



**BİLYALI DÖVME, PLAZMA NİTRÜRLEME VE BİLYALI
DÖVME/PLAZMA NİTRÜRLEME DUBLEKS YÜZEY
İŞLEMİ UYGULANMIŞ AISI 4140 ÇELİĞİNİN
MANYETİK ALAN ALTINDAKİ TRİBOLOJİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Halil ÇELİK

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekanik Bilim Dalı
Dr. Öğr. Üyesi Halim KOVACI
2019
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BİLYALI DÖVME, PLAZMA NİTRÜRLEME VE BİLYALI DÖVME/PLAZMA
NİTRÜRLEME DUBLEKS YÜZEY İŞLEMİ UYGULANMIŞ AISI 4140
ÇELİĞİNİN MANYETİK ALAN ALTINDAKİ TRİBOLOJİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Halil ÇELİK

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Mekanik Bilim Dalı**

**ERZURUM
2019**

Her hakkı saklıdır



ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**BİLYALI DÖVME, PLAZMA NİTRÜRLEME VE BİLYALI DÖVME/PLAZMA
NİTRÜRLEME DUBLEKS YÜZEY İŞLEMİ UYGULANMIŞ AISI 4140
ÇELİĞİNİN MANYETİK ALAN ALTINDAKİ TRIBOLOJİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Dr. Öğr. Üyesi Halim KOVACI danışmanlığında, Halil ÇELİK tarafından hazırlanan bu çalışma 11.07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı – Mekanik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği/oy çokluğu (3./3.)** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Ayhan ÇELİK

İmza:

Üye: Prof. Dr. A. Fatih YETİM

İmza:

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Halim KOVACI

İmza:

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu...18/07/2019...tarih ve 29./...64... nolu kararı
ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN

Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİLYALI DÖVME, PLAZMA NİTRÜRLEME VE BİLYALI DÖVME/PLAZMA NİTRÜRLEME DUBLEKS YÜZEY İŞLEMİ UYGULANMIŞ AISI 4140 ÇELİĞİNİN MANYETİK ALAN ALTINDAKİ TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Halil ÇELİK

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekanik Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Halim KOVACI

Aşınma, yorulma, korozyon ve kırılma gibi hasarların büyük çoğunluğu malzemelerin yüzeylerinden kaynaklanmaktadır. Bu hasarların giderilmesi için birçok yüzey işlemi kullanılmaktadır. Termokimyasal bir yüzey işlemi olan plazma nitrürleme, aşınmaya maruz kalan yüzeylerin tribolojik özelliklerini iyileştirmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Son yıllarda, plazma nitrürleme işleminin etkinliğini artırmak için ön işlem olan bilyalı dövme işlemi uygulanarak yüzeyde her iki işlemin etkisi ile meydana gelen dubleks yüzey işlemi önerilmiştir. Tüm bu işlemlerin yanı sıra, incelenen bir diğer konu manyetik alanın yüzeyleri nasıl etkilediği ile alakalıdır. Çünkü, birlikte bulunduğu üzere birçok malzeme ve makine elemanı manyetik alana maruz kalmaktadır. Manyetik alanın aşınmaya etkisi hakkında birçok çalışma yapılsa da bilyalı dövülmüş ve akabinde plazma nitrürlenmiş dubleks yüzey işlemi görmüş malzemelerin manyetik alan altındaki sürtünme ve aşınma davranışları henüz bilinmemektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, bu dubleks işleminin metalik malzemelerin manyetik etkiler altındaki sürtünme ve aşınma davranışına etkilerini belirlemektir. Bu amaçla, AISI 4140 çelik malzemeden üretilen numuneler 16, 20 ve 24 Almen şiddetlerinde dövülmüş ve dövüldükten sonra 1 ve 4 saatlik sürelerde %50N₂-%50H₂ gaz karışımı kullanılarak 500°C sıcaklıkta plazma ile nitrürlenmiştir. Numunelerin tribolojik özelliklerini belirlemek için manyetik alan uygulanmaksızın ve manyetik alan uygulanarak aşınma testleri yapılmış olup numunelerin yapısal ve mekanik özellikleri XRD, SEM, 3D profilometre ve mikrosertlik cihazı ile analiz edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, bilyalı dövme ve plazma nitrürleme ile oluşturulan dubleks yüzey işleminin malzemenin mekanik özelliklerini ve aşınma performansını; yüzey sertliğini artırarak, yüzeyde bası artık gerilmeleri oluşturarak, yüzeyin tane boyutunu küçülterek ve malzemenin yüzeyinde sert fazlar oluşturarak iyileştirdiği görülmüştür. Bunun yanı sıra manyetik alan, metalik malzemelerin yüzey enerjisini artırarak yüzeyde bir oksit filmi oluşturmuştur. Bu film tabakasının, testler esnasında yüzeyin aşınmasını önlediği ve bunun sonucunda yüzeyin tribolojik özelliklerinin olumlu yönde etkilendiği sonucuna varılmıştır.

2019, 70 sayfa

Anahtar Kelimeler: Sürtünme, Aşınma, Bilyalı dövme, Plazma nitrürleme, Manyetik alan.

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF SHOT PEENED, PLASMA NITRIDED AND SHOT PEENING/ PLASMA NITRIDING DUPLEX SURFACE TREATED AISI 4140 STEEL UNDER MAGNETIC FIELD

Halil ÇELİK

Ataturk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Mechanical Science

Advisor: Assist. Prof. Halim KOVACI

The majority of damages such as wear, fatigue, corrosion and fracture are caused by the surfaces of the materials. Many surface treatments are used to eliminate these damages. Plasma nitriding, a thermochemical surface treatment, is a surface treatment used to improve the tribological properties of surfaces exposed to wear. In recent years, in order to increase the efficiency of plasma nitriding process, a duplex surface treatment has been proposed with the effect of both processes on the surface by applying the shot peening process which is a pre-treatment. In addition to all these processes, another issue is related to how the magnetic field affects surfaces. Because, as it is known with the advancement of today's technology, many materials are exposed to magnetic field. Although many studies have been conducted on the effect of magnetic field on wear, studies such as the wear of duplex surface treated materials under magnetic field have remained quite shallow.

The main purpose of this study characterize the effects of this duplex process on the friction and wear behaviour of metallic materials under magnetic influences. For this aim, AISI 4140 steel specimens were shot peened at 16, 20 and 24 Almen intensities and were nitrided with 500°C plasma using a 50N₂% -50% H₂ gas mixture for 1 and 4 hours. Wear tests were performed under non-magnetic and magnetic field to specify tribological properties of the specimens and structural and mechanical properties of specimens were analyzed by XRD, SEM, 3D profilometer and microhardness tester. As a result of the studies, the duplex surface treatments were carried out to determine the mechanical properties and wear performance of the material; surface hardness, by creating residual stresses on the surface, by reducing the grain size of the surface and by forming hard phases on the surface of the material. In addition, the magnetic field raised the surface energy of the metallic materials to form an oxide film on the surface. It was concluded that this film layer prevented the wear of the surface more than normal during wear and as a result the tribological properties of the surface were positively affected.

2019, 70 pages

Keywords: Friction, Wear, Shot peening, Plasma nitriding, Magnetic field

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında benden yardımını, anlayışını, hoşgörüsünü, bilgisini, desteğini ve zamanını esirgemeyen, çok değerli tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Halim KOVACI'ya sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Yaptığım çalışmada bana daima yol gösteren ve benden bilgilerini esirgemeyen çok değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Ayhan ÇELİK'e, Sayın Prof. Dr. A. Fatih YETİM'e, ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yakup UZUN'a,

Deneysel çalışmalarım esnasında bana yol gösteren, bu çalışmanın her esnasında yanımda olan ve değerli zamanını harcayan çok değerli hocam Sayın Arş. Gör. Yusuf Burak BOZKURT'a,

Desteklerini daima hissettiğim Sayın Dr. Öğr. Üyesi Onur ÇOMAKLI'ya, Sayın Arş. Gör. Muhammet Taha ACAR'a, Sayın Arş. Gör. Yeşim SEÇER'e, Sayın Arş. Gör. Burak ATİK'e, Sayın Arş. Gör. Hilmi TEKDIR'e, Sayın Öğr. Gör. Mustafa YAZICI'ya, Sayın Öğr. Gör. Kerem TURALIOĞLU'na, Sayın Makine. Müh. Merve TAFTALI'ya, ve Sayın Elektrik Elektronik Müh. Şükran Merve TÜZEMEN'e,

Hayatım boyunca benden desteklerini, sabırlarını, hoşgörülerini ve anlayışlarını esirgemeyen sevgili annem Gönül ÇELİK'e, sevgili babam İbrahim ÇELİK'e ve kardeşlerime sonsuz teşekkür ederim.

Halil ÇELİK

Temmuz, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	6
2.1. Yüzey İşlemleri	6
2.1.1. Mekanik yüzey işlemleri	8
2.1.1.a. Bilyalı dövme işlemi ve amacı	8
2.1.1.b. Bilyalı dövme makinaları	11
2.1.1.c. Bilyaların sınıflandırılması	12
2.1.1.d. Bilyaların dövme şiddeti	13
2.1.2. Termokimyasal yüzey işlemleri	14
2.1.2.a. Plazmanın tanımı ve elamanları	15
2.1.2.b. Plazmanın elde edilmesi.....	15
2.1.2.c. Elektrik boşalması ve mekanizması	16
2.1.2.d. Plazma nitrüleme işlemi ve mekanizması.....	17
2.1.2.e. Plazma nitrüleme sonrası oluşan içyapılar	20
2.2. Manyetizma	20
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	27
3.1. Materyal.....	27
3.2. Bilyalı Dövme (Shot Peening) İşlemi	28
3.3. Plazma Nitrüleme İşlemi.....	28
3.4. XRD ve SEM Çalışmaları	31
3.5. Artık Gerilme Ölçümleri	32
3.6. Mikrosertlik Ölçümleri.....	32
3.7. Aşınma Deneyleri.....	33

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	36
4.1. XRD Analizleri.....	36
4.2. Artık Gerilme Analizleri	38
4.3. Mikroyapı Analizleri	40
4.4. Mikrosertlik İncelemeleri	41
4.5. Sürtünme ve Aşınma Analizleri	43
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR	56
EKLER.....	60
EK 1.....	60
EK 2.	64
EK 3.	67
ÖZGEÇMİŞ	71

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

%	Yüzde
μm	Mikronmetre
B	Manyetik Akı Yoğunluğu
B_r	Kalıcı Akı Yoğunluğu
B_s	Doyma Akı Yoğunluğu
Fe	Demir
GPa	Gigapascal
H	Manyetik Alan Şiddeti
H_2	Hidrojen
H_c	Koersif Kuvvet
I	Amper
Kg	Kilogram
L	Uzunluk
Mm	Milimetre
MPa	Megapascal
M_s	Doyma manyetikleşmesi
N	Çevrim Sayısı
N	Newton
N_2	Azot
°	Derece
Pa	Pascal
λ	Dalga Boyu
ω	Geliş/Incident Açısı
μ	Geçirgenlik

Kısaltmalar

3D	Üç Boyutlu
AISI	Amerikan Demir ve Enstitüsü
BD	Bilyalı Dövülmüş
BD+PN	Bilyalı Dövülmüş + Plazma Nitrülenmiş
CVD	Kimyasal Buhar Kaplama
E	Enerji
HV	Vickers Sertlik Birimi
P-CVD	Fiziksel-Kimyasal Buhar Kaplama
PN	Plazma ile Nitrülenmiş
PVD	Fiziksel Buhar Kaplama
Q	Isı Enerjisi
SAE	Society of Automotive Engineers
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	X-ışını Difraktometresi
γ YMK	Yapılı Demir Nitrür Fazı
ϵ HSP	Yapılı Demir Nitrür Fazı
α HMK	Yapılı Demir Fazı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Bilyalı dövme işleminin şematik gösterimi	9
Şekil 2.2. Bir bilyalı dövme işleminin uygulaması.....	9
Şekil 2.3. Bilyalı dövme sonucu oluşan yüzey ve bası artık gerilme profili	10
Şekil 2.4. Bilyalı dövme işlemi sonrası tane yapısı	11
Şekil 2.5. Bilyalı dövme makinalarının sınıflandırılması	12
Şekil 2.6. Almen test şeridi	14
Şekil 2.7. Elektrik arkı boşalmasının gerilim-akım ilişkisi	17
Şekil 2.8. Plazma nitrürleme işlem mekanizması	19
Şekil 2.9. Mıknatıstaki manyetik alan çizgileri	21
Şekil 2.10. Silindirik bir bobinde oluşan manyetik alan.....	21
Şekil 2.11. Diamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik maddelere manyetik alanın uygulanıp, uygulanmaması için manyetik momentlerin dizilişi.....	23
Şekil 2.12. Başlangıçta manyetik olmayan ferromanyetik bir maddenin B-H eğrisi ve birkaç manyetikleşme noktaları için manyetik momentlerin dizilişi, eğri üzerinde doyma akı yoğunluğu	25
Şekil 2.13. İleri ve tersine doyma akı yoğunluğuna (S ve S' noktaları) maruz bırakılan bir ferromanyetik maddede manyetik akı yoğunluğunun, manyetik alan şiddetiyle değişimi	26
Şekil 3.1. Farklı Almen şiddetlerinde dövülmüş numunelerin görüntüleri	28
Şekil 3.2. Plazma nitrürleme ünitesi	29
Şekil 3.3. X-Işını kırınım cihazı (XRD).....	31
Şekil 3.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	32
Şekil 3.5. Mikrosertlik cihazı.....	33
Şekil 3.6. Aşınma cihazı	34
Şekil 3.7. Manyetik alanda yapılan aşınma testinin şematik gösterimi	35
Şekil 4.1. İşlemsiz ve BD numunelerin XRD grafikleri	36
Şekil 4.2. 500°C'de 1 saat boyunca PN ve BD+PN numunelerin XRD grafikleri.....	37
Şekil 4.3. 500°C'de 4 saat boyunca PN ve BD+PN numunelerin XRD grafikleri.....	37
Şekil 4.4. İşlemsiz, PN, BD ve BD+PN numunelerin artık gerilme değerleri.....	39

Şekil 4.5. İşlemsiz ve farklı Almen şiddetlerinde dövülmüş numunelerin aşınmadan önce elde edilen 3D profilometre yüzey görüntüleri.....	40
Şekil 4.6. İşlemsiz, PN, BD ve BD+PN numunelerin mikrosertlik-derinlik kalınlığı grafikleri.....	42
Şekil 4.7. İşlemsiz, PN, BD ve BD+PN numunelerin non manyetik ve manyetik alan altında aşınma testlerinden elde edilen sürtünme katsayısı-zaman grafikleri.....	45
Şekil 4.8. İşlemsiz, PN, BD ve BD+PN numunelerinin non manyetik ve manyetik alan altında aşınma oranları.....	48



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Yüzey mühendisliğinde kullanılan metotlar.....	7
Çizelge 2.2. Bilyaların SAE standartları ve içerikleri.....	13
Çizelge 2.3. Almen test şeridinin standart sertlik değerleri ve kalınlıkları.....	14
Çizelge 3.1. AISI 4140 düşük alaşımlı çelik malzemesinin kompozisyonu.....	27
Çizelge 3.2. AISI 4140 düşük alaşımlı çeliğin mekanik özellikleri	27
Çizelge 3.3. AISI 4140 çelik numunelerin bilyalı dövme şiddetleri ve plazma nitürleme şartları	30
Çizelge 3.4. Aşınma deney şartları	34
Çizelge 4.1. İşlemsiz, PN, BD ve BD+PN numunelerin yüzey artık gerilmeleri, yüzey sertliği, bileşik tabaka kalınlığı, difüzyon tabakası, yüzey pürüzlülüğü, ortalama sürtünme katsayıları ve aşınma oranları değerleri.....	52

1. GİRİŞ

Aşınma, yorulma, korozyon ve kırılma gibi mühendislik yapılarındaki hasarların büyük çoğunluğu, özellikle malzemelerin yüzeylerinden veya dış katmanlarından kaynaklanır. Bunlar içerisinde mekanik hasarların büyük bir kısmını oluşturan aşınma hasarı doğrudan malzemenin yüzey durumuyla ilgilidir (Palacios *et al.* 2014). Malzemelerin mekanik özelliklerinin ve aşınma performansının; yüzey sertliğinin artırılarak, yüzeyde artık gerilmeler oluşturularak, tane boyutunun azaltılarak ve malzemenin yüzeyinde sert fazlar oluşturularak geliştirilebileceği bilinmektedir (Hassani-Gangaraj *et al.* 2014).

Malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek için pek çok farklı yüzey işlemi kullanılmaktadır. Yüzey işlemleri genel olarak, termal-termokimyasal işlemler ve yüzey kaplama teknikleri olarak sınıflandırılabilir. Yüzey işlemleri, yüzey özellikleri iyileştirilmek istenen malzemeye göre seçilebilmektedir. Termokimyasal bir yüzey işlemi olan plazma nitrüleme, metalik malzemelerin yorulma ve aşınma özelliklerini iyileştirmek ve geliştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Mohammadzadeh *et al.* 2014; Kovacı *et al.* 2016).

Bu çalışmada kullanılan AISI 4140 çeliği, yüksek basınç ve darbeye dayanıklı olmasından dolayı otomotiv, uzay ve havacılık, savunma sanayileri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Geniş bir kullanım alanı olan AISI 4140 çeliğinden imal edilen elemanlarda uzun bir çalışma ve kullanım ömür istenmekte ve bu nedenle bu elemanların yüzey özellikleri geliştirilmek istenmektedir. Bu amaçla, malzeme yüzeylerinde çeşitli yöntemlerle yüzey işlemleri yapılmaktadır. Termokimyasal bir yüzey işlemi olan plazma nitrülenme işleminin malzemelerin aşınmaya karşı dayanımlarını artırdığı bilinmektedir. Plazma nitrüleme işlemi demir içerikli malzemelerin tamamına, çok gözenekli sinterlenmiş çeliklere, dökme demirlere ve yüksek alaşımlı takım çelikleri gibi farklı malzeme gruplarına uygulanabilir. Türbin, kompresör diskleri, rotor milleri, iniş takımı bileşenleri, tank palet pimleri, yaylar, dişliler, bağlantı çubukları, kam milleri, krank milleri, biyel kolları, burulma çubukları vb. makine parçaları ve elemanları genellikle plazma nitrüleme ile yüzey işlemine tabi tutulan tipik bileşenlerdir. Bu çalışmada, AISI

4140 çeliğinin plazma nitrülenmesinden sonra oluşan bileşik tabaka ve bu tabakanın altında difüzyon tabakası elde edilir. Tribolojik özelliklerde iyileşme bu tabakalarda oluşan fazlar sayesinde sağlanır (Yetim *et al.* 2010). Fakat, bu tabakaların özellikleri ve kalınlığı bazı mühendislik uygulamalarında tatmin edici seviyede olmayabilir. Bu nedenle plazma nitrüllemenin etkinliğini artırmak için ön işlem olan bilyalı dövme işlemi kullanılabilir. (Kovacı *et al.* 2019).

Bilyalı dövme işlemi, malzeme yüzeylerinde bası artık gerilmeleri oluşturarak malzemenin yüzey sertliğini artırdığı için yaygın olarak kullanılan bir yüzey modifikasyon yöntemidir (Hashemi *et al.* 2011). Malzemenin yüzeyi ve yüzeye yakın bölgelerinin mekanik dayanımı; bilyalı dövme esnasında bilya toparlarının yüzeye tekrar tekrar çarparak yüzeyin sertliğini artırması, ve bası artık gerilmelerinin oluşması sebepleri ile artırılmış olur. Ayrıca bilyaların yüzeye sürekli olarak çarpmasının etkisiyle malzemenin yüzeyinde ve yüzey altı bölgelerinde ince taneli yapılar oluşur (Zhan *et al.* 2012; Bagherifard *et al.* 2014; Mitrovic *et al.* 2014).

Son yıllarda, iki veya daha fazla yüzey işleminin faydalı etkileri birleştirilerek ikili yüzey modifikasyon yöntemleri önerilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır. Bilyalı dövme ve plazma nitrüleme işlemlerinin sıralı uygulaması bu yöntemlerden biridir. Bilyalı dövme işlemi, yüzeyde bası artık gerilmesi oluşturarak ve yüzeyde sert bir tabaka oluşturarak mekanik dayanım bakımından büyük ölçüde avantaj sağlar. Plazma nitrüleme işlemi ise malzemenin yüzey sertliğini artırır (Hassani-Gangaraj *et al.* 2014). Ayrıca azotun difüzyon oranının, dislokasyon yoğunluğunun artırılması ve tane büyüklüğünün azaltılmasıyla artırabileceği bilinmektedir (Manova *et al.* 2007; Kikuchi *et al.* 2010). Bu açıdan bakıldığında, bilyalı dövmenin plazma nitrüleme işleminin etkinliği üzerinde yararlı etkilere sahip olduğu söylenebilir (Cho *et al.* 2013).

Bilimsel literatürde, bilyalı dövme ve plazma nitrüleme ikili işleminin etkileri farklı çalışmalarda incelenmiştir. Bu çalışmalarda genel olarak azotun difüzyon oranının, ön işlem olan bilyalı dövme ile artırıldığı belirtilmiştir (Shen *et al.* 2010; Cho *et al.* 2013; Chemkhi *et al.* 2013). Ayrıca bilyalı dövme ve plazma nitrüleme işleminin malzemelerin

yorulma özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için bazı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar malzemelerin yorulma dayanımlarının, bası artık gerilmeleri ve artan yüzey sertliği ile artırıldığını göstermiştir (Kikuchi *et al.* 2010; Hassani-Gangaraj *et al.* 2014). Ancak sadece plazma nitrülenmiş malzemelerin tribolojik özellikleri birçok çalışmada incelenirken, bilya ile dövülmüş ve plazma ile nitrülenmiş malzemelerin tribolojik özellikleri sınırlı sayıda çalışmada incelenmiştir. Bilyalı dövmenin malzemelerin aşınma davranışına etkileri ile ilgili çalışmalar farklı sonuçlar ortaya koymuştur. Bazı çalışmalarda bilyalı dövme işleminin malzemelerin aşınma özelliklerini iyileştirdiği belirtilirken (Matsui *et al.* 2006; Palacios *et al.* 2014; Mitrovic *et al.* 2014), bazı çalışmalarda ise bilyalı dövme işleminin malzemelerin tribolojik özelliklerini iyileştirmedeğini öne sürmüşlerdir (Matsui *et al.* 2006). Öte yandan bilyalı dövme ve plazma nitrürlenmenin malzemeler üzerindeki tribolojik davranış etkileri sınırlı sayıda çalışmada incelenmiştir (Kovacı *et al.* 2019).

Pek çok makine elamanı, çalışma veya çalışma öncesi koşullarda elektrik ya da manyetik alana maruz kalır. Manyetik alana maruz kalan makine elamanları genellikle yük taşıma sistemleri ve/veya bağlantı elamanlarıdır. Manyetik alanın etkisi, özellikle elektrik motoruna yakın parçalar için önemli olabilmektedir. Manyetik alan metallerin tribolojik özelliklerini etkileyebilir. Manyetik alan uygulayarak yapılan tribolojik işlemde makroskobik olarak, numune yüzeyinde meydana gelen kalıntı parçacıkları manyetik alan yardımıyla numune yüzeyinden sürekli olarak uzaklaştırılabilir veya yüzeye çekilebilir. Eğer manyetik alanın uygun bir şekilde etki etmesi sağlanabilirse yüzeyin, kalıntı parçacıkları ile tribolojik işlemi hariç tekrar tekrar aşınması önlenerek manyetik devredeki oksijen bileşeni artırılırken, sürtünme yüzeyinin oksidasyon aktivasyon enerjisi azaltılır. Mikroskobik olarak da manyetik alan, elektronların spinini, yüzey enerjisini, dislokasyon yoğunluğunu, atomların arayer hareketini ve sistemin enerji değişimini etkiler (Wei *et al.* 2013).

Malzemelerin manyetik alan altındaki aşınma mekanizmalarını açıklayan bilimsel literatürde, kayma sırasında üretilen ferromanyetik partiküllerin, hızlandırılmış

oksidasyon ve mıknatıslanma nedeniyle malzeme özelliklerinin değişmesinin önemli faktörler olabileceğini belirtilmiştir (Hiratsuka *et al.* 1993; Stolarski *et al.* 2011).

Bu alanda yapılan ilk çalışmalar, mıknatıslanmanın yüzey aktivasyon enerjisini artırdığını ve aşınma aktivasyon enerjisini azalttığını göstermiştir. Bu çalışmalarda, yüzey enerjisindeki artışın, oksidasyon ivmelenmesinden dolayı koruyucu oksit filminin yenilenmesine neden olurken, aşınma aktivasyon enerjisindeki azalmaya ve aşınma direncinde artışa sebep olduğu belirtilmiştir (Hiratsuka *et al.* 1980; Yamamoto *et al.* 1987). Ayrıca, oksidasyonun hem sürtünme katsayısında hem de aşınma oranlarında önemli düşüslere yol açtığını belirtmiştir. Bunlarla birlikte, mıknatıslanmanın oksidasyonu hızlandırdığı ve numune yüzeyinin oksijen yoğunluğunun manyetik alan tarafından arttığı bildirmiştir (Kumagai *et al.* 1993).

Başka bir çalışmada, manyetik alanın oksijen aktivitesini artırdığı ve oksitlenmiş ince parçacıkların aşınma yüzeyine bağlandığını ve aşınma kaybını önlediği belirtmiştir (Wang *et al.* 2003).

Bir diğer çalışmada, manyetik alanının aşınmaya etkisi bakımından diğer önemli bir noktanın, uygulanan manyetik alanın yönü olduğu belirlenmiştir. Manyetik alanın yatay yönde, yani kayma yönünde uygulanması halinde aşınma direncinin arttığı belirtmiştir (Hiratsuka *et al.* 1986).

Burada verilen literatür incelemesinden görüldüğü gibi, manyetik alanın aşınmaya etkisi, bilyalı dövülmüş, plazma nitrülenmiş ve bilyalı dövülmüş ve akabinde plazma nitrülenmiş numunelerin sürtünme ve aşınma davranışları hakkında birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen bilyalı dövülmüş ve plazma nitrülenmiş yani dubleks yüzey işlemi uygulanmış malzemelerin manyetik alan altındaki sürtünme ve aşınma davranışı hakkında herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada, manyetik alanın; bilyalı dövülmüş ve plazma nitrülenmiş malzemelerin sürtünme ve aşınma karakteristiklerine etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, AISI 4140 çelik numuneleri 16, 20 ve 24 Almen şiddetlerinde dövülmüş ve dövüldükten sonra 1 ve 4

saatlik sürelerde %50N₂-%50H₂ gaz karışımı kullanılarak 500°C sıcaklıkta plazma 1 ve 4 saatlik sürelerde plazma nitrülenmiştir. Numunelerin tribolojik özelliklerini belirlemek için manyetik alan uygulanmaksızın ve manyetik alan altında aşınma testleri yapılmış olup numunelerin yapısal ve mekanik özellikleri XRD, SEM, 3D profilometre ve mikrosertlik cihazı ile analiz edilmiştir.

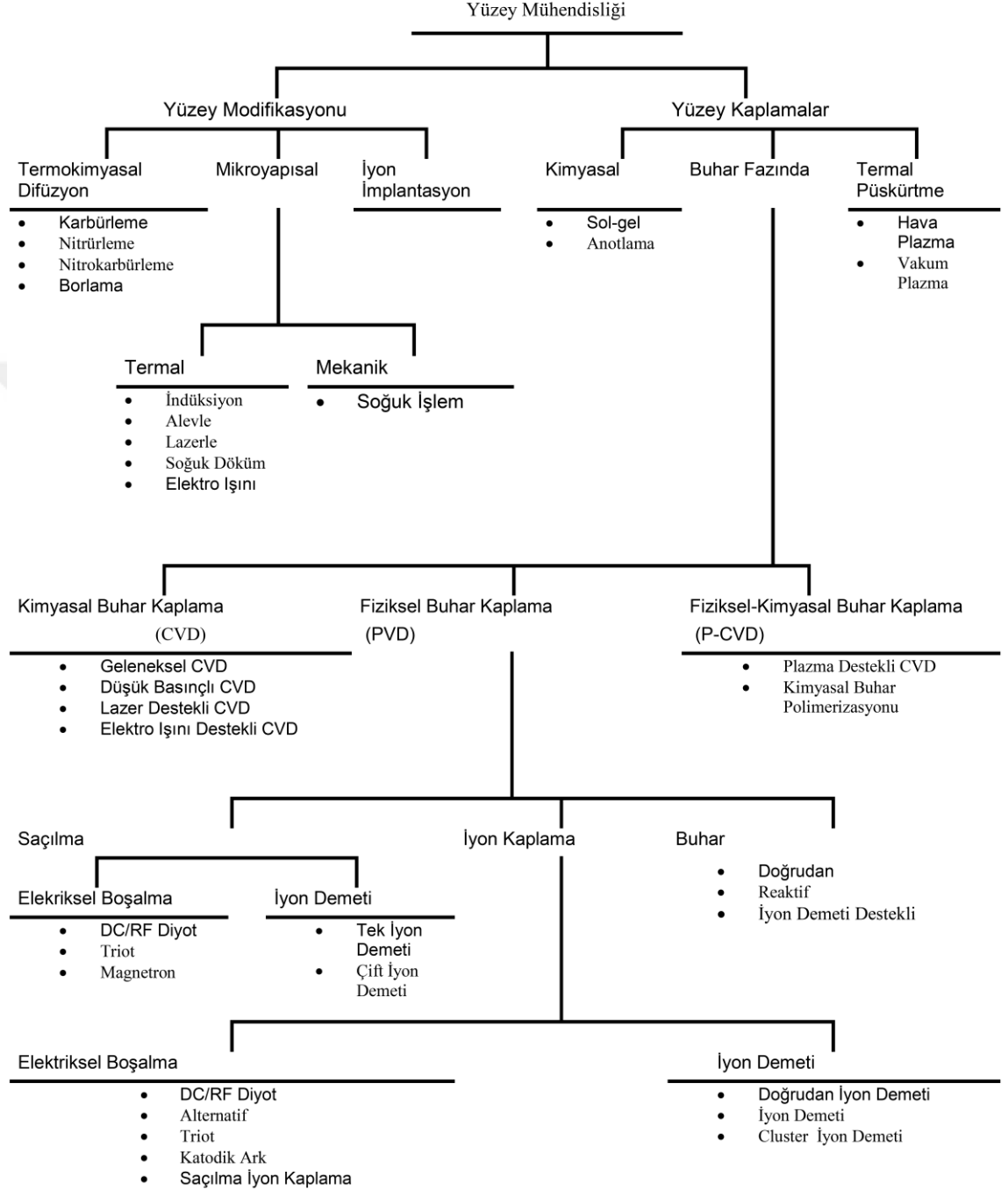


2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Yüzey İşlemleri

Dünya nüfusunun çok hızlı bir şekilde artması, teknolojik ürün talebinin de artmasına sebep olmuştur. İşçilik ve enerji maliyetlerinin çok yüksek olması beraberinde ham madde, üretim, makine ve sistemlerinin maliyetini artırmıştır. Bundan dolayı, kullanıcılar bu ürünlerden yüksek verim almak istemektedirler. Mühendislik ürünlerinde dikkat edilmesi gereken üç parametre estetik, emniyet ve ekonomidir. Bir makine elemanı, üzerine gelen yükleri malzemenin yüzey özellikleri olan yorulma, korozyon ve aşınma ile büyük oranda karşılar. Dolayısıyla, yüzey özelliklerinin önemli olduğu yerlerde bir makine elemanın bütününe müdahale etmeden sadece yüzeye ait özellikleri iyileştirmek hem maliyetten hem de zamandan tasarruf sağlamaktadır. Bunun sonucu olarak yüzey işlemleri ya da yüzey mühendisliği gibi kavramlar ortaya çıkmıştır. Çizelge 2.1’de yüzey mühendisliğinde kullanılan metotlar gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Yüzey mühendisliğinde kullanılan metotlar (Alsaran 2001)

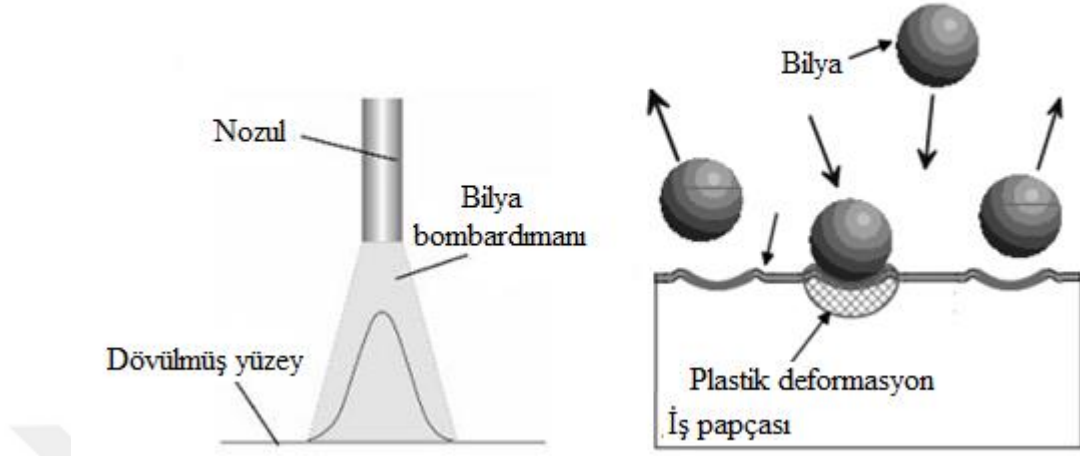


2.1.1. Mekanik yüzey işlemleri

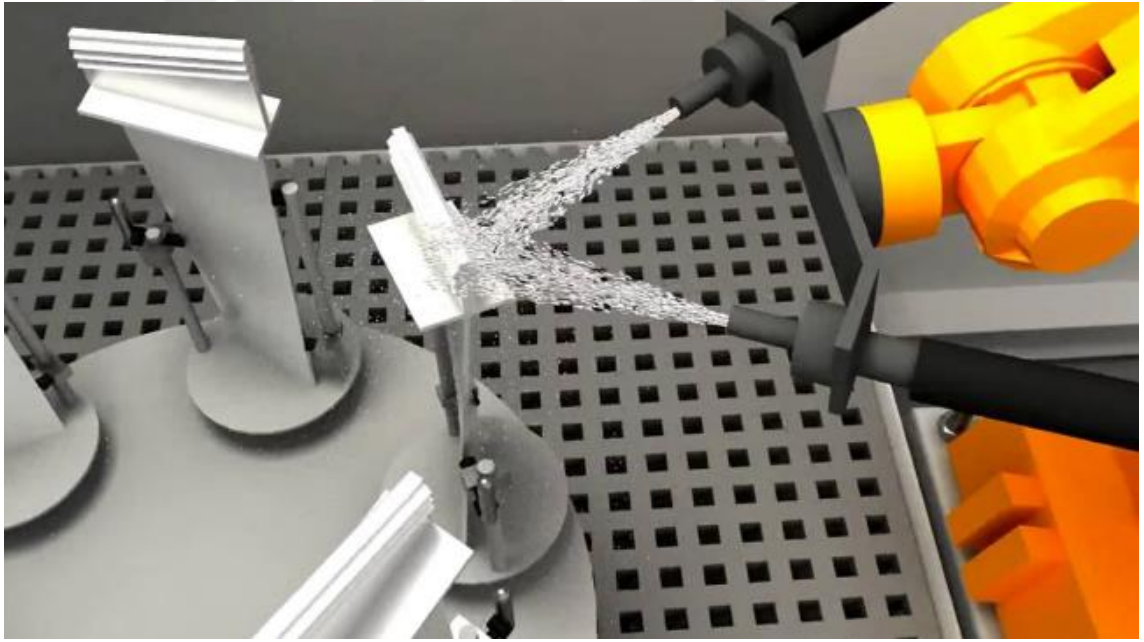
Mekanik yüzey işlemi malzemenin yüzeyine dışarıdan işleme takımlarıyla müdahale edilerek malzemenin yüzeyinde plastik deformasyon oluşturma işlemidir. Mekanik yüzey işlemleri sonucunda malzemenin yüzeyinde dislokasyonların artmasıyla birlikte yüzey topografyası da değişmektedir (Wagner 1999). Mekanik yüzey işlemleri ile malzemelerin korozyon, aşınma ve yorulma dayanımlarının iyileştirilmesi amaçlanmaktadır.

2.1.1.a. Bilyalı dövme işlemi ve amacı

Bilyalı dövme (Shot Peening) küresel şekildeki metal malzemelerin dövülecek olan malzeme üzerine belirli çalışma şartları sağlanarak (çarpma açısı, nozul mesafesi, hız, basınç, süre vb.) malzeme yüzeyine püskürtülerek yapılan mekanik bir yüzey işlemidir. Bilyalı dövme işleminin amacı, bilyaların malzeme üzerine vurdurularak malzeme üzerinde çukurcuklar ve tepecikler oluşturulması yani malzeme yüzeyinin plastik deformasyona uğratılmış olmasıdır. Bu işlem sonucunda malzeme yüzeyinde bası artık gerilmeleri meydana gelir bu da malzemenin yorulma ve gerilmeli korozyon dayanımını artırır (Schulze 2006). Bilyalı dövme işlemi havacılık, otomotiv ve enerji üretimi endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Türbin ve kompresör diskleri, bıçakları, rotor milleri, iniş takımı bileşenleri, tank palet pimleri, yaylar, dişliler, bağlantı çubukları, kam milleri, krank milleri, biyel kolları ve burulma çubukları, genellikle bilyalı dövme ile yüzey işlemine tabi tutulan tipik bileşenlerdir (Majzoobi *et al.* 2005). Bilyalı dövme işleminde kullanılan bilyalar, dövülmesi istenilen malzemeye göre daha sert olmalıdır. Bu bilyalar genellikle küre şeklinde dökme demir, çelik, kesme tel, seramik, cam ya da paslanmaz çelik malzemelerden yapılmış olup işlem şartlarına göre bilya tipi seçilmektedir (Varol 1990). Bilyalar, dövme işlemi sırasında plastik deformasyon oluşturacak şekilde malzeme yüzeyinde tümsekler ve çukurcuklar meydana getirmektedir (Ünal 2011). Bilyalı dövmenin şematik resmi Şekil 2.1’de ve bir bilyalı dövme işlemi uygulaması Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



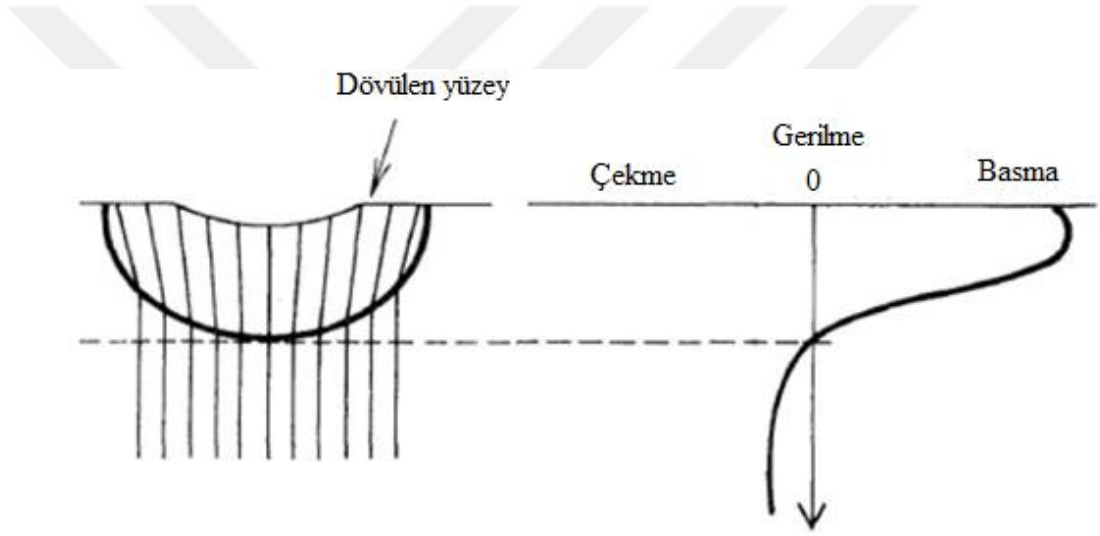
Şekil 2.1. Bilyalı dövme işleminin şematik gösterimi (Wagner 2003)



Şekil 2.2. Bir bilyalı dövme işleminin uygulaması

Bilyaların malzeme yüzeyine şiddetli bir şekilde çarpmasıyla birlikte deformasyona uğrayan bölgelerin genişlemeye çalışması yüzeyin hemen alt kısmında elastik deformasyona maruz kalan bölgelere engellenecektir. Bundan dolayı, yüzeyde ve yüzeyin hemen alt kısmında bilyalı dövmenin etki ettiği bölgelere kadar bası artık gerilmeleri görülecektir. Malzemenin iç kısımlarında genişlemeyi önlemeye çalışan

elastik deformasyona maruz kalmış bölgelerde ise çekme gerilmeleri meydana gelecektir. Yüzeyde çukur oluşumuna sebep olan çekme gerilmeleri, yüzeyin hemen altında malzemeyi eski haline getirmeye çalışan bası artık gerilmeleri tarafından engellenmeye çalışılacaktır. Bundan dolayı, yüzeyin hemen altında malzeme, basma gerilmesi ile yüklenir ve birbiri üzerine çakışan çukurcukların altında bası artık gerilmeleri profili oluşacaktır. Bilyalı dövülmüş bir metalin enine kesitinde oluşan bası artık gerilme profili Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Bası artık gerilmesi değeri, metalin akma dayanımının üstüne çıkamaz ve yaklaşık olarak metalin akma dayanımının yarısı mertebelerindedir (Kostilnik 1994).

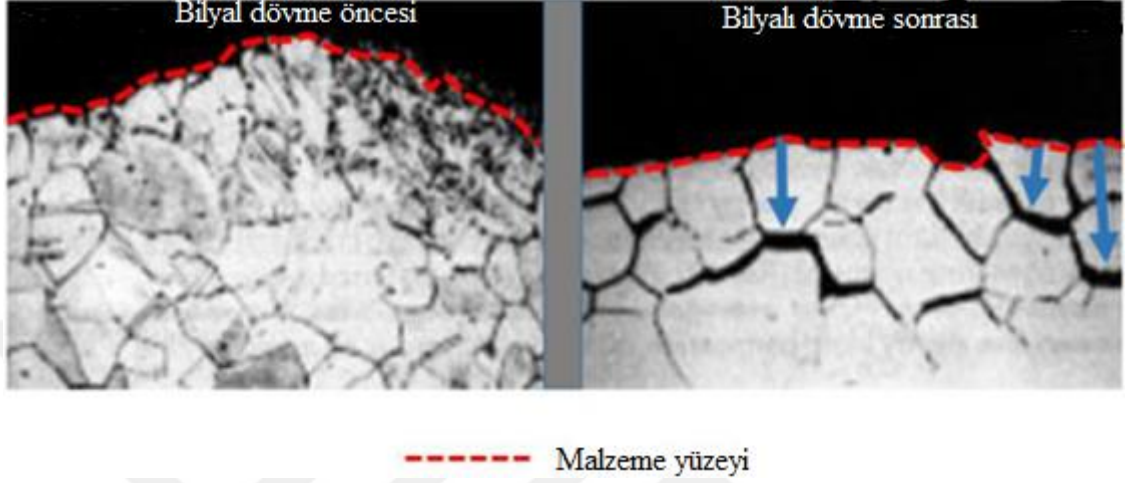


Şekil 2.3. Bilyalı dövme sonucu oluşan yüzey ve bası artık gerilme profili (Kostilnik 1994)

Malzemelerin mikro yapısını ve yüzey işlemlerine bağlı olarak aşınma, korozyon ve yorulma gibi özelliklerini iyileştirmek için bilyalı dövme işlemi yapılmaktadır.

Malzeme yüzeyinde meydana gelen aşınma, korozyon ve yorulma hasarları malzeme yüzeyinden iç kısmına doğru giderek ilerler. Bu hasarların önlenmesi için malzemenin iç yapısındaki tane boyutlarının, nano taneli yapıya dönüştürülmesi amaçlanmaktadır. Malzemenin bütün yapısını nano taneli yapıya dönüştürmeye gerek kalmadan malzemenin sadece yüzeyini nano taneli yapıya dönüştürerek dayanım artırılabilir.

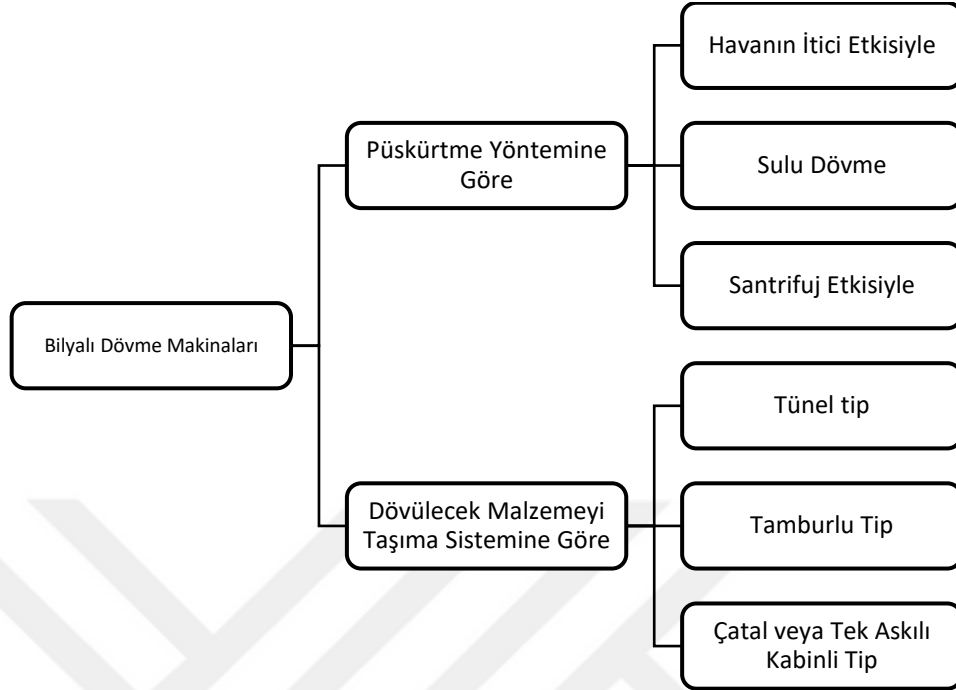
Bilyalı dövme işlemiyle yüzeyi dövülmüş paslanmaz çelik parçasının yüzeyindeki tane yapısının değişimi Şekil 2.4’de gösterilmiştir (Balyalı 2015).



Şekil 2.4. Bilyalı dövme işlemi sonrası tane yapısı (Balyalı 2015)

2.1.1.b. Bilyalı dövme makinaları

Bilyalı dövme makinaları başlıca iki kategoriden oluşmaktadır. Bilyaların tahrik edilmesi için basınçlı hava püskürtmeli sistemler ve türbin yardımıyla oluşturulan santrifüj etkisiyle tahrik edilen makinalar bulunmaktadır. Ayrıca endüstride farklı prensiplerle çalışan makinalarda bulunmaktadır. Bilyalı dövme makinalarının sınıflandırılması Şekil 2.5’de gösterilmiştir (Straub 1992).



Şekil 2.5. Bilyalı dövme makinalarının sınıflandırılması (Straub 1992)

Basıncılı hava püskürtmeli bilya dövme işlemi, hava basıncı ile cihazın haznesinde bulunan bilyaların uzun bir nozul yardımıyla malzemenin yüzeyine püskürtülmesi işlemidir. Diğer makinalara göre sistemin en avantajlı yönü, karmaşık geometriye sahip olan makine parçalarını kolaylıkla dövebilmesidir (Savaş 2010).

Santrifüj etkisiyle çalışan bilyalı dövme makinalarında, bilyanın kendi ağırlığı ile birlikte merkezkaç kuvveti oluşturarak düşük bir hızla dönen, üzerinde kanatçıklar olan çarkın merkezine bilyalar bırakılır ve çark üzerindeki kanatçıklar bilyaları dışarı doğru fırlatır. Böylece malzeme yüzeyine çarpan bilyalar ile dövme işlemi gerçekleşmiş olur (Straub 1973). Günümüzde santrifüj etkisiyle çalışan bilyalı dövme makinaları, endüstride sıklıkla kullanılmamaktadır.

2.1.1.c. Bilyaların sınıflandırılması

Bilyalı dövme için kullanılan bilya malzemeleri dökme çelik, dökme demir, çelik, paslanmaz çelik, seramik, cam ve kesme teldir. Çelik bilyalar, SAE (Society of

Automotive Engineers) standartlarına göre S70-S1320 arasında değer alırlar. Burada S harfi bilya malzemesinin çelik olduğunu ifade eder. S'den sonra gelen değer on binde biri, inç cinsinden bilyanın çapını vermektedir (Bek 2009).

Bilya üreticileri genel olarak standartlar içerisinde en çok SAE standartlarını kullanırlar. SAE standartlarında “ J ” harfi, genellikle bilyalı dövme uygulamaları için kullanıldığını göstermektedir. Bilyaların SAE standartları ve içerikleri Çizelge 2.2’de verilmiştir

Çizelge 2.2. Bilyaların SAE standartları ve içerikleri (Balyalı 2015)

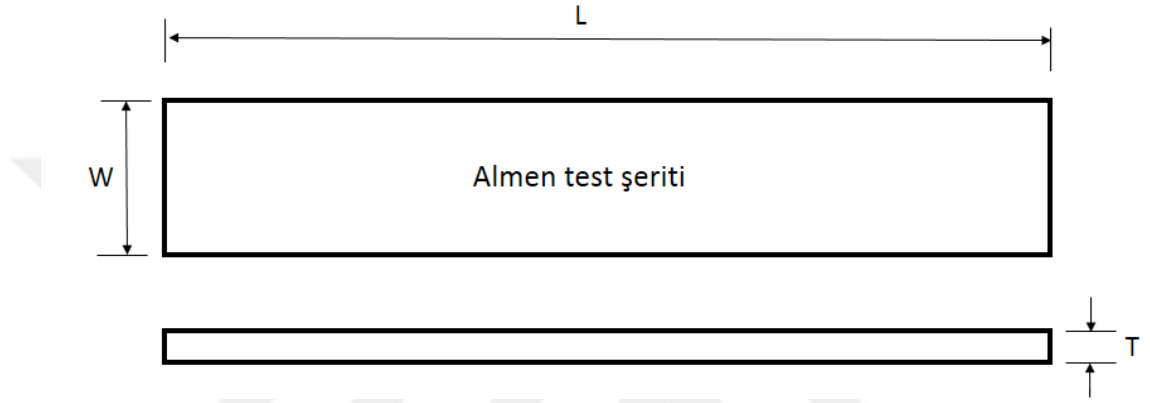
Standartlar	İçerikler
SAE J441	Kesme Tel
SAE J444	Bilya ve Grit Boyutları
SAE J827	Yüksek Karbonlu Dökme Çelik
SAE J1173	Cam Küre
SAE J1830	Seramik
SAE J2175	Düşük Karbonlu Dökme Çelik

2.1.1.d. Bilyaların dövme şiddeti

Bilyalı dövme işlemini daha standart hale getirmek için dövme şiddeti büyüklüğü geliştirilmiştir. Dövme şiddetini belirlemek için Almen şeritleri kullanılmaktadır. Almen şeritleri standartlaştırılmış olup, orta karbonlu çelikten üretilmişlerdir. Bu Almen şeritlerinin sertliği 45-58 HRC arasındadır. Üç tip Almen şeridi olup, kalından inceye doğru sırasıyla C, A, N harfleriyle gösterilirler. Çizelge 2.3’de Almen şeritlerinin standartlara göre sertlik değerleri ve kalınlıkları verilmiştir. Şekil 2.6’da da Almen test şeridi gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Almen test şeridinin standart sertlik değerleri ve kalınlıkları (Bek 2009)

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

**Şekil 2.6.** Almen test şeridi

Metal bilyalar, her üç (C, A, N) Almen şeridinde kullanılırken cam kürecik bilyalar, N şeridinde, seramik bilyalar ise A ve N şeridinde kullanılırlar.

Dövme şiddetini belirlemek için plastik deformasyona maruz kalan Almen şeridinin eğrilik yarıçapının yüksekliği bulunur ve bu değerin binde biri alınarak ölçüm yapılır. Bu ölçümler Almen masterlarıyla yapılır.

2.1.2. Termokimyasal yüzey işlemleri

Termokimyasal yüzey işlemleri; malzemelerin mekanik, kimyasal ve yüzey özelliklerini değiştirmek için uygulanan kontrollü bir şekilde ısıtma işlemidir. İşlemin amacı, aşınmaya maruz kalan yüzeylerin aşınma direncini artırmanın yanı sıra, parçanın yorulma ömrünü artırmak ve korozyon direncini iyileştirmektir. Bir makine parçasının yüzeyini sertleştirmek için termokimyasal yüzey işlemleri kullanılmaktadır.

2.1.2.a. Plazmanın tanımı ve elamanları

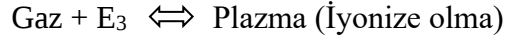
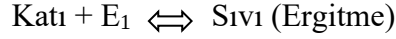
Maddenin katı, sıvı, gaz hallerinin yanı sıra, plazma adı verilen maddenin dördüncü bir hali daha bulunmaktadır. Plazma, elektronlardan, birkaç iyon türünden, nötr atomlardan ve moleküllerden oluşan bir gaz karışımı olarak tanımlanır (Capitelli and Gorse 1992).

Bu gaz karışımını meydana getiren elamanlar ise şu şekildedir:

- **Elektron:** Atom çekirdeğinin dışında bulunan ve belirli yörüngelerde hareket eden negatif (-) yüklü parçacıklardır. Değeri $e = 1,6 \times 10^{-19} C$ 'dir.
- **İyon:** Bir atomda elektron sayısının proton sayısından farklı olduğu yüklü parçacıklardır.
- **Foton:** Enerji yüklü ışın parçacıklarıdır.
- **Uyarılmış atom:** İyonizasyon enerjisinden daha küçük bir enerjinin bir atom üzerine verilmesiyle oluşan elektron kaybetmeyen atomdur.
- **Nötral atom ve nötral molekül:** Bir atomdaki proton sayısının, elektron sayısına eşit olduğu atom ve moleküllerdir.

2.1.2.b. Plazmanın elde edilmesi

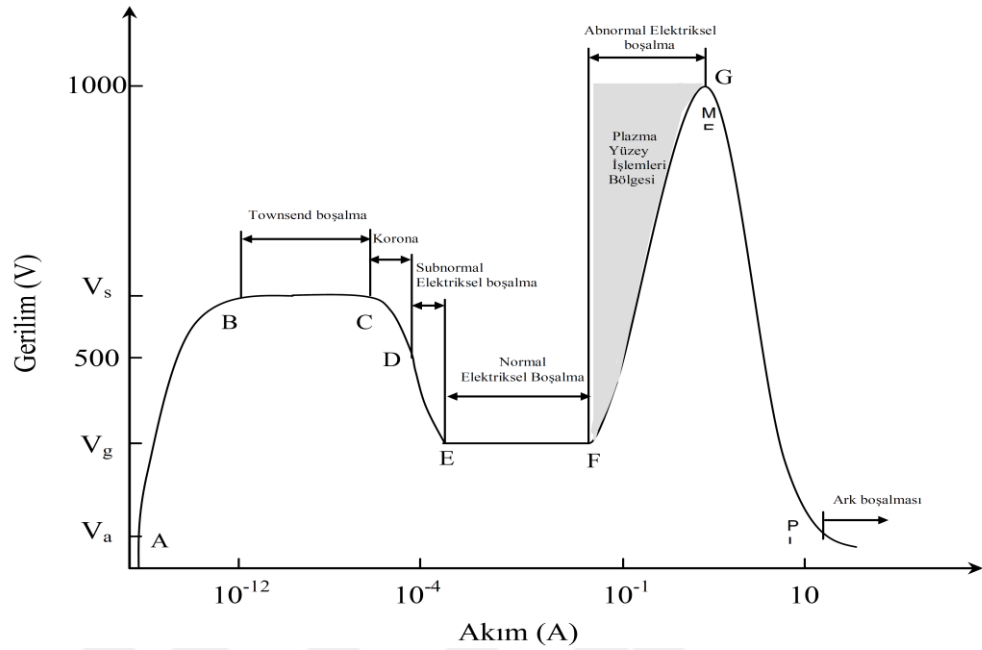
Maddelerin kendilerine özgü özellikleri olan katı, sıvı, gaz ve plazma olmak üzere toplam dört hali vardır. Bu haller arasındaki en önemli fark, her halin enerjisinin birbirinden farklı olmasından kaynaklanır. Yani, maddenin herhangi bir halini diğer bir hale dönüştürmek mümkündür. Aşağıda görüldüğü gibi katı haldeki bir maddeye E_1 enerjisi verilerek sıvı haline, sıvı haldeki maddeye E_2 enerjisi verilerek gaz haline, gaz halindeki maddeye de E_3 enerjisi verilerek plazma haline geçirmek mümkündür. Bu işlemlerin tersi de mümkündür (Karadeniz 1990).



İyonizasyon enerjisinden daha fazla bir enerjinin gaz halindeki bir atoma verilmesiyle atom iyonize olur ve plazma haline geçmiş olur. Plazma için gerekli olan enerji mekanik, ısı, ışın ve elektrik enerjisi şeklinde verilebilir. Mühendislik uygulamalarında en çok kullanılan elektrik enerjisi ile elde edilen plazmadır. Gaz halindeki bir kütleye elektrik enerjisi bir elektrik boşalması aracılığıyla verilir (Karadeniz 1990).

2.1.2.c. Elektrik boşalması ve mekanizması

Elektrik gerilim kaynağı gaz içerisinde bulunan anot ve katot plakaları arasına bağlanır ve belli çalışma şartları gerçekleştirildiğinde, tatbik edilen gerilim plakalar arasındaki gazın delinme geriliminden yüksek olduğunda bu anot ve katot plakaları arasında bir elektrik boşalması meydana gelir. Böylelikle plakalar arasında elektrik akımı akmaya başlar. Bu akım değeri 10 amperden büyük ise elektrik arkı adını alır. (Karadeniz 1990). Şekil 2.8’de elektrik arkı boşalmasının gerilim-akım ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Elektrik arkı boşalmasının gerilim-akım ilişkisi (Yetim 2009)

2.1.2.d. Plazma nitrüleme işlemi ve mekanizması

Plazma nitrülemeyi en iyi şekilde açıklayan modellerin başında Edenhofer'in modeli gelmektedir. Plazma nitrüleme işlemi şu şekilde açıklanmaktadır: Anot (+) katot (-) arasında gerilim farkı nedeniyle hızlanan iyon parçacıklarının çarpışmasıyla katot plakası üzerinde olan numunenin yüzeyine yakın bölgede gaz ortamını iyonize ederler, ortaya çıkan bu iyonlar numune yüzeyine çarparlar. Bütün bu çarpışma ve iyonizasyon bu bölgede cereyan eder. İşlem mekanizması aşağıda açıklanmış ve Şekil 2.8'da da şematik olarak gösterilmiştir.

- **Saçılma olayı (sputtering):** Numune yüzeyine çarpan iyonlar, yüzeyde yüksek sıcaklık oluşturarak buharlaşmaya yol açarlar. Bunun sonucunda numune yüzeyindeki Fe ve diğer alaşım elementleri atomlarını metalik olmayan element atomları karbon, oksijen, azot ile elektronlar yüzeyden uzaklaşır.

$$E = A + E_{kin}$$

A : Atomların numune yüzeyinden saçılması için gerekli olan enerji

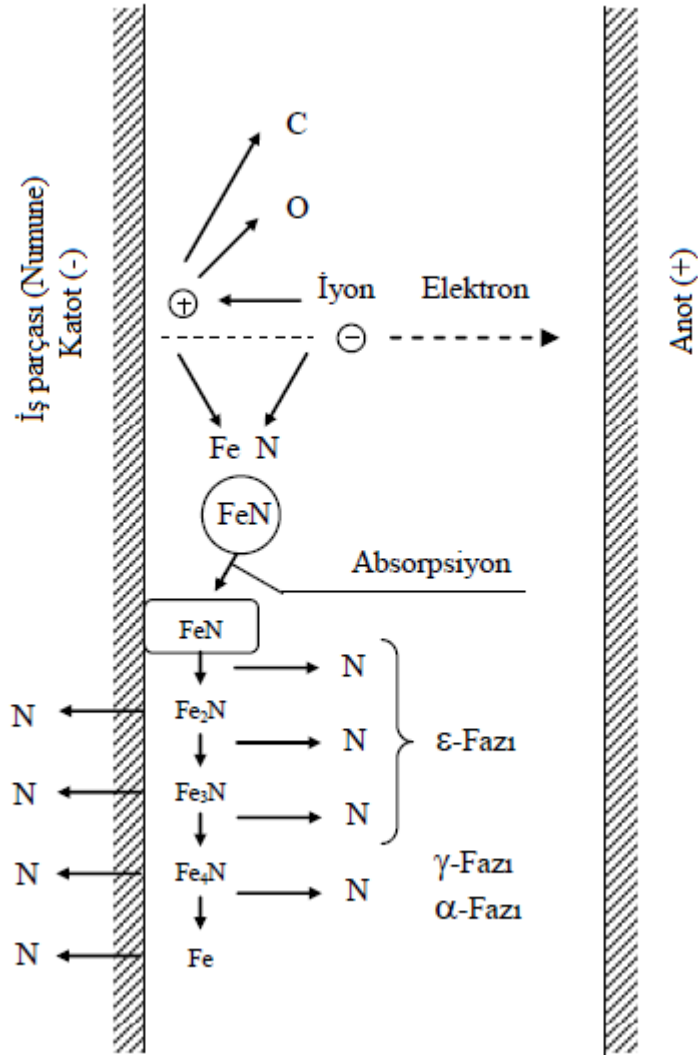
E_{kin} : Saçılan atomların kinetik enerjisi

- **Isınma:** Numune yüzeyine çarpan iyonların bir kısmı numunenin içine nüfuz ederken, geriye kalan bir kısım iyonun enerjisi de ısı enerjisine (Q) dönüşür.

$$E = A + E_{kin} + Q \text{’dır.}$$

Bu ısı enerjisi numunenin amaca göre istenilen sıcaklığa kadar ısınmasını sağlar.

- **Birikme (kondensasyon):** Katot (-) plakası üzerinde bulunan numunelerin yüzeyine çarpan iyonların bir kısmı numune yüzeyine yayılırken büyük bir kısmı saçılma olayını gerçekleştirir. Saçılan Fe atomlarıyla yüksek enerjili olan N atomları yüzeyin civarında FeN şeklinde birleşir. Bu işlem Şekil 2.8’de görülmektedir. FeN sıcak metal yüzeyinde kararsız olduğu için kararlı diğer nitrür yapılar olan Fe_2N , Fe_3N ve Fe_4N yapılarına dönüşür. Bu dönüşme sırasında serbest kalan N atomlarının bir kısmı numune üzerine yayılırken bir kısmı plazmaya tekrar geri döner.



Şekil 2.8. Plazma nitrüleme işlem mekanizması (Yetim 2009)

Saçılma ve birikme kullanılan gaza, vakum içerisindeki basınca ve voltaja önemli derecede bağlıdır. Örneğin; vakum içerisindeki basınç azaltılırsa numune yüzeyinden saçılan atomların hareketi daha kolay olacaktır. Buda Fe ve N atomlarının birleşme ihtimalini düşürecektir. Sonuçta numune yüzeyinde oluşan FeN tabakası incelenecektir. Eğer vakum içerisindeki basınç artırılırsa tam tersi durum gerçekleşecektir ve FeN tabakası kalınlaşacaktır.

2.1.2.e. Plazma nitrürleme sonrası oluşan içyapılar

Plazma nitrürleme işleminde sıcaklık, gaz karışımı ve zaman gibi parametrelerin değişmesiyle nitrürleme sonrasında aşağıdaki gibi yapılar meydana gelmektedir (Edenhofer 1974).

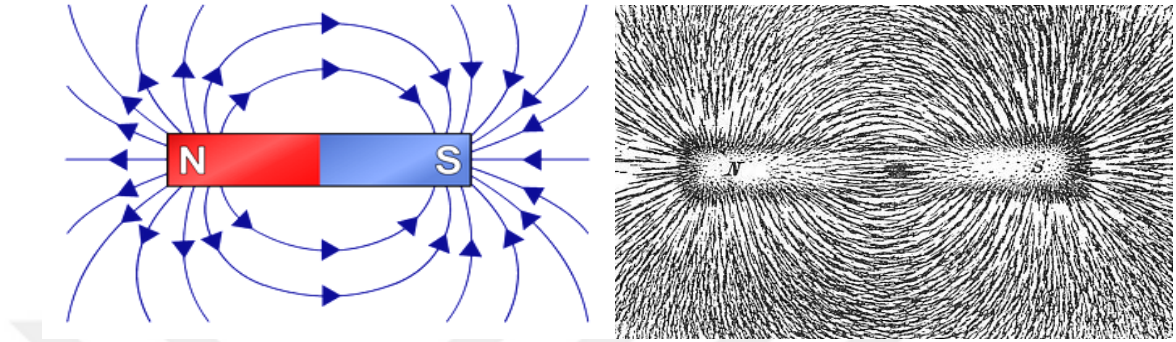
Beyaz tabaka; nitrürlenmiş malzemenin en dış yüzeyinde işlem sırasında gerçekleşen yoğunlaşma nedeniyle oluşan ve kimyasal dağlama işleminden etkilenmeyen, ince nitrürler içeren tabakadır. Bu tabaka Fe_4N (γ) ve Fe_{2-3}N (ϵ) fazlarından birisi ya da ikisinin karışımından oluşur. Bu fazların sadece biri oluşuyorsa malzemenin mekanik özelliklerinin daha iyi olduğu görülmüştür. 400°C den az sıcaklıklarda bu tabaka oluşmaz ve sıcaklıkla tabaka kalınlığı doğru orantılı bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Bu beyaz tabakanın özellikleri nitrür yapısının homojenliğine ve kalınlığına göre de değişmektedir. Eğer γ (YMK) ve ϵ (HSP) fazları her ikisi birden oluşursa farklı kafes yapıları meydana gelir ve buda iç gerilmeleri artırarak gevrek kırılmaya olan eğilimi artıracaktır. Ayrıca tabaka kalınlığı artarsa sünekliğin azaldığı da bilinmektedir (Karadeniz 1990).

Difüzyon tabakası ; beyaz tabakanın hemen altında oluşan bu tabaka çok ufak ve sık bir şekilde dağılmış sert nitrür fazları bulunur. Nitrürleme işleminde N atomlar yüksek enerjili bölgeler olan tane sınırlarından difüze olurlar (Karadeniz 1990).

2.2. Manyetizma

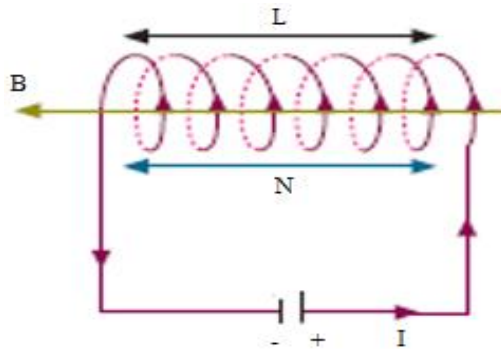
Manyetizma, hareket halindeki elektrik yüklerinin birbirlerine karşı kuvvetleri inceleyen bir bilim dalıdır. Manyetik alanların meydana getirdiği fiziki bir olaydır. Elektrik akımı veya maddenin temel parçası üzerinde manyetik alan meydana gelebilir. Manyetik alan bir mıknatısın çekim etkisi gösterdiği alana denir. Basit bir şekilde söylemek gerekirse, manyetik alan mıknatısı çevreleyen bir bölgedir. Mıknatısın etrafına serpilen demir tozlarının üzerinde sıralandığı çizgilere, mıknatısın o bölgede oluşturduğu manyetik alan çizgileri denir. Manyetik alan çizgileri N kutbundan çıkar ortamda yayılır ve manyetik S kutbuna geri döner. Böylece manyetik alan çizgileri kapalı bir döngü oluşturur. Çizgiler

ne kadar sık ise manyetik alan o kadar güçlüdür. Bir mıknatısın N ve S kutupları arasında oluşan manyetik alan çizgileri Şekil 2.9’da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Mıknatısın manyetik alan çizgileri

Ancak manyetik alan üretmek için bir mıknatısın olması şart değildir. Ayrıca manyetik alan elektriksel yüklerin hareketiyle de üretilebilir. Üzerinden I kadar akım geçen, L uzunluğunda ve N çevrimli silindirik bir bobin etrafında manyetik alan şiddeti (H) oluşur ve bu durum Şekil 2.10’da gösterilmiştir. H ; Denklem 2.1 ile ifade edilir ve birimi metre başına amper.çevrim (amper.çevrim /metre)’dir.



Şekil 2.10. Silindirik bir bobinde oluşan manyetik alan (Callister 2007)

$$H = \frac{NI}{L} \quad (2.1)$$

H : Manyetik alan şiddeti (amper.çevrim/metre)

N : Sarım sayısı (çevrim)

I : Amper (Amper)

L : Uzunluk (metre)

Bir H manyetik alanına maruz bırakılan bir maddedeki manyetik alan şiddetinin büyüklüğü manyetik akı yoğunluğu ile ifade edilir. B ile gösterilir birimi Tesladır yani metre kare başına Weber (Wb/m^2)'dir.

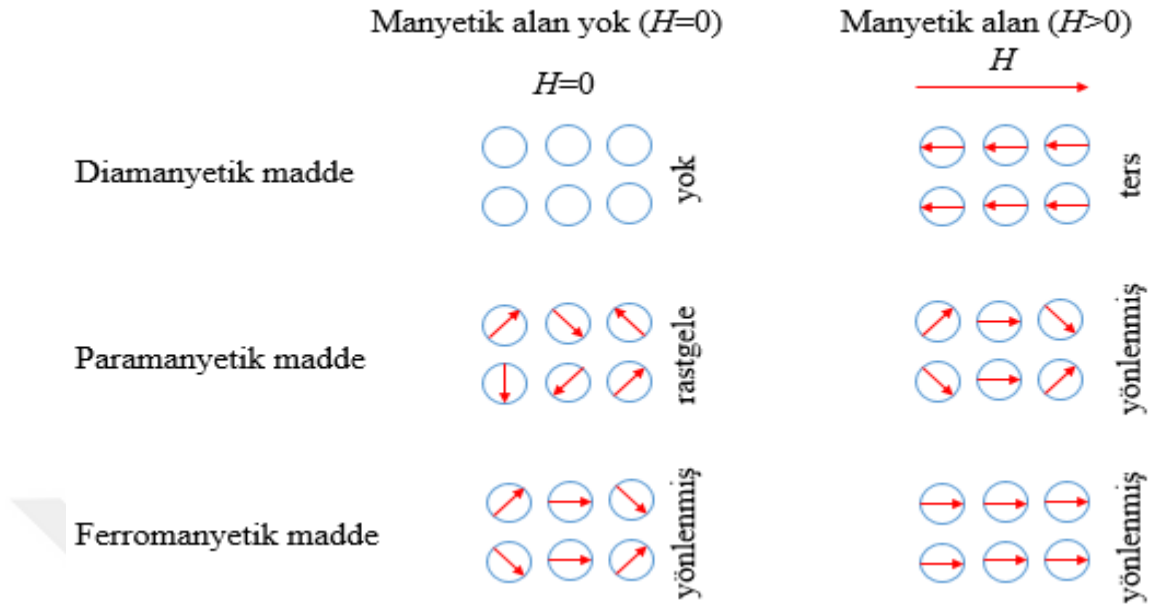
Manyetik alan şiddeti ve manyetik akı yoğunluğu arasında Denklem 2.2'de verilen bir ilişki vardır:

$$B = \mu H \quad (2.2)$$

Burada, μ parametresi geçirgenlik olarak adlandırılır. Geçirgenliğin birimi amper başına Weber (Wb/A.m)'dir. Bu geçirgenlik vakum ortamında $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 'lik bir değere sahip olup evrensel bir sabittir. Katı maddelerin manyetik özelliklerini tanımlamak için bazı parametreler kullanılır. Bunlardan biri malzemedeki geçirgenliğin vakumdaki geçirgenliğine oranıdır ve Denklem 2.3'te ;

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.3)$$

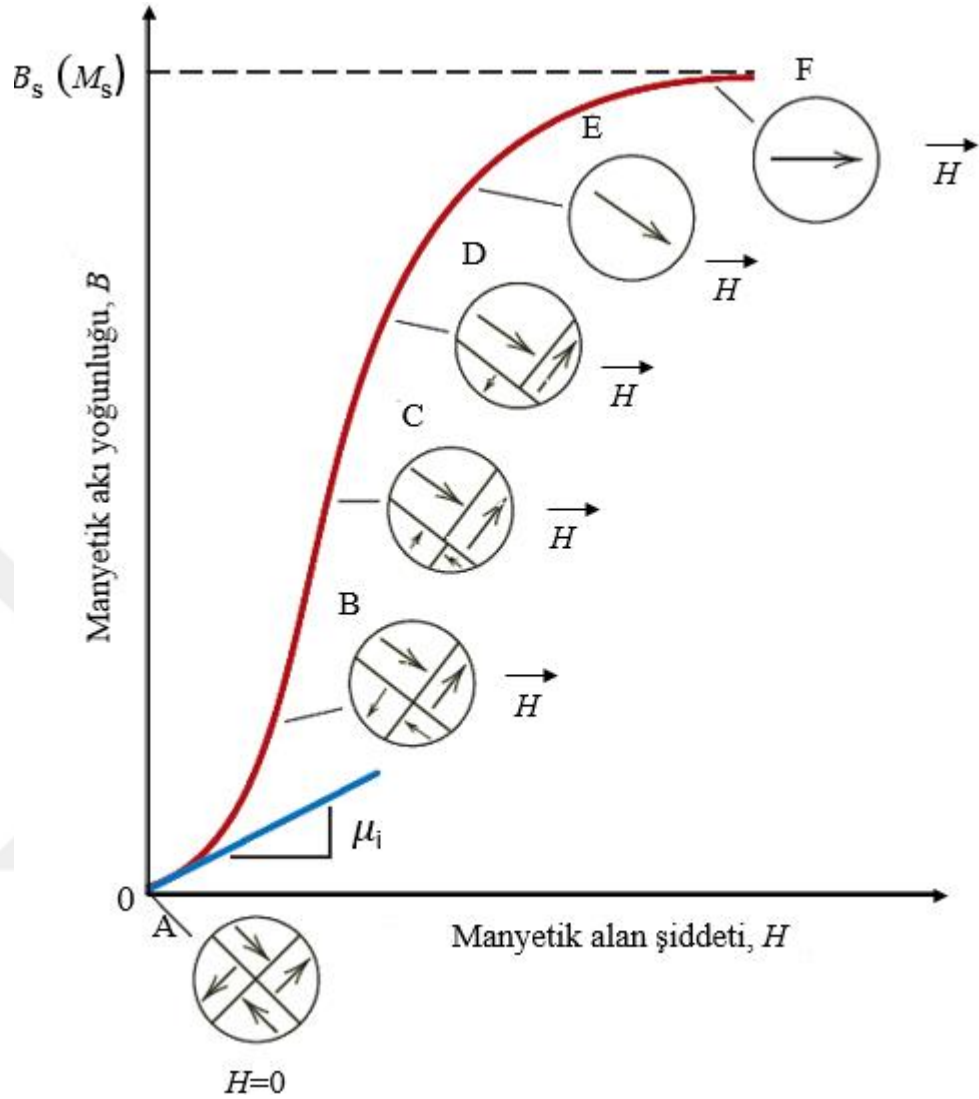
Burada, μ_r bağıl geçirgenlik olarak adlandırılır ve birimsizdir. Maddeler bağıl geçirgenliklerine göre üç gruba ayrılırlar. Şekil 2.11'de maddelerin bağıl geçirgenliklerine göre sınıflandırılması ve manyetik alanın uygulanıp, uygulanmaması durumunda bu üç grupta meydana gelen manyetik momentlerin dizilişi gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Diamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik maddelere manyetik alanın uygulanıp, uygulanmaması için manyetik momentlerin dizilişi (Callister 2007)

- **Diamanyetik maddeler;** manyetik alan uygulandığında mıknatıslanma özelliği gösteren maddelerdir. Diamanyetik maddelerin atomlarında manyetik momentler bulunmaz. Bu maddelere manyetik alan uygulandığında, atomlar içerisinde manyetik momentler, manyetik alanın tersi yönünde oluşur. Bu maddelerin bağıl geçirgenlikleri sıfırdan küçüktür. Bu maddeler üzerinden manyetik alan kaldırıldığında manyetik özelliğini kaybederler.
- **Paramanyetik maddeler;** manyetik alan uygulandığında mıknatıslanma özelliği gösteren maddelerdir. Paramanyetik maddelerin atomlarında farklı yönlerde rastgele dağılmış bir şekilde manyetik momentler vardır. Bu maddelere manyetik alan uygulandığında, manyetik momentler manyetik alanın doğrultusunda oluşur. Bu maddelerin bağıl geçirgenlikleri sıfırdan büyüktür. Bu tür maddeler manyetik alan kaldırıldığında manyetik özelliğini kaybederler.
- **Ferromanyetik maddeler;** manyetik alan uygulanıp kaldırıldığında atomlarda manyetik momentler kalır. Bunun nedeni ise her bir atomda bulunan manyetik momentlerin diğer atomlarla eşleşerek belli bir yöne doğru birlikte yönlenebilmesi ve bunun sonucunda çok kuvvetli bir mıknatıslanmanın ortaya çıkmasıdır. Ferromanyetik maddelerde oluşan en yüksek mıknatıslanma değerine doygunluk mıknatıslığı adı verilir.

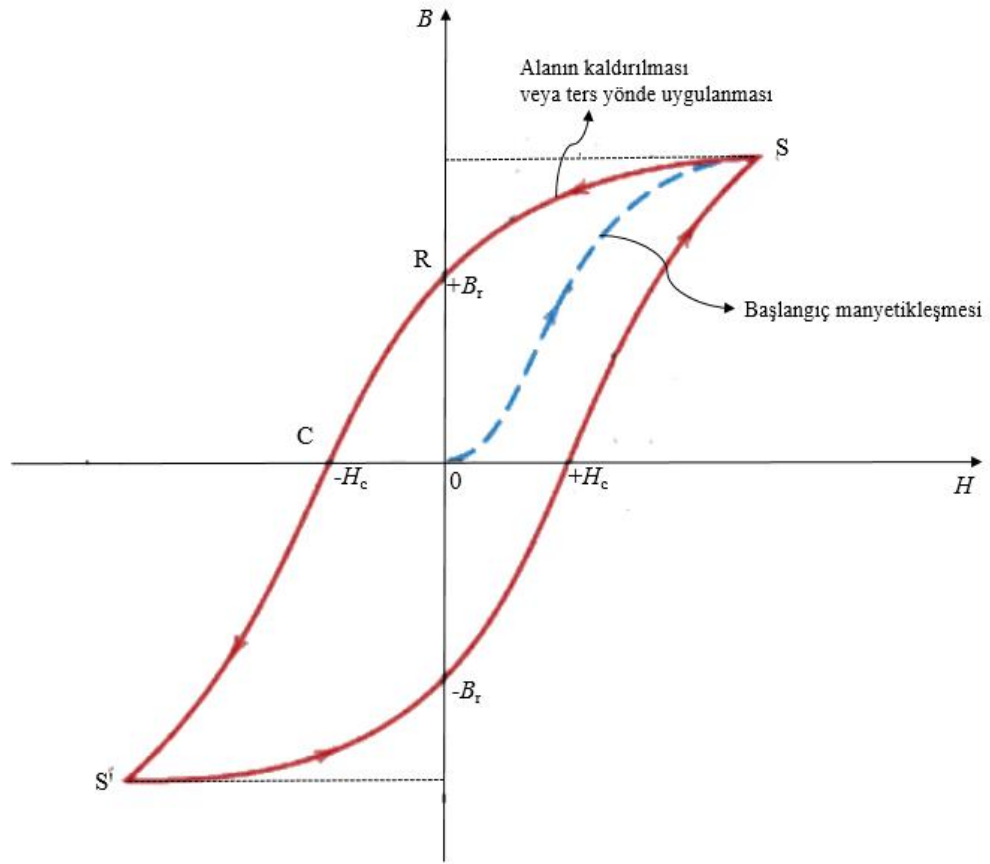
M_s ile gösterilir. Bu değer sıcaklıkla değişir. Bunun nedeni ise atomların sıcaklığa bağlı olarak sürekli bir salınımda olmalarıdır. Bu salınımın frekansı sıcaklıkla artar ve yüksek frekanslarda atomlar salındığı için bu atomlarda bulunan manyetik momentlerde de bazı bozunmalar meydana gelir. Bu durum ise ferromanyetik maddenin mıknatıslık özelliğini zayıflatır. Ferromanyetik maddelerde en yüksek doyumluk Sıfır Kelvin (0 K)'de görülür. Sıcaklığın artmasıyla mıknatıslanma doyumluğu düşer. Curie sıcaklığında (768°C) mıknatıslanma doyumluğu sıfır olur ve bu sıcaklık üzerinde malzeme mıknatıs özelliğini göstermez. Bu maddelerin bağlı geçirgenlikleri sıfırdan çok çok büyüktür (Callister 2007). Ferromanyetik bir maddeye bir H manyetik alanı uygulandığında, ferromanyetik maddenin atomları içerisindeki manyetik momentlerin şekli ve boyutu değişir. Şekil 2.12'te manyetik momentlerin yapıları, $B-H$ eğrisi boyunca birkaç noktada (A'dan F'ye kadar) gösterilmiştir. Başlangıçta ferromanyetik madde de manyetik akı şiddeti yoktur (A noktası). Bu maddeye dışardan bir manyetik alan uyguladığında, manyetik momentler uygulanan alan doğrultusunda veya o alana yakın yönde yönelmeye başlar (B-E noktaları). Manyetik alan şiddetinin artırılmasıyla, manyetik momentler neredeyse manyetik alan doğrultusunda yönelmiş olur (F noktası) ve böylelikle manyetik doyma noktası (M_s)'na ulaşmış olur (Wyatt *et al.* 1974).



Şekil 2.12. Başlangıçta manyetik olmayan ferromanyetik bir maddenin B - H eğrisi ve birkaç manyetikleşme noktaları için manyetik momentlerin dizilişi, eğri üzerinde doyma akı yoğunluğu (B_s) doyma manyetikleşmesi (M_s) ve başlangıç geçirgenliği μ_i gösterimi (Wyatt et al. 1974)

Şekil 2.13'de manyetik doyma noktası (S noktası)'na ulaşan, ferromanyetik madde üzerinden manyetik alan kaldırıldığında, H manyetik alanı ters yönde azalmakta ve orijinal eğri üzerinden yolunu takip etmemektedir. Bunun sonucu olarak, histerezis etki yani manyetik gecikme ortaya çıkar. H manyetik alanın azalmasıyla, geride düşük bir hızla azalan B kalıcı akı yoğunluğu kalır. Manyetik alan sıfır olduğunda (R noktası) ferromanyetik madde üzerinde kalıcı akı yoğunluğu B_r kalır. Dolayısıyla bu ferromanyetik maddeye dışardan bir manyetik alan uygulanmaksızın bu madde

manyetikliğini koruyabilir. Bu ferromanyetik madde içerisindeki manyetik akı yoğunluğunu ortadan kaldırmak için Şekil 2.13'deki (C noktası)'na başlangıçtaki manyetik alanın tersi yönünde ve H_c büyüklüğünde bir manyetik alan uygulanır. Burada H_c koersif kuvvet olarak adlandırılır. H_c manyetik alanı uygulanmasıyla ters yönde bir doyma noktasına ulaşır (S'noktası). İkinci bir ters alan başlangıç doyma noktasına (S noktası) simetrik bir histersiz eğrisi oluşturmakta ve negatif bir kalıcı manyetikleşme ($-B_r$) ve pozitif bir koersifiteye ($+H_c$) yol açmaktadır (Callister 2007).



Şekil 2.13. İleri ve tersine doyma akı yoğunluğuna (S ve S' noktaları) maruz bırakılan bir ferromanyetik maddede manyetik akı yoğunluğunun, manyetik alan şiddetiyle değişimi (Callister 2007)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada AISI 4140 düşük alaşımlı çelik malzemeden üretilen 25x25x10 mm³ boyutunda numuneler kullanılmış olup, malzemenin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri sırasıyla Çizelge 3.1’de ve Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. AISI 4140 düşük alaşımlı çelik malzemesinin kompozisyonu (Ağırlıkça %)

C	Mn	Cr	Si	Ni	Mo	V	S	Cu	Fe
0.36	0.80	0.014	0.005	0.30	0.85	0.075	0.07	0.143	Kalan

Çizelge 3.2. AISI 4140 düşük alaşımlı çeliğin mekanik özellikleri (Çelik 2017)

Özellikler		Koşullar	
		T(°C)	İşlem
Yoğunluk (x1000kg/m ³)	7.7-8.03	25	
Poison Oranı	0.27-0.30		
Elastisite Modülü (Gpa)	190-210		
Çekme Dayanımı (Mpa)	655	25	815°C’de tavllanmış
Akma Dayanımı (Mpa)	417.1		
%Uzama	25.7		
%Kesit Daralması	56.9		
Sertlik (HB)	197		
Darbe Dayanımı (J)	54.5		

3.2. Bilyalı Dövme (Shot Peening) İşlemi

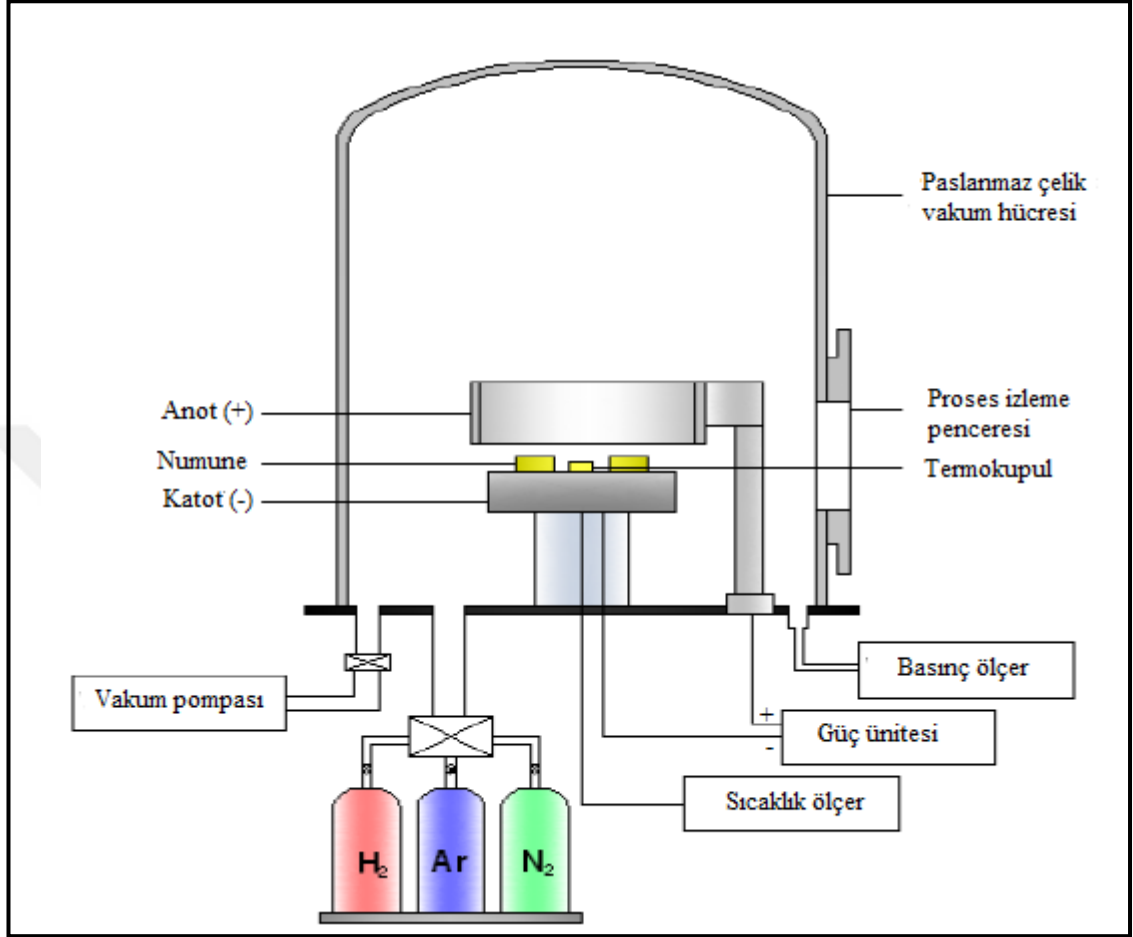
İşlemsiz AISI 4140 çelik numuneleri farklı Almen şiddetlerinde endüstriyel hava püskürtmeli bilyalı dövme makinesi (Sigma Bilyalı Dövme Şirketi/İstanbul) kullanılarak dövülmüştür. Numune yüzeylerini dövmek için S230 standart çelik bilya (40-51 HRC) ve %200 doyurma oranı ile bilyalı dövme işlemi yapılmıştır. İşlemsiz numuneler 16A, 20A ve 24A'lık farklı Almen şiddetlerinde dövülmüş ve dövme şiddetinin ölçümünde Almen test şeritlerinden olan "A" şeridi kullanılmıştır. Dövme şiddetini belirlemek için ise Almen masterları kullanılmıştır. Şekil 3.1'de farklı Almen şiddetinde dövülmüş numunelerin resmi görülmektedir.



Şekil 3.1. Farklı Almen şiddetlerinde dövülmüş numunelerin görüntüleri

3.3. Plazma Nitrürleme İşlemi

Plazma nitrürleme işleminde en önemli elamanlar vakum hücresi, vakum pompası, gaz karıştırma hücresi ve güç ünitesidir. Vakum hücresindeki basınç 0.1-10 Tor'dur. Doğru akım gerilimi 100-1500 V olup, akım yoğunluğu 100-1000 A/m²'dir. Gerilim katot ile anot arasına uygulanır. Kullanılan gazlar amaca yönelik olarak N₂ +H₂, N₂ +H₂ +A gibi değişmektedir. Şekil 3.2'de plazma nitrürleme ünitesi gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Plazma nitrüleme ünitesi (Yetim 2009)

Plazma nitrüleme işlemi aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilmiş olup Çizelge 3.3’de farklı Almen şiddetlerinde dövülmüş AISI 4140 çeliğin nitrüleme şartları verilmiştir.

- Öncelikli olarak vakum hücresi etil alkol ile silinerek temizlendi.
- 16A, 20A, 24A, Almen şiddetlerinde dövülmüş numuneler etil alkol ile temizlenip kurutuldu.
- Vakum hücresi içerisinde bulunan anot (+) ve katot (-) tablaları etil alkol ile temizlenip kurutuldu.
- Numuneler vakum hücresi içerisinde bulunan katot(-) tablası üzerine yerleştirildi.

- Vakum hücresi içindeki basınç vakum pompası yardımıyla 1.2 mbar'a kadar düşürüldü.
- Nitrürleme işlemine başlamadan önce numuneler üzerinde bulunan kir, pas ve yabancı maddeleri gidermek amacıyla 500V da 20 dakika H₂ gazı verilerek saçılma olayı gerçekleştirildi.
- Vakum hücresi tekrardan vakuma alındı.
- %50 H₂ ve %50 N₂ gaz karışımı vakum hücresine verildi.
- Vakum hücresinin ortam basıncı iğne vanalar yardımıyla 5×10^{-2} Pa'a sabitlendi.
- Güç ünitesini devreye alındı.
- Voltaj artırılarak numune sıcaklığı önceden belirlenen deney planındaki sıcaklıkta sabitlendi (Bu sabitleme sıcaklık farkı $\pm 15^\circ\text{C}$ olacak şekilde ayarlandı).
- Deney planındaki sıcaklığa gelindiğinde plazma nitrürleme işlemi başlatıldı.
- Anot katot arasında elektrik boşalmasıyla nitrürleme işlemi gerçekleştirildi.
- Nitrürleme işlem süresi bittiğinde güç ünitesi kapatılıp gazlar kesildikten sonra vakum hücresi içindeki numuneler ortam sıcaklığına gelineye kadar vakum ortamında soğutuldu.

Çizelge 3.3. AISI 4140 çelik numunelerin bilyalı dövme şiddetleri ve plazma nitrürleme şartları

AISI 4140 çelik numunelerin plazma nitrürleme şartları				
Gaz karışımı	Numuneler	Almen şiddeti [A]	Sıcaklık [$^\circ\text{C}$]	Plazma nitrürleme süresi [saat]
%50 N ₂ +%50 H ₂	İşlemsiz	-	-	-
	İşlemsiz/500-1	-	500	1
	İşlemsiz/500-4	-	500	4
	16A	16	-	-
	16A/500-1	16	500	1
	16A/500-4	16	500	4
	20A	20	-	-
	20A/500-1	20	500	1
	20A/500-4	20	500	4
	24A	24	-	-
	24A/500-1	24	500	1
	24A/500-4	24	500	4

3.4. XRD ve SEM Çalışmaları

Farklı Almen şiddetlerinde dövülmüş ve plazma nitrülenmiş numunelerin faz analizleri; Şekil 3.3’de şematik olarak gösterilen Erzurum Teknik Üniversitesi Yüksek Teknoloji Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan 30 kV ve 30 mA’de çalıştırılan GNR Explorer XRD cihazı vasıtasıyla $\lambda=1.79 \text{ \AA}$ dalga boyuna sahip Cu-K α radyasyonu kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 3.3. X-Işını kırınım cihazı (XRD)

Numunelerin yüzey ve kesit görüntüleri, aşınma izleri ve metalürjik mikro yapılarının incelenmesi için Şekil 3.4’te şematik olarak gösterilen ve Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan ZEISS Sigma 300 marka ve modeli SEM (Taramalı elektron mikroskobu) kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

3.5. Artık Gerilme Ölçümleri

Artık gerilme ölçümleri, GNR-Explorer XRD cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem ile artık gerilme ölçümü yapılırken, XRD cihazında kullanılan X-ışını kaynağının dalga boyu ve yansıma açıları bilindiğinden, Bragg kanunu kullanılarak düzlemler arası mesafe (d) tespit edilebilir. Düzlemler arası mesafe (d)'ye karşılık $\sin^2\omega$ grafiği çizildiğinde eğrinin eğiminin gerilme ile orantılı olduğu ifade edilmiştir. Kullanılan XRD cihazının yazılımı bu esasa dayanarak doğrudan artık gerilme değerlerini vermektedir. Burada X-ışının geliş açısı (ω) 5° olarak alınmıştır.

3.6. Mikrosertlik Ölçümleri

Sertlik ölçümleri, Şekil 3.5'te şematik olarak gösterilen ve Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Yüzey İşlemleri Laboratuvar'ında bulunan SHIMADZU marka mikrosertlik cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, Vickers Metodu ile 100 gr yük altında ve 15 sn yükleme süresince gerçekleştirilmiştir. Sertlik

ölçümleri, numunenin yüzeyinden başlamak üzere numune merkezine doğru belirli mesafelerden ölçümler alınarak yapılmıştır. Yüzeyden ilk alınan sertlik değeri yüzey sertliği olarak kabul edilirken, merkeze doğru çekirdek malzeme sertliğine ulaşınca kadar gidilen mesafe difüzyon derinliği olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.5. Mikrosertlik cihazı

3.7. Aşınma Deneyleri

İşlemsiz, plazma nitrülenmiş ve farklı Almen şiddetlerinde dövülmüş ve plazma nitrülenmiş numunelerin aşınma deneylerinde; Şekil 3.6’te gösterilen ve Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Biyomekanik Laboratuvarı’nda bulunan Turkeyus PODWT&RWT marka aşınma cihazı kullanılmıştır. Aşınma cihazında doğrusal zıt yönlü düzlem-pim aşınma (reciprocating ball-on-flat) yöntemi kullanılarak; deneyler tüm numuneler için manyetik alan uygulanmaksızın ve manyetik alan uygulanarak iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Aşınma pimi olarak 6 mm çaplı alümina (Al_2O_3) top kullanılmıştır. Sürtünme kuvveti bilgisayar tarafından aşınma cihazındaki yük hücresi (loadcell) ile sürekli olarak kaydedilmiştir. Aşınma deney şartları Çizelge 3.4’te verilmiştir.



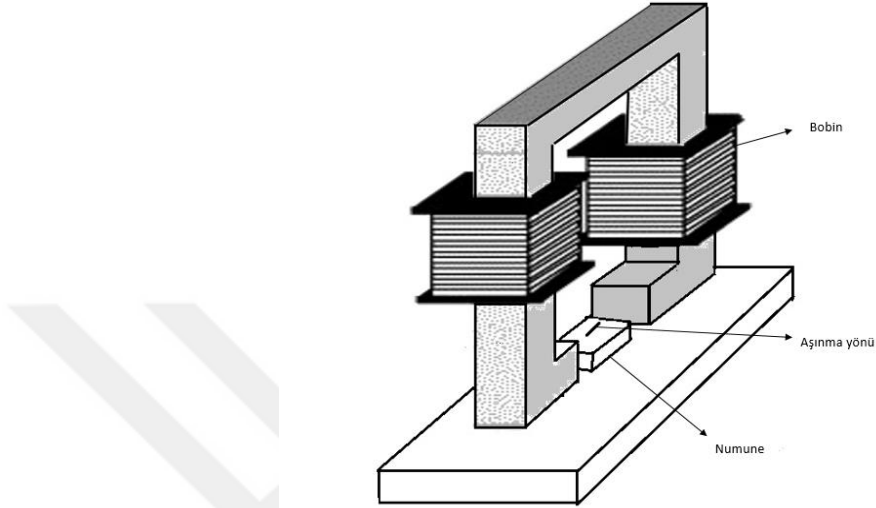
Şekil 3.6. Aşınma cihazı

Çizelge 3.4. Aşınma deney şartları

Deney Şartları	Uygulanan yük [N]	Aşındırma mesafesi [m]	Aşınma izi uzunluğu [mm]	Aşındırma hızı [m/dak]	Aşındırma süresi [s]	Sıcaklık [°C]	Nem	Manyetik Alan Şiddeti [Gauss]
Non Manyetik Alan	3	141	8	1,74	4860	20±2	%50 ±5	-
Manyetik Alan	3	141	8	1,74	4860	20±2	%50 ±5	3000

Manyetik alanda yapılan aşınma testinin şematik gösterimi Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Ayrıca numunenin manyetik alan altında aşınma yönü de gösterilmiştir. Manyetik alanın AISI 4140 çelik numunelerinin tribolojik özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek için, aşınma esnasında manyetik alana maruz bırakılmıştır. Manyetik alan kaynağı olarak, genellikle üzeri izole edilmiş iletken bakır tellerin üst üste ya da yanyana sarılması ile üretilen devre elemanı olan bobinler kullanılmıştır. Bobinlerin çalışma prensibi akım uygulandığında, akımın yönü sürekli değiştiğinden dolayı bobin etrafında bir manyetik

alan oluşur. Burada aşınma esnasında manyetik alan yoğunluğu 3000 Gauss uygulanmıştır.



Şekil 3.7. Manyetik alanda yapılan aşınma testinin şematik gösterimi

Aşınma testleri yapıldıktan sonra, Denklem 3.1’de verilen Archard eşitliği ile aşınma oranları hesaplanmıştır (Archard 1953).

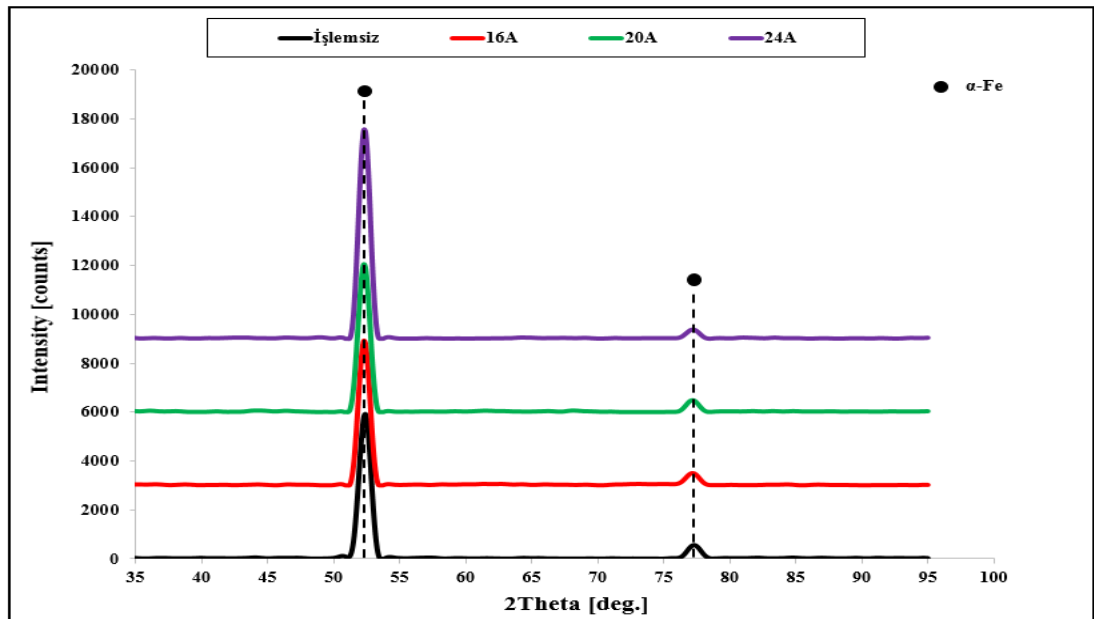
$$K = \frac{V}{w \cdot s} \quad (3.1)$$

Burada, V : kaybedilen toplam malzeme hacmini (mm^3), w : uygulanan normal yükü (N), s : toplam kayma mesafesini (m) ve K : aşınma oranını ($\text{mm}^3/\text{N.m}$) ifade etmektedir.

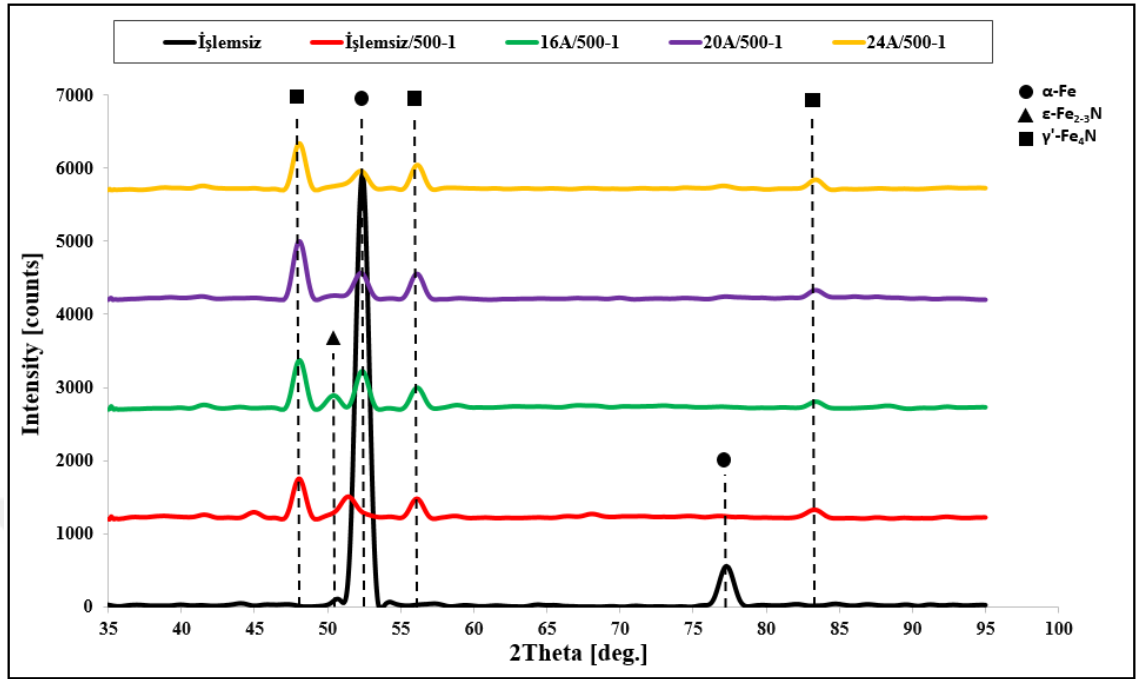
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. XRD Analizleri

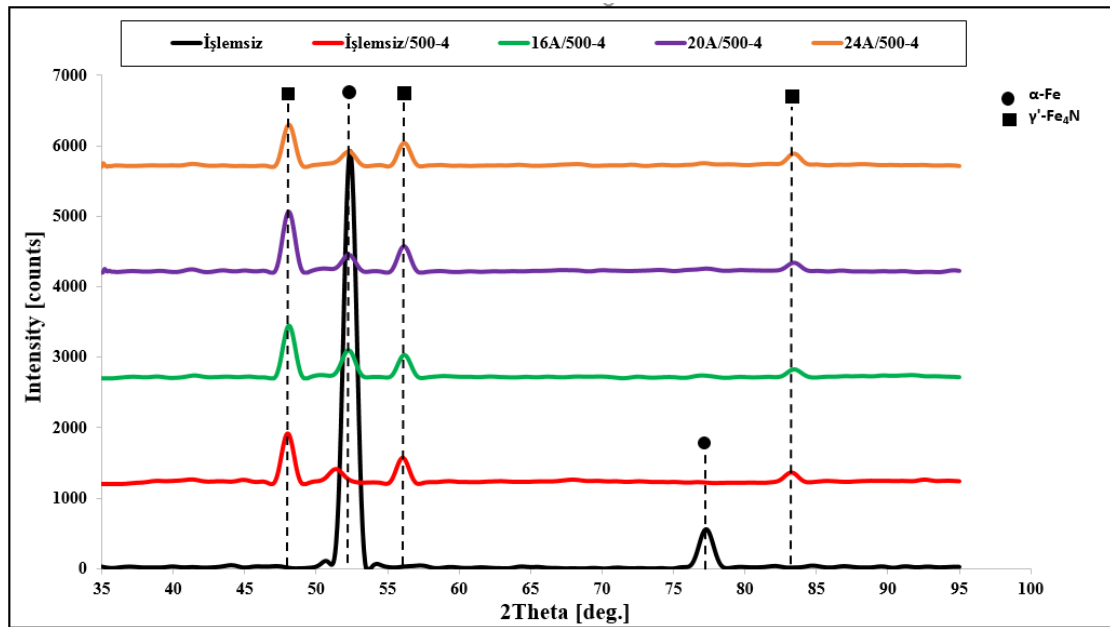
İşlemsiz, plazma nitrülenmiş (PN), bilyalı dövülmüş (BD), bilyalı dövülmüş ve plazma ile nitrülenmiş (BD+PN) numunelerin XRD grafikleri Şekil 4.1’de, Şekil 4.2’de ve Şekil 4.3’de gösterilmiştir. Şekillerden anlaşılabacağı üzere işlemsiz numunelerde α -Fe (hacim merkezli kübik) pikleri görülmüştür. Literatürde, plazma nitrüleme işlemi sonrasında , numunelerde γ' -Fe₄N (yüzey merkezli kübik) ve/veya ϵ -Fe₂₋₃N (sıkı paket hegzagonal) fazları oluştuğu bildirilmiştir (Çelik *et al.* 2008). XRD grafikleri incelendiğinde PN, BD+PN numuneler için plazma nitrüleme işlemi sonrasında ana fazın γ' -Fe₄N olduğu görülmüştür. Almen şiddetinin ve plazma nitrüleme süresinin nitrür piklerinin varlığını ve şiddetini etkilediği gözlemlenmiştir. Düşük Almen şiddetlerinde ve düşük plazma nitrüleme sürelerinde çok az miktarda ϵ -Fe₂₋₃N fazları oluşurken, Almen şiddeti ve plazma nitrüleme süresi arttığında ϵ -Fe₂₋₃N fazı ortadan kaybolarak γ' -Fe₄N fazı oluşmuştur. Ayrıca γ' -Fe₄N fazının şiddeti artan plazma nitrüleme süresi ve bilyalı dövme şiddeti ile artmıştır (Kovacı *et al.* 2019).



Şekil 4.1. İşlemsiz ve BD numunelerin XRD grafikleri (Kovacı *et al.* 2019)



Şekil 4.2. 500°C’de 1 saat boyunca PN ve BD+PN numunelerin XRD grafikleri (Kovacı *et al.* 2019)



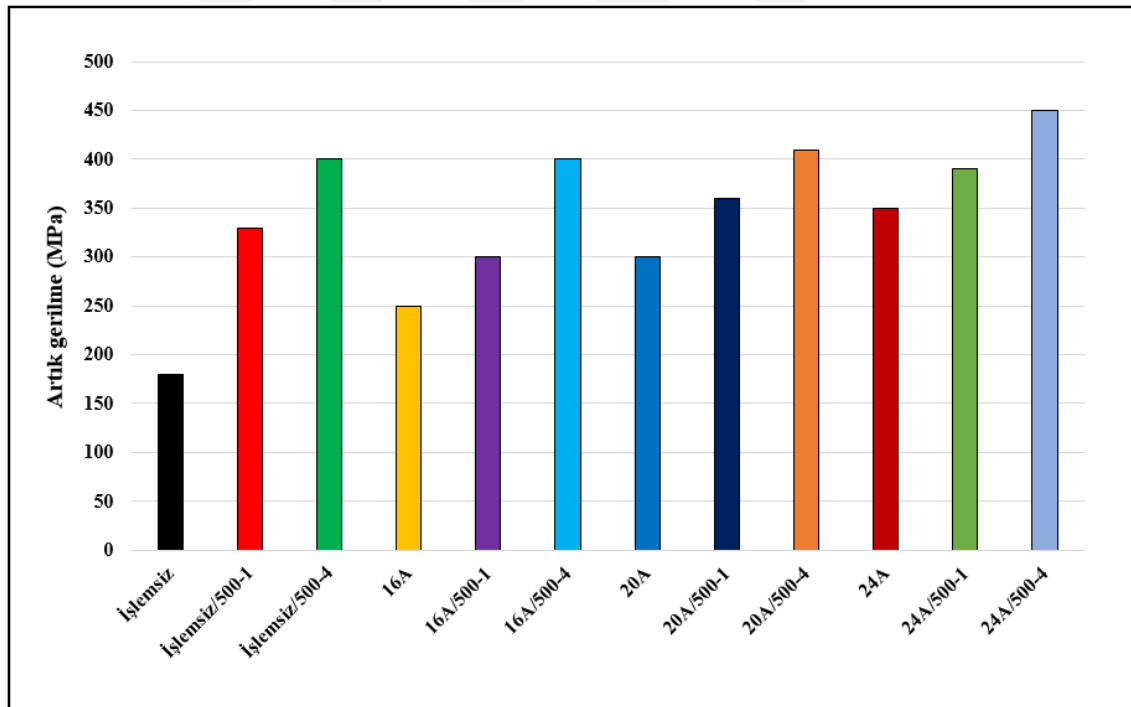
Şekil 4.3. 500°C’de 4 saat boyunca PN ve BD+PN numunelerin XRD grafikleri (Kovacı *et al.* 2019)

4.2. Artık Gerilme Analizleri

Artık gerilmeler, çeşitli imalat aşamalarından sonra; örneğin kaynaklı imalat, döküm, yüzey işlemleri ve ısıtım işlem prosesleri veya malzemeye homojen olmayan deformasyon uygulanması neticesinde parça içerisinde kalan gerilmelerdir. Artık gerilmeler üretilen malzemenin çalışma ömrünü doğrudan etkiler. Artık gerilmeler malzemenin mekanik özelliklerini ve aşınma performansını önemli derecede etkilemektedir (Oladijo *et al.* 2014). Artık gerilmeleri teorik olarak hesaplamak oldukça zor olsa da deneysel olarak bulmak nispeten daha kolaydır. Artık gerilmelerin ölçülmesinde manyetik metot, ultrasonik metot, raman spektroskopisi, X-ışınları kırınımı ve nötron kırınımı gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunların içinde en yaygın ve en pratik olanı X-ray diffraction yöntemidir. Bu yöntemle artık gerilme ölçümü yapılırken, XRD cihazında kullanılan X-ışını kaynağının dalga boyu ve yansıma açıları bilindiğinden, Bragg kanunu kullanılarak düzlemler arası mesafe (d) tespit edilebilir. Düzlemler arası mesafe (d)'ye karşılık $\sin^2\omega$ grafiği çizildiğinde eğrinin eğiminin gerilme ile orantılı olduğu belirtilmiştir (Anderoglu 2004). Kullanılan XRD cihazının yazılımı bu esasa dayanarak artık gerilme değerlerini otomatik olarak vermektedir. Bu yöntemin en avantajlı yönü, numunede hasar oluşturmada artık gerilmeyi belirleyen bir yöntem olmasıdır.

İşlemsiz, PN, BD ve BD+PN numunelerin artık gerilme değerleri Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi, işlemsiz numunede bası artık gerilmelerinin değeri işlem görmüş numunelere oranla daha az olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni ise uygulanan yüzey işlemlerinden olduğu düşünülmektedir. Termokimyasal bir yüzey işlemi olan plazma nitrürleme işlemiyle malzeme yüzeyinde, bası artık gerilmelerinin olduğu literatürde bildirmiştir (Hassani-Gangaraj *et al.* 2014). Bunun sebebinin ise, arayer atomu olan azotun difüzyonundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Arayer atomları difüzyon süresince ilerleyerek taban malzemenin atomları arasına girer ve taban malzemenin kafes yapısını çarpıtmaya ve genişletmeye çalışır. Bunun sonucunda ise bası artık gerilmeleri olduğu düşünülmektedir. Ayrıca sıcaklık parametresinin artışı ile azot atomları daha fazla difüze olur ve böylece daha fazla atomun kafes yapısında bozulmalar meydana geldiği ve bunların sonucunda daha yüksek değerlerde artık gerilmelerin

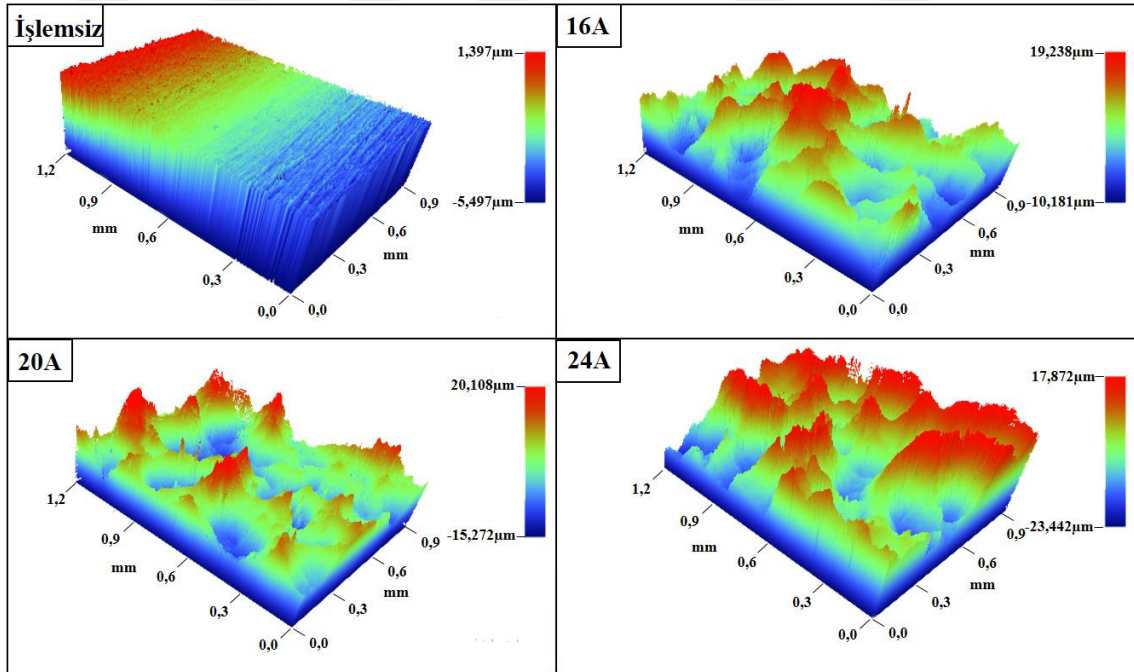
oluştugu düşünölmektedir. İşlemsiz/500-4 numunesinin artık gerilme değeri İşlemsiz/500-1 numunesinin artık gerilme değeriinden daha büyük olduğu Şekil 4.4’de görölmektedir. Ayrıca ön işlem olan bilyalı dövme işlemi de, bası artık gerilmeleri oluşturmaktadır (Kovacı *et al.* 2019). Bilyalı dövme işlemiyle malzeme yüzeyinde oluşturulan plastik deformasyon, taban malzemenin kafes yapısının yüzeyden malzemenin belli bir derinliğine kadar bozulmasına ve böylece bası artık gerilmelerinin meydana gelmesine neden olmuştur. Buna ek olarak, bilyalı dövme işlemiyle malzeme yüzeyinde ve yüzey altında yeni taneler oluşturarak da bası artık gerilmeleri oluşturmıştır. Ayrıca Almen şidetinin artmasıyla artık gerilme değeriinde artışlar gözlemlenmiştir. BD+PN numuneleri incelendiğinde bası artık gerilme değeriinin, PN ve BD numunelere oranla daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin ise, bilyalı dövme ve plazma nitrörlenmenin ortak etkisi olduğu düşünölmektedir.



Şekil 4.4. İşlemsiz, PN, BD ve BD+PN numunelerin artık gerilme değeri (Kovacı *et al.* 2019)

4.3. Mikroyapı Analizleri

İşlemsiz ve farklı Almen şiddetlerinde dövülmüş numunelerin aşınmadan önce elde edilen 3D profilometre yüzey görüntüleri Şekil 4.5’de gösterilmiştir. Bilyalı dövme işlemiyle malzemenin yüzey pürüzlülüğünü artırdığını literatürde belirtmiştir (Wagner 2003). Şekil 4.5’de görüldüğü gibi numune yüzeylerinde belirgin pürüzlerinin olduğu gözlemlenmiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. İşlemsiz numunenin yüzey pürüzlülük değeri $R_a=1,547 \mu\text{m}$ iken dövülmüş numunelerin R_a değerlerinin işlemsiz numunenin değerine oranla arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumun bilyalı dövme işleminin ardından malzeme yüzeyinde meydana gelen yüzeydeki kalıcı deformasyon neticesinde olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bilyalı dövme işlemi şiddetinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlemlenmiştir. 16A numunesinin yüzey pürüzlülüğü değeri $R_a=4,148 \mu\text{m}$ iken 24A numunesinin yüzey pürüzlülüğü $R_a=4,607 \mu\text{m}$ seviyesine çıkmıştır.



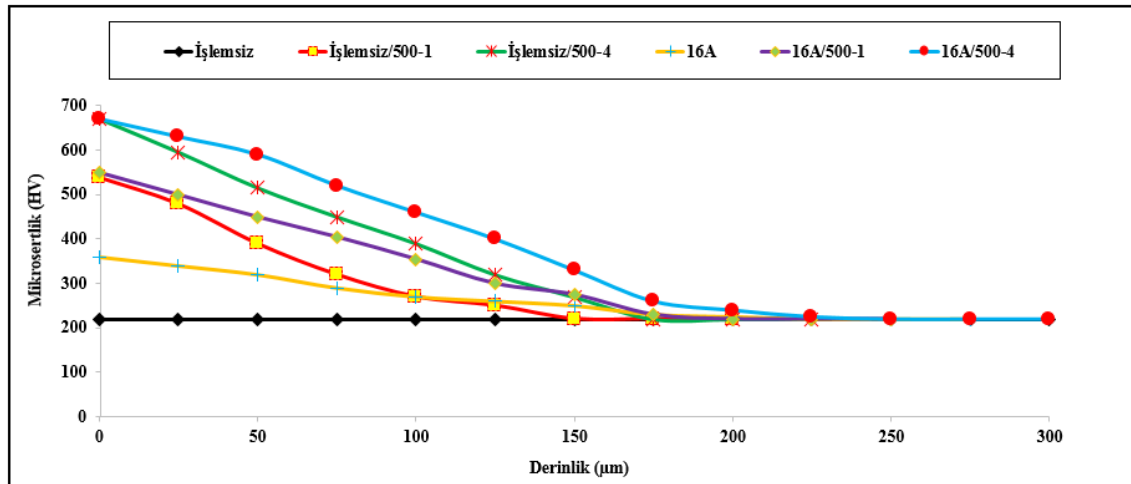
Şekil 4.5. İşlemsiz ve farklı Almen şiddetlerinde dövülmüş numunelerin aşınmadan önce elde edilen 3D profilometre yüzey görüntüleri

Farklı şartlarda işleme görmüş PN ve BD+PN numunelerin kesit SEM görüntüleri EK 1’de gösterilmiştir. Ayrıca bu kesit görüntülerinden elde edilen bileşik tabaka kalınlıkları ve ortalama difüzyon tabaka kalınlıkları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Burada verilen şekillerden malzeme yüzeyinde bilyalı dövme sonucunda oluşan plastik deformasyona uğramış ince bir tabaka oluştuğu görülmektedir. Bununla birlikte, EK 1’de görüldüğü gibi bileşik tabaka kalınlıkları ve difüzyon tabaka kalınlıkları işlem parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Plazma nitrürleme işlem sıcaklığı arttıkça, artan difüzyon ile birlikte oluşan tabaka kalınlıkları da artmaktadır. Nitrürleme işlemi sonrası yüzeyde oluşan tabakanın mikroyapı özellikleri işlem sıcaklığına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Ayrıca Almen şiddetinin artmasıyla difüzyon tabakalarında artışlar gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin ise, Almen şiddetinin artmasıyla yüzey ve yüzey altındaki tanelerin boyutunun plastik deformasyon neticesinde azalması ve azalan tane boyutu ile artan tane sınırı sayısından kaynaklandığı düşünülmektedir. Artan tane sayısı, tane sınırları artacak ve azot atomları bu tane sınırlarından daha kolay difüze olacaktır. İşlem sonrasında malzeme yüzeyinde taban malzeme ile belirgin bir çizgi ile ayrılmış, homojen bir kalınlığa sahip modifiye olmuş tabaka oluşumu gözlemlenmiştir. EK 1’de en düşük tabaka kalınlığı işlemsiz/500-1 numunesinde görülürken, en yüksek tabaka kalınlıkları BD+PN numunelerinden olan 24A/500-4 numunesinde görülmektedir. Bunun sebebi ise, bilyalı dövme ve plazma nitrürlemenin ortak etkisi olduğu düşünülmektedir. Artan bilyalı dövme şiddeti ile plastik deformasyon miktarı ve hali ile tane sınırı sayısı artmıştır. Ayrıca, plazma nitrürleme süresindeki artış ile de difüzyon miktarı artmıştır. Bu iki durumun ortak etkisi sonucunda da en yüksek difüzyon tabakası kalınlığı en yüksek seviyede deformasyona uğrayan ve uzun süre ile plazma nitrürlenmiş 24A/500-4 numunesinden elde edilmiştir.

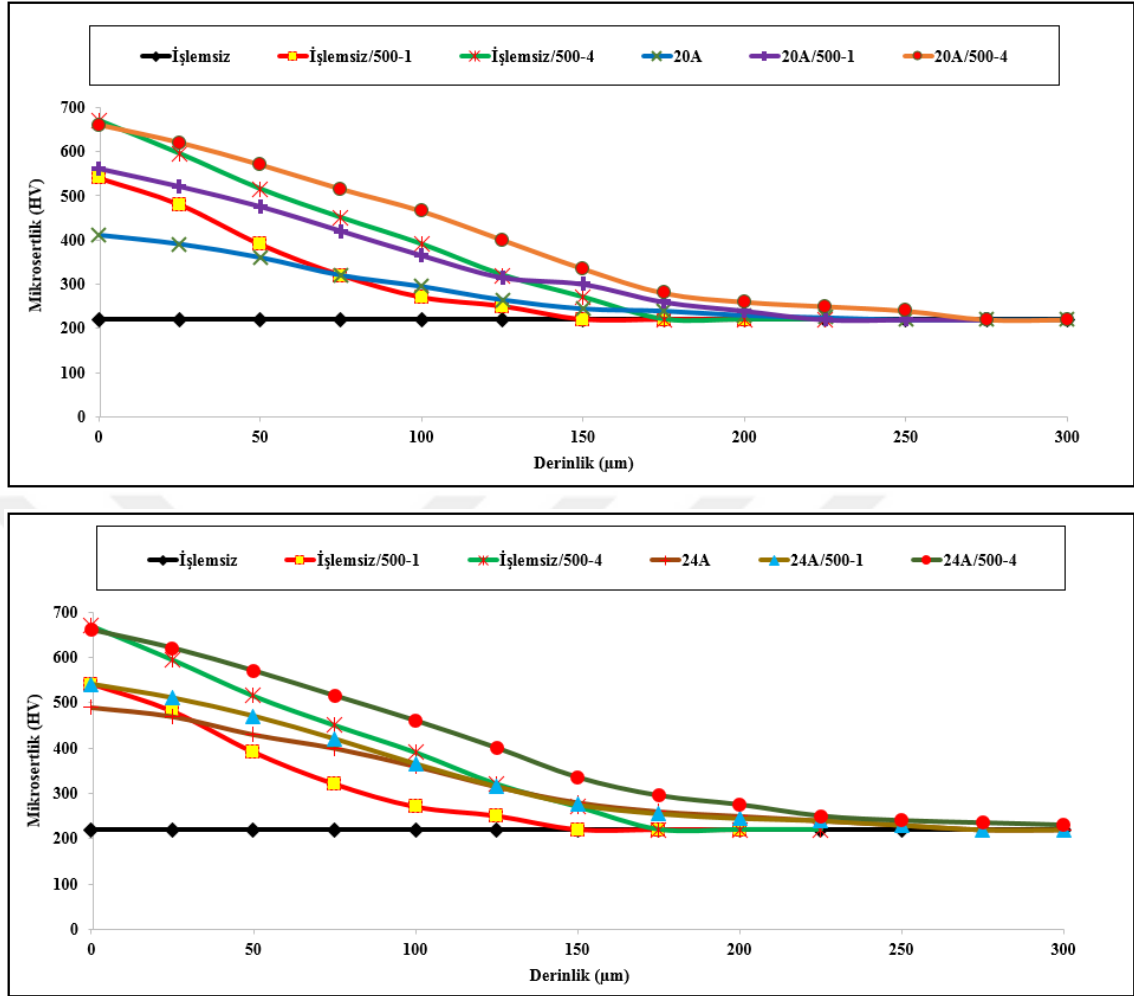
4.4. Mikrosertlik İncelemeleri

İşlemsiz, PN, BD ve BD+PN numunelerin mikrosertlik-derinlik kalınlığı grafikleri Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Ayrıca mikrosertlik değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Sertlik ölçümü numunenin yüzeyinden ve kesitinden malzemenin iç kısmına doğru belli bir mesafede yapılmıştır. Şekil 4.6’da verilen sertlik sonuçlarına göre, BD+PN numunelerin

difüzyon bölgesi kalınlıklarının PN numunelerinkinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu sonuç plazma nitrürleme süresine ve Almen şiddetinin artışının birleşik etkisine bağlanabilir. Farklı çalışmalarda bildirildiği gibi, bilyalı dövme işlemi tarafından oluşturulan plastik deformasyon, malzemenin yüzeyinde bozulmalar yaratır. Ayrıca yeni taneler ve alt tanelerin oluşturmasının yanı sıra dislokasyon yoğunluğunu da artırır (Kikuchi *et al.* 2015; Kovacı *et al.* 2019). Bu değişimler azot atomlarının difüzyonunu kolaylaştırır ve bunun sonucunda sertlik artırılmış olur. Bununla birlikte, yüzey sertlik değerleri bilyalı dövme işlemiyle artmıştır ve Almen şiddetinin artmasıyla bu artış daha yüksek seviyelerde gerçekleşmiştir. PN numunelerin yüzey sertliği; sert seramik esaslı nitrür fazlarının varlığı, plazma nitrürleme sonucunda oluşan bası artık gerilmeleri ve yüzeyde oluşan tabakanın yük taşıma kapasitesini artıran difüzyon bölgesinin varlığı sebepleri ile artmıştır. Ayrıca, sertlik değerleri, beklenildiği gibi plazma işlem süresinin artmasıyla artış göstermiştir (Çelik *et al.* 2008). En yüksek sertlik değerleri, yukarıda bahsedilen etkiler sebebi ile BD+PN numunelerde tespit edilirken, en düşük sertlik değeri ise işlemsiz numunede görülmüştür ve bu sertlik değeri ortalama 220 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür (Kovacı *et al.* 2019).



Şekil 4.6. İşlemsiz, PN, BD ve BD+PN numunelerin mikrosertlik-derinlik kalınlığı grafikleri (Kovacı *et al.* 2019)

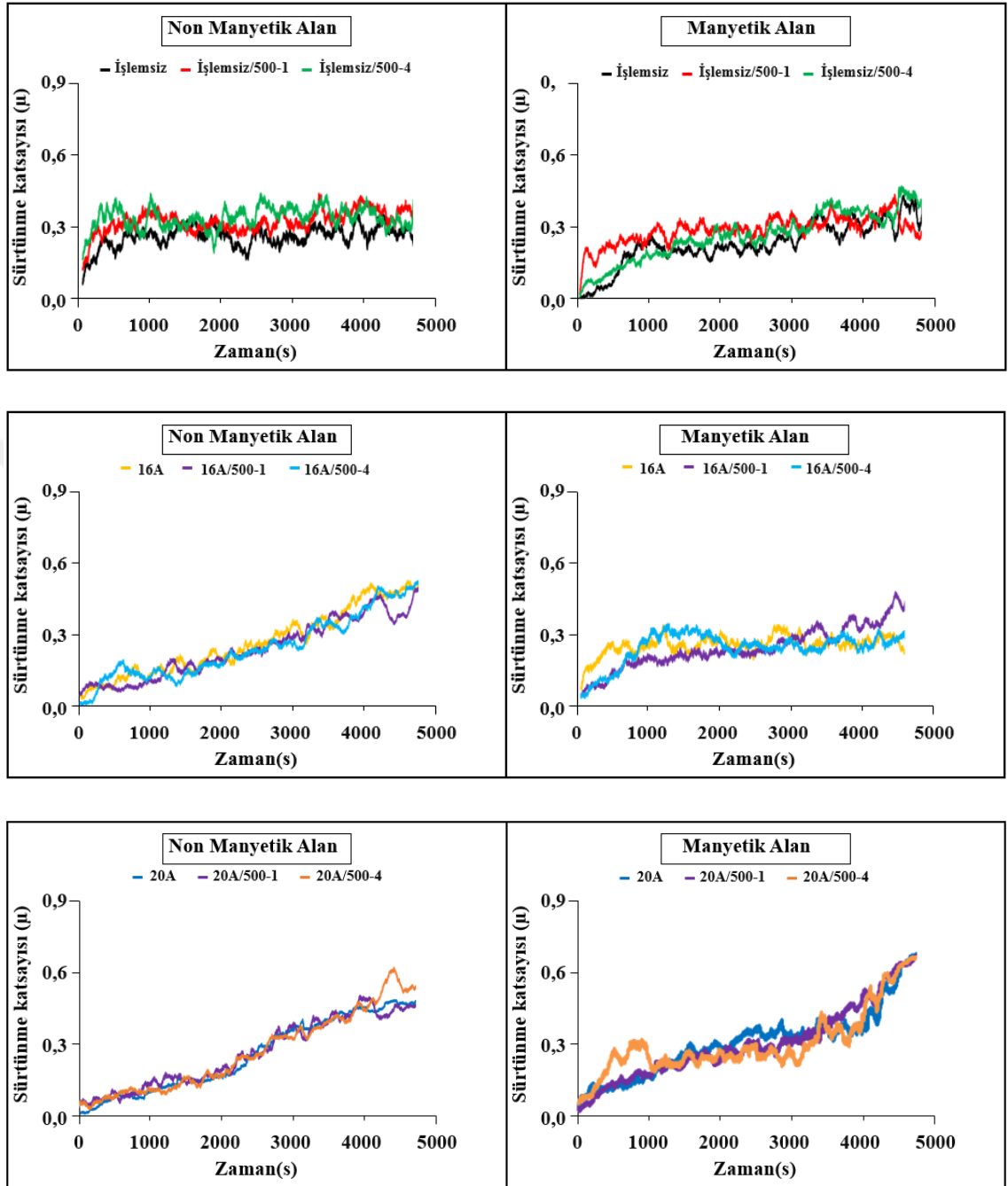


Şekil 4.6. İşlemsiz, PN, BD ve BD+PN numunelerin mikrosertlik-derinlik kalınlığı grafikleri (Kovacı *et al.* 2019) (devam)

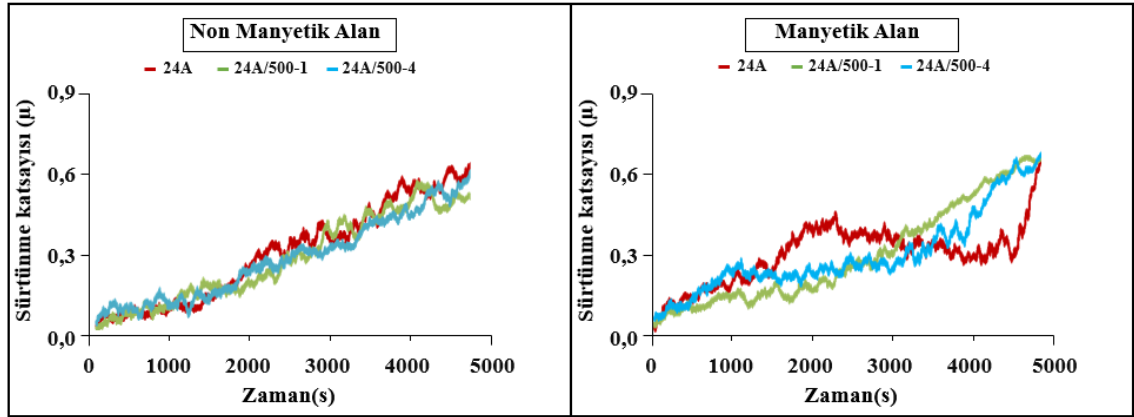
4.5. Sürtünme ve Aşınma Analizleri

İşlemsiz, PN, BD ve BD+PN numunelerin aşınma testlerinden elde edilen sürtünme katsayısı-zaman grafikleri Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Ayrıca sürtünme katsayılarının değerleri Çizelge 4.1’de de verilmiştir. Bu testler manyetik alan uygulanmaksızın (non manyetik alan) manyetik alan altında gerçekleştirilmiştir. Non manyetik alan ve manyetik alan altında yapılan testlerde sürtünme katsayısı-zaman grafikleri incelendiğinde, non manyetik alanda sürtünme katsayılarında genel olarak lineer bir artış görülürken, manyetik alanda sürtünme katsayılarında yaklaşık 1000 saniyeden sonra daha kararlı hale gelerek, sürekli olarak çok az miktarda artışlar ve azalışlar gözlemlenmiştir. Bunun

sebebinin ise, non manyetik alanda test başlangıcında, aşındırıcı bilye ile AISI 4140 çelik numune yüzeyindeki pürüzlülüklerin üst noktasının temas etmesiyle, temas yüzey alanının çok düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca sadece plazma nitrülenmiş numunelerde işlem sırasında meydana gelen sıçratma (sputtering) etkisi ile numunelerin yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen artış sebebi ile bu numuneler işlemsiz numuneden daha yüksek değerlerde sürtünme katsayısına sahiptirler. Bununla birlikte, bilyalı dövülmüş malzemelerin yüzey pürüzlülüklerinin çok yüksek değerlerde olması sebebi ile bu numunelerin sürtünme katsayısı değerleri işlemsiz ve sadece plazma nitrülenmiş numunelerden çok daha yüksektir. Manyetik alan altında aşınan numunelerin sürtünme katsayılarının 1000 saniyeden sonra daha kararlı hale gelmesine manyetik alanın etkisinin olduğu düşünülmektedir. Bunun sebebinin ise, manyetik alandan dolayı yüzeyde oluşan oksit filminin, malzemenin sürtünme katsayısını önemli derecede azaltması olduğu düşünülmektedir. Literatürde farklı çalışmalarda (Kumagai *et al.* 1993; Yetim *et al.* 2013), manyetik alanın malzemelerin yüzey enerjisini artırdığı ve artış ile de yüzeyde oksit oluşumunun hızlandığı belirtilmiştir. Bu durum, elde edilen sonuçları desteklemektedir. Manyetik alan uygulanmaksızın gerçekleştirilen testlerde, bilyalı dövülmüş ve bilyalı dövüldükten sonra plazma nitrülenmiş numunelerde malzemelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin çok yüksek seviyelerde olması sebebi sürtünme katsayısı değerleri aşınma süresince artış eğilimindedir. Ancak manyetik alan altında aşınmaya maruz kalan numunelerde manyetik alanın yüzeydeki oksidasyonu artırması ve bunun sonucunda oluşan yüzey oksit filminin aşınma süresince sürekli yenilenmesi sebebi ile manyetik alana maruz numunelerin sürtünme katsayılarının daha stabil bir davranış gösterdiği görülmüştür. Şekil 4.7’de görüldüğü gibi manyetik alan altında aşınan numunelerin sürtünme katsayılarının, non manyetik alan altında aşınan numunelerin sürtünme katsayılarından daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum göstermiştir ki, manyetik alan ile oluşan oksidasyon etkisi artan bilyalı dövme şiddetinin etkisinden daha baskındır.



Şekil 4.7. İşlemsiz, PN, BD ve BD+PN numunelerin non manyetik ve manyetik alan altında aşınma testlerinden elde edilen sürtünme katsayısı-zaman grafikleri

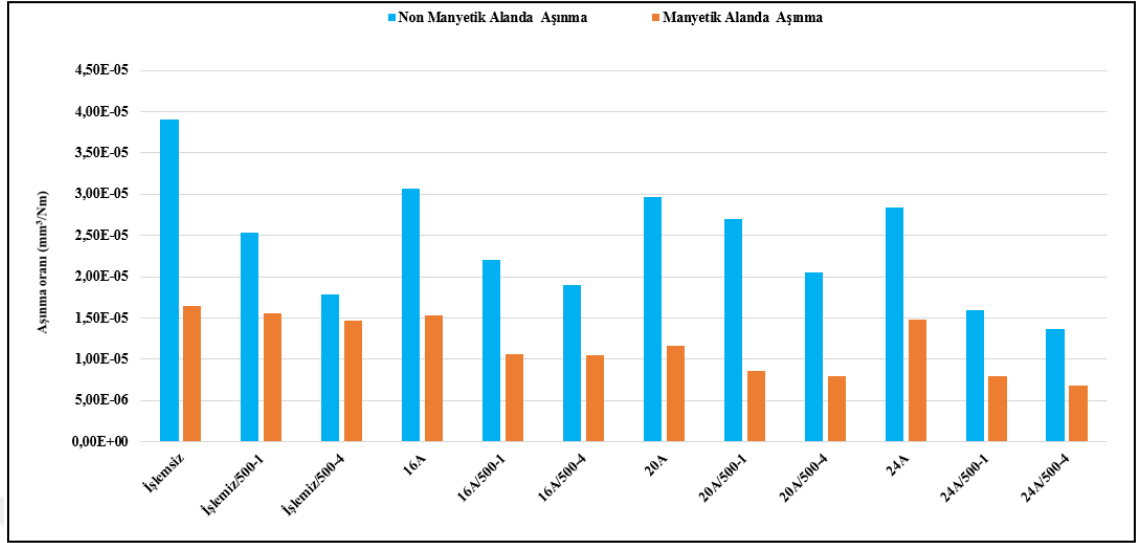


Şekil 4.7. İşlemsiz, PN, BD ve BD+PN numunelerin non manyetik ve manyetik alan altında aşınma testlerinden elde edilen sürtünme katsayısı-zaman grafikleri (devam)

İşlemsiz, PN, BD ve BD+PN numunelerinin non manyetik ve manyetik alan altında aşınma oranları grafiği Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Ayrıca bu aşınma oranlarının ortalama değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.8’de görüldüğü gibi işlemsiz numunenin aşınma oranı işlem görmüş numunelere oranla daha yüksektir. İşlemsiz numunenin yüzey pürüzlülüğü düşük olmasına rağmen yetersiz yüzey sertliğinden dolayı yüksek aşınma oranı sergilediği görülmüştür. Metalik malzemelerin tribolojik özelliklerini önemli derecede iyileştiren işlemlerden biri plazma nitrürleme işlemi sonrasında malzeme yüzeyinde oluşan sert bileşik tabaka (Fe_{2-3}N ve Fe_4N içeren) ve bu tabakanın altında oluşan difüzyon tabakası aşınma oranının işlemsiz numuneye kıyasla önemli derecede azalmasına sebep olmuştur (Kovacı *et al.* 2016). Plazma işlem süresinin artmasıyla aşınma oranlarında düşüşler gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ise işlem süresinin artmasıyla malzeme yüzeyinde oluşan bileşik sert tabaka kalınlığı ve bu tabakanın altında oluşan difüzyon tabaka kalınlığının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Öte yandan bilyalı dövme işleminin yüzey sertliğini artırdığı için malzemelerin aşınma özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir (Matsui *et al.* 2006). Bilyalı dövme işlemiyle Almen şiddetinin artmasıyla aşınma oranlarının işlemsiz ve sadece plazma nitrürlenmiş numuneye oranla azaldığı tespit edilmiştir. Bunun nedeninin ise bilyalı dövme işlemiyle oluşturulan plastik deformasyonun malzemenin kafes yapısını çarpıtması, malzeme yüzeyünde artık gerilmeler oluşturması ve malzeme yüzeyinde ince taneli bir yapı oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu bulgulara ek olarak en düşük

aşınma oranları BD+PN numunelerde gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ise bilyalı dövme ve plazma nitrüleme işleminin ortak etkisidir. Bilyalı dövme işlemiyle yüzey ve yüzey altında yeni tanelerin oluşumuyla beraber tane sınırları artar. Tane sınırlarının artmasıyla plazma nitrülemeye azot atomlarının daha kolay difüze olmasını sağlar ve böylelikle hem yüzeyde sert tabakalar oluşur hem de bu numunelerde daha yüksek difüzyon tabakası elde edilir. Bu sebeplerle de en düşük aşınma oranı BD+PN numunelerde gözlemlenmiştir.

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi manyetik alan altında aşınma testi yapılan numunelerin aşınma oranının, non manyetik alan altında aşınma testi yapılan numunelerin aşınma oranından daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni ise, manyetik alanın numunenin yüzey aktivasyon enerjisini artırarak yüzeyde bir oksidasyon tepkimesinin gerçekleşmesi ile açıklanabilir (Wang *et al.* 2003). Bu tepkimenin gerçekleşmesiyle malzeme yüzeyinden kopan partiküller sürekli olarak oksitlenir ve yüzeye tutunurlar. Malzeme yüzeyine tutunan bu partiküller yüzeyde bir oksit filmi oluşturur. Bu oksit filminin aşınma oranını önemli derecede azalttığı düşünülmektedir. Ayrıca manyetik alan, malzemenin yüzeyinde kopan parçacıkları sürekli olarak aşınan lokal bölgeden uzaklaştırdığı için abrasiv aşınmasına mücadele edilecektir ki bu durumun da aşınma oranını azaltıcı yönde etki ettiği düşünülmektedir. Bir diğer önemli nokta ise, uygulanan manyetik alanın yönüdür. Manyetik alanın yatay yönde, yani aşınma yönünde uygulanması aşınma oranını önemli derecede düşürmektedir. Bunun sebebi ise manyetik alan içerisine giren partiküllere bir manyetik kuvvetin etki edip partikülleri aşınan lokal bölgeden uzaklaştırmasıdır (Hiratsuka *et al.* 1986).



Şekil 4.8. İşlemsiz, PN, BD ve BD+PN numunelerinin non manyetik ve manyetik alan altında aşınma oranları

İşlemsiz, PN, BD ve BD+PN numunelerinin non manyetik ve manyetik alan altındaki aşınma testlerinden sonra aşınma izlerinin SEM görüntüleri EK 2’de gösterilmiştir. EK 2.a’da aşınma izleri incelendiğinde, manyetik alan uygulanmaksızın test edilen işlemsiz numunenin adeziv aşınmaya maruz kaldığı görülmektedir. Pin ile temas eden malzemenin yük taşıma kapasitesinin yetersiz olması sebebi ile lokal olarak artan gerilmeler etkisi ile (Hertz basıncının artması) malzemenin yüzeyinde ezilmeler meydana gelmiştir. Buradan malzemenin aşırı plastik deformasyona maruz kaldığı da anlaşılmaktadır. Ayrıca plastik deformasyon sonucunda aşınmaya uğrayan malzemenin bir kısmının da aşınma izi kenarlarında yığıldığı görülmektedir. Manyetik alan altında aşınmaya maruz kalan malzemenin aşınma yüzeyi incelendiğinde (EK 2.b), manyetik alan uygulanmayan malzemeye benzer şekilde malzeme yüzeyinde adeziv aşınmayı işaret eden plastik deformasyona uğramış bölgeler görülmektedir ve bu durum da bu numunenin de abrazyon aşınmaya maruz kaldığını göstermektedir. Bununla birlikte, manyetik alanda aşınan işlemsiz malzemenin SEM görüntüsünde, bu malzemenin yüzeyinde nonmanyetik malzemedan farklı olarak ince çizikler görülmektedir. Bu durum daha önce bahsedilen manyetik alan altında oksit filmlerinin oluşumu mekanizmasını desteklemektedir. Manyetik alan altında oluşan oksit filmi ve partikülleri her ne kadar stabil bir yapı oluştursa dahi malzeme yüzeyinden aşınma esnasında koparak malzeme yüzeyinde

çizikler oluşturarak malzemenin abraziv olarak aşınmasına sebep olmuştur. Bu bakımdan, manyetik alan altında aşınan işlemsiz malzemenin adeziv aşınmaya ek olarak abraziv aşınmaya da uğradığı söylenebilir.

Plazma nitrülenmiş numuneler incelendiğinde; manyetik alan uygulanmaksızın test edilen numunelerin yüzeylerinde çizikler olduğu görülmektedir (EK 2). Buradan, bu numunelerin abraziv aşınmaya maruz kaldıkları anlaşılmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi, plazma nitrüleme işlemi sonrasında malzeme yüzeyinde demir nitrür fazlarını içeren sert tabakalar oluşmaktadır. Bu tabakalar, aşınma deneyleri esnasında kontak basıncının lokal olarak ani artışı sebebi ile ince partiküller şeklinde yüzeyden kopmuş ve aşınma esnasında abraziv etki göstererek; aşınma mekanizmasının adeziv aşınmadan abraziv aşınmaya dönüşmesine sebep olmuşlardır. Bu numunelerin manyetik alan altındaki aşınma görüntüleri incelendiğinde, manyetik alana maruz kalan numunelerin yüzeylerinde daha az çizikler olduğu görülmüştür. Manyetik alan altındaki aşınmada her ne kadar abraziv etki yapan nitrür partiküllerine ek olarak oksit partikülleri aşınmaya dahil olsa da daha önce de belirtildiği üzere manyetik alanın aşınma yönünde etki etmesi sebebi ile bu partiküller aşınma bölgesinden uzaklaştırılarak olumsuz etkileri ortadan kaldırılmıştır (Hiratsuka *et al.* 1993). Bu sebeple de aşınma yüzeyinde daha az çizilmeler meydana gelmiş ve aşınma oranlarının incelendiği kısımda da anlatıldığı üzere aşınma oranında azalma meydana gelmiştir (Şekil 4.8).

BD numunelerin manyetik alan uygulanmaksızın gerçekleştirilen aşınma test görüntülerinden (EK 2.d-EK 2.1) bu numunelerinde işlemsiz numuneye benzer şekilde adeziv aşınmaya maruz kaldıkları görülmektedir. Burada, bilyalı dövme sonucunda malzeme yüzeyinde oluşan plastik deformasyona uğramış sert tabakaların aşınma esnasında oluşan gerilmelere işlemsiz numuneye göre daha fazla direnç gösterdiği görülmektedir. Çünkü, bu numuneler işlemsiz numuneye kıyasla daha dar aşınma iz genişliğine sahiptir. Ayrıca, ilgili şekillerden görüldüğü gibi, artan dövme şiddeti ve dolayısı ile artan plastik deformasyon miktarı ile de bu direnç artmış ve 24 A numunesi en dar aşınma iz genişliğine sahip olmuştur. Bilyalı dövülmüş ve ardından plazma nitrülenmiş numunelerin (BD+PN) görüntüleri incelendiğinde ise aşınma yüzeylerinde

çok küçük miktarda da olsa çizikler oluştuğu görülmüştür. Bu sebeple, işlemsiz numuneler gibi bu numunelerde de yüzeyden kopan nitrür partiküllerinin abraziv etki oluşturduğu görülmektedir. Bununla birlikte bu numuneler (BD+PN) işlemsiz, sadece plazma nitrürlenmiş ve sadece bilyalı dövülmüş numunelere oranla çok daha küçük aşınma izi göstermişlerdir. Buradan, hem bilyalı dövme ile yüzeyde oluşan sert tabakanın hem de nitrüleme sonucunda oluşan tabakaların aşınmaya karşı direnci oldukça artırdığı görülmektedir. Ayrıca, bu numunelerin aşınma iz genişlikleri artan plazma nitrüleme süresi ile artış göstermiştir.

BD ve BD+PN numunelerin manyetik alan altındaki aşınma görüntülerinden, manyetik alan altında aşınan diğer numunelere benzer olarak temelde adeziv ve düşük miktarda da olsa kısmen abraziv aşınmaya maruz kaldıkları anlaşılmaktadır. Ancak, burada her bir işlem şartı için manyetik alan uygulanmayan ve uygulanan numuneler karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, manyetik alan altında aşınan numunelerin daha dar aşınma iz genişliklerine sahip oldukları görülmüştür. Ayrıca, artan bilyalı dövme şiddeti ve plazma nitrüleme süresi ile izler daha da daralmıştır. Bu numuneler için de manyetik alan uygulanmadan gerçekleştirilen numuneler için elde edilen sonuçlar geçerlidir. Bununla birlikte, bu numunelerde aşınma iz genişliğinin daha dar olmasının sebebinin daha önce de anlatıldığı gibi, aşınma esnasında yüzeyden kopan partiküllerin manyetik alan etkisi ile aşınma bölgesinden uzaklaştırılması olduğu düşünülmektedir. Bu sebeplerle, BD ve BD+PN numuneler her bir işlem şartı için manyetik alan uygulanmaksızın gerçekleştirilen aşınma testlerine oranla daha dar aşınma iz genişliğine sahip olmuştur.

İşlemsiz, PN, BD ve BD+PN numunelerin non manyetik ve manyetik alan altındaki aşınma testlerinden sonra elde edilen 3D profilometre yüzey görüntüleri EK 3'de gösterilmiştir. EK 3.a'da aşınma izleri incelendiğinde, manyetik alan uygulanmaksızın test edilen işlemsiz numunenin aşınma izi derinliği ve genişliği, manyetik alan altında aşınan işlemsiz numunenin aşınma izi derinliği ve genişliğinden daha az olduğu görülmektedir. Plazma ile nitrürlenmiş numuneler incelendiğinde (EK 3.b-EK 3.c) işlemsiz/500-4 numunesinin aşınma izi ve derinliği işlemsiz/500-1 numunesine oranla daha küçük olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise, artan plazma nitrüleme işleminin

etkisi olduğu düşünölebilir. Plazma nitrörlöme işlemlöyle işlemsiz/500-4 numunesinin aşınmaya olan direnci artmıştır.

BD numunelerin manyetik alan uygulanmaksızın gerçekleştirilen aşınma izleri incelendiğinde (EK 3.d – EK 3.l), bu numunelerde işlemsiz numuneye oranla daha az aşınma izi ve derinliğı görölmektedir. Bunun sebebi ise, bilyalı dövme sonucunda malzeme yüzeyinde oluşın plastik deformasyona uğramış sert tabakaların aşınma esnasında oluşın gerilmelere işlemsiz numuneye göre daha fazla direnç gösterdiği görölmektedir. Ayrıca, ilgili şekillerden göröldüğü gibi, artın dövme şiddeti ve dolayısı ile artın plastik deformasyon miktarı ile de bu direnç artmıştır. Böylelikle bilyalı dövölmüş numuneler içerisinde 24 A numunesinde aşınma izi derinliğı ve genişliğı en küçük olmuştur.

Bilyalı dövölmüş ve ardından plazma nitrörlenmiş numunelerin (BD+PN) aşınma izleri incelendiğinde ise, aşınma izlerinin derinliğı ve genişliğı sadece plazma nitrörlenmiş ve sadece bilyalı dövölmüş numunelere oranla azalmıştır. Bunun sebebi ise, hem bilyalı dövme ile yüzeyde oluşın sert tabakanın hem de nitrörlöme sonucunda oluşın tabakaların aşınmaya karşı direnci oldukça artırdığı görölmektedir.

BD ve BD+PN numunelerin manyetik alan altındaki aşınma izleri incelendiğinde, manyetik alan altında aşınan işlemsiz numuneye göre aşınma izi derinliğinde ve genişliğinde azalış görölmektedir. Ancak, burada her bir işlem şartı için manyetik alan uygulanmayan ve uygulanan numuneler karşılaştırmalı olarak incelendiğinde, manyetik alan altında aşınan numunelerin daha dar aşınma iz genişliklerine sahip oldukları görölmüştür. Ayrıca, artın bilyalı dövme şiddeti ve plazma nitrörlöme süresi ile izlerin derinliğı ve genişliğı daha da küçölmüştür. Buna ek olarak da, bu numunelerde aşınma iz derinliğı ve genişliğinin daha küçük olmasının sebebi, aşınma esnasında yüzeyden kopın partiköllerin manyetik alan etkisi ile aşınma bölgesinden uzaklaştırılması olduğı düşünölmektedir. Aşınma izi derinliğı ve genişliğı en küçük olan ve manyetik alan altında aşınan 24A/500-4 numunesinde görölmektedir.

Çizelge 4.1. İşlemsiz, PN, BD ve BD+PN numunelerin yüzey artık gerilmeleri, yüzey sertliği, bileşik tabaka kalınlığı, difüzyon tabakası, yüzey pürüzlülüğü, ortalama sürtünme katsayıları ve aşınma oranları değerleri

					Non Manyetik Alan			Manyetik Alan		
Numuneler	Yüzey artık gerilmeleri [MPa]	Yüzey sertliği [HV _{0.1}]	Bileşik tabaka kalınlığı [µm]	Difüzyon tabakası [µm]	Yüzey pürüzlülüğü R _a [µm]	Ortalama sürtünme katsayısı [µ]	Aşınma oranıx10 ⁻⁵ [mm ³ /Nm]	Yüzey pürüzlülüğü R _a [µm]	Ortalama sürtünme katsayısı [µ]	Aşınma oranıx10 ⁻⁵ [mm ³ /Nm]
İşlemsiz	180	220	-	-	1,711	0,33	3,91	1,547	0,28	1,64
16A	250	360	-	-	4,528	0,42	3,06	4,148	0,37	1,53
20A	300	410	-	-	4,319	0,45	2,96	4,409	0,39	1,47
24A	350	490	-	-	4,330	0,48	2,83	4,207	0,43	1,15
İşlemsiz/500-1	330	540	8-10	45-50	2,898	0,40	2,53	2,726	0,29	1,55
İşlemsiz/500-4	400	670	18-20	60-65	3,084	0,42	1,78	2,46	0,31	1,46
16A/500-1	300	550	18-20	50-55	4,17	0,41	2,20	4,721	0,35	1,06
16A/500-4	400	670	20-22	75-80	4,422	0,43	1,89	4,762	0,37	1,04
20A/500-1	360	560	10-12	50-55	4,688	0,43	2,70	3,809	0,39	0,86
20A/500-4	410	660	12-14	80-85	5,252	0,44	2,05	4,464	0,41	0,79
24A/500-1	390	540	12-14	65-70	4,191	0,44	1,6	3,544	0,42	0,79
24A/500-4	450	670	14-16	90-95	4,572	0,46	1,36	3,593	0,43	0,68

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

AISI 4140 çelik numunelerine ön işlem olan bilyalı dövme farklı Almen şiddetlerinde uygulanmış ve daha sonra bu numuneler farklı işlem sürelerinde plazma ile nitrürlenmiştir. İşlemsiz, BD, PN ve BD+PN numunelerin non manyetik ve manyetik alan altında tribolojik özellikleri incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Plazma nitrürlenme işlemi sonrasında numunelerin yüzeyinde γ' -Fe₄N ve ϵ -Fe₂₋₃N fazlarını içeren bileşik tabaka ve bu tabakanın altında ise difüzyon tabakası olduğu gözlemlenmiştir.
- Düşük Almen şiddetlerinde ve düşük plazma nitrürlenme sürelerinde düşük pik şiddetinde ϵ -Fe₂₋₃N fazları oluşurken, Almen şiddeti ve plazma nitrürlenme süresi artırıldığında γ' -Fe₄N fazı oluşmuştur. Ayrıca γ' -Fe₄N fazının yoğunluğu artan plazma nitrürlenme süresi ve bilyalı dövme şiddeti ile artmıştır.
- Plazma nitrürlenme işlemi sonrasında numunelerin yüzeyinde oluşan bileşik tabaka ve bu tabakanın altında oluşan difüzyon tabakasının kalınlığı artan plazma nitrürlenme işlem süresiyle ve Almen şiddetinin artmasıyla artmıştır.
- Bilyalı dövme sonrasında malzeme yüzeyinde ince taneli bir plastik deformasyon tabakasının olduğu belirlenmiştir.
- AISI 4140 işlemsiz çelik numunelere PN, BD ve BD+PN yüzey işlemleri uygulandığında numunenin yüzeyinde ve yüzey altı bölgelerinde bası artık gerilmeleri oluşmuştur. Artık gerilmeler malzemenin mekanik özelliklerini ve aşınma performansını önemli derecede etkilemiştir.
- Ayrıca bası artık gerilmeleri plazma nitrürlenme süresi ve Almen şiddetinin artmasıyla artmıştır. Minimum bası artık gerilmesi işlemsiz numuneden elde edilirken maksimum bası artık gerilmesi 24A/500-4 numunesinden elde edilmiştir.
- Yüzey sertlik değerleri bilyalı dövme plazma nitrürlenme işlemleriyle arttığı görülmüştür. Kesit bölgesinden alınan sertlik değerlerinde yüzeyden itibaren iç

kısımlara doğru gidildikçe bu işlemlerin etkisi azalarak sertlik düşüşü görülmüştür. En düşük yüzey sertlik değeri işlemsiz numunede görülürken, en yüksek yüzey sertlik değerleri BD+PN numunelerde tespit edilmiştir.

- Bilyalı dövme ve plazma nitrüleme yüzey pürüzlülüğünü artırdığı için non manyetik alan altında aşınan numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinde artış gözlemlenirken, manyetik alan altında aşınan numunelerin sürtünme katsayısı değeri belli bir süreden sonra daha kararlı hale gelmiştir.
- Manyetik alanının malzeme yüzeyinde oksit filmi oluşturarak sürtünme katsayısını azaltıcı yönde etki ettiği görülmüştür.
- Bilyalı dövme ve plazma nitrüleme işlemlerinin, malzemenin aşınma direncini artırdığı gözlemlenmi ve en yüksek aşınma direncine BD+PN numunelerinin sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Artan Almen şiddeti ve plazma nitrüleme süresinin aşınma direncini artırdığı görülmüştür.
- Manyetik alan altında aşınma testi yapılan numunelerin aşınma oranının, non manyetik alan altında aşınma testi yapılan numunelerin aşınma oranından daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.
- Manyetik alanın yatay yönde yani aşınma izi doğrultusunda uygulanmasının; aşınma esnasında oluşan partikülleri aşınma bölgesinden uzaklaştırdığı için aşınma oranının düşmesine sebep olduğu belirlenmiştir.
- İşlemsiz numunede ve bilyalı dövülmüş numunelerde adeziv aşınma görülürken, plazma nitrülenmiş numunelerde aşınma esnasında yüzeyden kopan nitrür partiküllerinin abraziv aşınmaya sebep olduğu tespit edilmiştir.
- BD+PN numunelerinde yüzeyden kopan nitrür ve oksit partiküllerinin adeziv aşınmanın yanı sıra numunelerin abraziv olarak aşınmasına sebep olduğu belirlenmiştir.
- Aşınma izleri incelendiğinde manyetik alan altındaki numunelerde aşınma izlerinin daha dar olduğu belirlenmiştir.
- En geniş aşınma izi non manyetik alan altında aşınan işlemsiz numunede görülürken, en dar aşınma izinin manyetik alan altında aşınan 24A/500-4 numunesinde olduğu gözlemlenmiştir.

Bu çalışmadan elde edilen bilgiler doğrultusunda, bilyalı dövme işlemi farklı tür metalik malzeme gruplarına uygulanarak non manyetik ve manyetik alan altında aşınma, kırılma, yorulma ve korozyon gibi özellikleri incelenebilir. Ayrıca bilyalı dövme işlemi yapılan malzemeye farklı tür kaplamalarda yapılarak non manyetik ve manyetik alan altında bu tür özellikleri incelenebilir.



KAYNAKLAR

- Alsaran, A., 2001. Dupleks yüzey işlemleri uygulanmış AISI 5140 çeliğinin yapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin belirlenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Alsaran, A., Çelik, A. and Karakan, M., 2005. Structural, mechanical and tribological properties of duplex-treated AISI 5140 steel. *Materials characterization*, 54 (1), 85-92.
- Alsaran, A., Çelik, A., Karakan, M. and Yetim, F., 2011. Yüzey mühendisliğinde yeni bir yaklaşım; dupleks yüzey işlemleri. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 9 (1).
- Alsaran, A., Yildiz, F., Çelik, A., 2006. Effects of post-aging on wear and corrosion properties of nitrided AISI 4140 steel *Surf. Coat. Technol.*, 201, 3147-3154.
- Anderoglu, O., 2004. Residual Stress Measurement Using X-Ray Diffraction. Master of Science, Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University
- Archard, J.F., Contact and rubbing of flat surfaces, *J. Appl. Phys.*, 24 (1953) 981-988.
- Bagherifard, S., Slawik, S., Fernández-Pariente, I., Pauly, C., Mücklich, F., & Guagliano, M. (2014). Nanoscale surface modification of AISI 316L stainless steel by severe shot peening. *Materials & Design*, 102, 68-77.
- Balyalı, H.A., 2015. Metalik Malzemelerin Bilyalı Dövme Uygulaması Sonrası Tribolojik Davranışının DeneySEL Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bek N (2009). Peening Uygulamaları. *Yüzey İşlem Kumlaması Dergisi* 7: 26-28.
- Bi, H., Wang, Z., 2003. Wear of medium carbon steel in the presence of Nd-Fe-B permanent magnetic field. *Materials Letters*, 57, (11), 1752-1755.
- Callister, W.D., 2007. *Materials science and engineering*.
- Capitelli, M., Gorse, C., 1992. *Plasma Technology Fundamentals and Applications*.
- Chemkhi, M., Retraint, D., Roos, A., Garnier, C., Waltz, L., Demangel, C., & Proust, G. (2013). The effect of surface mechanical attrition treatment on low temperature plasma nitriding of an austenitic stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 221, 191-195.
- Cho, K. T., Song, K., Oh, S. H., Lee, Y. K., & Lee, W. B. (2013). Surface hardening of shot peened H13 steel by enhanced nitrogen diffusion. *Surface and Coatings Technology*, 232, 912-919.
- Çelik, A. and Karadeniz, S., 1996. Investigation of compound layer formed during ion nitriding of AISI 4140 steel. *Surface and Coatings Technology*, 80 (3), 283-286.
- Çelik, A., Bayrak, Ö., Alsaran, A., Kaymaz, İ., & Yetim, A. F. (2008). Effects of plasma nitriding on mechanical and tribological properties of CoCrMo alloy. *Surface and Coatings Technology*, 202(11), 2433-2438.
- Çelik, S., 2017. AISI 4140 çeliğine uygulanan farklı ısı işlemlerin mekanik özellikler üzerine etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, 19 Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Hashemi, B., Yazdi, M. R., & Azar, V. (2011). The wear and corrosion resistance of shot peened-nitrided 316L austenitic stainless steel. *Materials & Design*, 32(6), 3287-3292.

- Hassani-Gangaraj, S., Moridi, A., Guagliano, M., Ghidini, A., Boniardi, M., 2014. The effect of nitriding, severe shot peening and their combination on the fatigue behavior and micro-structure of a low-alloy steel. *International Journal of Fatigue*, 62, 67-76.
- Hiratsuka, K., Sasada, T., Norose S., 1993. The magnetic effect on the wear of metals *Wear*, 110, 251.
- Hiratsuka, K., Sasada, T., Norose, S., 1986. The magnetic effect on the wear of metals. *Wear*, 110, (3-4), 251-261.
- Karadeniz, S., 1990. *Plazma Tekniği*. Ankara.
- Kikuchi, S., Nakahara, Y., & Komotori, J. (2010). Fatigue properties of gas nitrided austenitic stainless steel pre-treated with fine particle peening. *International Journal of Fatigue*, 32(2), 403-410.
- Kostilnik, T. (1994). Shot peening.
- Kovacı, H., ASL, H. G., Albayrak, Ç., Alsan, A., & Çelik, A. (2016). Effect of plasma nitriding parameters on the wear resistance of alloy Inconel 718. *Metal Science and Heat Treatment*, 58(7-8), 470-474.
- Kovacı, H., Hacısalıhoğlu, İ., Yetim, A. F., & Çelik, A. (2019). Effects of shot peening pre-treatment and plasma nitriding parameters on the structural, mechanical and tribological properties of AISI 4140 low-alloy steel. *Surface and Coatings Technology*, 358, 256-265.
- Kovacı, H., Yetim A., Baran, Ö., Çelik, A., Fatigue crack growth analysis of plasma nitrided AISI 4140 low-alloy steel: part 1-constant amplitude loading *Mater. Sci. Eng. A*, 672 (2016), 257-264.
- Kovacı, H., 2016. Plazma nitrileme, DLC kaplama ve dubleks yüzey işlemlerinin AISI 4140 çeliğinin çeki ve bası aşırı yükleri altındaki yorulma çatlak gerilme davranışı üzerindeki etkileri.
- Kumagai, K., Suzuki, K., Kamiya, O., 1993. Study on reduction in wear due to magnetization. *Wear*, 162, 196-201.
- Li, J., Yang, X., S. Wang, K. Wei, J. Hu A rapid DC plasma nitriding technology catalyzed by pre-oxidation for AISI4140 steel.
- Majzoubi, G.H., Azizi, R., Alavi Nia, A., 2005. A three-dimensional simulation of shot peening process using multiple shot impacts. *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165, 1226-1234.
- Manova, D., Mändl, S., Neumann, H., Rauschenbach, B., 2007. Influence of grain size on nitrogen diffusivity in austenitic stainless steel *Surf. Coat. Technol.*, 201, 6686-6689.
- Matsui, M., & Kakishima, H. (2006). Improvement of tribological performance of steel by solid lubricant shot-peening in dry rolling/sliding contact wear tests. *Wear*, 260(6), 669-673.
- Mitrovic, S., Adamovic, D., Zivic, F., Dzunic, D., & Pantic, M. (2014). Friction and wear behavior of shot peened surfaces of 36CrNiMo4 and 36NiCrMo16 alloyed steels under dry and lubricated contact conditions. *Applied Surface Science*, 290, 223-232.
- Mohammadzadeh, R., Akbari, A., & Drouet, M. (2014). Microstructure and wear properties of AISI M2 tool steel on RF plasma nitriding at different N₂-H₂ gas compositions. *Surface and Coatings Technology*, 258, 566-573.

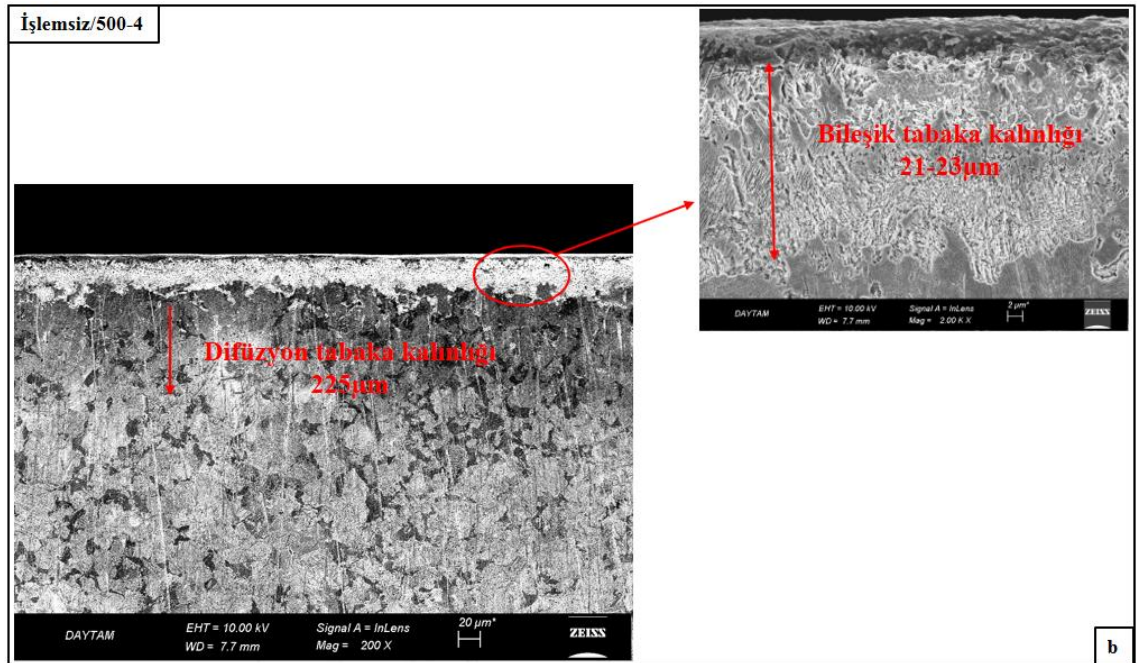
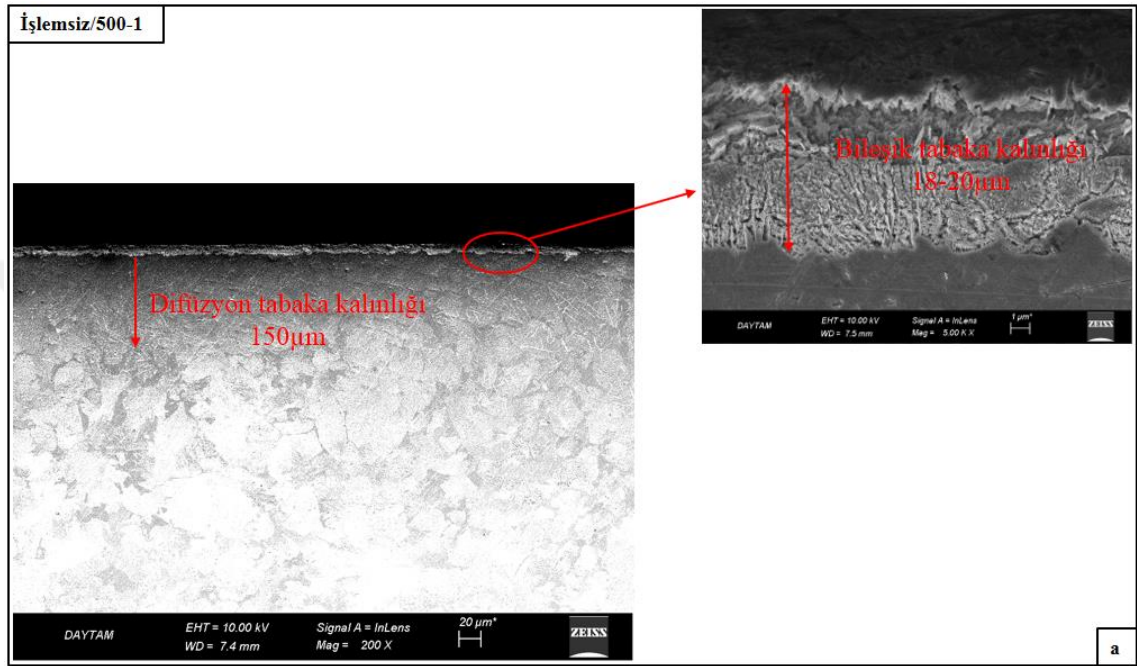
- Muju, M., Radhakrishna, A., 1980. Wear of non-magnetic materials in the presence of a magnetic field. *Wear*, 58, (1), 49-58.
- Oladijo, O.P., Venter, A.M. and Cornish, L.A., 2014. Correlation between residual stress and abrasive wear of WC–17Co coatings. *International Journal of Refractory*
- Palacios , M., Bagherifard , S., Guagliano , M., Fernández Pariente , I., 2014. Influence of severe shot peening on wear behaviour of an aluminium alloy. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 37, (7), 821-829.
- Savaş , S., 2010. Monitoring Variation of Surface Residual Stresses in The Shot-Peened Steel Compenents by Magnetic Barkhausen Noise Method. Master Science in Metallurgical, Middle East Technical University, Ankara.
- Schulze , V., 2006. Modern Mechanical Surface Treatment, 1st edition, WILEY WCH,368.
- Shen, L., Wang, L., Wang, Y., & Wang, C. (2010). Plasma nitriding of AISI 304 austenitic stainless steel with pre-shot peening. *Surface and Coatings Technology*, 204(20), 3222-3227.
- Stolarski, T., Makida, Y., 2011. Influence of magnetic field on wear in high frequency reciprocating sliding contacts. *Tribology international*, 44, (9), 1004-1013.
- Straub, D. P. (1992). Improvement in surface fatigue life of hardened gears by high-intensity shot peening.
- Straub, J. C. (1973). Special performance of transmission parts by shot peening SAE 730800, National Combined Farm, Construction & Industrial Machinery and Fuels and Lubricants Meeting, Milwaukee, September. *Surf. Coat. Technol.*, 204 (2010), pp. 3222-3227.
- Ünal, O., 2011. Bilyalı Dövme İşleminin Tane Boyutuna Etkisinin Deneysel İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın.
- Varol, R., 1990. 2024 alüminyum alaşımasının yorulma ömrü üzerine farklı bilyalı dövme işlem parametrelerinin etkisi. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya 127s.
- Wagner , L., 2003. Shot Peening.
- Wang, Z. B., Tao, N. R., Li, S. S., Wang, W., Liu, G., Lu, J., & Lu, K. (2003). Effect of surface nanocrystallization on friction and wear properties in low carbon steel. *Materials Science and Engineering: A*, 352(1-2), 144-149.
- Wei , Y., Zhang , Y., Chen , Y., Du , S., 2013. Impact of material permeability on friction and wear Properties under the interference of DC steady magnetic field. *Tribology international*, 57, 162-169.
- Wyatt, R. G., Dolin, R., Blacklow, N. R., DuPont, H. L., Buscho, R. F., Thornhill, T. S., ... & Chanock, R. M. (1974). Comparison of three agents of acute infectious nonbacterial gastroenteritis by cross-challenge in volunteers. *Journal of Infectious Diseases*, 129(6), 709-714.
- Yetim, A., Celik, A., Alsaran, A., 2010. Improving tribological properties of Ti6Al4V alloy with duplex surface treatment. *Surface and Coatings Technology*, 205 (2), 320-324.
- Yetim, A.F., 2009. Biyomalzeme olarak kullanılan AISI 316L ve Ti6Al4V alaşımasının plazma ile nitrüleme davranışı, Ti-DLC ince film ile karşılaştırılması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

- Yıldız, F., 2009. Farklı yüzey işlemlerinin metalik implant malzemeler üzerindeki etkileri. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Zhan, K., Jiang, C. H., & Ji, V. (2012). Surface mechanical properties of S30432 austenitic steel after shot peening. *Applied Surface Science*, 258(24), 9559-9563.

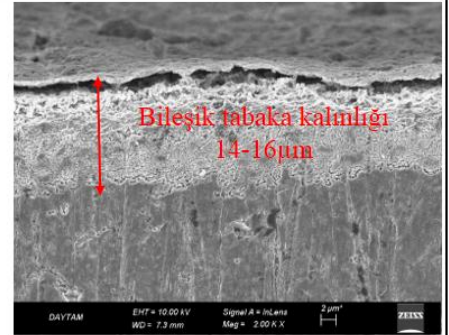
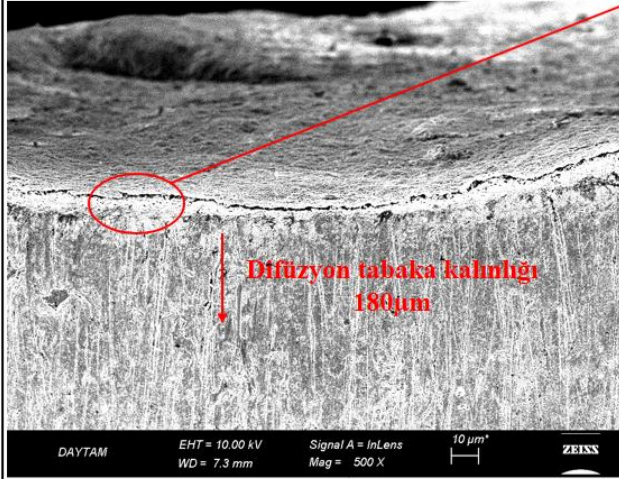


EKLER

EK 1. Farklı işlem şartlarında PN ve BD+PN numunelerin kesit SEM görüntüleri

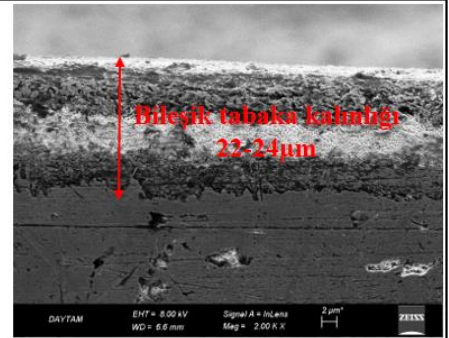
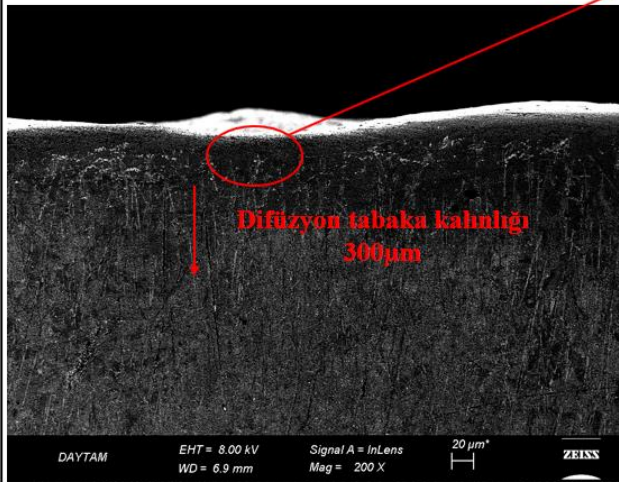


16A/500-1

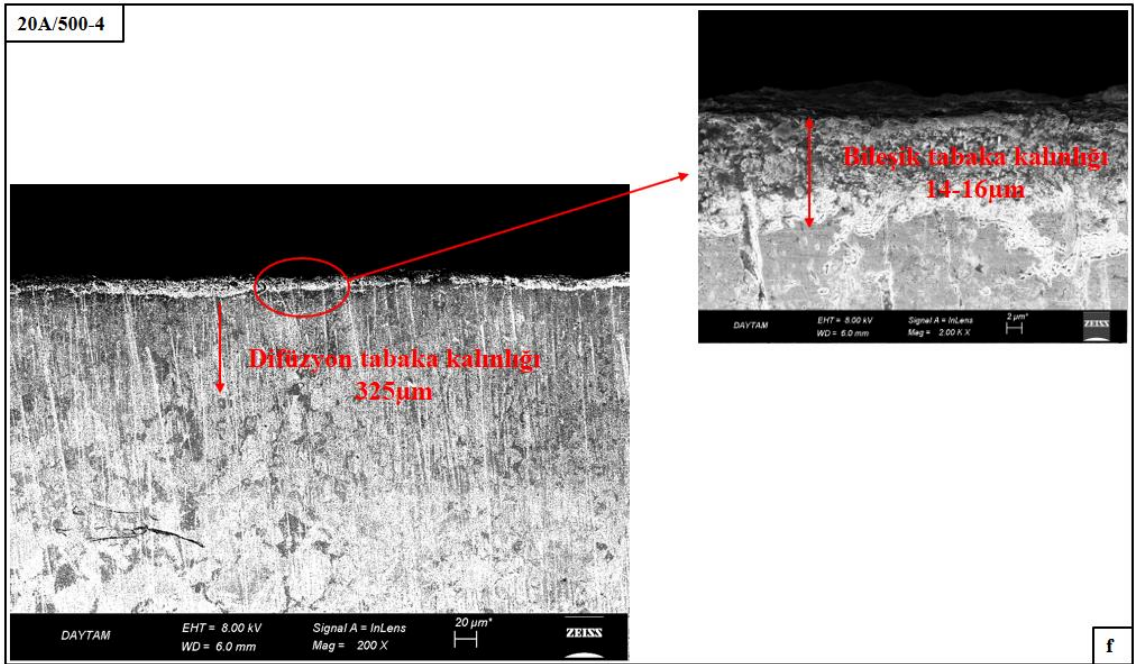
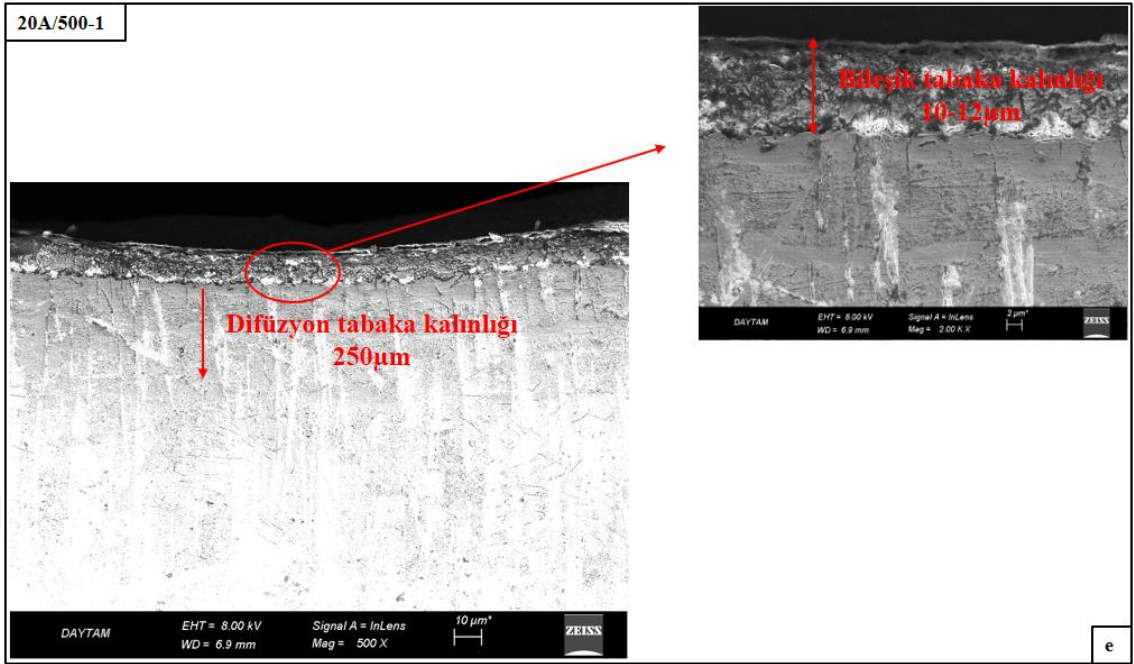


c

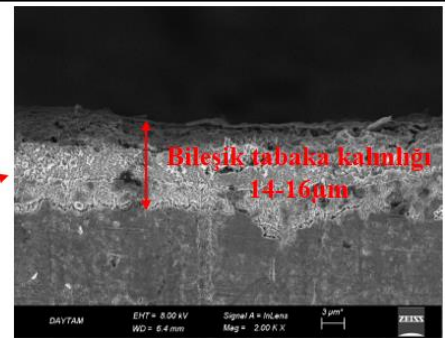
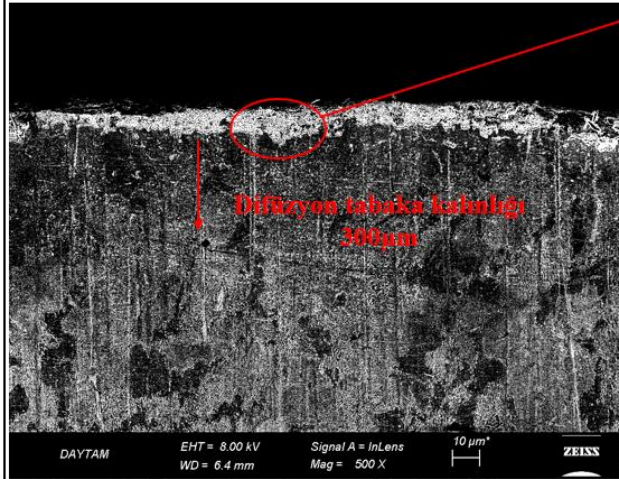
16A/500-4



d

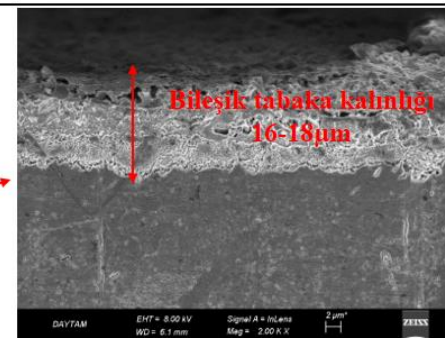
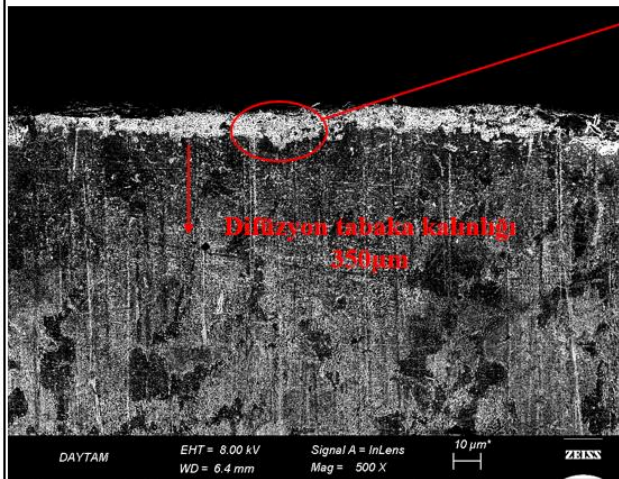


24A/500-1



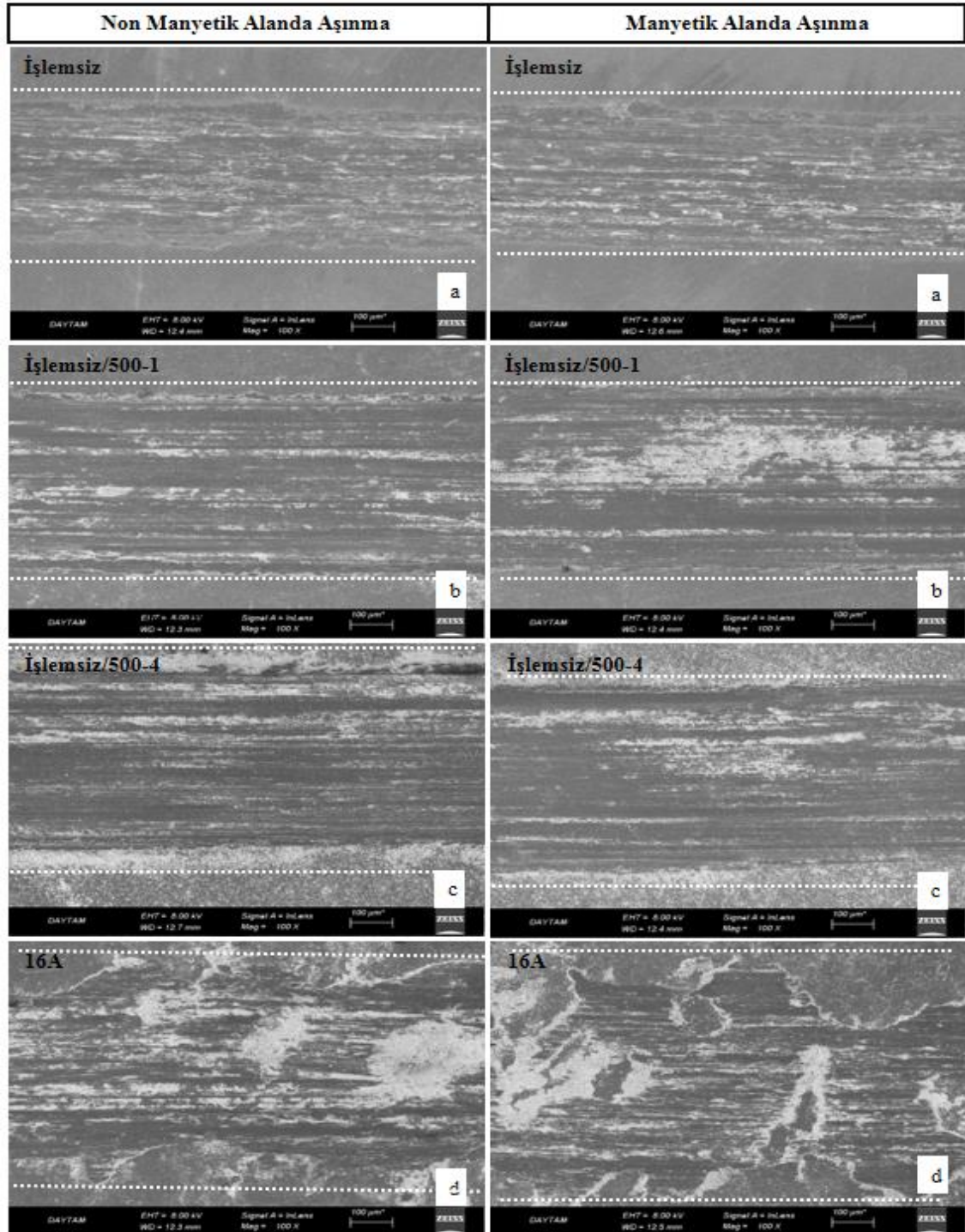
g

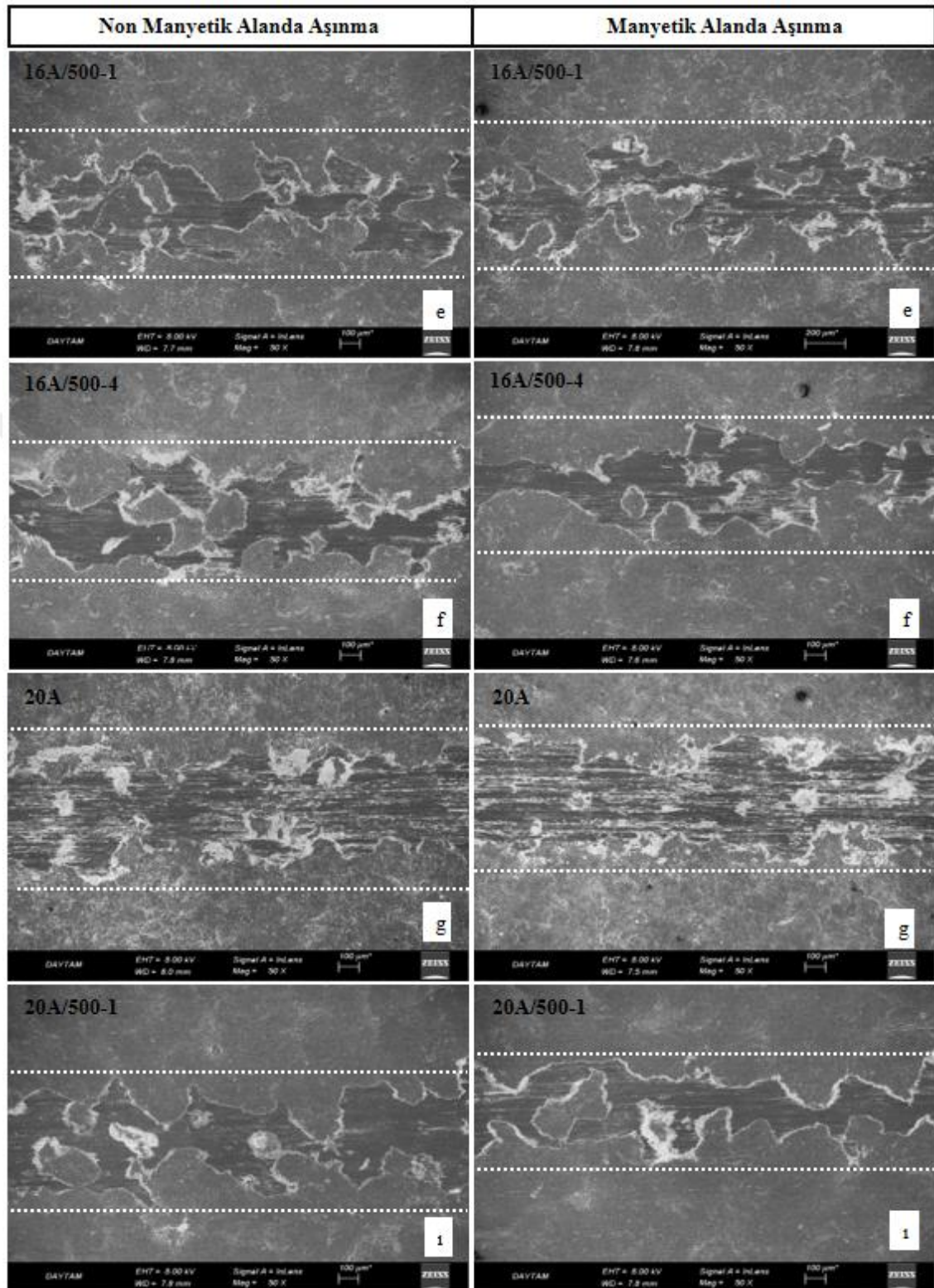
24A/500-4

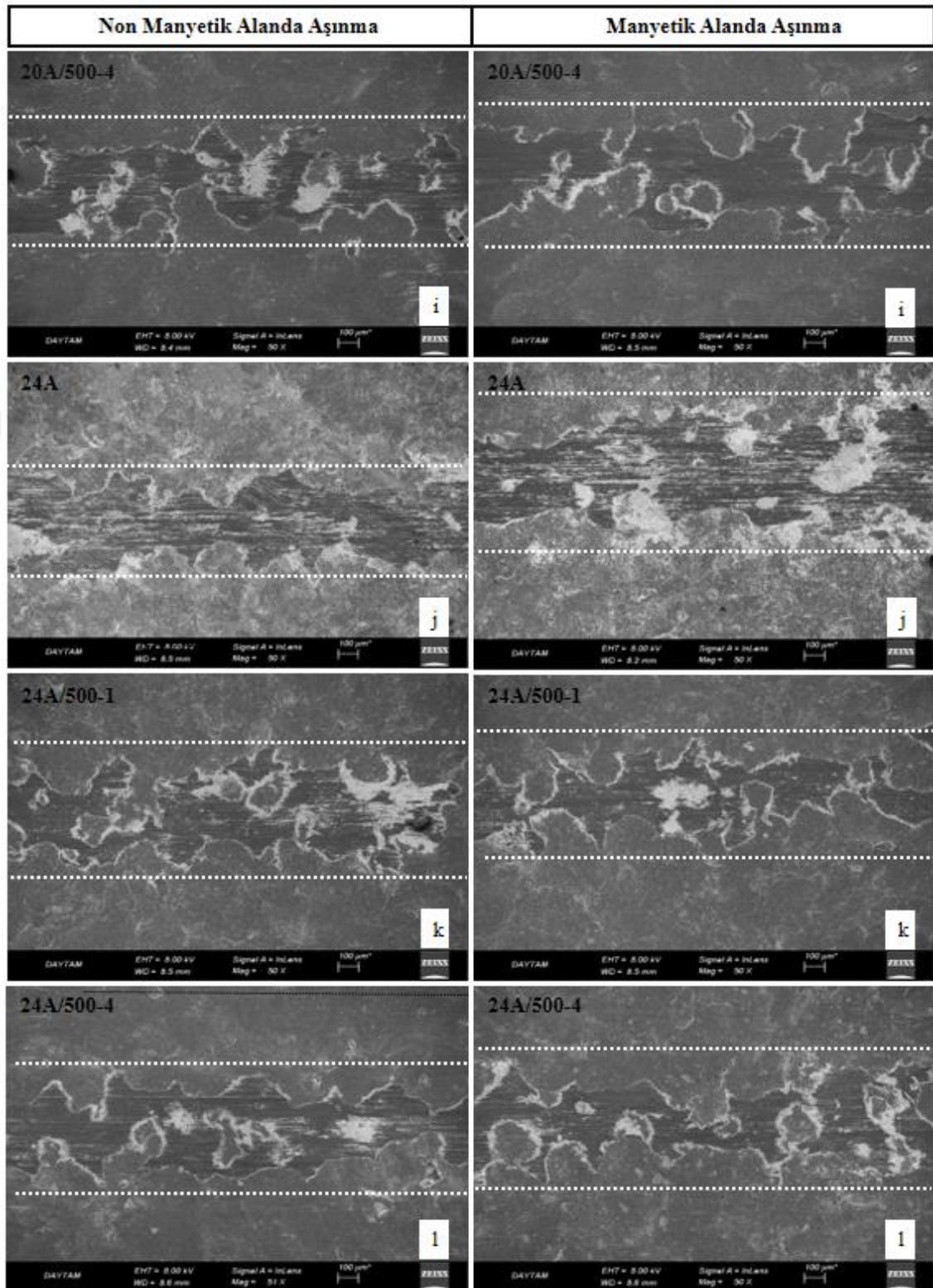


h

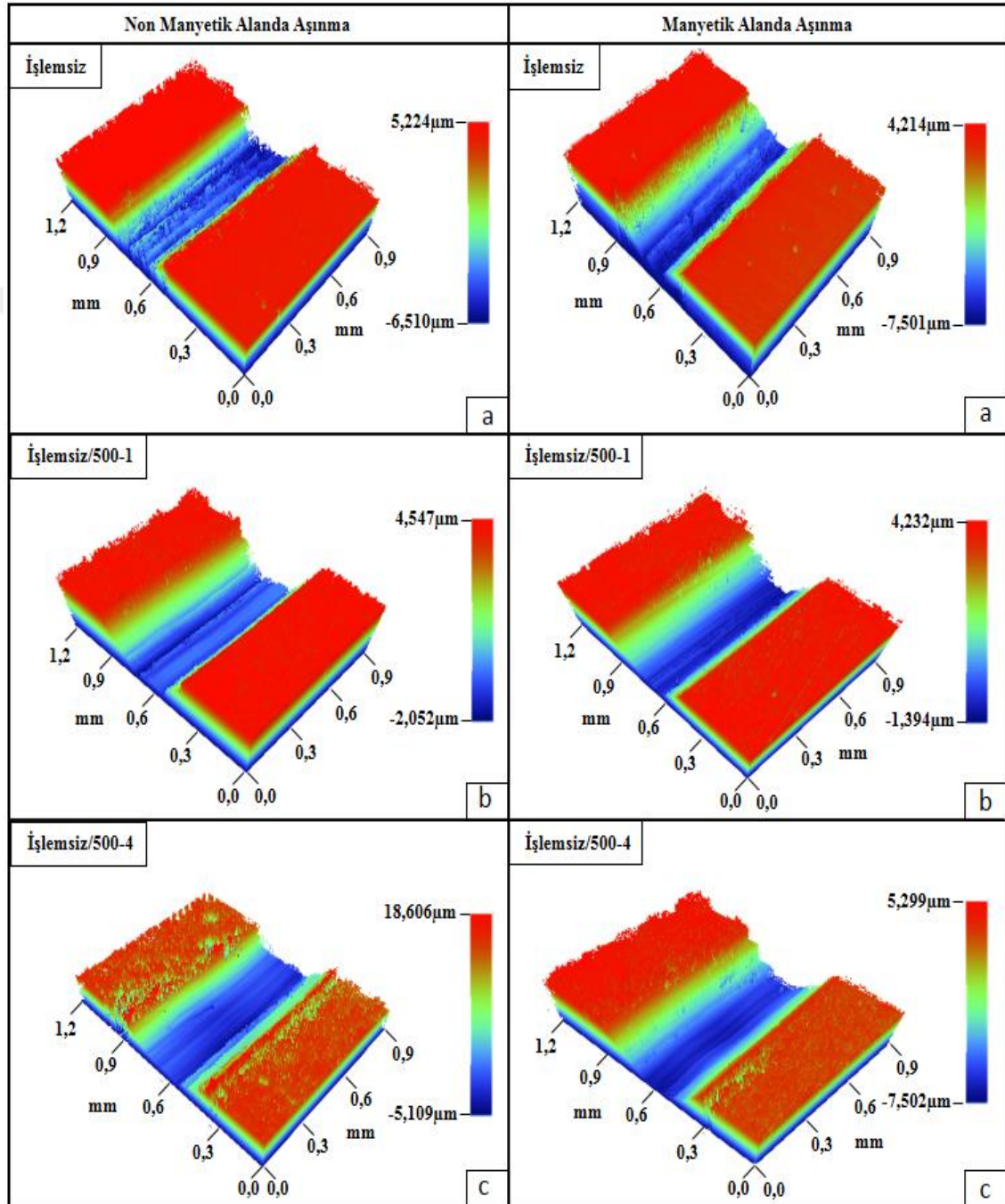
EK 2. İşlemsiz, PN, BD ve BD+PN numunelerinin non manyetik ve manyetik alan altındaki aşınma testlerinden sonra aşınma izlerinin SEM görüntüleri

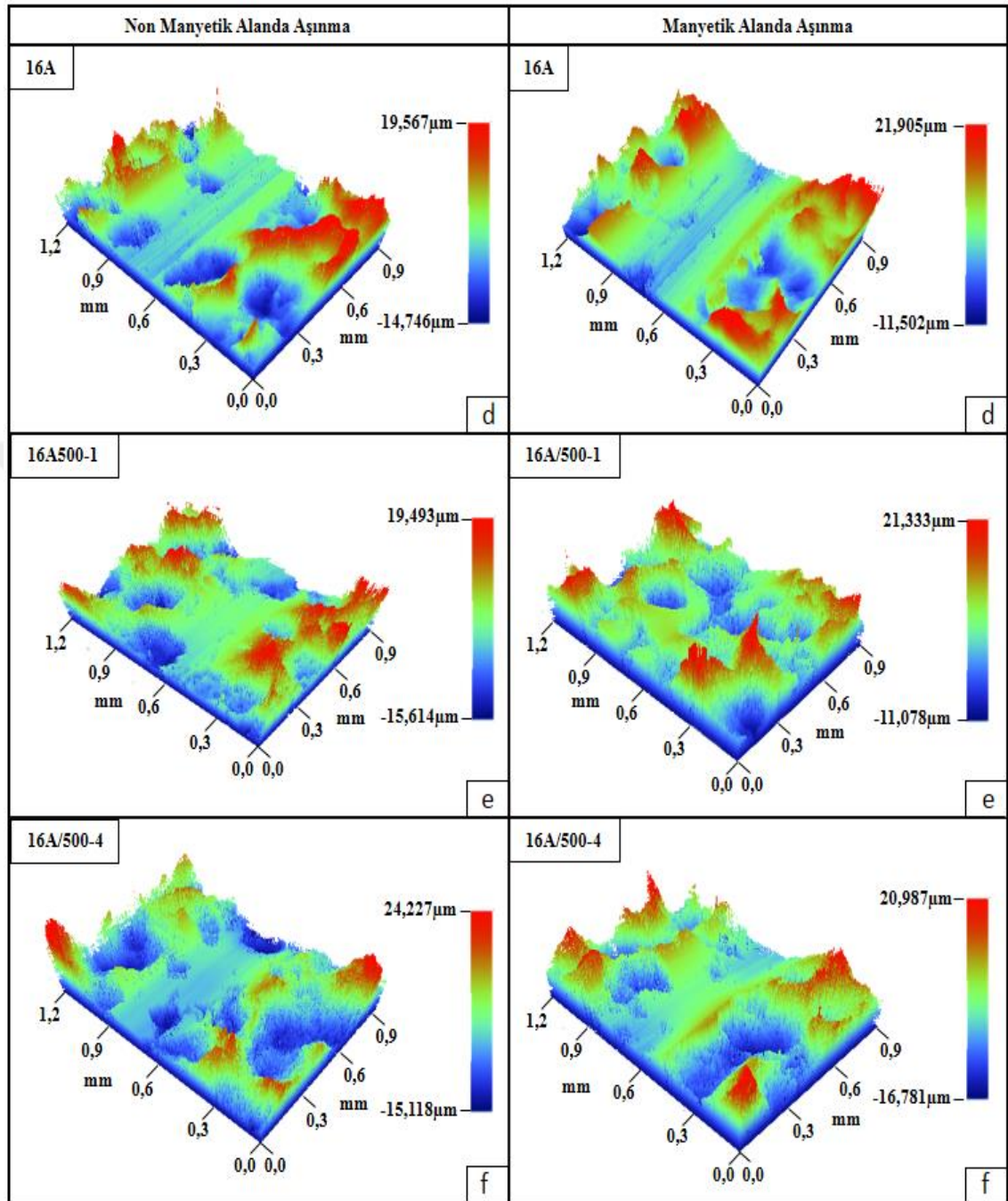


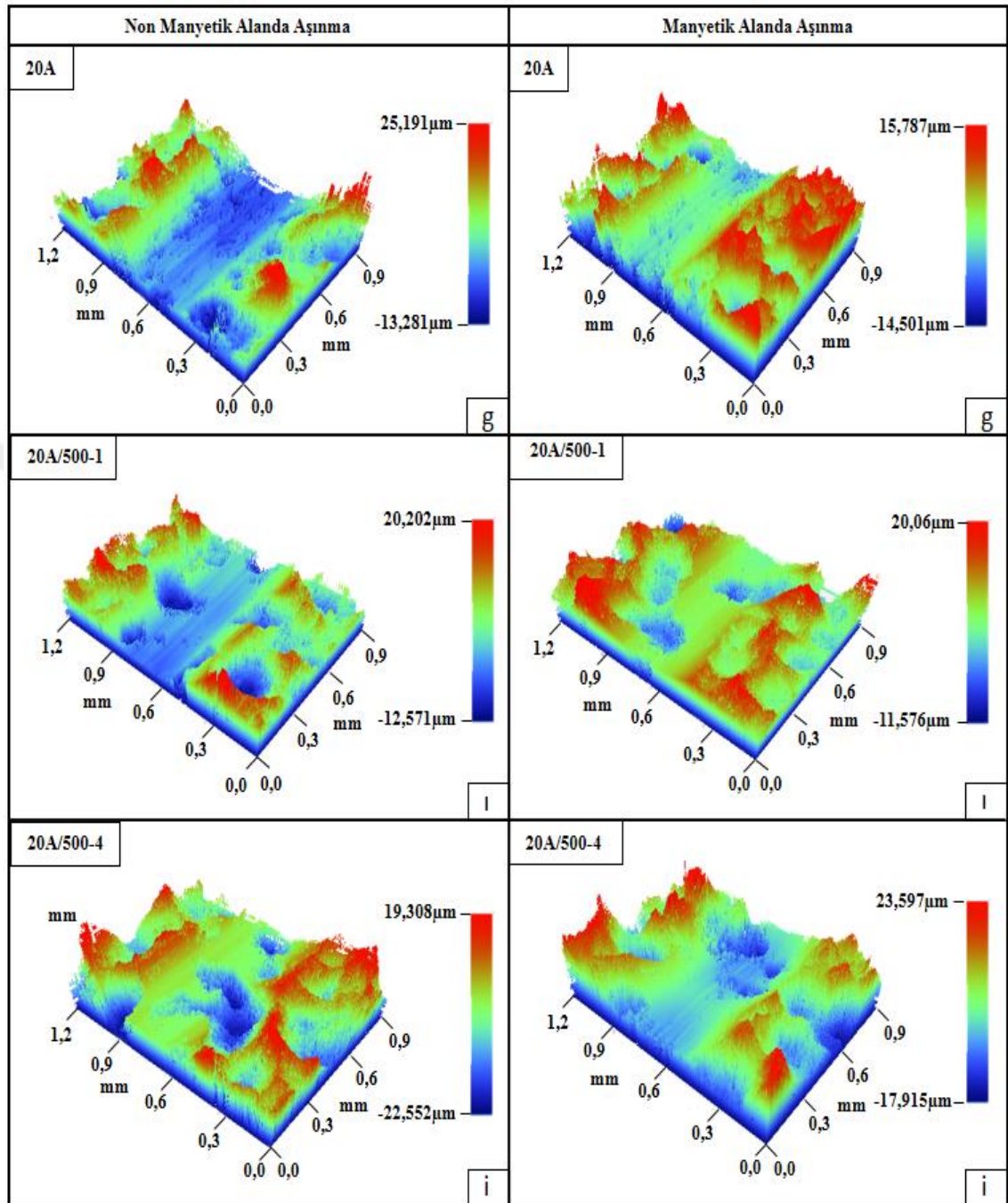


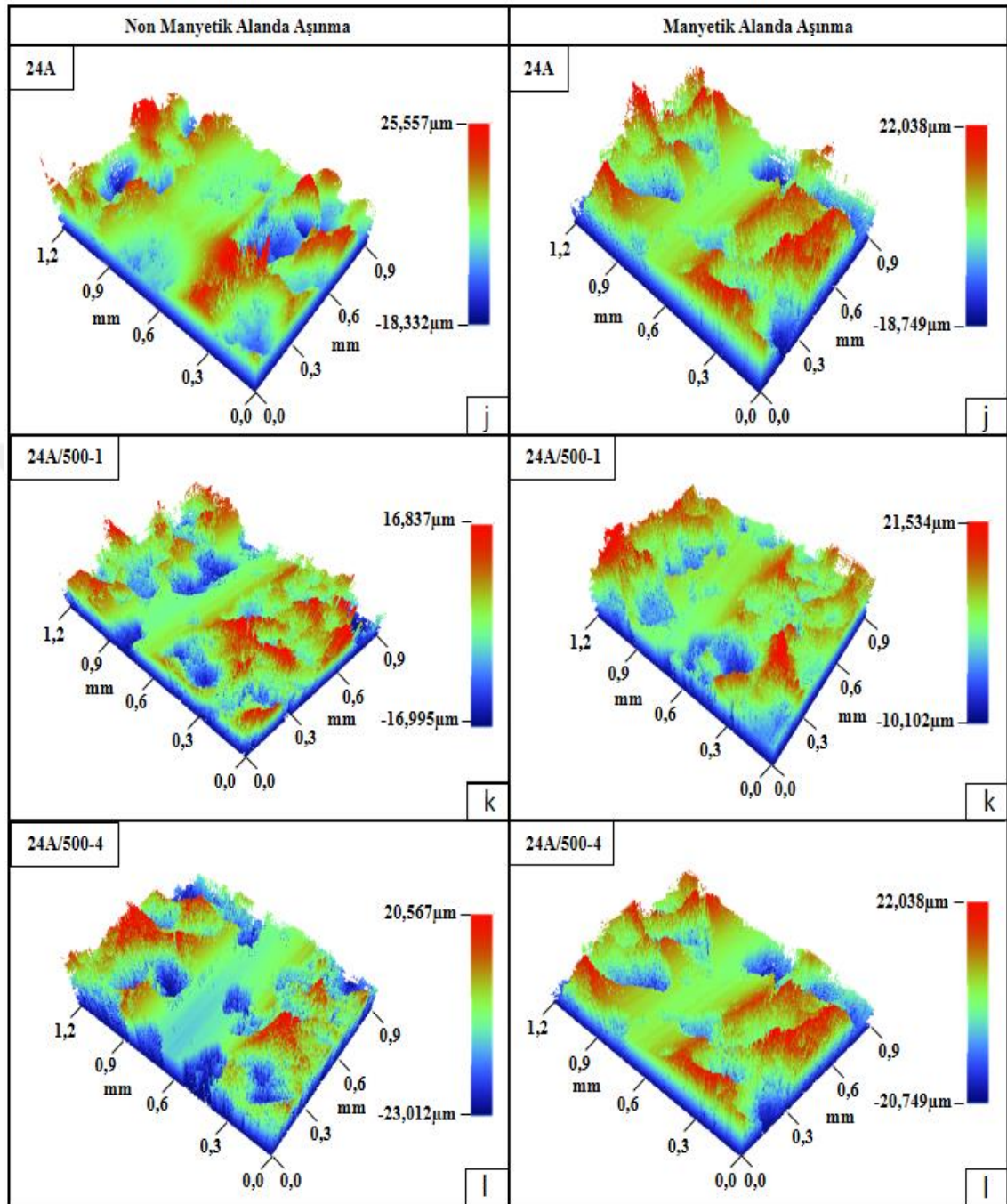


EK 3. İşlemsiz, PN, BD ve BD+PN numunelerin non manyetik ve manyetik alan altındaki aşınma testlerinden sonra elde edilen 3D profilometre yüzey görüntüleri









ÖZGEÇMİŞ

15 Ekim 1992 yılında Sarıkamış’da doğdu. İlköğrenimini Balabantaş Köyü İlkokulunda, orta öğrenimini Karaorgan Fehim Yenice Okulunda ve lise öğrenimini Kastamonu Tosya Anadolu Lisesi’nde tamamladı. 2012 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nden 2017 yılı haziran ayında yüksek onur öğrencisi ve bölüm 1.si olarak mezun oldu. 2017 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı.