arő. Gör. Dr. Fazıl HÜSEM'e teşekkür ederim. Ayrıca bu tezi tamamlamada bize maddi imkan sunan Karabük Üniversitesi Bilimsel Araőtırma Koordinatörlüğü'ne BAP FYL-2019-2051 (2019) numaralı projeye desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımı esirgmeden yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvi
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	4
LİTERATÜR ÖZETİ.....	4
2.1. YÜZEY İŞLEMLERİ.....	4
2.1.1. Mekanik Yüzey İşlemleri .....	4
2.1.1.1. Bilyalı Dövme İşlemi.....	5
2.1.1.2. Aşırı Bilyalı Dövme.....	9
2.1.1.3. Lazerle Dövme.....	10
2.1.1.4. Ultrasonik Nano Kristal Yüzey Modifikasyonu .....	11
2.1.2. Isıl Yüzey İşlemleri.....	12
2.1.2.1. Karbürleme .....	13
2.1.2.2. Alevle Yüzey Sertleştirme .....	13
2.1.2.3. Nitrüleme .....	14
2.1.2.4. Plazma Nitrüleme .....	15
2.2. YORULMA.....	18
2.2.1. Yorulma .....	18
2.2.1.1. Yorulma Çatlak Büyümesi.....	19

	<b><u>Sayfa</u></b>
2.2.1.2. Tekrarlı Gerilmeler ve Gerilme Çeşitleri .....	21
2.2.1.3. Yorulma Çatlak İlerleme Hızı .....	23
2.2.1.4. S-N Eğrisi (Wöhler diyagramı) .....	26
2.3. AŞINMA .....	27
2.3.1. Aşınma .....	27
2.3.2. Aşınma Çeşitleri .....	27
2.3.2.1. Abrazif Aşınma .....	27
2.3.2.2. Adhesif Aşınma .....	28
2.3.2.3. Korozyif Aşınma .....	29
2.3.2.4. Yorulma Aşınması .....	30
BÖLÜM 3 .....	31
DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	31
3.1. MALZEME SEÇİMİ .....	31
3.2. NUMUNE HAZIRLAMA .....	32
3.2.1. Geleneksel bilyalı Dövme (GBD) ve Aşırı Bilyalı Dövme (ABD) İşlemi Parametrelerinin Belirlenmesi .....	33
3.2.2. Plazma Nitürleme (PN) Parametrelerinin Belirlenmesi .....	35
3.3. MİKROYAPI ANALİZLERİ .....	35
3.4. X-İŞİNİ KIRINIM (XRD) ANALİZLERİ .....	36
3.5. MİKROSERTLİK ÖLÇÜMLERİ .....	37
3.6. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMLERİ .....	39
3.7. AŞINMA TESTİ .....	39
3.8. YORULMA ÇATLAK İLERLEME TESTLERİ .....	40
BÖLÜM 4 .....	42
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....	42
4.1. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI .....	42
4.2. MİKROSERTLİK SONUÇLARI .....	50
4.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ SONUÇLARI .....	51
4.4. XRD SONUÇLARI .....	52
4.5. YORULMA ÇATLAK İLERLEME SONUÇLARI .....	53

	<b><u>Sayfa</u></b>
4.5. AŞINMA SONUÇLARI .....	57
BÖLÜM 5 .....	60
SONUÇLAR .....	65
KAYNAKÇA .....	67
ÖZGEÇMİŞ .....	75



## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Küresel yapıda çelik bilyalar.....	6
Şekil 2.2. Bir türbin çarkının bilyalı dövülmesi.....	6
Şekil 2.3. Doyurma oranı ile işlem zamanı arasındaki bağıntı.....	8
Şekil 2.4. Lazerle dövme işleminin gösterimi.....	11
Şekil 2.5. Ultrasonik nano kristal yüzey modifikasyon işleminin şeması.....	12
Şekil 2.6. Alevle yüzey sertleştirme gösterimi.....	13
Şekil 2.7. Plazma nitrüleme ekipmanının şeması.....	16
Şekil 2.8. Yorulma çatlak oluşumu.....	19
Şekil 2.9. Yorulma çatlak yüzeyi.....	19
Şekil 2.10. Aşama 1 ve 2 yorulma çatlak ilerlemesi.....	20
Şekil 2.11. Aşama 1 ve 2 yorulma çatlak ilerlemesi.....	20
Şekil 2.12. Kırılma modları a) Mod I b) Mod II c) Mod III.....	21
Şekil 2.13. Döngüsel gerilme-zaman eğrileri.....	22
Şekil 2.14. Yorulma çatlak büyüme eğrisinin şeması, a) Çatlak uzunluğu, b) Çevrim sayısı.....	24
Şekil 2.15. Gerilme yoğunluk faktörü aralığı $\Delta K$ 'nın logaritmasına karşı yorulma çatlak ilerleme hızı $da/dN$ 'nin logaritmasının şematik gösterimi.....	26
Şekil 2.16. Çelik/Demir dışı malzemelerin gerilme-çevrim sayısı grafiği.....	27
Şekil 2.17. Abrasif aşınma mekanizmaları.....	28
Şekil 2.18. Adhesif sert temastaki deformasyon modeli.....	29
Şekil 2.19. Yorulma ve sürtünme aşınma modeli.....	30
Şekil 3.1. a) Yorulma çatlak ilerleme numunesi b) çatlak detayı.....	32
Şekil 3.2. Aşınma numunesi teknik resmi.....	33
Şekil 3.3. İşlem görmemiş yorulma çatlak ilerleme numunesi.....	33
Şekil 3.4. Geleneksel bilyalı dövülmüş numune.....	34
Şekil 3.5. Aşırı bilyalı dövülmüş numune.....	34
Şekil 3.6. Plazma nitrülenmiş numune.....	35
Şekil 3.7. Mikroskop görüntülerinde incelenen bölge.....	36
Şekil 3.8. XRD cihazı.....	37
Şekil 3.9. Mikro sertlik ölçümlerinin şeması.....	38

## Sayfa

Şekil 3.10. Mikro sertlik cihazı .....	38
Şekil 3.11. Yüzey pürüzlülük test cihazı .....	39
Şekil 3.12. Aşınma cihazı resmi .....	40
Şekil 3.13. Yorulma çatlak ilerleme test düzeneği .....	41
Şekil 3.14. Yorulma çatlak ilerleme testi .....	41
Şekil 4.1. İşlem görmemiş numunenin optik mikroskop görüntüleri a)10x, b)20x.	43
Şekil 4.2. GBD numunenin optik mikroskop görüntüleri a)10x, b)20x.....	43
Şekil 4.3. ABD numunenin optik mikroskop görüntüleri a) 10x, b) 20x.....	43
Şekil 4.4. PN numunenin optik mikroskop görüntüleri a) 10X, b)20X. ....	44
Şekil 4.5. İG numunenin SEM görüntüleri a) 3000X, b)5000X. ....	44
Şekil 4.6. GBD numunenin SEM görüntüleri a) 3000X, b) 5000X. ....	45
Şekil 4.7. GBD numunenin SEM görüntüleri a) 10000X, b) 30000X. ....	45
Şekil 4.8. ABD numunenin SEM görüntüleri a) 3000X, b)5000X. ....	46
Şekil 4.9. ABD numunenin SEM görüntüleri a) 10000X, b) 30000X. ....	46
Şekil 4.10. İG ve ABD numunelerinin SEM görüntüleri (30000X) a) İG, b) ABD. ....	46
Şekil 4.11. PN numunenin SEM görüntüleri a) 3000X, b) 5000X.....	47
Şekil 4.12. PN numunenin SEM görüntüleri a) 10000X, b) 20000X.....	47
Şekil 4.13. GBD numunenin EDAX analizi a) SEM fotoğrafı, b) elemental analiz. ....	48
Şekil 4.14. PN numunenin edax analizi a) SEM fotoğrafı, b) elemental analiz.....	49
Şekil 4.15. Mikrosertlik ölçümleri.....	51
Şekil 4.16. İG, PN, GBD ve ABD numuneleri XRD grafiği.....	53
Şekil 4.17. İG, PN, GBD ve ABD numuneleri çatlak boyu-çevrim sayısı grafiği....	54
Şekil 4.18. Yorulma çatlak ilerleme da/dN-ΔK grafiği.....	55
Şekil 4.19. İG 190.000 çevrimde çatlak boyu. ....	55
Şekil 4.20. GBD 190.000 çevrimde çatlak boyu.....	56
Şekil 4.21. ABD 190.000 çevrimde çatlak boyu.....	56
Şekil 4.22. PN 190.000 çevrimde çatlak boyu. ....	57
Şekil 4.23. 5N yük altında sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (500 m).....	58
Şekil 4.24. 10N yük altında sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (500 m)....	58
Şekil 4.25. 15N yük altında sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (500 m)....	59
Şekil 4.26. Ortalama sürtünme katsayısı-uygulanan yük sütun grafiği (500 m). ....	59
Şekil 4.27. 500m kayma mesafesi için aşınma oranı-uygulanan yük sütun grafiği. .	60

**Sayfa**

Şekil 4.28. a-b) 5N, c-d) 10N, e-f) 15N işlem görmemiş numunenin aşınma izleri SEM görüntüleri.....	61
Şekil 4.29. a-b) 5N, c-d) 10N, e-f) 15N ABD numunenin aşınma izleri SEM görüntüleri.....	62
Şekil 4.30. a-b) 5N, c-d) 10N, e-f) 15N ABD numunenin aşınma izleri SEM görüntüleri.....	63
Şekil 4.31. a-b) 5N, c-d) 10N, e-f) 15N ABD numunenin aşınma izleri SEM görüntüleri.....	64



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 2.1. Almen şeritlerinin standartlaştırılmış özellikleri. ....	9
Çizelge 3.1. AISI 4140 düşük alaşımlı çeliğin kimyasal bileşimi. ....	31
Çizelge 3.2. AISI 4140 düşük alaşımlı çeliğin mekanik özellikleri.....	31
Çizelge 3.3. Gelemlisel bilyalı dövme parametreleri. ....	34
Çizelge 3.4. Aşırı bilyalı dövme parametreleri. ....	34
Çizelge 3.5. Plazma nitrüleme parametreleri.....	35
Çizelge 4.1. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları. ....	52
Çizelge 4.2. İG, ABD ve GBD işlemleri sonrası yarı yükseklikteki pik genişliği değerleri. ....	53

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

C	: karbon
Cr	: krom
Fe	: demir
Mo	: molibden
P	: fosfor
Si	: silisyum
S	: kükürt
N	: azot
Mn	: mangan
N <sub>2</sub>	: nitrojen
H <sub>2</sub>	: hidrojen
HV	: vickers sertliği
HB	: brinell sertliği
$\sigma_{\max}$	: maksimum gerilme
$\sigma_{\min}$	: minimum gerilme
$\sigma_{\text{ort}}$	: ortalama gerilme
$\Delta\sigma$	: gerilme aralığı
$\sigma_a$	: gerilme genliği
$\Delta P$	: yük genliği
R	: gerilme oranı
N	: çevrim sayısı
A	: genlik oranı

## KISALTMALAR

- AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)  
ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)  
GBD : Geleneksel Bilyalı Dövme  
ABD : Aşırı Bilyalı Dövme  
PN : Plazma Nitrürleme  
UNYM : Ultrasonik Nano Kristal Yüzey Modifikasyonu  
LD : Lazerle Dövme  
İG : İşlem görmemiş

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Günümüz endüstrisinde metalik malzemeler arasında en yaygın kullanılan malzemeler çelik alaşımlarıdır. Ulaşım, havacılık endüstrisi, otomotiv, denizcilik ve savunma sanayi gibi ileri imalat sektörlerinde yaygın olarak kullanılan malzemelerin başında çelik alaşımları gelir [1]. Yorulma, aşınma, korozyon dayanımları yüksek olmasından dolayı akslar, dişliler, miller, pistonlar gibi yüksek dinamik yüklere maruz kalan kritik parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. AISI 4140 düşük alaşımlı çelikler otomotiv, havacılık ve imalat sanayi gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılır. AISI 4140 çeliğinin en önemli özelliği mukavemet, tokluk ve süneklik gibi mekanik özellikleri bir arada sunmasıdır [3,4].

Mühendislikte makine elemanlarına etki eden yükler statik ve dinamik yüklerdir. Statik yükler genel olarak inşaat mühendisliğini kapsar. Makine mühendisliğinde makine elemanları daha çok dinamik yüklere maruz kalmaktadır [5]. Bu dinamik zorlanmalar altındaki makine elemanları tekrarlı yükler sonucunda akma gerilmesinin çok altındaki bir değerde hasara uğrarlar. Bu değişken yükler altında malzemede meydana gelen tahribata yorulma adı verilir [6,7]. Makine elemanlarında oluşan hasarların %80'i yorulmadan kaynaklı olduğu varsayılmaktadır [8]. Mühendislik yapılarında yorulma, aşınma, kırılma, korozyon gibi hasarların büyük bir kısmı özellikle malzemelerin yüzeylerinden veya dış katmanlarından kaynaklanmaktadır [9]. Tekrarlı zorlanmalara maruz kalan makine elemanlarında yorulmadan kaynaklı çatlaklar meydana gelmektedir. Oluşan bu çatlakların zaman içinde boyunun artması yapı elemanlarında yıkıcı hasara neden olabilir. Yorulma kaynaklı oluşabilecek çatlakların önceden tespit edilmesi meydana gelecek hasarlara önlem alınması oldukça önemlidir [10]. Araştırmalar sonucunda yorulma kaynaklı oluşan çatlakların çoğu malzemenin yüzeyinde başlamaktadır. Malzeme üzerinde oluşan maksimum kayma gerilmesi neticesinde hareket eden dislokasyonlar,

karakteristik kayma bantlarını oluşturur ve malzeme yüzeyinde mikro girinti çıkıntılara neden olur. Yüzeydeki bu oluşumlar çatlak başlangıcına etki ederler bu durumdan dolayı yorulma kaynaklı çatlaklar genellikle malzemenin yüzeyinde oluşur [11]. Çatlak yayılma aşamasının ömür tahminini iyileştirmek adına birçok çaba gösterilmiştir. Bununla beraber, çatlak ilerleme süreci üzerine yapılan büyük miktarda çalışma ile karşılaştırılma durumunda, çatlak başlangıcı daha az önem görmüştür [12,13].

Aşınma, malzemelerin başka malzemelerle teması sonucunda mekanik etkenlerle yüzey bölgesinden küçük parçacıkların ayrılıp kopması neticesinde meydana gelen mekanik hasarlardır. Aşınma sonucunda malzeme kayıpları ile birlikte iş parçası üzerinde kalıcı hasarlar oluşmaktadır [14,15]. Aşınmanın önceden öngörülmesi ve optimizasyonu birçok mekanik tasarımın önemli bir unsurudur. Yüzey sertleştirme işlemlerinin aşınma üzerine olumlu etkisi birçok çalışma ile desteklenmektedir [16].

Malzemelerin mekanik davranışlarını (aşınma, yorulma, sertlik, korozyon) iyileştirmek adına bazı mekanik ve termal yüzey işlemleri uygulanabilmektedir. Bilyalı dövme (BD), aşırı bilyalı dövme (ABD), plazma nitrürleme (PN) bu yüzey işlemlerinden bazılarıdır. Mekanik yüzey işlemleri, malzemenin yüzeyinde dışardan bir müdahale ile plastik deformasyon oluşturma işlemidir. Malzemenin yüzeyinde yoğunluklu olarak dislokasyonlar oluşmakta ve yüzey topoğrafyası değiştirilmektedir [17].

Bilyalı dövme işlemi, küresel formattaki sert malzemelerin hedef malzemeye belirli parametreler altında bombardımana tutulması işlemidir. Bu işlem neticesinde dövülen malzemenin yüzeyinde aşırı plastik deformasyon oluşmasından dolayı ince taneli yapı meydana gelmektedir. Dövme sonrası malzeme yüzeyinde sert bir tabaka ve malzemenin enine kesitinde artık gerilme oluşmaktadır. Yüzeyde basma gerilmesi formunda oluşan artık gerilme, yorulma çatlak başlangıcı ve çatlak yayılma süresini geciktirerek yorulma mukavemetini arttırmaktadır [18,19]. Yorulma dayanımı ihtiyacı duyulan malzemeler, otomotiv endüstrisinde, uzay, savunma ve havacılık sanayisinde çok yaygın kullanılan malzemelerdir [20].

Plazma nitrüleme yada bir diğer adıyla iyon nitrüleme termokimyasal bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Bu yöntemde malzeme yüzeyinde yada yüzeye çok yakın bir bölgede termokimyasal bir metotla azot difüzyonu gerçekleşir. Malzeme yüzeyine gönderilen atomik azotun difüzyonu için glow deşarj yöntemi kullanılır. Çok düşük basınçlı vakum ortamında plazma hali oluşturmak için yüksek voltajlı elektrik enerjisi kullanılır ve azot atomları malzemeye nüfuz etmesi için hızlandırılır. Azot gazının yada azot içeren bir gaz karışımının yüksek voltajlı doğru akım ile iyonlara ayrıştırması yöntemidir. Bu metotta gaz olarak azot ( $N_2$ ) ya da amonyak gazı ( $NH_3$ ) kullanılmaktadır [21,22]. Plazma nitrüleme malzemenin yorulma dayanımını, aşınma ve korozyon direncini arttırmak için kullanılır. Bu yöntem enerji ve işçilik tasarrufu, nitrid tabakası özelliklerinin iyi tekrarlanabilirliği gibi özelliklerden dolayı endüstriyel yüzey sertleştirme işlemlerinde yaygın olarak kullanılır [23]. Plazma nitrüleme yönteminde elde edilen sertlik profili diğer nitrüleme işlemleriyle benzerlik göstermektedir. Ancak hem yüzeyde hemde yüzeye yakın bölgelerde işlem daha düşük sıcaklıklarda meydana geldiği için daha sert yüzeyler elde edilebilir [24].

Bu çalışmanın amacı, endüstride önemli bir yeri olan AISI 4140 kalite düşük alaşımlı çeliklerin modern yüzey sertleştirme yöntemleriyle yorulma çatlak ilerleme ve aşınma davranışlarını iyileştirmektir. Havacılık, otomotiv, savunma ve uzay sanayisinde kullanılan AISI 4140 düşük alaşımlı çeliğe mekanik yüzey işlemi olarak BD ve ABD işlemleri ve termokimyasal yüzey sertleştirme yöntemi olarak ise PN işlemi uygulanmıştır.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR ÖZETİ

#### 2.1. YÜZEY İŞLEMLERİ

##### 2.1.1. Mekanik Yüzey İşlemleri

Mekanik yüzey işlemlerinin tarihçesi çok eski yıllara dayanmaktadır. Tarihte haçlı seferleri askerlerinin savaş aletlerinin dayanımları mekanik yüzey işlemleri ile iyileştirilirken, yakın geçmişte ise topçu silahlarının yüzeyleri dövülerek mukavemetleri arttırılmıştır [19]. Mekanik yüzey işlemleri malzemenin yüzeylerine dışardan müdahale ederek plastik deformasyon oluşturulması operasyonudur. Mekanik yüzey işlemlerinde yüzey bölgesinde plastik deformasyondan dolayı yoğun bir dislokasyon meydana gelmekte, yüzey topoğrafyası değişiklik göstermektedir [25]. Mekanik yüzey işlemleri, mühendislik endüstrisinde kullanılan malzemelerin yorulma dayanımını arttırmak, korozyon ve aşınma direncini arttırmak, yüzey pürüzlülüğünü iyileştirme ve sertliğin artışı amaçlamaktadır. Mekanik yüzey işlemleri, malzemede kalıcı gerilmeler oluşturup yorulma ömürlerinde olumlu ya da olumsuz sonuçlar ortaya koyabilmektedir. Mekanik yüzey proseslerinde yüzeyde aşınma, yüzeyde pütürlü veya çizgili yapının oluşması, küçük parçacıkların yüzeye gömülmesi gibi istenmeyen olaylardan dolayı yüzey kalitesi düşük olabilmektedir [26].

Mekanik yüzey işlemleri, diğer yüzey işlemlerine kıyasla hızlı, temiz, kolay, düşük maliyetli ve yorulma performans arttırımı bakımından birçok avantaja sahiptir [27].

Günümüzde uygulanmakta olan bazı mekanik yüzey işlemleri şunlardır:

1. Geleneksel Bilyalı Dövme (GBD) (Shot Peening)
2. Aşırı Bilyalı Dövme (ABD) (Severe Shot Peening)
3. Lazerle Dövme (LD) (Laser Shock Peening)
4. Ultrasonik Nano Kristal Yüzey Modifikasyonu (UNYM) (Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification) [28].

#### **2.1.1.1. Bilyalı Dövme İşlemi**

Bilyalı dövme işlemi, küresel formattaki bilyaların belirli parametreler (çarpma açısı, püskürtme basıncı, püskürtme mesafesi, dövme süresi) altında istenilen parça yüzeyine bombardımanı sonrası, yüzey ve yüzeyin altındaki bölgede kalıntı basma gerilmeleri oluşturması temeline dayanmaktadır. Bilyalı dövme işleminin yorulma dayanımına etkisi 1928-1929 yılları arasında General Motors'un Buick Motor bölümündeki kumlama işlemleri sırasında tesadüfen ortaya çıkmıştır. Subap yayları kumlama işleminde temizlenirken bazı iri taneli parçalarla yapılan işlemin yorulma dayanımına olumlu etkisi fark edilmiştir [29].

Ticari anlamda ilk bilyalı dövme işlemi II. Dünya savaşı sırasında J. O. Almen ve J. Staroub tarafından uygulanmaya başlandı. O yıllarda üretilen tank palet pimlerindeki kopmaların sıklığından dolayı bilyalı dövme işlemi uygulandı ve olumlu sonuçlar verdi. İşlemin ekonomik boyutu ve malzeme ömrüne sağladığı bu olumlu katkıdan dolayı ticari manada gelişme gösterdi [18]. Günümüzde bilyalı dövme işlemi yüksek teknoloji gerektiren havacılık endüstrisi ve uzay sanayisindeki uygulama alanı oldukça geniştir. Bilyalı dövme işleminin uygulandığı parçalara örnek olarak dişli çarklar, akslar, helisel yaylar, şaftlar, uçakların iniş takımları, helikopter kanat ve pervaneleri, pistonlar, krank milleri, biyel kolları, subaplar, rotlar vs. gösterilebilir [30].

Bilyalı dövme işleminde kullanılan küresel bilyaların malzemeleri dökme demir, cam, çelik, seramik, kesme tel veya paslanmaz çelik olabilir (Şekil 2.1). Hedef

malzemeyi dövecek küresel bilyaların hızı, kalıcı deformasyon oluşturabilecek hızlarda olup malzemenin yüzeyine püskürtülmelidir [31].



Şekil 2.1. Küresel yapıda çelik bilyalar [32].

Malzemelerde yorulma hasarının nedeni, malzeme yüzeyinde isteyerek oluşturulan veya malzemenin imalatı sürecinden sonra istenmeden kalıntı olarak oluşan çekme gerilmesidir. Oluşan bu zararlı gerilmeler kalıcı baskı gerilmeli bir yüzey ile devredışı bırakılarak malzeme ömründe ciddi bir artış sağlanabilir. Yüksek basınçla fırlatılan bu küresel bilyaların malzeme yüzeyine püskürtülmesiyle baskı gerilmeli katman malzeme yüzeyinde oluşur. Yüzeğe çarpan küresel bilyaların her biri yüzeyde plastif deforme olmuş ince yapılı katmanı oluşturur [18]. Şekil 2.2’de bir türbin çarkının bilyalı dövülmesi esnasında oluşan görüntü görülmektedir.



Şekil 2.2. Bir türbin çarkının bilyalı dövülmesi [33].

Lindemann ve arkadaşları, Ti-Al alaşımlarına ortalama 0.5 mm çapında, küresel zirkonya bazlı seramik bilyeler kullanarak bilyalı dövme işlemi uygulamışlardır. Almen yoğunluğu 0.08 ile 0.61 mm N arasında değişmiştir. Bilyalı dövme işleminden sonra malzemenin yorulma ömründe artış gözlemlenmiştir [34].

Hatamleh, AA2195 alüminyum alaşımlarına bilyalı dövme işlemi uygulayıp, yorulma çatlak ilerleme davranışını incelemiştir. Bilyalı dövme işleminde 0.008 – 0.012 A Almen yoğunluğuna sahip ve %200 doyurma oranına sahip olan, 0.59 mm'lik cam boncuklar kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışma mekanik yüzey işlemlerinin çatlak büyümesinde kilit bir rol oynadığını göstermiştir [35].

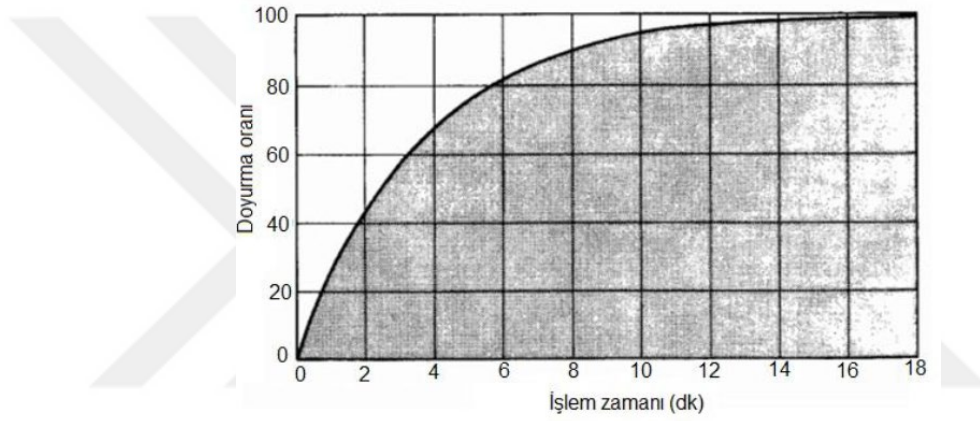
Pant ve arkadaşları, Ti6-Al-4V alaşımına lazerle dövme ve bilyalı dövme işlemleri uygulayarak çatlak büyümesinin davranışlarını incelemiştir. 1 mm bilya çapı ve 0.4 mm Almen yoğunluğunda numuneyi 3-5 saat dövmüşlerdir. Deneysel çalışmaların sonucunda yüzeyde en sert tabaka bilyalı dövme işlemi sonrasında oluşmuştur. Yorulma çatlak ilerleme davranışlarında ise iyileşmelerin olduğu gözlemlenmiştir [36].

Bilyalı dövme işlemi etkileyen önemli parametreler vardır. Bu parametrelerden biri doyurma oranıdır ve bilyalı dövmenin yüzeye etkisinin yoğunluğunu belirleyen bir orandır. Doyurma oranı bilyalı dövme işleminin uygulanacağı yüzeyi hangi oranda dövdüğünü gösteren bir parametredir. Dövme işlemi sonrası yüzey dağılım oranı homojen olmayan ya da yüzeyin her tarafının %100 dövülmediği durumlar sonucunda iş parçasının mekanik özelliklerinde iyileşmeler görülmeyebilir [37]. Makine iş parçasına uygulanan bilyalı dövme işleminde doyurma oranı ile dövme süresi arasındaki bağıntı matematiksel olarak aşağıda ifade edilmiştir (Eşitlik 2.1).

$$C_n = 1 - (1 - C_1)^n \quad (2.1)$$

Bu sayısal bağıntıya göre  $C_1$ , herbir çevrimden sonra yüzde doyurma oranını,  $C_n$  n'inci çevrimden sonra yüzde doyurma oranını ve son olarak n ise yüze bölgesinin yeniden dövülme sayısını göstermektedir [37]. Verilen sayısal ifadeden doyurma oranının %100'e limit olarak yaklaştığı anlaşılmaktadır. %98 doyurma oranı

üzerindeki ölçümleri analiz etmek oldukça zordur. Hassas ölçümlerin %98'e kadar yapılabildiği doyum oranı, %100 doyum oranı olarak kabul edilen bir değerdir. Bu değer altındaki doyum oranı değerleri, yüzeyde dövülmeyen yerlerin olduğu anlamına geleceğinden dövme işleminin tam manasıyla uygulanamadığından dolayı mekanik özelliklere olumsuz etkisi kaçınılmazdır [38]. Doyum oranı değeri bu değer üstünde bir değer ise zamanın arttırıldığını gösterir. Örneğin %150 - %200 gibi doyum oranlarının elde edilebilmesi için dövme işleminin 1.5 ya da 2 kez tekrarlanması manasına gelir [38]. Dövme işlemi zamanı ile doyum oranı arasındaki ilişki Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Doyum oranı ile işlem zamanı arasındaki bağıntı [38].

Doyum oranını doğrudan ölçebilen metotlar, göz ve Straub metotudur. Dolaylı metotlardan biri ise Valentine metodu olup tabaka kaldırmak şartıyla doyum oranı belirlenebilmektedir. Peenscan metodu ise ultraviyole ışıklardan ve boyama işlemlerinden faydalanarak doyum oranı belirlenmektedir. Bahsedilen bu metotlardan doyum oranının belirlenmesi zor olduğundan dolayı Almen eğrisinde dövme işlemi sırasında elde edilen kesişmelerden tespiti en yaygın uygulamadır [37].

Bilyalı dövme işlemi uygulanacak malzemenin dövülmeden önce arzu edilen dövme şiddetini belirtmek için Almen şeritleri kullanılmaktadır. Almen şeritleri standartlaştırılmış ve AISI 1070 yüksek karbonlu çelikten üretilmiş olup sertlik derecesi yaklaşık olarak 45 HRC düzeyindedir. Almen şeritlerinin standartlaştırılmış özellikleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir. Almen şeritleri inceden kalına doğru sırasıyla N, A ve C harfleriyle belirtilir [37].

Çizelge 2.1. Almen şeritlerinin standartlaştırılmış özellikleri.

Şerit Adı	Standart	Düzlemsellik	Sertlik	Kalınlık
C	AMS-S 13165	+/- 0.038 mm	44-50 HRC	2.39 mm
A	SAE J442	+/- 0.025 mm	44-50 HRC	1.29 mm
N	SAE AMS 2432	+/- 0.013 mm	45-58 HRC	0.76 mm

Dövme şiddetlerinin belirlenmesi amacıyla Almen şeritleri rijit bir bloğa bağlanarak bir yüzeyine bilyalı dövme işlemi uygulanmaktadır. Tutucudan çıkartılan şeridin dövülen kısmı dış bükey olacak şekilde yay parçası şekline bürünmekte ve oluşan eğrinin sehim miktarı ölçülmektedir. Bu sayısal değere eğrilik yüksekliği ismi verilmektedir [39]. Dövme şiddeti değeri ölçü aletinde gösterilen eğrilik yüksekliği ile standartlaştırılmıştır. Örneğin A şeridinin bilyalı dövme işlemi uygulandıktan sonra Almen ölçüm cihazında sehim değerinin 0.33 mm olması durumunda bu sehimi oluşturacak Almen dövme şiddeti 33A olarak belirtilmektedir [37].

Ünal ve arkadaşları, Almen yoğunluğunun AISI 1017 düşük karbonlu çelik malzemenin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerinde etkisini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlarda Almen yoğunluğunun sadece mekanik özelliklere değil mikroyapı değişikliklerini de doğrudan etkilediği gözlemlenmiştir [40].

Bilyalı dövme işlemi malzemelerin yorulma dayanımını artırmak maksadıyla kullanılmasına rağmen, metal şekillendirme, güçlendirme ve korozyon direncini arttırma gibi başka alanlarda da uygulanmaktadır [41]. Örnek olarak, sertleştirilmiş uçak kanat panelleri büyük boyutlarda bir malzeme olduğundan dolayı sıcak şekillendirme uygun olamamaktadır. Bu parçaların şekillendirilmesi bilyalı dövme işlemiyle gerçekleştirilmektedir [19]. Bilyalı dövme işlemi dişli çarkların onarımında, millerin güçlendirilmesinde ve bazı bölgelere kavis şekli verilmesinde kullanılmaktadır [42].

#### 2.1.1.2. Aşırı Bilyalı Dövme

Son zamanlarda ultra ince taneli yapılar veya nano kristal yapı oluşumlarına büyük ilgi duyulmuştur. Elde edilecek ultra ince taneli yapıların oluşması için birkaç tane

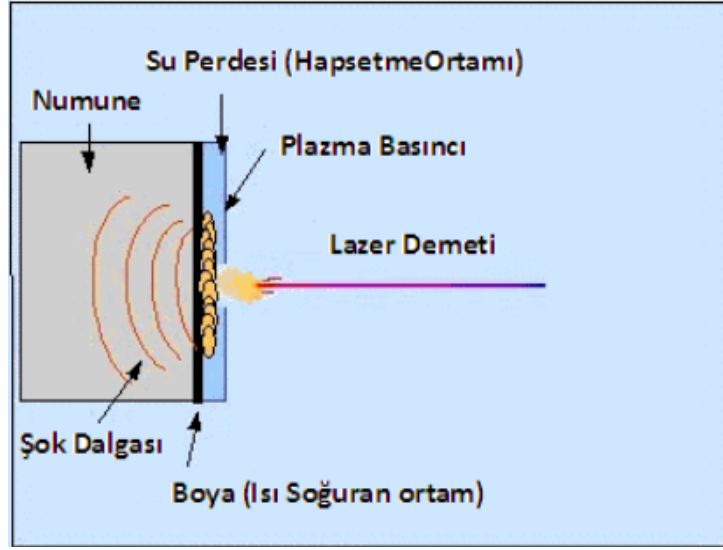
yöntem vardır. Aşırı bilyalı dövme, bu yöntemlerden biridir ve geleneksel bilyalı dövme işleminin almen şiddeti arttırılarak uygulanması işlemidir [40]. Son zamanlardaki çalışmalar, geleneksel bilyalı dövme işlemine göre daha yüksek parametreler kullanılan aşırı bilyalı dövme işleminin, hedef malzeme yüzeyinde nanotaneli yapıların oluşması için kullanıldığını göstermektedir. Bu işlem, ince taneli yapıya sahip malzemelerin yorulma özelliklerini oldukça ilgilendirdiği için, yorulma dayanımında artış göstermesi beklenmektedir [5,43,44].

Bagherifard ve arkadaşları, ferrit-perlit matrisli nodüler dökme demir malzemesi üzerinde yapmış oldukları bir çalışmada, dövme parametrelerini değiştirerek yorulma dayanımında ciddi iyileşmeler gözlemlemişlerdir [45].

Maleki ve arkadaşları, AISI 1045 karbon çeliği malzemesi üzerinde yaptıkları çalışmada aşırı plastik deformasyon işleminin malzeme yüzeyinde sertlik derecesini arttırdığı gözlemlenmiştir [46].

### **2.1.1.3. Lazerle Dövme**

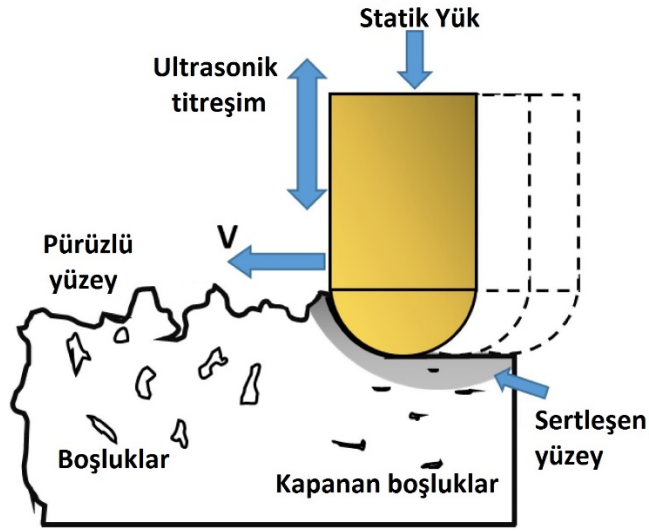
Lazerle dövme işlemi, malzemelerin yüzey bölgesinde basma gerilmesi oluşturma yoluyla mekanik özelliklerini iyileştiren bir yüzey işlemidir. Kalıntı basma gerilmesinin malzeme yüzeyinden daha derin kısımlara ulaşması, yüzeyde korozyon, yorulma, ezilmeli yorulma gibi mekanik hasarların başlamasına engel olmaktadır. Lazerle dövme işlemi, lazer dalgası sonucunda meydana gelen lazer demetlerinin yüzeye gönderilmesi olarak tarif edilmektedir (Şekil 2.4). Etki derinliği milimetre seviyelerine kadar ulaştığından diğer mekanik yüzey işlemlerine göre daha etkili bir yöntemdir [47]. Lazer sistemlerinin azalan maliyetinden dolayı giderek çok daha popüler hale gelmiştir. Ayrıca bilyalı dövme ve benzer tekniklere göre daha iyi bir yüzey pürüzlüğü sunmaktadır. Bazı çalışmalar sonucunda lazerle dövme işleminin yorulma ömrünü 4 kata kadar arttırdığı gözlemlenmiştir [48].



Şekil 2.4. Lazerle dövme işleminin gösterimi [28].

#### 2.1.1.4. Ultrasonik Nano Kristal Yüzey Modifikasyonu

Ultrasonik titreşim enerjisi kullanan ultrasonik nano kristal yüzey modifikasyonu (UNYM), nano yapı bir yüzey üretmek için malzemenin yüzeyine ciddi plastik deformasyon uygulayan bir yöntemdir (Şekil 2.5). UNYM tekniği, malzemelerin üzerinde basma kalıntı gerilme ve yüzey sertliği oluşturduğu için aşınma ve yorulma özelliklerini iyileştirebilir [49]. Ultrasonik nano kristal yüzey modifikasyonu yeni geliştirilmiş tekniklerden biridir. Farklı yüzey modifikasyon teknikleri arasında, bu tekniğin, malzemelerin kimyasal yapısını değiştirmeden, kaba taneli yapılardan nanometre ölçekli yapılar elde edilebildiği gösterilmiştir. Çeşitli metalik malzemelere uygulanan, aşırı plastik deformasyon yöntemiyle mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmekle birlikte işlem görmüş yüzey üzerinde oluklu bir yapı ve arzu edilen sayıda mikro çukurlar elde edilir [50]. Ma ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada, UNYM işleminden sonra yüzey pürüzlülüğünde iyileşme görüldüğü ve yüzey altı bölgede gözeneklerin önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca mikrosertlik ölçümlerinde yüzey sertliğinin arttığı, korozyon direncinin iyileştiği tespit edilmiştir. Yapılan aşınma testlerinde, UNYM işleminden sonra aşınan bölgenin hacminde azalma görülmüştür [51].



Şekil 2.5. Ultrasonik nano kristal yüzey modifikasyon işleminin şeması [51].

### 2.1.2. Isıl Yüzey İşlemleri

Yüzey sertleştirme metotlarının büyük bir kısmı ısı ile gerçekleştirilmektedir. Isıl işlem, malzemenin belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılması, ısıtıldıktan sonra aynı sıcaklıkta bir süre bekletilmesi ve belirli bir yöntemle uygun olarak sıcaklığın oda sıcaklığına kadar düşürülmesi olarak 3 aşamada gerçekleşir [24].

Günümüzde kullanılan bazı kritik makine elemanlarının maruz kaldıkları yükler sebebiyle aşınmaya karşı dirence, sert bir yüzey tabakasına ve önemli ölçüde tokluğa sahip olması gerekir. Bu özelliklerin olması ısıl işlem görmüş bir malzemede olması mümkün olmayabilir. Örnek olarak yüzeyin çok sert bir yapıda olması için yapılan bir işlem sonucunda malzemenin kırılgan olması veya tokluk özelliklerini arttırmak üzere yapılan bir işlemde sertlik derecesinin düşük olması gibi sonuçlar ortaya çıkacaktır. Bu kombinasyonları oluşturmak amacıyla yüzey sertleştirme işlemleri geliştirilmiştir. Özellikle icra ettikleri görev itibarıyla bazı parçaların yüzeylerinin fazla aşınmasından dolayı, aşınmaya karşı direnci arttırmak amacıyla bu yüzey işlemleri uygulanmaktadır. [19]. Sonuç olarak yüzey sertleştirme işlemi, parçanın yüzeyden iç kısma doğru belirli derinliğe kadar sertleştirilip, kalan kısımların orjinal sertlikte kalması işlemidir. Özellikle sürtünmenin önemli bir faktör olduğu dişli çarklar, burulmaya çalışan miller bu yöntemlerle sertleştirilir [52].

Günümüzde endüstrisinde yüzey sertleştirmede kullanılan temel yöntemler şunlardır:

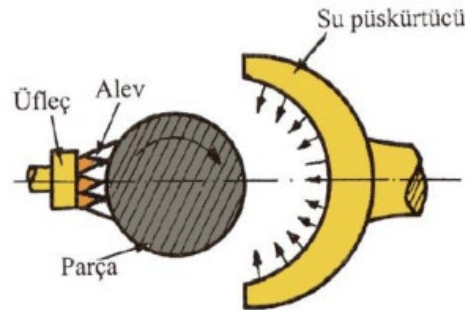
1. Karbürleme (Sementasyon)
2. Alevle veya indüksiyonla sertleştirme
3. Nitrüleme (Nitrasyon)
4. Plazma Nitrüleme

#### 2.1.2.1. Karbürleme

Karbürleme demir esaslı malzemelerin yüzey bölgesine karbon difüze edilmesi işlemidir. Karbürlenen makine parçaları sertleştirme işleminden sonra yüzeyde sert bir tabaka, parçanın iç kısımlarında ise tok bir yapı oluşmaktadır. Bu kombinasyon, özellikle dişli çarkların yorulmadan kaynaklı kırılma hasarlarının tekrarlanması ve sürtünmeden dolayı aşınan makine elemanları için arzu edilen bir özelliktir [53].

#### 2.1.2.2. Alevle Yüzey Sertleştirme

Alevle yüzey sertleştirme işlemi, gaz üfleçleri vasıtasıyla sertleştirilmesi arzu edilen yüzeyin ısıtılması ve uygun soğutma şartlarında ani soğutma uygulamasıdır (Şekil 2.6). Bu işlemde yanıcı gaz olarak genellikle asetilen ve likit petrol gazı (LPG), bunlar dışında hava gazı, doğalgaz, metan ve propan gibi gazlar, yakıcı olarak ise oksijen kullanılmaktadır. Böylece malzemeye ısıtma işlemi uygulanır. Soğutma işleminde ise çoğu kez su, tuz çözeltisi ve hava ile soğutma işlemi yapılır [54].



Şekil 2.6. Alevle yüzey sertleştirme gösterimi [54].

Alevle yüzey sertleştirme işlemi, büyük ölçekli malzemelere rahatça uygulanabildiğinden, belirli parametreler altında ekonomik olmasından, malzeme yüzeyinde pürüzlü bir yüzey oluşmamasından ve diğer şekil bozukluklarına sebep olmadığından dolayı avantajlı bir yüzey sertleştirme yöntemidir [54].

### 2.1.2.3. Nitrürleme

Nitrürleme, mühendislik uygulamalarında değişik kullanım alanı olan bir yüzey sertleştirme metotudur. Eğilme ve burulma gibi mekanik olaylarda en yüksek gerilmelere maruz kalan bölge malzemenin yüzeyidir. Malzemelerin yüzeyi ayrıca sürtünmeden ve kimyasal olaylardan etkilenen bölgedir. Yüzey sertleştirme yöntemlerinin amacı, malzemenin yüzeyinde oluşabilecek bir hasarı önceden engellemek yada geciktirmek için yüzey özelliklerini iyileştirmektir. Bu işlem neticesinde malzemenin yüzeyinde sert bir tabaka oluşur ve aşınma, korozyon, yorulma gibi mekanik hasarlara karşı direnci artarken, çekirdek kısmında bir değişim olmadığından malzemenin sünekliği korunur [55].

20. yüzyılın başlarında karbürleme işleminin distorsiyon problemine yol açtığı fark edilerek yapılan bazı deneyler sonucunda azotun demir içerisinde yüksek çözünürlüğe sahip olduğu fark edilmiştir. Çelik malzemeyi çok yüksek sıcaklıklara çıkarmadan ve ani bir soğutmaya ihtiyaç duyulmadan, azotun çeliğe difüzyonu sonucunda yüzey sertleşmiş ve korozyon direnci artmıştır. Azotun atom çapının karbondan daha küçük boyutlarda olması, demir kafesine difüzyonunu kolaylaştırmaktadır. Nitrürleme işleminin yaygın olmasındaki en önemli parametreler, malzeme çekirdeğinin sertlik yapısının etkilenmemesi, alternatif yüzey sertleştirme işlemlerinden daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi, işlem değişkenlerinin kontrol edilebilir olması ve çarpılmanın az olmasıdır [55].

Nitrürasyon ile yüzey sertleştirme işleminin çelik malzeme üzerinde olumlu etkileri gözlemlenmiştir. Aşınma dayanımının artması, yüksek yüzey sertliği, yüksek yorulma dayanımı ve düşük yorulma çentik duyarlılığı, paslanmaz olmayan çelik malzemeler için iyi bir korozyon direnci bu etkilerden bazılarıdır. Yüksek sertlik derecesine ulaşılma sıcaklığı alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerde 590 °C altında

mümkün olabilir ancak sıcaklığın düşük olması difüzyonu yavaşlatır. Yüksek sıcaklıklarda aynı süre için daha fazla sert bir tabaka elde edilebilir ancak uzun işlem sürelerinde sertlik değerinde azalma meydana gelir [24].

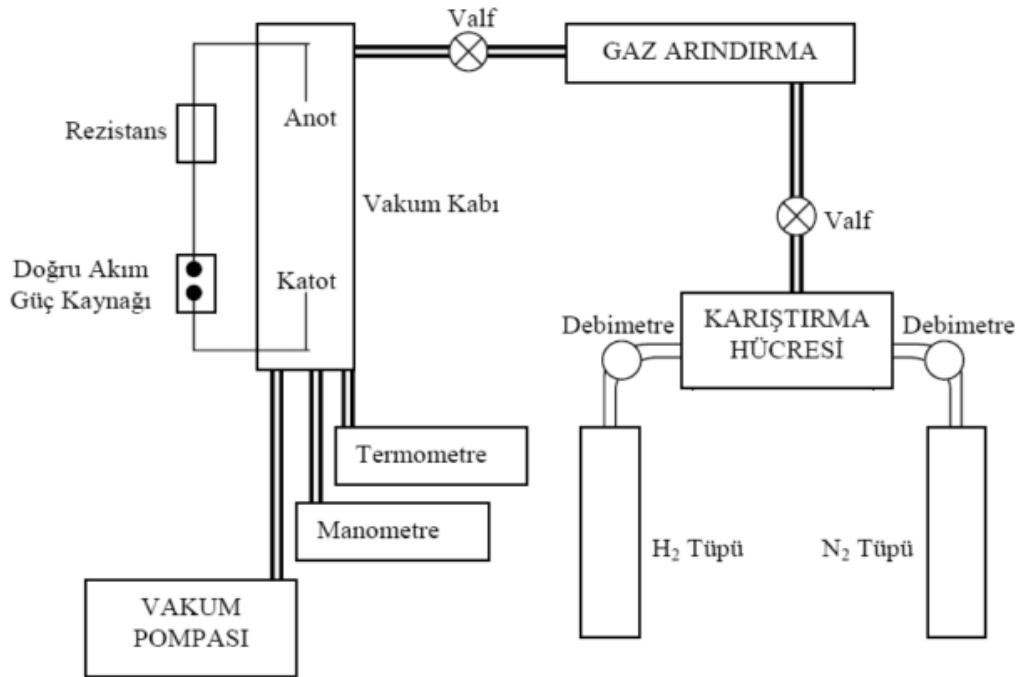
#### **2.1.2.4. Plazma Nitrürleme**

Plazma nitrürleme teknolojisi, Almanya’da, İsviçreli bir mühendis olan Bernard Berghaus tarafından keşfedildi. Ancak bu yöntemin endüstri uygulamalarına geçişi 1967’de gerçekleşti. 1973 yılında Japonya’da geliştirilen bu teknoloji, azot içeren gaza yüksek gerilimli doğru akım verilerek azotun iyonlarına ayrıştırılması ile gerçekleşen termokimyasal bir yüzey işlemdir [56].

Plazma nitrürleme işlemi başta demir esaslı malzemeler olmak üzere titanyum, nikel ve kobalt gibi demir esaslı olmayan metal alaşımlarına da uygulanmaktadır. Fakat bazı malzemelerin (bakır, nikel, kobalt) nitrürasyonu çok zor olduğu için bu malzemelerin plazma nitrürlenmesi çelik malzemelere göre daha az çalışılmıştır. Plazma nitrürleme işlemi, azotun nikel içerisinde çözünme durumu olmadığından ve stabil bir nitrür fazı mevcut olmadığından saf nikel malzemeye uygulanmaz. Plazma nitrürleme, çelik malzeme ferritik yapıda iken uygulanan işlem bir yüzey sertleştirme ısı işlemi olmasından dolayı, östenit fazı yapısına geçmek için herhangi bir ısıtma işlemine ve martenzit yapısı oluşturmak için ani bir soğutma işlemine ihtiyaç duyulmaz. Bu işlem, içerisinde azot içeren gaz karışımının yaklaşık 1-10 mbar (vakum) altında ve 400 – 800 V arasında uygulanan voltajın altında iki kutup arasında iyonize meydana gelmesiyle gerçekleştirilmektedir. Azot gazının iyonizasyonu ile serbest kalan elektron anot kutbuna gitmekte, elektron kaybından dolayı pozitif hale gelen azot atomu ise katot halindeki malzemeye hızla çarpılmaktadır. Bu esnada anot ve katot olarak pozisyonlandırılan malzeme arasında parıltılı bir boşalım (glow discharge) meydana gelmektedir. İyonlar bombardıman edilirken kinetik enerjilerini yüzeye aktarırlar ve malzeme yüzeyinde ısı artışı olur. Gaz karışımından birinin soygaz olması malzeme yüzeyinin işlem öncesi temizlenmesini sağlamaktadır. Metal malzemelerde yüzey sertleştirme işlemi yabancı atomların yüzeye difüzyonu sağlanarak yüzeyde ince bir tabaka oluşturulması amaçlanmaktadır. Malzemenin şekli önemsizin yüzeyin her yerinde

sert tabakanın olması için azot bombardımanının homojen olması gerekmektedir [6,57,58]. Plazma nitrüleme işlemi sonrasında oluşan yapının tribolojik özellikleri ve mikroyapısı incelendiğinde, nitrüleme işleminin bazı parametrelere bağlı olduğu görülmektedir. Nitrüleme sıcaklığı, nitrüleme süresi, gaz karışım oranı ve işlem gören malzemenin cinsi en önemli değişkenlerdir [6].

Plazma nitrüleme işlemi özel hazırlanmış vakum fırınlarda, elektrik akımı aracılığıyla işlem gazlarının iyonlaştırılarak malzemeye yönlendirilmesi ile gerçekleştirilir. Şekil 2.7’de plazma nitrüleme ekipmanının şematik gösterimi görülmektedir. Bu işlem sıcaklığı malzemenin türüne, önceden görmüş olduğu ısıl işlemlere ve istenilen yüzey parametrelerine göre 350–580°C arasında olabilir. İşlem süresi ise arzu edilen özelliklere bağlı olarak 15 dakika ile 120 saat kadar sürebilir. Plazma nitrüleme işlemi gören yüzeylerdeki sertlik yapısı diğer nitrüleme işlemleri ile yapı olarak benzerdir. Plazma nitrülemede gerek yüzey gerek yüzeye yakın bölgede daha düşük sıcaklıklarda nitrüleme işlemi yapıldığından dolayı daha yüksek yüzey sertlik yapısı elde edilebilir. İşlemin daha düşük sıcaklıklarda olması malzemede deformasyon ve ölçü değişimi gibi istenmeyen durumlar en az seviyededir [59].



Şekil 2.7. Plazma nitrüleme ekipmanının şeması [24].

Gavgalı ve arkadaşları, AISI 8620 çeliğini 520 °C sıcaklıklarda 1s, 4s ve 8s süre ile %50 N<sub>2</sub> + %50 H<sub>2</sub> gaz karışımında 5 mbar basınç ortamında iyon nitrüleme işlemine tabi tutmuşlardır. Elde edilen sonuçlara göre 4h süre ile nitrüleme işleminde sert beyaz tabakanın optimum olduğu ve diğer parametrelere göre daha iyi bir korozyon direncine sahip olduğu görülmektedir [60].

Güven ve arkadaşları, AISI 4140 çeliğine iyon nitrasyon yüzey sertleştirme işlemi uygulayıp, yorulma dayanımına etkisini incelemiştir. Numunelere 450 °C'de 18 saat ve 19.5 saat plazma nitrüleme işlemi uygulanmıştır. İşlem görmemiş numunenin sertlik değeri 221 HV iken, 18 saat nitrüleme işleminden sonra sertlik değeri 522 HV, 19.5 saat iyon nitrüleme işleminde 557 HV sertlik değerlerine ulaşılmıştır. Yorulma deneylerinde ise 18 saat ile 19.5 saat arasında pek bir fark olmadığı, ancak işlem görmemiş numuneye göre yorulma dayanımının arttığı gözlemlenmiştir [56].

Karakan, AISI 8620 çeliğinden hazırlanan numunelere 10 mbar basınçta 2 saat süreyle 450 ve 550 °C sıcaklıklarda, azot, hidrojen ve argon karışımlarda iyon nitrüleme işlemi uygulamıştır. İşlem sonrası yüzey sertliği, beyaz tabaka kalınlığı, difüzyon tabakasının mikrosertlik cihazında analizi ve optik mikroskop analizleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre nitrürasyon işleminin optimum atmosferi azot-hidrojen gaz karışımının, özellikle hidrojen oranının %60-80'lerde olduğu karışımlarda sağlanmıştır.

Plazma Nitrüleme işleminin avantajları:

1. Sertleşme kalınlığının hassas kontrolü,
2. İstenmeyen beyaz tabaka kalınlığının kontrolü,
3. İşlem sıcaklığını düşürmek suretiyle distorsiyonların azaltılması ve çekirdek yapısının değişmemesi,
4. İşlem sonrasında yüzey kalitesi değişiminin az olması,
5. Metal maskeler kullanılarak lokal sertleştirmelerin muhtemel olması [61].

## 2.2. YORULMA

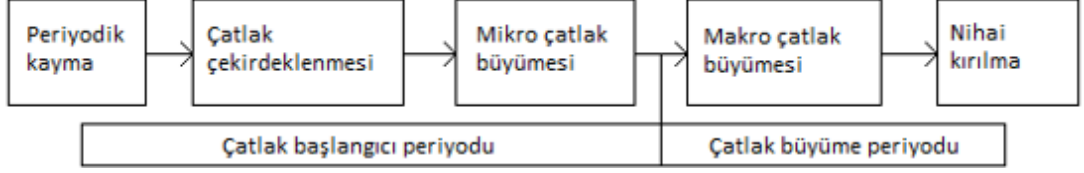
### 2.2.1. Malzemelerde Yorulma

Makine elemanları görevlerini icra ederken değişken yüklere bağlı olarak oluşan gerilmeler altında çalışır. Makine elemanlarına etki eden kuvvetler statik olsa bile malzeme kesitinde oluşan gerilmeler tam değişken olabilir. Oluşan gerilmeler malzemenin yüzeysel etkenlerinden veya içyapı hasarlarına bağlı olarak kesitte kusurların oluşmasına neden olur. Malzemelerin statik yüklemelerde dayanabileceği maksimum gerilmenin altında, tekrarlı yükler sonucunda oluşan gerilmeler nedeniyle hasara uğramasına yorulma denir [62,63].

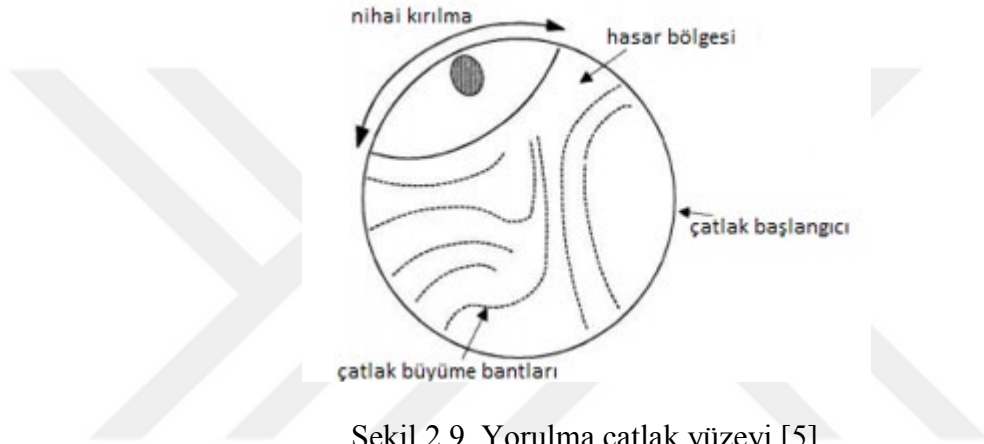
19. Yüzyılın ortalarında, tekrarlanan yüklemelere maruz kalan köprüler ve demiryollarında hasarlar gözlemlendi. Yüklemeler statik olarak hasar oluşturmayacak düzeyde olduğundan, hasarların tekrarlı yükleme sonucu oluştuğu kısa sürede anlaşıldı. Oluşan hasarlar tekrarlanan yüklemelerin neden olduğuna bir kırılma olayı olarak görülen metal yorgunluğu olarak tanımlandı [64]. 1852-1870 yılları arasında laboratuvar ortamında sistemli birçok deneysel çalışmalar yapan Alman mühendis August WÖHLER, elde ettiği verileri bir diyagramla yorumlamış ve bu diyagrama da kendi adını vermiştir [65].

Yorulma hasarları, mikro çatlakların oluşumuyla ve daha sonra bu çatlakların birleşmesiyle devam eden, yeterli dalgalanmalar sonucunda ise kırılma ile sonlanan bir hasar çeşididir (Şekil 2.8). ASTM E-206-72'ye göre yorulma tanımı, tekrarlı gerilmelere ve uzamalara maruz kalan malzemelerde, belirli bir tekrar sayısından sonra çatlakların büyümesine ve sonucunda da kırılmaya neden olan kalıcı hasarlardır. Yorulma hasarları yüzeyde başlayan mikro çatlaklar olmasından dolayı yüzey pürüzlülüğü ve dayanımı yorulma ömrünü etkileyen önemli unsurlardır (Şekil 2.9). Dinamik yükler altında yorulma hasarının oluşması belirli bir süreye bağlı olduğundan dolayı, bu zaman faktörü malzemenin cinsine, yüzey kalitesine, maruz kaldığı yükün büyüklüğüne ve frekansına bağlıdır. Yüzeyde meydana gelen çatlaklar mikro boyutta iken tespit edilip önlemler alınması, oluşacak çok daha büyük ve kalıcı hasarların önüne geçmek için önemlidir. Malzeme yüzeyinde yeteri kadar sert

yapının olmaması, kötü bir yüzey kalitesi ve korozyon gibi yüzeyi olumsuz etkileyecek faktörler yorulma riskini arttırmaktadır [8,66,67].



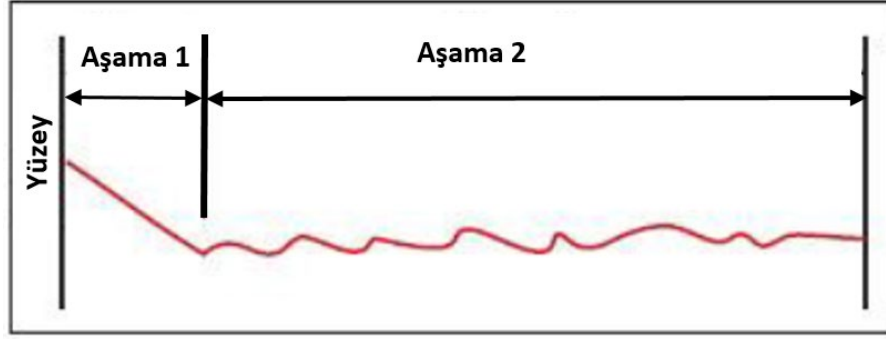
Şekil 2.8. Yorulma çatlak oluşumu [5].



Şekil 2.9. Yorulma çatlak yüzeyi [5].

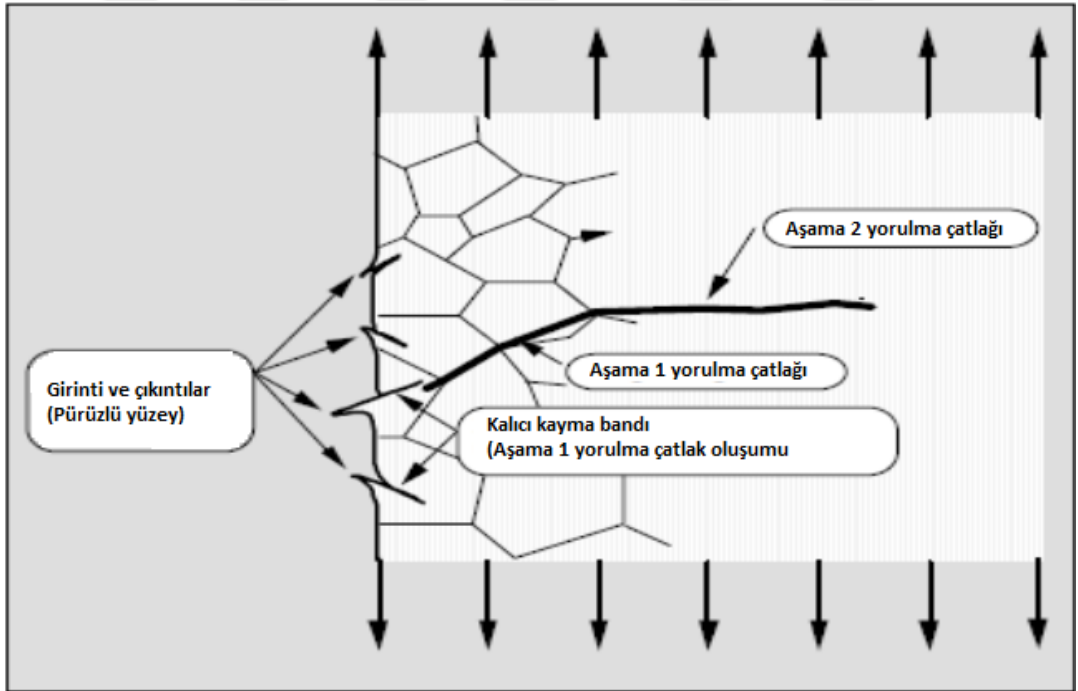
### 2.2.1.1. Yorulma Çatlak Büyümesi

Yorulma kırılması işlemi çatlak başlangıcı, çatlak yayılması ve nihai kırılma olarak 3 aşamada gerçekleşir. İlk olarak yorulma numunesinde bir çatlak başlatılır. Yüzeydeki yüksek kayma gerilmesi altındaki düzlemler 1. aşamada çatlak başlangıcına neden olur. Bu aşamada çatlak büyüme hızı döngü başına angstromlar seviyesindedir. İlk çatlak belirli uzunluğa ulaştıktan sonra aşama 2 gerçekleşir ve çatlak numune boyunca yavaşça yayılır (Şekil 2.10). Aşama 2’de çatlak büyüme hızı döngü başına mikron seviyelerine ulaşır ve nispeten yüksek bir hızdır. Son olarak belirgin kesit yeterince azalınca son yük çevriminde statik bir hasar meydana gelir. Yorulma çatlakları genellikle serbest bir yüzeyde ya da keskin bir köşe veya çentik gibi yüksek gerilme konsantrasyonlu bölgelerde başlatılır [64].



Şekil 2.10. Aşama 1 ve 2 yorulma çatlak ilerlemesi [64].

Çatlak başlangıcının gerçekleştiği aşama 1, genellikle kırılma yüzeyinin sadece küçük bir kısmına uzanır, ancak çekirdeklenme işlemi yavaş ise bu işlem birçok yükleme döngüsü gerektirebilir. Genellikle aşama 1 çatlakları, xy düzleminde yükleme yönüne göre 45°'lik bir açı alır. Hasar görmemiş malzemeler için yorulma çatlaklarının çekirdeklenmesi için kayma bantı girintilerinin ve çıkıntılarının oluşmasıyla gerçekleşmesi ileri sürülmüştür [64].

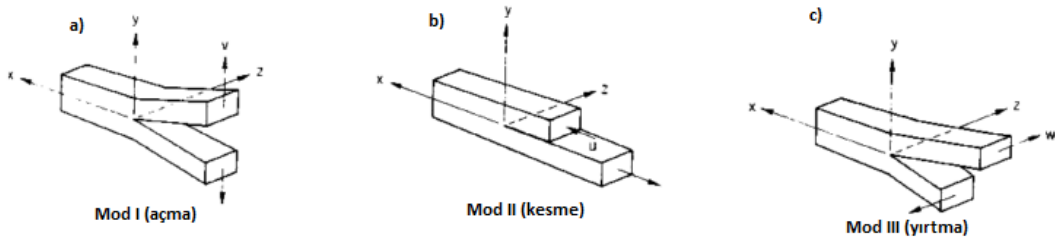


Şekil 2.11. Aşama 1 ve 2 yorulma çatlak ilerlemesi [8].

Hasar görmemiş malzemenin çekirdeklenme süreci Şekil 2.11'de kayma bantları (ekstrüzyon ve instrüzyon) mekanizması ile açıklanabilir. Dislokasyonların hareketi

sonucunda taneler içinde tek tek kayma bantları oluşur. Kayma bantları genellikle ilk birkaç bin gerilme döngüsünde oluşmaktadır. Gerilme düşük olduğunda yalnızca bazı taneler birkaç tane kayma bandı oluşturur ancak gerilme yüksek olduğunda plastik deformasyon birçok tanede oluşur ve çok miktarda kayma bandı oluşur. Döngüsel yüklemeler başladığında, kayma bantları üzerinde ileri geri bir hareket oluşur ve kalıcı kayma bandı boyunca yorulma çatlak meydana gelir [8].

Çatlakların malzeme üzerinde hareketi sonucunda kesit alanı azalır, döngüsel yüklemelerde uygulanan kuvvet gerilme mukavemet sınırını aşarak sünek veya gevrek kırılmalara neden olur [5]. Malzeme üzerine etki eden 3 yükleme modu Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Bu yükleme tipleri, açma, kayma ve yırtma tipi yükleme modları olup, aynı zamanda sırasıyla mod I, mod II ve mod III olarak bilinmektedir.



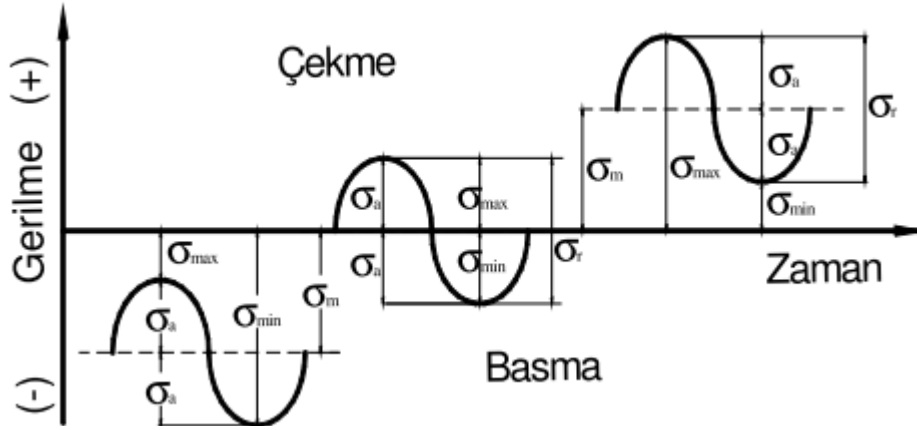
Şekil 2.12. Kırılma modları a) Mod I, b) Mod II, c) Mod III [64].

Mod I’de malzemenin y yönündeki çekme kuvvetlerine maruz bırakıldığı durumda çatlak yüzeylerinin aynı doğrultuda çekildiği durumu göstermektedir. Mod II’de malzeme çatlak yüzeylerine paralel doğrultuda kesme kuvvetlerine maruz bırakıldığında, çatlak yüzeylerinin x eksenine doğrultusunda birbirini üzerinde kaydığını gösterir. Mod III’de malzeme z eksenine doğrultusunda kesme kuvveti ile yüklenir ve çatlak yüzeyleri yükleme yönünde birbirinin üzerinde kaydığını gösterir [68].

### 2.2.1.2. Tekrarlı Gerilmeler ve Gerilme Çeşitleri

Mühendislik elemanlarına belirli zaman aralığı ve belirli süre değişkenlerine göre uygulanan yüklere tekrarlı yükler ve bu oluşan gerilmelere de tekrarlı gerilmeler adı verilir. Örnek verilecek olursa motor şaftları, demiryolu rayları, otomobil aksları, dişliler gibi dinamik yüklemelere maruz kalan kritik parçalar tekrarlı yüklemeler

altında çalışırlar. Yorulma olayına neden olan başlıca sebepler bu tekrarlı yüklemeler ve gerilmelerdir [66]. Döngüsel yüklemeler altında gerilimin maksimum ve minimum değerinin basma veya çekme olmasına göre üç farklı çevrim bölgesi olduğu Şekil 2.13'te gösterilmiştir. Uygulanan kuvvetin negatif değerden başka bir negatif değere geçtiği bölgeye negatif tekrar bölgesi ya da basma tekrar bölgesi adı verilir. Gerilmenin çekme ile basma değerleri arasındaki değişime alternatif bölge denir ve ikinci bölgedir. Üçüncü bölgede ise gerilme değişkeni pozitif değerden başka bir pozitif değere değişkenlik gösterir ve bu bölgeye de pozitif tekrar bölgesi ya da çekme tekrar bölgesi adı verilir [66].



Şekil 2.13. Döngüsel gerilme-zaman eğrileri [66].

Maksimum gerilme ( $\sigma_{max}$ ), Uygulanan gerilme parametreleri arasında en yüksek şiddete sahip olan gerilme değeridir. Minimum gerilme ( $\sigma_{min}$ ), uygulanan gerilmeler arasında şiddeti en küçük değer olan gerilme çeşididir. Ortalama gerilme ( $\sigma_{ort}$ ) ise maksimum ve minimum gerilmelerinin matematiksel değerleri toplamının yarısına eşittir (Eşitlik 2.2). Yorulma-çevrim grafiklerinde S ile ifade edilir [10].

$$\sigma_{ort} = \frac{\sigma_{maks} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.2)$$

Gerilme aralığı ( $\Delta\sigma$ ), maksimum gerilme değeri ile minimum gerilme değeri arasındaki matematiksel farka eşittir (Eşitlik 2.3).

$$\Delta\sigma = \sigma_{maks} - \sigma_{min} \quad (2.3)$$

Gerilme genliği ( $\sigma_a$ ), gerilme aralığı olarak adlandırdığımız maksimum ve minimum gerilmelerin farkının yarısına eşittir (Eşitlik 2.4).

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{maks} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.4)$$

Bu denklemlerden yola çıkarak bütün denklemler yeniden düzenlenirse Eşitlik 2.5 ve Eşitlik 2.6'da gösterilen denklemler elde edilir.

$$\sigma_{maks} = \sigma_{ort} + \sigma_a \quad (2.5)$$

$$\sigma_{min} = \sigma_{ort} - \sigma_a \quad (2.6)$$

Yorulma çevrim sayısı (N), malzemenin kopuncaya kadar uygulanan yüklerin toplam çevrim değeridir. 10'un katları ile ifade edilir.

Gerilme oranı (R), yorulma deneylerinde kullanılır ve bir döngüdeki en düşük gerilmenin en yüksek gerilmeye oranı ile ifade edilir (Eşitlik 2.7).

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{maks}} \quad (2.7)$$

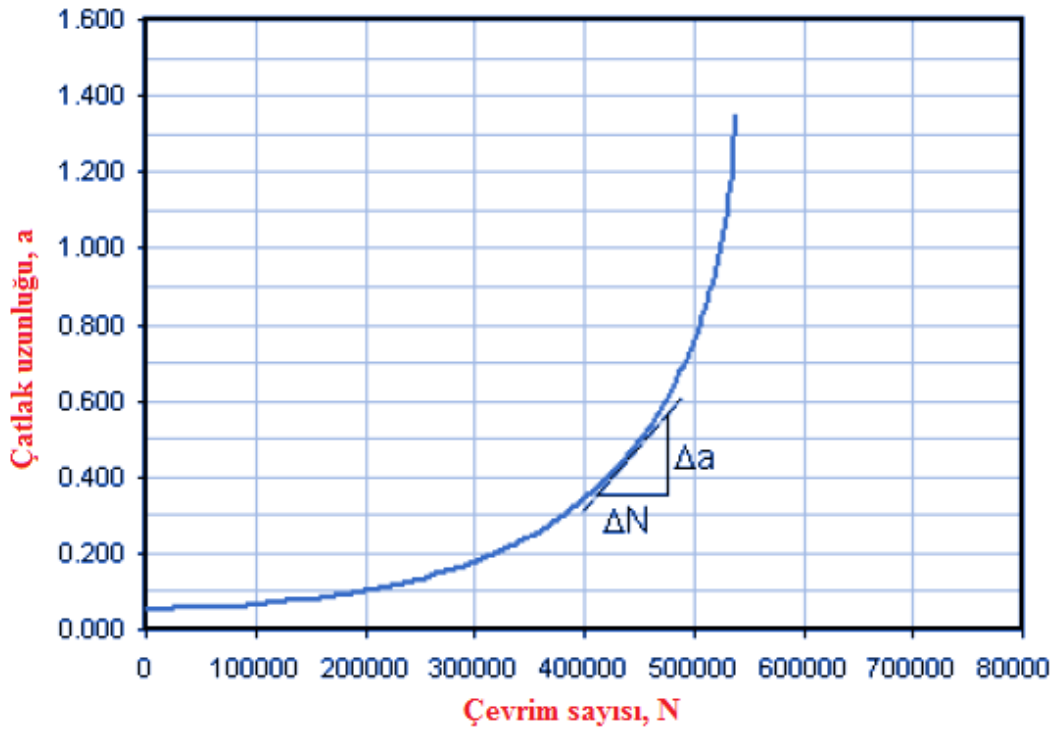
Genlik oranı (A), gerilme genliğinin ortalama gerilmeye oranı ile ifade edilir (Eşitlik 2.8) [69].

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_{ort}} = \frac{1-R}{1+R} \quad (2.8)$$

### 2.2.1.3. Yorulma Çatlak İlerleme Hızı

Her ne kadar yorgunluk hasarını minimuma indirmek için ölçümler dikkate alınsa da malzemeler kusursuz değerdir. Malzemelerin yapısal bileşenlerinde çatlaklar ve çekirdeklenme bölgeleri vardır. Döngüsel yüklemeler altındaki makine elemanları,

çatlaklar oluşturacak ve yapı boyunca çoğalacak, böylece çatlakların uzaması malzemenin aniden hasara uğramasına yol açacaktır [8]. Yorulma araştırmalarının sonucunda malzemelerin ömrünün çatlak ilerleme hızı ile ilişkili olduğunu göstermiştir. Çatlaklar, neredeyse tespit edilemeyecek kadar küçük boyutlardan aşama 2 büyümesi sırasında kritik bir değer alana kadar uzamaya devam eder. Döngüsel yüklemeler sırasında çatlak uzunluğunu izlemek için deneysel teknikler mevcuttur. Bir malzemenin yorulma çatlak ilerleme hızı ( $da/dN$ ), çatlak uzunluğunun devir sayısına karşı eğimidir (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Yorulma çatlak büyüme eğrisinin şeması, a) Çatlak uzunluğu, b) Çevrim sayısı [70].

Çatlak içeren bir malzeme döngüsel yüklemeye maruz kalırsa, döngüsel frekans ( $\nu$ ), yük oranı ( $R$ ) ve yük genliği ( $\Delta P$ ) sabit olduğunda, yorulma döngüsü sayısı ( $N$ ) arttıkça içindeki çatlakın uzunluğuda ( $a$ ) artar. Çatlak ilerleme hızı ( $da/dN$ ), test sırasında numunenin çatlak uzunluğuda arttıkça ilerleme hızı da artacaktır. Ayrıca yüksek yük genliğinde yapılan testlerde çatlak ilerleme hızı da artacaktır [8]. Bu gözlemlerden şu sonuçlara varılabilir:

$$\frac{da}{dN} R, v = f \Delta P, a \quad (2.9)$$

Yukarıdaki ifadede f fonksiyonu, numunenin geometrisine, yükleme durumuna, çatlak uzunluğu ve döngüsel yükleme aralığına bağlıdır. Bu genel ilişki, gerilme yoğunluk faktörü parametresi  $\Delta K$  ile basitleştirilebilir. Yük aralığı büyüklüğü ( $\Delta P$ ), çatlak uzunluğu ve geometrisi  $\Delta K$  ile Eşitlik 2.10'daki gibi,  $K_{\max}$  ve  $K_{\min}$  değerleri Eşitlik 2.11 ve Eşitlik 2.12'deki gibi ifade edilir.

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = f(g) \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.10)$$

$$K_{\max} = f(\sigma_{\max}, a) \quad (2.11)$$

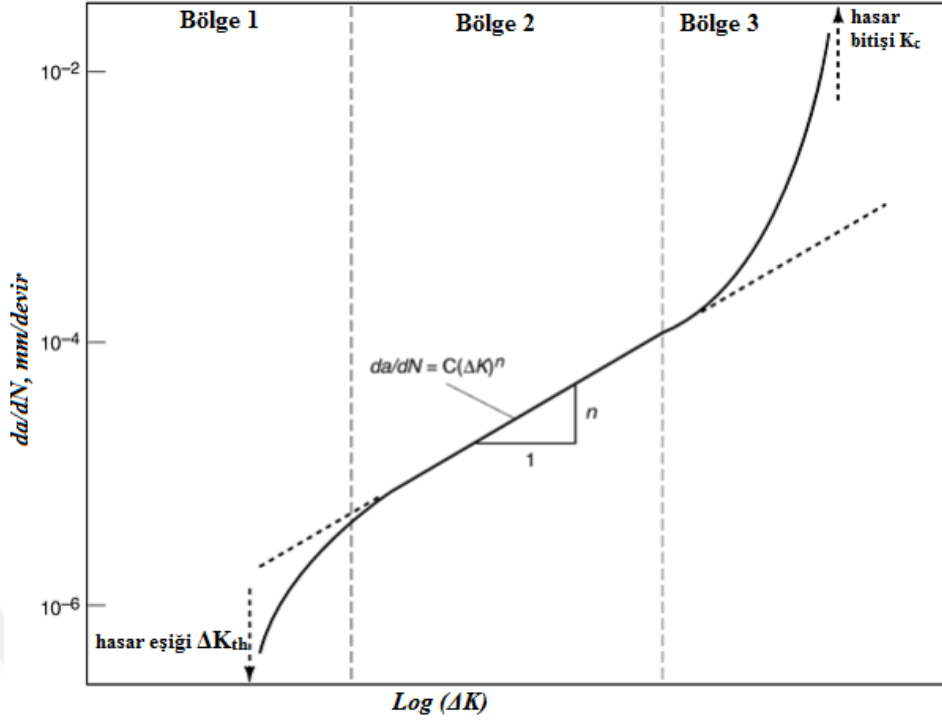
$$K_{\min} = f(\sigma_{\min}, a) \quad (2.12)$$

$\Delta \sigma$ , bileşene uygulanan dolaylı gerilmedir. Gerilme yoğunluk faktörü değişimi aşağıdaki gibi gerilme oranı açısından da tanımlanabilir (Eşitlik 2.13, 2.14).

$$\Delta K = (1 - R) K_{\max} \text{ for } R \geq 0 \quad (2.13)$$

$$\Delta K = K_{\max} \text{ for } R \leq 0 \quad (2.14)$$

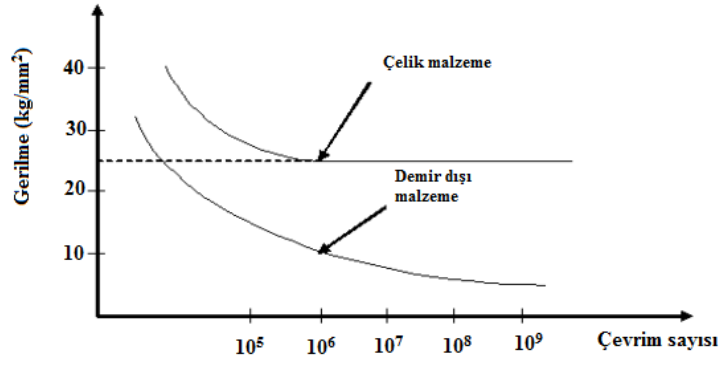
Hemen hemen tüm metalik malzemeler için yorulma çatlak ilerleme hızı üzerinde yapılan deneyler,  $da/dN$  ve  $\Delta K$  eğrilerinin üç farklı bölgeye sahip olduğunu göstermiştir (Şekil 2.15) [8]. Yorulma çatlak ilerleme eşiği bu eğrinin ilk bölgesinde görülür. Bu bölgenin altında gözlemlenebilir bir çatlak yayılımı yoktur. Gerilme yoğunluk faktörü arttıkça çatlak ilerleme hızı da artar ve eğrinin II. bölgesi gözlemlenir. Bu eğrinin II. bölgesi,  $\log da/dN$  ve  $\log \Delta K$ 'nin bu bölgede doğrusal bir ilişkiye sahip olması nedeniyle önemlidir. III. bölgede çatlak ilerleme hızı çok yüksektir ve bu bölgede kararsızlığın meydana geldiği, çatlak ilerleme ömrünün de çok düşük olduğu gözlemlenebilir. Bu bölgede maksimum gerilme yoğunluğu  $K_{\max}$ , malzemenin  $K_c$ 'sinin kırılma tokluğuna yaklaşmaktadır [8].



Şekil 2.15. Gerilme yoğunluk faktörü aralığı  $\Delta K$ 'nın logaritmasına karşı yorulma çatlak ilerleme hızı  $da/dN$ 'nin logaritmasının şematik gösterimi.

#### 2.2.1.4. S-N Eğrisi (Wöhler Diyagramı)

Gerilme-çevrim sayısı (S-N) diyagramı farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda hasara uğrayacağını gösteren bağıntıyı vermektedir (Şekil 2.16). Yorulma ömrünü tam olarak adlandırabilmek için ortalama gerilme veya yorulma gerilme oranı  $R$ 'ye ihtiyaç vardır. Test sonuçları, logaritmik ölçekte hasarın olduğu çevrime karşılık maksimum yorulma gerilmesi olarak grafik formatında verilir. S-N diyagramının çizilebilmesi için 8 ile 12 arasında numune kullanılabilir. Test sırasında ortalama gerilme sabit kalır ve numunelere farklı şiddetteki gerilmelerin uygulanması sonucu hasar meydana gelene kadar çevrim sayısı tespit edilmeye çalışılır. S-N eğrileri  $10^6$  çevrime ulaştıktan sonra apsis ekseninde sonsuza giden bir durum gözlemlenebilir. Bu diyagramda eğride asimptotik durum gözlemlendiği gerilme değeri test edilen malzemenin yorulma sınırı olarak kabul edilir. Oluşan bu gerilme değerinin altındaki değerlerde malzeme sonsuz ömürlü olduğu kabul edilir [37,71–73].



Şekil 2.16. Çelik/Demir dışı malzemelerin gerilme-çevrim sayısı grafiği [28].

## 2.3. AŞINMA

### 2.3.1. Malzemelerde Aşınma

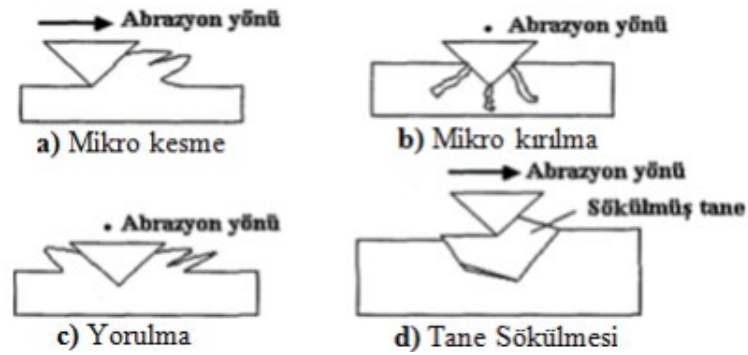
Aşınma, malzeme yüzeyine başka bir malzemenin teması neticesinde mikroskobik parçaların kopması sonucu malzeme kaybına neden olan yüzey bozulması şeklinde tanımlanabilmektedir. Aşınmanın meydana gelmesi, farklı iki parçanın birbirine teması ve hareketin olmasına bağlıdır. Bu olay sonucunda malzeme kaybı ile birlikte parça üzerinde kalıcı hasarlar oluşmaktadır [14]. Aşınma hasarları, makine elemanlarında enerji, malzeme ve zaman kayıplarına neden olurlar. Aşınma hasarlarına önlem alınması için aşınma türlerinin ve mekanizmalarının önemli derecede bilinmesi gerekir. Ayrıca malzemelere uygulanan yüzey işlemleri, malzeme seçimi, yüzeye uygulanan yük, kayma mesafesi, yüzey kalitesi, yüzey sertliği ve sürtünmenin azaltılması için yapılan yağlamalar aşınmayı etkileyen önemli faktörlerdir. Meydana gelen aşınma hasarları ciddi anlamda maddi kayıplara da sebep olmaktadır [14,74].

### 2.3.2. Aşınma Çeşitleri

#### 2.3.2.1. Abrazif Aşınma

Abrazif aşınma, birbiriyle hareketli durumda olan iki malzemenin belli bir temas sağlayarak pürüzlü yüzeyin diğer yüzeyden küçük parçacıklar kazınması sonucunda meydana gelen malzeme kaybı olayıdır (Şekil 2.18). Abrazif aşınmanın oluşması için

malzemelerden birinin sert, diğzerinin yumuşak olması gerekir. Sert malzeme yüzeyindeki pürüzler uygulanan kuvvet neticesinde yumuşak yüzeye gömülür ve hareket devam ederken yumuşak yüzeyde yarıklar meydana gelir. Oluşan yarıklardaki malzemeler, yüzeyden uzaklaşır ve bu durumda malzemede parça kaybı meydana gelir. Abrazif aşınma, yüzey kalitesi için yapılan taşlama işlemlerindeki malzemeden parça koparılması olayı ile benzerlik göstermektedir. Bazı durumlarda iki yüzey arasındaki sert parçacıklar tam anlamıyla bir kayma hareketi yapamaz, bazen ise yuvarlanma hareketi sergilerler. Sert parçacıkların tam kayma hareketi gerçekleştirmemesi durumunda aşınma yavaş olur. Abrazif aşınma mekanizmasındaki aşındırıcı sert pürüzlerin boyutu ve şekli, uygulanan yük, malzemelerin kırılma tokluğu, kayma mesafesi, kayma hızı ve sertlik önemli parametrelerdendir [75–78].

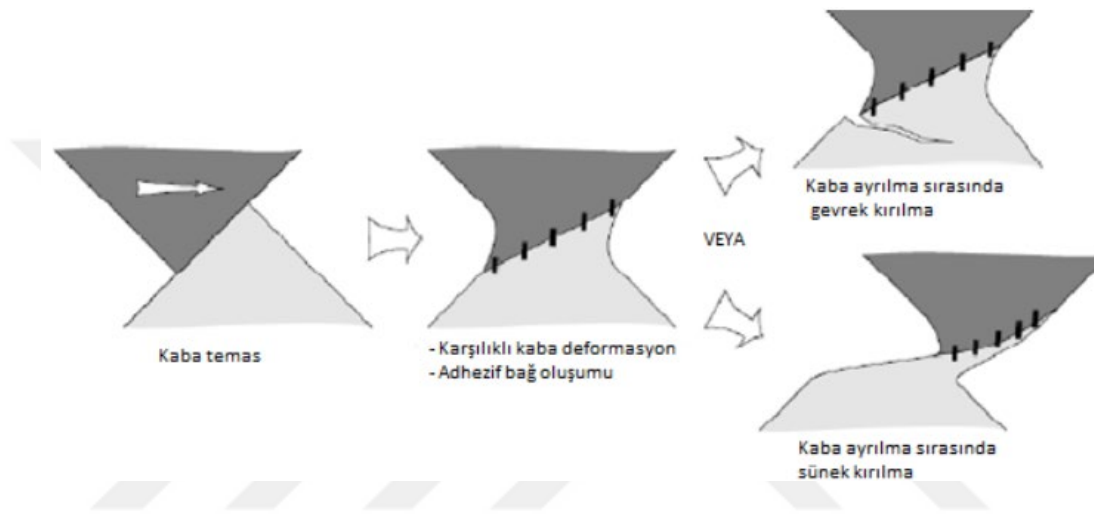


Şekil 2.17. Abrazif aşınma mekanizmaları [79].

### 2.3.2.2. Adhesif Aşınma

Adhesif aşınma, en çok karşılaşılan aşınma çeşitlerinden olup tüm aşınmaların %15'ini kapsamaktadır (Şekil 2.18). Birbirine temas eden malzemelerin temas yüzeylerinin belli bir kuvvet etkisi altında izafi olarak hareket yapmaları esnasında görülen, kayma ve yapışma aşınması olarak da bilinen aşınma türüdür. Genellikle iki metalin birbirine sürtünmesi ve mekanik hareketi neticesinde gerçekleşir. Metal malzemelerde yapışma olayı sadece sıcak durumlarda olmaz uygulanan yüke bağlı olarak soğuk durumlarda da gerçekleşebilir. Cisimlerin temas eden yüzeylerinin yüzey pürüzlülüğu nedeniyle bu noktadaki gerilmeler çok küçük yük durumlarında bile akma gerilmesi sınırlarına erişirler ve akarak plastik deformasyona uğrarlar.

Daha sonra cisimler birbirine mikro kaynaklar ile yapışır ve izafi hareket neticesinde kaynak bağı kopar. Kaynak bağı kopması sonucunda diğer cisme göre daha yumuşak malzemeden üretilmiş cismin yüzeyinde boşluklar meydana gelir, diğer cismin yüzeyinde ise çıkıntılar oluşur ve iki yüzey arasında adhesif parçacıklar dökülür [61,75]. Adhesyon aşınmasının önlenmesi için birbirine temas eden parçalara uygun yağlayıcılar seçilebilir ve malzemelerin aşınma davranışı değerlendirilerek, birbirine yakın malzemeler seçilebilir [76].



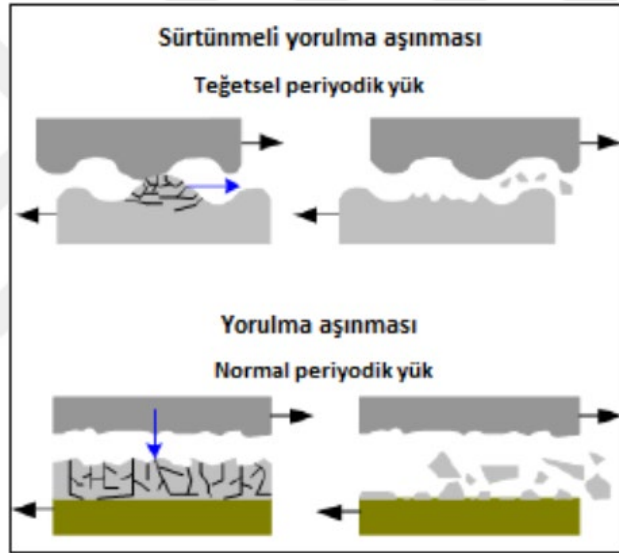
Şekil 2.18. Adhesif sert temastaki deformasyon modeli [5].

### 2.3.2.3. Korozyif Aşınma

Metal malzemelerin çevreleriyle kimyasal, elektrokimyasal ya da metalurjik olarak reaksiyona girmesi sonucu bu yüzeylerde farklı yapılar oluşturması ve hareketli parçaların yüzeylerinde meydana gelen sürtünme sebebiyle bu yapıların parçalanması neticesinde oluşan aşınma çeşididir. Korozyif aşınmanın oluşması için korozyif etkenin ve sürtünmenin bir arada olması gerekir. Malzemenin yüzeyinde korozyondan koruyucu bir tabaka oluşmazsa korozyif ortamda aşınma kaçınılmazdır. Aşınma çevrede veya yüzeyde bulunan kimyasalların tepkimesiyle gerçekleşir. Bu kimyasallar sıvı ve gaz olabilir. Kimyasalların tepkimeye girmesi sonucu malzeme üzerinde oksit tabakaları meydana gelmektedir. Oluşan oksit tabakası malzeme kaybına neden olur. Korozyif aşınmayı önlemek adına koruyucu yüzey tabaka ile kaplamalar yapılabilir veya malzemeye uygulanan yük azaltılabilir [75,78].

#### 2.3.2.4. Yorulma Aşınması

Tekrarlı yükler altında çalışan makine elemanları için yorulma kaçınılmazdır. Birbiriyle temas halinde olan yüzeylerde kayma hareketinin belirli aralıklarla durup tekrar başlaması neticesinde malzeme yüzeyinin kenarlarına etki eden yüklerde dalgalanmalar meydana gelir. Değişen bu yük aralığında hareketli yüzeylerde zaman geçtikçe yorulma kaynaklı çatlaklar oluşur ve zaman geçtikçe çatlaklar ilerleyerek yüzeyden mikro parçacıkların ayrılmasına neden olur. Yorulma aşınması özellikle dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda, demiryolu raylarında, soğuk veya sıcak haddeleme işlemlerinde görülmektedir (Şekil 2.19) [75,79].



Şekil 2.19. Yorulma ve sürtünme aşınma modeli [5].

## BÖLÜM 3

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 3.1. MALZEME SEÇİMİ

AISI veya SAE 4140 kalite alaşımlı çelik, otomotiv, tarım sanayisi, savunma sanayi ve havacılık endüstrisinde kullanılır. Atmosferik korozyon direncine ve makul dayanıma sahip çok yönlü bir alaşımdır. Genel olarak, aşınma direnci, tokluk ve yorulma dayanımı düşük karbonlu çeliklere göre daha iyidir. Alaşım elemanı olarak krom ve molibden içeren düşük alaşımlı bir çeliktir. Bu çalışmada GBD, ABD ve PN yüzey işlemleri için AISI 4140 düşük alaşımlı çelik kullanılmıştır. Kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de, mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. AISI 4140 düşük alaşımlı çeliğin kimyasal bileşimi.

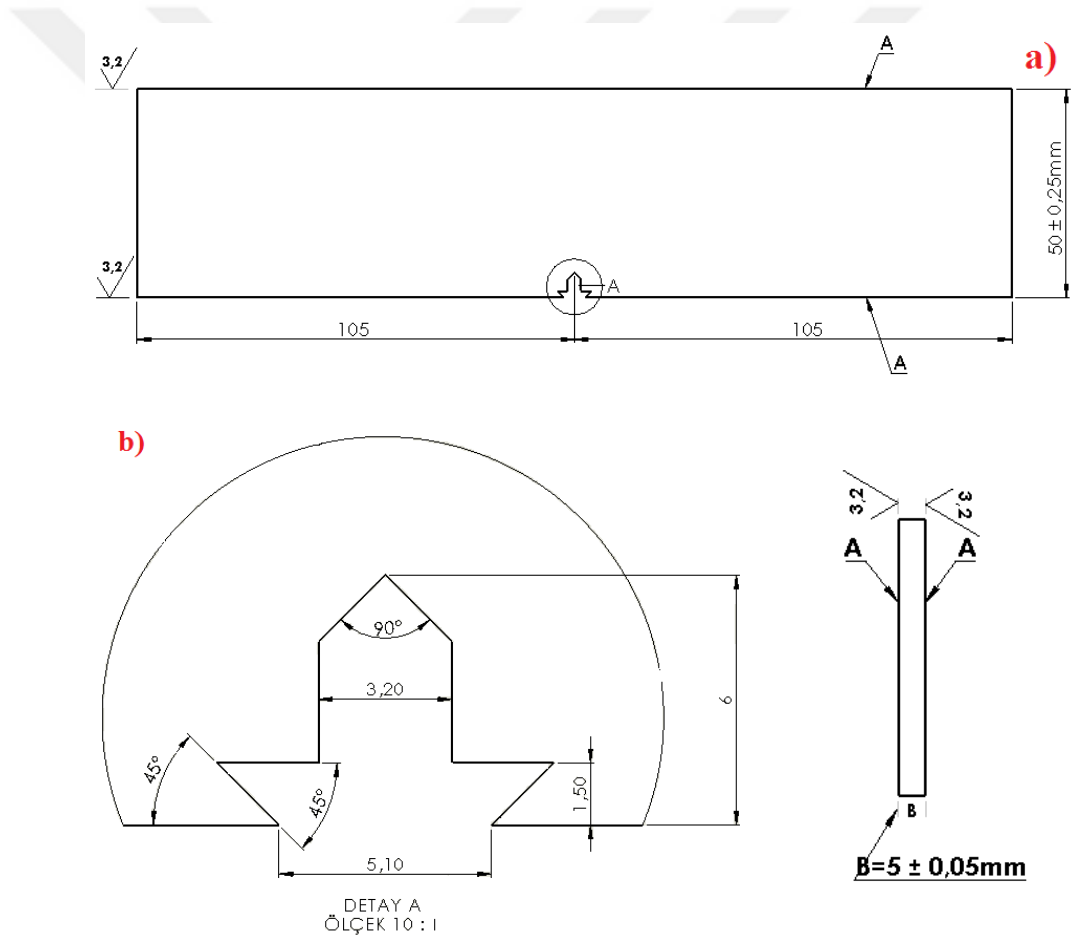
C %	Cr %	Fe %	Mn %
0,38 - 0,43	0,8 - 1,1	96,785 – 97,77	0,75 – 1,0
Mo %	P %	Si %	S %
0,15 – 0,25	≤ 0,035	0,15 – 0,3	≤ 0,04

Çizelge 3.2. AISI 4140 düşük alaşımlı çeliğin mekanik özellikleri.

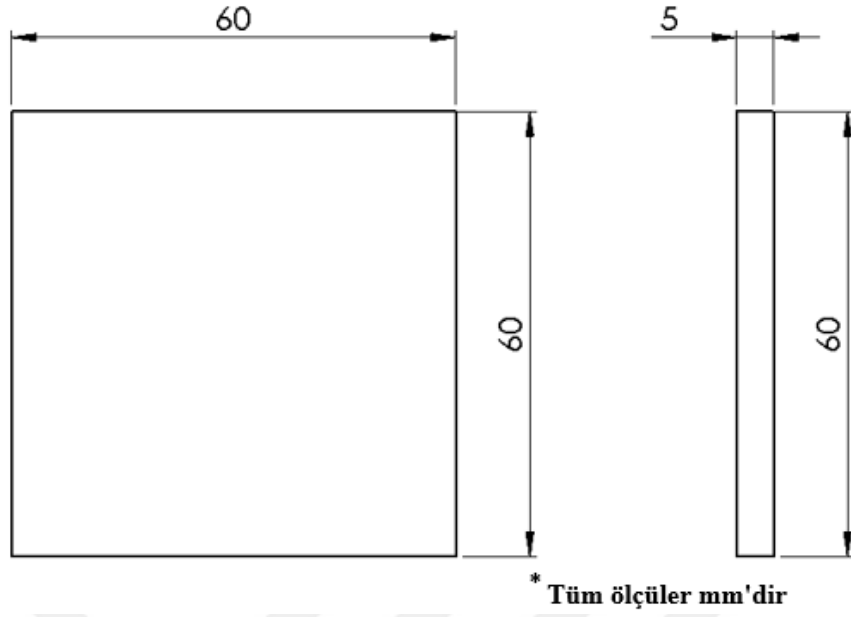
Çekme Dayanımı (MPa)	655,0
Akma Dayanımı (MPa)	415
Yoğunluk ( x 1000 kg/m <sup>3</sup> )	7,7 – 8,03
Poisson Oranı	0,27 – 0,30
Elastik Modülü (GPa)	190 - 210
Uzama (%)	25,7
Sertlik (HB)	197

### 3.2. NUMUNE HAZIRLAMA

Planlanan deneysel çalışmalar için AISI 4140 düşük alaşımlı çelik malzemeden 4 adet yorulma çatlak ilerleme hızı deneyleri için, 4 adet ise aşınma testleri için numuneler hazırlanmıştır. Numuneler ASTM E-647 standardı referans alınarak SE(B) numuneleri talaşlı imalat yöntemiyle hazırlanmış ve tel erezyonla işlenerek çatlak oluşturulmuştur. Yorulma çatlak ilerleme numunelerinin teknik resimleri Şekil 3.1.a ve Şekil 3.1.b'de gösterilmiştir. Aşınma numunelerinin teknik resmi Şekil 3.2'de verilmiştir. Şekil 3.3'te BD, ABD ve PN işlemleri öncesi yorulma çatlak ilerleme numunesi gösterilmiştir.



Şekil 3.1. a) Yorulma çatlak ilerleme numunesi, b) Çatlak detayı.



Şekil 3.2. Aşınma numunesi teknik resmi.



Şekil 3.3. İşlem görmemiş yorulma çatlak ilerleme numunesi.

### 3.2.1. Geleneksel Bilyalı Dövme (GBD) ve Aşırı Bilyalı Dövme (ABD) İşlemi Parametrelerinin Belirlenmesi

Yorulma çatlak ilerleme testlerinde kullanılacak olan numunelerin her iki yüzeyine GBD ve ABD işlemi uygulanmıştır. GBD ve ABD işlemi kapalı bir odada basınçlı hava ile bilyaların püskürtüldüğü Peenmatic S2000 ekipmanı kullanılmıştır. Bu işlem, 300 mm nozul mesafesi ve 90° nozul açısı ile kapalı haznede gerçekleştirilmiştir. GBD ve ABD işlemlerinin parametreleri sırasıyla Çizelge 3.3. ve

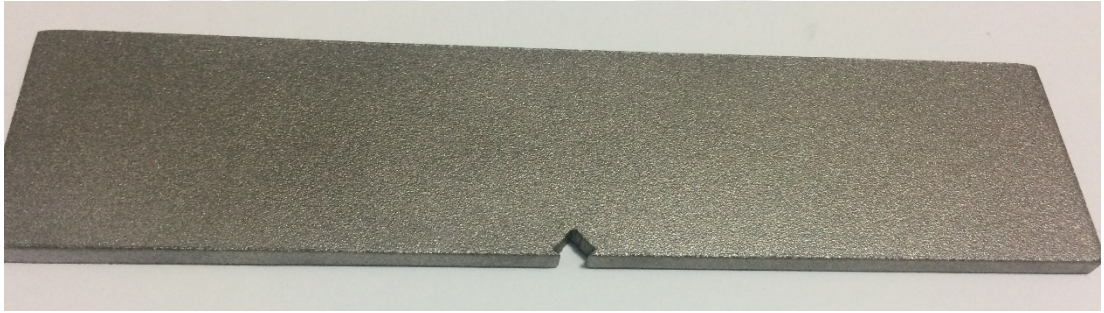
Çizelge 3.4'te verilmiştir. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te sırasıyla GBD ve ABD numuneleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. Geleneksel bilyalı dövme parametreleri.

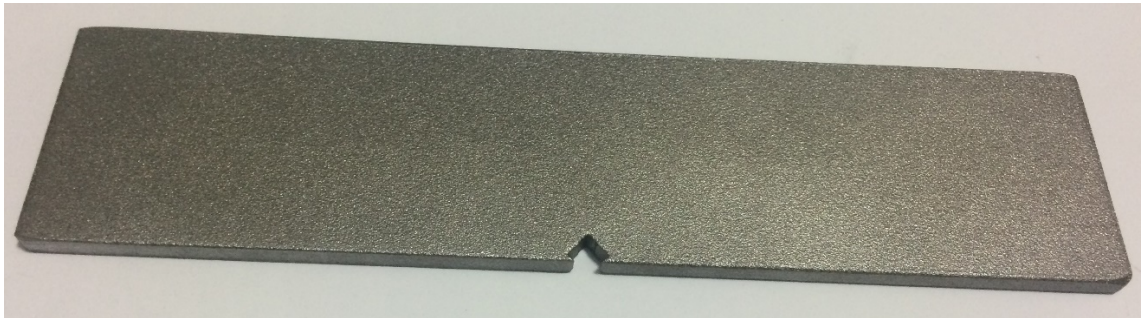
Almen yoğunluğu	Bilya çapı	Doyurma oranı (%)	Süre (sn)	Basınç kPa (psi)	Ark yüksekliği (mm)
13A	S230	200	15	414	0,13

Çizelge 3.4. Aşırı bilyalı dövme parametreleri.

Almen yoğunluğu	Bilya çapı	Doyurma oranı (%)	Süre (sn)	Basınç kPa (psi)	Ark yüksekliği (mm)
29A	S230	200	15	414	0,29



Şekil 3.4. Geleneksel bilyalı dövülmüş numune.



Şekil 3.5. Aşırı bilyalı dövülmüş numune.

### 3.2.2. Plazma Nitrürleme (PN) Parametrelerinin Belirlenmesi

Yorulma çatlak ilerleme testleri için numuneye kapalı bir fırın içerisinde düşük basınçlı ortamda plazma nitrürleme işlemi uygulanmıştır. Elektrik akımı vasıtasıyla gazların iyonize edilerek numuneye difüzyonu gerçekleştirilmiştir. PN parametreleri Çizelge 3.5’te verilmiştir. Şekil 3.6’da PN numunesi gösterilmektedir.

Çizelge 3.5. Plazma nitrürleme parametreleri

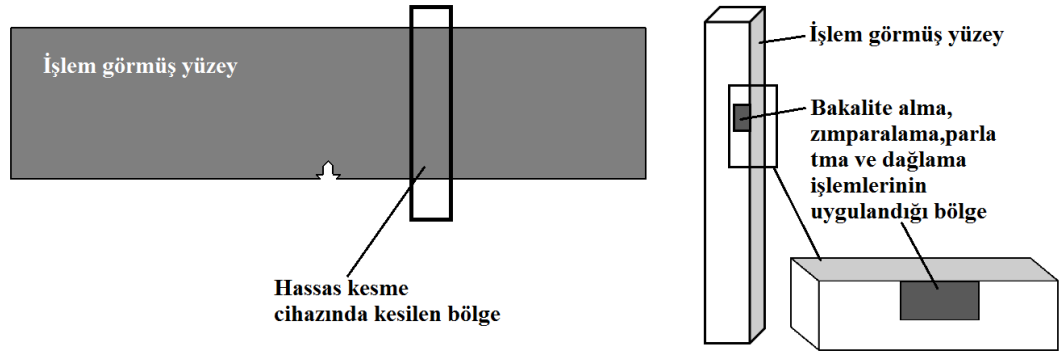
Sıcaklık	Süre	H <sub>2</sub> (%)	N <sub>2</sub> (%)	Vakum basıncı	Plazma gerilimi
520°	12 saat	75	25	5 mbar	500V



Şekil 3.6. Plazma nitrürlenmiş numune.

### 3.3. MİKROYAPI ANALİZLERİ

Mikroyapı çalışmalarında GBD, ABD ve PN işlemlerinin malzeme yüzeyinde ve yüzeyin altında kalan bölgedeki etkilerinin belirlenmesi hedeflenmektedir. GBD ve ABD işlemleri sonrası malzeme yüzeyinde deformasyon sonucu yapısal değişikliklerin varlığı incelenmesi üzerinde durulmaktadır. Mikroyapı karakterizasyonu X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop analizleri ile gerçekleştirilmiştir. GBD, ABD ve PN işlemleri uygulanan numunelerin yüzeyden merkeze doğru dik kesit bölgeden optik mikroskop ve SEM ile işlem etkilerine bakılmıştır. AISI 4140 düşük alaşımının incelenen bölgenin şeması Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Mikroskop görüntülerinde incelenen bölge.

İG, GBD, ABD ve PN numuneleri hassas kesme cihazında kesildikten sonra bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler 400-2500 kalite silisyum karbür (SiC) zımpara kağıtlarıyla zımparalanmış ve 6, 3 ve 1  $\mu\text{m}$  elmas süspansiyonlarla parlatma işlemi uygulanmıştır. Mikroyapı görüntüleri ve tane sınırlarının belirlenebilmesi için parlatılan numuneler %2 Nital çözeltisinde 3-5 saniye daldırma yöntemiyle dağlanmıştır. Mikroyapı görüntüleri Carl Zeiss Ultra Plus taramalı elektron mikroskobu ve Nikon Eclipse MA 200 optik mikroskobunda incelenmiştir.

#### 3.4. X-IŞINI KIRINIM (XRD) ANALİZLERİ

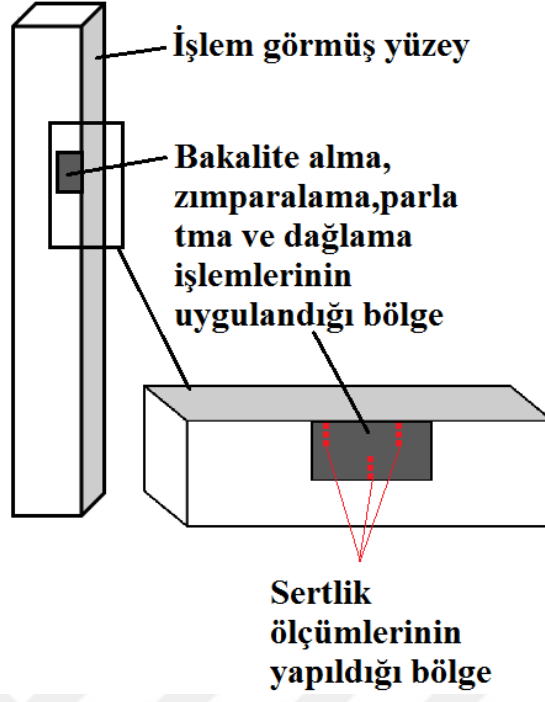
X-ışını kırınım analizi malzeme yapısındaki fazların değişimini belirlemek için yapılmıştır. XRD analizleri Rigaku Ultima IV marka cihazda gerçekleştirilmiştir. FWHM ölçüm verileri MATLAB R2014a yazılım programıyla yeniden belirlenip cihaz verileri ile karşılaştırılmıştır. XRD analizi 30 kV gerilim, 20 mA ile gerçekleştirilmiştir. XRD,  $10^{\circ}$ - $90^{\circ}$  açı aralıklarında,  $0.02^{\circ}$  adım tarama büyüklüğünde, dakikada 3.5 derece hızında gerçekleştirilmiştir. XRD cihazı Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



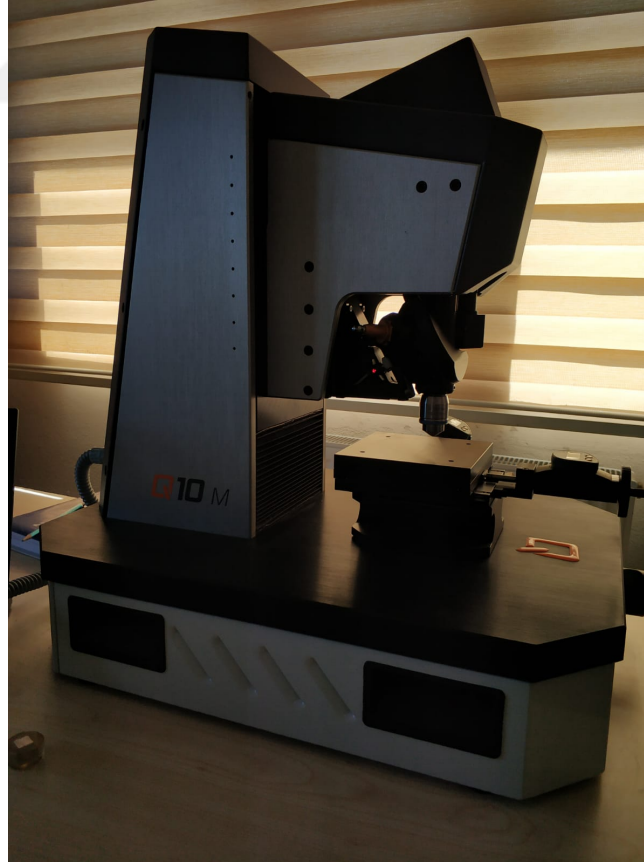
Şekil 3.8. XRD cihazı.

### 3.5. MİKROSERTLİK ÖLÇÜMLERİ

GBD, ABD ve PN işlemleri sonrası sertlik değişimlerini belirlemek amacıyla yüzeyden dik kesit bölge 3 farklı noktadan 20 µm aralıklarla ölçüm yapılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri Qness Q10 M marka cihazda gerçekleştirilmiştir. Mikro sertlik ölçümlerinde 20 gr yükleme yapıp 10 saniye yükleme süresinde, Vickers uç kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik deneylerinin şematik olarak gösterimi Şekil 3.9'da, mikro sertlik cihazı Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



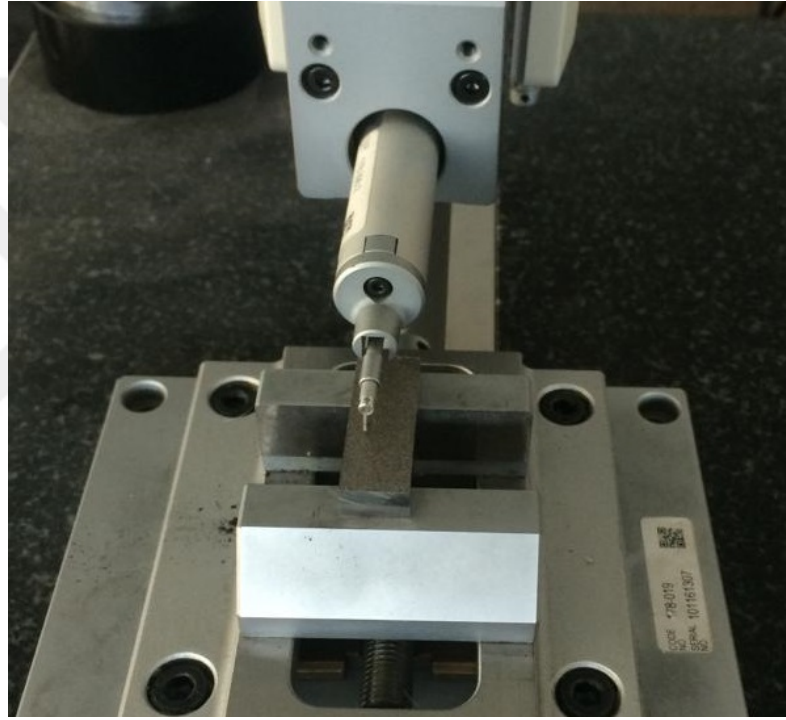
Şekil 3.9. Mikro sertlik ölçümlerinin şeması.



Şekil 3.10. Mikro sertlik cihazı.

### 3.6. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜMLERİ

İşlem görmemiş 4140 düşük alaşımli çelik numunenin GBD, ABD, ve PN işlemlerinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkisi incelenmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçümleri için Mitotoyo marka yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır. Yüzeyde 3 farklı noktadan ölçüm yapılmış ve bu ölçümlerin aritmetik ortalamasıyla Ra, Rq ve Rt değerleri sonuçlandırılmıştır. Şekil 3.11’de yüzey pürüzlülük test cihazı gösterilmiştir.

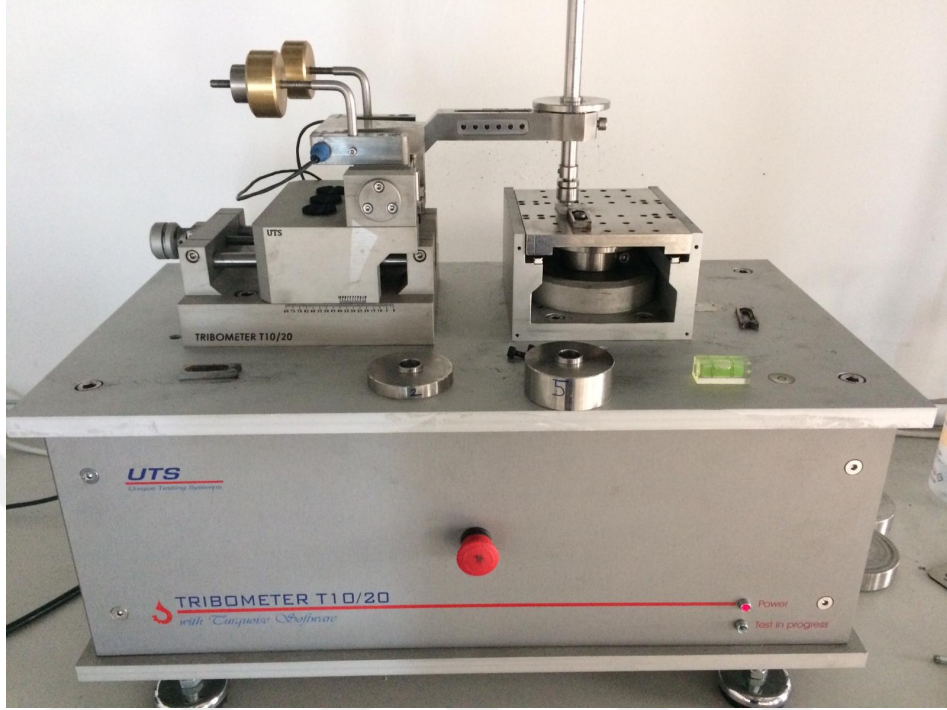


Şekil 3.11. Yüzey pürüzlülük test cihazı.

### 3.7. AŞINMA TESTİ

Aşınma deneyleri UTS Tribometre cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.12’de aşınma test cihazı gösterilmiştir. İG, GBD, ABD ve PN numunelerinin yüzeylerine kuru kayma şartlarında oda sıcaklığında aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma testi için 10 mm çapında WC bilyaların numune yüzeyine sürtünmesiyle gerçekleştirilmiştir. Testler, 5N, 10N ve 15N olmak üzere 3 farklı yükte gerçekleştirilmiştir.

olup kayma mesafesi 500 metre olarak belirlenmiştir. Aşınan yüzeyler SEM’de detaylı olarak incelenmiştir.

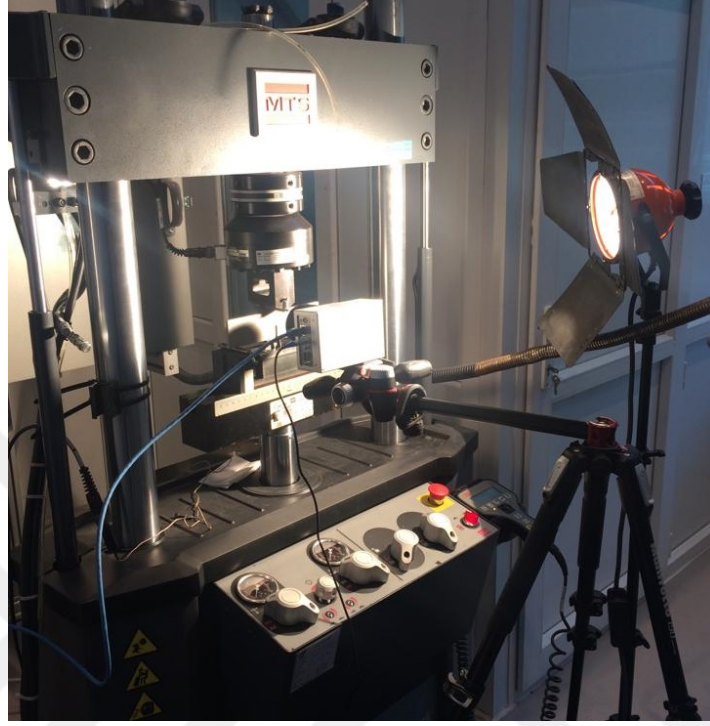


Şekil 3.12. Aşınma cihazı resmi.

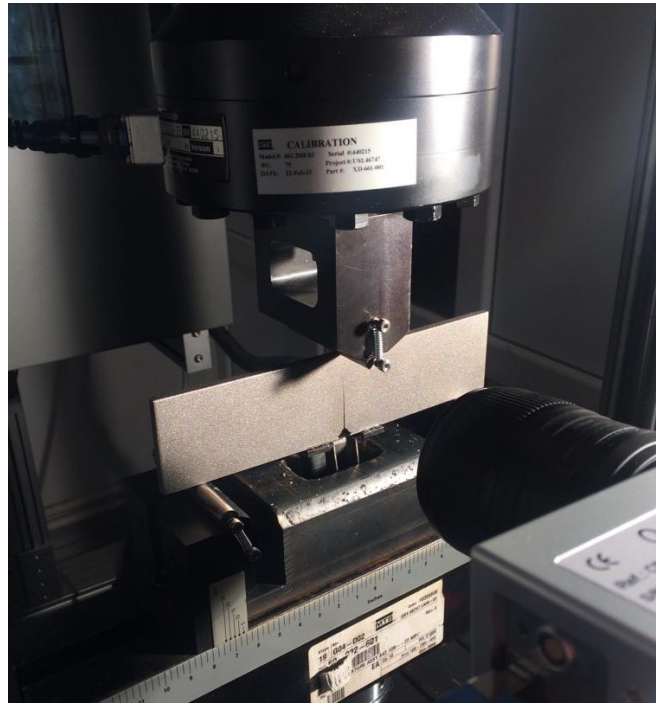
### 3.8. YORULMA ÇATLAK İLERLEME TESTLERİ

Yorulma çatlak ilerleme deneyleri ASTM E-647 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Numuneler dinamik yüklemelere maruz bırakılmış olup döngüsel yükleme başına çatlağın aldığı yol hesaplanarak yük-çatlak boyu değişiminin grafiği çizilmiştir. Testler MTS Landmark Servo Hidrolik 100 kN dinamik test cihazında gerçekleşmiş olup, çatlak ilerleme davranışlarını belirlemek için Optronis CR3000x2 ağır çekim (slow motion) kamera ve 800 W’lık tungsten projektör (flood light) ışık ekipmanı kullanılmıştır. Numune üzerinde oluşturulan dinamik yük esnasında çatlağın ilerleme davranışını belirlemek adına MTS marka COD gauge ekipmanı sisteme entegre edilmiştir. Yorulma çatlak ilerleme testlerinde numunenin çentik ucundan 12.5 mm’lik bir ön çatlak oluşturulmuştur. Deneyler, oda sıcaklığında, gerilme oranı  $R=0.5$  değerinde ve 40 Hz frekansta, sabit yük altında gerçekleştirilmiştir. Yorulma çatlak ilerleme testleri % 95 güven düzeyinde, % 5’lik

hata payında test edilmiştir. Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te yorulma çatlak ilerleme test düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Yorulma çatlak ilerleme test düzeneği.



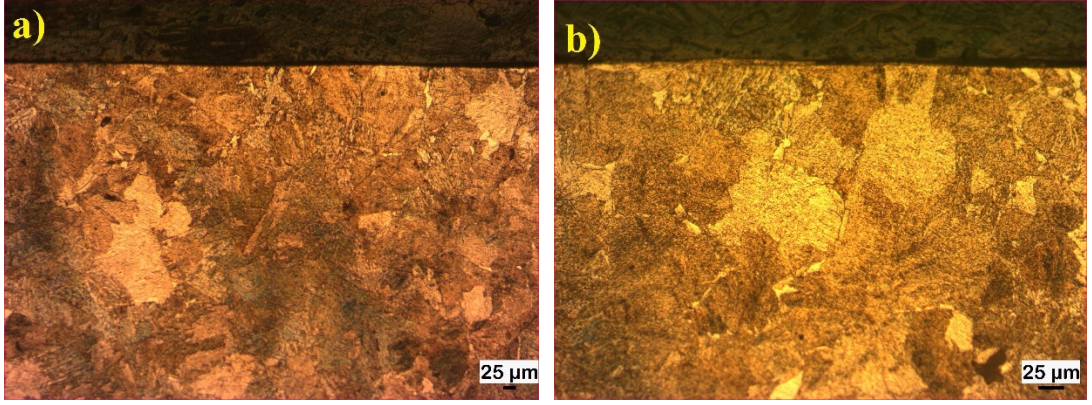
Şekil 3.14. Yorulma çatlak ilerleme testi.

## BÖLÜM 4

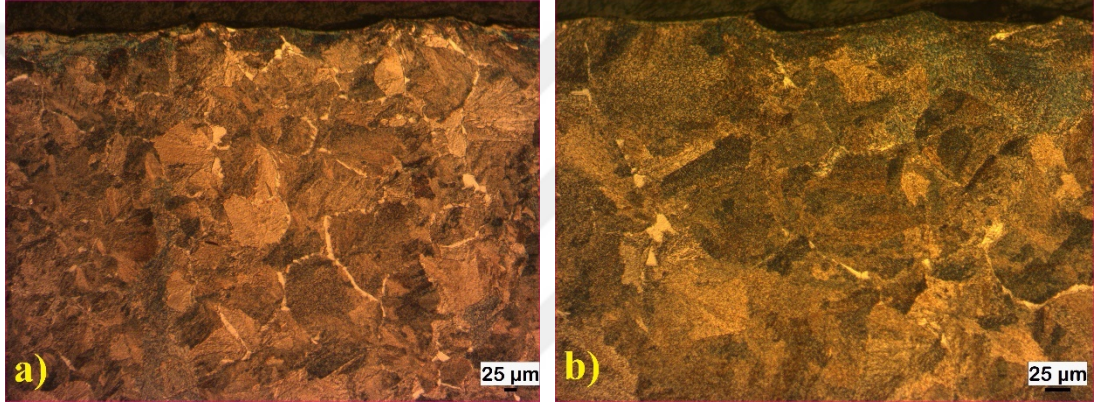
### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

#### 4.1. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI

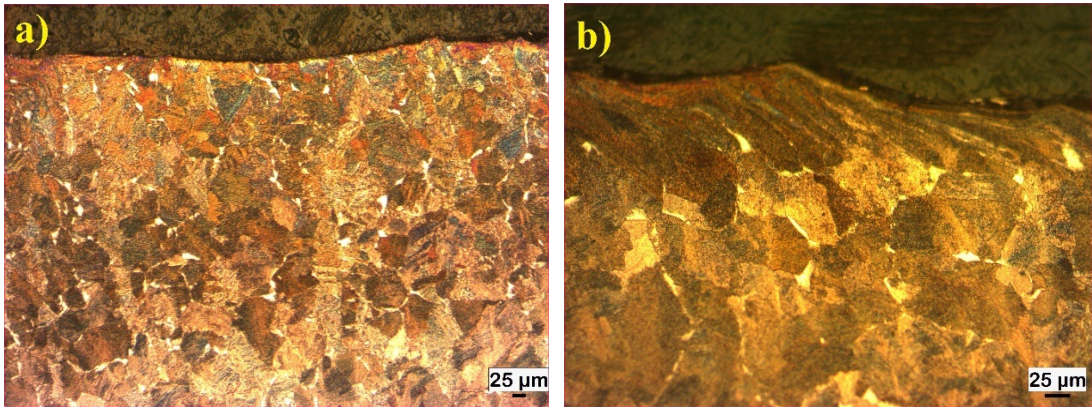
Mekanik testler gerçekleştirilmeden önce mikroyapı değişimlerinin testler üzerindeki etkisini belirleyebilmek amacıyla İG, GBD, ABD ve PN numunelerin optik ve taramalı elektron mikroskopta mikroyapı incelemeleri tamamlanmıştır. İG numunede taneler ve sınırlar gözlemlenmektedir (Şekil 4.1). İç yapı incelendiğinde yaklaşık 30-35 µm ortalama tane boyutu gözlemlenmektedir. GBD işlemi ile yüzeyin düzlüğü bilyaların çarpması ile kaybolmuş, yüzeyin hemen altında tane değişimi hususunda net fikir elde edilemese de değişim gözlemlenmektedir (Şekil 4.2). Şekil 4.2b 20x büyütmede, yüzeyin hemen altında tane büyüklüğü homojenizasyonunun kaybolduğu dikkat çekmektedir. ABD ile yüzeye yakın bölgede tane boyutunun dikkat çekmeyecek kadar küçüldüğü, tane sınırlarının kaybolduğu, iç kısımdan tamamıyla başka bir formata bürünen bir yapı olduğu kanaati oluşmuştur (Şekil 4.3b). Ünal vd. [40], Bagherifard vd. [80], Gangaraj vd. [81], optik mikroskop çalışmalarında benzer sonuçların ortaya çıktığını, işlemde etkilenen tabakanın yaklaşık 30-180 µm arasında olduğunu vurgulamışlardır. ABD işlemine bakıldığında optik mikroskopta farkedilen tabakanın 50-60 µm dolaylarında olduğu görülmüştür. Nitrürleme işlemi sonrası kesit yüzey incelendiğinde yaklaşık 5 µm kalınlığında bir nitrür tabakası göze çarpmaktadır. Bileşke tabakasının kimyasal değişim söz konusu olduğundan iç kısımla ayırt edilmesi daha belirgin olmaktadır. Farklı plazma nitrürleme ortam ve proses koşullarına bağlı olarak bileşke tabakanın 1-20 µm arasında değiştiği, 500°C sıcaklıkta yapılan nitrürleme işlemlerinde 5-10 µm arasında ölçüldüğü raporlanmıştır [82,83].



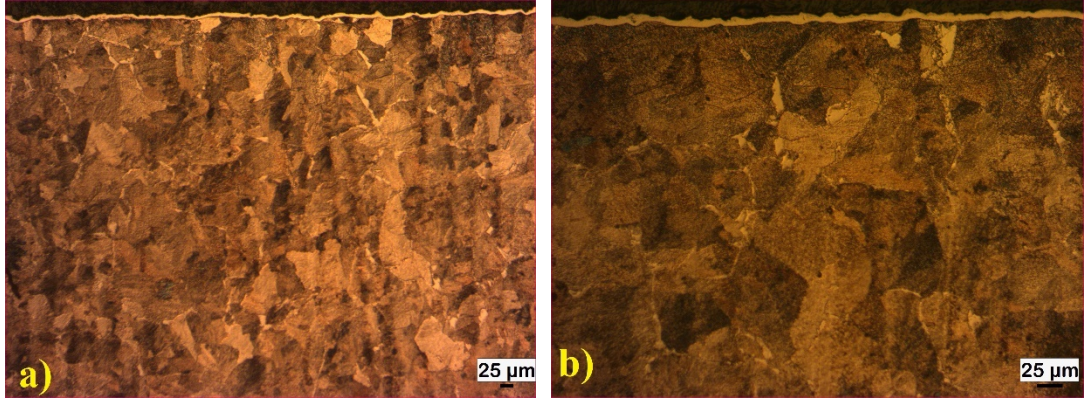
Şekil 4.1. İşlem görmemiş numunenin optik mikroskop görüntüleri a)10x, b)20x.



Şekil 4.2. GBD numunenin optik mikroskop görüntüleri a)10x, b)20x.

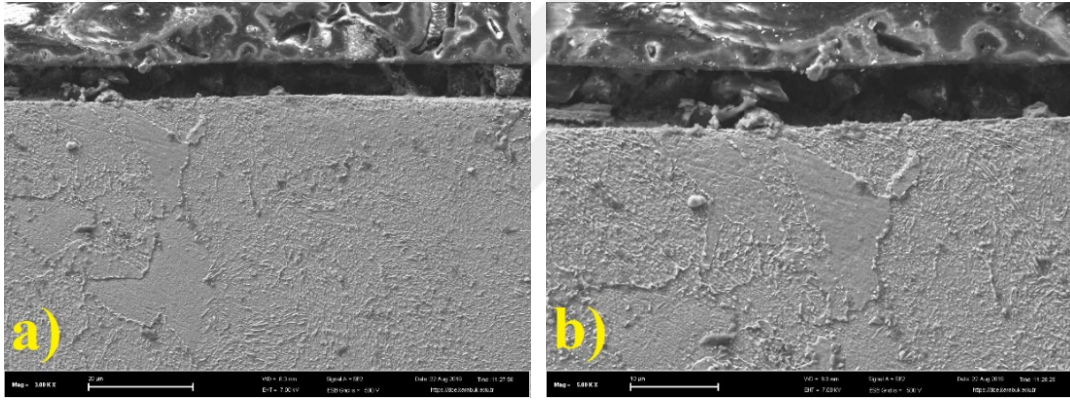


Şekil 4.3. ABD numunenin optik mikroskop görüntüleri a) 10x, b) 20x.



Şekil 4.4. PN numunenin optik mikroskop görüntüleri a) 10X, b)20X.

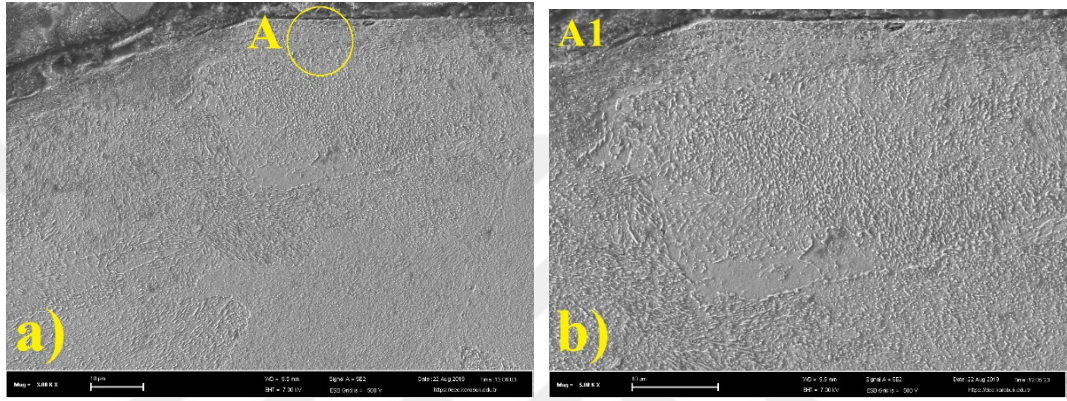
Şekil 4.5'te, işlem görmemiş numunenin SEM fotoğraflarında yüzeye komşu büyük boyutta taneler gözlemlenmiştir.



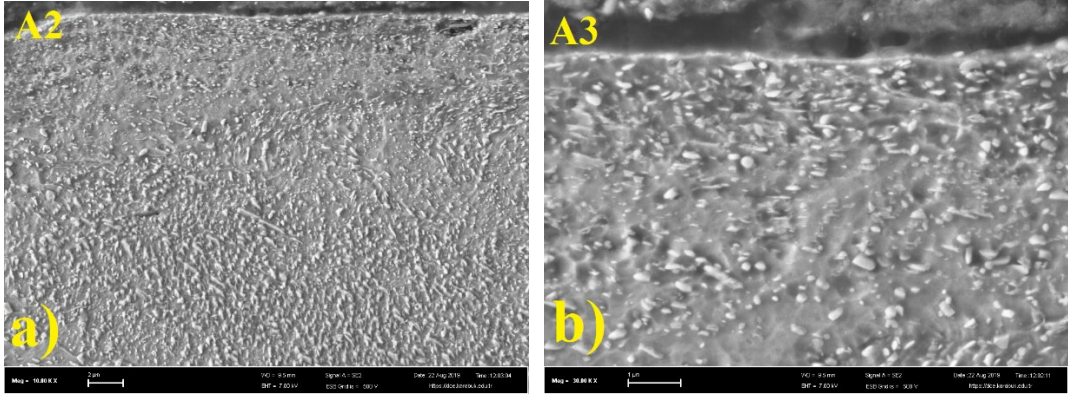
Şekil 4.5. İG numunenin SEM görüntüleri a) 3000X, b)5000X.

Şekil 4.6 ve 4.7'de GBD numunenin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri gösterilmiştir. Şekil 4.8 ve 4.9'da ABD numunenin farklı büyütmelerdeki SEM fotoğrafları gösterilmiştir. GBD ve ABD işlemleri sonrası bilyalı dövmeden etkilenen tabaka yüzeye yakın bölgede koyu renkli olarak belirginleşmiştir. Deforme olmuş tabaka GBD işleminde ince iken ABD işleminde kalınlaşmış olup yaklaşık 30-40 µm kalınlıkta homojen seyredirken 100 µm kalınlığa kadar bölgesel olarak etkilerini devam ettirmektedir. Bu tabaka ve yakın bölgelerde tane ve sınırlarını gözlemlenmek zorlaşmıştır. Aşırı plastik deformasyonda, dislokasyon hareketleri ve ikizlenmeler sonrası alt tane oluşumları gözlemlenmekte, deformasyon şiddetiyle orantılı olarak, tane incelmeleri nano tane seviyelerine kadar düşmektedir [84].

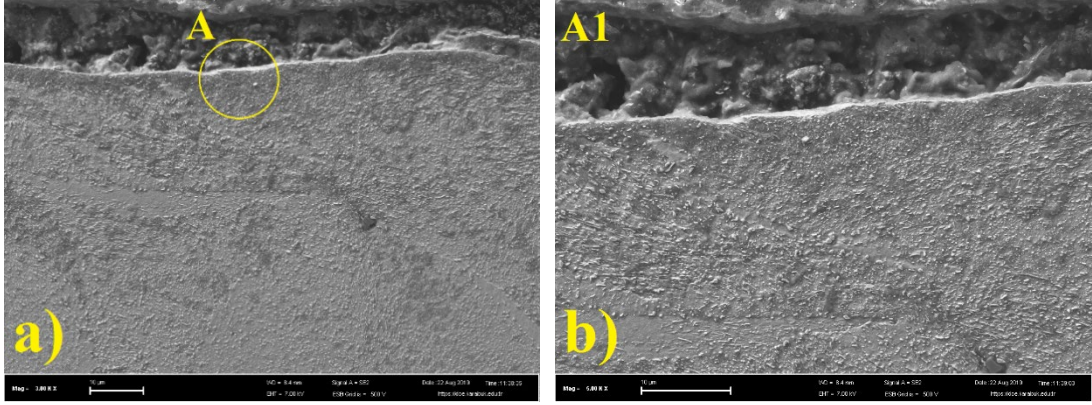
Dislokasyon yoğunluğu yüksek, aşırı deforme olmuş ince taneli yapıların optik ve SEM görüntüleriyle tespitinin zor olduğu ve detaylı HRTEM incelemesinin yapılması gerektiği literatürde vurgulanmıştır [85]. Ancak tez kapsamında yapılan detay SEM çalışmalarında İG ve ABD numunelerinde yüzeyden alınan görüntülerde sadece tanelerin değil Cr-Mo tabanlı çökeltilerin de boyutlarının küçüldüğü, bazı bölgelerde çok ince boyutlara eriştiği gözlemlenmiştir. Bu durum ABD işleminde etkili bir deformasyon ve tane incelme mekanizması oluşturduğunu göstermektedir.



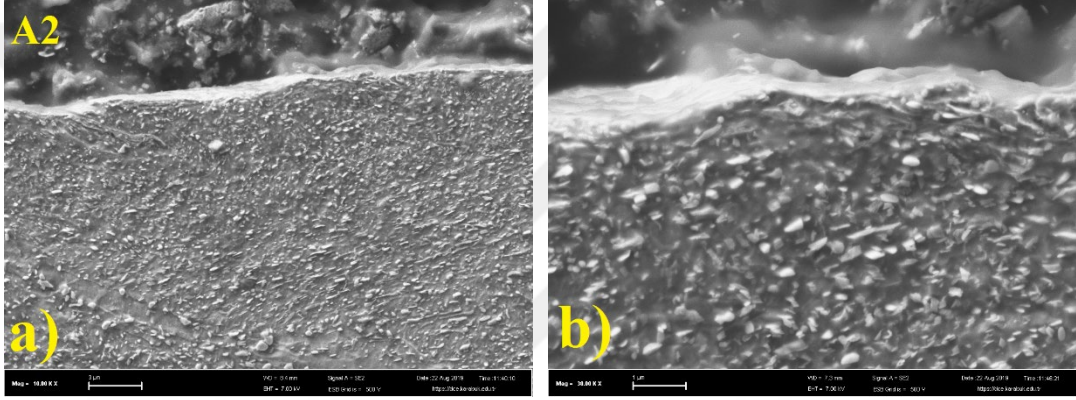
Şekil 4.6. GBD numunenin SEM görüntüleri a) 3000X, b) 5000X.



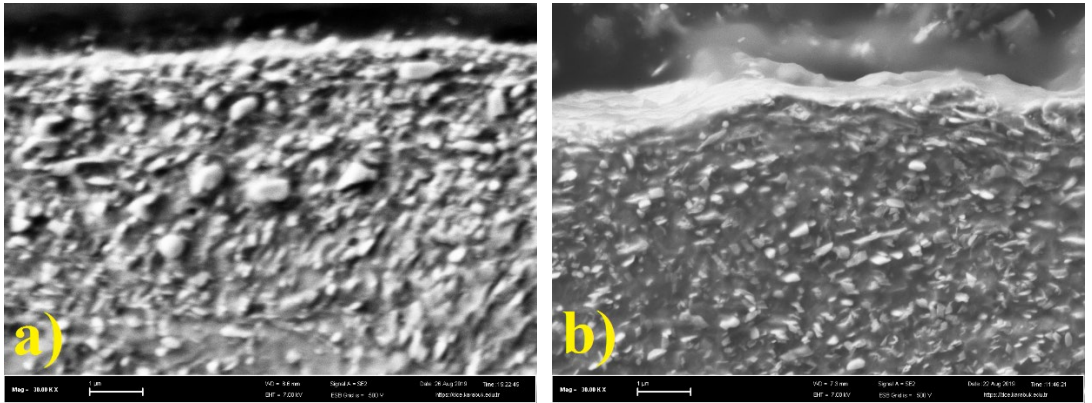
Şekil 4.7. GBD numunenin SEM görüntüleri a) 10000X, b) 30000X.



Şekil 4.8. ABD numuneninin SEM görüntüleri a) 3000X, b)5000X.



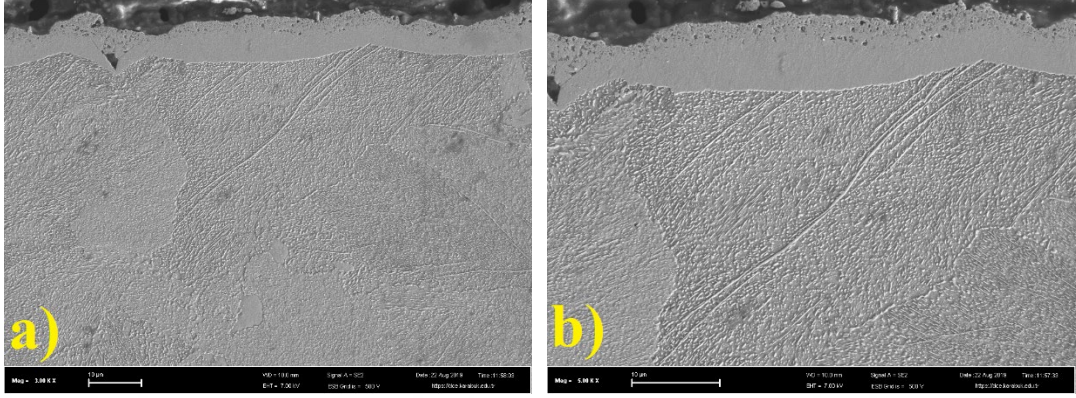
Şekil 4.9. ABD numuneninin SEM görüntüleri a) 10000X, b) 30000X.



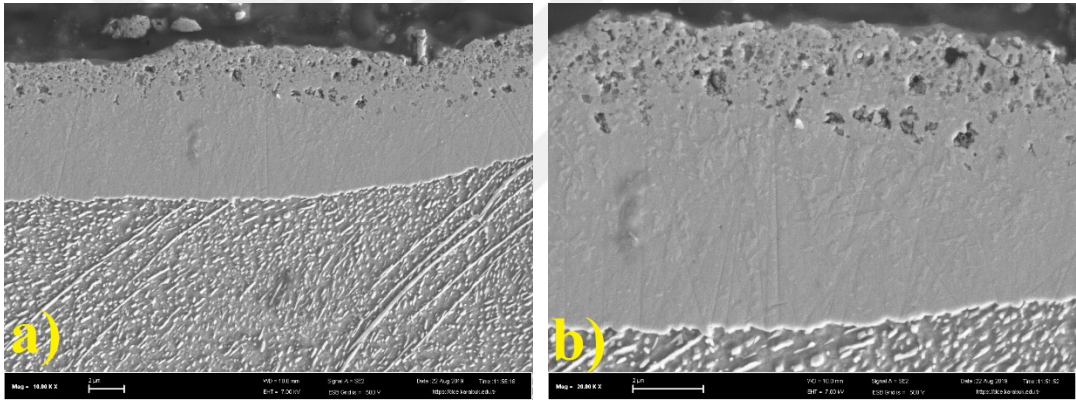
Şekil 4.10. İG ve ABD numunelerinin SEM görüntüleri (30000X) a) İG, b) ABD.

Şekil 4.11 ve 4.12’de PN numuneninin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. PN işlemi ile yüzeyde bileşke tabakanın varlığı dikkat çekmektedir. Bileşke tabakanın yüzeye yakın bölgesinde çökeltilerin varlığı söz konusudur. Cr-

Mn-Mo içerikli alaşımlı çeliklerde Cr-N bileşiklerinin varlığı literatürde yapılan çalışmalarda ortaya konmuştur [86,87].



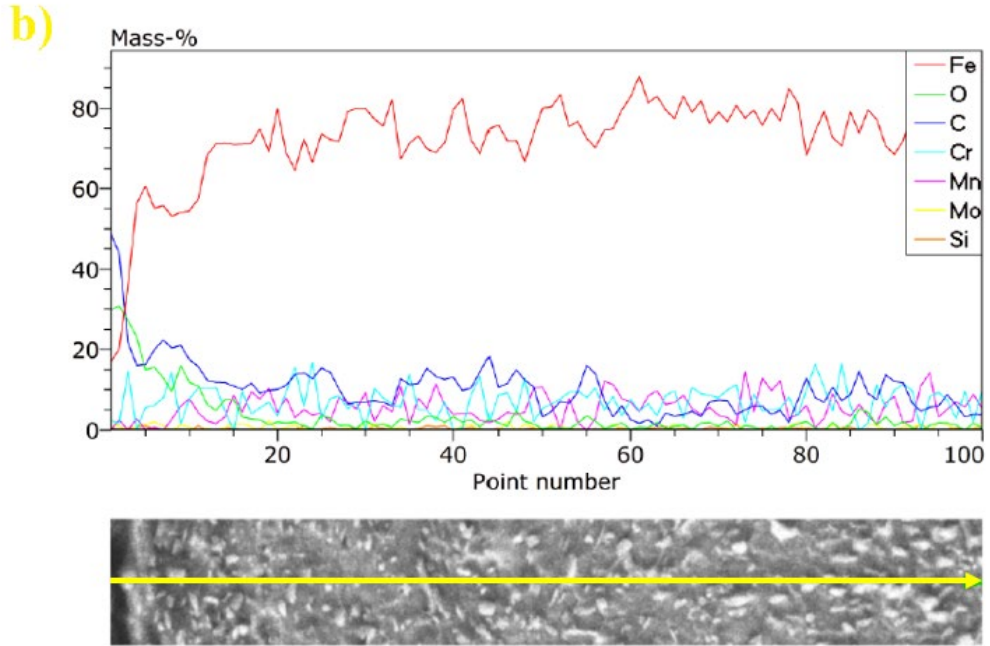
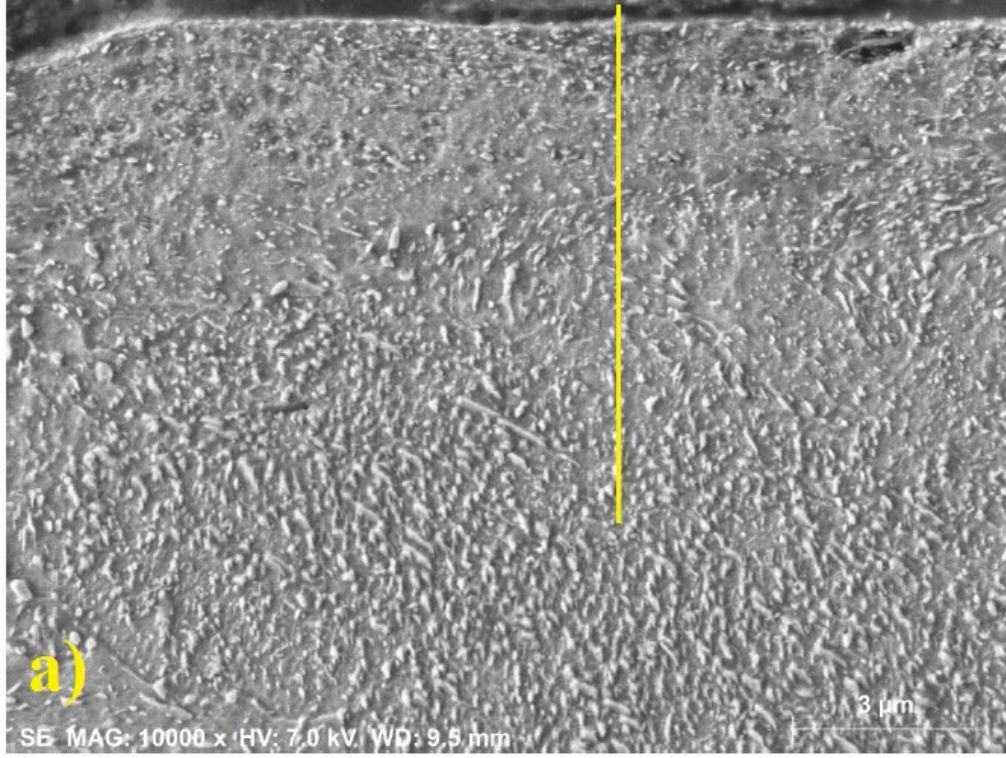
Şekil 4.11. PN numunenin SEM görüntüleri a) 3000X, b) 5000X



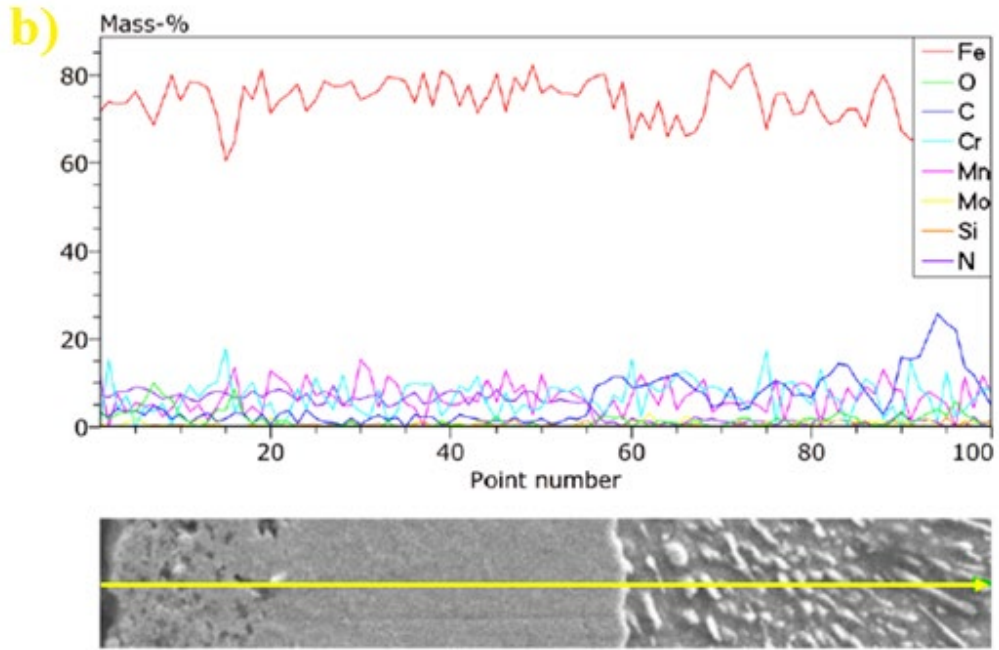
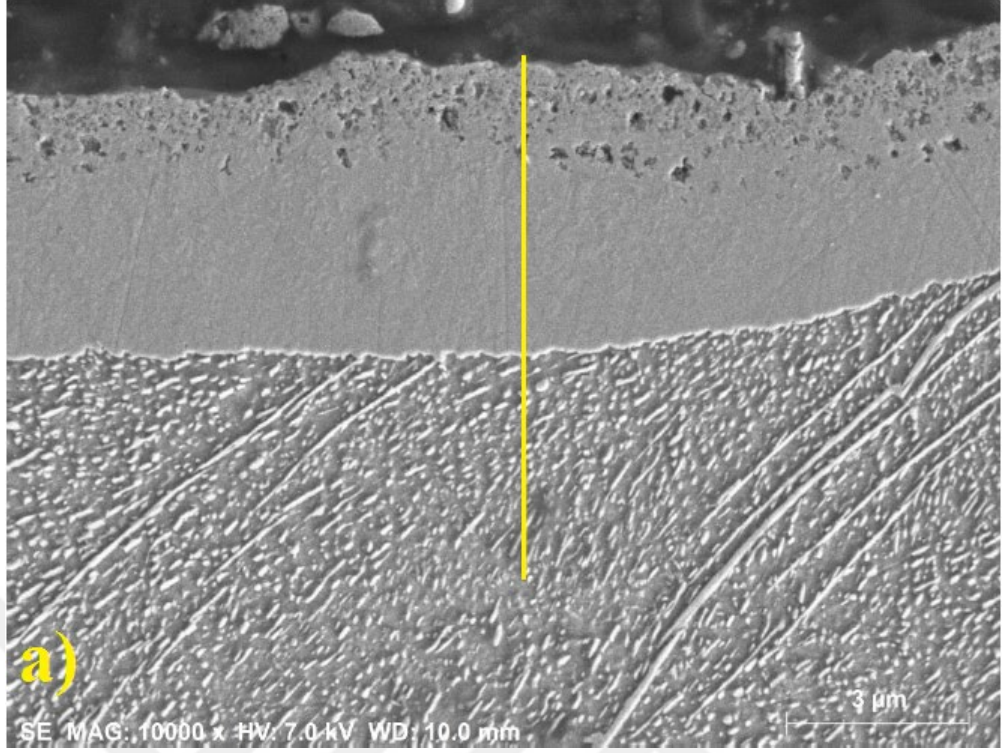
Şekil 4.12. PN numunenin SEM görüntüleri a) 10000X, b) 20000X.

Şekil 4.13 ve 4.14’te sırasıyla GBD ve PN numunenin EDAX analizleri verilmiştir. EDAX analizlerinde dövülmüş numune dikkate alındığında, karbonun yüzde dövülmüş bölgede fazla olduğu görülmektedir. EDAX analizlerinde karbon, azot ve oksijen gibi elementlerin oranlarının belirlenmesinin zor olduğu ve farklı hassas işlemlerin yapılmasının gerekliliği unutulmadan, bir yaklaşım sunulacak olursa karbon artışının özellikle aşırı plastik deformasyonun arttığı bölgelerde artış gösterdiği bu çalışmalarda vurgulanmıştır [88].

Nitrürlenmiş çelikde Fe-N bileşke yüzdesinin özellikle bileşke tabakada önemli ölçüde yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Cr-Mn-Fe bileşenlerinin varlığı da hem bileşke tabakada hemde difüzyon tabakasında etkindir.



Şekil 4.13. GBD numunenin EDAX analizi a) SEM fotoğrafı, b) elemental analiz.



Şekil 4.14. PN numunenin edax analizi a) SEM fotoğrafı, b) elemental analiz.

## 4.2. MİKROSERTLİK SONUÇLARI

Şekil 4.15'te İG, GBD, ABD ve PN numunelerinin mikrosertlik ölçümleri gösterilmiştir. AISI 4140 düşük alaşımlı çelik malzemeye uygulanan GBD, ABD ve PN işlemleri malzeme yüzeyinde sertlik artışına neden olmuştur. PN işleminin uygulandığı numunede diğer numunelere kıyasla sertlik değerlerinde daha etkili sonuçlar ortaya çıkmıştır. Yüzeyde kimyasal etkileşim sonucu Fe-N bileşiklerinin oluşumu ve yüzeye yakın bölgede difüzyon tabakasının varlığı sebebiyle sertlik artışı GBD ve ABD işlemine kıyasla oldukça yüksektir. PN ile yüzey sertliği 650 HV seviyelerine yükselmiştir. Yaklaşık olarak 400-450 µm derinliğe kadar etki gözlemlenmeye devam etmiştir. GBD ve ABD işlemlerinde yüzey sertliği yaklaşık olarak %30 oranında iyileşme göstermiştir. Yüzey sertliği her iki uygulama için 325 HV'ye yükselmiştir. Yalnız işlemin etki derinliği GBD için 100 µm iken ABD için 150 µm seviyelerindedir. Yaklaşık 150 µm'dan sonra sertlik değişiminde GBD ve ABD'nin etkileri tamamen kaybolmuştur. Termo-kimyasal yüzey sertleştirme işlemi PN'nin, mekanik yüzey işlemi GBD ve ABD'ye kıyasla sertlik üzerinde çok daha etkili olduğu kanaatine varılmıştır.

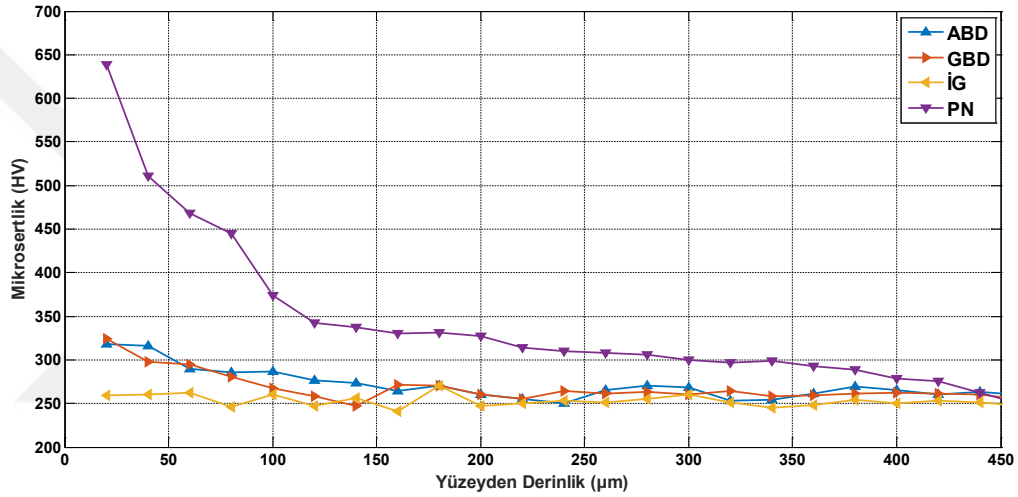
Umamura ve arkadaşları Plazma nitritli 410S ferritik-martensitik paslanmaz çeliklerin tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Yazarlar plazma nitrüleme işleminin mikrosertlik parametrelerinde artışa sebep olduğu sonucuna varmışlardır [89].

Kovacı ve arkadaşları, benzer şekilde AISI 4140 malzemeye yapış oldukları çalışmada plazma nitrüleme işleminin bilyalı dövme işlemine oranla yüzeyde daha yüksek sertlik oluşturduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca plazma nitrüleme sürelerinin ve Almen şiddetlerinin artması da sertlik üzerinde olumlu etki yapmışlardır. Ancak BD ve PN işlemlerinin beraber uygulanmasının sertlik üzerinde ekstra bir iyileşme göstermediği ortaya konulmuştur [9].

Ünal ve arkadaşları, Ti-6Al-4V alaşımına yaptıkları çalışmada ABD'nin PN'ye kıyasla yüzey sertliği üzerinde daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Ancak

sertlik derinliği bağlamında PN'nin daha etkili sonuçlar verdiği dikkat çekmektedir [90].

Biehler ve arkadaşları, parlatma ve bilyalı dövme ön işlemlili 304L ve 316L paslanmaz çeliklere PN uygulanmasını incelemişlerdir. Bu bağlamda AISI 4140 malzemeye benzer şekilde PN işleminin GBD ve parlatmaya oranla önemli ölçüde sertliği artırdığı gözlemlenmiştir. Özellikle yüksek sıcaklık PN (420°) uygulamasında GBD ön işleminin PN sonrası sertliği daha da artırdığı sonucu ortaya konulmuştur [91].



Şekil 4.15. Mikrosertlik ölçümleri.

### 4.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ SONUÇLARI

Numunelerin yüzey pürüzlükleri incelendiğinde genel olarak bilyalı dövme işleminin yüzey pürüzlüğünü artırdığı sonucuna varılmaktadır. Bu durum ABD işleminde oldukça yüksektir. GBD işleminde literatürde yapılan çalışmalarda belirli oranda sınırlanmışken AISI 4140 numunelerde oldukça yüksek çıkmıştır.

Kovacı vd. 16A şiddetinde AISI 4140 numunelerde yaklaşık 5 µm Ra değeri, 20A ve 24A'da ise 6 µm Ra değeri saptamışlardır. Yapılan çalışmada Almen şiddetinin düşük olmasına rağmen pürüzlülük değeri oldukça yüksektir [9]. Bu durumun yüzey doyurma oranı ve hava basıncı gibi parametrelerin dalgalanmasından

kaynaklanabileceği düşünülmektedir. PN'nin pürüzlülüğü düşürdüğü gözlemlenmiştir. İG numunenin yüzeyinin Ra değerinin yüksek olması bu durumun en önemli nedeni olarak gösterilebilir.

Kovacı vd. İG numunelerde oldukça düşük Ra değeri elde ettiklerinde PN sonrası Ra değerlerinde artış gözlemlenmiştir [9].

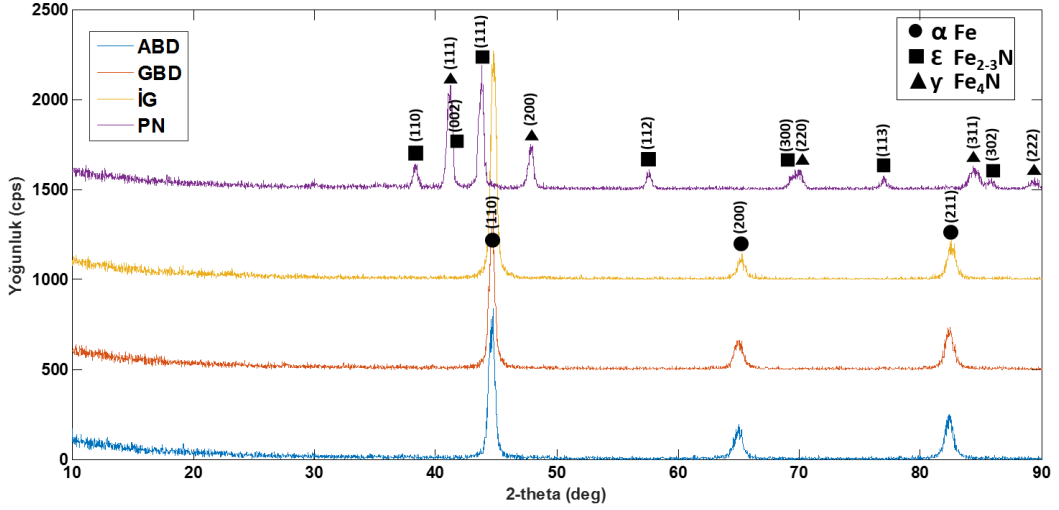
Çizelge 4.1. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları.

Numuneler	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rq ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )
İşlem görmemiş	3,231	4,088	26,700
BD	11,785	14,779	77,601
ABD	14,654	18,202	96,620
PN	2,072	2,687	18,371

#### 4.4. XRD SONUÇLARI

Şekil 4.16'da İG, GBD, ABD ve PN numunelerin XRD grafiği gösterilmektedir. XRD analizlerinde mekanik yüzey işlemi olan BD sonrası herhangi bir kimyasal değişim olmaması dolayısıyla herhangi bir faz veya element değişimine rastlanılmamaktadır. Plastik deformasyon etkisinden dolayı pik şiddetleri ve FWHM değerlerinde bir değişim söz konusudur. Yüzeyde tane boyutu azalması XRD analizlerinde piklerin genişliğini artırmaktadır. Bu durum, pikin yarı yüksekliğindeki genişliğin ölçülmesiyle belirlenmektedir. Çizelge 4.2'de İG ve GBD-ABD uygulanmış numunelerin farklı piklerde FWHM değerlerini göstermektedir. FWHM değerlerindeki artış, yüzeyde tane boyutunda bir azalma olduğunu göstermektedir [46,85,92].

Plazma nitrürleme sonrası yüzeyde  $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$  ve  $\text{Fe}_4\text{N}$  bileşiklerinin varlığı gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalarda  $\text{Fe}_4\text{N}$  bileşenin bileşke tabakasında yoğun olduğu vurgulanmıştır [88].



Şekil 4.16. İG, PN, GBD ve ABD numuneleri XRD grafiği.

Çizelge 4.2. İG, ABD ve GBD işlemleri sonrası yarı yükseklikteki pik genişliği değerleri.

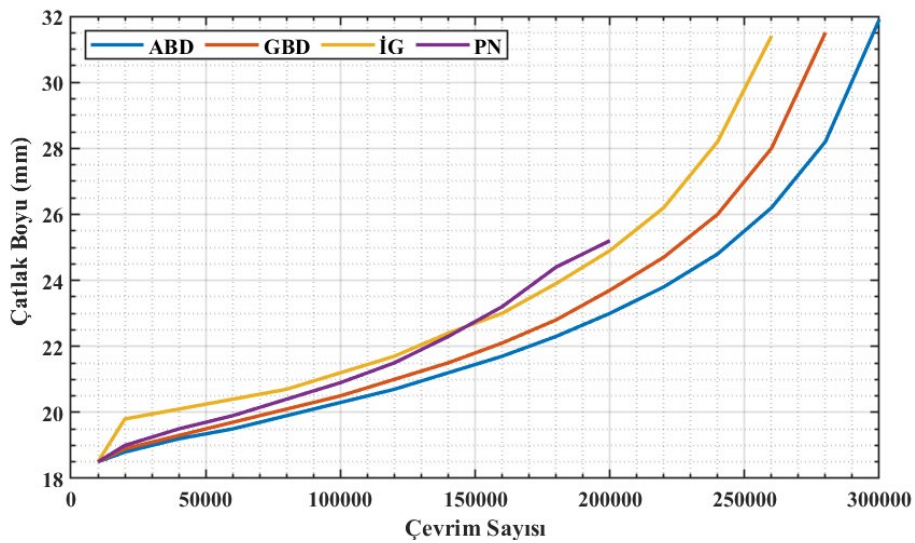
		FWHM (°)		
2θ	Pik	İşlem görmemiş	ABD	GBD
44,63	110	0,523	0,582	0,529
64,92	200	0,81	0,85	0,87
82,41	211	0,79	0,754	0,84

#### 4.5. YORULMA ÇATLAK İLERLEME SONUÇLARI

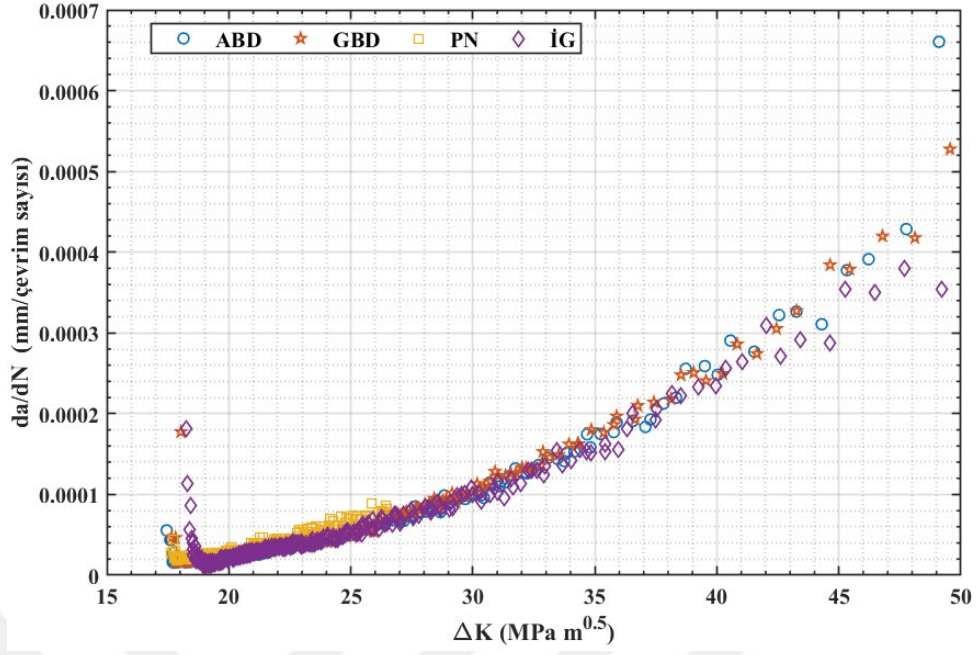
Şekil 4.17’de yorulma çatlak ilerleme ve yorulma çatlak ilerleme ömrü grafiği verilmiştir. İG numuneden alınan 24.3 mm çatlak boyu ve 190000 çevrim sayısı dikkate alındığında, FCG geleneksel bilyalı dövme işleminde 190000 çevrimde 23.25 mm çatlak boyutuna ulaşmış olup %4.3 iyileşme, ABD işleminde ise 190000 çevrimde 22.7 mm çatlak boyutuna ulaşarak % 6.6 iyileşme göstermiştir. Sonuçlar bilyalı dövme işleminin özellikle ABD’nin FCG ömrü bağlamında önemli etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, plazma nitrürleme prosesi için İG numuneye kıyasla dikkate değer bir durum gözlemlenememiştir. Plazma nitrürleme sonrası 190000 çevrimde 25.2 mm çatlak boyuna ulaşılmıştır. Şengül vd. yaptıkları çalışmalarda AISI 4140 numune için plazma nitrürleme işleminin çatlak ilerleme davranışını geciktirdiği sonucuna varmışlardır [93]. Bu çalışmada nitrürleme

süresinin diğer çalışmalara nazaran sertlik ve difüzyon derinliğini artırmak maksadıyla nispeten uzun tutulmasının sonuçları iyileştiremediği kanaatine varılmıştır. Pant vd. Ti-6Al-4V üzerinde yaptıkları FCGR testlerinde, lazerle dövme işleminin FCGR üzerinde önemli bir etkisi olduğu, 4A Almen şiddetinde yapılan GBD'nin kayda değer bir etki oluşturamadığı sonucuna varmışlardır [36]. Özellikle 4140, Ti-6Al-4V, 1080 gibi mukavim malzemelerde Almen şiddetinin yorulma dayanımı artırılması bağlamında etkili plastik deformasyonu oluşturacak şekilde belirlenmesi önem arz etmektedir. Kovacı vd. sertlik, artık gerilme yüklemesiyle FCGR arasında doğrudan bir korelasyon kurmanın zor olacağı sonucunu ortaya koymuştur [94]. Bu durum plazma nitrülmenin sonrasında FCGR değişiminin olmaması durumunu destekler niteliktedir.

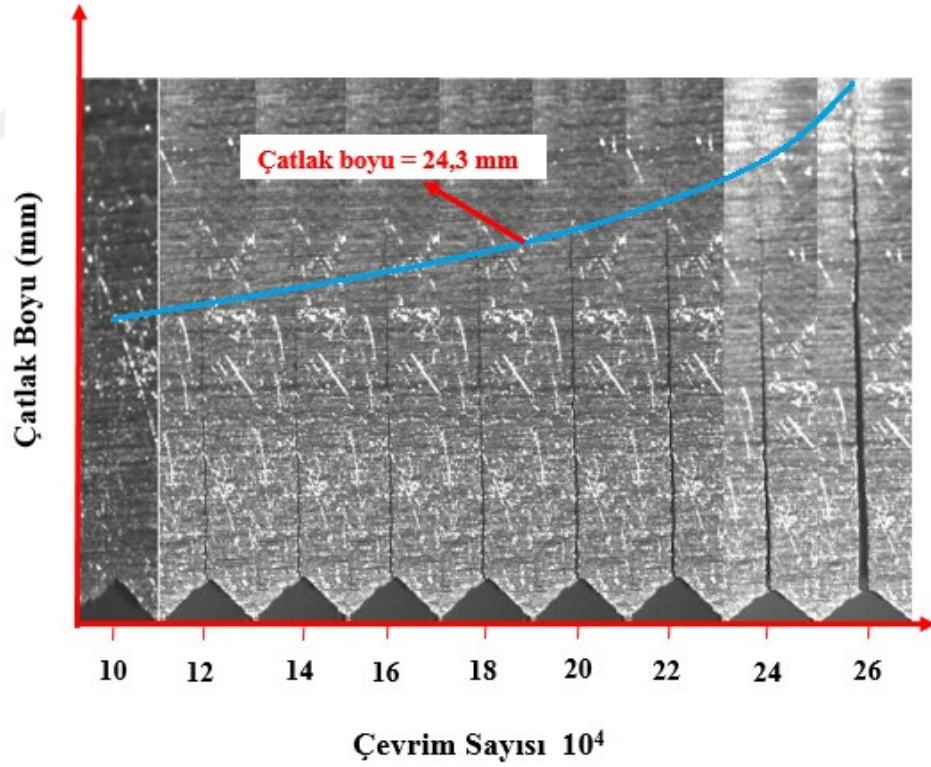
Şekil 4.18'de yorulma çatlak ilerleme oranı/çevrim sayısı-gerilme şiddet faktör grafiği verilmiştir. Grafikte BD işlemlerinin da/dN üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.19'dan 4.22'ye kadar sırasıyla 190000 çevrimde ölçülen çatlak boylarını gösteren çatlak görüntüleri verilmiştir. 190000 çevrimde İG çatlak boyu 24.3mm, GBD 23.25mm, ABD 22.7mm ve PN 25.2mm ölçülmüştür. Bu durum 520°C-12s süreli plazma nitrüleme işleminin yüzeyde çok kırılğan bir beyaz tabaka oluşturduğunu alt kısımda yüksek sertlikli ve basma gerilmeli tabakanın da çatlak ilerlemesini engelleyemediği hususunda bir kanaat oluşturmaktadır.



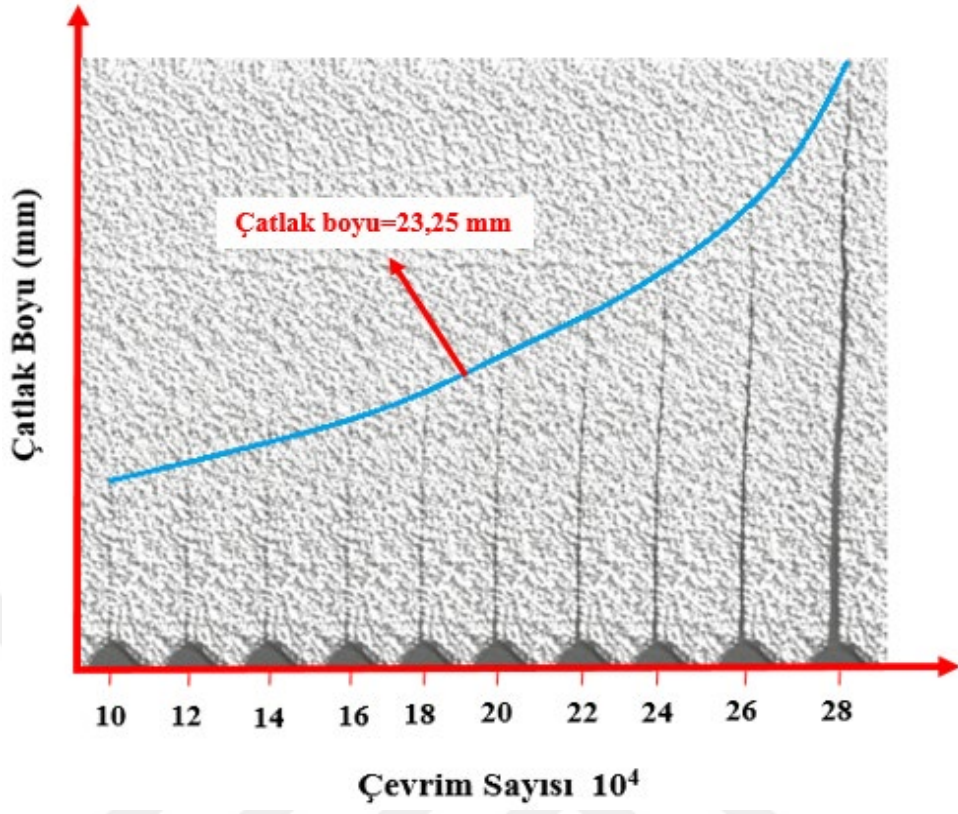
Şekil 4.17. İG, PN, GBD ve ABD numuneleri çatlak boyu-çevrim sayısı grafiği.



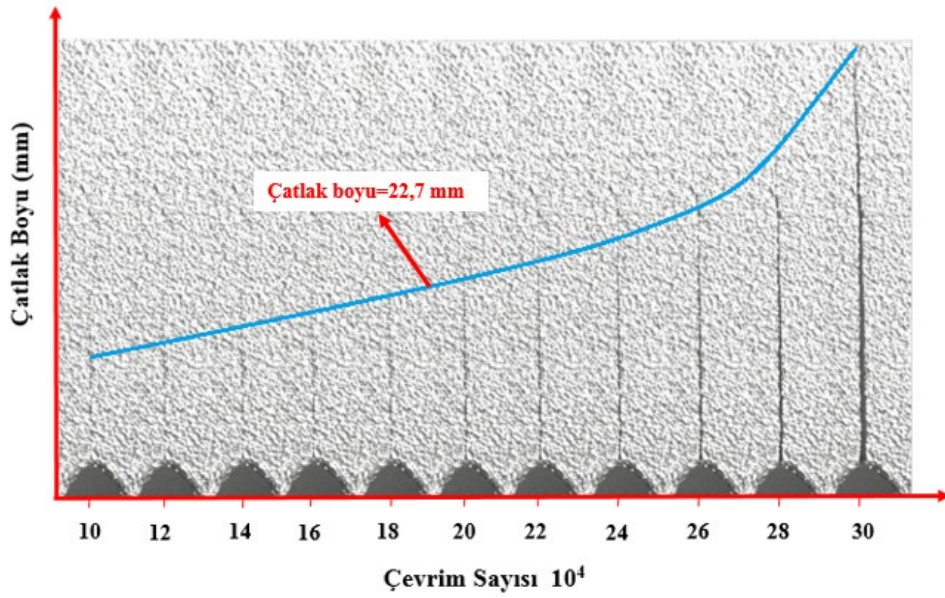
Şekil 4.18. Yorulma çatlak ilerleme  $da/dN$ - $\Delta K$  grafiği.



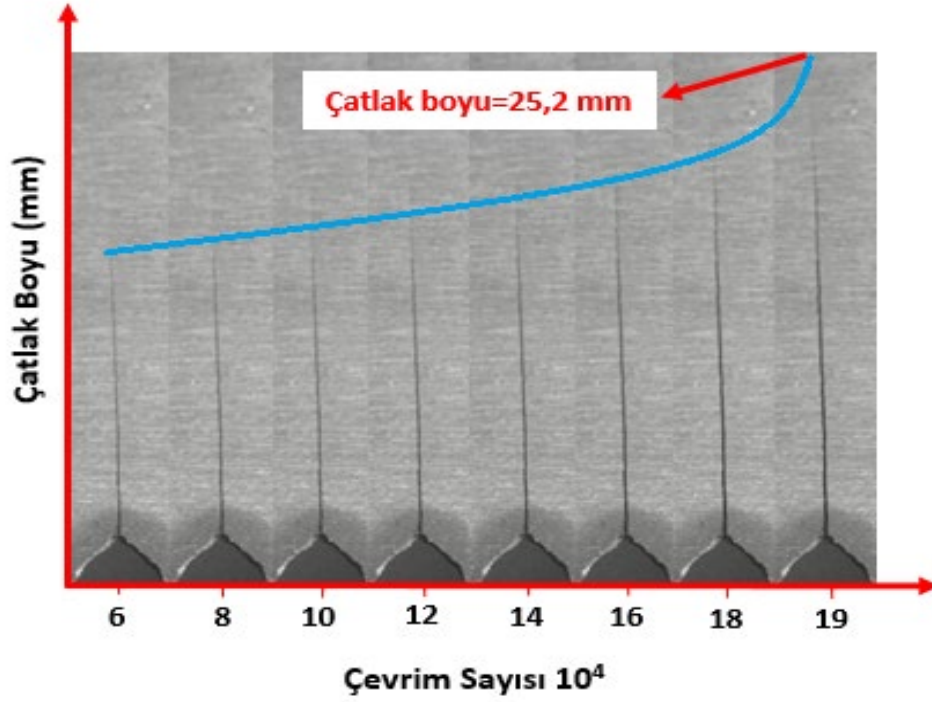
Şekil 4.19. İG 190.000 çevrimde çatlak boyu.



Şekil 4.20. GBD 190.000 çevrimde çatlak boyu.



Şekil 4.21. ABD 190.000 çevrimde çatlak boyu.

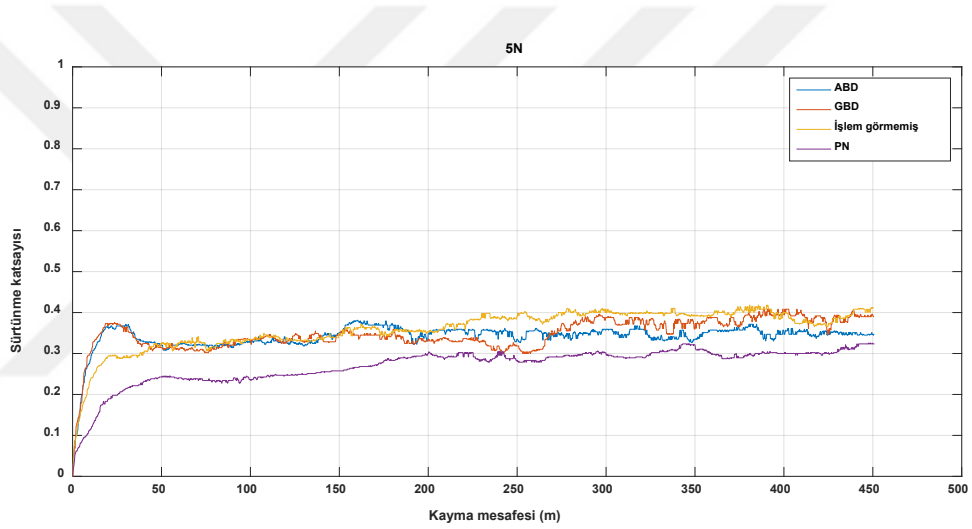


Şekil 4.22. PN 190.000 çevrimde çatlak boyu.

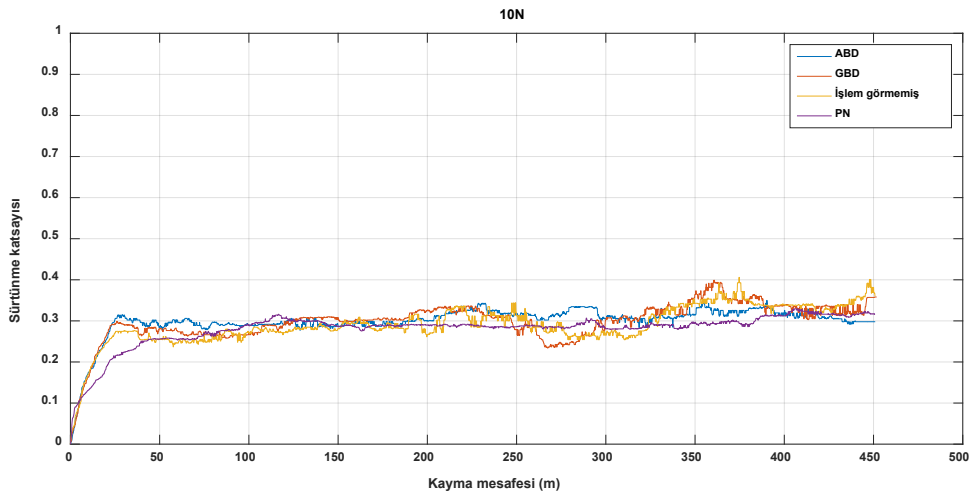
#### 4.5. AŞINMA SONUÇLARI

GBD, ABD ve PN uygulanmış malzemelerin aşınma davranışları 5N, 10N, 15N yük altında 500m mesafede incelenmiştir. Şekil 4.23'te 5N yük altında sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği gösterilmiştir. 5N yük altında PN uygulanmış malzemenin ortalama sürtünme katsayısı en düşüktür. Yüzey sertliğinin artmasının abrazif aşınmaya engel olması sonucu sürtünme katsayısının düştüğü çalışmalarda dikkat çekmektedir. Sürtünme katsayısı PN işlemi için ilk 150m mesafede daha düşükken, sonrasında bir miktar artış göstermektedir. Bu durum sertlik sonuçlarında ortaya çıkan değişimle de ilişkilidir. GBD ve ABD işlemi için de ortalama sürtünme katsayıları işlemsiz numunelere göre daha düşüktür. Yüzey sertleştirme etkilerinin özellikle düşük aşınma yüklerinde etkili olduğu söylenebilir. Ayrıca GBD işleminin 250m – 280m mesafeden sonra sürtünme katsayısının arttığı, ABD işleminin ortalama sürtünme katsayısını koruduğu söylenebilir. ABD işlemi sonrası sertlik ve ultra ince tane tabaka kalınlığının daha yüksek olması bu durumun nedeni olarak gösterilebilir. Şekil 4.24'te 10N yük altındaki sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği gösterilmektedir. 10N aşınma yükünde ortalama sürtünme katsayıları

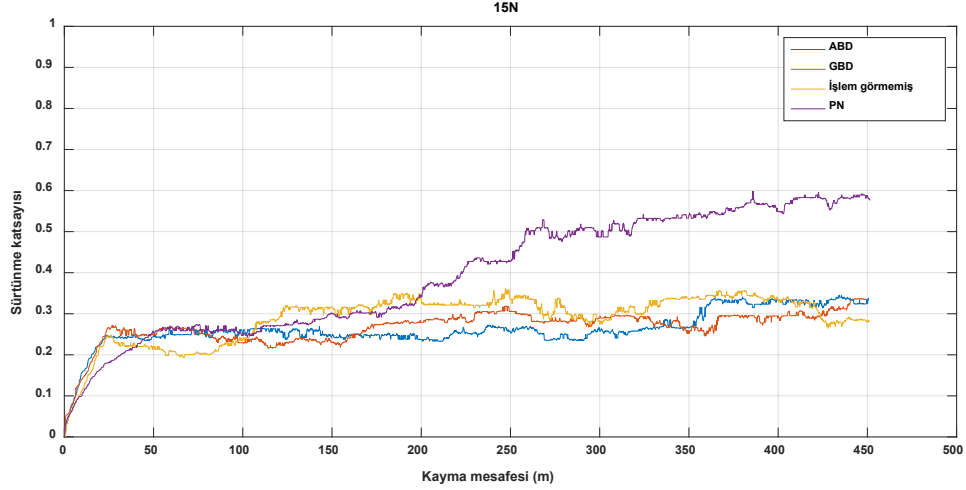
birbirine yakın olmasına rağmen PN işleminin en düşük olduğu gözlemlenmektedir. Kayma mesafesinin son kısmına doğru GBD ve işlem görmemiş numunenin sürtünme katsayısı değerindeki artış dikkat çekmektedir. Şekil 4.25'te 15N yük altında sürtünme katsayısı – kayma mesafesi grafiği gösterilmektedir. 15N yüklemde ortalama sürtünme katsayısında PN işlemi için önemli bir artış söz konusudur. Özellikle 200m'den sonra bu artışın ani olarak gerçekleşmesi beyaz tabaka – sert difüzyon tabakası – iç tabaka geçiş bölgesinde oluşan sertlik farkından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak o yükte yapılan aşınma oranı hesaplamalarında da en düşük aşınma kaybı PN işleminde görülmüştür. Şekil 4.26'da ortalama sürtünme katsayısı – uygulanan yük sütun grafiği gösterilmektedir.



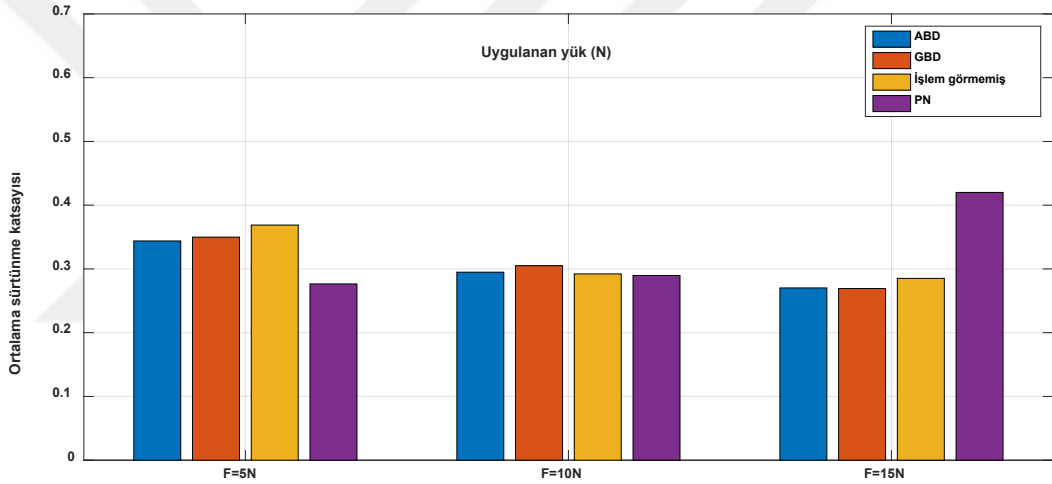
Şekil 4.23. 5N yük altında sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (500 m).



Şekil 4.24. 10N yük altında sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (500 m).

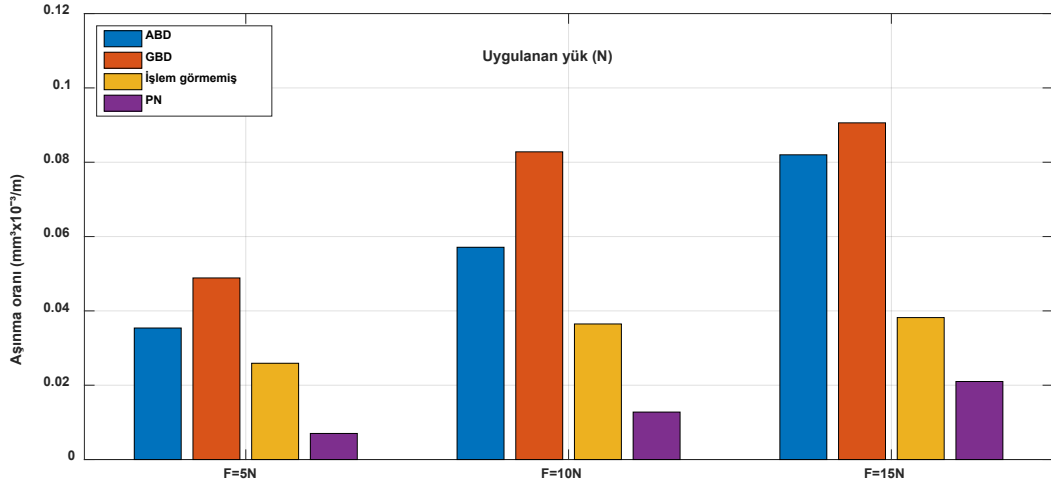


Şekil 4.25. 15N yük altında sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafiği (500 m).



Şekil 4.26. Ortalama sürtünme katsayısı-uygulanan yük sütun grafiği (500 m).

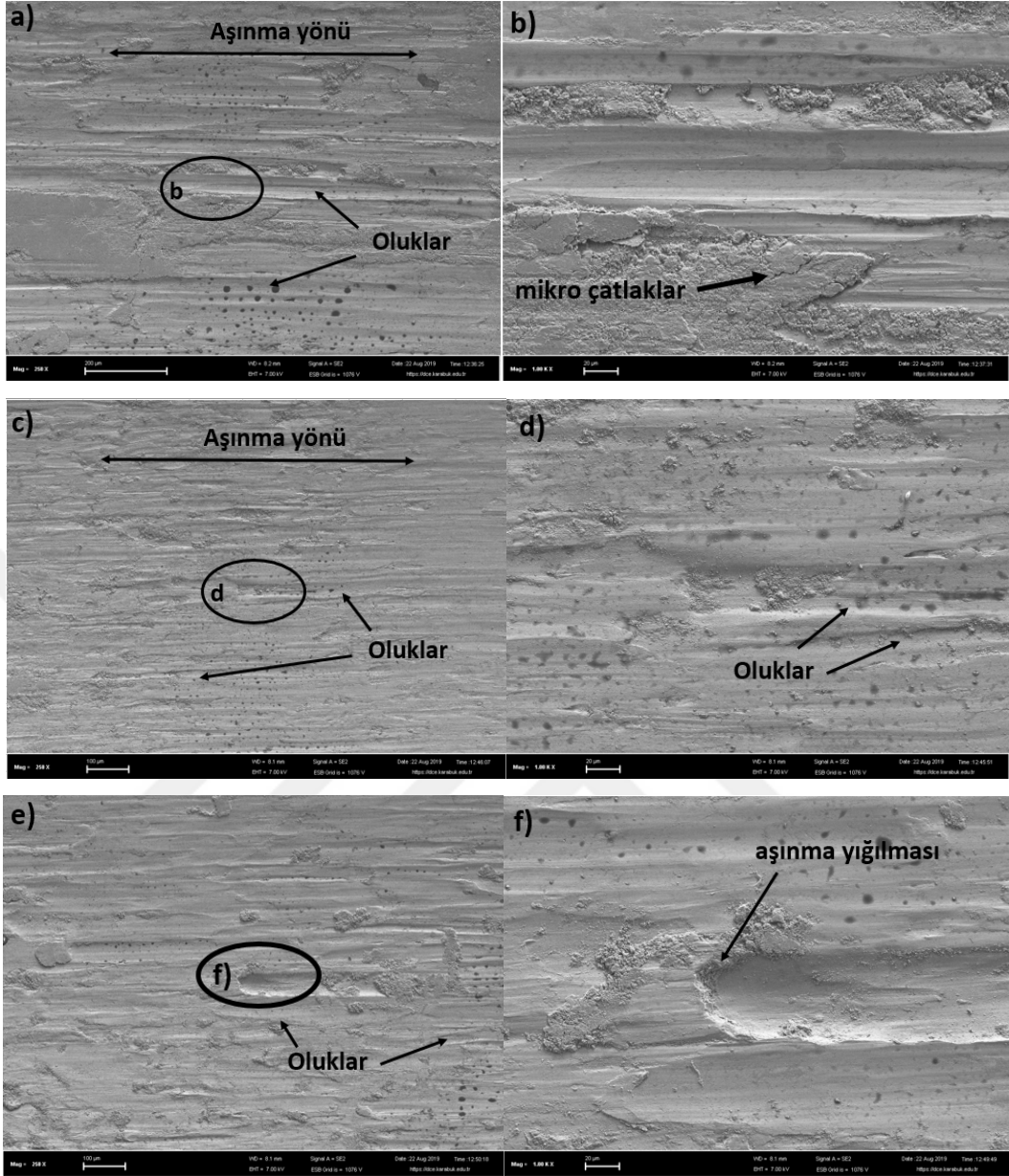
Şekil 4.27’de 5N, 10N ve 15N yükler altında aşınma oranı sütun grafiği gösterilmektedir. Aşınma kaybı incelendiğinde genel olarak PN işlemi sonrası en az hacim hacim kaybı yaşanmıştır. Yükün artmasıyla birlikte doğal olarak artmaktadır. Ancak GBD – ABD numunelerinde ortalama sürtünme katsayılarının düşük olmalarına rağmen aşınma oranlarının yüksek olması yüzey pürüzlülüğü ile değerlendirilmelidir. Yüzey pürüzlülüğünün artışı hacim kaybında artışa neden olabileceği düşünülmektedir. Aşınma kaybının GBD numunede daha çok olduğu ABD işleminin yük arttıkça GBD işlemi değerine yaklaştığı dikkat çekmektedir. Yükün artmasıyla sertleşme tabakasının geçildiği ve işlemlerin etkisinin azalması dolayısıyla birbirlerine benzer davranışlar gözlemlenmesi değerlendirilmektedir.



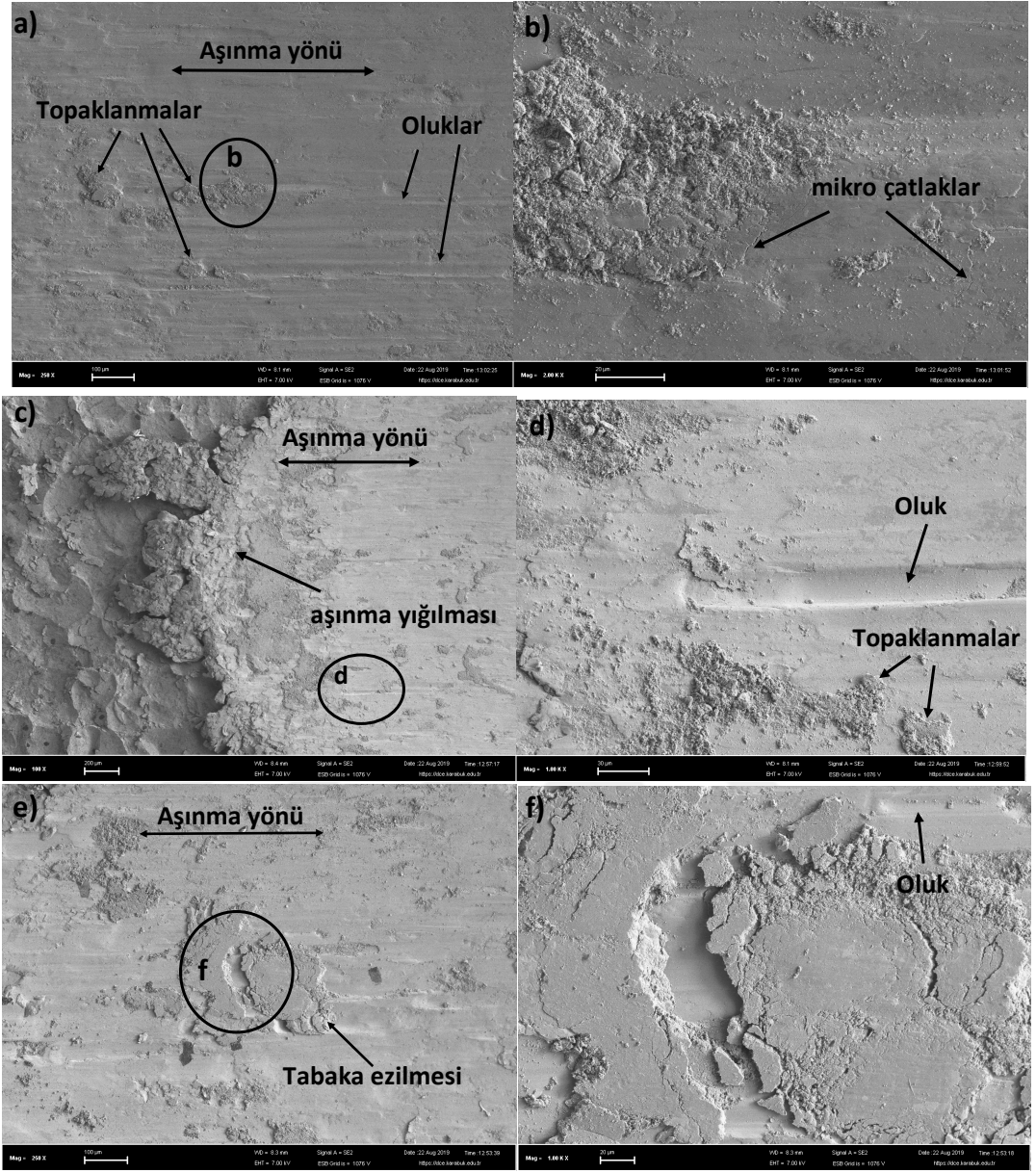
Şekil 4.27. 500m kayma mesafesi için aşınma oranı-uygulanan yük sütun grafiği.

Aşınma testlerinden elden edilen aşınma izlerine ait SEM görüntüleri Şekil 4.28, Şekil 4.29, Şekil 4.30 ve Şekil 4.31’de verilmiştir. Literatürde geleneksel düşük alaşımlı çeliklerin ciddi plastik deformasyona maruz kaldıkları ve bu durumun adhesif aşınmaya sebebiyet verdiği ortaya konmuştur [22]. Özellikle 15N yükte işlem görmemiş numunede aşınma izlerinin kenarında biriken aşınma yığılması işlem görmemiş numunenin adhesif aşınmaya maruz kaldığını kanıtlamaktadır.

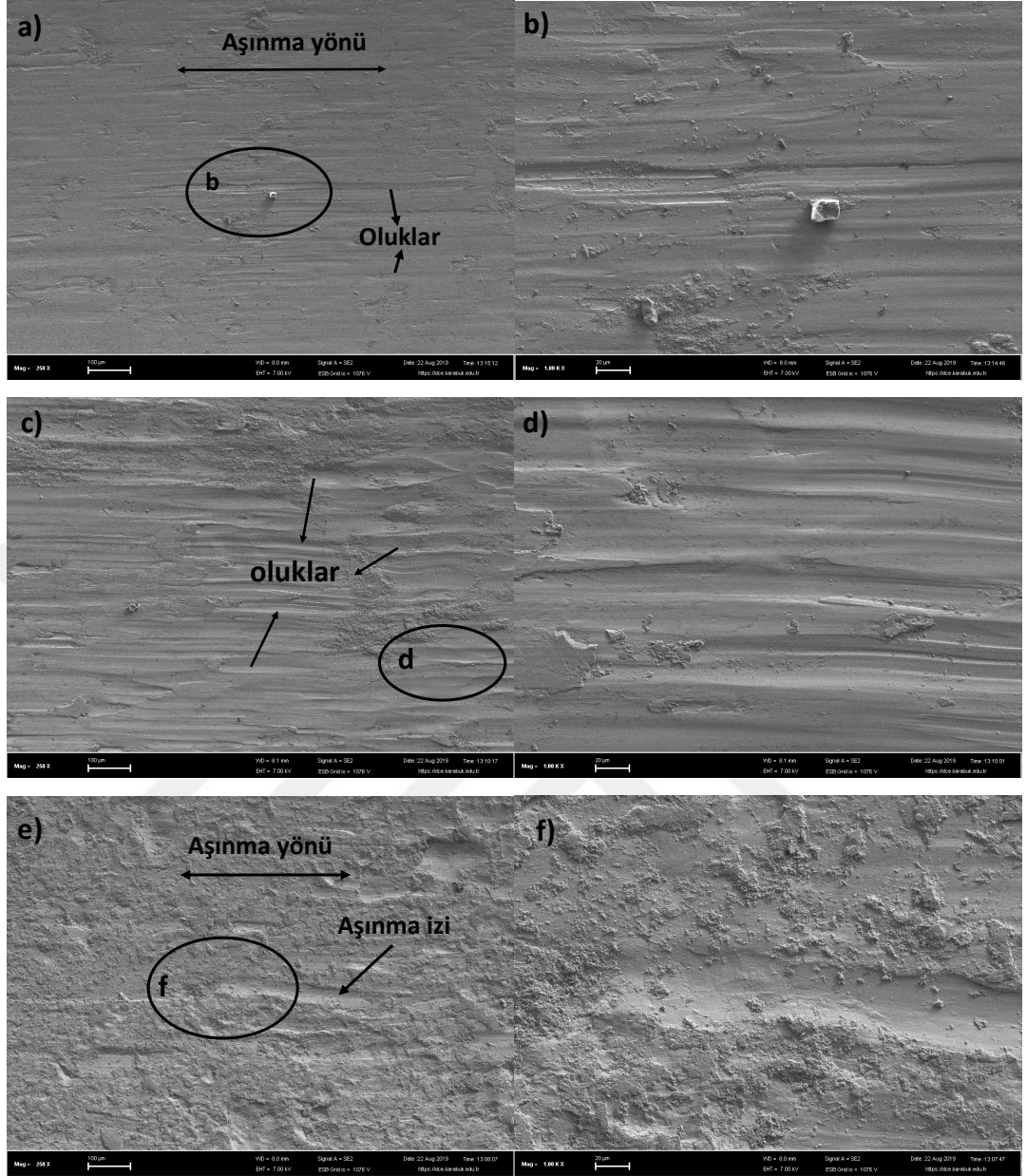
Ayrıca ABD ve GBD numuneler İG numuneye benzer aşınma davranışlar gösterdiği, adhesif aşınma izlerinin görüldüğü tespit edilmiştir. Bilyalı dövme işleminin yüzey ve altındaki bölgede oluşturduğu sertlik etkisinden dolayı İG numuneye kıyasla daha düşük aşınma derinliği oluşturduğu gözlemlenmektedir. PN işlemi sonrası yüzeyde oluşan sert difüzyon tabakasının plastik deformasyona ve adhesif aşınmaya direnç gösterdiği ortaya konmuştur. Numunelerin tümünde yükün artmasıyla beraber aşınma derinliğinin arttığı gözlemlenmiştir.



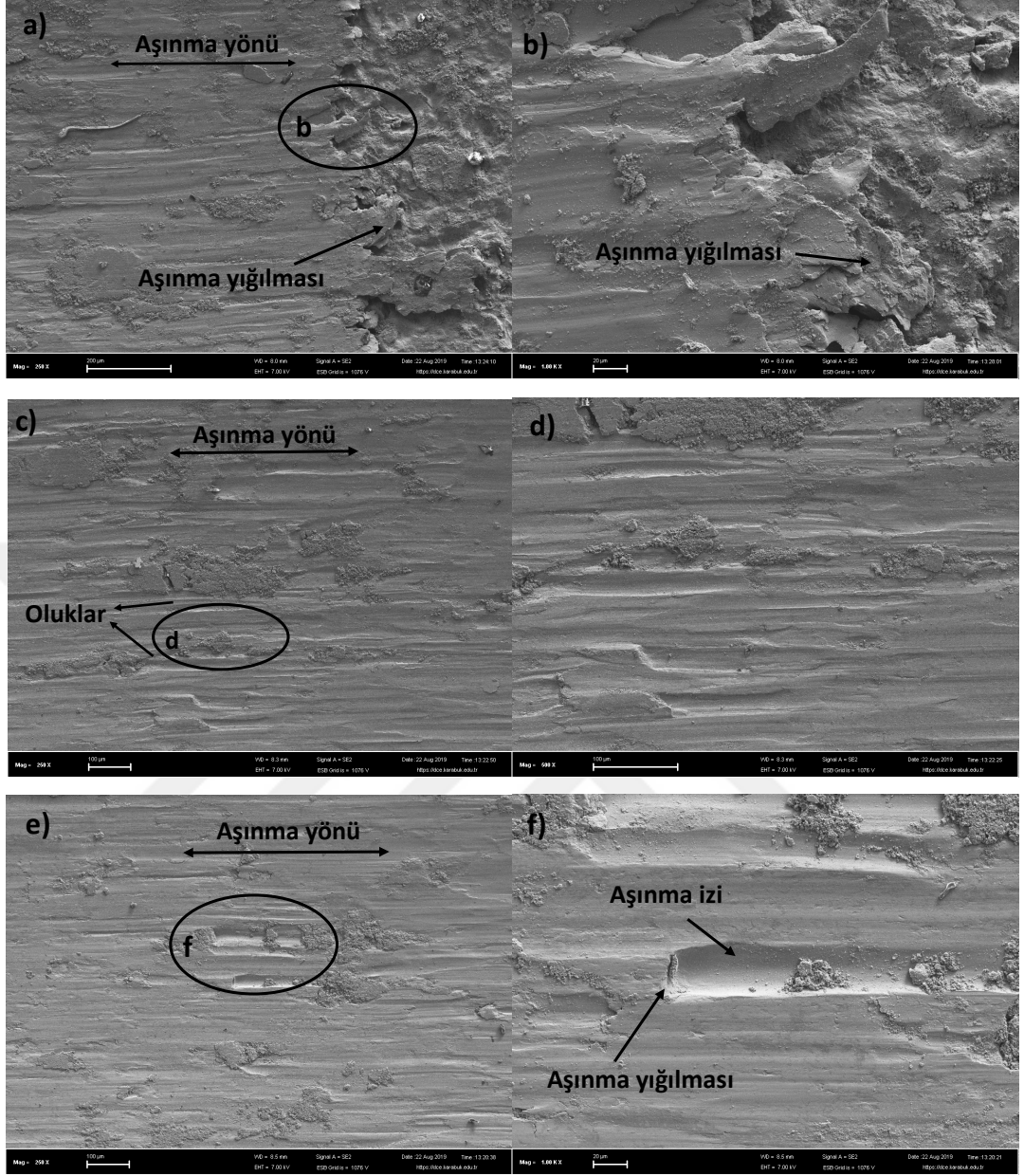
Şekil 4.28. a-b) 5N, c-d) 10N, e-f) 15N işlem görmemiş numunenin aşınma izleri SEM görüntüleri.



Şekil 4.29. a-b) 5N, c-d) 10N, e-f) 15N ABD numunenin aşınma izleri SEM görüntüleri.



Şekil 4.30. a-b) 5N, c-d) 10N, e-f) 15N ABD numunenin aşınma izleri SEM görüntüleri.



Şekil 4.31. a-b) 5N, c-d) 10N, e-f) 15N ABD numunenin aşınma izleri SEM görüntüleri.

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR

Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. GBD işlemi ile yüzeyin düzlüğü bilyaların çarpması ile kaybolmuş, yüzeyin hemen altında tane değişimi hususunda net fikir elde edilemese de değişim gözlemlenmiştir. ABD ile yüzeye yakın bölgede tane boyutunun dikkat çekmeyecek kadar küçüldüğü, tane sınırlarının kaybolduğu, iç kısımdan tamamen başka bir formata bürünen bir yapı olduğu kanaati oluşmuştur. ABD işleminde etkilenen tabakanın 50-60  $\mu\text{m}$  dolaylarında olduğu görülmüştür. Nitrüleme işlemi sonrası kesit yüzey incelendiğinde yaklaşık 5  $\mu\text{m}$  kalınlığında bir nitrür tabakası göze çarpmaktadır. Bileşke tabakanın yüzeye yakın bölgesinde çökeltilerin varlığı söz konusudur.
2. EDAX analizlerinde dövülmüş numune dikkate alındığında, karbonun yüzdece dövülmüş bölgede fazla olduğu görülmektedir. EDAX analizlerinde karbon, azot ve oksijen gibi elementlerin oranlarının belirlenmesinin zor olduğu ve farklı hassas işlemlerin yapılmasının gerekliliği unutulmadan, bir yaklaşım sunulacak olursa karbon artışının özellikle aşırı plastik deformasyonun arttığı bölgelerde artış gösterdiği bu çalışmada vurgulanmıştır.
3. PN işleminde yüzeyde kimyasal etkileşim sonucu Fe-N bileşiklerinin oluşumu ve yüzeye yakın bölgede difüzyon tabakasının varlığı sebebiyle sertlik artışı GBD ve ABD işlemlerine kıyasla oldukça yüksektir. GBD ve ABD işlemlerinin sertlik değerlerine etkisi benzer sonuçlar ortaya çıkardığı, yalnız işlemin etki derinliği dikkate alındığında ABD işlemi GBD işlemine göre daha olumlu sonuçlar vermiştir. PN işlemi hem sertlik değerleri hem etki

derinliği parametreleri dikkate alındığında diğer işlemlere kıyasla daha olumlu sonuçlar ortaya koymuştur.

4. Yüzey pürüzlülüğü dikkate alındığında ABD işleminin diğer işlemlere kıyasla daha yüksek sonuçlar ortaya çıkardığı kanaatine varılmıştır. PN işleminin yüzey pürüzlülüğüne olumlu sonuçları gözlemlenmiştir.
5. XRD analizlerinde mekanik yüzey işlemi olan BD sonrası herhangi bir kimyasal değişim olmaması dolayısıyla herhangi bir faz veya element değişimine rastlanmamaktadır. Plastik deformasyon etkisinden dolayı pik şiddetleri ve FWHM değerlerinde bir değişim söz konusudur. PN işlemi sonrası yüzeyde Fe<sub>2</sub>-3N ve Fe<sub>4</sub>N bileşiklerinin varlığı gözlemlenmiştir.
6. Yorulma çatlak ilerleme sonuçları dikkate alındığında bilyalı dövme işleminin özellikle ABD'nin FCG ömrü bağlamında önemli etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ancak PN prosesi için İG numuneye kıyasla dikkate değer bir durum gözlemlenememiştir. GBD işlemi İG'ye kıyasla %4,3 iyileşme, ABD işleminde ise %6,6 oranında bir iyileşme olduğu sonucuna varılmıştır.
7. Aşınma sonuçları incelendiğinde en düşük hacim kaybının PN işleminde olduğu görülmektedir. PN işlemi sonrası oluşan sert difüzyon tabakasının ve yüzey kalitesinin aşınma direncini artırdığı söylenebilir. ABD ve GBD işlemlerindeki aşınma oranının yüksek çıkması yüzey pürüzlülüğü ile ilişkilendirilebilir.

## KAYNAKLAR

1. Özcan, B., "Microstructure Control of AISI 4135 For Optimization of Fatigue and Fracture Performance", Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2018).
2. Çalışkan, S., "Determination of shot peening effect on fatigue behaviour of AISI 4140 steel by non-destructive measurement of surface residual stresses", Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2018).
3. Kesti, E., "Ç-4140 Çeliğinin, Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Su Verme Ortamının Etkilerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, (2009).
4. Yang, Q., Zhou, W., Niu, Z., Zheng, X., Wang, Q., Fu, X., Chen, G. and Li, Z., "Effect of different surface asperities and surface hardness induced by shot-peening on the fretting wear behavior of Ti-6Al-4V", *Surface And Coatings Technology*, 349: 1098–1106 (2018).
5. Efe, Y., "AA7075 alüminyum alaşımlarının farklı tip yüzey işlemleri ile yorulma davranışlarının iyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2018).
6. Öncel, E., "Yüzey Sertleştirme İşlemlerinin AISI 4140 çeliğinin yorulma dayanımına etkisinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, (2011).
7. Çelik, D., "SAE 4340 Çeliğinde ısıtma işlem parametrelerinin yorulma ve mikro yapı üzerine etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, (2018).
8. Tabatabaei, A. M., "Fracture and fatigue crack growth characterization of conventional and head hardened railway rail steels", Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2014).
9. Kovacı, H., Hacısalihoğlu, İ., Yetim, A. F. and Çelik, A., "Effects of shot peening pre-treatment and plasma nitriding parameters on the structural, mechanical and tribological properties of AISI 4140 low-alloy steel", *Surface And Coatings Technology*, 358: 256–265 (2019).
10. Bilge, H., "AISI 4140 çeliğinde yorulma çatlak ilerlemesinin sistemin doğal frekansına etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bolu, (2015).

11. Ateş, B., "Katı Çözelti Sertleşmesinin Küresel Grafitli Dökme Demirin Dönel Eğmeli Yorulma Davranışına Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2013).
12. Newman, J. C., Anagnostou, E. L. and Rusk, D., "Fatigue and crack-growth analyses on 7075-T651 aluminum alloy coupons under constant- and variable-amplitude loading", *International Journal Of Fatigue*, 62: 133–143 (2014).
13. Li, L., Shen, L. and Proust, G., "Fatigue crack initiation life prediction for aluminium alloy 7075 using crystal plasticity finite element simulations", *Mechanics Of Materials*, 81: 84–93 (2015).
14. Ayvaz, S., "Cr-Mo Çeliklerinin Aşınma ve Korozif Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2013).
15. Yüksel, F., "Alüminyum Matrisli B4C Partikül Takviyeli Aşınma Direnci Yüksek Kompozit Malzemelerin Aşınma Özelliklerinin Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 302 (2014).
16. Kosa, E., "Çeliklerin Eroziyon-Abrazif Aşınmasında Aşındırıcı Tane Büyüklüğünün Aşınma Direncine Etkisi", Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2016).
17. Wagner, L., "Mechanical surface treatments on titanium, aluminum and magnesium alloys", *Materials Science And Engineering: A*, 263 (2): 210–216 (1999).
18. Akyıldız, H. K., "Bilyalı dövmenin Fe + %2 Cu+ %0.5 C toz metal çeliğin yorulma davranışına etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (1998).
19. Ünal, O., "Bilyalı Dövme İşleminin Tane Boyutuna Etkisinin Deneysel İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bartın, (2011).
20. Balyalı, H. A., "Metalik Malzemelerin Bilyalı Dövme Uygulaması Sonrası Tribolojik Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2015).
21. Ülker, Ş., "Puls Plazma Nitrürleme Cihazının Tasarımı ve AISI 52100 Çeliğinin Plazma Nitrürlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, (2006).
22. Kovacı, H., Hacısalihoğlu, İ., Yetim, A. F. and Çelik, A., "Effects of shot peening pre-treatment and plasma nitriding parameters on the structural, mechanical and tribological properties of AISI 4140 low-alloy steel", *Surface & Coatings Technology*, 358: 256–265 (2018).

23. Kahraman, F. and Karadeniz, S., "Characterization and wear behavior of plasma nitrided nickel based dental alloy", *Plasma Chemistry And Plasma Processing*, 31 (4): 595–604 (2011).
24. Özdemir, U. and Erten, M., "Plazma (İYON) nitrüleme yöntemi ve malzeme özellikleri üzerindeki etkisi", *Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 2: 41–48 (2003).
25. Meletlioğlu, E., "Ti-6Al-4V İmplant Malzemesinin Yorulma ve Fretting Yorulması Davranışı Üzerine Ball Burnishing Mekanik Yüzey İşleminin Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, (2014).
26. Turan, M. Y., "Mekanik Yüzey İşlemlerinin Malzemelerin Yorulma Davranışına Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, (2011).
27. Juijerm, P. and Altenberger, I., "Fatigue performance enhancement of steels using mechanical surface treatments", *Journal Of Metals, Materials And Minerals*, 17 (1): 59–65 (2007).
28. Akbulut, M., "AISI 1045 Çeliğinin Yorulma Davranışı Üzerinde Mekanik Yüzey İşleminin Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, (2011).
29. Harbelioğlu, E., "Bilyalı Dövmenin AA7075 Alaşımının Yüzey Özelliklerine ve Erozyon Aşınma Davranışına Etkileri", Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, (2018).
30. Al-Obaid, Y. F., "Shot peening mechanics: experimental and theoretical analysis", *Mechanics Of Materials*, 19 (2–3): 251–260 (1995).
31. Alkan, Z., "Alüminyum Alaşımlarında Bilyalı Dövmenin Fiziksel, Mekanik ve Yüzey Özelliklerine Etkisi", Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, (2014).
32. "Tork Metal | Çelik Bilya", <http://www.torkmetal.com/urun.asp?id=20> (2019).
33. "Shot Peening Aircraft, Aerospace, Automotive, Turbine Engine Components", <https://www.progressivesurface.com/shotpeening.htm#definition> (2019).
34. Lindemann, J., Buque, C. and Appel, F., "Effect of shot peening on fatigue performance of a lamellar titanium aluminide alloy", *Acta Materialia*, 54 (4): 1155–1164 (2006).
35. Hatamleh, O., "A comprehensive investigation on the effects of laser and shot peening on fatigue crack growth in friction stir welded AA 2195 joints", *International Journal Of Fatigue*, 31 (5): 974–988 (2009).

36. Pant, B. K., Pavan, A. H. V., Prakash, R. V. and Kamaraj, M., "Effect of laser peening and shot peening on fatigue striations during FCGR study of Ti6Al4V", *International Journal Of Fatigue*, 93: 38–50 (2016).
37. Ünal, O., "Aşırı plastik deformasyonun metalik malzemelerde difüzyon karakteristiklerine etkisi", Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2015).
38. Başaran, A., "Toz Metal Parçalara Isıl ve Mekanik Yüzey İşlemlerin Birlikte Uygulanabilirliğinin Araştırılması", Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 14–15 (2007).
39. Savaş, S., "Monitoring Variation of Surface Residual Stresses in The Shot-Peened Steel Components by Magnetic Barkhausen Noise Method", Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2010).
40. Unal, O. and Varol, R., "Almen intensity effect on microstructure and mechanical properties of low carbon steel subjected to severe shot peening", *Applied Surface Science*, 290: 40–47 (2014).
41. Asquith, D. T., Yerokhin, A. L., Yates, J. R. and Matthews, A., "Effect of combined shot-peening and PEO treatment on fatigue life of 2024 Al alloy", *Thin Solid Films*, 515 (3): 1187–1191 (2006).
42. Widmark, M. and Melander, A., "Effect of material, heat treatment, grinding and shot peening on contact fatigue life of carburised steels", *International Journal Of Fatigue*, 21 (4): 309–327 (1999).
43. Unal, O. and Varol, R., "Surface severe plastic deformation of AISI 304 via conventional shot peening, severe shot peening and repeening", *Applied Surface Science*, 351: 289–295 (2015).
44. Trško, L., Bokůvka, O., Nový, F. and Guagliano, M., "Effect of severe shot peening on ultra-high-cycle fatigue of a low-alloy steel", *Materials & Design*, 57: 103–113 (2014).
45. Bagherifard, S., Fernandez-Pariente, I., Ghelichi, R. and Guagliano, M., "Effect of severe shot peening on microstructure and fatigue strength of cast iron", *International Journal Of Fatigue*, 65: 64–70 (2014).
46. Maleki, E. and Unal, O., "Roles of surface coverage increase and re-peening on properties of AISI 1045 carbon steel in conventional and severe shot peening processes", *Surfaces And Interfaces*, 11: 82–90 (2018).
47. Maawad, E., Sano, Y., Wagner, L., Brokmeier, H.-G. and Genzel, C., "Investigation of laser shock peening effects on residual stress state and fatigue performance of titanium alloys", *Materials Science And Engineering: A*, 536: 82–91 (2012).

48. Pavan, M., Furfari, D., Ahmad, B., Gharghour, M. A. and Fitzpatrick, M. E., "Fatigue crack growth in a laser shock peened residual stress field", *International Journal Of Fatigue*, 123: 157–167 (2019).
49. Wu, B., Zhang, J., Zhang, L., Pyoun, Y.-S. and Murakami, R., "Effect of ultrasonic nanocrystal surface modification on surface and fatigue properties of quenching and tempering S45C steel", *Applied Surface Science*, 321: 318–330 (2014).
50. Amanov, A., Pyun, Y.-S. and Sasaki, S., "Effects of ultrasonic nanocrystalline surface modification (UNSM) technique on the tribological behavior of sintered Cu-based alloy", *Tribology International*, 72: 187–197 (2014).
51. Ma, C. andani, M. T., Qin, H., Moghaddam, N. S., Ibrahim, H., Jahadakbar, A., Amerinatanzi, A., Ren, Z., Zhang, H., Doll, G. L., Dong, Y., Elahinia, M. and Ye, C., "Improving surface finish and wear resistance of additive manufactured nickel-titanium by ultrasonic nano-crystal surface modification", *Journal Of Materials Processing Technology*, 249: 433–440 (2017).
52. Yılmaz, U., "Gaz Ortamında Nitrürleme ve Nitrokarbürleme Yüzey Sertleştirme İşlemlerinin AISI 4140, 1.7131 ve 1.8550 Çeliklerinin Aşınma, Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, (2016).
53. Uluköy, A., "21NiCrMo2 (AISI 8620) Çeliğinden Yapılmış Dişli Çarklara Karbürleme ile Beraber Borlama İşleminin Uygulanması", Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, (2005).
54. Coşar, D., "8622RH ve 20MnCr5 Çeliklerinin Aşınma ve Mekanik Özelliklerine Gaz Karbürleme İşleminin Etkisinin İncelenmesi", *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2014).
55. Hamzaoğlu, E. E., "Plazma Nitrürlemenin WC-Co Kesici Uçların Performansına Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2008).
56. Güven, Ş. Y., Delikanli, K. and Öncel, E., "AISI 4140 Çeliğine Uygulanan İyon Nitasyon Yüzey Sertleştirme İşleminin Yorulma Dayanımına Etkisi", *SDÜ Teknik Bilimler Dergisi*, (2014).
57. Díaz-Guillén, J. C., Vargas-Gutiérrez, G., Granda-Gutiérrez, E. E., Zamarripa-Piña, J. S., Pérez-Aguilar, S. I., Candelas-Ramírez, J. and Álvarez-Contreras, L., "Surface Properties of Fe4N Compounds Layer on AISI 4340 Steel Modified by Pulsed Plasma Nitriding", *Journal Of Materials Science & Technology*, 29 (3): 287–290 (2013).
58. Karakan, M., "Gaz Karışımlarının İyon Nitürasyon İşlemi Üzerine Etkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, (1998).

59. Sevil, C., "Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin İyon Nitrürasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, 3–5 (2008).
60. Gavgalı, M., Çelik, A., Efeoğlu, İ. and Demir, Ü., "İyon Nitrürlenmiş AISI 8620 Çeliğinin Korozyon Davranışının İncelenmesi", Makine-İmalat Teknolojileri Sempozyumu, 14-15 Ekim 1999, Konya, .
61. Develi, F., "Plazma Nitrüleme ve Borlama ile Yüzey İşlem Uygulanmış AISI 8620 Çeliğinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, (2010).
62. Kaya, M. T., "SAE 4140 (42CrMo4) ıslah çeliğinin bileşik gerilmeli yorulma davranışının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yozgat, (2016).
63. Uzun, M., "Yorulma Çatlak İlerlemesi ve Çatlak Davranışının Nümerik Analizi", Yüksek Lisans Tezi, *Firat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (2002).
64. Yurtoğlu, M. E., "Mode II Fatigue Crack Growth Behaviour and Mode II Fracture Toughness of 7050 Aluminium Alloy in Two Orientations", Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 487–492 (2013).
65. McKeighan, P. C. and Ranganathan, N., "Fatigue Testing and Analysis Under Variable Amplitude Loading Conditions", *ASTM International*, United States Of America, 26-34 (2005).
66. Eskizeybek, V., "Paslanmaz Çelik Elyaf Takviyeli Alüminyum Kompozitlerde Yorulma Çatlak İlerlemesi", Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, (2006).
67. Günaydın, B., "Yüzey Çatlaklı Cam/Polyester Kompozit Malzemelerde Yorulma Çatlak İlerlemesi", Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, (2003).
68. Şen, G., "Determination of Fracture and Fatigue Behaviour of 4340 Steel", Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2015).
69. Gözütok, E., "Paslanmazçeliklerin Tıg Kaynağında Argon-Hidrojen Gaz Karışımının Birleştirmelerin Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2009).
70. "Fatigue Crack Growth Analysis Review | Engineers Edge", [https://www.engineersedge.com/material\\_science/fatigue\\_crack\\_growth\\_analysis\\_review\\_10071.htm](https://www.engineersedge.com/material_science/fatigue_crack_growth_analysis_review_10071.htm) (2019).

71. Gemi, L., "Düşük Hızlı Darbe Hasarlı Filaman Sarım Hibrid Boruların İç Basınç Altında yorulma Davranışı", Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, (2014).
72. Gören, Ş., "The Effects of Heat Treatment on Microstructure, Hardness and Fatigue Behaviour of (AMS5659) 15-5 Precipitation Hardenable Stainless Steel", Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2018).
73. Aksoy, M., "Ticari Yarı Römork Tanker Şasi Yorulma Dayanımının Gerçek Yol Sinyalleri ile Bilgisayar Ortamında İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2014).
74. Jia, X., Grejtak, T., Krick, B. and Vermaak, N., "Design of composite systems for rotary wear applications", *Materials & Design*, 134: 281–292 (2017).
75. Selçuk, N., "Toprak İşleme Tarım Makinelerinde Kullanılan 5630 Kalite Çeliğinin Aşınma Direncinin Değişik Yüzey Prosesleri ile İyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 203 (2014).
76. İldaş, G., "Fe - Esaslı Sert Kaplamaların 1.2714 Takım Çeliğinin Mikroyapı ve Aşınma Özelliklerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, (2017).
77. Demirtaş, S., "İçten Yanmalı Motorda Üst Ölü Noktada Meydana Gelen Aşınma Mekanizmalarının Deneysel Olarak İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2017).
78. Güleç, A., "Elektrik Ark Püskürtme Yöntemi ile FeCrCMn Esaslı Kompozit Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu", Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2014).
79. Özkader, M. Ç., "Isıl İşlemlerle AISI 4140 Çeliğinin Abrasiv Aşınmasının Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Çorum, (2015).
80. Bagherifard, S. and Guagliano, M., "Fatigue behavior of a low-alloy steel with nanostructured surface obtained by severe shot peening", *Engineering Fracture Mechanics*, 81: 56–68 (2012).
81. Hassani-Gangaraj, S. M., Moridi, A., Guagliano, M. and Ghidini, A., "Nitriding duration reduction without sacrificing mechanical characteristics and fatigue behavior: The beneficial effect of surface nano-crystallization by prior severe shot peening", *Materials & Design*, 55: 492–498 (2014).
82. Li, Y., Wang, L., Zhang, D. and Shen, L., "The effect of surface nanocrystallization on plasma nitriding behaviour of AISI 4140 steel", *Applied Surface Science*, 257 (3): 979–984 (2010).

83. Kovacı, H., Baran, Ö., Yetim, A. F., Bozkurt, Y. B., Kara, L. and Çelik, A., "The friction and wear performance of DLC coatings deposited on plasma nitrided AISI 4140 steel by magnetron sputtering under air and vacuum conditions", *Surface And Coatings Technology*, 349: 969–979 (2018).
84. Mineta, T. and Sato, H., "Simultaneously improved mechanical properties and corrosion resistance of Mg-Li-Al alloy produced by severe plastic deformation", *Materials Science And Engineering: A*, 735: 418–422 (2018).
85. Estrin, Y. and Vinogradov, A., "Extreme grain refinement by severe plastic deformation: A wealth of challenging science", *Acta Materialia*, 61 (3): 782–817 (2013).
86. Shen, L., Wang, L., Wang, Y. and Wang, C., "Plasma nitriding of AISI 304 austenitic stainless steel with pre-shot peening", *Surface And Coatings Technology*, 204 (20): 3222–3227 (2010).
87. Unal, O., Maleki, E. and Varol, R., "Plasma nitriding of gradient structured AISI 304 at low temperature: Shot peening as a catalyst treatment", *Vacuum*, 164: 194–197 (2019).
88. Sauvage, X., Wilde, G., Divinski, S. V., Horita, Z. and Valiev, R. Z., "Grain boundaries in ultrafine grained materials processed by severe plastic deformation and related phenomena", *Materials Science And Engineering: A*, 540: 1–12 (2012).
89. Umemura, M. T., Varela, L. B., Pinedo, C. E., Cozza, R. C. and Tschiptschin, A. P., "Assessment of tribological properties of plasma nitrided 410S ferritic-martensitic stainless steels", *Wear*, 426–427: 49–58 (2019).
90. Unal, O., Maleki, E. and Varol, R., "Effect of severe shot peening and ultra-low temperature plasma nitriding on Ti-6Al-4V alloy", *Vacuum*, 150: 69–78 (2018).
91. Biehler, J., Hoche, H. and Oechsner, M., "Corrosion properties of polished and shot-peened austenitic stainless steel 304L and 316L with and without plasma nitriding", *Surface And Coatings Technology*, 313: 40–46 (2017).
92. Fu, P., Chu, R., Xu, Z., Ding, G. and Jiang, C., "Relation of hardness with FWHM and residual stress of GCr15 steel after shot peening", *Applied Surface Science*, 431: 165–169 (2018).
93. Şengül, A. B. and Çelik, A., "Effect of plasma nitriding on fatigue crack growth on AISI 4140 steel under variable amplitude loading", *Surface And Coatings Technology*, 205 (21–22): 5172–5177 (2011).
94. Kovacı, H., Yetim, A. F., Baran, Ö. and Çelik, A., "Fatigue crack growth analysis of plasma nitrided AISI 4140 low-alloy steel: Part 1-constant amplitude loading", *Materials Science And Engineering: A*, 672: 257–264 (2016).

## ÖZGEÇMİŞ

Mehmet ÖZTÜRK 1991 yılında Elazığ'da doğdu; ilk ve orta öğrenimini Elazığ'da tamamladı. İsmail Rüştü Olcay Anadolu Lisesi'nden 2009 yılında mezun oldu. 2011 yılında Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde öğrenime başlayıp 2017 yılında mezun oldu. Aynı yıl içerisinde Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitimine başladı.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : Karabük Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü  
Balıklarkayası Mevkii / KARABÜK  
Tel : (532) 558 21 50  
E-posta : ozturkmhmet@gmail.com