



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİLYALI DÖVME İŞLEMİNİNDEN SONRA NİTRÜRLEMENİN

AISI 4140 ÇELİĞİNİN KURU KAYMA AŞINMA DİRENCİNE

ETKİSİ

SONER ÖZDEMİR

DANIŞMAN

PROF. DR. M. SABRİ GÖK

BARTIN-2022



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİLYALI DÖVME İŞLEMİNİNDEN SONRA NİTRÜRLEMENİN AISI 4140
ÇELİĞİNİN KURU KAYMA AŞINMA DİRENCİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SONER ÖZDEMİR

BARTIN-2022

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Prof. Dr. Mustafa Sabri GÖK danışmanlığında hazırlamış olduğum “BİLYALI DÖVME İŞLEMİNİNDEN SONRA NİTRÜRLEMENİN AISI 4140 ÇELİĞİNİN KURU KAYMA AŞINMA DİRENCİNE ETKİSİ ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

14.09.2022

Soner ÖZDEMİR

ÖNSÖZ

“BİLYALI DÖVME İŞLEMİNİN SONRA NİTRÜRLEMENİN AISI 4140 ÇELİĞİNİN KURU KAYMA AŞINMA DİRENCİNE ETKİSİ” adlı bu çalışma, Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır. Yüksek Lisans tezinin bilimsel danışmanlığını yapan Prof. Dr. Sayın Mustafa Sabri GÖK’a konunun belirlenmesinde, bu araştırmanın baştan sona yazım aşamasında göstermiş olduğu ilgi ve desteği için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Varlıklarına hep şükrettiğim bu zorlu süreçte her zaman yanımda olan beni hep yüreklendiren en zorlandığım an da bile başaracağıma yürekten inanan canım eşim Doç.Dr. Burçin GÖKKURT ÖZDEMİR ve oğlum Yiğit Osman ÖZDEMİR’e sonsuz teşekkürlerimi ve minnetlerimi sunuyorum.

Son olarak bu tezin yazılmasında desteğini aldığım Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırmaları Projeleri Koordinasyon Birimine çok teşekkür ederim. Bu tez, Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2021-FEN-CY-005 proje numarası ile desteklenmiştir.

Soner ÖZDEMİR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİLYALI DÖVME İŞLEMİNİN DEN SONRA NİTRÜRLEMENİN AISI 4140 ÇELİĞİNİN KURU KAYMA AŞINMA DİRENCİNE ETKİSİ

Soner ÖZDEMİR

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. M. Sabri GÖK

Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sabri ALKAN

Bartın-2022, sayfa: xi+69

Bilyalı dövme, metallerin yorulma ve gerilmeli korozyona karşı mukavemetlerini arttırmak amacı ile uygulanan bir mekanik yüzey işlemidir. Bilyalı dövme işlemi metallerde hem sertlik artışına hem de yüzeyde ve yüzeyin altında basma kalıntı gerilmesine sebep olan soğuk veya ılık olarak uygulanabilen bir işlemdir. Bu çalışmada bilyalı dövme işleminin den sonra nitrürlemenin AISI 4140 çeliğinin kuru kayma aşınma direncine etkisi incelenmiştir. Çalışmada silindirik halde temin edilen AISI 4140 çelik malzemeden aşınma ve metalografi numuneleri hazırlanmıştır. Numunelerin bir kısmı hiçbir işleme tabi tutulmayıp, geri kalanlara belirlenen parametrede dövme ve nitrürleme işlemi uygulanmıştır. Çalışmada nitrürlü ve nitrürsüz AISI (American Iron and Steel Institute) 4140 çeliğinin oda sıcaklığında kuru kayma aşınma davranışı incelenmiştir. Deneyler Ball-on-Disk aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Numunelerde meydana gelen hacim kayıplarını belirlemek için optik mikroskop kullanılmıştır. Ayrıca aşınmış numunelerin yüzey morfolojisi SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ile incelenmiştir. Sonuç olarak, bu çalışmada bilyalı dövme işleminin, AISI 4140 çeliğinin adhesiv aşınma özelliği üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: AISI 4140, yüksek sıcaklık aşınması, kuru-kayma

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

THE EFFECT OF NITRIDING ON THE DRY SLIDING WEAR RESISTANCE OF AISI 4140 STEEL AFTER SHOT PEENING

Soner ÖZDEMİR

Bartın University

Graduate School

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Thesis Advisor: Prof. Dr. M. Sabri GÖK

Co-Consultant: Asst. Prof. Dr. Sabri ALKAN

Bartın-2022, pp: xi+69

Shot peening is a mechanical surface treatment applied to increase the resistance of metals against fatigue and stress corrosion. Shot peening is a process that can be applied cold or warm, which causes both an increase in hardness in metals and a pressure residue on and under the surface. In this study, the effect of nitriding on the dry-sliding wear resistance of AISI 4140 steel after shot peening was investigated. In this study, abrasion and metallography samples were prepared from AISI 4140 steel material supplied in cylindrical form. Some of the samples were not be processed at all; Forging and nitriding were applied to the rest in the specified parameter. In our study, the dry sliding wear behavior of nitride and nitride AISI 4140 steel at room temperature was investigated. The experiments were carried out on the Ball-on-Disk wear device. An optical microscope was used to determine the volume losses in the samples. Surface morphology of the corroded samples was examined by SEM (Scanning Electron Microscope. As a result, in this study, it has been determined that nitriding after shot peening has an effect on the dry sliding wear resistance property of AISI 4140 steel.

Keywords: AISI 4140, high temperature wear, dry-sliding wear

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BEYANNAME	ii
ÖNSÖZ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
TABLolar DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Aşınma	2
1.1.1 Aşınma Türleri.....	3
1.1.1.1 Adhesiv Aşınma	4
Şekil 2.1: Adhesiv aşınma mekanizmasını gösteren şematik bir diyagram (Huchings, 1992)	5
1.1.1.2 Abrasiv Aşınma.....	5
1.1.1.3 Yorulma Aşınması	6
1.1.1.4 Koroziif Aşınma	7
1.1.1.5 Erozyon Aşınması.....	8
1.1.1.6 Kazımalı Aşınma	9
1.2 Aşınmayı Etkileyen Faktörler	9
1.3 Aşınmanın Önlenmesine Yönelik İşlemler	10
1.3.1 Malzeme Seçimi.....	10
1.3.2 Pürüzlülük	11

1.3.3 Sertlik.....	11
1.3.4 Yüzey İşlemleri.....	11
1.3.5 Yağlama	11
1.3.6 Temas (Kontak) Geometrisi.....	12
1.3.7 Çevre	12
1.3.8 Zaman	12
1.4. Bilyalı Dövme ve İşlemin Amacı	12
1.4.1 Bilyalı Dövme Parametrelerinin Belirlenmesi.....	19
1.5 Yorulma Olayı	21
2. KURAMSAL ÇERÇEVE	26
3. YÖNTEM	32
3.1 Aşındırılacak Numunelerin Hazırlanması	32
3.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Elektron Microscopy [SEM]).....	32
3.3 Noktasal Analiz Çalışmaları (Energy Dispersive Spectroscopy [EDS]).....	32
3.4 Sertlik Deneyleri	32
3.5 Kuru Kayma Aşınma Deneyleri.....	33
3.6 3D Profilometre Görüntüleri.....	34
4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME.....	35
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	62
5.1 Genel Sonuçlar	62
5.2 Öneriler	62
KAYNAKLAR.....	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
1.1: Aşınma eğrileri (Yıldız ve Gür, 2006).	3
2.1: Adhesiv aşınma mekanizmasını gösteren şematik bir diyagram (Huchings, 1992)	5
3.1: Abrasiv aşınma mekanizmasını gösteren şematik bir diyagram (Huchings, 1992)	6
4.1: Yorulma aşınma mekanizmasını gösteren örnek şema (Kurgan, 2018).....	7
5.1: Korozyon aşınma mekanizmasını gösteren örnek şema (Kurgan, 2018)	8
6.1: Erozyon aşınma mekanizmasını gösteren örnek şema (Shibe ve Chawia, 2014)	9
7.1: Aşınmayı Etkileyen Faktörler (Kurgan, 2018).....	10
8.1: Bombardıman Görüntüsü (http://www.sspst.com/icerik/goTo/5/shot-peening-bilyali-dovme-nedir.html)	17
9.1: Bombardıman Görüntüsü (http://www.sspst.com/icerik/goTo/5/shot-peening-bilyali-dovme-nedir.html)	17
10.1: Bilyalı Dövme Parametreleri (https://www.edemsimulation.com/spotlight/researching-advances-in-the-use-of-shot-peening-for-corrosion-fatigue-mitigation-in-steam-turbine-blades/)	18
11.1: Bilya Çeşitleri (Ünal, 2015).	18
12.1: Bilya çarpma açısı gösterimi (Yalçınkaya, 2019).	19
13.1: Geometrik Gösterim (www.boeing.com).....	20
14.1: Boeing Firması Tasarım İsterileri (www.boeing.com)	20
15.1: Yorulma Olayına Neden Olan Durumlar (Dieter, 1976).....	21
16.1: Toplam Yorulma Ömrünün Aşamaları	23
17.1: Yorulma kırığı yüzeyi	24
18.1: Wöhler eğrisi	24
19.1: Gerilme hali (Koç, 2006)	25
20.1: Ball-on-Disk Deney cihazı	33
21.1: Numunelerin 3 D profilometre görüntüleri a. Nitrürlü numune 15N yük b. Aşırı bilyalı dövülmüş numune 15 N yük c. Bilyalı dövülmüş numune 15 N yük	34
22.1: Aşırı bilyalı dövülmüş numune SEM mikroyapı görüntüsü 8000 x.	35
23.1: Bilyalı dövülmüş numune SEM mikroyapı görüntüsü 4000 x.....	35
24.1: İşlemsiz numune SEM mikroyapı görüntüsü 2000 x.	36
25.1: Nitrürlenmiş numune SEM mikroyapı görüntüsü 4000 x.	37

26.1: Nitrürlenmiş numune SEM (EDS) mikroyapı görüntüsü.....	38
27.1: Aşırı bilyalı dövülmüş numune X-RAY grafiği.....	38
28.1: Bilyalı dövülmüş numune X-RAY grafiği.....	39
29.1: İşlemsiz numune X-RAY grafiği.	39
30.1: Nitrürlenmiş numune X-RAY grafiği.	40
31.1: Aşırı bilyalı dövülmüş numune SEM yüzey görüntüsü 250 x	40
32.1: Aşırı bilyalı dövülmüş numune SEM yüzey görüntüsü 1000 x.	41
33.1: Bilyalı dövülmüş numune SEM yüzey görüntüsü 250 x.	41
34.1: Bilyalı dövülmüş numune SEM yüzey görüntüsü 1000 x.	42
35.1: Farklı yük altında numunelerde meydana gelen hacim kayıpları (mm ³).....	42
36.1: Nitrürlenmiş numune SEM mikroyapı görüntüsü 8000 x.	44
37.1: Nitrürlenmiş numunenin yüzeyden itibaren sertlik değerleri.....	45
38.1: Aşırı bilyalı dövülmüş numune SEM yüzey görüntüsü 2000 x.	45
39.1: Aşırı bilyalı dövülmüş numune SEM yüzey görüntüsü 4000 x.	46
40.1: Aşırı bilyalı dövülmüş numunenin yüzeyden itibaren sertlik değerleri.	47
41.1: Bilyalı dövülmüş numune SEM yüzey görüntüsü 4000 x.	47
42.1: Bilyalı dövülmüş numune SEM yüzey görüntüsü 10000 x.	48
43.1: Bilyalı dövülmüş numunenin yüzeyden itibaren sertlik değerler	49
44.1: Nitrürlenmiş numunelerin SEM aşınma izi fotoğrafları. a) 5 N 100x b) 5 N 1000x	50
45.1: Nitrürlenmiş numunelerin SEM aşınma izi EDS analizi 15 N.	51
46.1: Nitrürlenmiş numunelerin aşındırılmasında kullanılan Al ₂ O ₃ bilya üzerinden alınan SEM görüntüsü 15 N.	52
47.1: Şekil.39: Aşırı bilyalı dövülmüş numunelerin SEM aşınma izi fotoğrafları. a) 5 N 100x b) 5 N 1000x c) 10 N 100x d) 10 N 1000x e) 15 N 100x f) 15 N 1000x	53
48.1: Aşırı bilyalı dövülmüş numunelerin numunelerin aşındırılmasında kullanılan Al ₂ O ₃ bilya üzerinden alınan SEM görüntüsü 15 N.....	54
49.1: Aşırı bilyalı dövülmüş numunelerin SEM aşınma izi EDS analizi 15 N.	55
50.1: Bilyalı dövülmüş numunelerin SEM aşınma izi fotoğrafları. a) 5 N 100x b) 5 N 1000x c) 10 N 100x d) 10 N 1000x e) 15 N 100x f) 15 N 1000x	56
51.1: Bilyalı dövülmüş numunelerin numunelerin aşındırılmasında kullanılan Al ₂ O ₃ bilya üzerinden alınan SEM görüntüsü 15 N.....	57
52.1: Bilyalı dövülmüş numunelerin SEM aşınma izi EDS analizi 15 N.	59
53.1: Numuneler ait sürtünme katsayı değerleri a. Nitrürlenmiş b. Aşırı bilyalı dövülmüş c. Bilyalı dövülmüş.	61

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
1.1: Bilya Çeşitleri.....	19
2.1: Bilya Standartları	19

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

d_a:	nozzle ağız çapı
Θ :	dövme açısı
d:	dövme mesafesi
V_o:	nozzle ağızından bilya tanelerinin çıkış hızı
P:	basınç değeri
N_i :	yorulma çatlak başlama ömrü
N_p :	yorulma-çatlak yayılma ömrü
N_t:	toplam yorulma ömrü
σ_g:	gerilme genliği
σ_m:	ortalama gerilme
mm:	milimetre
mm³:	milimetre küp
nm:	nanometre
Kw:	kilowatt
W:	Watt
μm:	Mikrometre

KISALTMALAR

AISI:	American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
EBSD:	Elektron Geri saçılım Difraksiyonu
EDS:	Energy Dispersive Spectroscopy
SEM:	Scanning Elektron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SP:	Self-Potansiyel (Doğal potansiyel)

1. GİRİŞ

Son yıllarda teknoloji ve bilimde hızlı büyüyen gelişmelerle birlikte, önemli metallere biri olan çelik, birçok ülke tarafından inşaat, sağlık, otomotiv, tarım, uzay gibi birçok alanda kullanılmakta ve birinci sırada tercih edilenler arasında yerini almaktadır. Ekonomisi gelişmekte ya da gelişmiş olan ülkelerin ekonomik bakımından diğer ülkeler arasında önemli bir noktaya gelmesi için çelik metalinin rolü etkilidir. Çünkü son yıllarda incelenen raporlar dikkate alındığında, tüm ülkeler bazında çelik üretiminin ne kadar önemli olduğu görülmektedir. Batı Avrupa çelik üreticisi olan Türkiye, 2016 yılında önceki yıla nazaran dünyada önemli noktaya gelerek sekizinci ülke olarak yerini almıştır.

Bir makine ya da üründe teknik açıdan sahip olması gereken en önemli özelliklerden biri, uygun malzemenin tercih edilmiş olması, ömrünün uzun olması ve nitelikli olarak işlevini yapabilmesidir. Ayrıca malzemenin kullanıldığı süre çerçevesinde aşınmadan ve bozulmadan dayanıklı kalabilmesidir. Günümüzde düşük alaşımlı orta karbonlu çelikler, özellikle otomotiv endüstrisi ve savunma alanında sıklıkla kullanılmaktadır. Araştırmanın aynı zamanda konusu olan ve bahsedilen bu çeliklerden biri de AISI 4140 çeliğidir. AISI 4140 çeliğinin makine imalat sanayisindeki kullanım alanı oldukça yaygındır ve bu çelik Cr-Mo'li ıslah çeliklerinden en kapsamlı kullanım alanına sahiptir. Krom-molibden çeliği olarak da bilinen AISI 4140 çeliği, alaşımlı çelik, dövme kalite çelikler, orta karbonlu çelik ve düşük alaşımlı yapı çelikleri olarak da tanımlanabilmektedir. Bu çelik, su verme sonrasında süneklik, mukavemet ve tokluk gibi mekanik özellikleri bir arada sağlayabilir. Dolayısıyla AISI 4140 çeliğinin taşıdığı özellikler dikkate alındığında araştırmada bu çelik türü tercih edilmiştir.

Günümüz imalat sektörlerinde ortaya çıkan sorunlardan biri aşınma olayıdır. İlk kez Sümer ve Mısır uygarlıkları aşınma olayını araştırmalar, sonrasında Leonardo da Vinci (1452-1519) ve Amontons (1663-1705) tarafından üzerinde önemle durulan konulardan biri haline gelmiştir. Aşınma olayı, farklı ortamlarda birçok sektörde tercih edilen malzemelerin ömrünü önemli düzeyde azaltmakta ve ekonomik hasarlara neden olmaktadır (Erdem, 2006). Geçmiş yıllardan günümüze kadar pek çok ülkede yaşanan mekanik problemler arasında

malzeme kaybı gelmektedir. Dünya’da yer alan mekanik enerjinin, yüzde otuz kısmının mekanik kayıplara harcandığı göz önüne alındığında sürtünme ve aşınmanın ne kadar etkili olduğu aşikârdır. Bu araştırmada bilyalı dövme işleminin, AISI 4140 çeliğinin adhesiv aşınma özelliği üzerine etkisi incelendiğinden aşağıda aşınma ve aşınma türlerine detaylı yer verilmiştir.

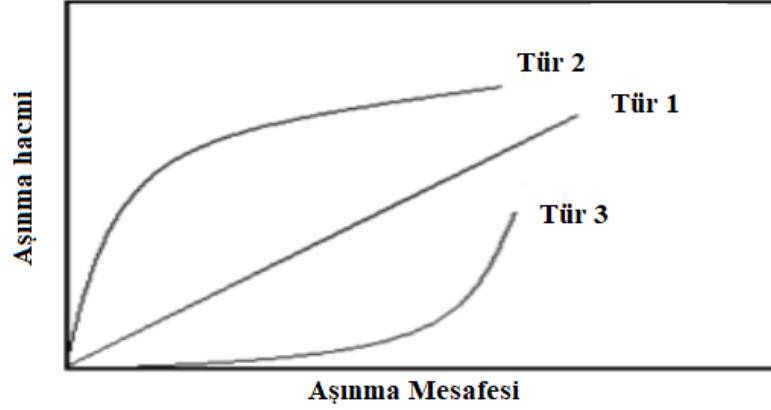
1.1 Aşınma

Aşınma olayı, mekanik etkiler nedeniyle temas eden yüzeylerden mikro tanelerin kopması sonucunda malzeme toleranslarının bozulması ve parçaların işlevlerini kaybetmesi olayıdır (Gök, 2008). Benzer şekilde Akbulut (2006) ve Evcin (2006), aşınma olayını, bağıl hareket durumunda karşılıklı yüzeylerden birinde ya da ikisinde oluşan malzeme kaybı olarak ifade etmişlerdir. Diğer taraftan Moore ise aşınmayı; gaz, sıvı ve katı maddelerin, kullanılan malzemelerin yüzeylerine etkileşimi sonucunda malzemenin yüzeyinden mikro parçacıkların ayrılması sonucu ortaya çıkan yüzey bozulması olarak dile getirmiştir (Akt. Bhushan, 2000).

Aşınma olayının görüldüğü durumlar sıklıkla; kaymalı ve rulmanlı yataklar, fren balataları ve silindirler, hareket aktarım elemanı olarak kullanılan miller, motor pistonu, dişliler ve türbin kanatlarıdır. Aşınma; sisteme etki eden sıcaklık, aşındırıcıların yüzeye temas durumları, malzemenin yüzeylerinin şekline, hız, çalışma süresi, kayma yüzeyleri arasındaki temas etme basıncı, sertlik vb. gibi birçok parametreyi içermektedir. Alanyazın incelendiğinde, aşınma konusu üzerine birçok araştırmanın (Bağcı, 2010; Dikmen, 2010; Erdem, 2006; Ertem, 2021; Gök, 2008; Hayat, 2022; Okay, 2006; Uzer, 2022) yapıldığı ancak bu araştırmalardan önemli sonuçlar ortaya çıkmasına rağmen aşınma miktarını belirleyecek bir bağıntının bulunamadığı görülmektedir. Temas yüzeylerinde zamanla oluşan fiziksel ve kimyasal değişimlerin oluşması sebebiyle duruma göre farklı aşınmalar meydana gelmektedir. Bağcı (2010), sıklıkla karşılaşılan aşınmalar arasında abrasif, adhesif (yapışma) yorulma, erozyon aşınması ve mekanik korozyonu ifade etmiştir.

Alman DIN 50320’nın 1979’da yayımladığı standartta aşınma, “ Kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması sonucu mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılmasıyla meydana gelen ve istenmeyen yüzey hasarlarıdır.” olarak

belirtilmiştir (Sevim, 1998). Şekil 1’de Yıldız ve Gür (2006) tarafından aşınma hacmi ile aşınma mesafesi arasında ilişkiyi gösteren aşınma eğrilerine yer verilmiştir.



Şekil 1.1: Aşınma eğrileri (Yıldız ve Gür, 2006).

Şekil 1.1’de görüldüğü üzere, aşınma şiddeti eğrileri verilmiştir. Bu şekilde belirtilen 1. Tür, tüm işlemin en baştan son aşamasına kadar sabit bir aşınma oranını ifade etmektedir. 2. Tür’ün anlamı ise, başlangıçta yüksek bir aşınma oranından düşük bir orandaki sabit aşınmaya kadar olan geçişi ifade etmektedir. Metallerde bu tür sıklıkla görülmektedir. Yıldız ve Gür (2006), 3. Türün, bir çatlama kırıklığı meydana gelmesi sonucunda, başlangıçtaki aşınmanın düşük oranın yüksek bir orandaki aşınmaya, daha kötü bir geçişini belirtmektedir.

Aşınma olayında, eğer önlemler alınabilirse engellenebilir. Örneğin, temas durumundaki yüzeylere yağlama metodunu kullanmak, yüzeyleri sertleştirmek ya da yüzeyde oksit tabakası oluşturularak aşınmayla ortaya çıkabilecek bozulmalar önlenabilir. Aşınma olayının önlenmesi için öncelikle olarak aşınmayı oluşturan faktörlerin bilinmesi gerekmektedir. Aşınmayı etkileyen faktörler incelendiğinde, yüzey şekli ve boyutu, ortam sıcaklığı, elastik modülü, malzemenin kristal yapısı, yüzey alanının sertlik yapısı ve kalitesi, nem miktarı, ortam basıncı, uygulanan kuvvetin etki büyüklüğü, biçimi ve süresi gibi pek çok faktörün olduğu görülmektedir (Yıldız ve Gür, 2006). Bu faktörler de aşağıda detaylı olarak sunulmuştur.

1.1.1 Aşınma Türleri

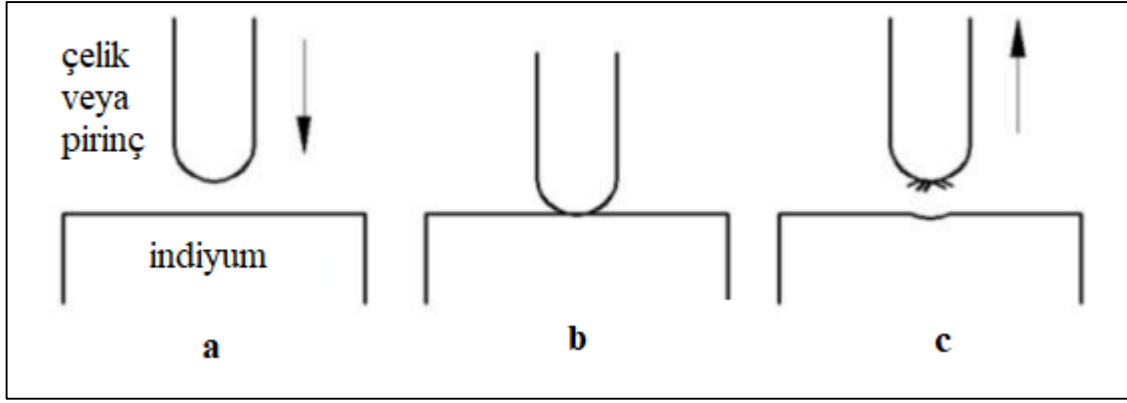
Günümüz dünyasında pek çok araştırmacı, birçok aşınma şeklini tespit ederek aşınma türlerini sınıflandırmışlardır. Her aşınma sürecinin kendi özgü süreçleri olduğundan araştırmacıların bu aşınma türlerinin nedenlerini tespit etmeleri ve önlem almaları önem arz etmektedir. Aşınma; dinamik, çevresel ve malzeme parametrelerinin meydana getirdiği bir

sürtünme sistemi içerisinde olduğundan çoğunlukla sürtünmeden dolayı ısınmayla beraber hızlanmaktadır. Aşınmada temel süreç, katı malzemenin yüzeyden ayrılmasıdır. Aşağıda sıklıkla karşılaşılan aşınma türlerine yer verilmiş ve bu aşınma türleri detaylı açıklanmıştır.

1.1.1.1 Adhesiv Aşınma

Adhesiv aşınma, karşılıklı olarak kayma sürtünmesi yapan yüzey bölgelerde soğuk kaynak veya bölgesel bağlanmalar neticesinde bir yüzeyden diğerine malzeme geçişi ve buna bağlı olarak meydana gelen kayma hareketi sonucunda oluşan malzeme kaybıdır (Varol, 2016). Diğer bir ifadeyle düzgün malzeme yüzeylerinin birbirleri üzerinde kayarak hareket etmesi ve bu kayma hareketinin sonucunda bir yüzeyden kopan parçacıkların diğer bir yüzeye yapışması şeklinde oluşmaktadır (Özsaraç, 1999). Toparlı (1993) ise benzer şekilde adhesiv aşınmayı, birbiriyle temas halinde bulunan iki metalin yüzeylerinin, yüksek basınçta ve buna bağlı olarak sıcaklığın yükselmesi sonucunda oluşan kaynama olarak belirtmiştir. Bu aşınma sonucunda, temas bölgeleri içinde oluşan deformasyonla birlikte şeklin değişmesi, bir çatlamanın oluşmasına ve gerilmeyle çatlamanın kırılmasına neden olmaktadır. Buna bağlı olarak da bozulma gerçekleşmekte ve malzeme kaybına sebep olmaktadır. Sonuç olarak, oluşan aşınma türü, adhesiv aşınma olarak ifade edilmektedir. Bu aşınmanın engellenebilmesi için yüzey sertleştirme ve yağlama yöntemlerinin kullanılması önerilmektedir (Varol, 2016). Toparlı'ya (1993) göre aşınma türleri karşılaştırıldığında adhesiv aşınma en çok görülen aşınma türüdür. Adhesiv aşınma sonucunda adhesiv aşınma parçası meydana gelir. Öncelikle temas durumundaki malzemelerin yapışma eğilimi, malzemelerin yüzey atomları arasındaki çekme kuvveti sonucu ortaya çıkar. İki yüzey teğetsel veya normal bir şekilde toplanarak kuvvet yardımı ile ayrılır ve bunun sonucu olarak da malzemede bir yüzeyden diğerine geçecek şekilde bir çekim alanı oluşur. Bu kapsamda adhesiv aşınma meydana gelir.

Malzemenin deforme edilebilme durumu yüksekse temas yeri artar ve tüm yüzeye yayılır. Bu bağlamda yüzeydeki emilmiş sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları ayrılarak malzeme moleküllerinin doğrudan kontak olmalarını sağlar. Dolayısıyla kontak olduğu noktalarda soğuk kaynak bölgeleri meydana gelir. Kaynak bölgeler bağıl hareket halinde sürtünme kuvveti ile kırılır ve yüzey bölgeleri arasına taşınır (Okay, 2006). Adhesiv aşınma türüne örnek olarak Şekil 2.1'deki örneğe yer verilmiştir.



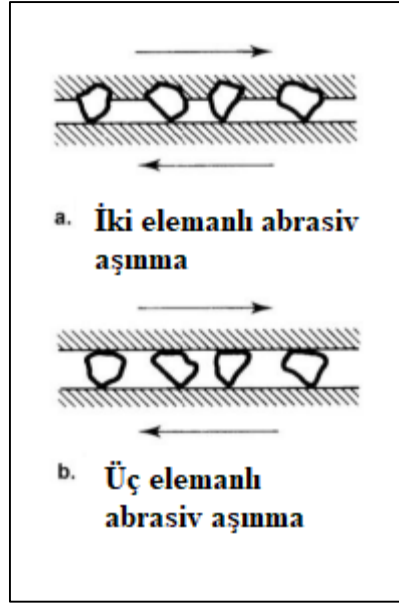
İndiyum: "zayıf metal" sınıfında sembolü "In" olan, 49 protonlu kimyasal elementtir.

Şekil 2.1: Adhesiv aşınma mekanizmasını gösteren şematik bir diyagram (Huchtings, 1992)

Şekil 2.1’de görüldüğü üzere, kurşun veya indiyum gibi yumuşak ve esnek metallere oluşan blok üzerine temiz bir çelik veya pirinçle bastırıldığında güçlü bir yapışma meydana gelir ve bunun sonucunda, çubuğa bir yumuşak metal (indiyum) parçası yapışır. Temas bağlantılarının yapışkan gücü, indiyumun bağlanma dayancından daha güçlüdür (Devaraju, 2015).

1.1.1.2 Abrasiv Aşınma

Abrasiv aşınma, sert taneciklerin ya da çıkıntılıların katı bir yüzeye birlikte hareket etmesi ve karşı koyması sonucu meydana gelir. Yırtılma ya da çizilme aşınması olarak da adlandırılan bu aşınma, sistemde hızlı hasara neden olur. Abrasiv aşınmada, yüzeylerin kendilerinden daha sert yapıya sahip parçacıklarla basınç altında etkileşmesiyle beraber sert parçacıkların malzeme yüzeylerinden parçacık kaldırması meydana gelir. Bu aşınma türüne örnek olarak, sisteme dışarıdan giren toz parçacıklarının ya da bir motorda oluşan yanma ürünlerinin neden olduğu aşınma şekli verilebilir. Abrasif aşınma endüstriyel cihazlarda malzeme kayıplarının ana sebeplerinden biridir (Varol, 2016). Abrasif aşınmanın oluşmaması için yüzeyin sertleştirilmesi ve makinaların talaştan veya pislikten temizlenmesi önerilmektedir (<https://www.muhandisbeyinler.net/asinma-nedir-asinma-cesitleri/>). Abrasif aşınmada oluşma mekanizmasına bağlı olarak iki elemanlı ve üç elemanlı abrasif aşınma olarak ikiye ayrılmaktadır (Huchtings, 1992). Bununla ilgili olarak Şekil 3.1’te şematik bir diyagrama yer verilmiştir.



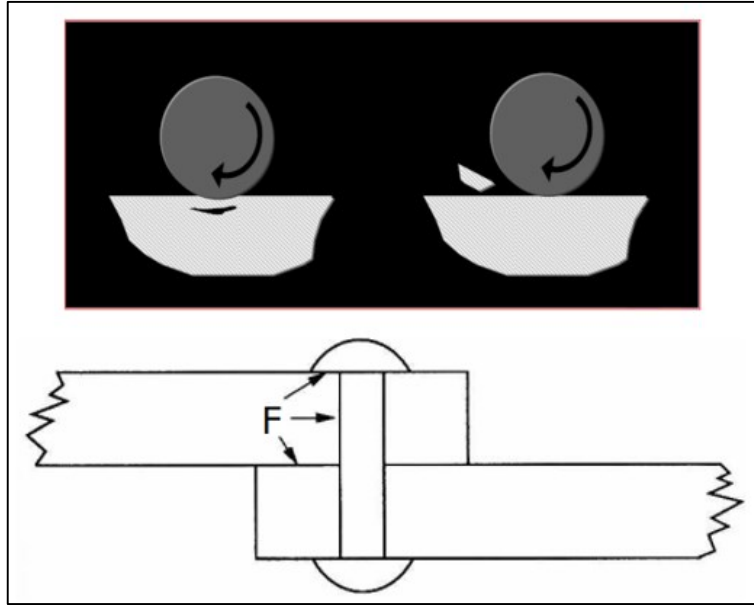
Şekil 3.1: Abrasiv aşınma mekanizmasını gösteren şematik bir diyagram (Huchtings, 1992)

Şekil 3.1 incelendiğinde şematik olarak gösterilen iki elemanlı abrasif aşınma, karşılıklı olarak çalışan malzemelerden sert olanın karşı yüzeyi çizmesi şeklinde meydana gelmektedir. Üç elemanlı abrasif aşınmada ise, sert yüzey üçüncü bir cisim olup, diğer iki yüzey arasında sıkıştırılmış ve onlardan birini veya her ikisini birden aşındıracak kadar sert olan parça çoğunlukla aşındırıcı ya da taşıdır.

1.1.1.3 Yorulma Aşınması

Önceki ilk iki aşama türünde devamlı bir temas meydana gelirken, çevrimsel bir temasın oluşması durumunda farklı bir aşınma türü meydana gelir. Bu aşınma türü, “yorulma aşınması” olarak adlandırılmaktadır. Bu çeşit çevrimsel temas durumlarında çevrim sayısı yüksek ise, yüksek çevrimli; düşük ise düşük çevrimli yorulma aşınmasının oluşması tahmin edilmektedir. Örneğin; temas noktasında, ana aşınma mekanizması yüksek çevrimli; temas noktalarındaki, boşluk, parça sınırı ve kalıntılar sebebiyle yerel olarak akma dayanımından oluşan gerilmeler ise düşük çevrimli yorulma aşınması olarak verilebilir. Yorulma aşınması, genellikle rulmanlar, yollar vb. gibi yuvarlanan veya kayan temas gövdelerinde oluşmaktadır. Dönen yapı elemanlarında ise genelde parçalar arasında elastik bir temas söz konusudur. Tekrarlanan döngüsel yüklemelerden sonra yüzeyde bir çatlak gözlemlenir. Sonrasında yeraltı çatlakları ilerler, diğer çatlaklarla bağlantı kurar, yüzeye ulaşır ve aşınma parçacıkları oluşturur. Benzer şekilde, yüzey çatlakları yığın halinde aşağı doğru hareket eder, diğer çatlaklarla birleşir ve bir aşınma parçacığını serbest bırakır. Meydana gelen bu

çatlak büyümesinin kuru havadan ziyade yüksek nemli ortamlarda hızlı bir şekilde meydana geldiği deneysel olarak rapor edilmiştir (Endo ve Goto, 1978; Varol, 2016). Şekil 4.1'te yorulma aşınmasına ilişkin örnek bir görsele yer verilmiştir.

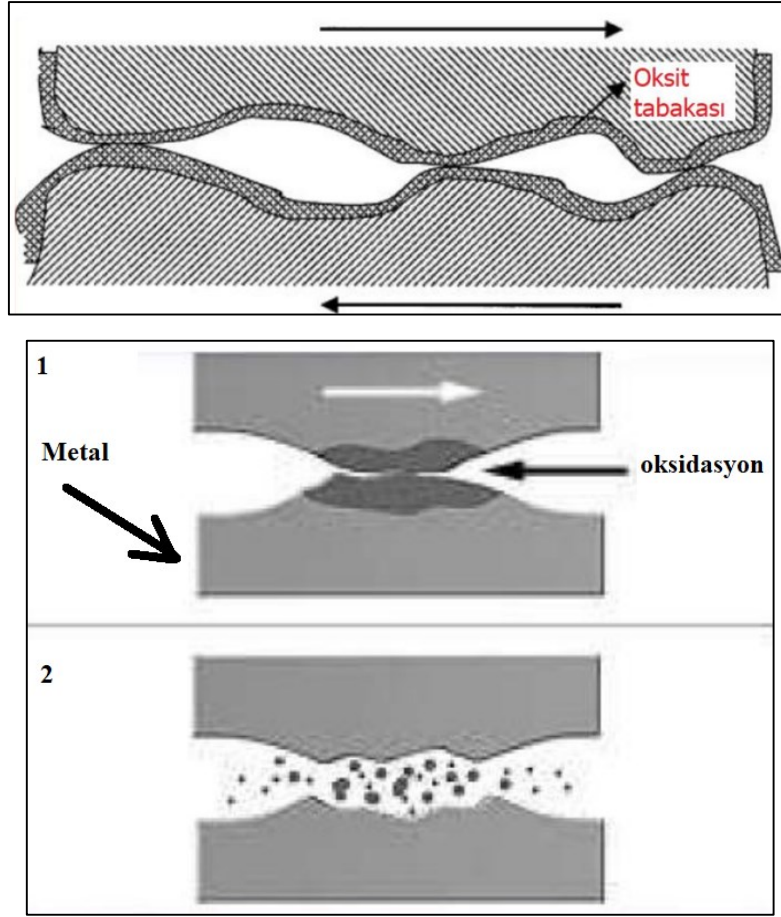


Şekil 4.1: Yorulma aşınma mekanizmasını gösteren örnek şema (Kurgan, 2018)

Şekil 4.1'te perçinlenmiş bir Al-çelik bağlantısında yorulma aşınmasının olduğu bölgelere (F bölgeleri) örnek verilmiştir.

1.1.1.4 Korozif Aşınma

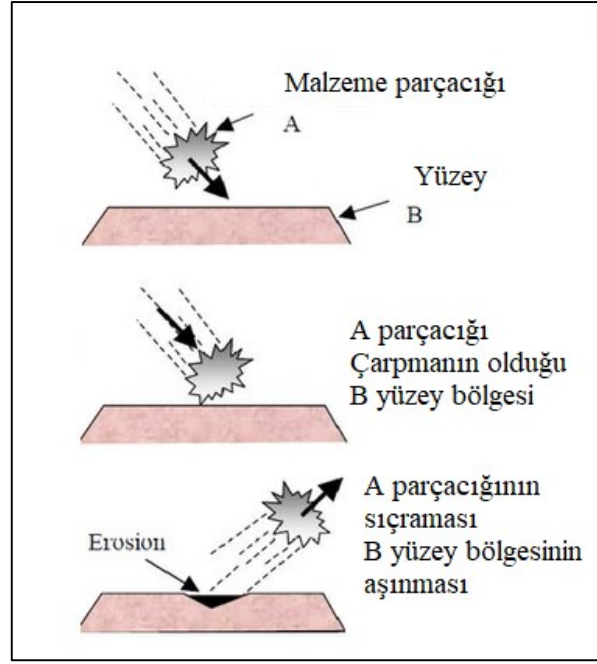
Korozif veya oksidatif ortamda kayma görüldüğünde korozif aşınma ortaya çıkar. Korozif oksijen havada en baskın oksijendir. Bu yüzden havada meydana gelen kimyasal aşınma genelde oksidatif aşınma olarak isimlendirilir (Varol, 2016). Kuru kayma esnasında normal ortamda bulunan oksijen ya da ortamdaki başka gazlar, katı yüzey ile reaksiyona maruz kalabilir. Aşınmayı engelleyici maddelerin aşırı varlığı da korozif aşınmaya neden olabilir. Yüksek sıcaklıkta oksijen, kayma yüzeyi ile etkileşebilir ve oksidatif aşınma adı verilen oksitleri oluşturabilir. Örnek verilecek olunursa, Inconel'in (bir miktar demir içeren nikel-krom alaşımları) oksidasyonu, 100°C'de meydana gelir ve bu durum nikel oksit (NiO) ve krom oksit (Cr_2O_3) oluşumuna neden olur. Bununla birlikte, sıcaklık 280°C'ye yükseltildiğinde, yüzey, $NiFe_2O_4$ ve Cr_2O_3 spineli (Spinel: Umut taş olarak adlandırılan bu taş, 1000 yılı aşkın bir süredir yakut ve safir ile karıştırılmış değerli taş minerali) içerir. Bu durumun neticesinde, mekanik olarak uyumsuz korozif/oksit tabakası oluşur (McIntyre, Zetaruk ve Owen, 1978). Korozif aşınmayla ilgili Şekil 5.1'te görsele yer verilmiştir.



Şekil 5.1: Korozyon aşınma mekanizmasını gösteren örnek şema (Kurgan, 2018)

1.1.1.5 Erozyon Aşınması

Akışkan içerisinde bulunan aşındırmaya neden olan parçacıklar, yüksek hızla hareket halindeki sıvı damlacıkları ve yüksek hıza sahip gaz kabarcıklarının oluşturdukları hasarlar, erozyon aşınması olarak adlandırılmaktadır. Akış esnasında, sıvı damlacıkları ve gaz kabarcıkları, temas ettikleri parçanın sınır yüzeylerine çarpma etkisiyle yüzeyden parçacıklar ayrılır. Bunun neticesinde dalgalı yüzey oluşur ve aşınma giderek artar. Erozyon aşınmasının sıklıkla görüldüğü yerler; pompa pervaneleri, gaz türbin bıçakları, boru ve tüplerin dirsek kısımlarıdır. Bu aşınma türünü etkileyen faktörler incelendiğinde, bunların başında parçacığın çarpma açısı, hızı ve boyutu gelmektedir (Varol, 2016). Şekil 6.1'da erozyon aşınma mekanizmasını gösteren görsele yer verilmiştir.



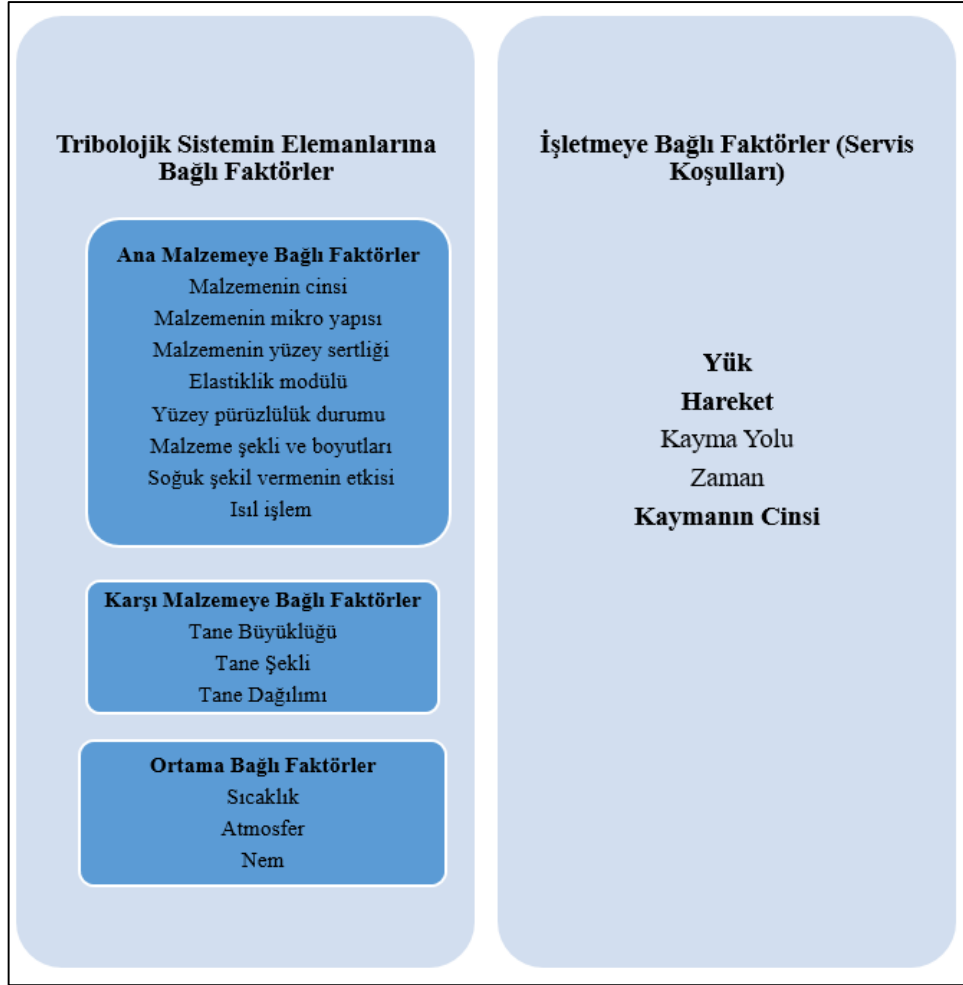
Şekil 6.1: Erozyon aşınma mekanizmasını gösteren örnek şema (Shibe ve Chawia, 2014)

1.1.1.6 Kazımalı Aşınma

Kazımalı aşınma, karşılaşan yüzeylerde mikro kaynaşmanın ortaya çıktığı bir aşınma türü olup adhesiv aşınmayla benzerlik göstermektedir. İki aşınmayı ayıran fark ise adhesiv aşınma, birbirleri üzerinde kayan yüzeylerde ortaya çıkarken, kazımalı aşınma birbirlerine göre hareket etmeyen yüzeylerde meydana gelmektedir.

1.2 Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Aşınmayı etkileyen faktörler incelendiğinde, bu faktörlerin iki ana başlıkta sınıflandırıldığı görülmektedir. Bunlar, Şekil 7.1’de verilmiştir.



Elastiklik modülü: Malzemenin kuvvet altında elastik şekil değiştirmesinin ölçüsü

Şekil 7.1: Aşınmayı Etkileyen Faktörler (Kurgan, 2018)

1.3 Aşınmanın Önlenmesine Yönelik İşlemler

Aşınmanın önlenmesi ya da azaltılabilmesi için, ilk olarak aşınmaya sebep olan tüm faktörlerin anlaşılması gerekmektedir.

1.3.1 Malzeme Seçimi

Etkileşim içerisinde birbirleriyle çalışan parçaların aşınma dayanımını yüksek seviyeye çıkartabilmek için malzemenin mekanik özellikleri ve çalışma ortamının iyi değerlendirilmesi gerekmektedir (Keskin, 2012).

1.3.2 Pürüzlülük

Aşınma dayanımını en çok etki eden faktörlerden biri yüzeyin pürüzlülük özelliğidir. Pürüzlerin temas halinde olduğu bölgede gerçek yüzey alanı bulunması nedeniyle öncelikle bu pürüzlerin adhezyon kuvvetlerinin artmasında önemli rol oynamaktadır (Keskin, 2012).

1.3.3 Sertlik

Diğer faktörleri sabit tutmak koşuluyla, malzemelerde sertliğin artırılmasına yönelik işlemler, aşınma miktarının azalmasına yardımcı olur. Sertleştirme işleminin yapılmadığı malzemenin yüzey bölgesinde deformasyon sertleşmesi uygulanan alanlarda mikro bölgeler oluşturur. Bu bölgelerin duktilitesi (duktilite: çekilerek uzatıldığı zaman büyük gerilmeler altında kopmaksızın kalabilme kabiliyeti) azalarak kopar. Aşınmayı engelleyebilmek için ısıl işleme veya alaşımlama işlemi uygulanarak yüzey alanının sertleştirilmesi gerekmektedir (Keskin, 2012).

1.3.4 Yüzey İşlemleri

Aşınmayı önleme yöntemlerinden biri de temas durumunda çalışan iki metal arasındaki sürtünme katsayısının ve tutunabilme özelliğinin düşürülmesi gerekmektedir. Bu kapsamda yüzeyde kimyasal, elektro-kimyasal ya da termo-kimyasal yöntemlerle malzemelerin yüzey bölgelerinde tabakalar oluşturulmalıdır (Keskin, 2012).

1.3.5 Yağlama

Yağlama yöntemiyle sürtünme azalmakta ve ısı uzaklaştırılmaktadır. Böylece mikro kaynak bölgeleri engellenmektedir. Hem ekonomik olması, hem de uygulamasının kolay olması açısından, bu yöntem çok tercih edilmektedir. Yağlama yöntemi, sürtünen yüzey bölgeleri arasındaki metal-metal sürtünmesi yerine sıvı-metal sürtünmesine olanak tanıdığından aşınmanın önlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, bu işlem için seçilen yağların yüksek sıcaklar dâhil yağlama özelliğini uzun süre koruyabilecek özelliği taşımasıdır (Keskin, 2012).

1.3.6 Temas (Kontak) Geometrisi

Aşınma miktarını etkileyen unsurlardan biri de sürtünen elemanların temas geometrisidir. Aşınma parçacıklarının iki yüzey arasından dışarı çıkmaları kolaylaştıkça parçaların abrazyon aşınması da azalmaktadır. Bunun yanı sıra yüzeye uygulanan kuvvet şekli de etkilemektedir. Çünkü normal kuvvete kıyasla bileşik kuvvet daha çok aşınmaya sebep olabilmektedir (Keskin, 2012).

1.3.7 Çevre

Aşınmayı etkileyen faktörlerden bir diğeri de çevre diğeri bir deyişle ortamdır. Atmosferde yer alan oksijen, yüzey bölgesinde koruyucu oksit tabakası ortaya çıkarmaktadır. Nitekim ortamda soy gaz olduğunda oksit oranı düşecektir. Bu oksit tabakalarının ayrılması nedeniyle malzemede metal-metal teması meydana gelerek, adezyon aşınması ortaya çıkacaktır. Benzer şekilde atmosferde bulunan bağıl nem oranı da aşınma miktarını etkilemektedir. Bağıl nem oranı azaldıkça, aşınma miktarının artmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak aşınma etkileyen bu faktörlerin de göz önüne alınması gerekmektedir (Keskin, 2012).

1.3.8 Zaman

Metal yüzeyinde yorulma olmasıyla beraber deformasyon sertleşmesi frekansa, devir sayısına ve toplam zamanla ilişkili olduğundan bu faktörün de dikkate alınması gerekmektedir (Keskin, 2012). Bu araştırmada bilyalı dövme işleminin, AISI 4140 çeliğinin adhesiv aşınma özelliği üzerine etkisi incelendiğinden aşağıda bilyalı dövme hakkında bilgi verilmiştir.

1.4. Bilyalı Dövme ve İşlemin Amacı

Türkiye’de bilya püskürtme ya da bilyalı dövme olarak adlandırılan bu işlem genellikle havacılık ve otomotiv sanayinde kullanılmaktadır (Karahana ve İnce, 2015; Ruiz ve Nagby, 2003). Bilyeli dövme işleminde, metal malzemelerin yüzey ve içyapı özelliklerini farklılaştırmak için malzemenin yüzey bölgesine küçük, küresel ve sert bilyelerin kontrollü olarak atılması işlemi uygulanır. Bu işlemde, bilyaların malzeme yüzeyinde yol açtığı plastik bozulma sonucu gerinim sertleşmesi sayesinde sertlik artışı elde edilebilmektedir. Bu tabaka

sayesinde malzemenin yorulma ömründe, istenilen düzeyde artışlar meydana gelebilir (Gerin, Pessard, Morel ve Verdu, 2017).

Guechichi ve arkadaşlarının (2013) araştırmasında, malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi için tercih edilen bir yöntem olan SP (Self-Potansiyel) hakkında bilgi verilmekte ve süreçte önemli parametre arasında olan bilyelerin hızına odaklanılmıştır. Hız tahminlerini yapabilmek için bir yöntem öneri olarak sunulmuştur. Bu yöntemle yürütülen deneylerde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bilye boyutu, malzeme ve fırlatma açısı parametreleri verilmesi halinde bilye hızı Almen yoğunluğuna göre belirlenebilmektedir. Başka bir çalışmada ise sonlu elemanlar yöntemini kullanılarak SP yönteminin karakteristik büyüklükleri ile ve etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu yöntem, Avrami denklemi ile benzer sonuçlar ortaya koymuştur (Gangaraj vd., 2014).

Reilley'in (2013) çalışmasında ise hassas SP sisteminden bahsedilmiştir. Daha hassas bir lülenin kullanıldığı sistemde hareketler ve parçaya odaklanma kendiliğinden olmaktadır. Başka bir çalışmada, bilyelerin yolunun sürece ve süreçteki parçanın değerlerine etkisi sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Bu yaklaşım deneylerle birlikte doğrulanmıştır. Endüstriyel alanda kullanılacak bu yaklaşımla beraber simülasyonların daha hızlı ve doğru şekilde yapılabileceği ve bu sayede maliyetlerin azaltılabileceği belirtilmiştir (Gariepy vd., 2013). Bagherifard ve arkadaşlarının (2012) yürüttüğü çalışmada, sonlu elemanlar simülasyonu ile SP yüzeyinin tahmini konusu üzerine odaklanılmıştır. SP yönteminin en önemli kontrol parametresi olan yüzey durumu, sürecin uygulamasında karar parametresidir.

Bilyalı dövme yöntemi sayesinde metalik malzemelerde sertlik artmaktadır. Bununla birlikte yüzey bölgede ve yüzeyin alt kısmında basma özellikli kalıntı gerilmeleri meydana gelmektedir. Bu işlem, sıcaklığın farklı olduğu ortamlarda etkili olarak yapılmakta, yüke karşı dayanım performansı ve yüzey özellikleri daha iyi hale getirilmektedir. İşlemin uygulanacağı yüzey bölge üzerinde farklı yapılarda küçük çaplı bilyalar atılmaktadır. Bilyaların çarpma etkisiyle birlikte yüzey bölge üzerinde enerji akışı meydana gelmektedir. Fırlatılan bilyalar, dövülme işleminin uygulanacağı malzemenin daha yüksek bir mukaveme değerine ve sertlik yapısına sahip olması gerekmektedir (Johnson ve ark., 2001).

Bilyalı dövme işlem sürecinde, birçok süreç yer almaktadır. Tankta yer alan birçok sayıda bilya, nozul yardımıyla ve yüksek bir basınçla, işlemin yürütüleceği malzemenin kullanım

amacı ve özelliği dikkate alınarak atılmaktadır. İşlem, önceden belirlenmiş etkenler kapsamında (vuruş açısı, yüzey sarma oranı, yoğunluk, hız, bilya boyutu, tipi ve süre gibi) kapalı bir ortamda yapılmaktadır. Bilyaların hızı, malzemede kalıcı bir bozulma meydana getirebilecek yoğunluk ve hızda gerçekleşmektedir. Yüzeyin hepsine dağılımı gerçekleştirebilmek amacıyla el yardımıyla kontrolü sağlanmakta veya otomatik robot tercih edilmektedir. Slead ve arkadaşlarına (2013) göre, bilyalı dövme işlemi, metalin yorulma süresi ve mekanik özelliğine etki etmektedir. Yapılan deneylere göre bilyalı dövme; yorulma dayanımı, yay çelikleri, titanyum alaşımlar, yapı çelikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Bilyalı dövme işleminden elde edilen sonuçlar, yüzey sarma oranı, yüzeyin sertlik değeri, malzeme, bilya tipi, şekil ve hıza göre belirlenmektedir. Bu işlemdeki en önemli ölçüt, malzeme yüzeyinde gerçekleştirilmesi istenen özelliklerin önceden belirlenmiş olması ve malzemenin özelliklerinin dikkate alınmasıdır. Yüksek çaplı bilyaların tercih edilmesi ve dövme süresinin uzatılması, malzemenin ömrünü her daim uzatmayabilir. Aşırı plastik deformasyonun sonucunda, malzeme gevreklik yaşamakta, bunun neticesinde de ömrü azalmaktadır. Bilya hızı ve çapının farklı olması, farklı dayanım ve sertlik değerlerinin bulunmasına neden olmaktadır. Yüksek hızla atılan bilyalar, çarpma hızı ve açısına göre bozulma miktarını ortaya koymaktadır.

Malzeme yüzeyine bilyalar vurduktan sonra çarpmanın etkisiyle bu bölgeler genişlemeye başlamakta, elastik bozulmaların olduğu bölgeler tarafından engellenmeye neden olmaktadır. Bu kapsamda, yüzey bölgesinde ve altında kalıntı basma gerilmesi iken, iç kesimlerde çekme gerilmesi meydana gelmektedir. Meydana gelen çekme gerilmesi sonucu, yüzeyde çukurların oluşmasına neden olur. Diğer taraftan yüzeyin altında bulunan metali eski şekline getirmek için basma gerilmesi rol oynamaktadır. Bu doğrultuda, yüzeyin altında metal, yüksek basma gerilmesi sonucu yüklenmektedir. Birbirlerinin üstünde çakışan çukurcukların altında ise basma nitelikli kalıntı gerilme görünüşü meydana gelmektedir (Ünal, 2011). Yüzeydeki kalıntı basma gerilme değeri, merkeze doğru ilerledikçe düşmektedir. Bunun nedeni olarak bilyanın dövme etkisinin sınırlı olması gösterilebilir.

Dövme işlemiyle, birçok üretim metotları ile malzemede oluşan ve istenmeyen çekilme gerilmeleri, malzeme yüzeyinin her yerine aynı şekilde dağılım göstermektedir. Bu işlemin etkisi, taşlanmış veya tornalamış yüzeylerde büyüktür. Bunun nedeni, bu işlemlerle malzeme yüzeyinde meydana gelen gerilmelerin, kalıntı basma gerilmelere dönüşmesidir (Yılmaz ve ark., 2007). İşlemin uygulandığı yüzeyler, korozyona ve aşınmaya karşı

dayanıklıdır ve dayanım gücü uzundur. Korozyon ve yorulma aşınmaları ile meydana gelen bozulmalar, yüzeyden merkeze doğru yayılmakta ve yorulma aşınmasına yol açmaktadır. Bilyalı dövme işleminin amacı, çekmeyle yüklenen malzeme yüzeyinde bir kalıntı basma gerilmesi meydana getirmektir. Bu gerilmeler yüzünden, yükleme ve çalışma şartlarına göre değişken yükler taşıyan yüzeylerdeki gerilmeler toplanabilmektedir (Wang ve ark., 1998).

Bir yükün altında çalışan bağlantı pimleri gibi metaller, çekme gerilmelerine doğrudan maruz kalmakta, bu durumda yorulmanın temelini oluşturmaktadır. Bilyalı dövme işleminin gerçekleştiği yüzeyin kalıntı basma gerilme potansiyeli ne kadar yüksek olursa, yükün gerilme etkisi de o ölçüde minimum seviyeye indirgenmektedir. Kalıntı basma gerilmeleriyle birlikte anlık burkulma, eğme ve çevrimsel yüklerin sonucunda yüzey üzerinde çatlakların meydana gelmesi ve yayılması önlenmekte bunun neticesinde de malzemenin performansı ve çalışma ömrü uzamaktadır.

Günümüz dünyasında bilim ve teknolojinin hızla yayılmasıyla birlikte bilyalı dövme metotları artmış ve bu metotlar giderek ilerlemiştir. Dövme işlemi, yüzeyde ve iç kısımda boşlukları olan parçalarda yorulma dayanım süresini uzatmak için etkili bir şekilde tercih edilmektedir. Bu bağlamda metal hem iç kısımdan hem de dış kısımdan daha yüksek bir mukavemet özelliği taşımaktadır. Yüzey bölgeye yapılan bilyalı dövme işlemi, boşluk kısımlarda uygulandığı takdirde daha olumlu sonuçlar elde edilmektedir (Barker, 2001). Bilyalı dövme işlemi metalik malzemelerde pek çok farklı uygulamalarda yapılmakta ve alanyazında birçok araştırmacı tarafından uygulanmıştır.

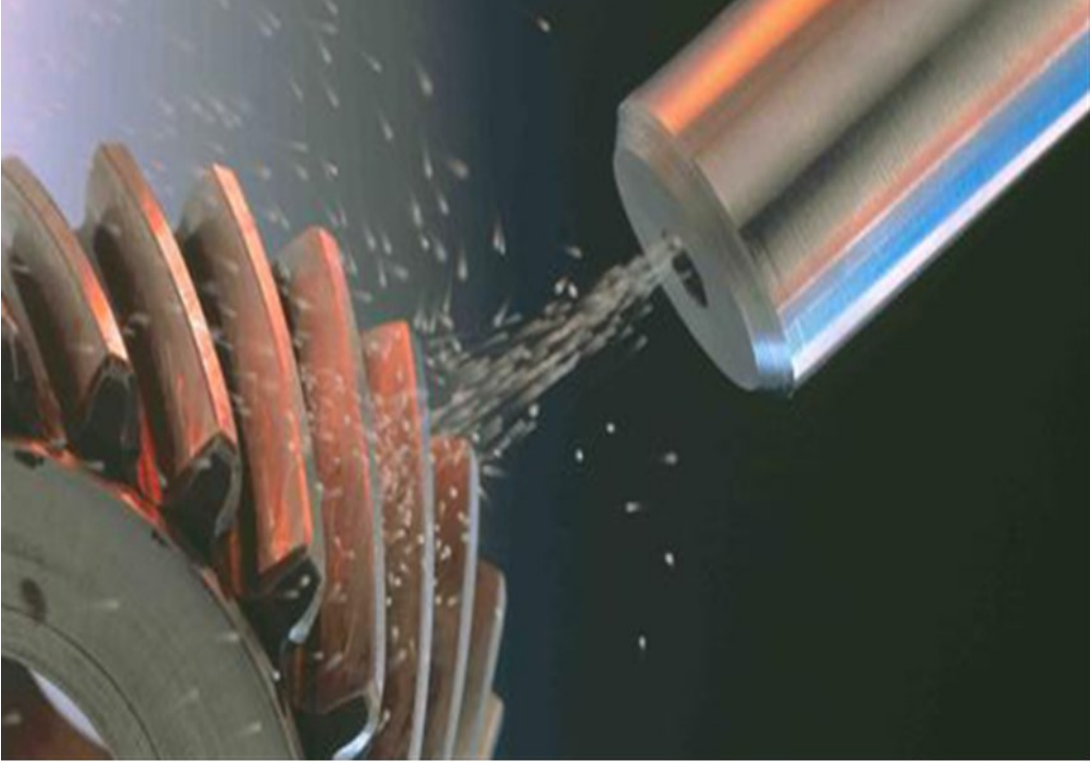
Chen ve arkadaşları (2018) tarafından bilyalı dövme işlemi, üst düzey yüzey işleme yöntemi olarak da bilinmektedir. Bilyalı dövme işlemi metalik malzemelerden paslanmaz çeliğin östenitik (ferritten daha fazla karbon emebilen bir demir formu olan östenit içerdiği çelikler) ve ferritik (%10,5 ile %30 krom içeriğiyle tanımlanan çelikler) halleri üzerine de uygulanarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bilyalı dövme işlemi paslanmaz çeliğin bu halleri (östenitik ve ferritik halleri) üzerine yapıldıktan sonra mikro yapısındaki davranışları incelenmiştir (Kovacı, Bozkurt, Yetim, Aslan ve Çelik, 2019) Bilyalı dövme işlemi, paslanmaz çelik 316 serisine farklı zamanlarda ve sonrasında korozyon testi uygulanarak yüzey davranışları detaylı gözlemlenmiştir (Feng, Jiang, Xu, Xie ve Ji, 2013). Bilyalı dövme işleminden sonra malzemenin sertlik düzeyinin artması malzemenin şekil değiştirmeye yatkın olmama özelliğini diğer bir deyişle gevrekliğinin de arttığını açıkça

göstermiştir. Bilyalı dövme işlemi paslanmaz çelik S32205 serisine uygulanarak mikro yapısındaki etkileri incelenmiştir (Chen vd., 2018). Mikro yapıda ortaya çıkan bilyalı dövme iyileştirmesi mekanik özelliklerinin iyileştiği ortaya çıkmıştır. SAF 2507 serisinde de benzer işlemler yapılarak ortaya çıkan sonuçlar gözlemlenmiştir (Chen vd., 2018). Deneysel çalışmalara dayalı olarak yüzeyde oluşan plastik deformasyonlar görüntülenmiştir. Chen ve arkadaşları (2018), bilyalı dövme işlemini alüminyum serisi 7A85 malzemesine uygulamışlar ve korozyon testlerine tabi tutmuşlardır. Bunun sonucunda da malzeme yüzey davranış hareketleri incelenmiştir. Bu işlem sonucunda elde edilen sonuçlara dayalı olarak, malzemenin çözeltiyle birlikte reaksiyona girmesi ve sonraki aşamada yorulma deney çalışmaları yapılmıştır. Sonuç olarak yorulma değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

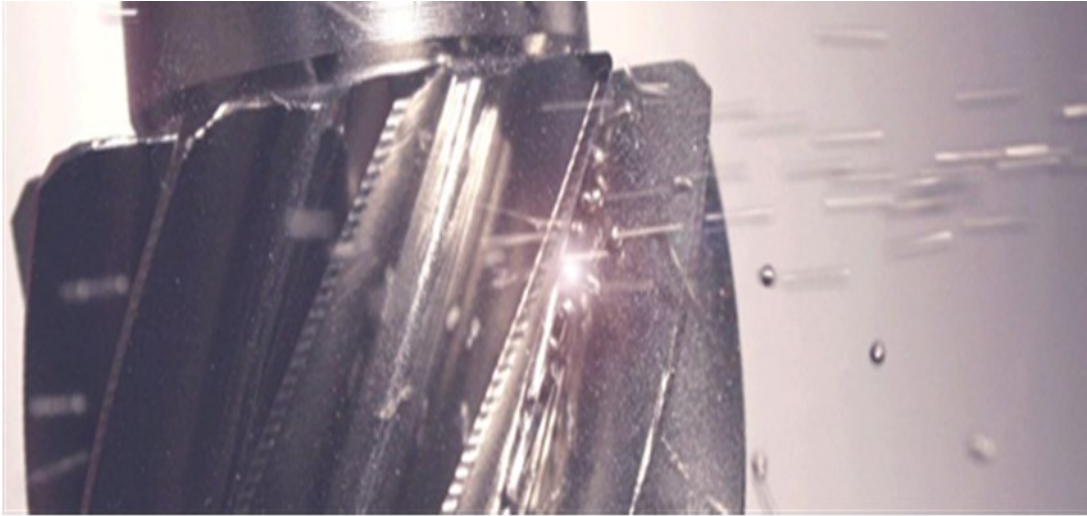
Bilyalı dövme işlem yönteminin fayda sağladığı alanlardan biri de, bükme, burulma, sürekli olarak çekme ve basma yüklerine maruz kalan parçaların yorulma ömürlerinin artmasına katkıda bulunmadır. Bu işlem sayesinde havacılıkta ve makina sanayisinde türbin diskleri ve bıçakları, krank şatları, konik dişliler ve benzeri parçalara uygulama yapıldığı bilinmektedir (Yalçınkaya, 2019).

Bilya dövme işlemi, üretilen parçanın yapıldığı yöntemle göre üzerinde kalan artık gerilmeleri eşit olarak dağılımını düzenlemek için de uygulanmaktadır. Bilyalı dövmenin bu özelliğinden dolayı talaşlı imalat sonrasında yapıldığı takdirde yüzey şekillerinde, delik çaplarında ve parça geometrisinde geometri değişikliğine de neden olmaktadır. Bilyalı dövme öncesinde ve sonrasında geometrik ölçüm değerlerinde değişiklik olduğu tespit edilmiştir (Yalçınkaya, 2019).

Bilyalı dövme işleminde, yüzeyin metal bilyeler ile malzeme cinsine bağlı olarak belirlenmiş bilya taneleri ve malzemesiyle bombardıman yapılmaktadır. Bu işlemdeki amaç, yüzeyde bir artık kuvvet tabakası oluşturarak yüzey sertliği meydana getirmektedir. Şekil 8.1 ve 9.1' da bombardıman görüntüsüyle ilgili alıntıya yer verilmiştir.

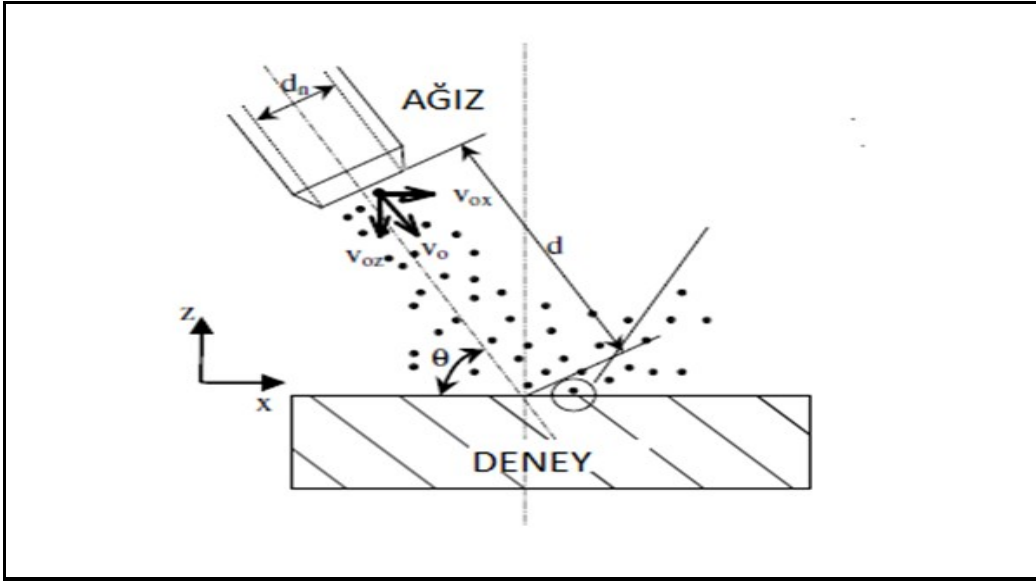


Şekil 8.1: Bombardıman Görüntüsü (<http://www.sspst.com/icerik/goTo/5/shot-peening-bilyali-dovme-nedir.html>)



Şekil 9.1: Bombardıman Görüntüsü (<http://www.sspst.com/icerik/goTo/5/shot-peening-bilyali-dovme-nedir.html>)

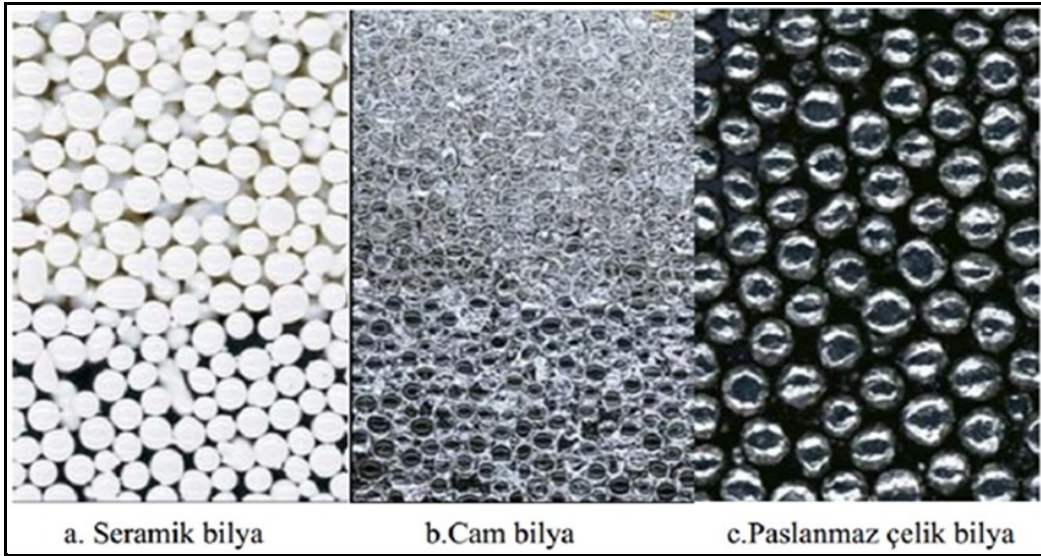
Bilyalı dövme işlemi yönteminde, sonuçların homojen ve verimli olabilmesi için dövme işlemi parametrelerinin iyi belirlenmesi ve tekrarlanabilir olması önem arz etmektedir. Bu parametreler arasında nozzle ağız çapı (d_a), dövme açısı (Θ), dövme mesafesi (d) ve nozzle ağızından bilya tanelerinin çıkış hızı (V_o) ve basınç değeri (P) gösterilebilir. Şekil 10.1’da bilyalı dövme parametrelerine ilişkin görsele yer verilmiştir.



Şekil 10.1: Bilyalı Dövme Parametreleri

(<https://www.edemsimulation.com/spotlight/researching-advances-in-the-use-of-shot-peening-for-corrosion-fatigue-mitigation-in-steam-turbine-blades/>)

Bilyalı dövme işleminde sabit ve belirli standartlarda olması gereken parametreler arasında bilya özellikleri yer almaktadır. Bilya özelliklerinden anlaşılan bilyanın çapı ve malzeme cinsidir. Şekil 11.1’de bilyalı dövme işleminde kullanılan bilya çeşitlerinden örnekler sunulmuştur.



Şekil 11.1: Bilya Çeşitleri (Ünal, 2015).

Bilya çeşitleri Tablo 1.1’de verilmiş olup kullanılan bilyaların uluslararası standartları ve sertlik dereceleri Tablo 2.1’de yer almaktadır (Ünal, 2015).

Tablo 1.1: Bilya Çeşitleri

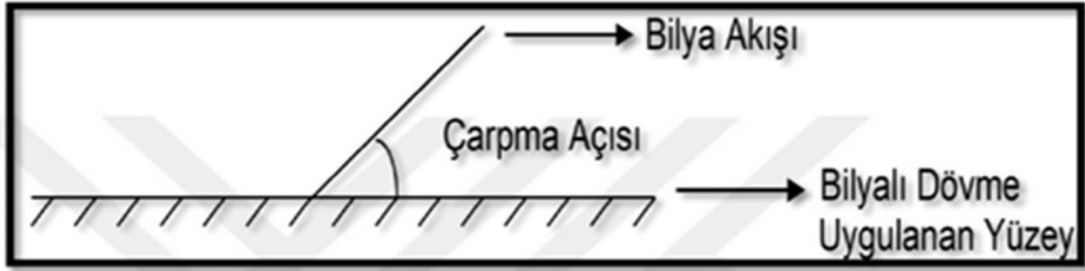
Bilya Çeşitleri		
Demir içerenler	Çelik Bilya, Yuvarlatılmış Kesme Tel, Paslanmaz Çelik Bilya	
Demir dışı olanlar	Metalik Olanlar	Alüminyum, Çinko, Bakır, Bronz
	Metalik Olmayanlar	Cam, Kürecik Seramik Bilya

Tablo 2.2: Bilya Standartları

Bilya Tipi	Uluslararası Standardı	Sertlik Derecesi
Çelik Bilya	AMS 2431/1 veya AMS 2431/2	45-52 HRC veya 55-62 HRC
	AMS 2431/3 veya AMS 2431/8	45-52 HRC veya 55-62 HRC
Tel Kesme Bilya	AMS 2431/6	48-52 HRC
Cam Bilya	AMS 2431/7	58-63 HRC

1.4.1 Bilyalı Dövme Parametrelerinin Belirlenmesi

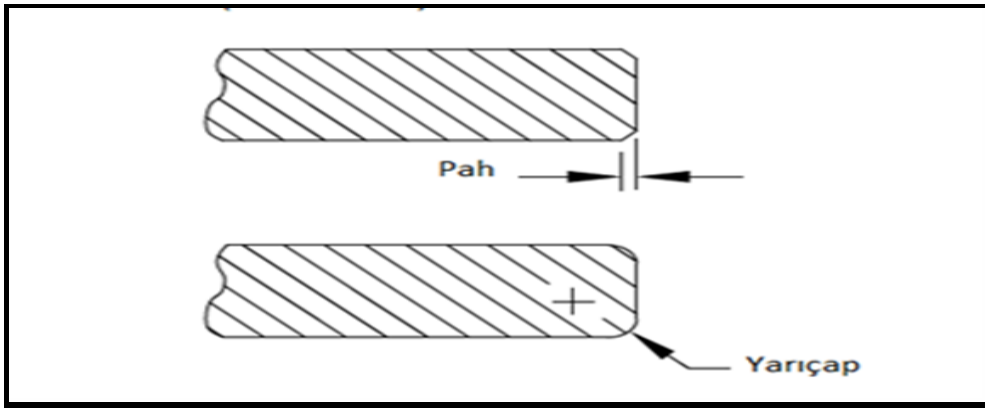
Bilyalı dövme parametreleri belirlenirken, uygulanacak malzeme geometrisine göre olmalıdır. Bilyalı dövme işlemi sonucunda meydana gelebilecek geometrik değişiklikleri parametreleri direk olarak etkilemektedir. Şekil 12.1’de bilya çarpma açısının gösterimine ilişkin görsele yer verilmiştir.



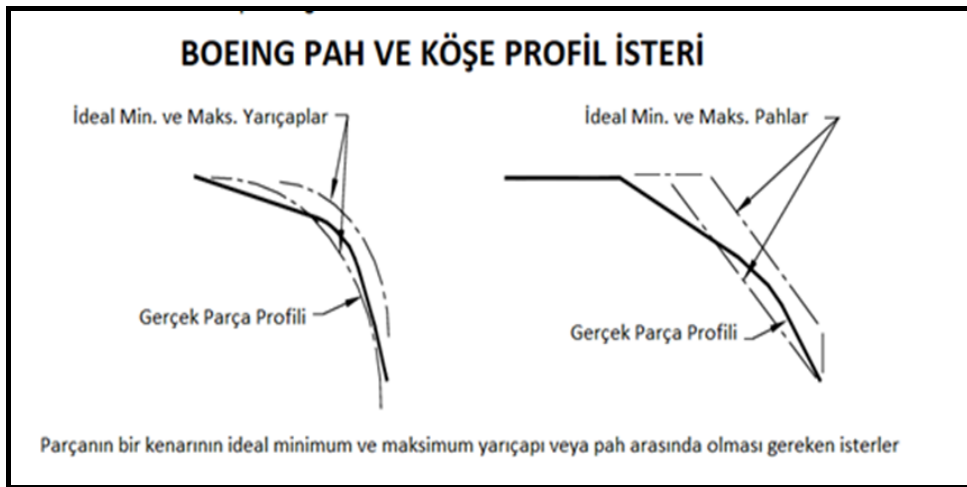
Şekil 12.1: Bilya çarpma açısı gösterimi (Yalçınkaya, 2019).

Şekil 12.1’de çarpmaya bağlı olarak hareket eden bilyanın yönü çarpma açısı olarak adlandırılmaktadır. Dövme şiddeti, çarpma açısının sinüs değerine göre farklılık göstermektedir. Yüzeye çarpan bilya akımının yönünü etki eden tüm parametreler dövme şiddetini etkilemektedir. Nozul pozisyonu, parça geometrisinin değişmesi, diğer bir yüzeyden sekmeler oluşması gibi etkiler çarpma açısının değerinin değişmesine neden olabilir. Uygun çarpma açısı olarak en az 45° kullanılır fakat bazı özel durumlarda bu değer daha da düşebilir (30° gibi).

Bilyalı dövme işlemi yöntemi kullanılırken, dövme makinesi içerisinde kullanılan bilyaların öncesinde makine bünyesinde bulunan bilya büyüklüğüne göre ayarlanmış elekten geçirilerek kullanım deposuna aktarılması gerekmektedir. Bu aktarım sonrasında ise zamanla bilyalı dövme yapılan malzemelerin geometrisi ve sertlik derecesine göre bilyaların zarar gördüğü ve aşındığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda, cihaz kullanımında ve yapılan iş değişikliğinde periyodik olarak bilyalar kontrol edilmelidir. Örneğin; havacılık alanında tasarım ve imalatla uğraşan şirketler bu bilya kaybının azaltılması ve iş parçasının bilyalı dövme işlemi sonrasında hurda olmasını önlemek için, bilyalı dövme özel üretim yöntemlere ilişkin dokümanlar hazırlamaktadır. Ayrıca üretim ya da tasarım sırasında iş parçası geometrisinde keskin duvar ve köşe geometrisi bırakmamaya çalışmaktadır. Şekil 13.1 ve Şekil 14.1’te geometrik gösterime ve boeing firması tasarım isterilerine yönelik görsellere yer verilmiştir.



Şekil 13.1: Geometrik Gösterim (www.boeing.com)



Şekil 14.1: Boeing Firması Tasarım İsterileri (www.boeing.com)

Barker (2001) araştırmasında, bilyalı dövme işleminde belirlenmesi gereken parametrelerin, istenilen dövme şiddetine ve şiddetin etkisine göre farklılık gösterdiğini ifade etmiştir. Dövme şiddeti ve yüzeye fırlatılan bilyaların taşıdığı enerji kinetik enerji ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

1.5 Yorulma Olayı

Yorulma olayı, üç aşamayla açıklanabilir. Birinci olarak, çatlak oluşmasına ve yayılmasına neden olan başlangıç hasarının oluşmasıdır. İkinci olarak devamlı bir şekilde meydana gelen çevrimsel yüklemeler sonucu oluşan çatlaklar sebebiyle yüke maruz kalan kesitin yüklemeye direnemeyecek kadar zayıf düşmesi sonucu çatlağın büyümesi olarak ifade edilebilir. Son olarak da geri dönüşü olmayan yüke karşı zayıf düşen kesit alanda kırık yapının ortaya çıkmasıdır (<http://muhendissel.com/yorulma-olayi/>).

Özet olarak, yorulmanın meydana gelmesi için üç etken vardır. Bunlar; “tekrarlanan gerilme”, “yeteri karlar yüksek bir çekme gerilmesi” ve “yeter sayıda gerilmenin tekrarlanmasıdır (Yalçınkaya, 2019). Yorulma olayına neden olan durumlar, Şekil 15.1’teki gibi ifade edilebilir:



Şekil 15.1: Yorulma Olayına Neden Olan Durumlar (Dieter, 1976)

Metal malzemelerde yorulma olayı birçok farklı şekilde görülmektedir.

- ✓ Haddelene kontak yorulması,

- ✓ Çentiklerde yorulma,
- ✓ Titreşimli aşınma yorulması,
- ✓ Korozyon yorulması,
- ✓ Sünme-yorulmasıdır (Dieter, 1976).

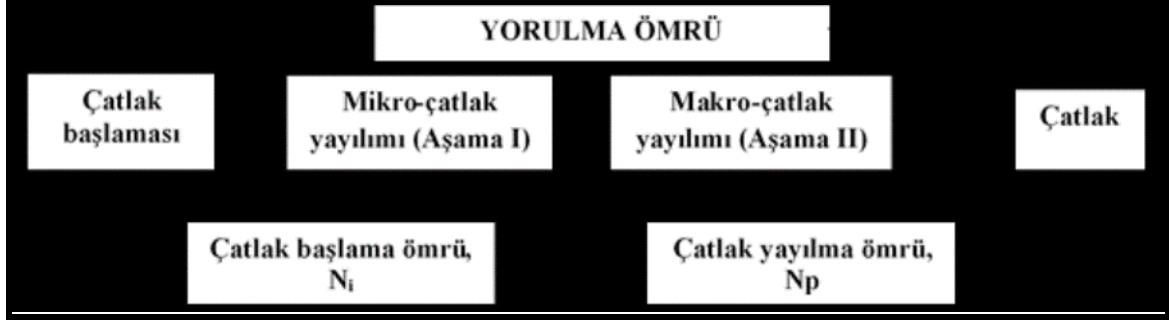
Düşük genlikli gerilmeler altında uzun sürede oluşan ve ömürleri 100.000 tekrardan fazla olan yorulmalara, yüksek tekrarlı yorulma adı verilmektedir (Dieter, 1976). Yüksek genlikli gerilmeler altında kısa sürede oluşan ve ömürleri genelde 100.000 (10-100.000) tekrardan az olan yorulmalar ise, düşük tekrarlı yorulmalardır. Metallerde yorulmaya etki eden pek çok faktör vardır. Bunlar aşağıda verilmiştir.

- ✓ Gerilme halleri: Gerilme genliği, gerilme yığılması, ortalama gerilme, kayma gerilmeleri vb. durumlardır.
- ✓ Malzeme kalitesi ve türü: Yorulma ömrünü etkileyen en temel faktör olup, malzeme cinsine göre büyük değişiklik göstermektedir.
- ✓ Çekme ve akma dayanımı: Yüksek düzeyde dayanımlı malzemeler deformasyona uzun süre dayanır ve bu bağlamda daha uzun vadede yüksek yorulma dayanımı özelliğine sahip olur. Birçok sünek malzeme kısa ömürde daha iyi performans ortaya koyar.
- ✓ Artık gerilmeler: Kaynak, döküm, ısıl işlemler ve benzeri işlemler sonucunda malzeme içyapısında oluşan artık gerilmeler yorulma ömrünü olumsuz etkiler.
- ✓ Tane büyüklüğü: Metal malzemelerde küçük tane büyüklüğüne sahip parçaların yorulma ömürleri daha uzun vadede olmaktadır.
- ✓ Sıcaklık: Çok yüksek veya düşük sıcaklık değerleri malzemenin yorulma ömrünü kısaltmasına yönelik etki etmektedir.
- ✓ Çevre koşulları: Gaz ortamı, korozyon, gibi çevre koşulları malzemenin yorulma ömrünü de etkilemektedir.

Yorulma olayı, malzemede bir noktada oluşan stres dalgalanması sonucunda oluşan çatlakların neden olduğu kalıcı ve yapısal değişim sürecidir. Bu doğrultuda, yorulma çatlakları sıklıkla imalat işlemleri esnasında meydana gelmiş ortaya çıkmış küçük bir oyuk başlar ve bu bölgede döngüsel zorlanma sebebiyle yüksek stres konsantrasyonu oluşur.

Yukarıda daha önce bahsedildiği gibi malzemelerde yorulma, “çatlak oluşumu”, “çatlağın yayılması” ve “meydana gelen çatlağın kontrolsüz yayılması sonucu malzemede meydana gelen ani kırılma olarak üç aşamadan oluşmaktaydı. İlk aşama, kısa süreli olabilir, ikinci

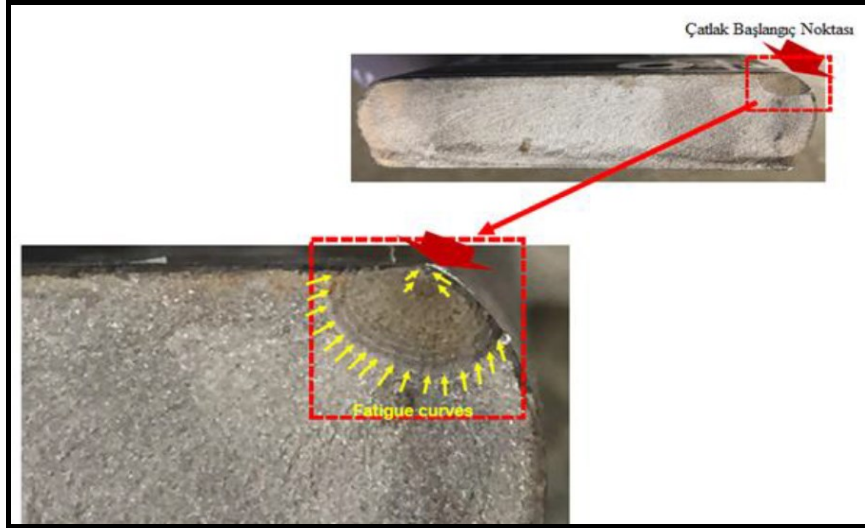
aşama malzeme ömür süresini içerir ve üçüncü aşama da aniden ortaya çıkar. Yorulma çatlaklarını başlatmak için gereken döngü sayısı yani yorulma çatlak başlama ömrü “ N_i ” şeklinde ifade edilir. Yorulma çatlaklarını kritik bir boyuta yaymak için gereken döngü sayısı yani yorulma-çatlak yayılma ömrü N_p şeklinde gösterilir. Toplam yorulma ömrünü ($N_t = N_i + N_p$) ifade eden N_t , başlama ve yayılma ömrünün toplamı Şekil 16.1’de gösterilmiştir



Şekil 16.1: Toplam Yorulma Ömrünün Aşamaları

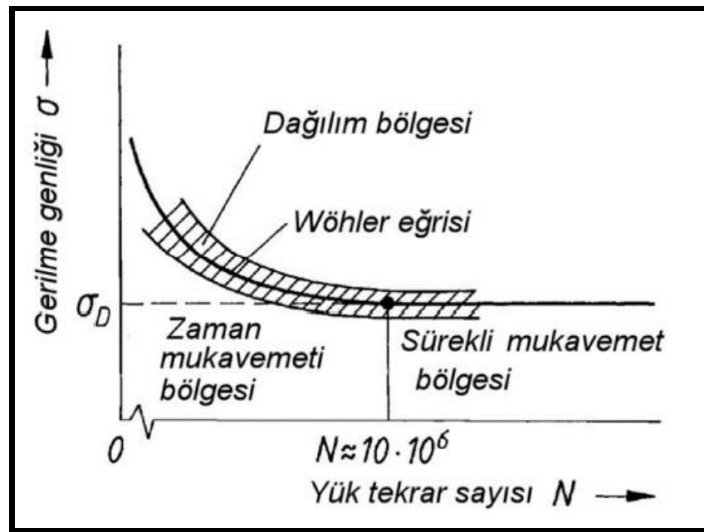
Yorulma çatlak başlangıcı ile yayılma arasında keskin bir sınır yoktur. Bununla birlikte, malzemede önceden bulunan bir çatlak, yorulma çatlak başlatma ömrünü kısaltabilir ya da tamamen ortadan kaldırabilir. Bu şekilde malzemenin toplam yorulma ömrü azalabilir. Bu açıklamalara dayalı olarak, malzemenin yorulma ömrü, bir yorulma çatlak başlatma ve çatlak kritik olmayan boyutlardan kritik boyuta geçirmek için oluşan döngülerin toplamıyla hesaplanır. Özet olarak, yorulma ömrünün, “yorulma çatlak başlangıcı”, “yorulma çatlak yayılımı” ve “kırılma” aşamalarını içerdiği görülmektedir (Dieter, 1976).

Kırılma aşaması, malzeme ömründeki terminal koşullarını temsil etmektedir. Döngüsel olarak malzemenin kullanım süresi, yukarıdaki aşamalar (yorulma çatlak başlangıcı yorulma çatlak yayılımı ve kırılma) değerlendirildiğinde her aşamadaki döngüsel davranış hareketi detaylı anlaşıldığında tespit edilebilir. Yorulma kırıklarının yüzey bölgelerinde tekrar çizgilerine rastlamak mümkündür. Bu kırılma yüzeylerinde, ağaç gövdelerinde olduğu gibi meydana gelen yaş halkaları şeklinde duraklama ve tekrarlamaya çizgileri ortaya çıkar. Bununla ilgili olarak Şekil 17.1’de örnek bir görsele yer verilmiştir.



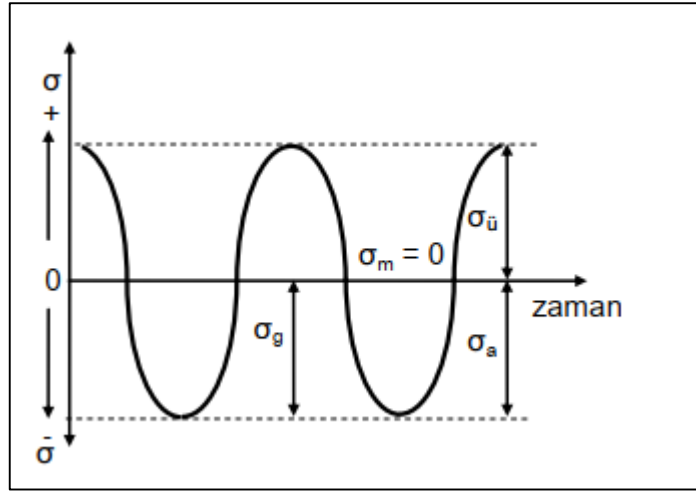
Şekil 17.1: Yorulma kırığı yüzeyi

Metal malzemelerde yorulma kırığı yüzeyi, diğerlerinden kolayca fark edilebilir (Çatlak yayıldıkça ortaya çıkan yüzeyler birbirlerine sürtünür ve yüzeylerin görünümü parlak bir hal alır. Bu yüzeyler bir müddet sonra kendisine uygulanan yükü taşıyamaz duruma gelir ve aniden kırılır. Sonuç olarak, yüzey kaba bir görünüme sahip olur (Ceyhanlı, 2016). Yorulma üzerine sistematik olarak ilk çalışmaları 1852-1870 yılları arasında Alman mühendis August Wöhler tarafından gerçekleştirmiştir (Karahana ve İnce, 2015). Wöhler eğrisi olarak da bilinen ve günümüzde halen kullanılan “S-N” eğrileri, malzemenin yorulma sonucunda hasara maruz kaldığı çevrim sayısına karşılık gelen malzemeye uygulanan gerilme genliğinin büyüklüğünü ifade etmektedir. Şekil 18.1’de Wöhler eğrisine ilişkin alıntıya yer verilmiştir.



Şekil 18.1: Wöhler eğrisi

Malzemelerin yorulma testlerinde, malzemelere zamanla değişen sinüzoidal dalgalı gerilmeler yüklenmektedir (Ceyhanlı, 2016). Bu yorulma testleri, yorulma ömür test cihazlarında yapılmaktadır. Bu cihazlarda malzemeye uygulanan yük artarak en yüksek değere ve azalarak en düşük değere ulaşmaktadır. Malzeme kırılıncaya kadar bu sinüzoidal dalgalı gerilme döngüsü devam etmektedir. Yorulma testleri çoğunlukla sinüzoidal yük uygulanarak gerçekleştirilir. Bu doğrultuda yorulma testlerinde en yüksek ve en düşük gerilmeler tespit edilir. Tam değişken gerilme durumundaki büyüklükler, gerilme genliği (σ_g) ve ortalama gerilmeyi (σ_m) gösteren görsele Şekil 19.1’da aynen yer verilmiştir.



Şekil 19.1: Gerilme hali (Koç, 2006)

2. KURAMSAL ÇERÇEVE

Bu bölümde araştırma konusunun dâhil olduğu AISI 4140 çelik, bilyalı dövme işlemi üzerine yürütülen ulusal ve uluslararası çalışmalara yer verilmiş ve bu çalışmalar geçmişten günümüze hiyerarşik sırada sunulmuştur.

Podgornik ve Vizintin 2001 yılında yaptıkları araştırmada, pulse plazma nitrülenmiş AISI 4140 ve A355 çeliklerinin aşınma direncini, kuru ve yağlanmış kayma koşulları altında değerlendirerek geleneksel plazma nitrülenmiş numunelerle karşılaştırmışlardır. Metalografik, mikrosertlik ve yüzey inceleme teknikleri kullanılarak yüzey karakterizasyonundan sonra, karşı yüzey olarak sertleştirilmiş bilyalı rulmanlı çelik disklerin kullanıldığı pim-disk makinesinde kayma aşınma testleri yapılmıştır. Yüzey işlemi, çelik bileşimi ve test koşullarının, yüzey işlem görmüş pimlerin aşınma direnci üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Test sonuçları, araştırılan çeliklerin aşınma direncinin, plazma ve darbeli plazma nitrüleme yoluyla geliştirilebileceğini göstermiştir. Ayrıca çelik bileşimi, plazma nitrülenmiş çelik yüzeyin özellikleri ve aşınma direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

Lee ve diğerleri (2009) tarafından yürütülen “Laser surface hardening of AISI H13 tool steel” başlıklı araştırmada, AISI H13 takım çeliğinin yüzey sertliğini ve aşınma özelliklerini, katı bir çözelti sertleştirilmesi ve mikro yapıların ısınması için 200 watt’lık bir fiber lazer kullanılarak artırılması yoluyla iyileştirilmeye sağlanmıştır. Lazerle eritilen yüzeyin sertliği incelenmiştir. Isı girişinin lazer ergime bölgesi üzerindeki etkisini tespit edebilmek için arama koşulları teyit edilmiştir. Deney çalışmaları sonucunda elde edilen sonuçlar, AISI H13 takım çeliğinin sertliğinin tahminen HV 240 ve lazer ile yüzey sertleştirme işleminden sonraki sertliğin ise yaklaşık HV 480-510 olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca sertleşme derinliği ve genişliğinin de artmasına için sonuçlara rastlanmıştır.

Tani ve arkadaşları (2010), martensitik paslanmaz çelik oyuk parçaların lazer ile yüzey sertleştirilmesi adlı araştırmalarında içi boş silindirik martensitik paslanmaz çelik (AISI 420) bileşene lazer ile yüzey sertleştirme işlemi uygulamışlardır. İş parçası boyutları değiştirilmeden sadece işlem parametrelerinden çevresel hız değiştirilerek işlem yapılmıştır. Bu işlemlerden elde edilen sonuçlara dayalı olarak önceden sayısal olarak tahmin edilen sonuçların kontrol edilmesine imkân sağlamıştır. Başka bir araştırmada, östemperlenmiş

sünek dökme demir kalitelerinin lazerle yüzey sertleşmesinin mikroyapı, sertlik ve artık gerilmelere etkisi incelenmiştir. Araştırmada, çeşitli östemperleme işlemleri görmüş iki östemperlenmiş sfero dökme demir kalitesinin lazerle yüzey sertleştirme prosesi incelenmiştir. Sertleştirme silindirik numunelerde kızılötesi sürekli dalga Nd: YAG lazer ile yapılmıştır. Lazer yardımıyla sertleştirilmiş numunelerin mikro yapıları optik mikroskop kullanılarak gözlemlenip mikro sertlikleri ölçülmüştür. Yüzey ile radyal kalıntı gerilmeler bir X-ışını difraktometresi ile çalışılmıştır. Her iki materyal için de benzer sonuçlar ortaya konmuştur. İşlem görmüş bölgede kalıntı östenit yapısına sahip kaba bir martenzit tespit edilmiştir. Böylece 650HV ila 800HV arasında mikro sertlikte 0.6mm ila 1mm arasında aşınmaya dirençli etkili bir katman elde edilmiştir. Sıkıştırılmış alanda, sıkıştırılmış kalıntı gerilmeler, gözlenen mikro sertlik ve mikro yapısal farklılıklarla uyumlu olduğu görülmüştür. Sonuç olarak araştırmada, östemperlenmiş sünek demirlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için lazerle yüzey sertleştirmenin kullanılabilir uygun bir yöntem olduğu tespit edilmiştir (Soriano vd., 2011).

Alpaslan, Atar ve Çimenoglu (2012) araştırmasında, sertleştirilmiş bir AISI 4140 çeliğinin plazma nitrülenmiş ve alınan yüzeylerinde nitridasyon öncesinde ve sonrasında oluşturulan arc-PVD-CrN kaplamaların özellikleri mikro sertlik ve aşınma testleri yardımıyla incelenmiştir. Nitrülenmiş yüzey üzerine çökeltilen CrN kaplama, alınan yüzey üzerine çökeltilen CrN kaplamaya kıyasla dikkate değer özellikler taşıdığı ortaya çıkmıştır.

Manfridini ve diğerleri (2014) çalışmasında, Ti-stabilize interstisyel serbest (IF) çeliklerin sertlik yapısını artırmak amacıyla triyot plazma nitrüleme işlemi uygulanmıştır. Nitrüleme kinetiğini geliştirmek ve daha derin vaka derinlikleri elde etmek amacıyla üçlü plazma nitrülemeyen önce bilyeli dövme işlemi de yapılmıştır. Triod plazma nitrüleme, Ti-stabilize IF çeliği üzerinde dört saat boyunca 450 °C, 475 °C ve 500 °C'de gerçekleştirilmiştir. Çelik yapıyı karakterize etmek için taramalı elektron mikroskobu ve X-ışını kırınımı kullanılmıştır. Araştırma sonunda plazmadan sonra önemli bir sertleştirme etkisinin elde edildiği ortaya konmuştur. Başka bir çalışmada Adel (2014), lazer yüzey sertleştirme işlemiyle CK45 çelik alaşımının kuru kayma özelliğinin geliştirilmesini araştırmıştır. Yürüttüğü çalışmasında lazer yüzey sertleştirme işlemi, Nd: cam lazer kullanılarak Ck45 çelik silindirik çubuk numunelerine uygulama işlemi gerçekleştirilmiştir. Lazer yüzey sertleştirme işlemi parametreleri, üç enerji (0.25 J, 0.51 J ve 0.64 J) ve lazer ışını boyutlarının sayısından oluşmaktadır. Yapılan inceleme sonucunda, erimenin, Ck45

çelik alaşımı için 0.64 J'ye eşit veya daha yüksek bir lazer enerjisiyle gerçekleştiği görülmüştür. Ck45 çelik numunelerinde, mikro yapının fazlarını tespit edebilmek için X ışını kırınımı tekniği uygulanmıştır. Bununla birlik lazerle yüzey sertleştirme işleminden sonraki yapısal ve mekanik özellikleri başlıca sertlik ve aşınma direnci özellikleri gözlemlenmiştir. Sertlik değerinin en yüksek enerjide önemli ölçüde arttığı ve lazerle yüzey sertleştirme işleminden sonra kuru kayma aşınma direncinin yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Özkader (2015) tarafından yürütülen araştırmada, ısıtma işleminin, AISI 4140 çeliğinin abrasiv aşınma özelliği üzerine etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda silindirik AISI 4140 çelik malzemeden aşınma, sertlik ve çekme test numuneleri hazır hale getirilmiştir. Bunların bir bölümü kontrol grubu olacak şekilde hiçbir işleme maruz kalmamıştır. Geri kalan numunelere normalizasyon, yumuşatma ve sertleştirme işlemleri uygulanarak dört grup oluşturulmuştur. Deneysel işlemlerin neticesinde sertleştirme ve normalizasyon ısıtma işleminin AISI 4140 malzemenin sertliğini, çekme dayanımını ve aşınma direncini arttırdığı, yumuşatma işleminin ise malzemenin bu değerlerini azalttığı ortaya çıkmıştır.

Liverani ve arkadaşlarının (2016) çalışmasında, kompleks orta karbonlu çelik, bileşenlerin lazerle yüzey sertleştirilmesi için bir kalıntı gerilme modeli ortaya konulması amaçlanmıştır. Araştırmada rastgele geometriye sahip mekanik bileşenlerin lazerle yüzey işlemini takiben kalıntı gerilmelerin değerlendirilmesi için sayısal bir model önerilmiştir. Modelin doğruluğu, hesaplanan gerilmeleri ölçülen değerlerle karşılaştırılarak teyit edilmiştir. Aynı bileşen için lazer akıcılığının ve tarama hızının sertleştirilmiş derinliğe ve kalıntı gerilme durumuna olan etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, daha yüksek lazer akıcılığı ya da sabit akışta maruz kalma hızında bir artışın sertleşmiş derinlikte bir artışa ve basınç dayanma gerilmelerinde bir azalmaya sebep olduğu ortaya çıkmıştır. Başka bir çalışmada, lazer ile yüzey sertleştirme sırasında yüzey emiciliğini belirlemek için sıralı yöntem kullanılmıştır. Bu araştırmada, lazerle yüzey sertleştirme sürecinde yüzey emiciliğini tespit etmek için etkili bir algoritma sunulması amaçlanmıştır. Başka bir çalışmada verilen deneysel sıcaklık verileri, önerilen yöntemin uygulanabilirliğini göstermek için kullanılmıştır. Araştırma sonucunda önerilen yöntemin lazerle yüzey sertleştirme işlemi sırasında yüzey emilmesini doğru bir şekilde tahmin edebildiği ortaya çıkmıştır (Nguyen ve Yang, 2016).

Zeisig ve arkadaşları (2017) tarafından yürütülen araştırmada, yüksek performanslı takım çelikleri için yeni bir FeCrMoVC lazer kaplama alaşımının mikro yapı ve abrasiv aşınma davranışına bakılmıştır. Kaynak işlemi esnasında yüksek soğutma hızları ve uygun lazer parametreleri sebebiyle, martensit, östenit ve VC-ve Mo2C-tipi karbürlerden oluşan ince, homojen bir mikro yapı ortaya çıkmıştır. Kısaca, bu araştırma, yeni FeCrMoVC alaşımı ile lazer kaplaması, yüksek performanslı karbon açısından zengin çelik araçların tamir kaynağı ve sert dolgu işlemi için yüksek bir potansiyel olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Guarino ve arkadaşları (2017) tarafından “High Power Diode Laser (HPDL) surface hardening of low carbonsteel: Fatigue life improvement analysis” başlıklı araştırmalarında AISI 1040 çelik bileşenlerin yorulma ömrünü uzatmak amacıyla yüksek ve güçlü özelliğe sahip diyot lazeri uygulanmıştır. Lazer ışınımı ile çelik yüzey arasındaki etkileşime bakılmıştır. Lazer tedavisinin etkisi, yorulma testi ile incelenmiştir. Öncelikle takip eden lazer işlemsel parametrelerinin her birinin rolü değerlendirilmiştir. İkinci aşama olarak, lazer işleminin etkilerini ve lazer çalışma parametrelerinin bileşenlerin yorulma dayanımı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla eğilme ile yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların analizinden elde edilen sonuçlar neticesinde lazer işleminin ışınlanmış bileşenlerin yorulma ömrünü önemli düzeyde arttırabileceği ve bu yöntemin endüstriyel uygulamalar tarafından kullanılabilir bir metot olduğu tespit edilmiştir.

2017 yılında Syed ve arkadaşları tarafından yürütülen araştırmada ise lazer yüzey sertleştirme için bir C-Mn düşük karbonlu otomotiv çelik sac tercih edilmiştir. Çelik sac, derinliği 250–300 µm özelliğinde olan, kalınlığı boyunca tabakalı kompozit yapı oluşturmak için yüksek güçlü diyot lazer kullanılarak yüzey bölgenin sertleştirilmesi amaçlanmıştır. Mikro yapısı işlenmiş katmanlı çelik levha, optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu, X ışını kırınımı gibi farklı karakterizasyon yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. İşlem yüzeyindeki martensit, beynit ve önceki ferrit şeklinde sert fazların meydana gelmesi sebebiyle önemli oranda EBSD (Elektron Geri saçılım Difraksiyonu) metodu kullanılarak sertliğin iyileştirilmesine yönelik sonuçlar elde edilmiştir. Menezes ve arkadaşları (2017) çalışmasında ise, sıralı olarak plazması karbürize edilmiş ve plazması nitrülenmiş AISI 316L östenitik paslanmaz çeliğin aşınma ve korozyon direnci üzerine bir bilyeli dövme işleminin etkisi araştırılmıştır. Triyot plazma karbonlama ve plazma nitrüleme, iki sıcaklıkta (400 °C ve 475 °C) sırayla gerçekleştirilmiştir. Sıralı plazma işlemlerinden önce bilyalı dövme işlemi, yüzeye yakın sertlikte önemli bir artışa neden olmuştur. 475 °C'de sıralı plazma işlemi ile kombinasyon halinde bilya dövme ön işlemi, karbonlanmış ve

nitrürlenmiş katmanların kalınlıklarında daha fazla artış sağlayarak daha büyük bir sertleştirme derinliğine yol açmıştır. Gök, Çay, Koçyiğit ve Yıldız (2018) çalışmasında, AISI 4140 çeliğinin yüksek sıcaklıktaki kuru kayma aşınma davranışını araştırmışlardır. Testler, 100, 200, 300 ve 450°C'lik oda sıcaklığında ve 3, 5, 7 ve 10 N'lik yükler altında ısı modüllü Pin-On-Disk aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Numunelerde meydana gelen hacim kayıplarını belirlemek için üç boyutlu optik mikroskop kullanılmıştır. Aşınmış numunelerin yüzey morfolojisi Taramalı Elektron Mikroskobu ile araştırılmış ve aşınma sonucu oluşan oksitlerin tiplerini belirlemek için Raman spektrometrisi kullanılmıştır. Çalışmanın sonunda, Yükler arttıkça numunelerin hacim kayıplarının arttığı ortaya çıkmıştır.

Son yıllarda yürütülen araştırmalar incelendiğinde de bu konu üzerinde çalışmalara rastlamak mümkündür. Örneğin Bozkurt, Kovacı, Yetim ve Çelik (2022) tarafından yürütülen araştırmada AISI 4140 düşük alaşımlı çeliğin tribokorozyon özelliklerine bilyalı dövmenin etkisi detaylı olarak incelenmiştir. AISI 4140 numuneleri farklı Almen yoğunluklarında bilyalı dövülmüş ve tribokorozyon performansları gözlemlenmiştir. Araştırmanın sonucunda, artan Almen yoğunluğunun yüzey özelliklerini hidrofobikten hidrofilik hale getirdiği görülmüştür. Ayrıca artan bilyeli dövme şiddeti ile malzemenin tribokorozyon performansının artan yüzey sertliği açısından iyileştiği tespit edilmiştir. Dong ve arkadaşları (2022) tarafından yapılan çalışmada, gradyan nano tanecikleri ile ultra güçlü bir yüzey tabakası oluşturulmuş ve M50 rulman çeliğinin aşınma direncini arttırmak için ultrasonik bilyeli dövme kullanılmıştır. Araştırmada, ultrasonik bilyeli dövme işleminin M50 çeliğinin yüzey bütünlüğü, mikro yapıları ve aşınma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Mikro yapısal gözlem, gradyan nano taneli yüzey tabakasının 200 µm'nin üzerinde kalınlıkta olduğunu göstermektedir. Ayrıca nano yapılı M50 çeliğinin mikro sertliği, yaklaşık 800 µm nüfuz derinliği ile 795 HV'den 987 HV'ye yükseltilir. Aşınma testleri sonuçlara göre, ultrasonik bilyeli dövme ile işlenmiş M50'nin aşınma oranının işlenmemiş numunelere kıyasla kayma koşullarında %50,4 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, araştırmada sürtünme işlemi sırasında oluşan plastik deformasyon tabakasının kalınlığı azaltılmıştır. Bu çalışma, malzeme bilimcilerine ve mühendislerine, yüksek mukavemetli çeliklerin aşınma direncini arttırmak için verimli bir yüzey işleme yöntemi sağlamaktadır. Świetlicki, Szalave Walczak (2022) araştırmasında bilyalı dövme yöntemlerine ilişkin temel bilgilere yer verilmiştir. Bilyeli dövme ve kavitasyon dövme işlemlerinin dövme işlemleri ve metalik bileşenlerin yüzey tabaka özellikleri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Ayrıca, dövmenin metalik malzemelerin

işlemsel performansı üzerindeki etkileri özetlenmiştir. Elde edilen önemli sonuçlar şunlar: Bilyalı dövme genellikle yüzey pürüzlülüğünü azaltmak, sertliği artırmak ve yüzey tabakası mikro yapısını yoğunlaştırmak için uygulanmakta ve bu uygulama da sertleştirme etkisini yol açmaktadır. Bunun yanında malzemeye verilen artık basınç gerilmeleri, yüzey tabakasının performansı üzerinde faydalı bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, dövme, yorulmaya, korozyona ve aşınmaya meyilli metalik yapılar için faydalı olabilir. Son zamanlarda, kaviteasyonla dövme giderek daha fazla geliştirilmiştir. Bu derleme şeklindeki araştırmada kaviteasyonla dövme üzerine yapılan araştırmaların çoğunun, katkı maddesi ile üretilmiş metalik malzemelerin işlenmesinde eksik kaldığı ileri sürülmektedir.

3. YÖNTEM

Bu araştırmada AISI 4041 eliği, farklı yzey modifikasyonları işlemine tabi tutularak mekanik ve kuru kayma aşınma davranışları izerine olan etkisi incelenmiştir. Bu amaç kapsamında, bir grup numune nitrleme işlemine maruz tutulurken, bir grup bilyalı dövme işlemine diğer bir grup ise aşırı bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuştur. Bu süreçte deneysel çalışmalar yapılmış ve testler yapılmıştır.

3.1 Aşındırılacak Numunelerin Hazırlanması

Deneylerde 75x25x10 mm boyutlarında Al 4041 alaşımı kullanılmıştır. Bu boyutlarda hazır hale getirilen aşınma numunelerinin yzey bölgesine herhangi bir işlem tabi tutulmadan ASTM G 65 tipi aşınma cihazına bağlanmıştır. Aşındırma işleminden sonra yzeyler basınçlı havayla temizlenerek kütle kayıpları belirlenmiştir. Hata payını en aza indirmek için aşınma deney çalışmalar üçer defa tekrarlanarak ortalama değerleri hesaplanmıştır.

3.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Elektron Microscopy [SEM])

Numunelerin aşınma yzeylerinden SEM mikroskobu yardımı ile farklı büyütmelerde görüntüleri çekilerek numune yzeyinde ortaya çıkan aşınma çeşidinin tespit edilmesinde yararlanılmıştır. Bununla birlikte aşındırıcı olarak kullanılan numunelerin SEM görüntüleri çekilmiştir.

3.3 Noktasal Analiz alışmaları (Energy Dispersive Spectroscopy [EDS])

SEM mikroskobunun bir ünitesini oluşturan Noktasal Analiz alışmaları modülü ile numunelerin ihtiyaç duyulan noktalarından noktasal, bölgesel ve çizgisel analizleri yapılmıştır.

3.4 Sertlik Deneyleri

Deney numunelerinin sertlikleri Qness marka mikro sertlik cihazında 200 g yük ve 15 g/sn yükleme hızı kullanılarak belirlenmiştir.

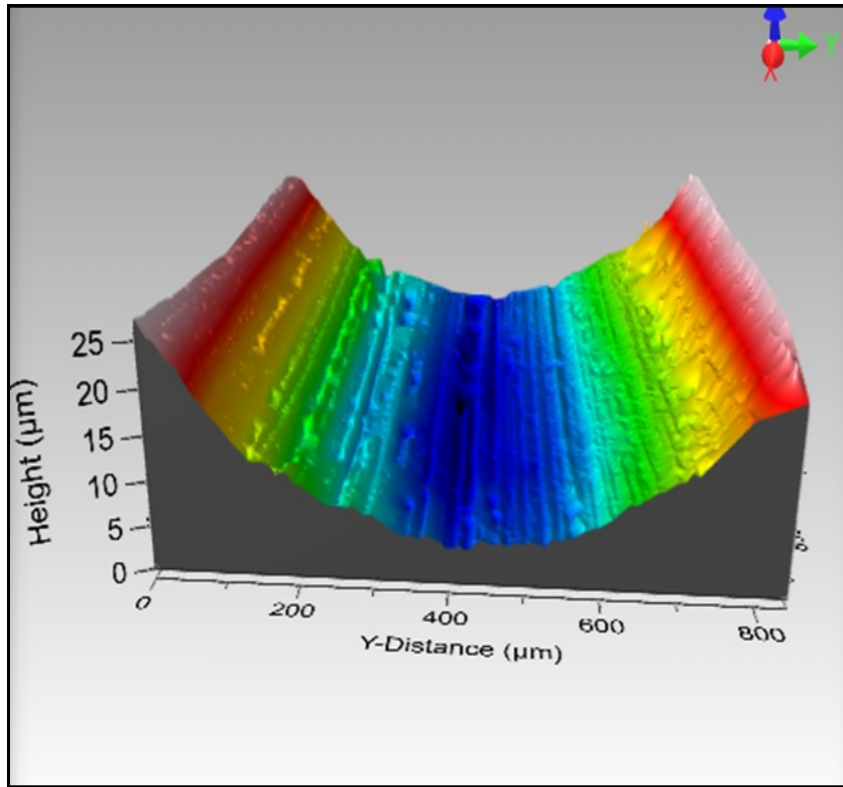
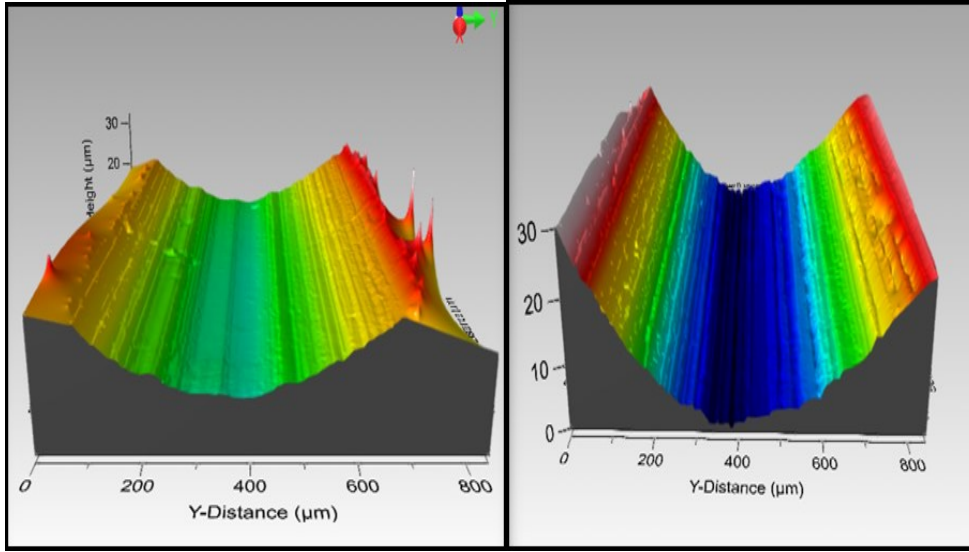
3.5 Kuru Kayma Aşınma Deneyleri

Kuru kayma aşınma testleri kuru ortamda ASTM G-99 standardındaki deney cihazı kullanılarak yapılmıştır. Bu cihazın görüntüsü Şekil 20’de aynen verilmiştir. Deneysel işlemler 5,10 ve 15 N’luk yükler altında gerçekleştirilmiştir. Kayma hızı 0.02 m/sn olarak belirlenmiştir. Aşındırıcı bilya olarak 6 mm çapında Al₂O₃ bilya kullanılmıştır.



Şekil 20.1: Ball-on-Disk Deney cihazı

3.6 3D Profilometre Görüntüleri

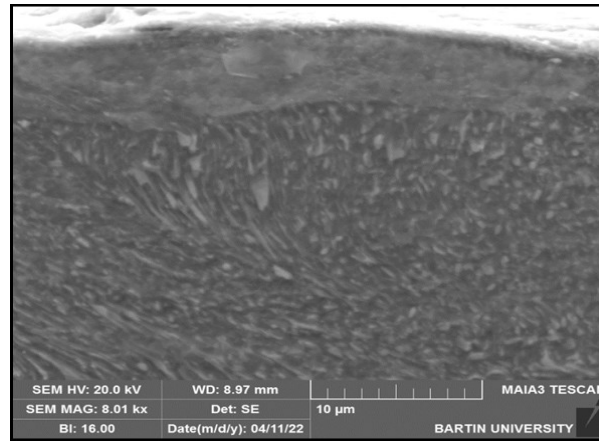


Şekil 21.1: Numunelerin 3 D profilometre görüntüleri a. Nitrürlü numune 15N yük b. Aşırı bilyalı dövülmüş numune 15 N yük c. Bilyalı dövülmüş numune 15 N yük

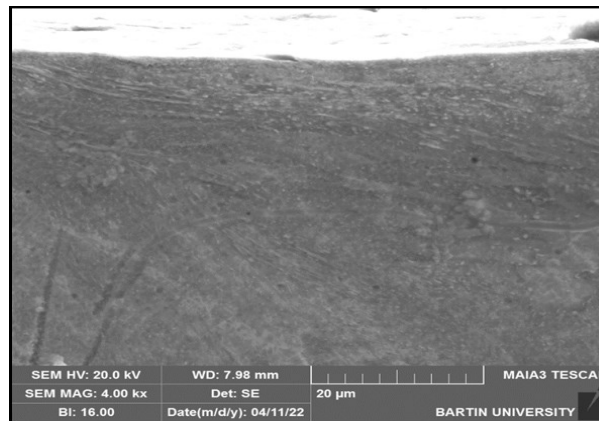
4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada; AISI 4140 çeliğinin bilyalı dövme ve nitrürleme işlemine tabi tutulmuştur. Bilyalı dövme işlemi normal ve aşırı olarak iki parametrede gerçekleştirilmiştir. Yapılan işlemler sonrasında AISI 4140 çelikleri reciprocating tipi kuru kayma aşınma deneyine tabi tutularak numunelere uygulanan nitrürleme ve bilyalı dövme işlemini çeliklerin aşınma davranışı üzerinde nasıl bir etkiye sahip oldukları belirlenmeye çalışılmıştır.

Aşırı bilyalı dövme işlemine tabi tutulan numunenin SEM mikroyapı görüntüsü Şekil 22.1'de verilmiştir. Görüleceği üzere yaklaşık 5 ve 7 µm kalınlığında alt yüzey üzerinde dövme sonucu oluşan amorf bir yapının varlığı dikkat çekmektedir. Yapılan sertlik ölçümlerinde bu yüzeyin sertliğinin HV 700 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 22.1: Aşırı bilyalı dövülmüş numune SEM mikroyapı görüntüsü 8000 x.

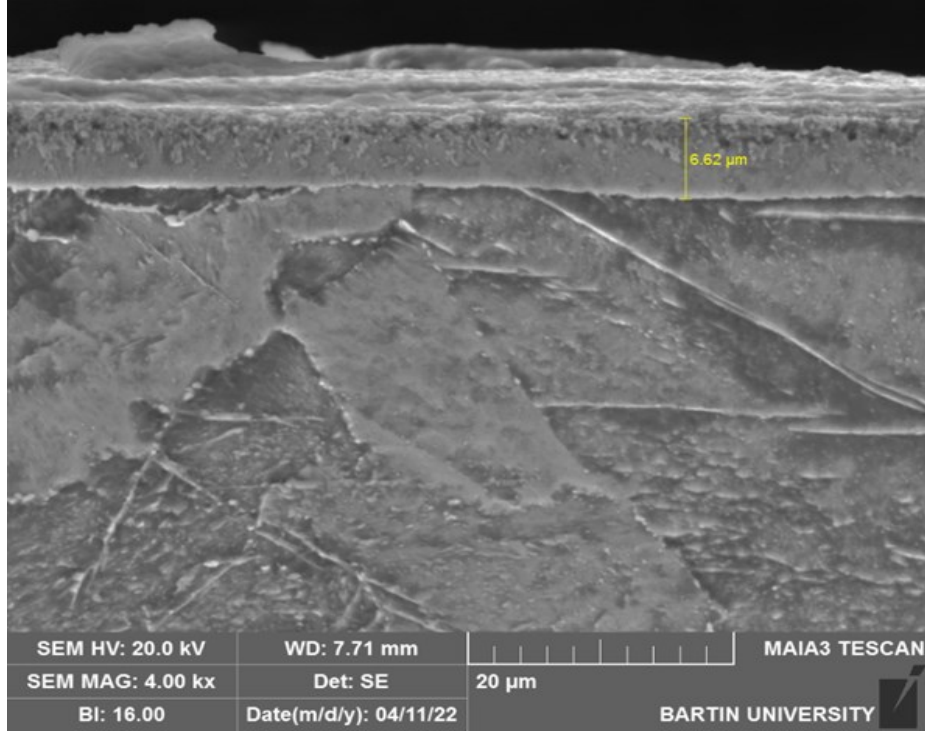


Şekil 23.1: Bilyalı dövülmüş numune SEM mikroyapı görüntüsü 4000 x.



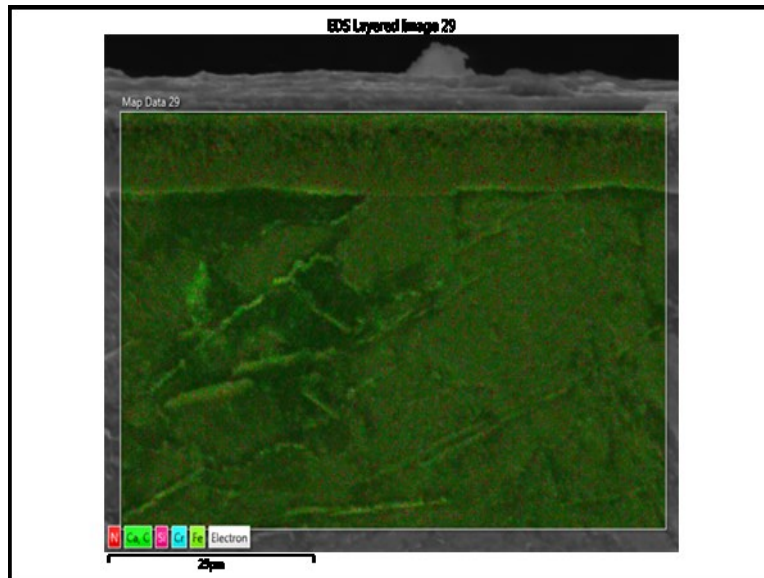
Şekil 24.1: İşlemsiz numune SEM mikroyapı görüntüsü 2000 x.

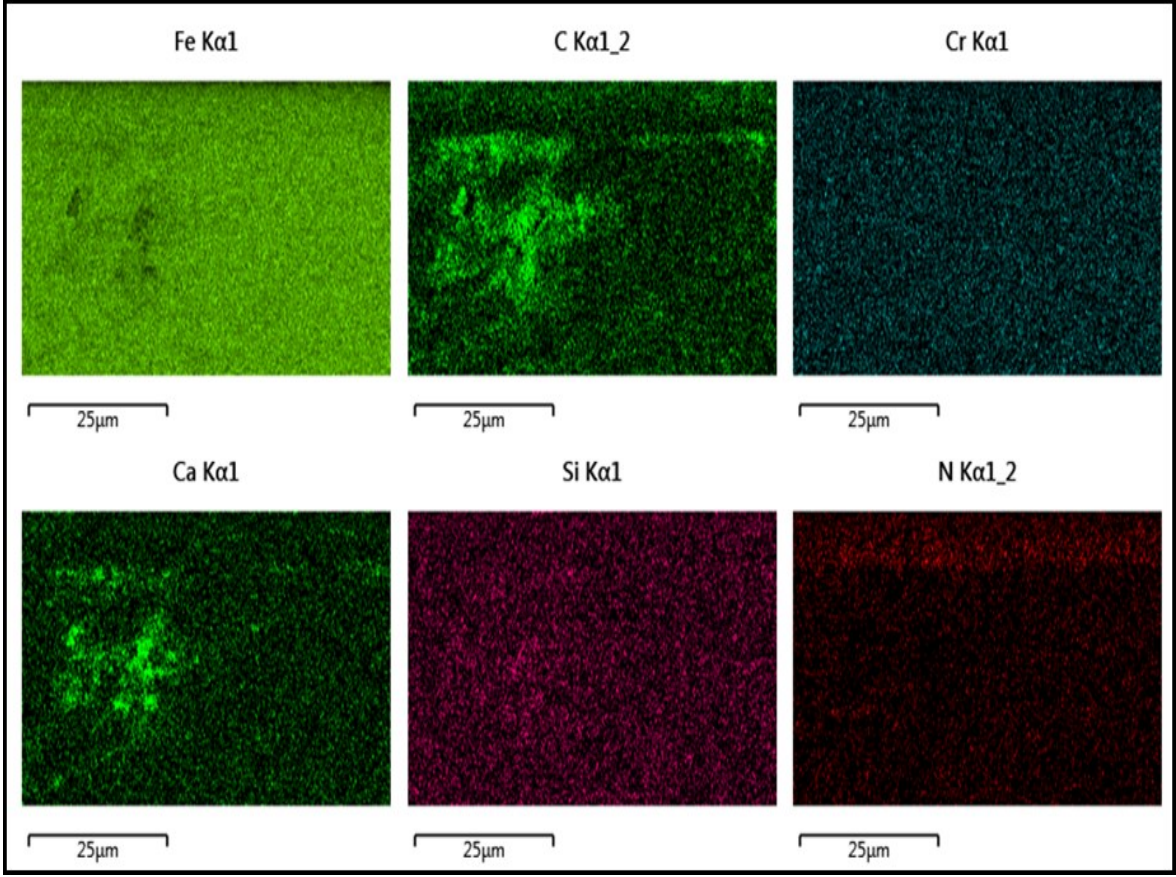
Şekil 23.1’de bilyalı dövülmüş AISI 4140 çeliğine ait SEM mikroyapı fotoğrafı görülmektedir. Bir önceki numune ile kıyaslandığında numune üst yüzeyinde oluşan dövme tabaka kalınlığının daha düşük olduğu ve perlit yapının tamamen bozulmadığı dikkat çekmektedir. Bu numune dövülmüş bölge üzerinden alınan sertlik değerinin ise HV 500 olduğu tespit edilmiştir. Şekil 24.1’te verilen ve işlemsiz numunenin SEM mikroyapı fotoğrafı incelendiğinde ferrit ve sementit yapının varlığı açıkça görülmektedir. Ferrit matris içerisinde oluşan sementitlerin tamamen lamelli şekilde değilde kesik lamel ve küresele yakın sementitler şekilde oluştuğu görülmektedir.



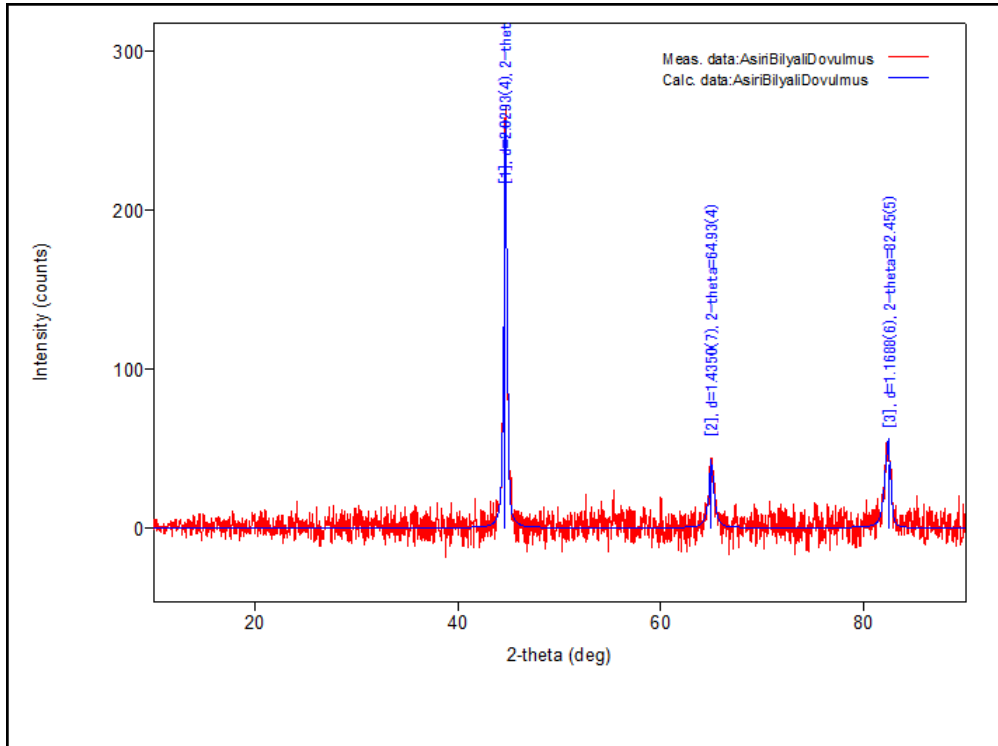
Şekil 25.1: Nitrülenmiş numune SEM mikroyapı görüntüsü 4000 x.

Şekil 25.1’de verilen nitrülenmiş numunenin SEM mikroyapı fotoğrafı incelendiğinde yaklaşık 6 μm kalınlığında oluşan nitrid tabakasının varlığı görülmektedir. Yine nitridleme işlemi esnasında numunenin 40 μm bir kısmında sıcaklıktan etkilenerek mikroyapısının matrise göre değiştiği görülmektedir. Nitridleme sonucunda numune yüzey sertliği 500 Hv olarak tespit edilmiştir. Yine Şekil 26.1’de bu numune arakesit yüzeyinden alınan EDS analiz sonuçlarında azot elementinin varlığı görülebilmektedir.

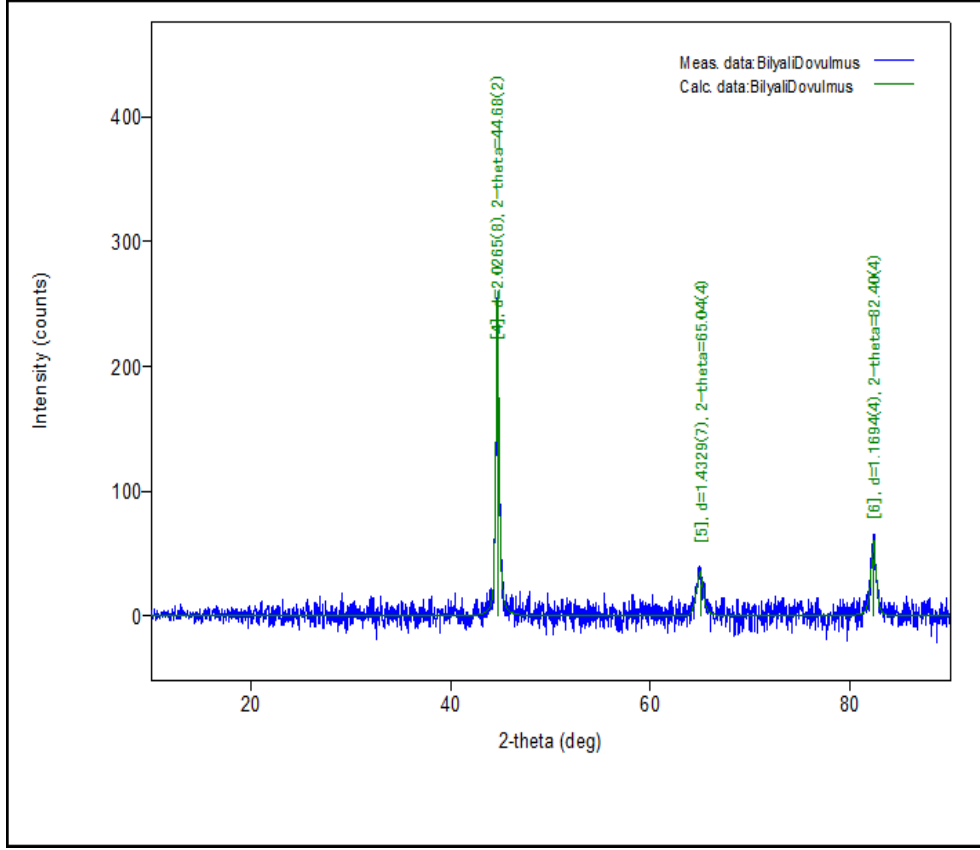




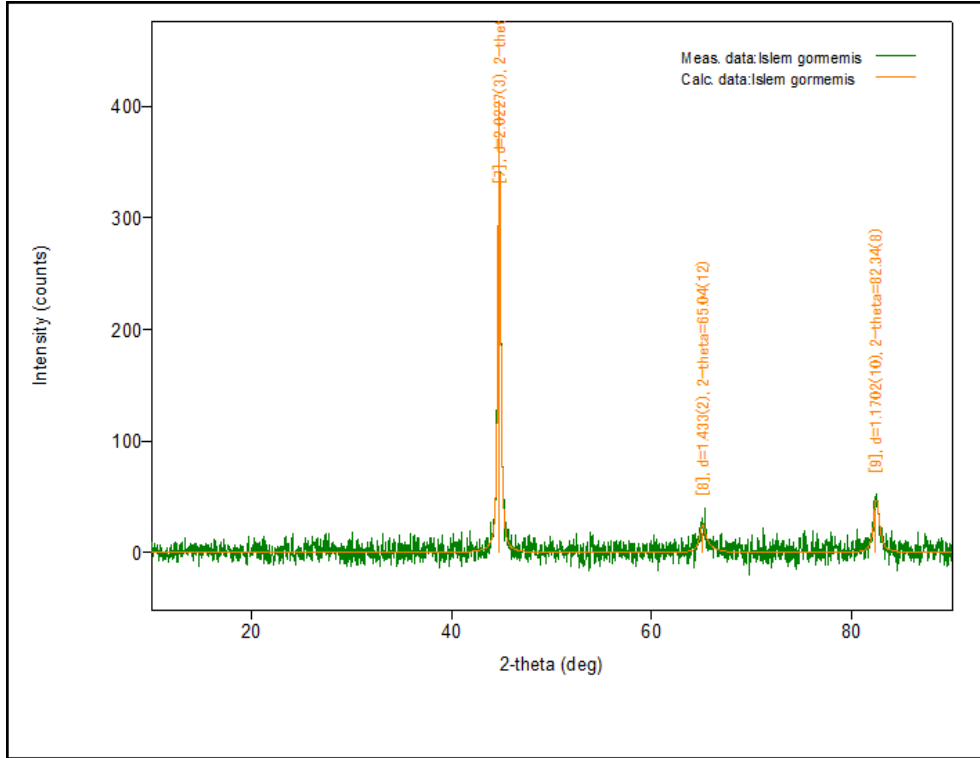
Şekil 26.1: Nitrülenmiş numune SEM (EDS) mikroyapı görüntüsü.



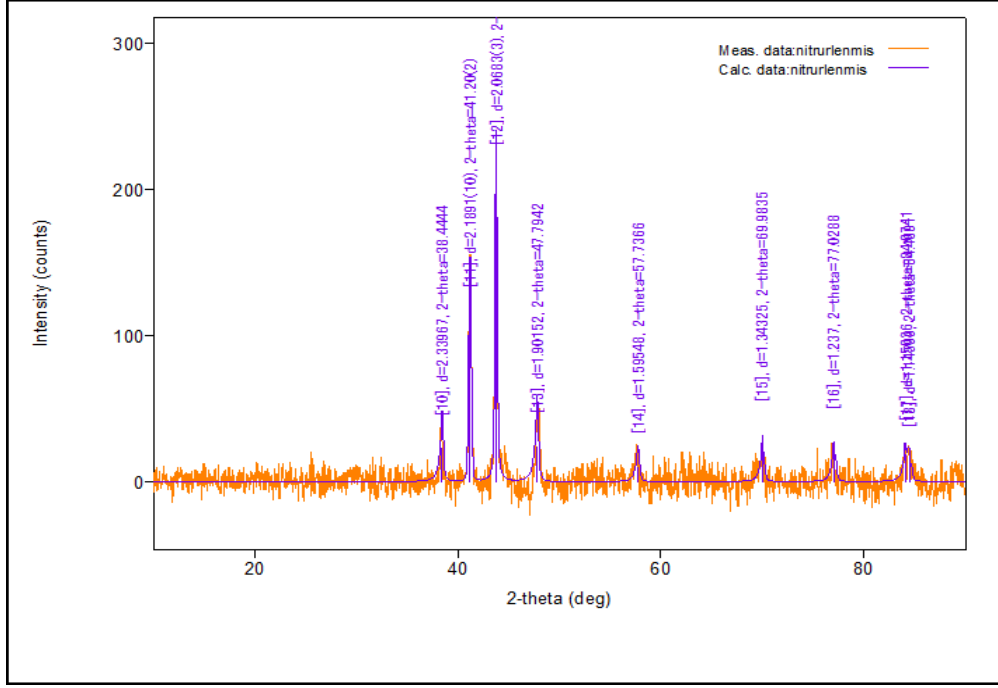
Şekil 27.1: Aşırı bilyalı dövülmüş numune X-RAY grafiği.



Şekil 28.1: Bilyalı dövülmüş numune X-RAY grafiği.

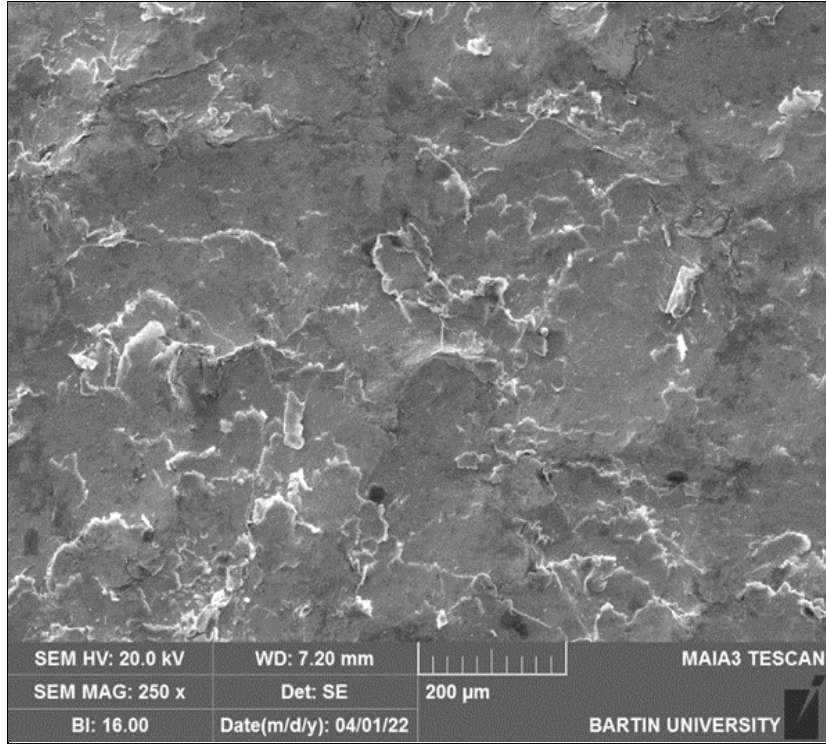


Şekil 29.1: İşlemsiz numune X-RAY grafiği.

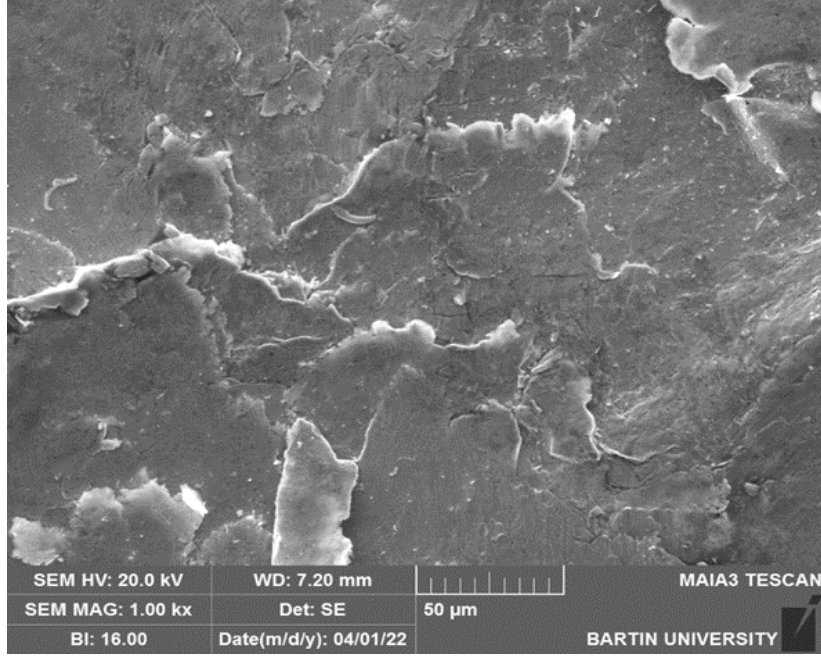


Şekil 30.1: Nitrülenmiş numune X-RAY grafiği.

Şekil 27.1-30.1 da sırası ile numunelerin X ray grafikleri verilmiştir. Burada nitrülenmiş numune haricinde diğer numunelerde farklı bir faz yapısına rastlanmamıştır.

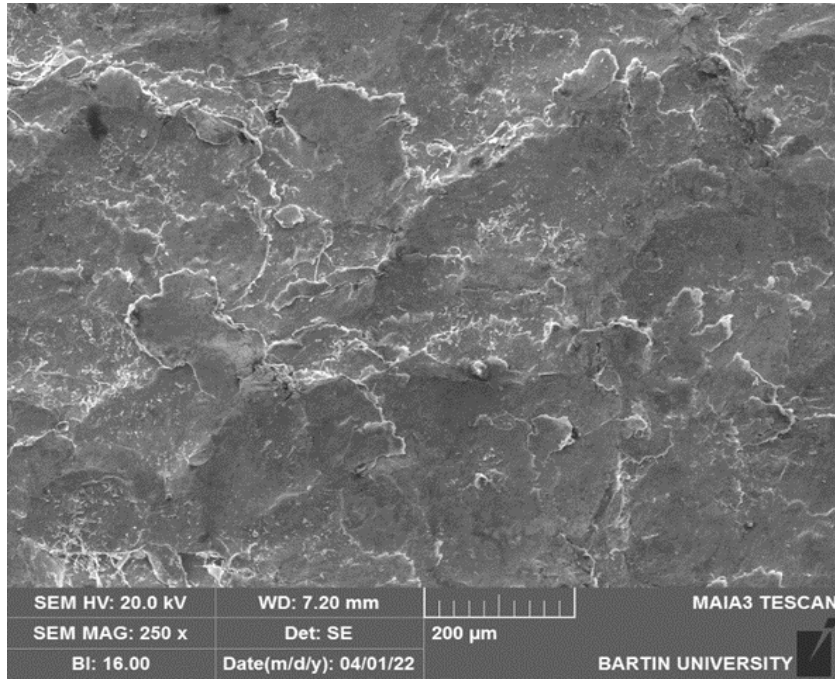


Şekil 31.1: Aşırı bilyalı dövülmüş numune SEM yüzey görüntüsü 250 x

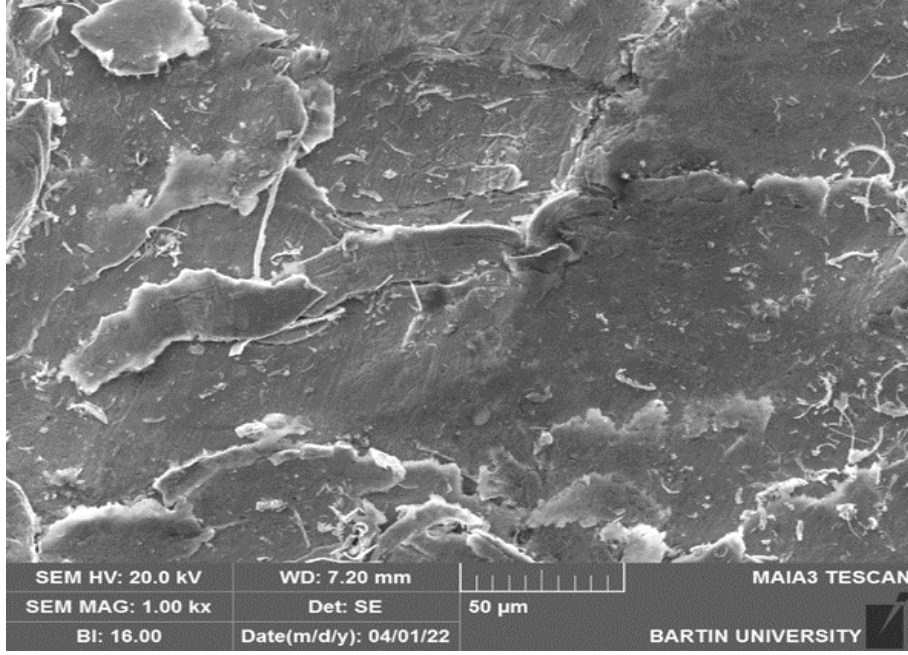


Şekil 32.1: Aşırı bilyalı dövülmüş numune SEM yüzey görüntüsü 1000 x.

Şekil 31.1 ve 32.1’de aşırı bilyalı dövülmüş numunenin farklı büyütmelelerdeki yüzey görüntüsü verilmiştir. Görüntülerde bilyalı dövmenin etkisi ile yüzeyde oluşan plastik deformasyonun varlığı görülmektedir. Ayrıca metalik parçanın yüzeyinde ekstrüzyon sonucu bazı partiküllerin koştığı bazı kısımların ise kenar oluşturduğu görülmektedir.

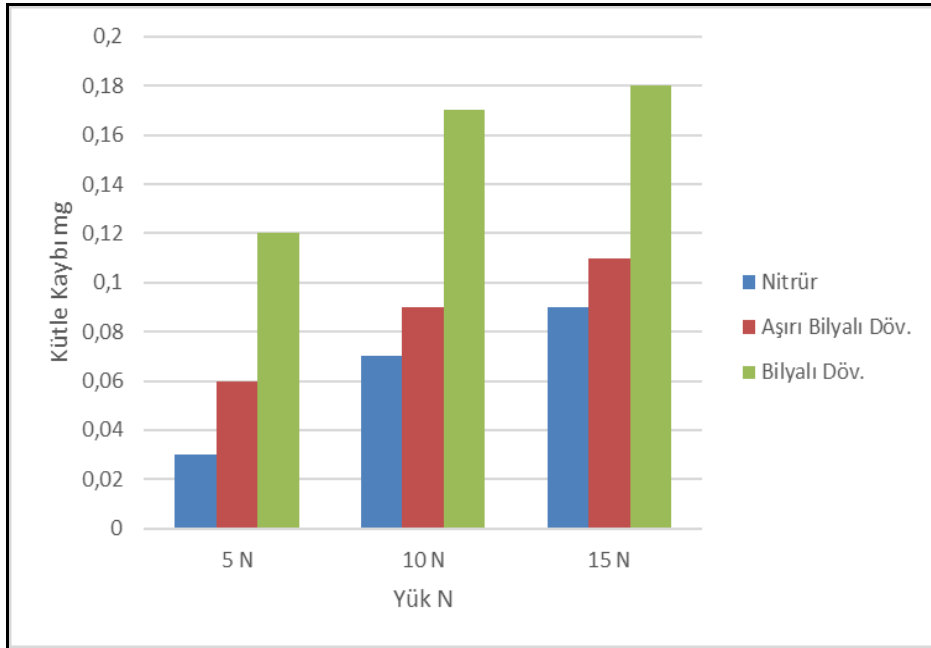


Şekil 33.1: Bilyalı dövülmüş numune SEM yüzey görüntüsü 250 x.



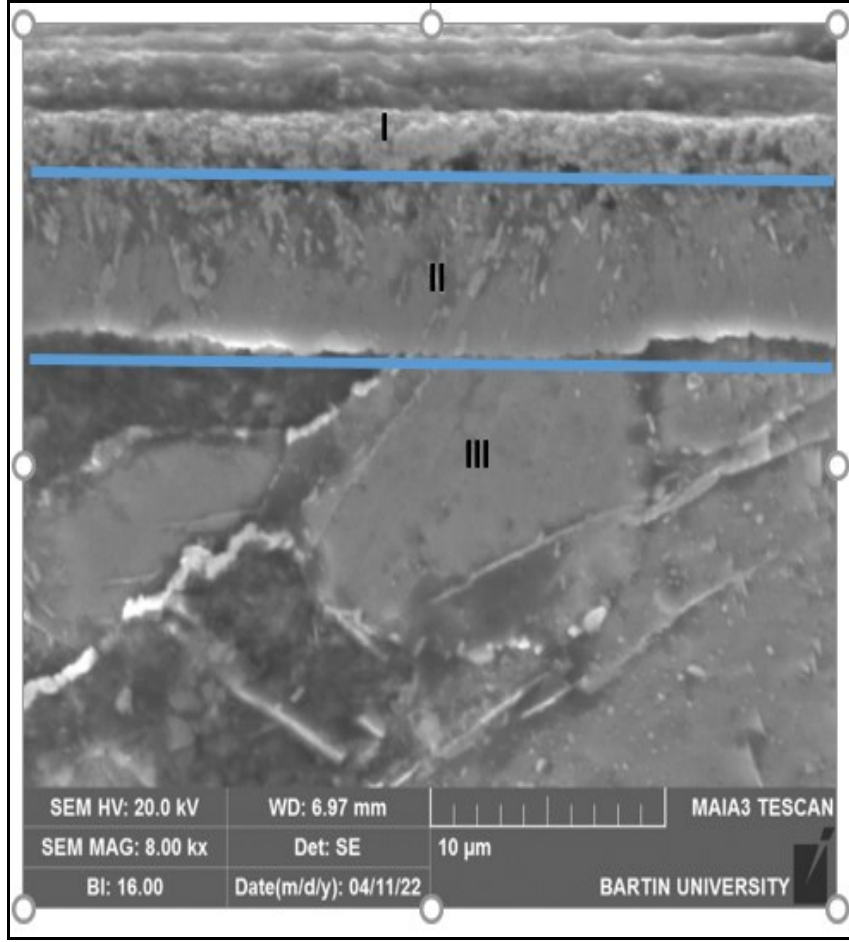
Şekil 34.1: Bilyalı dövülmüş numune SEM yüzey görüntüsü 1000 x.

Şekil 33.1 ve 34.1’de ise bilyalı dövülmüş numunenin farklı büyütmelelerdeki yüzey görüntüsü verilmiştir. Yine görüntülerde bilyalı dövmenin etkisi ile yüzeyde oluşan plastik deformasyonun varlığı görülmektedir. Ancak bir önceki numuneden (aşırı bilyalı dövülmüş) farklı olarak yüzeyde daha fazla dövme işleminden sonra atık metalik partikül kaldığı görülmektedir.



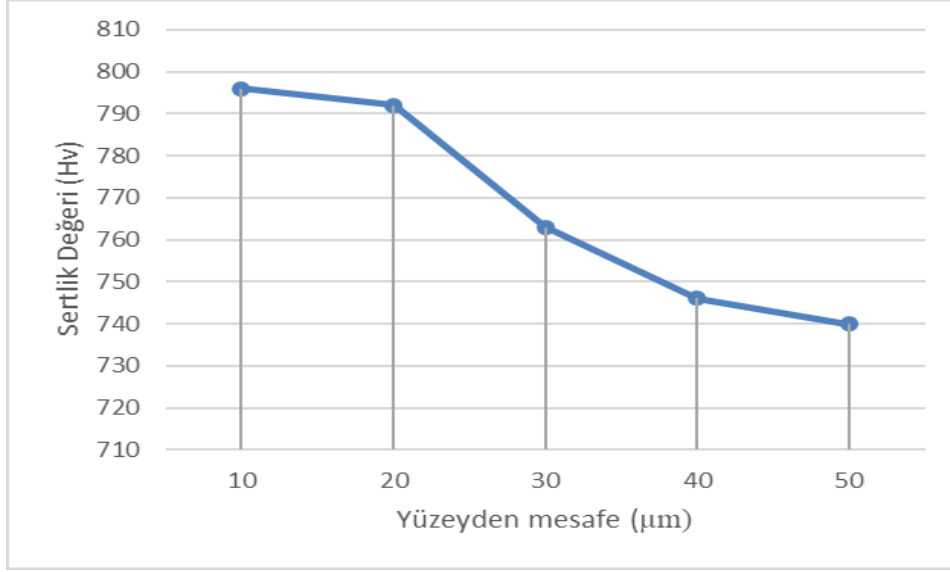
Şekil 35.1: Farklı yük altında numunelerde meydana gelen hacim kayıpları (mm^3)

Numunelerin 5, 10 ve 15 N luk yük altında aşındırma işlemine tabi tutulduktan sonra elde edilen hacim kayıpları Şekil 35.1'de verilmiştir. Grafikten görüleceği üzere en yüksek aşınma direnci nitrürlenmiş numunelerde görülmüştür. Nitrürlenme işlemi, yüzey sertliği veya diğer özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla azot iyonlarının malzeme içerisine yayılımı sonucu azot yoğunluğuna paralel olarak oluşturulan nitrür fazlarıyla yüzeyin geliştirilmesine dayanan termokimyasal bir yüzey işlemdir. Bu yöntem farklı olarak uygulanabilmektedir. Plazma yüzey işlemleri değişik endüstriyel uygulamalarda kullanılır. Yenilikçi bir yüzey sertleştirme yöntemi olan İyon (plazma) nitrürasyonu, çelik, dökme demir, titanyum ve sinterlenmiş metalik esaslı malzemelerin, mekanik ve aşınma özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. İşlem vakum altında yapılır. Nitrürasyonla ısı işlem yöntemlerine göre daha çevreci yöntem olup gerek metalürjik gerekse yüzey kalitesi açısından daha yüksek performansı sağlamaktadır. Proses sıcaklığı düşüktür. Böylece parça çarpılmalarının önüne geçilir. Yüksek aşınma, sarma, karıncalanma ve yapışma direnci yüksek bir yüzey sertliği sağlar. Korozyon (paslanma) mukavemetini de yükseltir. Nitrürlenme işleminde Şekil 25.1'de 4000x verilen mikroyapı fotoğrafında da ve Şekil 36.1'da 8000X verilen SEM mikroyapı fotoğrafında görüleceği üzere üç farklı yapı görülmektedir. Bunlardan birincisi en üst tabakada bulunan beyaz tabaka olarak da isimlendirilen tabakadır. Malzeme ve nitrürlenme şartlarına bağlı olarak 20µm kalınlığa kadar oluşan bu tabaka sert, gevrek ve aşınmaya dirençlidir. Benzer şekilde nitrürlenmiş numunenin mikroyapı fotoğrafında da görülmektedir. Yaklaşık 8µm kalınlığında oluşan nitrür tabakasının 2-3 µm lik kısmı çizgisel bir hat şeklinde yüzeye yakın bölgede oluşurken 4-5 µm lik nitrür tabakası bu bölgenin altında oluşmaktadır. İki bölge arasında keskin bir geçiş olmayıp beyaz tabakanın nitrür tabakası ile matrisin üzerinde oluşan nitrür tabakası arasında bir dağılım olmuştur. Matris ile üzerinde oluşan nitrür tabakası arasında daha keskin bir geçiş olmuştur. Burada oluşan fazın ise Fe₄N ve Fe₃N fazları olduğu daha önceki X-ray analizlerinden tespit edilmiştir. Numunenin sertlik değerinin artmasında etkin parametre olan bu fazlar yüzeyden itibaren sertlik değerinin artmasına da sebep olmuşlardır. Yine Şekil 37.1'de verilen ve yüzeyden 5 µm aralıklarla alınmış mikrosertlik grafiği incelendiğinde yüzey sertliği ile işlem görmemiş yüzey arasında iki kat bir sertlik artışı gözlenmiştir.



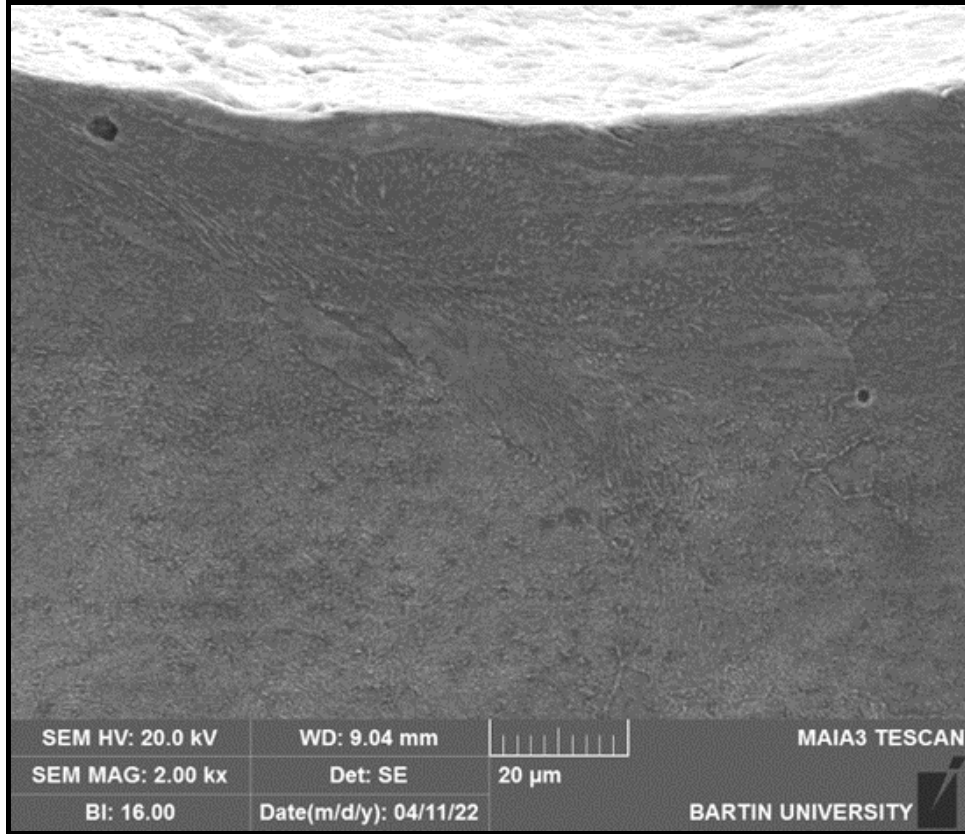
Şekil 36.1: Nitrülenmiş numune SEM mikroyapı görüntüsü 8000 x.

Dolayısıyla aşındırıcı bilya öncelikle beyaz tabaka ile karşı karşıya gelecektir. Sert olan bu tabaka kendisine batmaya çalışan bilyaya karşı direnç gösterecektir. Bu direnç ne kadar fazla olursa aşındırıcı bilyanın numuneye batması okadar zor olacağından dolayı aşınma oranı azalacaktır. Yine sert ama kırılğan bu tabakanın altında yer alan yani beyaz tabakanın altında bulunan ikinci bölgede nitrür tabakasının devam ettiği bölgedir. Tokluğu beyaz bölge ile kıyaslandığında daha yüksektir. Sertliği beyaz bölgeden düşük olsa da matris bölgesinden yüksek olduğu için yine numunenin aşınma direncinde önemli rol oynamıştır. Yine numunenin aşınma direncinin artmasında önemli rol oynayan parametrelerden birisi olan sır tabakası veya oksit tabakasının oluşumu ve varlığı ise SEM aşınma yüzey fotoğrafları kısmında anlatılacaktır.

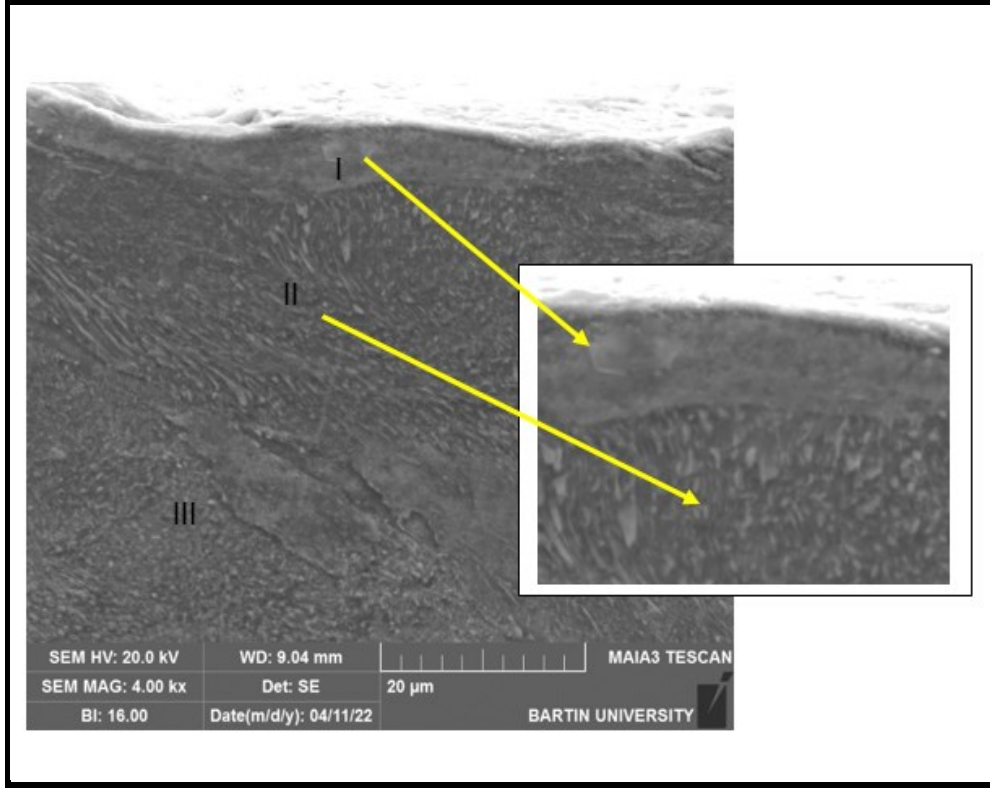


Şekil 37.1: Nitrülenmiş numunenin yüzeiden itibaren sertlik değerleri.

Şekil 38.1 ve 39.1’de aşırı bilyalı dövülmüş çeliğin 2000 ve 4000x büyütmedeki SEM mikro yapı fotoğrafları verilmiştir. Verilen SEM mikro yapı görüntü fotoğraflarında roma rakamları ile belirtilen üç bölge görmek mümkündür.



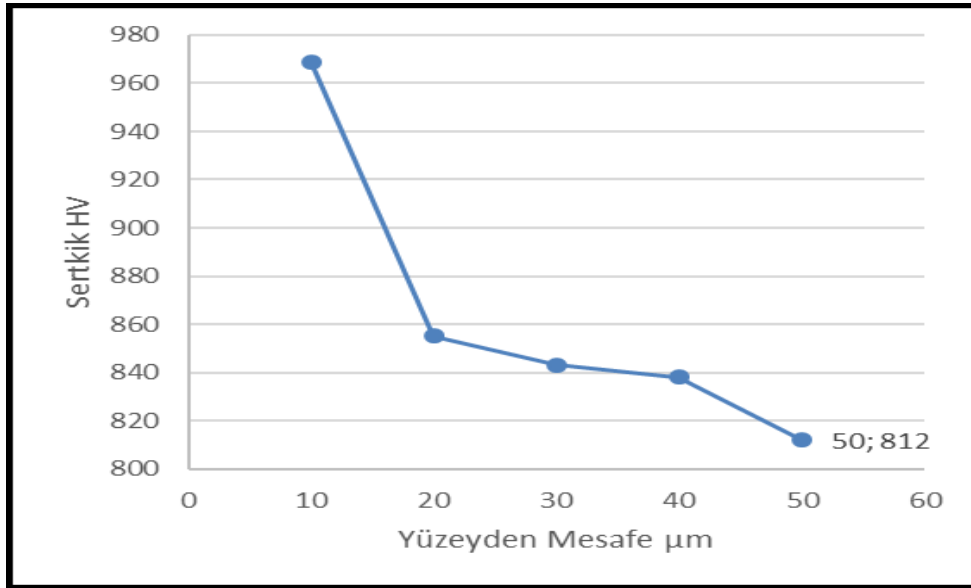
Şekil 38.1: Aşırı bilyalı dövülmüş numune SEM yüzey görüntüsü 2000 x.



Şekil 39.1: Aşırı bilyalı dövülmüş numune SEM yüzey görüntüsü 4000 x.

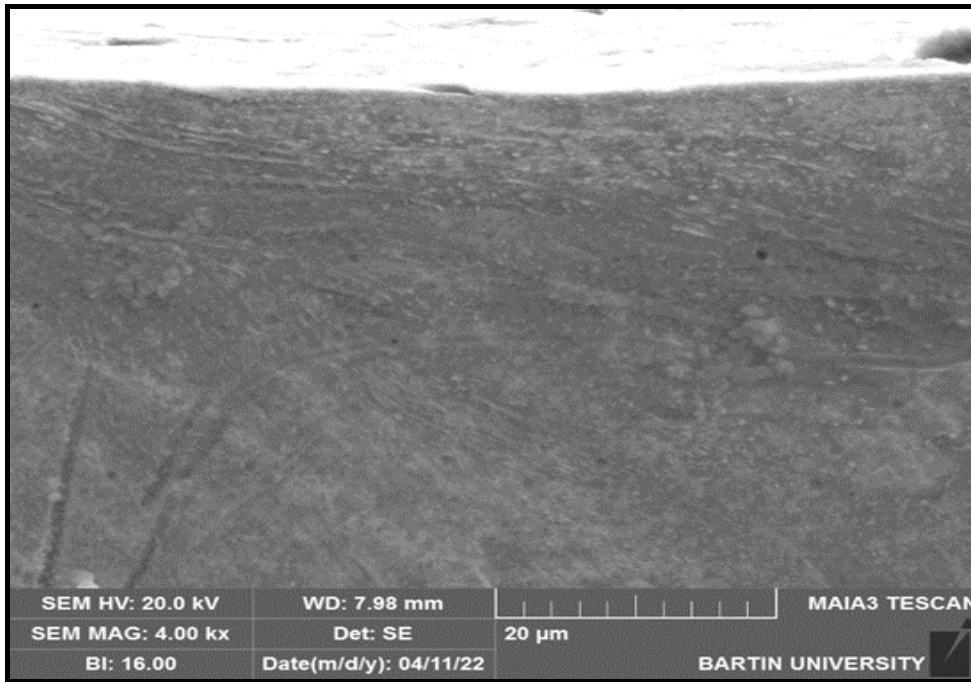
Bunlardan birincisi fotoğraf üzerinde I roma rakamı ile ifade edilen bölgedir. Bu bölgede yapının tamamen amorf bir yapıya döndüğü görülmektedir. Alınan SEM görüntüsünde yapısı ferrit ve perlitten oluşan AISI 4140 çeliğinin burada yapısının tamamen değiştiği dikkat çekmektedir. Bu yapının hemen altında kalan bölgede ise perlit yapının dövmenin etkisi ile nispeten şekillendiği görülmektedir. Nasıl ki haddeleme işleminde haddeleme yönünde malzeme tane yapısında bir şekillenme olmaktadır, burada da dövmenin etkisi ile ferrit matris içerisindeki perlit yapının yönlendiğini söylemek mümkündür. Bu bölge resim üzerinde roma rakamı ile II olarak ifade edilmiştir. Bu bölgenin altında kalan dövme işleminden etkilenmeyen ve resim üzerinde III ile ifade edilen bölge ise matrisi ifade etmektedir. AISI 4140'ın genel yapısı olan ferrit ve ince taneli perlitten oluşmaktadır. Yine numune kesit yüzeyinden 10 µm aralıklar ile alınan mikro sertlik değerleri incelendiğinde nitrüleme işleminden daha yüksek bir sertlik değeri elde edilmiştir. Ayrıca sertliğin nitrürlü bölgeden daha fazla derine işlediği grafikten anlaşılmaktadır. Daha önce de anlatıldığı gibi sertlik bir malzemenin kendisine batmaya çalışan başka bir cisme dolayısıyla malzemeye karşı göstermiş olduğu dirençtir. Aşındırma işleminde de iki etkin kuvvet rol oynar. Bunlardan birisi aşındırıcının karşı yüzeye batmasını sağlayan basma kuvveti diğeri malzeme üzerinden partikül kopartarak aşınmasına sebep olan kesme kuvvetidir. Tokluğu

etkilememek kaydı ile karşı yüzey sertliği ne kadar yüksek olursa malzemenin aşınma direnci de o kadar yüksek olmaktadır.



Şekil 40.1:Aşırı bilyalı dövülmüş numunenin yüzeyden itibaren sertlik değerleri.

Şekil 41.1 ve 42.1’de bilyalı dövülmüş çeliğin 4000x ve 10000 x büyütmedeki SEM mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Verilen SEM mikroyapı görüntü fotoğraflarında daha öncede anlatıldığı gibi üç farklı bölgeden bahsedilebilir.

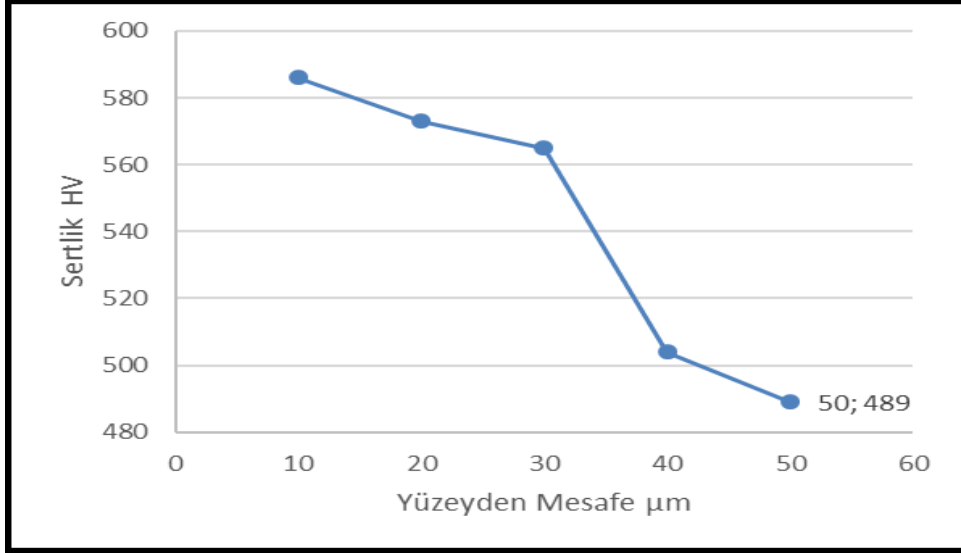


Şekil 41.1: Bilyalı dövülmüş numune SEM yüzey görüntüsü 4000 x.



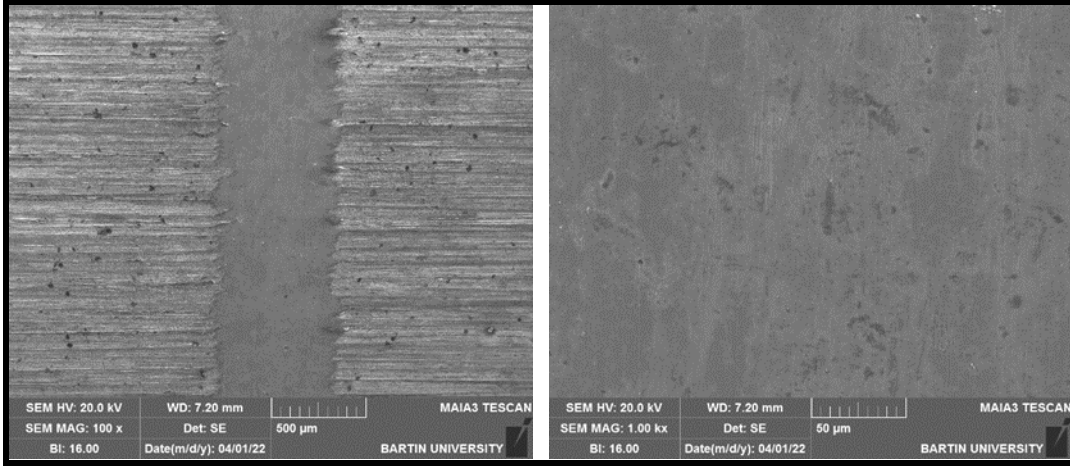
Şekil 42.1: Bilyalı dövülmüş numune SEM yüzey görüntüsü 10000 x.

Bunlardan birincisi en üst tabakadır. Burası dövmeyle temas anlamında maruz kalan bir bölge olup burada amorf bir yapının oluştuğunu söylemek mümkündür. Bu yapının kalınlığını 1-3 µm olduğunu söylemek mümkündür. Sonra bu tabakanın hemen altında oluşan bir mikroyapı oluşumundan bahsedebiliriz. Bu yapı ise dövmenin etkisi ile ferrit ve perlit fazlarının yönelmiş ve daha sıkı hale gelmiş olduğu yapıdır. Bunun altında ise matris bölge yer almaktadır. Ancak yapılan mikrosertlik incelemelerinde bu bölgenin 100-150 µm arasında bir mesafede oluştuğu anlaşılmaktadır. Bilyalı dövülmüş numunelerin hacim kayıpları nitrülenmiş ve aşırı bilyalı dövülmüş numunelerden sonra üçüncü sırada gelmiştir. Bunu yine öncelikle Şekil 43.1’de verilen kesit sertliği ile ilişkilendirmek mümkündür. Diğer iki numune ile kıyaslandığında daha düşük yüzey ve yüzey altı sertliğine sahip numunenin bu değeri göstermesi mümkündür.



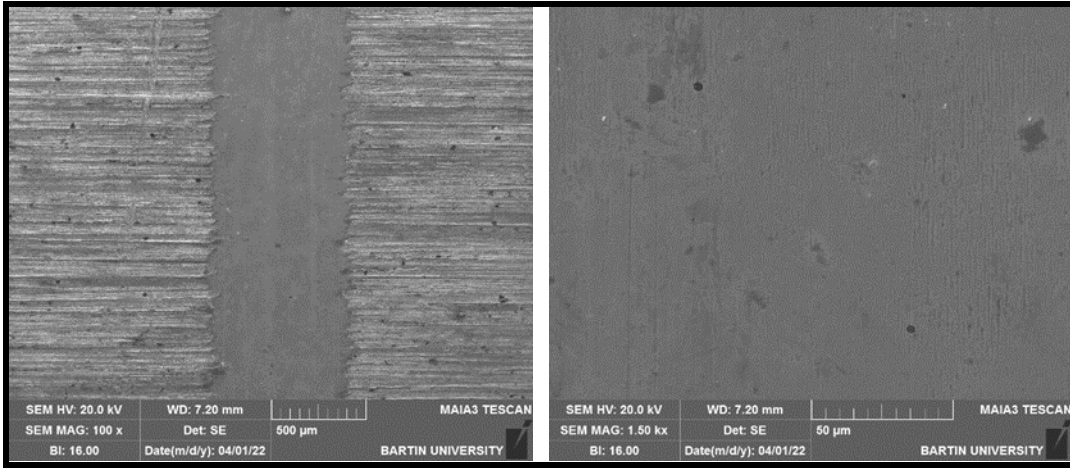
Şekil 43.1: Bilyalı dövülmüş numunenin yüzeyden itibaren sertlik değerler

Şekil 44.1’de a-f de 5, 10 ve 15 N yükler altında aşındırılan nitrürlenmiş numunelerin SEM aşınma izi yüzey fotoğrafları sırası ile verilmiştir. Yapılan incelemelerde aşınma mekanizmasının oksidasyon tipi aşınma olduğu yüzeyin morfolojik yapısından ve yüzey üzerinde yapılan EDS analiz sonuçlarından anlaşılmaktadır (Bkz. Şekil 45.1). Bu aşınma mekanizmasını basit açıklamak gerekirse, ortamda oksijenin bulunması işlenen birçok metalik malzeme üzerinde oksit filmi oluşması için ortam oluşturur. Hatta metalik malzemelerin yüzeyinde oluşan az miktarda oksijen bile aşınma oranını düşürür. Bu bağlamda oksidasyon aşınması sürtünmeli yüzeylerde faydalı olarak düşünülebilir. Oksidasyon prosesi etkileşim sıcaklığının artması ile ve temiz yüzeylerde daha hızlı oluşur. Yüzey üzerinde ince bir film tabakası şeklinde oluşan oksit filmi oynadığı yağlayıcı etki ve sebep olduğu düşük kesme gerilmelerinden dolayı aşınmayı azaltır. Oksitler ayrıca etkileşimli yüzeyler arasındaki adhesyon kuvvetlerini de azaltmaktadır. Ancak yüzeyde oluşan oksitlerin serbest kalmasıyla yüzeyde oluşan pürüzlük artacağı gibi aşınma oranı da artacaktır. Çünkü yüzeyde oluşan oksit tabakaları zamanla koparak aşındırıcı bilya ve karşı yüzey arasında sıkışıp abrasyon etkisi göstermektedirler. Bu durum Şekil 44.1 f’ de görülmektedir.



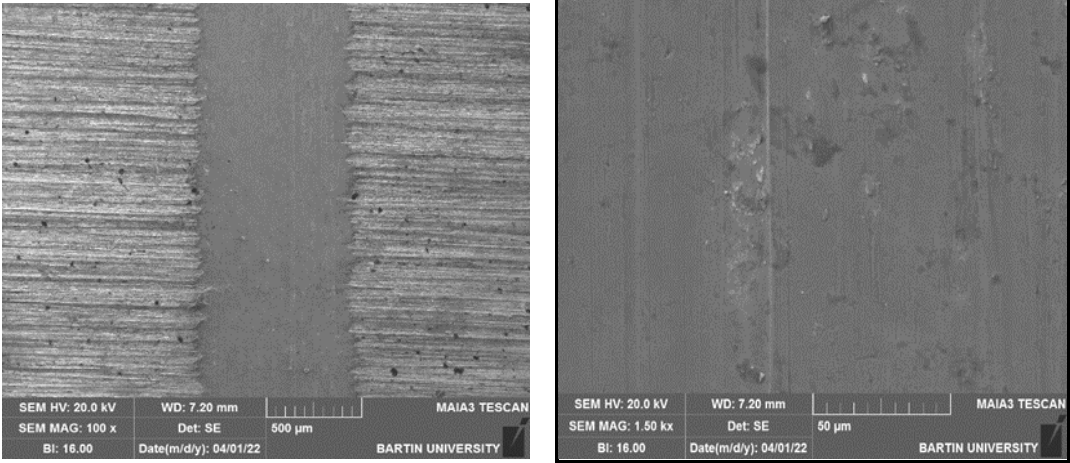
a.

b.



c.

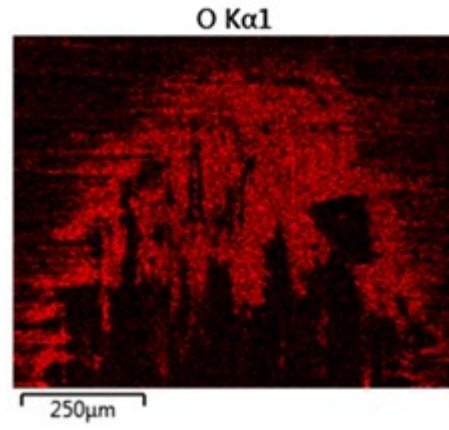
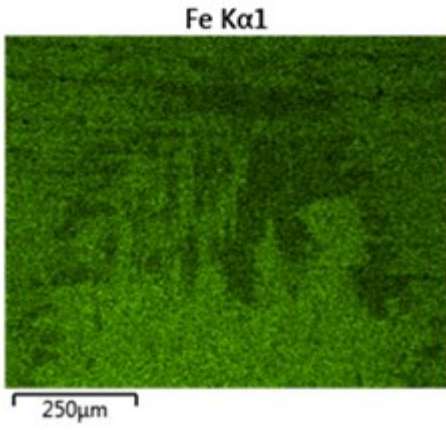
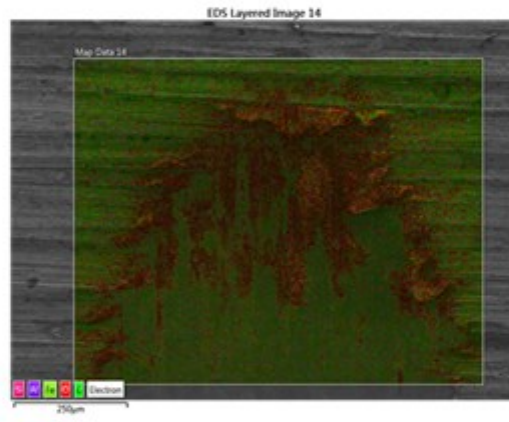
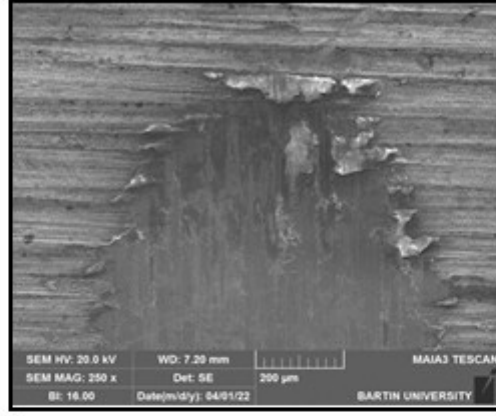
d.



e.

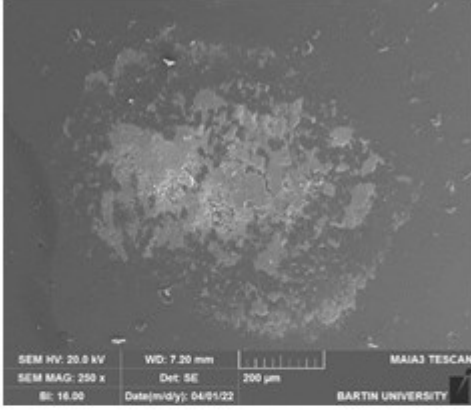
f.

Şekil 44.1: Nitrürlenmiş numunelerin SEM aşınma izi fotoğrafları. a) 5 N 100x b) 5 N 1000x

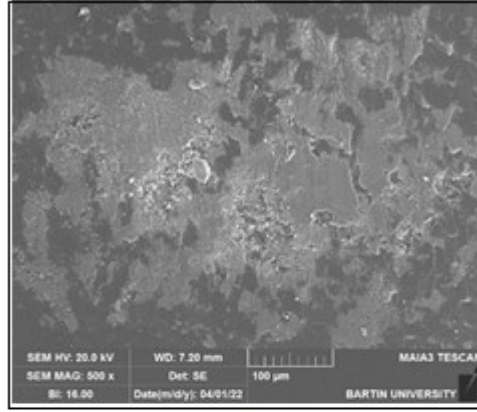


Şekil 45.1: Nitrülenmiş numunelerin SEM aşınma izi EDS analizi 15 N.

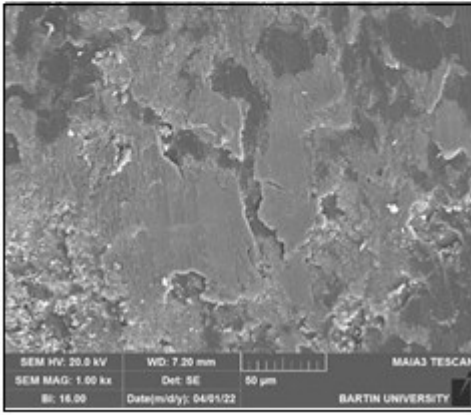
Şekil 45.1’de oksit tabakasının özellikle aşınma izi sonlarında yoğunlaştığı görülmektedir.



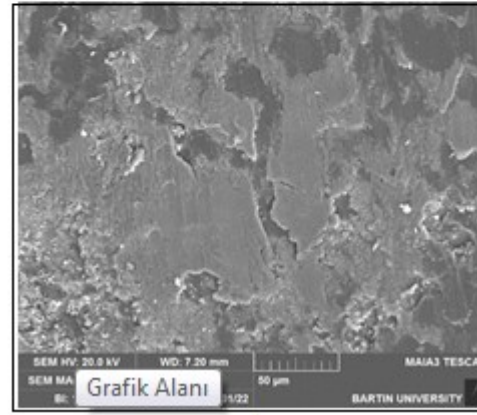
a.



b.



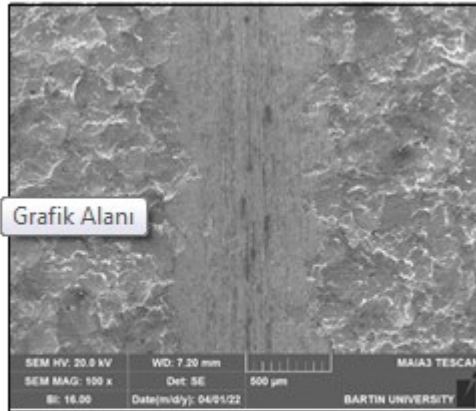
c.



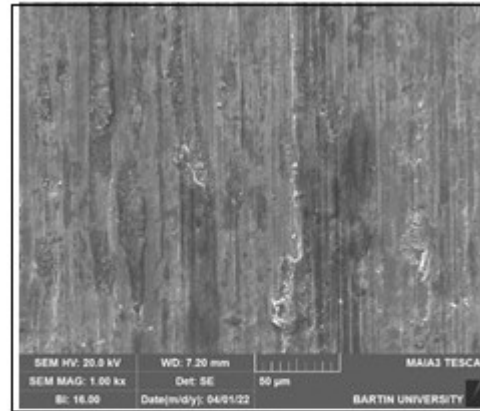
d.

Şekil 46.1: Nitrürlenmiş numunelerin aşındırılmasında kullanılan Al₂O₃ bilya üzerinden alınan SEM görüntüsü 15 N.

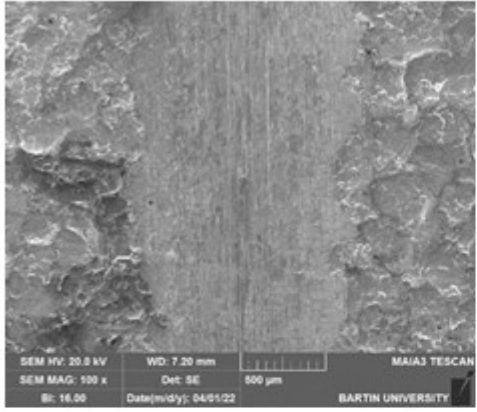
Yine Şekil 46.1'de aşındırıcı bilya üzerinde tekrarlı yükler sonrasında karşı yüzeyden ayrılarak aşındırıcı bilya üzerine yapışan metalik malzemelerin zamanla oksitlenip sonrasında bu oksit tabakalarının kırılması görülmektedir.



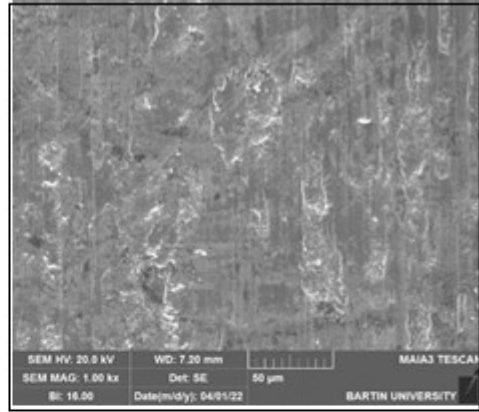
a.



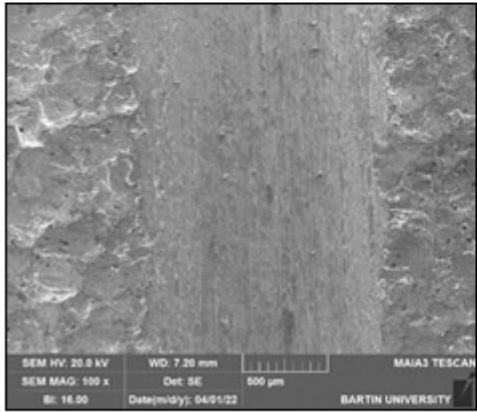
b.



c.



d.

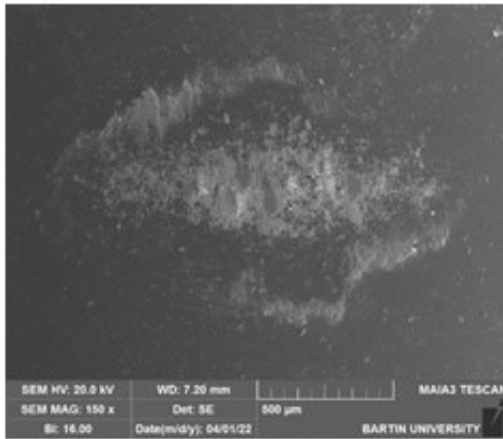


e.

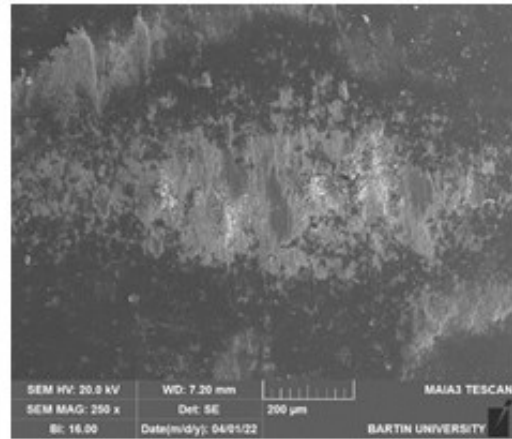


f.

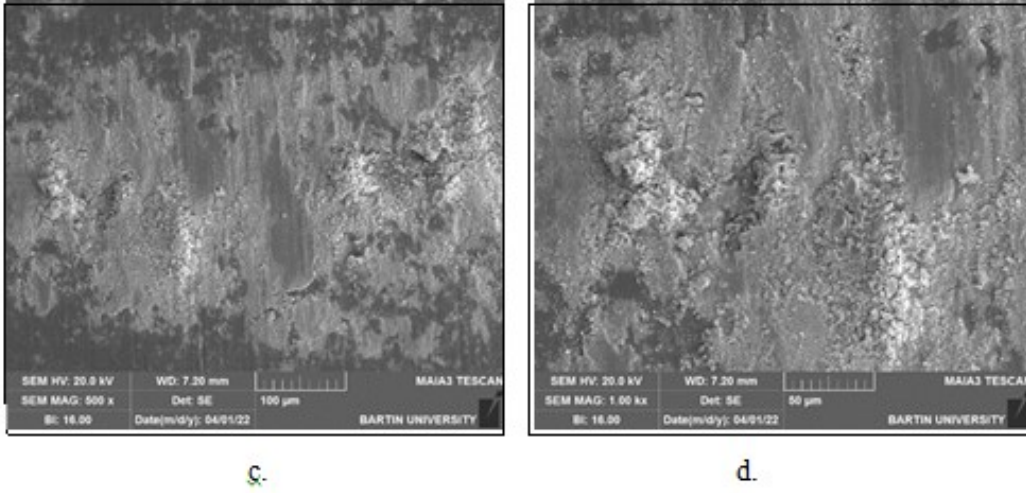
Şekil 47.1: Aşırı bilyalı dövülmüş numunelerin SEM aşınma izi fotoğrafları. a) 5 N 100x b) 5 N 1000x c) 10 N 100x d) 10 N 1000x e) 15 N 100x f) 15 N 1000x



a.



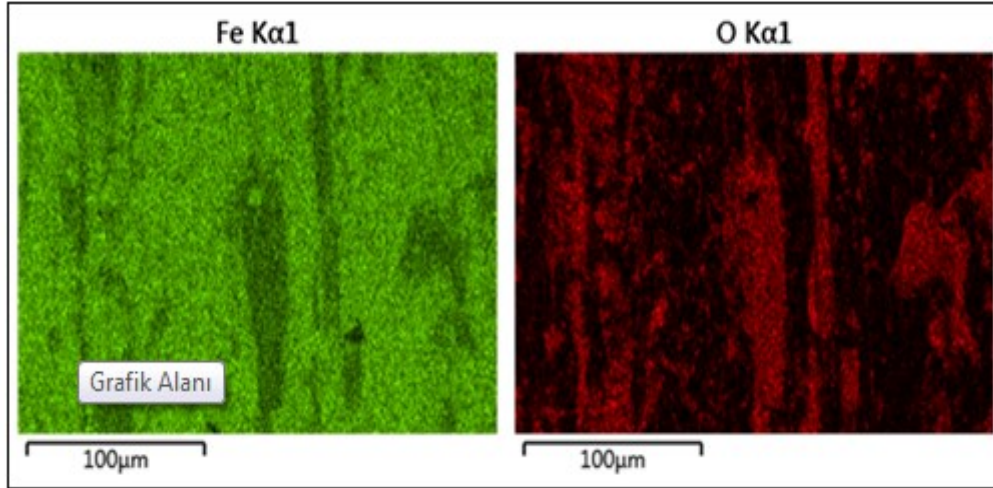
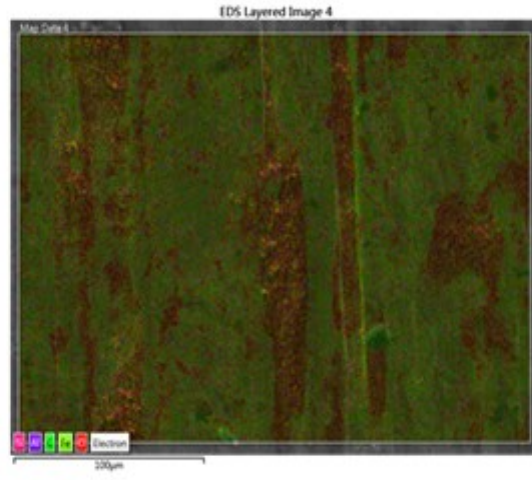
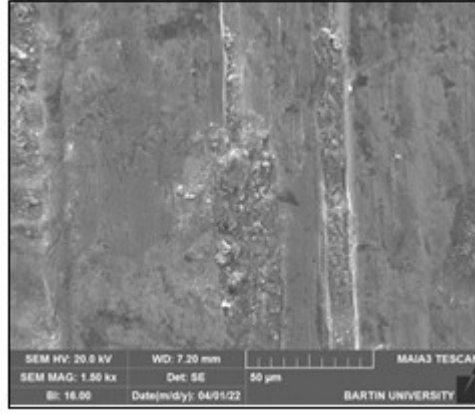
b.



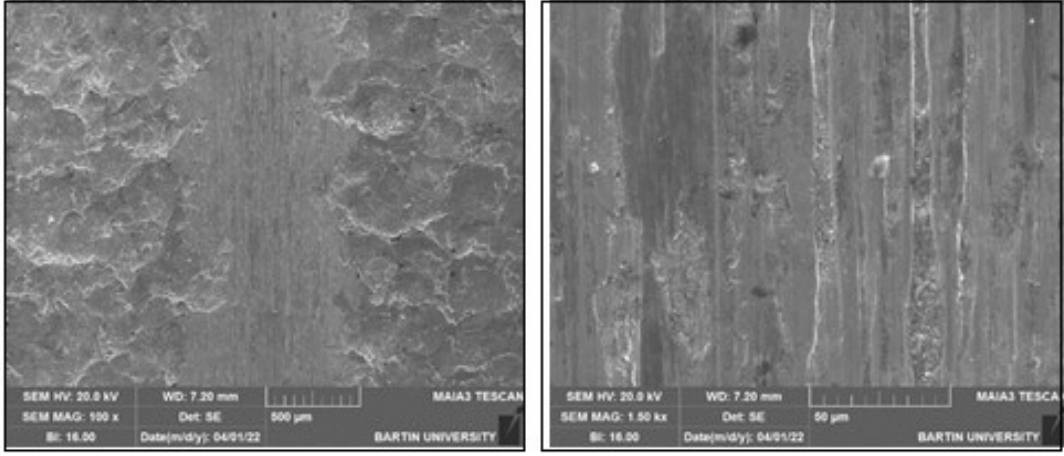
Şekil 48.1: Aşırı bilyalı dövülmüş numunelerin numunelerin aşındırılmasında kullanılan Al₂O₃ bilya üzerinden alınan SEM görüntüsü 15 N.

Şekil 47.1’de aşırı bilyalı dövülmüş numunelerin 5, 10 ve 15 N’luk yükler altında aşınma deneyi sonrası SEM aşınma izi fotoğrafları görülmektedir. Hemen hemen tüm yüklerde benzer aşınma mekanizmaları görülmüştür. Bunlar oksidasyon, oksitlerin kırılması sonucu yüzeyde meydana gelen aşınma atıkları ve bu atıkların yüzeyde meydana getirmiş olduğu mikro ve makro boyuttaki çiziklerdir. Şekil 48.1’de aşırı bilyalı dövülmüş numunelerin numunelerin aşındırılmasında kullanılan Al₂O₃ bilya üzerinden alınan SEM görüntüsü verilmiştir.

Şekil 49.1’de 15 N’luk yük altında aşındırılan numune üzerinden alınan EDS analizi görülmektedir. Burada yüzeydeki oksit tabakasının parçalanarak alt yüzeye verdiği hasar görülmektedir. Yine Şekil 48.1’de farklı büyütme oranlarında aşındırıcı bilya üzerine naklolan metalik parçalar görülmektedir. Şekil 49.1’de ise oksit tabakasının alt yüzeye nasıl nüfuz ettiğini ve bu yüzeyde nasıl mikro çizilmelere sebep olduğunu EDS analizleri daha açık göstermektedir.

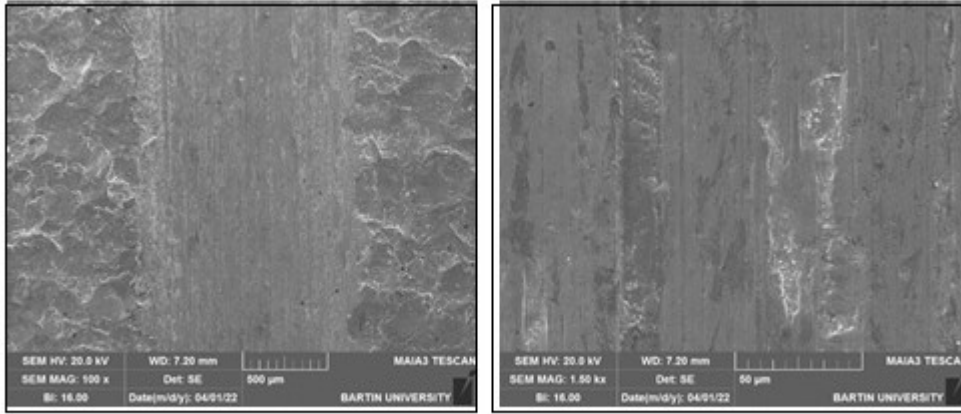


Şekil 49.1: Aşırı bilyalı dövülmüş numunelerin SEM aşınma izi EDS analizi 15 N.



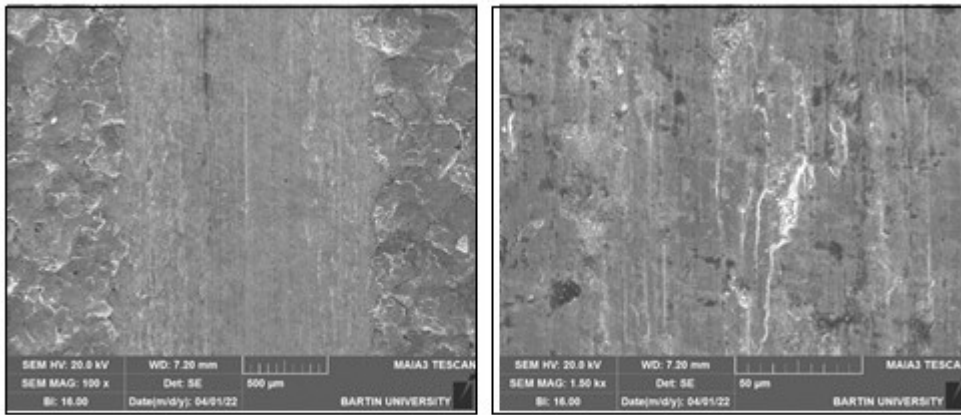
a.

b.



c.

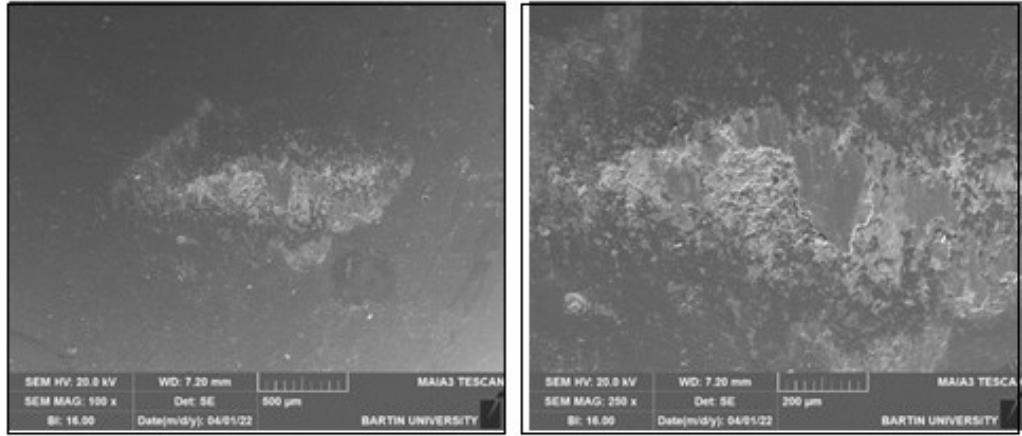
d.



e.

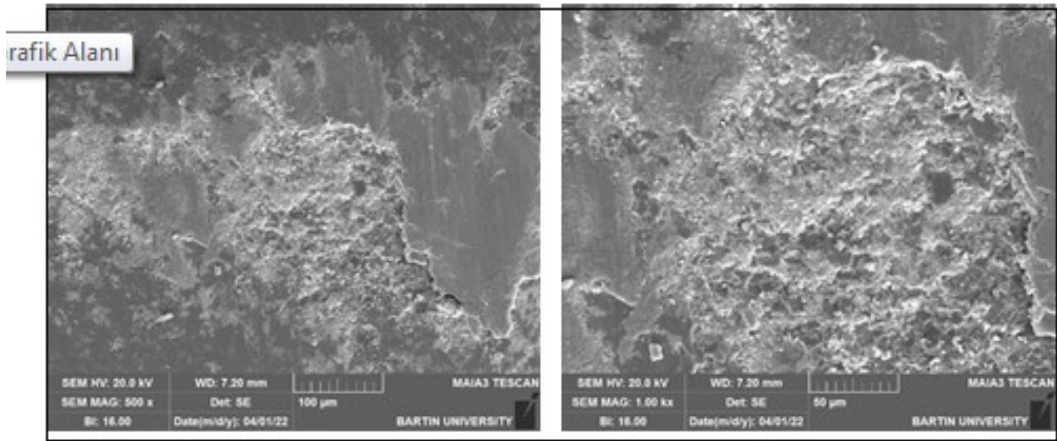
f.

Şekil 50.1: Bilyalı dövülmüş numunelerin SEM aşınma izi fotoğrafları. a) 5 N 100x b) 5 N 1000x c) 10 N 100x d) 10 N 1000x e) 15 N 100x f) 15 N 1000x



a.

b.



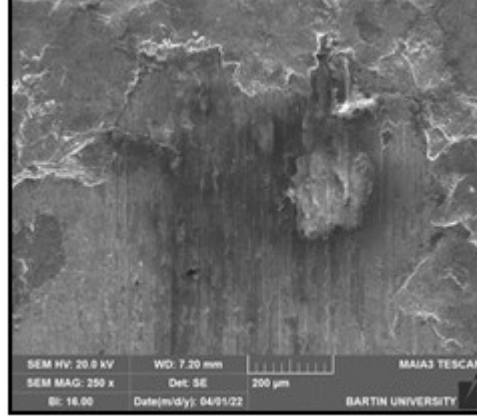
c.

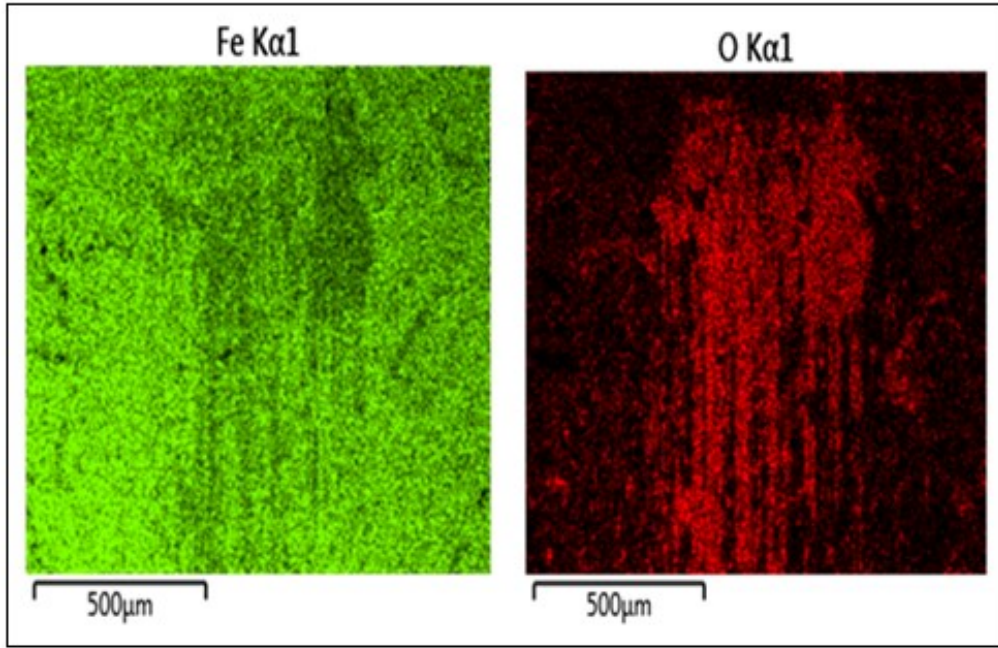
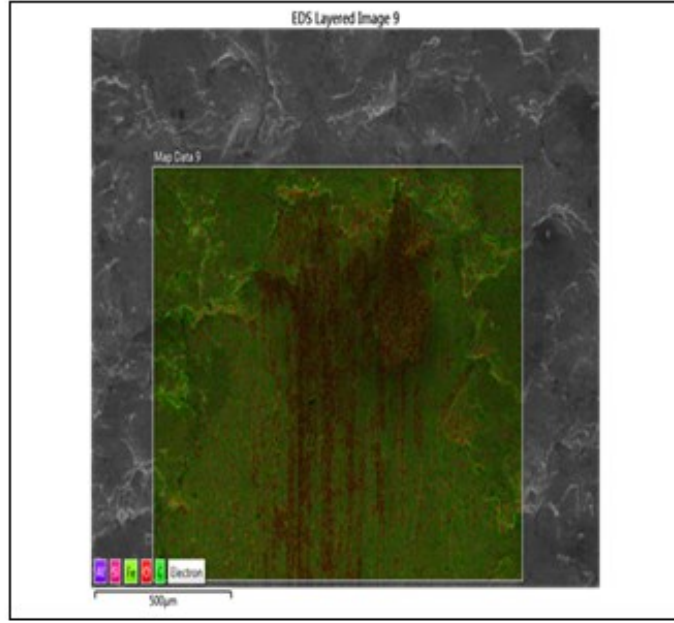
d.

Şekil 51.1: Bilyalı dövülmüş numunelerin numunelerin aşındırılmasında kullanılan Al₂O₃ bilya üzerinden alınan SEM görüntüsü 15 N.

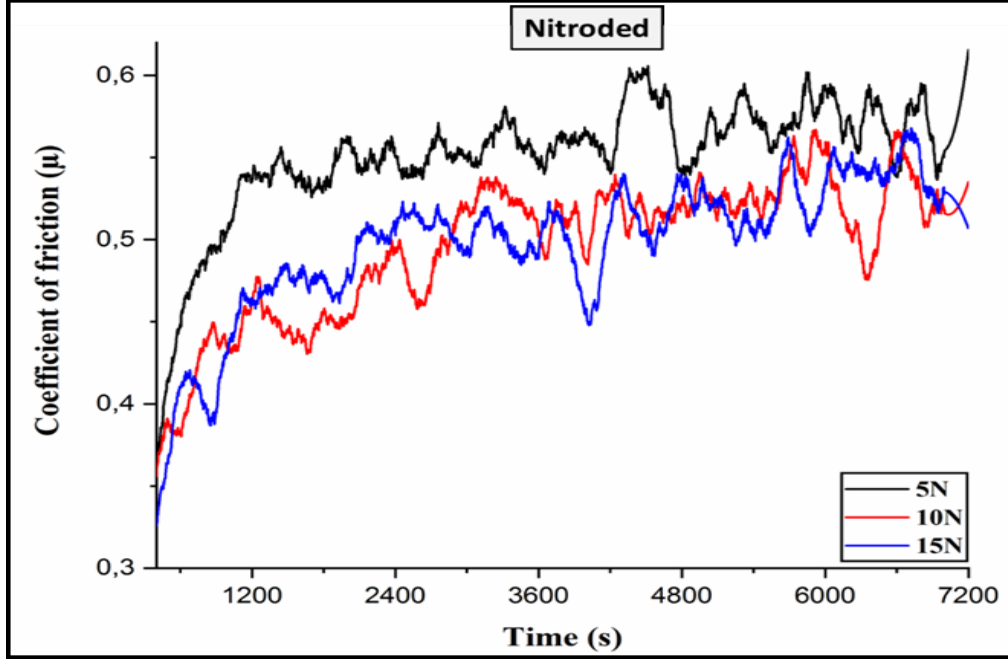
Şekil 50.1’de bilyalı dövülmüş numunelerin 5, 10 ve 15 N’luk yükler altında aşınma deneyi sonrası SEM aşınma izi fotoğrafları görülmektedir. Numunelerin aşınma mekanizmaları aşırı bilyalı dövülüş numunelerinin aşınma mekanizmaları ile benzerlik göstermektedir. 5 N luk yük altında numunelerde yüzeyde aşınma atıklarının meydana getirdiği mikro çizilmeler görülmektedir. numune yüzeyinde az da olsa oksidasyonun varlığı görülmektedir. Yükün artması ile yüzeyde oksidasyon tipi mekanizmanın arttığı görülmektedir. Yine yüzeyden kopan oksit partiküllerinin aşındırıcının git gel hareketi sonucu başlangıç ve bitiş noktalarına itildiği dolayısıyla bu bölgelerde oksit yoğunluğunun arttığı görülmektedir Şekil 52.1’de

verilen EDS analizi bu durumu ortaya koymaktadır. Son olarak aşındırıcı bilya üzerinden alınan SEM fotoğrafları Şekil 51.1’de görülmektedir. Oksidasyon ve oksit kırılması yüzeyde görülmektedir.



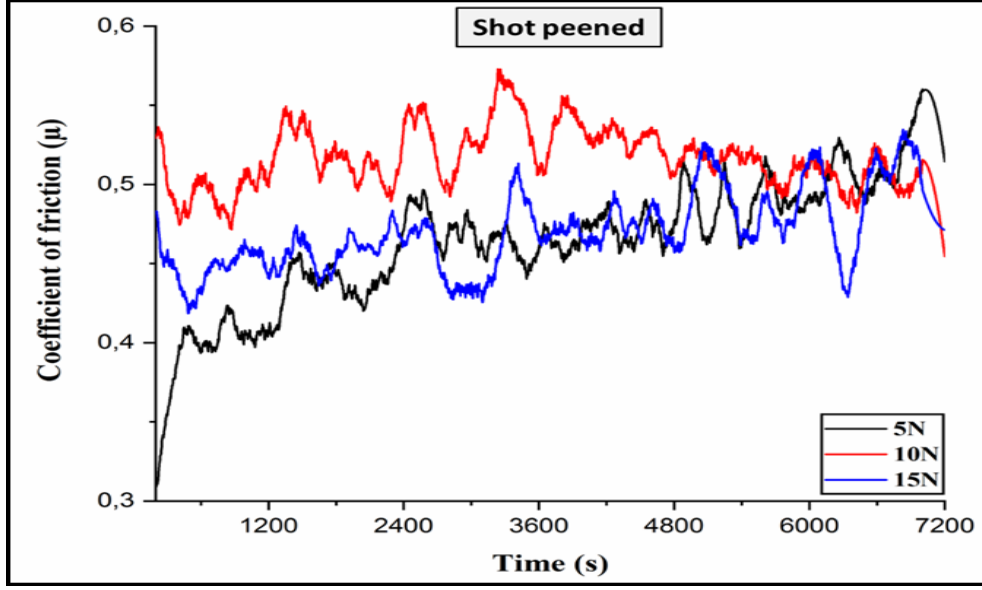


Şekil 52.1: Bilyalı dövülmüş numunelerin SEM aşınma izi EDS analizi 15 N.



a.

Şekil 53.1 a' da nitrürlenmiş numunelerin sürtünme katsayı değerleri verilmiştir. En yüksek sürtünme katsayısı 5 N luk yük altında test edilen numunede görülürken yükün artması SKD değerinin düşmesine sebep olmuştur. Düşük yüklerde sürtünme SKD yüksek olması birçok tribolojik etmen ile ilişkilendirilebilir. Örneğin başlangıçta yüzeyde bulunan yağ tabakası ve kirleticilerin temizlenmesi ve yüzeyde buluna pürüzlerin kırılması sonrasında yüzeyde oluşan oksit tabakaları ve bu tabakaların tekrar kırılarak oluşması bunlara örnek verilebilir. Burada 5 N luk yükün düşük kalması sürtünme katsayı değerinin yükselmesine sebep olmuştur. Diğer yüklerde sürtünme kat sayı değerinin düşmesi ise yüzeyde oluşan oksit tabakalarının varlığı ile açıklanabilir. Yine 5 N luk yük de run-in periyodu 1400 sn den sonra kararlı stabil yapıya dönerken 10 ve 15 N luk yüklerde kararlı durum aşınmasına geçiş 2500 sn kadar yükselmiştir. Şekil 53.1 b' de ise aşırı bilyalı dövülmüş numunenin SKD değeri verilmiştir. Burada N yük altında SKD değerinin yine yüksek yüksek yüklerdeki SKD değerinin ise düşük olduğu ve bir önceki numune ile bu bakımdan benzerlik gösterdiği anlaşılmaktadır. Ancak burada run-in periyodunun 3600 sn kadar devam ettiği görülmektedir. Bu periyotta daha öncede belirtildiği üzere aşındırılan numune yüzey pürüzlüğü önemli rol oynamaktadır. Yapısı gereği yüzeyi pürüzlü olan bu numunenin run-in periyot süresinin uzun olması bu durum ile ilişkilendirilebilir.



Şekil 53.1: Numuneler ait sürtünme katsayı değerleri a. Nitrürlenmiş b. Aşırı bilyalı dövülmüş c. Bilyalı dövülmüş.

Grafikten de görüleceği üzere yüksek yüklerde bu periyot daha hızlı geçilmiştir. Burada artan yük ile birlikte yüzey pürüzleri hızlı bir şekilde temizlenmiş ve kararlı durum aşınmasına geçilmiştir. Şekil 53.1 c'de diğer iki numuneden farklı bir durum göze çarpmaktadır. Düşük yük de en düşük SKD değeri elde edilmiştir. Burada daha önce bahsedildiği gibi tribolojik etkileşimde birçok parametre rol oynamaktadır. Bu numunenin sertlik değeri aşırı bilyalı numune ile kıyaslandığında daha düşüktür. Dolayısıyla düşük yüklerde de deforme olma potansiyeli daha yüksek denilebilir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1 Genel Sonuçlar

Bu araştırmada AISI 4140 çeliği, farklı yüzey modifikasyonları işlemine tabi tutularak mekanik ve kuru kayma aşınma davranışları üzerine olan etkisi incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda bir grup numune nitrüleme işlemine tabi tutulurken, bir grup bilyalı dövme işlemine diğer bir grup ise aşırı bilyalı dövme işlemine tabi tutularak deneysel olarak teste tabi tutulmuşlardır.

Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- ✓ Numunenler içerisinde en yüksek yüzey sertliğine nitrülenmiş numunede ulaşılmıştır. Bunu sırasıyla aşırı bilyalı dövülmüş ve bilyalı dövülmüş numuneler izlemiştir.
- ✓ Nitrülenmiş numunenin kesit yüzey sertliği ilk 10-15 μm de etkili olurken bilyalı dövülmüş numunelerde bu sertlik 40 μm kadar devam etmiştir.
- ✓ Hem aşırı bilyalı dövülmüş hem de bilyalı dövülmüş numunelerde amorf, yapısı değişmiş mikroyapı ve dövmeden etkilenmeyen üç bölge tespit edilmiştir. Aşırı bilyalı dövülen numunelerde bu bölge aralığının daha fazla olduğu görülmüştür.
- ✓ En iyi aşınma direncini nitrülenmiş numune gösterirken bunu aşırı bilyalı dövülmüş ve bilyalı dövülmüş numuneler izlemiştir.
- ✓ Aşındırma işleminde sertlik kadar numune özelliklerinin de etkili olduğu görülmüştür.
- ✓ Aşınma mekanizması olarak oksidasyon, delemasyon, mikro çizilme ve oluklanma tipi aşınma mekanizmaları görülmüştür.
- ✓ Aşındırıcı bilya üzerinde de oksitlenmiş aşınma atıklarını varlığı tespit edilmiştir.

5.2 Öneriler

Bu araştırma çerçevesinde ulaşılan sonuçlara göre gelecek çalışmalar için araştırmacılara şu öneriler sunulmuştur.

- ✓ Bilyalı dövme işleminin, endüstriyel atıklar için farklı boyutlarda eleme işlemine tabi tutularak partikül boyutunun aşındırma üzerindeki etkisinin incelenmesi önerilmektedir.

- ✓ Toz metalürjisiyle üretilen parçaların ısıtılma işleminden çıktıktan sonra son yüzey işlemi olarak yapılan vibrasyonlu çapak alma prosesinde kullanılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Adel, K. M. (2014). Enhancement of dry sliding wear characteristics of CK45 steel alloy by laser surface hardening processing. *Procedia Materials Science*, 6, 1639-1643.
- Akbulut, H. (2006). *Malzeme ve metalurji ders notları* (Yayımlanmamış). Sakarya: Sakarya Üniversitesi.
- Bagherifard, Ghelichi, S.R. ve Guagliano M. (2012) On the shot peening surface coverage and its assessment by means of finite element simulation: A critical review and some original developments. *Applied Surface Science* 259, 186-194. doi: 10.1016/j.apsusc.2012.07.017
- Bağcı, M. (2010). Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin erozyon aşınma davranışının incelenmesi. (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Konya.
- Barker, B. (2001). Shot peening small holes.
https://www.progressivesurface.com/downloads/casestudies/small_hole_peen adresinden 03.07.2022 tarihinde indirilmiştir.
- Bhushan, B. (2000). *Wear mechanisms, chapter 7. In modern tribology handbook*. United States of America: Crc press.
- Bozkurt, Y. B., Kovacı, H., Yetim, A. F. ve Çelik, A. (2022). Tribocorrosion properties and mechanism of a shot peened AISI 4140 low-alloy steel. *Surface and Coatings Technology* 440, 1-10.
- Ceyhanlı, U. T. (2016). *Ağır ticari araçlarda kullanılan parabolik yaprak yayların yorulma davranışının incelenmesi*. (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Chen, M., Liu, H., Wang, L., Wang, C., Zhu, K., Xu, Z., Jiang, C. ve Ji, V. (2018). Evaluation of the residual stress and microstructure character in SAF 2507 duplex stainless steel after multiple shot peening process. *Surface and Coatings Technology*, 344, 132–140.
- Devaraju. A. (2015). Critical review on different types of wear of materials. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 6(11), 77-83.
- Dieter G.E. (1976). *Mechanical metallurgy* (Second Edition). Tokyo, Japan: Mc Graw Hill Co.
- Dikmen, S. (2010). *AISI 4140 AISI 1050 ve AISI 8620 çelikleri için soğutma ortamının*

- aşınma davranışı üzerine etkisi.* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Dong, Z., Wang, F., Qian, D., Yin, F., Wang, H., Wang, X., Hu, S. ve Chi, J. (2022). Enhanced wear resistance of the ultrastrong ultrasonic shot-peened m50 bearing steel with gradient nanograins. *Metals*, 12(3), 1-16. doi.org/10.3390/met12030424
- Endo, K. ve Goto, H. (1978). Effects of environment on fretting fatigue. *Wear*, 48, 347-367.
- Erdem, S. (2006). *Yüksek karbon içeriğine sahip, yüksek kromlu, manganlı ve alaşımsız düşük karbonlu çeliklerin aşınma davranışlarının araştırılması.* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Ertem, M. (2021). *Termoreaktif difüzyon yöntemiyle niyobyum karbür–bor (NbC-B) kaplanan hardox 400 çeliğin mikroyapı özelliklerinin incelenmesi ve Taguchi yöntemiyle aşınma davranışının değerlendirilmesi.* (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman.
- Evcin, A. (2006). *Kaplama teknikleri ders notları.* Afyon: Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi
- Feng, O., Jiang, C., Xu, Z., Xie, L. ve Ji, V. (2013). Effect of shot peening on the residual stress and microstructure of duplex stainless steel. *Surface & Coatings Technology*, 226, 140-144. doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.03.047
- Gangaraj, S. M. H., Guagliano, M. ve Farrahi, G. H. (2014) An approach to relate shot peening finite element simulation to the actual coverage. *Surface & Coatings Technology* 243, 39–45. doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.03.057
- Gerin, B., Pessard, E., Morel, F. ve Verdu, C. (2017). Influence of surface integrity on the fatigue behaviour of a hot-forged and shot-peened C70 steel component. *Materials Science and Engineering*, 686, 121-133,
- Gök M. S. (2008). *Düşük ve orta karbonlu çeliklerin yüzeyine tig kaynak metoduyla kaplanan ostenitik paslanmaz çelik tozunun aşınma direncine karbür içeriğinin etkisinin araştırılması.* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Gök, M. S., Çay, V. V., Koçyiğit, F.ve Yıldız, F. (2018, Kasım). AISI 4140 çeliğin kuru-kayma yüksek sıcaklık aşınma davranışlarının incelenmesi. *International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC)* sunulan tam metin bildiri (s. 946-957).

- Guarino, S., Barletta, M. ve Afilal, A. (2017). High Power Diode Laser (HPDL) surface hardening of low carbonsteel: Fatigue life improvement analysis. *Journal of Manufacturing Processes*, 28, 266–271.
- Guechichi, H., Castex, L. ve Benkhettab, M. (2013) An analytical model to relate shot peening almen intensity to shot velocity. *Mechanics Based Design of Structures and Machines* 41, 79–99. doi:10.1080/15397734.2012.703607
- Hayat, F. (2022). *Nitrasyon ve borlama yapılan yüksek manganlı çeliğin korozyon ve aşınma özelliklerinin incelenmesi*. (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
- <http://www.sspst.com/icerik/goTo/5/shot-peening-bilyali-dovme-nedir.html>
- <http://www.sspst.com/icerik/goTo/5/shot-peening-bilyali-dovme-nedir.html>
- <https://www.edemsimulation.com/spotlight/researching-advances-in-the-use-of-shot-peening-for-corrosion-fatigue-mitigation-in-steam-turbine-blades/>
- <https://www.muhendisbeyinler.net/asinma-nedir-asinma-cesitleri/>
- <https://www.serdarkorkut.com/2018/01/27/sn-wohler-egrisi-nedir/>
- <http://muhendissel.com/yorulma-olayi/>
- Huchings, I. M. (1992). *Tribology: friction and wear of engineering materials*. CRC Press: Boca Raton.
- Karahan, B. ve Ince, U. (2015). Bilya Püskürtmenin (shot peening) teknik teknolojideki yolculuğu ve soğuk dövme prosesine adaptasyonu, *Derin*, 74-90.
- Keskin, İ. (2012). *Yüksek mekanizmalarında aşınma ve elastohidrodinamik yağlama*. (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Koç, E. (2006). *Makina elemanları* (Dördüncü Baskı). Adana: Nobel Yayınevi.
- Kovacı, H., Bozkurt, Y. B., Yetim, A. F., Aslan, M. ve Çelik, A. (2019). The effect of surface plastic deformation produced by shot peening on corrosion behavior of a low-alloy steel. *Surface and Coatings Technology*, 358, 256-265.
- Kurgan, N. (2018). Aşınma hasarları ders notları. [<https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/naci.kurgan/126929/05.%20A%C5%9F%C4%B1nma%20Hasarlar%C4%B1%20.pdf> adresinden 02.09.2022 tarihinde indirilmiştir.]
- Lee, J. H., Jang, J. H., Joo B. D., Son Y. M. ve Moon, Y. H. (2009). Laser surface hardening of AISI H13 tool steel. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19(4), 917-920 doi:10.1016/S1003-6326(08)60377-5

- Liverani, E., Adrian, H.A., Lutey, A. A., Fortunato, A. ve Tomesani, L. (2016). A complete residual stress model for laser surface hardening of complex medium carbon steel components. *Surface & Coatings Technology*, 302, 100–106.
- Manfridini, A.P.A., Godoy, C., Wilson, J.C.A.B. ve Auad M.V. (2014). Surface hardening of TF steel by plasma nitriding: effect of a shot peening pre-treatment. *Surface and Coatings Technology*, 260, 168-178
- McIntyre, N. S., Zetaruk, D. G. ve Owen, D. (1978). XPS study of initial growth of oxide film on Inconel 600 alloy. *Appl. Surf. Sci.*, 2, 55-73.
- Menezes, M.R., Godoy, C., Buono, V.T.L., Schwartzman, M.M.M. ve Avelar-Batista Wilson J.C. (2017). Effect of shot peening and treatment temperature on wear and corrosion resistance of sequentially plasma treated AISI 316L steel. *Surface and Coatings Technology*, 309, 651-662, doi:10.1016/j.surfcoat.2016.12.037
- Nguyen, Q. ve Yang, C. (2016). A sequential method to determine the surface absorptivity in the process of laser surface hardening. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 95, 224-229.
- Okay, F. (2006). *PVD yöntemi ile tin kaplı östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin adhesiv aşınma davranışlarının incelenmesi*. (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Ankara.
- Özkader, M. Ç. (2015). *Isıl işlemlerle AISI 4140 çeliğinin abrasiv aşınmasının araştırılması*. (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Hitit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Çorum.
- Özsaraç, U. (1999). *Endüstriyel yatak alaşımlarının aşınma davranışlarının karakterizasyonu*. (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Podgornik, P. ve Vizintin, J. (2001). Wear resistance of pulse plasma nitrided AISI, 4140 and A355 steels. *Mater. Sci. Eng. A*, 315, (1-2), 28-34.
- Reilley, M. (2013). *Product design & development*. Advantage business media
- Ruiz, A. ve Nagby, P. B., (2003). SAW dispersion measurements for ultrasonic characterization of surface-treated metals. *Instrumentation Measure Metrologie*, 3(3), 59-85.
- Sevim, İ. (1998). *Çeliklerin abrasiv aşınmasında aşındırıcı tane büyüklüğünün aşınma direncine etkisi*. (Yayımlanmamış Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Shibe, V. ve Chawia, V. (2014). A review of surface modification techniques in enhancing the erosion resistance of engineering components 1. *International Journal of Reserach in Mechanical Engineering & Technology*, 4(2), 2249-5762.
- Sledz, M., Bşk, L., Stachowicz, F. ve Zielecki, W. (2013). Analysis of the effect of shot peening on mechanical properties of steel sheets used as screener sieve materials *Journal of Physics: Conference Series*, 451, 1-6.
- Soriano, C., Leunda, J., Lambarri, J., Navas, G. V. ve Sanz, C. (2011). Effect of laser surface hardening on the microstructure, hardness and residual stresses of austempered ductile iron grades. *Applied Surface Science*, 257, 7101-7106.
- Syed, B., Shariff, S. M., Padmanabham, G., Lenka, S., Bhattacharya, B. ve Kundu S. (2017). Influence of laser surface hardened layer on mechanical properties of reengineered low carbon steel sheet. *Materials Science & Engineering*, 685, 168-177.
- Świetlicki, A., Szala, M. ve Walczak, M. (2022). Effects of shot peening and cavitation peening on properties of surface layer of metallic materials—a short review. *Materials*, 15(7), 1-26. doi:10.3390/ma15072476
- Tani, G., Fortunato, A., Ascari, A. ve Campana G. (2010). Laser surface hardening of martensitic stainless steel hollow parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59, 207–210.
- Toparlı, M. Şen. (1993, Nisan). Karbonlu çeliklerde aşınma. 5. *Denizli Malzeme Sempozyumu*, Denizli.
- Uzer, A. (2022). *Kriyojenik işlemin AM355 paslanmaz çeliğinin aşınma özelliklerine etkilerinin incelenmesi*. (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Ünal O. (2011). *Bilyalı dövme işleminin tane boyutuna etkisinin deneysel incelenmesi*. (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın.
- Varol, T. (2016). *Aşınma deneyi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuar Föyü, Trabzon.
- Wang, S., Li, Y., Yao, M. ve Wang, R. (1998). Compressive residual stress introduced by shot peening. *Journal of Materials Processing Technology*, 73, 64-73, doi: 10.1016/j.surfcoat.2018.03.012

www.boeing.com

- Yalçınkaya, A. (2019). *Bilyalı dövme uygulanan tank palet pimlerinin yorulma analizi*. (Yayımlanmamış yüksek lisans tezi). Milli Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yıldız, T. ve Gür, A. K. (2006). *Aşınma sistemleri*. Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü ders notları, Elazığ.
- Yılmaz, S. S., Ünlü, S., Varol, R. (2007). Borlama ve bilyalı dövmenin demir esaslı t/m malzemelerde mekanik özelliklere etkisi. *C.B. Ü. Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 2(8), 1-8.
- Zeisig, J., Schadlich, N., Giebeler, L., Sander, J., Eckert, J., Kuhni, U. ve Hufenbach, J. (2017). Microstructure and abrasive wear behavior of a novel FeCrMoVC laser cladding alloy for high-performance tool steels. *Wear*, 382-383, 107-112.