

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**METALİK MALZEMELERİN BİLYALI DÖVME UYGULAMASI
SONRASI TRİBOLOJİK DAVRANIŞININ
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harun Arda BALYALI

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

MAYIS 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**METALİK MALZEMELERİN BİLYALI DÖVME UYGULAMASI
SONRASI TRİBOLOJİK DAVRANIŞININ
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Harun Arda BALYALI
(503131204)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

**Tez Danışmanı: Yard. Doç. Dr. Zeynep PARLAR
Eş Danışman: Yard. Doç. Dr. Egemen AVCU**

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503131204 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Harun Arda BALLYALI**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**METALİK MALZEMELERİN BİLYALI DÖVME UYGULAMASI SONRASI TRİBOLOJİK DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yard. Doç. Dr. Zeynep PARLAR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Yard. Doç. Dr. Egemen AVCU**
Kocaeli Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yard. Doç. Dr. Vedat TEMİZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yard. Doç. Dr. İ. Mehmet PALABIYIK
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yard. Doç. Dr. İlknur KOÇAŞ
Gedik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **4 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **26 Mayıs 2015**

Aileme ve Arkadaşılarırma,

ÖNSÖZ

Bilyalı Dövme (Shot Peening) farklı boyutlar ve özelliklerdeki bilyaların metalik hedef malzeme yüzeyine farklı parametreler altında püskürtülmesi ile uygulanan mekanik bir yüzey işlemidir. Bilyalı dövme işlemi ile ; (i) malzemenin yüzeyinde kalıntı gerilme oluşturulması, (ii) yüzey ve yüzeye yakın bölgelerde dislokasyon yoğunluğunun artırılması ve (iii) yüzeye yakın bölgelerde tane yapısının inceltilmesi ile malzemelerin mekanik özelliklerinin artırılması hedeflenmektedir.

Birbirine göre izafi hareketli olan temas yüzeylerinde karşılaşılan en önemli problem bilindiği gibi aşınmadır. Aşınma neticesinde oluşan hasar sonucunda mühendislik malzemeleri zamanla işlevlerini yerine getirememektedirler. Kullanılan elemanların ömrünü etkileyen bu problem farklı yüzey işlemleri ile minimuma indirilmeye ve kontrol altında tutulmaya çalışılmaktadır. Günümüzde yüzey dayanımı ve sürtünme özellikleri geliştirilmiş alternatif malzeme arayışı izafi hareketli elemanlarda artarak devam etmektedir.

Bu çalışma kapsamında, paslanmaz çelik ve titanyum alaşımı malzemelerin sürtünme ve aşınma karakteristiğine bilyalı dövme işleminin ve işlem parametrelerinin etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, işlem parametrelerine bağlı olarak malzeme yüzey karakteristiği ve elde edilen bu yüzey karakteristiğinin kuru ve sınır sürtünme çalışma şartlarındaki tribolojik davranışı incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda bilyalı dövme parametrelerin optimize edilerek, titanyum alaşımı ve paslanmaz çelik malzemelerinin sürtünme ve aşınma kayıpları minimuma indirilmesi hedeflenmiştir. Bu hedefe ulaşılması ile uygulamada hem bu malzemelerin kullanım ömürlerinin artması hem de endüstriyel açıdan enerji kaybı anlamına gelen sürtünme direncinin düşürülmesi beklenmektedir.

Eğitim ve öğretim hayatım boyunca her an yanımda olan, sevgi ve özverilerini asla esirgemeyen değerli ailem başta olmak üzere bana istediğim bu tez konusunda tüm kapıları açıp birlikte çalışma olanağı vererek beni onurlandıran, değerli fikirleri ile çalışmamı yönlendiren, danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Zeynep PARLAR 'a, çalışmalarımda engin bilgi birikimi ve tecrübeleri ile yol gösteren, her zaman destekleyerek cesaretlendiren, kendimi geliştirmemde etkin rol alan eş danışmanım, değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Egemen AVCU 'ya, deneysel çalışmalarımda yapmış olduğu yardımlar için Arş. Gör. Yasemin YILDIRAN 'a ve Arş. Gör. Fatih Erdem BAŞTAN 'a, manevi desteklerini esirgemeyen tüm değerli yakın arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarımda kullanılan numunelerin bilyalı dövme işlemi ile yüzey hazırlıkları için yardımlarını esirgemeyen Bülent ÖZTORUN 'a ve Yakup ÖZBEK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2015

Harun Arda BALYALI
(Makina Mühendisi ve Endüstri Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	3
1.2 Literatür Araştırması	4
2. BİLYALI DÖVME	17
2.1 Amaç	17
2.2 Bilyalı Dövme Makinaları.....	19
2.3 Bilyaların Sınıflandırılması	24
2.4 Bilyalı Dövme Parametreleri.....	28
3. SÜRTÜNME VE AŞINMA	35
3.1 Sürtünme	36
3.1.1 Kuru sürtünme.....	37
3.1.2 Sınır sürtünmesi	38
3.1.3 Sıvı sürtünmesi.....	38
3.2 Aşınma	38
3.2.1 Aşınma mekanizmaları	38
3.2.1.1 Adhezif aşınma mekanizması	40
3.2.1.2 Abrazif aşınma mekanizması	40
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	43
4.1 Deneysel Yöntem	43
4.2 Deney Tesisi Tanıtımı ve Deneylerin Yapılışı	45
4.2.1 Sürtünme ve aşınma deney tesisi	45
4.3 Deney Numuneleri ve Numune Hazırlıkları	47
4.3.1 Ti6Al4V titanyum alaşımı	48
4.3.2 AISI 316 paslanmaz çeliği	48
4.3.3 Bilyalı dövme medyaları	49
4.3.4 Bilyalı dövme işlemi	49
4.3.5 Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri.....	50
4.3.6 Sertlik ölçümleri.....	50
4.3.7 Yüzey morfolojilerinin incelenmesi.....	51
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER.....	53
5.1 Yüzey Pürüzlülüğü Değerlerindeki Değişimler	53
5.2 Sertlik Değerlerindeki Değişimler	58
5.3 Sürtünme Karakteristiği	61
5.3.1 Kuru çalışma şartlarında sürtünme karakteristiği	62

5.3.2 Kuru çalışma şartlarında normal kuvvete bağlı sürtünme karakteristiği ..	65
5.3.3 Sınır sürtünme şartlarında sürtünme karakteristiği	69
5.3.4 Sınır sürtünme şartlarında normal kuvvete bağlı sürtünme karakteristiği	73
5.4 Aşınma Karakteristiği.....	77
5.4.1 Kuru çalışma şartlarında aşınma karakteristiği	78
5.4.2 Sınır sürtünme şartlarında aşınma karakteristiği	80
5.5 Yüzey Morfolojilerinin İncelenmesi	83
5.5.1 Titanyum alaşımının yüzey morfolojilerinin incelenmesi	84
5.5.2 AISI 316 çeliğinin yüzey morfolojilerinin incelenmesi	92
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	101
KAYNAKLAR.....	109
EKLER.....	115
ÖZGEÇMİŞ	123

KISALTMALAR

AISI	: American Iron and Steel Institute
AMS	: Aerospace Materials Specification
DIN	: Deutsches Institut für Normung
EDS	: Energy Dispersive x-ray Spectroscopy
HRC	: Hardness Rockwell C
HV	: Hardness Vickers
SAE	: Society of Automotive Engineers
SEM	: Scanning Electron Microscope

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Titanyum malzemenin fiziksel özellikleri.....	4
Çizelge 1.2 : Titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri.	6
Çizelge 2.1 : Bilya SAE standartları ve içerikleri.....	24
Çizelge 2.2 : Bilyalı dövme uygulaması için kullanılan malzemelerin standartları. .	25
Çizelge 2.3 : SAE J444 standartlarına göre çelik bilyalar.	27
Çizelge 2.4 : Bilya hasarlarında kabul edilebilirlik sınırları.....	30
Çizelge 2.5 : Almen test şeritlerinin kalınlık değerleri.....	32
Çizelge 4.1 : Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreleri.....	45
Çizelge 4.2 : PLINT TE-53 tribolojik deney cihazı teknik özellikleri.	46
Çizelge 4.3 : Deney numunelerinin elementsel analizi.	48
Çizelge 4.4 : Deneylerde kullanılan S230 bilya özellikleri.	49
Çizelge 4.5 : Bilyalı dövme tezgahının özellikleri.	50
Çizelge 4.6 : Optik profilometre cihazının özellikleri.	50
Çizelge 4.7 : Mikrosertlik ölçüm cihazı özellikleri.	51
Çizelge 4.8 : Stereo mikroskopların özellikleri.	51
Çizelge 4.9 : SEM cihazının özellikleri.....	51
Çizelge 5.1 : Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 çeliğin ortalama pürüzlülük değerleri. .	53
Çizelge 5.2 : Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 çeliği yüzde pürüzlülük artış oranları. .	56
Çizelge 5.3 : Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 çeliğinin ortalama sertlik değerleri.	58
Çizelge 5.4 : Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 çeliği yüzde sertlik artış oranları.....	61
Çizelge C.1 : Ti6Al4V ve AISI 316 malzemelerinin HRC sertlik değerleri	122

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Bilyalı dövme operasyonu.....	2
Şekil 2.1 : Bilyalı dövme kullanılan yüksek teknoloji gerektiren sanayiler.	17
Şekil 2.2 : Bir dişlinin dişlerinin bilyalı dövme işlemi uygulaması.	18
Şekil 2.3 : Bir hava taşıtının parçalarına uygulanan bilyalı dövme işlemi.	19
Şekil 2.4 : Bilyalı dövme uygulaması sonrası tane yapısı değişimi.	19
Şekil 2.5 : Bilyalı dövme makinalarının sınıflandırılması.	20
Şekil 2.6 : Bilyalı dövme makinalarında kullanılan sistemler.	21
Şekil 2.7 : Bilya akışı içerisinde bilya dağılımının yoğunluk değişimi.	22
Şekil 2.8 : Otomatik bilyalı dövme makinası.	22
Şekil 2.9 : Operatör kontrollü bilyalı dövme işlemi ve kabini.	22
Şekil 2.10 : Hava yardımıyla püskürtmeli bilyalı dövme makinaları.	23
Şekil 2.11 : Türbin vasıtasıyla püskürtmeli bilyalı dövme makinası çarkı.	23
Şekil 2.12 : Bilyalı dövme uygulamalarında kullanılan çeşitli bilya türleri.	24
Şekil 2.13 : Çelik bilyaların büyüklüklerine göre sınıflandırılması.	26
Şekil 2.14 : Farklı türlerdeki bilyalı dövme uygulaması medyaları.	26
Şekil 2.15 : Bilya sertliği değişimi ile çelikte gerçekleşen gerilme değişimi ve nüfuziyet derinliği.	28
Şekil 2.16 : Bilya hasar kontrolünde kullanılan mikroskop ve elek sistemleri.	29
Şekil 2.17 : Kabul edilebilir ve kabul edilemez bilya hasarları.	30
Şekil 2.18 : Bilyalı dövme işleminin doyma noktasının belirlenmesi.	31
Şekil 2.19 : SAE J442 standartlarındaki Almen şeritlerinin boyutları.	32
Şekil 2.20 : Bilyalı Dövme a) Almen şeritleri b) Almen masterları.	33
Şekil 2.21 : Almen test şeridi tutucu elemanı.	33
Şekil 2.22 : %35 ve % 91 doyurma oranlarına sahip yüzey görüntüleri.	34
Şekil 3.1 : Tribolojik sistemin bileşenlerinin şematik gösterimi.	35
Şekil 3.2 : Sistemin elemanlarına bağlı tribolojik faktörler.	35
Şekil 3.3 : Sürtünme kuvvetini oluşturan kuvvetler.	37
Şekil 3.4 : Farklı aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi.	39
Şekil 3.5 : İki ve üç elemanlı aşınma mekanizmaları.	41
Şekil 4.1 : Deneysel çalışmalarda yapılan incelemeler.	44
Şekil 4.2 : Deneysel çalışmalardaki uygulama basamakları.	44
Şekil 4.3 : Deney tesisatı ve sürtünme ve aşınma deneylerinin şematik gösterimi. ..	46
Şekil 4.4 : PLINT TE-53 sürtünme / aşınma deneyi cihazı ve numune teması.	47
Şekil 4.5 : Deney numunelerinin boyutları.	47
Şekil 4.6 : Disk ile deney numunesinin temas durumu.	48
Şekil 4.7 : Bilyalı dövme tezgahı.	49
Şekil 5.1 : Bilyalı dövme şiddetine bağlı AISI 316 paslanmaz çeliğinin yüzey pürüzlülüğünün değişimi.	54
Şekil 5.2 : Bilyalı dövme şiddetine bağlı Ti6Al4V alaşımının yüzey pürüzlülüğünün değişimi.	54

Şekil 5.3 : Bilyalı dövme şiddetine bağlı AISI 316 ve Ti6Al4V numunelerinin yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırması.	55
Şekil 5.4 : Bilyalı dövme şiddetine bağlı AISI 316 ve Ti6Al4V numunelerinin yüzey pürüzlülüklerinin grafikleri.	57
Şekil 5.5 : Bilyalı dövme şiddetine bağlı AISI 316 paslanmaz çeliğinin sertlik değişimi.	59
Şekil 5.6 : Bilyalı dövme şiddetine bağlı Ti6Al4V alaşımının sertlik değişimi.	59
Şekil 5.7 : AISI 316 ve Ti6Al4V numunelerin sertlik değişiminin karşılaştırması.	60
Şekil 5.8 : 10N normal yük uygulanan paslanmaz çeliğin kuru ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.	63
Şekil 5.9 : 20N normal yük uygulanan paslanmaz çeliğin kuru ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.	63
Şekil 5.10 : 40N normal yük uygulanan paslanmaz çeliğin kuru ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.	63
Şekil 5.11 : 10N normal yük uygulanan titanyum alaşımın kuru ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.	64
Şekil 5.12 : 20N normal yük uygulanan titanyum alaşımın kuru ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.	64
Şekil 5.13 : 40N normal yük uygulanan titanyum alaşımın kuru ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.	65
Şekil 5.14 : Bilyalı dövülmemiş paslanmaz çeliğin sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.	66
Şekil 5.15 : A 0,006 dövme şiddetli paslanmaz çeliğin sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.	66
Şekil 5.16 : A 0,008 dövme şiddetli paslanmaz çeliğin sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.	67
Şekil 5.17 : A 0,010 dövme şiddetli paslanmaz çeliğin sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.	67
Şekil 5.18 : Bilyalı dövülmemiş titanyum alaşımın sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.	68
Şekil 5.19 : A 0,006 dövme şiddetli titanyum alaşımın sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.	68
Şekil 5.20 : A 0,008 dövme şiddetli titanyum alaşımın sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.	69
Şekil 5.21 : A 0,010 dövme şiddetli titanyum alaşımın sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.	69
Şekil 5.22 : 10N normal yük uygulanan paslanmaz çeliğin yağlı ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.	70
Şekil 5.23 : 20N normal yük uygulanan paslanmaz çeliğin yağlı ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.	71
Şekil 5.24 : 40N normal yük uygulanan paslanmaz çeliğin yağlı ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.	71
Şekil 5.25 : 10N normal yük uygulanan titanyum alaşımın yağlı ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.	72
Şekil 5.26 : 20N normal yük uygulanan titanyum alaşımın yağlı ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.	72
Şekil 5.27 : 40N normal yük uygulanan titanyum alaşımın yağlı ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.	73
Şekil 5.28 : Bilyalı dövülmemiş paslanmaz çeliğin yağlı ortamdaki sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.	74

Şekil 5.29 :	A 0,006 dövme şiddetli paslanmaz çeliğin yağlı ortamdaki sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.....	74
Şekil 5.30 :	A 0,008 dövme şiddetli paslanmaz çeliğin yağlı ortamdaki sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.....	75
Şekil 5.31 :	A 0,010 dövme şiddetli paslanmaz çeliğin yağlı ortamdaki sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.....	75
Şekil 5.32 :	Bilyalı dövülmemiş titanyum alaşımın yağlı ortamdaki sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.....	76
Şekil 5.33 :	A 0,006 dövme şiddetli titanyum alaşımın yağlı ortamdaki sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.....	76
Şekil 5.34 :	A 0,008 dövme şiddetli titanyum alaşımın yağlı ortamdaki sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.....	77
Şekil 5.35 :	A 0,010 dövme şiddetli titanyum alaşımın yağlı ortamdaki sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.....	77
Şekil 5.36 :	1 m/s kayma hızlı ve 10N normal yük uygulanan paslanmaz çeliğin aşınma hızlarının dövme şiddetine bağlı değişimi.	79
Şekil 5.37 :	1 m/s kayma hızlı ve 10N normal yük uygulanan titanyum alaşımın aşınma hızlarının dövme şiddetine bağlı değişimi.	79
Şekil 5.38 :	1 m/s kayma hızlı ve 10N normal yük uygulanan paslanmaz çeliğin ve titanyum alaşımın aşınma hızlarının dövme şiddetine bağlı değişimi. ..	80
Şekil 5.39 :	1 m/s kayma hızlı ve 10N normal yük uygulanan paslanmaz çeliğin yağlı ortamdaki aşınma hızlarının dövme şiddetine bağlı değişimi.	81
Şekil 5.40 :	1 m/s kayma hızlı ve 10N normal yük uygulanan titanyum alaşımın yağlı ortamdaki aşınma hızlarının dövme şiddetine bağlı değişimi.	82
Şekil 5.41 :	1 m/s kayma hızlı ve 10N normal yük uygulanan paslanmaz çeliğin ve titanyum alaşımın yağlı ortamdaki aşınma hızlarının karşılaştırması.	82
Şekil 5.42 :	AISI 316 ve Ti6Al4V numunelerin yağlı ve kuru ortamlardaki 500m kayma mesafesinde aşınma hızlarının karşılaştırması.	83
Şekil 5.43 :	Ti6Al4V alaşımı numunelerin optik mikroskop görüntüleri.....	85
Şekil 5.44 :	Ti6Al4V alaşımının aşınma deneyleri sonrasındaki optik mikroskop görüntüleri.	86
Şekil 5.45 :	Ti6Al4V alaşımının A 0.010 Almen dövme şiddetinde dövme sonucunda yüzeyde oluşan çukur ve tümsekler (80X).	87
Şekil 5.46 :	Ti6Al4V alaşımının A 0.006 Almen dövme şiddetinde dövme sonucunda yüzeyde oluşan çukur boyutları (40X).	87
Şekil 5.47 :	Ti6Al4V alaşımı numunelerin optik mikroskop görüntüleri.....	88
Şekil 5.48 :	Ti6Al4V alaşımının EDS görüntüsü ve sonuçları.	89
Şekil 5.49 :	A 0.006 ve A 0.010 Almen şiddetlerinde dövülmüş Ti6Al4V alaşımının kuru sürtünme şartlarında aşındırılmış yüzeylerinin SEM görüntüleri. ..	91
Şekil 5.50 :	A 0.006 ve A 0.010 Almen şiddetlerinde dövülmüş Ti6Al4V alaşımının sınır sürtünme şartlarında aşındırılmış yüzeylerinin SEM görüntüleri. ..	92
Şekil 5.51 :	AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin optik mikroskop görüntüleri. ..	93
Şekil 5.52 :	AISI 316 paslanmaz çeliğinin aşınma deneyleri sonrasındaki optik mikroskop görüntüleri.	94
Şekil 5.53 :	AISI 316 paslanmaz çeliğin A 0.010 bilyalı dövme şiddetinde dövme sonucunda yüzeyde oluşan çukur ve tümsekler (80X).	95
Şekil 5.54 :	AISI 316 paslanmaz çeliğin A 0.008 bilyalı dövme şiddetinde dövme sonucunda yüzeyde oluşan çukur ve tümsekler (50X).	96
Şekil 5.55 :	AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin optik mikroskop görüntüleri. ..	96
Şekil 5.56 :	AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin EDS görüntüsü ve sonuçları. ..	97

Şekil 5.57 :	A 0.006 ve A 0.010 Almen şiddetlerinde dövülmüş paslanmaz çeliğin kuru sürtünme şartlarında aşındırılmış yüzeylerinin SEM görüntüleri. .99
Şekil 5.58 :	A 0.006 ve A 0.010 Almen şiddetlerinde dövülmüş paslanmaz çeliğin sınır sürtünme şartlarında aşındırılmış yüzeylerinin SEM görüntüleri. 100
Şekil A.1 :	Ti6Al4V titanyum alaşımı çubuk malzemenin sertifikası. 116
Şekil A.2 :	AISI 316 paslanma çelik çubuk malzemenin sertifikası. 117
Şekil B.1 :	Bilyalı dövülmemiş Ti6Al4V alaşımının yüzey pürüzlülüğü. 118
Şekil B.2 :	A 0.006 dövme şiddetli Ti6Al4V alaşımının yüzey pürüzlülüğü. 118
Şekil B.3 :	A 0.008 dövme şiddetli Ti6Al4V alaşımının yüzey pürüzlülüğü. 119
Şekil B.4 :	A 0.010 dövme şiddetli Ti6Al4V alaşımının yüzey pürüzlülüğü. 119
Şekil B.5 :	Bilyalı dövülmemiş AISI 316 çeliğinin yüzey pürüzlülüğü. 120
Şekil B.6 :	A 0.006 dövme şiddetli AISI 316 çeliğinin yüzey pürüzlülüğü. 120
Şekil B.7 :	A 0.008 dövme şiddetli AISI 316 çeliğinin yüzey pürüzlülüğü. 121
Şekil B.8 :	A 0.010 dövme şiddetli AISI 316 çeliğinin yüzey pürüzlülüğü. 121

METALİK MALZEMELERİN BİLYALI DÖVME UYGULAMASI SONRASI TRİBOLOJİK DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada Ti6Al4V titanyum alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik malzemelerin bilyalı dövme sonrası tribolojik davranışlarının karakterize edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik numunelere farklı Almen dövme şiddetleri (A 0.006, A 0.008 ve A 0.010) ile bilyalı dövme uygulanmıştır. Almen dövme şiddetine bağlı olarak numunelerin yüzey pürüzlülüğü, sertlik, sürtünme katsayısı ve aşınma hızı değerlerindeki değişimler incelenmiştir. Numune yüzey topografyasındaki değişimler için optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu ile incelemeler yapılmıştır. Bilyalı dövme işlemine bağlı olarak numunelerin yüzey pürüzlülüğünde, sertliğinde ve tribolojik davranışlarında önemli oranda değişiklikler gözlemlenmiştir.

Bilyalı dövme işlemi sonrasında numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerlerinde önemli değişiklikler gözlemlenmiştir. Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik malzemelerin yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerleri bilyalı dövme işlemi sonrasında artış göstermiştir. Ayrıca Almen dövme şiddetinin artışı ile yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Buna ek olarak AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerlerindeki yüzde artış oranları, Ti6Al4V alaşımının yüzde artış oranlarından yüksek olduğu görülmüştür. Bu sonuç paslanmaz çelik numunelerin plastik şekil değiştirme kabiliyetinin daha iyi olmasının bir neticesidir.

Numunelerin sürtünme katsayısındaki değişimler çalışma şartlarının kuru ve yağlı olmasına bağlı olarak incelenmiştir. Bilyalı dövme işlemi etkisiyle AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin kuru çalışma şartlarında sürtünme katsayılarında yükselme gözlemlenmiştir. Kayma hızının artması ile sürtünme katsayısı değerlerinin yükseldiği görülmüştür. Uygulanan normal yükün artması ile sürtünme katsayısı değerlerindeki değişim farklılıklar göstermiş olup, sabit artış veya azalış gözlenmemiştir. Ti6Al4V alaşımının kuru çalışma şartlarındaki sürtünme katsayısına bilyalı dövme işleminin etkileri net olarak gözlemlenememiştir. Aynı şekilde kayma hızının artmasına bağlı olarak kuru ortamdaki Ti6Al4V alaşımının sürtünme katsayılarında değişim tespit edilmemiştir. Genel olarak uygulanan normal yükün artışı ile titanyum alaşımının sürtünme katsayısı değerlerinde azalma gözlenmiştir.

Yağlayıcı bulunan çalışma şartlarındaki A0.006 ve A0.008 Almen dövme şiddetli AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin sürtünme katsayılarında düşüş gözlemlenmiştir. Ek olarak kayma hızının artışı ile sürtünme katsayılarında azalma tespit edilmiştir. Normal kuvvetin artması ile sürtünme katsayılarında çok küçük değer artışları gözlenmesine rağmen, bu küçük değer artışlarına göre sürtünme katsayısının arttığı söylenememektedir. Ti6Al4V alaşımını yağlayıcı bulunan sınır sürtünme şartlarındaki sürtünme katsayısının A 0.006 Almen dövme şiddetli numunelerde azalma gösterirken, A 0.008 ve A 0.010 Almen dövme şiddetleriyle

dövülen numunelerde yükselme göstermiştir. Kayma hızının artmasına bağlı olarak ise Ti6Al4V alaşımının yağlayıcı madde bulunan sınır sürtünme şartlarındaki sürtünme katsayısının değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Kayma hızının artması ile dövülmemiş ve A 0.006 Almen dövme şiddeti ile dövülen numunelerin sürtünme katsayıları azalırken, A 0.008 ve A 0.010 Almen dövme şiddetli numunelerde sürtünme katsayılarında daha stabil değerler elde edilmiştir. Uygulanan normal yükün artması ile dövülmemiş ve A 0.006 Almen dövme şiddeti ile dövülen numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinin çok küçük değerlerde azaldığı, A 0.008 ve A 0.010 Almen dövme şiddeti ile dövülen numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.

Sunulan çalışmada kuru ve yağlı çalışma şartlarında Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin aşınma hızları da incelenmiştir. Paslanmaz çelik numunelerin 500 metre kayma mesafesi boyunca 10N normal yük, 1m/s kayma hızıyla kuru sürtünme şartlarındaki aşınma hızları bilyalı dövme işlemi sonrasında artış göstermiştir. Diğer yandan Titanyum alaşımının kuru sürtünme şartlarındaki aşınma hızlarında değişim gözlenememiştir. Titanyum malzemedeki Almen dövme şiddeti artışıyla aşınma hızları değişmezken, paslanmaz çelik numunenin kuru ortamdaki aşınma hızlarında düşüş gerçekleşmiştir. Yağlayıcı madde bulunan sınır sürtünme şartlarında numunelerin aşınma miktarları 500m, 1000m, 2000m, 3000m, 4000m ve 5000m kayma mesafesinde ölçülmüştür. 10N normal yük altında, 1m/s kayma hızında titanyum alaşımı ve paslanmaz numunelerin aşınma hızları bilyalı dövme uygulaması sonrası düşüş sergilemiştir. Ayrıca Almen dövme şiddetinin artışı ile aşınma hızlarının azaldığı görülmüştür. Bunun yanında 3000 metre kayma mesafesinden sonra aşınma miktarlarının durmaya yakın olduğu gözlemlenmiştir. Kuru ve sınır sürtünme şartlarındaki aşınma hızları karşılaştırıldığında Ti6Al4V alaşımının aşınma dayanımının her iki çalışma şartlarında da paslanmaz çelikten daha yüksek olduğu görülmüştür.

500 metre kayma mesafesinde, 10N normal yük altında ve 1m/s kayma hızında titanyum alaşımı ve paslanmaz çelik malzemelerin her iki farklı çalışma şartlarındaki aşınma hızları incelendiğinde Ti6Al4V alaşımının yağlayıcı madde bulunan sınır sürtünme şartlarında aşınma hızlarının en düşük olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda sınır sürtünme şartlarında aşınma dayanımlarının bilyalı dövme işlemi ile arttığı neticesine varılmıştır.

Bilyalı dövülmüş numunelerin yüzeyleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu ile incelenerek yüzey topografyalarındaki değişimler gözlemlenmiştir. Yüksek hızlarda ve tekrarlı bir şekilde malzeme yüzeyine çarpan çelik bilyaların etkisi ile malzemelerin yüzeylerinde plastik deformasyonlar oluşmuştur. Numunelerin yüzeylerinde oluşturulan deformasyonların sonucunda oluşan çukur ve tümsek yapılar yüzey morfolojilerinin incelenmesi çalışmalarında tespit edilmiştir. Aşınma yüzeyleri incelendiğinde Almen dövme şiddetinin değişmesi aşınma mekanizmasını değiştirmezken, aşınma şiddetinde değişikliğe yol açtığı görülmüştür.

Bilyalı dövme işlemi ve işlem parametrelerinin malzeme özelliklerinin önemli derecede etkilediği, tribolojik davranışlarında etkin rol oynadığı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ti6Al4V Titanyum Alaşımı, AISI 316 Paslanmaz Çelik, Bilyalı Dövme, Yüzey Pürüzlülüğü, Sertlik, Sürtünme, Aşınma, Optik Mikroskop, Taramalı Elektron Mikroskobu – (TEM).

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL BEHAVIOUR OF METALLIC MATERIALS AFTER SHOT PEENING IMPLEMENTATION

SUMMARY

In this study, characterization of tribological behaviour of Ti6Al4V alloy and AISI 316 stainless steel bar materials after shot peening implementation is evaluated. It is aimed to understand the relationship between the Almen intensity and tribological behaviour of Ti6Al4V alloy and AISI 316 stainless steel. For that purpose, Ti6Al4V alloy and AISI 316 stainless steel samples were shot peened with different (A 0.006, A 0.008 and A 0.010) Almen peening intensity. Surface roughness, hardness, friction coefficient and wear rate values of samples were examined depending on the Almen peening intensity. Optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM) examinations were performed for to examine the variations on the sample surface topography and possible wear mechanisms were discussed. It is observed that tribological behaviour of the sample was significantly varied depending on the shot peening implementation, surface roughness and hardness.

In this study, not only experimental investigation of shot peening implementation was practiced but also effects of parameters of shot peening on materials are investigated. On the other hand, a comprehensive literature survey was conducted about shot peening implementation.

Shot peening is a cold working process that involves the bombardment of spherical balls against the surface of components, thus it causes high plastic deformation on the surface of materials. Shot peening is an important technology of mechanical treatment of surface that modifies the surface with elastic residual stress distribution, increased surface hardness, and higher near-surface dislocation density. As an important surface treatment method, shot peening implementation is widely used in automotive and aerospace industries in order to improve surface properties. It is used for various components such as railway and automobile leaf springs, helical springs of all types, gears, axle bearings, crankshafts, pneumatic drills, milling cutters, connecting rods, coil springs, cylinder blocks, valve springs, and washers.

Titanium alloys (specifically Ti6Al4V alloy) have been extensively used in aerospace and automotive applications due to their good mechanical, chemical and physical properties such as high strength to weight ratio, high toughness, low density, excellent corrosion resistance and high working temperature. Moreover, Ti6Al4V alloy is significantly stronger than commercial pure titanium while having the same stiffness and thermal properties. These superior properties make Ti6Al4V alloy usage preferable in the blades and disks of aircraft compressors, the rotor blades of helicopters, valves, piping and centrifugal pumps used in industrial waste water systems. However, they present relatively poor wear resistance due to their poor tribological properties.

Stainless steels are used widely due to their high corrosion resistance. Especially in chemical industry, their variety types are developed for different and difficult operation conditions. Stainless steels have been used in food, chemical, automotive, medical, petroleum chemical industry, turbine, marine and white goods industry due to good mechanical properties, easily processability, healthy and easy cleanability properties. Moreover, it can be used in low and high temperature environment. In different operation conditions, new generation alternative materials are needed. As a result, those stainless steels are developed with using of alloy elements. However, these processes are expensive and difficult. On the other hand, studies about the surface improvement treatments of stainless steel materials continue.

For that purpose, investigation of tribological behaviours of Ti6Al4V alloy and AISI 316 stainless steel is aimed after shot peening implementation.

Ti6Al4V alloys and AISI 316 stainless steel materials used in this study was supplied as bar (12mm diameter). After shot peening implementations, the samples were cut as cylinder of 15 mm from these shot peened bars. In experimental stage of this present study, Surface roughness, hardness, friction coefficient and wear rate values of samples were examined depending on various parameters such as the Almen intensity, normal force, sliding speed and operation conditions.

In order to investigate the effects of shot peening implementation, shot peened samples were investigated by using a non-contact laser optical profilometer (Nanovea PS50) and surface hardness of the samples were measured by using a Digital Micro-hardness Tester (Metkon Duroline M). The surface roughness values, 3-D surface morphologies and micro-hardness of the samples were obtained and examined. Three tests for each sample were carried out and then the average surface roughness for each sample was calculated. Moreover, scanning electron microscopy investigations of shot peened surfaces of Ti6Al4V alloy were conducted. The micro-hardness of the samples was measured with an experimental force of 1000gf and a loading time of 15s. Six tests for each sample were carried out and then the average micro hardness for each sample was calculated.

Surface roughness and hardness of Ti6Al4V and AISI 316 stainless steel show significantly alteration with shot peening implementation. After shot peening implementation, compared to untreated sample, surface roughness and hardness values of samples increased as expected. Besides, surface roughness and hardness values of samples increased with increases in Almen intensity. Moreover, the surface roughness and the hardness of AISI 316 stainless steels increased dramatically compared to Ti6Al4V alloy. Thus, this behaviour can be explained due to the better ability of plastic deformation of the stainless steel alloy compared to Ti6Al4V alloy.

Variation of the friction coefficient of the samples was investigated depending on the dry and boundary friction operation conditions. Friction coefficient of AISI 316 stainless steel increased with shot peening implementation in dry friction operation conditions. Friction coefficient of AISI 316 stainless steel increased with increases in sliding velocity. Moreover, friction coefficient of AISI 316 stainless steel changed nonuniform with increasing the normal force. It is observed that in general the coefficient of friction of Ti6Al4V alloy is not affected by shot peening in dry friction operation conditions. In addition to this, in dry friction conditions, friction coefficient of Ti6Al4V alloy don't change with increases in sliding velocity. Generally, friction coefficients of Ti6Al4V alloy decreases with increasing the normal force.

The friction coefficient of AISI 316 stainless steel samples peened with A0.006 and A0.008 Almen intensity decreased in boundary friction operation conditions. Furthermore, the friction coefficient of AISI 316 stainless steel samples decreased with increases in sliding velocity. Friction coefficient of AISI 316 stainless steel don't change with increasing the normal force. Coefficient of friction of Ti6Al4V alloys peened with A0.006 Almen intensity decreased in boundary friction operation conditions. On the other hand, friction coefficients of titanium samples peened with A0.008 and A0.010 Almen intensity increased. Depending on the increase of the sliding velocity, the coefficient of friction of Ti6Al4V alloy has been shown to variability in boundary friction operations conditions. Coefficients of friction of Ti6Al4V alloys peened with A0.006 Almen intensity and unpeened samples decreased with increases in sliding velocity. On the other hand, friction coefficients of titanium samples peened with A0.008 and A0.010 Almen intensity don't show important alteration. In addition, in boundary friction operation conditions, friction coefficients of Ti6Al4V alloy peened with A0.006 Almen intensity decrease in small value and friction coefficients of titanium samples peened with A0.008 and A0.010 Almen intensity increased in small ranges.

In this study, wear rates of Ti6Al4V alloy and AISI 316 stainless steel samples have investigated in dry and boundary friction working conditions. In dry operation conditions, wear tests were conducted with 500 meters sliding distance, 10N normal force and 1 m/s sliding speed. In dry friction operation conditions, wear rates of Ti6Al4V alloy didn't change after shot peening implementation. In addition, AISI 316 stainless steel has exhibited increment in dry friction operation conditions. Wear rates of titanium alloy samples didn't change with increasing Almen intensity. However, wear rate values were exhibited reduction for stainless steel samples in dry friction operation conditions.

In lubricated operation conditions, the amount of wear was measured depending on (500m, 1000m, 2000m, 3000m, 4000m and 5000m) the various sliding distance. Also wear tests were performed with 10N normal force and 1m/s sliding speed. After shot peening implementation, wear rates of titanium alloy and stainless steel decreased at lubricated operation conditions. In addition, wear rates of all samples decreased with the increase of Almen intensity. After sliding distance of 3000 meters, it has been observed that the wear rates of the sample became stable. As a result wear resistances of Ti6Al4V alloy were found to be higher than AISI 316 in dry and boundary friction operation conditions.

Wear rates of titanium alloy and stainless steel samples were compared for 500 meters sliding distance, 10N normal force and 1 m/s sliding velocity. In boundary friction operation conditions, wear rates of Ti6Al4V alloy and AISI 316 stainless steel were observed low in comparison with in dry friction operation conditions. In addition, for all Almen intensities, the wear rate of Ti6Al4V alloy is observed the lowest in boundary friction conditions. As a result, the wear resistance of the material after shot peening applications developed for boundary friction conditions.

Finally, the shot peened surface of the samples were examined by using stereo optical microscope and scanning electron microscope (SEM) in order to understand effect of shot peening implementation. With these methods, the effects of shot peening on the surface morphology of the samples have investigated. Plastic deformation has occurred on surface of materials due to shot peening media, which affect repeatedly and has very high impact velocity. Because of plastic deformations,

pit and mound structures have been identified on sample surface with using optical microscopy. The surface morphology is specifically varied with shot peening implementation. The height of peaks and holes are increased sharply with increasing Almen intensity. Wear mechanisms have not changed with Almen intensity. But wear severity showed significant changes.

According to results of study, the shot peening implementation and process parameters significantly affect the properties of the materials and dramatically play an active role in the tribological behaviors.

Keywords: Ti6Al4V Titanium Alloy, AISI 316 Stainless Steel, Shot Peening, Surface Roughness, Hardness, Friction, Wear, Optical Microscope, Scanning Electron Microscope – (SEM).

1. GİRİŞ

Uzay ve havacılık uygulamaları başta olmak üzere biyomedikal ürünlerde, otomotiv, denizcilik, savunma sektörlerinden oldukça yaygın kullanılan titanyum alaşımları yüksek ağırlık/mukavemet, yüksek yorulma ve korozyon direnci ve düşük yoğunluk, yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek mekanik özellikleri nedeniyle çok sık kullanılan malzemelerdendir. Bu özelliklerinden dolayı endüstriyel alanda çok geniş ve çeşitli kullanım alanına sahip olmasına karşın titanyum alaşımları düşük aşınma dayanımı sergilemektedir. Bu nedenle titanyum alaşımlarının sürtünme ve aşınma özelliklerinin incelenmesi ve yüzey özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla araştırmalar devam etmektedir. Yüksek ve kararlı olmayan sürtünme katsayısı, düşük abrasif ve adhezif sürtünme direnci gibi zayıf tribolojik özelliklere sahip titanyum alaşımlarının endüstriyel alanda kullanım ömürlerinin arttırmak maksadıyla bilyalı dövme uygulaması, plazma ve lazer nitrülasyon, plazma sprej kaplama gibi çok çeşitli yüzey işlemleri uygulanmaktadır.

İnsanoğlu yaşamları esnasından farkında olarak ya da olmayarak bir şekilde tribolojik etkiler altında kalmaktadır. Aşınma ve sürtünmenin etkilerinden pozitif yararlanmanın yanında pek çok endüstriyel ve mühendislik uygulamalarda istenmeyen sonuçlara sebep olunmaktadır. Hatta öyle uygulamalar vardır ki bu iki davranış türü farklı amaçlar ile aynı çalışmalarda karşımıza çıkmaktadır. Birçok sürtünme olan uygulamada malzeme kaybının en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. Sürtünme ve aşınma sonucu malzeme ve enerji kayıplarının minimuma indirilmesi açısından alternatif yüzey işlemleri, yüzey geliştirme uygulamaları gerçekleştirilmektedir.

Bilyalı dövme malzemelerin yüzey sertliğinin arttırılması, mekanik özelliklerin geliştirilmesi ve artık gerilme etkilerinin olumlu yönde kullanılması amacıyla tercih edilen bir uygulamadır. Ayrıca bilyalı dövme işleminin uygulama kolaylığı ve maliyetinin düşük olması bu yöntemi diğer uygulamalara göre üstün kılmaktadır. Bu sebeplerden dolayı yorulma dayanımı arttırmada en yaygın yöntemler arasındadır.

Yüzey işlem yöntemlerinden “Bilyalı Dövme”, bilyaların malzeme yüzeyine yüksek hızlarda tekrarlı bir şekilde çarptırılması prensibine dayanmaktadır. Yüzeye çarpan bilyalar malzeme yüzeyinde ve yüzeyin hemen altında malzeme özelliklerinde (tane büyüklüğü, sertlik, kalıntı basma gerilmesi, pürüzlülük) değişiklikler meydana getirmektedir. Bilyalı dövme işlemi malzemelerin belirli derinlikteki sertlik değerlerini ve yüzey pürüzlülüklerini değiştirdiği için aşınma ve sürtünme davranışında da önemli bir etkiye sahiptir. Bu yüzden bilyalı dövme işlemi ve işlem parametrelerinin malzemelerin tribolojik davranışlarına olan etkilerinin irdelenmesi önem arz etmektedir. Şekil 1.1’de bilyalı dövme operasyonu şematik olarak gösterilmiştir [1].

Şekil 1.1 : Bilyalı dövme operasyonu.

Yüksek lisans tez çalışmasında Ti6Al4V titanyum alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çeliği malzemelerine farklı Almen dövme şiddetlerinde bilyalı dövme işlemi

uygulanmıştır. Çeşitli Almen dövme şiddetleri ile farklı yüzey sertliklerine ve farklı yüzey pürüzlülüğü değerlerine sahip yüzeylerin elde edilmesi amaçlanmıştır. Önceki paragraflarda da belirtildiği üzere titanyum alaşımlarının zayıf olan tribolojik davranışlarının uygulanan bilyalı dövme işlemi ile ne oranda değişeceği tez kapsamında araştırılmıştır. Diğer yandan titanyum malzeme ile paslanmaz çelik malzemenin bilyalı dövme sonrası aşınma davranışları karşılaştırılmıştır. Farklı şiddetlerde dövülen malzemelerin tez kapsamında block on disk aşınma deney düzeneği kullanılarak farklı parametreler altında (hız, kuvvet, çalışma şartları) tribolojik deneyler gerçekleştirilmiş, malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışı detaylı olarak incelenmiştir.

Yüksek lisans tez çalışmasında ilk bölümde literatür araştırmaları anlatılmıştır. Literatür araştırmalarında bilyalı dövme, bilyalı dövme çalışmaları, bilyalı dövme sonrası sergilenen aşınma davranışları incelenmiş ve malzemelerin yüzey karakterizasyonları hakkında bilgi verilmiştir. Sonraki bölümlerde bilyalı dövme, sürtünme ve aşınma konularına yer verilmiştir. Deneysel çalışmalar bölümünde titanyum alaşımı ile paslanmaz çelik numunelerin hazırlıkları ve yüksek lisans tezi kapsamında kullanılan deney tesisatı ve yöntemler detaylı olarak anlatılmıştır. Deneysel sonuçlar kısmında ise bir önceki bölümde detaylı olarak anlatılan yöntemler doğrultusunda gerçekleştirilen deneysel çalışmalarının ve yüzey karakterizasyonlarının sonuçları verilmiş, Ti6Al4V alaşımının aşınma sonrası yüzey karakterizasyonları yapılmış ve AISI 316 paslanmaz çelik malzemenin sonuçları ile karşılaştırılmış. Sonuçlar kısmında elde edilen sonuçlar yorumlanarak açıklanmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Sürtünme ve buna bağlı olarak meydana gelen aşınma, birbirine göre izafi hareket eden yüzeyler arasında kaçınılmaz olarak meydana gelmektedir. Aşınma ile ortaya çıkan malzeme hasarı ve kaybını kontrol etmek amacıyla temaslı yüzeyler arasındaki sürtünme direncini düşürecek yönde yağlayıcı uygulanması olağan bir yöntemdir. Ayrıca sürtünme katsayısını düşürmek ve aşınma direncini arttırmak yönünde yüzey kaplama, yüzey üzerinde oluşturulan küçük çukurcuklar içine yağ emdirilmesi gibi farklı yüzey işlemleri gerçekleştirilmektedir.

Sunulan çalışmada özellikle havacılık sektöründe kullanılmakta olan titanyum alaşımına uygulanan bilyalı dövme uygulamasının bu malzemenin sürtünme ve

aşınma karakteristiğine etkilerinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla, farklı bilyalı dövme şiddetleri ile yüzeyleri dövülmüş olan Ti6Al4V titanyum alaşımı malzemenin numuneler hazırlanmıştır. Bilyalı dövme işlemi sonrasında malzemenin yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerlerindeki değişimler incelenmiştir. Sürtünme ve aşınma deneyleri hem kuru sürtünme hem de yağlayıcı madde bulunan sınır sürtünme çalışma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerlerindeki değişimler sonucunda temaslı hareket halindeki malzemelerin sürtünme katsayısı ve aşınma hızlarındaki değişimleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçları karşılaştırmak amacıyla Ti6Al4V alaşımı ile benzer mekanik özelliklere sahip AISI 316 paslanmaz çelik malzemeye aynı özelliklerde uygulama yapılmıştır.

Bununla birlikte bilyalı dövme uygulaması hakkında genel konular, bilyalı dövme sonrasında malzemelerin aşınma ve sürtünme davranışı hakkındaki literatür çalışmaları irdelenerek tez çalışmalarının sonuçları açıklanmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Titanyum alaşımları (özellikle Ti6Al4V alaşımı) yüksek spesifik mukavemeti, yüksek tokluğu, düşük yoğunluğu ve mükemmel korozyon direnci, yüksek dayanım gibi iyi mekanik, kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptir. Bu özellikleri nedeni ile implant malzemesi olarak tıpta, uzay ve havacılıkta (özellikle türbin, fan kanatçığı ve diski, motor bileşenleri, helikopter rotorlarında, jet motoru yapılarında), otomotiv sektöründe (yarış arabalarında; rotlar, egzoz susturucu bağlantılarında, vanalarda), elektronik, mücevher, kimyasal ve galvanoplasti donanımlarında, ısı değiştiricilerinde, tuzlu su soğutmalı kıyı kuvvet santrallerinde, deniz suyu kullanılan veya dönüştürülen tesislerde yaygın olarak kullanılmaktadır [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

Bu özelliklerinin yanında titanyum alaşımları pahalı ve düşük aşınma dayanımına sahiptir [3, 7, 9]. Titanyum malzemenin fiziksel özellikleri Çizelge 1.1’de verilmiştir [10].

Çizelge 1.1 : Titanyum malzemenin fiziksel özellikleri.

Özellikler	Birimi
Yoğunluk	4,5 g/cm ³
Erime sıcaklığı	1670 °C
Elastiklik modülü	110000 N/mm ²
Genleşme katsayısı	9 10 ⁻⁶ /K

Titanyum alaşımlarının bileşimindeki katkıların türü ve miktarı mekanik özellikleriyle yakından ilgilidir. Asal olmayan bu metalin korozyona olan bu önemli derecedeki mukavemeti, yüzeye bağlanan ve kimyasal etkilere karşı büyük direnç gösteren oksit tabakasından ileri gelmektedir. Asit karışımlarından, oksitleyici asitlerden hatta ve hatta hidroklorik asit ve nitrik asitin 3:1 oranında karıştırılması ile oluşan Kral Suyu gibi kuvvetli asit çözeltilerine bile kimyasal kararlılığa sahip davranış göstermektedir.

Titanyum malzemeler yüksek korozyon direnci, yoğunluğunun düşüklüğüne bağlı olan mükemmel spesifik modül ve spesifik mukavemet gibi üstün özelliklerinin yanında düşük aşınma direnci gibi zayıf özelliklere de sahiptir. İmal usulleri açısından kaynaklı birleştirme, havada ısıtma işlem ve sıcak şekil verme uygulamalarında oksijen alması problemi ile karşılaşmaktadır. Isıtma işlemleri vakum altında veya asal gaz ortamında yapılmalıdır.

Titanyum malzemelerin uygulama alanlarındaki ihtiyaçları karşılaması için çok sayıda geliştirilmiş titanyum alaşımları mevcuttur. Hegzagonal- α alaşımları, hacim merkezli kübik- β alaşımları ve iki fazlı $\alpha+\beta$ alaşımlarına sahiptirler. Başta alüminyum olmak üzere kalay, zirkonyum alaşım elementleri ve oksijen hegzagonal (α) yapısının, vanadyum, krom, demir ve molibden hacim merkezli kübik (β) yapısının kararlılığını desteklemektedir. Jet motorları gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında hegzagonal (α) alaşımları tercih edilirken, hacim merkezli kübik (β) alaşımları ise oda sıcaklığındaki dayanımları daha iyidir. Hacim merkezli kübik (β) alaşımlarının en az %13 vanadyum ve %11 krom gibi ağır alaşım elementleri içermeleri gerektiğinden yoğunluk artmaktadır. İki fazlı $\alpha+\beta$ alaşımları spesifik mukavemetleri ve spesifik modülleri yüksek olan alaşımlardır. Hacim merkezli kübik (β) alaşımları kadar yüksek dayanımlara sahip olmalarına rağmen düşük yoğunluk özellikleri ile tercih sebebidir. (α) yapısının ve (β) yapısının özelliklerini temsil etmelerinden dolayı iki fazlı $\alpha+\beta$ alaşımları çok yaygın olarak sanayi uygulamalarında kullanılmaktadır.

Uygulamalara uygun olarak α , β ve $\alpha + \beta$ alaşımları geliştirilmiş olup genellikle iki veya daha fazla katkı elementi içermektedirler. Çizelge 1.2’de bazı titanyum alaşımları ve bunların mekanik özellikleri görülmektedir [10].

Çizelge 1.2 : Titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri.

Malzeme	Çekme Dayanımı N/mm ²	% 0,2 sınırı N/mm ²	Kopma uzaması A ₅ %	Kristal Yapısı
TiAl5Sn2,5	880	840	18	α
TiAl6V4	1200	1050	7	$\alpha + \beta$
TiV13Cr22Al3	1270	1200	6	β

Ayrıca TiF35, TiF55 ve TiF60 gibi teknikte kullanılan saf titanyum türleri mevcut olup, DIN17850 ve DIN17860 standartlarında belirtilmişlerdir.

Literatürde malzeme yüzeylerinin aşınma davranışının geliştirilmesi amacı ile birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların bir kısmında yüzey sertleştirilerek (nitürasyon, karbürleme, endüksiyon sertleştirilmesi gibi) yüzeylerde çatlak başlangıç direnci arttırılmakta, diğer kısmında da artık basma gerilmeleri meydana getirerek (şahmerdanda dövme, şekil değiştirme sertleşmesi, yüzey haddeleme, su jeti, lazer şok, düşük plastisite fırçalama, yağ jeti, ultrasonik peening ve bilya püskürtme yöntemi vb.) yüzeylerin aşınma davranışlarını geliştirmeye çalışılmıştır. Bu yöntemler basma gerilmesine sahip yüzeyler meydana getirerek aşınma yorulmasını geliştiren yeni favori yüzey geliştirme teknikleridir [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

Yüksek lisans tez çalışması kapsamında bilyalı dövülen Ti6Al4V alaşımının aşınma davranışı karakterize edileceği için bundan sonraki bölümde bilyalı dövme konusundaki literatür çalışmalarına yer verilmiştir.

Dövme işleminin tarihi gelişimi incelendiğinde malzemelerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesinden çok eski tarihlere dayanan bir yöntem olduğu görülmektedir. Haçlı seferlerindeki askerlerin kılıç ve kask dayanımlarının arttırılmasında kullanılan dövme tekniğinin milattan önce 2700 yıllarından beri uygulandığı bilinmektedir. Bunun yanında topçu silahlarının yüzeylerinin dövülerek dayanım arttırmaya gidildiği görülmektedir. 1800'lü yıllarda ise tren akslarının dayanımlarını döverek arttırma çalışmaları yapılmıştır [8].

General Motor'un Buick motor bölümünde 1928-1929 yıllarında yüzey temizleme amaçlı kumlama uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Kumlama uygulamaları sırasında tesadüfen keşfedilen yorulma dayanımındaki artış ile günümüzdeki bilyalı dövme işleminin temelleri atılmıştır. Supap yaylarında uygulanan bu yöntem sonrasında iri taneli kum parametreleri ile temizlenen parçaların yorulma ömürlerinde kayda değer bir gelişme olduğu görülmüştür. Mekanik yüzey işlemleri uygulanan malzemeler,

parlatılan malzemelere göre daha yüksek yorulma dayanımına sahip olup, ömürlerinin daha fazla olduğu belirlenmiştir [8].

II. Dünya savaşı sırasında üretilen tank palet pimlerine J.O. Almen ve J. Staroub tarafından uygulanan dövme işleminin belirgin bir derecede yorulma ömürlerini arttırdığı görülmüştür. İşlemin ucuz olması ve parça kullanım ömrünü arttırması bu işlemin endüstriyel uygulamalarda ticari olarak kullanılmasına olanak sağlamıştır. Ayrıca John Almen kendi ismini verdiği Almen şeritlerini geliştirerek bilyalı dövme uygulamalarında işlem parametrelerini standart hale dönüştürmüştür [18].

Günümüzde askeri ve demir yolu uygulamalarında, otomotiv sektöründe (yay, dişli vb.), havacılık ve uzay sanayinde (türbin kanatçığı ve diskinde), tıpta (implant) bilyalı dövme işlemi çok yaygın olarak kullanılmaktadır [2, 4, 19, 20].

Bilyalı dövme işleminde yüksek hızla malzeme yüzeyine çarpan bilyalar bütün yüzey üzerinde bir ön gerilme katmanı oluşturmakta, oluşan bu ön gerilme (kalıntı basma gerilmesi) yük altında çalışan malzemenin yorulma ömrünü önemli ölçüde artırmakta ve gerilmeli korozyon çatlaklarına karşı direnç meydana getirmektedir [2, 4, 5, 19, 20, 21].

Bilyalı dövme genellikle dairesel temaslı yüklenen parçaların yorulma ömrünü uzatmak için uygulanmaktadır. Ayrıca bilyalı dövme uygulaması, termomekanik yüklemelerin olduğu mühendislik malzemelerinin yüzeye yakın bölgelerinde basma gerilmeleri meydana getirerek yorulma dayanımını geliştirme ve hassas yüzey elde etmek amaçlı son işlem olarak uygulanmaktadır [11, 12, 13, 14, 15, 16].

Kontrol edilebilir şartlar altında ve çok sayıda bilyanın oluşturduğu bir bilya jeti vasıtası ile yüzey işlemi uygulanacak parçaların yüzeylerine uygulanan “Bilya Dövme” işlemi, homojen olmayan plastik deformasyonlar sonucu elde edilen kalıcı basma gerilmesi oluşturulmuş bir tabaka meydana getiren yüzey geliştirme işlemidir[22].

Bilya ile dövme işleminin esas malzeme yüzeyine daha yüksek sertlikte bir küresel bilyanın yüksek hızla çarpması sonucunda dövülen malzemenin plastik şekil değiştirmesine dayanmaktadır. Plastik deformasyona uğrayan bu yüzeyler daha fazla hacim kaplamak isteyecektir. Fakat yüzey altındaki daha derin bölgelerde ise plastik şekil değişimi olmayarak bu şekil değişimine karşı direnç meydana gelecektir. Böylece malzeme yüzeyinde belirli bir derinliğine kadar kalıcı basma gerilmesi

oluşurken, yüzey altında ise çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Yüzeyde oluşturulan basma gerilmeleri malzemenin yorulma dayanımını arttırmakta ve dolayısıyla parçaların çalışma ömürlerinin de açık bir şekilde uzadığı görülmektedir [23].

Dövme işleminin pozitif etkilerinin anlaşılmasından sonraki süreçte araştırmacılar tarafından pek çok çalışma gerçekleştirilmiş olup halen önemli bir araştırma konusu olarak görülmektedir. Yapılan araştırmalarda kalıcı basma gerilmelerinin yorulma ömrünü artırıcı yönde etkiler yaratması, çatlak başlangıcını sınırlaması ve yayılımını engellemesi, ince taneli yapıların mikro sertlik arttırışı bilyalı dövme uygulamalarında genel olarak karşılaşılan önemli sonuçlardır [15, 24, 25, 26, 27]. Bilyalı dövme uygulaması sonrasında malzeme yüzeyindeki sınırlı derinlikteki sertlik artışı pek çok araştırmanın ortak sonucu olmaktadır. Yüzeye yakın bölgelerdeki tane yapısının değişerek ince yapı bir bölge oluşturulduğu görülmektedir. Tane boyutlarının küçülmesi, yüzeyde oluşturulan deformasyonların sebep olduğu dislokasyonlar ve mikro gerilmelerin yoğunluk artışı sonucunda bilyalı dövme işlemin uygulandığı yüzeye yakın bölgelerin mikro sertlikleri gelişmektedir [27, 28, 29]. Bilyalı dövme uygulaması yapılan JIS SUP9 yay çeliklerinde yüzey sertliklerinin bu sayede önemli derecede arttığı tespit edilmiştir [13]. Dövme şiddetinin artışı ile kalıcı basma gerilme alanlarının yüzeyden daha derin bölgelerde oluştuğu, dövme şiddeti ile ilişkili olan bilya boyutları ve hızının artması ile ise oluşan çukurların büyüklüklerinin ve derinliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. [30, 31, 32, 33, 34].

Bilyalı dövme uygulaması sadece potansiyel malzeme dayanımı geliştirme tekniği olmayıp, malzeme yüzey karakteristiğini de geliştirmektedir [19]. Bilyalı dövme uygulaması sonrasında yüzey özellikleri ve yüzey profili değişmektedir. Bu soğuk yüzey geliştirme işleminde iş parçasına çarpan partiküller yüzey morfolojisini değiştirirler. Yüksek hızlarda çarpan bu partiküllerin tekrarlı bir şekilde yüzeyi dövmesi sonucunda yüzeyde plastik deformasyonlar oluşur ve yüzey profilinin değişmesinin yanında yüzey altında milimetre boyutlarında artık gerilmeler oluşur. Bu yüzey geliştirme tekniği parçaların yorulma ve korozyon dirençlerini, mekanik karakteristiklerini geliştirir [35, 36]. Bilyalı dövme uygulaması sonrasındaki yüzey pürüzlülüğündeki artış ile sürtünme aşınması azalırken, yorulma ömründe artış gözlenir. Yüzey pürüzlülüğünün azalması ile yüksek sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma hızı gözlemlenmektedir [37]. Bunun yanında pürüzlülüğün artması ile kuru

sürtünme durumlarında sürtünme kuvvetinin arttığı sonuçları literatürde rastlanmaktadır [38].

Literatür çalışmaları incelendiğinde bilyalı dövme işleminde artan Almen şiddeti ile yüzey kalitesinde azalma meydana gelmiştir. Yüzey geliştirme amacı ile borlama yapılmış olan toz metalürjisi malzemelerin bilyalı dövme uygulamasından sonra kuru ortamda uygulanan pin on disk aşınma sonuçları incelendiğinde, bilyalı dövme sonrası yüzeylerin aşınma dayanımı sadece borlama işlemi görmüş malzemeye nazaran düşüş sergilemiştir. Bilyalı dövme uygulaması sonrasında toz metalürjik malzemenin basma dayanımı ve sertlik değerlerinde önemli artışlar elde edilmiştir [22, 39, 40].

Dülek ve arkadaşları Ç1020 çelik malzemesine uyguladıkları bilyalı dövme işlemi sonucunda bilyalı dövme şiddeti artışı ile genel anlamda yorulma ömrünün arttığını belirtmişlerdir. Artan bilyalı dövme şiddeti ile yüzeyden daha derin bölgelerde kalıcı basma gerilemelerinin oluştuğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca yaptıkları bu çalışmada dövme şiddetinin artışının her zaman oluşturulan kalıcı basma gerilmesi değerlerini arttırmadığını, aşırı şiddetli bilyalı dövme sonucu yüzeyde oluşan plastik deformasyonların artışının o bölgedeki tabakaya aşırı zarar vererek malzeme yüzeyinden tabakaların kaldırılmasına neden olduğu düşünülmektedir [34].

Varol ve Tunay yaptıkları çalışmada alüminyum malzemenin aşınma miktarının deneylerdeki baskı kuvvetinin artması ile artacağını belirtmişler ve bilyalı dövme sonucunda yapılan aşınma deneylerinde bilyalı dövülmüş malzemenin aşınma miktarının başlangıç yol değerlerinde dövülmemiş malzemenin aşınma değerlerine göre daha yüksek olduğunu, bu farkın artan yol değerleri ile kapandığını gözlemlemişlerdir [40].

Ünal ve Varol, saf titanyum ile AISI 1017 düşük karbonlu çelik malzemeler üzerinde yaptıkları bilyalı dövme uygulamasında Almen şiddetinin değişmesi ile sertlik değerlerinde değişimi incelemişlerdir. Almen şiddetinin farklı derinliklerdeki sertlik değerlerini etkilediği belirtmişlerdir. Almen yoğunluğunun artması ile sertlik değerlerinde bir artış olduğu, Almen yoğunluğundaki bir değişim ile yüzeyden aynı derinlikteki noktalarda farklı sertlik değerlerine rastlamışlardır. Bilyalı dövme uygulamalarında yüzeyden istenilen derinlikte bir etki almak için Almen yoğunluğu denilen dövme şiddetine önem verilmesi gerektiği anlaşılmış. Buna ek olarak çelik

numunenin uygulama öncesi sertlik değeri titanyum numuneye göre daha düşük olmasına rağmen, düşük karbonlu AISI 1017 çelik malzemenin yüksek plastik şekil değiştirme kabiliyetinin bir sonucu olarak, bilyalı dövme sonrasında titanyum numunelerin sertlik değerlerinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bilyalı dövme işlemi ile çelik numunelerin titanyum numunelere kıyasla daha fazla etkilendiklerini belirtmişlerdir [29].

Ünal ve arkadaşları yaptıkları diğer çalışmada farklı Almen şiddetleri ile dövülen malzemenin yüzeyde ve yüzey altında olduğu kalıntı gerilme değerlerini, sertliklerini ve yüzey pürüzlülük değerlerini incelemişlerdir. Almen şiddetinin artması ile kalıntı gerilme değerlerinde artış meydana geldiğini, yüzey pürüzlülüğünün arttığını ve yüzey ve yüzey altı sertliğinin arttığını belirlemişlerdir [20].

Bagherifard ve arkadaşları yaptıkları çalışmada farklı Almen şiddetleri (15A ve 7C) ve farklı yüzey doyurma (sarma) oranları (sırasıyla %100 ve %1500) ile dövülen malzemenin yüzeyinde ve yüzeyin hemen altında oluşan kalıntı gerilmeleri ve yüzey pürüzlülük değerlerini ölçmüşlerdir. Almen şiddetinin ve doyurma oranının kalıntı gerilme değerini etkilediği buna ek olarak bilyalı dövme işleminden etkilenen tabakanın dövme şiddetinin artması ile daha da genişlediğini bulmuşlardır. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin de Almen şiddetinin artması ile arttığını belirtmişlerdir [41].

Liu ve arkadaşları gerçekleştirdiği çalışmada TC17 titanyum alaşımına farklı bilya püskürtme basıncında ve farklı sürelerde bilyalı dövme işlemi gerçekleştirmişler, bu işlemlerin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda her iki bilya püskürtme basıncında (0,25 ve 0,35 MPa) dövme süresinin artması ile yüzey pürüzlülüğü değerinin de arttığını bulmuşlardır [42].

Sabelkin ve arkadaşları Ti6Al4V alaşımına yüksek dövme şiddetlerinde (4A, 7A ve 10A) bilyalı dövme işlemi uygulamışlar, yüzey ve yüzeye yakın bölgelerde bilyalı dövme sonucunda oluşan kalıntı gerilme değerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda yüzeyde meydana gelen kalıntı gerilmelerin dövme şiddeti ile doğrudan ilişkili olduğunu bulmuşlardır [5].

Kameyama ve arkadaşları Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası mikro yapı değişimini incelemişlerdir. Bilyalı dövme sonrası tekrarlanan mikro sürme

mekanizmaları sonucunda yüzeyde katmanlar halinde bilyalar tarafından taşınan elementler gözlemlenmişlerdir [19].

Heredia ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada işlem yapılmamış, parlatılmış ve bilyalı dövülmüş Ti-10V-2Fe-3Al alaşımının sertlik, pürüzlülük ve kalıntı gerilme değerlerini incelemişlerdir. Bilyalı dövülen numunelerin yüzey sertliği, pürüzlülüğü ve kalıntı gerilme değerlerinin diğer numunelere kıyasla yüksek olduğu bulunmuştur [43].

Byrne ve arkadaşları kaplama öncesi titanyum alaşımına bilyalı dövme ve kumlama işlemleri uygulamış, bu işlemlerin titanyum alaşımının kaplama adhezyonuna etkisi incelemişlerdir. Her iki yöntemin de yüzey pürüzlülüğü değerlerini arttırdığını ve kaplama adhezyonunu arttırdığını saptamışlardır [3].

Thomas ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada bilyalı dövme işleminin Ti-834 alaşımlarının mikro yapı ve mekanik özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. Mekanik ikizlenmenin bilyalı dövme işlemi ile oluştuğunu, bilyalı dövme oranının artması ile ikizlenme yoğunluğunun arttığını gözlemlenmiştir. Mekanik ikizlenmeden etkilenen tabakanın yüzeyden itibaren ilk 50 µm’da tespit edildiğini, bilyalı dövme oranının artması ile bu derinliğin değişmediğini belirtmişlerdir [9].

Jiang ve arkadaşları gerçekleştirdiği çalışmada bilyalı dövülen ve ardından tekrar bilyalı dövülen Ti6Al4V alaşımının dört nokta eğme yorulma davranışını oda sıcaklığında ve 150°C incelemişlerdir. Bilyalı dövme işlemi sonrası yorulma dayanımı oda sıcaklığında ve 150°C’ de yüksek oranda arttırdığı, tekrarlı bilyalı dövmenin zararlı bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir [6].

Leonard ve arkadaşları yaptıkları çalışmada bilyalı dövme işlemi ile malzemelerin yüzey pürüzlülüğünde, aşınma dayanımında ve yorulma ömründe artış gözlemlenmiştir [37].

Girish ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada bilyalı dövme işlemi uygulanan EN 24 çelik dişlilerinin performansındaki değişimleri incelemişlerdir. Bilyalı dövme işlemi ile temas halinde çalışan dişlilerin yüzeylerindeki yorulma dayanımını önemli derecede arttırdığı gözlemlenmiş, bilyalı dövme uygulaması sonucunda yüzeylerdeki çukurcuk oluşumu limitlerinde gelişmeler elde etmişlerdir [44].

Ağır kamyon gibi kara taşıtlarındaki yakıt verimliliği motor ağırlığındaki azalış ile geliştirilebilmektedir. Özellikle havacılık uygulamalarında kullanılan bir malzeme

olarak bilinen Ti6Al4V alaşımı ağır elik malzemelerle bu amaçla yer değiştirmektedir. Biyel kolu, emme subabı, turbo kanatçıkları ve pistonlar gibi kritik sürtünme ve aşınma özelliklerine sahip motor parçalarında kullanılmaktadır. Ti6Al4V alaşımı mükemmel korozyon direnci, iyi yorulma dayanımı, kabul edilebilir kırılma tokluğu gibi aranan özelliklerin yanında zayıf kayma karakteristiğine sahiptir. Titanyum alaşımları genellikle bozulmalar sonrasında yüksek ve istikrarsız sürtünme katsayıları sergilemektedir. Bilyalı dövme uygulaması ile yüzeyde artık basma gerilmeleri meydana getirilerek Ti6Al4V alaşımının aşınma yorulma performansı gelişmektedir [45].

Yük altında çalışan parçalardaki çatlak başlangıcı ve yayılmasını önlemede bilinen bilyalı dövme işleminin Titanyum alaşımlarının yorulma dayanımlarının attırđı birçok çalışmada görülmüştür [5, 43].

Sürtünme aşınmasına yaratmış olduğu etkiler üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde sürtünme katsayısında deneylerin başında bir azalma meydana geldiği gözlenmektedir. Ayrıca bilyalı dövme uygulaması yapılmış ve parlatma yapılmış titanyum malzemelerin yüzeyleri incelenip karşılaştırıldığında yüzeylerde tespit edilen çatlak miktarının bilyalı dövme uygulaması yapılan parçalarda daha az ve küçük olduğu görülmüştür. Artık gerilmelerin çatlak başlangıcını ve ilerlemesini sınırlamasında etkili bir rol aldığı böylece tespit edilmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda bilyalı dövme işleminin Ti6Al4V alaşımının aşınma yorulması dayanımı, çatlak başlangıcı ve yayılması üzerinde önemli rol oynayarak yararlı etkiler yarattığı belirtilmiştir [4, 43, 46, 47].

Literatürde bilyalı dövme işleminin yüzeylerin kuru veya yağlayıcı ortamdaki sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi adına bir takım çalışmalar yapılmış olup, sayıları oldukça az olduğu öngörülmüştür. Bu anlamda yapılan çalışmalar arasında, Mitrovic ve arkadaşları bilyalı dövme işlemi uygulanan 36CrNiMo4 ile 36NiCrMo16 alaşımlarının aşınma ve sürtünme davranışlarını kuru ve yağlayıcı ortamlarda incelemişlerdir. Block on disk aşınma deney yöntemi ile 3 farklı normal yük ve 3 farklı hızda çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bilyalı dövme işlemi uygulanan yüzeyleri mikrosertlik, sürtünme ve aşınma özellikleri yönünden karşılaştırılmıştır. alışmaları incelendiğinde bilyalı dövme işlemi sonrası yüzey sertlikleri %10 artmıştır. Bilyalı dövme işleminde sonra yüzey sertliği, farklı derinliklerde muntazam olarak aynı olduğu gözlenmiştir. 36CrNiMo4 ve

36NiCrMo16 alaşımlarının bilyalı dövme öncesi ve sonrasındaki pürüzlülük değerleri incelendiğinde yüzey pürüzlülükleri “Ra” bilyalı dövme sonrasında her iki tür alaşım içinde artmıştır. Sürtünme ve aşınma karakteristiğinin bilyalı dövme uygulaması sonrasında geliştiği gözlemlenmiştir. Sürtünme ve aşınma davranışının kuru çalışma şartları için yüksek yük ve kayma hızlarında, yağlı çalışma şartları için ise düşük kayma hızı ve yüksek yüklerde olumlu etkilendiği tespit edilmiştir. Yağlı çalışma ortamlarında hız arttıkça aşınma oranı azalırken kuru çalışma ortamında aşınma oranı hızla birlikte artmıştır. Kuru ve yağlı çalışma şartlarında yük arttıkça aşınma oranının arttığı gözlemlenmiştir. Aşınma partikülleri incelendiğinde hem abrazif aşınma hem de adhezif aşınma mekanizmalarının etkili olduğu görülmüştür. Diğer önemli bir sonuçta yorulma dayanımı açısından bilyalı dövme uygulanan yüzeylerde, işlem uygulanmamış yüzeylere göre daha düşük sayıda çatlaklar gözlemlenmiştir. Bilyalı dövme uygulanan numuneler düşük sürtünme katsayısı ve daha iyi aşınma oranı sergilemiştir. Yağlı çalışmalarda sürtünme katsayısının oldukça düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca yağlı çalışma durumlarında sürtünme katsayısının hız arttıkça azaldığını ve yük arttıkça arttığını gözlemlenmiştir. Kuru sürtünmede ise hız ve yükün artması ile sürtünme katsayısı yükselmiştir. 36NiCrMo16 aşınma direnci ve sürtünme karakteristiği açısından 36CrNiMo4’e göre daha iyi özellikler sergilemiştir [48].

Tsuji ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada plazma karbürlenen ve bilyalı dövme işlemi yapılan Ti6Al4V alaşımının yorulma ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Bilyalı dövülen ve plazma karbürlendikten sonra bilyalı dövme işlemi yapılan numunelerde yüzey pürüzlülük değerlerinin işlem yapılmayan numunelere ve sadece plazma karbürlenen numunelere göre daha yüksek değerde olduğunu belirtmişlerdir. Plazma karbürlenen numunelerde en yüksek sertlik değerlerine ulaşıldığı ancak yüzeyden inildikçe tüm numunelerin aynı sertlik değerine ulaştığı sonucuna varmışlardır. Ball on disk yöntemi aşınma deneylerinde kullanılmış, karbürlenen ve karbürlendikten sonra bilyalı dövülen numunelerin aşınma dayanımı diğer numunelere göre daha yüksek değerlerde çıkmıştır [49].

Ganesh ve arkadaşları implant malzemesi olarak kullanılan Ti6Al4V ve Ti6Al7Nb alaşımlarına farklı şiddetlerde bilyalı dövme işlemi uygulamış, bilyalı dövme işleminin malzemelerin aşınma davranışına ve çekme dayanımına olan etkisini incelemişlerdir. Aşındırıcı test yöntemi olarak pin on disk yöntemini kullanmışlardır.

Bilyalı dövme işlemi yapılmış numunelerin aşınma dayanımının ve akma dayanımının, işlem yapılmamış numunelere kıyasla daha yüksek değerlerde olduğunu, bilyalı dövme şiddetinin artması ile bu değerlerin daha da arttığını gözlemlemişlerdir [2].

Fridrici ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövülmesi sonrası sürtünme aşınma davranışını incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda bilyalı dövmenin Ti6Al4V alaşımının aşınma davranışına herhangi bir etkisi olmadığını gözlemlemişlerdir. Bunun nedeni olarak, bilyalı dövme işleminden etkilenen yüzey tabakasının aşınma deneyleri esnasında ortadan kalkmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir [4].

Heredia ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada işlem yapılmamış, parlatılmış ve bilyalı dövülmüş Ti-10V-2Fe-3Al alaşımının sürtünme aşınma davranışını incelemişlerdir. Numunelere ait sürtünme aşınma davranışının birbirinin aynı olduğunu gözlemlemişlerdir [43].

Dong ve arkadaşları Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme işlemi sonrası blok on disk aşınma davranışını incelemiştir. İşlem yapılmamış numunenin ve bilyalı dövülen numunelerin benzer aşınma davranışı gösterdiğini gözlemlemişlerdir [50].

Literatürde birçok araştırmacı çeşitli malzemelere uygulanan bilyalı dövme işlemi sonrası malzemenin yüzey sertliğini, yüzey pürüzlülüğünü, kalıntı yüzey gerilmesini, yorulma dayanımını, çekme dayanımını, yüzeyde gerçekleşen deformasyon mekanizmalarını incelemiştir [3, 5, 19, 20, 41, 42].

Ancak sınırlı sayıda araştırmacı bilyalı dövme sonrası malzemenin aşınma davranışındaki değişimini incelemiştir [2, 4, 43, 50].

Ganesh ve arkadaşları yaptıkları çalışmada bilyalı dövme işleminin malzemenin pin on disk aşınma davranışına etkisini incelemişlerdir. Bilyalı dövme sonucunda yüzeyin sertliğinin artması ile malzemenin aşınma dayanımının da arttığı sonucuna varmışlardır [2].

Fridrici ve arkadaşları bilyalı dövme sonrası malzemenin titreşimli aşınma davranışını incelemiştir. Bilyalı dövme yapılmış numunelerin başlangıçta sürtünme katsayısı değeri bilyalı dövme işlemi yapılmış numunelere göre daha düşük çıkmıştır. Ancak aşınma deneyi sırasında, bilyalı dövme işlemi etkisiyle plastik şekil değiştiren katmanın yüzeyden kalkması sonucunda, işlem yapılmamış numunelere yakın

sürtünme katsayısı değerlerini elde etmişlerdir. Sonuç olarak bilyalı dövme işleminin malzemenin sürtünme katsayısı değerine etkisi olmadığı sonucuna varmışlardır [4].

Ancak bazı araştırmacılar şiddetli bilyalı dövme işlemi sonucunda yüzey ve yüzey altında oluşan çatlakların malzemelerin yorulma ömrünü azalttığı, malzemenin aşınma dayanımını düşürdüğü belirlemişlerdir [20, 51].

Zhang ve Liu yaptıkları çalışmada bilyalı dövme işlemi uyguladıkları Ti811 alaşımının yüksek sıcaklıklarda aşınma davranışını incelemişlerdir. Bilyalı dövme nedeni ile pürüzlü yüzeyde mikro çatlakların kolaylıkla oluştuğunu bu nedenle malzemenin aşınma dayanımının azaldığını gözlemlemişlerdir [51].

Buna karşılık Tsuji ve arkadaşları gerçekleştirdiği çalışmada bilyalı dövülen Ti6Al4V alaşımının ball on disk aşınma davranışı incelemişler ve bilyalı dövülen Ti6Al4V alaşımının yüzey pürüzlülüğünün fazla olmasına rağmen aşınma dayanımının işlem yapılmamış malzemeye göre daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir [49].

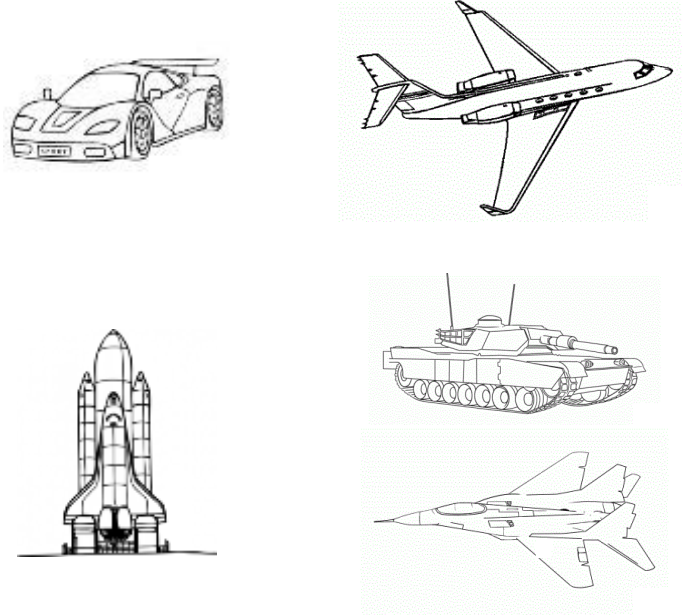
Literatür çalışmaları incelendiğinde bilyalı dövme sonrası malzemelerin yüzey ve yüzey altı özelliklerinin karakterize edildiği görülmektedir. Bilyalı dövme sonrası malzeme yüzeylerinin pürüzlülük, sertlik, artık gerilme değerlerinin ölçüldüğü, tane yapısı, dislokasyon yoğunluğunun, aşınma davranışının ve yüzey morfolojisinin incelendiği görülmüştür. Ancak özellikle bilyalı dövme sonrası metal malzemelerin sürtünme ve aşınma davranışı inceleyen, uygulamanın etkilerini bu açıdan kapsamlı olarak araştıran yeteri kadar çalışmaya rastlanılmamıştır. Yapılan birkaç çalışmada ise farklı sonuçlar elde edilmiştir. Literatürdeki bu eksiklik göz önüne alınarak bu çalışmamın yapılmasına karar verilmiştir.

Bu sebeple yüksek lisans tez çalışmasında Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası aşınma davranışı farklı operasyon parametreleri (dövme şiddeti, hız, normal yük, ortam - çalışma şartları) kullanarak detaylı olarak incelenmiştir.

2. BİLYALI DÖVME

2.1 Amaç

Bilyalı dövme (Shot Peening) küresel formdaki metal malzemenin hedef malzeme üzerine belirli çalışma şartları altında ve standartlara göre püskürtülerek yapılan, malzeme içerisinde artık gerilmeler oluşturulması temeline dayanarak malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmeye yönelik bir soğuk şekil verme işlemidir. Yorulma dayanımı gerektiren malzemelerin gereksinimi duyulan, yüksek teknoloji gerektiren otomotiv, havacılık, savunma ve uzay sanayisinde çok yaygın olarak kullanılan bu tekniğin temel prensibi gerilmeli korozyon çatlaklarına karşı direnci ve malzemenin yorulma dayanımı artırılmasını sağlayan plastik deformasyonlar ile artık basma gerilmeleri oluşturmaktır. Şekil 2.1’de bilyalı dövme tekniğinin kullanıldığı sanayiler gösterilmektedir.



Şekil 2.1 : Bilyalı dövme kullanılan yüksek teknoloji gerektiren sanayiler.

Bu sektörlerdeki gelişmeler ile bilyalı dövme uygulama alanları artmaktadır. Havacılık endüstrisinde kullanılan malzemelerin üretim aşamasında bilyalı dövme uygulaması önemli yer tutmaktadır. Hava taşıtlarının motor ve gövde aksamlarında

sıklıkla bilyalı dövme uygulaması gerekmektedir. Uçak iniş takımları, kanatlar pervaneler, türbinler bu tekniğin görüldüğü uygulama yerlerdir. Ayrıca önemli bir pazar payına sahip olan otomotiv sektöründe başta yük altında kullanılan yay malzemeleri olmak üzere dişliler, burulma çubuğu, kam milleri, krank milleri, biyel kolları vb. çeşitli komponentlerin yorulma dayanımı arttırmak amaçlı sıklıkla uygulanır. Bu uygulama kumlamadan farklı amaçla yapılmakla birlikte sonuç olarak bu yöntem ile yorulma, korozyonlu yorulma ve gerilmeli yorulma dayanımı artırımının yanında yüzey temizliği işlemi de yapılmış olunmaktadır.

Şekil 2.2 bir dişli çarkın diş yüzeylerine, Şekil 2.3 ise bir hava taşıtının parçalarına uygulanan bilyalı dövme işlemi görülmektedir [8, 52].



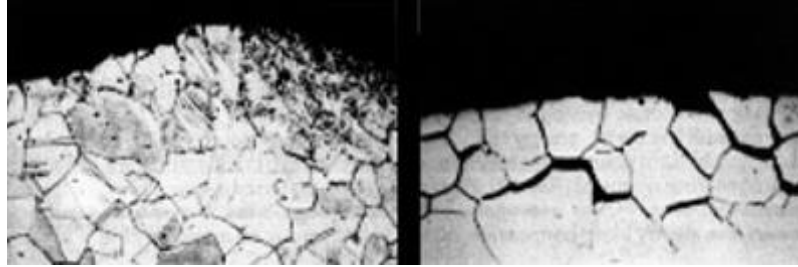
Şekil 2.2 : Bir dişlinin dişlerinin bilyalı dövme işlemi uygulaması.

Malzemelerin içyapısı ve yüzey özelliklerine göre değişen aşınma, korozyon, yorulma davranışları bilyalı dövme uygulaması ile geliştirilmeye çalışılmaktadır. Malzeme yüzeyinde oluşan aşınma, korozyon ve yorulma hasarları genellikle giderek malzemenin iç kısımlarına doğru ilerler. Bu hasarların önlenmesinde önemli etkiye sahip içyapı tane boyutlarını nano boyutlarına dönüştürülmeye çalışılmaktadır. Malzemedeki bu hasar mekanizmalarına karşı direnç için malzemenin tüm yapısını nano taneli yapıya dönüştürmeye gerek kalmadan, malzeme yüzeyinin ince ve nano taneli yapılardan oluşturulması ile dayanım arttırılmaktadır. Yüksek basınçta burulma, kayma aşınması, bilyalı dövme, ses üstü bilyalı dövme ve basınçlı hava yardımıyla uygulanan bilyalı dövme teknikleri ile oluşturulan aşırı plastik deformasyonlar neticesinde ince taneli yapılar elde

edilmektedir. Şekil 2.4'te 304 paslanmaz çelik plakanın bilyalı dövme uygulaması sonrasındaki tane yapısındaki değişim gösterilmiştir [53].



Şekil 2.3 : Bir hava taşıtının parçalarına uygulanan bilyalı dövme işlemi.



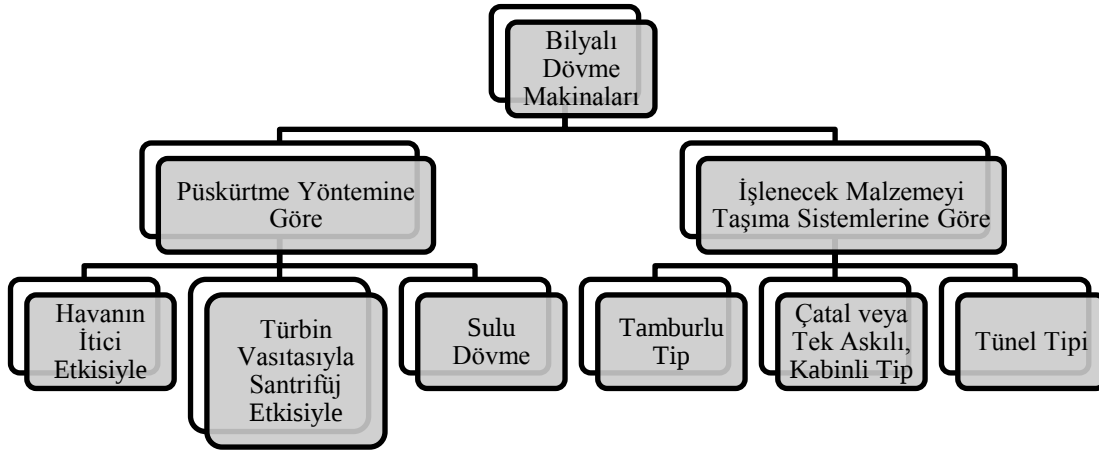
Şekil 2.4 : Bilyalı dövme uygulaması sonrası tane yapısı değişimi.

Yorulma dayanımını arttırmak amacı haricinde, bilyalı dövme uygulaması yüzey sertliğini arttırmak amacıyla da kullanılan bir yöntemdir. Makina elemanlarının kullanıldığı tüm sanayi uygulamalarında gereksinim halinde kullanılabilir bir yöntemdir. Yüzey gözeneklerin giderilmesi, yüzey temizleme ve hazırlanması, sertleştirme, yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ve kalitesinin artırılmasında parça üretim metoduna, şekline, metalinin türüne bağlı olmaksızın ucuz ve kolay uygulanabilmesi tekniğin avantajları arasındadır.

2.2 Bilyalı Dövme Makinaları

Ticari açıdan çok farklı ve fazla sayıda bilyalı dövme makinası var olup, genel anlamda abrasif bilyaların püskürtmesi ve işlem görececek malzemenin hareket ettirme mekanizması farklılığına göre bu işlem parametrelerinin otomatik olup olmamasına bağlı olarak tasarımlar iki kategoride incelenebilir. Şekil 2.5'te bir takım farklı özellik ve türlerdeki bilyalı dövme makinaları sınıflandırılmıştır [54]. En temel olarak bilyaların püskürtülmesinde basınçlı havanın itici ve türbin vasıtasıyla

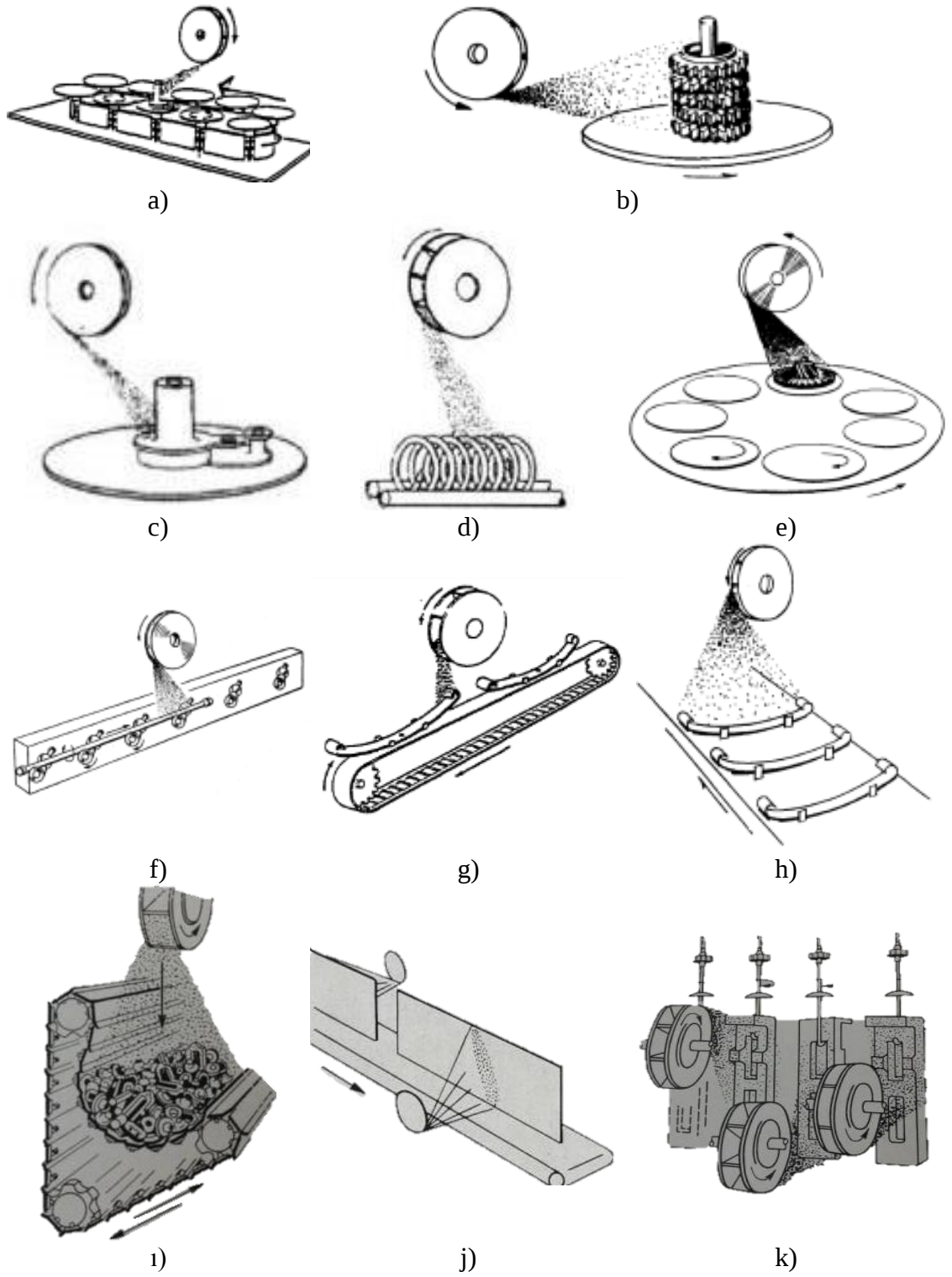
santrifüj etkisi sonucundaki püskürtme yöntemleri kullanılmakta olup farklı tür ve prensibi olan makinalar bulunmaktadır. Basınçlı havanın itici etkisiyle çalışan bilyalı dövme makinaları da abrasiflerin pozitif veya negatif basınç etkisiyle hızlandırılmasına göre iki gruba ayrılır. Her iki basınçlı hava etkisiyle çalışan makinaların kendilerine has özellikleri olup, çeşitli partikül türlerinin kullanılması ve nozul yardımıyla en dar girintilerin-çıkıntıların işlenebilmesi en önemli avantajlarıdır. Bir türbin vasıtasıyla santrifüj etkisi sonucunda püskürtme temeline dayalı bilyalı dövme makinalarında yüksek devirlerde döndürülen diskin merkezinden yerçekimi ve vakum etkisiyle abrasifler beslenir, bilyalar disk üzerindeki paletlerden kayarak malzeme yüzeyine fırlatılırlar. Bu yöntemle hızlı bir şekilde yüzeylerin bilyalı dövülmesi gerçekleşir. Bilyalı dövme makinaları işlenecek malzemenin taşıma sistemlerine göre de gruplanmaktadır.



Şekil 2.5 : Bilyalı dövme makinalarının sınıflandırılması.

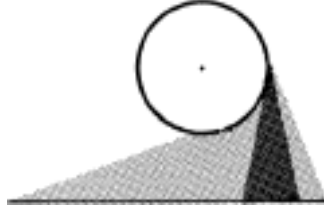
Ayrıca parça özelliklerine göre değişen kumlama cihazlarından davul tipi bilyalı dövme cihazları kaba malzemelerin, lineer konveyörlü cihazlarda helisel yayların, dönel tablalı bilyalı dövme makinalarında ise küçük malzemelerin bilyalı dövme işlemi ile yüzey geliştirme uygulamaları yapılmaktadır.

Bilyalı dövme makinalarının farklı tiplerdeki tutma ve taşıma sistemleri Şekil 2.6’te gösterilmiştir [55, 56]. Şekil 2.6a’da Düz hat, Şekil 2.6b’de döner tutucu, Şekil 2.6c’de eksenel dönüşlü, Şekil 2.6d’de lineer konveyörlü, Şekil 2.6e’de dairesel hatlı, Şekil 2.6f’de radyal dönüşlü, Şekil 2.6g ve h’de kayış konveyörlü, Şekil 2.6ı ve j’de paletli ve Şekil 2.6k’da askılı sistemler şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.6 : Bilyalı dövme makinalarında kullanılan sistemler.

Şekil 2.7’de türbin vasıtalı sistemlerin kullandığı santrifüj etkisi ile bilya püskürtme tekniğindeki partikül yoğunluğunun akış içerisindeki dağılımı ifade edilmeye çalışılmıştır.



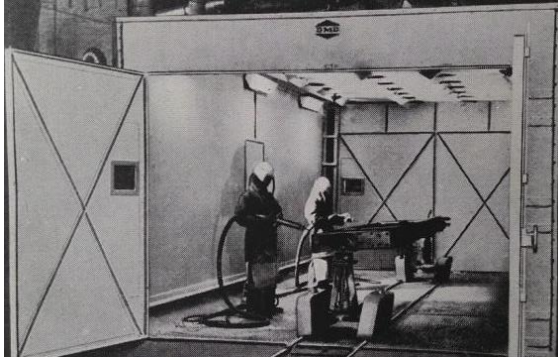
Şekil 2.7 : Bilya akışı içerisinde bilya dağılımının yoğunluk değişimi.

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan otomatik bilyalı dövme makinasının görüntüsü Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8 : Otomatik bilyalı dövme makinası.

Şekil 2.9a ve Şekil 2.9b’de operatör tarafından manuel olarak bilyalı dövme yapılabilinen bir kabin resmedilmektedir [56, 57].



a)



b)

Şekil 2.9 : Operatör kontrollü bilyalı dövme işlemi ve kabini.

Nozul kullanılarak malzeme yüzeyine en etkili bir biçimde püskürtülen bilyaların kullanıldığı hava basınçlı sistemler en yaygın kullanılan ticari ürünlerdir. Yer çekimi kuvvetinden yararlanılan ve nozul sayesinde belirli ve zor bölgelere uygulama

olanağı sağlayan hava püskürtmeli bilyalı dövme makinaları klasik bilyalı dövme makinalarına göre üstün özelliklere sahiptir. Bunun yanında santrifüj etkisiyle çalışan makinaların daha az enerji harcayarak daha fazla alanı, daha hızlı ve seri üretime adapte edilebilir şekilde işlemesi nedeniyle rakipsiz kılan özellikleri göz ardı edilememektedir.

Türbin vasıtalı santrifüj etkisiyle çalışan makinaların kullanılmadığı yerlerde belirtilen üstün özelliklerinden dolayı hava püskürtmeli bilyalı dövme makinaları kullanılmaktadır. Şekil 2.10a ve Şekil 2.10b’de hızlanan havanın yarattığı vakum etkisi ile bilya püskürtmeli bilyalı dövme makinaları verilmiştir. Şekil 2.10c’de operatörün kontrolü ile gerçekleştirilen bir bilyalı dövme işlemi görülmektedir [56].



a)



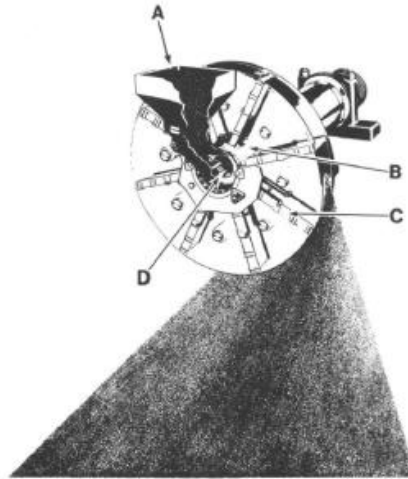
b)



c)

Şekil 2.10 : Hava yardımıyla püskürtmeli bilyalı dövme makinaları.

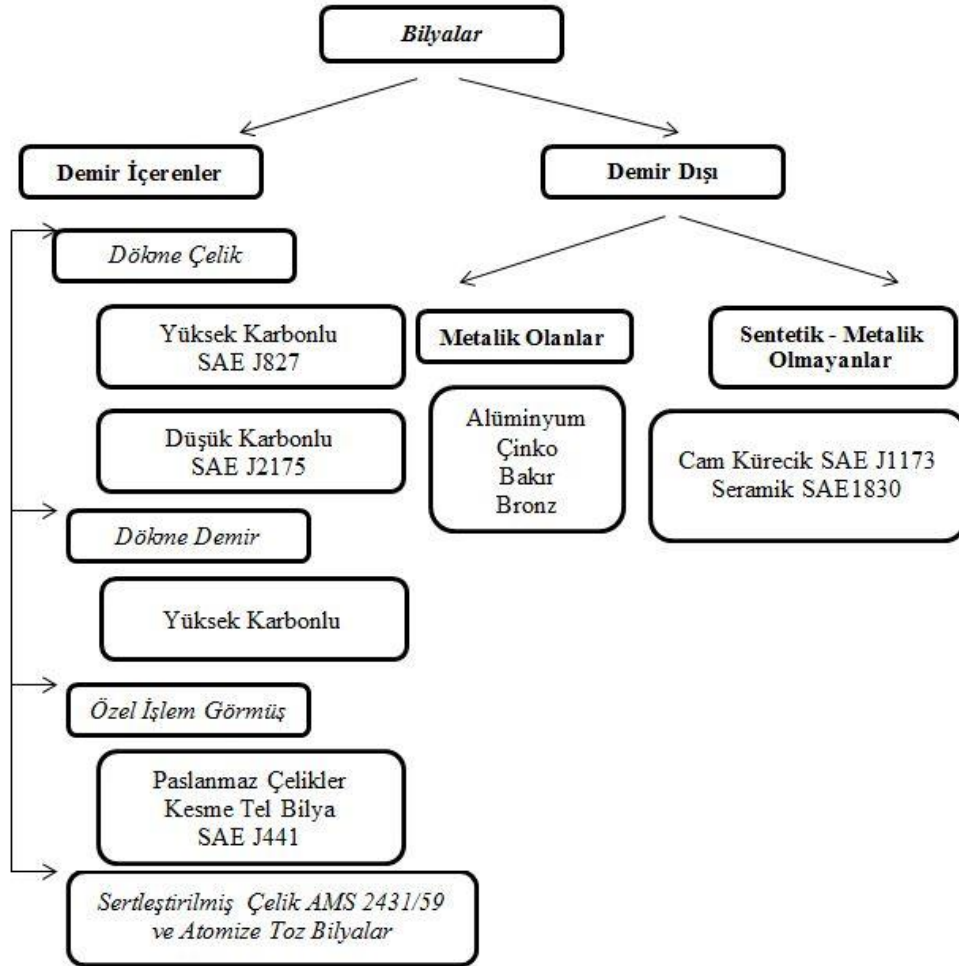
Şekil 2.11’de türbin vasıtalı santrifüj etkisiyle çalışan bir bilyalı dövme makinasının çalışma prensibi resmedilmiştir [55]. Grafikte belirtilen A, B, C ve D bölümleri sırasıyla bilya besleme hunisi, kontrol kafesi, kanatçıklar ve çarktır.



Şekil 2.11 : Türbin vasıtasıyla püskürtmeli bilyalı dövme makinası çarkı.

2.3 Bilyaların Sınıflandırılması

Bilyalı dövme işleminde malzeme yüzeyine püskürtülen bilyalar farklı sınıflar altında gruplandırılmıştır. Bilyalı dövme işleminin sonuçları üzerinde önemli etkiye sahip olan bilyalı dövme işleminde kullanılan çeşitli bilya tipleri Şekil 2.12’de verilmiştir [58, 59].



Şekil 2.12 : Bilyalı dövme uygulamalarında kullanılan çeşitli bilya türleri.

Bilyalı dövme işlemlerinde kullanılan bilya boyut ve özellikleri SAE standartlar halinde düzenlenmiş olup bu standartlar ve içerikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Bilya SAE standartları ve içerikleri.

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

Dövme işlemini etkileyen parametrelerin başında gelen bilya seçiminde bilya türü ve özellikleri üzerinde durulması gerekli noktalardır. Bilya kütlesi ile bağıntılı olan dövme şiddetini elde edebilmek için doğru parametrelerin seçilmesi gereklidir. Yüksek dövme şiddeti istenilen uygulamalarda (Almen C ve Almen A) kesme tel bilya veya çelik bilyalar, daha düşük dövme şiddeti (Almen N) uygulamaları için ise cam ve seramik bilyalar tercih edilebilir. Çelik bilyalar çok yaygın olup, santrifüj dövme makinalarında tercih edilirler. Kesme tel bilyaların karbon ve paslanmaz çelik türleri olup, paslanmaz çelik veya demir dışı malzemeler dövüleceği uygulamalarda paslanmaz çelik kesme tel, cam ve seramik bilyalar kullanılarak kirlenme sorunları engellenmiş olur.

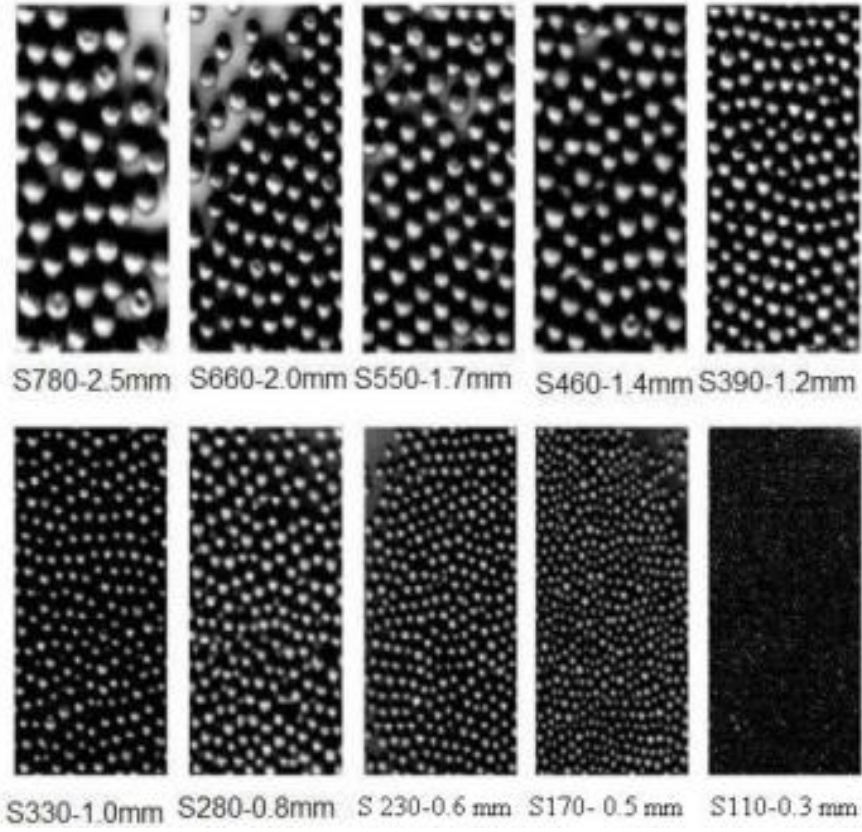
Bilyalı dövmede kullanılan bilya türlerinin sınıflandırılmasında bilya üreticileri, uluslararası kurumlar, kuruluşlar ve son kullanıcılar tarafından hazırlanan standartlar kullanılmaktadır. Society of Automotive Engineers “SAE” tarafından hazırlanan standartlar en yaygın olanlarıdır. SAE, “J” genel bilyalı dövme uygulamaları için olduklarını belirlerken, Aerospace Materials Specification “AMS” havacılık sanayisi için hazırladıkları standartlardır. Standartlardaki aşındırıcılar ve genel özellikleri Çizelge 2.2’de verilmiştir [58].

Çizelge 2.2 : Bilyalı dövme uygulaması için kullanılan malzemelerin standartları.

Aşındırıcı Tipi	Standartlar	Sertlik
Çelik Bilya	AMS 2431/1 veya AMS2431/2	45-52 HRC veya 55-62 HRC
Tel Kesme	AMS 2431/3 veya AMS 2431/8	45-52 HRC veya 55-62 HRC
Cam Kürecik	AMS 2431/6	48-52 HRC
Seramik Bilya	AMS 2431/7	58-63 HRC

Bilya tanımlarında baştaki “S” harfi bilya malzemesinin çelik olduğunu belirtir. Çelik bilyalar SAE J444 standartlarına göre S70 ile S1320 değerleri arasında değişir. Bu değerlerin on binde biri inç cinsinden mertebe olarak bilya çaplarını belirtmektedir. Çizelge 2.3 SAE J444 standartlarındaki bilyaların elek açıklıklarına göre sınıflandırılmış halini göstermekte olup, Şekil 2.13’te sınıflandırılmış bilyaların görüntüleri mevcuttur [58].

Şekil 2.14’te bilyalı dövme işleminde kullanılan çeşitli türde ve malzemedan yapılmış bilyalı dövme uygulaması medyalarının görüntüleri verilmiştir. [60]



Şekil 2.13 : Çelik bilyaların büyüklüklerine göre sınıflandırılması.



Şekil 2.14 : Farklı türlerdeki bilyalı dövme uygulaması medyaları.

Çizelge 2.3 : SAE J444 standartlarına göre çelik bilyalar.

Elek Açıklığı (mm ⁴)	Elek Tanımı	Nominal Elek Açıklığı (in)	S1320	S1110	S930	S780	S660	S550	S460	S390	S330	S280	S230	S170	S110	S70
4.75	4	(0.187)	0%max	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
4.00	5	(0.157)	--	0%max	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
3.35	6	(0.132)	90%MIN	--	0%max	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2.80	7	(0.111)	97%MIN	90%MIN	--	0%max	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2.36	8	(0.0937)	--	97%MIN	90%MIN	--	0%max	--	--	--	--	--	--	--	--	--
2.00	10	(0.0787)	--	--	97%MIN	85%MIN	--	0%max	0%max	--	--	--	--	--	--	--
1.70	12	(0.0661)	--	--	--	97%MIN	85%MIN	--	5%max	0%max	--	--	--	--	--	--
1.40	14	(0.0555)	--	--	--	--	97%MIN	85%MIN	--	5%MAX	0%max	--	--	--	--	--
1.18	16	(0.0469)	--	--	--	--	--	97%MIN	85%MIN	--	5%MAX	0%max	--	--	--	--
1.00	18	(0.0394)	--	--	--	--	--	--	96%MIN	85%MIN	--	5%MAX	0%max	--	--	--
0.85	20	(0.0331)	--	--	--	--	--	--	--	96%MIN	85%MIN	--	10%MAX	0%max	--	--
0.71	25	(0.0278)	--	--	--	--	--	--	--	--	96%MIN	85%MIN	--	10%MAX	--	--
0.60	30	(0.0234)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	96%MIN	85%MIN	--	0%max	--
0.50	35	(0.0197)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	97%MIN	--	10%MAX	--
0.425	40	(0.0165)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	85%MIN	--	0%max
0.355	45	(0.0139)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	97%MIN	--	10%MAX
0.300	50	(0.0117)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	80%MIN	--
0.180	80	(0.0070)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	90%MIN	80%MIN
0.125	120	(0.0049)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	90%MIN
0.075	200	(0.0029)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

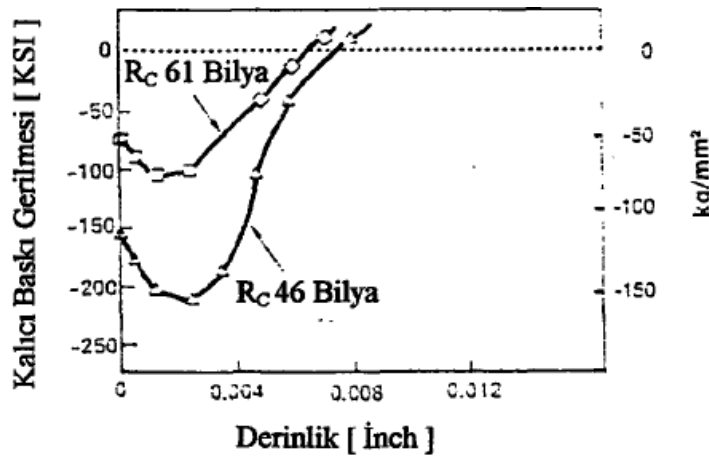
2.4 Bilyalı Dövme Parametreleri

Bilyalı dövme işlemine etkileyen parametreler çok fazla sayıda olup operasyon parametreleri, bilya, hedef malzeme, ortam ve test özellikleri olmak üzere 4 ana başlık altında incelenebilir.

Bilya boyutu, bilyanın sertliği, bilyadaki kırılma hasarları ve bilya kalitesi bilya özelliklerinden kaynaklanan önemli parametreler arasındadır. Bunun yanında bilya hızı, bilyanın çarpma açısı, dövme şiddeti, doyurma oranı, işlem süresi, nozul çapı, nozul-parça mesafesi, akış hızı, iş parçasının geometrisi, sertliği, deformasyon davranışı ve ortam-hedef malzeme sıcaklıkları etkili diğer işlem parametreleridir [54, 59].

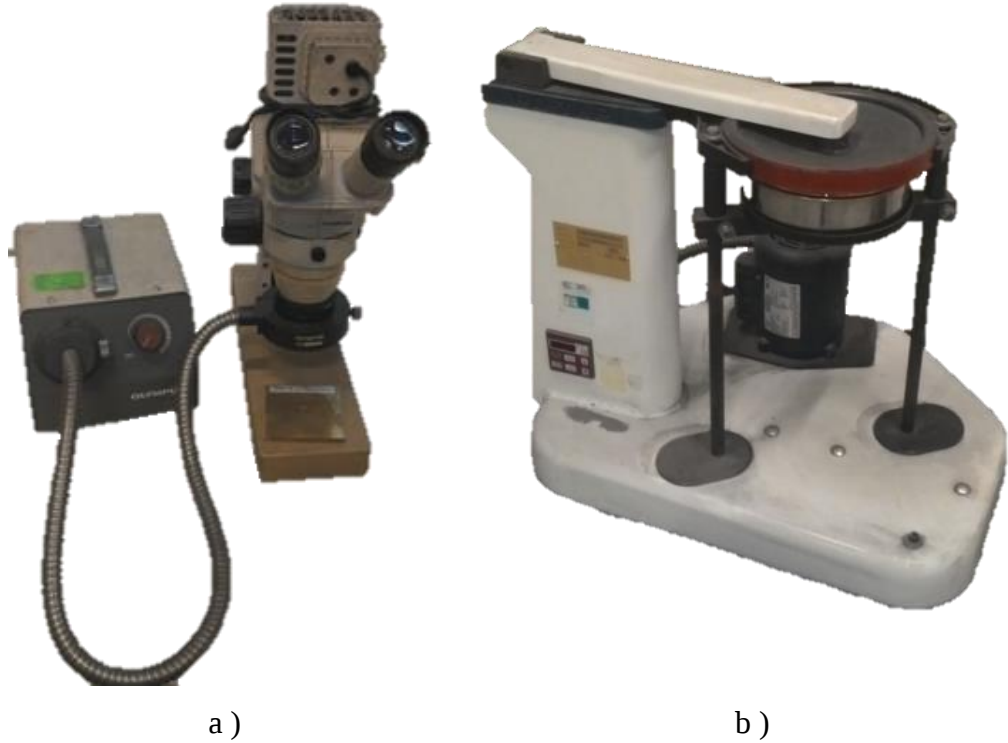
Bilya boyutları yüzey pürüzlülüğünden, nüfuziyet derinliğine, yüzey hasarı, dövme şiddeti ve parça geometrisi ile yakından ilgilidir. Bilya boyutlarının artması ile dövme şiddeti ve nüfuziyet derinliği artarken yüzey doyurma oranı azalabilir. Ayrıca yüksek dövme şiddetlerinde kullanılan büyük boyutlu bilyalar ile yapılan dövme işlemlerinden yüzey hasarları gözlenebilir. Ayrıca bilya boyutlarının artırılmasının dövme şiddetine pozitif etki yaparken dövmenin homojen bir şekilde yapılmasını zorlaştırır [59].

Kalıcı basma gerilmesi elde edebilmek için bilya sertliğinin hedef malzeme sertliğinden daha yüksek olması istenir. Bilya sertliğinin nüfuziyet derinliği ve kalıcı baskı gerilmesi üzerindeki etkileri Şekil 2.15'te verilmiştir [59]. Bilya sertliği nüfuziyet derinliğini önemli derecede etkilemektedir.



Şekil 2.15 : Bilya sertliği değişimi ile çelikte gerçekleşen gerilme değişimi ve nüfuziyet derinliği.

Bilya sertliğindeki azalış ile bilya hasarına bağlı olarak maliyet artışı gerçekleşir. Gönderilen bilyalar ne kadar sert olursa o kadar bilya yüzeyinde daha az şekil değişimi gerçekleşir. Çok sert ve kırılgan malzemeler kullanılmamalıdır. Sert ve tok malzemeler tercih sebebidir [54]. Sistemdeki hasar görmemiş, sağlam bilya yüzdesi %85'in altına inmemelidir. Bilya sertliği artması nedeniyle oluşan bilya kırılmaları sonucunda dövme şiddetinin azalması yanında hedef malzeme ciddi hasarlar ile karşılaşır. Kırık, keskin kenar ve köşelere sahip bilyaların kullanılması neticesinde parça yüzeyinden yırtılmalar, çizikler oluşabilir bu hasarlar gerilme merkezlerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Ayrıca bu hasarlar sonucunda yorulma direnci artışı negatif yönde etkilenir. Bunun yanından bu tip ürünler kullanılarak dövme makinalarının da ömürlerinde azalmalar ve cihaz içinde aşınmalar görülebilmektedir [59]. Deforme olmuş bilyaların kullanılması ile parçaların yorulma ömürlerinde kötüleşme olmaması için hasarlı bilyaların sistemden uzaklaştırılması gerekmektedir. Bilyaların kontrolü için kullanılan optik mikroskop ve elek sistemleri sırasıyla Şekil 2.16a ve Şekil 2.16b' de verilmiştir.



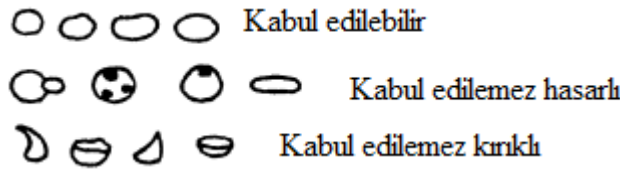
Şekil 2.16 : Bilya hasar kontrolünde kullanılan mikroskop ve elek sistemleri.

Çizelge 2.4'te “Shot Peening of Metal Parts” başlıklı SAE AMS-S13165 standartlarında belirtilen kullanılabilir hasarlı bilya miktarının sınırlamasını veren değerler bulunmaktadır [59].

Çizelge 2.4 : Bilya hasarlarında kabul edilebilirlik sınırları.

Bilya	Örnek boyutları (inç)	Deforme olan kabul edilebilir bilya sayısı
S780	1 x 1	11
S460	1 x 1	32
S330	1/2 x 1/2	16
S230	1/2 x 1/2	32
S170	1/4 x 1/4	16
S130	1/4 x 1/4	23
S110	1/4 x 1/4	32
S70	1/4 x 1/4	45

Şekil 2.17’de SAE AMS-S13165 standartlarında belirtilen bilyaların kabul edilebilir ve edilemez olan hasar görüntüleri şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.17 : Kabul edilebilir ve kabul edilemez bilya hasarları.

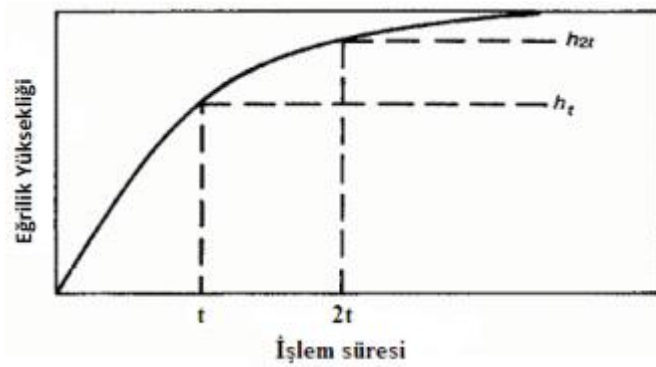
Kullanılan bilyalı dövme makinalarına göre bilya hızı hava basıncından ve türbin-çark hızlarından etkilenmektedir. Bilya hızının artması ile dövme şiddeti, bilya kırılma oranı, maliyet artar. Bilya hızı seçiminde bilya boyutu, sertliği ve kütle göz önünde bulundurulmalıdır. Uygulama bilyanın çarpma etkisine dayalı olduğu için bilya hızı, kinetik enerjisi ve momentumu önemlidir. Bilya hızında ayrıca nozul geometrisi de oldukça önemlidir. Düz kanallı bir nozuldan çıkan bilya hızı ventüri kanallı bir nozuldan çıkan bilya hızına göre çok daha düşüktür [54].

Nozul veya türbin ile dövülecek parça arasındaki mesafede oldukça önemlidir. Küçük parçalarda parçalar türbine yakın olması, büyük parçalarda ise her noktaya bilyaların teması için parçanın türbine olan mesafesinin arttırılması gereklidir [54]. Türbin ve dövülecek parçaların arasındaki mesafeye göre de dövme şiddetinin değişeceğinden türbin hızının göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Genellikle hava basınçlı sistemlerde, dar ve belirli bölgelerin uygulanmasında kullanılan püskürtme nozulunun iş parçası yüzeyi ile yaptığı açılı bilya çarpma açısı olarak belirtilmektedir. Uygulamalarda genellikle dik ve dike yakın açılar tercih edilir. Çarpma açısı 90° veya daha az seçilmesinin yanında açılı küçüldükçe dövme şiddeti düşer. Konstrüksiyon gereği düşük çarpma açılarında yapılması gerekli dövme işlemlerinde bilya boyutu olarak daha büyük bilyalar veya bilya hızının

artırılması gerekmektedir [59]. Diğer bir yöntem ise bilya sertliğinin arttırılarak bilyaların sekmesini sağlayarak sektği yüzeyden başka yüzeyleri dövmesidir. Burada bilya sertliği oldukça kritik ve dikkat edilmesi gereken bir karardır [54].

Bilyalı dövme uygulanan malzemelerin yorulma ömürlerinin etkilediği birçok araştırmada görülmüş olup, dövme yoğunluğunun bunla yakından ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Malzemenin özelliklerinde görülen gelişmeler dövme yoğunluğu ile değişkenlik göstermektedir [5]. Bilyalı dövme işleminin güvenli ve doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi için standartlar geliştirilmiş olup, dövme şiddeti tayin edilmiştir. Dövme şiddeti Almen test çubuklarındaki deforme olmuş bölgenin yay yüksekliğinin eğrilik çapı olarak ifade edilir. Ölçülen yay yüksekliği ile uygulanan bilyalı dövmenin etkinliği belirlenmektedir. Uygulama öncesi dövme şiddetinin belirlenmesi için bu test şeritleri kullanılmalıdır. Standartlarla belirlenmiş olan Almen test şeritleri aynı bilya ve hava basıncı ile dövülürler, eğrilik yüksekliği ve zaman eğrisi grafiği çizilerek yay yüksekliğinin artışının %10'u geçmediği noktada dövme işlemi doyma noktasına erişmiş demektir. Almen test çubukları ile uygulamalar esnasından birden fazla test yapılarak cihazın kararlı bir şekilde çalıştığını kontrol etmek gereklidir [59]. Bunun yanında sürekli imalat operasyonları için, metal bilyalarda en az her sekiz saatte bir, metalik olmayan bilyalar için ise en az her iki saatte bir dövme yoğunluğu denetlenmelidir. SAE J443 standartlarına göre doyma noktasının tayinini açıklayan grafik Şekil 2.18'de verilmiştir.



Şekil 2.18 : Bilyalı dövme işleminin doyma noktasının belirlenmesi.

“C, A ve N” diye tanımlanan üç farklı Almen test çubuğu kullanılarak bilyalı dövme şiddeti belirlenir. Her tür Almen çubuklarının kalınlıklar ayrı olup kullanım alanları bilya sınıflandırılmasında belirtildiği gibidir. Bunun yanıdan SAE J2441 standartlarına göre metal bilyalar her üç (C, A, N) Almen şeridinde kullanılabilirken,

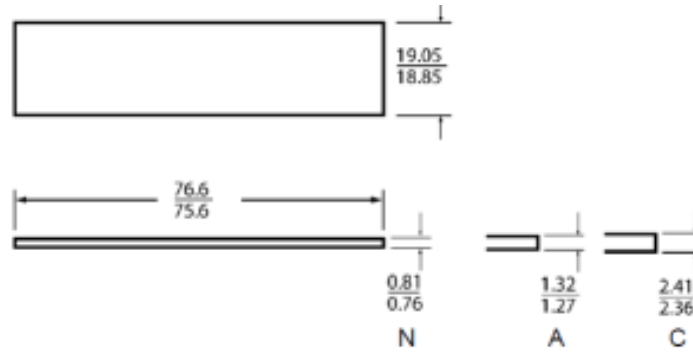
cam kürecikler sadece “N”, Seramik bilyalar ise hem “A” hem de “N” Almen şeridi de kullanılabilir.

İnce parçalarda dövme şiddeti parça kalınlığının %10’undan büyük değildir [59]. Test şeritleri 76,6 mm (3 inç) boyunda ve 19,05 mm (0,75 inç) genişliğindedirler. SAE AMS-S-13165 standartlarına göre Almen test şeritlerinin kalınlıkları Çizelge 2.5’te verilmiştir.

Çizelge 2.5 : Almen test şeritlerinin kalınlık değerleri.

Almen Şeridi	Kalınlık
C	2,3825 mm (0,0938±0,001 inç)
A	1,2954 mm (0,051±0,001 inç)
N	0,7874 mm (0,031±0,001 inç)

Şekil 2.19’da SAE J442 standartlarında belirtilen Almen şeritlerinin tipine göre kalınlıkları gösteren çizim verilmiştir.

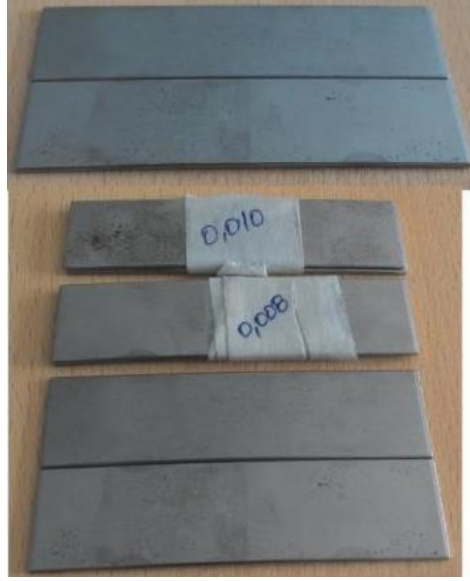


Şekil 2.19 : SAE J442 standartlarındaki Almen şeritlerinin boyutları.

Dövme şiddetini belirtmede eğrilik yayı yüksekliğinin inç biriminde binde biri olan değer olarak isimlendirilir. Mesela 10A şiddeti, 0,010 inç ’in Almen A tipi test çubuğundaki eğrilik yay yüksekliğinin göstergesidir. Bunun yanından son zamanlarda farklı ölçülendirme ve isimlendirmeler de yapılmaktadır. Eğrilik yay yüksekliğinin milimetrik değeri de aynı şekilde kullanılmaktadır. Örneğin 0,28mm değerindeki eğrilik yay yarıçapına karşılık olarak 0,28mm A olacak şekilde isimlendirme yapılabilir.

Diğer yandan 0,013A test sonucunda eğrilik yay yüksekliği 0,013 inç veya 0,33 mm ve Almen A şeridi kullanıldığı belirtilirken metrik sistemde 33A olarak belirtilen uygulamalar söz konusudur [58].

Almen şeritleri ve mastarları Şekil 2.20a ve Şekil 2.20b’de gösterilmektedir.



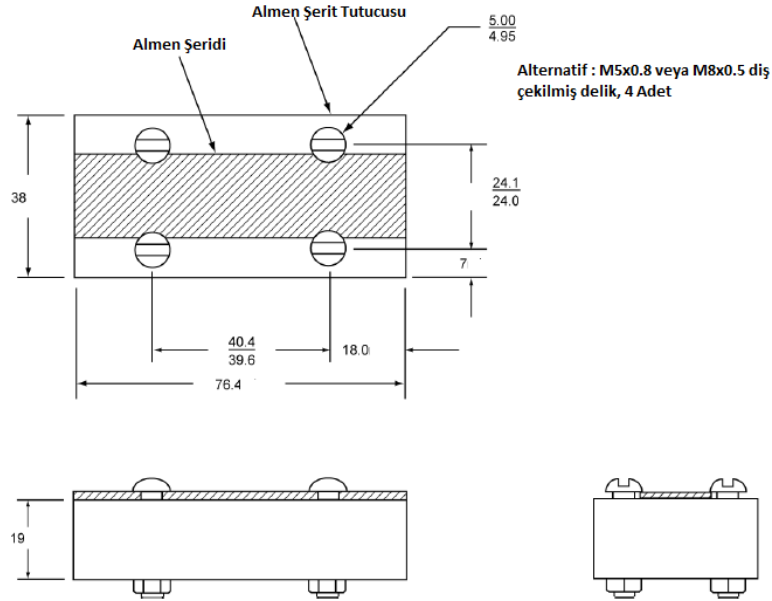
a)



b)

Şekil 2.20 : Bilyalı Dövme a) Almen şeritleri b) Almen mastarları.

Almen test şeritlerinin bağlandığı tutucu takımlar da standartlar içine alınmış olup, boyutlarıyla birlikte Şekil 2.21’de verilmiştir.



Şekil 2.21 : Almen test şeridi tutucu elemanı.

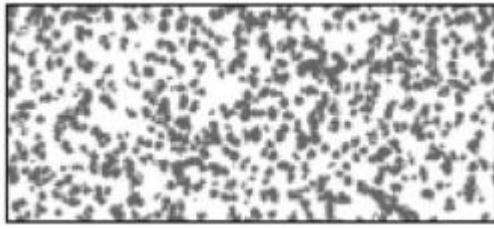
Dövme işleminin yoğunluğu dövme medyası boyutlarına, medya hızına, doyurma (sarma) oranına, çarpma açısına ve işlem süresine bağlıdır [61].

Uygulamalarda dikkat edilmesi gereken doyurma oranı ise dövülen parçanın yüzeyine çarpan bilya sayısı ile ilişkilidir. Parça yüzeyinde birim alan başına bilya

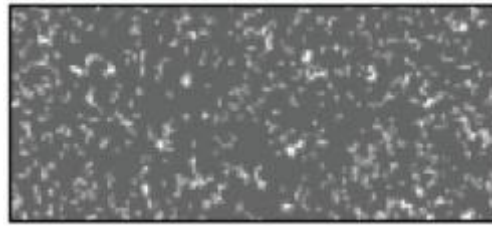
Çarpma sayısı doyurma oranı olarak belirtilir. Doyurma oranının tespitinde görsel metotlar, Straub metodu, Valentine metodu ve X-Ray kırınım metodu kullanılır [59]. Doyurma oranının tespitinde en kolay yöntem x10 büyütme ile optik mikroskopta incelemesidir. Bunun yanında malzeme yüzeyinin “Fluorescent tracer” ile boyanması ve dövme neticesinde yüzeyden boyanın kaldırılarak doyurma oranı elde edilebilir fakat bu yöntem güvenilirlik açısından problemler teşkil etmektedir. En doğru doyurma oranları için Almen eğrilerinden yola çıkılarak hesaplamalar yapılması tercih edilmelidir [16].

Tam veya dolu doyurma anlamı %100’dr yani parça yüzeyinin her birim alanına bilyaların en az bir kez çarpmasıdır. Tam doyurma %100 doyurma için gerekli zaman dilimidir ve katlı doyumalar, %100 doyurma süresinin katlarıdır. Örneğin %200 doyurma tam doyurma için gerekli srenin iki katı süreyi ifade eder [59].

SAE J2277 standartlarından alınan %35 ve % 91 doyurma (sarma) oranlarına sahip yüzeylerin görüntüleri sırasıyla ekil 2.22a ve ekil 2.22b’de verilmiştir.



a)



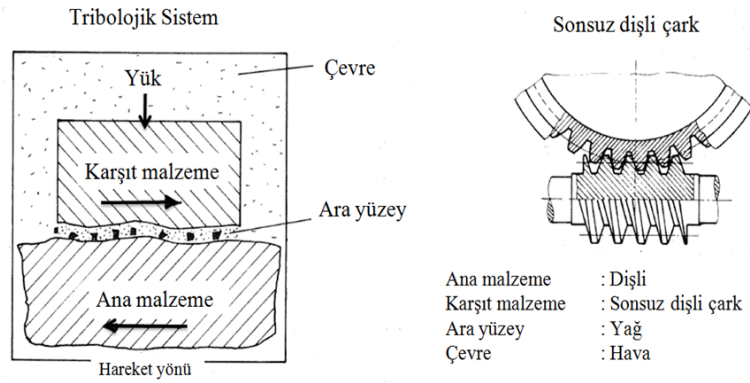
b)

Şekil 2.22 : %35 ve % 91 doyurma oranlarına sahip yüzey görüntüleri.

3. SÜRTÜNME VE AŞINMA

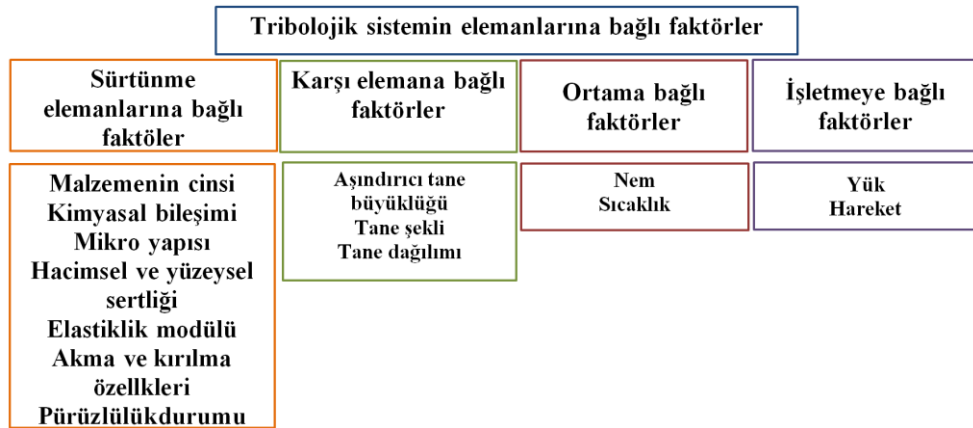
Triboloji, bir izafî hareket içinde bulunarak birbirlerine etki eden yüzeylerin ve bunlarla ilgili olayların bilimi ve ya tekniği olarak tanımlanmaktadır. Triboloji; sürtünme, aşınma ve yağlanmanın bilimsel incelenmesini ve tribolojik bilgilerin teknik uygulamasını içermektedir [64].

Tribolojik sistemi oluşturan unsurlar, ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük, hareket ve çevreden oluşmaktadır. Bir tribolojik sistem bu unsurların birçoğunu içinde bulundurur. Şekil 3.1’ de tribolojik sistemi oluşturan unsurlar şematik olarak verilmiştir [64, 66, 67].



Şekil 3.1 : Tribolojik sistemin bileşenlerinin şematik gösterimi.

Aşınma faktörlerinin sınıflandırılmasını tribolojik sistem göz önünde bulundurularak yapmak mümkündür. Şekil 3.2’de aşınma faktörleri verilmiştir [68, 69].



Şekil 3.2 : Sistemin elemanlarına bağlı tribolojik faktörler.

3.1 Sürtünme

Sürtünme, birbiri ile temasta olan ve birbirine göre bağıl hareket yapan elemanlar arasındaki harekete karşı ortaya çıkan direnç olarak tanımlanabilir. Fonksiyon yüzeylerin arasında hiçbir kuvvet alanının bulunmaması ve kesin olarak aralarında mutlak vakumdan başka bir ortamın bulunmaması halinde sürtünmenin olmadığı söylenebilir. Aksi durumunda sürtünme karşımıza bir şekilde çıkan bir olgudur [70].

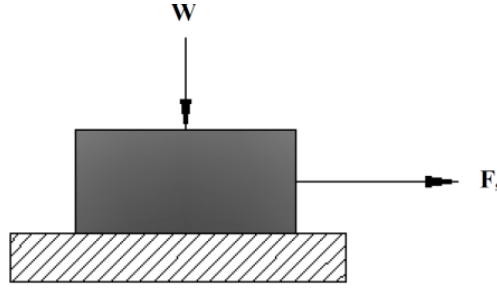
Hareketli parçalar arasındaki sürtünme, enerji, zaman ve maddi kayıplara yol açması insanları eski zamanlardan itibaren bu konu ile ilgili hale getirmiştir. Tren tekerlekleri ile raylar arasındaki sürtünme ile tren tekerlekleri ile fren pabuçları arasındaki sürtünme iki farklı durumda sürtünmenin etkisi görülmektedir. Tekerler ile raylar arasındaki sürtünme enerji kaybına sebep olmasından dolayı sistemin verimini düşürmesinden dolayı sürtünmenin olmaması istenirken, teker ile pabuçlar arasındaki sürtünme trenin hareketinin kontrolü için hayati önem taşıması nedeni ile istenen bir durumdur. Bu örnekten görüldüğü gibi birbiri ile temas halindeki hareketli parçalar arasındaki sürtünmeyi azaltmak kadar belirli sınırlar içerisinde tutmakta son derece önemlidir.

Sürtünme kuvveti konusunda bilinen ilk çalışma (1452-1519) Leonardo da Vinci'ye aittir. Da Vinci'ye göre sürtünme katsayısının sürtünme kuvvetinin normal yüke oranı olduğunu bulmuştur [62]. Literatürde birden fazla sürtünme teorisi olduğu görülmektedir. Ünlü fizikçi Amontons (1699) ve Coulomb (1785) sürtünme, yüzeylerdeki pürüz tepelerinin birbirlerine takılmasından doğan direnç olarak tariflendirmektedir. Ancak bu teori sürtünmedeki enerji kaybını ve çok iyi işlenmiş yüzeylerin sürtünme artışını açıklayamamaktadır [70].

Bowden ve Tabor çeşitli etkenlerin mantıksal bir sentezi olarak “Kaynama, Kesme, Sürme” adlı teorileriyle sürtünmeyi açıklamışlardır. Buna göre, Bowden ve Tabor sürtünmenin meydana gelmesinde en büyük etkenin yüzeylerin birbirine değen tepciklerindeki adheziv ve koheziv bağlar olduğunu, bunlara ilave olarak tepciklerdeki deformasyonların da direnç arttırıcı etkileri bulunduğunu öne sürmüşlerdir [70].

İki katı cisim birbirine temas edecek şekilde yerleştirilirse, bu cisimlerin birbiri üzerinde kaymasını sağlamak için uygulanan kuvvete (W) dik yönde olacak şekilde

bir sürtünme kuvveti (F_s) oluşur. Şekil 3.3'te sürtünme kuvvetinin oluşumu şematik olarak verilmiştir [62].



Şekil 3.3 : Sürtünme kuvvetini oluşturan kuvvetler.

Birbirine temas eden veya birbiri üzerinde kayan iki yüzey ne kadar hassas işlenmiş olsa dahi gerçek temas alanı görünür temas alanının 0.01 ila 0,1' i kadardır. Gerçek temas sadece küçük pürüz tepeliklerinde meydana gelmektedir. Birbirine temas eden hareketli parçalar arasında kayma, yuvarlanma ve kayma-yuvarlanma hareketleri şeklinde temas meydana gelmektedir [62].

Kayma sırasında teğetsel kuvvet arttırıldığında, temas noktalarındaki birleşmeler kaymaya başlar. Tüm birleşmelerin kesilmesi için gerekli sürtünme kuvveti, birleşmelerde malzemenin gerilmesi ile orantılı olarak değişecektir [62].

Yüklü bir kürenin veya silindirin, düz yüzey üzerinde yuvarlanması sırasında farklı bir temas oluşur. Bu şekilde gerçekleşen temas sonucunda yük altındaki silindirin veya kürenin sürtünme direnci, yuvarlanan malzemenin merkezine uygulanır. Bu şekilde meydana gelen sürtünme yük ile doğru orantılı, yuvarlanma elemanın çapı ile ters orantılıdır [62].

İzafi hareket yapan yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması veya konulmaması bakımından sürtünme kuru, sınır ve sıvı sürtünme olarak üç halde incelenir.

3.1.1 Kuru sürtünme

Kuru sürtünme yabancı maddelerden arındırılmış, yağlayıcı bir akışkanın olmadığı yüzeylerin atmosfer şartlarındaki sürtünme halidir. Kuru sürtünme sonucu olarak malzemelerde aşınmaya bağlı hasar, enerji kaybı ve sıcaklık yükselmesi gibi olaylar oluşur. Sürtünme fren, kavrama, sürtünmeli dişli çarklar gibi makine elemanlarında istenen bir olayken izafi hareket yapan yüzeylerde istenmeyen bir olay olarak karşımıza çıkmaktadır [62].

3.1.2 Sınır sürtünmesi

Yüzeyler arasında herhangi bir yağlayıcı madde bulunmasına rağmen sıvı sürtünmesi hali oluşmadığı durumlarda sınır sürtünmesi hali ortaya çıkar. Pratikte en çok rastlanan bu sürtünme halinde, sürtünme katsayısı genel olarak 0,02 ile 0,1 arasında değişir [62].

3.1.3 Sıvı sürtünmesi

Sıvı sürtünmesi, fonksiyon yüzeylerinin bir yağ tabakası tarafından tamamen ayrılmış olduğu sürtünme halidir. Yüzeyler ile doğrudan doğruya temasta bulunan yağ tabakaları, adsorpsiyon yolu ile malzemelere tamamen yapışmış olduğu görülür [62].

3.2 Aşınma

Aşınma, sürtünme halinde bulunan yüzeylerde mekanik etkenlere bağlı olarak meydana gelen malzeme kaybıdır. Birbiriyle temas halindeki iki cisim arasında meydana gelen bağıl hareket ile cisimlerin yüzeylerinin birbirini etkilemesi sonucu aşınma meydana gelir. Bu nedenle yüzeylerin ilk şekilleri bozulur, parçalar arasındaki boşluklar büyür ve amaçlanan fonksiyon yerine getirilemez [63, 64, 65].

Makinalarda ortaya çıkan arızaların ve konstrüksiyon elemanlarının kullanım dışı kalmasının en önemli sebeplerinden birisi aşınmadır. Mühendislik malzemelerinde görülen yıpranmanın aşınma sayılabilmesi için bazı şartların gerçekleşmesi gerekmektedir. Bu şartlar, mekanik bir etkenin olması, sürtünmenin (bağıl hareketin olması) yavaş ve devamlı olması, malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi ve istem dışında meydana gelmesidir [64, 66].

Sürtünme nasıl bir enerji kaybı nedeni ise, aşınmada tekrar geriye kazanılamayan bir madde kaybı sebebidir. Bu yüzden dünyada her yıl önemli ölçüde ekonomik kayıplar meydana gelmekte buna paralel olarak kayıpların önlenmesi için çeşitli tedbirler geliştirilmeye çalışılmaktadır [63].

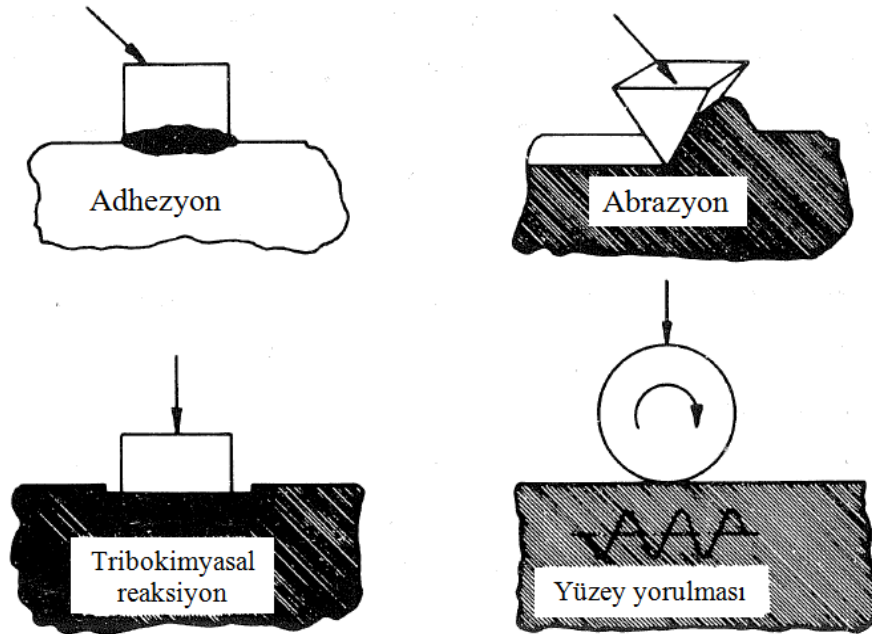
3.2.1 Aşınma mekanizmaları

Fonksiyon yüzeylerinden istenilmeyen şekilde malzeme ayrılması fiziksel, kimyasal veya erime şeklinde gerçekleşmektedir. Bunun sonucu olarak mekanik, termal ve tribo-kimyasal aşınma mekanizmaları oluşmakta olup, bu mekanizmaları kesin hatlar

şeklinde birbirlerinden ayırt etmek mümkün olmamaktadır. Aşınmayı meydana getiren tribolojik aşınma mekanizmaları genel olarak,

- Adhezif aşınma
- Abrazif aşınma,
- Eroziv aşınma,
 - Katı partiküllerin oluşturduğu erozyon,
 - Akışkanların oluşturduğu erozyon,
 - Kavitatif erozyon,
 - Elektro erozyon (kıvılcım erozyonu),
- Sürtünme oksidasyonu,
- Koroziv aşınma,
- Yorulma aşınması,
- Yenme, pitting (pulcuk kalkması) ve diğerleri şeklinde sınıflandırılmaktadır [70].

Şekil 3.4'te adhezyon, abrazyon, tribokimyasal ve yorulma aşınması mekanizmaları şematik olarak gösterilmiştir [67].



Şekil 3.4 : Farklı aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi.

Adhezif ve abrazif aşınma endüstriyel uygulamalarda en çok rastlanılan aşınma türleridir [63]. Bu sebeple yüksek lisans tez çalışması içerisinde adhezif ve abrazif aşınma mekanizmalarına yer verilmiştir.

3.2.1.1 Adhezif aşınma mekanizması

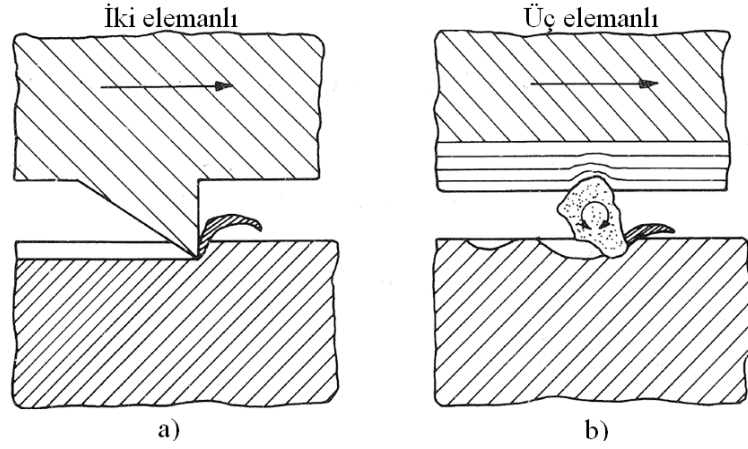
Adhezif aşınma en genel olarak karşılıklı etkileşim içerisinde birbirlerine göre göreceli olarak hareket eden iki yüzeyin birisinden bir parçacığın koparak diğer yüzeye yapışması sonucunda, bir yüzeyden diğer yüzeye olan malzeme taşınımı olarak tanımlanır. İki ayrı metal yüzeyi basınç altında bir araya getirildiği zaman, iki ayrı yüzeyde bulunan karşılıklı çıkıntılar sürtünme, ısı, soğuk kaynama etkisiyle birbirleriyle bağ yaparlar. Yüzeylerin birbirlerine karşı olarak yaptığı hareketin devam etmesiyle birleşen iki çıkıntı, bağ kuvvetinin en zayıf olduğu noktadan kopar [65, 66, 69]. Bu şekilde oluşan hasar mekanizması adhezif aşınma olarak tanımlanmaktadır. Yağlayıcı madde kullanılması sonucunda sistemden oluşan ısı uzaklaştırılır ve yüzeyler arasındaki oluşan kaynama engellenebilir. Ayrıca birbiri içerisinde çözünmeyen maddeler kullanılarak adhezif aşınmanın gelişimi ortadan kaldırılabilir. Kaynaşmanın gerçekleşeceği çıkıntıların olmadığı düz yüzeylerin kullanılması veya yüzeyler arasında fosfat kaplamaları gibi kimyasal filmlerin oluşturulması sonucunda adhezif aşınma önlenir [66].

3.2.1.2 Abrazif aşınma mekanizması

Abrazif aşınma, sistemde hızlı hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür. Abrazif aşınma, malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan partiküllerle basınç altında etkileşmesiyle, sert partiküllerin malzeme yüzeylerinden parçalar koparması şeklinde tanımlanır. Bu mekanizmaya örnek olarak, sisteme dışarıdan giren toz parçacıklarının veya bir motorda oluşan yanma ürünlerinin sebep olduğu aşınma şekli verilebilir. Bu tip aşınmada sert ve keskin partiküller, malzeme yüzeyinden mikron boyutlu talaş kaldırma etkileri gösterirler. Bu aşınma iki elemanlı veya üç elemanlı olmak üzere ikiye ayrılır. Şekil 3.5a ve Şekil 3.5b’de sırasıyla iki elemanlı ve üç elemanlı aşınma mekanizmaları şematik olarak gösterilmiştir [65, 66].

İki elemanlı abrazif aşınma, sürtünen elemanların doğrudan birbirleriyle etkileşimleri sonucu meydana gelir. Üç elemanlı abrazif aşınmada ise, ana ve karşı malzeme arasında serbest ara malzeme olması söz konusu olabileceği gibi, aşınma sonucu yüzeyden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları da üçüncü eleman olarak görev yapabilir. Abrazif aşınmayı etkileyen iki temel faktör, aşındırıcı partikül ile metal yüzeyi arasındaki sertlik farklılığı ve teması meydana getiren

basıncın büyüklüğüdür. Abrazif aşınma hızı, malzeme yüzeyine etki eden normal yük azaltılarak düşürülebilir [65, 66, 67, 69].



Şekil 3.5 : İki ve üç elemanlı aşınma mekanizmaları.

Abrazif aşınmanın engellenmesinde veya abrazif aşınma hızının en aza indirilmesi amacıyla malzeme yüzey sertliklerinin artırılması ve abrazif aşınmaya sebebiyet veren sert partiküllerin sistemden uzaklaştırılması gerçekleştirilmektedir.

Diğer iki önemli aşınma mekanizmasında bahsetmek gerekirse, tribokimyasal reaksiyonlu (korozyif) aşınmada temas halindeki yüzeyler ortamla reaksiyona girerler ve yüzeyde reaksiyon ürünlerinden oluşan bir tabaka meydana gelir. Daha sonra, temas noktasında çatlak oluşumu veya abrazif etkilerden dolayı reaksiyon tabakası hasara uğrar. Yorulma aşınması ise değişken ve tekrarlı yüklemeler sonucu meydana gelir. Malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur, böylece yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur. Bu tür aşınma daha çok dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve yuvarlanma hareketi yapan mekanizmaların yüzeylerinde görülmektedir [65, 66, 69].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin bilyalı dövme uygulaması sonrası sürtünme ve aşınma karakteristiğini belirlemek amacıyla izlenen deneysel çalışma yöntemleri, deney tesisatı, deney numuneleri ve numunelerin hazırlanması ile ilgili bilgiler verilmiştir. Yüksek lisans tez çalışmasında takip edilen yöntem ve adımlar anlatıldıktan sonra deney tesisatı tanıtılmıştır. Son olarak test numunelerinin özelliklerine ve hazırlık aşamalarına yer verilmiştir.

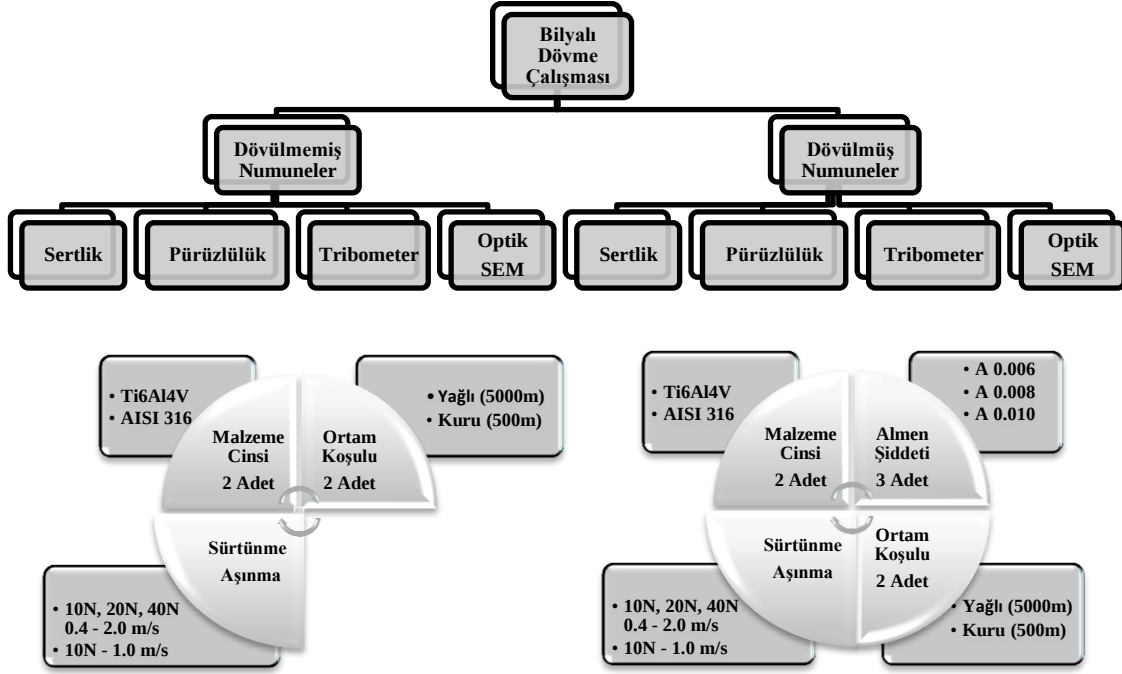
4.1 Deneysel Yöntem

Deneysel çalışmalarda bilyalı dövme uygulamasının tribolojik deney sonuçlarına etkilerinin tespiti için dövülmemiş ve bilyalı dövme uygulamaları gerçekleştirilmiş numunelere sertlik, pürüzlülük, sürtünme ve aşınma deneyleri son olarakta yüzey morfolojisindeki değişimlerin incelemesi yapılmıştır. Yüksek lisans tezi kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda kullanılan yöntemler ve incelemeler Şekil 4.1’de verilmiştir. Bilyalı dövme işlemi sonrasında yüzey özelliklerinin değişimleri optik mikroskop ile incelenmiştir. Bunun yanında aşınma deneyleri sonrasında elektron mikroskobu ile yüzey morfolojisi incelemeleri yapılmıştır. Pürüzlülük ölçümlerinde her numuneden üçer adet ölçüm yapıp, bu ölçümlerin aritmetik ortalamaları alınması ile yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiştir. Yüzey sertlik ölçümlerinde her numuneden altışar ölçüm yapılmış, ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak yüzey sertlik değerlerine ulaşılmıştır.

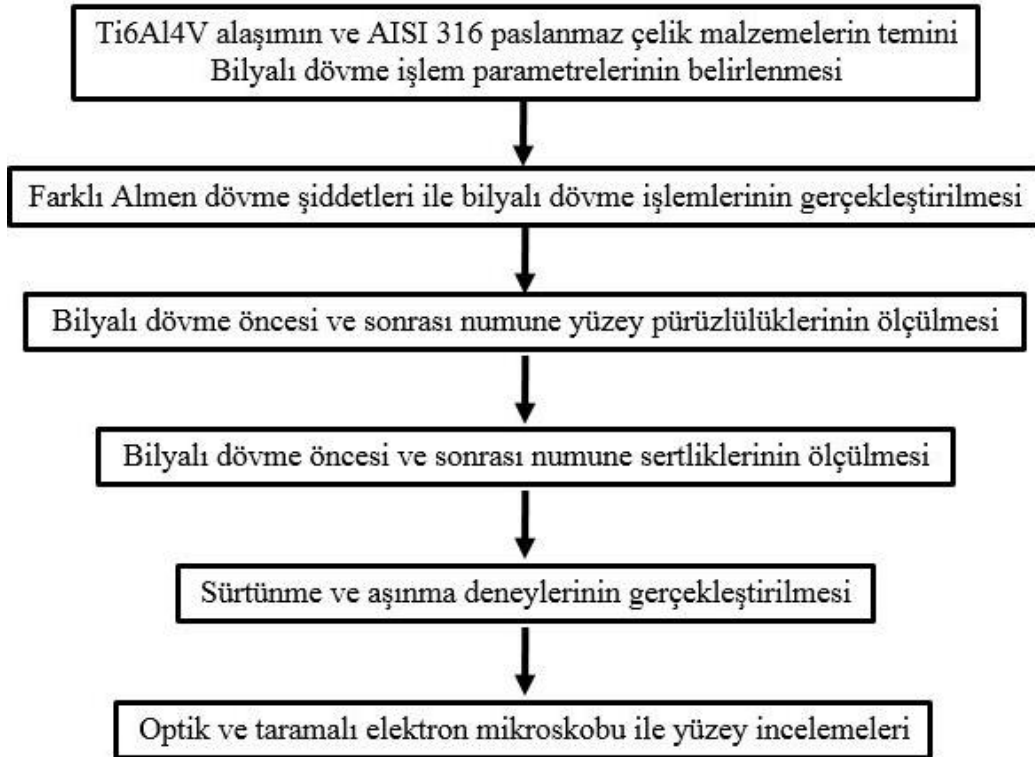
Şekil 4.2’de verilen akış şemasında tez çalışmasının deneysel çalışma bölümündeki uygulama basamakları görülmektedir.

Sunulan çalışmada kullanılan parametreler Çizelge 4.1’de özetlenmiştir. Çizelgeden görüldüğü gibi deney numuneleri 3 farklı Almen dövme şiddetinde dövülerek hazırlanmıştır. Sürtünme deneyleri 3 farklı normal kuvvet için 9 farklı kayma hızında gerçekleştirilmiştir. Sabit normal kuvvet ve kayma hızı altında aşınma deneyleri

yapılmıştır. Tüm deneyler hem kuru hem de yağlı çalışma şartları için tekrarlanmıştır. Aşınma deneylerinde kayma mesafesi kuru ve yağlı çalışma durumu için sırasıyla 500 m ve 5000 m olarak seçilmiştir.



Şekil 4.1 : Deneysel çalışmalarda yapılan incelemeler.



Şekil 4.2 : Deneysel çalışmalardaki uygulama basamakları.

Çizelge 4.1 : Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreleri.

Malzeme	Almen Şiddeti	Sürtünme	Aşınma	Ortam
Ti6Al4V	A 0.006	10N-20N-40N	10N – 1m/s	Kuru
AISI 316	A 0.008	0.4m/s - 2.0m/s	Kuru 500 m	Yağlı
	A 0.010		Yağlı 5000 m	

4.2 Deney Tesisatı Tanıtımı ve Deneylerin Yapılışı

4.2.1 Sürtünme ve aşınma deney tesisatı

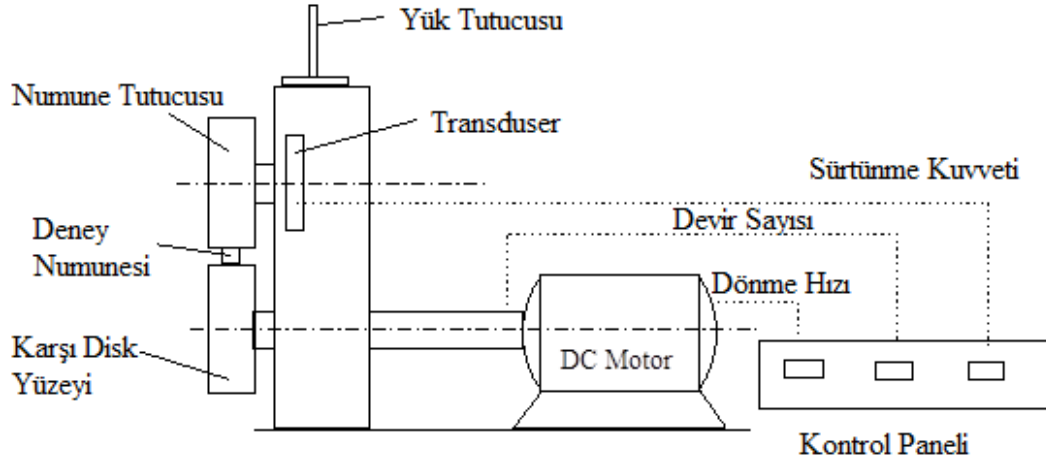
Deneysel tasarım planına göre numuneler sürtünme ve aşınma deneylerine tabi tutulmuşlardır. İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Hilmi İleri Makine Elemanları Laboratuvarında bulunan PLINT TE-53SLIM / 8147 çok amaçlı sürtünme ve aşınma deney tesisatı kullanılarak numunelerin tribolojik davranışı incelenmiştir. Deney tesisatının şematik görünüşü Şekil 4.3 de verilmiştir. Cihazın üzerinde sabit hızla dönen bir disk bulunmakta ve dönen bu disk üzerine, silindirik deney numunesini belirli bir normal kuvvetle bastırarak sürtünme ve aşınma deneyleri gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.3’den görüldüğü gibi karşı ağırlıklar kullanılarak normal kuvvet belirlenmektedir. Sabit olan numune tutucuya hazırlanan numuneler bağlandığında çizgisel bir temas elde edilmektedir. Hareketli olan karşı yüzey diski bir DC motor ile tahrik edilmektedir. Motor hızı 0 ila 2,5 m/s aralığında değiştirilebilmektedir. Deney tesisatının bağlı olduğu kontrol paneli üzerinde istenen kayma hızı d/dak olarak ayarlanmaktadır. Numune tutucu kola yerleştirilmiş olan bir kuvvet transdüseri yardımıyla numune ile karşı yüzey arasında oluşan sürtünme kuvveti kontrol paneli üzerinden okunabilmektedir. Kuvvet transdüseri ± 200 N kuvvet aralığında ± 2 mV hassasiyetle ölçüm yapabilmektedir. Bu durumda ölçümler sırasında yapılan maksimum hata $\pm 0,1$ N civarındadır.

Numunelerdeki aşınma miktarı ise hassas terazi yardımı ile ölçülmüştür. Deneylerde kullanılan Precisa XB 220A model hassas terazisi maksimum 220gr tartım kapasiteli ve 0,0001gr hassasiyetle ölçüm yapılabilir. 0,2mg doğruluk ve 0,1mg tekrarlanabilirlik değerlerine sahiptir.

Aşınma hızı hesaplamaları birim kayma mesafesi ve uygulanan normal yük başına meydana gelen aşınma miktarına göre hesaplanmıştır. Buna göre, aşınma hızı denklem 4.1’de verildiği şekilde hesaplanmıştır.

$$k = \frac{m}{F \times L} \quad (4.1)$$

Burada m gram cinsinden kütle kaybı, F Newton cinsinden uygulanan normal kuvvet ve L metre cinsinden alınan yolu ifade etmektedir.

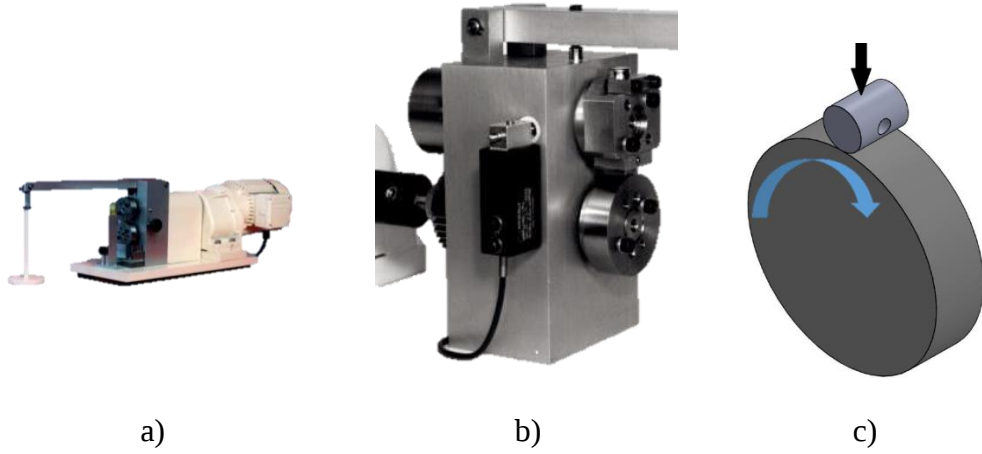


Şekil 4.3 : Deney tesisatı ve sürtünme ve aşınma deneylerinin şematik gösterimi.

Deneyisel çalışmalarda kullanılan karşı malzeme olan aşındırıcı disk 60 mm çapında, 16 mm kalınlığında ve 52 HRC sertliğinde AISI 416C martenzitik paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiştir. Diskin ortalama yüzey pürüzlülüğü 0,5 µm dir. Diskin takılı olduğu milin dönme sayısı deney tesisatı içerisine yerleştirilmiş bir takometre yardımı ile kontrol paneli üzerinden izlenebilmektedir. Diskin çevresi bilindiğinde dolayı, bir tam tur dönme sonucunda kayma mesafesinin belirlenmesi mümkündür. Çizelge 4.2 deneylerde kullanılan PLINT TE-53 çok amaçlı sürtünme ve aşınma deneyi cihazının teknik özelliklerini içermektedir. Şekil 4.4a ve Şekil 4.4b’de deneylerde kullanılan çok amaçlı sürtünme ve aşınma deney cihazının görüntüsü, Şekil 4.4c’de karşı disk ile deney numunelerinin temas durumunun şematik görüntüsü verilmiştir.

Çizelge 4.2 : PLINT TE-53 tribolojik deney cihazı teknik özellikleri.

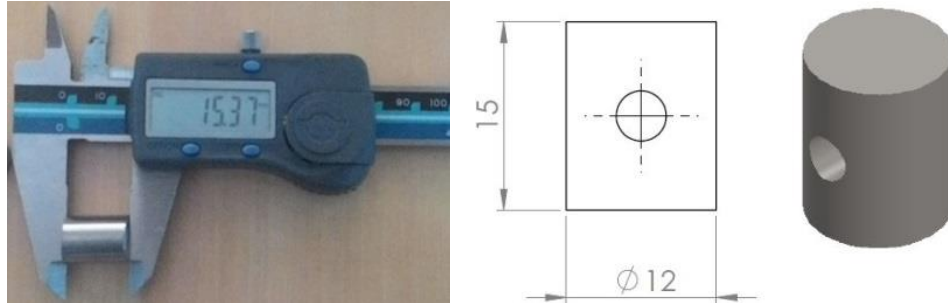
Özellikler	Değerler
Tahrik	A.C. Motor, 425 d/d (50Hz)
Hız aralığı	30-850 d/d
Normal yük aralığı	10N-750N
Normal yük için kaldıraç oranı	5:1
Kuvvet dönüştürücü yük aralığı	±200N



Şekil 4.4 : PLINT TE-53 sürtünme / aşınma deneyi cihazı ve numune teması.

4.3 Deney Numuneleri ve Numune Hazırlıkları

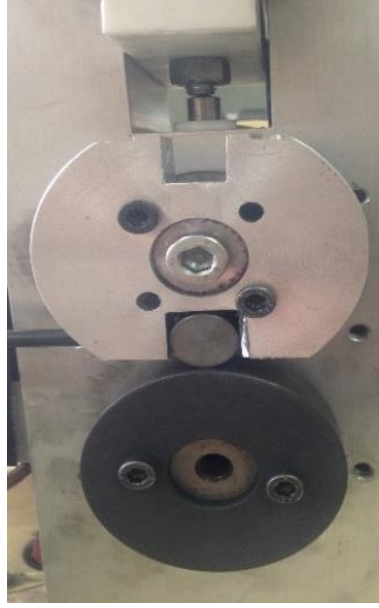
Deneyisel çalışmalarda bilyalı dövme uygulaması sonrası metal malzemelerin sürtünme ve aşınma karakteristiğini incelemek amacıyla Grade 5 Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik malzemeler seçilmiştir. Yüksek lisans tez çalışmasında kullanılan deney numunelerinin boyutları ve şematik gösterimi Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5 : Deney numunelerinin boyutları.

12 mm çapında çubuk halinde temin edilen Ti6Al4V titanyum alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik malzemeler hazırlanan deneyisel tasarım planına uygun olarak bilyalı dövme işlemine tabi tutulduktan sonra 15 mm uzunluklara sahip silindirler halinde kesilerek çalışmada kullanılan numuneler elde edilmiştir.

Pim şeklinde silindirik olarak hazırlanan numuneleri, numune tutucuya yerleştirebilmek amacıyla eksenel doğrultuda bir delik açılmıştır. Bu delikten geçirilen bir vidalı eleman yardımı ile tutucuya montajı tamamlanmıştır. Şekil 4.6’da numune deney tesisatına yerleştirildikten sonra disk ile temas durumu görülmektedir.



Şekil 4.6 : Disk ile deney numunesinin temas durumu.

4.3.1 Ti6Al4V titanyum alaşımı

Deneysel çalışmalarda Timet Metal & Medical firmasından temin edilen sertifikalı Grade 5 Ti6Al4V titanyum alaşımı kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan Ti6Al4V alaşımının sertifikası Ekler Şekil A.1’de verilmiştir.

4.3.2 AISI 316 paslanmaz çeliği

Deneysel çalışma sonuçlarının kıyaslanması için kullanılan diğer malzeme Timet Metal & Medical firmasından temin edilen sertifikalı AISI 316 türü paslanmaz çelik çubuklardır. Yüksek lisans tez çalışmasında kullanılan AISI 316 paslanmaz çelik malzemenin sertifikası Ekler Şekil A.2’de verilmiştir. Numunelerin elde edildiği çubuk halindeki Ti6Al4V alaşımının ve AISI 316 paslanmaz çeliğinin kimyasal bileşimi Çizelge 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Deney numunelerinin elementsel analizi.

Numune	Element	% Ağırlık Oranı	Numune	Element	% Ağırlık Oranı
Ti6Al4V	Al	6,23	AISI 316	Si	0,350
	V	4,26		P	0,047
	Fe	0,169		S	0,025
	C	0,014		Ni	10,08
	N	0,019		Cr	16,81
	H	0,001		Mo	2,04
	O	0,09			
	Ti	89,217			

4.3.3 Bilyalı dövme medyaları

Bilyalı dövme uygulamalarında S230 kodlu çelik bilyalar kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan sertifikalı S230 çelik bilyalarının özellikleri Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Deneylerde kullanılan S230 bilya özellikleri.

Özellik	Değer
Standart	S230, ASH 230 MIL-S13165C
Boyut	0.6 mm - (230)
Sertlik	55 / 62 HRC

4.3.4 Bilyalı dövme işlemi

Bu çalışmada 12 mm çapında çubuk haldeki Ti6Al4V titanyum alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik malzemelerden hazırlanan numuneler deneysel tasarım planına uygun olarak Kale Havacılık Sanayi A.Ş. tarafından havanın itici etkisi ile çalışan Wheelabrator Sisson Lehmann markalı bilyalı dövme tezgahında dövülmüşlerdir. Şekil 4.7'da deneysel çalışmalarda kullanılan programlanabilir otomatik bilyalı dövme tezgahının görüntüleri verilmiştir. Çizelge 4.5'te bilyalı dövme tezgahının özellikleri verilmiştir.



Şekil 4.7 : Bilyalı dövme tezgahı.

İstenilen dövme şiddetleri için %100 doyma oranında, Almen A şeritleri ve S230 bilya kullanılarak yakalayabilmek için gerekli olan parametre değerleri bilyalı dövme makinesi tarafından otomatik olarak ayarlanmıştır. Bilyalı dövme uygulamasında numunelerin bağlandığı tabla ve fikstür sabit olup, bilyaların püskürtüldüğü nozul hareket etmektedir. Nozul ve dövülecek numune çubukları arasındaki bilya çarpma

açısı 90° ve nozul ile numune çubukları arasındaki mesafe 300 mm olarak sabit kalacak şekilde dövme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.5 : Bilyalı dövme tezgahının özellikleri.

Özellikler	Değerler
Marka/ Model	Wheelabrator Sisson Lehmann 2006
Tabla Çapı	Ø1500 mm
Yükseklik	1000 mm
Eksen Sayısı	6 Eksenli

4.3.5 Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri

Bilyalı dövme işleminin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemek amacı ile numune yüzeyleri Nanovea marka PS50 modeli 3D temassız optik profilometre cihazı kullanılarak taranmıştır. Deneysel çalışmalarda yüzeylerin ortalama pürüzlülük (Ra) değerlerine göre hesaplamalar yapılmıştır. Aritmetiksel ortalama sapma Ra pürüzlülük profilinin tüm profil değerlerinin oluşturduğu alanların aritmetik ortalamasıdır. Kullanılan optik profilometre ile bilyalı dövme işlemi uygulanan yüzeylerin 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntüleri alınmıştır. Bilyalı dövme uygulamasının öncesinde ve sonrasında Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin yüzey profili taramaları yapılmıştır. Nanovea marka PS50 modeli 3D temassız optik profilometre cihazının özellikleri Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Optik profilometre cihazının özellikleri.

Özellikler	Değerler
X-Y eksen mesafesi	50 mm
Z ekseni	30 mm
X-Y ekseni çözünürlüğü	0.1 µm
Maksimum X-Y hızı	10 mm/s

4.3.6 Sertlik ölçümleri

Bilyalı dövme uygulamasının malzeme yüzey sertliğine etkisini incelemek amacıyla numunelerin uygulama öncesi ve sonrası yüzey sertliği değerleri ölçülmüştür. Çalışmadaki sertlik ölçümleri için Metkon markalı Duroline-M model mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri için 136° açılı dörtgen piramit uç 15 saniye bekletilerek, sertlik değerleri HV1 olarak ölçülmüştür. Numunelerin farklı alanlarından altışar adet ölçüm yapılmıştır. Elde edilen sertlik değerlerinin aritmetik ortalamaları alınarak numunelerin yüzey sertlik değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 4.7’de Duroline-M model mikrosertlik cihazının özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Mikrosertlik ölçüm cihazı özellikleri.

Özellikler	Değerler
Test yükü	10-1000gf
Mercek	10X – 40X
Yükleme mekanizması	Otomatik - 50 µm /s
Bekleme Süresi	5 - 99 s
Ölçüm mikroskobu	Elektronik – Auto (D1/D2)

4.3.7 Yüzey morfolojilerinin incelenmesi

Deneysel çalışmalarda Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin bilyalı dövme uygulaması öncesinde, sonrasında ve aşınma deneyleri sonrası yüzey morfolojileri stereo mikroskoplarla incelenmiş ve yüzey görüntüleri alınmıştır. Yüzey incelemeleri için Kocaeli Üniversitesi İleri Disiplinler Arası Endüstriyel Araştırma Laboratuvarları, İleri Malzemeler Laboratuvarı'ndan bulunan Leica M80 ve Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Makina Malzemesi Laboratuvarı'ndaki Nikon SMZ745T stereo mikroskoplar kullanılmıştır. Standart optik ile 1x-10X zoom aralığına sahip olan Leica M80 mikroskopta 80X büyütme kadar inceleme yapılabilinmektedir. Çalışmalarda kullanılan stereo mikroskop cihazlarının özellikleri ve incelemelerde kullanılan büyütme oranları Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8 : Stereo mikroskopların özellikleri.

Özellikler	Leica M80	Nikon SMZ745T
Büyütme	10X – 80X	300X
Kullanılan Büyütme	10X, 40X, 80X	40X, 50X

Deneysel çalışmalarda Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin aşınma deneyleri sonrası yüzey morfolojilerinin incelenmesi JEOL JSM 6060LV taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektrometresi (EDS) analizleri ise SEM cihazına ekli IXRF 500 Model EDS dedektörü ile gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.9'da kullanılan SEM cihazının özellikleri verilmiştir.

Çizelge 4.9 : SEM cihazının özellikleri.

Özellikler	Değerler
Çözünürlük	3,5 nm,
Büyütme	8x- 300.000x
Hızlandırma voltajı	0,5KV - 30kV,
Resim boyutu	1280 x 960 piksele kadar
Numune kabini	32 mm iç çap

Yapılan analizler sonrası bilyalı dövme uygulamasının numunelerin yüzey morfolojilerine etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca aşınma deneyleri sonrasında bilyalı dövme şiddetine ve aşınma deney parametrelerine bağlı olarak yüzey morfolojisindeki değişimi ve bu değişimde rol oynayan etkin aşınma mekanizmaları irdelenmiştir.

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu bölümde Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin öncelikle bilyalı dövme uygulaması öncesi ve sonrasında yüzey pürüzlülüğü ile sertlik değerlerindeki değişimler incelenmiş, ardından kuru ve yağlı çalışma şartlarındaki sürtünme karakteristikleri ile aşınma karakteristikleri değerlendirilmiştir. Son olarak optik mikroskop ve elektron mikroskobu görüntü analizleri ile tez çalışmasının bulgularına ve yorumlarına yer verilmiştir.

5.1 Yüzey Pürüzlülüğü Değerlerindeki Değişimler

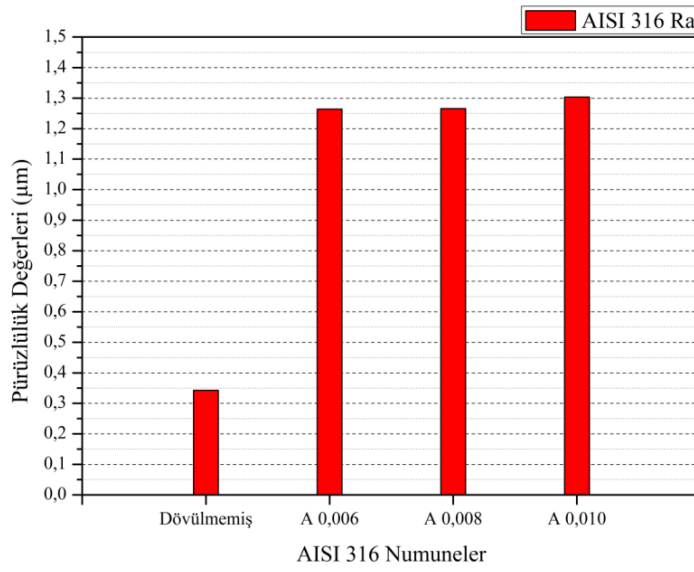
Deneysel çalışmaların ilk aşamasında işlem görmemiş ve bilyalı dövme uygulanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçümleri yapılmıştır. Bilyalı dövme işlemi uygulanmış ve uygulanmamış numunelerin yüzey profili özelliklerinin tespiti gerçekleştirilmiştir. Her bir numune grubundan üçer numune seçilip, her numunenin farklı bölgelerinden üçer adet optik profilometre ile ölçümler yapılmış, aritmetik ortalamaları alınarak yüzey pürüzlülüğü değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 5.1 'de bilyalı dövme uygulaması yapılmamış ve 3 farklı A0.006, A 0.008, A 0.010 Almen dövme şiddetleri ile dövülmüş AISI 316 paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşımı numunelerinin yüzey pürüzlülüğü değerlerinin aritmetik ortalamaları verilmiştir. Ekler Ek B bölümünde Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik malzemelerin optik profilometre ile yüzey taramalarının görüntülerine yer verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 çeliğin ortalama pürüzlülük değerleri.

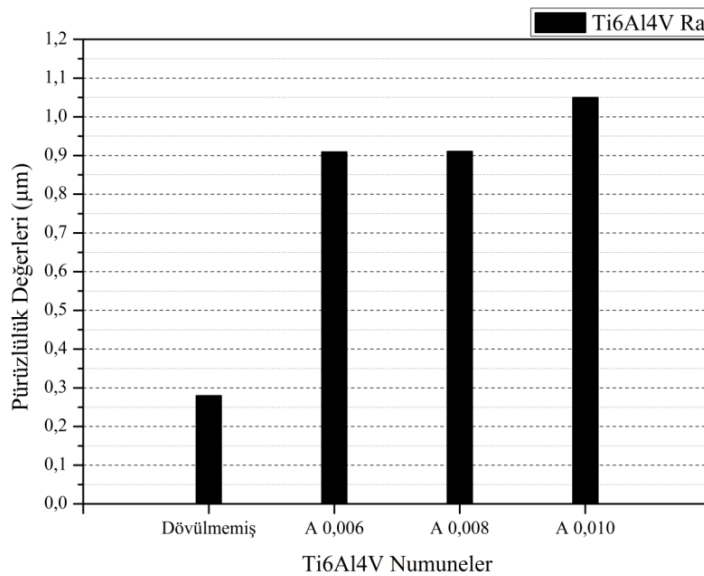
Almen	Ti6Al4V	AISI 316
Dövülmemiş	0,28	0,34
A 0,006	0,90	1,26
A 0,008	0,91	1,27
A 0,010	1,05	1,30

Çizelge 5.1 incelendiğinde titanyum alaşımının ve paslanmaz çelik malzemenin yüzey pürüzlülüğü değerlerinin bilyalı dövme uygulaması sonrasında arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de çalışmada kullanılan numunelerin yüzey

pürüzlülüğü değerlerinin Almen dövme şiddetlerine bağlı değişimi gösterilmektedir. Yüzey pürüzlülük değerlerinin verildiği Çizelge 5.1 ve Şekil 5.1 - 5.4 incelendiğinde bilyalı dövme uygulaması sonucunda beklenildiği gibi numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerlerinde kayda değer bir artış gerçekleşmiştir. Yüzey pürüzlülüğündeki bu değişimin bilyalı dövme uygulaması sonrasında numunelerin yüzeylerinde meydana gelen plastik deformasyonlar sonucu kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca Almen dövme şiddeti arttıkça yüzey pürüzlülüğü değerlerinde kayda değer bir artış gözlenmemektedir.



Şekil 5.1 : Bilyalı dövme şiddetine bağlı AISI 316 paslanmaz çeliğinin yüzey pürüzlülüğünün değişimi.



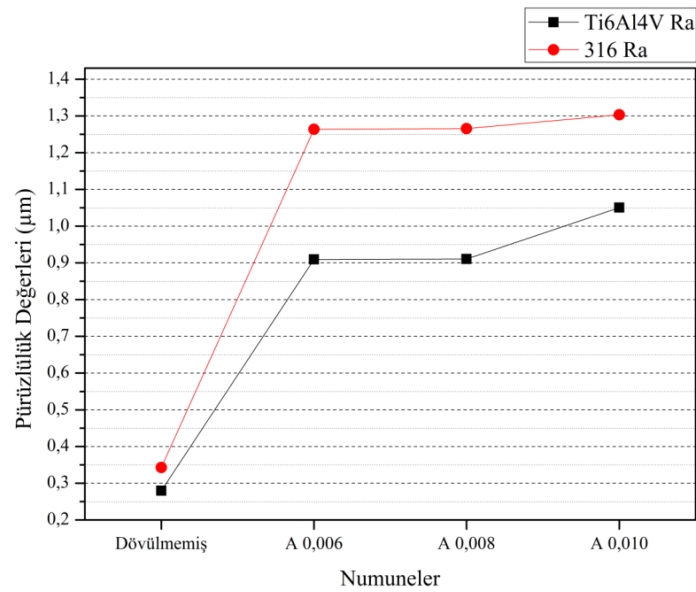
Şekil 5.2 : Bilyalı dövme şiddetine bağlı Ti6Al4V alaşımının yüzey pürüzlülüğünün değişimi.

Yüzey pürüzlülük değerlerindeki artış ve farklılıklar plastik deformasyonların şiddetinin bir göstergesi niteliği taşımakta olup, sadece bilyalı dövme işleminin değil, Almen dövme şiddetinin de yüzey özellikleri ve yüzey pürüzlülüğü değerleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlar literatürde yapılan önceki çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile örtüşmektedir [16, 48, 49].

Bilyalı dövme uygulaması yapılmamış her iki farklı tür numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde, AISI 316 paslanmaz çelik malzemenin yüzey pürüzlülüğü değerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç bilyalı dövme uygulaması sonrasında da aynı şekilde elde edilmiştir.

Şekil 5.3’de AISI 316 paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşımı numunelerinin yüzey pürüzlülüğü değerleri birlikte verilerek karşılaştırılmıştır. Bilyalı dövme uygulamasının etkisi ile yüzey pürüzlülüğü değerinin her iki farklı malzeme türü içinde arttığı gözlemlenmiştir. Pürüzlülük değerlerinin yüzde artış oranlarına bakıldığında, Almen dövme şiddetinin A0.006’dan A0.010’a yükselmesi AISI 316 paslanmaz çelik malzemenin yüzey pürüzlülüğü değerinde yüksek değerlerde artış sağlamazken, Ti6Al4V alaşımının yüzey pürüzlülüğü artan Almen dövme şiddeti ile daha fazla artış gösterdiği görülmüştür.

Titanyum malzemelerin sert bir yüzeye sahip oluşu ve buna bağlı püskürtülen malzemelerin yüzeyde oluşturabildiği deformasyon şiddetinin daha az olmasının bir sebebi olarak yüzey pürüzlülüğü değerindeki artış daha az olmuştur.



Şekil 5.3 : Bilyalı dövme şiddetine bağlı AISI 316 ve Ti6Al4V numunelerinin yüzey pürüzlülüklerinin karşılaştırması.

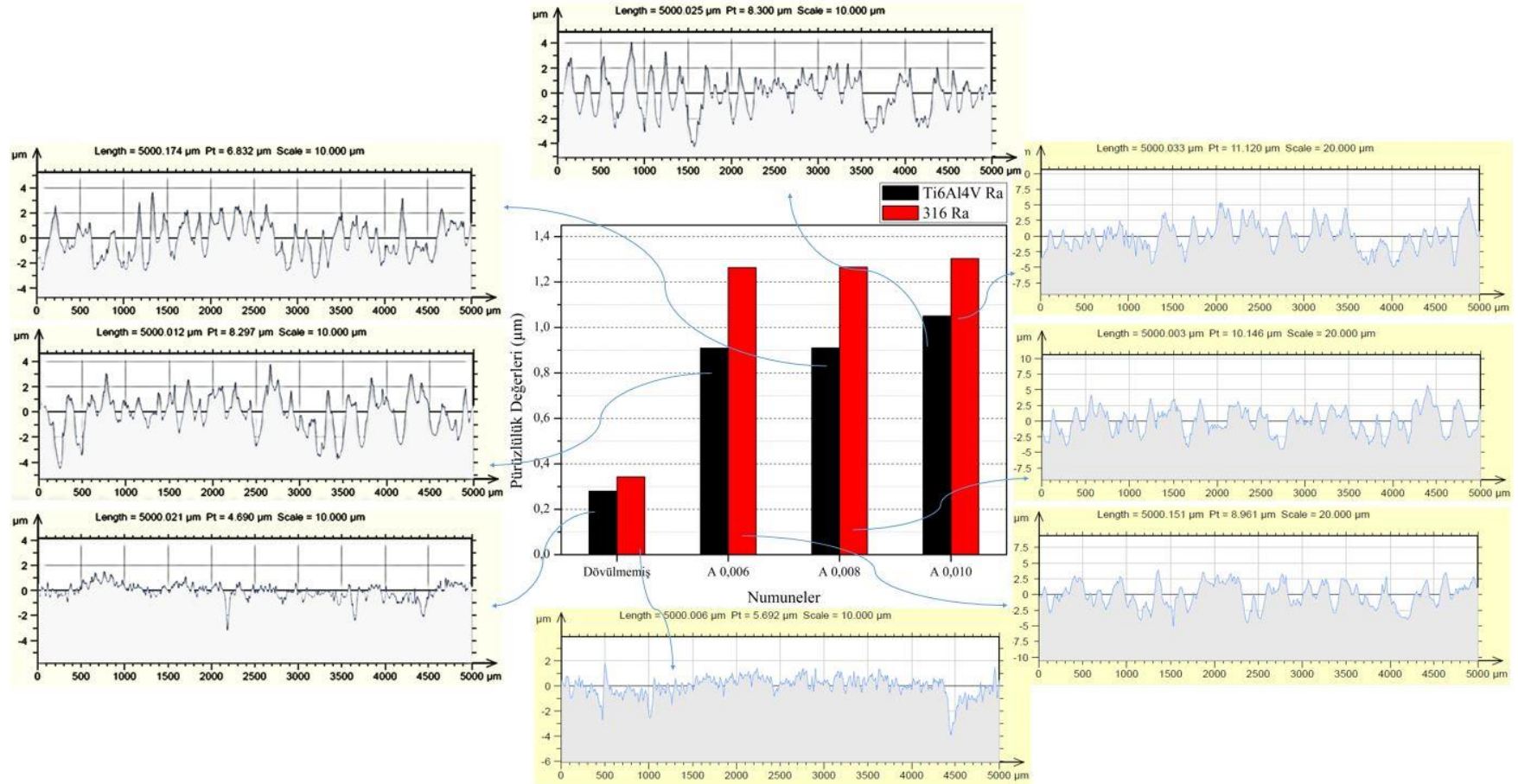
Şekil 5.4'te bilyalı dövme işlemi öncesi ve farklı Almen dövme şiddetleri ile dövülen AISI 316 paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşımı numunelerinin optik profilometre cihazından elde edilen yüzey pürüzlülüğü grafikleri verilmiştir. Grafiklerden de anlaşıldığı gibi bilyalı dövme uygulaması sonrasında yüzey pürüzlülüğü her iki tür malzemeden elde edilen numuneler içinde artmaktadır. Yüzey pürüzlülük değişimleri açısından sonuçlar incelendiğinde bilyalı dövme şiddeti arttıkça numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin artacağı öngörülmektedir. Çizelge 5.2'de farklı Almen dövme şiddetlerindeki bilyalı dövme işlemi sonrasında numunelerdeki yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki değişimlerin yüzde oranları verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 çeliği yüzde pürüzlülük artış oranları.

Almen	Ti6Al4V %	AISI 316 %
A 0,006	225,18	268,56
A 0,008	225,58	269,08
A 0,010	275,52	280,07

Çizelge 5.2'de verilen hesaplamalara göre AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerlerinde daha fazla bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum püskürtülen S230 medyalarının AISI 316 paslanmaz çelik numunelerini daha fazla deforme edebildiğinden kaynaklanmaktadır. Çizelge 5.2'ye göre AISI 316 paslanmaz çelik numunesinin soğuk plastik deformasyon kabiliyetinin Ti6Al4V alaşımına göre daha iyi olduğu söylenebilir [58]. Diğer yandan bilyalı dövme uygulanmış ve uygulanmamış numuneler karşılaştırıldığında yüzey pürüzlülüğünün çok yüksek oranda değişim gösterdiği söylenebilir. Ancak bilyalı dövme şiddetinin artışının yüzey pürüzlülüğü üzerinde düşük oranda etkili olduğu Çizelge 5.2' de net bir şekilde görülmektedir.

Malzemelerin yorulma dayanımı, yatak malzemesi olarak kullanılabilme ve aşınma özellikleri yüzey pürüzlülüğü ile yakından ilgilidir. Bu durumda bilyalı dövme sonrası değişen yüzey pürüzlülük değerlerinin malzemelerin aşınma davranışlarına etkilerinin incelenmesi önemli bir araştırma gerekçesidir. Tez çalışmasında bilyalı dövme sonrasında aşınma karakteristiklerindeki değişimlerin irdelenebilmesi için bu bölüm içerisinde sunulan yüzey pürüzlülük ölçümleri göz önünde bulundurulacaktır. Bilyalı dövme sonrası değişen yüzey pürüzlülük değerlerinin titanyum alaşımı ve paslanmaz çelik malzemelerin aşınma davranışlarına etkileri tartışılacaktır.



Şekil 5.4 : Bilyalı dövme şiddetine bağlı AISI 316 ve Ti6Al4V numunelerinin yüzey pürüzlülüklerinin grafikleri.

5.2 Sertlik Değerlerindeki Değişimler

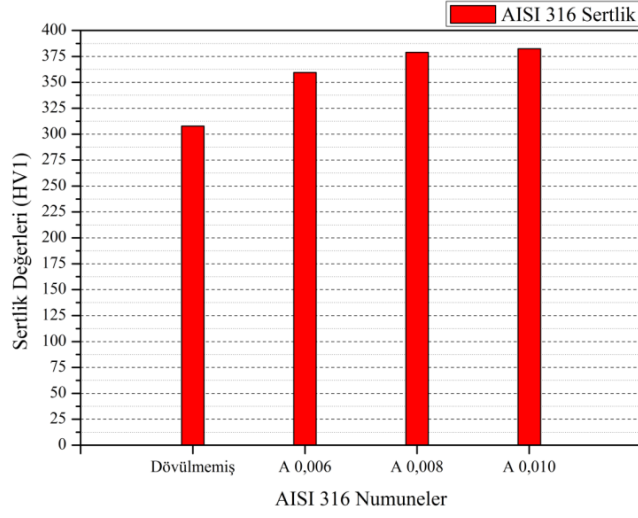
Yüzey pürüzlülük değerleri ile birlikte malzemelerin aşınma davranışlarını etkileyen bir diğer önemli parametre malzemelerin yüzey sertlik değerleridir. Bu nedenle deneysel çalışmaların ikinci aşamasında bilyalı dövme uygulamasının malzemelerin yüzey sertlik değerlerine etkileri incelenmiştir. Buna ek olarak farklı Almen dövme şiddetlerinde gerçekleştirilen bilyalı dövme uygulamalarının malzemelerin yüzey sertliği üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Her numunenin farklı altı noktasından mikrosertlik ölçümleri alınmış, bu altı ölçüm değerlerinin aritmetik ortalamaları alınarak HV1 sertlik değerleri hesaplanmıştır. Bilyalı dövme uygulaması yapılmamış ve 3 farklı A 0.006, A0.008, A0.010 dövme şiddetleri ile dövülmüş AISI 316 paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşımı malzemelerin ortalama sertlik değerleri Çizelge 5.3'te verilmiştir. Ayrıca deney cihazı tarafından numunelerin HRC olarak sertlik değerleri alınmış, bu değerlere Ekler, Ek C, Çizelge C.1'de yer verilmiştir. Çizelge 5.3 incelendiğinde Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik numunelerine bilyalı dövme uygulaması neticesinde yüzey sertlik değerlerinde artış olduğu görülmektedir. Bununla birlikte Almen dövme şiddetinin artışı ile sertlik değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Literatür çalışmaları incelendiğinde bilyalı dövme işlemleri sonrasında malzemenin yüzey ve yüzeye yakın bölgelerinde artan dislokasyon yoğunluğu, yüksek plastik deformasyon ve tane yapısının incilmesi ile malzemenin yüzey sertliğinin artış gösterdiği belirtilmiştir [58]. Bu noktada deneysel çalışmaların sonuçlarının literatür ile uyumlu olduğu söylenebilir.

Çizelge 5.3 : Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 çeliğinin ortalama sertlik değerleri.

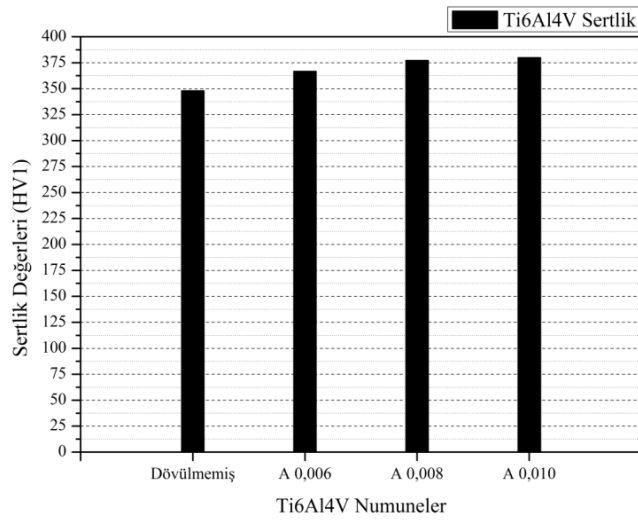
Almen	Ti6Al4V	AISI 316
Dövülmemiş	348	308
A 0,006	367	359
A 0,008	377	379
A 0,010	380	382

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da sırasıyla AISI 316 paslanmaz çeliği ve Ti6Al4V alaşımı malzemelerden elde edilen numunelerin yüzey sertlik değişimlerinin gösterildiği grafikler verilmiştir. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da bilyalı dövme işlemi sonrasında malzemelerin yüzey sertliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmaya benzer literatürdeki çalışmalarda da aynı sonuçlar elde edildiği görülmüştür [48]. Ayrıca yapılan çalışmanın sonuçlarından, bilyalı dövme uygulanmış numunelerin sertlik

değerlerindeki fark çok yüksek olmamakla birlikte Almen dövme şiddetinin artışı ile numune yüzey sertlik değerlerinde artış olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.5 : Bilyalı dövme şiddetine bağlı AISI 316 paslanmaz çeliğinin sertlik değişimi.

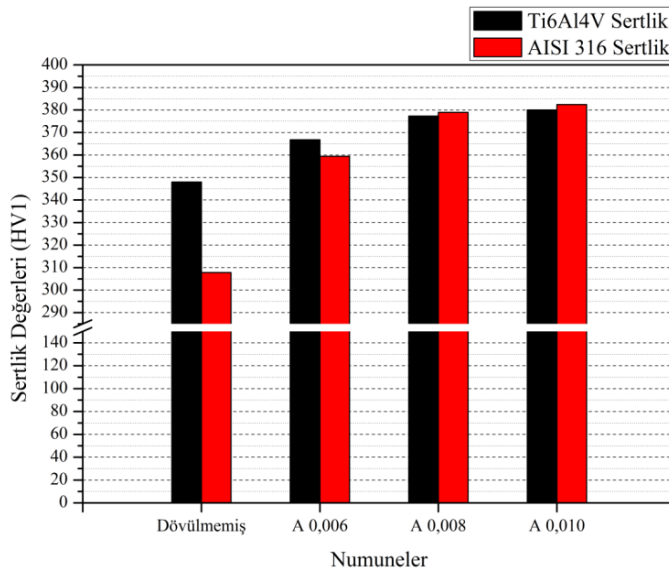


Şekil 5.6 : Bilyalı dövme şiddetine bağlı Ti6Al4V alaşımının sertlik değişimi.

Çalışmalar neticesinde elde edilen bu sonuç literatürdeki bilyalı dövme uygulaması yapılmış olan numunelerin sertlik değişim eğilimleri ile örtüşmektedir. Bilyalı dövme uygulaması sonucunda yüzeye yakın olan bölgelerdeki tanelerin ince yapılı hale gelerek sertlik değerlerinde bir artış sergilediği ve bu sertlik artışının uygulamadaki Almen dövme şiddeti değişimi ile paralel olduğu bilinmektedir. Bazı çalışmalarda Almen dövme şiddetlerindeki artışlar numunelerin sertlik değerlerinde belirli bir seviyeye kadar artış meydana getirmekte, daha yüksek dövme şiddetleri sonucunda deformasyon şiddetine bağlı olarak yüzeyden malzeme kırılmaları

gerçekleşmektedir. Bunun sonucu olarak yüzey sertlik değerlerinde azalma veya işlem görmemiş (dövülmemiş) numunelerin yüzey sertlik değerleri ile aynı sertlik sonuçları elde edilmektedir [34].

Şekil 5.7’de deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 316 çeliğinin ve Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme şiddetine bağlı olarak numune yüzey sertlik değerleri karşılaştırılması verilmiştir. Dövülmemiş AISI 316 paslanmaz çelik numunenin sertlik değerleri bilyalı dövme işlemi yapılmamış Ti6Al4V alaşımının sertlik değerlerinden daha düşük değerdedir. Bilyalı dövme uygulamasında sonra her iki tür malzeme içinde sertlik artışı gözlemlenmiş ve sertlik değerlerindeki fark azalarak birbirlerine yaklaşmıştır. Dövme şiddeti artışı ile AISI 316 paslanmaz numunelerin yüzey sertliği değerlerindeki artış titanyum alaşımı numunelere göre daha yüksek olup, A 0,008 ve A 0,010 Almen dövme şiddetlerinde Ti6Al4V alaşımına göre daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.7 : AISI 316 ve Ti6Al4V numunelerin sertlik değişiminin karşılaştırması.

Yüksek Almen dövme şiddetleri sonrasında AISI 316 paslanmaz çelik malzemenin sertlik değerlerinin Ti6Al4V alaşımı numunelerinin sertlik değerlerinden daha yüksek çıkması literatürdeki çalışmalarda da karşılaşılan bir sonuçtur [58]. AISI 316 paslanmaz numunelerin bu şekilde bir sertlik artışı göstermesi plastik deformasyon kabiliyetinin daha yüksek oluşu sonucunda elde edilen ince tane yapısından kaynaklandığı öngörülmektedir. AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin aşırı soğuk plastik deformasyonu sertlik artışıdaki bu farkı sonuçlandırmıştır. Bu neticelere

bakılarak bilyalı dövme uygulamaları ile numunelerin dayanımlarının arttığı öngörülmektedir.

Çizelge 5.4'te deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 316 paslanmaz çeliği ve Ti6Al4V alaşımlarının yüzey sertliği değerlerindeki yüzde artış oranları verilmiştir. Paslanmaz çelik numunelerin sertlik artışıdaki oranın daha yüksek olduğu ve pekleşme kabiliyetinin daha iyi olduğu Çizelge 5.4'te daha net olarak gösterilmiştir. Bu noktada bir önceki bölümde açıklanan yüzey pürüzlülük değerlerinin değişimi ile sertlik değerlerinin değişimlerinin birbirlerine paralel olduğu söylenebilir. Paslanmaz çelik malzemenin daha yüksek plastik deformasyon göstermesi ile titanyum alaşımına kıyasla hem sertlik değerlerinin hem de pürüzlülük değerlerinin bilyalı dövme işlemi ile daha yüksek oranda artış gösterdiği belirlenmiştir.

Çizelge 5.4 : Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 çeliği yüzde sertlik artış oranları.

Uygulamalar	Ti6Al4V %	AISI 316 %
A 0,006	5,39	16,76
A 0,008	8,42	23,09
A 0,010	9,20	24,22

Literatür çalışmaları incelendiğinde bu bölüm içerisinde belirtildiği gibi bilyalı dövme işlemi ile malzemelerin yüzey sertliklerinin artış gösterdiği bilinmektedir. Ancak bu artışın malzemelerin aşınma davranışlarına etkileri üzerine literatürde henüz yeteri kadar çalışma yer almamaktadır. Tez çalışmasının en önemli özgün değeri bilyalı dövme sonrası malzemelerin yüzey sertlik değerlerinde, yüzey pürüzlülüklerinde ve morfolojilerinde meydana gelen değişimler ile aşınma davranışları arasındaki ilişkinin ortaya konmasıdır. Gerçekleştirilen detaylı yüzey analizleri ve aşınma deneyleri sonucunda tez çalışmasında bilyalı dövme işlemlerinin titanyum ve paslanmaz çelik alaşımlarının aşınma karakteristiklerine etkileri açıklanmaya çalışılacaktır.

5.3 Sürtünme Karakteristiği

AISI 316 paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşımı numunelerin yağlı ve kuru çalışma şartlarındaki sürtünme karakteristikleri, kayma hızının değişimine, uygulanan dövme şiddetine ve normal yükün değişimine bağlı olarak incelenmiştir. Bu amaçla sürtünme karakteristiğindeki değişimlerin incelenmesinde block on ring sürtünme ve aşınma deney metodu kullanılmıştır.

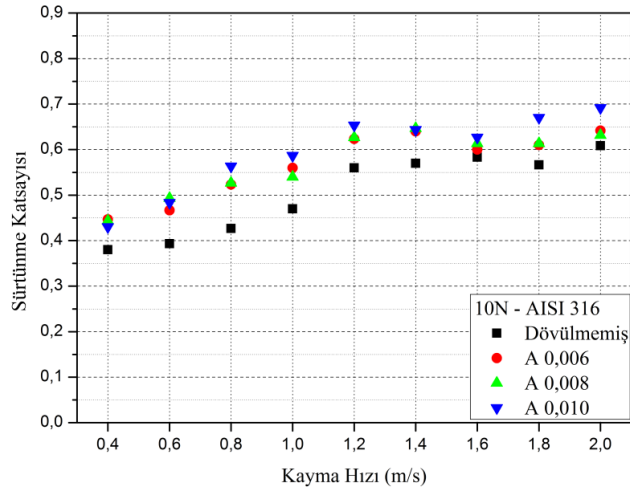
5.3.1 Kuru çalışma şartlarında sürtünme karakteristiği

Bu bölümde farklı Almen dövme şiddetleri ile bilyalı dövme yapılmış AISI 316 paslanmaz çelik ve Ti6Al4V titanyum alaşımı malzemelerin kuru çalışma şartlarındaki sürtünme karakteristiğindeki değişimler incelenmiştir. Bu amaçla her iki farklı tür malzemedan hazırlanan herhangi dövme işlemi görmemiş numuneler ile A0.006, A0.008 ve A0.010 Almen dövme şiddetleriyle bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunelerin 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 ve 2.0 m/s kayma hızları için sabit normal kuvvet altında sürtünme katsayısının değişimi incelenmiştir. Tüm deneylerde karşı disk yüzeyi aseton ile temizlenerek hem teknik olarak kuru bir yüzey elde edilmeye çalışılmış, hem de daha önceki deneyden kalabilecek aşınma partikülleri yüzeyden uzaklaştırılmıştır.

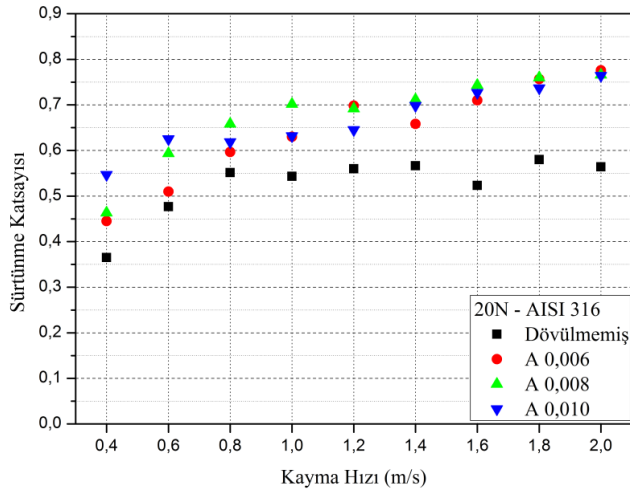
Şekil 5.8 – 5.10’da sırasıyla 10 N, 20 N, ve 40N normal yük altında farklı Almen dövme şiddetleriyle bilyalı dövme uygulaması yapılmış AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin kayma hızının bir fonksiyonu olarak kuru çalışma şartlarındaki sürtünme katsayısının değişimi görülmektedir. Grafikler incelendiğinde üç farklı Almen dövme şiddetindeki bilyalı dövme işleminde de AISI 316 paslanmaz çelik malzemenin sürtünme katsayısında önemli bir değişim gözlenmiştir. Üç farklı Almen dövme şiddetinde dövülen numunelerin sürtünme katsayısında yükselme tespit edilmiştir. Dövme işlemi görmüş olan numunelerin ve dövme işlemi yapılmamış numunelerin sürtünme katsayısı değişim eğiliminin birbirlerine benzemekte olduğu görülmüştür.

Deney sonuçları incelendiğinde sürtünme katsayısının artan kayma hızı ile birlikte arttığı görülmektedir. Bunun yanından uygulanan Almen dövme şiddetinin değişmesinin sürtünme katsayısı üzerindeki etkileri net olarak anlaşılamamaktadır. Genel olarak sürtünme katsayısı kayma hızına bağlı olarak 0,4 ila 0,7 arasında değişmektedir.

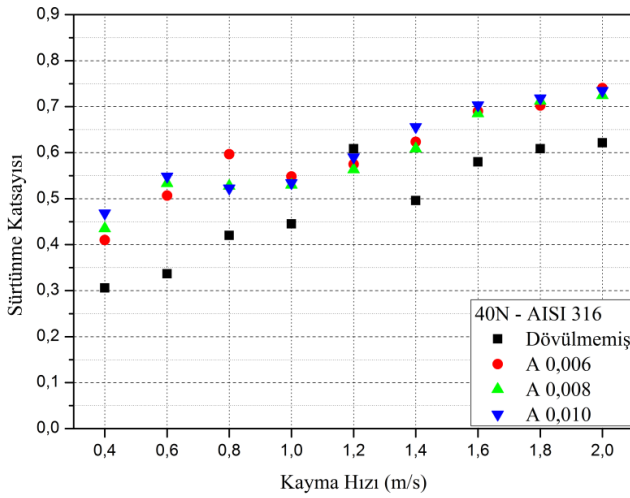
Şekil 5.11’de 10 N, Şekil 5.12’de 20 N, Şekil 5.13’te 40 N normal yük uygulanan farklı Almen dövme şiddeti uygulanmış olan Ti6Al4V alaşımı numunelerin kayma hızının bir fonksiyonu olarak kuru çalışma şartlarındaki sürtünme katsayısının değişimi görülmektedir.



Şekil 5.8 : 10N normal yük uygulanan paslanmaz çeliğin kuru ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.

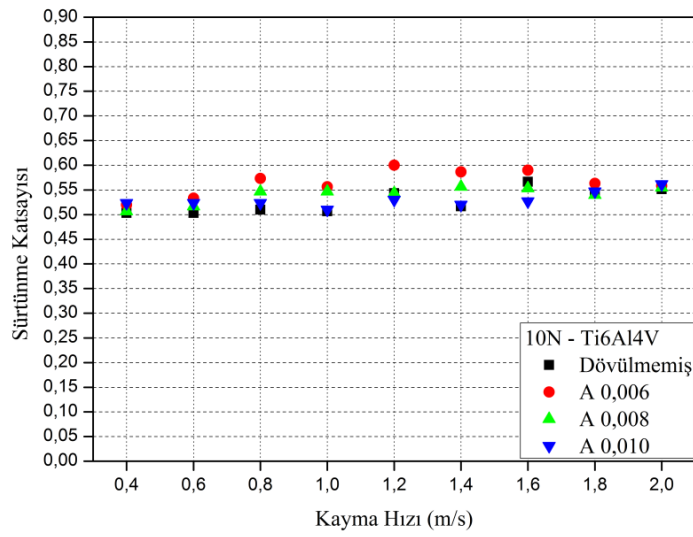


Şekil 5.9 : 20N normal yük uygulanan paslanmaz çeliğin kuru ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.

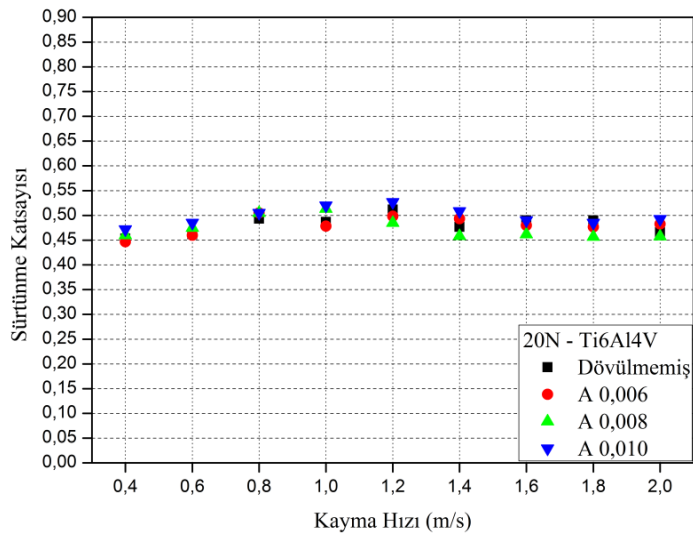


Şekil 5.10 : 40N normal yük uygulanan paslanmaz çeliğin kuru ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.

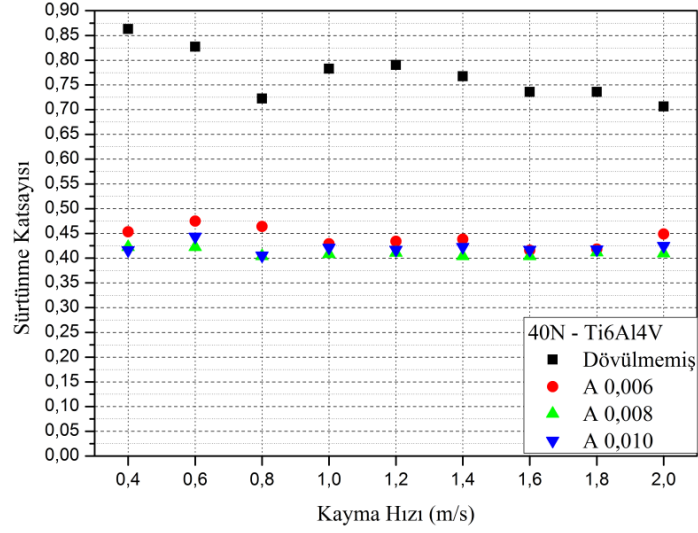
Şekil 5.11 ve Şekil 5.13 arasındaki grafikler incelendiğinde Ti6Al4V alaşımı için gerçekleştirilen farklı Almen dövme şiddetindeki bilyalı dövme uygulamalarının kuru çalışma şartlarındaki sürtünme katsayısında genel olarak kayda değer bir değişim meydana getirmediği görülmüştür. Farklı Almen dövme şiddetleri ile dövülen ve dövme işlemine maruz bırakılmamış titanyum alaşımlarının kuru çalışma şartlarındaki sürtünme katsayısı değerleri birbirine yakın olup, yaklaşık olarak benzer bir değişim eğilimi gözlenmiştir. Bunun yanında 40 N normal yük altında sürtünme katsayısında bilyalı dövme işlemi uygulanmış numuneler için bir azalma gözlenmiştir.



Şekil 5.11 : 10N normal yük uygulanan titanyum alaşımının kuru ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.



Şekil 5.12 : 20N normal yük uygulanan titanyum alaşımının kuru ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.



Şekil 5.13 : 40N normal yük uygulanan titanyum alaşımının kuru ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.

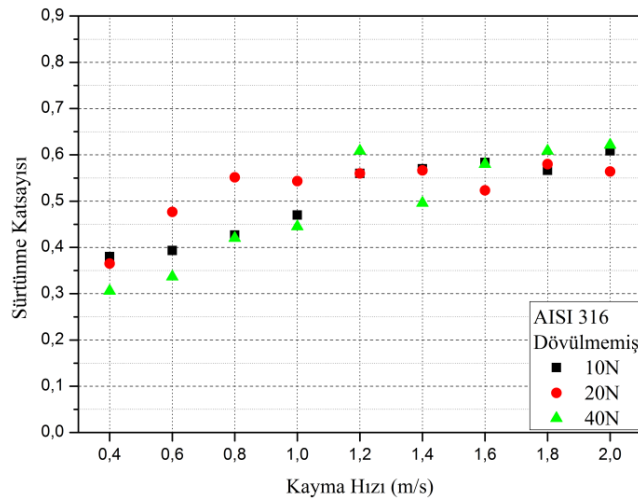
Farklı üç normal yük ile yapılan sürtünme deneylerinde kayma hızının artışı ile Ti6Al4V alaşımının kuru sürtünme çalışma şartlarındaki sürtünme katsayısı değerleri birbirine yakın olup, sabit bir değer etrafında değiştiği söylenebilir. 40 N normal yük altında yapılan deneylerde dövülmemiş numunelerin dışındaki diğer numunelerde sürtünme katsayısının 0,5 civarında değiştiği gözlenmiştir.

5.3.2 Kuru çalışma şartlarında normal kuvvete bağlı sürtünme karakteristiği

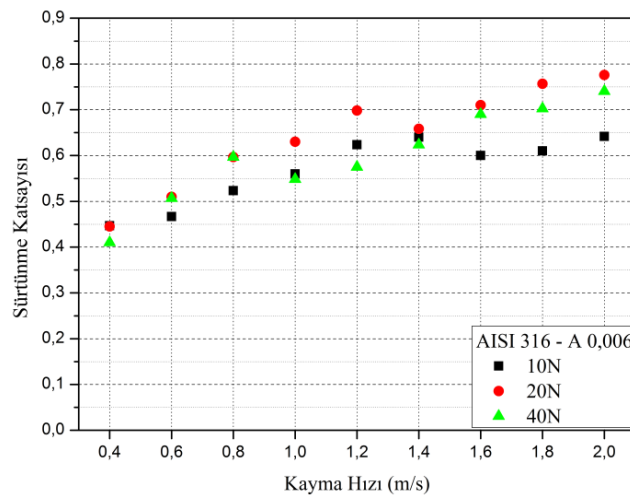
Bu bölümde Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik malzemelerin kuru sürtünme çalışma şartlarındaki sürtünme karakteristiklerinin kayma hızı ve normal kuvvete bağlı değişimleri incelenmiştir.

Şekil 5.14'te bilyalı dövme işlemi yapılmamış, Şekil 5.15'de A 0.006, Şekil 5.16'da A 0.008 ve Şekil 5.17'de A 0.010 Almen dövme şiddetleri ile dövülmüş AISI 316 paslanmaz çelik malzemelerin kuru çalışma şartlarındaki sürtünme katsayılarının kayma hızı ve uygulanan normal kuvvete bağlı değişimi verilmiştir. Bilyalı dövme yapılmamış numunelerin ve üç farklı Almen dövme şiddetinde bilyalı dövme işlemi yapılmış numunelerin kuru sürtünme çalışma şartlarındaki sürtünme katsayısı değerleri ve bu değerlere bağlı çizilen grafikler incelendiğinde, uygulanan normal yük ile sürtünme katsayısının değişmediği söylenebilir. Uygulanan normal yük değerindeki artış ile genel olarak kuru çalışma şartlarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin net olarak arttığı veya azaldığı gözlemlenmemiştir. Buna ek olarak Şekil 5.15 - 5.17 incelendiğinde, kuru çalışma şartlarında genel olarak 20 N normal yük

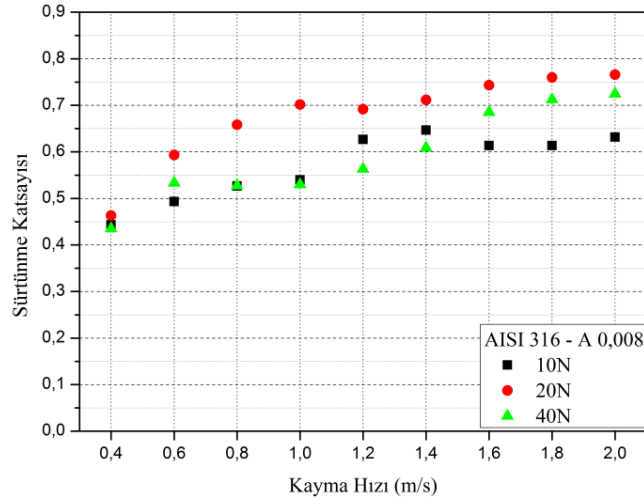
uygulamalarında sürtünme katsayısı değerlerinin maksimum olduğu, 10N ve 40N normal yük uygulamalarındaki sürtünme katsayısı değerlerinde ise birbirine çok yakın olduğu değişimler görülmektedir. 0,8 m/s ile 1,4 m/s kayma hızları aralığında sürtünme katsayısı değerlerinin 10 N normal yük uygulamalarında 40 N normal yük uygulama değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. Diğer kayma hızı aralıklarında 40 N normal yük uygulamalarındaki sürtünme katsayısı değerleri 10 N normal yük durumundaki sürtünme katsayısı değerlerinden daha yüksektir. Kayma hızının değişimi ile sürtünme katsayısı değerlerindeki değişimler Şekil 5.14 ile Şekil 5.17 arasındaki grafiklerde incelendiğinde, kuru sürtünme çalışma şartlarında AISI 316 paslanmaz çelik malzemenin sürtünme katsayısının bilyalı dövme işlemi ve kayma hızının artışına bağlı olarak yükseldiği tespit edilmiştir.



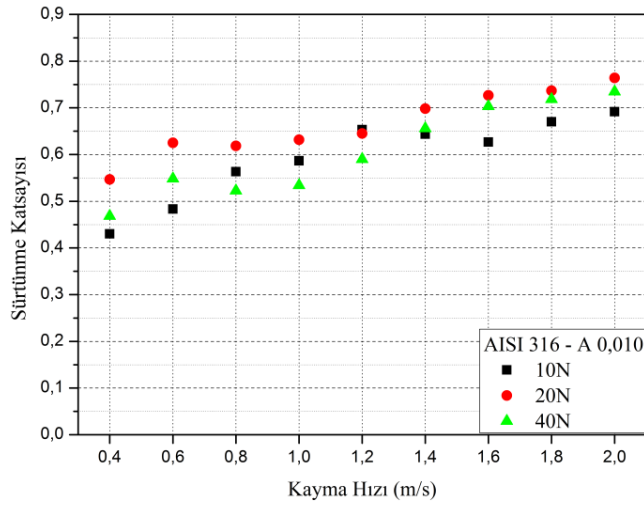
Şekil 5.14 : Bilyalı dövülmemiş paslanmaz çeliğin sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.



Şekil 5.15 : A 0,006 dövme şiddetli paslanmaz çeliğin sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.



Şekil 5.16 : A 0,008 dövme şiddetli paslanmaz çeliğin sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.

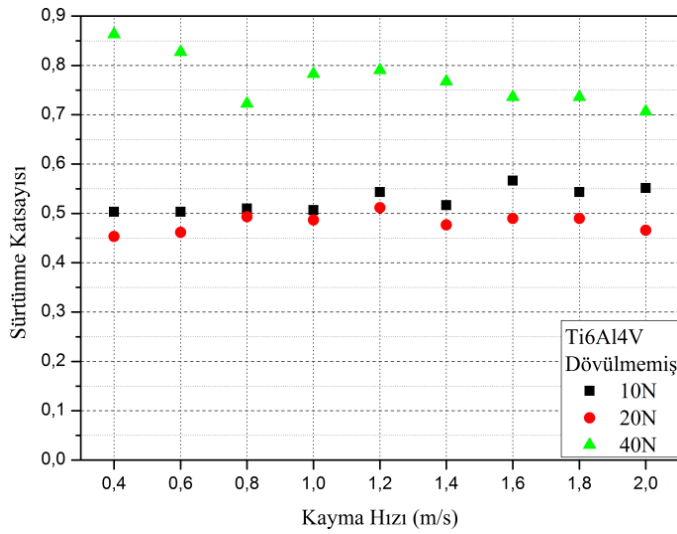


Şekil 5.17 : A 0,010 dövme şiddetli paslanmaz çeliğin sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.

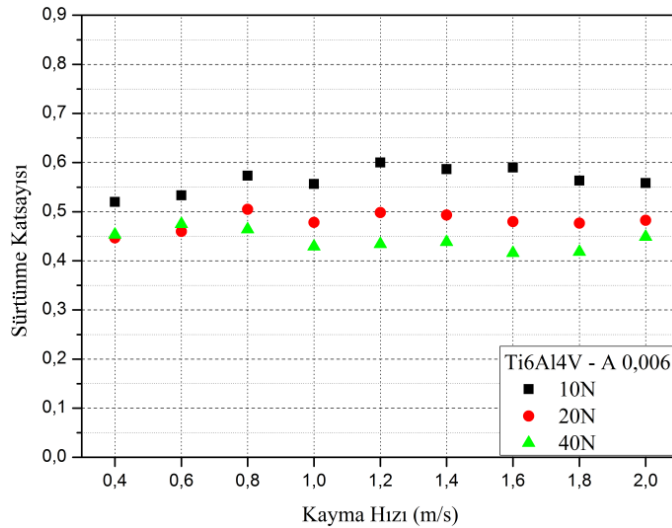
Ti6Al4V alaşımı malzemelerin bilyalı dövme uygulanmamış, A 0.006, A0.008 ve A0.010 Almen dövme şiddetlerinde dövülmüş numunelerinin kuru sürtünme çalışma şartlarındaki sürtünme katsayıları kayma hızına ve uygulanan normal kuvvete bağlı değişimi sırasıyla Şekil 5.18, Şekil 5.19, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de verilmiştir. Bilyalı dövme yapılmamış numunelerin ve üç farklı Almen dövme şiddetinde bilyalı dövme uygulaması yapılmış numunelerin kuru çalışma şartlarındaki sürtünme katsayısı değerleri ve bu değerlere bağlı çizilen grafikler incelendiğinde, uygulanan normal yük değerindeki artış ile genel olarak kuru sürtünme çalışma şartlarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Kayma hızındaki değişim

ile kuru ortamdaki numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinde değişim gözlenmemiştir.

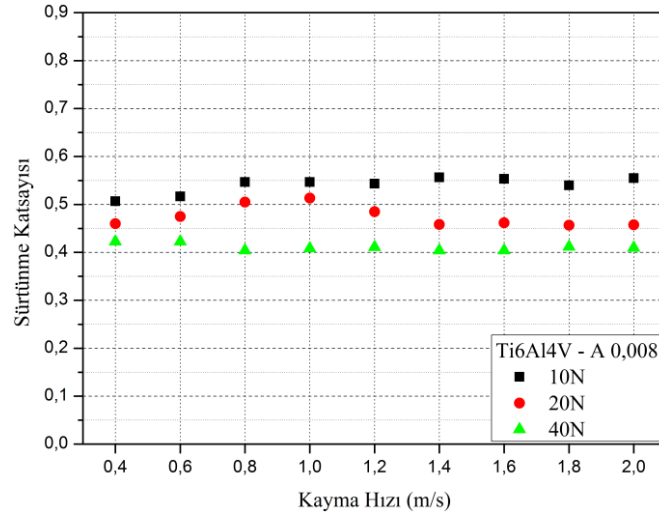
Sadece dövülmemiş numunelerin deney sonuçlarında 40N normal yük uygulanan deney numunelerinin kuru sürtünme katsayısı değerlerinin diğer numune değerlerinden daha yüksek olduğu ve kayma hızının artışı ile 40N normal yükleme durumunda kuru sürtünme katsayısında azalma görülmüştür. Bunun yanında her malzeme grubunun kuru çalışma şartlarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin değişim trendi genel olarak birbirine benzemektedir.



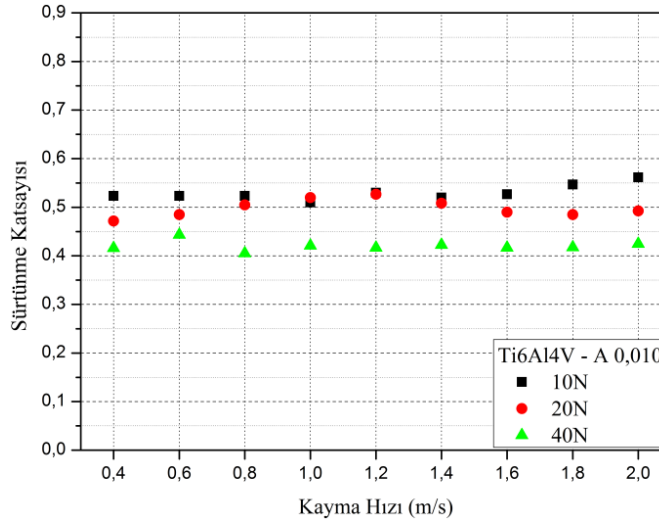
Şekil 5.18 : Bilyalı dövülmemiş titanyum alaşımın sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.



Şekil 5.19 : A 0,006 dövme şiddetli titanyum alaşımın sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.



Şekil 5.20 : A 0,008 dövme şiddetli titanyum alaşımının sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.



Şekil 5.21 : A 0,010 dövme şiddetli titanyum alaşımının sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.

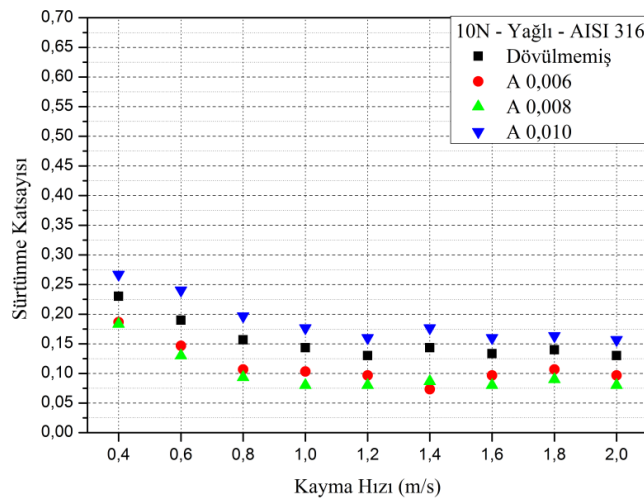
5.3.3 Sınır sürtünme şartlarında sürtünme karakteristiği

Bu bölümde üç farklı Almen şiddetlerinde bilyalı dövülen AISI 316 paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşımı malzemelerin yağlayıcı madde bulunan sınır sürtünmeli çalışma şartlarındaki sürtünme katsayısının değişimi incelenmiştir. Bu amaçla her iki farklı tür malzemeden elde edilen herhangi bir dövme işlem yapılmamış numuneler ile A 0.006, A 0.008 ve A 0.010 Almen dövme şiddetleriyle bilyalı dövme uygulaması yapılmış olan numunelerin 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 ve 2.0 m/s kayma hızlarında sürtünme deneyleri yapılarak karşılaştırılmıştır. Tüm deneylerde yağlayıcı olarak SAE 90 viskozite sınıflı Petrol Ofisi Maxigear Keban dişli yağı kullanılmıştır. SAE 90 otomobillerin düz ve helisel dişlileri için vites kutularında ve

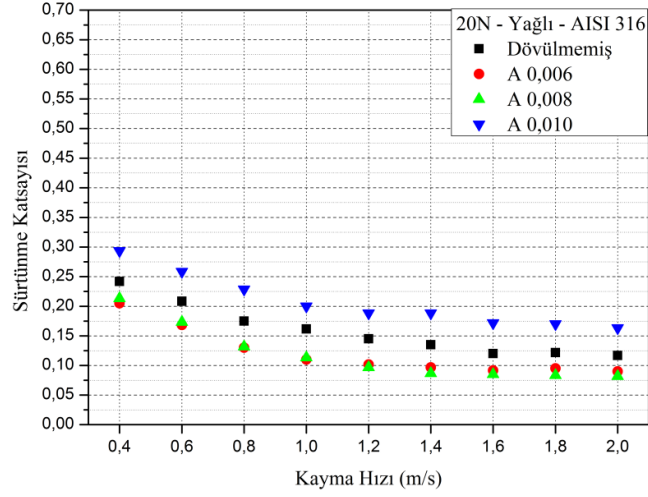
diferansiyellerinde kullanıma uygundur. 100°C’de 13.5 cSt kinematik viskozite değeri olan bu yağ oksidasyona dayanıklı, köpük yapmayan, çalışma sırasında kalınlaşmayan, metal yüzeyler üzerinde film oluşturarak pasa ve korozyona karşı koruyucu özelliklerdedir. Deneyler sırasında karşı disk yüzeyi temizlenip, yağ düzenli olarak değiştirilmiş ve yağ seviyesini sabit tutabilmek için gerekli yağ takviyesi işlemleri yapılmıştır.

Farklı Almen dövme şiddetleri ile dövülen AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin kayma hızının ve uygulanan normal yükün bir fonksiyonu olarak yağlı çalışma şartlarındaki sınır sürtünme katsayılarının grafiksel gösterimi Şekil 5.22, Şekil 5.23, Şekil 5.24’te verilmiştir. Grafikler incelendiğinde üç farklı Almen şiddetindeki dövme işleminde de AISI 316 paslanmaz çelik malzemenin sürtünme katsayılarında değişim eğilimi genel olarak benzer elde edilmiştir. Kayma hız arttıkça yağlı ortamdaki sınır sürtünme katsayılarının azaldığı gözlemlenmiştir.

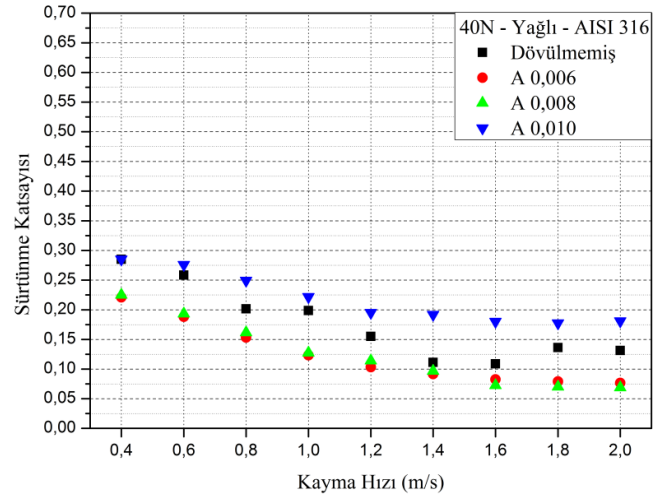
Deney sonuçları doğrultusunda elde edilen sürtünme katsayısı değerlerine bağlı çizilen grafiklere bakılarak Almen dövme şiddetinin değişmesi ile sınır sürtünme katsayısı değerlerinde önemli değişimler elde edilmiş olup, sınır sürtünme çalışma şartlarındaki AISI 316 paslanmaz çeliğin sürtünme katsayısı değerlerinde net bir azalma ve artma gözlemlenmemiştir. Bunun yanında farklı normal yük altında gerçekleştirilen deneylerde A 0,006 ve A0,008 dövme şiddeti ile dövülen numunelerin sürtünme katsayılarında düşüş elde edilirken A 0,010 dövme şiddeti ile dövülen numunelerde sürtünme katsayısında dövülmemiş olana göre daha yüksek bir değer gözlenmiştir. Sürtünme katsayısının 0,25 ila 0,1 arasında değiştiği söylenebilir.



Şekil 5.22 : 10N normal yük uygulanan paslanmaz çeliğin yağlı ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.



Şekil 5.23 : 20N normal yük uygulanan paslanmaz çeliğin yağlı ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.

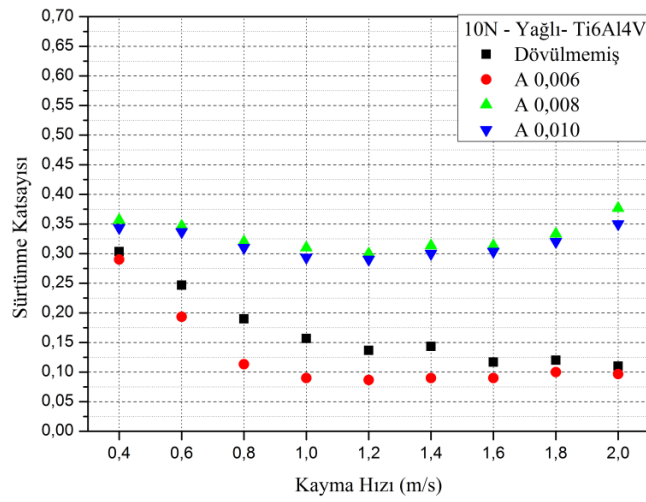


Şekil 5.24 : 40N normal yük uygulanan paslanmaz çeliğin yağlı ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.

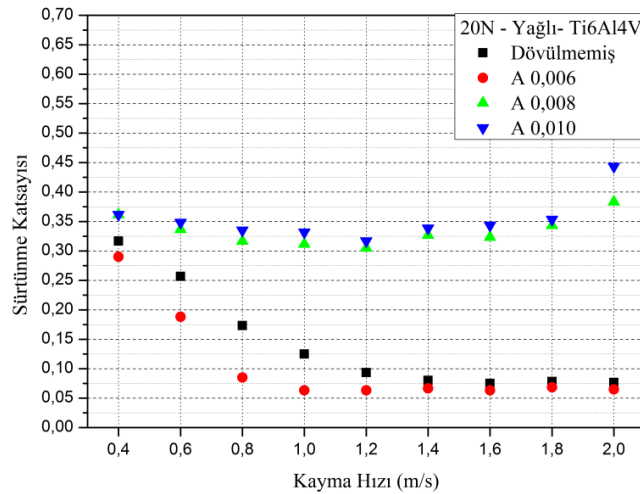
Şekil 5.25’de 10 N, Şekil 5.26’da 20 N, Şekil 5.27’de 40 N normal yük altında, farklı Almen dövme şiddeti ile bilyalı dövme yapılan Ti6Al4V alaşımında elde edilen numunelerin kayma hızının bir fonksiyonu olarak yağlı ortamdaki sınır sürtünme katsayısının grafiksel gösterimi yapılmıştır. Grafikler incelendiğinde yağlı ortamda Ti6Al4V alaşımının sınır sürtünme katsayısı değerleri dövme şiddetine göre önemli derecede değişim gösterdiği görülmektedir. Farklı normal yükler altında, yağlı ortamda çalışan numunelerin sınır sürtünme katsayısı değerlerindeki değişim eğilimi genel olarak benzer gözlemlenmiştir. Ti6Al4V alaşımı için uygulanan deney parametreleri sonucunda yüzey dövme işleminin yağlı ortamdaki sınır sürtünme katsayısını dövme şiddetine göre farklı oranlarda etkilediği görülmüştür. Almen dövme şiddeti artışı ile genel olarak sınır sürtünme katsayısında artış

gözlemlenmiştir. 3 farklı normal yük değeri ile yapılan sürtünme deneylerinde de Ti6Al4V alaşımının yağlı ortamdaki sınır sürtünme katsayısı değerleri A 0.006 dövme şiddetine maruz kalan numunelerde azalırken, A 0.008 ve A 0.010 dövme şiddeti ile dövülen numunelerin yağlı ortamdaki sürtünme katsayısı değerleri artış göstermiştir.

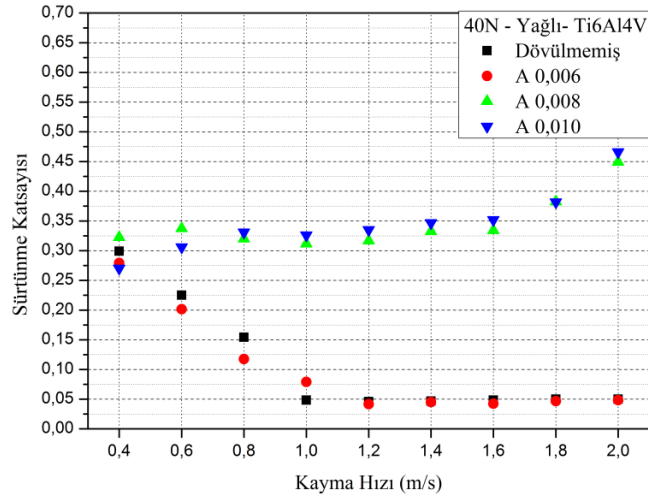
Bunun yanında dövme işlemi yapılmamış ve A 0.006 dövme şiddeti ile dövülmüş olan Ti6Al4V alaşımı numunelerinin yağlı ortamdaki sınır sürtünme değerleri artan kayma hızı ile azalış göstermiş, yaklaşık olarak 1.0 m/s kayma hızından sonra sürtünme katsayısı değerlerinde azalma sona ermiş ve sabitlenmiştir.



Şekil 5.25 : 10N normal yük uygulanan titanyum alaşımın yağlı ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.



Şekil 5.26 : 20N normal yük uygulanan titanyum alaşımın yağlı ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.



Şekil 5.27 : 40N normal yük uygulanan titanyum alaşımın yağlı ortamdaki sürtünme katsayısının hız ve dövme şiddetine bağlı değişimi.

A 0.008 ve A 0.010 Almen dövme şiddetlerinde dövülen titanyum alaşımı numunelerin yağlı ortamdaki sınır sürtünme katsayısı değerleri ise dövme işlemi uygulanmamış numune değerlerinden daha yüksek gözlemlenirken, kayma hızının değişiminden önemli derecede etkilenmemiş, yakın değerler ve eş değişim eğilimi vermiştir. Bunun yanında A 0.008 ve A 0.010 Almen dövme şiddetlerinde dövülen numuneler için sınır sürtünme şartlarında sürtünme katsayısının artan kayma hızı ile genel olarak değişmediği, 1.6 m/s kayma hızından sonra bir miktar yükselme göstererek 0,35 değerinde 0,45 değerine yükseldiği görülmüştür.

5.3.4 Sınır sürtünme şartlarında normal kuvvete bağlı sürtünme karakteristiği

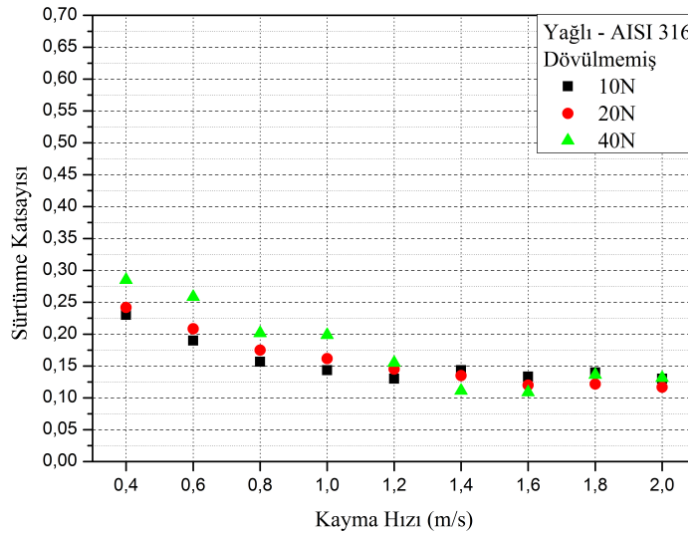
Bu bölümde Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik malzemelerin yağlı ortamdaki sınır sürtünme katsayılarının kayma hızı ve normal kuvvete bağlı değişimleri incelenmiştir.

Şekil 5.28’de dövme işlemi görmemiş, Şekil 5.29’da A 0.006, Şekil 5.30’da A0.008 ve Şekil 5.31’de A 0.010 Almen dövme şiddetleri ile dövülmüş AISI 316 paslanmaz çelik malzemelerin yağlayıcı ortamdaki sınır sürtünme katsayılarının kayma hızı ve uygulanan normal kuvvete bağlı değişimi verilmiştir.

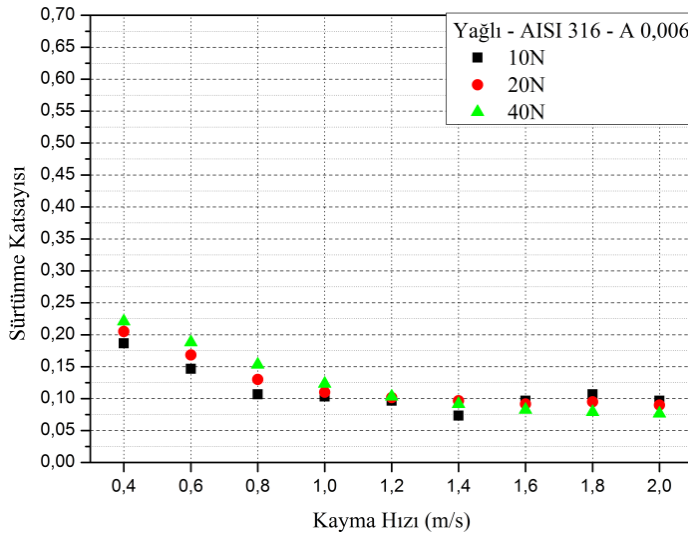
Bilyalı dövme işlemi görmemiş ve üç farklı Almen dövme şiddetinde dövülmüş numunelerin yağlı ortamdaki sürtünme katsayısı değerleri ve bu değerlere bağlı çizilen grafikler incelendiğinde, uygulanan normal yük değerindeki artış ile yağlı ortamdaki AISI 316 paslanmaz çelik malzemenin sınır sürtünme katsayısı

değerlerinin çok küçük miktarlarda arttığı gözlemlenmiş olup bu küçük değişimlere bakılarak sürtünme katsayısının normal yük artışı ile arttığı söylenememektedir.

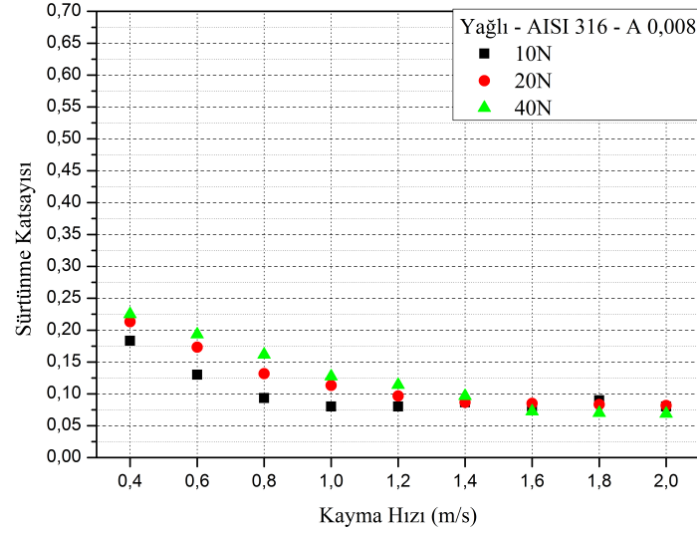
Diğer yandan 1.2 m/s kayma hızından sonra sınır sürtünme şartlarındaki sürtünme katsayısı değerleri birbirine çok yakın elde edilmiş, bu kayma hızı değerinden sonra sürtünme katsayısındaki düşüş azalmıştır. Buna ek olarak kayma hızının artışı ile birlikte genel olarak AISI 316 paslanmaz çeliğinin sınır sürtünme katsayısında düşüş tespit edilmiştir.



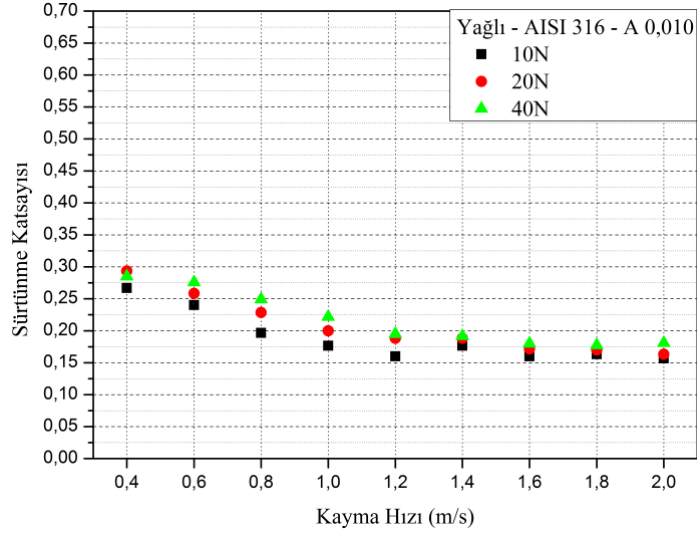
Şekil 5.28 : Bilyalı dövülmemiş paslanmaz çeliğin yağlı ortamdaki sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.



Şekil 5.29 : A 0,006 dövme şiddetli paslanmaz çeliğin yağlı ortamdaki sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.



Şekil 5.30 : A 0,008 dövme şiddetli paslanmaz çeliğin yağlı ortamdaki sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.

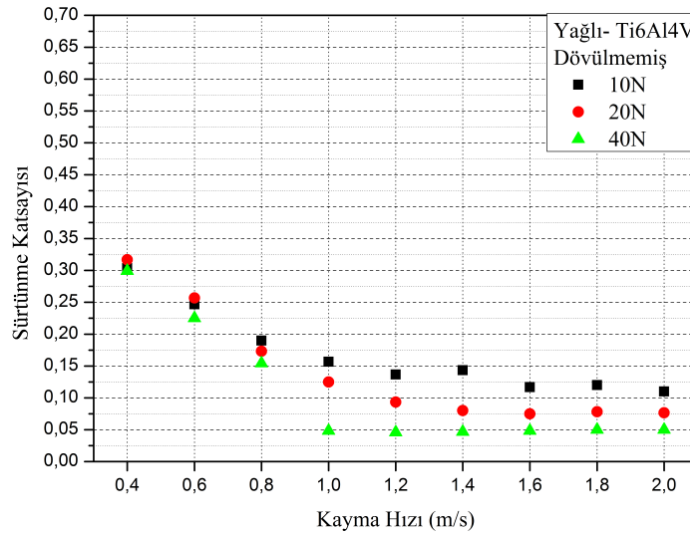


Şekil 5.31 : A 0,010 dövme şiddetli paslanmaz çeliğin yağlı ortamdaki sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.

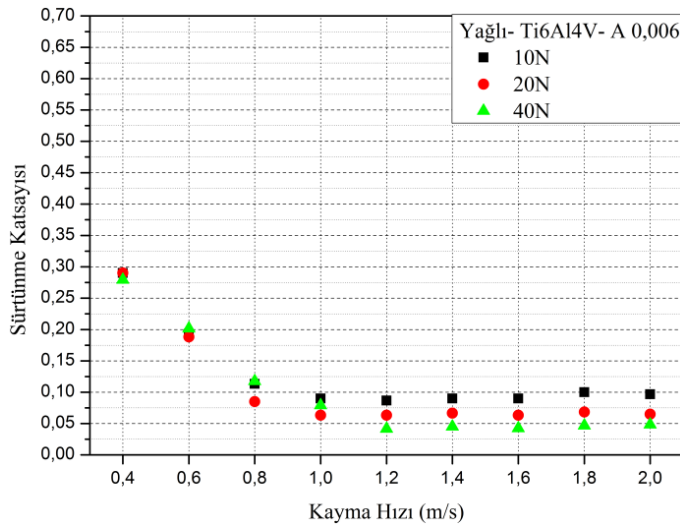
Bilyalı dövme işlemi uygulanmamış titanyum alaşımı ile A0.006, A0.008 ve A0.010 Almen dövme şiddetleriyle dövülen Ti6Al4V alaşımı numunelerin yağlı ortamdaki sınır sürtünme katsayısının kayma hızı ve uygulanan normal kuvvete bağlı değişimi sırasıyla Şekil 5.32, Şekil 5.33, Şekil 5.34 ve Şekil 5.35'te verilmiştir.

Dövülmemiş ve A 0.006 Almen dövme şiddeti ile dövülen numunelerin sınır sürtünme katsayısı değerlerinin her normal yük değeri için artan kayma hızı ile azaldığı Şekil 5.32 ve Şekil 5.33'te görülebilmektedir. 1.0 m/s kayma hızından sonra sürtünme katsayısı değerlerindeki düşüş azalıp birbirine yakın değerler sergilemiştir. Ayrıca artan normal yük değerleri ile sürtünme katsayısı azalma göstermiştir.

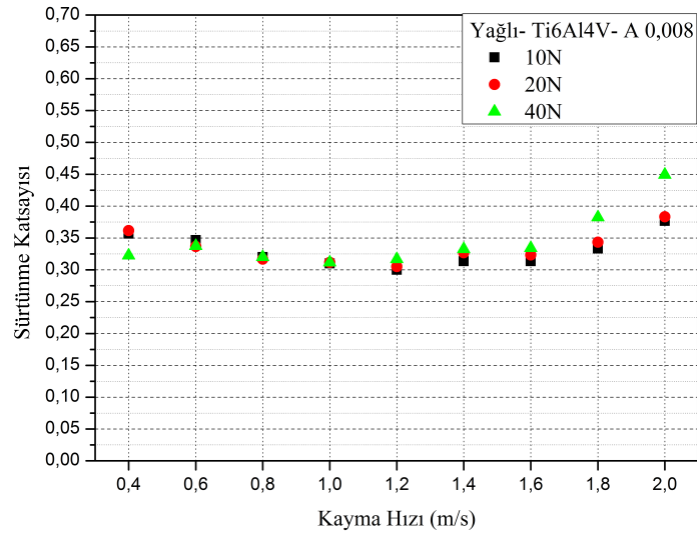
Şekil 5.34 ve Şekil 5.35'te görüldüğü gibi A 0.008 ve A 0.010 Almen dövme şiddetleri ile dövülen Ti6Al4V alaşımı numunelerinin yağlı ortamda üç farklı normal yük altındaki sınır sürtünme katsayısı değerleri kayma hızının artması ile kayda değer değişimler göstermemiştir. Genel olarak A 0.008 ve A 0.010 Almen dövme şiddetleri ile dövülen Ti6Al4V alaşımı numunelerinin sınır sürtünme çalışma şartlarındaki sürtünme katsayısı değerleri kayma hızının değişmesinden etkilenmeyip, sabite yakın küçük değerlerde salındığı gözlenmiştir. Yine ilgili Şekil 5.34 ve Şekil 5.35 incelendiğinde sürtünme katsayısı değerlerinin kayma hızının 1.6 m/s hıza ulaşmasından sonra artış göstermiştir. Bunun yanında artan normal yük değerleri ile sürtünme katsayısı yükselme göstermiştir.



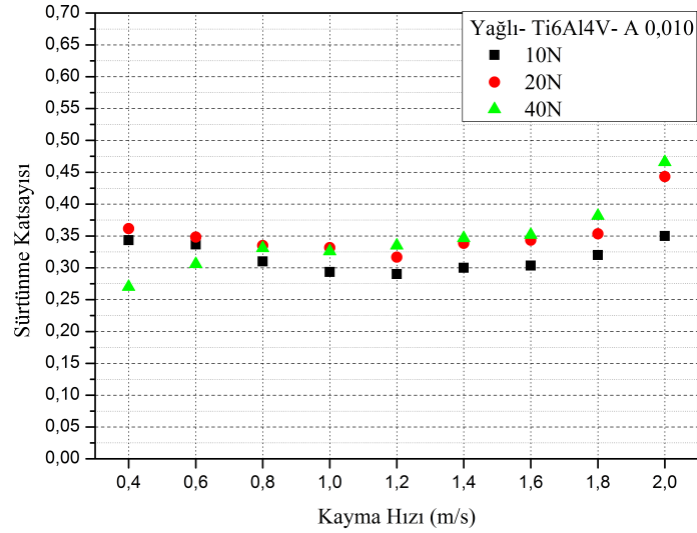
Şekil 5.32 : Bilyalı dövülmemiş titanyum alaşımın yağlı ortamdaki sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.



Şekil 5.33 : A 0,006 dövme şiddetli titanyum alaşımın yağlı ortamdaki sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.



Şekil 5.34 : A 0,008 dövme şiddetli titanyum alaşımının yağlı ortamdaki sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.



Şekil 5.35 : A 0,010 dövme şiddetli titanyum alaşımının yağlı ortamdaki sürtünme katsayılarının hız ve normal kuvvete bağlı değişimi.

5.4 Aşınma Karakteristiği

Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik malzemelerden hazırlanan numunelerin hem yağlayıcı madde bulunan hem de kuru çalışma şartlarında aşınma karakteristiğindeki değişim, uygulanan dövme şiddetine bağlı olarak incelenmiştir. Tüm aşınma deneyleri 10 N normal yük ve 1 m/s kayma hızında gerçekleştirilmiştir. Kuru çalışma için aşınma deneylerinde kayma mesafesi 500 metre, yağlayıcı madde bulunan çalışma şartlarındaki deneyler için 5000 metre kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında diskin ortalama yüzey pürüzlülüğü 1,3 μm olarak değişim göstermiştir.

5.4.1 Kuru çalışma şartlarında aşınma karakteristiği

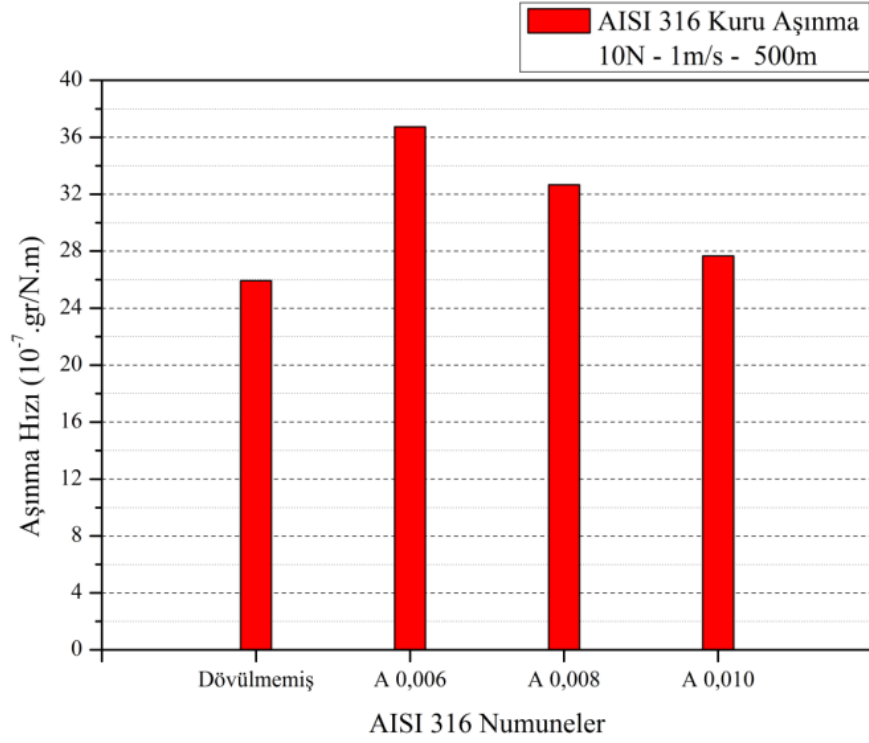
Bu bölümde Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik malzemelerin yağlayıcı madde bulunmayan kuru çalışma şartlarında aşınma karakteristiğindeki değişim bilyalı dövme şiddetine bağlı olarak incelenmiştir. Aşınma deneyleri her iki farklı malzeme türü içinde 10 N normal yük altında ve 1 m/s kayma hızında gerçekleştirilmiştir. AISI 316 paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşımı numunelerin kuru ortamdaki 500 metre kayma mesafesi boyunca aşınma hızları sırasıyla Şekil 5.36 ve Şekil 5.37’de verilmiştir. Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik malzemelerin farklı Almen dövme şiddetlerindeki aşınma hızlarının karşılaştırıldığı grafik Şekil 5.38’de gösterilmiştir.

Şekil 5.36 incelendiğinde AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin bilyalı dövme yüzey işlemi sonrası kuru sürtünme çalışma şartlarındaki aşınma hızlarının, dövme işlemi yapılmamış numunelere göre daha yüksek çıktığı görülmüştür. Almen dövme şiddetinin artışı ile AISI 316 paslanmaz malzemenin kuru çalışma şartlarındaki aşınma hızının azalmasına rağmen, her üç Almen dövme şiddeti içinde aşınma hızları dövme işlemi uygulanmamış numunelerin aşınma hızlarından yüksek görülmüştür.

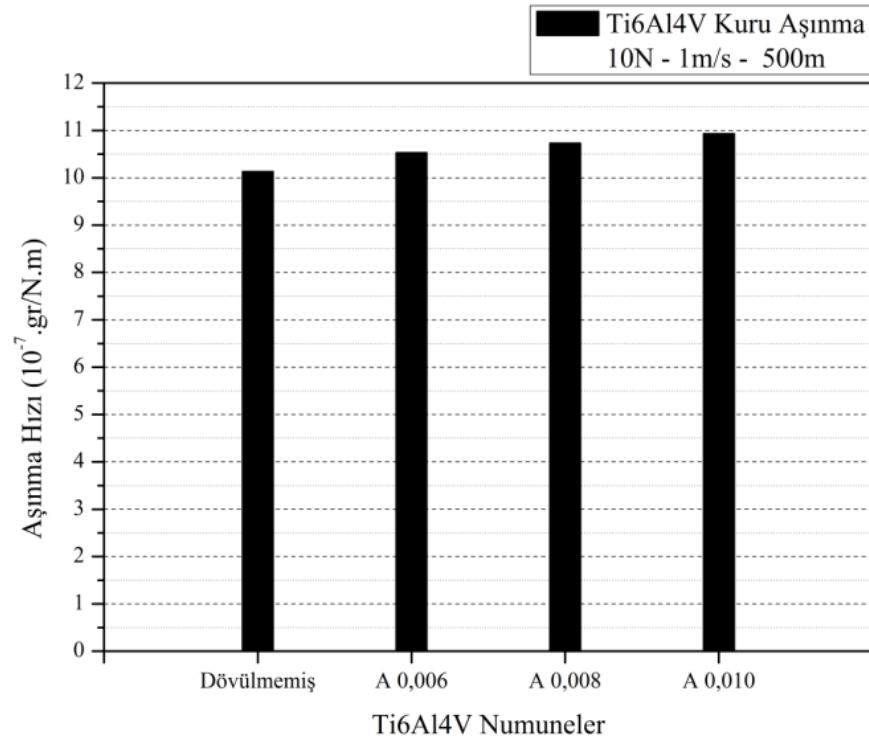
Ti6Al4V alaşımının kuru sürtünme çalışma şartlarındaki aşınma hızlarının verildiği Şekil 5.37 incelendiğinde, bilyalı dövme uygulaması yapılan Ti6Al4V numunelerin aşınma hızlarının bilyalı dövülmemiş numunenin aşınma hızına yakın sonuçlar çıktığı aşınma hızında önemli bir değişimin olmadığı görülmüştür. Bunun yanında bilyalı dövme işlemi uygulanması ile çok küçük bir değerde aşınma miktarında yükselme görülmüştür. Fakat bu değerlerdeki aşınma miktarları ile bilyalı dövme işlemi sonrası aşınma hızı artmıştır sonucuna varılması doğru değildir. Benzer olarak aynı grafik incelendiğinde numunelere uygulanan Almen dövme şiddetinin artışı ile aşınma hızlarının çok küçük değerlerde de olsa yükselme sergilediği görülmekte olup bu artışlar sonucunda aşınma hızının Almen dövme şiddeti ile arttığını söyleyebilmek kesin değildir.

Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik malzemelerinin kuru çalışma şartlarındaki aşınma hızlarının verildiği Şekil 5.38’de Ti6Al4V alaşımın aşınma direncinin farklı dört yüzey özelliğine sahip numunede yüksek olduğu görülmektedir. Grafiklerden görüldüğü gibi 10 N normal yük ve 1 m/s kayma hızı ile yapılan deneyler sonucunda AISI 316 paslanmaz çelik malzemenin kuru ortamdaki aşınma

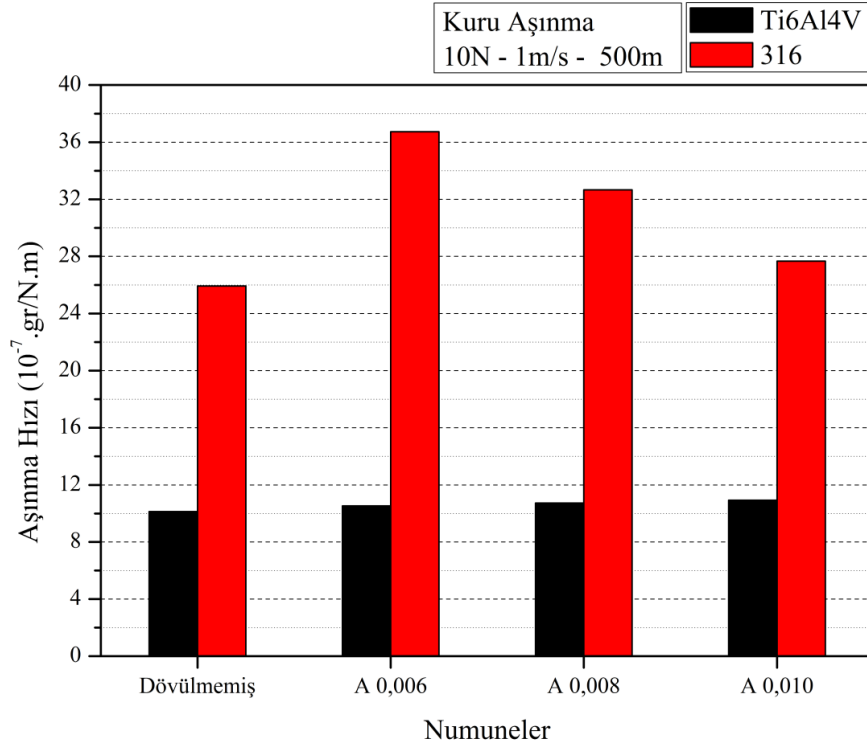
direnci bilyalı dövme işlemi ile düşüş göstermiştir. Ti6Al4V alaşımının aşınma direncinde ise kesin bir değişim gözlenememiştir.



Şekil 5.36 : 1 m/s kayma hızlı ve 10N normal yük uygulanan paslanmaz çeliğin aşınma hızlarının dövme şiddetine bağlı değişimi.



Şekil 5.37 : 1 m/s kayma hızlı ve 10N normal yük uygulanan titanyum alaşımın aşınma hızlarının dövme şiddetine bağlı değişimi.



Şekil 5.38 : 1 m/s kayma hızlı ve 10N normal yük uygulanan paslanmaz çeliğin ve titanyum alaşımın aşınma hızlarının dövme şiddetine bağlı değişimi.

5.4.2 Sınır sürtünme şartlarında aşınma karakteristiği

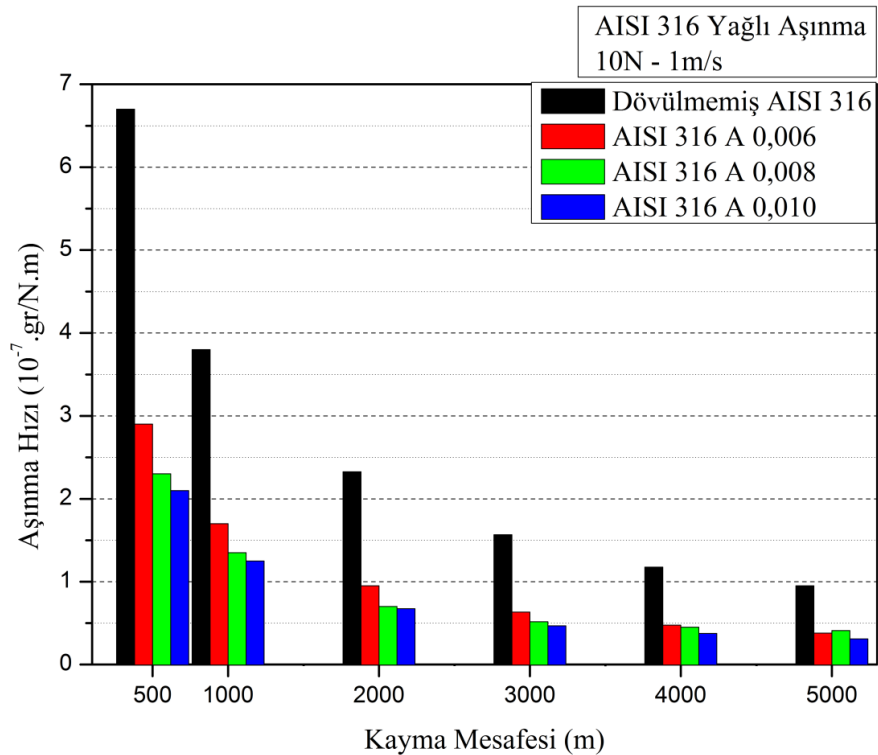
AISI 316 paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşımı numunelerin 5000 metre kayma mesafesi boyunca, yağlayıcı madde bulunan sınır sürtünme şartlarındaki aşınma hızları kayma mesafesi ve Almen dövme şiddetinin bir fonksiyonu olarak sırasıyla Şekil 5.39 ile Şekil 5.40'ta gösterilmiştir. Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik malzemelerin farklı Almen dövme şiddetlerindeki aşınma hızlarının karşılaştırıldığı grafik Şekil 5.41'de verilmiştir. Aşınma deneyleri her iki farklı tür malzeme içinde 10 N normal yük altında, 1 m/s kayma hızında ve 5000 metre kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Bilyalı dövme işlemi sonrasında numunelerin sınır sürtünme şartlarında aşınma karakteristiklerinde önemli değişiklikler gözlemlenmiştir.

Şekil 5.39 incelendiğinde AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin bilyalı dövme yüzey işlemi sonrası sınır sürtünme şartlarındaki aşınma hızları, dövme işlemi yapılmamış numunelere nazaran önemli derecede daha düşük çıktığı görülmüştür. Almen dövme şiddetinin artışı ile yağlı ortamdaki AISI 316 paslanmaz çelik malzemenin aşınma hızının azaldığı görülmüştür. Kayma mesafesinin artması

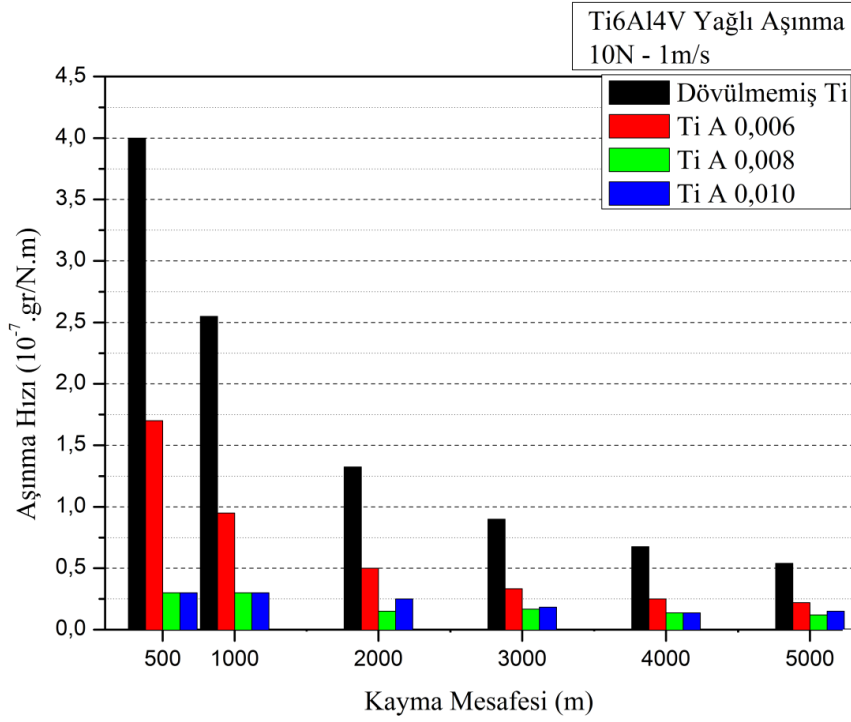
sonucunda aşınma hızlarının yaklaşık olarak sabitlendiği, 3000 metreden sonra aşınma hızının sabit bir değer civarında kaldığı söylenebilir.

Şekil 5.40 incelendiğinde Ti6Al4V alaşımının yağlı ortamdaki aşınma hızlarının bilyalı dövme işlemi ile azaldığı, buna ek olarak numunelerin aşınma hızlarında Almen dövme şiddetinin artışı ile düşüş gösterdiği söylenebilir. A 0.008 ve A0.010 bilyalı dövme şiddetlerinde titanyum malzemenin aşınma hızlarının birbirine yakın değerlerde çıktığı görülmüştür. AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin aşınma hızlarına benzer şekilde 3000 metre kayma mesafesinden sonra Ti6Al4V alaşımının aşınma hızının sabit bir değer civarında kaldığı gözlemlenmiştir.

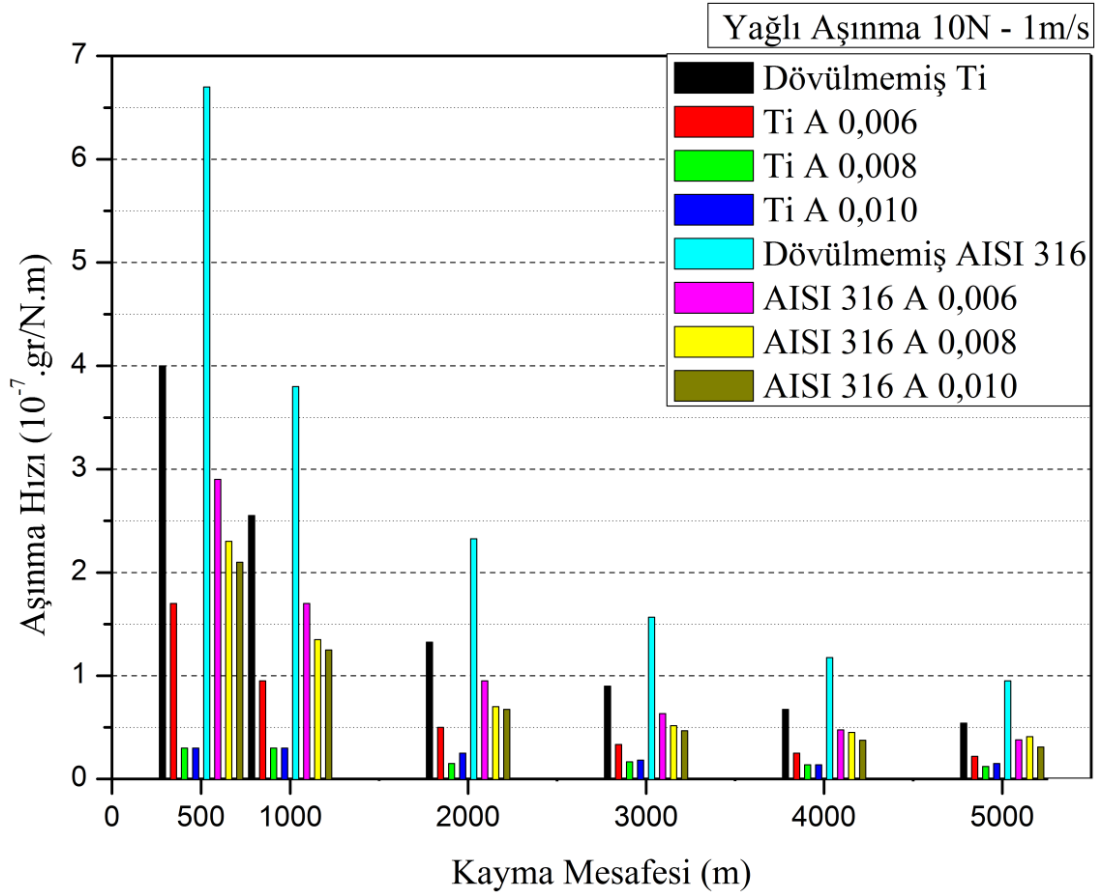
Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik malzemelerinin yağlayıcı madde bulunan sınır sürtünme şartlarındaki aşınma hızları karşılaştırıldığında, Ti6Al4V alaşımın aşınma direncinin her dört farklı yüzey özelliğine sahip numunede de daha yüksek olduğu Şekil 5.41’de görülmektedir. Çalışmanın bu bölümünde elde edilen sonuçlara göre 10 N normal yük ve 1 m/s kayma hızında AISI 316 paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşımının sınır sürtünme çalışma şartlarındaki aşınma dirençleri bilyalı dövme işlemi ile gelişme gösterdiği bulunmuştur.



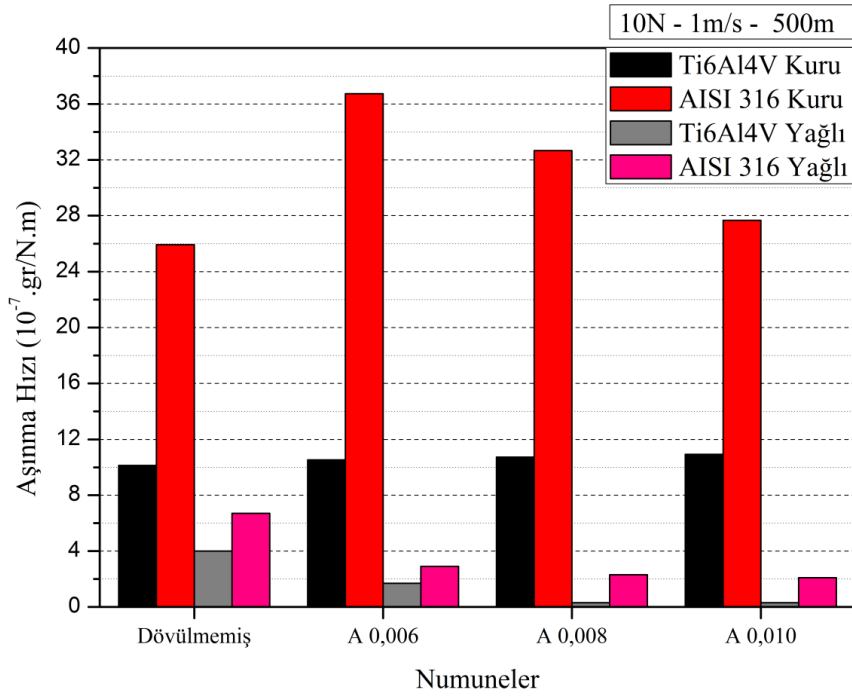
Şekil 5.39 : 1 m/s kayma hızlı ve 10N normal yük uygulanan paslanmaz çeliğin yağlı ortamdaki aşınma hızlarının dövme şiddetine bağlı değişimi.



Şekil 5.40 : 1 m/s kayma hızlı ve 10N normal yük uygulanan titanyum alaşımın yağlı ortamdaki aşınma hızlarının dövme şiddetine bağlı değişimi.



Şekil 5.41 : 1 m/s kayma hızlı ve 10N normal yük uygulanan paslanmaz çeliğin ve titanyum alaşımın yağlı ortamdaki aşınma hızlarının karşılaştırması.



Şekil 5.42 : AISI 316 ve Ti6Al4V numunelerin yağlı ve kuru ortamlardaki 500m kayma mesafesinde aşınma hızlarının karşılaştırması.

Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik malzemelerinin hem kuru hem de yağlı çalışma şartlarındaki aşınma hızlarının 500 metre kayma mesafesi için kıyaslandığı grafik Şekil 5.42’de verilmiştir. Sınır sürtünme şartlarındaki aşınma hızlarının dört farklı yüzey özelliğine sahip her iki farklı tür malzeme içinde daha az olduğu, buna ek olarak titanyum alaşımı numunelerin aşınma hızlarının en düşük olduğu görülebilmektedir. Ayrıca bilyalı dövme sonrasında sınır sürtünme şartlarında aşınma hızları incelendiğinde Ti6Al4V alaşımının yaklaşık 13 kata kadar, AISI 316 çeliğinin ise yaklaşık 3 kata kadar aşınma hızlarının azaldığı görülmektedir. Diğer yandan numunelerin kuru ve sınır sürtünme şartlarındaki aşınma hızları kıyaslandığında, kuru sürtünme şartlarındaki aşınma hızına göre Ti6Al4V alaşımının sınır sürtünme aşınma hızı 33 kata kadar azalma göstermiştir. Aynı şekilde AISI 316 malzemenin sınır sürtünme şartlarında aşınma hızı, kuru sürtünme şartlarındaki aşınma hızına göre yaklaşık 12 kata kadar azalma sergilemiştir.

5.5 Yüzey Morfolojilerinin İncelenmesi

Metalik malzemelerin yüzey özelliklerinin malzemelerin tribolojik davranışları üzerinde önemli etkilere sahip olduğu bir önceki bölümlerde detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Deneysel çalışmaların son basamağı olarak bilyalı dövme işlemi

yapılmamış ve dövülmüş olan iki farklı türdeki malzemeden elde edilen numunelerin yüzeylerinin optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu ile incelemesi yapılarak elde edilen sonuçların nedenlerinin anlaşılması amaçlanmıştır.

AISI 316 paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşımından elde edilen numunelerin bilyalı dövme öncesi ve sonrasında sırasıyla 10x, 40x ve 80x olmak üzere 3 farklı büyütmede yüzey görüntüleri optik mikroskopta alınmıştır. Ayrıca aşınma öncesi ve sonrasında 40X büyütmeli optik mikroskop ile inceleme yapılmıştır. Mikroskoplardan elde edilen görüntüler ile yüzey topoğrafyasındaki değişim incelenmeye çalışılmıştır. Mikroskop görüntülerinden yüksek hızla çarpan bilyaların etkisi ile dövülen numune yüzeylerinde soğuk plastik deformasyonlar sonucunda oluşan çukur ve tümsek yapılar tespit edilebilmektedir. Bunun yanında aşınma yüzeyindeki çizikler ve bilyalı dövme etkisiyle oluşan çukur ve tümsek yapıların hasara uğradığı görülmüştür.

Malzemelerin tribolojik davranışlarındaki değişimlerin daha net anlaşılması için yüzey morfolojilerinin incelenmesi gerekmektedir. Bu nedenle bilyalı dövme işlemi sonrasında numunelerin yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu ile incelemesi önem arz etmektedir. Yapılan SEM incelemeleri sonucunda stereo mikroskop görüntüleri ile benzer sonuçları veren SEM görüntüleri elde edilmiştir. Yüzeylerdeki çukur ve tümsek yapıların mevcudiyeti verilen taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde de görülebilmektedir. Ayrıca SEM incelemelerinin yanında numunelerin elementsel analizleri enerji dağılım spektrometresi (EDS) ile alınmıştır.

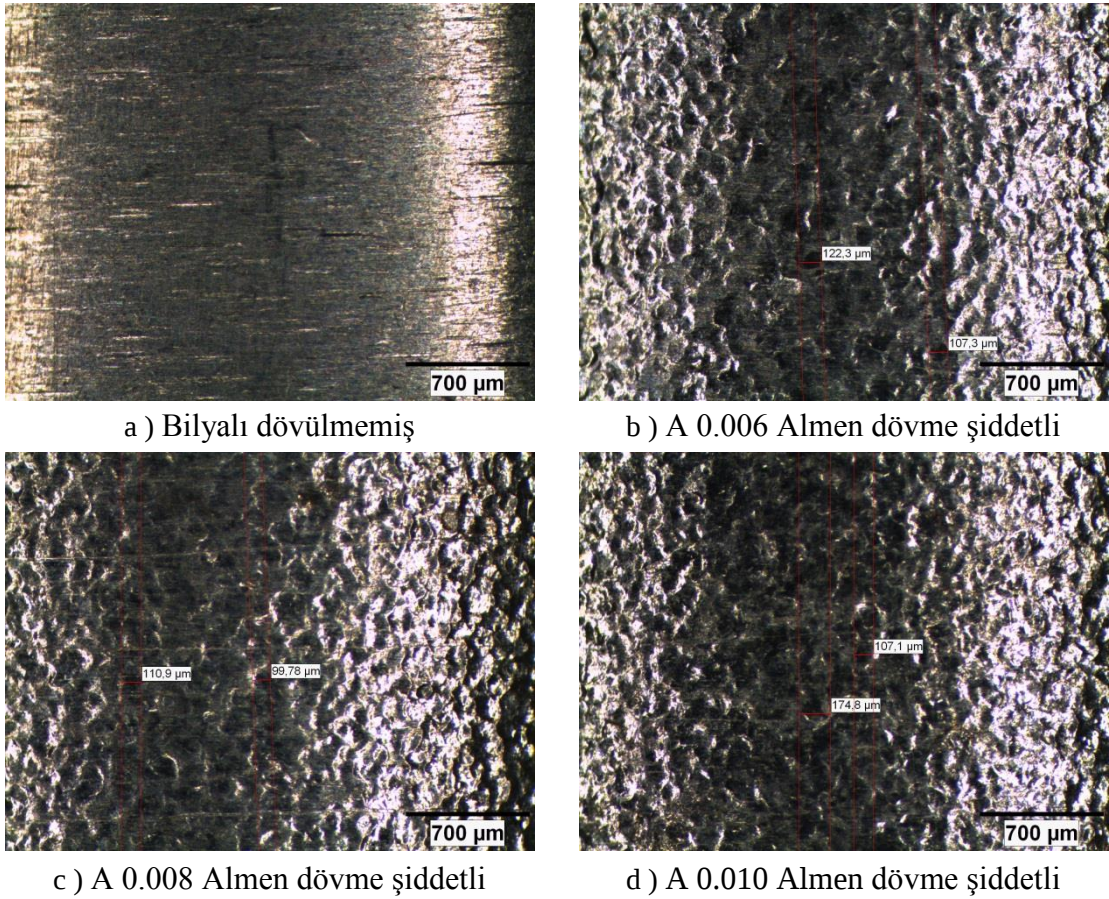
SEM incelemeleri sonrasında aşınma izlerinin yağlayıcı madde bulunan sınır sürtünme şartlarında aşındırılan numunelerde daha az olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında Almen dövme şiddeti ile aşınma izleri arasındaki ilişki numune cinsine ve çalışma şartlarına göre değişiklik göstermiştir.

5.5.1 Titanyum alaşımının yüzey morfolojilerinin incelenmesi

Bilyalı dövme işlemi yapılmamış, A 0.006, A 0.008 ve A 0.010 dövme şiddetleri ile dövülen Ti6Al4V alaşımı numunelerin 40X büyütmedeki stereo mikroskop görüntülerine sırasıyla Şekil 5.43a, Şekil 5.43b, Şekil 5.43c ve Şekil 5.43d’de yer verilmiştir. Bilyalı dövme sonrasında Ti6Al4V numunelerinin yüzey morfolojilerinin değişim sergilediği tespit edilmiştir. En düşük dövme şiddeti olan A 0.006 dövme şiddeti ile dövülen numunelerin yüzey görüntülerinde dahi önemli değişimler olduğu

görülmektedir. Yüzey özelliklerindeki değişimler incelendiğinde, artan dövme şiddetinin etkileri görüntülerden çok net olarak anlaşılamamaktadır. Bunun yanında 40X büyütme görüntülerde A 0.010 şiddeti ile dövülen numune yüzeyindeki tepe ve çukurların daha net ve fazla, düz alanların ise daha az olduğu görülmektedir.

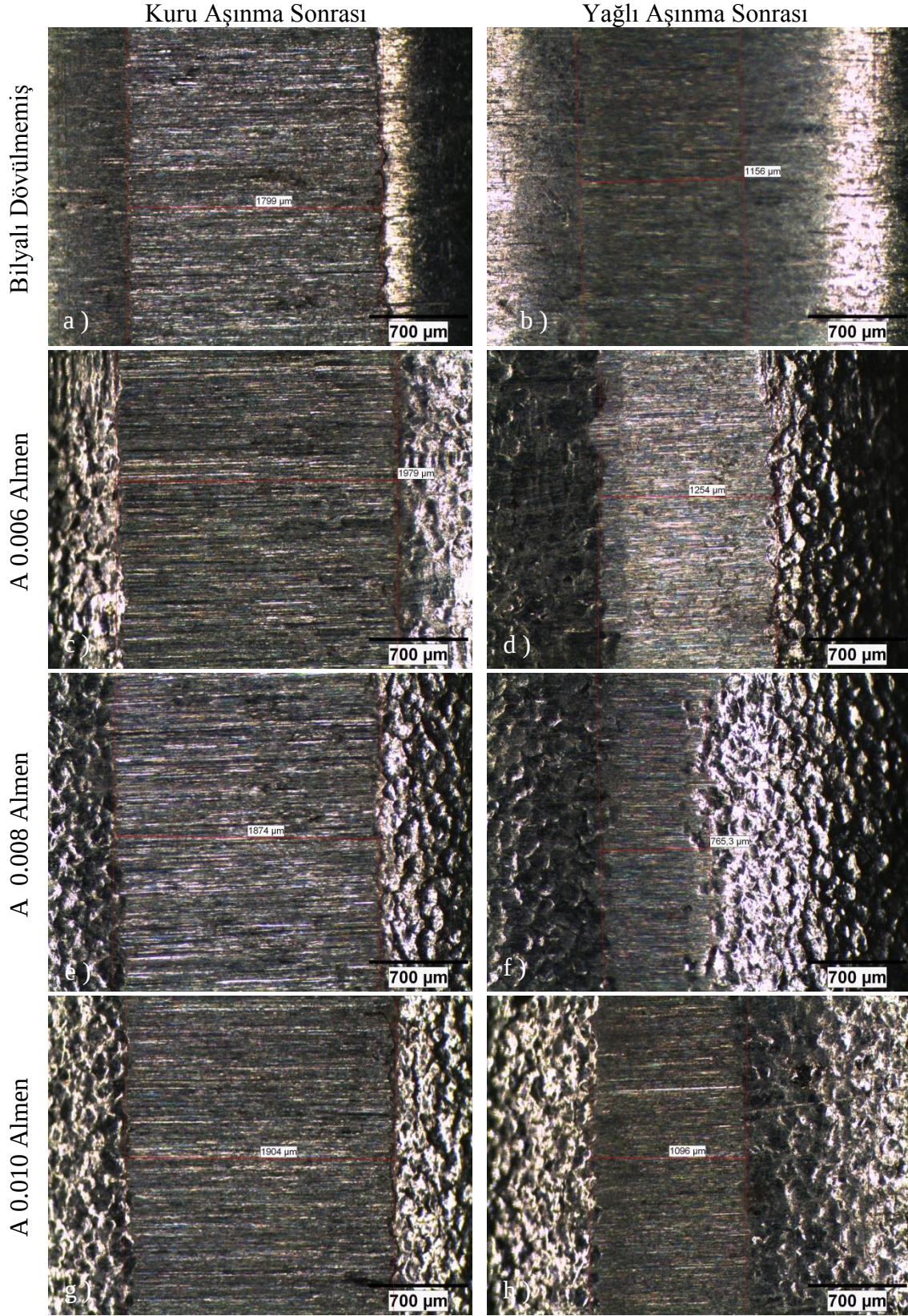
Ti6Al4V alaşımının pürüzlülük değerleri incelenerek dövme işleminin yüzey özelliklerini değiştirdiği daha önceki bölümlerde verilmiştir. A 0.006 ve A 0.008 dövme şiddetleri ile dövülen numunelerin pürüzlülük değerinin birbirine yakın çıkarken, A 0.010 şiddeti ile dövülen numunelerin pürüzlülük değeri daha yüksek çıktığı görülmüştür. Pürüzlülük ölçüm sonuçlarının ve optik mikroskop ile elde edilen yüzey görüntülerinin birbirleri ile uyumlu olduğu söylenebilir.



Şekil 5.43 : Ti6Al4V alaşımı numunelerin optik mikroskop görüntüleri.

Titanyum alaşımı numunelerin kuru sürtünme ve sınır sürtünme çalışma şartlarındaki aşınma sonrası optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.44'te verilmiştir. Sınır sürtünme şartlarında numunelerin aşınma izlerinin küçüldüğü görülmektedir. Ayrıca sınır sürtünme şartlarında Almen dövme şiddetinin artışı ile aşınma genişliği (A 0.008) azalmıştır. Kuru sürtünme şartlarında ise aşınma izlerinin büyüdüğü görülmektedir.

Şekil 5.45'te A 0.010 dövme şiddetinde %100 doyurma oranında dövülmüş olan Ti6Al4V alaşımının 80X büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü verilmiştir.



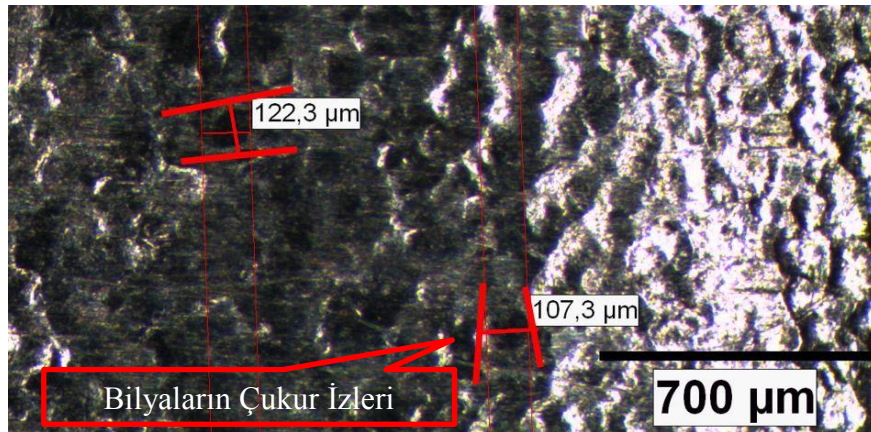
Şekil 5.44 : Ti6Al4V alaşımının aşınma deneyleri sonrasındaki optik mikroskop görüntüleri.

Bilyalı dövme işlemi yapılan titanyum alaşımının yüzeyinde bilya çarpmalarının sonuçları olarak oluşan çukur ve tümsek yapılar Şekil 5.45 ve Şekil 5.46'da gösterilmektedir.



Şekil 5.45 : Ti6Al4V alaşımının A 0.010 Almen dövme şiddetinde dövme sonucunda yüzeyde oluşan çukur ve tümsekler (80X).

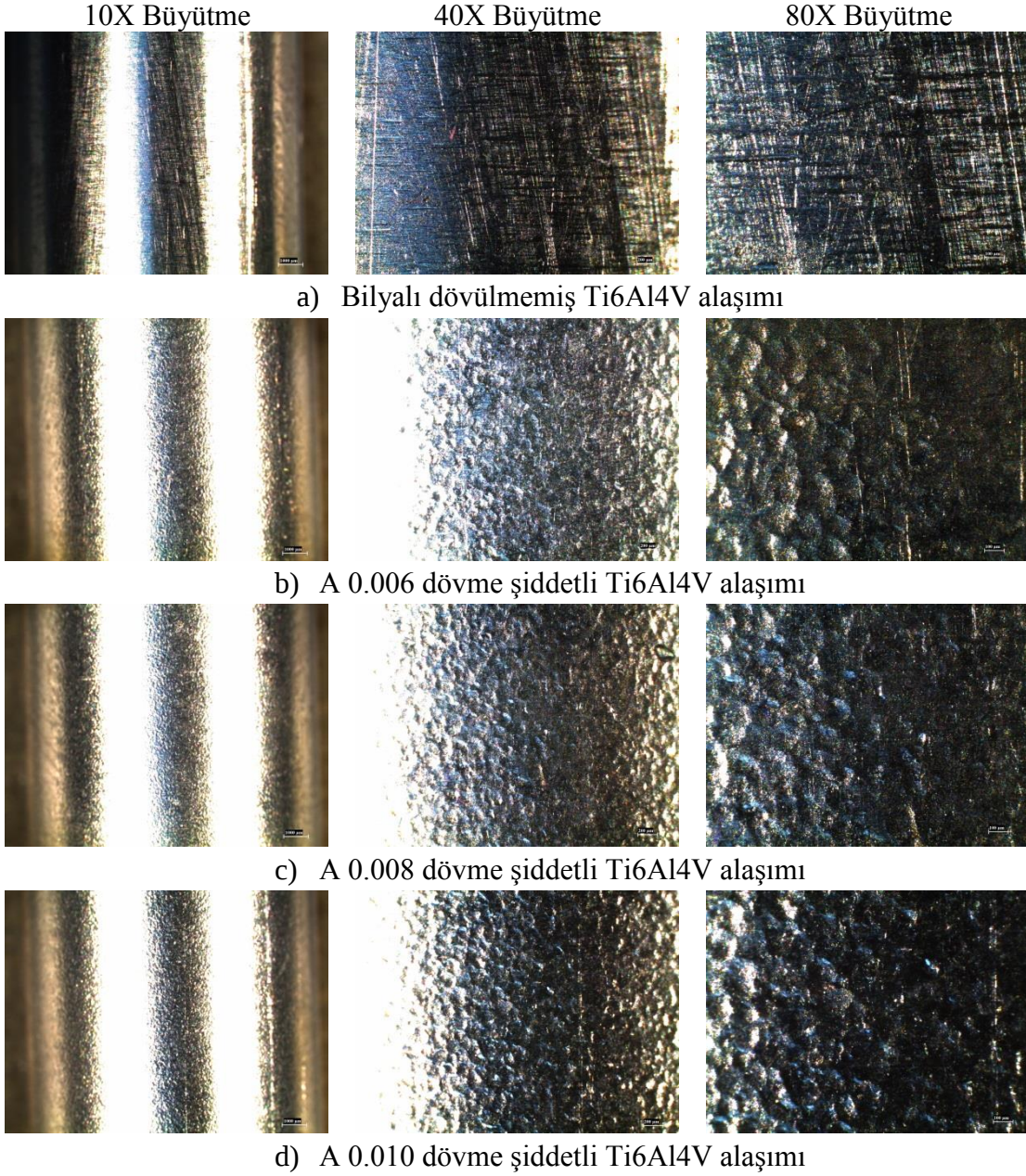
Şekil 5.46'da A 0.06 dövme şiddetinde %100 doyurma oranında dövülmüş olan Ti6Al4V alaşımının 40X büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Yüzeyde oluşan çukur rahatlıkla görülebilmektedir.



Şekil 5.46 : Ti6Al4V alaşımının A 0.006 Almen dövme şiddetinde dövme sonucunda yüzeyde oluşan çukur boyutları (40X).

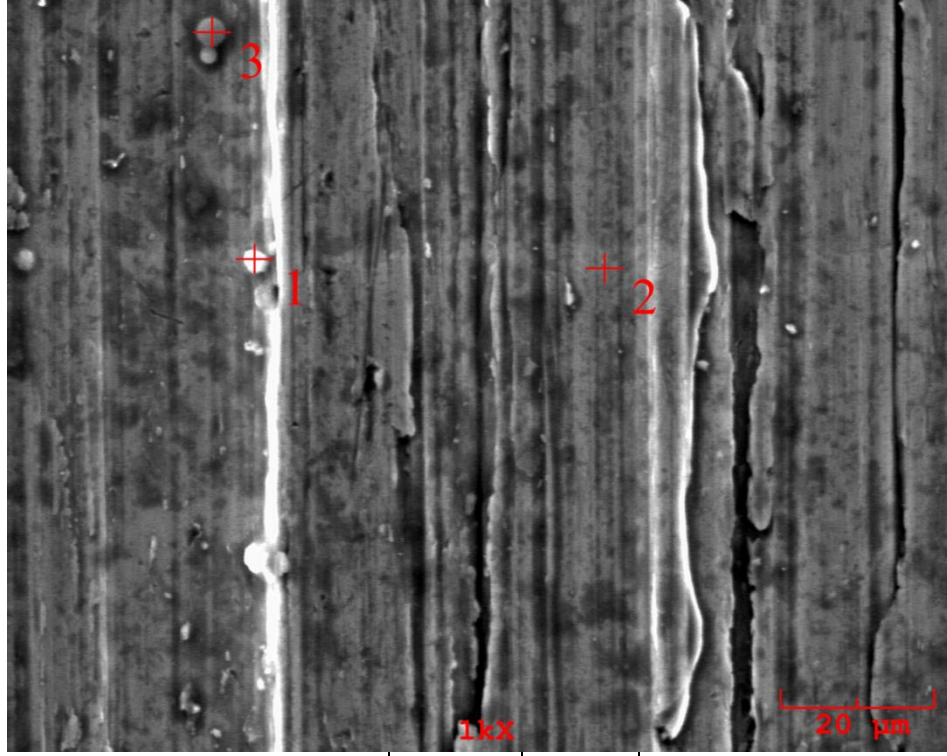
Şekil 5.47'de Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası 10X, 40X ve 80X büyütmedeki mikroskop görüntüleri verilmiştir. Bilyalı dövme sonrasındaki

numunelerin yüzeylerindeki değişimler ve Almen dövme şiddetinin artmasıyla çukur ve tümseklerin daha net olduğu görülebilmektedir.



Şekil 5.47 : Ti6Al4V alaşımı numunelerin optik mikroskop görüntüleri.

Şekil 5.48’de A 0.010 Almen dövme şiddeti ile dövülmüş titanyum alaşımı numunenin kuru sürtünme sonrasındaki aşınma yüzeyinin 1000x büyütme SEM görüntüsü ve bu yüzeyin EDS sonuçları verilmiştir. Kütlece ağırlığının yaklaşık yüzde 88’i titanyum, yüzde 6’sı alüminyum ve yüzde 5’i vanadyum elementi olduğu görülmüştür. Elde edilen bu EDS sonuçlarına göre incelenen fazın Ti6Al4V alaşımı olduğu görülmektedir.



Elementler	Ti	Al	V
Kütle %	88,243	6,401	5,356

Şekil 5.48 : Ti6Al4V alaşımının EDS görüntüsü ve sonuçları.

Şekil 5.49’ da A 0.006 ve A 0.010 Almen dövme şiddetiyle dövülmüş Ti6Al4V alaşımı numunelerinin kuru sürtünme şartlarında aşındırılmış yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.49a ve Şekil 5.49b 40x büyütmeli, Şekil 5.49c ve Şekil 5.49d 500x büyütmeli, Şekil 5.49e ve Şekil 5.49f ise 1000x büyütmeli SEM görüntülerini içermektedir. 40x büyütmeli Almen dövme şiddetinin artması ile aşınma izlerinin, numune yüzeylerindeki çukurcuk korozyonu ve çatlaklarının A0.010 Almen dövme şiddeti ile dövülmüş numunelerde daha az ve daha ince olduğu görülmektedir.

A 0.006 Almen dövme şiddetiyle dövülen numune yüzeylerinin mikrosürme ve mikrokesme mekanizmaları ile yoğun bir şekilde aşındırıldıkları görülmektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde aşınma mekanizmalarının Almen şiddetine bağlı olarak önemli bir değişim göstermediği görülmektedir. Ancak Almen şiddetinin artışı ile aşınma mekanizmalarının yol açtığı tahribatın düşük Almen şiddeti ile dövülen numune yüzeylerine kıyasla nispeten azaldığı görülmektedir. A 0.006 Almen şiddeti ile dövülen numune yüzeyinde daha derin aşınma izleri ve daha yüksek oranda plastik deformasyon görülmektedir. Yüksek oranda plastik deformasyon nedeniyle

malzemenin sıvanması ile yüzeyde oluşan tepecikler SEM görüntülerinde beyaz renklerde kontrastlar ile görülmektedir.

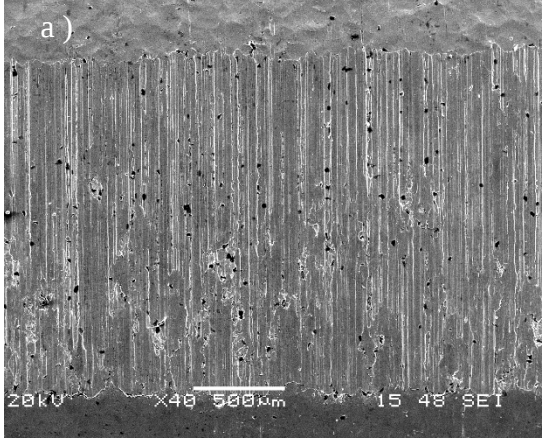
Numune yüzeyinde siyah renkte görülen bölgelerin aşınma esnasında yüzeyde oluşan kirlilikler olduğu söylenebilir. Son olarak düşük Almen şiddetinde dövülen numunenin yüzeyinde çok daha heterojen ve şiddetli bir aşınma gerçekleştiği tespit edilmiştir. Yüksek Almen şiddeti ile malzemenin yüzeyinde meydana gelen başta sertlik olmak üzere mekanik özelliklerin artışına bağlı olarak aşınma hasarının ve plastik deformasyonun sınırlandığı belirlenmiştir. Bu durum yüzeyde düşük Almen şiddetinde dövülen numuneye göre nispeten daha düzenli aşınma izlerinin görülmesine yol açmıştır.

Şekil 5.50' de A 0.006 ve A 0.010 Almen dövme şiddetiyle dövülmüş Ti6Al4V alaşımı numunelerinin sınır sürtünme şartlarında aşındırılmış yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.50a ve Şekil 5.50b 40x büyütme, Şekil 5.50c ve Şekil 5.50d 500x büyütme, Şekil 5.50e ve Şekil 5.50f ise 1000x büyütme SEM görüntülerini içermektedir. Şekil 5.49 ve 5.50 karşılaştırıldığında ilk olarak aşınma sonrası hasara uğrayan yüzey alanının önemli miktarda azaldığı görülmektedir. 40X büyütmede verilen SEM fotoğraflarına bakıldığında aşınma nedeniyle hasara uğrayan bölgenin genişliğinin yüksek oranda daraldığı görülmektedir. Bu durum sınır sürtünme şartlarında aşındırılan numunelerin aşınma oranı ve sürtünme değerlerinin kuru sürtünme şartlarında aşındırılan numunelere kıyasla daha düşük olmasını açıklamaktadır. Yağlayıcı maddeler karşıt yüzey ile aşınan malzeme arasında doğrudan temas eden yüzeyi önemli miktarda azaltmakta ve bunun sonucunda hasara uğrayan toplam yüzey alanı sınırlamaktadır.

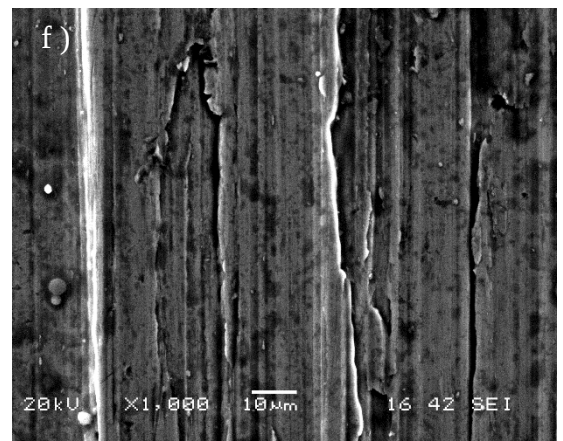
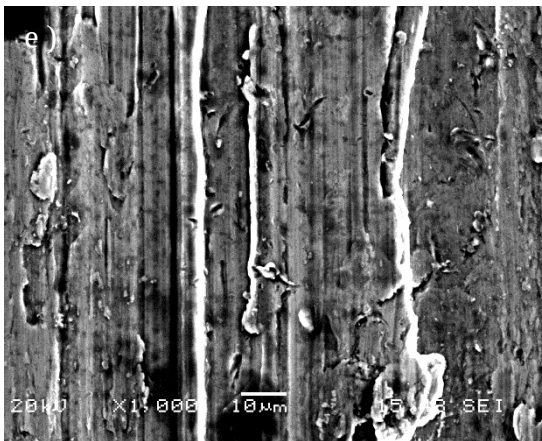
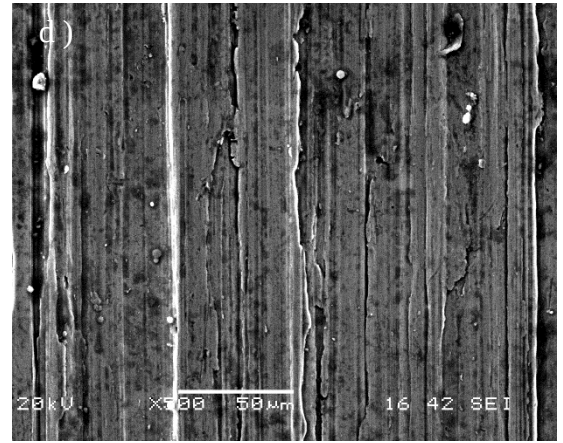
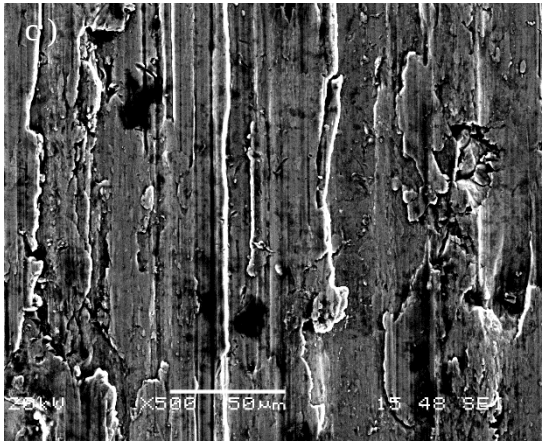
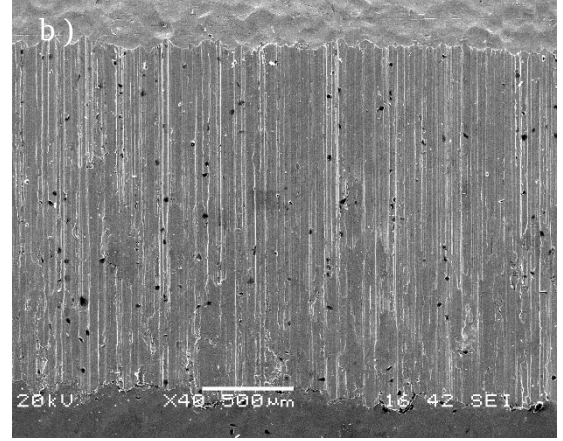
Şekil 5.50' de yüksek büyütme verileri verilen SEM fotoğrafları (500X ve 1000x) incelendiğinde malzemenin mikrosürme ve mikrokesme mekanizmaları ile hasara uğradığı görülmektedir. Almen şiddetinin değişiminin aşınma mekanizmaları üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı sınır sürtünme şartlarında aşındırılan numuneler içinde söylenebilir. Ayrıca kuru sürtünme şartlarında aşındırılan numunelerde olduğu gibi Almen şiddetinin artışı ile numunede meydana gelen hasarın şiddetinin azaldığı söylenebilir. Bu durum daha önce de belirtildiği gibi Almen şiddeti artışı ile numune yüzeylerinde başta sertlik olmak üzere mekanik özelliklerin artışıyla açıklanabilir.

Son olarak sınır sürtünme şartlarında düşen sürtünme kuvvetlerine bağlı olarak kuru sürtünme şartlarına kıyasla daha düşük oranda plastik deformasyon görüldüğü SEM fotoğraflarında net bir şekilde görülmektedir.

A 0.006 Almen dövme şiddetli
Ti6Al4V alaşımı

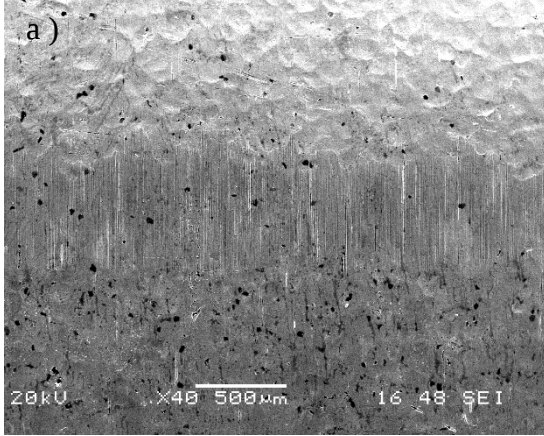


A 0.010 Almen dövme şiddetli
Ti6Al4V alaşımı

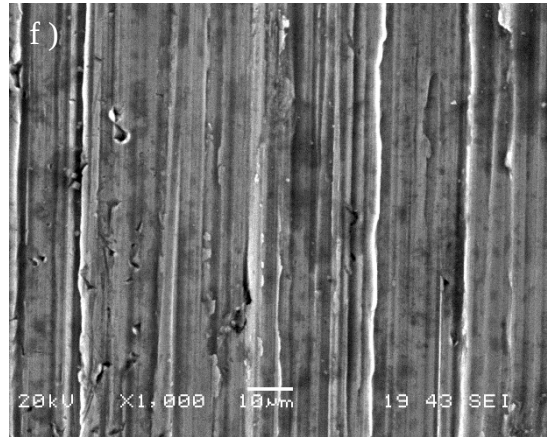
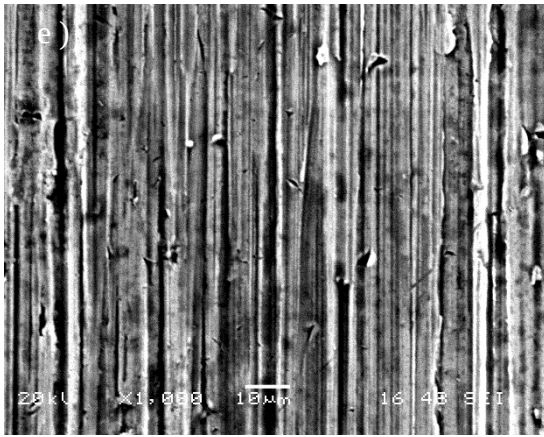
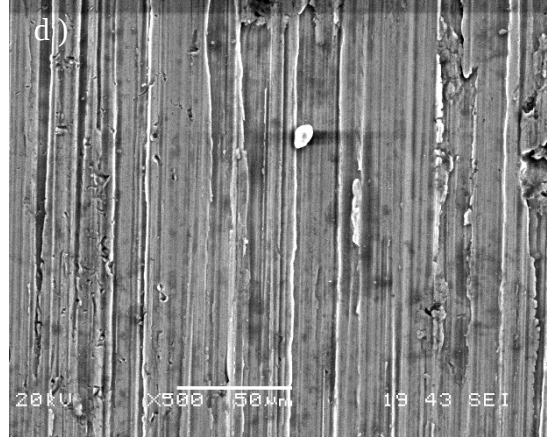
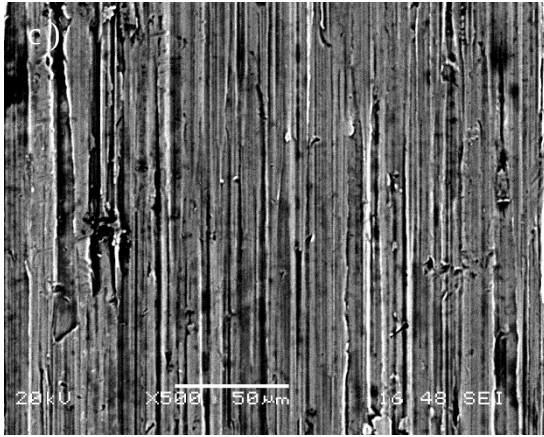
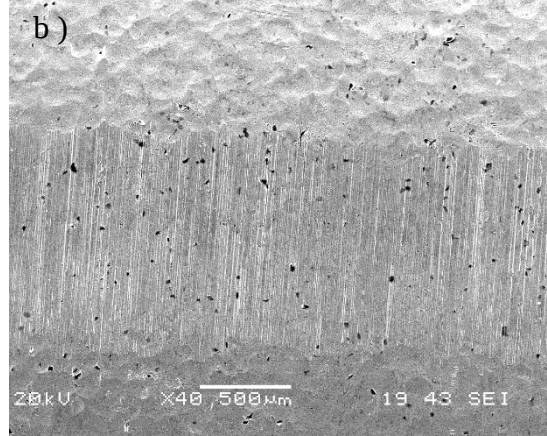


Şekil 5.49 : A 0.006 ve A 0.010 Almen şiddetlerinde dövülmüş Ti6Al4V alaşımının kuru sürtünme şartlarında aşındırılmış yüzeylerinin SEM görüntüleri.

A 0.006 Almen dövme şiddetli
Ti6Al4V alaşımı



A 0.010 Almen dövme şiddetli
Ti6Al4V alaşımı

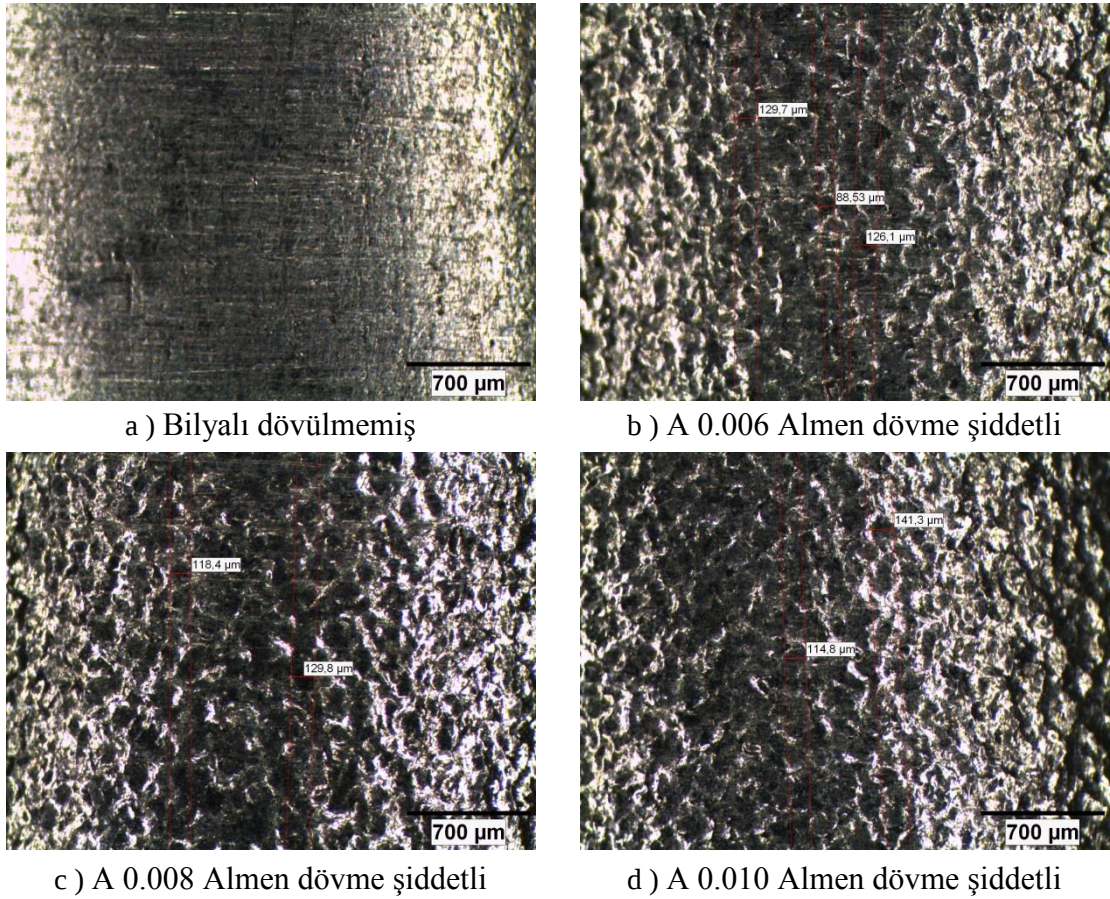


Şekil 5.50 : A 0.006 ve A 0.010 Almen şiddetlerinde dövülmüş Ti6Al4V alaşımının sınır sürtünme şartlarında aşındırılmış yüzeylerinin SEM görüntüleri.

5.5.2 AISI 316 çeliğinin yüzey morfolojilerinin incelenmesi

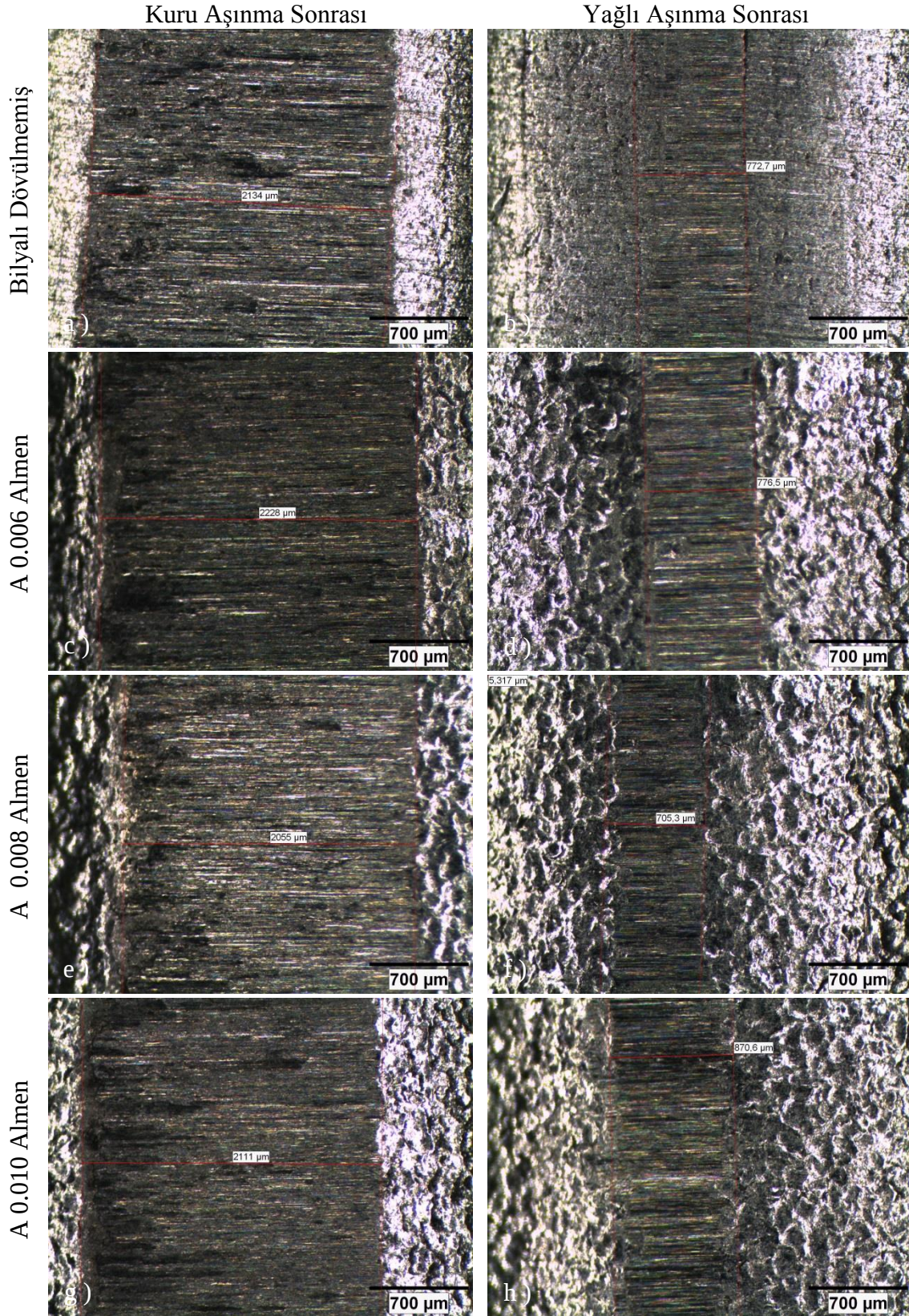
Şekil 5.51a, Şekil 5.51b, Şekil 5.51c ve Şekil 5.51d’de sırasıyla bilyalı dövme işlemi yapılmamış, A 0.006, A 0.008 ve A 0.010 Almen dövme şiddetleri ile dövülen AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin 40X büyütmedeki stereo optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.

Mikroskop görüntüleri incelendiğinde AISI 316 paslanmaz çelik malzemenin yüzey morfolojisinin bilyalı dövme yapıldıktan sonra önemli derecede değişim gösterdiği görülmektedir. En az dövme şiddeti olan A 0.006 dövme şiddeti ile dövülen numunelerin yüzey görüntüleri, dövme işlemine maruz kalmamış olan numunelerin yüzey görüntüleri ile karşılaştırıldığında yüzey özelliklerinin değiştiği ifade edilebilmektedir. Bunun yanı sıra Almen dövme şiddetinin artışı ile yüzey özelliklerinde önemli derecede bir değişim gözlenmemiştir. Pürüzlülük ölçümleri sonucunda elde edilen pürüzlülük değerlerinde de Almen şiddetine bağlı olarak kayda değer bir artış gözlemlenmemiştir. Bu noktada Almen şiddeti artışının dövülen yüzey morfolojisi üzerinde büyük bir etkisi olmadığı sonucuna varılabilir.



Şekil 5.51 : AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin optik mikroskop görüntüleri.

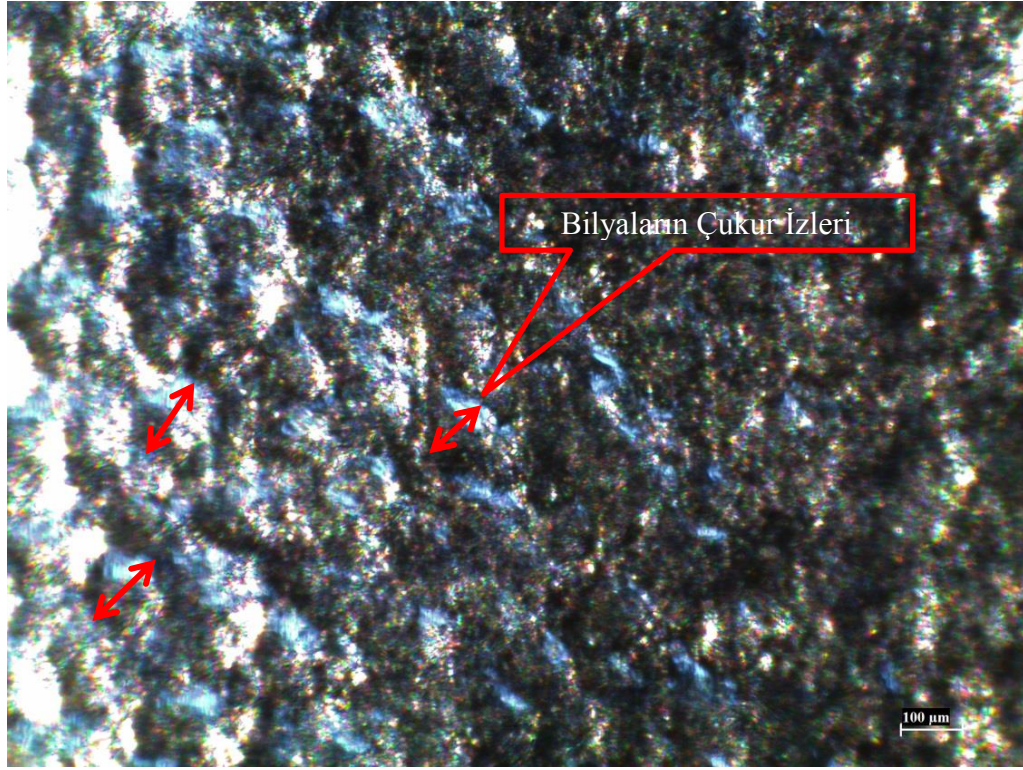
AISI 316 paslanmaz çelik numunelerinin kuru sürtünme ve sınır sürtünme çalışma şartlarındaki aşınma sonrası optik mikroskop görüntüleri Şekil 5.52’de verilmiştir. Sınır sürtünme şartlarında malzemenin aşınma izlerinin kuru sürtünme şartlarına göre daraldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca A 0.008 Almen dövme şiddetlerinde aşınma genişliklerinde azalma gözlemlenmiştir.



Şekil 5.52 : AISI 316 paslanmaz çeliğinin aşınma deneyleri sonrasındaki optik mikroskop görüntüleri.

Şekil 5.53’de A 0.010 dövme şiddetinde %100 doyurma oranında dövülmüş olan AISI 316 paslanmaz çeliğin 80X büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü

verilmiştir. Şekil 5.53 incelendiğinde AISI 316 paslanmaz çelik malzemenin yüzeyinde bilyalı dövme işleminde kullanılan bilyaların çarpması sonucunda oluşan çukur ve tümsek yapılar görülmektedir.

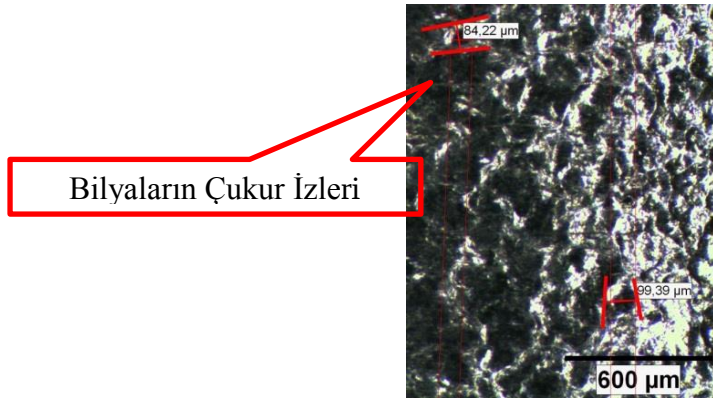


Şekil 5.53 : AISI 316 paslanmaz çeliğin A 0.010 bilyalı dövme şiddetinde dövme sonucunda yüzeyde oluşan çukur ve tümsekler (80X).

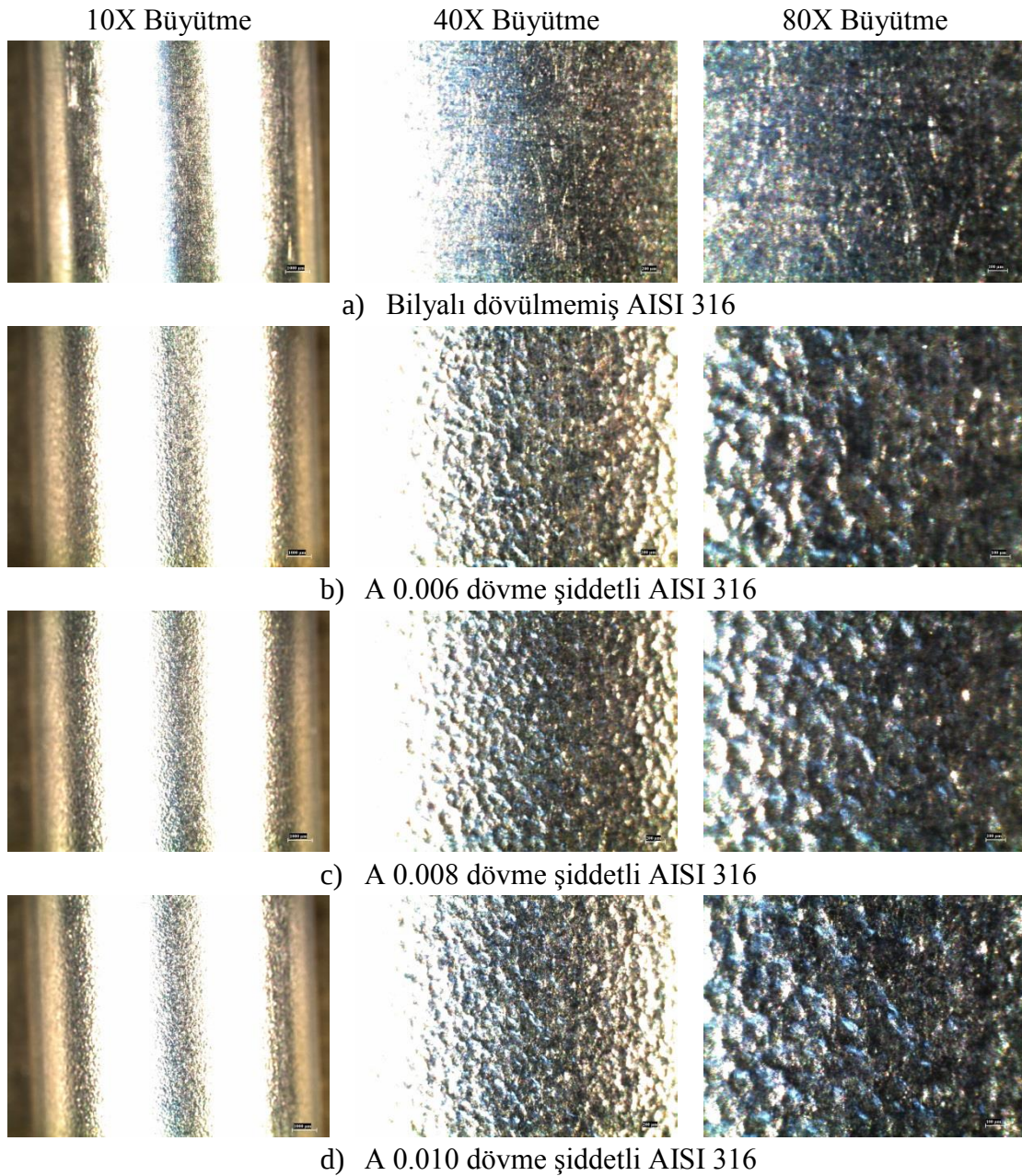
Şekil 5.45’ de verilen bilyalı dövme uygulanmış Titanyum alaşımının ve Şekil 5.53’de verilen bilyalı dövme uygulanmış paslanmaz çelik numunenin yüzeyleri incelendiğinde AISI 316 paslanmaz çelik numunenin yüzeyindeki çukur ve tümseklerin daha fazla olduğu, malzeme yüzeyinin titanyum alaşımına kıyasla daha fazla deforme olduğu rahatlıkla görülebilmektedir.

Verilen bu görüntüler ve yapılan pürüzlülük ölçüm sonuçları, optik mikroskop görüntüleriyle birbirini destekleyen eş sonuçlar sergilemiştir.

Şekil 5.54’te A 0.08 Almen dövme şiddetinde dövülmüş olan AISI 316 çelik malzemenin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Numune yüzeyindeki çukur ve tümsek yapılar diğer görüntülerde olduğu gibi Şekil 5.54’te rahatlıkla görülmektedir.



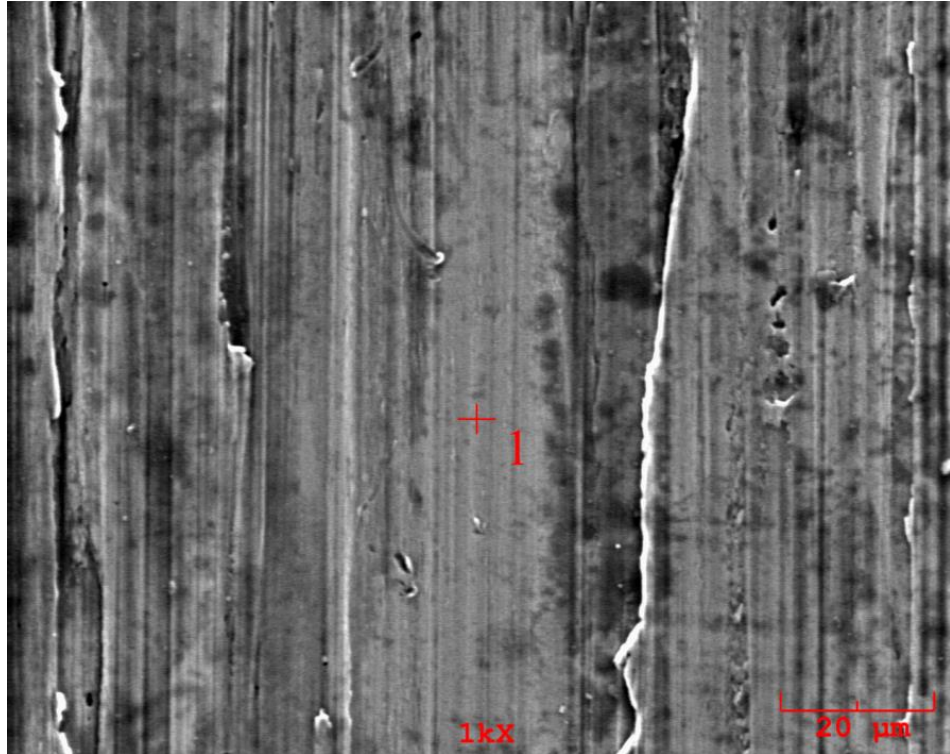
Şekil 5.54 : AISI 316 paslanmaz çeliğin A 0.008 bilyalı dövme şiddetinde dövme sonucunda yüzeyde oluşan çukur ve tümsekler (50X).



Şekil 5.55 : AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin optik mikroskop görüntüleri.

Şekil 5.55'te AISI 316 paslanmaz çelik malzemenin bilyalı dövme sonrası 10X, 40X ve 80X büyütmedeki mikroskop görüntüleri verilmiştir. Bilyalı dövme sonrasındaki numunelerin yüzeylerindeki değişimler görülebilmektedir. Fakat Almen dövme şiddetinin artmasıyla çukur ve tümsek yapılarda değişiklikler gözlenmemiştir.

Şekil 5.56'da A 0.006 Almen dövme şiddeti ile dövülmüş paslanmaz çelik numunenin kuru sürtünme sonrasındaki aşınma yüzeyinin 1000x büyütme SEM görüntüsü ve bu yüzeyin EDS sonuçları verilmiştir. EDS sonuçlarına göre açık gri renkte görülen fazın AISI 316 paslanmaz çelik malzeme olduğu görülmektedir.



Elementler	Cr	Ni	Fe
Kütle %	18,752	8,914	72,334

Şekil 5.56 : AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin EDS görüntüsü ve sonuçları.

Şekil 5.57' de sırasıyla A 0.006 ve A 0.010 Almen dövme şiddetiyle dövülmüş AISI 316 numunelerin sınır sürtünme şartlarında aşındırılmış yüzeylerinin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.57a ve Şekil 5.57b 40x büyütmeli, Şekil 5.57c ve Şekil 5.57d 500x büyütmeli, Şekil 5.57e ve Şekil 5.57f ise 1000x büyütmeli SEM görüntülerini içermektedir. Görüntüler incelendiğinde Almen dövme şiddetinin artması ile numunelerin aşınan yüzeyin genişliğinin azaldığı görülmüştür. Benzer şiddette bir değişim bilyalı dövme uygulanmış titanyum numunelerde görülmemiştir. Tez çalışmasında daha önceki bölümlerde verilen Almen şiddetine bağlı olarak sertlik değerlerinin değişimleri incelendiğinde, paslanmaz çelik

malzemenin sertlik değerinin artan Almen şiddetine bağlı olarak titanyum alaşımına göre çok daha yüksek miktarda değişim gösterdiği sonucu dikkat çekmektedir. Bu durum paslanmaz elik malzemenin titanyum alaşımına göre daha yüksek plastik deformasyon kabiliyetine sahip olması ve buna bağlı olarak yoğun plastik deformasyon ve pekleşmenin meydana gelmesi, bunun sonucunda sertlik değerlerinde daha yüksek bir artışın görülmesi ile açıklanmıştır.

Farklı Almen şiddetlerinde dövülmüş paslanmaz elik malzemelerin aşındırılmış yüzeyleri incelendiğinde Almen şiddeti artışı ile aşınma izinin ve buna bağlı olarak aşınma hasarının azalmasının paslanmaz elik malzemede Almen şiddetinin paslanmaz elik malzemenin yüzey özellikleri üzerinde titanyum alaşımına kıyasla daha etkin olduğu ve daha yüksek oranda bir gelişmeye neden olması ile açıklanabilir. Daha nceki bölümlerde verilen aşınma oranı, sürtünme katsayısı ve yüzey pürüzlülük değerleri sonuçları bu bulguyu desteklemektedir. Tez çalışmasında gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemlerinin paslanmaz elik malzemenin yüzey özellikleri üzerinde daha pozitif değişimlere yol açtığı söylenebilir.

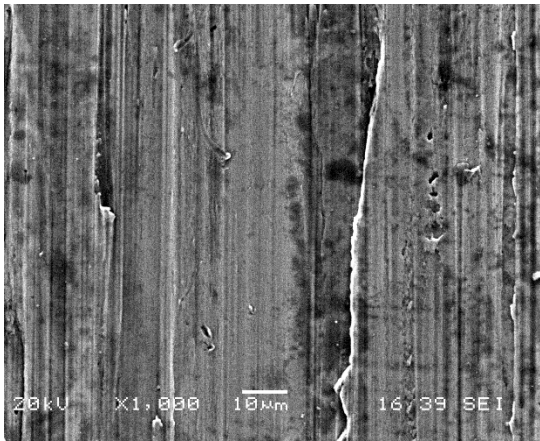
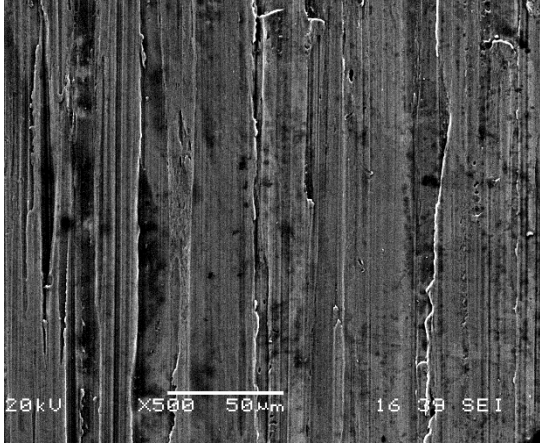
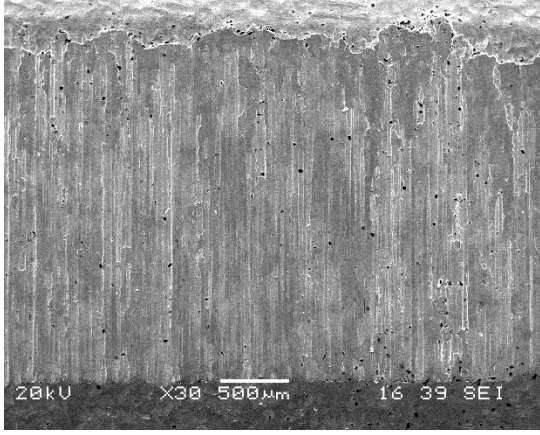
Bu sonuçların yanı sıra şekil 5.57’ de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde malzemenin mikrosürme ve mikrokesme mekanizmaları ile yoğun bir şekilde aşındırdığı söylenebilir. şekil 5.58’ da aynı malzemenin sınır sürtünme şartlarında aşındırılan yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. şekil 5.58a ve şekil 5.58b 40x büyütmeli, şekil 5.58c ve şekil 5.58d 500x büyütmeli, şekil 5.58e ve şekil 5.58f ise 1000x büyütmeli SEM görüntülerini içermektedir. Görüntüler incelendiğinde paslanmaz elik numunelerin yüzeylerinin titanyum alaşımının sınır sürtünme şartlarında aşındırılmış yüzeyleri ile benzer değişimler gösterdiği söylenebilir.

Yağlama ile birlikte kuru sürtünme şartlarına kıyasla doğrudan temasa ve aşınmaya maruz kalan yüzeyin önemli miktarda azaldığı görülmektedir. Yağlama ile birlikte aşınan bölgelerde aşınma mekanizmalarında herhangi bir değişiklik görülmediği, ancak aşınma şiddetinin önemli miktarda azaldığı söylenebilir. Almen şiddeti yüksek olan yüzeyin, düşük Almen şiddetine sahip yüzeye kıyasla nispeten daha az aşındığı görülmektedir. Bu noktada Almen şiddeti artışının paslanmaz elik malzemenin aşınma dayanımını iyileştirdiği söylenebilir.

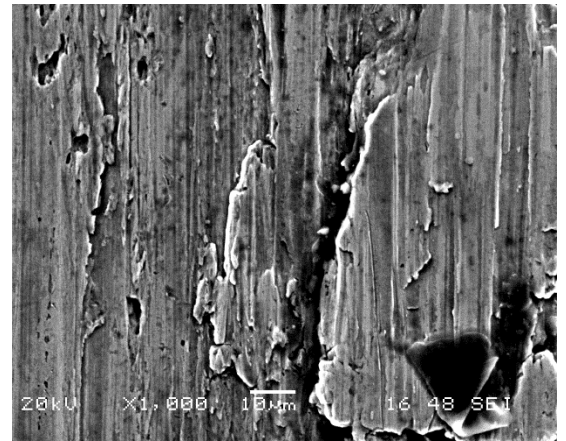
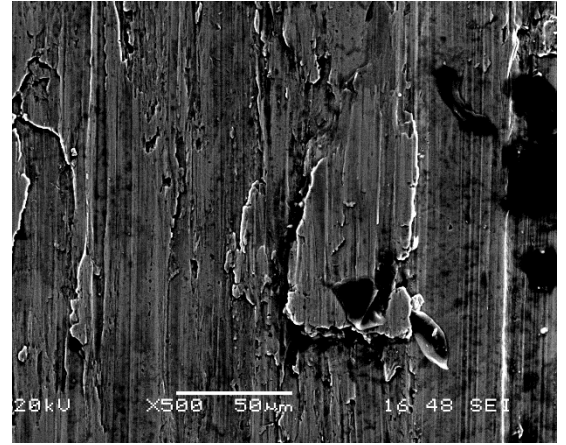
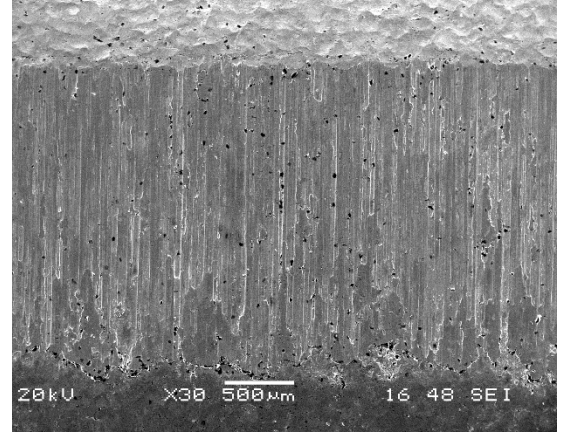
Bilyalı dövme uygulanmış titanyum ve paslanmaz elik numunelerin kuru ve sınır sürtünme şartlarında aşındırılmış yüzeyleri karşılaştırıldığında tüm yüzeylerde

mikrosürme ve mikrokesme aşınma mekanizmalarının hakim olduğu görülmektedir. Diğer yandan Almen şiddetinin paslanmaz çelik için titanyum alaşımına kıyasla aşınma davranışını üzerinde daha etkin olduğu sonucuna varılmıştır.

A 0.006 Almen dövme şiddetli
AISI 316 çeliği

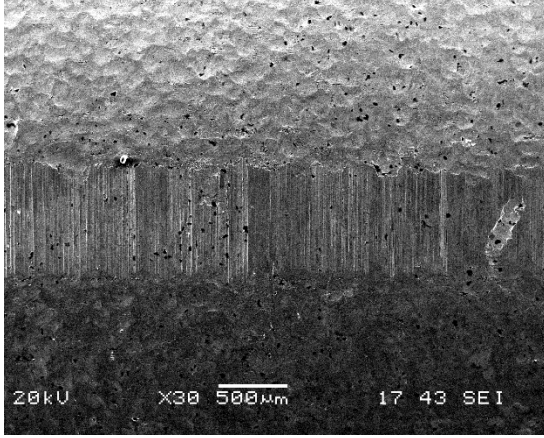


A 0.010 Almen dövme şiddetli
AISI 316 çeliği

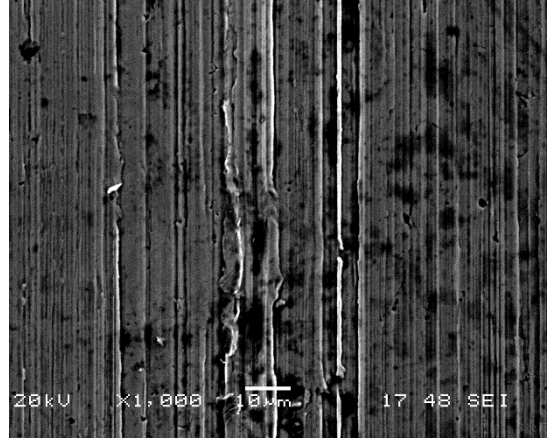
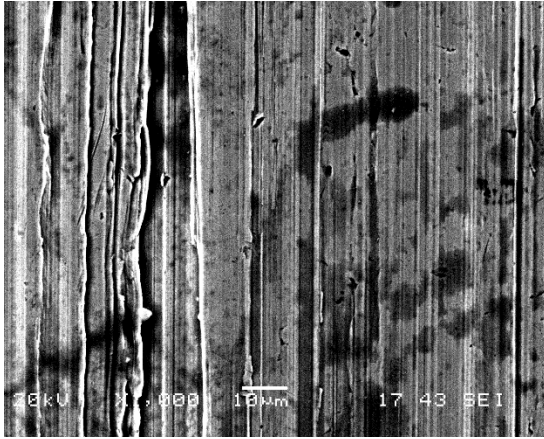
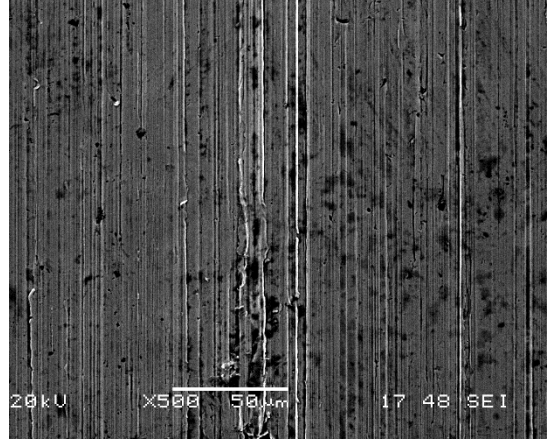
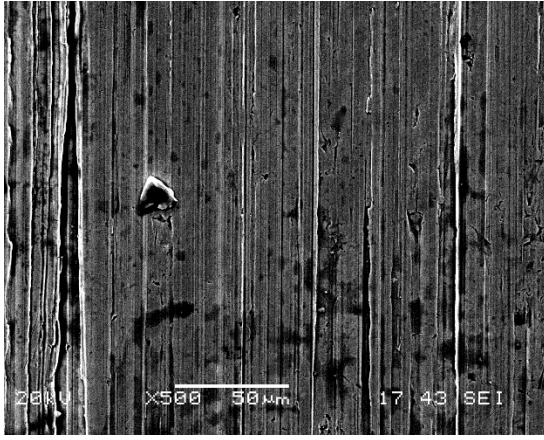
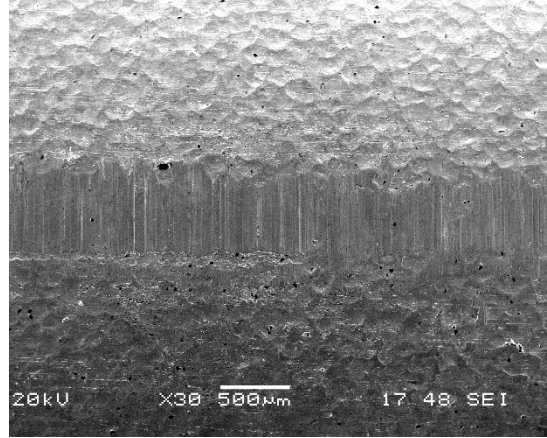


Şekil 5.57 : A 0.006 ve A 0.010 Almen şiddetlerinde dövülmüş paslanmaz çeliğin kuru sürtünme şartlarında aşındırılmış yüzeylerinin SEM görüntüleri.

A 0.006 Almen dövme şiddetli
AISI 316 çeliği



A 0.010 Almen dövme şiddetli
AISI 316 çeliği



Şekil 5.58 : A 0.006 ve A 0.010 Almen şiddetlerinde dövülmüş paslanmaz çeliğin sınır sürtünme şartlarında aşındırılmış yüzeylerinin SEM görüntüleri.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, AISI 316 paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşımı malzemelerin bilyalı dövme uygulaması sonrasındaki tribolojik davranışındaki değişim incelenmiştir. Bu kapsamda elde edilen numunelerin pürüzlülük, sertlik, sürtünme katsayısı ve aşınma hızı değerleri inceleme konusuna dahil edilmiştir. Son olarak numunelerin yüzey morfolojileri incelenmiştir. Yüksek lisans tez çalışması kapsamında yapılan incelemelerden sonra aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Bilyalı dövme uygulanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde yüksek hızda püskürtülen bilyaların malzeme yüzeylerinde oluşturduğu soğuk plastik deformasyonlar neticesinde pürüzlülük değerleri bilyalı dövme uygulaması ile artmış olduğu tespit edilmiştir. Hem AISI 316 paslanmaz çelik hem Ti6Al4V alaşımından elde edilen yüzeylerin pürüzlülük değerleri artan Almen dövme şiddeti ile yükselmiştir. Bilyalı dövme öncesinde ve sonrasında AISI 316 paslanmaz çelik malzemenin yüzey pürüzlülük değerlerinin Ti6Al4V malzemedan daha yüksek olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü değişimlerindeki yüzde oranları incelendiğinde AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin pürüzlülük artış oranları Ti6Al4V alaşımının pürüzlülük artış oranından yüksek olduğu tespit edilmiş ve AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin plastik deformasyon kabiliyetinin Ti6Al4V alaşımından daha iyi olduğu neticesine varılmıştır.

Paslanmaz çelik ve titanyum alaşımı numunelerin dövülmemiş ve dövülmüş sertlik değerleri incelendiğinde, bilyalı dövme işlemi sonrasında yüzey sertliklerinde artış gözlemlenmiştir. Dövülmemiş numunelerin sertlik değerlerine bakıldığında Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 paslanmaz çelik numunelerin sertlik değerlerinin arasında kayda değer bir fark olup, Ti6Al4V alaşımının sertlik değeri daha yüksek bulunmuştur. Almen dövme şiddeti artışı ile numunelerin yüzey sertlik değerlerinin arttığı ve iki farklı tür malzemenin sertlik değerleri arasındaki farkın azaldığı gözlemlenmiştir. Yüksek Almen dövme şiddetlerinde (A 0.008 ve A 0.010) paslanmaz çelik malzemenin sertlik değerlerinin titanyum malzemeye kıyasla yüksek olduğu görülmüştür. Sertlik değerlerindeki artış oranları incelendiğinde AISI 316 paslanmaz

elik numunelerin sertlik artış oranları daha yüksek olduğu ve plastik deformasyon kabiliyetinin titanyumdan daha fazla olması sebebiyle daha yüksek bir sertlik artışı gerçekleştiği öngörülmüştür.

AISI 316 paslanmaz elik ve Ti6Al4V alaşımının sürtünme karakteristiği hem kuru hem de yağlı çalışma şartlarında incelenmiştir.

Paslanmaz elik malzemelerin kuru sürtünme çalışma şartlarındaki sürtünme karakteristiğinde önemli değişimler gözlemlenmiştir. Bilyalı dövme uygulaması sonrasında AISI 316 paslanmaz elik malzemenin sürtünme katsayısı değerlerinde artış gerçekleşmiştir. Genel olarak sürtünme katsayısı kayma hızına bağlı olarak 0,4 ila 0,7 arasında değişmektedir. Bununla birlikte kayma hızının artması sonucunda sürtünme katsayısı değerlerinde de artış gözlenmiştir. Numunelerin sürtünme katsayısındaki değişim eğilimlerinin benzer olduğu gözlemlenirken, Almen dövme şiddetinin etkileri kesin olarak tespit edilememiştir. Paslanmaz elik malzemenin kuru sürtünme çalışma şartlarında uygulanan normal yükün artması ile sürtünme katsayısı değerlerindeki değişim farklılıklar göstermektedir. Genel olarak 20N normal yükleme halindeki çalışma şartlarında sürtünme katsayısı maksimum çıkmıştır. 0,8 m/s ile 1,4 m/s kayma hızı aralığında 10 N normal yük altındaki sürtünme katsayısı değerleri 40 N normal yükte çalışma halindeki sürtünme katsayısı değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. Sürtünme katsayısı değerlerinin düşük olması istenilen uygulamalar için bu değerlerin göz önünde bulundurulmasının önemli olduğu görülmüştür.

Kuru sürtünme çalışma şartlarındaki titanyum alaşımı numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinde bilyalı dövme sonrası önemli bir değişim gözlemlenmemiştir. Bununla birlikte kayma hızının artışı veya Almen dövme şiddetinin değişimi ile Ti6Al4V alaşımının kuru sürtünme çalışma şartlarındaki sürtünme katsayısı değerlerinde önemli değişimler tespit edilememiştir. Ayrıca paslanmaz elik malzemedeki sonuç gibi, titanyum numunenin de sürtünme katsayısı değerlerindeki değişim eğilimi birbirine benzemektedir. Deney sonuçlarından elde edilen verilere göre uygulanan normal yükün artması ile sürtünme katsayısı değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Diğer yandan dövülmemiş titanyum numunelerinde 40 N normal yük halinde sürtünme katsayısı değerleri maksimum elde edilirken, kayma hızının artması ile titanyum alaşımı numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinde azalma söz konusudur.

AISI 316 paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşımı malzemelerin yağlayıcı madde bulunan sınır sürtünme çalışma şartlarındaki sürtünme karakteristiği uygulanan Almen dövme şiddeti ve aşınma deney parametre değerlerine göre değişiklikler göstermiştir. Paslanmaz çelik malzemenin sınırı sürtünme çalışma şartlarında sürtünme katsayısı değerinde genel olarak kayma hızının artmasına bağlı olarak düşüş gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısının kayma hızına bağlı olarak 0,25 ila 0,1 arasında değiştiği söylenebilir. Deneysel çalışmalarda AISI 316 paslanmaz çelik malzemenin sürtünme katsayılarında değişim eğilimi genel olarak benzer elde edilmiştir. Bilyalı dövme uygulaması yapılmamış numunelerin sürtünme katsayısı değerleri, A 0.006 ve A 0.008 Almen dövme şiddeti ile bilyalı dövülen numunelerin sürtünme katsayısı değerlerine göre yüksek gözlemlenirken, A 0.010 Almen dövme şiddeti ile dövülmüş paslanmaz çelik malzemenin sürtünme katsayı değerlerinden daha düşük bulunmuştur. Ayrıca sürtünme deneyleri boyunca AISI 316 paslanmaz çelik numunelere uygulanan normal yük değerinin artması ile sınırı sürtünme çalışma şartlarında sergilenen sürtünme katsayısı değerlerinde çok küçük artmalar gözlemlendiği için sürtünme katsayısının normal yük artışı ile değiştiği söylenememiştir. 1.2 m/s kayma hızından sonra sürtünme katsayısı değerleri birbirine çok yakın gözlemlenmiştir.

Ti6Al4V titanyum alaşımının sınır sürtünme çalışma şartlarındaki sürtünme katsayısı değerlerinin dövme şiddetine bağlı olarak farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Numunelerin sınır sürtünme katsayısı değerlerindeki değişimler genel olarak benzer gözlemlenmiştir. Sınır sürtünme çalışma şartlarındaki bilyalı dövme işlemi yapılmamış numunelerin sürtünme katsayısı değerleri, A 0.006 Almen dövme şiddetli ile dövülen numunelerin sürtünme katsayısı değerlerine göre daha yüksek olarak bulunmuştur. Diğer yandan A 0.008 ve A 0.010 Almen dövme şiddeti sonrasında sürtünme katsayısı değerlerinde yükselme gözlemlenmiştir. Sınır sürtünme çalışma şartlarında kayma hızının artması sonucundaki sürtünme katsayısı değişimin uygulanan Almen dövme şiddeti ile ilgili olduğu görülmüştür. Genel olarak Almen dövme şiddetinin artışı ile sürtünme katsayısı değerlerinde yükseliş tespit edilmiştir. Sınır sürtünme çalışma şartlarındaki A 0.006 Almen dövme şiddeti ile dövülen numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinin kayma hızının artması ile azaldığı gözlemlenmiştir. Dövülmemiş ve A 0.006 Almen dövme şiddetinde dövülen numunelerinin 1.0 m/s kayma hızından sonra sürtünme katsayısı değerlerindeki

azalma yavaşlamıştır. Ayrıca bu numuneler için artan normal yük değerleri ile sürtünme katsayısı küçük miktarlarda azalma göstermiştir. A 0.008 ve A 0.010 Almen dövme şiddeti ile bilyalı dövülen Ti6Al4V alaşımının sürtünme katsayısı değerlerinin sınır sürtünmeli çalışma şartlarında kayma hızının artmasına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Kayma hızının artması ile sınır sürtünme katsayısı A0.008 ve A0.010 Almen dövme şiddetlerinde çok küçük değerlerde önce azalmış sonra artmıştır. 1.6 m/s kayma hızından sonra sürtünme katsayısında artış görülmektedir. Bu artış ve azalışlar çok küçük miktarlarda olduğu için sürtünme katsayısı değerleri sabit kaldığı söylenmektedir. Buna ek olarak sürtünme deneyleri boyunca A 0.008 ve A 0.010 Almen dövme şiddeti ile bilyalı dövülen Ti6Al4V alaşımı numunelere uygulanan normal yük değerinin artması ile sınırı sürtünme çalışma şartlarında sergilenen sürtünme katsayısı değerlerinde düşük değerlerde yükseliş gözlemlenmiştir.

AISI 316 paslanmaz çelik ve Ti6Al4V alaşımının hem kuru hem de yağlayıcı madde bulunan çalışma şartlarındaki aşınma karakteristiği araştırılmıştır.

Kuru çalışma şartlarında AISI 316 paslanmaz çelik malzemenin bilyalı dövme sonrasında aşınma hızının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca uygulanan Almen dövme şiddetinin artışı ile aşınma hızında azalma tespit edilmiştir.

Bilyalı dövme işlemi yapılan Ti6Al4V alaşımının kuru çalışma şartlarında aşınma hızının, dövülmemiş numunelerin aşınma hızı ile karşılaştırıldığında, aşınma hızının bilyalı dövme işleminden sonra değişmediği gözlemlenmiştir. Aşınma hızında çok küçük değerlerde değişimler elde edilmiş bu değişimlere göre aşınma hızının arttığı veya azaldığı sonucuna varılmasının doğru olmadığı düşünülmüştür. Bunu yanında yine Almen dövme şiddetindeki artış ile küçük değerlerle olsa da aşınma hızında artış görülmüş olup bu değerlere göre aşınma hızının dövme şiddeti ile arttığı kesin olarak söylenememektedir.

Bilyalı dövme işlemi sonrasında numunelerin kuru çalışma şartlarındaki aşınma hızlarının yükselişi ile malzemelerin aşınma dayanımlarında düşüşler olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca Ti6Al4V alaşımı numunelerin daha yavaş aşınma hızı sergiledikleri gözlemlenmiştir.

AISI 316 paslanmaz çelik malzemelerin sınır sürtünme çalışma şartlarındaki deneyler sonucunda aşınma hızının bilyalı dövme işlemi sonrasında düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte artan Almen dövme şiddetinin sonucu olarak

paslanmaz çelik malzemenin sınır sürtünme çalışma şartlarında aşınma hızının azaldığı tespit edilmiştir. AISI 316 çeliğinin aşınma hızının 3000 metre kayma mesafesinden sonra sabit bir değerde kaldığı görülmüştür.

Ti6Al4V alaşımının yağlayıcı madde bulunan sınır sürtünmeli çalışma şartlarında aşınma karakteristiğinin bilyalı dövme işlemi ile değiştiği gözlemlenmiştir. Titanyum malzemenin aşınma hızında bilyalı dövme işleminden sonra azalma meydana gelmiştir. Ayrıca Almen dövme şiddetinin artmasına bağlı olarak Ti6Al4V alaşımının aşınma hızı azalmıştır. Buna ek olarak A 0.008 ve A 0.010 Almen dövme şiddetli titanyum numunelerin aşınma hızları birbirine yakın olarak gerçekleşmiştir. 3000 metre kayma mesafesinden sonra sınırı sürtünme çalışma şartlarındaki titanyum alaşımı malzemenin aşınma hızın paslanmaz çelik numunelerde olduğu gibi sabit bir değerde kaldığı görülmüştür.

Sınır sürtünme çalışma şartlarında gerçekleştirilen deneyler sonucunda aşınma direncinin hem titanyum alaşımı hem de paslanmaz çelik malzeme için bilyalı dövme sonrasında geliştiği gözlemlenmiştir. Buna ek olarak Ti6Al4V alaşımının aşınma hızın daha düşük bulunması sebebiyle daha yüksek dayanımlı olduğu sonucuna varılmıştır.

500 metrelik kayma mesafesi için hem kuru hem de sınır sürtünme çalışma şartlarındaki deneyler incelendiğinde yağlayıcı madde bulunan sınır sürtünme şartlarındaki deneylerin aşınma hızları daha düşük bulunmuştur. Bunun yanında Ti6Al4V titanyum alaşımının aşınma hızları en düşük seviyede gözlemlenmiştir.

Yüzey morfolojilerinin incelenmesi sonucunda elde edilen görüntülerde bilyalı dövülmüş olan numunelerin yüzey topoğrafyalarındaki değişimler gözlemlenmiştir. İki farklı tür malzemedan yapılan numunelerin yüzeylerinde soğuk plastik deformasyon sonucunda elde edilen yüzeylerde çukur ve tümsek yapılar tespit edilmiştir. Optik mikroskop görüntülerinin analizleri ile yüzey pürüzlülüğündeki değişimler benzer ve birbirini destekler niteliklerde olduğu görülmüştür. Bilyalı dövme şiddetinin artışı ile yüzey özelliklerinde değişimlerin şiddeti anlaşılamamakla birlikte en yüksek dövme şiddeti olan A 0.010 parametresi ile dövülen numunelerin yüzeylerindeki çukurların ve tümseklerin daha fazla ve daha net oldukları görülmektedir.

SEM incelemeleri sonrasında aşınma izlerinin sınır sürtünme şartlarında aşındırılan numunelerde daha az olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında Almen dövme şiddeti ile aşınma izleri arasındaki ilişki numune cinsine ve çalışma şartlarına göre değişiklikler göstermiştir. Almen dövme şiddetinin artması ile numunelerin yüzeylerindeki aşınma izlerinin azaldığı ve daha düzenli aşınma izleri olduğu SEM görüntülerinden elde edilmiştir. Düşük dövme şiddetli numunelerde genellikle daha derin aşınma izleri ve yüksek oranda plastik deformasyonlar gözlemlenmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde aşınmaların mikrokesme ve mikrosürme olarak gerçekleştiği görülmüştür. Ayrıca Almen dövme şiddetinin değişmesi aşınma mekanizmalarında değişikliğe yol açmadığı tespit edilmiştir.

Tez çalışması sonucunda bilyalı dövme işleminin paslanmaz çelik ve titanyum alaşımı malzemelerin aşınma davranışlarını önemli ölçüde değiştirdiği sonucuna varılmıştır. Bilyalı dövme sonrasında malzemelerin yüzey pürüzlülükleri ve sertliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiş ve bu değişimlerin her iki malzemenin aşınma davranışlarına olan etkileri tartışılmıştır.

Paslanmaz çeliğin aynı şartlarda gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemleri sonrasında; sertlik ve pürüzlülük değerleri ile aşınma davranışlarının titanyum alaşımına kıyasla daha büyük oranda değiştiği sonucuna varılmıştır. Diğer yandan her iki malzeme için bilyalı dövme şiddetinin malzemelerin sürtünme katsayılarını ve aşınma davranışını etkileyen önemli bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır.

Bilyalı dövme işleminin malzemelerin tribolojik davranışları üzerindeki etkilerinin incelenmesinin amaçlandığı bu yüksek lisans tezinde Almen dövme şiddetinin, sürtünme ve aşınma karakteristikleri üzerine önemli etkilere sahip olduğu görülmüştür. Bilyalı dövme işleminin sonuçlarını etkileyen birden fazla etkin parametre bulunmaktadır. Bilya dövme işleminde, Almen dövme şiddetinin etkilerinin dışında, bilya boyutu, cinsi ve şekli, ayrıca numune ve nozul arasındaki mesafe ve bilyaların çarpma açısı gibi parametrelerin etkilerinin de ileriki çalışmalarda incelenmesi gerekmektedir. Bilya özelliklerinin (sertlik, boyut, şekil) değişimi ile bilyalı dövülen numunelerin yüzey özelliklerinin değişimi incelenmeli, bu değişimler neticesinde sürtünme ve aşınma davranışları karşılaştırılmalıdır. Literatürdeki mevcut çalışmalardaki Almen dövme şiddetlerinden farklı olarak bilyalı dövme uygulamaları gerçekleştirilerek çalışmalara devam edilmelidir. Numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve sertlik değerlerindeki değişimler araştırılarak

literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmadığıdır. Yapılacak bu çalışmalar ile literatürdeki eksik alanlar giderilebilir. Ayrıca Almen dövme şiddetinin bir fonksiyonu olarak malzeme kesitindeki sertlik değerlerinin ve tane yapılarının değişimleri incelenmelidir. Sunulan yüksek lisans tez çalışmasında bilyalı dövme işlemi uygulanan malzemenin özellikleri deney sonuçlarını yakından ilgilendirdiği görülmüştür. Bu sonuçlardan anlaşılmaktadır ki bilyalı dövme uygulamaları malzeme özelliklerine göre farklı sonuçlar verebilmektedir. Bu noktada bilyalı dövme işleminin verimliliğinin artırılması için yöntemin uygulanan malzemeye göre optimize edilmesi önem arz etmektedir. Konu ile ilgili literatürde yer alan eksiklikler farklı malzemelerin bilyalı dövme uygulamaları araştırılarak doldurulabilir.

Ti6Al4V ve 316 paslanmaz çelik alaşımları endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilen önemli mühendislik malzemelerdir. Her iki malzeme de uygulamada aşınma ile karşılaşmakta ve aşınma sonucunda hasara uğramaktadır. Bu nedenle bu malzemelerin aşınma davranışlarının geliştirilmesine yönelik gerçekleştirilen çalışmalar tez çalışmasında sıkça belirtildiği gibi artarak devam etmektedir. Diğer yandan bilyalı dövme işlemi gerek uygulama kolaylığı gerekse sağladığı pek çok faydalı katkı ile mühendislik malzemelerine uygulanan önemli bir mekanik yüzey işlemidir. Bu noktada tez çalışmasında önemli iki mühendislik malzemesinin yaygın olarak kullanılan, ancak henüz aşınma üzerine etkileri tam olarak anlaşılamamış bilyalı dövme işlemi ile işlenmesi ve sonrasında bu işlemin malzemelerin aşınma davranışlarına olan etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Literatür araştırmaları sırasında bilyalı dövme işleminin tribolojik davranışlar üzerine olan etkilerini inceleyen çalışmalara çok fazla rastlanamaması bu yüksek lisans tez çalışmasının özgün yanını ortaya koymaktadır. Tez çalışmasının araştırma gerekçesinin ve çıktılarının gerek endüstriyel gerekse bilimsel çalışmalar için önem arz ettiği açıktır. Tez çalışması sonrasında gerçekleştirilecek yayın çalışmaları ile literatürde konu ile ilgili önemli bir boşluk doldurulacaktır. Diğer yandan tez çalışmalarının çıktıları endüstriyel uygulamalarda bilyalı dövme işleminin ve işlem parametrelerinin optimizasyonu ve malzemelerin aşınma davranışlarına etkilerinin anlaşılması konularında önemli bir rehber olacaktır. Bilyalı dövme işlemi kullanılmasıyla malzemelerin aşınma davranışları başta olmak üzere tribolojik davranışları üzerine yapılan önemli bir yenilik ve katkı sağlanacağı kaçınılmazdır. Çalışma şartlarına bağlı olarak titanyum alaşımı ve paslanmaz çelik malzemelerin endüstriyel

uygulamalardaki tribolojik davranışları elde edilen bu sonuç dikkate alınarak gözden geçirilebilir. Titanyum alaşımlarının ve paslanmaz çelik malzemelerin kullanıldığı başta havacılık, savunma sanayi ve otomotiv olmak üzere dayanıklı tüketim aletleri, petrokimya ve tıp sektörlerinde aşınma davranışları açısından değerli sonuçların elde edildiği görülmüştür. Minimum aşınmanın gerçekleştiği çalışma ve bilyalı dövme şartları doğrultusunda uygulamalar yapılarak aşınma dayanımı açısından gelişme sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Savaş S.** (2010). Monitoring variation of surface residual stresses in the shot-peened steel components by magnetic barkhausen noise method, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 81 s.
- [2] **Ganesh, B. K. C., Sha, W., Ramanaiah, N., Krishnainah, A.** (2014). Effect of shotpeening on sliding wear and tensile behavior of titanium implant alloys, *Materials and Design*, 56, 480-486.
- [3] **Byrne, G. D., O'Neill, L., Twomey, B., Dowling, D. P.** (2013). Comparison between shot peening and abrasive blasting processes as deposition methods for hidroxyapatite coatings onto a titanium alloy, *Surface & Coatings Technology*, 216, 224-231.
- [4] **Fridrici, V., Fouvry, S., Kapsa, Ph.** (2001). Effect of shot peening on the fretting wear of Ti-6Al-4V, *Wear*, 250, 642-649.
- [5] **Sabelkin, V., Martinez, S. A., Mall, S., Sathish, S., Blodgett, M. P.** (2005). Effects of shot peening intensity on fretting fatigue crack initiation behaviour of Ti-6Al-4V, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 28, 321-332.
- [6] **Jiang, X. P., Man, M. J., Shepard, M. J., Zhai, T.** (2007). Effects of shot-peening and re-shot-peening on four-point bend fatigue behavior of Ti-6Al-4V, *Materials Science and Engineering A*, 468-470, 137-143.
- [7] **Bansal, D. G., Kirkham, M., Blau, P. J.** (2013). Effects of combined diffusion treatments and cold working on the sliding friction and wear behavior of Ti-6Al-4V, *Wear*, 302, 837-844.
- [8] **Schulze.** (2004). *Modern Mechanical Surface Treatments*, 1st edition, Wiley WCH, 368.
- [9] **Thomas, M., Lindley, T., Rugg, D., Jackson, M.** (2012). The effect of shot peening on the microstructure and properties of near – alpha titanium alloy following high temperature exposure, *Acta Materialia*, 60, 5040-5048.
- [10] **Güleç, Ş., Aran A.** (1995). *Malzeme Bilgisi*, Cilt 2, İ.T.Ü. Makine Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.
- [11] **Conner, B.P., Hutson, A.L., Chambon, L.** (2003). Observations of fretting fatigue micro-damage of Ti-6Al-4V, *Wear*, 255, 259-268.

- [12] **Hoeppner, D. W., Gates, F. L.** (1981). Fretting fatigue considerations in engineering design, *Wear*, 70, 155-164.
- [13] **Mutoh, Y., Tanaka, K.** (1988). Fretting fatigue in several steels and a cast iron, *Wear*, 125, 175 -191.
- [14] **Kermouche, G., Rech, J., Hamdi, H., Bergheau, J.M.** (2010). On the residual stress field induced by a scratching round abrasive grain, *Wear*, 269, 86-92.
- [15] **Hongbin, X., Qing, C., ve Eryu, S., Dengzhen, W., Zhaohong, C., ve Zhengle, W.** (1991). The effect of shot peening on rolling contact fatigue behaviour and its crack initiation and propagation in carburized steel, *Wear*, 151, 77-86.
- [16] **Hasçalık, A.** (1998). Yaprak yay yapımında kullanılan 35 Cr 4 çeliğinin fretting yorulma davranışının araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [17] **Prakash, N. A., Gnanamoorthy, R., Kamaraj, M.** (2012). Fretting wear behavior of fine grain structured aluminium alloy formed by oil jet peening process under dry sliding condition, *Wear*, 294-295, 427-437.
- [18] **Almen, J. O., Black P. B.**, (1963). Residual stresses and fatigue in metals, McGraw-Hill Book Co.
- [19] **Kameyama, Y., Komotori, J.** (2009). Effect of micro ploughing during fine particle peening process on the microstructure of metallic materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 6146-6155.
- [20] **Ünal, O., Varol, V.** (2014). Almen intensity effect on microstructure and mechanical properties of low karbon steel subjected to severe shot peening, *Applied Surface Science*, 290, 40-47.
- [21] **Ohue, Y., Matsumoto, K.** (2007). Sliding-rolling contact fatigue and wear of maraging steel roller with ion-nitriding and fine particle shot-peening, *Wear*, 263, 782-789.
- [22] **Yılmaz, S. S., Ünlü, B. S., Varol, R.** (2008). Borlanmış ve bilyalı dövülmüş demir esaslı T/M malzemelerin aşınma ve mekanik özellikleri, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1, 7-16.
- [23] **Başarantoz, A.** (2007), Metal parçalara ısı ve mekanik yüzey işlemlerin birlikte uygulanabilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- [24] **Tomlinson, W. J., Moule, R. T., Blount, G. N.**, (1987). The effect of shot peening on the cavitation erosion of pure iron and austenitic stainless steel in distilled and 1% salt waters, *Wear*, 118, 233 - 242.

- [25] **Zammit, A., Abela, S., Wagner, L., Mhaede, M., Grech, M.** (2013). Tribological behaviour of shot peened Cu–Ni austempered ductile iron, *Wear*, 302, 829-836.
- [26] **Appel, F.** (2013). Atomic level observations of mechanical damage in shot peened TiAl, *Philosophical Magazine*, Vol. 93, Issue. 1-3, 2-21.
- [27] **Zhan, K., Jiang, C.H., Ji, V.** (2012). Effect of prestress state on surface layer characteristic of S30432 austenitic stainless steel in shot peening process, *Materials and Design*, 42, 89-93.
- [28] **Wanga, Z., Jiang, C., Gan, X., Chen, Y., Ji, V.** (2011). Influence of shot peening on the fatigue life of laser hardened 17-4PH steel, *International Journal of Fatigue*, 33, 549-556.
- [29] **Ünal, O., Varol, R.** (2012). Mechanical properties of commercially pure titanium and low carbon steel after severe shot peening. 14th International Materials Symposium, IMSP'2012, Pamukkale University, Denizli, Turkey, 10-12 October 2012.
- [30] **Wang, S., Li, Y., Yao, M., Wang, R.** (1998). Compressive residual stress introduced by shot peening, *Journal of Materials Processing Technology*, 73, 64-73.
- [31] **Guagliano, M., Riva, E., Guidetti, M.** (2002). Contact fatigue failure analysis of shot-peened gears, *Engineering Failure Analysis*, 9, 147-158.
- [32] **Guagliano, M.** (2001). Relating Almen intensity to residual stresses induced by shot peening: a numerical approach, *Journal of Materials Processing Technology*, 110, 277-286.
- [33] **Meguid, S.A., Shagal, G., Stranart, J.C., Daly, J.** (1999). Three-dimensional dynamic finite element analysis of shot-peening induced residual stresses, *Finite Elements in Analysis and Design*, 31, 179-191.
- [34] **Dülek, E., Orman, Ş., Karataş, Ç., Sarıtaş, S.** (2005). Bilyalı dövme parametrelerinin Ç1020 çeliğinin yorulma dayanımına etkisi ve oluşan kalıcı gerilmenin katman kaldırma yöntemi ile araştırılması, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi Cilt 20, No 3*, 289-295.
- [35] **Nouguier-Lehon, C., Zarwel, M., Diviani, C., Hertz, D., Zahouani, H., Hoc, T.** (2013). Surface impact analysis in shot peening process, *Wear*, 302 1058–1063.
- [36] **Kocan, M., Rack, H. J., ve Wagner, L.** (2005). Fatigue performance of metastable titanium alloys: effects of microstructure and surface finish, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Volume 14, Issue 6, December JMEPEG 14:765-772, ASM International.

- [37] **Leonard, B. D., Sadeghi, F., Shinde, S., Mittelbach, M.** (2013). Rough surface and damage mechanics wear modeling using the combined finite-discrete element method, *Wear*, 305, 312–321.
- [38] **Lee, H., Mall, S., Soyama, H.,** (2009). Fretting fatigue behavior of cavitation shotless peened Ti–6Al–4V, *Springer, Tribology Letters*, Volume 36, 89–94.
- [39] **Wagner, L.** (1999). Mechanical surface treatments on titanium, aluminum and magnesium alloys, *Materials Science and Engineering A*, 263, 210–216.
- [40] **Varol R., Tunay, R., F.** (2001). Bilyalı dövülmüş AA2024 alüminyum alaşımının aşınma özellikleri, *Makina ve Mühendis Dergisi*, Cilt 42, Sayı 497, 40-44.
- [41] **Bagherifard, S., Guagliano, M.** (2012). Fatigue behavior of a low alloy steel with nanostructured surface obtained by severe shot peening, *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 81, 56-68.
- [42] **Liu, Y. G., Li, H. M., Li, M. Q.** (2015). Characterization of surface layer in TC17 alloy treated by air blast shot peening, *Materials and Design*, 65, 120-126.
- [43] **Heredia, S., Fouvry, S., Berthel, B., Panter, J.** (2011). A non-local fatigue approach to quantify Ti-10V-2Fe-3Al fretting cracking process: Application to grinding and shot peening, *Tribology International*, 44, 1518-1525.
- [44] **Girish, D. V., Mayuram, M. M., ve Krishnamurthy, S.** (1997). Influence of shot peening on the surface durability of thermomechanically treated En 24 steel spur gears, *Tribology International*, Vol. 30, No. 12, 865-870.
- [45] **Bansal, D. G., Eryilmaz, O. L., Blau, P. J.** (2011). Surface engineering to improve the durability and lubricity of Ti–6Al–4V alloy, *Wear* 271, 2006– 2015.
- [46] **Li, C.X., Horspool, D., Dong, H.** (2007). Effect of ceramic conversion surface treatment on fatigue properties of Ti6Al4V alloy, *International Journal of Fatigue*, 29, 2273–2280.
- [47] **Costa, M. Y. P., Venditti, M. L. R., Voorwald, H., Cioffi, M. O. H., Cruz, T. G.** (2009). Effect of WC–10%Co–4%Cr coating on the Ti–6Al–4V alloy fatigue strength, *Materials Science and Engineering A*, 507, 29–36.

- [48] **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.
- [49] **Tsuji, N., Tanaka, S., Takasugi, T.** (2009). Effects of combined plasma - carburizing and shot peening on fatigue and wear properties of Ti-6Al-4V alloy, *Surface & Coatings Technology*, 230, 1400-1405.
- [50] **Dong, H., Bloyce, A., Bell, T.** (1999). Slurry abrasion response of surface engineered Ti6Al4VELI, *Tribology International*, 32, 517-526.
- [51] **Zhang, X., Liu, D.** (2009). Effect of shot peening on fretting fatigue of Ti811 alloy at elevated temperature, *International Journal of Fatigue*, 31, 889-893.
- [52] **Url-1** <<http://www.aerospace-technology.com/contractors/manufacturing/wheelabrator>> alındığı tarih: 21.10.2014
- [53] **Url-2** <http://www.uk-finishing.org.uk/N-COAT70/mech_surf_treat.htm> alındığı tarih: 10.11.2014
- [54] **Satıcı M. E.** (2004). Kumlama işleminin ve bu işleme etkiyen parametrelerin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [55] **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.
- [56] **Zieler, W., Lepand, H.** (1964). *Strahlen und Strahlmittel*, Carl Hanser Verlag. München.
- [57] **Url-3** <http://www.wheelabratorgroup.com/en/sites/wheelabrator/content/equipment/airblast__wetblast/blastroom.aspx> alındığı tarih: 02.05.2015
- [58] **Ünal O.** (2011). Bilyalı dövme işleminin tane boyutuna etkisinin deneysel incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın.
- [59] **Akyıldız H. K.** (1998). Bilyalı dövmenin Fe + % 2Cu + % 0,5C toz metal çeliğin yorulma davranışına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [60] **Url-4** <<http://www.frohn.com/en/products/high-performance-specialty-shot-blasting-media/>> alındığı tarih: 26.02.15, 13:30
- [61] **Girish, D. V., Mayuram, M. M., ve Krishnamurthy, S.** (1966). Surface integrity studies on shot-peened thermal-treated En 24 steel spur gears, *Wear*, 193, 242-247.

- [62] **Şahin, F. Y.** (2012). Titanyum-Nikel alaşımlı malzeme üretimi ve aşınma davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ekim, Ankara.
- [63] **Kayalı, Y.** (2011). Borlanmış AISI 316L paslanmaz çeliğin korozyon ve aşınma davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şubat.
- [64] **Çam, S.** (2012). A356 Alüminyum alaşımında titanyum miktarının aşınma davranışı üzerinde etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran.
- [65] **Güleryüz, K.** (2011). Deformasyon yaşlanmasının AA7075 alaşımının mekanik özelliklerine ve aşınma davranışına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ocak.
- [66] **Eryiğit, H.** (2012). Borlanmış çift fazlı çeliklerin aşınma davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ekim.
- [67] **Heinz, K., Gahr, Z.** (1987). Microstructure and Wear of Materials, Elsevier Science Publishers B.V., Tribology Series 10.
- [68] **Hıdıroğlu, M.** (2012). Aşınan makine parçalarına uygulanan sert dolgu kaynağının aşınma özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ocak.
- [69] **Suzin, S. H.** (2011). Grafit ve SiC takviyeli ZA 27 hibrit kompozit malzemelerin ısıtılmasının aşınma davranışına etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran.
- [70] **Soydan Y., Ulukan L.** (2013), Temel Triboloji – Sürtünme – Aşınma – Yağlama Bilimi ve Teknolojisi, Tagem Kopisan, Sakarya.

EKLER

EK A: Deneylerde kullanılan Ti6Al4V ve AISI 316 malzeme sertifikaları.

EK B: Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 çeliği numunelerin pürüzlülükleri.

EK C: Ti6Al4V alaşımı ve AISI 316 çeliği numunelerin HRC sertlikleri

EK A

TIMET

Inspection certificate

Baoli Xinnuo New Metal Materials Co., Ltd Production licence: XK27-006-00041 Certification No :Ti20130422-16

User Name	Commodity	Designation	Heat No	Condition	Size(mm)	Net weight (kg)	Gross weight (kg)	Quantity	Specification
Timet Titanium Metal & Medical	Tibar	Gr5	XN120311-1213	M	Φ12	30.4	/	/	ASTM B348

Temperature ℃	Tensile strength Rm/Mpa	Yield strength Rp0.2/Mpa	Elongation A/%	Reduction of area Z/%	Hardness HV10	Mpa	Melting Method
20	972	901	17	51			VAR Melting for 0.01times

Dimensional inspection	Visual inspection	Undamage inspection	Macrostructure	Microstructure	Surface contamination	Grain size
qualified	qualified	qualified	qualified	/	qualified	---

Chemical Composition (%)									
Ti	Al	V	/	/	Fe	C	N	H	O
Remainder									Each<0.10
Remainder	6.23	4.26			0.169	0.014	0.019	0.001	0.09
Remainder									Total<0.30

Inspector: **TIMET** **Turhan KIRANKAYA** qualified: **06.01.2015** Tarih ve
06.01.2015 Nolu Fatura
muhteviyatının Sertifikasıdır.

Stamp:
2013-04-22

Annealing temperature 760℃ for 1 hour.

Note

Tepceca VU 205 401 115 54

Şekil A.1 : Ti6Al4V titanyum alaşımı çubuk malzemenin sertifikası.

**BHANSALI****BRIGHT BARS PVT. LTD.**

MANUFACTURERS & EXPORTERS (GOVERNMENT RECOGNISED EXPORT HOUSE)

E-mail : sales@bhansalisteel.com / works@bhansalisteel.com / bbbpl@bhansalisteel.com • Visit us at : www.bhansalisteel.com

MILL TEST CERTIFICATE

(Equivalent to EN 10204 / 3.1 B)

CUSTOMER : ERASLAN PASLANMAZ ÇELİK TİCARET LTD.ŞTİ TC NO. : 149

DEMİRCİLER SİTESİ 2. YOL NO.:60

ZEYİTBURNU 34780, İSTANBUL / TURKEY

DESCRIPTION: STAINLESS STEEL BRIGHT BARS

AISI 316 & AISI 316L

ORDER NO.:

INVOICE NO. EXP/04-05/0090

CONDITION OF DELIVERY :

ITEM 1 & 2: COLD DRAWN & GROUND & POLISHED

ITEM 3 : PEELED, GROUND & POLISHED TOL : h-9

ITEM 4 & 5 : DRAWN & POLISHED TOL : h11

ITEM	BDL	DIMENSION	GRADE	WEIGHT (MT)	HEAT NO.	BDLS NO.
1	1 BDL	10 MM	AISI 316	0.520	U 9957	38
2	1 BDL	12 MM	AISI 316	0.229	V 4602	39
3	1BDL	45 MM	AISI 316	0.131	U 8973	40
4	2 BDLS	22 MM HEX	AISI 316	1.102	U 9957	27 & 28
5	1 BDL	32 MM HEX	AISI 316L	0.310	U 9956	29

CHEMICAL COMPOSITION

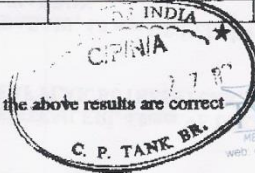
ITEM	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Ni	% Cr	% Mo	N2 PPM	% Cu
1	0.044	1.58	0.330	0.036	0.015	10.05	16.60	2.18	700	0.22
2	0.023	1.60	0.350	0.047	0.025	10.08	16.81	2.04	763	..
3	0.049	1.40	0.36	0.039	0.024	10.20	16.55	2.09	500	0.24
4	0.044	1.58	0.330	0.036	0.015	10.05	16.60	2.18	700	0.22
5	0.019	1.42	0.500	0.035	0.015	10.10	16.80	2.06	780	0.23

MECHANICAL PROPERTIES

ITEM	YIELD STRESS N/mm2	TENSILE STRENGTH N/mm2	ELONGATION %	REDUCTION IN AREA %	HARDNESS IN BHN
1	745.49	807.40	31.62	60.15	242 - 246
2	740.17	808.34	32.17	62.37	240 - 243
3	356.40	540.19	54.15	67.28	175 - 180
4	609.57	690.77	39.00	68.74	207 - 212
5	652.13	706.43	44.25	68.14	208 - 213

REMARK :

is hereby certified that the above results are correct



FOR BHANSALI BRIGHT BARS PVT LTD

Tarih ve 06.07.2015

Notu Fatura 8162023

muhteviyatının Sertifikasıdır.

S. K. BHATTACHARJEE

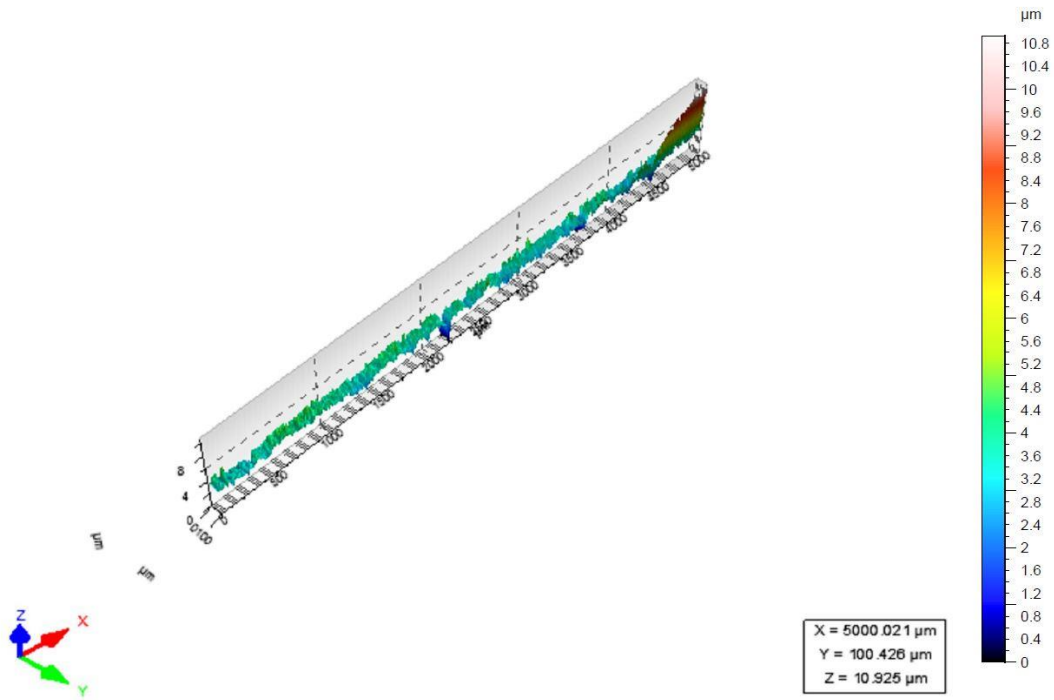
Manager Quality Control

PLANT/MARKETING OFFICE : C 8/2, T.T.C. INDUSTRIAL AREA, VILLAGE PAWNE, NAVI MUMBAI - 400 705, INDIA. TEL : 261 22 2748 4011 • 2748 2003 • 2748 2924

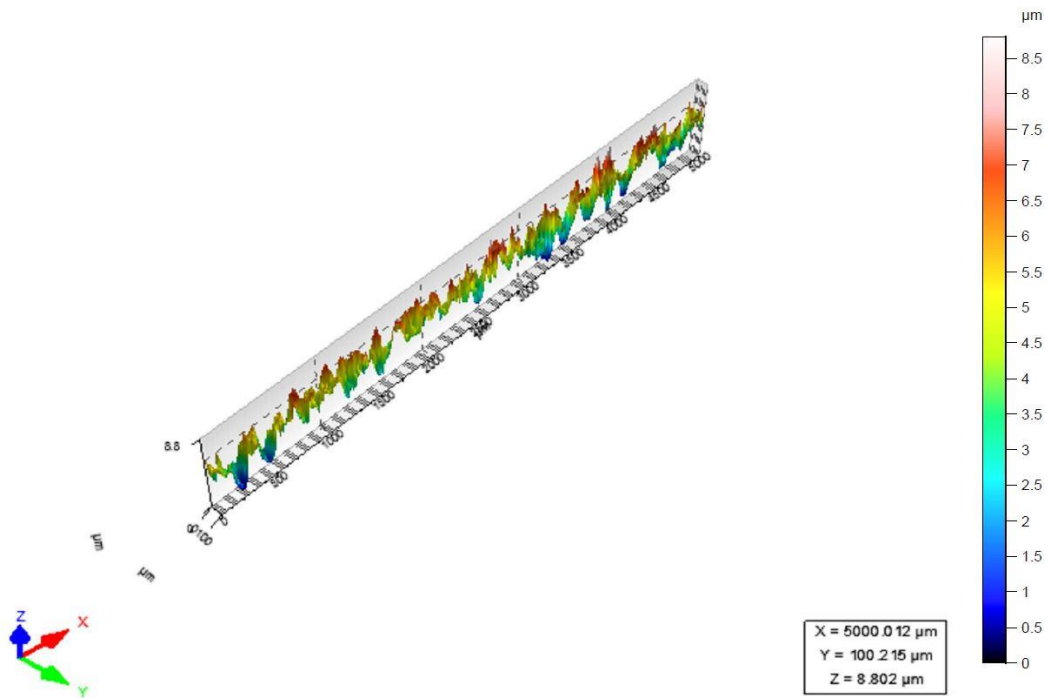
HEAD OFFICE : MADHAV BHAVAN, 150 NANUBHAI DESAI ROAD, MUMBAI - 400 004, INDIA. TEL : +91-22-2386 5178 • 2386 2320 • 5636 2988

Şekil A.2 : AISI 316 paslanma çelik çubuk malzemenin sertifikası.

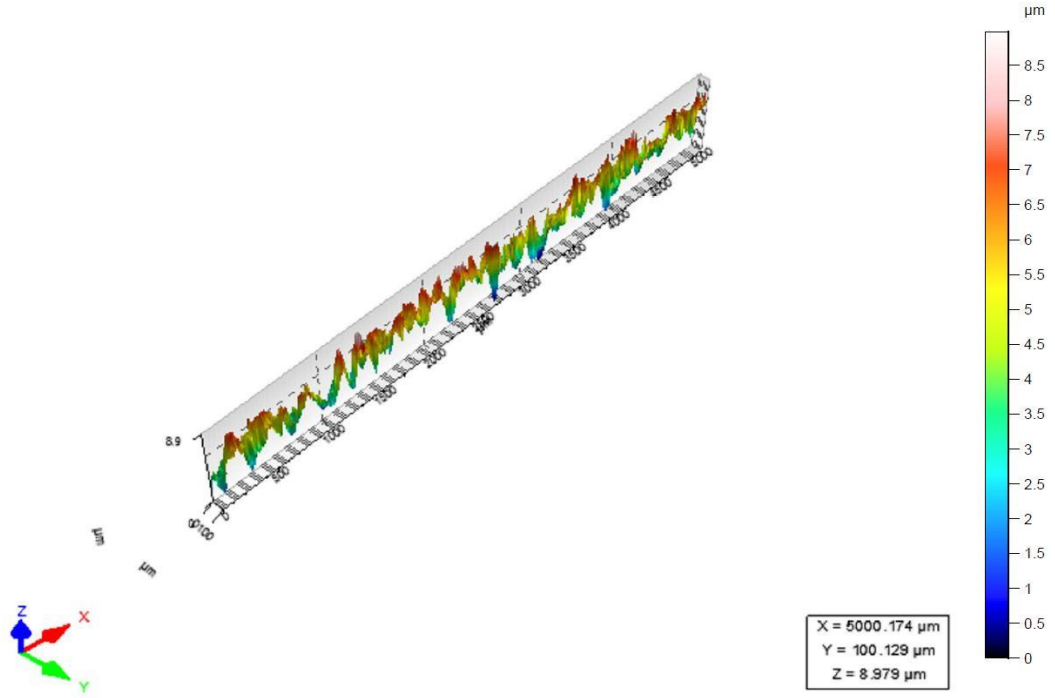
EK B



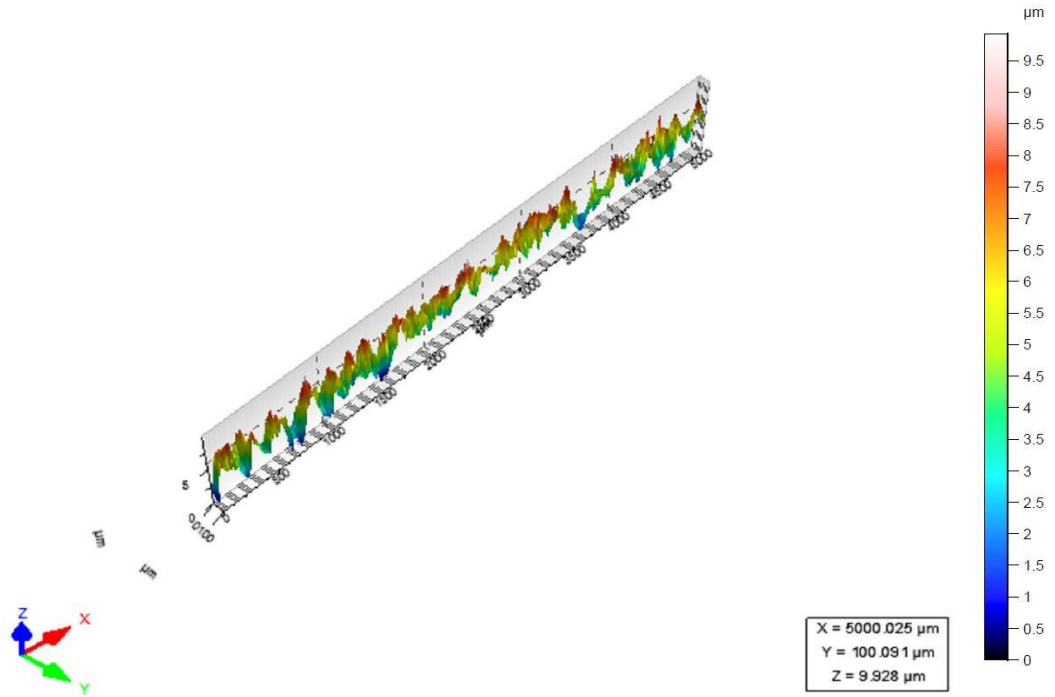
Şekil B.1 : Bilyalı dövülmemiş Ti6Al4V alaşımının yüzey pürüzlülüğü.



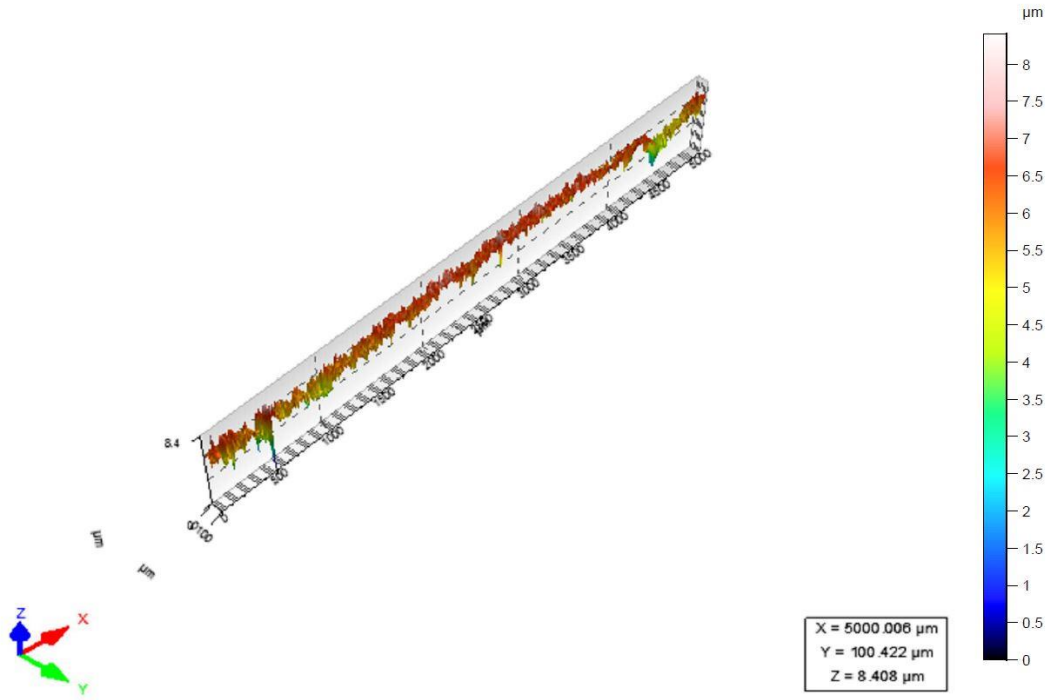
Şekil B.2 : A 0.006 dövme şiddetli Ti6Al4V alaşımının yüzey pürüzlülüğü.



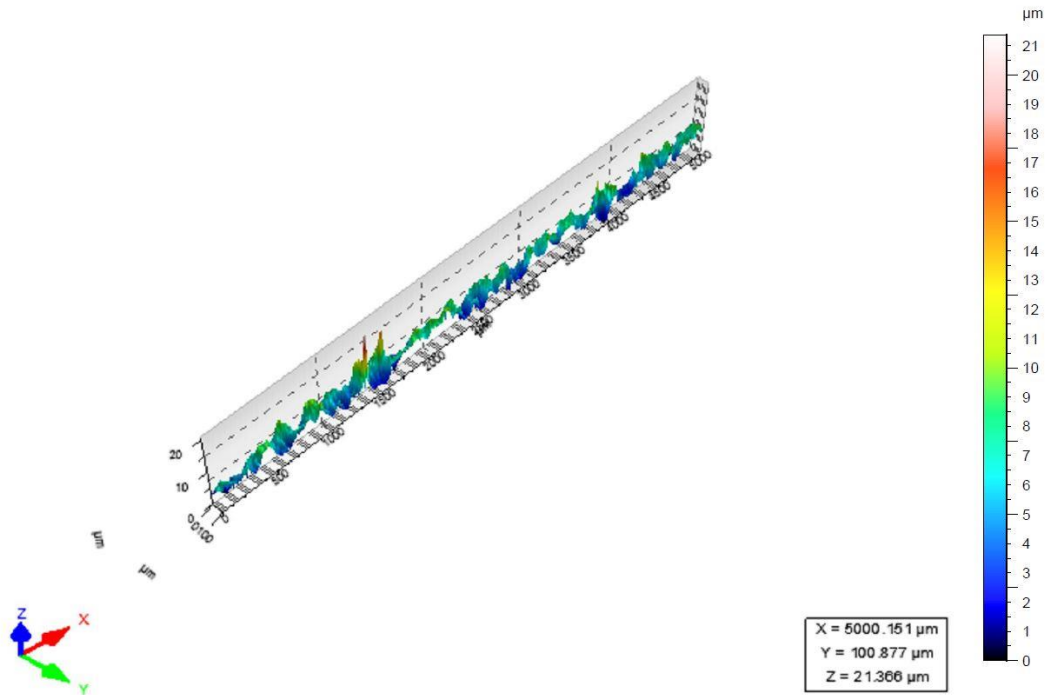
Şekil B.3 : A 0.008 dövme şiddetli Ti6Al4V alaşımının yüzey pürüzlülüğü.



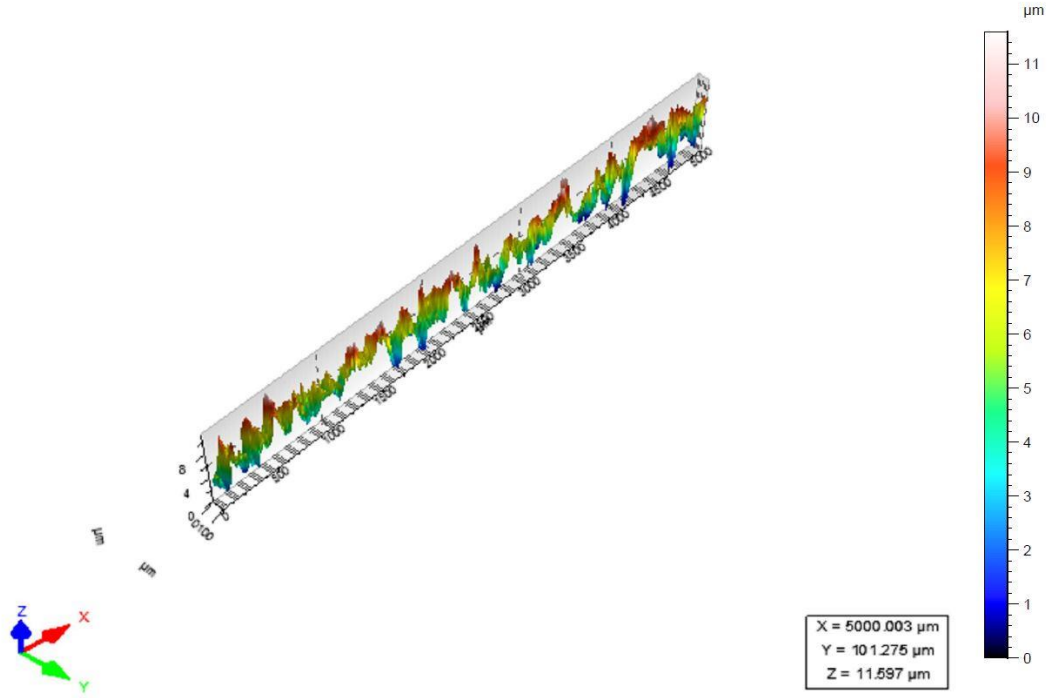
Şekil B.4 : A 0.010 dövme şiddetli Ti6Al4V alaşımının yüzey pürüzlülüğü.



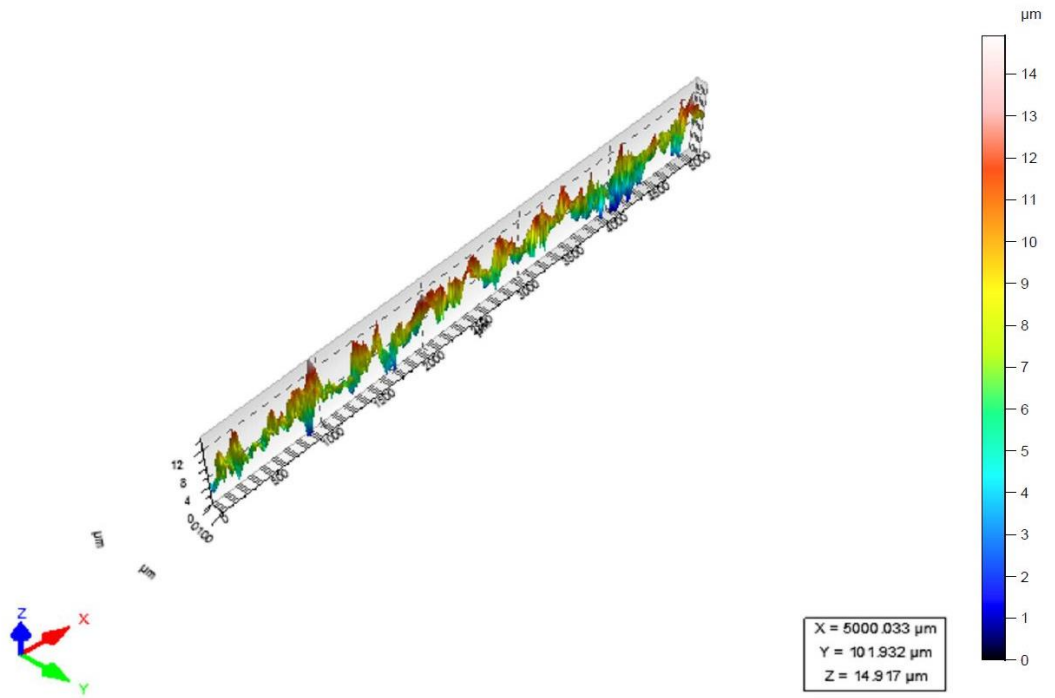
Şekil B.5 : Bilyalı dövülmemiş AISI 316 çeliğinin yüzey pürüzlülüğü.



Şekil B.6 : A 0.006 dövme şiddetli AISI 316 çeliğinin yüzey pürüzlülüğü.



Şekil B.7 : A 0.008 dövme şiddetli AISI 316 çeliğinin yüzey pürüzlülüğü.



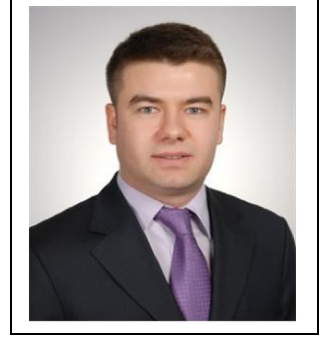
Şekil B.8 : A 0.010 dövme şiddetli AISI 316 çeliğinin yüzey pürüzlülüğü.

EK C

Çizelge C.1 : Ti6Al4V ve AISI 316 malzemelerinin HRC sertlik değerleri.

Almen	Ti6Al4V	AISI 316
Dövülmemiş	37,00	32,42
A 0,006	38,91	38,17
A 0,008	39,92	40,08
A 0,010	40,22	40,41

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Harun Arda BALYALI
Doğum Yeri ve Tarihi : Bandırma / BALIKESİR - 26/01/1989
Adres : 17 Eylül Mah. Atatürk Cad. Görener Apt. No: 161
Daire:12 Bandırma / BALIKESİR
E-Posta : harunardabalyali@gmail.com
: balyali@itu.edu.tr
Web : <http://web.itu.edu.tr/balyali/>

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, Kocaeli Üni., Mühendislik Fak., Makina Müh.,
: 2013, Kocaeli Üni., Mühendislik Fak., Endüstri Müh.,
- **Orta Öğretim** : 2007, Bandırma Anadolu Lisesi, Sayısal Bilimler,

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Özel Sektör, Otomotiv Sanayi, Proses Mühendisi
- Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fak., Makina Müh., Mezuniyet Derecesi (2.)

YAYINLAR VE SUNUMLAR:

- Balyalı H.A., Koçoğlu H., Harbelioğlu E., Yıldırım Y., Avcu E., Sınmazçelik T., 2014. Aşındırıcı Partikül Özelliklerinin Ti6Al4V Alaşımının Eroziyon Aşınma Davranışına Etkileri, 15th International Materials Symposium (IMSP'14), October 15-17, 2014, Denizli, Turkey.
- Balyalı H.A., Koçoğlu H., Öztürk A., Yıldırım Y., Avcu E., Fidan S., Şahin A.E., Sınmazçelik T., 2013. Cam Fiber Takviyeli Polyester Matrisli Kompozit Malzemelerin Aşınma Davranışlarının Taguchi Metodu ile İncelenmesi, II. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu (KomPEGE2013), November 07-09, 2013, Kuşadası, Türkiye.