

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**Ti6Al4V TİTANYUM ALAŞIMIN BİLYALI DÖVME SONRASI
AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YASEMİN YILDIRAN AVCU

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

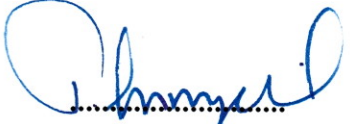


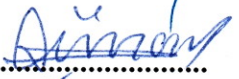

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Ti6Al4V TİTANYUM ALAŞIMIN BİLYALI DÖVME SONRASI
AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

YASEMİN YILDIRAN AVCU

Prof. Dr.Tamer SINMAZÇELİK
Danışman, Kocaeli Üniv.
Prof. Dr. Sedat KARABAY
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.
Doç. Dr. Ş. Hakan ATAPEK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.
Prof. Dr. Volkan GÜNAY
Jüri Üyesi, Yeditepe Üniv.
Prof. Dr. Şenol YILMAZ
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.

Tezin Savunulduğu Tarih: 20.06.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bilyalı dövme, kontrollü şartlar altında çok sayıda bilyanın tekrarlı bir şekilde malzemelerin yüzeylerine yüksek hızlarda çarptırılması ile gerçekleştirilen mekanik bir yüzey işleme yöntemidir. Bilyalı dövme, özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde kullanılan metalik malzemelerin yüzey ve yüzey altı bölgede tane küçülmesini sağlamak, mikroyapı özelliklerini geliştirmek, yüzey sertliğini arttırmak, çatlakların oluşumunu önlemek, malzemenin kristal yapısını değiştirmek, dislokasyon yoğunluğunu arttırmak, kalıntı gerilme oluşturmak, yorulma dayanımları arttırmak amacı ile sıklıkla kullanılan bir soğuk şekil verme yöntemidir. Bilyalı dövme işleminin uygulama kolaylığı ve proses maliyetinin düşük olması nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir.

Titanyum ve alaşımları, yüksek mukavemeti, korozyon dayanımı, toksit olmaması, yüksek biyouyumluluğu, yorulma dayanımının yüksek olması, şekillendirilebilirliği ve işlenebilir olması nedeni ile biyomedikal ve havacılık malzemesi olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak titanyum ve alaşımları yüksek sürtünme katsayısına sahip olması nedeni ile düşük aşınma dayanımına sahiptir.

Aşınma mühendislik malzemelerin kullanım ömrünü sınırlayan ve ekonomik kayıplara yol açan önemli bir endüstriyel problemdir. Aşınma sonrası malzeme yüzeyinden malzeme uzaklaşmakta, yüzey ve yüzey altı özellikleri bozulmakta ve buna bağlı olarak malzemenin kullanım ömründen önce hasar meydana gelmektedir. Bir malzemenin aşınma davranışını etkileyen birçok farklı faktör bulunmaktadır. Bu faktörler arasında aşınmanın meydana geldiği malzemenin yüzey ve yüzey altı özellikleri malzemenin aşınma davranışını belirleyen en önemli etkenlerden biridir. Bilyalı dövme ile malzemenin yüzey pürüzlülüğü başta olmak üzere, yüzey ve yüzey altı mikroyapısı, sertliği vb. mekanik özellikleri büyük değişiklik göstermektedir. Bu durumda bilyalı dövme uygulanan bir malzemenin aşınma davranışının incelenmesi önemli bir araştırma konusudur.

Tez çalışmasında; biyomedikal ve havacılık uygulamalarında sıklıkla tercih edilen Ti6Al4V alaşımının yüzey ve yüzey altı özelliklerine bilyalı dövme işleminin ve işlem parametrelerinin etkilerinin özgün yöntemler yardımıyla ortaya çıkarılması ve bilyalı dövme işlemi nedeniyle değişen yüzey ve yüzey altı özelliklerine bağlı olarak titanyum alaşımlarının tribolojik davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır.

Doktora tez çalışmalarım süresince değerli fikirleri ve yorumları ile bana yol gösteren değerli danışmanım Prof. Dr. Tamer Sınmazçelik' e sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Değerli fikirleri, yorumları ve yönlendirmeleri ile doktora tez çalışmalarına katkılarından dolayı doktora tez izleme jürim Prof. Dr. Sedat Karabay ve Doç. Dr. Ş. Hakan Atapek' e teşekkürlerimi sunarım.

Bilyalı dövme ve erozif aşınma çalışmalarını gerçekleştirdiğim Ford Otosan İhsaniye Otomotiv MYO'da bulunan Mekanik Yüzey İşlemleri Laboratuvarımız ve ekibimiz üyeleri Ahmet Burak Çubuk ve Berkay Gönül'e, yürütücüsü Dr. Öğretim Üyesi Egemen Avcu'ya ve Dr. Öğretim Üyesi Rıza Emre Ergün'e, okul müdürü Doç. Dr. Abdülkadir Cengiz'e ve teknik desteği ile hep yanımda olan Recep Usta'ya teşekkürlerimi sunarım.

Otomatik kontrollü bilyalı test düzeneğinin tasarlanmasında, imalatında ve kontrolünde büyük katkısı bulunan Arş. Gör. Yüksek Makine Mühendisi Hürol Koçoğlu'na ve Kadir Numal'a teşekkürlerimi sunarım.

Kocaeli Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Malzeme Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen çalışmalarda yardımlarından dolayı Arş. Gör. Erhan Balcı ve Arş. Gör. Beysim Çetin'e, Konstrüksiyon Laboratuvarı'nda gerçekleştirdiğim aşınma testlerine yardımlarından dolayı Prof. Dr. Taner Yılmaz, Arş. Gör. Yüksek Makine Mühendisi Alp Eren Şahin, Arş. Gör. Yüksek Makine Mühendisi Okan Gül ve Uğur Dinçer'e, Makine Mühendisliği Bölümü'ndeki tüm Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma, emeği geçen fakültemiz ve bölümümüz akademik ve idari personeline teşekkürlerimi sunarım.

Değerli fikirleri, katkıları ve en zor durumlarda her zaman yanımda olan değerli dostum Dr. Fatih Erdem Baştan'a, Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Araştırma ve Uygulama Laboratuvarı ekibine ve laboratuvarın kurucusu Prof. Dr. Fatih Üstel'e teşekkürlerimi sunarım.

Her türlü aksaklık karşısında yılmadan yola devam etmemi sağlayan, gösterdiği destek ve yüksek motivasyon sayesinde tüm zorlukları aştığım yol arkadaşım Okan Yetik'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her döneminde yanımda olan, en zor zamanlarımda destek olan ve verdikleri destekle bu günlere gelmemi sağlayan canım annem Saniye Yıldırım ve canım babam Yusuf Yıldırım ve bütün aileme, arkadaşlarıma gösterdikleri sabır, anlayış ve fedakarlık için teşekkürlerimi sunarım.

Doktora tezimi bitirmemin en büyük destekçisi, tezin zorlu sürecince hep yanımda olan, motive eden, bilgisi ve deneyimleri ile tezime ışık tutan, hayat arkadaşım, değerli eşim Dr. Öğretim Üyesi Egemen Avcu'ya ve tatlı gülüşünü benden hiçbir zaman esirgemeyen biricik oğlum Kaan Avcu'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs-2019

Yasemin YILDIRAN AVCU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
TABLolar DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
ÖZET.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
GİRİŞ	1
1. TİTANYUM ALAŞIMLARI	3
1.1. Titanyumun Tarihçesi ve Dünyadaki Önemi	3
1.2. Titanyum ve Alaşımının Genel Özellikleri.....	3
1.3. Titanyum ve Alaşımının Kimyasal İçeriği	5
1.4. Titanyum ve Alaşımının İÇyapı Özellikleri	6
1.5. Titanyum Alaşımının Sınıflandırılması	7
1.5.1. Ticari saf titanyum (CP Ti).....	7
1.5.2. Alfa (α) fazlı titanyum alaşımaları	8
1.5.3. Alfa (α) - yakın fazlı titanyum alaşımaları	8
1.5.4. Alfa-beta ($\alpha+\beta$) fazlı titanyum alaşımaları	9
1.5.5. Beta (β) fazlı titanyum alaşımaları	9
1.6. Titanyum ve Alaşımının Kullanım Alanları	9
1.6.1. Biyomedikal uygulamalarda titanyum ve alaşımının kullanımı	10
1.6.2. Titanyum ve alaşımının havacılık uygulamaları	12
1.6.3. Titanyum ve alaşımının otomotiv endüstrisi uygulamaları	13
1.6.4. Titanyum ve alaşımının diğer kullanım alanları.....	14
1.7. Titanyum ve Alaşımının Aşınma Davranışı	15
2. BİLYALI DÖVME	19
2.1. Bilyalı Dövme Proses Kontrol Metodları	23
2.1.1. Almen şiddeti.....	23
2.1.2. Yüzey örtme oranı	24
2.2. Bilyalı Dövme Parametreleri	26
2.2.1. Bilya özellikleri	26
2.2.2. İşlem parametreleri	27
2.2.3. Hedef malzeme özellikleri.....	29
2.3. Çeşitli Metalik Malzemelerde Bilyalı Dövme Sonrası Yüzey ve Yüzey Altı Özelliklerin İncelenmesi	29
2.3.1. Bilyalı dövme sonrası yüzey pürüzlülüğü incelemeleri.....	29
2.3.2. Bilyalı dövme sonrası mikroyapı incelemeleri	31
2.3.3. Bilyalı dövme sonrası sertlik incelemeleri	31
2.3.4. Bilyalı dövme sonrası kalıntı gerilme incelemeleri	31
2.3.5. Bilyalı dövme sonrası yorulma davranışı incelenmesi	32
2.3.6. Bilyalı dövme sonrası korozyon dayanımı incelenmesi	33

2.3.7.	Bilyalı dövme sonrası yüzey ıslatma açısının belirlenmesi.....	33
2.3.8.	Bilyalı dövme sonrası tribolojik davranışın incelenmesi.....	33
3.	TİTANYUM ALAŞIMLARININ BİLYALI DÖVME SONRASI YÜZEY ve YÜZEY ALTI ÖZELLİKLERİNİN LİTERATÜRDE İNCELENMESİ	34
3.1.	Titanyum Alaşımlarının Bilyalı Dövme Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü İncelemeleri.....	34
3.2.	Titanyum Alaşımlarının Bilyalı Dövme Sonrası Mikroyapı İncelemeleri.....	38
3.3.	Titanyum Alaşımlarının Bilyalı Dövme Sonrası Sertlik İncelemeleri.....	42
3.4.	Titanyum Alaşımlarının Bilyalı Dövme Sonrası Kalıntı Gerilme İncelemeleri.....	43
3.5.	Titanyum Alaşımlarının Bilyalı Dövme Sonrası Yorulma Davranışının İncelenmesi.....	45
3.6.	Titanyum Alaşımlarının Bilyalı Dövme Sonrası Korozyon Dayanımının İncelenmesi	46
3.7.	Titanyum Alaşımlarının Bilyalı Dövme Sonrası Tribolojik Davranışının İncelenmesi.....	46
4.	MALZEME VE YÖNTEM.....	50
4.1.	Ön Çalışmalar İçin Kullanılan Malzemeler ve Yöntemler	50
4.1.1.	Malzeme	50
4.1.2.	Bilyalar	50
4.1.3.	Yöntemler	51
4.2.	İkinci Aşama Çalışmalar İçin Kullanılan Malzemeler ve Yöntemler.....	55
4.2.1.	Malzeme	55
4.2.2.	Bilyalar	56
4.2.3.	Yöntemler	57
4.2.3.1.	Metalografik hazırlık	58
4.2.3.2.	Bilyalı dövme	59
4.2.3.3.	Almen şiddetinin belirlenmesi.....	60
4.2.3.4.	Bilyaların hızlarının belirlenmesi	61
4.2.3.5.	Erozif aşınma deneyleri	62
4.2.3.6.	Adhezif aşınma deneyleri	63
4.2.3.7.	Bilyalı dövme sonrası yüzeylerin morfolojik incelenmesi	64
4.2.3.8.	Sertlik incelemeleri.....	64
4.2.3.9.	Pürüzlülük ölçümü.....	65
5.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	66
5.1.	Tez Çalışması Kapsamında Gerçekleştirilen Ön Çalışmalar	66
5.1.1.	Ti6Al4V alaşımının farklı parametreler altında dövülmesi sonrası yüzey pürüzlülüğünün ve yüzey sertliğinin incelenmesi.....	66
5.1.1.1.	Yüzey pürüzlülüğü incelemeleri.....	67
5.1.1.2.	Yüzey sertliğinin incelenmesi	69
5.1.1.3.	Genel sonuçlar ve çözümler	70
5.1.2.	Ti6Al4V alaşımının paslanmaz çelik bilyalar kullanılarak dövülmesi sonrası yüzey pürüzlülüğünün ve yüzey morfolojisinin incelenmesi	71
5.1.2.1.	Pürüzlülük incelemeleri.....	71

5.1.2.2.	SEM incelemeleri	77
5.1.2.3.	Genel sonuçlar ve çözümler	78
5.1.3.	Ti6Al4V alaşımının farklı sürelerde dövülmesi sonrası adhezif aşınma davranışının incelenmesi.....	79
5.1.3.1.	Bilya püskürtme süresinin yüzey topografisine etkisi	79
5.1.3.2.	Adhezif aşınma testleri sonrası ağırlık ve hacim kaybı ...	82
5.1.3.3.	Sürtünme katsayısı değerleri	83
5.1.3.4.	Aşınma testleri sonrası yüzey topografisi.....	84
5.1.3.5.	Genel sonuçlar ve çözümler	87
5.2.	Doktora Tezi Kapsamında Gerçekleştirilen İkinci Aşama Çalışmalar ve Sonuçları	88
5.2.1.	Bilyalı dövme işlemleri.....	88
5.2.1.1.	Bilya püskürtme basıncına göre değişen bilya hızları	88
5.2.1.2.	Bilyalı dövme parametrelerine göre değişen Almen şiddeti.....	89
5.2.1.3.	Bilyalı dövme sonrası ağırlık kaybının incelenmesi.....	90
5.2.1.4.	Bilyalı dövme sonrası yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi	91
5.2.1.5.	Bilyalı dövme sonrası yüzey mikroyapı özelliklerinin incelenmesi	92
5.2.1.6.	Bilyalı dövme sonrası yüzey altı sertlik incelemeleri.....	93
5.2.1.7.	Bilyalı dövme sonrası yüzey altı mikroyapı özelliklerinin incelenmesi	96
5.2.2.	Erozif aşınma testleri	101
5.2.2.1.	Erozif aşınma testleri sonrası ağırlık kaybı	101
5.2.2.2.	Erozif aşınma testleri sonrası yüzey pürüzlülüğü.....	103
5.2.2.3.	Erozif aşınma testleri sonrası yüzey morfolojisinin incelenmesi	105
5.2.2.4.	Image J programı ile saplanan partiküllerin belirlenmesi.....	110
5.2.3.	Adhezif aşınma testleri	114
5.2.3.1.	Adhezif aşınma testleri sonrası ağırlık kaybı	114
5.2.3.2.	Adhezif aşınma testleri sonrası sürtünme katsayısı belirlenmesi.....	117
5.2.3.3.	Kısa mesafe sürtünme katsayısı değerlerine bağlı cıvata sıkma momenti hesabı.....	128
5.2.3.4.	Adhezif aşınma sonrası yüzey morfolojisinin incelenmesi	134
5.2.3.5.	Adhezif aşınma sonrası yüzey altı morfolojisinin incelenmesi	140
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	143
6.1.	Bilya Çarpma Hızları	143
6.2.	Almen Şiddeti	143
6.3.	Bilyalı Dövme Sonrası Kütle Kaybı	143
6.4.	Yüzey Pürüzlülüğü ve Topografyası.....	144
6.5.	Bilyalı Dövme Sonrası Yüzey Mikroyapısı ve Morfolojisi.....	144
6.6.	Bilyalı Dövme Sonrası Yüzey Altı Mikroyapısı.....	144
6.7.	Bilyalı Dövme Sonrası Yüzey Altı Sertliği	145
6.8.	Erozif Aşınma Testleri Sonrası Kütle Kaybı	145

6.9. Eroziyon Aşınma Testleri Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü.....	145
6.10. Eroziyon Aşınma Testleri Sonrası Yüzey Morfolojisi	146
6.11. Adheziyon Aşınma Testleri Sonrası Kütle Kaybı	146
6.12. Adheziyon Aşınma Testleri Sonrası Sürtünme Katsayısı.....	147
6.12.1. Sürtünme katsayılarına bağlı cıvata sıkma momenti hesabı	147
6.13. Adheziyon Aşınma Sonrası Yüzey Morfolojisi.....	147
6.14. Adheziyon Aşınma Sonrası Yüzey Altı Morfolojisi	147
KAYNAKLAR.....	150
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER.....	168
ÖZGEÇMİŞ.....	173



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Saf titanyumun sıcaklığa göre değişen kristal yapıları a) α fazı birim hücre, b) β fazı birim hücre	6
Şekil 1.2.	Titanyum ve alaşımlarının genel özellikleri ve bu özelliklerine bağlı olarak kullanım alanları	10
Şekil 1.3.	Kalça ve diz implantı	11
Şekil 1.4.	Uygulanan yük ve kayma hızına bağlı etkin aşınma mekanizması	16
Şekil 1.5.	Oksidasyon aşınması hacmi ve kayma hızı ilişkisi.....	16
Şekil 1.6.	Delaminasyon aşınması hacmi ve kayma hızı ilişkisi	17
Şekil 1.7.	Kuru sürtünmede aşınan hacim ve kayma hızı ilişkisi	18
Şekil 2.1.	Bilyalı dövmenin sonrası görülen değişimler	20
Şekil 2.2.	a) Bilyalı dövmenin şematik gösterimi, b) bilyalı dövme sonrası plastik deformasyon	20
Şekil 2.3.	Kalıntı gerilme oluşumunun şematik gösterimi a) plastik şekil değişimi, b) Herzt basıncı sonrası.....	21
Şekil 2.4.	Bilyalı dövme sonrası kalıntı gerilme oluşumunun şematik gösterimi	22
Şekil 2.5.	Bilyalı dövmenin malzemenin yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkileri	22
Şekil 2.6.	Almen şiddetinin ölçüm sistemi	23
Şekil 2.7.	Şematik doyum noktası eğrisi.....	24
Şekil 2.8.	ImageJ programı yardımı ile yüzey örtme oranının belirlenmesi a) orijinal görüntü, b) 8 bit tonlamalı görüntü, c) görüntüdeki sınırların netleştirilmesi ve jeodezik yapılandırılması, d) görüntüdeki sınırların netleştirilmesi ve jeodezik yapılandırılması, e) son görüntü, f) orijinal görüntü ile kıyaslanması.....	25
Şekil 2.9.	Bilyalı dövme sırasında bilya - malzeme yüzeyi arasındaki enerji transferi	28
Şekil 2.10.	Aynı Almen şiddetinde farklı boyutta bilya kullanımı-hız ilişkisi	30
Şekil 3.1.	a) İşlem görmemiş, b) 0,25 MPa püskürtme basıncı ile 15 dakika, c) 0,25 MPa püskürtme basıncı ile 30 dakika dövülmüş numunelerin 3 boyutlu yüzey görüntüsü, d) Basınca ve zaman bağlı yüzey pürüzlülüğü değerleri	35
Şekil 3.2.	Ortamala çizgisel yüzey pürüzlülüğüne (R_a) bilyalı dövme parametrelerinin etkisi a) püskürtme basıncı etkisi, b) dövme süresi etkisi	36
Şekil 3.3.	3 boyutlu yüzey incelemeleri a) ve b) 0,25 MPa, 15 dk, c) ve d) 0,25 MPa, 30 dk, e) ve f) 0,35 MPa, 30 dk.....	37
Şekil 3.4.	0,35 MPa püskürtme basıncında ve 30 dakika dövülen Ti6Al4V alaşımının derinliğe bağlı tane yapısının incelenmesi	39

Şekil 3.5.	Almen şiddetine bağlı yüzey morfolojisi a) işlem görmemiş yüzey, b) 0,08 A, c) 0,12 A, d) 0,16 A, e) 0.20 A ve f) 0,24 A	40
Şekil 3.6.	Bilyalı dövme sonrası tane küçülmesi	40
Şekil 3.7.	A28-30 Almen şiddeti ile dövülen Ti6Al4V alaşımının kesit SEM incelemesi	41
Şekil 3.8.	Bilyalı dövme öncesi ve sonrası XRD sonuçları	42
Şekil 3.9.	Mg/Ti bağlantılarının a) Almen şiddetine bağlı çekme dayanımları, b) Almen şiddeti-sertlik değişimi	43
Şekil 3.10.	a) Yüzey sertliği değerleri, b) bilyalı dövme sonrası derinliğe bağlı kalıntı gerilme	44
Şekil 3.11.	Bilyalı dövmenin a) yüzey pürüzlülüğüne, b) sertliğe, c) aşınma davranışına etkisi	47
Şekil 4.1.	Ti6Al4V numunelerin şematik gösterimi	50
Şekil 4.2.	Paslanmaz çelik bilyalar a) büyük çaplı bilya (S60), b) küçük çaplı bilya (S10).....	51
Şekil 4.3.	Bilyalı dövme test düzeneği.....	52
Şekil 4.4.	Pürüzlülük ölçüm yöntemi.....	53
Şekil 4.5.	Adhezif aşınma cihazı şematik gösterimi	54
Şekil 4.6.	Aşınma sonrası optik profilometre ile hacim kaybı hesabı.....	55
Şekil 4.7.	Ti6Al4V alaşımı numunelerin kesit mikroyapısı.....	56
Şekil 4.8.	a) ve b) S60 bilya, c) ve d) S10 bilya SEM görüntüleri.....	57
Şekil 4.9.	İkinci aşama deneylerin akış şeması.....	58
Şekil 4.10.	Otomatik kontrollü bilyalı dövme sistemi 3 boyutlu görüntüsü.....	59
Şekil 4.11.	Bilyalı dövme işlemi şematik gösterimi	60
Şekil 4.12.	Almen gage	61
Şekil 4.13.	Partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler	62
Şekil 4.14.	Erozif aşınma testi şematik gösterim	63
Şekil 4.15.	Adhezif aşınma testi şematik gösterimi	63
Şekil 4.16.	Image J programının uygulama akışı.....	65
Şekil 5.1.	Bilya çarpma açısına bağlı pürüzlülük değişimi.....	67
Şekil 5.2.	Bilya püskürtme basıncına bağlı pürüzlülük değişimi.....	68
Şekil 5.3.	Bilyalı dövme sonrası yüzey morfolojisi	69
Şekil 5.4.	Bilya çarpma açısına bağlı sertlik değişimi	70
Şekil 5.5.	Bilya püskürtme basıncına bağlı sertlik değişimi.....	70
Şekil 5.6.	Püskürtme basıncının çizgisel yüzey pürüzlülüğüne (R_a) etkisi.....	71
Şekil 5.7.	Püskürtme basıncının alansal yüzey pürüzlülüğüne (S_a) etkisi	72
Şekil 5.8.	Püskürtme basıncının çizgisel yüzey pürüzlülüğüne (R_a) etkisi.....	73
Şekil 5.9.	Püskürtme basıncının alansal yüzey pürüzlülüğüne (S_a) etkisi	73
Şekil 5.10.	Bilya boyutunun çizgisel yüzey pürüzlülüğüne (R_a) etkisi.....	74
Şekil 5.12.	Bilya boyutunun çizgisel yüzey pürüzlülüğüne (R_a) etkisi.....	76
Şekil 5.13.	Bilya boyutunun alansal yüzey pürüzlülüğüne (S_a) etkisi.....	76
Şekil 5.14.	Farklı parametreler altında gerçekleşen bilyalı dövme işlemleri sonrası SEM incelemeleri a) 2 bar_S10, b) 5bar_S10, c) 2 bar_S60, d) 5 bar_S60	77
Şekil 5.15.	Bilyalı dövme sonrası SEM görüntüsü ve EDS analizi	78
Şekil 5.16.	Bilyalı dövme sonrası 3 boyutlu yüzey topografisi a) İşlem görmemiş, b) 7 bar, 5 dakika ve c) 7 bar, 15 dakika.....	80
Şekil 5.17.	Bilyalı dövme sonrası ortalamalama alansal pürüzlülük değerleri.....	81

Şekil 5.18.	Bilyalı dövme sonrası ortamalama çizgisel pürüzlülük değerleri	81
Şekil 5.19.	Bilyalı dövme ağırlık kaybı ve hacim kaybı ilişkisi	82
Şekil 5.20.	Bilyalı dövme spesifik aşınma oranı ilişkisi	83
Şekil 5.21.	Sürtünme katsayısı grafikleri	84
Şekil 5.22.	Aşınma sonrası 3 boyutlu yüzey topografisi a) İşlem görmemiş, b) 7 bar, 5 dakika ve c) 7 bar, 15 dakika.....	85
Şekil 5.23.	Aşınma sonrası ortalama alansal pürüzlülük değerleri.....	86
Şekil 5.24.	Aşınma izinden alınan ortalama çizgisel pürüzlülük.....	86
Şekil 5.25.	Aşınma sonrası ortalama çizgisel pürüzlülük değerleri.....	87
Şekil 5.26.	Bilyaların çarpma hızları	89
Şekil 5.27.	Bilyalı dövme parametrelerine göre değişen Almen şiddeti.....	90
Şekil 5.28.	Bilyalı dövme sonrası ağırlık kaybı	90
Şekil 5.29.	Bilyalı dövme sonrası yüzey pürüzlülüğü	91
Şekil 5.30.	Bilyalı dövme sonrası yüzeylerin SEM incelemesi a) işlem görmemiş Ti6Al4V alaşımı, b) S10_5 dk, c) S60_5 dk, d) S60_15 dk	92
Şekil 5.31.	Bilyalı dövme sonrası yüzeylerin SEM incelemesi a) S10_5dk, b) S60_5 dk.....	93
Şekil 5.32.	EDS incelemesi a) bilyalı dövme yüzeyi, b) 1 numaralı nokta, c) 2 numaralı nokta	94
Şekil 5.33.	Bilyalı dövme sonrası kesit sertlik değişimi	96
Şekil 5.34.	İşlem görmemiş Ti6Al4V alaşımının kesit SEM incelemesi.....	97
Şekil 5.35.	Bilyalı dövme sonrası (S10_5 dk) kesit SEM incelemesi.....	98
Şekil 5.36.	Bilyalı dövme sonrası (S60_5 dk) kesit SEM incelemesi.....	99
Şekil 5.37.	Bilyalı dövme sonrası (S60_15 dk) kesit SEM incelemesi.....	101
Şekil 5.38.	Erozif aşınma sonrası ağırlık kaybı değişimi.....	102
Şekil 5.39.	Erozif aşınma sonrası ağırlık kaybı değişimi.....	103
Şekil 5.40.	Erozif aşınma testleri sonrası pürüzlülük değişimi.....	104
Şekil 5.41.	Erozif aşınma sonrası yüzeylerin morfolojik incelemesi a) ve b) S60_5dk, c) ve d) S60_15dk (Erozif aşınma parametreleri; 1,5 bar partikül püskürtme basıncı, 30° partikül çarpma açısı)	106
Şekil 5.42.	Erozif aşınma sonrası yüzeylerin EDS analizi ile haritalanması (bilyalı dövme parametreleri; S60, 5dk, erozif aşınma parametreleri; 1,5 bar partikül püskürtme basıncı, 30° partikül çarpma açısı)	107
Şekil 5.43.	EDS spektrumu (bilyalı dövme parametreleri; S60, 5dk, erozif aşınma parametreleri; 1,5 bar partikül püskürtme basıncı, 30° partikül çarpma açısı).....	108
Şekil 5.44.	Erozif aşınma sonrası yüzeylerin morfolojik incelemesi a) ve b) S60_5dk, c) ve d) S60_15dk (Erozif aşınma parametreleri; 1,5 bar partikül püskürtme basıncı, 90° partikül çarpma açısı).....	109
Şekil 5.45.	Erozif aşınma testleri sonrası yüzeye saplanan partiküllerin yüzdesel oranı	111
Şekil 5.46.	Erozif aşınma sırasında gerçekleşen kinetik enerji aktarımı	112
Şekil 5.47.	Erozif aşınma sonrası yüzeye saplanan partiküllerin a) S60_5 dk bilyalı dövme sonrası SEM görüntüsü, b) S60_5 dk Image J programı ile incelenmesi, c) S60_15 dk bilyalı dövme sonrası	

	SEM görüntüsü, d) S60_15 dk Image J programı ile incelenmesi	113
Şekil 5.48.	Erozif aşınma sonrası a) S60_5 dk bilyalı dövme sonrası SEM görüntüsü, b) S60_5 dk Image J programı ile incelenmesi, c) S60_15 dk bilyalı dövme sonrası SEM görüntüsü, d) S60_15 dk Image J programı ile incelenmesi	114
Şekil 5.49.	Adhezif aşınma testi sonrası ağırlık kaybı	116
Şekil 5.50.	Adhezif aşınma testi sonrası ağırlık kaybı	116
Şekil 5.51.	Adhezif aşınma testleri sonrası ağırlık kaybı	117
Şekil 5.52.	Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (çevresel hız 0,05 m/s)	118
Şekil 5.53.	Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (çevresel hız 0,1 m/s)	119
Şekil 5.54.	Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (0 – 0,1 m)	120
Şekil 5.55.	Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (0 – 0,3 m)	120
Şekil 5.56.	Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (0 – 1 m)	121
Şekil 5.57.	Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (0 – 3 m)	122
Şekil 5.58.	Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (0 – 5 m)	122
Şekil 5.59.	Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (çevresel hız 0,05 m/s)	123
Şekil 5.60.	Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (0 – 0,1 m)	124
Şekil 5.61.	Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (0 – 0,3 m)	124
Şekil 5.62.	Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (0 – 1 m)	125
Şekil 5.63.	Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (0 – 3 m)	125
Şekil 5.64.	Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (0 – 5 m)	126
Şekil 5.65.	Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (çevresel hız 0,1 m/s)	126
Şekil 5.66.	Biyomedikal civatada gerçekleşen hasar a) kırılan ön kol kemiği, b) implant malzemede gerçekleşen çatlak, c) çatlağın ilerlemiş görüntüsü, d) implant değişimi	129
Şekil 5.68.	Somun altı sürtünme momentinin mesafeye bağlı değişimi (çevresel hız 0,1 m/s)	131
Şekil 5.69.	Toplam momentin mesafeye bağlı değişimi (çevresel hız 0,05 m/s)	132
Şekil 5.70.	Toplam momentin mesafeye bağlı değişimi (çevresel hız 0,1 m/s)	133
Şekil 5.71.	Adhezif aşınma testi sonrası yüzey morfolojisi (işlem görmemiş Ti6Al4V) a) ve b) çevresel hız: 0,05 ms ⁻¹ , c) ve d) çevresel hız: 0,1 ms ⁻¹	135

Şekil 5.72.	Adhezif aşınma testi sonrası yüzey morfolojisi (S10_5dk) a) ve b) çevresel hız: 0,05 ms ⁻¹ , c) ve d) çevresel hız: 0,1 ms ⁻¹	135
Şekil 5.73.	Adhezif aşınma testi sonrası yüzey morfolojisi (S60_5 dk) a) ve b) çevresel hız: 0,05 ms ⁻¹ , c) ve d) çevresel hız: 0,1 ms ⁻¹	136
Şekil 5.74.	Adhezif aşınma testi sonrası yüzey morfolojisi (S60_15 dk) a), b) çevresel hız: 0,05 ms ⁻¹ , c), d) çevresel hız: 0,1 ms ⁻¹	136
Şekil 5.75.	Adhezif aşınma sonrası yüzeylerin EDS analizi ile haritalanması (bilyalı dövme parametreleri; S60, 15dk, adhezif aşınma çevresel hız: 0,05 ms ⁻¹)	137
Şekil 5.76.	Adhezif aşınma testleri sonrası kullanılan alümina bilyanın EDS analizi ile haritalanması	139
Şekil 5.77.	Adhezif aşınma sonrası işlem görmemiş Ti6Al4V alaşımının kesit SEM incelemesi.....	140
Şekil 5.78.	Adhezif aşınma sonrası (S10_5 dk) kesit SEM incelemesi	141
Şekil 5.79.	Adhezif aşınma sonrası (S60_5 dk) kesit SEM incelemesi	142
Şekil 5.80.	Adhezif aşınma sonrası (S60_15 dk) kesit SEM incelemesi	142

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1.	Titanyum ve alüminyumun bazı fiziksel özellikleri	4
Tablo 1.2.	Ti6Al4V alaşımının fiziksel özellikleri ve kimyasal içeriği	5
Tablo 1.3.	Diş, kemik, titanyum ve metal alaşımların elastik modülleri	12
Tablo 2.1.	Almen şeritlerinin ölçüleri	24
Tablo 2.2.	Çeşitli bilyalar ve fiziksel özellikleri	26
Tablo 4.1.	Ti6Al4V alaşımının XRF sonuçları	50
Tablo 4.2.	Çelik bilyaların özellikleri	51
Tablo 4.3.	Paslanmaz çelik bilyaların özellikleri	51
Tablo 4.4.	Ön deneylerde kullanılan bilyalı dövme parametreleri (çelik bilya)	52
Tablo 4.5.	Ön deneylerde kullanılan bilyalı dövme parametreleri (paslanmaz çelik bilya)	52
Tablo 4.6.	Pürüzlülük ölçüm parametreleri.....	53
Tablo 4.7.	Aşınma testi parametreleri	54
Tablo 4.8.	Bilya özellikleri.....	56
Tablo 4.9.	Bilyalı dövme işlemi operasyon parametreleri	60
Tablo 4.10.	Erozif aşınma test parametreleri	63
Tablo 4.11.	Aşınma testi parametreleri	64
Tablo 5.1.	Hesaplamalarda kullanılan implant civata ve civataya ait özellikler	130

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

σ_{\max}	: Maksimum basma gerilmesi (N/mm ²)
σ_{sur}	: Yüzey kalıntı gerilmesi (N/mm ²)
σ_{ten}	: Maksimum çekme gerilmesi (N/mm ²)
t_1	: Maksimum basma gerilmesinin derinliği (μm)
t_2	: Kalıntı gerilmenin çekme gerilmesine geçtiği derinlik (μm)
E_k	: Kinetik enerji (J)
m	: Bilya kütlesi (mg)
V	: Bilya hızı (m/s)
V_i	: Bilyanın yüzeye çarpmadan önceki hızı (m/s)
V_r	: Bilyanın yüzeye çarptıktan sonraki hızı (m/s)
α	: Bilya çarpma açısı (°)
α'	: Bilya yüzeye çarptıktan sonraki açısı (°)
e_r	: Çarpışma katsayısı
ΔW	: Çarpışma öncesi ve sonrası kinetik enerji değişimi (J)
W_p	: Plastik deformasyona neden olan enerji (J)
W_d	: Kayıp enerji (J)
r	: Bilya izi yarı çapı (mm)
D	: Bilya izi derinliği (mm)
K	: Spesifik aşınma oranı (mm ³ /(Nm))
U	: Aşınan hacim (mm ³)
L	: Aşınma mesafesi (m)
N	: Uygulanan kuvvet (N)
t	: Bilyaların üst diskten alt diske ulaşmaları esnasında geçen süre (s)
θ	: İlk iz ile ikinci iz arasındaki açı (°)
n	: Devir hızı (d/dk)
R_a	: Ortalama çizgisel pürüzlülük (μm)
S_a	: Ortalama alansal pürüzlülük (μm)
S_v	: Taranan alandaki en derin vadi derinliği (μm)
S_z	: Taranan alandaki en yüksek tepe en düşük vadi mesafesi (μm)
M_{Anahtar}	: Cıvata sıkma momenti (N.mm)
$M_{\text{dişler}}$: Cıvata dişleri ile kemik arasında oluşan moment (N.mm)
$M_{\text{somun altı}}$: Somun altı momenti (N.mm)
F_A	: Cıvata sıkma kuvveti (N)
$F_{\text{ö}}$: Ön gerilme kuvveti (N)
F_H	: Dişe çevresel etki eden kuvvet (N)
F_S	: Sürtünme kuvveti (N)
r_A	: Cıvata sıkma kuvvetinin cıvata merkezine uzaklığı (mm)
r_2	: Ortalama diş yarıçapı (mm)
$\tan \alpha$: Cıvatanın eğim açısı
$\tan \gamma$: Sürtünme açısı
R_m	: Cıvata başının temas ettiği ortalama çap (mm)
μ	: Sürtünme katsayısı

Kısaltmalar

AKM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
APD	: Aşırı Plastik Deformasyon
BSE	: Backscattered Electrons (Geri Yansıyan Elektronlar)
CP	: Commercially Pure (Ticari Saflıkta)
EBS	: Electron Backscatter Diffraction (Eletron Geri Yansıma Difraksiyonu)
EDS	: Energy Dispersive X-Ray Spectrometer (Enerji Dağılım X-Işını Spektrometresi)
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Teşkilatı)
SAE	: Society of Automotive Engineers (Otomotiv Mühendisleri Birliği)
SEM	: Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SPH	: Sıkı Paket Hegzagonal
MR	: Manyetik Rezonans
TEM	: Transmission Electron Microscope (Taramalı Geçirimli Elektron Mikroskobu)
VS	: Vickers Sertliği
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
XRD	: X-Ray Diffraction (X Işını Difraksiyonu)
XRF	: X-Ray Fluorescence (X Işını Floresans Analizi)

Ti6Al4V ALAŞIMIN BİLYALI DÖVME SONRASI AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, Ti6Al4V alaşımı özel olarak tasarlanan bilyalı dövme sisteminde farklı işlem parametreleri altında dövülmüştür. Tez çalışmasının ilk aşamasında bilyalı dövme sonrası Ti6Al4V alaşımının yüzey topografisi, morfolojisi, mikroyapısı ve pürüzlülüğü, kesit sertliği gibi yüzey ve yüzey altı özelliklerinin bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. İkinci aşamada, bilyalı dövme sonrası titanyum alaşımının erozif ve adhezif aşınma davranışının incelenmesi ve bilyalı dövmenin erozif ve adhezif aşınma davranışı üzerindeki etkilerinin tartışılması amaçlanmıştır. Farklı parametrelerde bilyalı dövülmüş numunelerin yüzeyleri temaslı uçlu pürüzlülük cihazı, taramalı elektron mikroskobu ve görüntü işleme yöntemleri ile detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bilyalı dövmenin Ti6Al4V alaşımının mekanik özelliklerine ve mikroyapısına etkilerinin incelenmesi için bilyalı dövülmüş numunelerin mikroyapısal ve mikrosertlik karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Bilyalı dövülmüş yüzeylerin erozif aşınma davranışı katı partikül erozyonu testleri ve adhezif aşınma davranışları ball-on-disk aşınma testleri ile incelenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda bilya boyutu ve püskürtme süresinin yüzey ve yüzey altı özelliklerinde önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir. Farklı bilyalı dövme parametreleri altında yüzey topografisindeki değişimler ve bu değişimlerin kök nedenleri başarılı bir şekilde ortaya konmuştur. Diğer yandan bilyalı dövmenin titanyum alaşımının kuru sürtünme aşınma dayanımını düşük bir miktar iyileştirdiği belirlenmiştir. Bu tez çalışması titanyum alaşımlarının bilyalı dövme ile yüzey ve yüzey altı özelliklerinde meydana gelen değişimleri ortaya çıkarmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bilyalı dövme, bilya boyutu, yüzey topografisi, yüzey pürüzlülüğü, yüzey morfolojisi, titanyum alaşımları.

INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL BEHAVIOR OF Ti6Al4V ALLOY AFTER SHOT PEENED

ABSTRACT

In this thesis, Ti6Al4V alloy was shot peened under various peening parameters by using a custom-designed shot peening system. Firstly, the variation of the surface and subs-surface properties such as surface topography, morphology, microstructure and roughness of peened Ti6Al4V alloy depending on the peening parameters such as shot size and peening time were investigated. Secondly, it is aimed to investigate and discuss the effects of shot peening on the erosion and dry sliding wear behaviour of titanium alloy. The surfaces of the specimens shot peened under different parameters were investigated via stylus profilometer and scanning electron microscope in detail. Microstructural and microhardness characterizations of the peened specimens were carried out to investigate the effects of shot peening on the mechanical properties and the microstructure of Ti6Al4V alloy. The erosion and dry sliding wear behaviour of the shot peened specimens were investigated via solid particle erosion and ball-on-disc wear tests, respectively. Based on the experimental studies, it is determined that shot size and peening pressure play an important role on the surface and sub-surface properties. Moreover, the underlying reasons of the variation of the surface topography depending on shot peening parameters were clarified. It is determined that shot peening slightly enhances the dry sliding behaviour of titanium alloy. This thesis reveals the variation of the surface and sub-surface properties of titanium alloys with shot peening.

Keywords: Shot peening, shot size, surface topography, surface roughness, surface morphology, titanium alloys.

GİRİŞ

Bilyalı dövme, malzemelerin yüzeylerine tekrarlı bir şekilde çok sayıda bilyanın yüksek hızlarda çarptırılması ile gerçekleştirilen mekanik bir yüzey işleme yöntemidir. Değişken yüklemelere maruz kalan mühendislik malzemelerinin yorulma dayanımlarının ve kullanım ömürlerinin arttırılması için bilyalı dövme yönteminin uygulanması büyük önem arz etmektedir. Bilyalı dövme işleminin uygulama kolaylığı ve proses maliyetinin düşük olması nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir.

Titanyum ve alaşımları, yüksek spesifik mukavemeti, korozyon dayanımı, toksit olmaması, yüksek biyouyumluluğu, yorulma dayanımının yüksek olması, şekillenebilirliği ve işlenebilir olması nedeni ile biyomedikal ve havacılık malzemesi olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak titanyum ve alaşımları yüksek sürtünme katsayısına ve düşük aşınma dayanımına sahiptir.

Aşınma mühendislik malzemelerin kullanım ömrünü sınırlayan ve ekonomik kayıplara yol açan önemli bir endüstriyel problemdir. Aşınma sonrası malzeme yüzeyinden malzeme uzaklaşmakta, yüzey ve yüzey altı özellikleri bozulmakta ve buna bağlı olarak malzemenin kullanım ömrü bitmeden hasar meydana gelmektedir. Bir malzemenin aşınma davranışını etkileyen birçok farklı faktör bulunmaktadır. Bu faktörler arasında aşınmanın meydana geldiği malzemenin yüzey ve yüzey altı özellikleri malzemenin aşınma davranışını belirleyen en önemli etkenlerdendir. Bilyalı dövme ile malzemenin yüzey pürüzlülüğü başta olmak üzere, yüzey ve yüzey altı mikroyapısı, sertliği vb. mekanik özellikleri büyük değişiklik göstermektedir. Bu durumda bilyalı dövme uygulanan bir malzemenin aşınma davranışının incelenmesi önemli bir araştırma konusudur. Bu çalışmanın öncelikli amaçları; i) titanyum alaşımlarının yüzey ve yüzey altı özelliklerine bilyalı dövme işleminin ve işlem parametrelerinin etkilerinin özgün yöntemler yardımıyla ortaya çıkartılması ve tartışılması, ii) bilyalı dövme işlemi nedeniyle değişen yüzey özelliklerine bağlı olarak titanyum alaşımlarının tribolojik davranışlarının incelenmesidir. Bu amaçlara ulaşmak için ilk aşamada bilyalı dövme işleminde etkin bilya boyutu, bilya çarpma hızı, dövme

süresi, bilyalı dövme şiddeti, doyma oranı gibi çok sayıda işlem parametresinin farklı kombinasyonları ile bilyalı dövme işlemleri gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada bilyalı dövme uygulanmış titanyum alaşımlarının yüzey morfolojisi, topografisi ve mikroyapısı gibi yüzey ve yüzey altı özelliklerinin değişimleri ileri karakterizasyon teknikleri ile incelenmiştir. Üçüncü aşamada bilyalı dövme yöntemi ile elde edilmiş farklı yüzey ve yüzey altı karakteristiğine sahip numunelerin erozif ve adhezif aşınma davranışları incelenmiştir. Tez çalışmasının özgün değerinin, yaygınlığının ve sürdürülebilirliğinin artırılması amacı ile endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan Ti6Al4V alaşımı üzerinde çalışılmıştır.

Tez çalışmasının kapsamını sırası ile; Ti6Al4V alaşımı yüzeylerinin farklı parametreler altında bilyalı dövme işlemleri ile hazırlanması, bilyalı dövme işlemleri sonrası malzemenin yüzey sertliği ve yüzeyden merkeze doğru sertlik değerlerindeki değişimlerin incelenmesi, yüzey ve yüzeye yakın bölgelerde tane yapısındaki değişimlerin incelenmesi, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey morfolojisi incelemeleri için gerekli karakterizasyon çalışmaları, bilyalı dövme uygulanan malzemelerin tribolojik davranışlarının karakterizasyonu için gerçekleştirilecek erozif ve adhezif aşınma testleri ve son olarak aşınma sonrası yüzey ve yüzey altı özelliklerin karakterizasyon çalışmalarını içermektedir.

1. TİTANYUM ALAŞIMLARI

1.1. Titanyumun Tarihçesi ve Dünyadaki Önemi

1791 yılında İngiliz araştırmacı William Gregor tarafından bulunmuş [1, 2]. William Gregor bulduğu maddeyi manyetik etki altında demirden ayrıştırarak HCl ile dağlamış, yeni bir elementin oksidini elde etmiş ve buna mekanit ismini vermiştir [3]. Alman kimyager Martin Heinrich Klaproth, bu maddeye “Titanyum” ismini vermiştir [1, 3-5]. 1938–1940 yılları arasında Dr. Kroll, “Kroll Yöntemi” adı verilen işlemle titanyum tetra klorürün ($TiCl_4$) koruyucu atmosfer ortamında magnezyum ile indirgeyerek yapısı sünger gibi gözenekli “titanyum süngeri” de denilen titanyumu elde etmiştir [2, 3].

Titanyumun uygulamaya yönelik ilk üretimi 1952 yılında DC-7 tipi uçakların kanatlarındaki motor bağlantı elamanları için gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamanın ardından titanyum alaşımları; kompresör diskleri, askeri ve ticari uçaklardaki jet motorlarının pervane kanatları ve uçak iskeletlerinde kullanılmıştır [3]. Titanyum alaşımlarının kullanımı 1980 yılı sonrası özellikle ticari ve askeri uçak endüstrilerinde yaygınlaşmıştır. Son 20 yılda genel olarak havacılık, uzay ve deniz endüstrileri uygulamalarında titanyum alaşımlarının kullanımı yaygın olmak ile birlikte, titanyum alaşımının işlenebilirliğinin gelişmesi ile biyomedikal aparatlardaki ve dental implantlardaki kullanımı da artmıştır [4, 6].

1.2. Titanyum ve Alaşımlarının Genel Özellikleri

Titanyum, alüminyum, demir ve magnezyum ile birlikte mühendislik uygulamalarında kullanılan en önemli metallere biridir. Ancak saf titanyum metalinin eldesinin oldukça karmaşık ve zahmetli olması titanyum metalinin kullanımında yüksek maliyetlere neden olmaktadır [3, 7].

Titanyumun yoğunluğunun (4,54 gr/cm³) düşük olması nedeni ile tercih sebebidir. Tablo 1.1’ de titanyumun diğer yaygın kullanılan alüminyum ile karşılaştırılan önemli özellikleri verilmiştir.

Tablo 1.1. Titanyum ve alüminyumun bazı fiziksel özellikleri

Özellikler	Alüminyum	Titanyum
Yoğunluk (gr/cm ³)	2,7	4,54
Elastisite modülü (GPa)	62	115
Ergime Noktası (°C)	660	1668
Oda sıcaklığındaki kristal yapısı	YMK	SPH

Titanyum yüksek spesifik mukavemet değerleri ile havacılık alanında tercih edilen bir metaldir. Ayrıca yüksek ergime noktası ve yüksek sıcaklık dayanımı sayesinde özellikle savunma endüstrisi uygulamalarında nikel ve kobalt içerikli alaşımlara alternatif oluşturmaktadır [3]. Titanyumun yüzeyinde korozyona karşı direnç sağlayan oksit tabakası oluşturma yeteneği bu metalin denizcilik ve kimya sanayilerinde de kullanımının önünü açmıştır [4]. Son olarak biyolojik uyumu, korozyon direnci ve yüksek mekanik özellikleri ile son yıllarda ortopedi ve diş hekimliği uygulamalarında da titanyum alaşımlarının sıklıkla kullanılmaktadır [4]. Titanyumun tercih edilme sebepleri aşağıda özetlenmiştir:

- Korozyona karşı yüksek direnci [8],
- Yüksek spesifik mukavemet özellikleri [9],
- Farklı yarı mamüller olarak temin edilebilir olması (kütük, yuvarlak, altıgen, lama, çubuk, plaka, sac, tel vb),
- Kolay kaynak edilebilirliği,
- İyi darbe dayanımı ve yüksek sıcaklık uygulamaları için uygunluğu,
- Biyolojik uyumluluğu,
- Maliyetinin diğer yüksek maliyetli alaşımlara yakın olması,
- İyi kriyojenik özellikleri (-150 °C sıcaklık altındaki ortamlardaki davranışları) [3].

Titanyum alaşımları iki üstün özellikleri ile tercih sebebi olmaktadır; i) üstün mekanik özellikleri ve ii) yüksek korozyon dayanımı. Bu özellikleri nedeni ile titanyum alaşımları özellikle; uzay ve havacılık, kimya, biyomedikal ve savunma endüstrilerinin önemli malzemesi konumuna gelmiştir. Bu artılarına rağmen düşük sürtünme ve aşınma dayanımları titanyum alaşımlarını hareketli temasın olduğu mühendislik uygulamalarında oldukça zorlamakta ve kullanımlarını kısıtlamaktadır. Bu nedenle

titanyum alaşımları genellikle aşınmanın kritik olmadığı uygulamalarda kullanılmakta veya bu alaşımların tribolojik davranışları farklı uygulamalar ile geliştirilmeye çalışılmaktadır. Aşınma gerçekleşmesi durumunda korozyon direncini sağlayan koruyucu oksit yapı bozulmakta ve aşınma ile birlikte şiddetli korozyon da meydana gelmektedir. Titanyum alaşımlarının tribolojik davranışlarının geliştirmesi için farklı yüzey modifikasyon tekniklerinin uygulanması (kaplama, yüzey sertleştirme, vb.) gerekliliği ortaya çıkmıştır. Titanyum alaşımlarının dşuk aşınma dayanımlarının geliştirilmesi için çeşitli yüzey işlemleri uygulanmakta ve başarılı sonuçlar alınabilmektedir [3, 10].

1.3. Titanyum ve Alaşımlarının Kimyasal İçeriği

Saf titanyumun ve titanyum alaşımlarının fiziksel ve mekanik özellikleri, oksijen, demir, nitrojen gibi farklı elementlerin az miktarda ilavesi ile büyük lde değişebilmektedir [1]. Alüminyum, oksijen, azot, karbon, kalay gibi elementler α - stabilizatör; hidrojen, gümüş, altın, krom, demir, vanadyum, magnezyum, molibden gibi elementler ise β - stabilizatör alaşım elementleri olarak adlandırılırlar [1, 11].

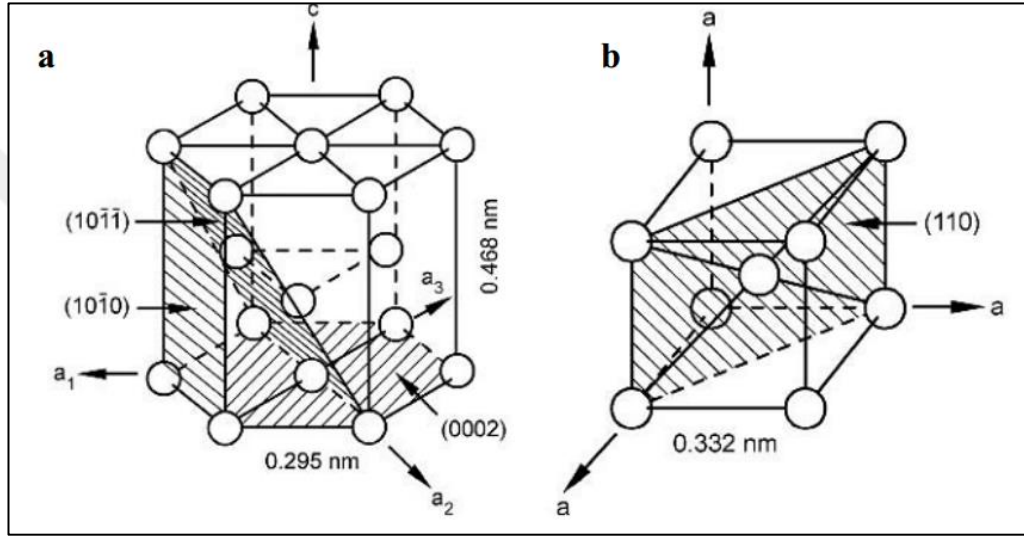
Titanyum alaşımlarının en sık kullanılanı, arzu edilen oran ve öngörülür retebilirliğinden dolayı $\alpha + \beta$ formunda bulunan, Ti6Al4V sembolü ile anılan % 6 alüminyum ve % 4 vanadyum içeren alaşımıdır [1]. Bu alaşımın endüstriyel uygulamalardaki oranı % 45' tir. Ti6Al4V alaşımların en önemli özellikleri; korozyona karşı yüksek direnci, sertliği ve dayanıklılığıdır. Bu özelliklerinden dolayı tıbbi uygulamalar başta olmak üzere, hava araçlarında ve basınc tankları yapımında çok fazla tercih edilmektedirler. Ti6Al4V alaşımlarının kimyasal içeriği ve fiziksel zellikleri Tablo 1.2'de verilmiştir.

Tablo 1.2. Ti6Al4V alaşımının fiziksel özellikleri ve kimyasal içeriği [3]

Fiziksel zellikler		Kimyasal içerik	
Yoğunluk (gr/cm ³)	4,42	Alüminyum, Al	6,00%
Erime Sıcaklığı (°C \pm 15°C)	1649	Vanadyum, V	4,00%
Özgül Isısı (J/Kg °C)	560	Demir, Fe	0,10%
Hacimsel Elektrik direnci (ohm.cm)	170	Oksijen, O	0,15%

1.4. Titanyum ve Alaşımlarının İyapı Özellikleri

Titanyum allotropik karakterde bir malzeme olup, oda sıcaklığındaki sıkı paket hekzagonal (SPH) kristal yapıdaki α fazı, saf titanyum için yaklaşık 883 °C’ de hacim merkezli kübik (HMK) yapıdaki β fazına dönüşmektedir [1, 7, 12]. Bu sıcaklık “ β dönüşüm sıcaklığı” adını almaktadır. Oksijen, azot ve karbon gibi α fazını kararlı kılan elementlerin etkisiyle bu sıcaklık yükselirken; metalik kalıntılar veya alaşım elementlerinin etkisiyle düşmekte ya da yükselebilmektedir [3, 12] (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Saf titanyumun sıcaklığa göre değişen kristal yapıları a) α fazı birim hücre, b) β fazı birim hücre [12]

Alaşım elementlerinin ilavesi bu dönüşüm sıcaklığını ikiye bölmektedir. Tüm alaşımın α fazında olduğu sıcaklığa “ α dönüşüm sıcaklığı”; üstündeki sıcaklıklarda tüm alaşımın β fazında olduğu sıcaklığa “ β dönüşüm sıcaklığı” denilmektedir. Bu iki dönüşüm sıcaklığı arasında malzemenin mikro yapısında hem α hem de β fazı bulunmaktadır [3].

Alüminyum, α fazını kararlı hale getiren ve dönüşüm sıcaklığını yükselten en önemli alaşım elementidir. Ara yer elementlerinden olan oksijen, azot ve karbon da α fazını kararlı hale getiren diğer elementlerdendir. Dönüşüm sıcaklığını düşürerek β fazını kararlı hale getiren iki grup element vardır. Bunlar β izomorf ve β ötektik elementleri olarak adlandırılırlar. İzomorf grup β fazı içinde tamamen çözünebilen molibden, tantal, vanadyum ve niyobyum elementlerinden oluşmaktadır. Diğer grup olan β ötektik elementleri ise titanyumla ötektoid alaşımlar yapan elementlerdir. Bunlar

mangan, demir, krom, silisyum, nikel, bakır ve kobalttır. Bu elementler α fazında düşük çözünürlüğe sahiptirler ve dönüşüm sıcaklığını düşürmektedirler [10].

Titanyum alaşımlarının özellikleri genel olarak, α ve β fazlarının yapıdaki hacimsel oranlarına ve dağılımlarına bağlılık göstermektedir. HMK β ile kıyaslandığında, HSP α anizotropik kristal yapıya sahiptir, plastik deformasyona daha yüksek dayanım gösterir, sünekliği daha düşüktür, difüzyon hızı daha fazladır ve daha yüksek sürünme dayanımı sergilemektedir [10].

1.5. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Titanyum alaşımları yapısında buldukları fazlara göre; α , $\alpha + \beta$ alaşımları ve β alaşımları olmak üzere başlıca üç gruba ayrılmaktadır. α alaşımının tüm yapısında α fazı bulunurken, β alaşımlarının yapısında büyük ölçüde β fazı bulunmaktadır. $\alpha + \beta$ alaşımları ise oda sıcaklığında yapılarında hem α hem de β fazı bulundurlar. Yapısında β fazından daha fazla α fazı içeren alaşımlara alfaya yakın alaşımlar denilmektedir [10, 13].

Titanyum ve alaşımları;

- Saf (alaşımlanmamış) Titanyum
- α alaşımları
- α -yakın alaşımları
- $\alpha+\beta$ alaşımları
- β alaşımları olarak da gruplandırılırlar [10, 13]

1.5.1. Ticari saf titanyum (CP Ti)

Ticari saflıktaki titanyum ağırlıkça % 98,65 - % 99,5 oranında titanyum içermektedir. CP Ti mikro yapısında oda sıcaklığında sıkı paket hegzagonal yapıdaki α fazında bulunmakta olup 883 °C' de hacim merkezli kübik yapıdaki β fazına dönüşür. Ayrıca bu dönüşüm sırasında her iki fazın da bir arada bulunduğu küçük bir sıcaklık aralığı da vardır [2].

CP Ti, genellikle yüksek mukavemet gerektirmeyen ancak korozyon direncinin ön planda olduğu uygulamalarda tercih edilir. Oda sıcaklığındaki alaşımsız titanyumun mikro yapısı % 100 oranında α fazındadır. Katkı elementlerinin, özellikle demirin,

miktarı arttıkça mikro yapıda tane sınırlarında küçük fakat artan oranlarda β fazına rastlanır [10].

1.5.2. Alfa (α) fazlı titanyum alaşımları

Alüminyum, kalay veya zirkonyum içeren α alaşımları daha çok yüksek sıcaklık ya da çok düşük sıcaklıklarda tercih edilmektedir. α fazı zengin olan alaşımlar, β alaşımlarına göre yüksek sıcaklıklarda sürünmeye karşı genellikle daha dayanıklıdır. Çok düşük miktarda ara yer atomu içeren α alaşımları, sünekliğini ve tokluğunu çok düşük sıcaklıklarda dahi sürdürmektedir ve mikroyapı özelliklerini geliştirmek amacı ile ısıtıl işlem yapılamazlar [2, 14].

α fazı alaşımları en çok kimya sanayi ve proses mühendisliğince kullanılır. Bu uygulamalarda gerekli olan çok yüksek korozyon dayanımı ve deformasyon kabiliyetine sahiptirler. CP-Titanyumun mukavemet gereksinimini karşılayamadığı yerlerde, en eski titanyum alaşımı olan ve uzun zaman önce kabul görmüş Ti5Al2.5Sn alaşımı tercih edilir. Düşük sıcaklıklı uygulamalar olan hidrojen depolama ve basınçlı araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [3, 10, 13, 14].

1.5.3. Alfa (α) - yakın fazlı titanyum alaşımları

Bu alaşımlara kütlece % 1 - 2 oranında β fazı stabilizatör elementler eklenerek işlenebilirliği ve mukavemetinin artması sağlanır [14]. "Süper α " ya da " α - yakın alaşımlar" olarak bilinen bu alaşımların mikro yapısındaki α fazı yüksek kararlılığa sahiptir ve sınırlı miktarda β fazını kararlı kılan elementler içermektedir [3, 10, 13, 14].

Ti8Al1Mo1V, yüksek sıcaklık için geliştirilmiş ilk titanyum alaşımıdır. Ancak yüksek alüminyum içeriğinin zayıf korozyon dayanımına sebep olması nedeniyle titanyum alaşımları en fazla % 6' ya kadar alüminyum içeriğine sahiptirler. Bugün en gelişmiş yüksek sıcaklık titanyum alaşımı Amerikan TIMETAL 834 olarak bilinir. Kullanım sıcaklığı üst limiti olan 600°C' de uzun süre kararlı davranmakta ve oksidasyona karşı koruma sağlamaktadır [13].

1.5.4. Alfa-beta ($\alpha+\beta$) fazlı titanyum alaşımları

En yaygın kullanılan $\alpha+\beta$ alaşımı Ti6Al4V (toplam titanyum üretiminin % 60' ını oluşturan [15-17]), 1950' lerde geliştirilmiştir ve bilinen ilk titanyum alaşımları arasında gösterilmektedir. Ti6Al4V' un üstünlüğü sadece dengeli özellikleri değil, kullanılmış ve kullanılmakta olan titanyum malzemeler arasında en yaygın olarak kullanılanı olmasıdır. Özellikle havacılık sanayinde önemli bir kriter olan en çok test edilmiş, denenmiş ve geliştirilmiş titanyum alaşımı olmasını sağlamıştır. Diğer yaygın kullanıma sahip $\alpha + \beta$ alaşımları; yüksek mukavemet amaçlı geliştirilmiş Ti6Al6V2Sn, yüksek mukavemet ve yüksek tokluğa sahip Ti6Al2Sn4Zr6Mo, gaz türbin motorlarında Ti6Al2Sn2Zr2Mo2Cr alaşımlarıdır [10, 14].

1.5.5. Beta (β) fazlı titanyum alaşımları

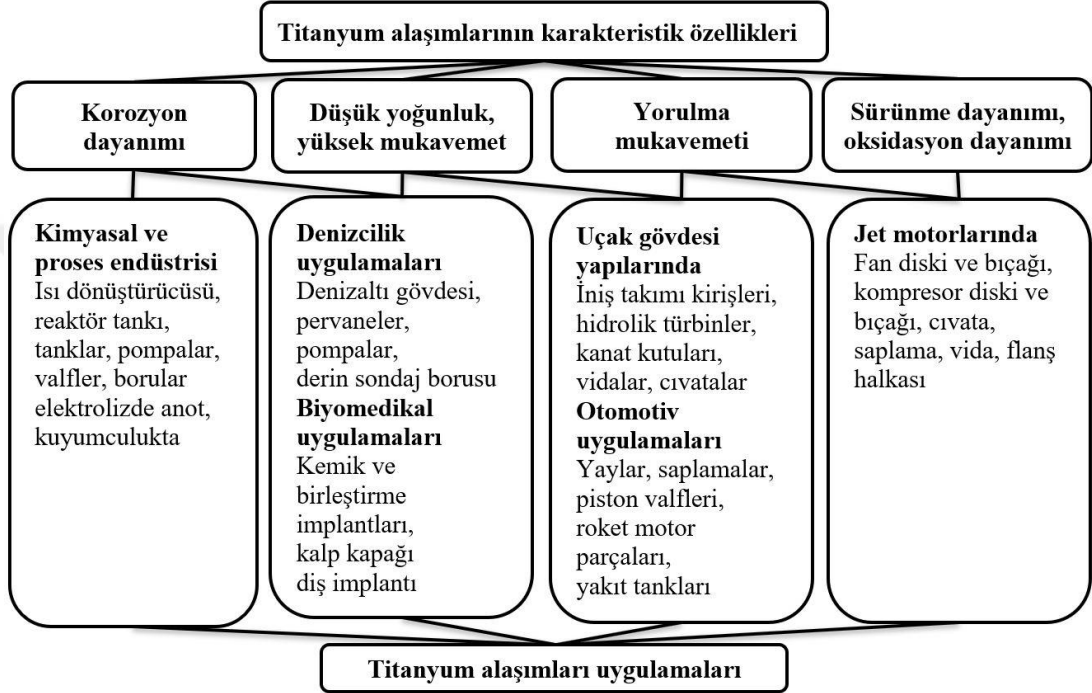
Bileşimlerinde önemli miktarda β fazını kararlaştırıcı alaşım elementleri içermektedir. Sertleştirilebilme, dövülebilirlik, soğuk şekillendirilebilme ve yüksek yoğunluk gibi özellikleriyle diğer titanyum alaşımlarından farklılık arz etmektedir [13].

β alaşımları kararsız alaşımlardır ve α fazının β matrisi içinde çökeltmesi ile sertleştirilirler. Yüksek kırılma tokluğuna sahip olup molibden içermeleri bu alaşımların korozyona karşı direncini arttırmaktadır. $\alpha + \beta$ alaşımlarına göre daha iyi işlenebilirken ısıtılma daha yatkın olduğu bilinmektedir [13].

1.6. Titanyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları

Titanyum, düşük ağırlık oranına göre gösterdiği yüksek mukavemet, mükemmel korozyon direnci ve biyouyumluluğu gibi üstün özellikleri sayesinde, i) havacılık sektöründe; jet motorları, füzeler ve uzay araçlarında, ii) ulaşım ve denizcilik sektöründe; otomobil, uçak ve denizaltı çalışmalarında, iii) endüstri işlemlerinde; kimyasal ve petrokimyada, kayak takımlarında, cep telefonu, takı ve aksesuarlarda, iv) spor malzemelerinde; bisiklet, tenis raketi, olta takımlarında, v) tıbbi uygulamalarda; ortopedik eklem, implant, sabit ve hareketli protezlerde, ortodontik tel yapımında ve endodontik kanal aletlerinde [1], kalp kapakçığı ve protez yapımında kullanılmaktadır [12, 18-20].

Titanyum oksit şu anda bilinen en beyaz boya maddesidir. Titanyum beyazı adı altında boya endüstrisinde geniş çapta kullanılır. Bunun dışında; kozmetik endüstrisi, linolyum (muşamba), yapay ipek, beyaz mürekkep, renkli cam, seramik sırası, deri ve kumaş boyanması, kaynak elektrotları yapımı ve kâğıt endüstrisi gibi pek çok alanda da kullanılmaktadır. Şekil 1.2’ de titanyum ve alaşımlarının genel özellikleri ve bu özelliklerine bağlı olarak kullanım alanları verilmiştir [14].



Şekil 1.2. Titanyum ve alaşımlarının genel özellikleri ve bu özelliklerine bağlı olarak kullanım alanları [14]

1.6.1. Biyomedikal uygulamalarda titanyum ve alaşımlarının kullanımı

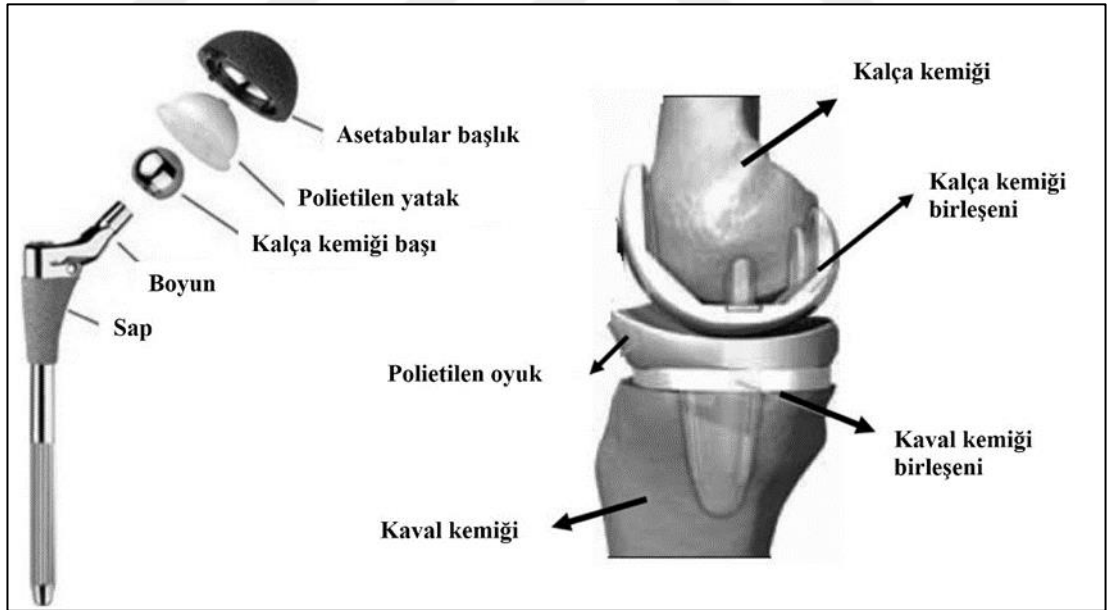
Biyolojik etkileşimlerde yüzey önemli bir rol oynamaktadır. İmplant - doku arasındaki mekanik bağlanma stabilitesini yüzey bileşimi, yüzey topografisi, yüzey pürüzlülüğü ve enerjisi etkilemektedir. Hücre tutunması ve büyümesi, yüzey pürüzlülüğüne duyarlıdır ve Ti6Al4V alaşımının yüzey pürüzlülüğü arttıkça artmaktadır [21]. Bu nedenle metalik biyo malzemelere mekanik yüzey işlemleri (bilyalı dövme, kumlama vb.) aşınma dayanımını, korozyon dayanımını ve biyouyumluluğunu arttırmak için sıklıkla uygulanmaktadır [22].

Titanyumun ve alaşımlarının biyomalzeme olarak tercih edilmesinin nedenleri;

- Düşük yoğunluğa sahip olduğu için daha hafif oluşu [3, 4, 8],

- Spesifik mukavemetlerinin yüksek oluşu [3, 8],
- Titanyum alaşımının elastiklik modülünün diğer tüm implant malzemelerine göre kemiğe daha yakın oluşu [3, 7, 8],
- Uzun süreli deri içine yerleştirilen implantasyonlarda en iyi biyouyumluluğa sahip oluşu [3, 4, 7],
- Alerjik özelliğinin az oluşu [3, 4],
- Vücuda enjekte edilen maddelerle birlikte kimyasal reaksiyona girme olasılığının düşük oluşu [3, 4, 7],
- Antimanyetik özelliği, MR (manyetik rezonans) için uygun oluşu [3, 7, 16] olarak söylenebilir.

Titanyum ve alaşımlarının kullanımının artmasındaki önemli diğer bir özellikte yüzeylerinde kendiliğinden oluşan ve vücut içerisindeki korozif ortamda mükemmel korozyon direnci gösteren kararlı, pasif oksit tabakaları ve kemik-implant bağlantısını geliştirerek hızlı bağlanmayı sağlayan osseointegrasyon eğilimidir. Paslanmaz çelik ve Cr-Co esaslı biyomalzemelerle karşılaştırıldığında titanyum çok iyi korozyon direnci ve üstün biyouyumluluk sergilemektedir [5]. Şekil 1.3' te kalça ve diz implantlarında titanyumun kullanımı gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Kalça ve diz implantı

Ortodontide kullanılan $\alpha+\beta$ fazdaki Ti6Al4V alaşımı ve β (beta) fazındaki TiMo telleri diş hekimliğinde tercih edilen alaşımlardandır. Fakat bunlar içerisinde kullanımı yoğun tercih edilen saf titanyum ve Ti6Al4V alaşımıdır [4, 5]. Dental implantlarda titanyumun tercih edilmesinin bir nedeni titanyum ve alaşımlarının elastiklik

değerlerinin diğer biyomateryallere oranla kemiğe daha uygun olmasından kaynaklanmaktadır. Tablo 1.3' de görüldüğü gibi kobalt-krom (Co-Cr) metal alaşımı ve paslanmaz çeliğin elastiklik modülü kemik ve dişe göre çok yüksekken, titanyum ve Ti6Al4V alaşımının elastisite modülü daha yakındır [4].

Tablo 1.3. Diş, kemik, titanyum ve metal alaşımların elastik modülleri [4]

Malzeme	Elastik Modül (GPa)
Kemik	17-28
Dentin	18,3
Mine	84,1
Titanyum	110
Ti6Al4V	85-115
CoCr	190-230
Paslanmaz çelik	193,1

Diş hekimliğinde titanyum, implant yapımında, sabit ve hareketli protezlerde, ortodontik tel yapımında ve endodontik kanal aletlerinde kullanılmaktadır [1]. Dental implant yüzeylerinde nanoteknolojik çalışmalarla modifikasyonların yapılması, günümüz çalışmaları açısından titanyum yüzeyinin kimyasal olarak değiştirilip osteoindüktif malzemelerin yüzeye ilave edilmesi, implant araştırmaları bakımından önemli konulardır [4].

Titanyum oksijenle çok çabuk reaksiyona girdiği için yüzeyinde daima koruyucu bir titanyum dioksit tabakası görülür. Bu sayede korozyona karşı yüksek direnç gösterir dolayısıyla doku uyumu en iyi olan metaldir. Günümüzde metal alerjisinin korozyon kaynaklı olduğu kanıtlanmıştır. Titanyum korozyona karşı dirençli olduğu için metal alerjisi olan hastalarda kullanılabilir. Son yıllarda en çok kullanılan metal implantlar titanyum alaşımı malzemelerden yapılmıştır. Bunun nedeni olarak titanyum alaşımlarının aşınmaya dayanıklı, uzun ömürlü ve korozyona karşı çok yüksek dayanıma sahip olması gösterilmektedir [13].

1.6.2. Titanyum ve alaşımlarının havacılık uygulamaları

Titanyum kullanımı ilk olarak uçak ve uzay endüstrisiyle başlarken zamanla, söz konusu üstün özellikleri nedeniyle birçok alana yayılmaya başlamıştır. Hafifliği ve yüksek mukavemeti nedeniyle havacılık uygulamalarında kendine yer bulmuştur.

Titanyumun havacılık sanayinde yaygın kullanımının önemli sebepleri;

- Hafiflik,
- Çalışma sıcaklığı,
- Korozyon direnci,
- Polimer matrisli kompozitler ile galvanik uyumluluktur.

Günümüzde otomobil sanayi ürettiği bir aracın ağırlığındaki bir kilogramlık hafifletme 15\$ maliyeti tolere edebilirken, havacılıkta bu rakam atılan her bir kilogram fazladan ağırlık için 1.500\$' a çıkmaktadır. Eğer üretim çok daha ileri teknoloji gerektiren uzay faaliyetleri ile ilgili ise bu rakam 15.000\$ civarına yükselmektedir. Bu durum titanyumun diğer üstün özellikleri dışında sadece düşük yoğunluğu sayesinde kendisine havacılık sanayinde önemli bir pazar yakaladığını açıklayan güzel bir örnektir [13].

Uçakların yüksek korozyon direnci ve kısmi mukavemet gerektiren içindeki yaşam alanlarında sıkça ticari saflıkta titanyum kullanılır. Yüksek üretim maliyetlerine rağmen uçakların ana iniş takımları için dövme titanyum alaşımlarının kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Yüksek mukavemet çeliklerinden imal edilen ana iniş takımlarının kullanım ömürleri dolmadan sıkça gerilmeli korozyon şüphesi ile değiştirilmeleri bu malzeme yerine, yeterli mukavemete sahip dövme titanyum alaşımlarının tercih edilmesini sağlamıştır. Bu tercih aynı zamanda büyük bir ticari yolcu uçağının 270 - 300 kg civarında bir ağırlık azaltılmasını da sağlamaktadır. Ticari uçaklarda kullanımı ile kıyaslandığında askeri uçaklardaki titanyum kullanımının daha fazla olduğu görülmektedir. Askeri uçaklarda gövde imalatında kullanılan titanyum oranı % 50' lere varmaktadır. Askeri uçaklarda kullanılan titanyum parçalar arasında en büyük olan ve kritik parça, kanatlardan maruz kaldığı tekrarlı ve yüksek yükleri taşıma görevindeki kanat kutusudur [13].

1.6.3. Titanyum ve alaşımlarının otomotiv endüstrisi uygulamaları

Titanyum, otomotiv endüstrisinde ilk kez 1950' lerin ortalarında kullanılmaya başlanmıştır. General Motor firmasının "Titanium Firebird II" adlı deneysel aracının tüm dış yüzeyi titanyum kullanılarak tasarlanmıştır. Hiç üretilmeyen bu araç, hava sürtünmesi kaynaklı ısınmadan korunmaya ihtiyaç duyan hızlı yarış arabaları hariç titanyum dış yüzeyli tek araçtır [3].

Yakıt tasarrufu sağlayan ve çevreye daha az zarar veren araçlara olan talebin artması araçların ağırlılığının hafiflemesi ve performansın artırılmasını gerektirmiştir. Bu noktada yüksek korozyon direnci ve güce sahip titanyum alaşımları başlıca tercih malzemesi olmuştur. Ancak titanyumun maliyeti arttırması otomotiv endüstrisinde daha yaygın olarak kullanılmasının önündeki en büyük engeldir ve kullanımını yarış otomobilleri, motorları ve Formula 1 araçları gibi yüksek performans ve dayanıklılık gerektiren araçlarla sınırlamıştır [3].

Süspansiyon yayları çelik yerine titanyumun kullanımının oldukça ekonomik olduğu bir otomotiv elemanıdır. Özellikle titanyumun çeliğe oranla çok daha düşük elastik modüle ve düşük kayma modülüne sahip olması tercih sebebidir. Geleneksel süspansiyon yayı malzemesiyle karşılaştırıldığında düşük modül, artan süspansiyon sapmasına ve bir sarmal hareketinde daha az süspansiyon hareketine yol açmaktadır. Böylelikle ağırlık sadece titanyumun düşük yoğunluğundan değil aynı zamanda süspansiyon sarmallarının daha kısa olmasından da kaynaklanmakta ve hem artan taşıma kapasitesine hem de motor ya da yolcu alanının daha geniş olmasına katkıda bulunmaktadır [13].

Formula1 araçları uzun süre motosiklet yarışlarında da kullanılan titanyum yaylardan faydalanmıştır. Ancak dünyada ilk kez seri üretim araçta titanyum yay kullanan grup Volkswagen olmuştur. Lupo "FSI", 2000 yılından beri arka süspansiyonlarında titanyum kullanılan küçük bir otomobildir [13].

1.6.4. Titanyum ve alaşımlarının diğer kullanım alanları

Titanyum, yüksek yorulma ömrü, tokluğunun iyi olması, kaynak yapılabilme imkanının olması ve yoğunluğunun düşük olması nedeni ile askeri alanda, deniz ile temas eden yapılarda ve kimyasal etkilerin olduğu ortamlarda kullanılan en iyi mühendislik malzemesidir [5].

Titanyumun bir başka avantajı da paslanmaz çeliğin yarısı, alüminyum da üçte biri kadar bir ısıl genleşme katsayısına sahip olmasıdır. Bu durum, inşasında fazla cam ya da beton kullanılan binalarda titanyum kullanımını ön plana çıkarmaktadır. Düşük ısıl genleşme katsayısının bir sonucu olarak hareketli çatılar gibi büyük titanyum yapılarda gece gündüz ısı farkının neden olduğu gerilim en aza indirilebilmektedir [13].

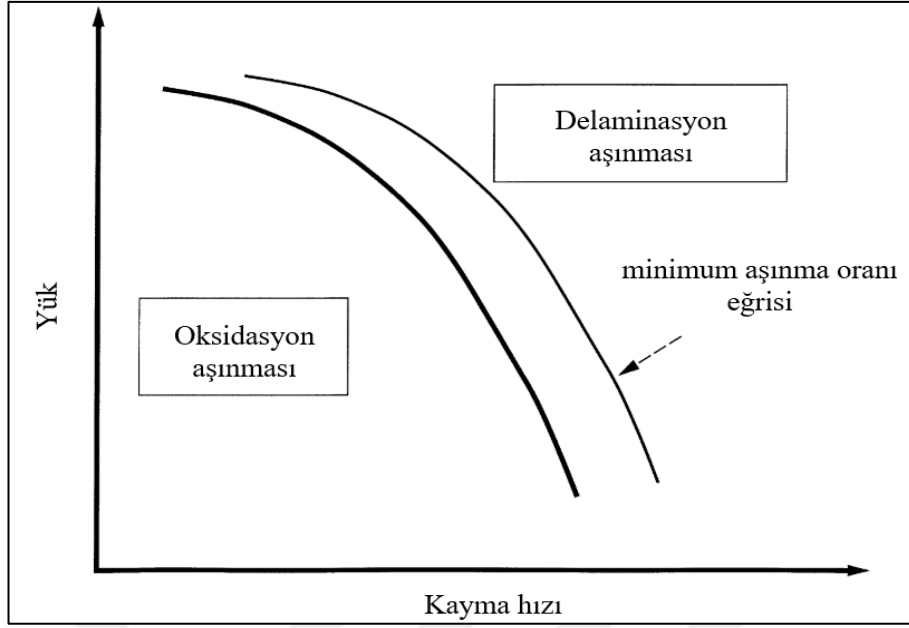
Titanyum alaşımları yüksek performanslı malzemeler olarak bilinir ve başlıca golf, tenis, bisiklet, su altı sporları, dağcılık, dağ yürüyüşü ve kış sporlarında kullanılmaktadır. Örneğin; golf oynarken ana amaç topu mümkün olduğunca uzağa atabilmektir ve bunu sağlamak için golf sopasının ucu en önemli elemandır. Önceleri ağaç kullanılarak üretilen uçlar daha sonra çelik kullanılarak üretilmeye başlanmıştır. 1990'ların ortalarında ise ilk kez titanyum kullanılarak üretilen uçlar pazara sürülmüştür. Düşük ağırlıklı metaller kullanmak üreticilere daha büyük uçlar üretip ağırlığı hafif tutma şansını tanımaktadırlar. Üretimde genellikle Ti6Al4V kullanılmakla birlikte Ti3Al2.5V gibi diğer $\alpha + \beta$ alaşımlar da kullanılmaktadır [13].

1.7. Titanyum ve Alaşımlarının Aşınma Davranışı

Titanyum ve alaşımları üstün mekanik ve kimyasal özelliklere sahip olmalarının yanında zayıf aşınma dayanımları nedeniyle yapısal uygulamalarda tercih edilmemektedir [23-25]. Titanyum ve alaşımlarının zayıf tribolojik özellikleri iki temel faktöre dayanmaktadır:

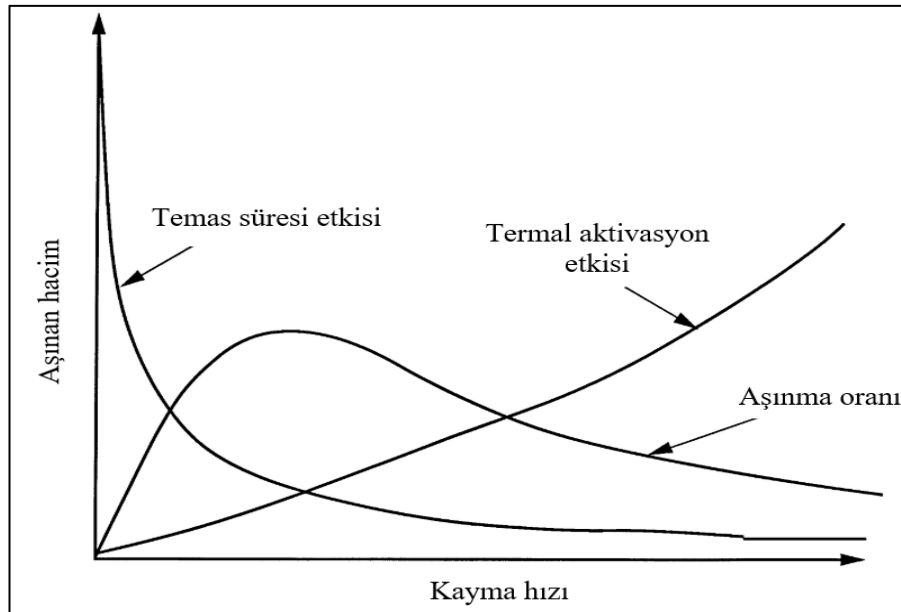
1. Plastik deformasyona dayanımının ve pekleşmesinin düşük olması, sonuç olarak aşınma davranışının malzemenin mekanik özelliklerinden (adhezyon, abrazyon ve delaminasyon) etkilenmektedir [26].
2. Adhezif aşınma sırasında oluşan yüksek sıcaklık nedeni ile yüzey oksidasyona uğrar. Oluşan bu oksit tabakası zayıf koruma özelliği sergiler ve aşınma testleri sırasında kolaylıkla yüzeyden ayrılır, yayılır ve parçalanarak matrise saplanır. Oluşan bu oksit tabakası yüzey ve yüzey altını aşınmaya karşı koruyamaz [26].

Bu nedenlerden dolayı titanyum ve alaşımlarının yapısal uygulamalarda kullanılabilmesi için aşınma dayanımları çeşitli yüzey işlemleri uygulanarak geliştirilmesi gerekmektedir [23, 25, 26]. Molinari ve arkadaşları farklı yük ve hızlarda Ti6Al4V alaşımının adhezif aşınma davranışını incelemişler, gerçekleştirdikleri SEM ve XRD çalışmaları sonrası ağırlık kaybının yük ile arttığını, aşınma hızına bağlı değişim gösterdiği, düşük hızlarda oksidasyon aşınması gerçekleşirken, yüksek hızlarda delaminasyon aşınmasının gerçekleştiğini belirlemişler, elde ettikleri sonuçlara bağlı olarak aşınma haritası oluşturmuşlardır (Şekil 1.4). Şekilde kalın çizgi, oksidasyon aşınması ile delaminasyon aşınmasını ayırmakta, ince çizgi ise minimum aşınma oranını göstermektedir [26].



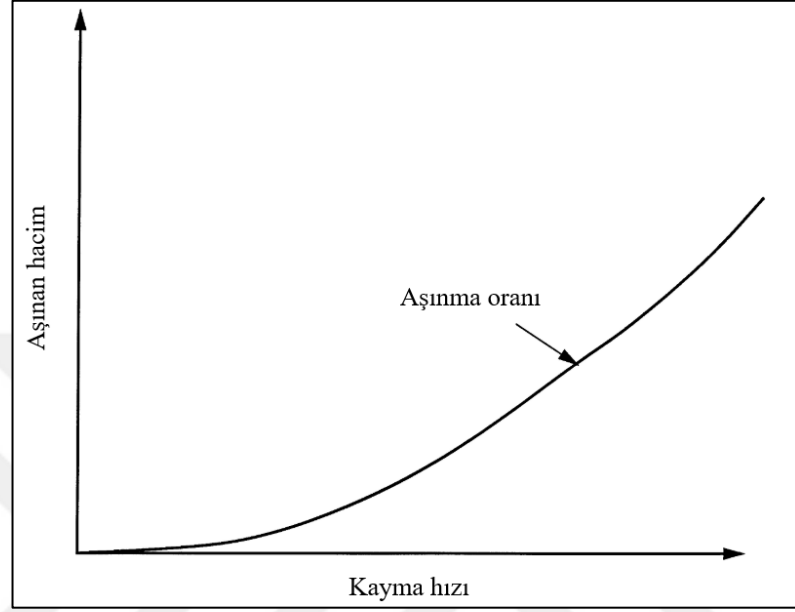
Şekil 1.4. Uygulanan yük ve kayma hızına bağlı etkin aşınma mekanizması [26]

Oksidasyon aşınması; temas halindeki iki hareketli yüzeyin temas süresi ve oksidasyona termal eğilimi ile ilişkilidir. Şekil 1.5’de oksidasyon aşınmasının kayma hızına bağlı değişimi verilmiştir. Kayma hızının artması temas süresini azaltmakta fakat bu sırada sürtünme sırasında oluşan sıcaklığı artırarak aşınma oranını maksimum değere ulaştırmaktadır [26].



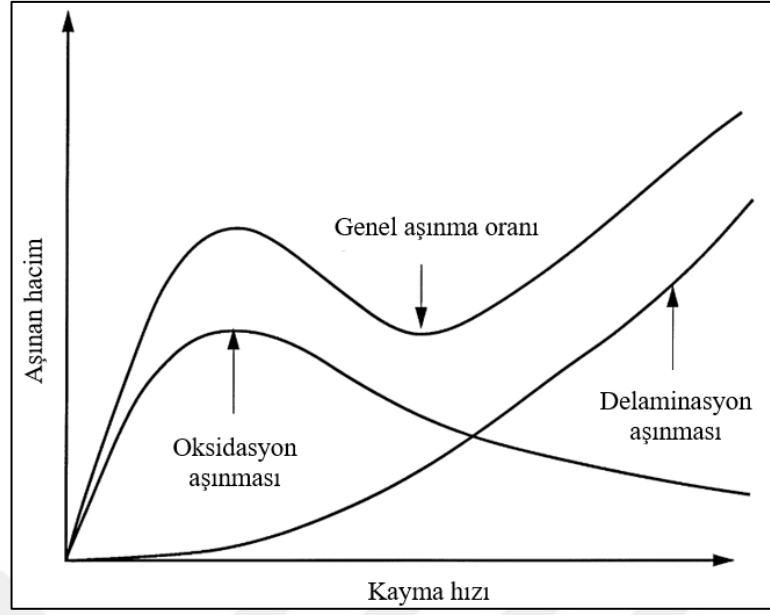
Şekil 1.5. Oksidasyon aşınması hacmi ve kayma hızı ilişkisi [26]

Şekil 1.6’ da delaminasyon aşınması hacim kaybının kayma hızına bağlı değişimi verilmiştir. Kayma hızının artması ile yüzey sıcaklığı artmakta böylelikle termal yumuşama oluşarak ve akma mukavemeti azalmaktadır. Bu nedenle aşınan hacimde ciddi artış gerçekleşmektedir [26].



Şekil 1.6. Delaminasyon aşınması hacmi ve kayma hızı ilişkisi [26]

Şekil 1.5 ve Şekil 1.6’te yola çıkılarak Ti6Al4V alaşımı için; titanyumun düşük aktivasyon enerjisine sahip olması nedeni ile oksidasyon aşınması düşük kayma hızlarında beklenir, aslında genel olarak incelendiğinde düşük kayma hızlarında oksidasyon aşınması delaminasyon aşınmasından daha baskın olarak gözlemlenir (Şekil 1.7). Kayma hızı arttıkça oksidasyon aşınmasından delaminasyon aşınmasına geçiş olur [27]. Delaminasyon tipi aşınma sırasında temas halindeki yüzeyler kırılır, plaka benzeri küçük parçacıklar oluşur. Yüksek yük ve hızlarda karşı yüzeye malzeme transferi de gerçekleşir [27].



Şekil 1.7. Kuru sürtünmede aşınan hacim ve kayma hızı ilişkisi [26]

Titanyum ve alaşımlarının sıklıkla kullanılsa da düşük aşınma dayanımına ve yüksek sürtünme katsayısına sahip olması nedeni ile kullanımı sınırlanmaktadır. Dört temel mekanizma ile bu özellikler geliştirilebilmektedir;

1. Kalıntı gerilme oluşturmak [28],
2. Sürtünme katsayısını düşürmek [19, 23],
3. Sertliğini arttırmak [23, 27],
4. Yüzey pürüzlülüğünü arttırmak [29].

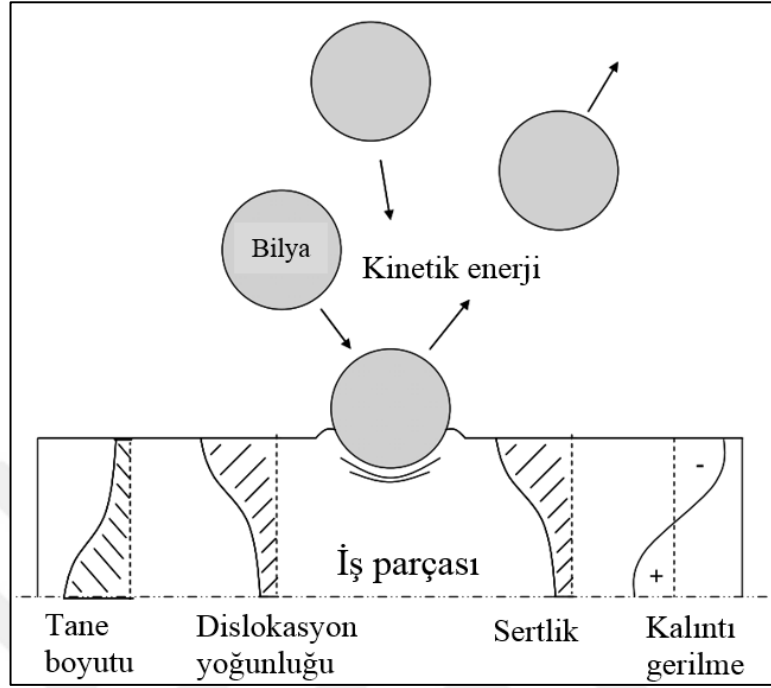
Bu nedenle tez çalışmasında yukarıda sayılan dört temel mekanizmanın bilyalı dövme ile Ti6Al4V alaşımını numunelere uygulanarak malzemenin aşınma dayanımının artırılması hedeflenmiştir.

2. BİLYALI DÖVME

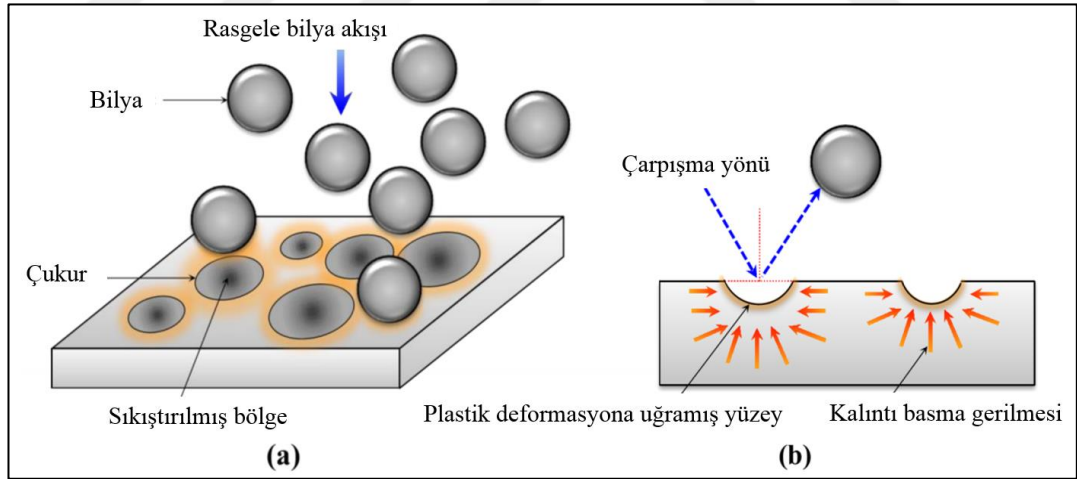
Makine elemanlarında gerçekleşen hasar ve kırılmanın çoğu malzeme özelliklerinden ve yüzeylerinde gerçekleşen tahribattan meydana gelmektedir [30, 31]. Bu nedenle, yüzey özellikleri birçok endüstride önemli bir rol oynamaktadır [32, 33]. Bilyalı dövme, özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde kullanılan metalik malzemelerin yüzey ve yüzey altı bölgede tane küçülmesini sağlamak, mikroyapı özelliklerini geliştirmek, yüzey sertliğini arttırmak, çatlakların oluşumunu önlemek, malzemenin kristal yapısını değiştirmek, dislokasyon yoğunluğunu arttırmak, kalıntı gerilme oluşturmak, yorulma dayanımlarını arttırmak amacı ile sıklıkla kullanılan soğuk şekil verme yöntemidir [8, 25, 31, 32, 34-53]. Havacılık endüstrisinde uçakların motor parçalarının %75' ine bilyalı dövme işlemi uygulanmaktadır [54]. Bu bölüm içerisinde, bilyalı dövme ile malzemelerin yüzeyinde görülen değişimler ve bu değişimlere neden olan mekanizmalar konu ile ilgili literatür çalışmaları yardımıyla açıklanmıştır. Bilyalı dövmede etkin parametreler ve bu parametrelerin kontrolü kısaca anlatılmıştır. Bilyalı dövme parametrelerinin mikroyapı, sertlik, kalıntı gerilme gibi yüzey ve yüzey altı özelliklere olan etkileri ile ilgili literatürde sunulan bilgiler derlenmiştir. Bilyalı dövme sonucu yüzeyde meydana gelen değişimler şematik olarak verilmiştir (Şekil 2.1). Bilyalı dövme işlemi yüksek hızlı standart bilyaların kontrol altında metalik malzemelerin yüzeylerinin bombardımana uğratılması olarak tanımlanır (Şekil 2.2) [25, 32].

Her bir bilya metalik malzemenin yüzeyini küçük bir çekiç gibi döver ve yüzeyde plastik deformasyon mekanizmaları ile çukurcuklar oluşturur. Bilya ve hedef malzeme arasındaki etkileşim sona erdiğinde, elastik şekil değiştirmiş bölge eski haline dönmeye çabalarken, plastik şekil değişimine uğrayan bölge kalıcı deformasyonunu sürdürür. Bu homojen olmayan elasto-plastik deformasyonlar sonucunda yüzeyde kalıntı basma gerilmesi oluşur. Kalıntı basma gelirlmesi dinamik yükleme sırasında olası çatlak oluşumunu azaltır ve oluşan çatlakların ilerlemesini yavaşlatır. Böylece dövülmüş malzemenin yorulma ömrü arttırılmış olur [55].

Wohlfahrt bilyalı dövme sonrası kalıntı basma gerilmesinin oluşumunu; i) plastik şekil değişimleri ve ii) Hertz basıncı oluşumu ile tanımlamaktadır [55].



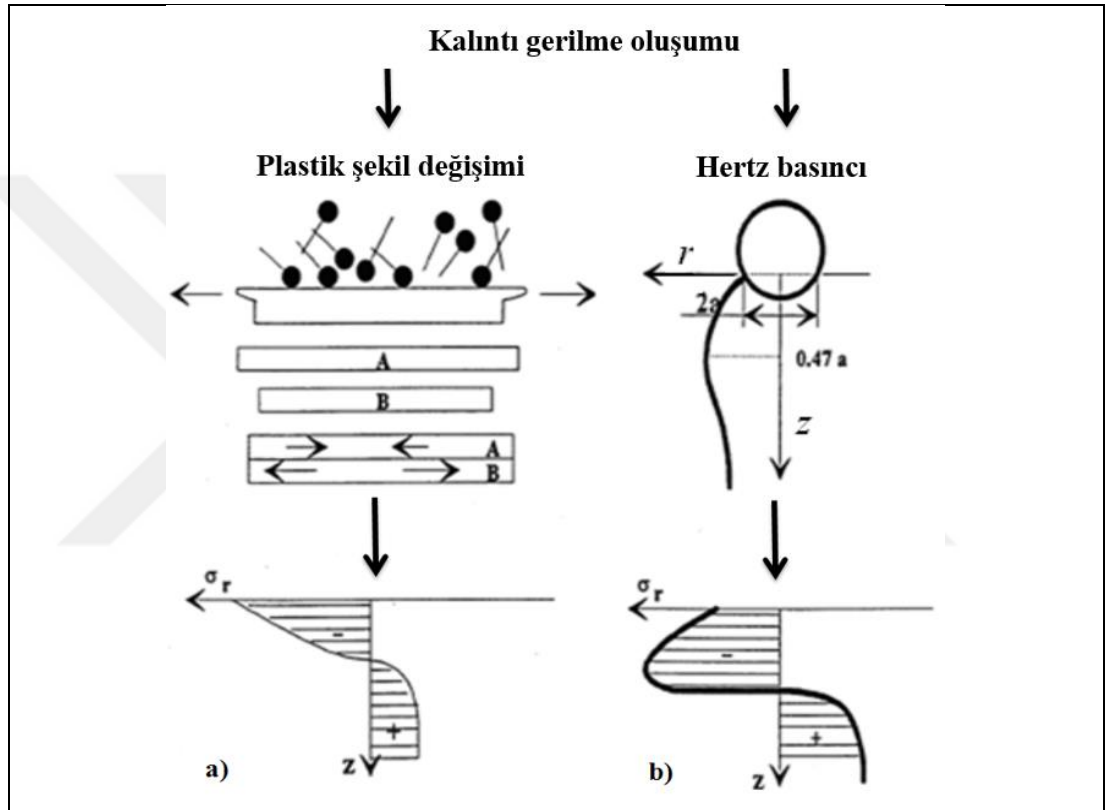
Şekil 2.1. Bilyalı dövmenin sonrası görülen değişimler [56]



Şekil 2.2. a) Bilyalı dövmenin şematik gösterimi, b) bilyalı dövme sonrası plastik deformasyon [32]

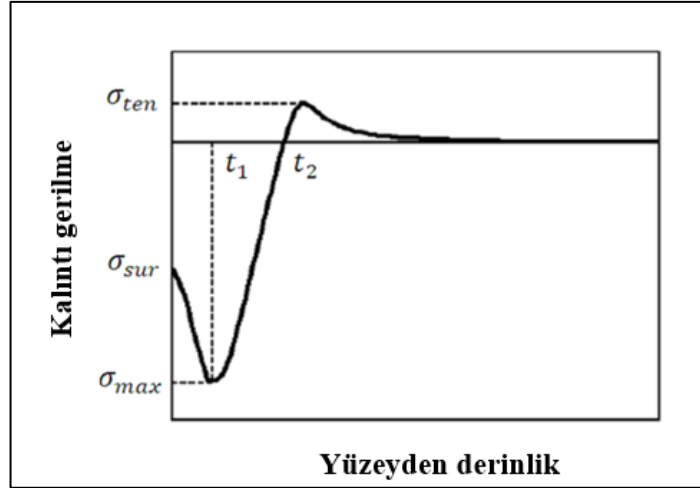
Şekil 2.3a'da çok sayıda bilya çarpması sonrasında plastik deformasyona uğrayan bölge gösterilmektedir. Bilyalı dövme sonrasında dövülen malzemede oluşan gerilme incelendiğinde gerilmenin "rz" eksenini boyunca iki farklı bölgeye ayrıldığı görülmektedir. Şekil 2.3-a'da A bölgesi bilyalı dövme sonrası plastik deformasyona uğrayan bölgeyi gösterirken, B bölgesi plastik deformasyonun altındaki bölgeyi

göstermektedir. Yüzey tabakasında oluşan elasto-plastik şekil değişimi kalıntı basma gerilmesine neden olmakta ve bu değer en fazla yüzeyin en dış tabakasında görülmektedir. Bir diğer kalıntı gerilme oluşumu mekanizması Hertz basıncı oluşumu ile açıklanabilir (Şekil 2.3b). Kalıntı gerilme maksimum olduğu değer, bilyanın yüzeyde yarattığı çukurun çapı ile orantılıdır. Sonuç olarak bilyalı dövme sonrası oluşan kalıntı basma gerilmesi yüzeyin doğrudan plastik deformasyonu ve Hertz basıncı nedeni ile oluşan plastik deformasyonun kombinasyonu ile açıklanabilir [55].



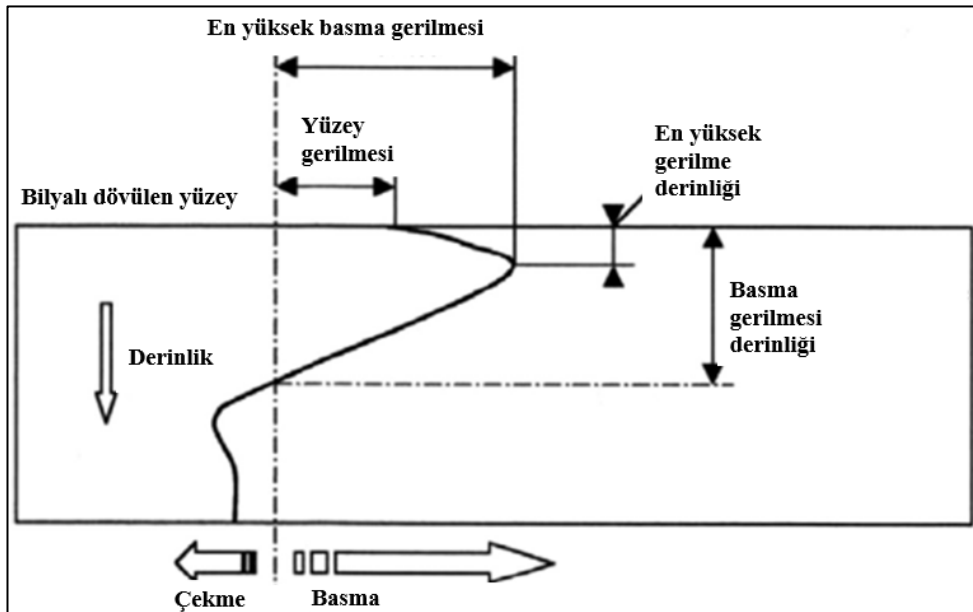
Şekil 2.3. Kalıntı gerilme oluşumunun şematik gösterimi a) plastik şekil değişimi, b) Hertz basıncı sonrası [55]

Kalıntı gerilmeyi tanımlayan beş ana terim gösterilmiştir. σ_{max} ; maksimum basma gerilmesi, σ_{sur} ; yüzey kalıntı gerilmesi, σ_{ten} ; maksimum çekme gerilmesi, t_1 ; maksimum basma gerilmesinin derinliği, t_2 ; kalıntı gerilmenin basma gerilmesinden çekme gerilmesine geçtiği derinliği tanımlamaktadır (Şekil 2.4) [55].



Şekil 2.4. Bilyalı dövme sonrası kalıntı gerilme oluşumunun şematik gösterimi [55]

Bilyalı dövme işlemi ile yüzeyde tane yapısının nano boyuta getirilmesi sağlanarak malzemelerin çekme dayanımının artırılması, yüzeyin sertleştirilmesi, kalıntı basma gerilmesi oluşturularak çatlak oluşumunun ve ilerlemesinin geciktirilmesi ve buna bağlı olarak malzemenin yorulma dayanımının artırılması amaçlanmaktadır [25, 30, 31, 35, 38, 42, 49]. Bilyalı dövme sonrası yüzey altında etkilenen tabaka kalınlığı yaklaşık 0,13 - 0,25 mm aralığındadır, ancak bu bölge 0,5 mm' ye kadar çıkabilir [25]. Şekil 2.5' te bilyalı dövülen malzemede derinliğe bağlı yüzey özelliklerinin değişimi gösterilmiştir.



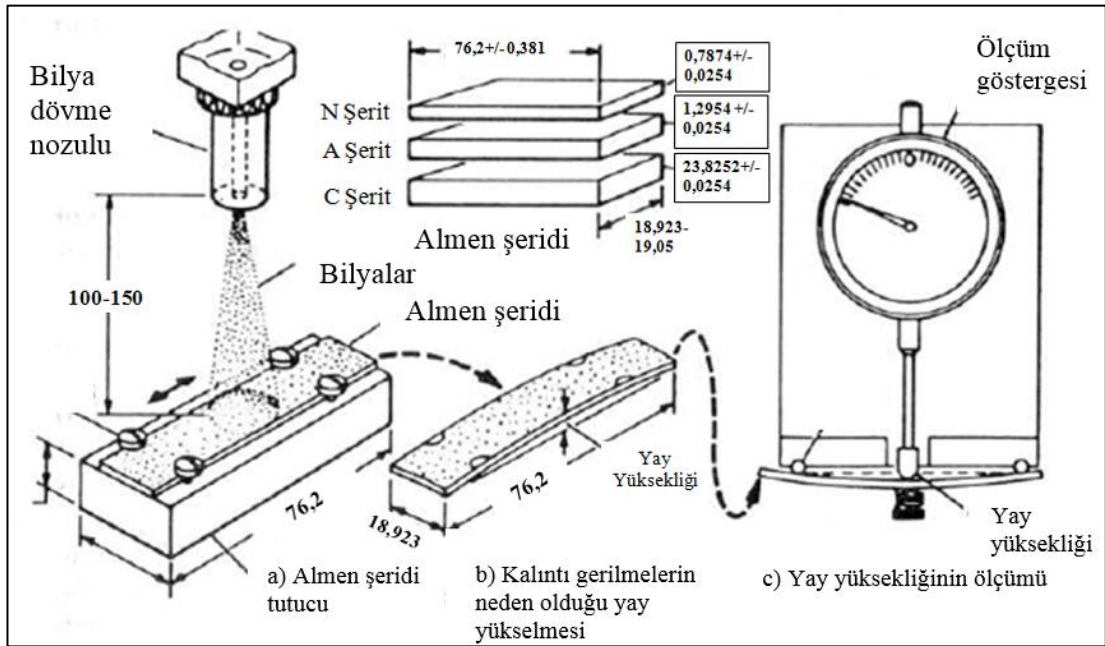
Şekil 2.5. Bilyalı dövmenin malzemenin yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkileri [25]

2.1. Bilyalı Dövme Proses Kontrol Metodları

2.1.1. Almen şiddeti

1940'larda J. O. Almen, bilyaların yüzeye transfer ettiği kinetik enerjiyi ölçmek için standart bir yöntem geliştirmiştir. Almen şiddetinin belirlenmesi Almen şeridi adı verilen standartlaştırılmış bir şeridin dövülmesi ve dövülen şeritte oluşan deformasyonun Almen ölçü aletinde (Almen gage) ölçülmesi ile hesaplanmaktadır. Şekil 2.6' de standart Almen şiddeti ölçüm yöntemi gösterilmiştir. Almen şiddetinin belirlenmesinde; i) Tablo 2.1' de verilen farklı kalınlıklardaki SAE 1070 yay çeliğinden üretilen Almen şeritleri, ii) özel olarak tasarlanan Almen tutucu ve iii) Almen ölçüm cihazı kullanılmaktadır [55].

Almen şeritleri bilyalı dövme işlemi öncesi özel olarak tasarlanan Almen şeridi tutucusuna bağlanır (Şekil 2.6a). Bağlanan Almen şeridine bilyalı dövme uygulanır ve dövme işlemi bittikten sonra Almen şeridi tutucudan çıkarılır. Almen şeridinde bilyalı dövme işleminde gerçekleşen plastik deformasyon nedeni ile bir miktar deformasyon meydana gelir ve şeritte bir miktar sehim oluşur (Şekil 2.6b). Almen şiddeti, ölçüm cihazında şeritte meydana gelen sehimin yay yüksekliğinin ölçülmesi ile hesaplanır (Şekil 2.6c) [55].



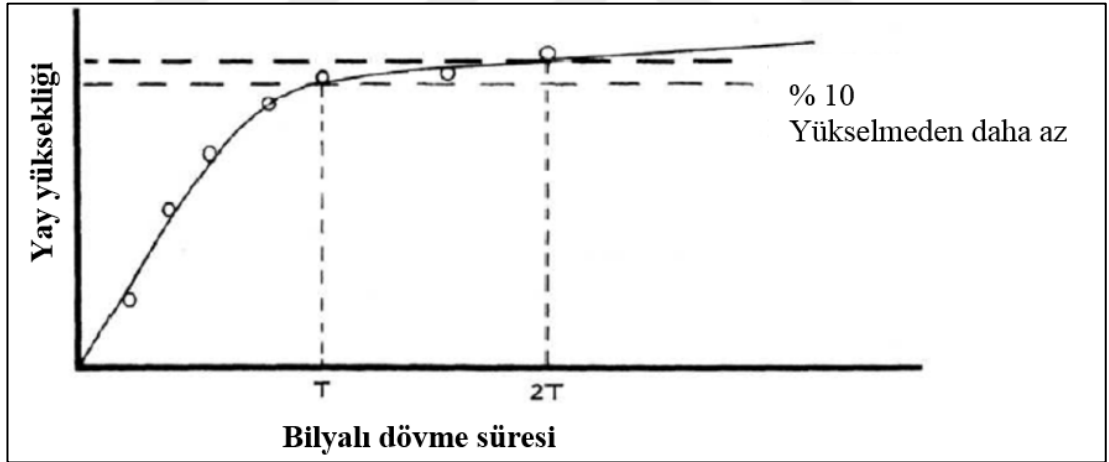
Şekil 2.6. Almen şiddetinin ölçüm sistemi [55]

Tablo 2.1. Almen şeritlerinin ölçüleri [55]

Şerit	Kalınlık (mm)	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kullanımı
N	0,7874+/- 0,0254	76,2+/- 0,381	18,923-19,05	Düşük şiddet
A	1,2954 +/- 0,0254	76,2+/- 0,381	18,923-19,05	Ortalama şiddet
C	23,8252+/- 0,0254	76,2+/- 0,381	18,923-19,05	Yüksek şiddet

Bir prosesin Almen şiddetinin belirlenebilmesi için aynı bilyalı dövme parametreleri altında farklı sürelerde birçok deney yapılması gereklidir. Doyum noktası eğrisi farklı dövme sürelerinde Almen şeritlerinin dövülmesi ile elde edilen farklı yay yüksekliklerinden elde edilmektedir. Doyum noktası, bilyalı dövme süresinin iki katına çıktığında yay yüksekliğinde meydana gelen artışın %10'dan az olduğu ilk noktadır (Şekil 2.7). Almen şiddeti doyum noktasında elde edilen yayın yüksekliğidir [55].

Almen şiddeti bilyalı dövme parametrelerine (bilya boyutu [35, 54, 57, 58], bilya türü [59, 60], bilya püskürtme basıncı [35, 54, 61], püskürtme süresi [35], yüzey örtme oranı [35, 62, 63]) bağlı olarak değişiklik göstermektedir.



Şekil 2.7. Şematik doyum noktası eğrisi [55]

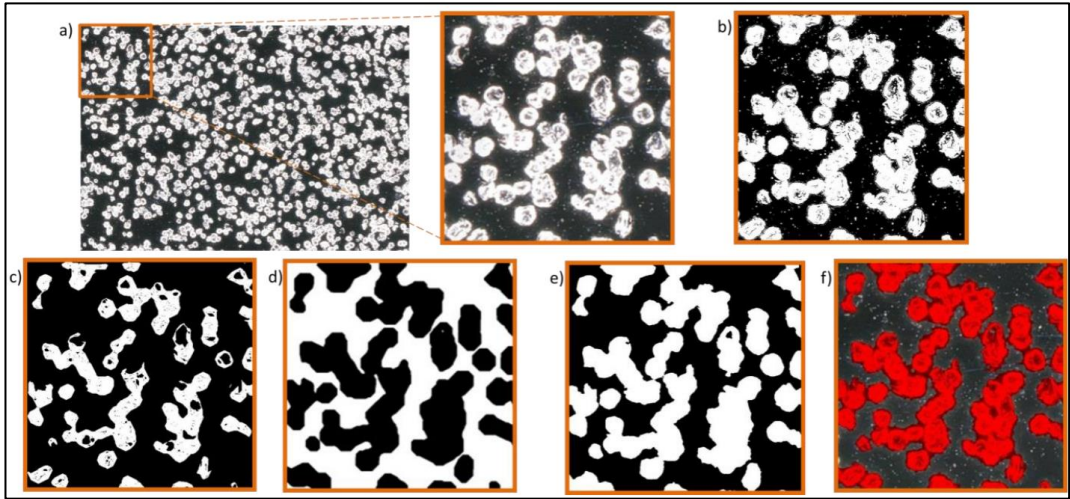
2.1.2. Yüzey örtme oranı

Yüzey örtme oranı, bilyalı dövmeden etkilenen bölgenin tüm bölgeye olan oranı olarak tanımlanabilir [53]. Yüzey örtme oranı, bilyalı dövme işlemlerinde kullanılan çok etkin bir parametredir ve prosesin güvenilirliğinin ve homojenliğinin kontrolünde çok önemli etkisi vardır [53, 64] ve Almen şiddeti gibi bilyalı dövme işlemlerinde kullanılan en önemli ölçülebilir parametredir [64]. Ne yazık ki literatürde yüzey örtme oranının genel tanımı, pratik kontrolü ve tahmini için genel bir tanımlama ve standart

bir metot ortaya konulmamıştır [64]. Yüzey örtme oranının hesaplanmasında görsel tespitler standart yöntemdir. % 100 örtme oranının belirlenmesi çok zor olduğu için pratikte maksimum yüzey örtme oranı % 98 olarak görsel olarak tespit edilmektedir. % 200 yüzey örtme oranı, % 100 örtme oranının sağlandığı dövme süresinin iki katının sağlanması ulaşılmaktadır [53, 55].

Yüzey örtme oranının hesaplanmasında literatürde yeni nicel yöntemler de kullanılmaktadır [65]. Bu yeni yöntemde, optik mikroskopta alınan görüntüler ImageJ isimli programda işlenerek özel algoritmalar oluşturulur. Alınan görüntülerin program yardımı ile işlenmesi ile bilyalı dövme homojen olup olmadığı, bilyaların yüzeyde oluşturduğu izin boyutu, yoğunluğu hakkında bilgi edinmek mümkündür [65].

Yüzey örtme oranının hesaplanmasında yüzeyin orijinal görüntüsü alınarak ImageJ programına atılır. Program yardımı ile sırasıyla orijinal görüntünün 8 bit gri tonlamalı görüntüye dönüştürülür, ardından görüntüdeki izlerin netleştirilmesi ve jeodezik yapılandırılma uygulanması işlemleri gerçekleştirilerek son görüntü elde edilir ve belirlenen alanlar kırmızı pikselle boyanarak bu alanların oranı belirlenir (Şekil 2.8) [65].



Şekil 2.8. ImageJ programı yardımı ile yüzey örtme oranının belirlenmesi a) orijinal görüntü, b) 8 bit tonlamalı görüntü, c) görüntüdeki sınırların netleştirilmesi ve jeodezik yapılandırılması, d) görüntüdeki sınırların netleştirilmesi ve jeodezik yapılandırılması, e) son görüntü, f) orijinal görüntü ile kıyaslanması [65]

2.2. Bilyalı Dövme Parametreleri

Bilyalı dövme parametrelerinin bilyalı dövme işleminin etkinliğine büyük bir etkisi olduğu bilinmektedir [30, 52, 62]. Bilyalı dövme parametreleri üç ana grup halinde sınıflandırılabilir [53]; i) bilya özellikleri (boyutu, türü, şekli, yoğunluğu, sertliği, akma dayanımı, vb. [25, 53, 54, 57, 66, 67]), ii) işlem parametreleri (bilya püskürtme debisi, püskürtme basıncı, püskürtme hızı, çarpma açısı, nozul-hedef arası mesafe, nozul çapı, püskürtme süresi vb. [25, 54, 66-70]), iii) hedef malzeme özellikleri (sertliği, akma dayanımı, tokluğu, kimyasal bileşimi, kristal yapısı, sıcaklığı vb. [38]), iv) çevresel etkenler (sıcaklık, nem vb.[16]).

2.2.1. Bilya özellikleri

Bilyalı dövme işlemlerinde istenen özelliklerin sağlanması açısından bilya seçimi önemli bir rol oynamaktadır. Çeşitli türde ve boyutta çelik, paslanmaz çelik, cam, zirkonyum oksit bilyalar kullanılmaktadır. Değişik özellikteki bilyaların kullanılması ile her bir bilyalı dövme işleminden farklı sonuçlar elde edilmektedir. Bu farklı sonuçlar ile uygulamada limitsiz varyasyonlara ulaşılabilmektedir [54]. Örneğin; yüksek kalıntı gerilmeler yüksek sertlikte bilyalar kullanılarak elde edilmektedir. Nano kristal tabakanın kalınlığı kullanılan bilyanın sertliği ile ilişkilidir [60]. Sawada, bilyaların elastik modülünün yüzey pürüzlülüğü, kalıntı gerilme ve sertliğe etkisini incelemek amacı ile aynı sertlikte (ısıtılmış işlem yaparak), aynı boyutta ve yoğunlukta bilyalar kullanarak bilyalı dövme işlemi gerçekleştirmiştir. Yüksek elastik modüle sahip bilyalar kullanarak daha sert, daha pürüzsüz ve yüksek kalıntı gerilmeli yüzeyler elde etmiştir [60]. Bilyalı dövme işlemlerinde kullanılan çeşitli bilyalar ve özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Çeşitli bilyalar ve fiziksel özellikleri [60]

	Çelik	Yüksek hız çeliği	FeCrB	Zirkonya	WC-Co	Alümina
Sertlik (HV)	200-800	800	1200	1300	1400	1900
Elastik modül (GPa)	200	220	290	200	300	360
Yoğunluk (mg/m ³)	7,8	8,1	7,4	6,0	14,0	3,8
Bilya şekli	Küresel	Küresel	Küresel	Küresel	Küresel	Karışık

Bilya boyutunun değişimi ile aynı bilya püskürtme basıncında farklı bilya hızları elde edilir. Kinetik enerji formülünden yola çıkılarak (Denklem 2.1) bilya hızının ve bilya kütlesinin kinetik enerji üzerine etkisi büyüktür.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad [54] \quad (2.1)$$

Trung ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada iki farklı boyutta bilya ile farklı püskürtme basınçlarında bilyalı dövme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Aynı basınçta küçük bilyaların hızlarının büyük bilyalara göre daha hızlı olduğunu belirleseler de büyük bilyalar kullanarak daha yüksek kinetik enerji elde etmişlerdir. Büyük bilyaların yüksek basınçta yüzeyde daha derin ve geniş izler yarattığını belirlemişlerdir [54].

2.2.2. İşlem parametreleri

Bilyalı dövme işleminde, bilyalar püskürtme basıncının etkisi ile hızlanmakta, böylece her bir bilya sahip olduğu kinetik enerjiyi çarptığı yüzeye aktararak yüzeyde plastik deformasyona neden olmaktadır. Bu deformasyon işlemi, yüzeyde ve yüzeye yakın bölgelerde dislokasyon hareketine neden olmakta, dislokasyon yoğunluğunu arttırmakta ve sonuç olarak bu bölgelerde pekleşme meydana getirmektedir [25]. Kanou ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada çarpma enerjisinin plastik deformasyona uğrayan bölge üzerine olan etkisini incelemişlerdir. Çarpma enerjisinin bilya çapı ve püskürtme basıncının artması ile arttığını gözlemlemişlerdir. Çarpma enerjisi ile oluşan çukurcuğun derinliği ve plastik deformasyona uğrayan bölgenin büyüklüğü arasındaki ilişki kurmuşlardır. Oluşan çukurcuğun derinliğinin ve plastik deformasyona uğrayan bölgenin alanının çarpma enerjisi ile doğru orantılı olduğunu tespit etmişlerdir [71].

Bilya ve hedef yüzey arasında gerçekleşen çarpışma sırasında bilya-yüzey malzemesi, bilya kütlesi (m), bilyanın çarpma öncesi hızı (V_i), bilya çarpma açısı (α), bilyanın yüzeye çarptıktan sonraki hızı (V_r) ve bilyanın çarptıktan sonraki açısı (α') göz önünde bulundurulmalıdır (Şekil 2.9). Çarpışma, çarpışma katsayısı (e_r) olan bir katsayı ile tanımlanmaktadır. Çarpışma katsayısı (e_r), bilyanın çarptıktan sonraki hızının normalinin, bilyanın yüzeye çarpmadan önceki hızının normaline olan oranı olarak kabul edilmektedir (Denklem 2.2) [32].

$$e_r = \frac{v_r \sin \alpha'}{v_i \sin \alpha} \quad (2.2)$$

Çarpışma katsayısı (e_r), bilya/hedef malzeme sertlik oranı gibi bilya ve hedef malzeme özelliklerine göre değişim göstermektedir.

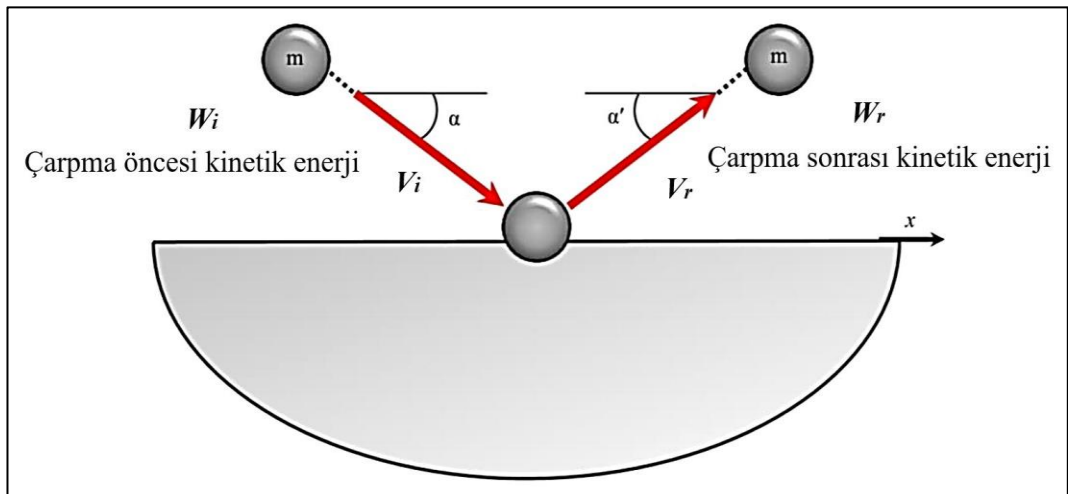
Bilyanın hareketi kayma, dikey saplanma veya dönerek ilerleme veya bu durumların karışımı şeklinde olabilir. Örneğin; dikey saplanma incelendiğinde, çarpışma öncesi ve sonrası kinetik enerjileri Denklem 2.3'de tanımlanmıştır [32]:

$$\Delta W_{(\alpha=90)} = \frac{1}{2} m V_i^2 (1 - e_r^2) \quad (2.3)$$

Bununla beraber bu durumda, bilyanın tamamen rijit ve plastik deformasyona uğramadığı kabul edilmiştir. Bu koşulda, plastik deformasyon göz önüne alındığında, kinetik enerji (Denklem 2.4) [32]:

$$\Delta W_{(\alpha=90)} = W_p + W_d \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'te kayıp enerji, W_d ve bilyalı dövülen yüzeyde plastik deformasyona neden olan enerjidir. Bu eşitliklerden yola çıkarak bilyalı dövme ile malzeme yüzeyinin maruz kaldığı enerji bilya hızı, kütlesi ve çarptığı açı ile etkilenmektedir. Dolaylı yoldan bu parametrenin oluşturduğu enerji ile yüzey plastik deformasyona uğramaktadır [32].



Şekil 2.9. Bilyalı dövme sırasında bilya - malzeme yüzeyi arasındaki enerji transferi [32]

2.2.3. Hedef malzeme özellikleri

Metalik malzemelerin plastik deformasyona uğrama yeteneği dislokasyon hareketi ve plastik deformasyon hızına bağlıdır [32]. Bilyalı dövme sonrası yüzey ve yüzey altında oluşan kalıntı gerilme değeri hedef malzemenin mekanik özelliklerinin bir fonksiyonudur ve malzemenin akma dayanımının % 50 - 60' ı kadar fazla olabilir. Kalıntı gerilmenin etkin derinliği bilyalı dövme şiddeti, bilya malzemesinin ve hedef malzemenin sertliği ile değişkenlik gösterir. Örneğin; yumuşak bir hedef malzeme (230 - 300 HV) için kalıntı gerilmenin etkin olduğu derinlik 0,8 - 1 mm iken, daha sert bir hedef malzeme (700 HV) için bu değer 0,2 - 0,25 mm civarındadır [25].

2.3. Çeşitli Metalik Malzemelerde Bilyalı Dövme Sonrası Yüzey ve Yüzey Altı Özelliklerin İncelenmesi

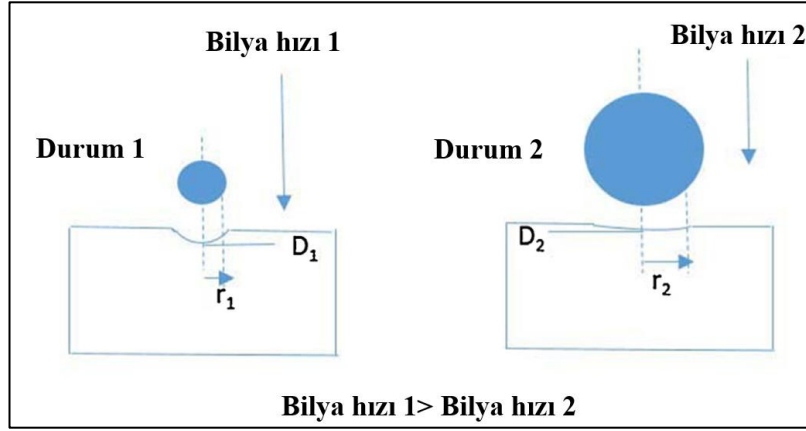
2.3.1. Bilyalı dövme sonrası yüzey pürüzlülüğü incelemeleri

Yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi birçok parametrenin etkin olduğu bilyalı dövmenin tekrarlanabilirliğinin sağlanması amacı ile kontrol metodu olmasının yanında bilyalı dövme parametrelerinin etkinliğinin incelenmesi amacı ile de kullanılmaktadır [69, 72]. Yüzey pürüzlülüğü birçok parametre altında değişiklik göstermektedir [57, 69]. Genel olarak yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde;

- Bilya püskürtme basıncının artması ile artış göstermekte [54, 57, 67, 69],
- Bilya boyutuna bağlı olarak değişiklik göstermekle beraber literatürde farklı yaklaşımlar söz konusudur. Bazı araştırmacılar artan bilya boyutu ile yüzey pürüzlülük değerlerinde azalmanın gerçekleştiğini belirlerken [8, 57, 62], diğer araştırmacılar artan bilya boyutu ile yüzey pürüzlülüğünde artışın meydana geldiğini belirlemişlerdir [54, 72, 73].

Aynı Almen şiddetinde büyük çaplı bilyalar kullanılarak gerçekleştirilen dövme işlemlerinde elde edilen düşük pürüzlülük değerleri Hertz teoremi ile açıklanabilmektedir. Şekil 2.10' da aynı Almen şiddeti ile farklı boyuttaki iki bilyanın çarptıkları yüzeyde oluşturdukları izin yarıçapı (r) ve derinliği (D) olan iki durum birbiri ile kıyaslanmıştır. Aynı Almen şiddeti ile dövülen yüzeyde büyük bilyanın

oluşturduğu izin yarıçapının daha büyük olduğu ($r_2 > r_1$) ve derinliğinin daha küçük olduğu ($D_2 < D_1$) belirlenmiştir [8].



Şekil 2.10. Aynı Almen şiddetinde farklı boyutta bilya kullanımı-hız ilişkisi [8]

- Bilya püskürtme süresinin artması ile artış göstermekte, ancak belirli bir doyum noktasına ulaşıldıktan sonra bariz bir değişim göstermemektedir [68, 74],
- Almen şiddetinin artması ile artış göstermekte [75], bazı araştırmalarda ise azalmaktadır [76],
- Yüzey örtme oranının artması ile artmakta, ancak bir süre sonra sabit değere ulaşmaktadır [72].

Bilyalı dövme sonrası oluşan yüzey pürüzlülükleri (malzeme yüzeyinde oluşan çukur ve tümsekler) çentik etkisi göstermekte çatlak başlangıcı oluşturarak malzemelerin yorulma dayanımına negatif etki ederken [68, 70, 72, 76], yüzey ve yüzey altı tane yapısının küçülmesi ile çatlak ilerlemesini yavaşlatarak malzemenin yorulma dayanımına pozitif etki etmektedir [75, 77]. Bu nedenle literatürde birçok araştırmacı bilyalı dövme sonrası malzemelerin yüzey pürüzlülüğünü incelemiş [8, 35, 54, 78, 79], sonrasında yüzey pürüzlülüğü – yorulma dayanımını ilişkilendirmiş [75, 76] ve optimum bilyalı dövme parametrelerini belirlemişlerdir. Ayrıca kaplama öncesi bilyalı dövülen yüzeylerin pürüzlülüğü kaplamanın adhezyonunun sağlanmasında büyük önem taşımaktadır [57, 80]. Bilyalı dövme sonrası yüzeylerin pürüzlülük değerleri temaslı uçlu profilometre [8, 57, 62, 79, 81], temasız uçlu optik profilometre [54, 69, 73, 75, 78, 82-85], optik mikroskop [35], atomik kuvvet mikroskobu (AKM) [86] ve optik interferometre [87] yardımı ile belirlenebilmektedir.

2.3.2. Bilyalı dövme sonrası mikroyapı incelemeleri

Bilyalı dövme ile malzemelerin yüzey ve yüzey altı tane yapısı küçülmekte [54, 88-90], dislokasyon yoğunluğunu arttırmakta [91, 92], faz yapısı değişmekte [92] ve plastik deformasyonlar oluşmaktadır [87]. Tane yapısının küçülmesinde bilyalı dövme parametreleri (Almen şiddeti, bilya boyutu, bilya türü, bilya püskürtme basıncı [35, 57, 58, 62]) etkindir. Bilyalı dövülen malzeme yüzeyine çarpan bilyaların boyutunun ve hızının her bir bilyanın sahip olduğu kinetik enerjinin belirlenmesinde önemlidir. Bu enerji sayesinde tane yapısında küçülme gerçekleştiği ve küçülen tane yapısının etkin olduğu derinliğin arttığı belirlenmiştir [93]. Literatürde tane yapısındaki değişimlerin incelemeleri optik mikroskop [8, 78], SEM [84], yüksek çözünürlüklü transmisyon elektron mikroskopisi (TEM) [35, 58, 88, 90, 94, 95], dislokasyon yoğunluğunun belirlenmesinde TEM [35, 96], tane boyutunun belirlenmesinde X ışını difraksiyonu yöntemi (XRD) [35, 42, 97], plastik deformasyonun belirlenmesinde EBSD yöntemi [87, 95] kullanılmaktadır.

2.3.3. Bilyalı dövme sonrası sertlik incelemeleri

Bilyalı dövme ile aşırı plastik deformasyonlar oluşmakta ve tane yapısı küçülmekte böylelikle yüzey ve yüzey altı sertlik değerlerinde artış meydana gelmekte, sertlik değişimi ve etkin olduğu derinlik bilyalı dövme parametrelerine bağlı değişiklik göstermektedir [8, 34, 58, 91, 96, 98-101]. Bilya boyutunun [8, 101], püskürtme basıncının [34], açısının [34], püskürtme süresinin [34, 91], ortam sıcaklığının [100], Almen şiddetinin [57], yüzey örtme oranının artması [57] ve nozul numune arasındaki mesafenin azalması [34] ile yüzey ve yüzey altı sertlik değerinde artış meydana getirdiği belirlenmiştir. Bilyalı dövme sonrası kesite bağlı sertlik değişimi mikro Vickers yöntemi [8, 58, 78, 89, 100, 101] ve nanoindentasyon yöntemi [35, 54, 87] ile belirlenmektedir.

2.3.4. Bilyalı dövme sonrası kalıntı gerilme incelemeleri

Bilyalı dövme sonrası tane yapısının küçülmesi ve dislokasyon yoğunluğunun artması ile kalınlı gerilme değerinde artış gerçekleşmesi literatürde birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir [8, 57, 84, 99-103]. Bilyalı dövme parametrelerinin (bilya püskürtme basıncı, bilya boyutu ve türü, sıcaklık) tane yapısının küçülmesinde,

dislokasyon yoğunluğunun, mikro gerilmelerin artmasında ve sertlik değerinin değişmesinde olduğu gibi kalıntı gerilme değeri ve etkin olduğu derinlik üzerine etkisi vardır [8, 57, 100, 102, 103]. Büyük çaplı bilyalar kullanılarak yüksek Almen şiddetleri ile malzeme yüzeyinin dövülmesi ile yüksek kalıntı gerilme değerlerine ulaşılmıştır [57]. Kalıntı gerilme değerlerinin belirlenmesinde X-ışını difraksiyonu yöntemi ($\sin^2 \psi$ metodu) [42, 58, 62, 87, 89, 100-102, 104, 105], Voigt metodu [103], delik delme yöntemi [8, 57, 78], nanoindentasyon yöntemi [35] ve kontur yöntemi [106] kullanılmaktadır.

2.3.5. Bilyalı dövme sonrası yorulma davranışı incelenmesi

Literatürde pek çok araştırmacı bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak malzemelerin yorulma davranışını incelemiştir [9, 36, 43, 58, 78, 89, 104, 107-110]. Literatürde genel olarak;

- Bilyalı dövmede bilya boyutunun artması ile malzeme yüzeyinin daha pürüzlü olduğu, bu pürüzlülüklerin çentik etkisi oluşturarak yüzeyde çatlaklar oluşturduğu ve yorulma ömrünü azalttığı [43],
- Küçük çapta ve hızlı bilyalar ile kalıntı gerilmenin etkin olduğu derinliğin artması ile yorulma çatlaklarının yüzey altında gerçekleştiği [43],
- Farklı Almen şiddeti ile dövülen yüzeylerde artan Almen şiddeti ile pekleşmenin ve kalıntı gerilme değerinin arttığı [57] ve böylece yorulma dayanımının arttığı ancak yüksek Almen şiddetinde bilyalı dövme uygulanması ile pekleşen bölgelerde ayrılma gerçekleşerek çatlak ilerlemesinin kolaylaştığı buna bağlı olarak yorulma dayanımının azaldığı [36, 104, 107-110],
- Şiddetli bilyalı dövme parametreleri kullanarak gerçekleştirilen çalışmalarda, yüksek kinetik enerjili bilyaların malzeme yüzeyinde şiddetli deformasyonlara ve kılcal çatlak oluşumuna neden olduğunu, şiddetli bilyalı dövme sonrası yüzeyde nano taneli yapı oluşması rağmen malzemenin yorulma ömründe artışın sağlanamadığına [58] rastlanmıştır.

2.3.6. Bilyalı dövme sonrası korozyon dayanımı incelenmesi

Bilyalı dövme sonrası nano kristal yapıda yüzeylerin oluşması ile malzemelerin korozyon dayanımı artmaktadır [111]. Porozitesi yüksek malzemelerin bilyalı dövme ile yüzey pürüzlülük değeri azalarak termal oksidasyona uğrayan yüzeylerde termal olarak büyüyen oksit tabakasının alanının düşmesi ile oksidasyon dayanımında artış gerçekleştiği belirlenmiştir [112]. Diğer yandan bilyalı dövme sonrası artan pürüzlülük ile malzemelerin korozyon dayanımında azalma belirlenmiştir [8, 57, 78].

2.3.7. Bilyalı dövme sonrası yüzey ıslatma açısının belirlenmesi

Yüzey ıslatma özellikle biyomalzemelerin yüzeylerinde hücre tutunması ve yüksek biyouyumluluk açısından çok önemlidir. Literatürde sınırlı sayıda araştırmacı bilyalı dövme sonrası yüzey ıslatma açısı değerlerini incelemiştir. Bilyalı dövme ile yüzeyin pürüzlenmesi ile yüzey ıslatma değerinde artış meydana geldiğini belirlemişlerdir [57].

2.3.8. Bilyalı dövme sonrası tribolojik davranışın incelenmesi

Literatürde bilyalı dövme sonrası aşınma davranışı sınırlı sayıda araştırmacı tarafından incelenmiş, bilyalı dövme sonrası yüzey ve yüzey altı bölgede tane boyutunun küçülmesi, sertliğin artması, kalıntı gerilme oluşması ile malzemelerde aşınma sonrası kütle kaybının azaldığı, sürtünme katsayı değerinin düştüğü ve buna bağlı olarak aşınma dayanımını arttığı belirlenmiştir [45, 46, 48, 52, 54, 113].

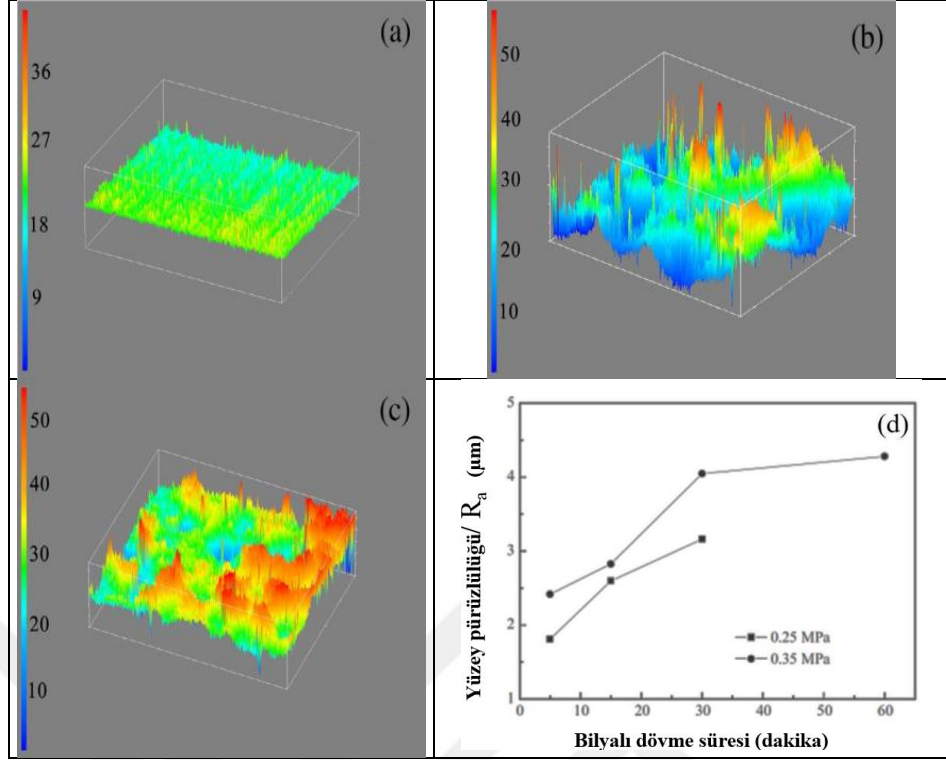
3. TİTANYUM ALAŞIMLARININ BİLYALI DÖVME SONRASI YÜZEY ve YÜZEY ALTI ÖZELLİKLERİNİN LİTERATÜRDE İNCELENMESİ

Titanyum alaşımları (özellikle Ti6Al4V) yüksek spesifik mukavemeti, yüksek tokluğu, düşük yoğunluğu ve mükemmel korozyon direnci gibi iyi mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleri nedeni ile havacılıkta, otomotiv, enerji, kimyasal uygulamalarda önemli bir yere sahiptir, ancak titanyum alaşımları düşük aşınma dayanımına, yüksek sürtünme katsayısı değerine sahiptir [17, 23, 39-41, 48, 114-116]. Ti6Al4V alaşımları implant malzemesi olarak [23, 25, 39, 40, 46, 115, 117], uzay ve havacılıkta (özellikle türbin, fan bıçağı ve diski, motor bileşenleri, helikopter rotorlarında) [40, 47, 49, 118, 119], otomotiv sektöründe (yarış arabalarında; rodlar, egzoz susturucu bağlantılarında, vanalarda) [40, 120] kullanılmaktadır.

3.1. Titanyum Alaşımlarının Bilyalı Dövme Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü İncelemeleri

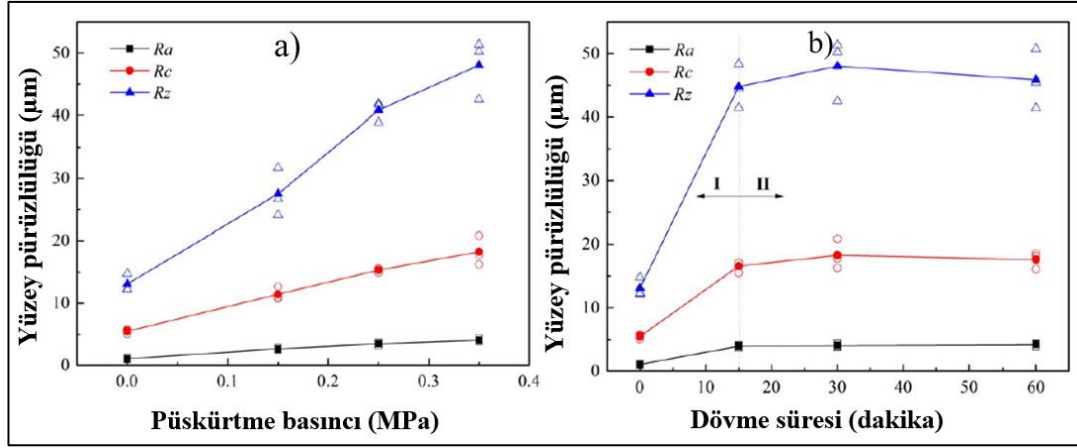
Byrne ve arkadaşları, kaplama öncesi titanyum alaşımına bilyalı dövme ve kumlama işlemleri uygulamış, bu işlemlerin titanyum alaşımının kaplama adhezyonuna etkisini incelemiştir. Her iki yöntemin de yüzey pürüzlülüğü değerlerini artırarak kaplama adhezyonunu arttırdığını saptamışlardır [39].

Liu ve arkadaşları, gerçekleştirdiği çalışmada, TC17 titanyum alaşımına farklı bilya püskürtme basıncında ve farklı sürelerde bilyalı dövme işlemi gerçekleştirmişler ve bu işlemlerin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemiştir. Çalışmaları sonucunda, her iki bilya püskürtme basıncında (0,25 ve 0,35 MPa) dövme süresinin artması ile yüzey pürüzlülüğü değerinin arttığını bulmuşlardır. Şekil 3.1' de Liu ve arkadaşlarının gerçekleştirdikleri çalışmalar sonrası elde ettiği yüzey pürüzlülüğü değerleri verilmiştir [31].



Şekil 3.1. a) İşlem görmemiş, b) 0,25 MPa püskürtme basıncı ile 15 dakika, c) 0,25 MPa püskürtme basıncı ile 30 dakika dövülmüş numunelerin 3 boyutlu yüzey görüntüsü, d) Basınca ve zaman bağlı yüzey pürüzlülüğü değerleri [31]

Liu ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada Ti6Al4V alaşımına farklı püskürtme basıncında (0,15-0,35 MPa) ve farklı püskürtme sürelerinde (15-60 dakika) bilyalı dövme uygulamış, bilyalı dövmenin malzemenin mikro yapısına ve yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemiştir. Çalışmalarında $\alpha + \beta$ fazında titanyum alaşımı kullanmış olup, Şekil 3.2' de bilyalı dövme parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğü değişim grafikleri verilmiştir. Püskürtme basıncının artması ile yüzeye ait ortalama yüzey pürüzlülüğü ve yüzeyde oluşan en derin nokta - en yüksek tepe arasındaki mesafenin arttığını belirlemişlerdir. Dövme süresinin artması ile ilk 15 dk'lık sürede ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin arttığı ilerleyen sürelerde yüzey pürüzlülüğünün aşırı dövmeyle ilgili olarak değişmediğini belirlemişlerdir [121].

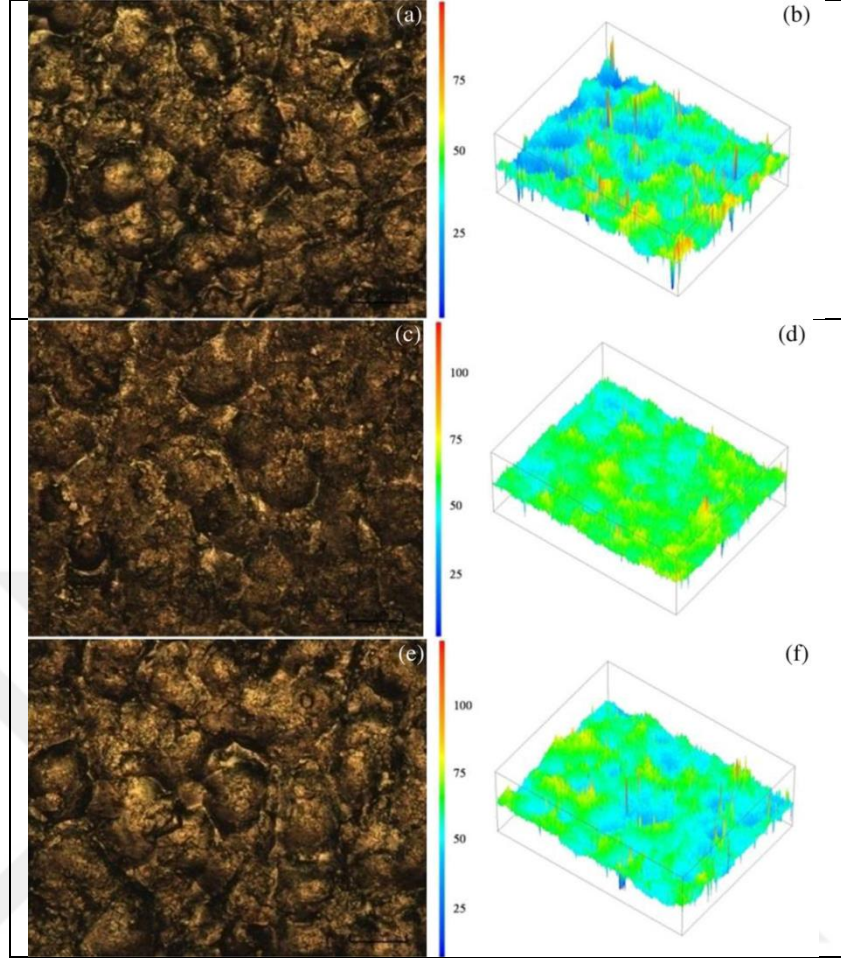


Şekil 3.2. Ortamala çizgisel yüzey pürüzlülüğüne (R_a) bilyalı dövme parametrelerinin etkisi a) püskürtme basıncı etkisi, b) dövme süresi etkisi [121]

Şekil 3.3 a-f' ye bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak değişen yüzey topografisi verilmiştir. Şekil 3.3a ve d'de püskürtme süresinin artması ile yüzeyde daha derin çukurların oluştuğunu, Şekil 3.3d ve f incelendiğinde de püskürtme basıncının artması ile yüzeyde daha derin çukurların oluştuğunu belirlemişlerdir.

Ahmed ve arkadaşları, iki farklı faz yapısına sahip Ti6Al4V alaşımını (iğnesel ve eş eksenli) farklı boyutlarda bilya (850, 450 ve 125 - 250 μm) kullanılarak 0,22 mmA Almen şiddetinde dövmüştür. Bu uygulamaların malzemelerin korozyon dayanımına, yüzey pürüzlülüğüne, sertliğe ve kalıntı basma gerilmesine etkisi incelenmiştir. Bilyalı dövme ile malzeme yüzeyinin sertliğinin arttığı, yüzeyde kalıntı basma gerilmesi oluştuğunu sonucuna varılmıştır. Büyük bilya kullanılarak düşük pürüzlülükler elde edildiği ve korozyon dayanımının arttığı belirlenmiştir. Ancak genel olarak bilyalı dövme ile korozyon dayanımının azaldığını belirlemişlerdir [8].

Ganesh ve arkadaşları, farklı püskürtme basınçları ile hızlandırılan bilyaların yüzey pürüzlülüğüne etkisini atomik kuvvet mikroskobu (AKM) kullanarak incelemişler, püskürtme basıncının artması ile yüzey pürüzlülüğünde artış meydana geldiğini gözlemlemişlerdir [25].



Şekil 3.3. 3 boyutlu yüzey incelemeleri a) ve b) 0,25 MPa, 15 dk, c) ve d) 0,25 MPa, 30 dk, e) ve f) 0,35 MPa, 30 dk [121]

Xie ve arkadaşları, titanyum matrisli kompozitlerin ((TiB + TiC) / Ti6Al4V) bilyalı dövme sonrası yüzey pürüzlüklüklerini incelemiş, bilyalı dövme ile yüzeylerin pürüzlülüğünün artmasını yüksek kinetik enerjili küçük çelik bilyaların yüzeye çarpması ile yüzeyde küçük konkavlıklar ve konvekslikler oluşturmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir [122].

Arola ve arkadaşları, su jeti dövme yöntemi sonrası ortopedik implant malzemesi olarak kullanılan AISI 304 ve Ti6Al4V alaşımının kalıntı gerilme değerini, yüzey tekstürünü ve yorulma dayanımını incelemişlerdir. Partikül boyutu ve püskürtme basıncının yüzey pürüzlülüğü, kalıntı gerilme değeri ve yorulma dayanımı üzerine etkili olduğu ve bu değerlerin partikül basıncının artması ile beraber arttığını bulmuşlardır [79].

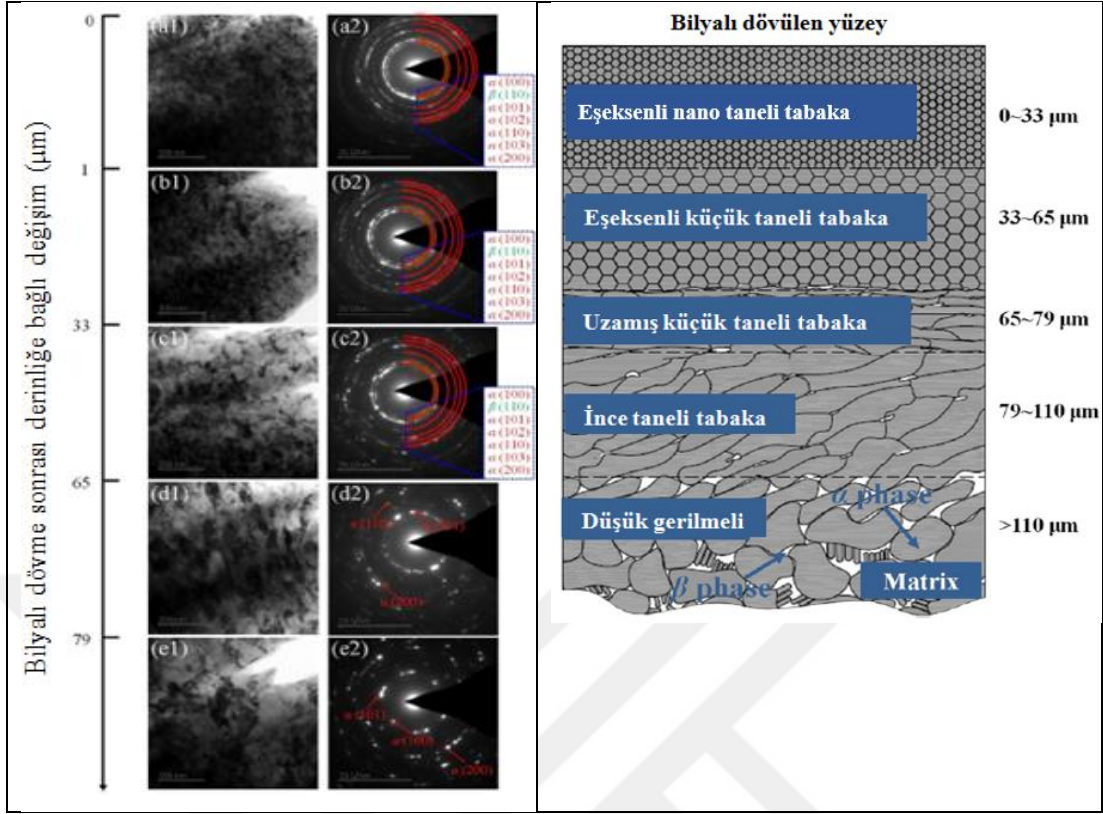
3.2. Titanyum Alaşımının Bilyalı Dövme Sonrası Mikroyapı İncelemeleri

Kameyama ve arkadaşları, Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası mikroyapı değişimini incelemiştir. Bilyalı dövme sonrası tekrarlanan mikro sürme mekanizmaları sonucunda yüzeyde katmanlar halinde bilyalar tarafından taşınan elementler gözlemlenmiştir [123].

Thomas ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmada bilyalı dövme işleminin Ti-834 alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerine olan etkisini incelemiştir. Mekanik ikizlenmenin, bilyalı dövme işlemi ile oluştuğu, bilyalı dövme oranının artması ile ikizlenme yoğunluğunun arttığını gözlemlenmiştir. Mekanik ikizlenmeden etkilenen tabakanın yüzeyden itibaren ilk 50 µm' de gözlemlendiği, bilyalı dövme oranının artması ile bu derinliğin değişmediğini belirtmişlerdir [41].

Şekil 3.4'de 0,35 MPa püskürtme basıncında ve 30 dakika dövülen Ti6Al4V alaşımının TEM görüntüleri ve TEM görüntüleri bağlı çizilen şematik tane boyut dağılımı verilmiştir. İncelemeler sonucunda malzeme dış yüzeyinde eş eksenli nano tane oluşurken derinliğe bağlı olarak tanelerin boyutunda ve yönlendirmede değişimlerin meydana geldiği belirlenmiştir [121]. Liu ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmalar için genel olarak; nano tane yapısının 0,25 MPa püskürtme basıncı ve 30 dakika dövme süresinin üstünde gerçekleştirdikleri deneyler sonrası oluştuğunu, ince tane yapısının oluştuğu kalınlığın bilya püskürtme basıncının ve süresinin artması ile arttığını ancak buna bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünde de artış meydana geldiğini, en iyi yüzey pürüzlülüğü ve tane büyüklüğünün düşük püskürtme basıncında ve uzun süre bilyalı dövme işlemleri ile elde ettikleri söylenebilir [121].

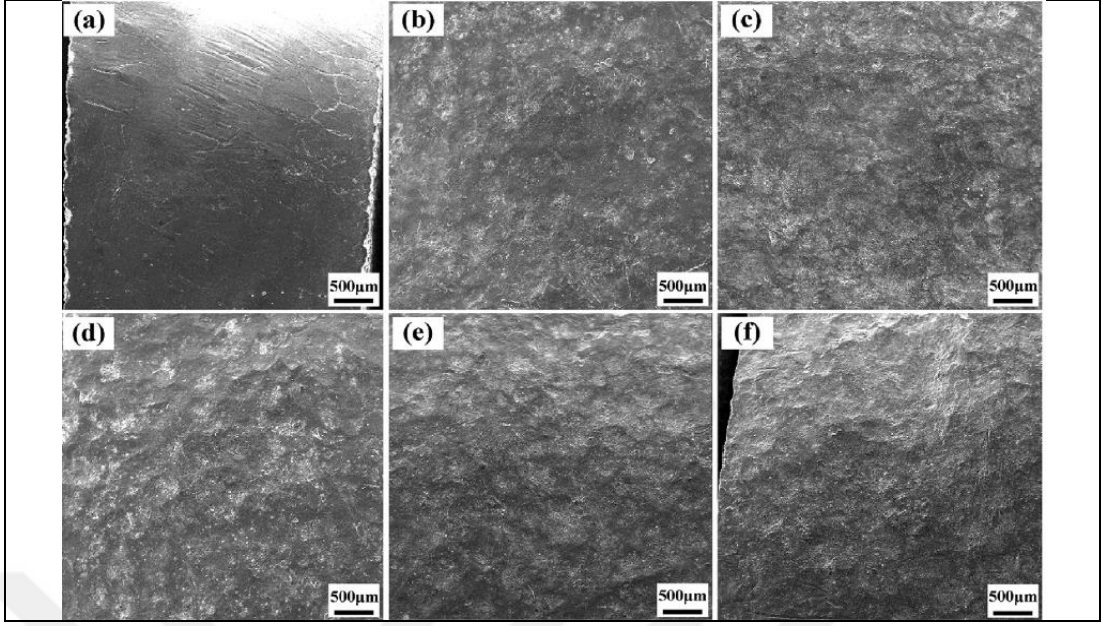
Lainé ve arkadaşları, gerçekleştirdiği çalışmada Ti6Al4V alaşımını metalik bilyalı dövme ve lazer şok dövme yöntemi kullanarak detaylı olarak incelemiştir. Bu iki yöntemde belirli derinliklerde kalıntı basma gerilmesi değeri elde etmişler, ikizlenme mekanizmalarının yöntemle ilgili olarak değişiklik gösterdiğini ifade etmişlerdir [124].



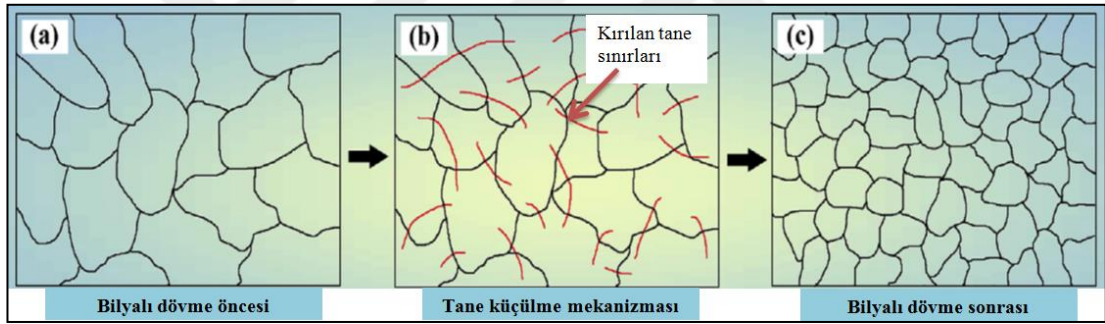
Şekil 3.4. 0,35 MPa püskürtme basıncında ve 30 dakika dövülen Ti6Al4V alaşımının derinliğe bağlı tane yapısının incelenmesi [121]

Xu ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmalar doğrultusunda genel olarak; yüksek enerjili bilyalı dövme yöntemi ile Mg/Ti kaynağının maksimum çekme dayanımı %24.5 oranında artarak 241 MPa'a çıktığı, 0,16 mm N Almen şiddeti ile yüzey hasarları elimine edilerek yüksek kalıntı basma gerilmesi değeri elde edildiği, tane küçülmesi elde edilerek Mg/Ti kaynağının dayanımının arttığını, Almen şiddetinin 0,24 mm N' a yükselmesi ile kaynak dikişinde çatlak oluşumu başladığını ve bu durumda kaynak mukavemetini azaltıcı bir etkisi olduğunu belirlemiştir [125]. Şekil 3.5' de farklı Almen şiddetinde dövülen yüzeylere ait SEM incelemeleri verilmiştir. Yüzey topografileri incelendiğinde artan Almen şiddeti ile yüzey de daha büyük izlerin meydana geldiği gözlenmiştir. Ortalama pürüzlülük değerlerinin de artan Almen şiddeti ile artış gösterdiği belirlenmiştir [125].

Xu ve arkadaşları, bilyalı dövme sonrası yüzeyde gerçekleşen tane küçülmesi mekanizmasını Şekil 3.6' da şematik olarak göstermiştir. Bilyalı dövmenin etkisi ile kırılan tane sınırları ile küçük taneli yapılar elde edilmiştir [125].



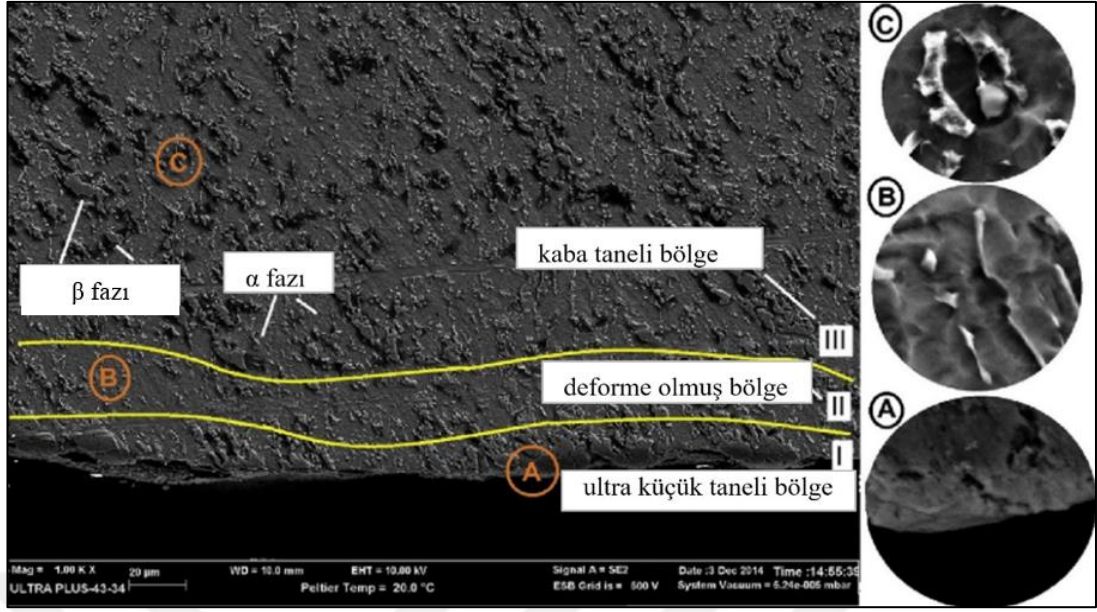
Şekil 3.5. Almen şiddetine bağlı yüzey morfolojisi a) işlem görmemiş yüzey, b) 0,08 A, c) 0,12 A, d) 0,16 A, e) 0,20 A ve f) 0,24 A [125]



Şekil 3.6. Bilyalı dövme sonrası tane küçülmesi [125]

Liu ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmalar doğrultusunda genel olarak; bilyalı dövme işlemi ile eş eksenli nano kristalin taneler elde edilmiş ve tane boyutu 6.7 nm olarak ölçülmüştür. Püskürtme basıncı ve dövme süresinin artması ile tane boyutunun küçüldüğünü belirlemişlerdir [31].

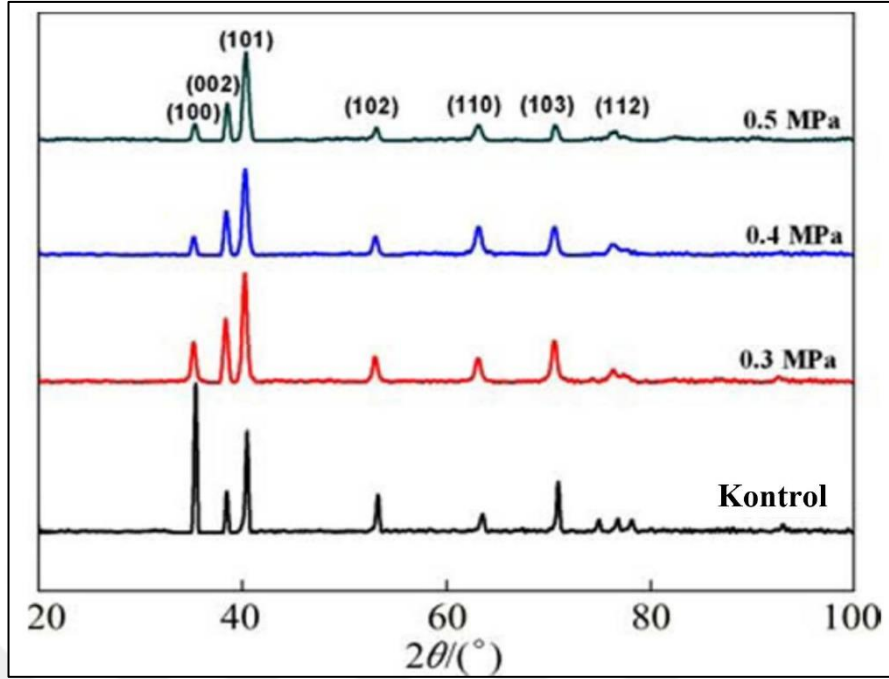
Şekil 3.7’de Ünal ve arkadaşlarının A 28-30 Almen şiddeti ile dövdükleri Ti6Al4V alaşımının kesit SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde birinci katmanda α ve β fazlarının yok olduğu, homojen bir tabakanın oluştuğu, ikinci tabakada üçüncü tabakaya göre deforme olmuş bölge, tane küçülmesi ve yönlendirilmiş α ve β fazlarının olduğunu belirlemişlerdir [126].



Şekil 3.7. A28-30 Almen şiddeti ile dövülen Ti6Al4V alaşımının kesit SEM incelemesi [126]

Chen ve arkadaşları, Ti6Al4V alaşımına farklı Almen şiddetlerinde (0,145, 0,231, 0,364 mmA) Al₂O₃ bilya kullanarak ıslak bilyalı dövme uygulayıp, malzemenin mikroyapısını, yüzey morfolojisini, yorulma dayanımını ve kalıntı gerilme değerini incelemiştir. Bilyalı dövme öncesi ve sonrası (püskürtme basıncına bağlı) XRD analizi gerçekleştirmişler (Şekil 3.8). Bilyalı dövme sonrası tanelerin küçülmesi nedeni ile XRD piklerinin genişlediğini, mikro gerilme nedeni ile kalıntı gerilme varlığının piklerin düşük açılarda yükselmesinden belirlemiştir. Piklerin genişlemesi ve yükselmesinin nedenini artan Almen şiddeti ile açıklamışlardır [16].

Han ve arkadaşları, Ti4Al2V ve 0Cr18Ni9Ti alaşımının yüksek enerjili bilyalı dövme (1 mm çapında çelik bilya, 0,6 MPa bilya püskürtme basıncında, 5 dk) sonrası yüzey ve yüzey altı tane yapısının değişimini ve bu değişimin difüzyon bağlanma özelliklerine etkisini incelemiştir. Bilyalı dövme işlemi ile her iki malzemede nano kristal yapı oluşurken, bilyalı dövme ile bağlanma mukavemetinin arttığını belirlemiştir [18].

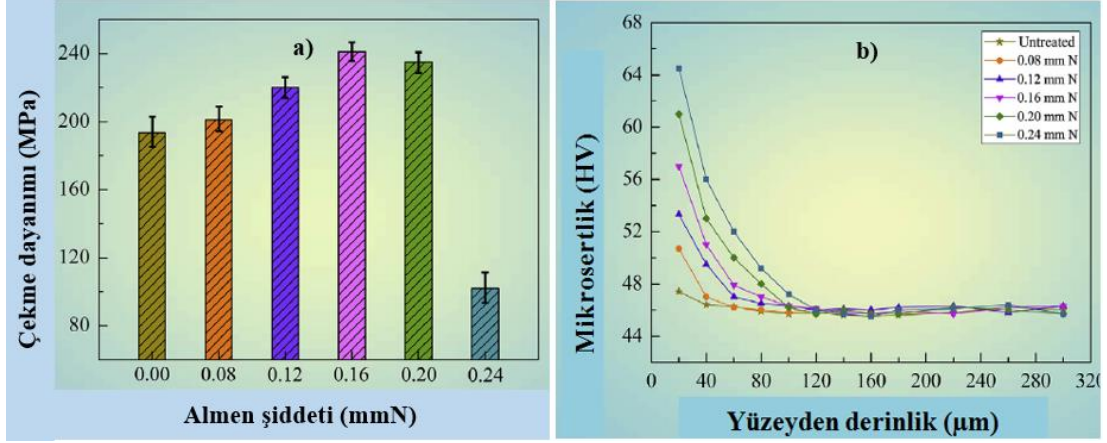


Şekil 3.8. Bilyalı dövme öncesi ve sonrası XRD sonuçları [16]

3.3. Titanyum Alaşımlarının Bilyalı Dövme Sonrası Sertlik İncelemeleri

Xu ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada, TIG kaynağı ile birleştirilen Mg/Ti bağlantılarının yüksek enerjili bilyalı dövme sonrası mikroyapısını, mekanik özelliklerini, kalıntı basma gerilmesi değerlerini, tane boyut değerlerini, dislokasyon yoğunluklarını ve çekme dayanımı değerlerini araştırmıştır [125]. Almen şiddetinin artması ile belirli bir değere kadar (0, 16 mmN) çekme dayanımının arttığını (Şekil 3.9), bu değerden sonra aşırı bilyalı dövme nedeni ile yüzeyde çatlak oluşumunun artması ve bu çatlakların çentik etkisi yaratması nedeni ile çekme dayanımında azalma meydana geldiğini belirlemişlerdir. Almen şiddetinin artması ile malzeme yüzeyindeki sertlik değerinde artış meydana geldiği ve yüksek Almen şiddeti ile dövülen numunelerdeki sertlik artışından etkilenen bölgenin daha derin bölgelerde (120 μm) etkili olduğu belirlenmiştir [125].

Ünal ve arkadaşları, bilyalı dövme sonrası yüzey ve yüzey altında bilyalı dövme şiddetine bağlı sertlik değişimini nano inderter cihazı ile incelemiş, saf titanyum numunelerin A27 Almen şiddetiyle dövülmesi ile ve yüzey altında 500 μm derinliğe kadar etkin olduğunu ve yüzey sertliğinin yaklaşık 9 GPa değerine yükseldiğini (6 GPa'dan) belirlemişlerdir [127].



Şekil 3.9. Mg/Ti bağlantılarının a) Almen şiddetine bağlı çekme dayanımları, b) Almen şiddeti-sertlik değişimi [125]

Ren ve arkadaşları, lazer dövme sonrası Ti6Al4V alaşımının yüzey ve yüzey altında gerçekleşen sertlik değişiminin temel nedeninin ikizlenme mekanizmaları ve dislokasyon hareketine bağlı tane küçülmesi olarak açıklamıştır [105]. Buna bağlı olarak Hall-Petch ilişkisi incelendiğinde (Denklem 3.1);

$$H_V = H_{V_0} + K_{H_V} d^{-1/2} \quad (3.1)$$

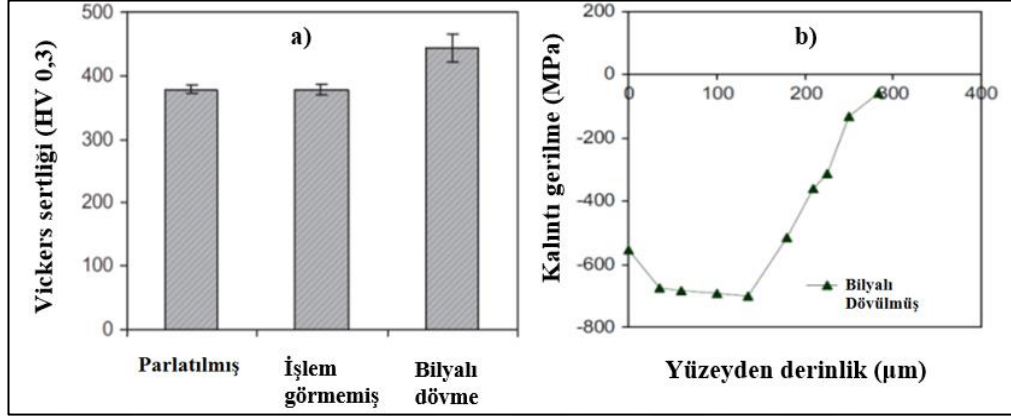
Bu eşitlikte; H_V işlem görmüş numunenin sertliği, H_{V_0} işlem görmemiş ana malzemenin sertliği, K_{H_V} malzemeye özgü katsayı ve d ise tane boyutunu göstermektedir. Bu eşitlikten tane boyutunun küçülmesi ile yüzey sertliğinin artış gösterdiği belirlenmektedir [23].

3.4. Titanyum Alaşımlarının Bilyalı Dövme Sonrası Kalıntı Gerilme İncelemeleri

Sabelkin ve arkadaşları, Ti6Al4V alaşımına yüksek dövme şiddetlerinde 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 [118].

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 sertlik, pürüzlülük ve kalıntı

gerilme değerinin diğer numunelere kıyasla daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Şekil 3.10'da Heredia ve arkadaşlarının gerçekleştirdikleri çalışma sonuçları verilmiştir [128].



Şekil 3.10. a) Yüzey sertliği değerleri, b) bilyalı dövme sonrası derinliğe bağlı kalıntı gerilme [128]

Zhang ve arkadaşları, bilyalı dövme sonrası oluşan kalıntı basma gerilmesi, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliğinin Ti811 alaşımının yüksek sıcaklık sürtünme yorulma dayanımına etkisi incelemiştir. Kalıntı basma gerilmesinin ve yüzey sertliğinin sürtünme yorulma dayanımını artırıcı, yüzey pürüzlülüğünün de azaltıcı etkisi olduğu belirlemişlerdir. Zhang ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği çalışmalar sonucunda kalıntı basma gerilmesi değerinin yorulma dayanımı arttıran en önemli faktör olduğunu, yüzey pürüzlülüğünün yorulma ömrünü azaltıcı etki yarattığını belirlemişlerdir [129].

Xie ve arkadaşları, Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme (0,3 mm çapında Al₂O₃ bilya, 0,55 MPa, 30 s, ve 0,2 mA Almen şiddeti) sonrası X-ışını gerilme analizi yöntemi kullanarak oluşan kalıntı gerilme değerini numunenin kesiti boyunca incelemiştir. Oluşan kalıntı gerilmenin basma gerilmesi olduğunu ve deformasyona uğrayan bölgenin yaklaşık 150 µm olduğunu bulmuşlardır. Kalıntı gerilmenin değerinin maksimum değere ulaştığı, sonra tekrar düştüğü ve daha sonra doğru sabitlendiğini belirlemişlerdir. Maksimum kalıntı basma gerilmesinin (-795 MPa) yüzeyin 15 µm altında oluştuğu, 25 µm - 125 µm aralığında kalıntı gerilmede azalma meydana geldiğini ve 125 µm'den sonra kalıntı gerilme değerinin sabitlendiğini belirlemişlerdir. Kalıntı basma gerilmesi oluşumunu yüksek enerjili bilyaların malzeme yüzeyindeki tabakayı plastik şekil değiştirmeye zorlaması, zorlanma etkisi ile tabakanın genişlemek istemesi, ancak bu tabakanın etrafındaki malzemenin bu davranışa karşı

elastik şekil değiştirerek karşılık vermesi bu nedenle darbenin etkisi ile genişlemeye çalışan tabakanın genişlenmesinin kısıtlanması olarak açıklamaktadırlar. Ayrıca kalıntı basma gerilmesinin yüzeyde daha yüksek oluşunu bilyaların yüzeye doğrudan çarpmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir [130].

Arola ve arkadaşları, abrazyon partikül su jeti bilyalı dövme yönteminin saf titanyum ve Ti6Al4V alaşımının kalıntı gerilme değerine etkisini incelemiştir. Dövme işleminin her iki malzemenin kalıntı gerilme değerini arttırdığını, ancak aynı parametreler altında Ti6Al4V alaşımında oluşan kalıntı gerilme değerinin daha yüksek değerde olduğunu belirlemişlerdir [131].

3.5. Titanyum Alaşımlarının Bilyalı Dövme Sonrası Yorulma Davranışının İncelenmesi

Jiang ve arkadaşları, gerçekleştirdiği çalışmada bilyalı dövülen ve ardından tekrar bilyalı dövülen Ti6Al4V alaşımının dört nokta eğme yorulma davranışını oda sıcaklığında ve 150 °C incelemiştir. Bilyalı dövme işleminin yorulma dayanımını oda sıcaklığında ve 150 °C’ de yüksek oranda arttırdığı, tekrarlı bilyalı dövmenin zararlı bir etkisinin olmadığını belirtmişlerdir [47].

Sahoo ve arkadaşları, $\alpha + \beta$ titanyum alaşımından yapılan kompresör disklerinin düşük çevrimli yorulma ömürlerine bilyalı dövme işleminin etkisini incelemiştir. Çoğu kompresör diskinde düşük çevrimli yorulma ile gerçekleşen kırılmanın kompresör diskinde bulunan kıvrangıç kuyruğu şeklindeki oyuk bölümden mevcut kalıntı çekme gerilmesinden kaynaklandığını düşünmüşlerdir. Bu nedenle çalışmalarında, kompresör diskinde bulunan kıvrangıç kuyruğu şeklindeki oyukta kalıntı basma gerilmesi oluşturulması amacı ile bilyalı dövme işlemi uygulayarak yorulma ömrünün artırılmasını hedeflemişlerdir. Bilyalı dövme sonrası türbin disklerinin kullanım ömürlerinin 800 saatten 1500 saate çıktığını belirlemişlerdir [37].

Apachitei ve arkadaşları, gerçekleştirdiği çalışmada, biomedikal alaşım olan Ti6Al4V alaşımının kaplama sonrası yorulma performansını incelemiştir. Kaplama öncesi Ti6Al4V alaşımına bilyalı dövme işlemi uygulanmış, bilyalı dövme işlemi ile numunelerin yüzeyinde kalıntı gerilme oluştuğunu, böylelikle kaplanan yüzeylerin yorulma dayanımının %50 oranında arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca bilyalı dövülen

ve sonrasında kaplama yapılan yüzeylerin ıslatılabilirlik ve hücre tutunması için yararlı yüzey serbest enerjisinin yüksek olduğunu belirlemişlerdir [44].

3.6. Titanyum Alaşımlarının Bilyalı Dövme Sonrası Korozyon Dayanımının İncelenmesi

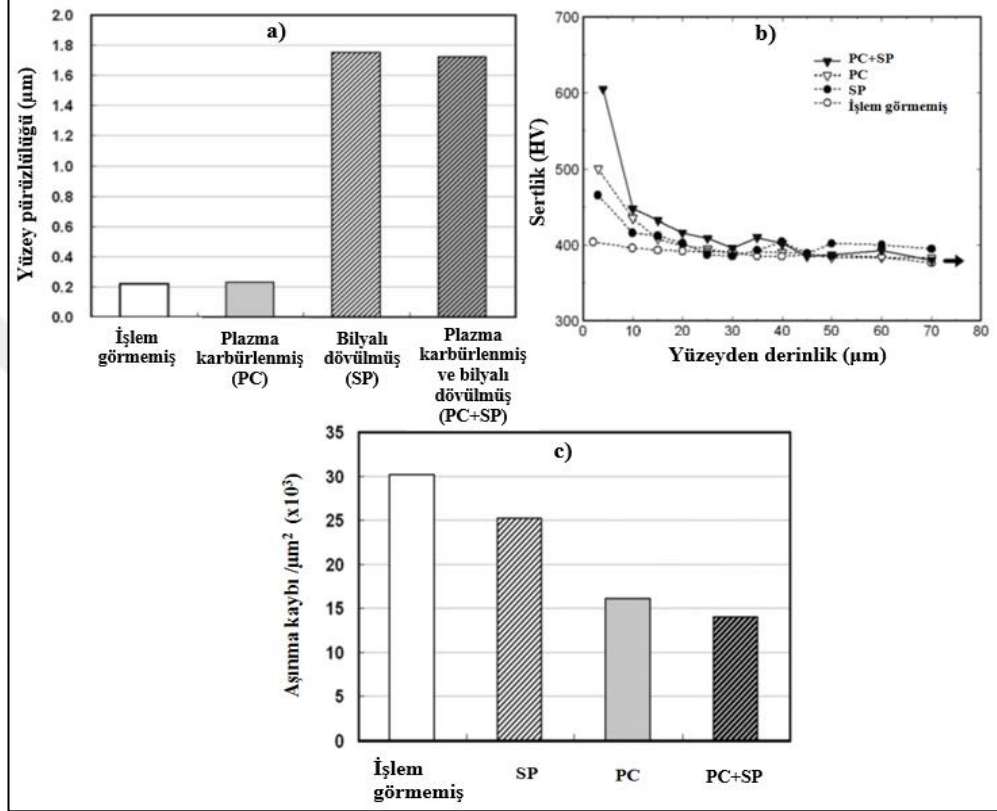
Kumar ve arkadaşları, Ti6Al4V alaşımı ultrasonik bilyalı dövme yöntemi ile dövülerek 17 ile 25 nm boyutlarında tane yapısını yüzeyden yaklaşık 30 µm deriliği boyunca elde etmiştir. Nano tane yapılı yüzeye üç farklı tuz karışımı uygulanarak korozyon dayanımını incelemiş, ultrasonik dövülen yüzeylerde korozyon dayanımı dövülme yüzeylere göre daha yüksek değerde olduğunu belirlenmiştir [132]. Ahmed ve arkadaşları ise farklı boyutlarda seramik bilyalar ile gerçekleştirdikleri mikro bilyalı dövme işlemleri sonrası Ti6Al4V alaşımı numunelerin korozyon dayanımında azalma olduğunu belirlemişlerdir [8].

3.7. Titanyum Alaşımlarının Bilyalı Dövme Sonrası Tribolojik Davranışının İncelenmesi

Fridrici ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmada parlatılmış ve bilyalı dövülmüş Ti6Al4V alaşımın titreşimli aşınma davranışını incelemişlerdir. Çalışmalarında bilyalı dövme işleminin etkisi ile başlangıçta sürtünme katsayısı değeri azalırken bu etki bilyalı dövme işleminden etkilenen bölgenin aşınma nedeniyle kaybolması ile zamanla bilyalı dövme işlemi görmemiş Ti6Al4V alaşımı malzemenin gösterdiği aşınma davranışını gösterdiğini belirtmişlerdir. Deneysel çalışmalarında, bilyalı dövme işleminin Ti6Al4V alaşımının aşınma davranışına neredeyse hiç etki etmediğini, aynı aşınma kaybının gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Ancak kesit mikroyapı incelemelerinde, aşınma sonrası oluşan yüzey çatlaklarının boyunun bilyalı dövülen numunelerde daha kısa olduğunu belirlemişlerdir. Çatlak boyunun kısalığını bilyalı dövme sonrası oluşan kalıntı gerilme ile ilişkilendirmişlerdir [49].

Tsuji ve arkadaşları, plazma karbürlenen ve bilyalı dövülen Ti6Al4V alaşımının yorulma ve aşınma davranışını incelemişlerdir. Yüzeyi geliştirilen Ti6Al4V alaşımı numunelerin yüzey morfolojisini, pürüzlülüğünü, mikroyapısını, kalıntı gerilmesini, pekleşen bölgelerini ve mikro sertliklerini analiz etmişlerdir. Plazma karbürlenen numunelerin bilyalı dövülmesi ile yorulma ömürlerinin arttığını belirlemişlerdir.

Bilyalı dövülen ve plazma karbürledikten sonra bilyalı dövülen Ti6Al4V alaşımı numunelerin aşınma (ball-on-cylinder) dayanımlarının işlem görmemiş numunelere kıyasla daha yüksek olduğunu, bunun da bilyalı dövme ve karbürizasyon işlemleri nedeni ile artan yüzey sertliğinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Şekil 3.11’te Tsuji ve arkadaşlarının elde ettiği verilerin bir kısmı verilmiştir [119].



Şekil 3.11. Bilyalı dövmenin a) yüzey pürüzlülüğüne, b) sertliğe, c) aşınma davranışına etkisi [119]

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 [25].

Heredia ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri çalışmada işlem yapılmamış, parlatılmış ve bilyalı dövülmüş Ti-10V-2Fe-3Al alaşımının titreşimli aşınma davranışını

incelemişlerdir. Numunelere ait sürtünme aşınma davranışının birbirinin aynı olduğunu gözlemlemişlerdir [128].

Bansal ve arkadaşları, Ti6Al4V alaşımına farklı yüzey mühendisliği teknikleri uygulayarak malzemenin tribolojik özelliklerini geliştirmeyi ve uyguladıkları yöntemleri birbiri içinde kıyaslarak en uygun yöntemi belirlemeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında, Ti6Al4V alaşımı numunelere çeşitli difüzyon işlemleri (oksijen difüzyonu, karbürleme, nitrürleme), sert kaplamalar, yumuşak kaplamalar, bilyalı dövme işlemleri ve bu işlemlerin kombinasyonları uygulanmıştır ve bu işlemlerden sonra numunelerin sürtünme ve aşınma davranışları ball on flat aşınma yöntemi (ASTM G133) ile incelemişlerdir. Bilyalı dövme ile malzemenin aşınma dayanımının arttığını belirlemişlerdir [133].

Dong ve arkadaşları, Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme işlemi sonrası “block-on-disc” aşınma davranışını incelemiştir. İşlem yapılmamış numunenin ve bilyalı dövülen numunelerin benzer aşınma davranışı gösterdiğini gözlemlemişlerdir [50].

Ünal ve arkadaşları, saf titanyum (Grade 2) numunelerin bilyalı dövme ve yüksek sıcaklıkta oksidasyonu sonrası sabit toplu mikro abrazyon aşınma test yöntemi ile aşınma davranışını incelemişlerdir. Bilyalı dövmenin ve yüksek sıcaklık oksidasyonunun malzemenin aşınma dayanımını arttırdığı sonucuna varmışlardır [127].

Karaoğlanlı farklı Almen şiddetleri ile dövdüğü saf titanyum (Grade 2) numunelerin aşınma davranışını sabit toplu mikro abrazyon aşınma test yöntemi ile incelemiştir. Farklı Almen şiddetlerinde yüzey ve yüzey altında sertlik artışına bağlı malzemenin aşınma dayanımında artış gerçekleştiğini belirlemiştir [134].

Zhou ve arkadaşları, Ti6Al4V alaşımına farklı parametreler altında lazer dövme işlemi uygulayarak Hank solüsyonlu ortamda “ball-on-disc” aşınma davranışını sürtünme katsayısı ve aşınma kütle kaybı açısından incelemiştir. Lazer dövme işlemi ile numunenin yüzey ve yüzey altı sertlik değerinin ve yüzey pürüzlülüğünün artması ile sürtünme katsayısının, aşınma genişliğinin, aşınma derinliğinin ve kütle kaybının azaldığını belirlemişlerdir [23].

Genel olarak literatür incelediğinde;

- Bilyalı dövme sonrası yüzey ve yüzey altı bölgedeki tanecikler nano boyuta inmiştir [8, 31, 121, 124, 125, 129, 132]. İnce tane yapısının oluştuğu kalınlık bilya püskürtme basıncının ve süresinin artması ile artmaktadır ancak buna bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünde de artış meydana gelmektedir [31, 121, 125, 129].
- En iyi yüzey pürüzlülüğü ve tane büyüklüğü düşük püskürtme basıncında ve uzun süre bilyalı dövme işlemleri neticesinde elde edilmiştir. [31, 121, 125, 129]. Yüksek yüzey pürüzlülüğü yorulma ömrünü azaltıcı etki yaratmıştır [129].
- Bilyalı dövme sonrası yüzey ve yüzey altı sertliği artmaktadır [8, 31, 121, 124, 125, 127, 129].
- Bilyalı dövme sonrası yüzey ve yüzey altı bölgesinde kalıntı basma gerilmesi oluşmaktadır [8, 31, 121, 124, 125, 129]. Kalıntı basma gerilmesi yorulma dayanımı arttıran en önemli faktördür [129].
- Yüksek Almen şiddeti ile dövme yüzeyde çatlak oluşumuna neden olmakta, bu da yorulma ömrünü azaltmaktadır [125].
- Bilyalı dövme sonrası yüzeylerin korozyon dayanımı incelendiğinde nano boyuttaki yüzeyin korozyon dayanımının yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir [132]. Ancak bilyalı dövme sonrası önemli derecede artan pürüzlülük değeri ise korozyon dayanımını azaltıcı etki yaratmaktadır [8].

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 [31, 35, 39-42, 47, 49, 50, 71, 117-119, 123, 128]. Ancak sınırlı sayıda araştırmacı bilyalı dövme sonrası malzemenin aşınma davranışındaki değişimini incelemiştir [25, 49, 50, 118, 119, 127, 133, 134]. Gerçekleştirilen sınırlı sayıda araştırmada ise birbirinden farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bazı araştırmalarda bilyalı dövme sonrası malzemenin aşınma dayanımının arttığı belirlenirken [127, 134], diğer çalışmalarda bilyalı dövme sonrası titanyum alaşımlarının aşınma dayanımının değişmediğini belirlemişlerdir [49].

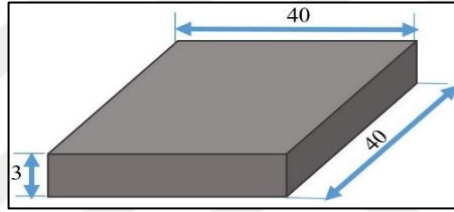
Tez çalışması kapsamında farklı parametreler altında bilyalı dövme işlemi gerçekleştirilecek ve bilyalı dövme işlemiminin malzemenin aşınma davranışına etkisi detaylı olarak incelenecektir.

4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1. Ön Çalışmalar İçin Kullanılan Malzemeler ve Yöntemler

4.1.1. Malzeme

TİMET Metal'den 3 mm kalınlığında sac malzeme olarak temin edilen Ti6Al4V alaşımı 40 mm x 40 mm boyutlarında kesilmiştir (Şekil 4.1). XRF (X-Işını Floresan Spektrometre) analiz sonuçlarına göre malzeme kompozisyonu Tablo 4.1' de verilmiştir.



Şekil 4.1. Ti6Al4V numunelerin şematik gösterimi

Tablo 4.1. Ti6Al4V alaşımının XRF sonuçları

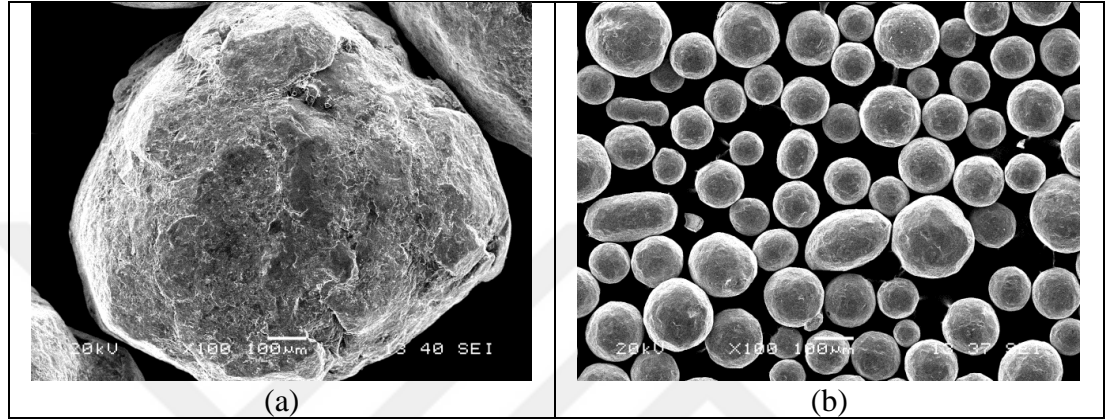
Bileşen	Al	Fe	S	Si	Ti	V
%	5,629	0,089	0,006	0,052	91,455	2,769

4.1.2. Bilyalar

İlk aşamada, bilyalı dövme işlemlerinde iki farklı boyutta çelik bilya kullanılmıştır. Kullanılan çelik bilyaların fiziksel özellikleri ve kimyasal kompozisyonu Tablo 4.2' de detaylı olarak olarak verilmiştir. Daha sonrasında Fetaş Metalurji A.Ş.' den temin edilen iki farklı boyutta (0,09 - 0,14 mm ve 0,7 - 1 mm elek aralığında) paslanmaz çelik bilyalar kullanılmıştır (Şekil 4.2). Tablo 4.3' te kullanılan bilyaların fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşenleri verilmiştir.

Tablo 4.2. Çelik bilyaların özellikleri

Ticari adı	S70 (0,2 mm), S230 (0,6 mm)				
Mikroyapısı	Martenzitik				
Kimyasal bileşenleri	C	Si	Mn	S	P
% ağırlık	0,10-0,15	0,1-0,25	1,2-1,5	0,035	0,035
Spesifik yoğunluğu (g/cm ³)	7,2				
Özgül ağırlığı (kg/cm ³)	7,90				
Sertlik (EN ISO 6507-1) HRC	40-55				



Şekil 4.2. Paslanmaz çelik bilyalar a) büyük çaplı bilya (S60), b) küçük çaplı bilya (S10)

Tablo 4.3. Paslanmaz çelik bilyaların özellikleri

Ticari adı	Chronital S10, Chronital S60						
Mikroyapısı	Östenitik						
Kimyasal bileşenleri	C	Cr	Si	Mn	Ni	S	P
% ağırlık	0,10-0,13	18,0-19,0	<3,0	<2,0	8,0-10,0	<0,03	<0,04
Spesifik yoğunluğu (g/cm ³)	4,70						
Özgül ağırlığı (kg/cm ³)	7,90						
Sertlik (HV1) (EN ISO 6507-1)	450						

4.1.3. Yöntemler

Bilyalı dövme işlemleri, bilyaların basınçlı hava ile hızlandırılarak numune yüzeyine istenilen açı ile çarptırıldığı özel olarak tasarlanmış bilyalı dövme test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Ön deneylerde kullanılan bilyalı dövme işlemlerinde kullanılan parametreler Tablo 4.4 ve Tablo 4.5 'te verilmiştir.

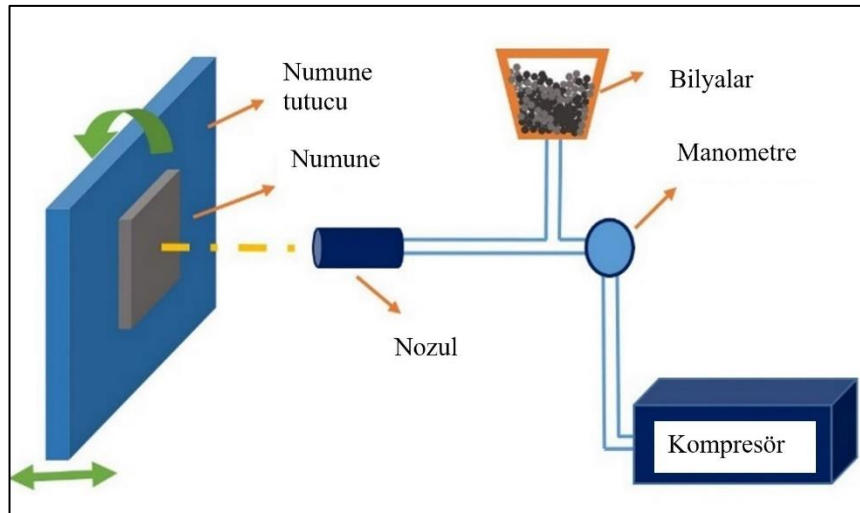
Tablo 4.4. Ön deneylerde kullanılan bilyalı dövme parametreleri (çelik bilya)

Bilya çapı (mm)	0,20 ve 0,60
Bilya püskürtme basıncı (bar)	2, 4
Bilya çarpma açısı (°)	75, 90
Dövme süresi (s)	10
Nozul mesafesi (mm)	20

Tablo 4.5. Ön deneylerde kullanılan bilyalı dövme parametreleri (paslanmaz çelik bilya)

Bilya türü	S10	S60
Bilya çapı (mm) (Elek aralığı)	0,09-0,14	0,7-1,00
Bilya sertliği (HV1)	450	
Püskürtme basıncı (bar)	2, 5, 7	
Çarpma açısı (°)	90	
Süre (dk)	1, 5 ve 15	

Şekil 4.3' te özel olarak tasarlanan bilyalı dövme test düzeneği şematik olarak verilmiştir. Bilyalar bir manometre ile kontrol edilen basınçlı hava ile hızlandırılıp nozul yardımı ile numunelere püskürtülmüştür.



Şekil 4.3. Bilyalı dövme test düzeneği

Bilyalı dövülen numunelerin yüzey sertliği değerleri ise mikro Vickers sertlik cihazı ile 0,1 N yük altında, 5 s sürede ve 5 tekrarda gerçekleştirilmiştir.

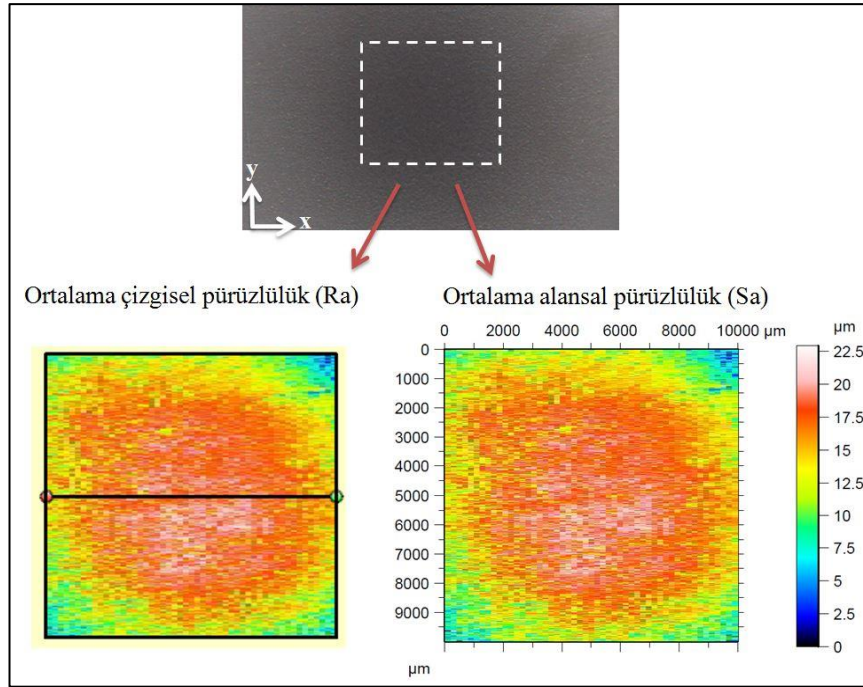
Bilyalı dövme operasyon parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemek amacı ile bilyalı dövülen numuneler Nanovea marka optik profilometre yardımı ile incelenmiştir. Pürüzlülük ölçüm parametreleri Tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.6. Pürüzlülük ölçüm parametreleri

	Tarama boyutu (mm)	Tarama sıklığı (μm)	Ölçüm standardı
Ortalama çizgisel pürüzlülük (R_a)	10 (x)	200	ISO 4287
Ortalama alan pürüzlülüğü (S_a)	10 x 10 (x, y)	200 x 20	ISO 25178

Şekil 4.4’ da bilyalı dövme işlemi uygulanan bir numunenin pürüzlülük ölçüm yöntemi verilmiştir. Dövülen numunenin ortalama çizgisel pürüzlülük (R_a) değerinin belirlenmesinde 10 mm’ lik bir çizgi taranmıştır. Ortalama çizgisel pürüzlülük değerleri belirlenirken x eksenini doğrultusunda 200 μm ’de bir ölçüm alınmıştır. Herbir numunede çizgisel ortalama pürüzlülüğün belirlenmesinde 5 tekrar yapılmıştır.

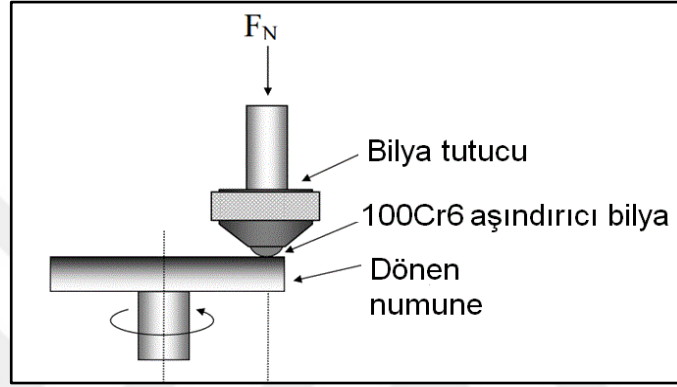
Dövülen numunenin ortalama alan pürüzlülük (S_a) değerinin belirlenmesinde 10 x 10 mm^2 lik alan taranmıştır. Ortalama alan pürüzlülük değerleri belirlenirken x eksenini doğrultusunda 200 μm ’de bir, y eksenini doğrultusunda 20 μm ’de bir ölçüm alınmıştır.



Şekil 4.4. Pürüzlülük ölçüm yöntemi

Bilyalı dövme operasyon parametrelerinin malzeme yüzey morfolojisine etkisini incelemek amacı ile bilyalı dövülen numuneler taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımı ile incelenmiştir.

Farklı parametrelerde dövülen numunelerin adhezif aşınma testleri Nanovea marka ball-on-disk türü aşınma cihazı kullanılarak test edilmiştir. Şekil 4.5’ de kullanılan cihazın şematik gösterimi, Tablo 4.7’ de ise adhezif aşınma testi parametreleri verilmiştir.



Şekil 4.5. Adhezif aşınma cihazı şematik gösterimi

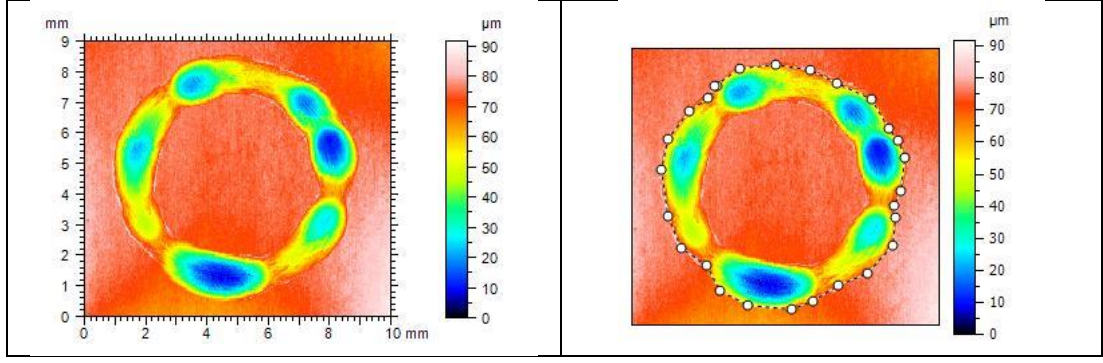
Tablo 4.7. Aşınma testi parametreleri

Karşıt malzeme	100Cr6
Karşıt malzeme sertliği	65 HRC
Radyal hız	0,1 ms ⁻¹
Normal yükleme	10 N
Toplam kayma mesafesi	150 m

Aşınma testleri sonrası numunelerin ağırlık kaybı, hassas terazi yardımı ile kütle değişimi, hacim kayıpları ise optik profilometre yardımı ile belirlenmiştir. Şekil 4.6’ da optik profilometre hacim kaybı ölçümleri şematik olarak verilmiştir. Spesifik aşınma, hacim kaybı (U); mesafe (L) ve yüke (N) bağlı olarak aşağıda verilen eşitlik (Denklem 4.1) yardımı ile belirlenmiştir;

$$K = U / (LN) \quad (4.1)$$

Bu denklemde U aşınan hacimi (mm³), L aşınma mesafesini (m), N uygulanan kuvveti (N) ve K spesifik aşınma oranını (mm³/(Nm)) göstermektedir [8, 9].



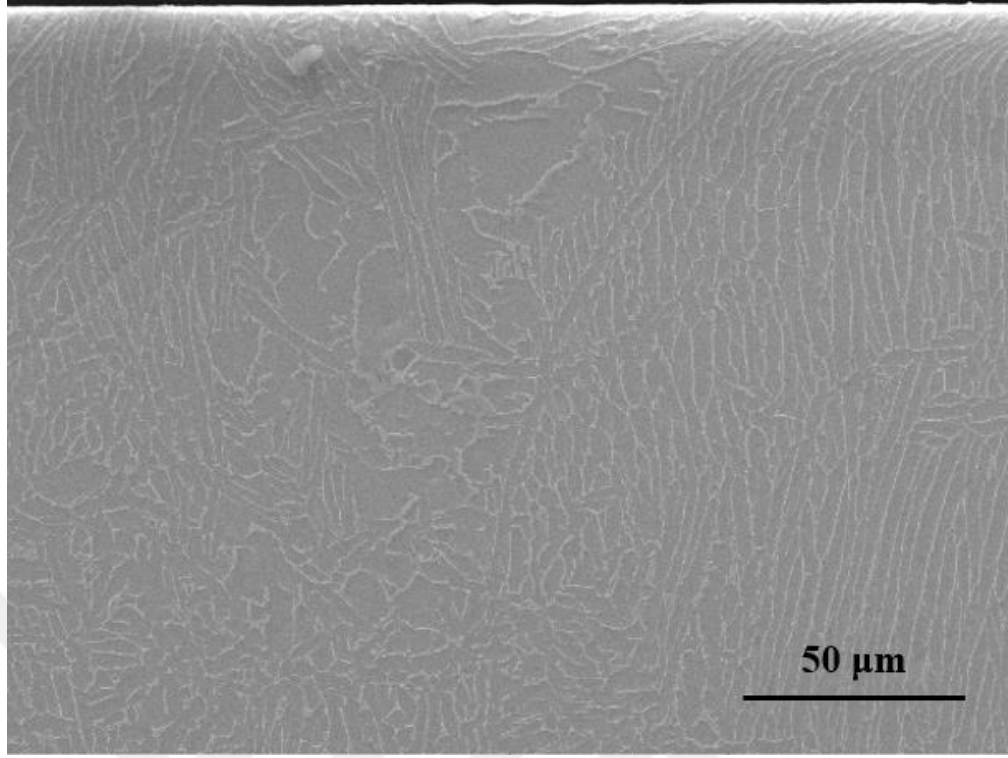
Şekil 4.6. Aşınma sonrası optik profilometre ile hacim kaybı hesabı

Ayrıca optik profilometre ile aşınma öncesi ve sonrası 3 boyutlu yüzey topografisi incelenmiştir. Şekil 4.6' da gerçekleştirilen aşınma testleri sonrası hesaplanan hacim kayıpları görsel olarak verilmiştir.

4.2. İkinci Aşama Çalışmalar İçin Kullanılan Malzemeler ve Yöntemler

4.2.1. Malzeme

İkinci aşama için kullanılan numunelerin geometrisinde birinci aşamada gerçekleştirilen deneysel sonuçlar dikkate alınarak revizyona gidilmiştir. Deneysel çalışmalarda hedef malzeme olarak kullanılan ticari adı Ti.Gr.5 olan silindirik çubuk (Ø20) halindeki Ti6Al4V alaşımı, TİMET Metal'den temin edilmiştir. Çubuk malzeme Kar Metal marka yarı otomatik şerit testere (M42 27*0,9*3000) ile kuru olarak 10 mm kalınlıklarında kesilmiştir. Kesim işlemleri sonrası numune yüzeylerinde oluşan testere izlerini gidermek için numunelere alın tormalanma yapılmıştır. Şekil 4.7'de temin edilen Ti6Al4V alaşımı malzemenin kesit mikroyapı görüntüsü verilmiştir.



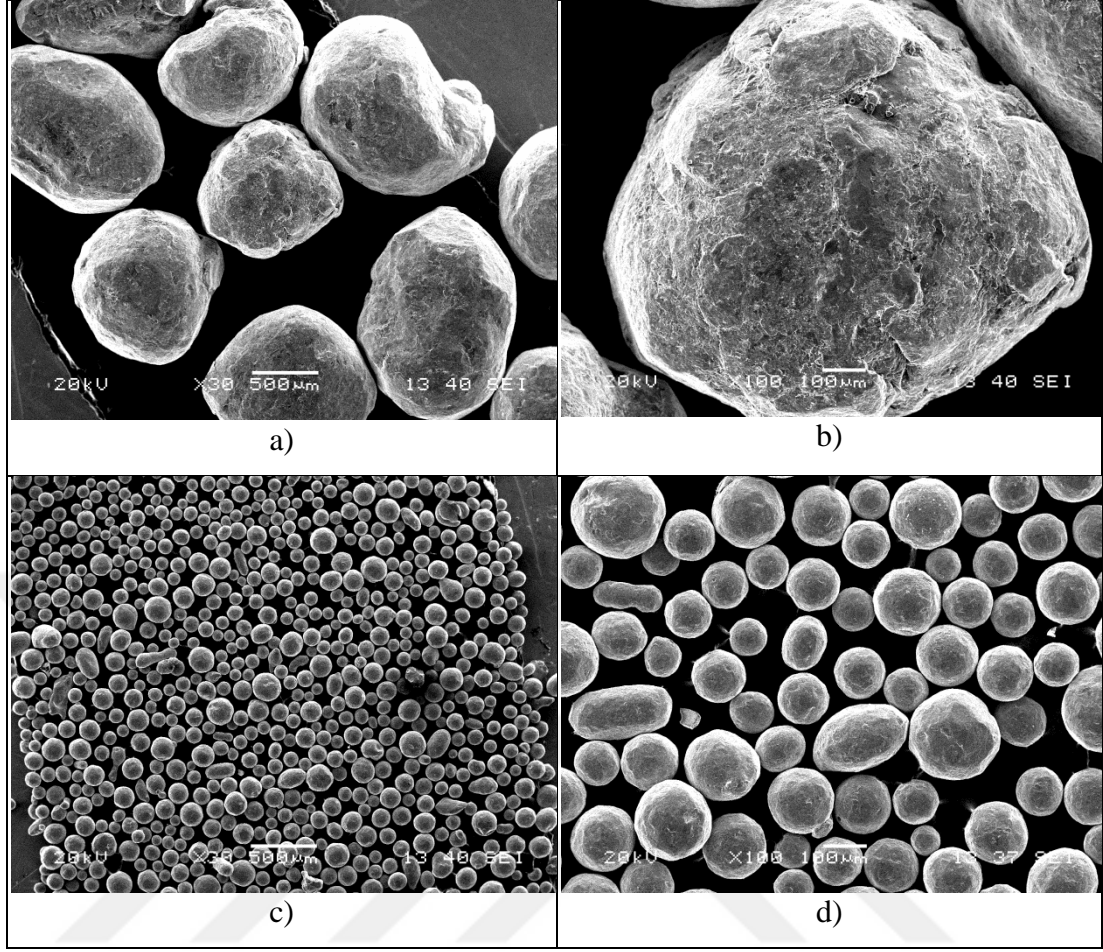
Şekil 4.7. Ti6Al4V alaşımı numunelerin kesit mikroyapısı

4.2.2. Bilyalar

Bilyalı dövme işleminde kullanılmak amacı ile iki farklı boyutta paslanmaz çelik bilya Fetaş Metalurji A.Ş.' den temin edilmiştir. Tablo 4.8' de temin edilen bilyaların özellikleri ve Şekil 4.8' de bilyaların SEM görüntüleri verilmiştir.

Tablo 4.8. Bilya özellikleri

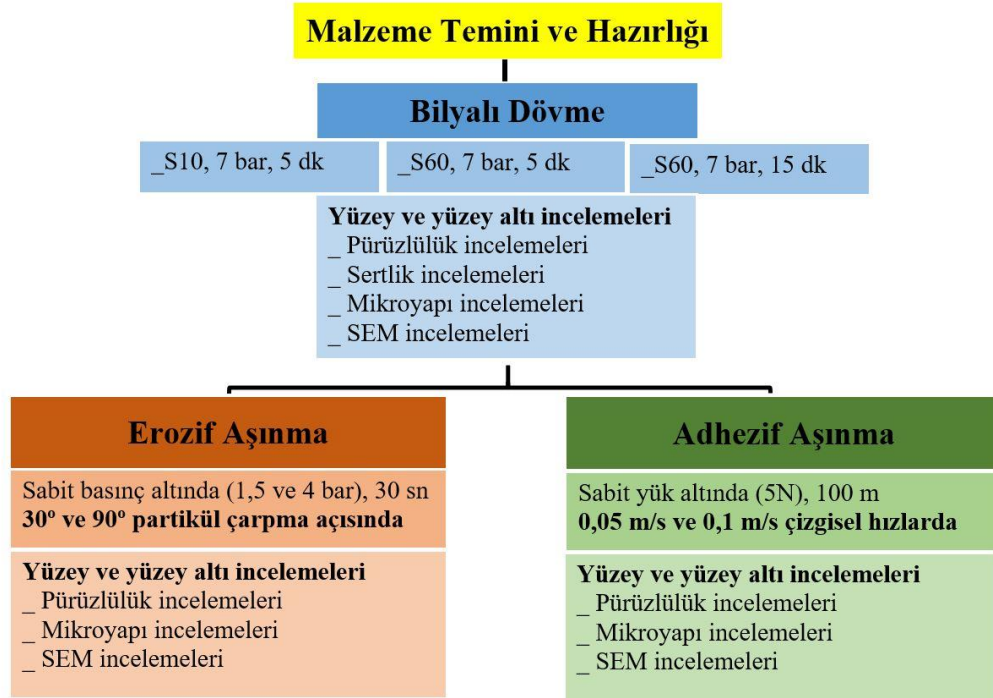
Ticari adı	Chronital S10, Chronital S60						
Tanımı	Paslanmaz çelik bilya (Atomizasyon işlemi ile dökülmüş paslanmaz küresel çelik bilya)						
Mikroyapısı	Östenitik						
Kimyasal Bileşenleri % ağırlık	C	Cr	Si	Mn	Ni	S	P
	0,10- 0,13	18,0- 19,0	<3,0	<2,0	8,0- 10,0	<0,03	<0,04
Spesifik Yoğunluğu	4,70 (g/cm ³)						
Özgül Ağırlığı	7,90 (kg/cm ³)						
Sertlik	450 (HV1) (EN ISO 6507-1)						



Şekil 4.8. a) ve b) S60 bilya, c) ve d) S10 bilya SEM görüntüleri

4.2.3. Yöntemler

İkinci aşama deneysel çalışmalar için birinci aşamada gerçekleştirilen deneylerin sonuçları irdelenmiştir. Bu irdeleme sonucunda gerek bilyalı dövme parametreleri (basınç, süre, bilya türü ve boyutu) gerek numune geometrisi revize edilmiştir. Diğer yandan ikinci aşamada gerçekleştirilen en önemli yenilik bilyalı dövme işlemlerinin tasarımı ve imalatı araştırmacı ve araştırma ekibi tarafından gerçekleştirilen otomatik kontrollü bilyalı dövme test sisteminde gerçekleştirilmesidir. Şekil 4.9' da tez çalışmasında kullanılan yöntemler akış şeması halinde özetlenmiştir.



Şekil 4.9. İkinci aşama deneylerin akış şeması

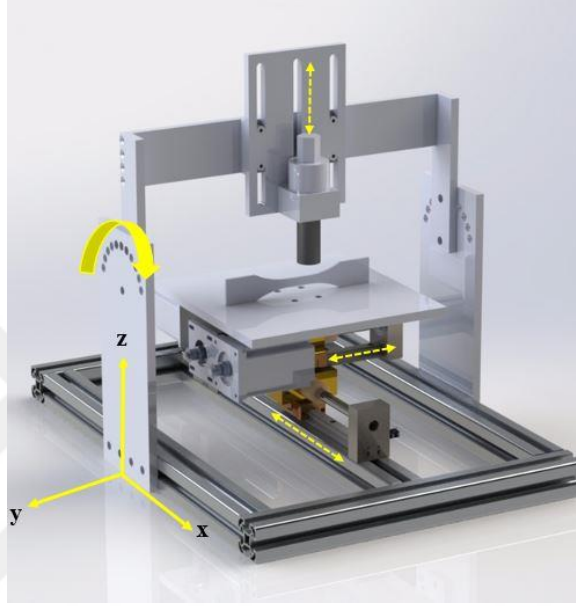
4.2.3.1. Metalografik hazırlık

Uygun numune boyutlarına getirilen Ti6Al4V alaşımı numuneler Metkon marka yarı otomatik zımpara cihazı ile sırasıyla 320, 600, 1200 meshlik zımparalar kullanılarak zımparalanmış, bilyalı dövme deneyleri için hazırlanmıştır. Ardından bilyalı dövülen numuneler kesit sertlik ve mikroyapı incelemeleri için Metkon marka hassas kesme cihazı ile elmas kesme diski kullanılarak kesilmiş, soğuk bakalite alınmış ve kesit yüzeylerine zımpara (320, 600, 1200 mesh lik zımparalar) - parlatma (1 ve 3 mikron elmas süspansiyon ve uygun çuhalar) işlemleri uygulanmıştır. Parlatılan numuneler 15 dakika süre ile ultrasonik banyoda temizlenmiştir.

Kesiti alınan numunelerin mikroyapı incelemeleri için Kroll dağlayıcısı hazırlanmış ve 5 s dağlanmıştır. Kroll dağlayıcısı içeriğinde 2 ml HF, 6 ml HNO₃, 92 ml H₂O kullanılmıştır [8]. Bilyalı dövülen numunelerin aşınma testleri (erozif ve adhezif aşınma testleri) sonrası kesit mikroyapı incelemeleri için aynı yöntemler kullanılmıştır.

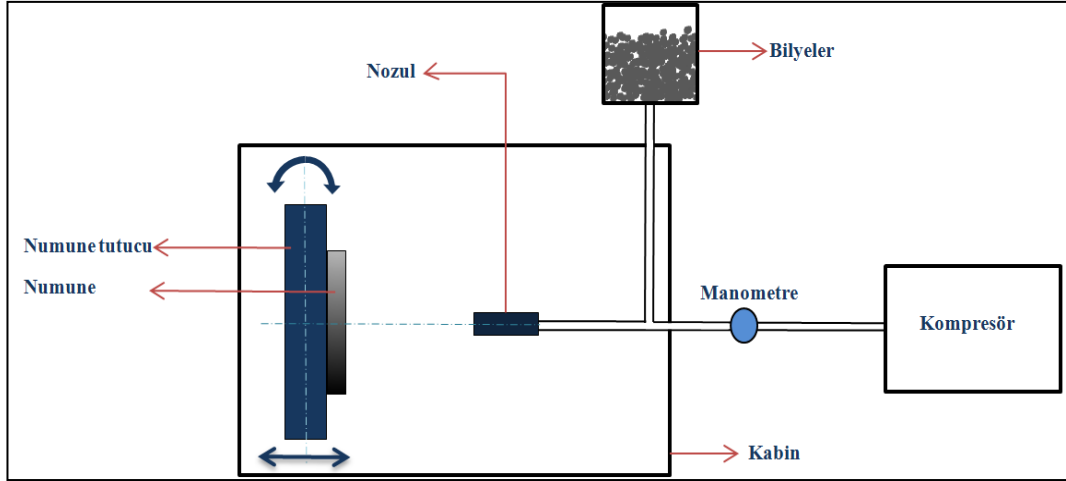
4.2.3.2. Bilyalı dövme

Bilyalı dövme işlemleri Kocaeli Üniversitesi, Ford Otosan İhsaniye Otomotiv MYO'da, Yüzey İşlemleri Laboratuvarı'nda bulunan özel olarak tasarlanan CNC kontrollü bilyalı dövme test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.10' da özel olarak tasarlanan bilyalı dövme test düzeneğinin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.10. Otomatik kontrollü bilyalı dövme sistemi 3 boyutlu görüntüsü

CNC kontrollü bilyalı dövme test cihazında bilyalar bir kompresörden sağlanan basınçlı hava ile hızlandırılarak numune yüzeyine çarptırılmaktadır. Basınçlı hava bir manometre ile kontrol edilir istenilen basınç değerine getirilir. Numunenin bağlandığı tabla x-y eksenini boyunca otomatik hareket edebilmektedir. Bu sayede, numune yüzeylerinde istenilen hızda ve alanda tarama yapılarak bilyalı dövme işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Nozulun z eksenini boyunca hareketi manuel olup, istenilen mesafede ve açıda dövme işlemleri gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.11' de bilyalı dövme yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.11. Bilyalı dövme işlemi şematik gösterimi

Bilyalı dövme testleri Tablo 4.9’ de özetlenen parametreler doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda iki farklı boyutta (0,09-0,14 ve 0,7-1,00 mm) paslanmaz çelik bilya, sabit bilya püskürtme basıncında (7 bar), farklı sürelerde (5 ve 15 dk) numune yüzeyine püskürtülmüştür.

Tablo 4.9. Bilyalı dövme işlemi operasyon parametreleri

Bilya türü	S10	S60
Bilya çapı (mm) (Elek aralığı)	0,09 - 0,14	0,7 - 1,00
Bilya sertliği (HV1)	450	
Püskürtme basıncı (bar)	7	
Çarpma açısı (°)	90	
Süre (dk)	5 ve 15	

4.2.3.3. Almen şiddetinin belirlenmesi

Endüstriyel bilyalı dövme işlemlerinde işlem parametrelerinin kontrolü ve sistemin güvenilirliğinin belirlenmesi amacı ile her dört saatte bir Almen şeritleri dövülerek oluşan yay yükseklikleri kontrol edilmektedir. Literatür incelendiğinde bazı çalışmalarda parametreler verilmeksizin Almen şiddeti değeri üzerinden alınan sonuçlara göre incelemeler gerçekleştirildiğinden [127] tez çalışmasında belirlenen parametreler altında Almen şeritleri dövülerek işlem parametrelerinin yarattığı Almen şiddeti değerleri belirlenmiştir. Dövülen Almen şeritlerinde oluşan yayın yüksekliği Şekil 4.12’ de verilen endüstride kullanılan “Almen Gage” adı verilen cihaz yardımı ile belirlenmiştir.



Şekil 4.12. Almen gage

4.2.3.4. Bilyaların hızlarının belirlenmesi

Partikül çarpma hızı; katı partikül erozyonu, kumlama, soğuk plazma spreycaplama, termal püskürtme ile kaplama gibi birçok işlemler için en önemli parametrelerden biri olarak kabul edilebilir [1- 5]. Bu nedenle, lazer doppler hız ölçer, fotoğraf tekniği [135, 136], çift disk [137] vb. gibi çeşitli yöntemler parçacık hızı ölçmek için kullanılmaktadır [2]. Deneysel çalışmalarda, çift disk metodu ile paslanmaz çelik bilyalar (S10 ve S60) 7 bar bilya püskürtme basıncı ile hızlandırılmış ve bu basınçta bilya çarpma hızları belirlenmiştir. Şekil 4.13' de bilya çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler cihazın CAD resmi üzerinde verilmiştir.

$$t = \frac{60 \times \theta}{360 \times n} \quad (4.2)$$

t = bilyaların üst diskten alt diske ulaşmaları esnasında geçen süre (s)

θ = İlk iz ile ikinci iz arasındaki açı (°)

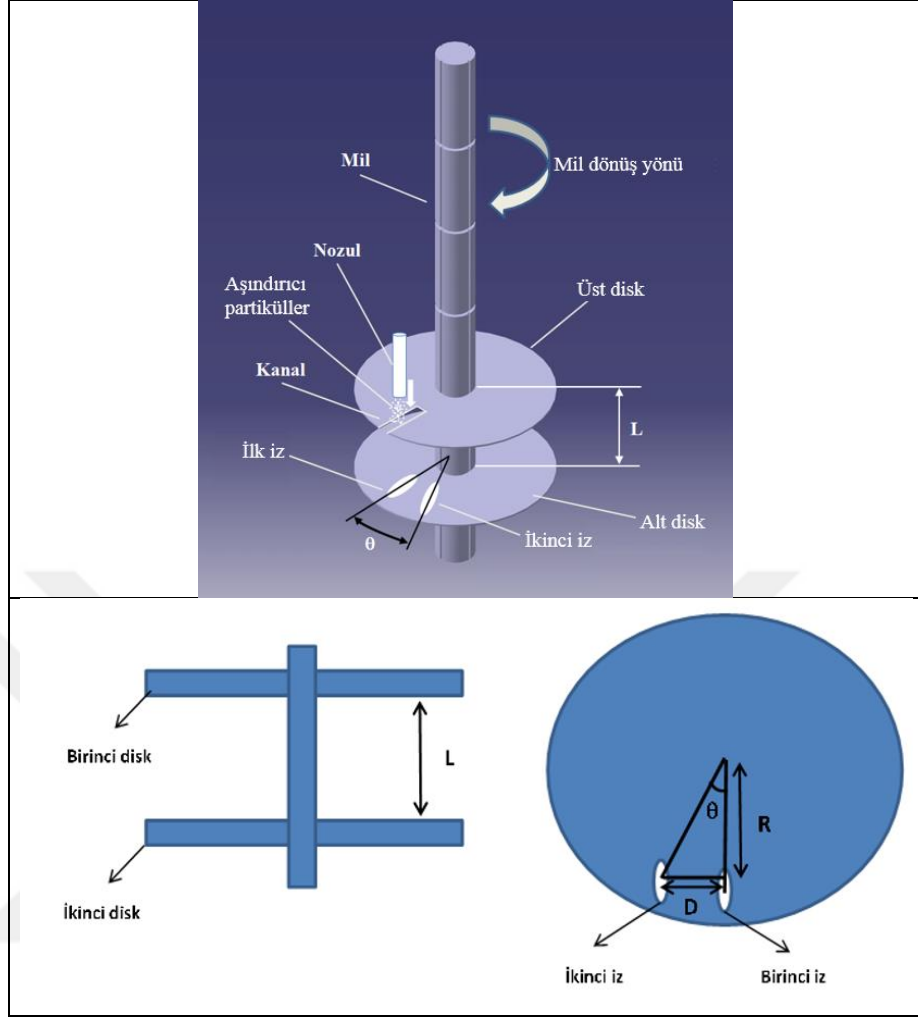
n = devir hızı (d/dk)

Daha sonra hesaplanan süre Denklem 4.3' de yerine koyularak partiküllerin çarpma hızı bulunur.

$$V = \frac{L}{t} \quad (4.3)$$

V = bilya çarpma hızı (m.s⁻¹)

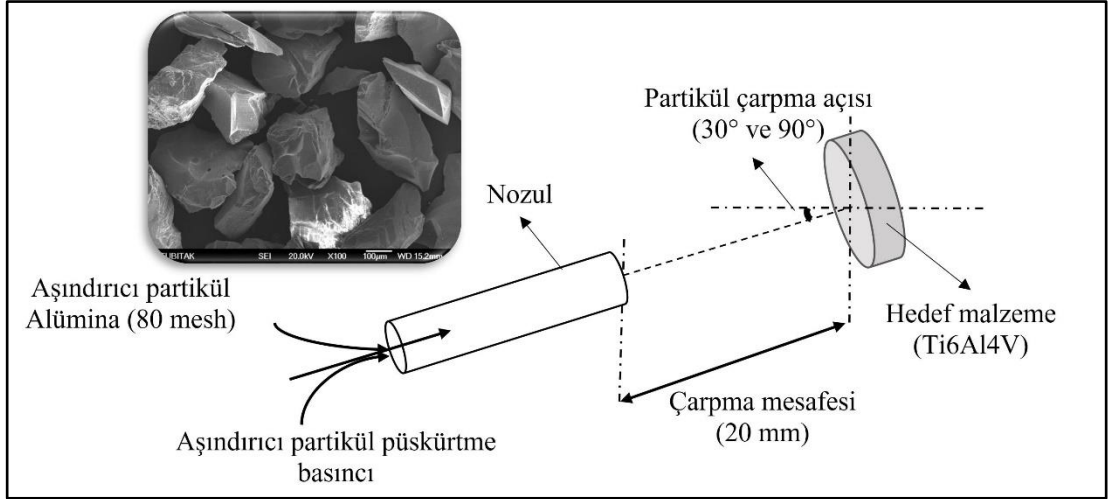
L = diskler arası mesafe (m)



Şekil 4.13. Partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler [138]

4.2.3.5. Eroziyon aşınma deneyleri

Ti6Al4V alaşımı numuneler farklı Almen şiddetlerinde bıyalı dövüldükten sonra numune yüzeylerine eroziyon aşınma testleri uygulanmıştır. Eroziyon aşınma testleri Kocaeli Üniversitesi, Ford Otosan İhsaniye Otomotiv Meslek Yüksek Okulu'nda bulunan özel olarak taraflanmış CNC kontrollü eroziyon aşınma test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Düzenek aşındırıcı partiküllerin basınçlı hava yardımı ile hızlandırılmasına ve hedef malzeme yüzeyine belirlenen açıda, sürede ve mesafede çarptırılmasına izin vermektedir (Şekil 4.14). Eroziyon aşınma testlerinde kullanılan parametreler Tablo 4.10' da verilmiştir. Eroziyon aşınma sonrası numunelerin ağırlık kaybı hassas terzi kullanılarak belirlenmiştir. Eroziyon aşınma testlerinde 80 mesh boyutunda alümina aşındırıcı partiküller kullanılmıştır.



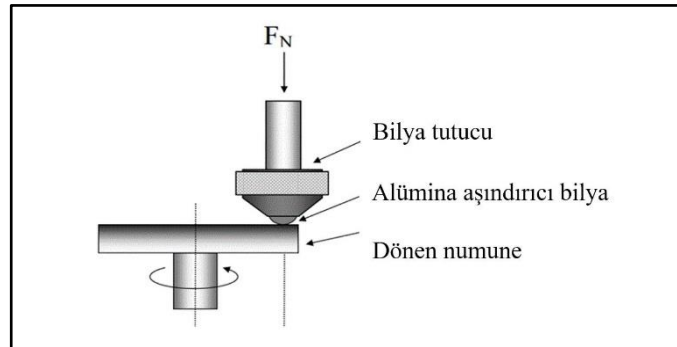
Şekil 4.14. Eroziv aşınma testi şematik gösterim

Tablo 4.10. Eroziv aşınma test parametreleri

Aşındırıcı partikül	Alümina
Aşındırıcı partikül boyutu (mesh)	80
Partikül püskürtme basıncı (bar)	1,5 ve 4
Partikül çarpma açısı (°)	30 ve 90
Süre (s)	30
Nozul çapı (mm)	10
Nozul mesafesi (mm)	20

4.2.3.6. Adhezif aşınma deneyleri

Farklı parametrelerde dövülen Ti6Al4V alaşımı numunelerin aşınma davranışları Kocaeli Üniversitesi, Makine Mühendisliği'nde bulunan Nanovea marka "ball-on-disk" türü aşınma cihazı kullanılarak test edilmiştir. Şekil 4.15' de kullanılan cihazın şematik gösterimi, Tablo 4.11' de ise aşınma testi parametreleri verilmiştir.



Şekil 4.15. Adhezif aşınma testi şematik gösterimi

Adhezif aşınma test cihazı deneyler sırasında sürtünme katsayısı grafiklerini ilerleme mesafesine ve zamana bağlı olarak sahip olduğu program sayesinde vermektedir. Adhezif aşınma testleri sonrası aşınmaya uğrayan numunelerin ve aşındırıcı bilyanın kütle kaybı hassas terazi ile belirlenmiştir.

Tablo 4.11. Aşınma testi parametreleri

Karşıt malzeme	Alümina bilya
Radyal hız	0,05 ms ⁻¹ ve 0,1 ms ⁻¹
Normal yükleme	5 N
Toplam kayma mesafesi	100 m

4.2.3.7. Bilyalı dövme sonrası yüzeylerin morfolojik incelenmesi

Farklı parametreler altında bilyalı dövülen numunelerin yüzeyleri ve kesitleri, bilyalı dövüldükten sonra aşındırılan numunelerin yüzeyleri ve kesitleri Tescan Vega 2 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDS analizleri cihaza ekli Bruker Quantax EDS dedektörü ile gerçekleştirilmiştir.

Bilyalı dövme sonrası gerçekleştirilen erozif aşınma testleri sonrası numune yüzeyine farklı çarpma açılarında (30° ve 90°) gönderilen alümina partiküllerin yüzeye saplanma oranı “Image J” programı kullanılarak belirlenmiştir. Erozif aşınma sonrası yüzeye saplanan alümina aşındırıcı parçaları öncelikle SEM EDS analizi ile belirlenmiştir. Ardından SEM görüntüsüne “Image J” programında skala ayarı ve kontrast ayarı yapılarak yüzeye saplanan partiküllerin alanı ölçülmüş ve yüzdesel olarak belirlenmiştir [139]. Yöntem, Şekil 4.16’ de verilen akış şemasında özetlenmiştir.

4.2.3.8. Sertlik incelemeleri

Bilyalı dövme parametrelerinin yüzey ve yüzey altı sertliğine olan etkisini incelemek amacı ile Kocaeli Üniversitesi, Makine Mühendisliği’ nde bulunan mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı ile kullanılarak sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümleri 50 µm sıklıkla HV_{0,1} yük uygulayarak gerçekleştirilmiştir. Her bir nokta için beş tekrar yapılmıştır.

Erozif aşınmaya uğrayan yüzeyin SEM görüntüsü
_ BSE modunda uygun görüntü
_ Yüzeğe saplanan partiküllerin EDS ile belirlenmesi



Image J programı kullanılarak SEM görüntülerinin analiz edilmesi
_ SEM görünüşünün Image J programında açılması
_ Programın skalasının SEM görüntüsüne bağlı ayarlanması
_ İnceleme yapılacak alanın belirlenmesi
_ "Threshold" komutu uygulanarak saplanan partiküllerin sınırlarının belirlenmesi
_ Filtre uygulayarak saplanan partiküllerin sınırlarının netleştirilmesi
_ Saplanan partikülleri alanlarının ölçülmesi

Şekil 4.16. Image J programının uygulama akışı

4.2.3.9. Pürüzlülük ölçümü

Bilyalı dövme sonrası ve erozif aşınma sonrası yüzeylerin pürüzlülük değeri Mitutoyo Surfes SJ-310 marka pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Cihaz temaslı uçlu olup numune yüzeyinde 4 mm uzuluğunda bir çizgi taramaktadır. Her bir pürüzlülük ölçümü beş tekrarla gerçekleştirilmiştir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Tez Çalışması Kapsamında Gerçekleştirilen Ön Çalışmalar

Bu bölümde, doktora tezi için gerçekleştirilen ön çalışmaların sonuçları detaylı olarak açıklanacaktır. Gerçekleştirilen literatür çalışmaları sonucunda elde edilen bilgiler doğrultusunda ön deneyler gerçekleştirilmiş, ön deneyler ve sonuçları doktora tezinin ikinci aşamasında gerçekleştirilen çalışmalara ışık tutmuştur. Ön çalışmalar sonucunda elde edilen ilk sonuçlara göre alt yapısal eksiklikler giderilerek ilerleyen süreçteki olası problemler giderilmeye ve literatürdeki özgün değer yakalanmaya çalışılmıştır.

Ön çalışmalarda gerçekleştirilen deneyler ve sonuçları üç ana başlık altında toplanabilir;

- i) Ti6Al4V alaşımının farklı parametreler altında (bilya boyutu, bilya çarpma açısı ve bilya püskürtme basıncı) dövülmesi ile yüzey pürüzlülüğünün ve yüzey sertliğinin değişiminin incelenmesi,
- ii) Ti6Al4V alaşımının paslanmaz çelik bilyalar kullanılarak (farklı bilya boyutu ve farklı bilya püskürtme basıncı) dövülmesi ile yüzey pürüzlülüğünün ve yüzey morfolojisinin incelenmesi,
- iii) Ti6Al4V alaşımının farklı sürelerde dövülmesi sonrası adhezif aşınma davranışının incelenmesi.

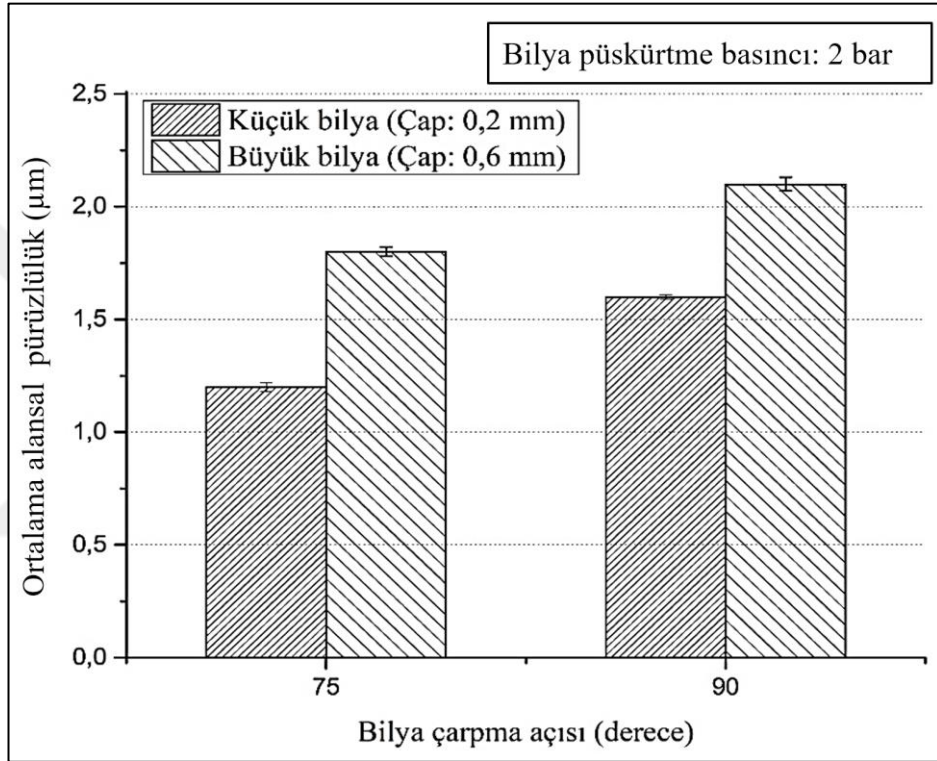
Bu bölümde yukarıda verilen üç başlık altında elde edilen sonuçlar detaylı olarak anlatılarak, elde edilen sonuçlara bağlı tezin ilerleyen dönemlerinde değişikliğe gidilen yöntemler ve nedenleri detaylı olarak anlatılacaktır.

5.1.1. Ti6Al4V alaşımının farklı parametreler altında dövülmesi sonrası yüzey pürüzlülüğünün ve yüzey sertliğinin incelenmesi

Bu çalışmada, farklı parametreler (bilya boyutu, bilya çarpma açısı ve bilya püskürtme basıncı) altında dövülen Ti6Al4V alaşımının yüzey pürüzlülüğünün ve sertliğinin değişimine parametrelerin etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir.

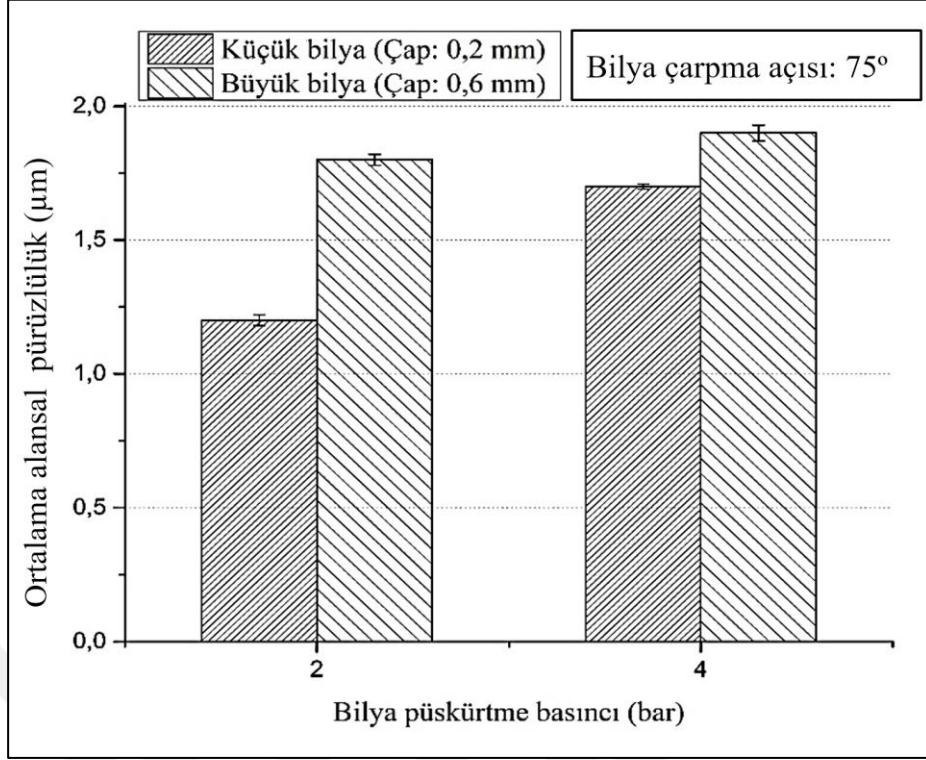
5.1.1.1. Yüzey pürüzlülüğü incelemeleri

Şekil 5.1’ de 2 bar püskürtme basıncı altında farklı bilya boyutları (0,20 ve 0,60 mm) ve farklı çarpma açılarında (75° ve 90°) gerçekleştirilen bilyalı dövme sonrası elde edilen ortalama alansal pürüzlülük değerleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde ortalama alansal pürüzlülüğün bilya çarpma açısı ve boyutu [54] ile değişim gösterdiği belirlenmiş, büyük bilya ve 90° çarpma açısında daha yüksek pürüzlülük değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.1. Bilya çarpma açısına bağlı pürüzlülük değişimi

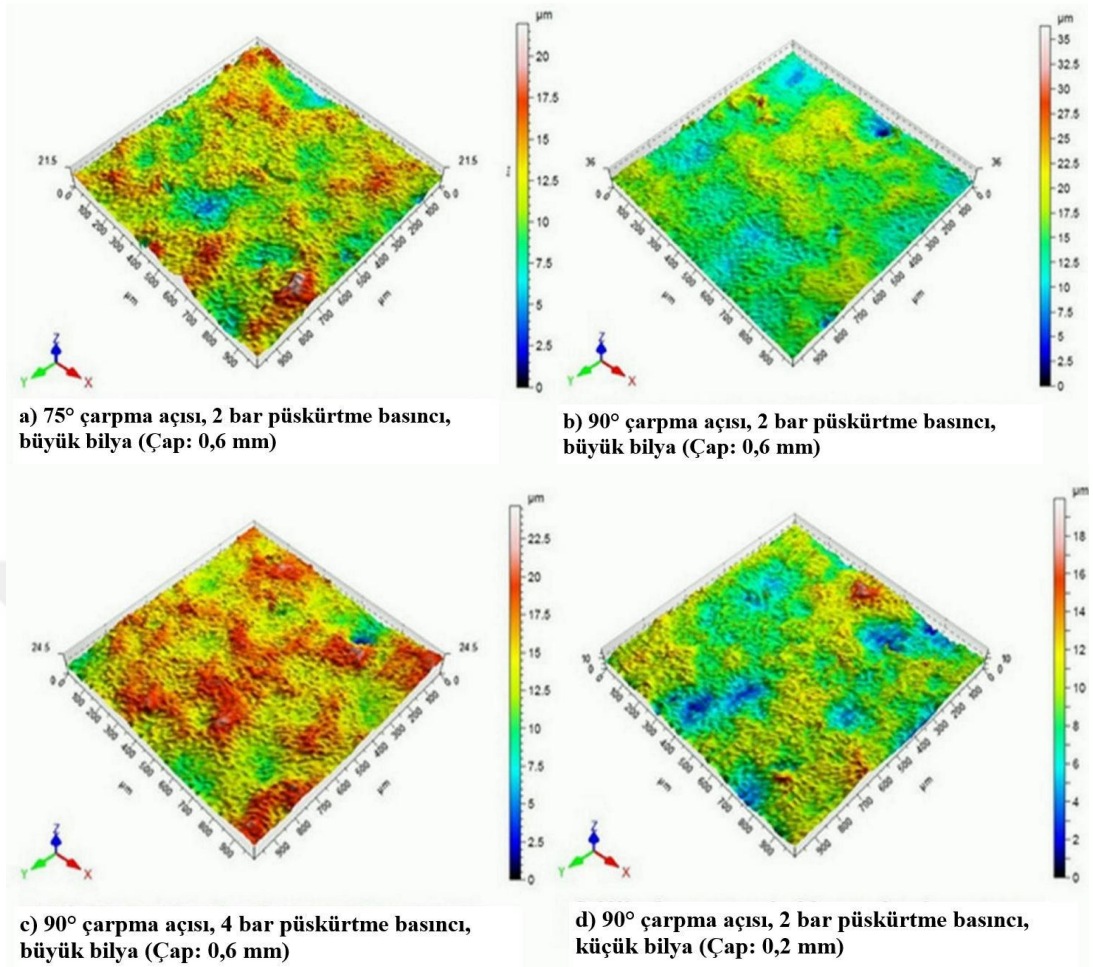
Şekil 5.2’ de 75° bilya çarpma açısında gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemleri sonrasında yüzey pürüzlülüğündeki değişimin püskürtme basıncına bağlı olarak verilmiştir. Her iki boyuttaki bilya için bilya püskürtme basıncının artması ile yüzey pürüzlülüğü değerinin arttığı [54], küçük bilyalarda bu artışın daha şiddetli olduğu belirlenmiştir [61].



Şekil 5.2. Bilya püskürtme basıncına bağlı pürüzlülük değişimi

Şekil 5.3'te bilyalı dövme sonrası değişen yüzey topografileri verilmiştir. Şekil 5.3a ve b incelendiğinde bilya çarpma açısının dikleşmesi ile yüzeyin daha pürüzlü olduğu, yüzeyde daha derin çukurların oluştuğu görülmektedir. Şekil 5.3a ve c'de ise, bilya püskürtme basıncının artması ile, her bir bilyanın sahip olduğu kinetik enerjinin artması ile yüzeyde bilyaların yarattığı çukurların derinleştiği, buna bağlı olarak pürüzlülük değerlerinde artış gerçekleştiği belirlenmiştir [25]. Küçük bilyaların yüzeyde daha düşük plastik deformasyon meydana getirdiği Şekil 5.3d incelendiğinde görülmektedir.

Genel olarak Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 incelendiğinde yüksek basınçla hızlandırılan bilyaların sahip oldukları yüksek kinetik enerjileri ile yüzey daha fazla plastik deformasyona uğrattığı, dikleşen çarpma açısında tüm kinetik enerjilerini kullanırken, eğik çarpma açısında (75°) hızın dik bileşenini kullandıklarından düşük pürüzlülük oluşturdukları belirlenmiştir. Ayrıca küçük çaplı bilyaların sahip oldukları düşük kütleleri nedeni ile büyük bilyalara kıyasla daha az pürüzlülük oluşturdukları belirlenmiştir [32].

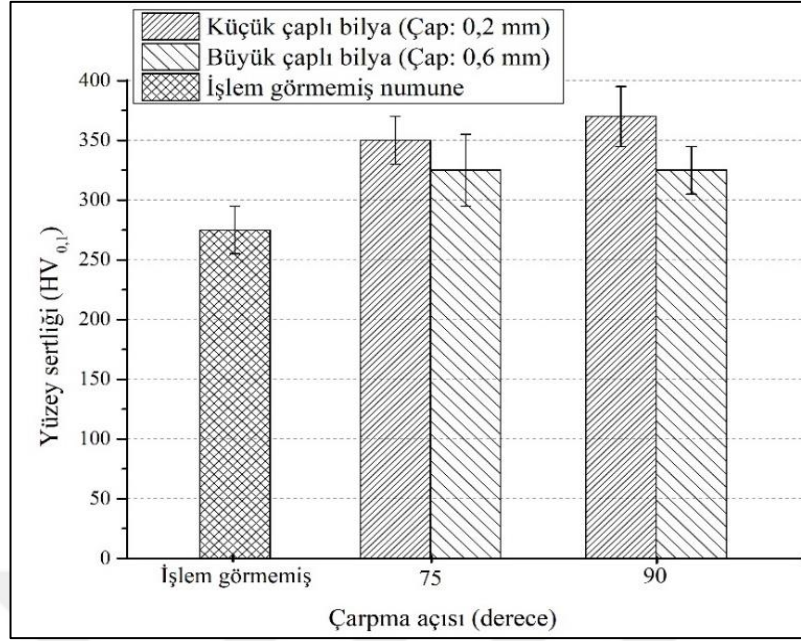


Şekil 5.3. Bilyalı dövme sonrası yüzey morfolojisi

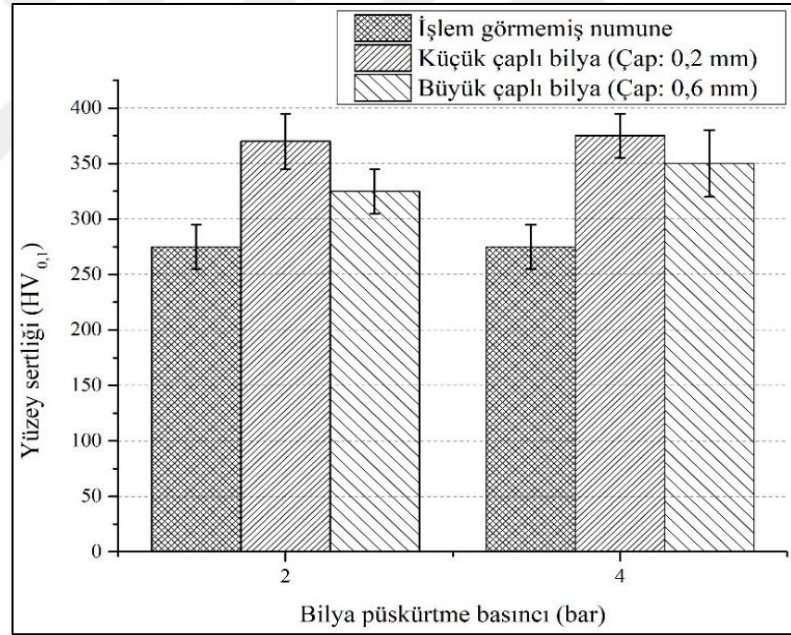
5.1.1.2. Yüzey sertliğinin incelenmesi

Şekil 5.4' de 2 bar bilya püskürtme basıncında, bilya çarpma açısına ve bilya boyutuna göre değişen yüzey sertliği değerleri verilmiştir. Her iki bilya çarpma açısı değerinde bilyalı dövmenin etkisi ile numune yüzeyinin sertlik değeri artarken [127], en fazla sertlik değeri 90° bilya çarpma açısında gerçekleşmiştir. Ayrıca küçük çaplı bilyaların yüzey sertliğini daha fazla arttırdığı belirlenmiştir.

Şekil 5.5' de 90° bilya çarpma açısında 2 ve 4 bar püskürtme basıncında numunelerin sertlik grafiği verilmiştir. Bilya püskürtme basıncının artması ile büyük çaplı bilyaların yüzeyde oluşturdukları sertlik değerinde az da olsa artış gözlemlenirken, küçük çaplı bilyaların kullanımı ile bariz bir artış gerçekleşmemiştir.



Şekil 5.4. Bilya çarpma açısına bağlı sertlik değişimi



Şekil 5.5. Bilya püskürtme basıncına bağlı sertlik değişimi

5.1.1.3. Genel sonuçlar ve çözümler

Gerçekleştirilen çalışmalar sonrası elde edilen sonuçlar dahilinde aşağıda listelenen düzenlemeler gerçekleştirilmiştir;

- Bilyalı dövme işlemlerinde kullanılan çelik bilyaların paslanması nedeni ile yüzeyde oksit tabakası oluşmaktadır. Paslanan bilyalar tekrarlı kullanıma elverişli

değildir. Bu nedenle ilerleyen tez çalışmasında çelik bilyalar değiştirilerek paslanmaz çelik bilyalar kullanılacaktır.

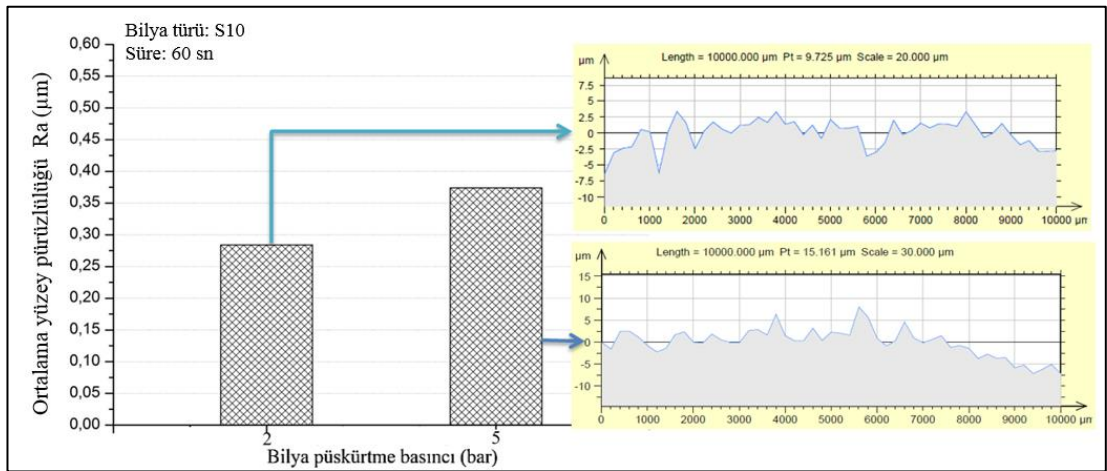
- ii) Yüksek püskürtme basıncında dövülen numunelerde hem yüzey pürüzlülüğünün hem de yüzey sertliğinin daha fazla olması sebebi ile tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde yüksek basınçlara çıkılması gerekliliği belirlenmiştir.
- iii) Ön çalışmada 75° ve 90° bilya çarpma açıları kullanılmıştır. 90° bilya çarpma açısında bilyanın sahip olduğu kinetik enerjiyi malzeme yüzeyine kayıp vermeden çarpması nedeni ile tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde 90° bilya çarpma açısının kullanılmasına karar verilmiştir.

5.1.2. Ti6Al4V alaşımının paslanmaz çelik bilyalar kullanılarak dövülmesi sonrası yüzey pürüzlülüğünün ve yüzey morfolojisinin incelenmesi

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımı numuneler, paslanmaz çelik bilyalar kullanılarak farklı parametreler altında (farklı bilya boyutu ve farklı bilya püskürtme basıncı) dövülmüş ve bu parametrelerinin Ti6Al4V alaşımının yüzey pürüzlülüğüne ve 3 boyutlu yüzey topografisine etkisi incelenmiştir.

5.1.2.1. Pürüzlülük incelemeleri

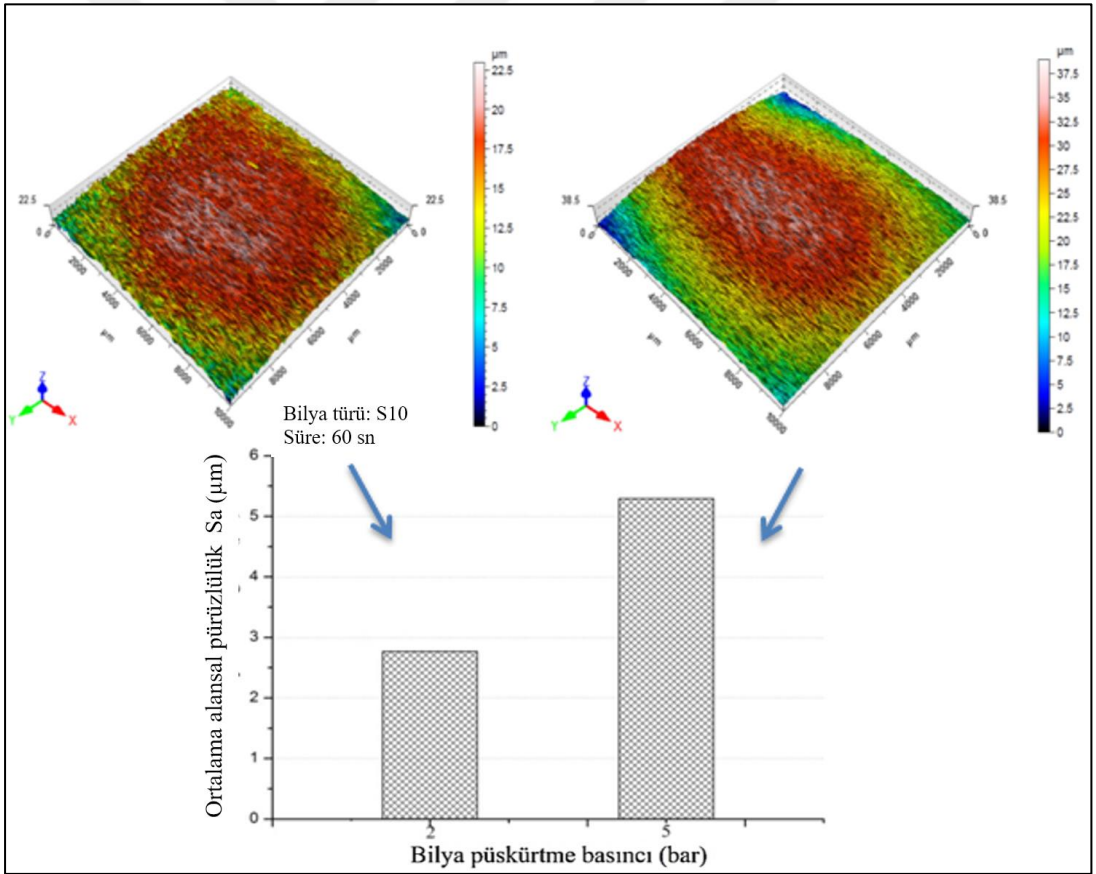
Bilya püskürtme basıncının yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemek amacı ile Ti6Al4V alaşımı numuneler farklı bilya püskürtme basıncında (2 bar ve 5 bar) sabit bilya boyutunda dövülmüştür.



Şekil 5.6. Püskürtme basıncının çizgisel yüzey pürüzlülüğüne (Ra) etkisi

Şekil 5.6’te küçük çaplı (0,09 - 0,14 mm elek aralığı) paslanmaz çelik bilyalar kullanılarak 2 bar ve 5 bar püskürtme basıncında dövülen numunelerin ortalama çizgisel yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri ve çizgisel pürüzlülüğün ölçüldüğü kesit görüntüsü verilmiştir. Şekil incelendiğinde ortalama çizgisel pürüzlülüğün (R_a) püskürtme basıncının artması ile arttığı belirlenmiştir.

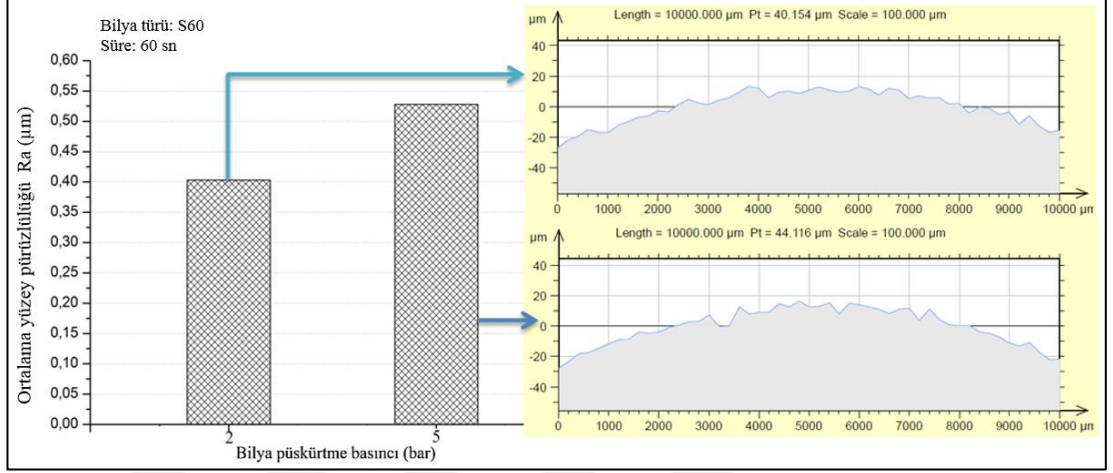
Şekil 5.7’ de ise Şekil 5.6’ da verilen parametreler altında dövülen numunelerin ortalama alansal pürüzlülüğü (S_a) değerleri ve 3 boyutlu yüzey görüntüsü verilmiştir. Ortalama alansal yüzey pürüzlülüğünün bilya püskürtme basıncının artması ile arttığı belirlenmiştir. Literatür incelendiğinde bilyalı dövme işlemi ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı [94], artan püskürtme basıncı ile daha pürüzlü yüzeyler elde edildiği belirlenmiştir [66]. Byrne ve arkadaşları da gerçekleştirdikleri çalışmalarda püskürtme basıncının artması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığını saptamışlardır [39].



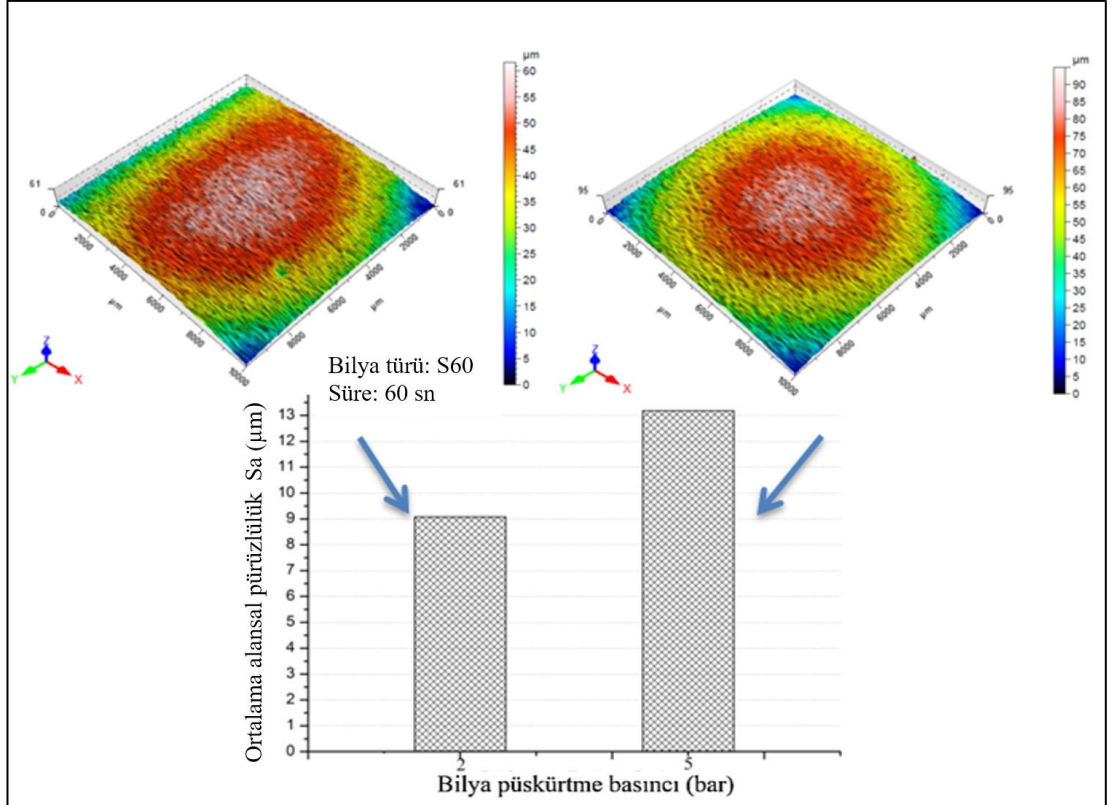
Şekil 5.7. Püskürtme basıncının alansal yüzey pürüzlülüğüne (S_a) etkisi

Şekil 5.8’ de S60 (0,7-1 mm elek aralığı) paslanmaz çelik bilyalar kullanılarak 2 bar ve 5 bar püskürtme basıncında dövülen numunelerin ortalama çizgisel yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri ve çizgisel pürüzlülüğün ölçüldüğü kesit görüntüsü

verilmiştir. Şekil incelendiğinde ortalama çizgisel pürüzlülüğün (R_a) püskürtme basıncının artması ile arttığı belirlenmiştir. Bu sonuçtan her iki farklı bilya boyutunda da püskürtme basıncının artması ile ortalama çizgisel yüzey pürüzlülüğü değerinin arttığı saptanmıştır.



Şekil 5.8. Püskürtme basıncının çizgisel yüzey pürüzlülüğüne (R_a) etkisi



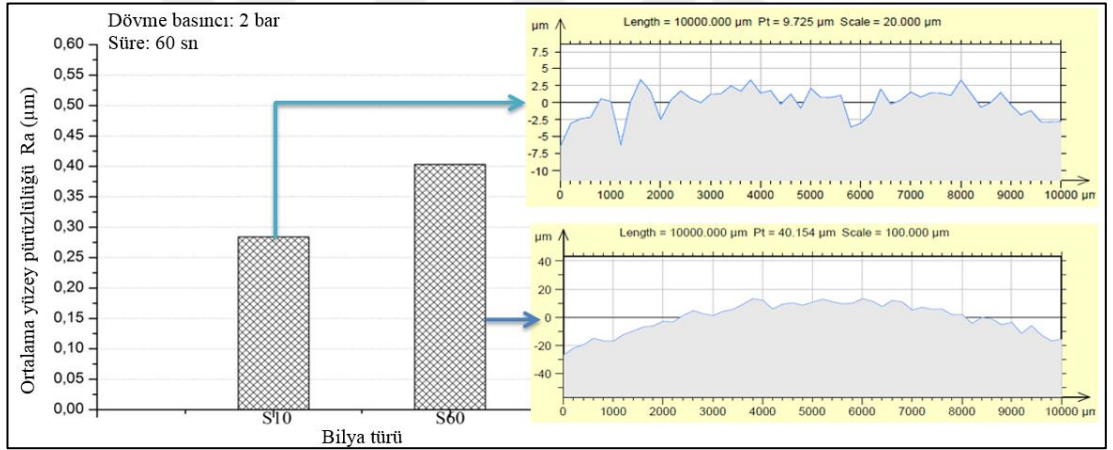
Şekil 5.9. Püskürtme basıncının alansal yüzey pürüzlülüğüne (S_a) etkisi

Şekil 5.9' da ise Şekil 5.8' de verilen parametreler altında dövülen numunelerin ortalama alansal pürüzlülüğü incelenmiştir. Şekilde numunelerin ortalama alansal

yüzey pürüzlülüğü (S_a) değerleri ve alansal pürüzlülüğü ölçülen numunelerin alanın 3 boyutlu yüzey görüntüsü verilmiştir. S60 bilyalar ile 2 ve 5 barda dövülen numunelerin alansal yüzey pürüzlülüğünün bilya püskürtme basıncının artması ile arttığı belirlenmiştir.

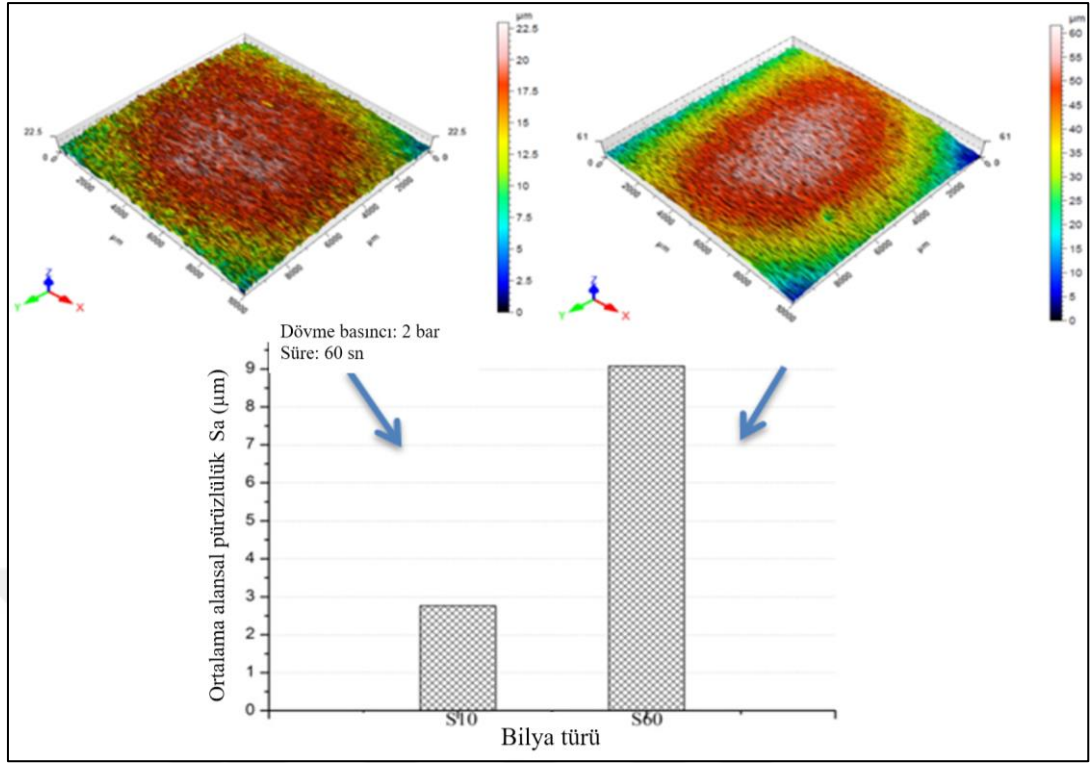
Bilya boyutunun yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemek amacı ile Ti6Al4V alaşımı numuneler farklı bilya çaplarında (S10 (0,09-0,14 mm elek aralığında) ve S60 (0,7-1 mm elek aralığında)) sabit bilya püskürtme basıncında dövülmüştür.

Şekil 5.10' te 2 bar püskürtme basıncı ile S10 (0,09 - 0,14 mm elek aralığı) ve S60 (0,7 - 1 mm elek aralığında) paslanmaz çelik bilyalar kullanılarak dövülen numunelerin ortalama çizgisel yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri ve çizgisel pürüzlülüğün ölçüldüğü kesit görüntüsü verilmiştir. Şekil incelendiğinde ortalama çizgisel pürüzlülüğün (R_a) bilya çapının artması ile arttığı belirlenmiştir.



Şekil 5.10. Bilya boyutunun çizgisel yüzey pürüzlülüğüne (R_a) etkisi

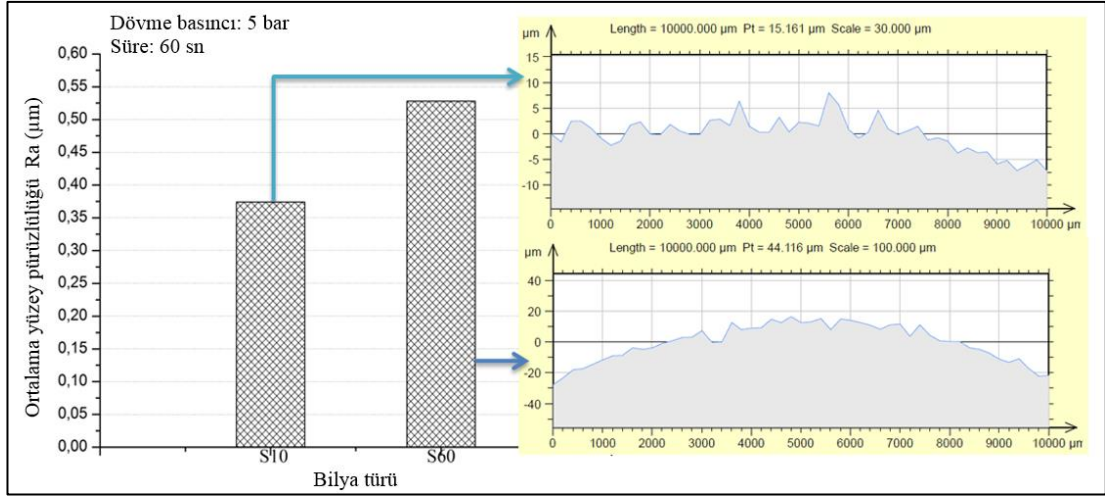
Şekil 5.11' de ise Şekil 5.10' da verilen parametreler altında dövülen numunelerin ortalama alansal pürüzlülüğü (S_a) değerleri ve 3 boyutlu yüzey görüntüsü verilmiştir. Ortalama alansal yüzey pürüzlülüğünün bilya boyutuna bağlı olarak değişim gösterdiği, büyük boyutlu bilyalar (S60) ile dövülen numunelerin küçük boyutlu bilyalar (S10) ile dövülen numunelerin yüzeylerine göre daha pürüzlü bir yüzeye sahip olduğu tespit edilmiştir.



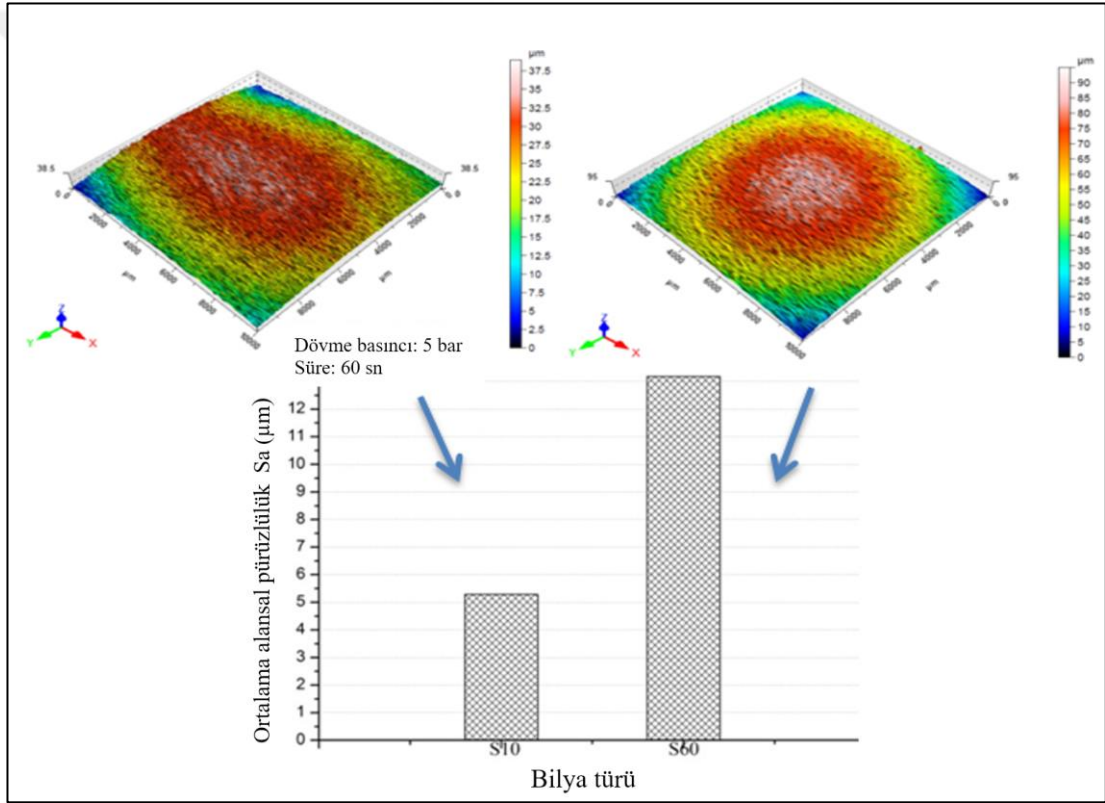
Şekil 5.11. Bilya boyutunun alansal yüzey pürüzlülüğüne (S_a) etkisi

Şekil 5.12’ de 5 bar püskürtme basıncı ile S10 (0,09-0,14 mm elek aralığı) ve S60 (0,7-1 mm elek aralığında) paslanmaz çelik bilyalar kullanılarak dövülen Ti6Al4V alaşımı numunelerin ortalama çizgisel yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri ve çizgisel pürüzlülüğün ölçüldüğü kesit görüntüsü verilmiştir. Şekil incelendiğinde ortalama çizgisel pürüzlülüğün (R_a) bilya çapının artması ile arttığı belirlenmiştir.

Şekil 5.13’ de ise Şekil 5.12’ de verilen parametreler altında dövülen numunelerin ortalama alansal pürüzlülüğü incelenmiştir. Şekilde numunelerin ortalama alansal yüzey pürüzlülüğü (S_a) değerleri ve alansal pürüzlülüğü ölçülen numunelerin alanın 3 boyutlu yüzey görüntüsü verilmiştir. Alansal yüzey pürüzlülüğünün de bilya boyutuna bağlı olarak değişim gösterdiği, büyük boyutlu bilyalar (S60) ile dövülen numunelerin küçük boyutlu bilyalar (S10) ile dövülen numunelerin yüzeylerine göre daha pürüzlü bir yüzeye sahip olduğu tespit edilmiştir.



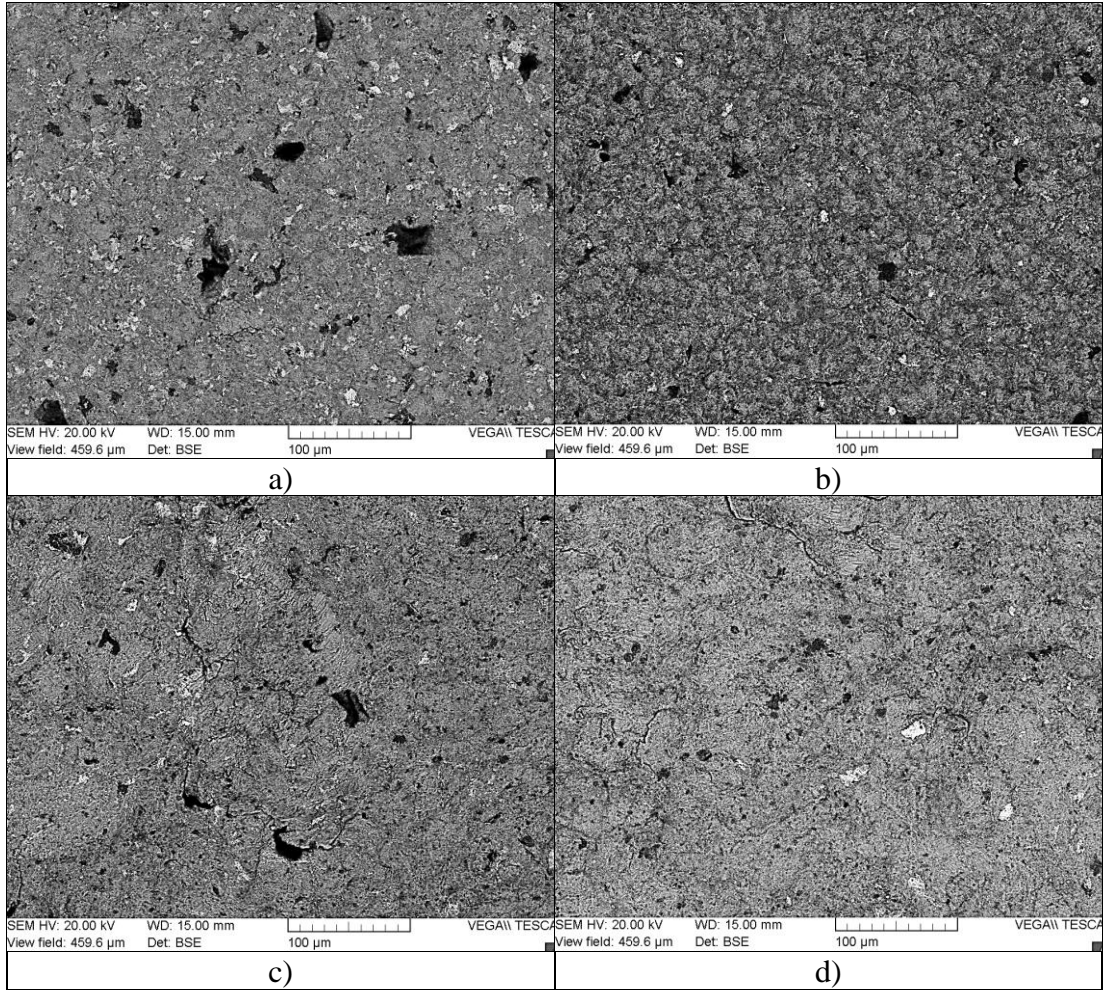
Şekil 5.12. Bilya boyutunun çizgisel yüzey pürüzlülüğüne (R_a) etkisi



Şekil 5.13. Bilya boyutunun alansal yüzey pürüzlülüğüne (S_a) etkisi

5.1.2.2. SEM incelemeleri

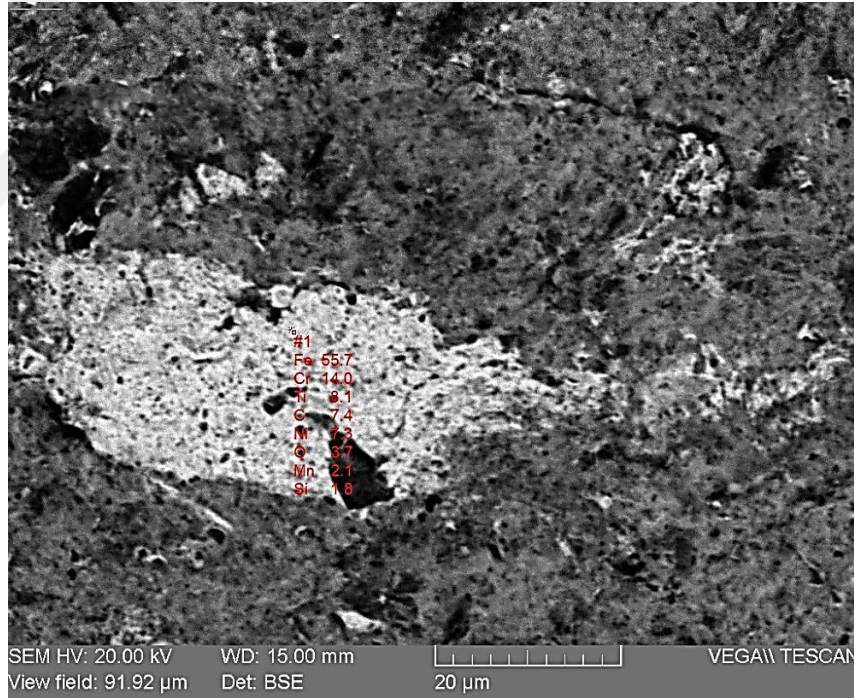
Şekil 5.14'te farklı parametreler altında dövülen Ti6Al4V alaşımının SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.14a ve b incelendiğinde küçük çaplı bilyaların farklı püskürtme basınçlarında (2 ve 5 bar) malzeme yüzeyinde oluşturdukları plastik deformasyonlar net bir şekilde gözükmemektedir. SEM görüntüleri incelendiğinde 5 bar püskürtme basıncı ile dövülen yüzeylerde oluşan plastik deformasyonların daha şiddetli olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak püskürtme basıncının artması ile bilyaların sahip olduğu kinetik enerjinin artması, artan kinetik enerji ile malzemeye çarpan bilyaların malzeme yüzeyinde daha fazla plastik deformasyona neden olduğu söylenebilir. Bir önceki bölümde püskürtme basıncının artması ile ortama çizgisel ve alansal pürüzlülüğün artmasının da artan kinetik enerjileri ile bilyaların malzemenin yüzeyini daha fazla plastik şekil değişimine uğratması sebep olarak gösterilebilir.



Şekil 5.14. Farklı parametreler altında gerçekleşen bilyalı dövme işlemleri sonrası SEM incelemeleri a) 2 bar_S10, b) 5bar_S10, c) 2 bar_S60, d) 5 bar_S60

Şekil 5.14b ve d’de incelendiğinde 5 bar püskürtme basıncında farklı boyutta bilyalar (S10 ve S60) kullanarak dövülen numunelerin görüntüleri verilmiştir. Bilya boyutunun artması ile yüzeyde çok daha büyük kraterler oluştuğu görülmüştür. Şekil 5.14b incelendiğinde küçük bilyaların yüzeyde oluşturdukların izin Şekil 5.14d’ de oluşan ize göre daha homojen olduğu söylenebilir. Şekil 5.14d incelendiğinde çarpma şiddetinin etkisi ile Ti6Al4V malzemenin yüzeyinde mikro sürme mekanizmalarının oluştuğu ve büyük çatlaklar görülmektedir.

Şekil 5.14’ de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde tüm görüntülerde Ti6Al4V malzemesinin yüzeyinde aydınlık kontrastta bir faz gözükmemektedir. Şekil 5.15’ te, Şekil 5.14-c’ de verilen görüntünün EDS alınmış hali verilmiştir. Şekildeki aydınlık fazın bilyalı dövme işleminde kullanılan paslanmaz çelik bilya kalıntısı olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.15. Bilyalı dövme sonrası SEM görüntüsü ve EDS analizi

5.1.2.3. Genel sonuçlar ve çözümler

Gerçekleştirilen çalışmalar sonrası elde edilen sonuçlar dahilinde aşağıda listelenen düzenlemeler gerçekleştirilmiştir;

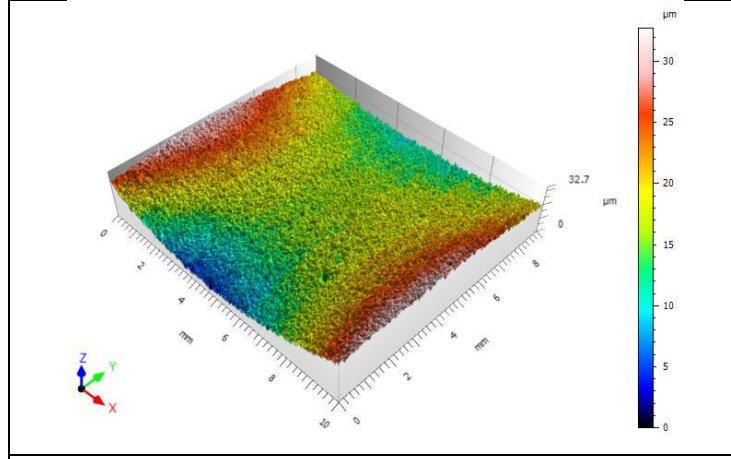
- i) Paslanmaz çelik bilyaların tekrarlı kullanılabilirliği ve bilyalı dövme sürecince etkin oldukları belirlenmiştir. Tez çalışmasının sonraki aşamalarında paslanmaz çelik bilya kullanımına karar verilmiştir.
- ii) Bilya püskürtme basıncında bilyalı dövme test sisteminin çıkabildiği maksimum bilya püskürtme basıncına çıkılarak bilyaların hızlandırılmasına karar verilmiştir.
- iii) Bilyaların hızlarının belirlenmesine karar verilmiştir.
- iv) Bilyalı dövme süresinin arttırılmasına karar verilmiştir.

5.1.3. Ti6Al4V alaşımının farklı sürelerde dövülmesi sonrası adhezif aşınma davranışının incelenmesi

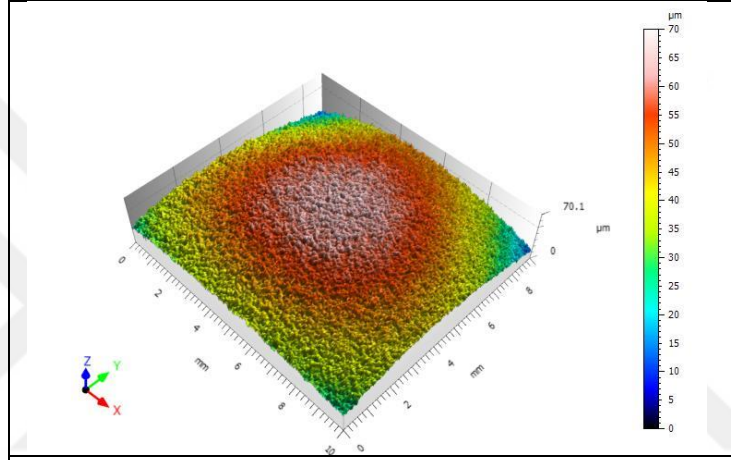
Farklı bilya dövme sürelerinde dövülen Ti6Al4V alaşımının adhezif aşınma davranışını incelemek amaçlı deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, numuneler büyük bilyalar kullanılarak (S60), yüksek bilya püskürtme basıncında (7 bar) ve iki farklı sürede (5 ve 15 dk) dövülmüştür. Adhezif aşınma testleri için ball-on-disk test cihazı, aşınma öncesi ve sonrası yüzey topografisi incelemelerinde ise temassız uçlu profilometre kullanılmıştır.

5.1.3.1. Bilya püskürtme süresinin yüzey topografisine etkisi

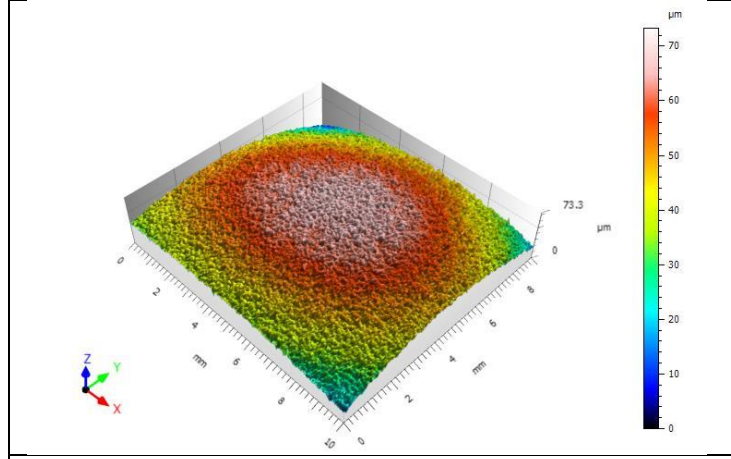
Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’ de bilyalı dövme sonrası Ti6Al4V alaşımın yüzeyinde değişen ortalama alansal ortalama pürüzlülük değeri (S_a), alandaki en derin vadi (S_v) ve alandaki en yüksek tepe en düşük vadi arasındaki mesafe (S_z) değerleri verilmiştir. Bilyalı dövme ile tüm değerlerde (S_a , S_v ve S_z) artış meydana gelirken, dövme süresinin artması ile bu değerlerde net bir artış ile karşılaşılmamıştır [114].



a)

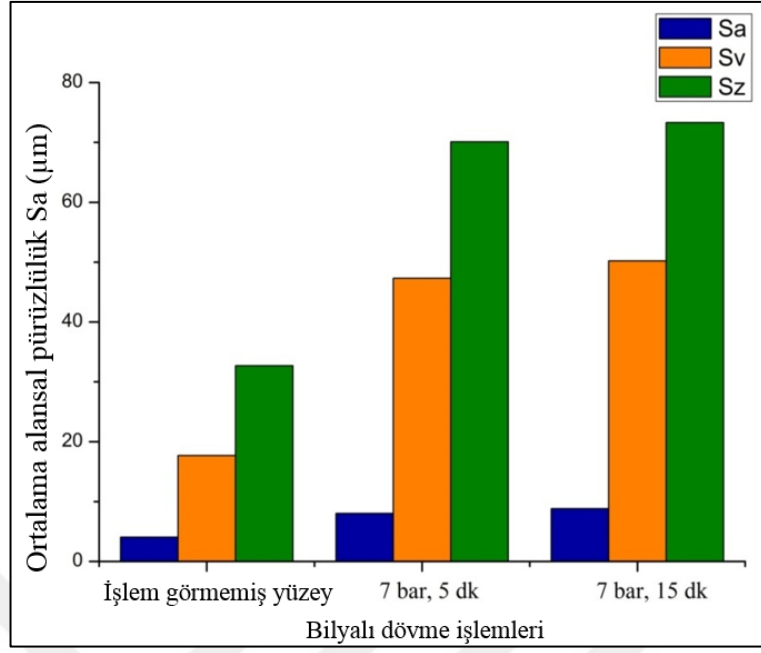


b)



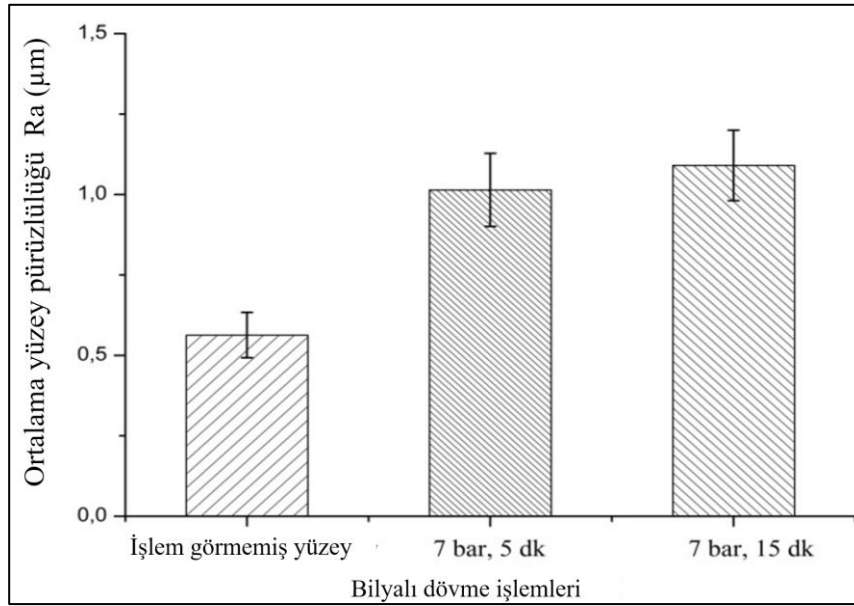
c)

Şekil 5.16. Bilyalı dövme sonrası 3 boyutlu yüzey topografisi a) İşlem görmemiş, b) 7 bar, 5 dakika ve c) 7 bar, 15 dakika



Şekil 5.17. Bilyalı dövme sonrası ortalama alansal pürüzlülük değerleri

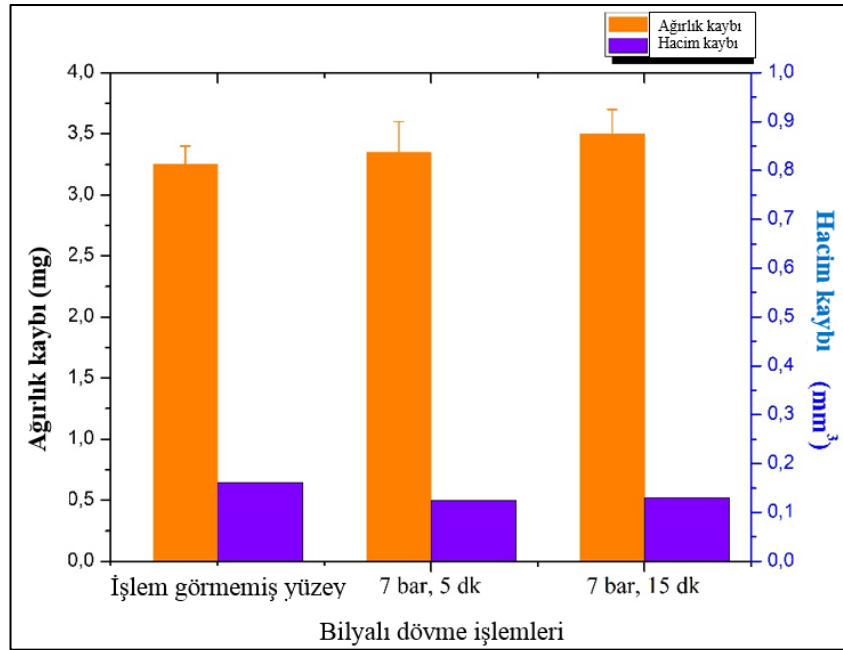
Şekil 5.18’ de bilyalı dövme sonrası elde edilen ortalama çizgisel pürüzlülük (R_a) değerleri verilmiştir. Ortalama çizgisel pürüzlülük değerleri bilyalı dövme sonrası işlem görmeyen numunelere kıyasla artış göstermiş, bilyalı dövme süresine bağlı olarak çok az değişim göstermiştir [140]. Unal ve ark. bilyalı dövme süresinin artması ile ortalama çizgisel pürüzlülük değerinde azalma olduğunu belirlemişlerdir [126].



Şekil 5.18. Bilyalı dövme sonrası ortalama çizgisel pürüzlülük değerleri

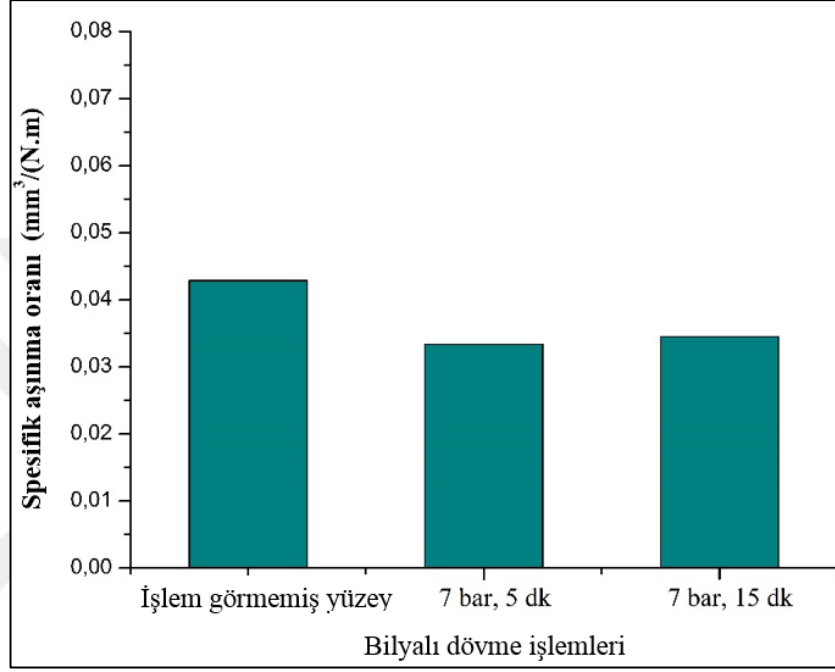
5.1.3.2. Adhezif aşınma testleri sonrası ağırlık ve hacim kaybı

Farklı bilyalı dövme sürelerinde dövülen ve işlem görmeyen numunelerin adhezif aşınma (ball-on-disc) testi sonrası kütle kaybı ve hacim kaybı değerleri incelenmiş, yöntem bölümünde verilen denkleme bağlı olarak spesifik aşınma değerleri hesaplanmıştır. Şekil 5.19 incelendiğinde bilyalı dövme uygulanmış numuneler ile uygulanmamış numunelerde aşınma sonrası gerçekleşen kütle kaybının birbirine yakın değerlerde gerçekleştiği, uzun süre dövülen numunede biraz daha fazla kütle kaybı gerçekleştiği söylenebilir. Hacim kaybı grafiği incelendiğinde ise bilyalı dövülme işlemi yapılmayan numunelerde daha fazla hacim kaybı gerçekleştiği belirlenmiştir. Bilyalı dövme sonrası yüzeyde ve yüzeyin hemen altında ince tane yapısının oluşması, malzeme yüzeyinin sertleşmesi nedeni ile işlem yapılmayan numunelerde aşınma ile daha fazla plastik deformasyon olduğu, hacim kaybının daha fazla olduğu görülmüştür. Bilyalı dövme sonrası incelenen tane yapısı, artan sertlik ve pürüzlülük nedeni ile bilyalı dövme yapılan numunelerde ağırlık kaybı daha fazla çıkmıştır. Ancak tane yapısının küçük olduğu bu tabakaların çok ince kalınlıkta olduğu, deneyler sırasında bu ince tabakanın kaldırılıp, bilyalı dövülmeden etkilenilmeyen bölgeye inildiği düşünülmektedir [49]. Bu nedenle tez çalışmasının ilerleyen dönemlerinde kesitten SEM incelemeleri, sertlik incelemeleri ve farklı parametreler altında tekrar adhezif aşınma testleri uygulanacaktır.



Şekil 5.19. Bilyalı dövme ağırlık kaybı ve hacim kaybı ilişkisi

Şekil 5.20' de aşınma testleri sonrası elde edilen spesifik aşınma değerleri verilmiştir. İşlem görmemiş Ti6Al4V alaşımında spesifik aşınma oranı değeri bilyalı dövülen numunelere kıyasla daha yüksek değerde hesaplanmıştır. İşlem görmeyen Ti6Al4V alaşımı numunede adhezif aşınma testleri sonucunda bilyalı dövme uygulanan numunelere göre daha fazla plastik deperasyona uğrayarak, daha fazla hacim kaybına uğradığı söylenebilir.

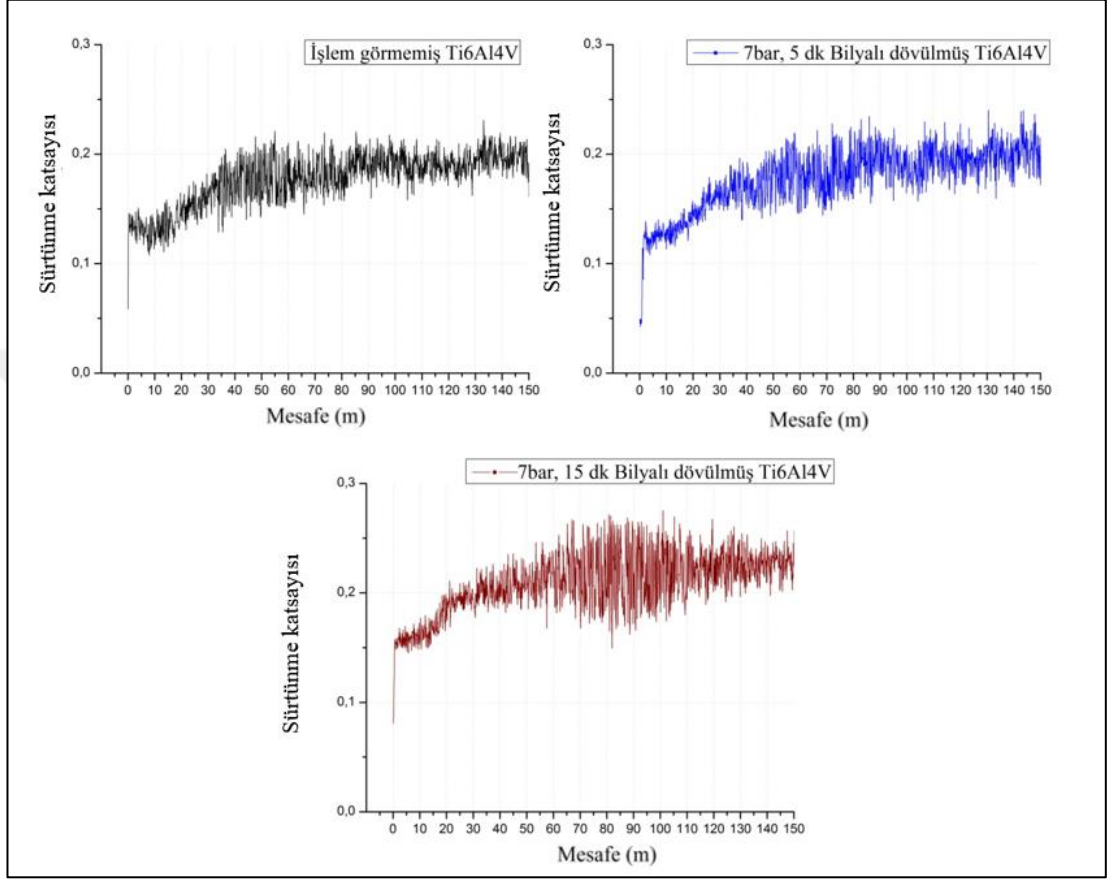


Şekil 5.20. Bilyalı dövme spesifik aşınma oranı ilişkisi

5.1.3.3. Sürtünme katsayısı değerleri

Adhezif aşınma testleri sırasında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri Şekil 5.21' te verilmiştir. Şekil genel olarak incelendiğinde sürtünme katsayısı karakteristiğinin birbirine yakın değerlerde elde edildiği görülmüştür. Aşınma deneyleri öncesi bilyalı dövme ile yüzey ve yüzey altı bölgelerde meydana gelen değişimler (pürüzlülük ve sertlik artışı, tane yapısı değişimi) nedeni ile sürtünme katsayısı grafiğinde değişim görülmesi ön görülmüştür. Ancak gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda bu değişim gözlenememiştir. Bu değişimin gözlenememe nedeni olarak uygulanan normal kuvvetin (10 N) ve mesafenin (150 m) fazla olması nedeni ile bilyalı dövmeden etkilenen ince taneli yüzey altı bölgenin aşınma testleri sonrası ortandan kalkması nedeni ile gerçekleştiği düşünülmüştür.

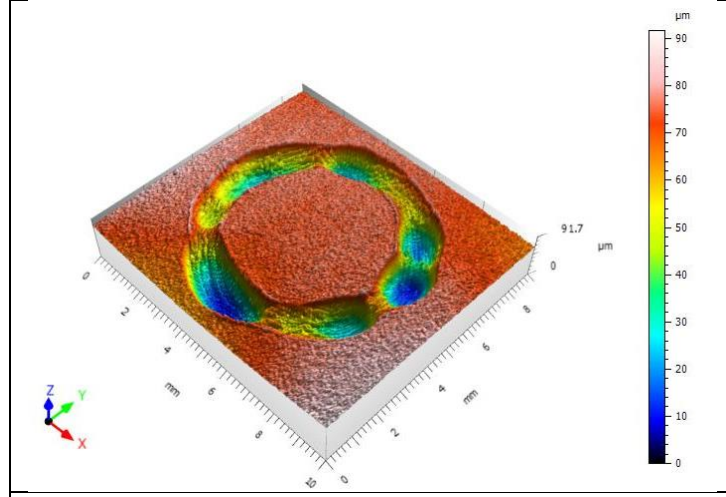
Uzun süre bilyalı dövülen numunenin (7 bar, 15 dk) sürtünme katsayısı grafiği incelendiğinde grafiğin kararlı hale geçtiği bölgede sürtünme katsayısı eğrisi frekansında yüksek titreşim elde edilmiştir. Diğer numunelerde kararlı durumda bu tarz bir titreşim frekansı mevcut değildir.



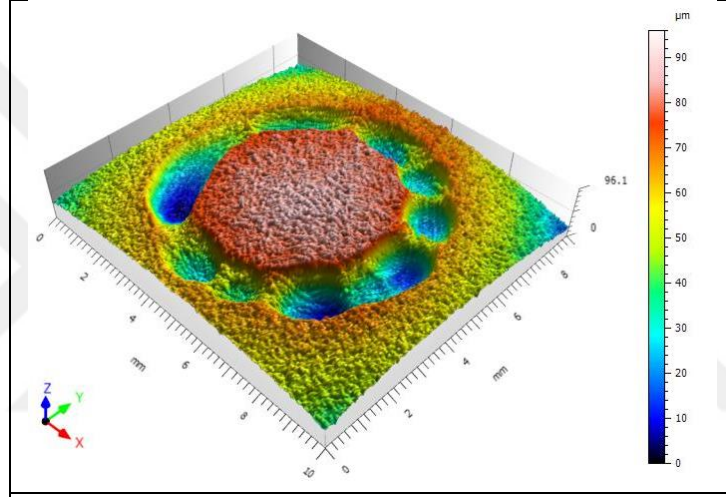
Şekil 5.21. Sürtünme katsayısı grafikleri

5.1.3.4. Aşınma testleri sonrası yüzey topografisi

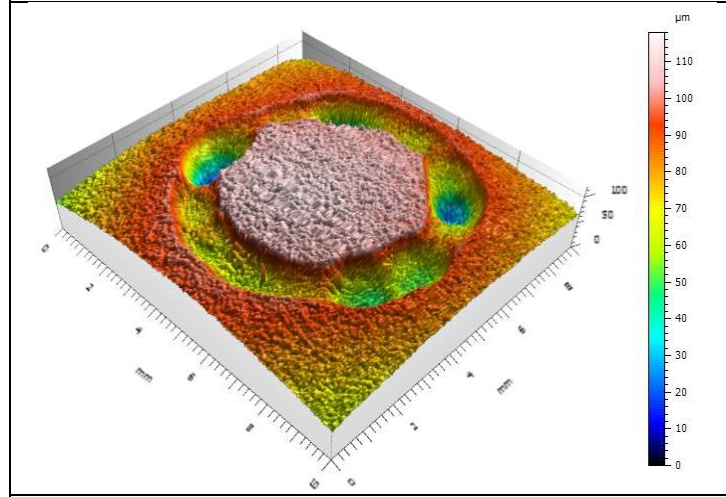
Farklı bilya püskürtme sürelerinde (5 ve 15 dakika) 7 bar püskürtme basıncında S60 paslanmaz çelik bilyaları ile dövülen Ti6Al4V numuneler sabit aşınma parametreleri ile adhezif (ball-on-disk) aşınma test cihazında aşındırılmış, aşınma sonrası elde edilen 3 boyutlu yüzey topografileri Şekil 5.22' de verilmiştir.



a)



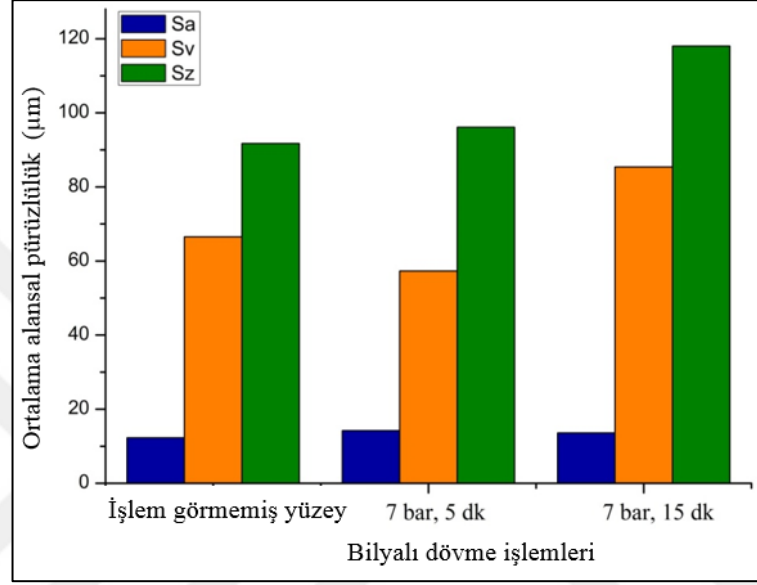
b)



c)

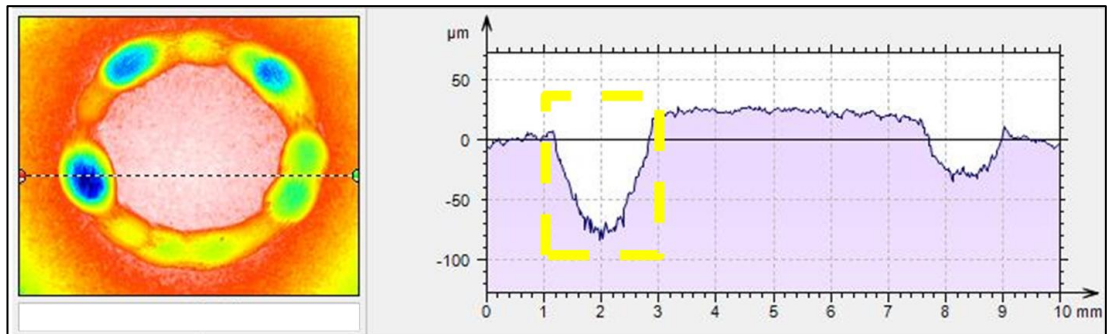
Şekil 5.22. Aşınma sonrası 3 boyutlu yüzey topografisi
a) İşlem görmemiş, b) 7 bar, 5 dakika ve c) 7 bar, 15 dakika

Şekil 5.23’ de bilyalı dövme sonrası adhezif aşındırılan Ti6Al4V alaşımın yüzeyinde değişen ortalama alansal ortalama pürüzlülük değeri (Sa), alandaki en derin vadi (Sv) ve alandaki en yüksek tepe en düşük vadi arasındaki mesafe (Sz) değerleri verilmiştir. Uzun süreli bilyalı dövme işlemi gerçekleştirdikten sonra aşındırılan yüzeyde Sv ve Sz değerlerinin bilyalı dövülmeden aşınmaya uğrayan numuneye kıyasla daha yüksek değerde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.23. Aşınma sonrası ortalama alansal pürüzlülük değerleri

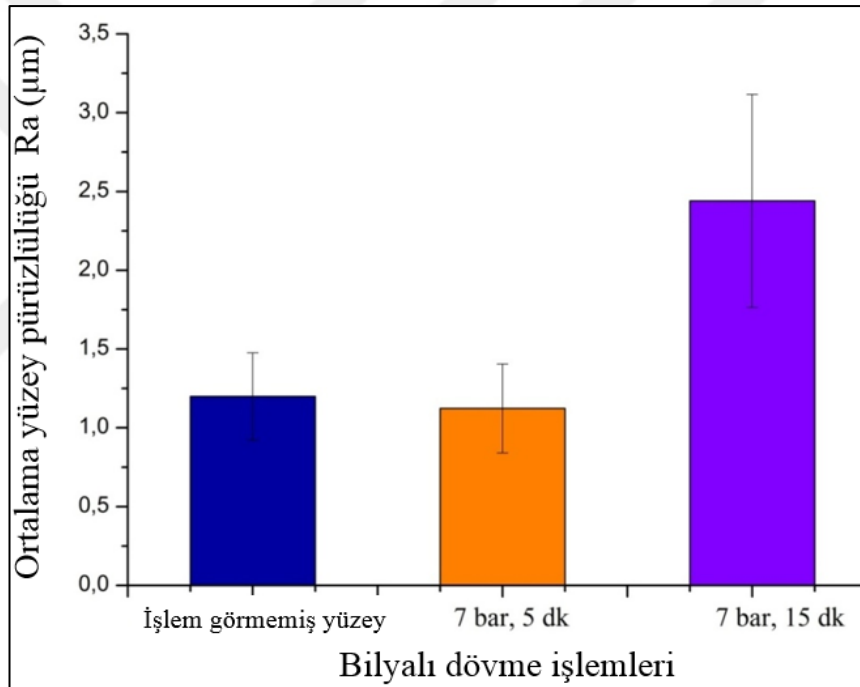
Aşınma testleri sonrası, aşındırılan yüzey optik profilometre ile tarandıktan sonra aşınma izinden bir çizgi çizilerek kesit profili alınmıştır. Profilde aşındırıcı bilyanın iz oluşturduğu bölgeden çizgisel pürüzlülük değerleri alınarak ortalama çizgisel pürüzlülük değeri (Ra) elde edilmiştir. Ortalama çizgisel pürüzlülük değerinin elde edilme yöntemi şematik olarak Şekil 5.24’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.24. Aşınma izinden alınan ortalama çizgisel pürüzlülük

Şekil 5.25’ de, Şekil 5.24’de verilen yöntem doğrultusunda elde edilen Ra değerlerine bağlı olarak aşınma sonrası ortalama çizgisel pürüzlülük değerleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde uzun süreli bilyalı dövüldükten sonra aşındırılan numunelerdeki aşınma izlerinden elde edilen Ra değerinin diğerlerine kıyasla daha yüksek değerde olduğu belirlenmiştir.

Sürtünme katsayısındaki titreşimin 7 bar, 15 dk dövülen numunede daha fazla olmasını aşınma yüzeyinde meydana gelen yüzey pürüzlülüğünden kaynaklandığı söylenebilmektedir. Daha detaylı yorum yapabilmek için numune yüzeylerinin SEM ile incelenmesi, numunelerin kesiti alınıp dağlandıktan sonra mikroskop incelemelerinin yapılması gerekmektedir.



Şekil 5.25. Aşınma sonrası ortalama çizgisel pürüzlülük değerleri

5.1.3.5. Genel sonuçlar ve çözümler

Gerçekleştirilen çalışmalar sonrası elde edilen sonuçlar dahilinde aşağıda listelenen düzenlemeler gerçekleştirilmiştir;

- i) Bilyalı dövme işlemlerinde literatür ve endüstride sıklıkla kullanılan Almen şeritlerinin homojen dövüleceği sistemin geliştirilmesi gerekmektedir. Özel olarak tasarlanan bilyalı dövme test düzeği bu amaçla modifiye edilerek tez çalışması yeni test cihazında gerçekleştirilecektir.

- ii) Dikdörtgen prizma şeklinde olan numuneler (40x40x3) uzun süre bilyalı dövme sonrasında sehim vermektedir. Bu nedenle bundan sonra gerçekleştirecek deneylerde çubuk numuneler 10 mm kalınlığında kesilerek kullanılacaktır.
- iii) Adhezif aşınma testleri sonrası aşınma davranışında (ağırlık kaybı, hacim kaybı ve sürtünme katsayısı değerlerinde) bariz bir değişim olmamıştır. Bu nedenle deneyler daha düşük yük altında tekrarlanacak ve yüzey ve yüzey altı mikroyapısı detaylı olarak incelenecektir.

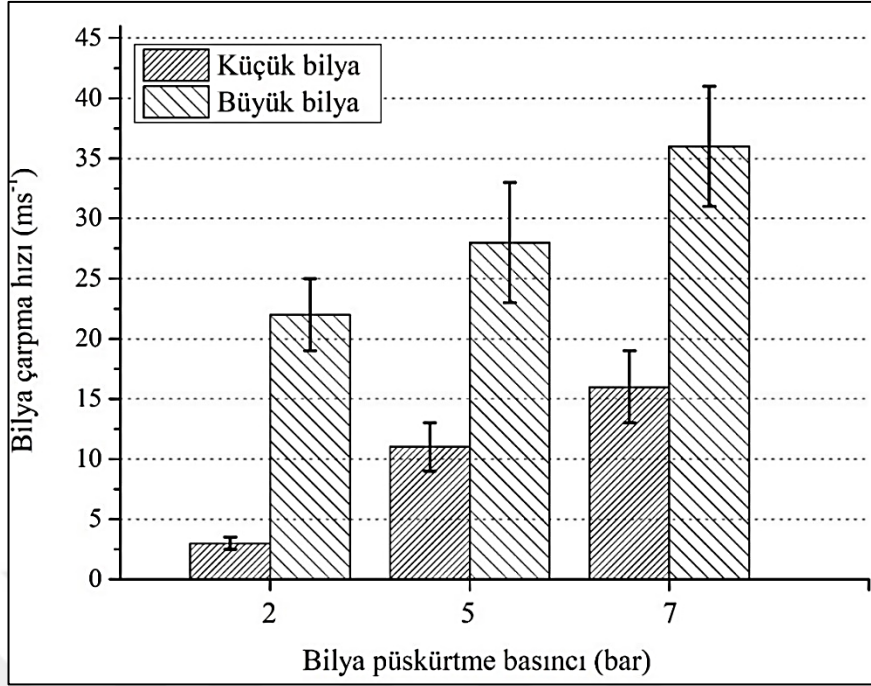
5.2. Doktora Tezi Kapsamında Gerçekleştirilen İkinci Aşama Çalışmalar ve Sonuçları

Tez çalışmasında gerçekleştirilen ön çalışmalar kapsamında elde edilen sonuçlar, ulaşılan çözüm yöntemleri ve gerçekleştirilen yenilikler bir önceki bölümde maddeler halinde detaylı olarak sunulmuş ve irdelenmiştir. Bahsi geçen bu çalışmalar sonucunda özetlemek gerekirse; i) araştırmacı ve çalışma arkadaşlarının gayreti ve Kocaeli Üniversitesi'nin desteği ile tamamen özgün ve yerli otomatik kontrollü bilyalı dövme düzeneği tasarlanmış ve imal edilmiş, ii) konunun bilimsel olarak irdelenmesi için gereken en ideal bilyalı dövme test parametreleri belirlenmiş, iii) incelenecek malzemenin teknik özelliklerine bağlı olarak gerçekleştirilecek bilimsel çalışmalar için en ideal numune boyutları ve geometrisi belirlenmiştir. Gerçekleştirilen tüm bu geliştirmeler sonrasında bu aşamada detaylı olarak sunulacak ve irdelenecek ikinci aşama deneysel çalışmalar bölümüne geçilmiştir. Bu bölümde deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar i) bilyalı dövme işlemleri, ii) bilyalı dövülen numunelerin erozif aşınma testleri ve iii) bilyalı dövülen numunelerin adhezif aşınma testleri sonuçları olmak üzere üç ana madde altında detaylı olarak incelenmiştir.

5.2.1. Bilyalı dövme işlemleri

5.2.1.1. Bilya püskürtme basıncına göre değişen bilya hızları

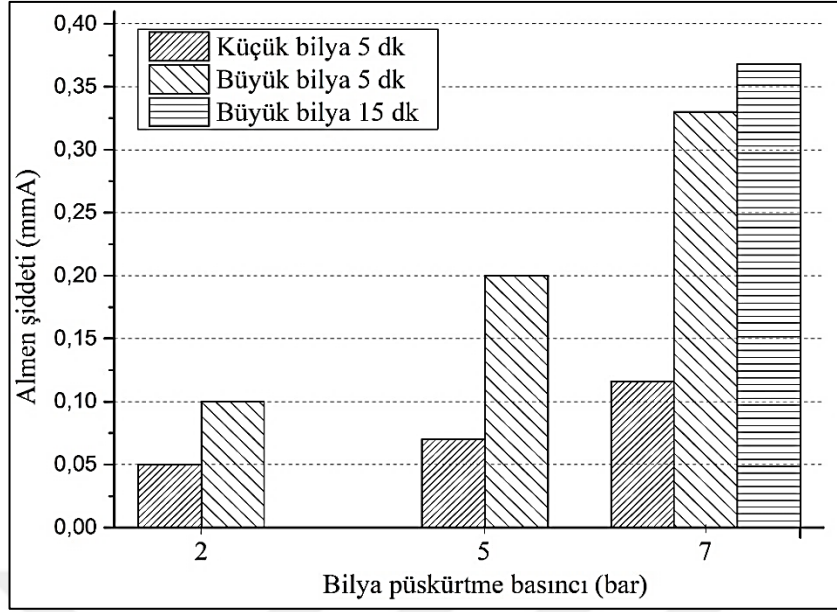
Farklı bilya püskürtme basıncı ile hızlandırılan bilyaların hızları çift disk metodu ile belirlenmiştir. Bilya püskürtme basıncının artması ile her iki bilya boyutu için çarpma hızının arttığı [54, 141] ayrıca büyük çaplı bilyaların küçük çaplı bilyalara kıyasla daha fazla hızlandığı belirlenmiştir (Şekil 5.26).



Şekil 5.26. Bilyaların çarpma hızları

5.2.1.2. Bilyalı dövme parametrelerine göre değişen Almen şiddeti

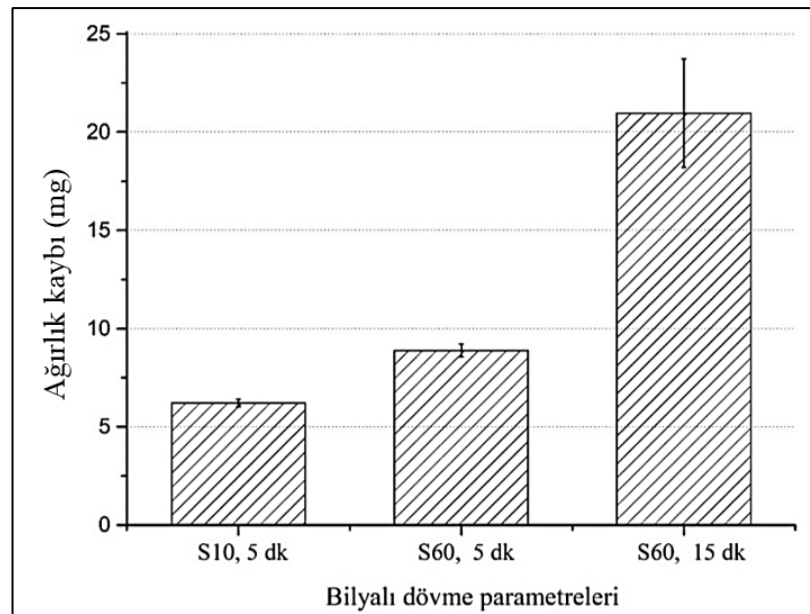
Farklı parametreler altında bilyalı dövülen Almen şeritlerinde kalıntı gerilmeler nedeni ile oluşan yay yüksekliği Almen gage yardımı ile belirlenmiştir. Şekil 5.27' de farklı parametreler altında gerçekleştirilen bilyalı dövme sonrası Almen şiddeti değerleri verilmiştir. Bilya püskürtme basıncının [142] ve bilya çapının artması ile Almen şiddeti değerinde artış gerçekleştiği belirlenmiştir [57]. Büyük çaplı bilyaların sabit püskürtme basıncında daha fazla hızlanması ve kütlelerinin büyüklüğü nedeni ile sahip oldukları kinetik enerji daha fazladır. Bu nedenle büyük çaplı bilyaların Almen şeritlerine daha yüksek enerji ile çarpması sonucunda daha yüksek değerlerde sehim elde edilmiştir.



Şekil 5.27. Bilyalı dövme parametrelerine göre değişen Almen şiddeti

5.2.1.3. Bilyalı dövme sonrası ağırlık kaybının incelenmesi

Farklı parametreler altında gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemleri sonrası ağırlık kaybı değerleri Şekil 5.28’ te verilmiştir. Şekil incelendiğinde büyük bilyaların numuneleri daha fazla ağırlık kaybına uğrattıkları belirlenmiştir. Büyük çaplı bilyaların sahip olduğu yüksek kinetik enerji ve uzun süre gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemi kütle kaybını arttırmıştır.

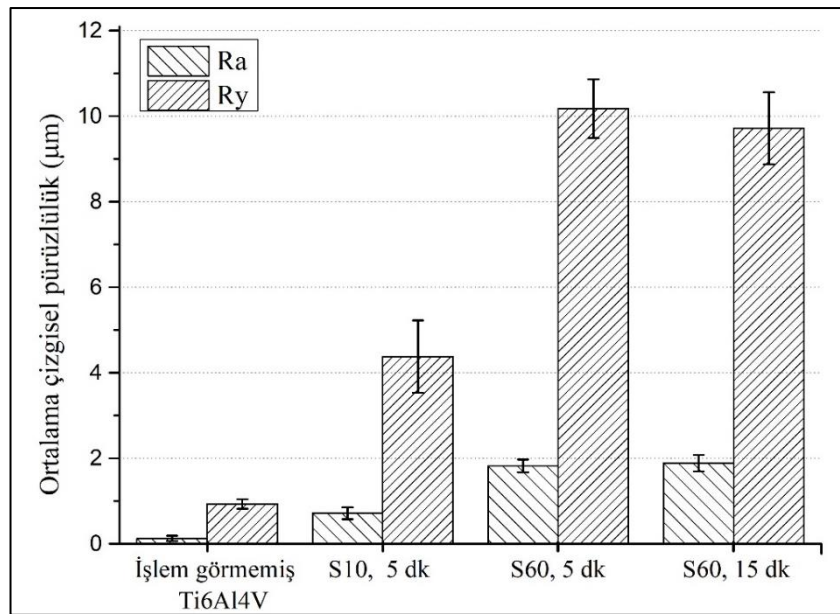


Şekil 5.28. Bilyalı dövme sonrası ağırlık kaybı

5.2.1.4. Bilyalı dövme sonrası yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi

Bilyalı dövme ile yüzeye farklı boyutta ve türde, farklı püskürtme basınçları altında bilyalar gönderilmesi ile yüzeylerde farklı değerlerde yüzey pürüzlülükleri oluşmaktadır. Şekil 5.29 incelendiğinde sabit basınç altında (7 bar) büyük çaplı bilyaların yüzeyi daha fazla pürüzlendirdiği belirlenmiştir. Bunu büyük çaplı bilyaların sahip olduğu yüksek kinetik enerjiden kaynaklandığı söylenebilir. Uzun dövme sürelerinde ortalama çizgisel pürüzlülük değerinde ciddi bir değişim belirlenmemiştir [114, 140, 143].

Yüzey pürüzlülüğü, biyomedikal uygulamalarda kemik ile implant arasındaki temas alanını genişleterek protein adsorpsiyonu ve hücre yapışmasını [144] ve kaplamaların yapışma mukavemetini arttırmaktadır. Ancak yüksek yüzey pürüzlülüğü çatlak başlangıcı etkisi göstererek malzemelerin yorulma dayanımını düşürücü etki oluşturmaktadır. Farklı Almen şiddetleri ile dövülen Ti6Al4V alaşımının artan şiddetle birlikte yüzey pürüzlülüğünün arttığı belirlenmiştir [145], ancak fazla yüzey pürüzlülüğünün bilyalı dövmenin yüzey ve yüzey altında yarattığı pozitif etkinin önüne geçerek malzemenin yorulma ömrünü azaltıcı etki yarattığı belirlenmiştir [142, 145]. Bilyalı dövme sonrası gerçekleştirilecek tekrarlı bilyalı dövme, kumlama veya yüzey parlatma gibi işlemler sonrası yüzey pürüzlülüğü düşürülerek yorulma dayanımı arttırılabilmektedir [32, 142].



Şekil 5.29. Bilyalı dövme sonrası yüzey pürüzlülüğü

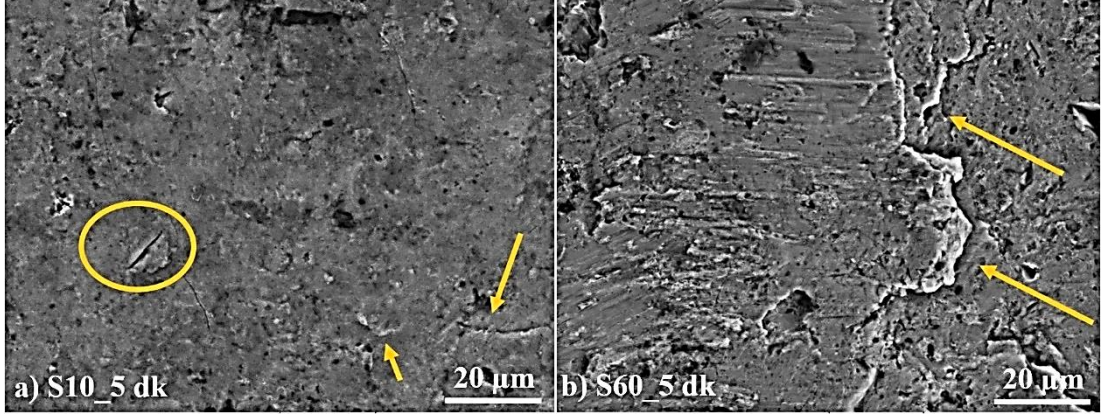
5.2.1.5. Bilyalı dövme sonrası yüzey mikroyapı özelliklerinin incelenmesi

Farklı parametreler altında gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemleri sonrası değişen yüzey morfolojisi Şekil 5.30 ve Şekil 5.31’te detaylı olarak incelenmiştir. Bilyalı dövme ile yüksek basınçla malzeme yüzeyine fırlatılan bilyalar yüzeyde çukurcuklara, plastik deformasyona ve çatlaklara neden olmuş, büyük çaplı bilyaların kullanılması ile plastik deformasyonun şiddetinin arttığı, oluşan çukurların derinleştiği belirlenmiştir. Büyük çaplı bilyalar ile uzun süreli bilya dövme işleminin gerçekleştirilmesi ile yüzeyde aşırı plastik deformasyon ve buna bağlı oluşan çok büyük çatlaklar ve yüzeyde ciddi hasarın olduğu belirlenmiştir (Şekil 5.30).



Şekil 5.30. Bilyalı dövme sonrası yüzeylerin SEM incelemesi a) işlem görmemiş Ti6Al4V alaşımı, b) S10_5 dk, c) S60_5 dk, d) S60_15 dk

Şekil 5.31 incelendiğinde, büyük çaplı bilyaların kullanımı ile yüzeyde delaminasyonların olduğu belirlenmiştir. Büyük çaplı bilyaların sahip olduğu yüksek kinetik enerji ile Ti6Al4V alaşımı malzemenin yüzeyine çarpması sonucunda şiddetli delaminasyonlar gerçekleşmiştir. Küçük çaplı bilyanın kullanımı ile de delaminasyonlar oluşmakla birlikte oluşan delaminasyon miktarı ve boyutu nispeten daha azdır. Ancak yüzey çatlaklarına rastlanmaktadır.



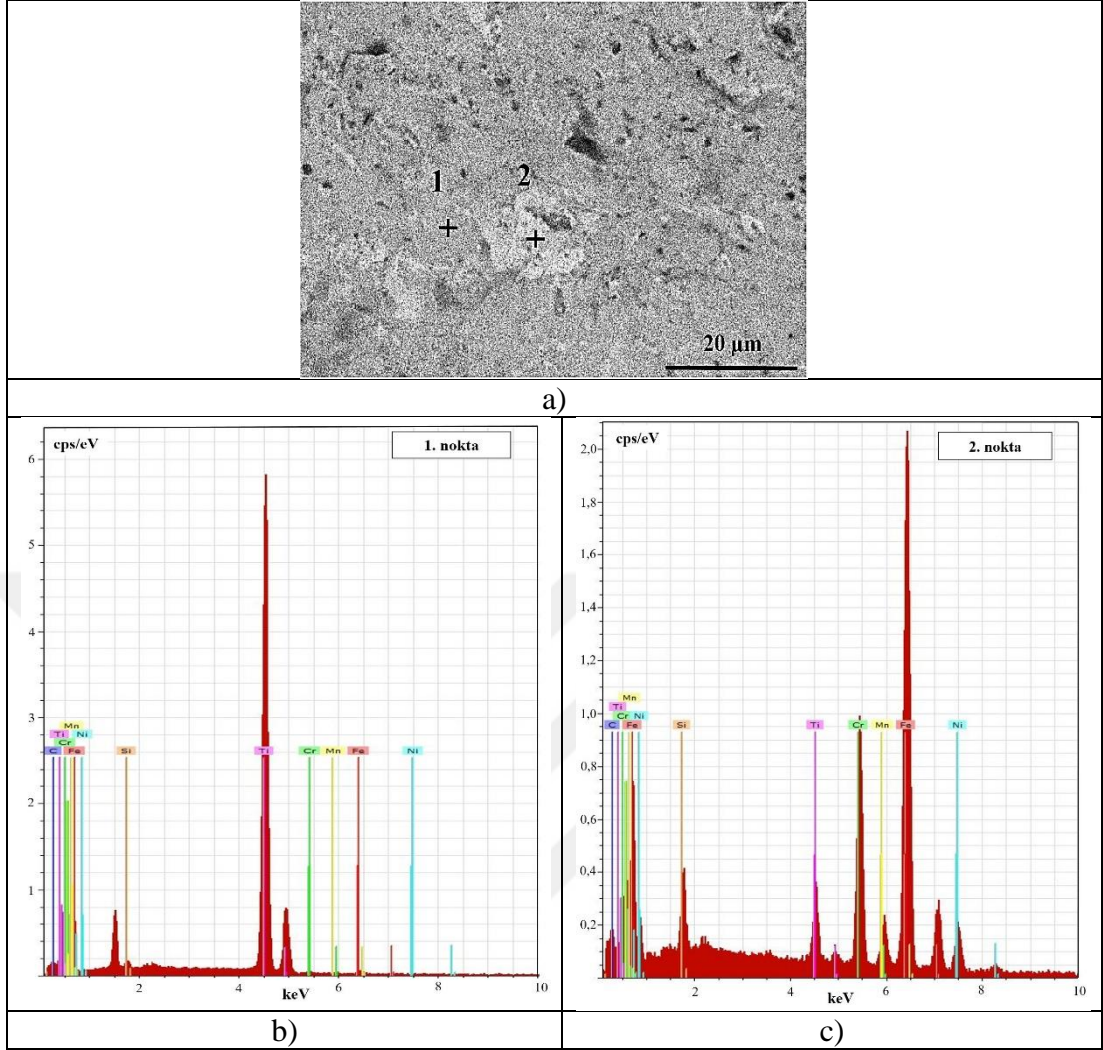
Şekil 5.31. Bilyalı dövme sonrası yüzeylerin SEM incelemeleri a) S10_5dk, b) S60_5 dk

Şekil 5.32’ de büyük çaplı bilyaların (S60_5dk) kullanımı ile gerçekleştirilmiş bilyalı dövme sonrası yüzeye EDS analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.32-a’da bilyalı dövülen yüzeyde koyu kontrastlı bölgede (1 numaralı nokta) titanyum alaşımının ağırlıkça üstünlüğü varken, 2 numaralı noktadaki aydınlık faz, bilyalı dövme ile yüzeye saplanan paslanmaz çelik bilyayı göstermektedir (Şekil 5.32-b).

5.2.1.6. Bilyalı dövme sonrası yüzey altı sertlik incelemeleri

Bir önceki bölümde tartışıldığı gibi bilyalı dövme malzemelerin yüzey ve yüzey altı mikroyapısında önemli değişimler meydana getirmektedir. Bu mikroyapısal değişimlerin mekanik özellikler üzerinde etkin bir rol oynayacağı açıktır. Bu bölümde, farklı bilyalı dövme parametreleri altında dövülen Ti6Al4V numunelerin yüzey altı sertlik değerlerinin derinliğe bağlı olarak değişimleri irdelenecektir. Mekanik özelliklerdeki değişimler irdelenirken konunun daha net anlaşılabilmesi için daha önceki bölümlerde elde edilen bulgular, özellikle kesit mikroyapısının derinliğe bağlı olarak değişimi, göz önünde bulundurulmalıdır.

Şekil 5.33 incelendiğinde bilyalı dövme işlemlerinin Ti6Al4V alaşımının sertlik değerini arttırdığı belirlenmiştir. Bilyalı dövme uygulanmamış alaşımın sertlik değerinin yaklaşık olarak 320 - 350 HV_{0,1} aralığında değiştiği gözlenmiştir. Bilyalı dövme ile bu sertlik değerinin bilyalı dövmenin en etkin olduğu yüzeye yakın bölgelerde 475 HV_{0,1} değerine kadar yükselmesi çarpıcı bir sonuçtur.



Şekil 5.32. EDS incelemeleri a) bilyalı dövülmüş yüzey, b) 1 numaralı nokta, c) 2 numaralı nokta

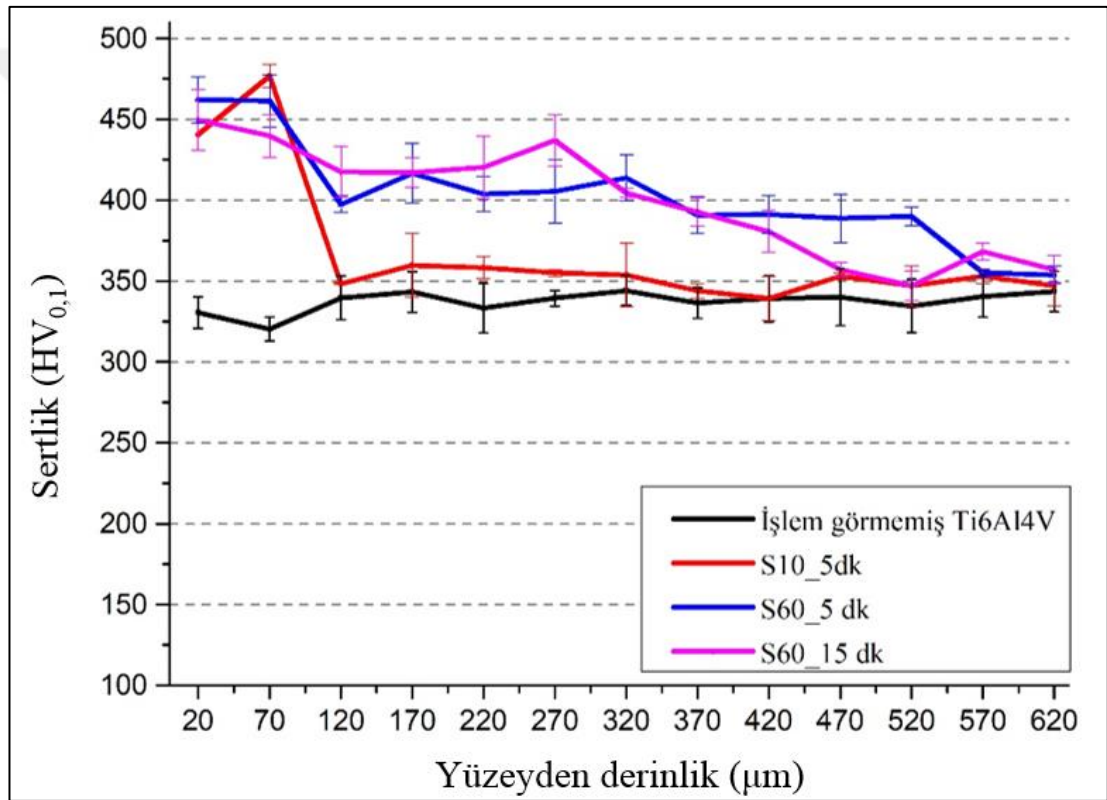
Bu noktada bilyalı dövme ile alaşımın sertlik değerinin malzemenin orijinal sertlik değerine kıyasla yaklaşık olarak % 35' e kadar iyileşme gösterdiği söylenebilir. Sertlik değerindeki bu artış değerinin tüm bilyalı dövme parametreleri için derinlikteki artışa bağlı olarak azaldığı ve belirli bir derinlikten sonra bilyalı dövmeden etkilenen bölgenin sona erdiği ve nihayetinde malzemenin orijinal sertlik değerinin ölçüldüğü görülmektedir. Bir önceki bölümde kesit mikroyapılarında bilyalı dövme işlemine bağlı olarak görülen mikroyapısal değişimler ile sertlik değişimlerinin uyumlu olduğu söylenebilir.

Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar ve tez genelinde tartışılan deneysel sonuçlar göz önüne alındığında bilyalı dövme ile mekanik özelliklerin gelişiminin (sertlik artışının) çok sayıda kök nedeni bulunmaktadır. Bu nedenlerin neredeyse tamamı mikroyapısal

özelliklerin değişimine ve bu değişime bağlı olarak mikroyapı içerisinde dislokasyon hareketlerinin değişimine bağlanmaktadır. Bilindiği üzere metallerde plastik deformasyon dislokasyon oluşumu ve dislokasyonların hareketi ile gerçekleşmektedir. Mikroyapı içerisinde dislokasyon hareketini değiştiren her etkileşim, örneğin tane sınırı – dislokasyon veya ikincil fazla dislokasyon etkileşimleri gibi, malzemelerin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Örneğin tane sınırı incilmesi ile artan tane sınırı-dislokasyon etkileşimleri dislokasyon hareketlerini zorlaştırmakta ve malzemenin özellikle akma dayanımı ve sertlik gibi birçok mekanik özelliğinin artmasına neden olmaktadır. Bilyalı dövme ile malzemelerin mekanik özelliklerinin gelişimine neden olan mekanizmalar literatürden elde edilen bilgiler ışığında şu şekilde özetlenebilir; i) yüzey altı bölgede görülen tane incilmesi ile dislokasyon hareketinin yavaşlaması ve bunun sonucunda tüm alaşımlar için kabul gören Hall-Petch etkisi ile mekanik özelliklerin artışı (tane incilmesi sertleşmesi [19, 146-153]), ii) mikroyapı içerisinde yer alan ikincil sert fazların (çökelti vb. partiküllerin) kırılarak tane boyutlarının azalması ve mikroyapı içerisinde homojen bir şekilde dağılmaları sonucunda dislokasyonlar ile etkileşimlerinin artması ve Orowan modeli ile dislokasyon hareketinin zorlaşarak mekanik özelliklerinin artması (Orowan sertleşmesi [146, 147, 154-156]), iii) yüzey ve yüzey altı mikroyapısında meydana gelen aşırı plastik deformasyona bağlı olarak meydana gelen aşırının gerinim nedeni ile dislokasyon kaynaklarının aktif edilmesi sonucunda dislokasyon yoğunluğunun artması, artan dislokasyon yoğunluğu ile artan dislokasyon-dislokasyon etkileşimleri ile dislokasyon hareketinin yavaşlaması (gerinim sertleşmesi [19, 88, 127, 146, 148, 157]). Tez çalışması içerisinde sunulan kesit mikroyapılarında ve yüzey altı sertlik değerlerinde bilyalı dövme işlemine bağlı olarak meydana gelen değişimlerin kök nedenlerinin mikroyapı içerisinde dislokasyon hareketlerine bağlı olan bu sertleşme mekanizmaları olduğu sonucuna varılabilir.

Şekil 5.33’de küçük çaplı bilyalar kullanılarak gerçekleştirilen dövme işlemi sonucunda sertlik değeri artışının yüzeyden 70 - 120 µm derinliği civarında sınırlandığı, büyük bilyada ise sertlik artışının yüzeyden 370 - 420 µm derinliğe kadar etkin olduğu belirlenmiştir. Bu durumdan büyük çaplı bilyaların sahip olduğu yüksek kinetik enerjinin sorumlu olduğu söylenebilir. Büyük çaplı bilya için, kesit SEM incelemelerinde, bilyalı dövmeden etkilenen ve tane boyutunun aşırı küçüldüğü aşırı

plastik deformasyona (APD) uğrayan bölgede ciddi sertlik artışının olduğu ancak bu bölgeden derinliğe inildikçe plastik deformasyon etkisinin devam ettiği (370 - 420 μm civarında) belirlenmiştir. Büyük çaplı bilyaların kullanıldığı farklı dövme sürelerinde gerçekleştirilen deney sonuçları incelendiğinde sertlik değerindeki artışın ve etkin değerinin neredeyse aynı olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni belirli bir süre bilyalı dövme işleminden sonra dislokasyon yığılmasının yeniden kristallenme hızı ile dengede gitmesinden kaynaklandığı söylenebilir [114]. Bu durumda bilyalı dövme ile sertlik artışına neden olan sertleşme mekanizmalarının etkinliğinin yeniden kristallenme ile azaldığı söylenebilir.

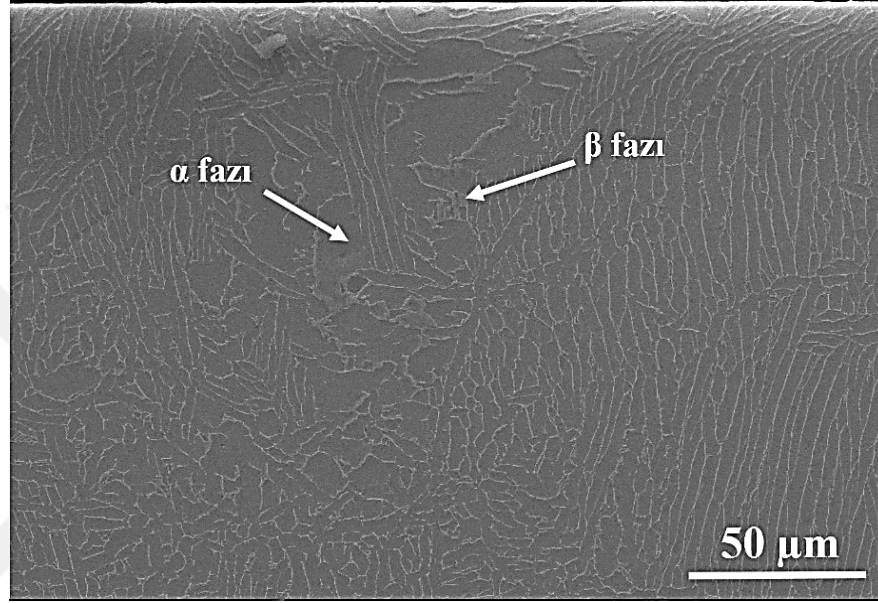


Şekil 5.33. Bilyalı dövme sonrası kesit sertlik değişimi

5.2.1.7. Bilyalı dövme sonrası yüzey altı mikroyapı özelliklerinin incelenmesi

Bilyalı dövme işlemi ile bir önceki bölümde incelenen yüzey morfolojisinde meydana gelen değişimlerin yanı sıra yüzey altı mikroyapısının da değişeceği açıktır [114, 121, 126, 127, 145, 154, 158-161]. Tez çalışması kapsamında farklı parametreler altında dövülen numunelerin yüzey altı mikroyapısının değişiminin incelenmesi için dövme sonrası numunelerin kesitleri alınmış, metalografik olarak hazırlanmış ve SEM

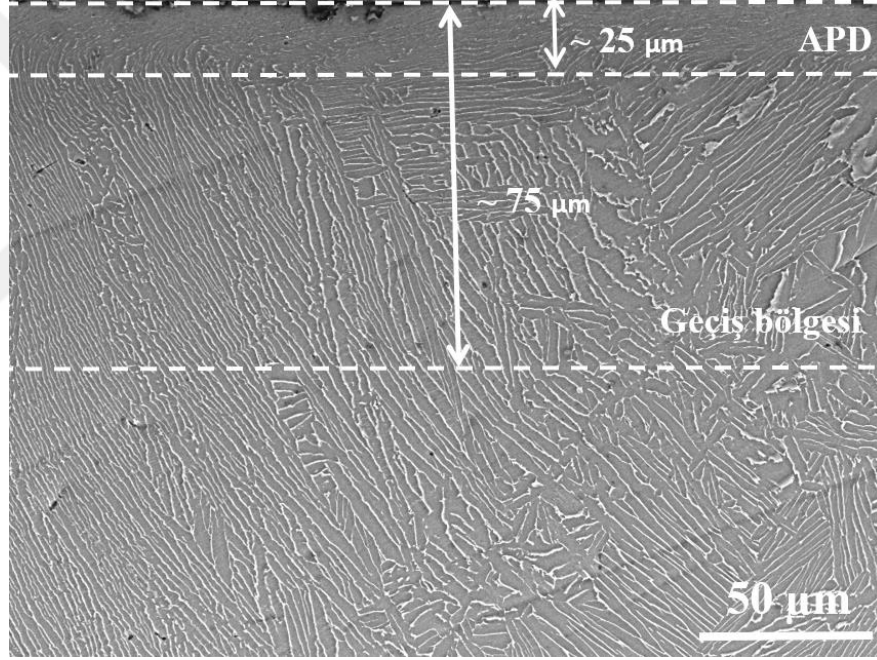
yardımı ile yüksek çözünürlük ve büyütmelelerde bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak yüzey altı mikroyapısında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Şekil 5.34’ de bilyalı dövme işlemi öncesi Ti6Al4V alaşımı numunelerin yüzey altı mikroyapısı verilmiştir. Mikroyapının α ve β fazlarının homojen bir şekilde dağılımı ile oluştuğu açıktır. Diğer yandan mikroyapıda ince ve uzun lamelli yapı dikkat çekmektedir [162, 163].



Şekil 5.34. İşlem görmemiş Ti6Al4V alaşımının kesit SEM incelemesi

Şekil 5.35’de bilyalı dövme uygulanmış numunenin kesit mikroyapısı verilmiştir. Şekil 5.34 ile kıyaslandığında mikroyapıda meydana gelen radikal değişimler net bir şekilde görülmektedir. Bunun yanında bu değişimlerin derinliğe bağlı etkisini yitirdiği söylenebilir [122, 158, 164-167]. Bu noktada Şekil 5.35’de verilen kesit mikroyapısı; i) aşırı plastik deformasyona uğramış bölge (APD), ii) deforme olmuş bölge ve iii) herhangi bir değişime uğramamış bölge olarak 3 bölgeye ayrılabilir. Yaklaşık 25 μ m derinliğindeki APD bölgesinde mikroyapının bilyalı dövme öncesi mikroyapı ile tamamen farklı olduğu söylenebilir. Bu bölgedeki temel farklılıkların kök nedenleri; i) aşırı plastik deformasyon ile tane sınırlarının kırılması ve bunun sonucunda tane incelmesinin gerçekleşmesi ve ii) bilyaların çarpması ile oluşan tekrarlı darbe ve basma gerilmeleri etkisinde malzemenin bilya çarpma eksenine dik doğrultuda adeta sıvanarak dövülmesi ile tanelerde ve ikincil fazlarda yönlennmelerin meydana gelmesi ile açıklanabilir. İkincil fazlarda meydana gelen yönlennme deforme

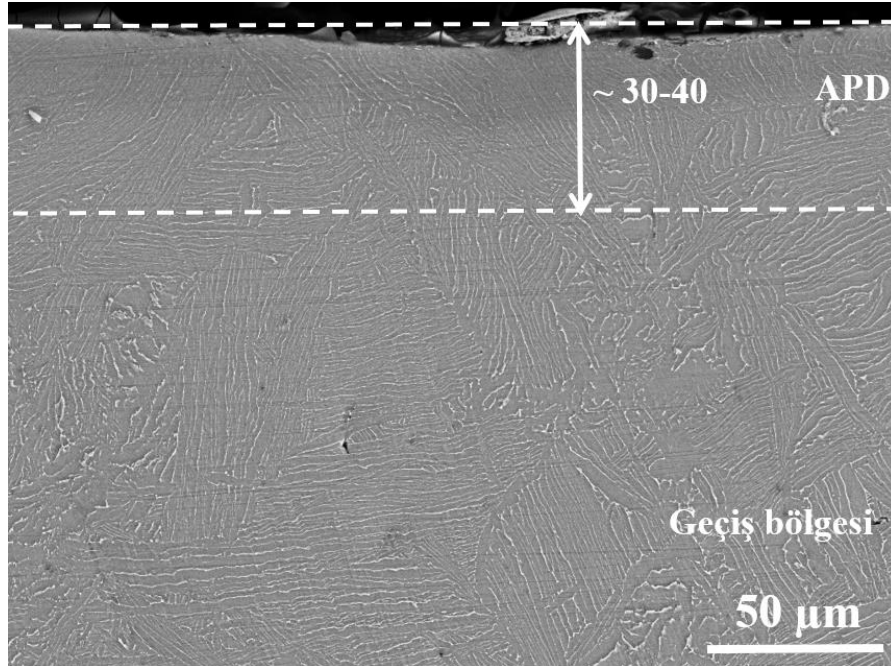
olmuş bölge içerisinde (yaklaşık olarak 75 μm derinliğine kadar) APD bölgesine kıyas ile daha düşük bir şiddete gözlemlenebilmektedir. β fazında ve tanelerde meydana gelen dövme eksenine göre yaklaşık 30 - 45° lik yönlenme dikkat çekmektedir. Sonuç olarak bilyalı dövme öncesi ve sonrası kesit mikroyapılarında meydana gelen bu mikroyapısal değişimlerin malzemenin mekanik özelliklerini değiştireceği açıktır. Bu noktada bilyalı dövmenin mekanik özellikleri ve yüzey sertliği birçok mühendislik alaşımına göre görece olarak yüksek olan Ti6Al4V alaşımının dahi yüzey ve yüzey altı mikroyapısında meydana getirdiği değişimler çarpıcıdır. Malzemelerin mekanik davranışlarının mikroyapıları ile doğrudan ilişkili olduğuna göre herhangi bir kompozisyon değişikliği yapılmaksızın bilyalı dövme ile malzemelerin mekanik özelliklerinin değiştirilebileceği açıktır.



Şekil 5.35. Bilyalı dövme sonrası (S10_5 dk) kesit SEM incelemesi

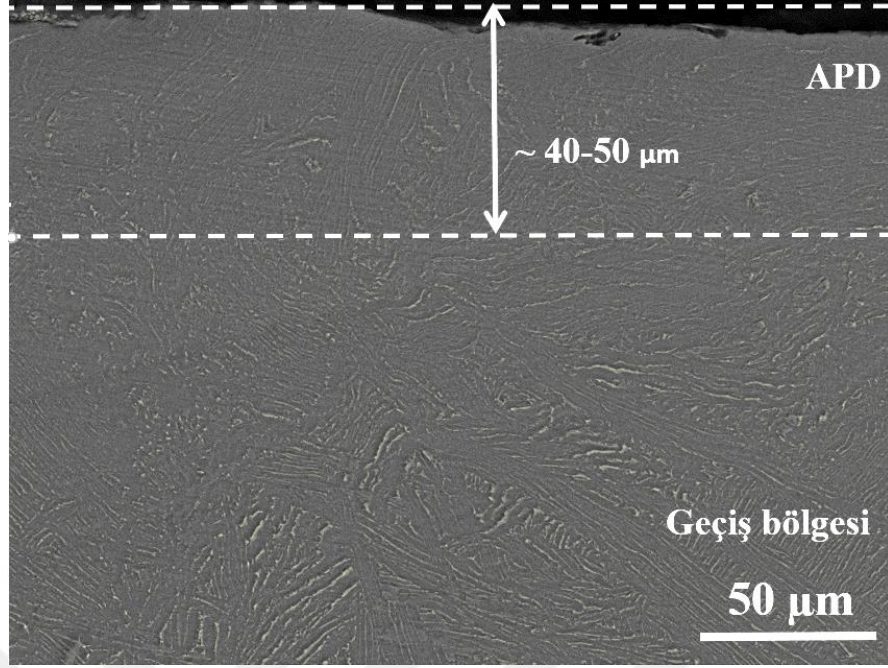
Şekil 5.36' de büyük boyutlu bilyalar ile dövülen Ti6Al4V numunenin kesit mikroyapısı verilmiştir. Şekil 5.35'e kıyas ile mikroyapıda meydana gelen değişimlerin daha şiddetli olduğu ve değişim görülen derinliğin ciddi miktarda artış gösterdiği sonucuna varılabilir. Bu noktada daha önceki bölümlerde tartışılan büyük bilyaların daha yüksek çarpma hızlarına dolayısıyla daha yüksek çarpma enerjilerine sahip olmaları ve bunun sonucunda büyük bilyalar ile gerçekleştirilen dövme işlemlerinde daha yüksek Almen şiddetlerine ulaşılmış olması bu farklılığı nedeni olarak açıklanabilir. Kısacası dövme şiddeti daha yüksek olan büyük boyutlu bilyalar

yüzey altında daha radikal mikroyapısal değişimlerin meydana gelmesine neden olmuşlardır. APD bölgesinin derinliği yaklaşık 40 μm 'ye kadar ulaşırken deforme olmuş bölge derinliği ise 150 - 200 μm aralığında değişmektedir. Küçük boyutlu bilyalar ile dövülen kesit mikroyapısına benzer bir şekilde (Şekil 5.35) yüzeye yakın bölgelerde tane incelmesi, yönelmesi ve ikincil fazların incelenerek yönelmesi dikkat çekicidir (Şekil 5.36). Diğer yandan deforme olmuş bölgede de tane incelmesi ve yönelmesi küçük boyutlu bilya ile dövülen numuneye göre çok daha belirgin görünmektedir. Bu noktada büyük boyutlu bilya ile gerçekleştirilen dövme işleminin yüzey altı mikroyapısı üzerinde küçük boyutlu bilya ile gerçekleştirilen dövme işlemine göre çok daha etkin olduğu söylenebilir. Sadece bilya boyutunun değişimi ile gerçekleşen bu belirgin değişimin ortaya konulması tez çalışması ile elde edilen önemli özgün değerlerden biridir. Literatür çalışmalarında genellikle bilyalı dövme parametreleri üzerinde çok fazla durulmamış ve bilyalı dövme parametrelerinin doğrudan Almen şiddeti ve yorulma ömrü benzeri performansa dayalı özellikler üzerine etkilerine odaklanılmıştır [59, 127, 168-175]. Ancak gerek yorulma ömrü ve diğer mekanik özelliklerin bilyalı dövme işlemine ve bilyalı dövme işlem parametrelerine bağlı olarak değişimlerinin bilimsel ve kök nedenlerinin mikroyapıda meydana gelen ve bu bölüm içerisinde tartışılan değişimlere bağlı olduğu açıktır.



Şekil 5.36. Bilyalı dövme sonrası (S60_5 dk) kesit SEM incelemesi

Şekil 5.37’de büyük boyutlu bilyalar ile Şekil 5.36’e kıyas ile daha uzun sürelerde gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemi ile elde edilen kesit mikroyapısı verilmiştir. Dövme süresinin artması ile APD bölgesinin derinliğinin artış gösterdiği ve deforme olmuş bölgede meydana gelen tane incelmeleri ve yönlenmesinin şiddetinin arttığı açıkça görülmektedir. O halde bilyalı dövme süresinin de kesit mikroyapısı üzerinde yadsınamaz bir etkinliği olduğu sonucuna varılabilir. Ancak yüzeye yakın bölgelerde görülen yüzey çatlakları ve aşırı plastik deformasyon ile oluşmuş porozite benzeri boşluklar dikkat çekmektedir. Bu durum aşırı plastik deformasyonun yüzeyde meydana getirdiği tahribatı gözler önüne sermektedir. Benzer mikroyapısal ve yüzey özellikleri yüzey pürüzlülüğü ve yüzey morfolojileri incelemelerinde de sunulmuştur. Bu durumda bilyalı dövme parametrelerinin optimize edilmesinin önemi ortaya çıkmaktadır. Literatürde bu durum aşırı dövme ile meydana gelen aşırı plastik deformasyonlar ile irdelenmiştir [32]. Tez çalışmasının genelinde belirtildiği gibi bilya boyutu ve dövme süresi gibi bilyalı dövme parametrelerinin bilyalı dövülen malzemenin yüzey pürüzlülüğü, morfolojisi ve yüzey altı mikroyapısı üzerindeki etkileri üzerinde çok fazla durulmamıştır [33, 115, 129, 176, 177]. Ancak bu bölüm içerisinde tartışılan kesit mikroyapıları göz önüne alındığında bu parametrelerin mikroyapısal özellikler üzerinde ne denli etkin olduğu gözler önüne serilmiştir. Bu mikroyapısal değişimlerin malzemenin nihai mekanik ve yorulma davranışlarını etkileyeceği açıktır. Bir sonraki bölümde bu durumun kanıtlanması için farklı parametreler altında dövülen Ti6Al4V alaşımının yüzey altı sertlik değerinin derinliğe bağlı olarak değişimleri incelenecektir.



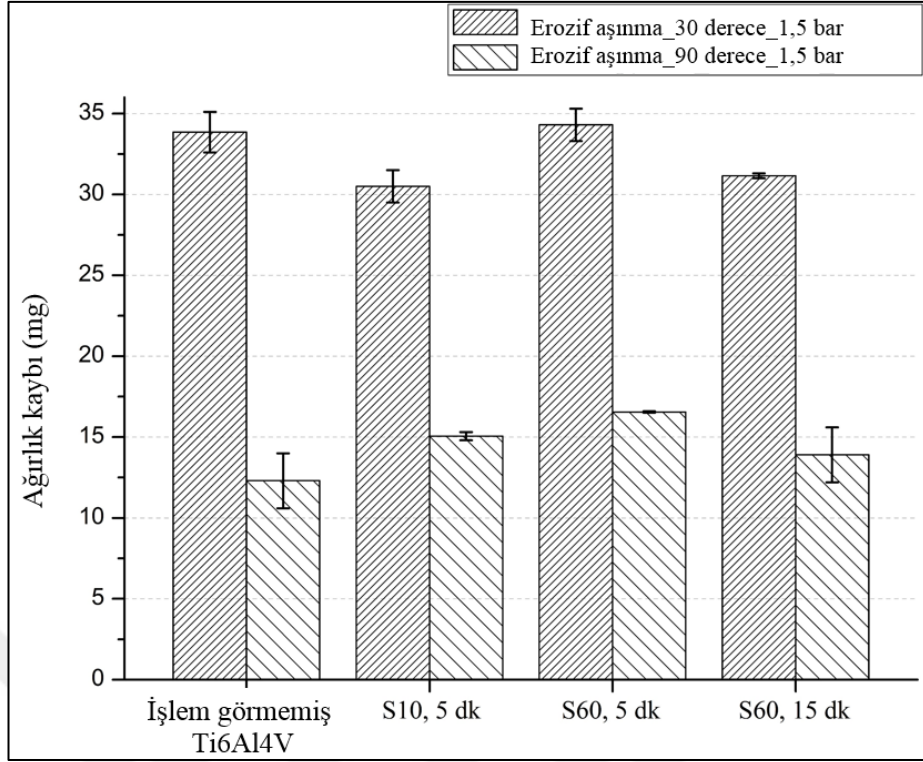
Şekil 5.37. Bilyalı dövme sonrası (S60_15 dk) kesit SEM incelemesi

5.2.2. Eroziyon aşınma testleri

Bilyalı dövme sonrası farklı yüzey ve yüzey altı özelliğine sahip olan numunelere eroziyon aşınma testleri uygulanarak aşınma davranışları incelenmiştir. Eroziyon aşınma testleri sonrası ağırlık değişimi, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey mikroyapısı, sırasıyla hassas terazi, temaslı uçlu yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ve SEM ile incelenmiştir.

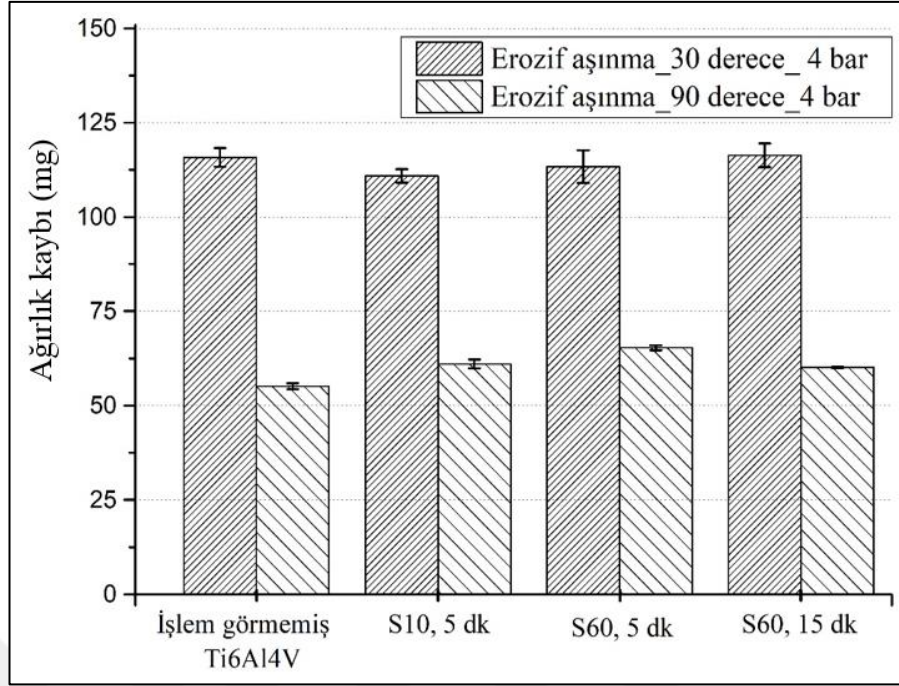
5.2.2.1. Eroziyon aşınma testleri sonrası ağırlık kaybı

Bilyalı dövülen numunelere araştırmacının daha önceki yıllarda gerçekleştirdiği eroziyon aşınma deneyleri sonuçlarına ve tecrübelerine dayanarak optimize edilmiş belirli parametreler altında eroziyon aşınma deneyleri uygulanmıştır [138, 178-182]. Numuneler 80 mesh boyutunda alümina aşındırıcı partikül kullanılarak, 1,5 bar partikül püskürtme basıncında, 30° ve 90° partikül çarpma açılarında, 30 s boyunca eroziyon aşınma testleri uygulanmıştır. Eroziyon aşınma testleri sonucunda partikül çarpma açısına göre değişen ağırlık kaybı grafiği Şekil 5.38’de verilmiştir. Bilyalı dövülen numunelerin ve kontrol numunesinin genel aşınma davranışı incelendiğinde ağırlık kaybı değerlerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Partikül çarpma açısının etkisi incelendiğinde ise ağırlık kaybının, 30° partikül çarpma açısında, 90° çarpma açısına kıyasla tüm numunelerde daha yüksek değerde olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.38. Erozif aşınma sonrası ağırlık kaybı değişimi

Şekil 5.39' de 4 bar aşındırıcı partikül püskürtme basıncı altında aynı parametreler kullanılarak erozif aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Püskürtme basıncının artması ile tüm numunelerde ağırlık kaybının arttığı belirlenmiştir. Partikül çarpma açısına bağlı ağırlık kaybının değiştiği ve 30° partikül çarpma açısında ağırlık kaybının daha fazla olduğu belirlenmiştir [180, 182, 183]. Farklı parametreler altında bilyalı dövme işlemi gerçekleştirilen yüzeyler ile kontrol numunesinin ağırlık kaybı değerlerinin birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.39. Erozif aşınma sonrası ağırlık kaybı değişimi

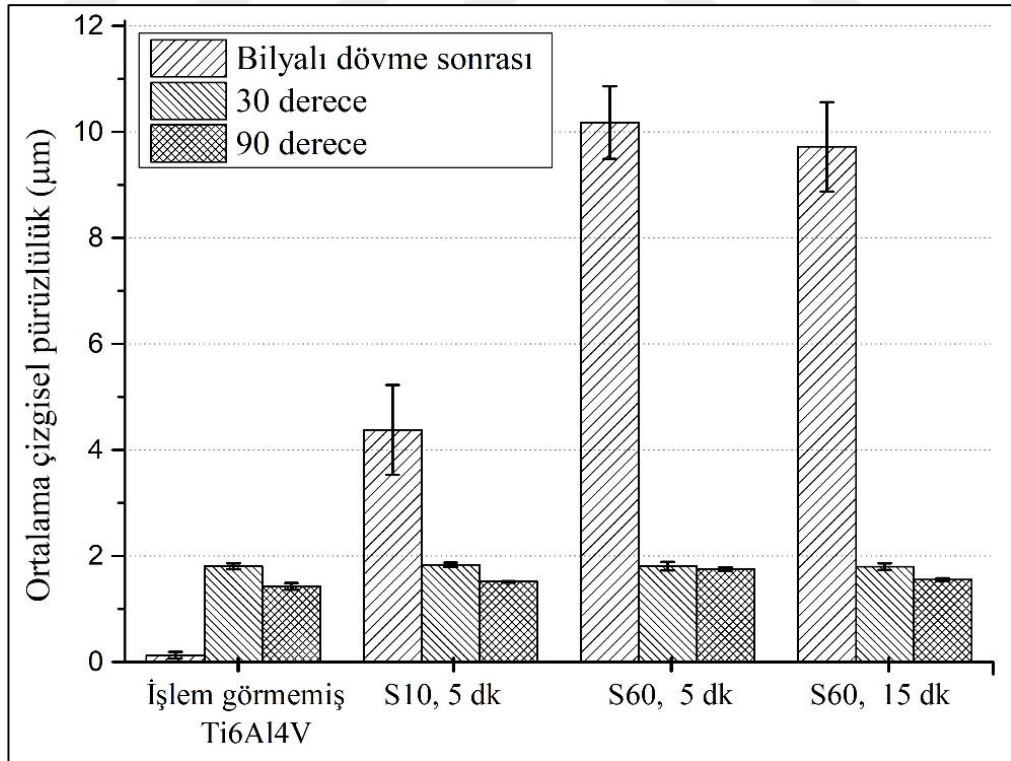
Literatür çalışmaları incelendiğinde Ti6Al4V alaşımının sünek erozif aşınma davranışı gösterdiği, en fazla kütle kaybının 30°- 45° partikül çarpma açılarında, en düşük aşınmanın 90° çarpma açısında, gerçekleştiği belirlenmiştir [3, 11, 182]. Farklı ısı işlemler sonucunda sertleştirilen Ti6Al4V alaşımına gerçekleştirilen erozif aşınma deneyleri sonrası sertlik artışı ile birlikte erozif aşınma dayanımının azaldığı belirlenmiştir [184]. Tez çalışmasında bilyalı dövme sonrası Ti6Al4V alaşımının yüzey ve yüzey altı tabakada sertliğin artışı sağlanmıştır. Erozif aşınma deneyleri sonrası gerçekleşen kütle kaybının işlem görmemiş Ti6Al4V alaşımı ile benzer değerlerde gerçekleştiği belirlenmiştir.

5.2.2.2. Erozif aşınma testleri sonrası yüzey pürüzlülüğü

Şekil 5.40'da bilyalı dövülen yüzeylerin 1,5 bar partikül püskürtme basıncı altında erozif aşındırılmaları sonucunda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Şekil genel olarak incelendiğinde bilyalı dövme sonrası çok yüksek olan ortalama pürüzlülük değerlerinin erozif aşınma sonrası düştüğü (yaklaşık 2 µm) belirlenmiştir. İşlem görmemiş Ti6Al4V kontrol numunesinin düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri erozif aşınma testleri sonrası artarak 2 µm değerine ulaşmıştır. Erozif aşınma sonrası tüm numunelerinin pürüzlülük değerlerinin birbirine yakın

değerde olduğu, 30° partikül çarpma açısında yüzeylerin az da olsa daha pürüzlü olduğu belirlenmiştir.

Literatür incelendiğinde Ti6Al4V alaşımı için partikül çarpma açısına bağlı yüzey pürüzlülük değerinde değişim olduğu, 30°- 45° partikül çarpma açılarında pürüzlülük değerinin 90° çarpma açısına göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir [178, 182, 185]. Bilyalı dövme sonrası yüzey pürüzlülüğü değeri literatürde sıklıkla incelenen bir durumdur [29, 42, 61, 186, 187]. Yüksek pürüzlülük değerleri bilyalı dövmenin yüzey ve yüzey altında yarattığı pozitif etkinin önüne geçerek malzemenin yorulma dayanımını azaltıcı etki yaratmaktadır [142]. Bu nedenle araştırmacılar bilyalı dövme işleminden sonra tekrar kısa süreli veya farklı boyutta bilyalar kullanarak bilyalı dövme, kumlama vb. işlemleri uygulayarak yüzey pürüzlülüğünü azaltmayı hedeflemektedir [42, 142]. Özellikle biyomedikal uygulamalarda kullanılan Ti6Al4V alaşımı altlık malzemelerde ise belirli bir aralıkta (1-2 µm) pürüzlülük değerleri istediğinden bilyalı dövme sonrası ve erozif aşınma testleri sonrası yüzey pürüzlülüğü değerlerinin incelenmesi ve istenilen değerlere getirilmesi önemlidir [22, 29].



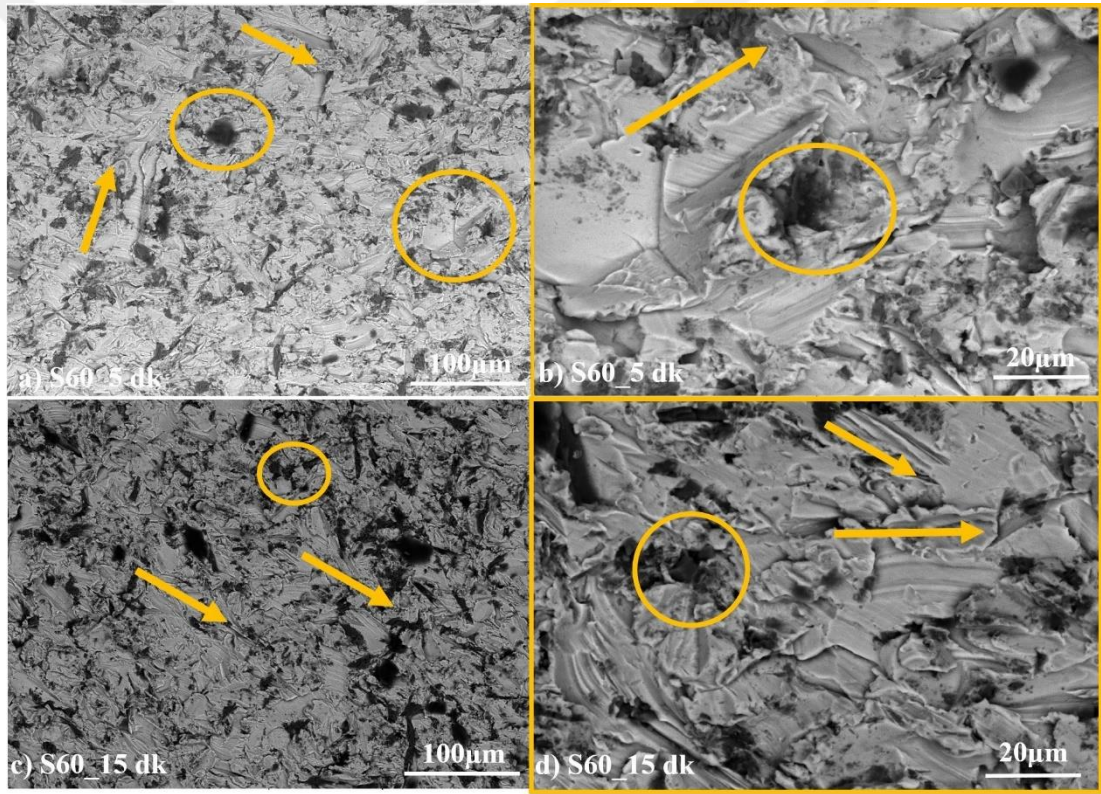
Şekil 5.40. Erozif aşınma testleri sonrası pürüzlülük değişimi

5.2.2.3. Eroziyon aşınma testleri sonrası yüzey morfolojisinin incelenmesi

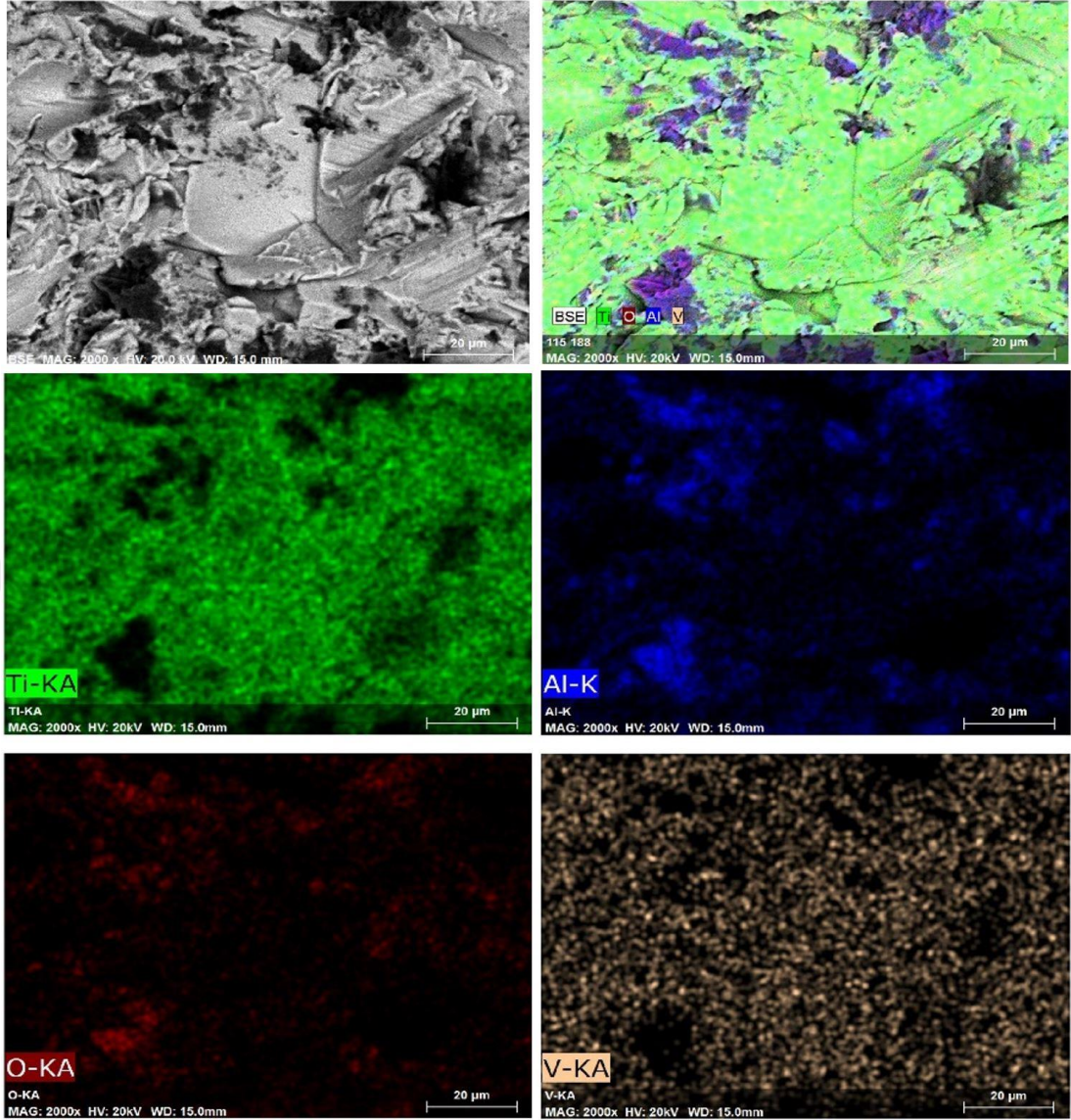
Önceki bölümlerde tartışılan eroziyon aşınmaya bağlı ağırlık kaybı ve yüzey topografyasının değişimi aşınma ile oluşan hasarın ortaya konması açısından önem arz etmektedir. Ancak aşınma hasarının ortaya çıkmasına neden olan etkin aşınma mekanizmalarının anlaşılabilmesi için aşınma sonrası yüzey morfolojilerinin detaylı bir şekilde incelenmesi ve tartışılması gerekliliği açıktır. Şekil 5.41’de bilyalı dövme sonrası numunelerin yüzey morfolojilerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Tüm SEM görüntülerinde aşındırıcı alümine partiküllerin yüzeye 30° çarpma açısında yüksek hızlarda çarpmaları ile oluşan aşınma izleri görünmektedir. Bu aşınma izlerinin oluşturan temel eroziyon aşınma mekanizmalarının mikrosürme ve mikrokesme mekanizmaları olduğu söylenebilir [138, 179-181, 188-190]. Mikrosürme ve mikrokesme mekanizmaları genellikle metaller ve polimerler gibi sünek malzemelerde düşük partikül çarpma açılarında görülen ve yüzeyden yüksek miktarda malzeme kaybına neden olan önemli eroziyon aşınma mekanizmalarıdır [136, 138, 179, 181]. Bu aşınma mekanizmalarının etkin olarak görülmesi yüzeyde gerek malzeme kaybı gerekse aşırı plastik deformasyon nedeniyle vadi ve tepeciklerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu noktada bir önceki bölümde tartışılan 30° lik partikül çarpma açısında meydana gelen yüksek kütle kaybı ve yüzey pürüzlülük değerleri ile yüzey morfolojilerinin ve etkin aşınma mekanizmalarının örtüştüğü sonucuna varılabilir.

Özellikle yüksek büyütme verileri SEM görüntülerinde (Şekil 5.41) keskin kenarlı aşındırıcı partiküllerin yüzeyde oluşturduğu çizikler dikkat çekmektedir. Dikkat çeken bir diğer unsur ise yüzeyde yer alan kontrastlardır. Şekil 5.42 incelendiğinde yüzeyde yer alan bu kontrastlar yüzeye saplanan ve gömülen aşındırıcı alümine partikülleri olduğu görülmektedir. Aydınlık kontrastlı bölgeler ise Ti6Al4V alaşımı olarak belirlenmiştir. Şekil 5.42’ de verilen EDS haritaları incelendiğinde yüzeyde çok sayıda alümine partikülü bulunduğu görülmektedir. Eroziyon aşınma esnasında yüzeye aşındırıcı partiküllerin gömülmesi literatürde özellikle titanyum alaşımları gibi sünek eroziyon aşınma davranışı gösteren metaller için sıklıkla belirtilmiştir [138, 180]. Partikül gömülmesi keskin köşeli aşındırıcıların sahip oldukları yüksek momentum nedeniyle kendilerine göre nispeten sünek hedef malzeme yüzeyine aşınma esnasında penetre olmaları ve arkalarından gelen diğer aşındırıcı partiküllerin darbeleri ile parçalanarak hedef malzeme yüzeyine

gömülmeleri ile açıklanmıştır. Literatürde Ti6Al4V ile ilgili katı partikül erozyonu çalışmalarında bu durum raporlanmıştır [136, 138, 180]. Partikül gömülmesi için en önemli faktörler aşındırıcı partikülün yüzeye penetrasyonunu sağlayacak keskin köşe ve kenarlarının bulunması ve hedef malzemeye göre nispeten daha yüksek bir sertlik değerine sahip olmaları olarak açıklanabilir [181]. Ancak alümina partiküllerine göre oldukça düşük sertlik değerine sahip olan ve neredeyse hiç keskin köşe ve kenarı bulunmayan küresel paslanmaz çelik bilyalar ile gerçekleştirilen bilyalı dövme işleminde dahi yüzeye saplanan bilyalar tez içerisinde daha önceki bölümlerde tartışılmıştır. Bu noktada erozif aşınma deneyleri ve süreci için partikül saplanmasının kaçınılmaz bir sonuç olduğu belirtilmelidir [136, 180, 191].

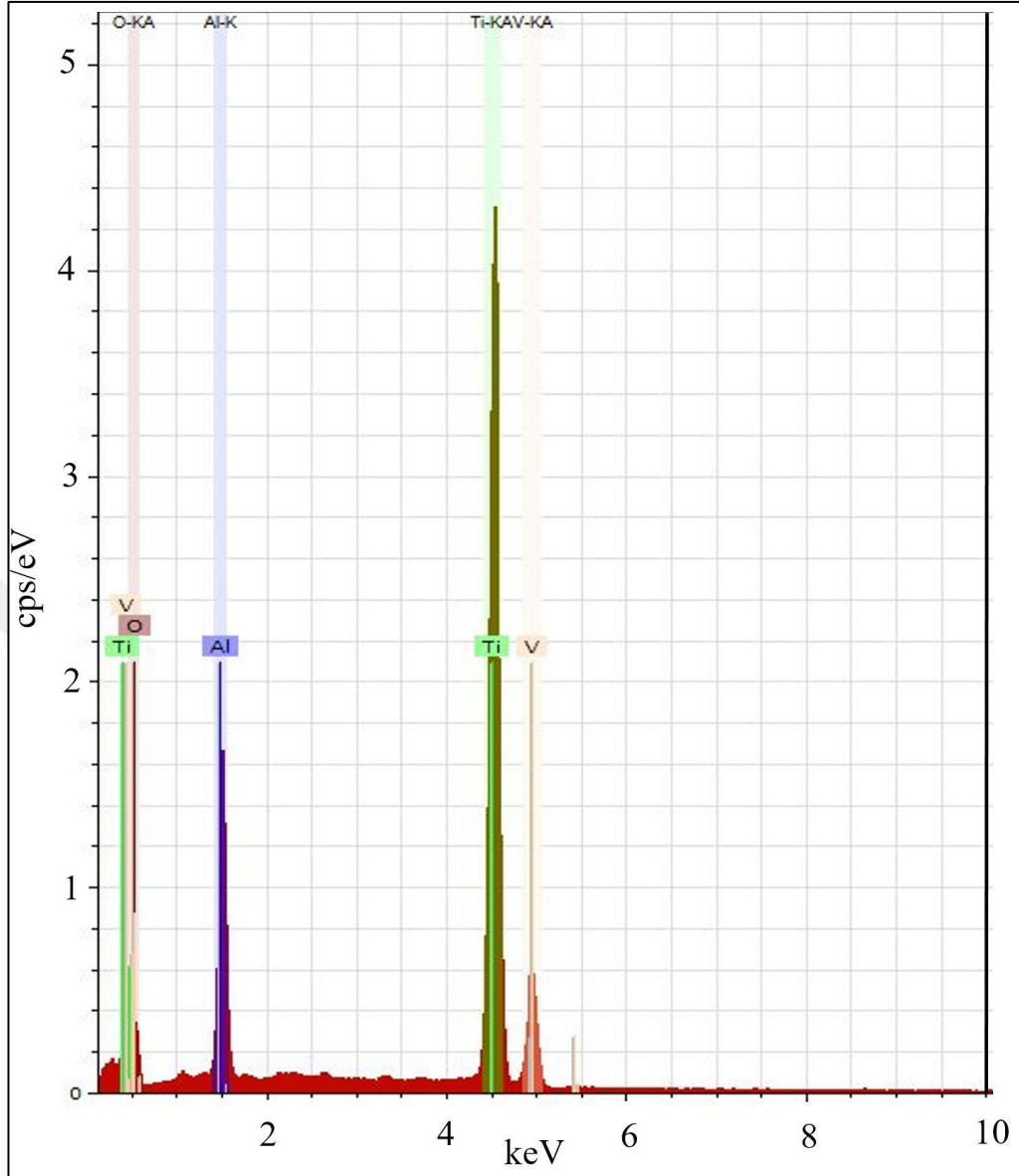


Şekil 5.41. Erozif aşınma sonrası yüzeylerin morfolojik incelemeleri a) ve b) S60_5dk, c) ve d) S60_15dk (Erozif aşınma parametreleri; 1,5 bar partikül püskürtme basıncı, 30° partikül çarpma açısı)



Şekil 5.42. Erozif aşınma sonrası yüzeylerin EDS analizi ile haritalanması (bilyalı dövme parametreleri; S60, 5dk, erozif aşınma parametreleri; 1,5 bar partikül püskürtme basıncı, 30° partikül çarpma açısı)

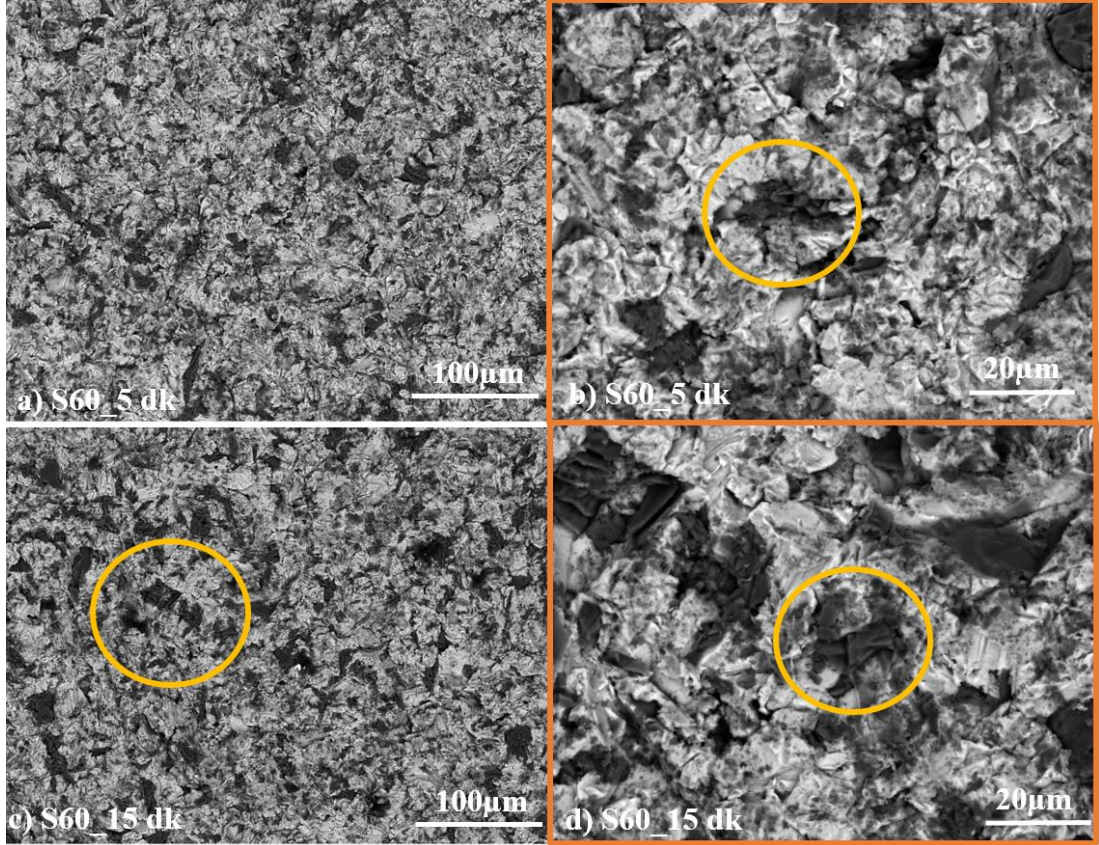
Şekil 5.41’de farklı bilyalı dövme sürelerinde dövülen yüzey morfolojileri incelendiğinde bilyalı dövme süresinin erozif aşınma mekanizmaları üzerinde herhangi bir etkinliği bulunmadığı sonucuna varılabilir. Bu durum bir önceki bölümde tartışılan ağırlık kaybı ve yüzey pürüzlülük değerlerinin bilyalı dövme süresine bağlı olarak değişimi için de geçerlidir. Bu noktada bilyalı dövmenin ve bilyalı dövme süresinin Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışı üzerinde önemli bir değişime yol açmadığı sonucuna varılabilir.



Şekil 5.43. EDS spekterumu (bilyalı dövme parametreleri; S60, 5dk, erozif aşınma parametreleri; 1,5 bar partikül püskürtme basıncı, 30° partikül çarpma açısı)

Literatür çalışmaları incelendiğinde Ti6A4V alaşımının erozif aşınma davranışını değiştiren en önemli erozif aşınma parametresinin partikül çarpma açısı olduğu belirlenmiştir [3, 11, 138, 178, 179, 182, 188-190]. Bu nedenle Şekil 5.44' de 90° partikül çarpma açısında aşındırılan bilyalı dövülmüş yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde Şekil 5.41' e kıyasla yüzey morfolojisinin tamamen değiştiği görülmektedir. Şekil 5.41' de yer alan çizikler, mikrosürme ve mikrokese izleri tamamen ortadan kaybolmuş, bu aşınma morfolojilerinin yerini mikro çatlaklar ve plastik deformasyon sonucu oluşmuş küçük tepe ve çukurlar

almıştır. Bu sonuçların bir önceki bölümde tartışılan yüzey pürüzlülük değerleri ile uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 5.40). Literatürde konu ile ilgili yer alan çalışmalar incelendiğinde bu aşınma mekanizmalarının sünek malzemelerde aşınma miktarını sınırladığı ve yüksek partikül çarpma açılarından yüzeyden az miktarda malzeme uzaklaşabildiği belirtilmiştir [179-181]. Bu durum, Şekil 5.38' de ve Şekil 5.39' da sunulan bilyalı dövülmüş numunelerde 30° ve 90° partikül çarpma açılarında erozif aşınma ile meydana gelen ağırlık kaybı değişimini net bir şekilde açıklamaktadır. 90° partikül çarpma açısında görülen bu aşınma mekanizmaları yüzeyde etkin bir malzeme kaybı meydana getirmemiş ve 30° partikül çarpma açısında aşındırılan numunelere kıyasla daha düşük kütle kayıplarının görülmesine yol açmıştır [138, 188, 192].



Şekil 5.44. Erozif aşınma sonrası yüzeylerin morfolojik incelemeleri a) ve b) S60_5dk, c) ve d) S60_15dk (Erozif aşınma parametreleri; 1,5 bar partikül püskürtme basıncı, 90° partikül çarpma açısı)

Şekil 5.44 incelendiğinde yüzeye çok sayıda aşındırıcı partikülün saplandığı ortaya çıkmaktadır. Bunun yayında 30° partikül çarpma açısı ile aşındırılan numunelerin yüzeyleri (Şekil 5.41) ile kıyaslandığında partikül gömülmesinin çok daha baskın

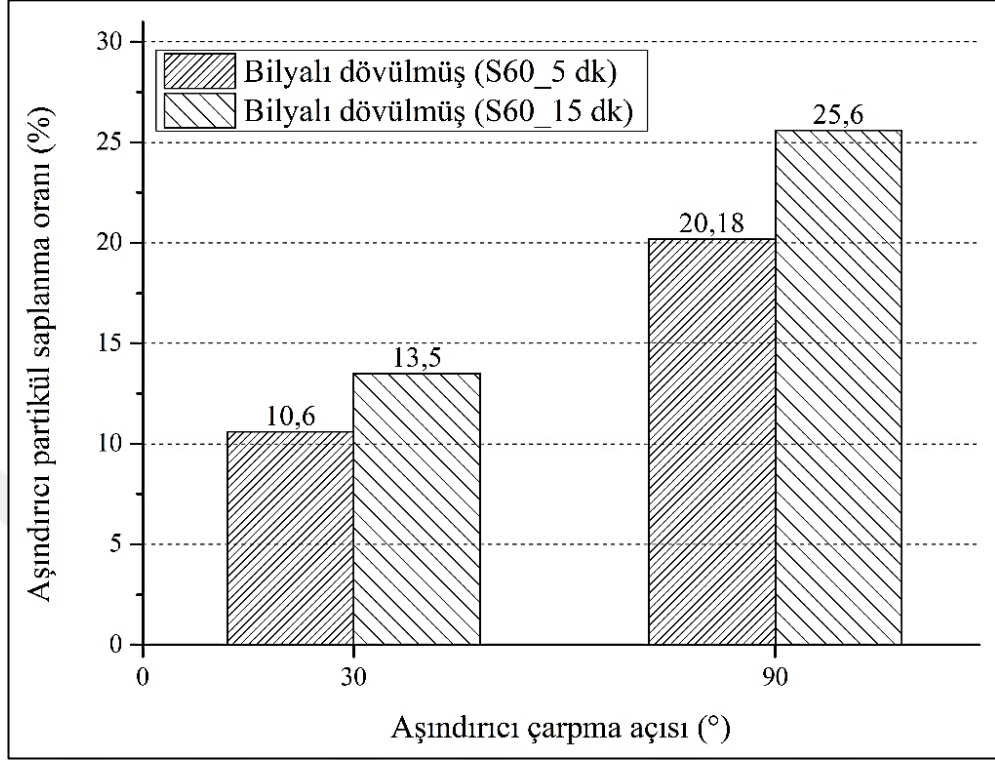
olduğu ve yüzeyin büyük bir bölümünün alümina partikülleri ile adeta kaplandığı görülmektedir. Yüksek çarpma açılarında yüzeye dik olarak çarpan keskin köşe ve kenarlara sahip aşındırıcı partiküllerin yüzeye dik doğrultudaki hız bileşenleri ile sahip oldukları momentumun neredeyse tamamını yüzeye penetre etmek ve yüzeyi keserek aşındırmak için harcayacakları açıktır. Bu aşınma mekanizmasının yüzeyde mikroçatlaklar, tepe ve çukurcukların oluşmasına yol açmasının yanında çok sayıda aşındırıcı partikülün de yüzeye gömülmesine neden olacağı Şekil 5.44a ve c' de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde tespit edilmiştir. Şekil 5.44b ve d' de yüzeye saplanan aşındırıcı partiküllerin yüzeye saplandıktan sonra kırıldığı ve bu nedenle çok sayıda küçük parçacıktan meydana geldiği görülmektedir. Bu durumun temel nedeni yüzeye saplanan partiküllere kendilerini takip eden diğer aşındırıcı partiküllerin çarpmalarıdır. Gevrek karakterdeki bu aşındırıcılar kendilerine çarpan aşındırıcı partiküllerin darbeleri ile kırılmakta ve yüzeye daha fazla gömülmektedirler. Farklı partikül çarpma açılarında yüzeye saplanan partikül miktarının kantitatif olarak karşılaştırılması için bir sonraki bölümde yüzeye saplanan partikül miktarı görüntü işleme programları yardımıyla yüzdesel olarak belirlenmiş ve tartışılmıştır.

5.2.2.4. Image J programı ile saplanan partiküllerin belirlenmesi

Farklı parametreler altında bilyalı dövülen Ti6Al4V alaşımı malzemeye erozif aşınma testleri uygulamış, aşınma sonrası ağırlık kaybı, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey morfolojisi bir önceki bölümde detaylı olarak incelenmiştir. Erozif aşınma sonrası yüzeye aşındırıcı partiküllerin (alümina) saplandığı gerçekleştirilen EDS incelemeleri sonucunda belirlenmiştir (Şekil 5.42 ve Şekil 5.43). Bu bölümde bilyalı dövme sonrası erozif aşındırılan numunelerin yüzeylerine saplanan aşındırıcı partiküllerin yüzdece oranı Image J programı ile belirlenmiştir.

Şekil 5.45'te farklı bilyalı dövme işlemleri sonrası gerçekleştirilen erozif aşınma deneyleri (1,5 bar aşındırıcı püskürtme basıncında, 30° ve 90° partikül çarpma açısında) sonrası yüzeye saplanan aşındırıcı partiküllerin saplanma oranları verilmiştir. Şekil genel olarak incelendiğinde yüzeye saplanan partiküllerin yüzdesel oranının partikül çarpma açısı ile değişim gösterdiği, 90° çarpma açısında 30° çarpma açısına kıyasla yüzeye daha fazla saplanma olduğu her iki dövme işleminde de belirlenmiştir. 90° çarpma açısında yüzeye daha fazla saplanma olmasını aşındırıcı partiküllerin sahip

olduğu kinetik enerjiyi hedef malzeme yüzeyine daha yüksek oranda aktarmasından kaynaklandığı söylenebilir [180, 185, 191].

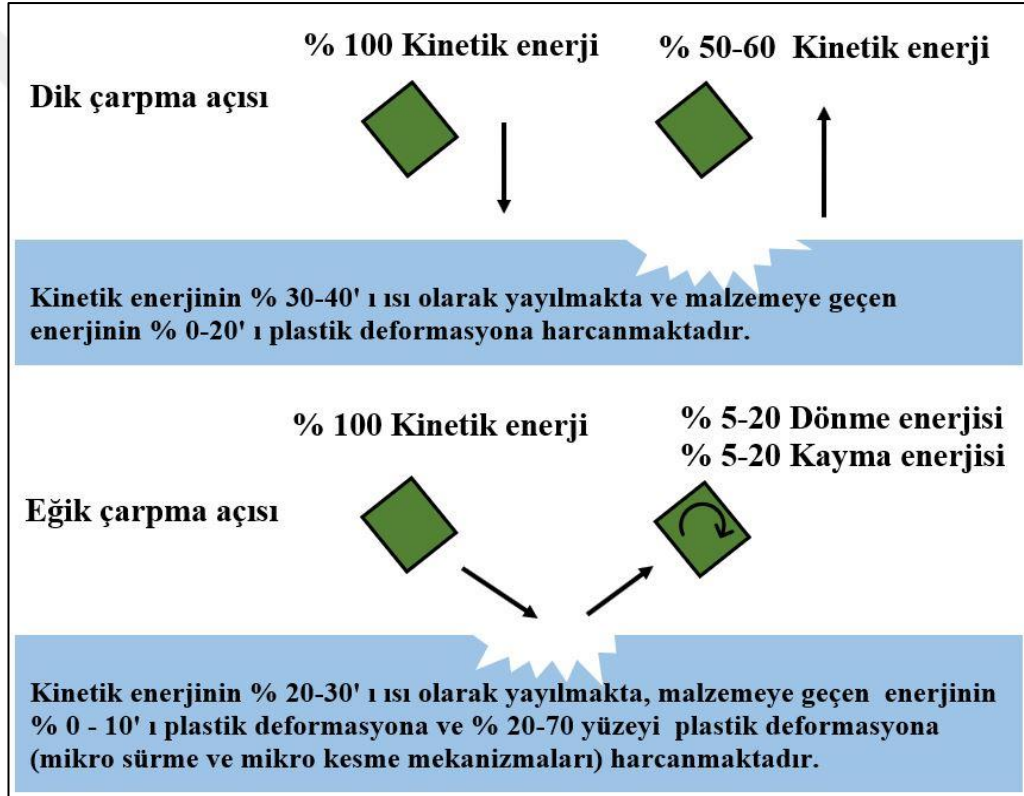


Şekil 5.45. Eroziyon aşınma testleri sonrası yüzeye saplanan partiküllerin yüzdesel oranı

Literatür incelendiğinde eroziyon aşınma testleri sonrası maksimum erozyon oranının sünek malzemeler için 30° ve gevrek malzemeler için 90° çarpma açıları arasında gerçekleştiği belirtilmiştir. Bunun nedeni değişen partikül çarpma açısına bağlı partiküllerin başlangıçta sahip olduğu kinetik enerjinin farklı enerjilere dönüşmesi ve çarpma açısının değişimine bağlı partiküllerin sahip olduğu kinetik enerjiyi kaybetmesi olarak açıklanmaktadır [138, 182, 185, 189, 190].

Çarpma açısının dik olduğu durumlarda bir partikülün sahip olduğu kinetik enerjinin % 30 - 40' ını olarak yayılmakta ve % 0 - 20' ini absorbe edilerek plastik deformasyon için kullanılmaktadır. Geri kalan enerji (başlangıçtaki enerjinin % 50 - 60' ını) partiküllerin yüzeye çarpması ile önce elastik deformasyon enerjisi olarak depolanır, daha sonra ise yüzeyden seken partiküllerin kinetik enerjisine dönüşmektedir (Şekil 5.46) [185].

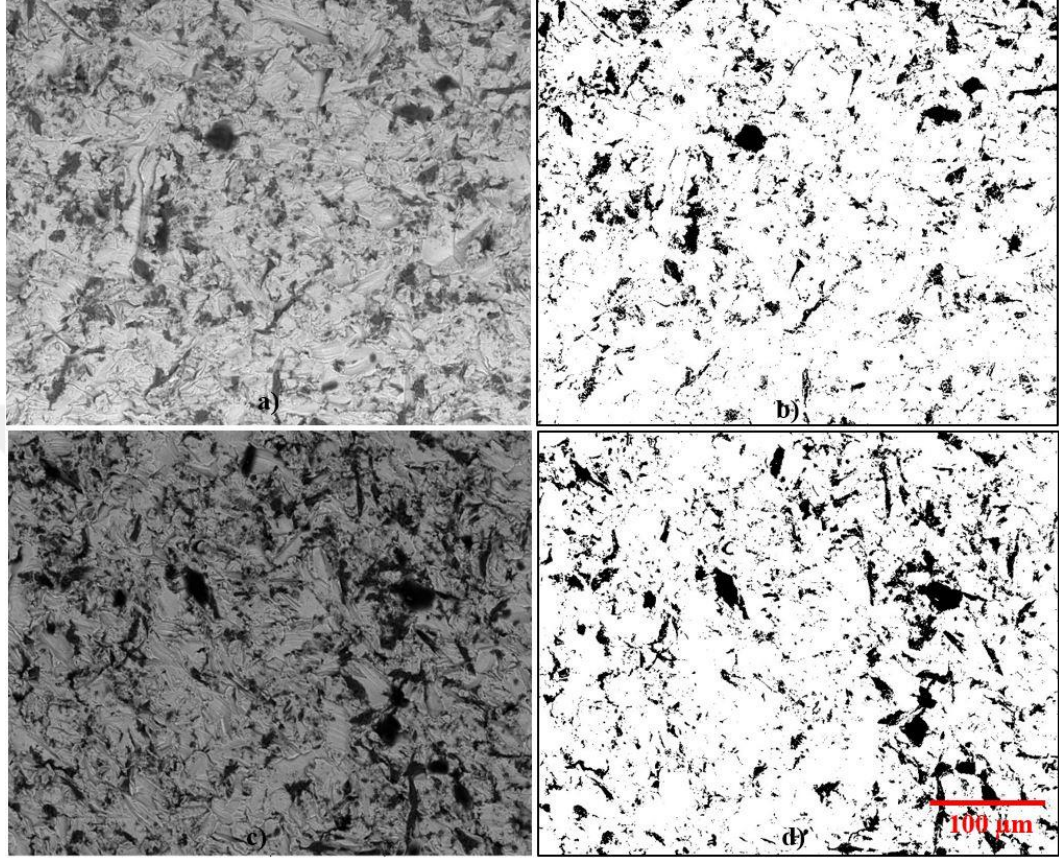
Çarpma açısının eğik olduğu durumda, hedef malzemeye temas anında sürtünmeden olayı partikül döner, kayar ve başlangıçta sahip olduğu kinetik enerjinin % 5 – 20' sini dönme ve kayma enerjisi olarak harcar. Dik açıda gerçekleşen plastik deformasyona ek olarak eğik çarpma açılarında mikro sürme ve mikro kesme aşınma mekanizmaları gözlemlenmekte ve partikülün sahip olduğu enerjinin % 20 – 70' ini tüketmektedir. Eğik çarpma açılarında kinetik enerjinin % 20 - 30' u ısı olarak yayılmakta ve % 0 - 10' u absorbe edilerek plastik deformasyon için kullanılmaktadır (Şekil 5.46) [185]. Literatürde bahsedilen bu enerji dönüşümlerinden de anlaşılacağı üzere sünek aşınma davranışı gösteren malzemede dik çarpma açısında eğik çarpma açısına göre partikül saplanmalarına daha yüksek oranlarda enerji harcandığı belirlenmiştir.



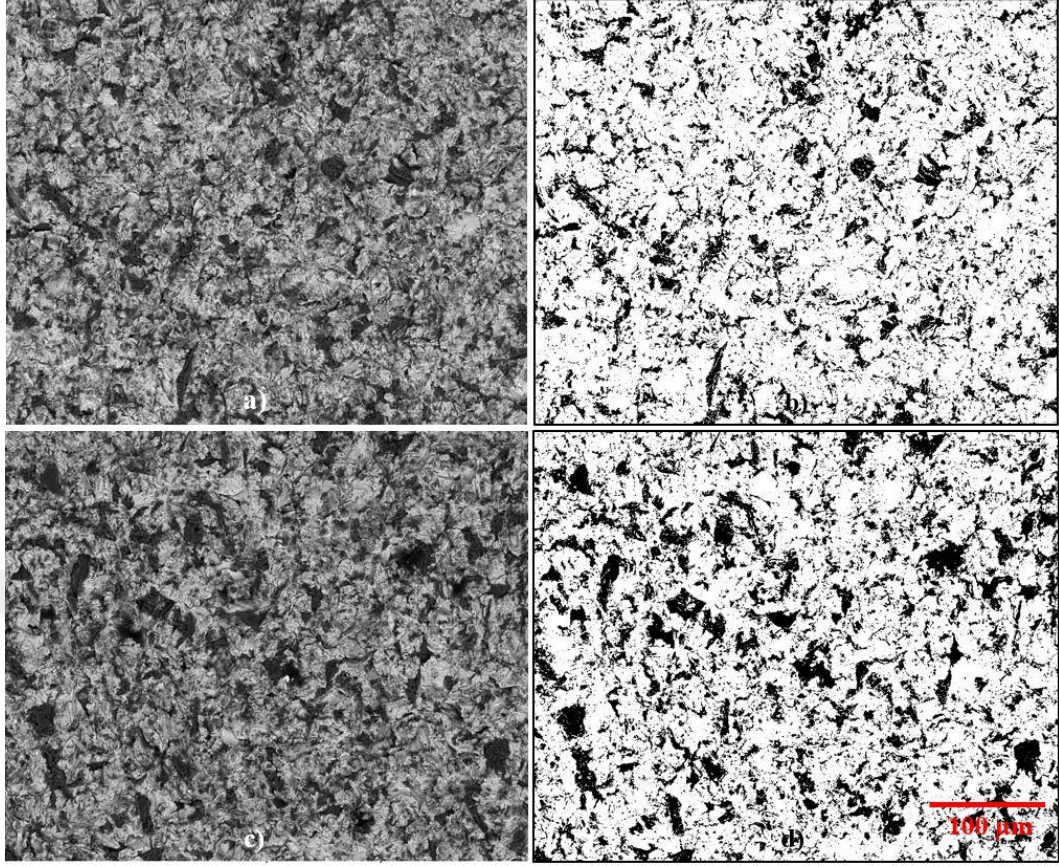
Şekil 5.46. Erozif aşınma sırasında gerçekleşen kinetik enerji aktarımı [185]

Şekil 5.47 ve Şekil 5.48' da bilyalı dövme sonrası erozif aşındırılan yüzeylerin SEM görüntüleri ve bu görüntülerin Image J programı ile işlenmiş hali verilmiştir. Farklı bilyalı dövme sürelerinde (5 dk ve 15 dk) dövülen Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma sonrası yüzeye saplanan aşındırıcı partikül oranları incelendiğinde; uzun süre bilyalı dövme işlemi gerçekleştirilen yüzeylerde daha fazla partikül saplanması olduğu her iki partikül çarpma açısında da belirlenmiştir (Şekil 5.45). Uzun süre bilyalı dövülen numune yüzeylerinde oluşan aşırı plastik deformasyonlar, delaminasyonlar,

çukurcuklar ve çatlaklar nedeni ile yüzeyin tahrip olduğu ve erozif aşınma testleri sırasında aşındırıcı partiküllerin bu tahrip olmuş yüzeye daha kolay saplandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.47. Erozif aşınma sonrası yüzeye saplanan partiküllerin a) S60_5 dk bilyalı dövme sonrası SEM görüntüsü, b) S60_5 dk Image J programı ile incelenmesi, c) S60_15 dk bilyalı dövme sonrası SEM görüntüsü, d) S60_15 dk Image J programı ile incelenmesi



Şekil 5.48. Erozif aşınma sonrası a) S60_5 dk bilyalı dövme sonrası SEM görüntüsü, b) S60_5 dk Image J programı ile incelenmesi, c) S60_15 dk bilyalı dövme sonrası SEM görüntüsü, d) S60_15 dk Image J programı ile incelenmesi

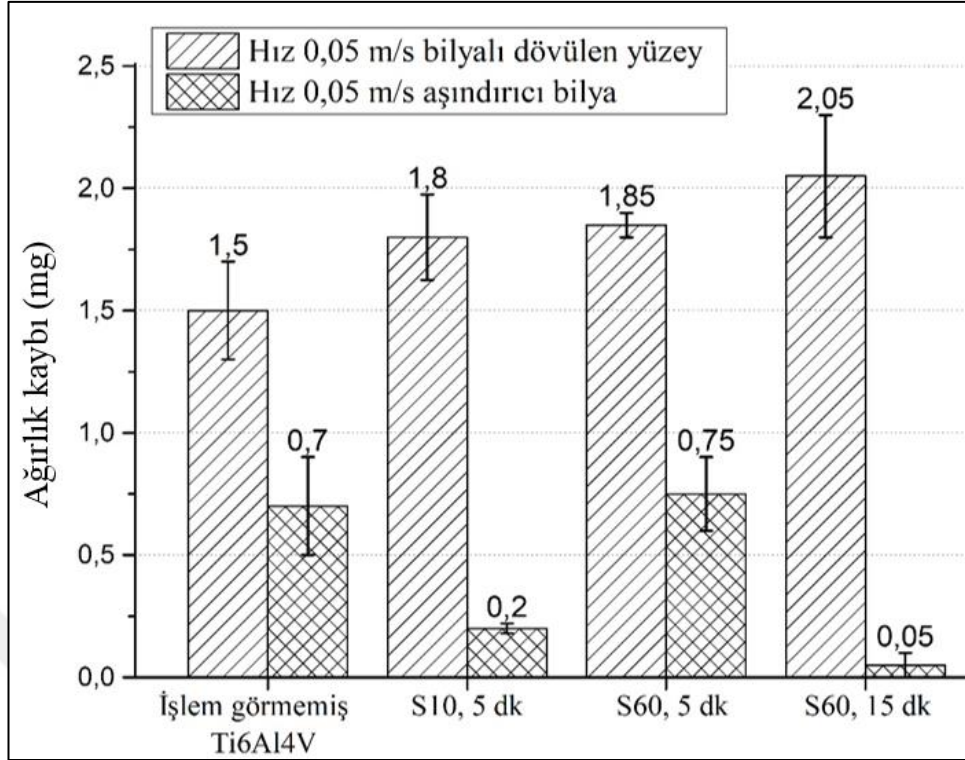
5.2.3. Adhezif aşınma testleri

Bu bölüm içerisinde farklı parametreler altında bilyalı dövülen Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme işlemine ve bilyalı dövme işlem parametrelerine bağlı olarak adhezif aşınma davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Bölüm içerisinde sırası ile farklı adhezif aşınma şartları altında ball-on-disk yöntemi ile aşındırılan numunelerin ağırlık kayıpları, sürtünme katsayıları ve yüzey morfolojilerinin değişimleri incelenmiştir.

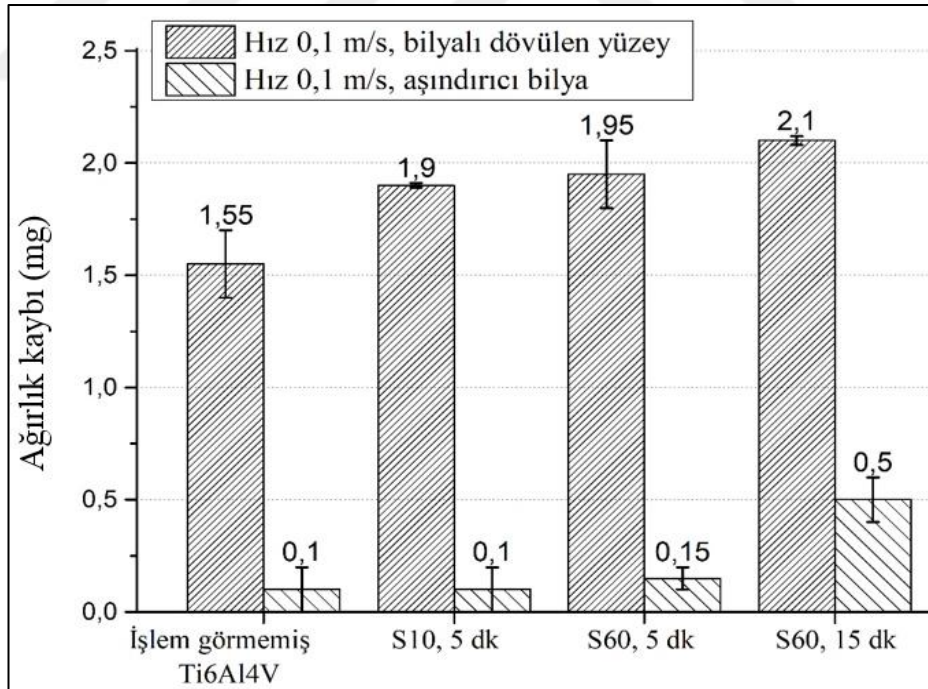
5.2.3.1. Adhezif aşınma testleri sonrası ağırlık kaybı

Şekil 5.49' de ve Şekil 5.50' da iki farklı aşınma hızında gerçekleştirilen aşınma testleri sonrasında aşındırılan malzemede (bilyalı dövülmüş ve işlem görmemiş Ti6Al4V alaşımı) ve aşındırıcı malzemede (alümina bilya) gerçekleşen ağırlık kayıpları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde tüm numunelerde ve aşındırıcı bilyalarda çok düşük miktarda kütle kaybı gerçekleştiği belirlenmiştir. Her iki aşınma hızında da

bilyalı dövme ile aşındırılan malzemede görülen ağırlık kaybının küçük bir miktar arttığı görülmektedir. Bilyalı dövme ile malzeme yüzeyinde ve yüzey altında önemli miktarda sertlik artışı gösterdiği daha önceki bölümlerde tespit edilmiş ve tartışılmıştır. Sertlik ile aşınma miktarı (kütle kaybı) arasında doğrudan geçerli bir ilişki olmamasına rağmen, genellikle sertlik artışı ile malzemelerin aşınma direncinin artışı ve bunun sonucunda kütle kaybının azalması beklenebilecek bir sonuçtur [23, 77, 114, 127, 193]. Diğer yandan bilyalı dövme sonrası aşırı plastik deformasyona uğrayan ve bunun sonucunda pürüzlülüğü ve süreksizliği artan yüzey topografyası ve morfolojisi tez çalışmasının önceki bölümlerinde açıkça belirlenmiş ve tartışılmıştır. Bu durumda artan pürüzlülük ve yüzey süreksizlikleri ile karşıt iki yüzeyin etkileşimine dayanan adhezif aşınma davranışının da değişmesi beklenen bir sonuçtur [193-199]. Şekil 5.49 ve Şekil 5.50 incelendiğinde bu değişimlerin malzemede görülen sertlik artışına rağmen aşınma davranışının çok düşük bir miktarda olsa olumsuz etkilediği ve bunun sonucunda bilyalı dövme ile kütle kaybının küçük bir miktar artış gösterdiği görülmektedir. Şekiller dikkat ile incelenirse kütle kaybının bilyalı dövme şiddeti artışı ile artış gösterdiği ve en fazla kütle kaybının büyük boyutlu bilyalar ile uzun süre dövülen numunelerde görüldüğü dikkat çekmektedir. Bu numunelerin en yüksek yüzey pürüzlülüklerine ve oldukça tahrip olmuş yüzey morfolojilerine sahip olduğu vurgulanmalıdır. Diğer yandan bu numunelerin bilyalı dövme ile ulaşılan en yüksek yüzey ve yüzey altı sertlik değerlerine sahip olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Bu noktada adhezif aşınma davranışı üzerinde sertlik artışından ziyade yüzey topografisinin ve morfolojisinin daha önemli bir rol oynadığı sonucuna varılmıştır. Bilyalı dövme ile değişen yüzey topografisi ve morfolojisi çok düşük bir miktar da olsa adhezif aşınma davranışını olumsuz etkilemiştir. Ancak ağırlık kaybının mg 1-2 mg mertebesi aralığında olması göz önünde bulundurulduğunda bilyalı dövmenin adhezif aşınma davranışı üzerindeki etkisi ihmal edilebilecek düzeydedir. Bu durumda bilyalı dövmenin malzemelerin yüzey ve yüzey altı mekanik özellikleri ile nihai yorulma ve mekanik özelliklerini geliştirirken adhezif aşınma davranışı üzerinde ihmal edilebilecek düzeyde olumsuz bir etkisinin belirlenmiş olması bilimsel ve endüstriyel anlamda önemli bir bulgudur.



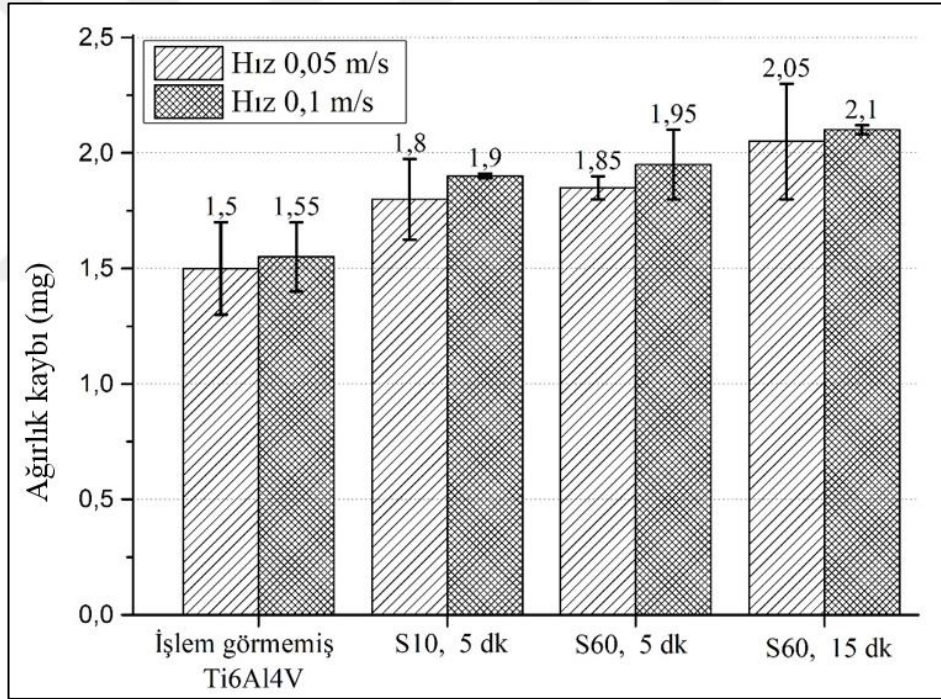
Şekil 5.49. Adhezif aşınma testi sonrası ağırlık kaybı



Şekil 5.50. Adhezif aşınma testi sonrası ağırlık kaybı

Şekil 5.51' de farklı parametreler altında bilyalı dövülmüş ve işlem görmemiş numunelerin iki farklı adhezif aşınma hızında ağırlık kayıpları verilmiştir. Tüm numuneler için aşınma hızı artışı ile ağırlık kaybının bir miktar artış gösterdiği

görülmektedir. Literatürde adhezif aşınma ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde adhezif aşınma hızının artışı ile ağırlık kaybının artışının beklenen bir sonuç olduğu söylenebilir [26, 200]. Ancak bazı çalışmalarda ağırlık kaybı hız artışı ile azalmıştır [201]. Bölüm içerisinde tartışıldığı gibi bilyalı dövülmüş numunelerde küçük bir miktar olsa da aşınma miktarının arttığı görülmektedir. Aşınma miktarındaki artış bilyalı dövme şiddeti ile orantılı olarak artış gösterdiği belirlenmiştir. Ancak bilyalı dövme sonrasında ağırlık kaybında görülen artışın neredeyse ihmal edilebilecek bir seviyede olduğunun tekrar vurgulanmasında yarar vardır. Sonuç olarak takip eden bölümlerde sürtünme katsayısının ve aşınmış yüzey morfolojisinin bilyalı dövme ve bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak tartışılması ile bilyalı dövmenin titanyum alaşımının adhezif aşınma davranışı üzerindeki etkinliğinin anlaşılması amaçlanmaktadır.

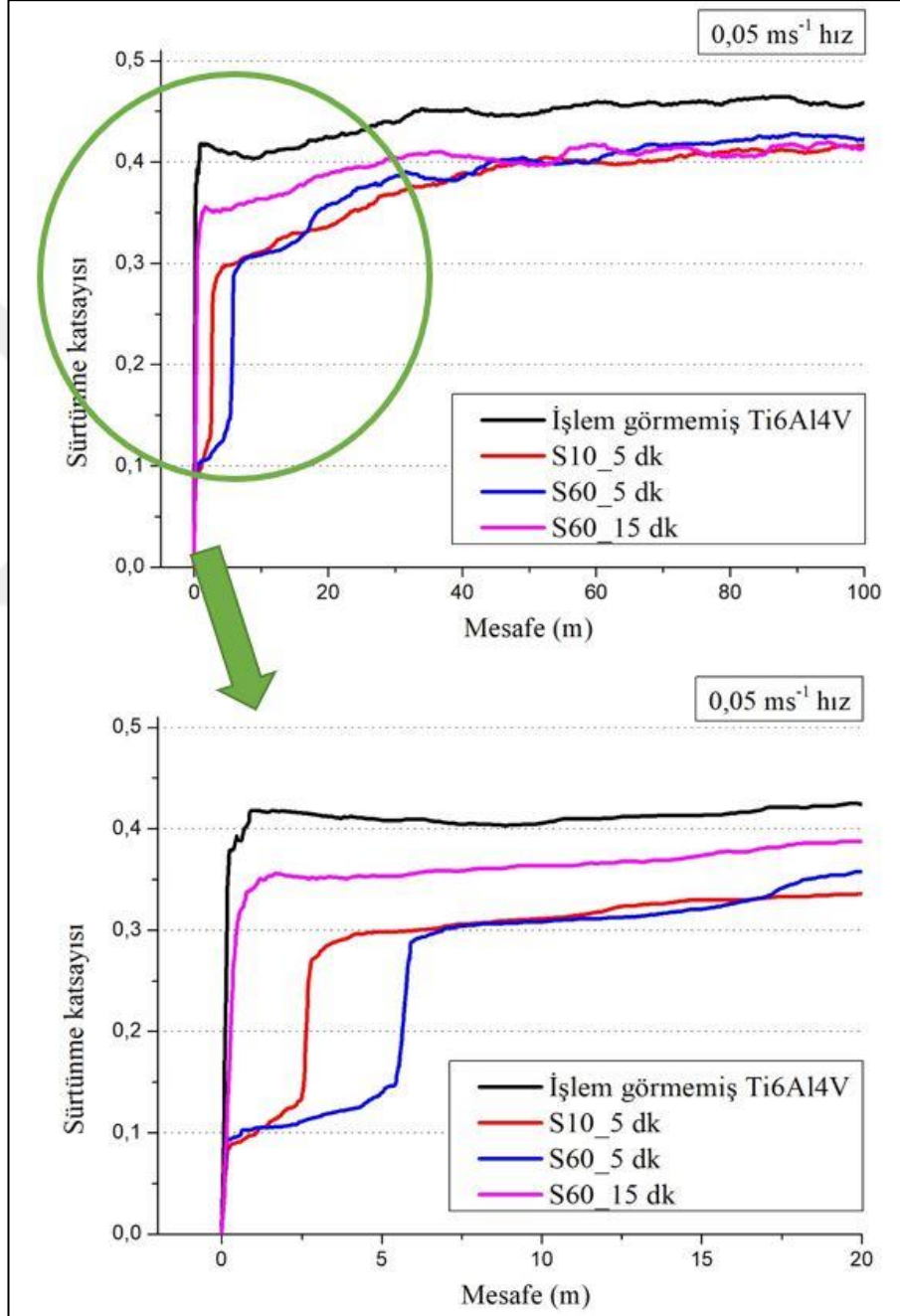


Şekil 5.51. Adhezif aşınma testleri sonrası ağırlık kaybı

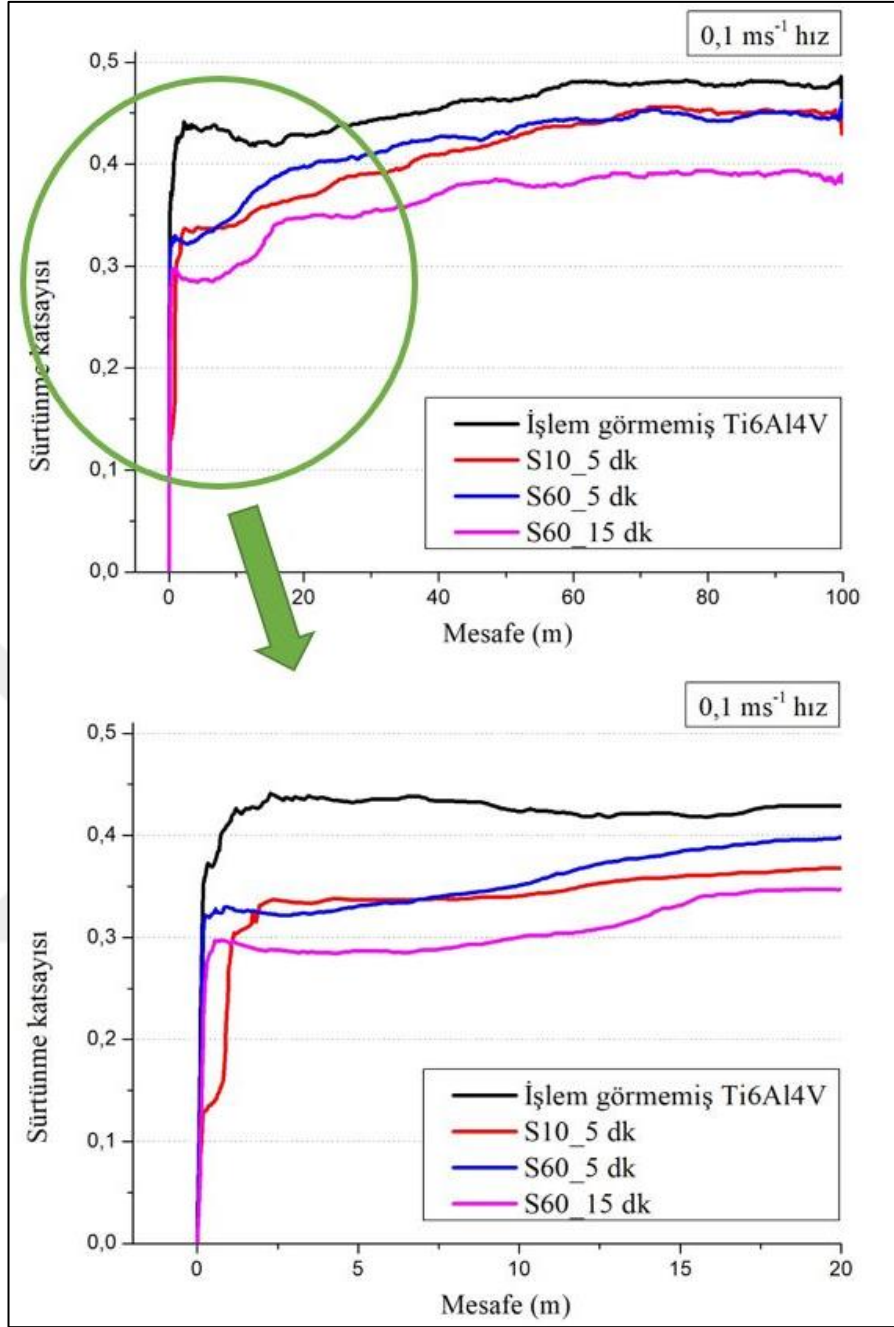
5.2.3.2. Adhezif aşınma testleri sonrası sürtünme katsayısı belirlenmesi

Bu bölümde iki farklı adhezif aşınma hızında gerçekleştirilen ball-on-disk aşınma deneyleri sonrasında işlem görmemiş ve farklı parametreler altında bilyalı dövülmüş Ti6Al4V alaşımını numunelerin sürtünme katsayılarının mesafeye bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. Sürtünme katsayısı - mesafe eğrileri incelendiğinde, bilyalı dövme ile sürtünme katsayısının önemli oranda değiştiği görülmektedir (Şekil 5.54 ve

Şekil 5.55). Her iki grafikte özellikle 0-5 m mesafede sürtünme katsayısının bilyalı dövme ve bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak ciddi bir değişim gösterdiği, ancak artan mesafe ile birlikte sürtünme katsayısı değerlerinin tüm numuneler için kayda değer bir değişim göstermedikleri söylenebilir [166, 202]. Şekiller genel olarak incelendiğinde bilyalı dövülen numunelerinin sürtünme katsayısı değerlerinin işlem görmemiş numuneye göre daha düşük olduğu belirlenmiştir.



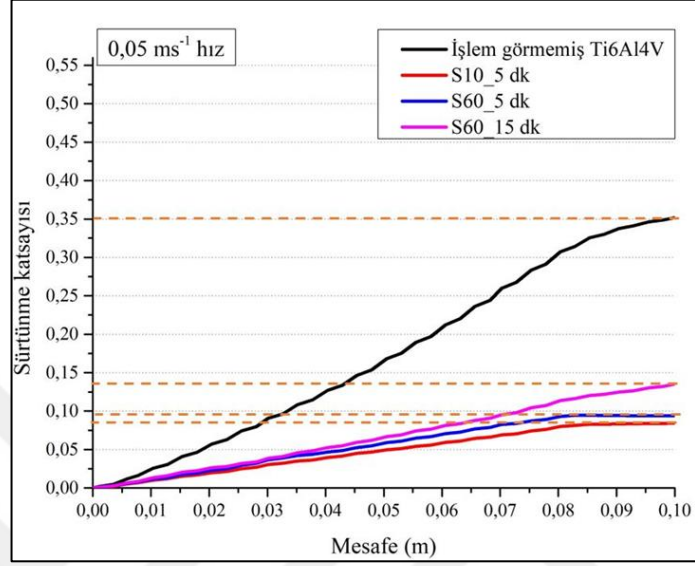
Şekil 5.52. Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (çevresel hız 0,05 m/s)



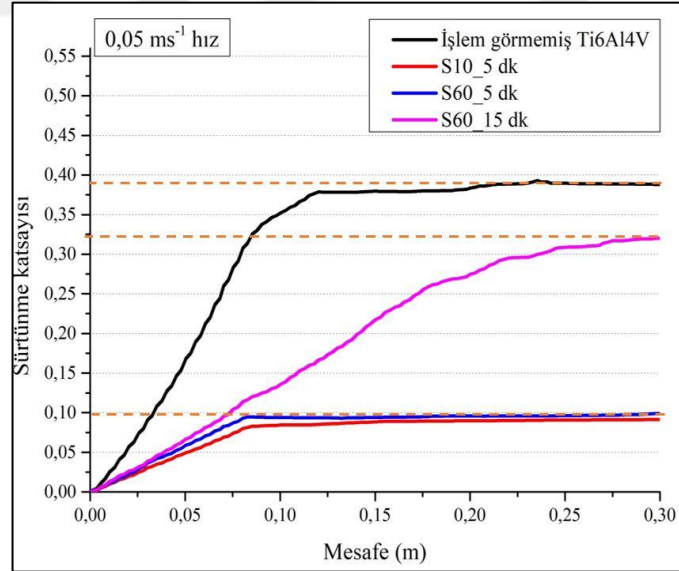
Şekil 5.53. Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (çevresel hız 0,1 m/s)

Bu bölümde iki farklı hızda aşındırılan bilyalı dövülmüş yüzeylerde değişen sürtünme katsayısı değeri çok kısa mesafelerde (0 – 0,1 m, 0 – 0,3 m, 0 - 1 m, 0 - 3 m ve 0 – 5 m) çizilen grafikler üzerinde daha detaylı olarak incelenmiştir. Şekil 5.54, Şekil 5.55, Şekil 5.56, Şekil 5.57 ve Şekil 5.58’ de düşük hızda (0,05 m/s) gerçekleştirilen aşınma testlerinin ilk 5 m’lik sonuçları verilmiştir. Şekil 5.54’ te 0 – 0,1 m mesafede bilyalı dövülen numunelerin sürtünme katsayısı değerlerinin, işlem görmemiş numuneye

kıyasla çok düşük değerde olduğu belirlenmiştir. Bu mesafede işlem görmemiş Ti6Al4V alaşımının sürtünme katsayısı değerinin dövülmüş yüzeylerin yaklaşık üç katı daha fazla olduğu belirlenmiştir. Sürtünme katsayısı değerinin artan mesafe ile arttığı belirlenmiştir.



Şekil 5.54. Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (0 – 0,1 m)

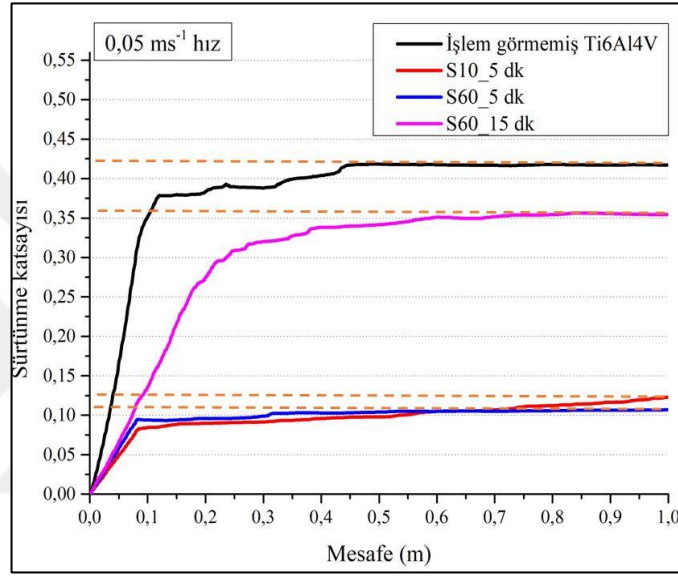


Şekil 5.55. Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (0 – 0,3 m)

Şekil 5.55' te işlem görmemiş numunede sürtünme katsayısı eğrisinin 0,1 m civarında kırılmaya uğradığı, bu değerden sonra eğrinin sabit olarak ilerlediği, bilyalı dövülen

numunelerde ise büyük bilyalı ile uzun süre dövülen yüzeylerde sürtünme katsayısındaki artışın 0,3 m'ye mesafeye kadar artış gösterdiği belirlenmiştir.

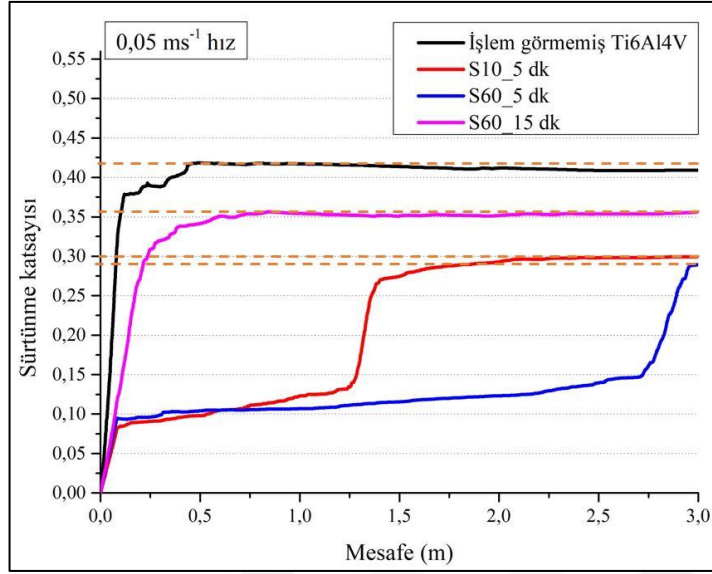
Kısa süreli küçük ve büyük bilyalarla dövülen yüzeylerde ise sürtünme katsayısı eğrisinin birbirine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Şekil 5.56 incelendiğinde, 0,3 – 1 m arasında işlem görmemiş ve büyük bilya ile uzun süre dövülen numunenin sürtünme katsayısı eğrilerinin sabit olarak devam ettiği, diğer numunelerde ise çok az artışla değiştiği belirlenmiştir.



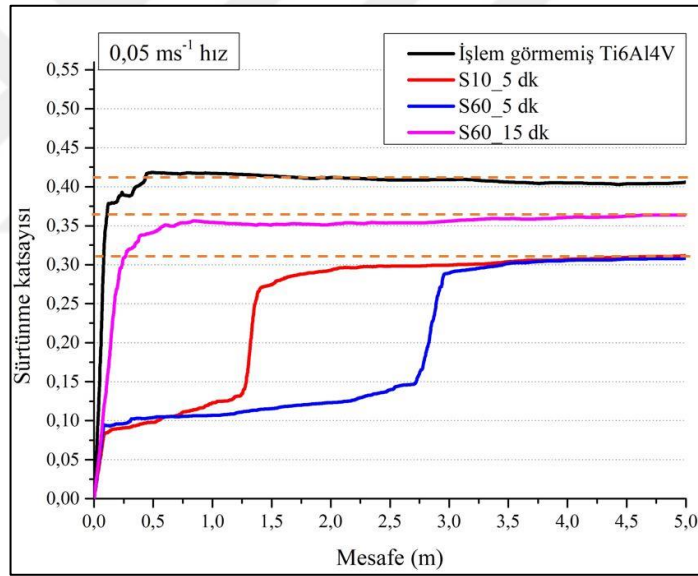
Şekil 5.56. Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (0 – 1 m)

Şekil 5.57 ve Şekil 5.58 incelendiğinde küçük ve büyük çaplı bilyalar ile kısa süreli dövülen numunelerdeki sürtünme katsayısı değişiminde ani yükselişler gerçekleşmiştir. Küçük çaplı bilya ile 1-1,5 m mesafede gerçekleşen bu ani yükseliş, büyük çaplı bilya ile dövülen yüzeyde 2,5 - 3 m civarında gerçekleşmiştir. Ani yükselmeler sonrası her iki yüzeyin sürtünme katsayısı değeri yaklaşık 0,3 değerinde sabitlenerek aynı değerde kalmıştır (Şekil 5.58). Sürtünme katsayısındaki ani yükselmelere bilyalı dövme sonrası oluşan yüksek yüzey pürüzlülüğünün (tepeler ve çukurlar) aşınma ile ortadan kaybolmasının neden olduğu düşünülmektedir.

İşlem görmemiş numune ve büyük çaplı bilya ile uzun süre dövülen numunede sürtünme katsayısı değerleri sabit kalmıştır. 0,41 civarında sabit kalan bu değer her zaman kısa süreli dövülen numunelerin sürtünme katsayısından yüksektir.



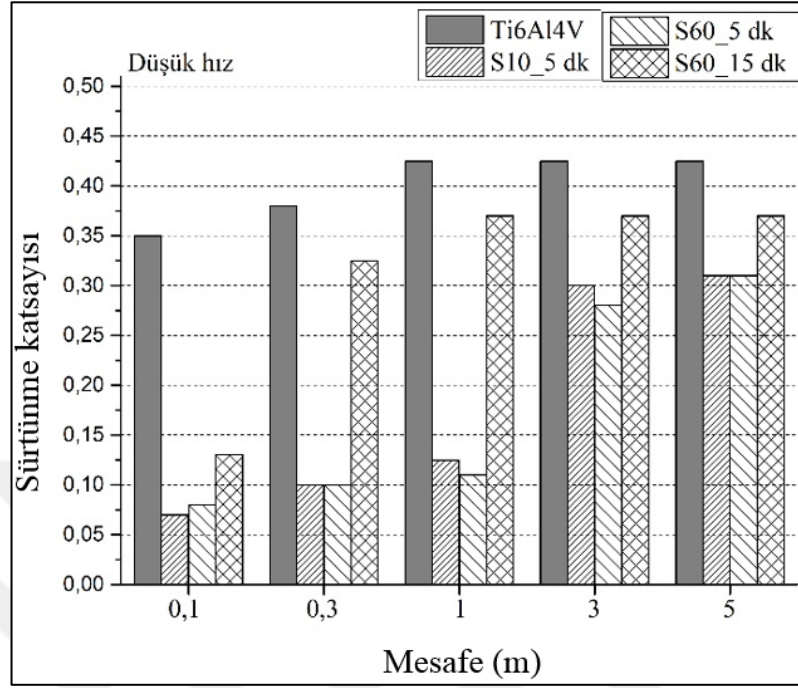
Şekil 5.57. Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (0 – 3 m)



Şekil 5.58. Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (0 – 5 m)

Şekil 5.59' da kısa mesafelerde farklı parametreler altında bilyalı dövülen ve işlem görmemiş Ti6Al4V alaşımının sürtünme katsayısı değerleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde işlem görmemiş malzemenin sürtünme katsayısının tüm mesafe değerlerinde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Uzun süreli bilyalı dövülen numunenin sürtünme katsayısının kısa süreli dövülen numunelerden her zaman daha yüksek olduğu, bunun sebebinin şiddetli bilyalı dövme sonucunda yüzeyin aşırı

deforme olarak yüzey ve yüzey altında çatlakların oluşumu ve aşınma işlemi ile bu tabakaların katmanlar halinde çok kısa mesafelerde kalkması ile açıklanabilmektedir.

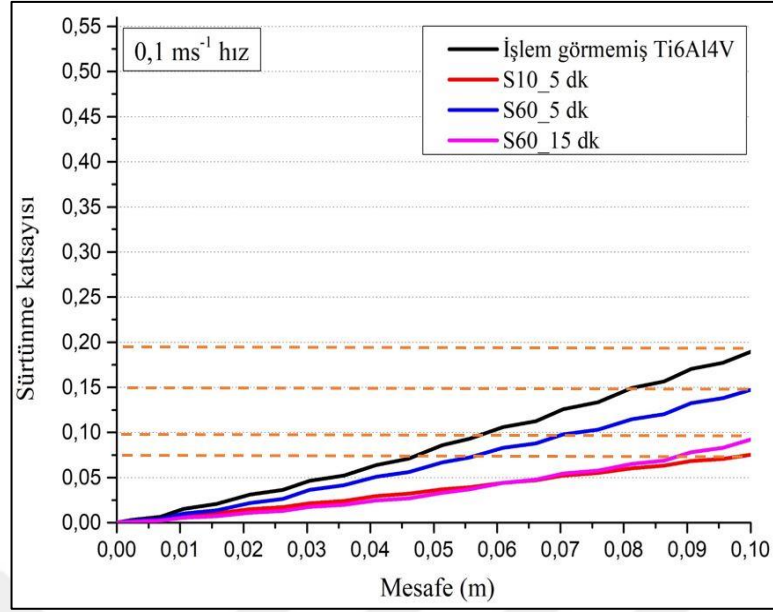


Şekil 5.59. Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (çevresel hız 0,05 m/s)

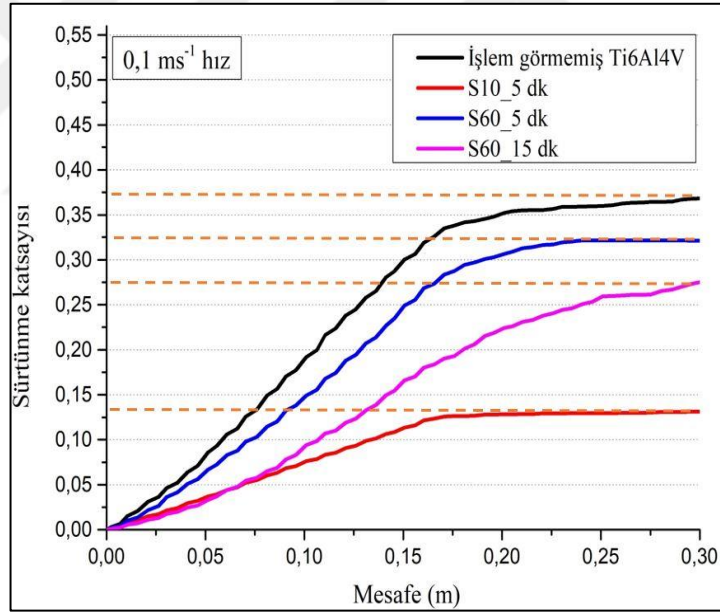
Şekil 5.60, Şekil 5.61, Şekil 5.62, Şekil 5.63 ve Şekil 5.64’ te yüksek hızlarda gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonrası ilk 5 m’ lik mesafede farklı parametreler altında dövülen malzemelerde değişen sürtünme katsayısı değerleri detaylı olarak incelenmiştir.

0 – 0,1 m aralığında sürtünme katsayısı değerleri lineer artış göstermektedir (Şekil 5.60). İşlem görmemiş malzemenin sürtünme katsayısı bilyalı dövülen numunelere göre daha yüksektir.

0 – 0,3 m aralığında küçük bilya ile kısa süreli dövülen numunenin sürtünme katsayısı değeri diğerlerine kıyasla daha düşüktür (Şekil 5.61). Ayrıca bu numuneye ait sürtünme katsayısı değeri 0,15 m civarında sabitlenerek devam ederken diğer numunelerin sürtünme katsayısı değeri artış göstermektedir.

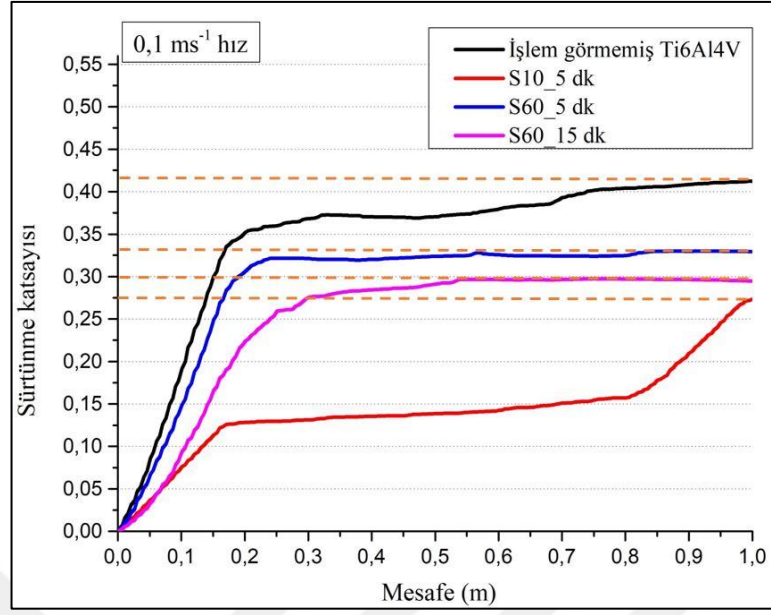


Şekil 5.60. Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (0 – 0,1 m)

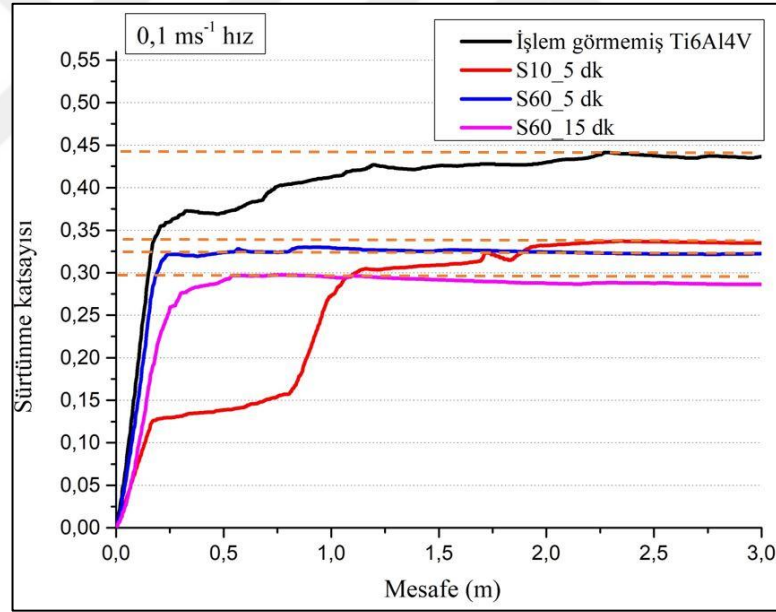


Şekil 5.61. Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (0 – 0,3 m)

Şekil 5.62, Şekil 5.63 ve Şekil 5.64 incelendiğinde küçük çaplı bilya ile kısa süre dövülen numunenin sürtünme katsayısında 1 m civarında ani yükselme olduğu, mesafenin artması ile sürtünme katsayısının sabit kaldığı (yaklaşık 0,35) belirlenmiştir. İşlem görmemiş malzemenin sürtünme katsayısında 0,7 – 2 m mesafede artış meydana geldiği, 2 m’den sonra ise sabitlendiği (yaklaşık 0,45) belirlenmiştir.

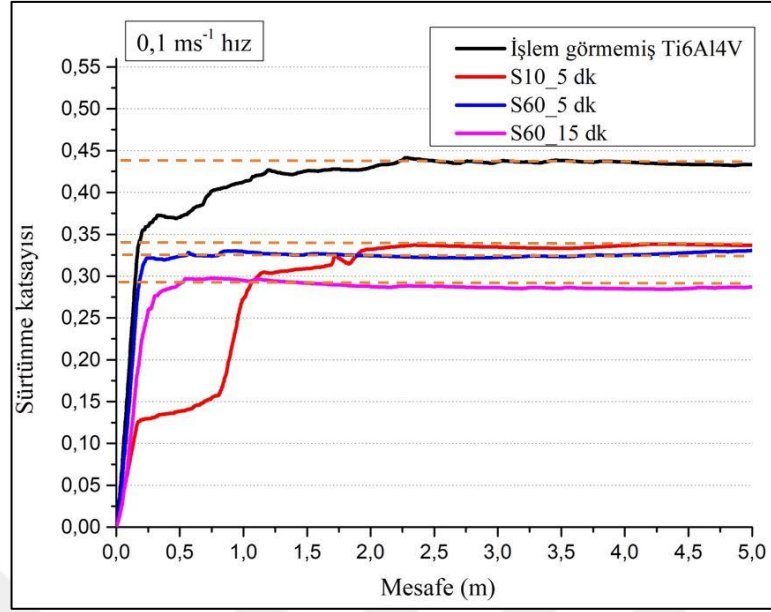


Şekil 5.62. Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (0 – 1 m)



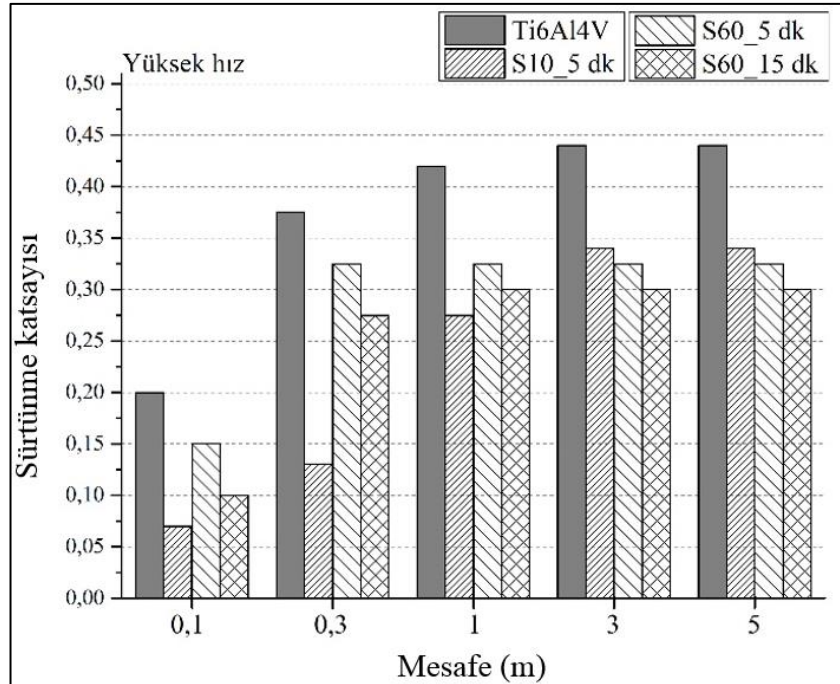
Şekil 5.63. Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (0 – 3 m)

Büyük çaplı bilya ile kısa ve uzun süre dövülen numunelerin sürtünme katsayısı eğrileri birbirine yakın özellikte ilerlemiş, 0 – 0,3 m mesafede lineer artış gerçekleşirken, bu mesafeden sonra sabit (yaklaşık 0,3 – 0,32) kalmıştır.



Şekil 5.64. Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (0 – 5 m)

Şekil 5.65' te yüksek aşınma hızlarında gerçekleştirilen aşınma testleri sonrası kısa mesafelerde farklı parametreler altında bilyalı dövülen ve işlem görmemiş Ti6Al4V alaşımının sürtünme katsayısı değerleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde işlem görmemiş malzemenin sürtünme katsayısının tüm mesafe değerlerinde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.65. Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısının değişimi (çevresel hız 0,1 m/s)

Literatürde araştırmacılar farklı pürüzlülükteki yüzeylerin adhezif aşınma davranışını incelemişler ve özellikle kuru sürtünme koşullarında başlangıç anında yüzey pürüzlülüğünün tribolojik davranış ile bağlantılı olduğunu belirtmişlerdir [203]. Bazı çalışmalarda, yüksek pürüzlülüğe sahip yüzeylerin sürtünme katsayısı değerinin yüksek olduğu belirlenirken [203, 204, 207, 208], bazı çalışmalarda ise tam tesri olarak yüksek pürüzlülüğe sahip yüzeylerin sürtünme katsayısı değerlerinin düşük olduğu belirlenmiştir [23]. Ayrıca bazı çalışmalarda pürüzlü yüzeylerin aşınma testleri başlangıcında düşük olan sürtünme katsayısı değerlerinin, aşınma testinin ilerleyen safhalarında pürüzlülük değerinin aşınmaya bağlı azalması ile sürtünme katsayısı değerinde artış meydana geldiği belirlenmiştir.

Daha önceki bölümlerde tartışılan mikroyapısal değişim ve bu değişime bağlı olarak artan sertlik değerinin adhezif aşınmanın neredeyse sadece yüzeyde gerçekleştiği ve yüzey altına çok fazla penetre etmediği düşünüldüğünde önemli bir etkisi olmadığı düşünülmektedir. Ancak literatür çalışmaları incelendiğinde yüzey ve yüzey altında gerçekleşen mikroyapısal değişimin, tane küçülmesinin, kalıntı gerilmenin malzemenin sürtünme özelliklerinin geliştirilmesi açısından önemli olduğu, sürtünme katsayısını düşürdüğü belirtilmiştir [19, 166, 199, 209]. Ancak bu durumun netleşmesi için ilerleyen bölümlerde adhezif aşınmış yüzeylerin yüzey morfolojileri ve aşınma kesit mikroyapıları detaylı bir şekilde irdelenecektir.

Sonuç olarak bilyalı dövme ile Ti6Al4V alaşımının sürtünme katsayısı değerinin azaldığı söylenebilir. Bu azalmanın tez içerisinde bilyalı dövme ile değişen yüzey ve yüzey altı özelliklerin değişimleri göz önünde bulundurulduğunda iki önemli kök nedeni olabilir. Birincisi bilyalı dövme ile değişen yüzey ve yüzey altı mikroyapısı ve mekanik özelliklerinin Ti6Al4V alaşımının adhezif aşınma davranışına ve sürtünme katsayısını etkilemesidir. İkinci olası kök neden ise bilyalı dövme ile değişen yüzey morfolojisi ve topografisinin adhezif aşınma esnasında görülen aşınma mekanizmalarını ve aşındırıcı ile aşınan malzeme arasındaki temas yüzeyine olan etkileridir. Bilyalı dövme ile meydana gelen bu değişimler göz önünde bulundurulduğunda bilyalı dövülmüş numunelerde sürtünme katsayısında meydana gelen bu değişimin temel nedeninin değişen yüzey topografisi ve morfolojisi nedeniyle aşınma esnasında aşındırıcı bilya ile numuneler arasındaki temas yüzeyinin ve buna bağlı olarak temas basıncının değişim göstermesi olduğu düşünülmektedir [143, 166,

198, 203, 204]. Özellikle bilyalı dövme sonrası değişen yüzey pürüzlülüğü aşınma testleri sırasında temas alanına etki ederek sürtünme katsayısında özellikle ilk 5 m' de etki etmektedir.

Başlangıç anında ve ilk mesafelerde sürtünme katsayısı değerlerinin bilinmesi özellikle biyomedikal uygulamalarda kullanılan cıvatalarda sıkma momentinin hesaplanmasında önem arz etmektedir. Bir sonraki bölümde, bu bölümde ilk 5 m mesafede elde edilen tüm sürtünme katsayısı değerleri için cıvata sıkma momenti değerleri hesaplanacak ve farklı bilyalı dövme işlemlerinin cıvata sıkma momentine etkileri detaylı olarak incelenecektir.

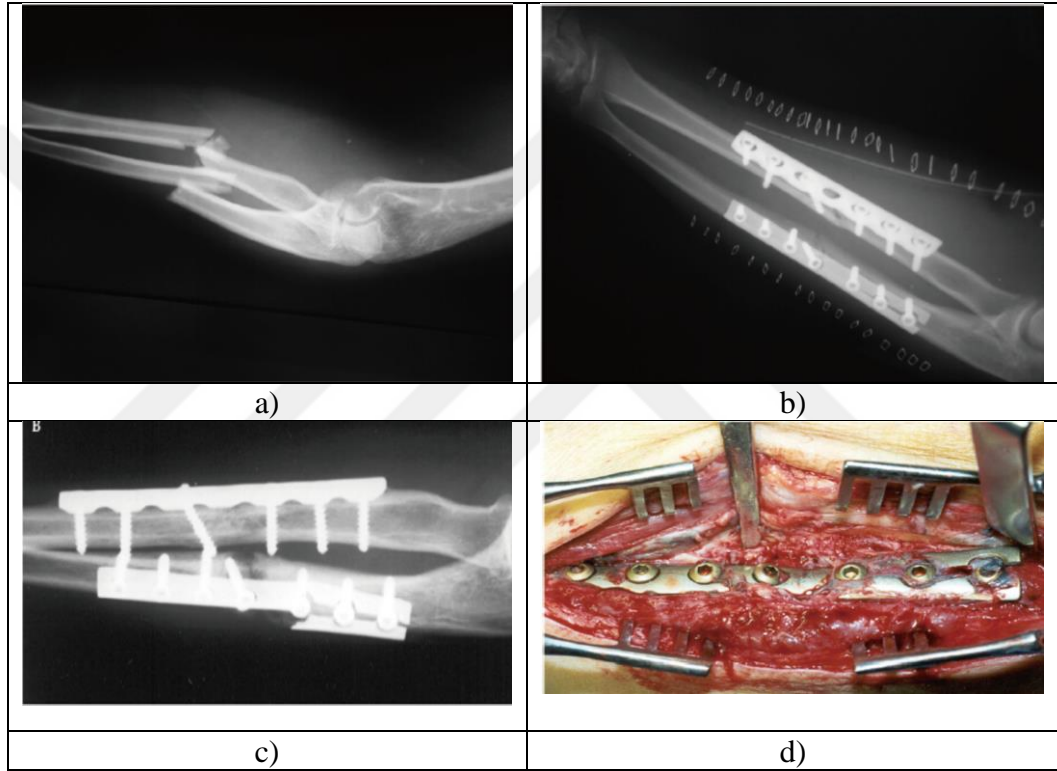
5.2.3.3. Kısa mesafe sürtünme katsayısı değerlerine bağlı cıvata sıkma momenti hesabı

Titanyum ve alaşımları protez eklem, cerrahi splint, damar stentler ve bağlayıcıları, dental implant, kuron köprü ve parsiyel protez yapımında kullanılmaktadır [205]. Biyomedikal uygulamalarda, özellikle kemik çatlak veya kırıklarının onarımında plaka – cıvata bağlantıları sıklıkla kullanılmakta, başarılı sonuçlar alınmaktadır. Ancak literatür çalışmaları incelendiğinde plaka – cıvata bağlantılarında, cıvatanın gerekenden fazla moment ile sıkılması nedeni ile oluşan hasarlara rastlanmaktadır [206]. Literatürden alınan bir vaka örneği Şekil 5.66' da verilmiştir. Ön kol kemiğinde kırık olan hastaya (Şekil 5.66a) plaka – cıvata takılarak tedavi uygulanmıştır. İşlem sonrası X – ışını ile incelemeler gerçekleştirilmiş ve cıvatanın aşırı sıkılması nedeni ile plakada çatlak oluşumu ve ilerlemesi fark edilmiştir (Şekil 5.66b ve c). Hasta acilen ameliyata alınarak operasyon yenilenmiştir (Şekil 5.66d) [206]. Örnek vakandan da anlaşılacağı üzere hastanın sağlığı, operasyonun maliyeti ve operatörün iş gücü kaybı nedeni ile plaka – cıvata bağlantılarında cıvataya uygulanması gereken momentin bilinmesi önemlidir.

Biyomedikal uygulamalarda kullanılan cıvatalarda, cıvata başının plakaya temas ettiği mesafe, bağlantıda kullanılan cıvatanın boyutlarına bağlı olarak değişmekle birlikte, cıvata başının ortalama çapının birkaç katıdır. Bu nedenle grafiklerde 0 - 0,3 m mesafedeki sürtünme katsayısı ve moment değerleri detaylı incelenmiştir. Ayrıca cıvatanın birkaç sefer sökülüp takıldığı durumlar, endüstriyel anlamda büyük çaplı cıvatalar kullanımını ve sürtünme katsayısının sabit olduğu koşullardaki momentin

belirlenmesi açısından ilk 5 m mesafedeki moment değerleri detaylı olarak incelenmiştir.

Bu bölümde kemik kırıklarında kullanılan plaka ve cıvata arasında gerçekleşen sürtünme ve sürtünmeye bağlı cıvatanın sıkılması gereken moment hesabı yapılmıştır. Önceki bölümde detaylı olarak incelenen, farklı parametreler altında bilyalı dövülen Ti6Al4V alaşımının ilk 5 m mesafede sahip olduğu sürtünme katsayısı değerleri cıvata sıkma momentinin hesaplanmasında kullanılmıştır (Denklemler 5.1) [207].



Şekil 5.66. Biyomedikal cıvatada gerçekleşen hasar a) kırılan ön kol kemiği, b) implant malzemede gerçekleşen çatlak, c) çatlağın ilerlemiş görüntüsü, d) implant değişimi [206]

$$M_{\text{Anahtar}} = M_{\text{dişler}} + M_{\text{somun altı}}$$

$$F_A \cdot r_A = F_H \cdot r_2 + F_S \cdot R_m$$


$$F_A \cdot r_A = [F_0 \cdot \tan(\alpha + \gamma)] \cdot r_2 + [\mu \cdot F_0] \cdot R_m \quad (5.1)$$

Denklemlerde cıvatayı sıkma momenti (M_{Anahtar}), cıvatanın kemiğe saplanması ile oluşan, cıvata dişleri – kemik arasında gerçekleşen sürtünme momenti ($M_{\text{dişler}}$) ve somun altı sürtünmesinden (cıvata başı – plaka arası) kaynaklanan moment ($M_{\text{somun altı}}$) olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır (Denklemler 5.1) [207].

Cıvata bir anahtar yardımı ile sıkıldığında üzerinde bir ön gerilme kuvveti (F_{δ}) oluşmaktadır. Ön gerilme kuvveti aksenal olarak etki ederek, cıvatayı sıkma kuvveti olarak kullanılmaktadır. Cıvatayı sıkarken, anahtarla uygulanan moment dişin üzerinde çevresel olarak etki eden sıkma kuvvetine (F_H) neden olmaktadır. Cıvata bir tur attığında plaka içinde bir adım (hatve) ilerleyecektir. Bu nedende uygulamalarda kullanılan cıvatanın boyutları moment hesaplanmasında etkilidir.

Cıvata dişleri – kemik arasında gerçekleşen sürtünme momentinin ($M_{dişler}$), cıvatanın eğim açısının ($\tan \alpha$), sürtünme açısının ($\tan \gamma$) ve ortalama diş çapının (r_2) hesaplanmasında biyomedikal uygulamalarda kullanılan, Tablo 5.1’ de özellikleri verilen cıvata kullanılmıştır. Literatür incelemeleri sonucunda, hesaplamalarda kullanılan cıvata – kemik arasında oluşan sürtünme katsayısı değeri 0,7 olarak alınmıştır [208].

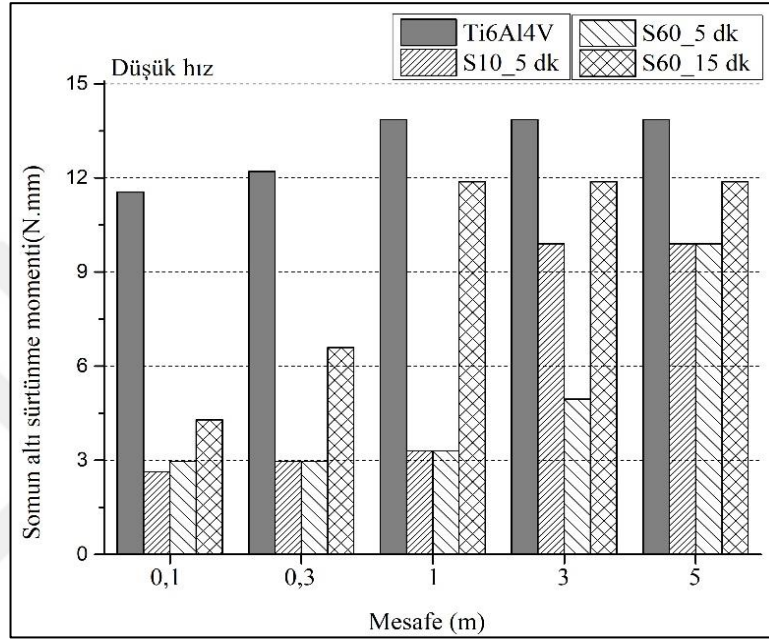
Tablo 5.1. Hesaplamalarda kullanılan implant cıvata ve cıvataya ait özellikler

	Cıvata profili	
	Vida dişi çapı (mm)	4,5
	Diş dibi çapı (mm)	3,0
	Hatve (mm)	1,75
	Cıvata başı çapı (mm)	8,0

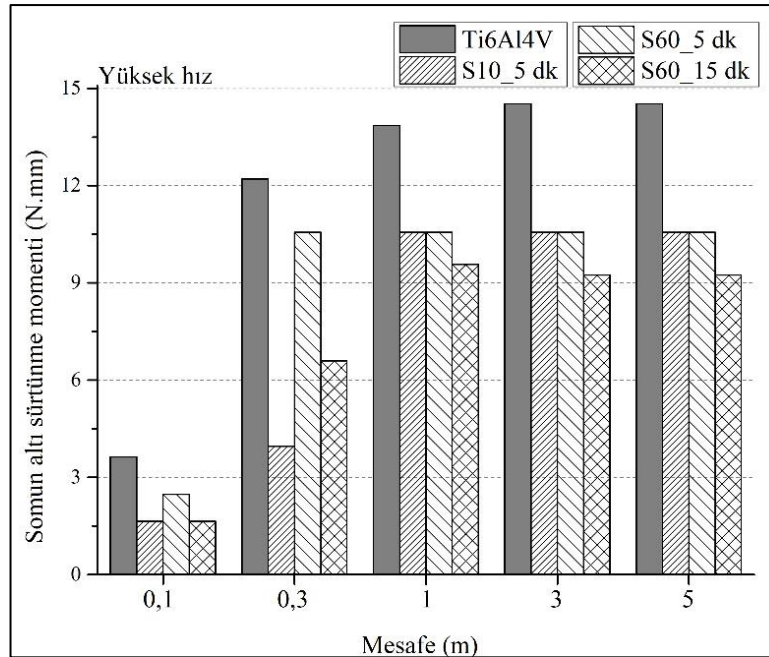
Somun altı sürtünme (cıvata başı – plaka arası) momentinin ($M_{somun\ altı}$) hesaplanmasında, cıvata başının temas ettiği ortalama çapı (R_m), Tablo 5.1’ den alınan değerlere bağlı hesaplanmıştır. Sürtünme kuvveti (F_s), ön gerilme kuvvetinin (F_{δ}) cıvata başı - plaka arasındaki sürtünme katsayısı (μ) ile çarpımına eşittir. Ön gerilme kuvveti (F_{δ}), aşınma testlerinde kullanılan yük değeri olan 5 N olarak alınmıştır. Cıvata başı – plaka arası sürtünme katsayısı değerleri, önceki bölümde detaylı olarak incelenen ilk 5 m mesafeden alınan değerlerle detaylı olarak hesaplanmıştır.

Farklı bilyalı dövme parametrelerinin sürtünme katsayısına etkisi ve buna bağlı olarak somun altı momentinin değişimi Şekil 5.67 ve Şekil 5.68’ de verilmiştir. Şekil 5.67’ de düşük hızda gerçekleştirilen aşınma testleri sonrası kısa mesafede (0 – 5 m) elde edilen sürtünme katsayısı değerlerine bağlı hesaplanan somun altı sürtünme momenti değerleri verilmiştir. İşlem görmemiş Ti6Al4V alaşımında tüm mesafelerde sürtünme momentinin yüksek olduğu belirlenmiştir. Özellikle başlangıç koşullarında (0 – 1 m)

bilyalı dövülen numunelerle işlem görmemiş numune arasındaki somun altı sürtünme momenti farkı çok fazladır. Yüksek hızda gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı değerlerine bağlı hesaplanan somun altı momentlerinde ise ilk 0,3 m mesafede işlem görmemiş ve bilyalı dövülen numunelerde moment farkının yüksek olduğu, artan mesafe ile birlikte bu farkın azalarak sabitlendiği belirlenmiştir (Şekil 5.68).



Şekil 5.67. Somun altı sürtünme momentinin mesafeye bağlı değişimi (çevresel hız 0,05 m/s)

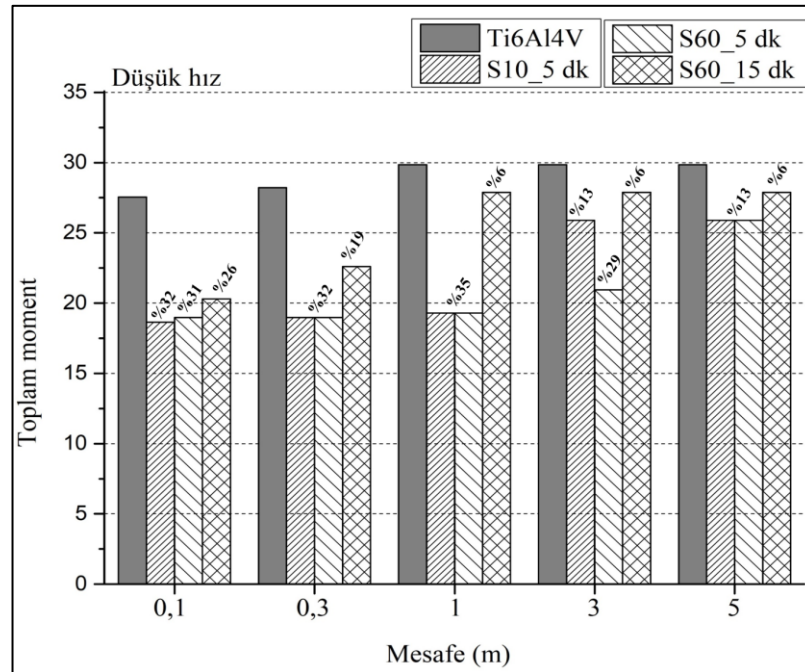


Şekil 5.68. Somun altı sürtünme momentinin mesafeye bağlı değişimi (çevresel hız 0,1 m/s)

Cıvatayı sıkmak için gereken momentin (M_{Anahtar}), cıvata – plaka arasında gerçekleşen sürtünmeden kaynaklanan moment ($M_{\text{Somun altı}}$) ve cıvatanın kemiğe saplanması ile oluşan, cıvata dişleri – kemik arasında gerçekleşen sürtünme momentinin ($M_{\text{dişler}}$) toplamıdır (Denklem 5.1). $M_{\text{dişler}}$ değeri cıvatanın boyutlarına göre alınmış ve sabit bir değer olarak (14 N.mm) hesaplanmıştır.

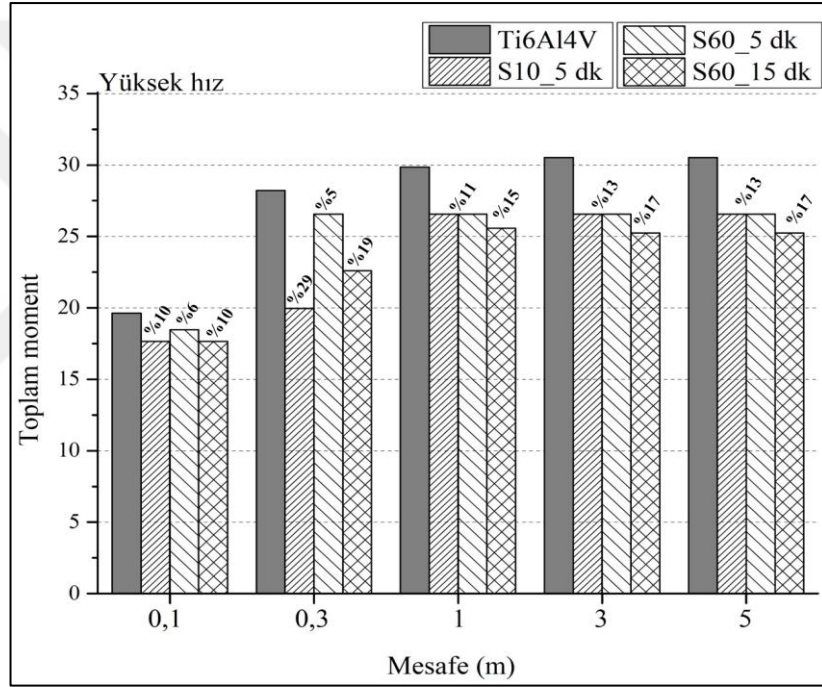
$M_{\text{Somun altı}}$ değeri için aşınma testleri sonrası mesafeye bağlı olarak elde edilen sürtünme katsayısı değerleri farklı parametreler altında bilyalı dövülen ve işlem gerçekleştirilmeyen numuneler için belirlenmiş ve hesaplamalarda kullanılmıştır. Ardından hesaplanan bu iki moment değeri toplanarak cıvatanın sıkılması için gereken toplam moment (M_{Anahtar}) bulunmuştur.

Şekil 5.69 ve Şekil 5.70’ te cıvatayı sıkmak için gereken toplam momentin bilyalı dövme parametrelerine ve değişen mesafeye bağlı değişimi verilmiştir. Şekil 5.69 incelendiğinde, cıvatayı sıkmak için gereken momentin ilk 0,3 m mesafede, bilyalı dövülen numunelerde işlem görmemiş numuneye kıyasla, yaklaşık % 30 oranında düşük olduğu belirlenmiştir. 1 m mesafeden sonra, aradaki moment farkının azaldığı, 5 m civarında bu farkın % 13’ e indiği belirlenmiştir. Büyük bilya ile uzun süre dövülen numuneler ile işlem görmemiş numune arasındaki cıvata sıkma momenti farkı (% 6) kısa mesafede (1 m) azaltmış ve bu mesafeden sonra sabit olarak devam etmiştir.



Şekil 5.69. Toplam momentin mesafeye bağlı değişimi (çevresel hız 0,05 m/s)

Şekil 5.70' te yüksek hızlı gerçekleştirilen aşınma testleri sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerlerine bağlı olarak hesaplanan toplam moment değerleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde başlangıç aşamasında (ilk 0,1 m) bilyalı dövülen ve işlem görmemiş numuneler için hesaplanan cıvata sıkma momenti değerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. 0,3 m mesafede, işlem görmemiş numune ve bilyalı dövülen numunelerin arasındaki farkta dalgalanmalar belirlense de, 1 m mesafeden sonra gereken toplam cıvata sıkma momenti değerleri ve aradaki fark sabit kalmıştır. Bu mesafeden sonra kısa sürede küçük ve büyük çaplı bilyalar ile dövülen numunelerin işlem görmemiş numune ile arasındaki sıkma momenti farkı yaklaşık % 13 iken, uzun süre büyük bilyalar kullanılarak dövülen numunelerdeki bu fark % 17' dir.



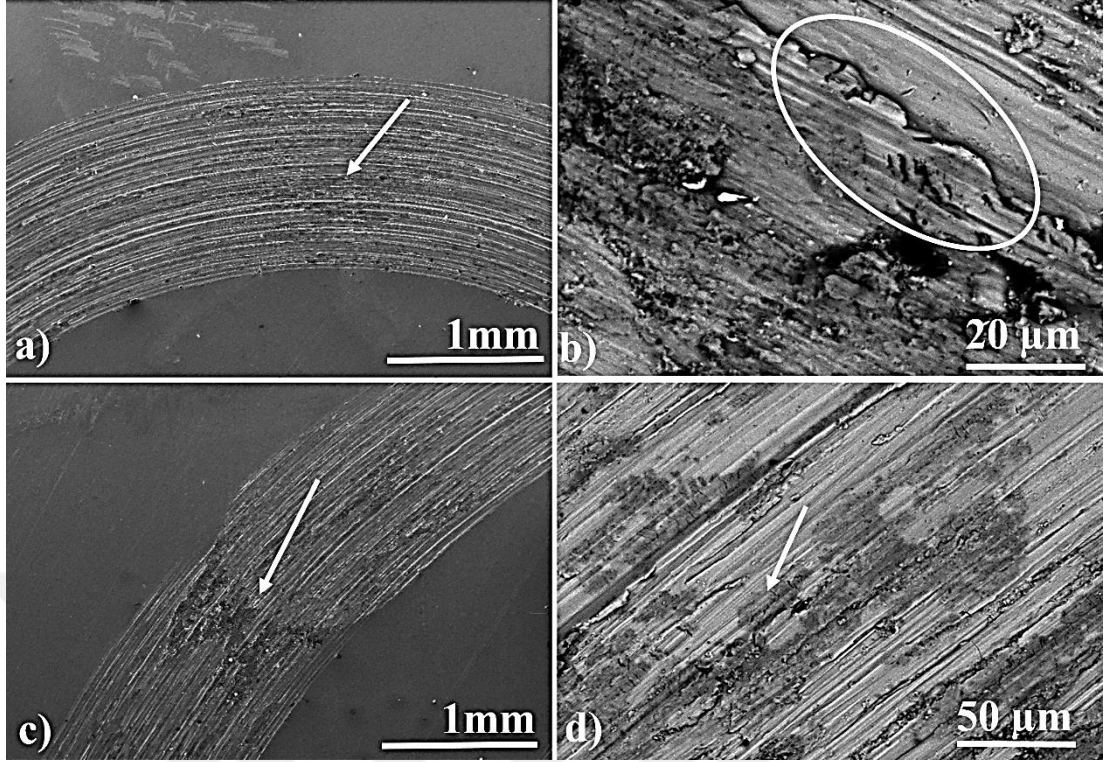
Şekil 5.70. Toplam momentin mesafeye bağlı değişimi (çevresel hız 0,1 m/s)

Aşınma testleri sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin, plaka – cıvata biyomedikal uygulamalarında cıvata sıkma momentinin hesaplanmasında kullanımı sonucunda bilyalı dövmenin cıvatayı sıkmak için gereken momenti azalttığı belirlenmiştir. Özellikle yavaş gerçekleştirilen aşınma testlerinden elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin düşük olması nedeni ile cıvataların düşük hızlarda sıkılması önerilmektedir. Cıvatayı sıkmak için gereken momentin azalması ile operatör daha az kuvvet uygulayarak cerrahi işlemleri gerçekleştirecektir.

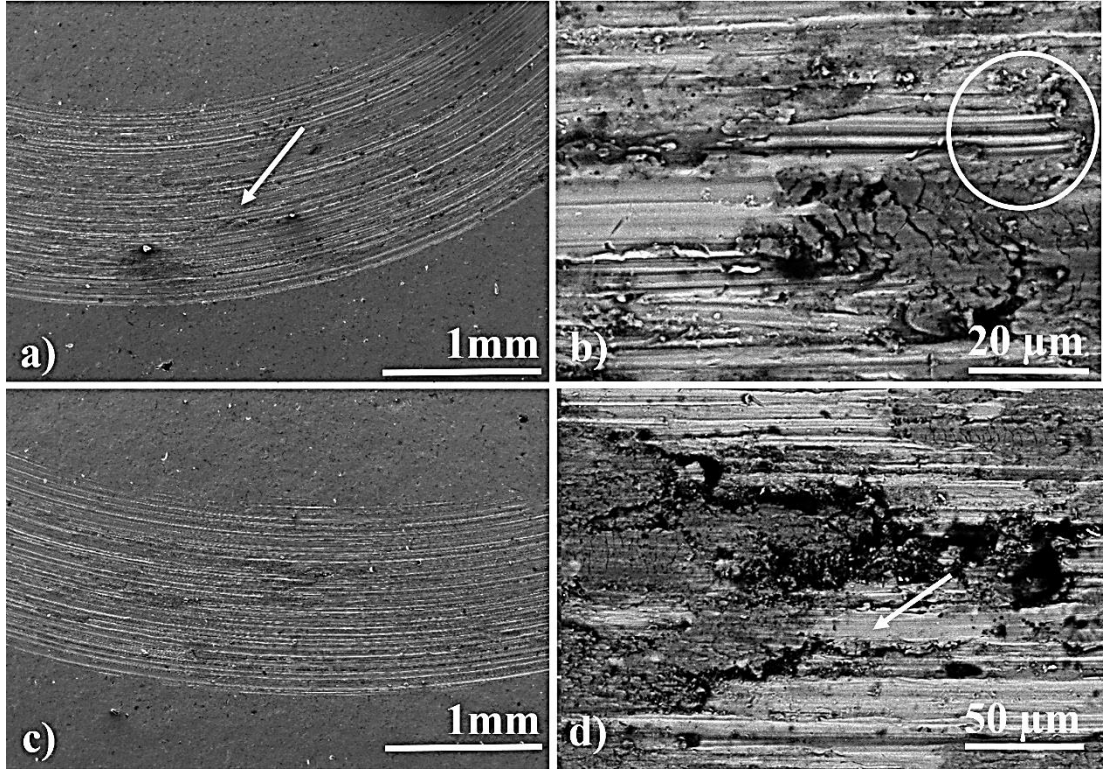
5.2.3.4. Adhezif aşınma sonrası yüzey morfolojisinin incelenmesi

Bu bölüm içerisinde iki farklı adhezif aşınma hızında ball-on-disk test düzeneği ile aşındırılmış işlem görmemiş ve bilyalı dövülmüş numunelerin aşınan yüzey morfolojileri incelenecektir. İşlem görmemiş numunenin aşınması esnasında meydana gelen plastik deformasyon ile oluşan çizikler, çukur ve vadiler Şekil 5.71' de net bir şekilde görülmektedir. Aşınma doğrultusuna paralel olarak oluşan çizikler göz önünde bulundurulduğunda aşınma izinin oldukça düzenli olduğu söylenebilir. Yüzeyde abrasif ve adhezif aşınma mekanizmalarının hakim olduğu, diğer yandan bazı bölgelerde gevrek karakterde oksit tabakalarının yer aldığı belirlenmiştir. Benzer aşınma izleri ve mekanizmaları bilyalı dövülmüş yüzeylerde de gözlenmektedir (Şekil 5.72, Şekil 5.73 ve Şekil 5.74). Şekil 5.75' de yüzeyde oluşan bu oksit tabakalarının tespiti için gerçekleştirilen EDS analizi ve haritaları verilmiştir. Şekil incelendiğinde yüzeye adeta kaplanmış gibi görünen bu tabakaların aşınma esnasında yüzeyde oluşan oksit tabakaları olduğu söylenebilir. Diğer yandan bu oksit tabakaların aşınma esnasında meydana gelen temas ile kırılarak yüzeye dağıldığı görülmektedir. Titanyum ve alüminyum alaşımları gibi yüzeyleri kolay oksitlenen alaşımlarda, aşınma esnasında yüzeyde oksit tabakaları oluşması ve yüzeyden oksidasyon ile malzeme kaybı literatürde açıklanmıştır [150]. Özellikle yüzeyde korozyona karşı etkin koruma sağlayan bu oksit tabakalarının aşınma esnasında titanyum alaşımlarının aşınma davranışına etkisi oldukça karmaşıktır. Bazı kaynaklarda aşınma esnasında oluşan ve yüzeyden kopan sert oksit tabakalarının aşınma esnasında bir aşındırıcı gibi davranarak üç cisimli aşınma mekanizmasını aktif hale getirdiği ve aşınmayı hızlandırdığı yazılmıştır. Diğer yandan oluşan bu oksit tabakasının yüzeyi aşınma esnasında koruması ve aşınma dayanımını arttırması da beklenebilir.

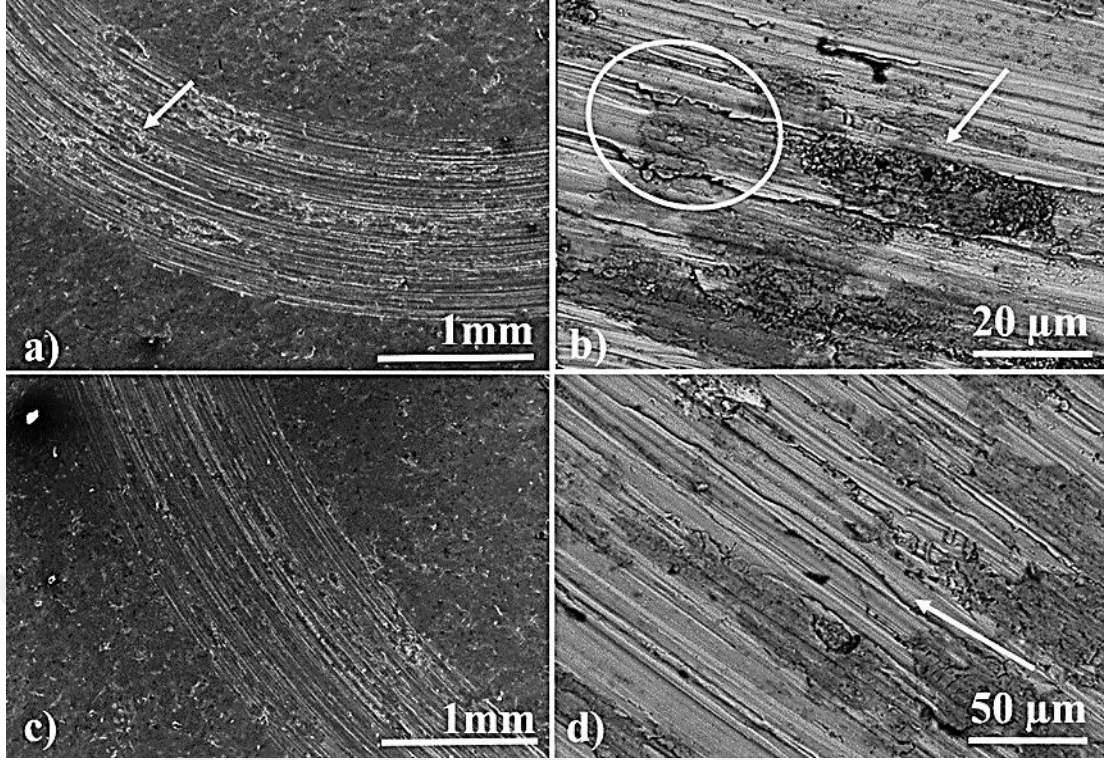
Şekil 5.72, Şekil 5.73 ve Şekil 5.74 karşılaştırıldığında yüzeydeki oksit tabakasının ve parçacıklarının varlığının bilyalı dövme ve bilyalı dövme şiddeti artışı ile artış gösterdiği görülmektedir. Bu durum bilyalı dövme ile mikroyapısal olarak ciddi bir değişime uğrayan yüzey ve yüzey altı mikroyapısal özellikleri değişen titanyum alaşımının oksitlenme eğiliminin artışı ile açıklanabilir. Bunun yanında bilyalı dövme ile artan yüzey pürüzlülüğünün de oksitlenme eğilimini arttırması beklenmektedir.



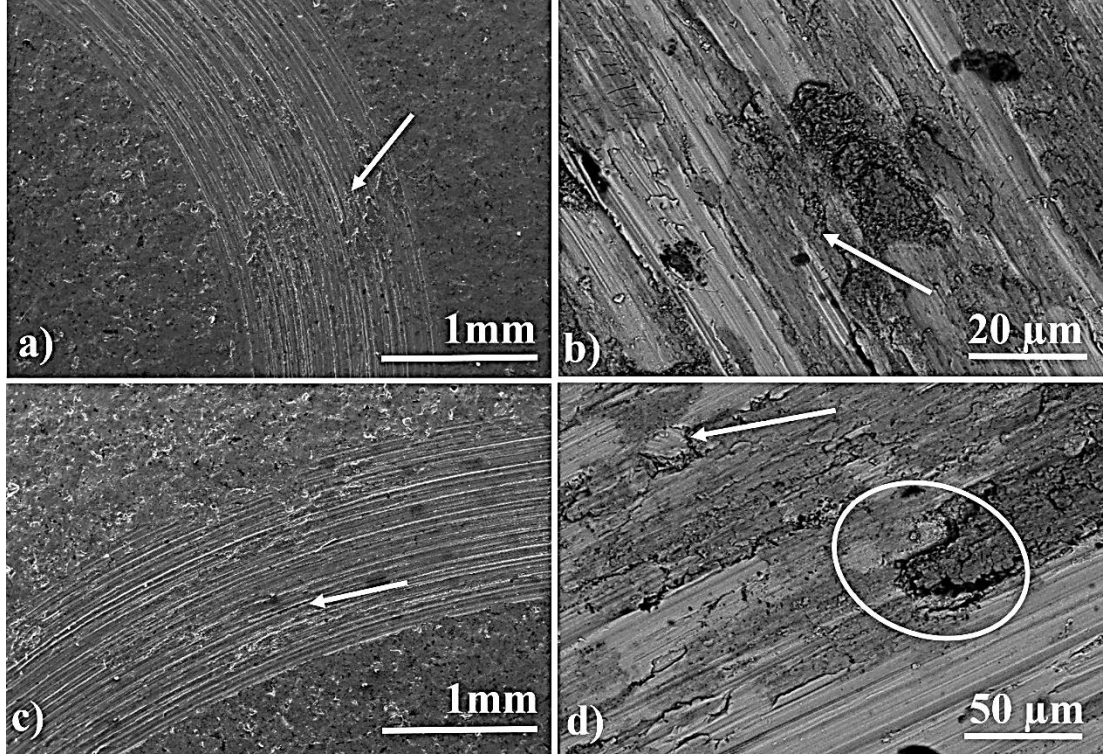
Şekil 5.71. Adhezif aşınma testi sonrası yüzey morfolojisi (işlem görmemiş Ti6Al4V) a) ve b) çevresel hız: $0,05 \text{ ms}^{-1}$, c) ve d) çevresel hız: $0,1 \text{ ms}^{-1}$



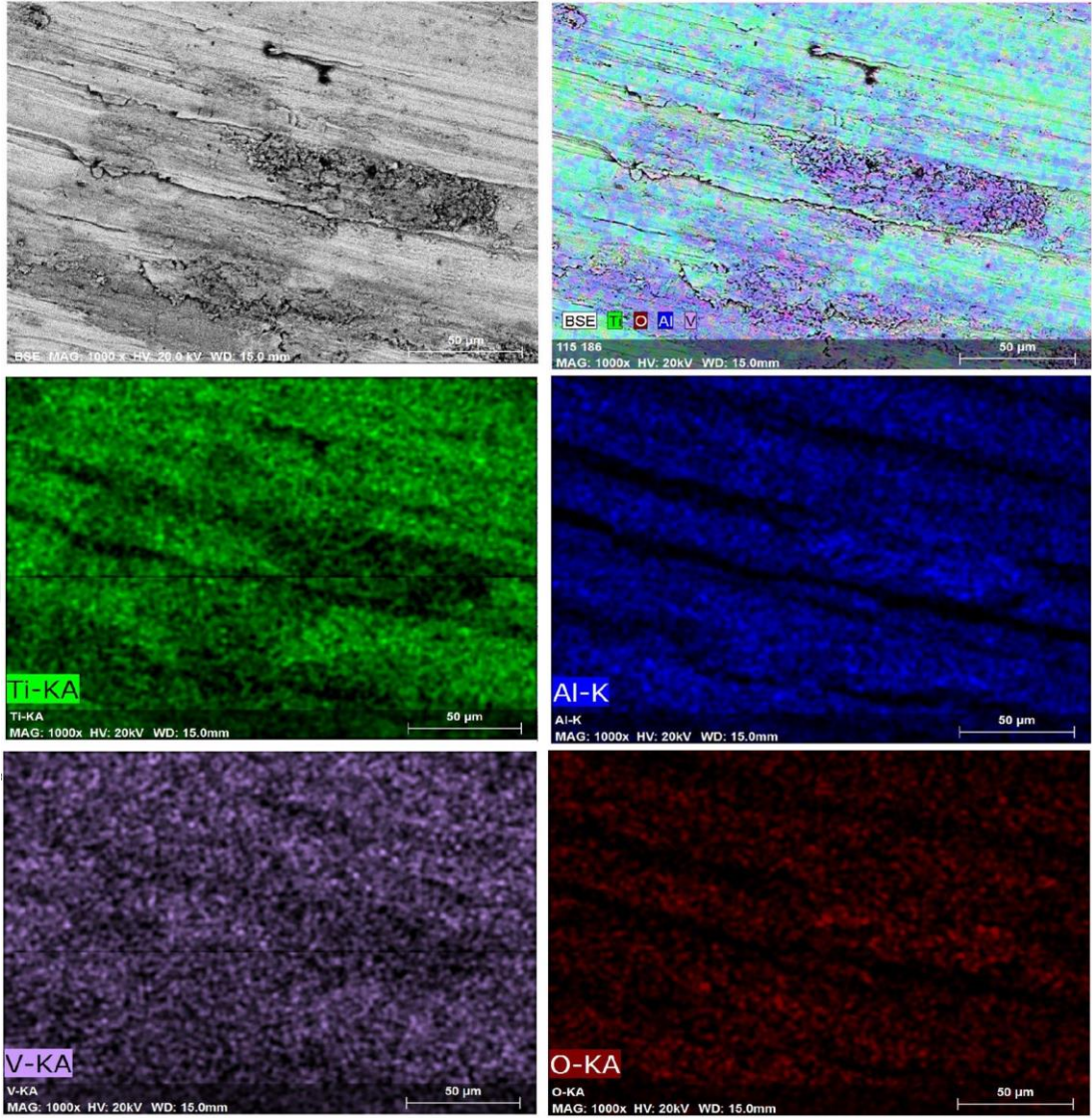
Şekil 5.72. Adhezif aşınma testi sonrası yüzey morfolojisi (S10_5dk) a) ve b) çevresel hız: $0,05 \text{ ms}^{-1}$, c) ve d) çevresel hız: $0,1 \text{ ms}^{-1}$



Şekil 5.73. Adhezif aşınma testi sonrası yüzey morfolojisi (S60_5 dk) a) ve b) çevresel hız: $0,05 \text{ ms}^{-1}$, c) ve d) çevresel hız: $0,1 \text{ ms}^{-1}$



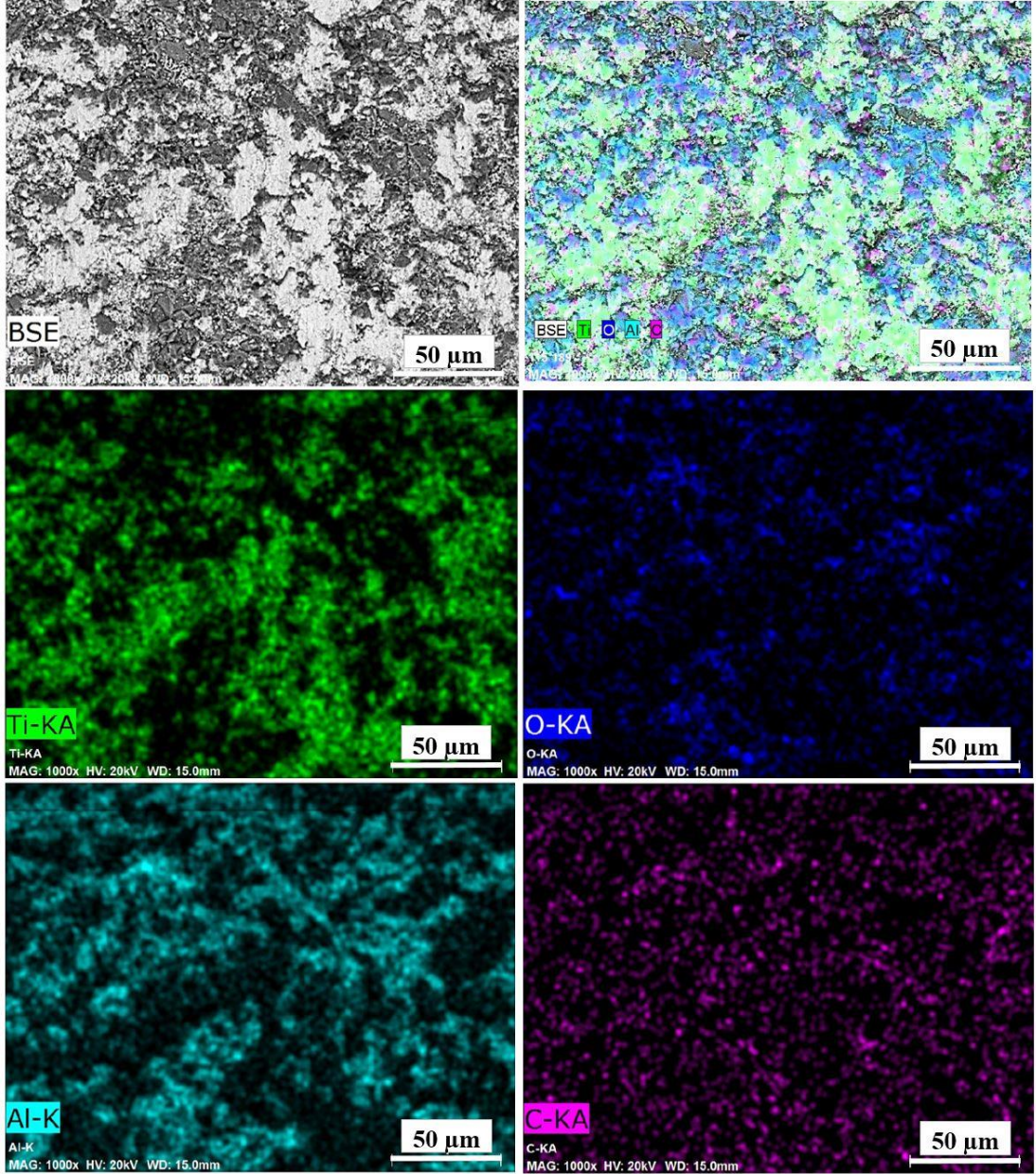
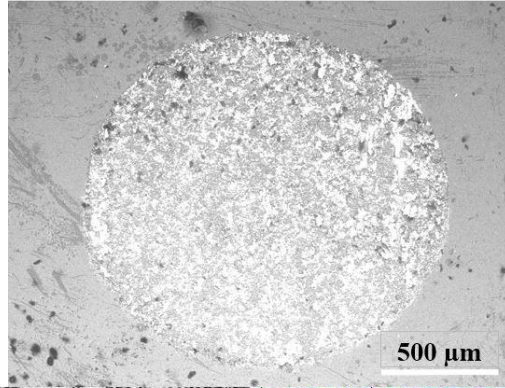
Şekil 5.74. Adhezif aşınma testi sonrası yüzey morfolojisi (S60_15 dk) a), b) çevresel hız: $0,05 \text{ ms}^{-1}$, c), d) çevresel hız: $0,1 \text{ ms}^{-1}$



Şekil 5.75. Adhezif aşınma sonrası yüzeylerin EDS analizi ile haritalanması (bilyalı dövme parametreleri; S60, 15dk, adhezif aşınma çevresel hız: $0,05 \text{ ms}^{-1}$)

Adhezif aşınma deneyleri sonrası aşınan hedef malzeme yüzeylerinin incelenmesinin yanında aşındırıcı yüzeyin de analiz edilmesi önem arz etmektedir. Şekil 5.76' de aşınma deneylerinde kullanılan aşındırıcı bilyanın SEM görüntüsü ve EDS sonuçları verilmiştir. EDS analizleri incelendiğinde alümina aşındırıcı bilyanın yüzeyinin titanyum alaşımı ile sıvandığı dikkat çekmektedir. Bu durumda aşınma esnasında aşınan yüzeylerden aşındırıcı yüzeyine bir malzeme transferi olduğu sonucuna varılabilir. Bu sonuç aşınma esnasında görülen etkin aşınma mekanizmasının adhezif aşınma yönünde olduğunu göstermektedir. Aşınma esnasında abrasif ve adhezif aşınma mekanizmaları ile titanyum alaşımı numunelerin yüzeyinden uzaklaşan malzeme aşındırıcı yüzeyine sıvanarak aşınan ile aşındırıcı arasında bir malzeme filmi

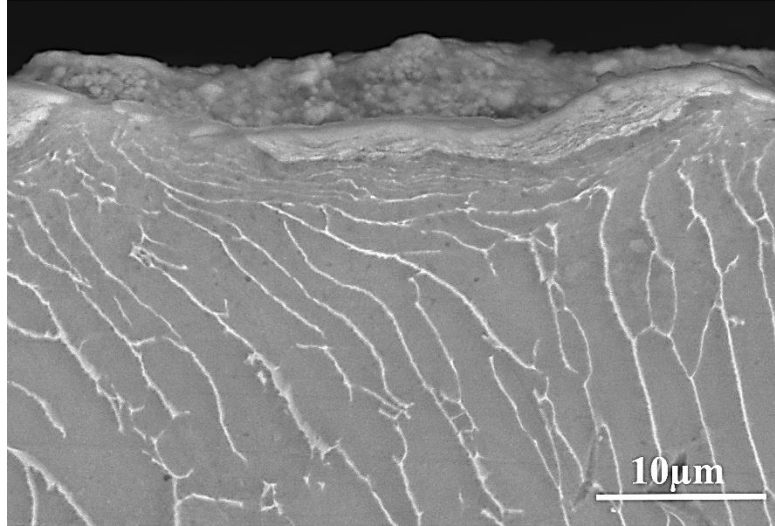
oluşturabilmektedir. Bölüm içerisinde verilen tüm SEM görüntüsü ve EDS analizleri değerlendirildiğinde işlem görmemiş ve farklı bilyalı dövme parametrelerinde dövülmüş numunelerde görülen aşınma mekanizmaları arasında önemli bir fark olmadığı, etkin aşınma mekanizmasının adhezif aşınma mekanizmaları olduğu söylenebilir [23]. Bunun yanında yüzeyde özellikle bilyalı dövme ile etkin bir oksitlenme ve oksit tabakası oluşumu tespit edilmiştir. Bu oksit tabakalarının adhezif aşınma esnasında üçüncül bir yüzey olarak davranarak üç cisimli abrasif aşınma meydana getirebileceği söylenebilir [134]. Şekil 5.72, Şekil 5.73 ve Şekil 5.74’de kısmen de olsa görülen derin çiziklerin bu aşınma mekanizması ile oluştuğu söylenebilir. Son olarak EDS analizleri aşınma esnasında aşınan yüzeyden aşındırıcı yüzeyine malzeme transferi gerçekleştiğini işaret etmektedir. Aşınma esnasında görülen yüzey ve yüzey altı değişimlerin daha fazla irdelenebilmesi için takip eden bölümde aşınma sonrası numunelerin kesit mikroyapıları incelenecektir.



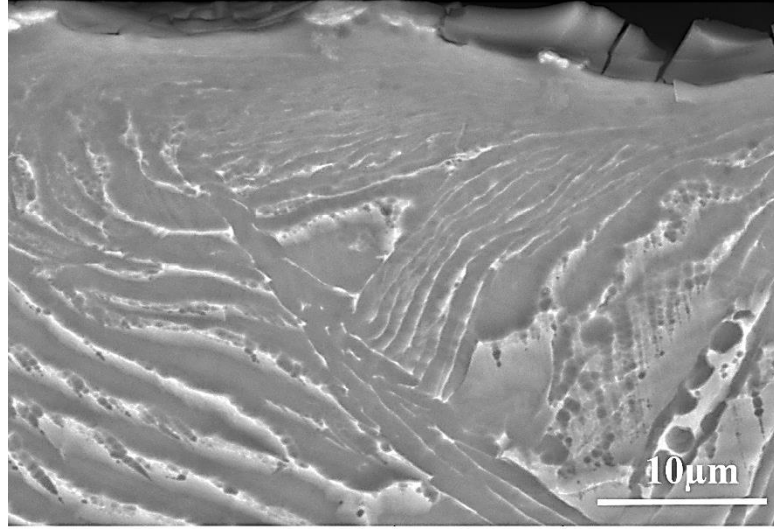
Şekil 5.76. Adhezif aşınma testleri sonrası kullanılan alümina bilyanın EDS analizi ile haritalanması

5.2.3.5. Adhezif aşınma sonrası yüzey altı morfolojisinin incelenmesi

Bu bölüm içerisinde bilyalı dövmenin ve adhezif aşınmanın yüzey morfolojisinin yanısıra yüzey altı mikroyapısı üzerinde de önemli değişimlere neden olabileceği düşünülerek adhezif aşınma sonrası işlem görmemiş ve farklı parametreler ile bilyalı dövülmüş numunelerin yüzey altı mikroyapıları irdelenecektir. Şekil 5.77’de adhezif aşınma sonrası bilyalı dövülmemiş (işlem görmemiş) numunenin yüzey altı mikroyapısı verilmiştir. Mikroyapı incelendiğinde ilk göze çarpan unsur adhezif aşınma ile meydana gelen ağırlık kaybı ve aşırı plastik deformasyon nedeniyle yüzeyde oluşan aşınma izi olduğu söylenebilir. Bu aşınma izinin etrafında oluşan oksit tabakası dikkat çekmektedir. Diğer yandan adhezif aşınma esnasında meydana gelen plastik deformasyon ile yüzeye yakın bölgelerde lamellerin incelendiği görülmektedir. Şekil 5.78’de küçük boyutlu bilyalar ile dövülen numunenin adhezif aşınma sonrası mikroyapısı verilmiştir. Kesit mikroyapısında işlem görmemiş numuneye benzer bir şekilde (Şekil 5.77) aşınma izi oluşumu, oksit tabakasının varlığı ve aşınmadan etkilenen bölgede meydana gelen mikroyapısal değişim dikkat çekmektedir.



Şekil 5.77. Adhezif aşınma sonrası işlem görmemiş Ti6Al4V alaşımının kesit SEM incelemesi

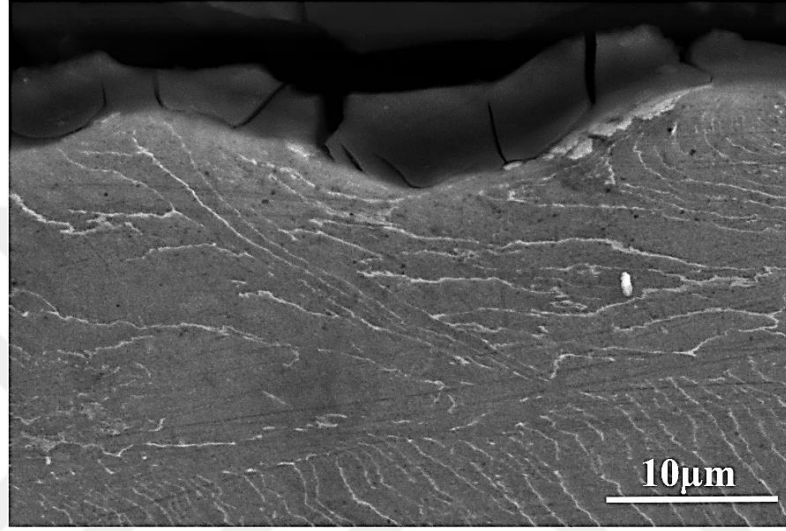


Şekil 5.78. Adhezif aşınma sonrası (S10_5 dk) kesit SEM incelemesi

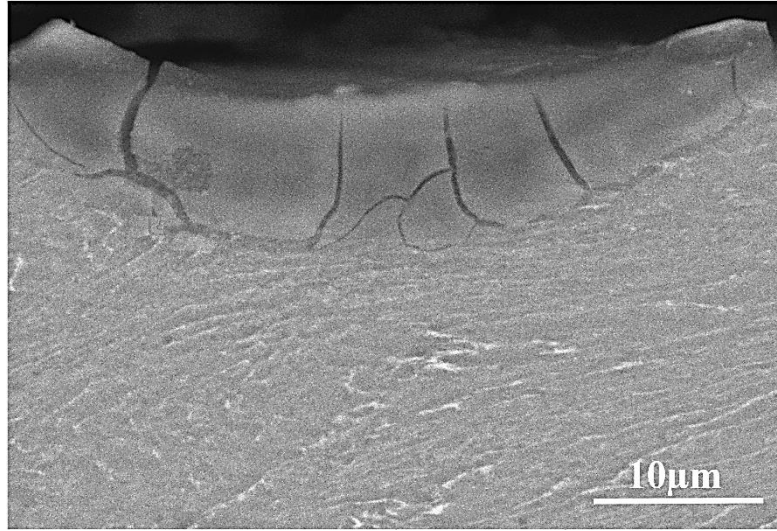
Büyük boyutlu bilyalar ile 5 dk ve 15 dk dövülen numunelerde adhezif aşınma sonrası benzer şekilde bir aşınma izi oluşumu belirlenmiştir (Şekil 5.79 ve Şekil 5.80). Daha önce tartışılan aşırı şiddette gerçekleştirilen bilyalı dövme nedeniyle yüzey altında lamellerin incilmesi ve yönlenmesi adhezif aşınma sonrası kesit mikroyapılarında da net bir şekilde gözlenmektedir (Şekil 5.79 ve Şekil 5.80). İşlem görmemiş (Şekil 5.77) ve düşük şiddette bilyalı dövülmüş (Şekil 5.78) numunelerin aşınma sonrası kesit SEM görüntülerine kıyasla bilyalı dövme şiddeti artışı sonrasında (Şekil 5.79 ve Şekil 5.80) yüzeyde oluşan derin vadi ve çukurların varlığı dikkat çekicidir. Bilyalı dövme ile yüzeylerin aşırı deformasyonu ile pürüzlülük artışı ile birlikte oksitlenme eğilimi artan titanyum alaşımında oksit tabakalarının bilyalı dövme işlemi ve bilyalı dövme şiddetine bağlı olarak titanyum alaşımının sürtünme davranışının ve düşük miktarda olsa da sürtünme katsayısının değişiminin kök nedenleri olduğu söylenebilir.

Bilyalı dövme sonrası adhezif aşınma ile titanyum alaşımının hasara uğramadan önce yüzeyde oluşan oksit tabakalarının yüzeyden uzaklaştırılması gerektiği söylenebilir. Bu noktada bu tabakaların aşınma esnasında sürtünme katsayısını düşürme ve hedef malzemeyi koruma görevleri üstlenebileceği düşünülebilir. Ancak diğer yandan bu tabakanın daha önceki bölümde vurgulandığı gibi aşınma esnasında yüzeyden kopması ile üçüncül bir karşıt yüzey meydana getirerek üç cisimli abrazif aşınma mekanizmalarını aktif edebileceği ve aşınmayı hızlandırabileceği de unutulmamalıdır [201, 209, 210]. Bir önceki bölümde tartışılan aşınma sonrası yüzey morfolojileri ve

bu bölümde tartışılan aşınma sonrası yüzey altı mikroyapısının değişimi göz önünde bulundurulduğunda, bilyalı dövmenin ağırlık kaybı ve sürtünme katsayısında küçük değişimler meydana getirmesine paralel olarak adhezif aşınma esnasında görülen etkin aşınma mekanizmaları üzerine de önemli değişimlere yol açmadığı ve bilyalı dövme sonrası görülen aşınma mekanizmalarının bilyalı dövülmemiş malzemede görülen aşınma mekanizmalarına benzer olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.79. Adhezif aşınma sonrası (S60_5 dk) kesit SEM incelemesi



Şekil 5.80. Adhezif aşınma sonrası (S60_15 dk) kesit SEM incelemesi

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında; titanyum alaşımının (Ti6Al4V) yüzey ve yüzey altı özelliklerine bilyalı dövme işleminin ve işlem parametrelerinin etkilerinin ortaya çıkarılması ve bilyalı dövme işlemi nedeniyle değişen yüzey ve yüzey altı özelliklerine bağlı olarak titanyum alaşımlarının tribolojik davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçlar dahilinde elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

6.1. Bilya Çarpma Hızları

Deneysel çalışmalar sonucunda bilya püskürtme basıncı ve bilya boyutunun bilyaların hedef malzemeye çarpma hızlarını önemli ölçüde değiştirdikleri belirlenmiştir. Püskürtme basıncı artışı ile bilya çarpma hızları artmıştır. Diğer yandan bilya boyutu artışı beklentilerin aksine çarpma hızlarını arttırmıştır.

6.2. Almen Şiddeti

Bilya çapı ve bilya püskürtme basıncı artışı ile Almen şiddetinin artmıştır. Püskürtme basıncı artışı ile birlikte bilyaların artan kinetik enerjilerinin Almen şiddetinin artmasına sebep olduğu belirlenmiştir. Bilya boyutu ile Almen şiddetinin artışı aynı basınç değerleri için daha yüksek hızlara sahip bilyaların daha yüksek kütleleri ile birlikte küçük bilyalara kıyasla daha yüksek çarpma enerjilerinin olması ile ilişkilendirilmiştir. Son olarak bilyalı dövme süresinin Almen şiddeti üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır.

6.3. Bilyalı Dövme Sonrası Kütle Kaybı

Farklı parametreler altında gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemleri sonrası, büyük çaplı bilyaların titanyum alaşımı numuneleri daha fazla kütle kaybına uğrattıkları belirlenmiştir. Büyük çaplı bilyaların sahip olduğu yüksek kinetik enerji ve uzun süre gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemi sonucunda kütle kaybını arttırmıştır. Ancak bilyalı dövme ile gerçekleşen kütle kaybının mg seviyesinde gerçekleştiği vurgulanmalıdır.

6.4. Yüzey Pürüzlülüğü ve Topografyası

Bilyalı dövme işlemi ve işlem parametrelerinin hedef malzemenin çizgisel ve alansal yüzey pürüzlülükleri ile yüzey topografyası üzerinde önemli etkileri olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı basınç değerinde hızlandırılan (7 bar) büyük çaplı bilyaların küçük çaplı bilyalara kıyas ile yüzeyi daha fazla pürüzlendirdiği ve yüzeyde derin vadi ve çukurlar oluşturduğu belirlenmiştir. Dövme süresinin yüzey pürüzlülüğü ve topografyası üzerinde etkin bir rol oynamadığı ve uzun dövme sürelerinde ortalama çizgisel pürüzlülük değerinde ciddi bir değişime neden olmadıkları gözlenmiştir.

6.5. Bilyalı Dövme Sonrası Yüzey Mikroyapısı ve Morfolojisi

Bilyalı dövme işlemi ve işlem parametrelerin yüzey mikroyapısı ve morfolojisi üzerinde önemli etkileri olduğu ortaya konulmuştur. Bilyalı dövme ile titanyum alaşımı yüzeyinde plastik deformasyona ve çatlaklara bağlı olarak hasar görmüş bir mikroyapının ortaya çıktığı ve yüzey morfolojisinde çok sayıda çukurcuk ve tepelik oluşumu gözlemlenmiştir. Büyük çaplı bilyaların kullanılması ile plastik deformasyonun şiddetinin arttığı ve oluşan çukurların derinleştiği belirlenmiştir. Büyük çaplı bilyalar ile uzun süreli bilya dövme işleminin gerçekleştirilmesi ile yüzeyde aşırı plastik deformasyon ve buna bağlı olarak oluşan derin çatlakların varlığı tespit edilmiştir. Büyük çaplı bilyaların sahip olduğu yüksek kinetik enerji ile Ti6Al4V alaşımı malzemenin yüzeyine çarpması sonucunda yüzeyde delaminasyonlar ile malzeme ayrılması gerçekleşmiştir. Küçük çaplı bilyanın kullanımı ile de delaminasyonlar oluşmakla birlikte oluşan delaminasyonların miktarının ve şiddetinin nispeten daha az olduğu belirlenmiştir.

6.6. Bilyalı Dövme Sonrası Yüzey Altı Mikroyapısı

İşlem görmemiş numune ile bilyalı dövülen numuneler kıyaslandığında mikroyapıda meydana gelen radikal değişimler net bir şekilde görülmektedir. Bunun yanında bu değişimlerin derinliğe bağlı olarak etkisini yitirdiği belirlenmiştir. Büyük boyutlu bilyalar ile gerçekleştirilen dövme işleminin yüzey altı mikroyapısı üzerinde küçük boyutlu bilyalar ile gerçekleştirilen dövme işlemine göre daha etkin olduğu söylenebilir.

6.7. Bilyalı Dövme Sonrası Yüzey Altı Sertliği

Bilyalı dövme ile Ti6Al4V alaşımının sertlik değeri malzemenin orijinal sertlik değerine göre yaklaşık olarak % 35' e kadar iyileşme gösterdiği belirlenmiştir. Sertlik değerindeki bu artışın tüm bilyalı dövme parametreleri için derinliğe bağlı olarak azalarak belirli bir derinlikten sonra bilyalı dövmeden etkilenen bölgenin sona erdiği bulunmuştur. Sertlik değişiminde görülen artış trendinin bilyalı dövme işlemine bağlı olarak görülen mikroyapısal değişimler ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Küçük çaplı bilyalar kullanılarak gerçekleştirilen dövme işlemi sonucunda sertlik değeri artışının 70 - 120 µm derinliği civarında sınırlandığı, büyük bilyada ise sertlik artışının 370 - 420 µm derinliğe kadar etkin olduğu belirlenmiştir. Büyük çaplı bilyaların kullanıldığı farklı dövme sürelerinde gerçekleştirilen deney sonuçları incelendiğinde sertlik değerindeki artışın ve etkin değerinin neredeyse aynı olduğu belirlenmiştir.

6.8. Eroziyon Aşınma Testleri Sonrası Kütle Kaybı

Bilyalı dövülen numunelerin ve kontrol numunesinin genel aşınma davranışı incelendiğinde kütle kaybı değerlerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Partikül çarpma açısının etkisi incelendiğinde ise kütle kaybının, 30° partikül çarpma açısında, 90° çarpma açısına kıyasla tüm numunelerde daha yüksek değerde olduğu belirlenmiştir. Püskürtme basıncının artması ile tüm numunelerde kütle kaybının arttığı belirlenmiştir.

6.9. Eroziyon Aşınma Testleri Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü

Bilyalı dövme sonrası çok yüksek olan ortalama pürüzlülük değerlerinin eroziyon aşınma sonrası düştüğü (yaklaşık 2 µm) belirlenmiştir. İşlem görmemiş Ti6Al4V kontrol numunesinin düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri eroziyon aşınma testleri sonrası artarak 2 µm değerine ulaşmıştır. Eroziyon aşınma sonrası tüm numunelerinin pürüzlülük değerlerinin birbirine yakın değerde olduğu, 30° partikül çarpma açısında yüzeylerin az da olsa daha pürüzlü olduğu belirlenmiştir.

6.10. Eroziyon Aşınma Testleri Sonrası Yüzey Morfolojisi

30° çarpma açısında gerçekleştirilen eroziyon aşınma testleri sonrası oluşan temel eroziyon aşınma mekanizmalarının mikrosürme ve mikrokese mekanizmaları olduğu belirlenmiştir. Bu aşınma mekanizmalarının etkin olarak görülmesi yüzeyde gerek malzeme kaybı gerekse aşırı plastik deformasyon nedeniyle vadi ve tepeliklerin oluşmasına neden olmuştur. 90° partikül çarpma açısında aşındırılan bilyalı dövülmüş yüzeylerin yüzey morfolojisinin tamamen değiştiği, yüzeyde yer alan çizikler, mikrosürme ve mikrokese izleri tamamen ortadan kaybolmuş, bu aşınma morfolojilerinin yerini mikro çatlaklar ve plastik deformasyon sonucu oluşmuş küçük tepe ve çukurlar almıştır. 90° partikül çarpma açısında görülen bu aşınma mekanizmaları yüzeyde etkin bir malzeme kaybı meydana getirmemiş ve 30° partikül çarpma açısında aşındırılan numunelere kıyasla daha düşük kütle kayıplarının görülmesine yol açmıştır.

6.11. Adheziyon Aşınma Testleri Sonrası Kütle Kaybı

Adheziyon aşınma testleri sonrası kütle kaybının bilyalı dövme şiddeti artışı ile artış gösterdiği ve en fazla kütle kaybının büyük boyutlu bilyalar ile uzun süre dövülen numunelerde görüldüğü dikkat çekmektedir. Bu numunelerin en yüksek yüzey pürüzlülüklerine ve oldukça tahrip olmuş yüzey morfolojilerine sahip olduğu ayrıca bu numunelerin bilyalı dövme ile ulaşılan en yüksek yüzey ve yüzey altı sertlik değerlerine sahip olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Bu noktada adheziyon aşınma davranışı üzerinde sertlik artışından ziyade yüzey topografyasının ve morfolojisinin daha önemli bir rol oynadığı sonucuna varılmıştır. Bilyalı dövme ile değişen yüzey topografyası ve morfolojisi çok düşük bir miktar da olsa adheziyon aşınma davranışını olumsuz etkilemiştir. Bu durum bilyalı dövmenin malzemelerin yüzey ve yüzey altı mekanik özellikleri ile nihai yorulma ve mekanik özelliklerini geliştirilen adheziyon aşınma davranışı üzerinde ihmal edilebilecek düzeyde olumsuz bir etkisinin belirlenmiş olması bilimsel ve endüstriyel anlamda önemli bir bulgudur.

6.12. Adhezif Aşınma Testleri Sonrası Sürtünme Katsayısı

Bilyalı dövme ile sürtünme katsayısının önemli oranda değiştiği belirlenmiştir. Özellikle 0 - 5 m yol aralığında sürtünme katsayısının bilyalı dövme ve bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak ciddi bir değişim gösterdiği, ancak artan yol ile birlikte sürtünme katsayısı değerlerinin tüm numuneler için birbirine yaklaştığı söylenebilir. Sonuç olarak bilyalı dövme ile Ti6Al4V alaşımının sürtünme katsayısı değerinin azaldığı söylenebilir.

6.12.1. Sürtünme katsayılarına bağlı civata sıkma momenti hesabı

Adhezif aşınma testleri sonrası elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin, plaka – civata biyomedikal uygulamalarında civata sıkma momentinin hesaplanmasında kullanımı sonucunda bilyalı dövmenin civatayı sıkmak için gereken momenti azalttığı belirlenmiştir. Özellikle yavaş gerçekleştirilen aşınma testlerinden elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin düşük olması nedeni ile civataların düşük hızlarda sıkılması önerilmektedir. Bunlara bağlı olarak, civatayı sıkmak için gereken momentin azalması ile operatör daha az kuvvet uygulayarak cerrahi işlemleri gerçekleştirecektir.

6.13. Adhezif Aşınma Sonrası Yüzey Morfolojisi

Adhezif aşınma sonrasında aşınan yüzeylerde hem abrasif hem de adhezif aşınma mekanizmalarının hakim olduğu, diğer yandan bazı bölgelerde gevrek karakterde oksit tabakalarının yer aldığı belirlenmiştir. Bilyalı dövülen numunelerde işlem görmemiş numunelere kıyasla yüzeylerinde oluşan bu oksit tabakasının arttığı ancak aşınma mekanizmalarının önemli bir değişim göstermediği sonucuna varılmıştır.

6.14. Adhezif Aşınma Sonrası Yüzey Altı Morfolojisi

Tüm numuneler için aşınma sonrası adhezif aşınma esnasında meydana gelen plastik deformasyon ile yüzeye yakın bölgelerde tanelerin incelendiği belirlenmiştir. Bir önceki bölümde tartışılan aşınma sonrası yüzey morfolojileri ve bu bölümde tartışılan aşınma sonrası yüzey altı mikroyapısının değişimi göz önünde bulundurulduğunda, bilyalı dövmenin kütle kaybı ve sürtünme katsayısında küçük değişimler meydana getirmesine paralel olarak adhezif aşınma esnasında görülen etkin aşınma mekanizmaları üzerine de önemli değişimlere yol açmadığı sonucuna varılmıştır.

Literatürde Ti6Al4V alaşımının düşük aşınma dayanımları nedeniyle kullanım ömürlerinin kısıtlandığı ve hasara uğradıkları belirtilmiştir. Bu nedenle birçok araştırmacı Ti6Al4V alaşımının erozif ve adhezif aşınma davranışlarını incelemiştir. Gerçekleştirilen çalışmalarda farklı yüzey işleme teknikleri ile (çeşitli mekanik yüzey işlemleri, ısıl işlemler, kaplama, nitrüleme vb.) Ti6Al4V alaşımının aşınma davranışlarının geliştirilmesi için çabalanmıştır. Ancak titanyum alaşımlarının yorulma davranışlarının geliştirilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılan bilyalı dövme işleminin Ti6Al4V alaşımının yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkileri üzerine sınırlı sayıda çalışma yer almaktadır. Bunun yanında bilyalı dövme işlemi ve işlem parametrelerinin Ti6Al4V alaşımının erozif ve adhezif aşınma davranışına etkileri henüz çalışılmamıştır.

Tez çalışmasında özgün olarak tasarlanan ve imal edilen bilyalı dövme test düzeneği yardımı ile farklı bilyalı dövme parametrelerinde dövülen Ti6Al4V numunelerin yüzey ve yüzey altı özelliklerinin bilyalı dövme işlemi ve işlem parametrelerine bağlı değişimleri net ve ayrıntılı bir şekilde ortaya konmuştur. Diğer yandan Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası erozif ve adhezif aşınma davranışı bilyalı dövme ile değişen yüzey ve yüzey altı özellikleri ışığında incelenmiş ve açıklanmıştır. Bu çalışmaların sonucunda tez çalışması ile çok sayıda akademik ve endüstriyel çıktıya ulaşılması hedeflenmiştir.

Akademik olarak Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme yöntemi ile işlenmesi, bilyalı dövme işlem parametrelerinin malzemelerin yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkileri ve bilyalı dövme işleminin malzemenin aşınma davranışına etkileri konularında çok sayıda SCI indeks yayın, ulusal ve uluslararası bildiri çıktısı hedeflenmiş ve tez çalışması sürecinde bu çalışmaların bazıları literatüre kazandırılmıştır.

Endüstriyel uygulamalara yönelik olarak malzemelerin bilyalı dövme işlemi ve işlem parametrelerine bağlı olarak değişen yüzey pürüzlülüğü, yüzey ve yüzey altı mikroyapısı, sürtünme katsayısı, aşınma dayanımı vb. çok sayıda endüstriyel öneme sahip çıktılar ortaya konmuştur. Bunun yanında bilyalı dövme için proses ve proses parametrelerinin malzeme nihai özellik ilişkisi ve bu ilişkiyi belirleyen kök nedenler açıklığa kavuşturulmuştur. Ortaya konulan bu çıktılardan çok sayıda farklı endüstriyel uygulama için önem arz edeceği açıktır. Bilyalı dövmenin yaygın olarak kullanıldığı

otomotiv ve havacılık birleşenlerinde değişen yüzey pürüzlülüğü, aşınma dayanımı ve sürtünme katsayısı benzeri özelliklerin nihai ürün performansını nasıl etkileyeceği önemli bir merak konusudur. Bu noktada bilyalı dövme ile yorulma dayanımının yanı sıra bu birleşenlerin kullanım ömürlerini ve performanlarını iyileştirmesi söz konusu olabilir. Diğer yandan uygulamada meydana gelecek olumsuzluklar da göz önünde bulundurulmalıdır. Tez çalışması ile bilyalı dövme, yüzey karakterizasyonu ve tribolojik çalışmalar ile bilyalı dövme işlemi ile malzemelerin tribolojik davranışları arasındaki ilişkiler net bir şekilde ortaya çıkartılmıştır. Tüm bu çalışmalar literatürde konu ile ilgili önemli bir boşluğu dolduracak aynı zamanda endüstriyel uygulamalarda özellikle bilyalı dövme parametrelerinin kontrolü ile bilyalı dövme sonrası malzemelerin aşınma dayanımlarının geliştirilmesi noktasında önemli bir kaynak olacaktır. Bu noktada tez çalışmasının çıktıları endüstriyel uygulamalar için önemli faydalar getirecektir.

Tez çalışmasının sürdürülebilir olması nedeniyle tez çalışmasını takip eden yeni projelerin ve bilimsel çalışmaların hayata geçirilmesi mümkün olacaktır. Tez çalışması sonrası farklı malzemelerin bilyalı dövme sonrası yüzey özellikleri ve tribolojik davranışların incelenmesi ile bilyalı dövme sonrası malzemelerin korozyon ve oksidasyon özelliklerinin incelenmesi konularında ilerleyen zamanlarda yüksek bütçeli projeler ve uzun süreli çalışmalar gerçekleştirilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Aslan M.A., Titanyum Alaşım Yüzeyinin Farklı Kaplama Teknikleri ile Kaplanmasının Titanyum-Porselen Bağlantısına Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 2013, 352774.
- [2] Durdu S., Plazma Elektrolitik Oksidasyon Yöntemiyle Ti6Al4V Alaşımı Yüzeyine Hidroksiapatit Bazlı Biyoseramik Fazlarının Kaplanması ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2014, 378331.
- [3] Avcu E., Titanyum Alaşımlarının Partikül Erozyonu ile Pürüzlendirilmesi ve Aşındırılması İşlemlerinin Optimizasyonu, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 348736.
- [4] Çalışkan N., Antibakteriyel Dental Titanyum İmplantların Hazırlanması ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2013, 321408.
- [5] Hacısalihoglu İ., Aşırı Plastik Deformasyon Uygulanmış Saf Titanyum Üzerinde Hidroksiapatit Oluşturulması ve Elektrokimyasal Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2011, 275650.
- [6] Zhecheva A., Sha W., Malinov S., Long A., Enhancing the Microstructure and Properties of Titanium Alloys Through Nitriding and Other Surface Engineering Methods, *Surface and Coatings Technology*, 2005, **200**(7), 2192-2207.
- [7] Dikici T., Biyomedikal Uygulamalar İçin Titanyum İmplantların Mikro ve Nano Yapılı Titanyum Oksit Filmler ile Kaplanması ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2016, 438765.
- [8] Ahmed A.A., Mhaede M., Wollmann M., Wagner L., Effect of Micro Shot Peening on The Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Two Microstructure Ti-6Al-4V Alloy, *Applied Surface Science*, 2016, **363**, 50-58.
- [9] Takahashi K., Sato E., Influence of Surface Treatments on Fatigue Strength of Ti6Al4V Alloy, *Materials Transactions*, 2010, **51**(4), 694-698.
- [10] Akagündüz E., Isıl İşlem Görmüş Ti6Al4V Alaşımının Yüzey Özelliklerinin Mikroyapı ve Yüzey Çizilme Dayanımları Açısından İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2008, 179147.

- [11] Avcu E., Farklı Büyüklüklere Sahip Aşındırıcı Partikül Karışımlarının Ti6Al4V Alaşımının Erozif Aşınma Davranışına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011, 283038.
- [12] Ünker F., Aşırı Plastik Deformasyonun Titanyumun Şekillendirebilirlik ve Korozyon Davranışı Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2012, 315542.
- [13] Yücel Z., Lazer ve Kumlama Yöntemleri ile Ti6Al4V Alaşımında Fonksiyonel Yüzeylerin Oluşturulması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2008, 232710.
- [14] Joshi V.A., *Titanium Alloys: An Atlas of Structures and Fracture Features*. 1. Edition ed. 2006, USA: Taylor&Francis Group.
- [15] Howard R., A Study in the Prediction of Residual Stresses in Shot Peening, Yüksek Lisans Tezi, Rensselaer Teknik Enstitüsü, Connecticut, 2008.
- [16] Chen G., Jiao Y., Tian T., Zhang X., Li Z., Zhou W., Effect of Wet Shot Peening on Ti-6Al-4V Alloy Treated by Ceramic Beads, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, **24**(3), 690-696.
- [17] Zhou H., Li C., Ji G., Fu S., Yang H., Luo X., Yang G., Li C., Local Microstructure Inhomogeneity and Gas Temperature Effect in In-Situ Shot-Peening Assisted Cold-Sprayed Ti-6Al-4V Coating, *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, **766**, 694-704.
- [18] Han J., Sheng G.M., Zhou X.L., Diffusion Bonding of Surface Self-Nanocrystallized Ti-4Al-2V and 0Cr18Ni9Ti by Means of High Energy Shot Peening, *ISIJ International*, 2008, **48**(9), 1238-1245.
- [19] Alikhani Chamgordani S., Miresmaeili R., Aliofkhazraei M., Improvement in Tribological Behavior of Commercial Pure Titanium (CP-Ti) by Surface Mechanical Attrition Treatment (SMAT), *Tribology International*, 2018, **119**, 744-752.
- [20] Amanov A., Cho I.-S., Kim D.-E., Pyun Y.-S., Fretting Wear and Friction Reduction of CP Titanium and Ti-6Al-4V Alloy by Ultrasonic Nanocrystalline Surface Modification, *Surface and Coatings Technology*, 2012, **207**, 135-142.
- [21] Citeau A., Guicheux J., Vinatier C., Layrolle P., Nguyen T.P., Pilet P., Daculsi G., In Vitro Biological Effects of Titanium Rough Surface Obtained by Calcium Phosphate Grid Blasting, *Biomaterials*, 2005, **26**(2), 157-165.
- [22] Pattanaik B., Pawar S., Pattanaik S., Biocompatible Implant Surface Treatments, *Indian Journal of Dental Research* 2012, **23**(3), 398-406.

- [23] Zhou J., Sun Y., Huang S., Sheng J., Li J., Agyenim-Boateng E., Effect of Laser Peening On Friction And Wear Behavior Of Medical Ti6Al4V Alloy, *Optics & Laser Technology*, 2019, **109**, 263-269.
- [24] Lin N., Li D., Zou J., Xie R., Wang Z., Tang B., Surface Texture-Based Surface Treatments on Ti6Al4V Titanium Alloys for Tribological and Biological Applications: A Mini Review, *Materials*, 2018, **11**(4), 487.
- [25] Ganesh B.K.C., Sha W., Ramanaiah N., Krishnaiah A., Effect of Shotpeening on Sliding Wear and Tensile Behavior of Titanium Implant Alloys, *Materials & Design* 2014, **56**, 480-486.
- [26] Molinari O., Straffelini G., Tesi B., Bacci T., Dry Sliding Wear Mechanisms of the Ti6Al4V alloy, *Wear*, 1997, **208**, 105-112.
- [27] Yazdanian M.M., Edrissy A., Alpas A.T., Vacuum Sliding Behaviour of Thermally Oxidized Ti-6Al-4V Alloy, *Surface and Coatings Technology*, 2007, **202**(4-7), 1182-1188.
- [28] Tong Z.P., Ren X.D., Zhou W.F., Adu-Gyamfi S., Chen L., Ye Y.X., Ren Y.P., Dai F.Z., Yang J.D., Li L., Effect of Laser Shock Peening on Wear Behaviors of TC11 Alloy at Elevated Temperature, *Optics & Laser Technology*, 2019, **109**, 139-148.
- [29] Ganesh B.K.C., Ramanaiah N., Chandrasekhar Rao P.V., Effect of Surface Treatment on Tribological Behavior of Ti-6Al-4V Implant Alloy, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 2012, **11**, 735-743.
- [30] Maleki E., Unal O., Kashyzadeh K.R., Effects of Conventional, Severe, Over, and Re-Shot Peening Processes on The Fatigue Behavior of Mild Carbon Steel, *Surface and Coatings Technology*, 2018, **344**, 62-74.
- [31] Liu Y.G., Li H.M., Li M.Q., Characterization of Surface Layer in TC17 Alloy Treated by Air Blast Shot Peening, *Materials & Design*, 2015, **65**, 120-126.
- [32] Maleki E., Unal O., Amanov A., Novel Experimental Methods for The Determination of The Boundaries Between Conventional, Severe and Over Shot Peening Processes, *Surfaces and Interfaces*, 2018, **13**, 233-254.
- [33] Liu Y., Li M., Nanocrystallization Mechanism of Beta Phase in Ti-6Al-4V Subjected to Severe Plastic Deformation, *Materials Science and Engineering: A*, 2016, **669**, 7-13.
- [34] Nam Y.-S., Jeong Y.-I., Shin B.-C., Byun J.-H., Enhancing Surface Layer Properties of An Aircraft Aluminum Alloy by Shot Peening Using Response Surface Methodology, *Materials & Design*, 2015, **83**, 566-576.
- [35] Unal O., Varol R., Almen Intensity Effect on Microstructure and Mechanical Properties of Low Carbon Steel Subjected to Severe Shot Peening, *Applied Surface Science*, 2014, **290**, 40-47.

- [36] Trško L., Guagliano M., Bokůvka O., Nový F., Fatigue Life of AW 7075 Aluminium Alloy After Severe Shot Peening Treatment with Different Intensities, *Procedia Engineering*, 2014, **74**, 246-252.
- [37] Sahoo B., Satpathy R.K., Prasad K., Ahmed S., Kumar V., Effect of Shot Peening on Low Cycle Fatigue Life of Compressor Disc of a Typical Fighter Class Aero-Engine, *Procedia Engineering*, 2013, **55**, 144-148.
- [38] Morita T., Noda S., Kagaya C., Influence of Hardness of Substrates on Properties of Surface Layer Formed by Fine Particle Bombarding, *Materials Science and Engineering: A*, 2013, **574**, 197-204.
- [39] Byrne G.D., O'Neill L., Twomey B., Dowling D.P., Comparison Between Shot Peening and Abrasive Blasting Processes as Deposition Methods for Hydroxyapatite Coatings onto a Titanium Alloy, *Surface and Coatings Technology*, 2013, **216**, 224-231.
- [40] Bansal D.G., Kirkham M., Blau P.J., Effects of Combined Diffusion Treatments and Cold Working on The Sliding Friction and Wear Behavior of Ti-6Al-4V, *Wear*, 2013, **302**(1-2), 837-844.
- [41] Thomas M., Lindley T., Rugg D., Jackson M., The Effect of Shot Peening on The Microstructure and Properties of A Near-Alpha Titanium Alloy Following High Temperature Exposure, *Acta Materialia*, 2012, **60**(13-14), 5040-5048.
- [42] Bagherifard S., Guagliano M., Fatigue Behavior of A Low-Alloy Steel with Nanostructured Surface Obtained by Severe Shot Peening, *Engineering Fracture Mechanics*, 2012, **81**, 56-68.
- [43] Oguri K., Fatigue Life Enhancement of Aluminum Alloy for Aircraft by Fine Particle Shot Peening (FPSP), *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, **211**(8), 1395-1399.
- [44] Apachitei I., Leoni A., Riemslog A.C., Fratila-Apachitei L.E., Duszczuk J., Enhanced Fatigue Performance of Porous Coated Ti6Al4V Biomedical Alloy, *Applied Surface Science*, 2011, **257**(15), 6941-6944.
- [45] Yilmaz S.S., Ünlü B.S., Varol R., Effect of Boronizing and Shot Peening in Ferrous Based FeCu-Graphite Powder Metallurgy Material on Wear, Microstructure and Mechanical Properties, *Materials & Design*, 2010, **31**(9), 4496-4501.
- [46] Ohue Y., Matsumoto K., Sliding-Rolling Contact Fatigue and Wear of Maraging Steel Roller With Ion-Nitriding and Fine Particle Shot-Peening, *Wear*, 2007, **263**(1-6), 782-789.
- [47] Jiang X.P., Man C.S., Shepard M.J., Zhai T., Effects of Shot-Peening and Re-Shot-Peening on Four-Point Bend Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V, *Materials Science and Engineering: A*, 2007, **468-470**, 137-143.

- [48] Harada Y., Fukaura K., Haga S., Influence of Microshot Peening on Surface Layer Characteristics of Structural Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, **191**(1-3), 297-301.
- [49] Fridrici V., Fouvry S., Kapsa P., Effect of Shot Peening on the Fretting Wear of Ti-6Al-4V, *Wear*, 2001, **250**, 624-649.
- [50] Dong H., Bloyce A., Bell T., Slurry Abrasion Response of Surface Engineered Ti6Al4VELI, *Tribology International*, 1999, **32**, 517-526.
- [51] Yang Q., Zhou W., Gai P., Zhang X., Fu X., Chen G., Li Z., Investigation on The Fretting Fatigue Behaviors of Ti-6Al-4V Dovetail Joint Specimens Treated With Shot-Peening, *Wear*, 2017, **372-373**, 81-90.
- [52] Bagheri S., Guagliano M., Review of Shot Peening Processes to Obtain Nanocrystalline Surfaces in Metal Alloys, *Surface Engineering*, 2009, **25**(1), 3-14.
- [53] Nguyen V.B., Poh H.J., Zhang Y.-W., Predicting Shot Peening Coverage Using Multiphase Computational Fluid Dynamics Simulations, *Powder Technology*, 2014, **256**, 100-112.
- [54] Trung P.Q., Khun N.W., Butler D.L., Effects of Shot Peening Pressure, Media Type and Double Shot Peening on The Microstructure, Mechanical and Tribological Properties of Low-Alloy Steel, *Surface Topography: Metrology and Properties*, 2016, **4**(4), 045001.
- [55] Miao H.Y., Numerical and Theoretical Study of Shot Peening and Stress Peen Forming Process, Doktora Tezi, Montreal Üniversitesi, Montreal, 2010.
- [56] Maawad E.K.S., Residual Stress Analysis and Fatigue Behavior of Mechanically Surface Treated Titanium Alloys, Doktora Tezi, Clausthal Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, Clausthal, 2013.
- [57] Ahmed A.A., Mhaede M., Basha M., Wollmann M., Wagner L., The Effect of Shot Peening Parameters and Hydroxyapatite Coating on Surface Properties and Corrosion Behavior of Medical Grade AISI 316L Stainless Steel, *Surface and Coatings Technology*, 2015, **280**, 347-358.
- [58] Bagherifard S., Fernandez-Pariante I., Ghelichi R., Guagliano M., Effect of Severe Shot Peening on Microstructure and Fatigue Strength of Cast Iron, *International Journal of Fatigue*, 2014, **65**, 64-70.
- [59] Trško L., Guagliano M., Bokůvka O., Nový F., Jambor M., Florková Z., Influence of Severe Shot Peening on the Surface State and Ultra-High-Cycle Fatigue Behavior of an AW 7075 Aluminum Alloy, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, **26**(6), 2784-2797.
- [60] Sawada T., Effect of Young's Modulus of Shot Peening Media on Surface Modification Behavior by Micro Shot Peening, *13. International Conferences on Shot Peening*, Montreal, Kanada, 18-21 Eylül 2017.

- [61] Avcu E., Surface Properties of AA7075 Aluminium Alloy Shot Peened, *Acta Materialia Turcica*, 2017, **1**, 3-10.
- [62] Llana V., Belzunce F.J., Study of the Effects Produced by Shot Peening on The Surface of Quenched and Tempered Steels: Roughness, Residual Stresses and Work Hardening, *Applied Surface Science*, 2015, **356**, 475-85.
- [63] Unal O., Maleki E., Shot Peening Optimization with Complex Decision-Making Tool: Multi Criteria Decision-Making, *Measurement*, 2018, **125**, 133-141.
- [64] Bagherifard S., Ghelichi R., Guagliano M., On The Shot Peening Surface Coverage and Its Assessment by Means of Finite Element Simulation: A Critical Review and Some Original Developments, *Applied Surface Science*, 2012, **259**, 186-194.
- [65] Badreddine J., Ernould C., Guenier E., Puydt Q., Hazotte A., A New Method to Quantify The Heterogeneity of A Shot Stream – Coverage and Indent Distribution, *13 th International Conference on Shot Peening Montreal-Canada*, 2017.
- [66] Xie L., Jiang C., Lu W., The Influence of Shot Peening on The Surface Properties of (TiB+TiC)/Ti-6Al-4V, *Applied Surface Science*, 2013, **280**, 981-988.
- [67] Harada Y., Fukauara K., Kohamada S., Effects of Microshot Peening on Surface Characteristics of High-Speed Tool Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, **201**(1-3), 319-324.
- [68] Abood A.N., Saleh A.H., Salem R.K., Kadhim G.A., Abdullah Z.W., Strain Life of Shot Peening AA 2024-T4, *Journal of Materials Science Research*, 2012, **2**(1).
- [69] Azhari A., Schindler C., Hilbert K., Godard C., Kerscher E., Influence of Waterjet Peening and Smoothing on The Material Surface and Properties of Stainless Steel 304, *Surface and Coatings Technology*, 2014, **258**, 1176-1182.
- [70] Sanjurjo P., Rodríguez C., Pariente I.F., Belzunce F.J., Canteli A.F., The Influence of Shot Peening on The Fatigue Behaviour of Duplex Stainless Steels, *Procedia Engineering*, 2010, **2**(1), 1539-1546.
- [71] Kanou S., Takakuwa O., Mannava S.R., Qian D., Vasudevan V.K., Soyama H., Effect of The Impact Energy of Various Peening Techniques on The Induced Plastic Deformation Region, *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, **212**(10), 1998-2006.
- [72] Bagherifard S., Ghelichi R., Guagliano M., Numerical and Experimental Analysis of Surface Roughness Generated by Shot Peening, *Applied Surface Science*, 2012, **258**(18), 6831-6840.

- [73] Yıldiran Y., Avcu E., Sınmazçelik T., Optimization of Surface Properties of Shot Peened Ti6Al4V Alloy, *Acta Physica Polonica A*, 2015, **127**(4), 984-986.
- [74] Mordyuk B.N., Prokopenko G.I., Ultrasonic Impact Peening for The Surface Properties' Management, *Journal of Sound and Vibration*, 2007, **308**(3-5), 855-866.
- [75] Zupanc U., Grum J., Surface Integrity of Shot Peened Aluminium Alloy 7075-T651, *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 2011, **57**(05), 379-384.
- [76] Vielma A.T., Llaneza V., Belzunce F.J., Effect of Coverage and Double Peening Treatments on The Fatigue Life of A Quenched and Tempered Structural Steel, *Surface and Coatings Technology*, 2014, **249**, 75-83.
- [77] Yang Q., Zhou W., Zhong Y., Zhang X., Fu X., Chen G., Li Z., Effect of Shot-Peening on The Fretting Wear and Crack Initiation Behavior of Ti-6Al-4V Dovetail Joint Specimens, *International Journal of Fatigue*, 2018, **107**, 83-95.
- [78] Abdulstaar M., Mhaede M., Wollmann M., Wagner L., Investigating The Effects of Bulk and Surface Severe Plastic Deformation on The Fatigue, Corrosion Behaviour and Corrosion Fatigue of AA5083, *Surface and Coatings Technology*, 2014, **254**, 244-251.
- [79] Arola D., Alade A.E., Weber W., Improving Fatigue Strength of Metals Using Abrasive Waterjet Peening, *Machining Science and Technology*, 2006, **10**(2), 197-218.
- [80] Zhou Z., Gong S., Li H., Xu H., Zhang C., Wang L., Effects of Shot Peening Process on Thermal Cycling Lifetime of TBCs Prepared by EB-PVD, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2007, **20**(2), 145-147.
- [81] Bagherifard S., Colombo C., Guagliano M., Application of Different Fatigue Strength Criteria to Shot Peened Notched Components. Part 1: Fracture Mechanics Based Approaches, *Applied Surface Science*, 2014, **289**, 180-187.
- [82] Vrbka M., Křupka I., Svoboda P., Šperka P., Návrat T., Hartl M., Nohava J., Effect of Shot Peening on Rolling Contact Fatigue and Lubricant Film Thickness Within Mixed Lubricated Non-Conformal Rolling/Sliding Contacts, *Tribology International*, 2011, **44**(12), 1726-1735.
- [83] Altenberger I., Nalla R.K., Sano Y., Wagner L., Ritchie R.O., On The Effect of Deep-Rolling and Laser-Peening on The Stress-Controlled Low- and High-Cycle Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V at Elevated Temperatures Up to 550°C, *International Journal of Fatigue*, 2012, **44**, 292-302.
- [84] Turski M., Clitheroe S., Evans A.D., Rodopoulos C., Hughes D.J., Withers P.J., Engineering the Residual Stress State and Microstructure of Stainless Steel with Mechanical Surface Treatments, *Applied Physics A*, 2010, **99**(3), 549-556.

- [85] Shukla P., Nath S., Wang G., Shen X., Lawrence J., Surface Property Modifications of Silicon Carbide Ceramic Following Laser Shock Peening, *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, **2017**(37), 3027-3038.
- [86] Sathyajith S., Kalainathan S., Effect of Laser Shot Peening on Precipitation Hardened Aluminum Alloy 6061-T6 Using Low Energy Laser, *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, **50**(3), 345-348.
- [87] Kattoura M., Mannava S.R., Qian D., Vasudevan V.K., Effects of Laser Shock Peening on Residual Stress, Microstructure and Fatigue Behaviour of ATI 18Plus Alloy, *International Journal of Fatigue*, 2017, **102**, 121-134.
- [88] Umemoto M., Todaka Y., Tsuchiya K., Formation of Nanocrystalline Structure in Steels by Air Blast Shot Peening, *Materials Transactions*, 2003, **44**(7), 1488-1493.
- [89] Trško L., Bokůvka O., Nový F., Guagliano M., Effect of Severe Shot Peening on Ultra-High-Cycle Fatigue of A Low-Alloy Steel, *Materials & Design*, 2014, **57**, 103-113.
- [90] Mordyuk B.N., Prokopenko G.I., Vasylyev M.A., Iefimov M.O., Effect of Structure Evolution Induced by Ultrasonic Peening on The Corrosion Behavior of AISI-321 Stainless Steel, *Materials Science and Engineering: A*, 2007, **458**(1-2), 253-261.
- [91] Cho K.T., Song K., Oh S.H., Lee Y.-K., Lim K.M., Lee W.B., Surface Hardening of Aluminum Alloy by Shot Peening Treatment with Zn Based Ball, *Materials Science and Engineering: A*, 2012, **543**, 44-49.
- [92] Cho K.T., Yoo S., Lim K.M., Kim H.S., Lee W.B., Effect of Si Content on Surface Hardening of Al-Si alloy by Shot Peening Treatment, *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, **509**, S265-S270.
- [93] Dai K., Shaw L., Comparison Between Shot Peening and Surface Nanocrystallization and Hardening Processes, *Materials Science and Engineering: A*, 2007, **463**(1-2), 46-53.
- [94] Appel F., Atomic Level Observations of Mechanical Damage in Shot Peened TiAl, *Philosophical Magazine*, 2013, **93**(1-3), 2-21.
- [95] Sugimoto K., Mizuno Y., Natori M., Hojo T., Effects of Fine Particle Peening on Fatigue Strength of A Trip-Aided Martensitic Steel, *International Journal of Fatigue*, 2017, **100**, 206-214.
- [96] Cho K.T., Song K., Oh S.H., Lee Y.-K., Lee W.B., Surface Hardening of Shot Peened H13 Steel by Enhanced Nitrogen Diffusion, *Surface and Coatings Technology*, 2013, **232**, 912-919.
- [97] Wang Z., Luan W., Huang J., Jiang C., XRD Investigation of Microstructure Strengthening Mechanism of Shot Peening on Laser Hardened 17-4PH, *Materials Science and Engineering: A*, 2011, **528**(21), 6417-6425.

- [98] Kong L., Lao Y., Xiong T., Li T., Nanocrystalline Surface Layer on AISI 52100 Steel Induced by Supersonic Fine Particles Bombarding, *Journal of Thermal Spray Technology*, 2013, **22**(6), 1007-1013.
- [99] Zhan K., Jiang C.H., Ji V., Effect of Prestress State on Surface Layer Characteristic of S30432 Austenitic Stainless Steel in Shot Peening Process, *Materials & Design*, 2012, **42**, 89-93.
- [100] Harada Y., Mori K., Effect of Processing Temperature on Warm Shot Peening of Spring Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, **162-163**, 498-503.
- [101] Zhang J., Li W., Wang H., Song O., Lu L., Wang W., Liu Z., A Comparison of The Effects of Traditional Shot Peening and Micro-Shot Peening on The Scuffing Resistance of Carburized and Quenched Gear Steel, *Wear*, 2016, **368-369**, 253-257.
- [102] Zhan K., Jiang C.H., Ji V., Uniformity of Residual Stress Distribution on The Surface of S30432 Austenitic Stainless Steel by Different Shot Peening Processes, *Materials Letters*, 2013, **99**, 61-64.
- [103] Fu P., Jiang C., Residual Stress Relaxation and Micro-Structural Development of The Surface Layer of 18CrNiMo7-6 Steel After Shot Peening During Isothermal Annealing, *Materials & Design*, 2014, **56**, 1034-1038.
- [104] Aggarwal M., Agrawal V., Khan R., A Stress Approach Model for Predictions of Fatigue Life by Shot Peening of EN45A Spring Steel, *International Journal of Fatigue*, 2006, **28**(12), 1845-1853.
- [105] Ren N.F., Yang H.M., Yuan S.Q., Wang Y., Tang S.X., Zheng L.M., Ren X.D., Dai F.Z., High Temperature Mechanical Properties and Surface Fatigue Behavior Improving of Steel Alloy via Laser Shock Peening, *Materials & Design*, 2014, **53**, 452-456.
- [106] Curtat J.L., Lantaigne J., Champlaud H., Zhaoheng L., Levesque J.B., Influence of hammer peening on fatigue life of E309L steel used for 13%Cr-4%Ni blade runner repairs, *International Journal of Fatigue*, 2017, **100**, 68-77.
- [107] Başaran A., Varol R., Pirge G., Baştürk S., Varol H., Bilyalı Dövme İşlemi ve Yüksek Sıcılığın, Bakır İlaveli Toz Metal Çelik Parçaların Yorulma Dayanımına Etkisinin İncelenmesi, *8. Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı*, 2007.
- [108] Dülek E., Orman Ş., Karataş Ç., Sarıtaş S., Bilyalı Dövme Parametrelerinin Ç1020 Çeliğinin Yorulma Dayanımına Etkisi ve Oluşan Kalıcı Gerilmenin Katman Kaldırma Yöntemi ile Araştırılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2005, **20**(3), 289-295.

- [109] Fouad Y., Metwally M.E., Shot-Peening Effect on High Cycling Fatigue of Al-Cu Alloy, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2013, **44**(12), 5488-5492.
- [110] Živković D., Anzulović B., The Fatigue of 5083 Aluminium Alloy Welds with The Shot-Peened Crater Hot-Cracks, *Materials & Design*, 2005, **26**(3), 247-250.
- [111] Wang T., Yu J., Dong B., Surface Nanocrystallization Induced by Shot Peening and Its Effect on Corrosion Resistance of 1Cr18Ni9Ti Stainless Steel, *Surface and Coatings Technology*, 2006, **200**(16-17), 4777-4781.
- [112] Döleker K.M., Bilyalı Dövme İşleminin Termal Bariyer Kaplamaların Oksidasyon Davranışı Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın, 2015, 390559.
- [113] Yılmaz S.S., Ünlü B.S., Varol R., Borlama ve Bilyalı Dövmenin Demir Esaslı T/M Malzemelerde Aşınma ve Mikro Yapı Özelliklerine Etkisi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2008, **4.1**, 1-8.
- [114] Takesue S., Kikuchi S., Akebono H., Misaka Y., Komotori J., Effect of Pre-Treatment with Fine Particle Peening on Surface Properties and Wear Resistance of Gas Blow Induction Heating Nitrided Titanium Alloy, *Surface and Coatings Technology*, 2019, **359**, 476-484.
- [115] Wang W., Wang Y., Yu X., Effect of Shot-Peening Treatment on The Bio-Tribological Properties of a Ni+ Implantation Layer Formed on The Surface of Ti6Al4V, *Materials Research Express*, 2018, **5**(6), 066423.
- [116] She D., Yue W., Fu Z., Wang C., Yang X., Liu J., Effects of Nitriding Temperature on Microstructures and Vacuum Tribological Properties of Plasma-Nitrided Titanium, *Surface and Coatings Technology*, 2015, **264**, 32-40.
- [117] Ball M., Grant D.M., Lo W.J., Scotchford C.A., The Effect of Different Surface Morphology and Roughness on Osteoblast-Like Cells, *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 2008, **86**(3), 637-47.
- [118] Sabelkin V., Martinez S.A., Mall S., Sathish S., Blodgett M.P., Effects of Shot-Peening Intensity on Fretting Fatigue Crack-Initiation Behaviour of Ti-6Al-4V, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2005, **28**, 321-332.
- [119] Tsuji N., Tanaka S., Takasugi T., Effects of Combined Plasma-Carburizing and Shot-Peening on Fatigue and Wear Properties of Ti-6Al-4V alloy, *Surface and Coatings Technology*, 2009, **203**(10-11), 1400-1405.
- [120] Zhu L., Guan Y., Wang Y., Xie Z., Lin J., Zhai J., Influence of Process Parameters of Ultrasonic Shot Peening on Surface Roughness and Hydrophilicity of Pure Titanium, *Surface and Coatings Technology*, 2017, **317**, 38-53.

- [121] Liu Y.G., Li M.Q., Liu H.J., Nanostructure and Surface Roughness in The Processed Surface Layer of Ti-6Al-4V via Shot Peening, *Materials Characterization*, 2017, **123**, 83-90.
- [122] Xie L., Wang L., Jiang C., Lu W., The Variations of Microstructures and Hardness of Titanium Matrix Composite (TiB+TiC)/Ti-6Al-4V After Shot Peening, *Surface and Coatings Technology*, 2014, **244**, 69-77.
- [123] Kameyama Y., Komotori J., Effect of Micro Ploughing During Fine Particle Peening Process on The Microstructure of Metallic Materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, **209**, 6146-6155.
- [124] Lainé S.J., Knowles K.M., Doorbar P.J., Cutts R.D., Rugg D., Microstructural Characterisation of Metallic Shot Peened and Laser Shock Peened Ti-6Al-4V, *Acta Materialia*, 2017, **123**, 350-361.
- [125] Xu C., Sheng G., Wang H., Jiao Y., Yuan X., Effect of High Energy Shot Peening on The Microstructure and Mechanical Properties of Mg/Ti Joints, *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, **695**, 1383-1391.
- [126] Unal O., Maleki E., Varol R., Effect of Severe Shot Peening and Ultra-Low Temperature Plasma Nitriding on Ti-6Al-4V Alloy, *Vacuum*, 2018, **150**, 69-78.
- [127] Unal O., Karaoglanli A.C., Ozgurluk Y., Doleker K.M., Maleki E., Varol R., Wear Behavior of Severe Shot Peened and Thermally Oxidized Commercially Pure Titanium, *Advanced Structured Materials*, 2019, **92**, 461-470.
- [128] Heredia S., Fouvry S., Berthel B., Panter J., A Non-Local Fatigue Approach to Quantify Ti-10V-2Fe-3Al Fretting Cracking Process: Application to Grinding and Shot Peening, *Tribology International*, 2011, **44**, 1518-1525.
- [129] Zhang X., Liu D., Effect of Shot Peening on Fretting Fatigue of Ti811 Alloy at Elevated Temperature, *International Journal of Fatigue*, 2009, **31**(5), 889-893.
- [130] Xie L., Wen Y., Zhan K., Wang L., Jiang C., Ji V., Characterization on Surface Mechanical Properties of Ti-6Al-4V After Shot Peening, *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, **666**, 65-70.
- [131] Arola D., McCain M., Kunaporn S., Ramulu M., Waterjet and Abrasive Waterjet Surface Treatment of Titanium: A Comparison of Surface Texture and Residual Stress, *Wear*, 2001, **249**(10), 943-950.
- [132] Kumar S., Chattopadhyay K., Mahobia G.S., Singh V., Hot Corrosion Behaviour of Ti-6Al-4V Modified by Ultrasonic Shot Peening, *Materials & Design*, 2016, **110**, 196-206.
- [133] Bansal D.G., Eryilmaz O.L., Blau P.J., Surface Engineering to Improve The Durability and Lubricity of Ti-6Al-4V alloy, *Wear*, 2011, **271**(9-10), 2006-2015.

- [134] Karaoglanli A.C., Effect of Severe Air-Blast Shot Peening on The Wear Characteristics of CP Titanium, *Materiali in tehnologije*, 2015, **49**(2), 253-258.
- [135] Wu Q., Xie D., Jia Z., Zhang Y., Zhang H., Effect of Shot Peening on Surface Residual Stress Distribution of SiCp/2024Al, *Composites Part B: Engineering*, 2018, **154**, 382-387.
- [136] Lin N., Arabnejad H., Shirazi S.A., McLaury B.S., LAn H., Experimental Study of Particle Size, Shape and Particle Flow Rate on Erosion of Stainless Steel, *Powder Technology*, 2018, **336**, 70-79.
- [137] Bousser E., Martinu L., Sapiuha J.E.K., Solid Particle Erosion Mechanisms of Hard Protective Coatings, *Surface and Coatings Technology*, 2013, **235**, 383-393.
- [138] Avcu E., Fidan S., Yıldıran Y., Sinmazçelik T., Solid Particle Erosion Behaviour of Ti6Al4V Alloy, *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces*, 2013, **7**(4), 201-210.
- [139] Avcu E, Yıldıran Y, Sinmazcelik T, Investigation of erodent particle embedding in solid particle erosion of Ti6Al4V alloy, *AES-ATEMA International Conference Series - Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications*, Canada, 2015.
- [140] Pandey V., Singh J.K., Chattopadhyay K., Srinivas N.C.S., Singh V., Optimization of USSP Duration for Enhanced Corrosion Resistance of AA7075, *Ultrasonics*, 2019, **91**, 180-192.
- [141] Miao H.Y., Demers D., Larose S., Perron C., Lévesque M., Experimental Study of Shot Peening And Stress Peen Forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, **210**(15), 2089-2102.
- [142] Ünal O., Aşırı Plastik Deformasyonun Metalik Malzemelerde Difüzyon Karakteristiklerine Etkisi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2015, 410873.
- [143] Mitrovic S., Adamovic D., Zivic F., Dzunic D., Pantic M., Friction and Wear Behavior of Shot Peened Surfaces of 36CrNiMo4 and 36NiCrMo16 Alloyed Steels Under Dry And Lubricated Contact Conditions, *Applied Surface Science*, 2014, **290**, 223-232.
- [144] Kıcır K., Elektroforetik Biriktirme Metodu ile Yüzey Modifiye Titanyum İmplantların Hazırlanması ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2013, 335696.
- [145] Tang C., Liu D., Tang B., Zhang X., Qin L., Liu C., Influence of Plasma Molybdenizing and Shot-Peening on Fretting Damage Behavior of Titanium Alloy, *Applied Surface Science*, 2016, **390**, 946-958.

- [146] Zhan K., Wu Y., Li J., Zhao B., Yan Y., Xie L., Wang L., Ji V., Investigation on Surface Layer Characteristics of Shot Peened Graphene Reinforced Al Composite by X-ray Diffraction Method, *Applied Surface Science*, 2018, **435**, 1257-1264.
- [147] Rousseau T., Nougier-Lehon C., Gilles P., Hoc T., Finite Element Multi-Impact Simulations Using A Crystal Plasticity Law Based on Dislocation Dynamics, *International Journal of Plasticity*, 2018, **101**, 42-57.
- [148] Pour-Ali S., Kiani-Rashid A.-R., Babakhani A., Virtanen S., Allieta M., Correlation Between The Surface Coverage of Severe Shot Peening and Surface Microstructural Evolutions in AISI 321: A TEM, FE-SEM and GI-XRD Study, *Surface and Coatings Technology*, 2018, **334**, 461-470.
- [149] Zhai W., Shi X., Yang K., Huang Y., Zhou L., Lu W., Mechanical and Tribological Behaviors of The Tribo-Layer With Nanocrystalline Structure During Sliding Contact: Experiments and Model Assessment, *Composites Part B: Engineering*, 2017, **108**, 354-363.
- [150] Avcu E., The Influences of ECAP on The Dry Sliding Wear Behaviour of AA7075 Aluminium Alloy, *Tribology International*, 2017, **110**, 173-184.
- [151] Greger M., Cerny M., Kander L., Kliber J., Structure and Properties of Titanium for Dental Implants, *Journal Metalurgija*, 2009, **48**(4), 249-252.
- [152] Wang S., Li Y., Yao M., Wang R., Fatigue Limits of Shot-Peened Metals, *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, **73**(1-3), 57-63.
- [153] Wang H., Yuan X., Wu K., Xu C., Jiao Y., Ge W., Luo J., Effect of High Energy Shot-Peening on The Microstructure and Mechanical Properties of Al5052/Ti6Al4V Lap Joints, *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, **255**, 76-85.
- [154] Zhu L., Guan Y., Lin J., Zhai J., Xie Z., A Nanocrystalline-Amorphous Mixed Layer Obtained by Ultrasonic Shot Peening on Pure Titanium at Room Temperature, *Ultrason Sonochem*, 2018, **47**, 68-74.
- [155] Zhu K., Jiang C., Ji V., Surface Layer Characteristics of CNT/Al-Mg-Si Alloy Composites Treated by Stress Peening, *Surface and Coatings Technology*, 2017, **317**, 10-16.
- [156] Lin Y.C., Jiang Y.-Q., Chen X.-M., Wen D.-X., Zhou H.-M., Effect of Creep-Aging on Precipitates of 7075 Aluminum Alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2013, **588**, 347-356.
- [157] Van Steenkiste T., Smith J., Teets R., Aluminum Coatings via Kinetic Spray with Relatively Large Powder Particles, *Surface and Coatings Technology*, 2002, **154**(2-3), 237-252.

- [158] Canals L., Badreddine J., McGillivray B., Miao H.Y., Levesque M., Effect of Vibratory Peening On The Sub-Surface Layer of Aerospace Materials Ti-6Al-4V and E-16NiCrMo13, *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, **264**, 91-106.
- [159] Yang Q., Zhou W., Niu Z., Zheng X., Wang Q., Fu X., Chen G., Li Z., Effect of Different Surface Asperities and Surface Hardness Induced by Shot-Peening on The Fretting Wear Behavior of Ti-6Al-4V, *Surface and Coatings Technology*, 2018, **349**, 1098-1106.
- [160] Uematsu Y., Kakiuchi T., Hattori K., EBSD-Assisted Fractography of Sub-Surface Fatigue Crack Initiation Mechanism in The Ultrasonic-Shot-Peened β -Type Titanium Alloy, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2018, **41**(11), 2239-2248.
- [161] Unal O., Cahit Karaoglanli A., Varol R., Kobayashi A., Microstructure evolution and mechanical behavior of severe shot peened commercially pure titanium, *Vacuum*, 2014, **110**, 202-206.
- [162] Leitner H., Oberwinkler B., Gaenser H., Stoschka M., Influence of the Peening Intensity on the Fatigue Behavior of Shot Peened Titanium Components, 7. *International ASTM/ESIS Symposium on Fatigue and Fracture Mechanics*, 14-16 Kasim 2007.
- [163] Thomas M., On the Characterisation of Subsurface Deformation Microstructures in Aerostructural Titanium Alloys, Doktora Tezi, Sheffield Üniversitesi, Sheffield, 2012.
- [164] Huang Z.W., Lin J.P., Feng B., Microstructural Characterization and Fatigue Response of Alloy Ti-46Al-5Nb-1W with Varied Surface Quality and Thermal Exposure History, *Materials Characterization*, 2017, **130**, 285-297.
- [165] Liu Y.G., Li M.Q., Liu H.J., Surface Nanocrystallization and Gradient Structure Developed in The Bulk TC4 Alloy Processed by Shot Peening, *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, **685**, 186-193.
- [166] Li G., Qu S.G., Pan Y.X., Li X.Q., Effects of The Different Frequencies and Loads of Ultrasonic Surface Rolling on Surface Mechanical Properties and Fretting Wear Resistance of HIP Ti-6Al-4V Alloy, *Applied Surface Science*, 2016, **389**, 324-334.
- [167] Zhao W., Liu Y., Liu L., Yu Y., Ma Y., Gong S., Surface Recrystallization of A Gamma-TiAl Alloy Induced by Shot Peening and Subsequent Annealing Treatments, *Applied Surface Science*, 2013, **270**, 690-696.
- [168] Zhu K., Li Z., Jiang C., Surface Mechanical Properties of Shot-Peened CNT/Al-Mg-Si Alloy Composites, *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, **773**, 1048-1053.

- [169] Li H., Lu Y., Han Z., Guo X., Xu Y., Xu X., Tao J., The Shot Peen Forming of Fiber Metal Laminates Based On The Aluminum-Lithium Alloy: Deformation Characteristics, *Composites Part B: Engineering*, 2019, **158**, 279-285.
- [170] Uzan N.E., Ramati S., Shneck R., Frage N., Yeheskel O., On the Effect of Shot-Peening on Fatigue Resistance of AlSi10Mg Specimens Fabricated by Additive Manufacturing Using Selective Laser Melting (AM-SLM), *Additive Manufacturing*, 2018, **21**, 458-464.
- [171] Ferreira N., Antunes P., Ferreira J., D. M. Costa J., Capela C., Effects of Shot-Peening and Stress Ratio on The Fatigue Crack Propagation of Al 7475-T7351 Specimens, *Applied Sciences*, 2018, **8**(3), 375.
- [172] Bianchetti C., Lévesque M., Brochu M., Probabilistic Analysis of The Effect of Shot Peening on The High and Low Cycle Fatigue Behaviors of AA 7050-T7451, *International Journal of Fatigue*, 2018, **111**, 289-298.
- [173] Bagherifard S., Hickey D.J., Fintova S., Pastorek F., Fernandez-Pariente I., Bandini M., Webster T.J., Guagliano M., Effects of Nanofeatures Induced by Severe Shot Peening (SSP) on Mechanical, Corrosion and Cytocompatibility Properties of Magnesium Alloy AZ31, *Acta Biomater*, 2018, **66**, 93-108.
- [174] Hadzima B., Nový F., Trško L., Pastorek F., Jambor M., Fintová S., Shot Peening as a Pre-Treatment to Anodic Oxidation Coating Process of AW 6082 Aluminum for Fatigue Life Improvement, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, **93**(9-12), 3315-3323.
- [175] González J., Bagherifard S., Guagliano M., Fernández Pariente I., Influence of Different Shot Peening Treatments on Surface State and Fatigue Behaviour of Al 6063 Alloy, *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, **185**, 72-81.
- [176] Žagar S., Grum J., Surface Modification Analysis after Shot Peening of AA 7075 in Different States, *Materials Science Forum*, 2013, **768-769**, 519-525.
- [177] Wagner L., Mhaede M., Wollmann M., Altenberger I., Sano Y., Surface Layer Properties and Fatigue Behavior in Al 7075-T73 and Ti-6Al-4V, *International Journal of Structural Integrity*, 2011, **2**(2), 185-199.
- [178] Kaplan M., Uyaner M., Avcu E., Yildiran Avcu Y., Karaoglanli A.C., Solid particle erosion behavior of thermal barrier coatings produced by atmospheric plasma spray technique, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2018, 1-7.
- [179] Avcu E., Yildiran Y., Sınmazçelik T., The Influences of The Erodent Particle Size Distribution on The Solid Particle Erosion of Ti6Al4V Alloy, 28. *International Conference on Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications* Montreal, Kanada, 20-24 Haziran 2016.

- [180] Avcu E., Yıldırım Y., Sınmazçelik T., Investigation of Erodent Particle Embedding in Solid Particle Erosion of Ti6Al4V Alloy, *Advances and Trends in Engineering Materials and Their Applications*, Montreal, Kanada, 15-19 Haziran 2015.
- [181] Balyalı H.A., Koçoğlu H., Harbelioğlu E., Yıldırım Y., Avcu E., Sınmazçelik T., The Effects of Erodent Particle Properties on The Erosion Behaviour of Ti6Al4V Alloy, 15. *Uluslararası Malzeme Sempozyumu*, Denizli, Türkiye, 15-17 Ekim 2014.
- [182] Avcu E., Yıldırım Y., Şahin A.E., Fidan S., Sınmazçelik T., Influences of Particle Impingement Angle and Velocity on Surface Roughness, Erosion Rate, and 3D Surface Morphology of Solid Particle Eroded Ti6Al4V Alloy, *Acta Physica Polonica A*, 2014, **125**(2), 541-543.
- [183] Önen B., Yıldırım Y., Avcu E., Çınar A., Investigation of the Effects of Erosion Test Parameters on the Particle Impingement Velocity by Using CFD Analysis, *Acta Physica Polonica A*, 2015, **127**(4), 1225-1229.
- [184] Fidan S., Avcu E., Karakulak E., Yamanoglu R., Zeren M., Sınmazçelik T., Effect of Heat Treatment on Erosive Wear Behaviour of Ti6Al4V Alloy, *Materials Science and Technology*, 2013, **29**(9), 1088-1094.
- [185] Dong M., Wang C., Liu H., Liu C., Shen C., Zhang J., Jia C., Ding T., Guo Z., Enhanced Solid Particle Erosion Properties of Thermoplastic Polyurethane-Carbon Nanotube Nanocomposites, *Macromolecular Materials and Engineering*, 2019, **304**(5), 1900010.
- [186] Vázquez J., Navarro C., Domínguez J., Experimental Results in Fretting Fatigue with Shot and Laser Peened Al 7075-T651 Specimens, *International Journal of Fatigue*, 2012, **40**, 143-153.
- [187] Mhaede M., Influence of Surface Treatments on Surface Layer Properties, Fatigue and Corrosion Fatigue Performance of AA7075 T73, *Materials & Design*, 2012, **41**, 61-66.
- [188] Avcu E., Fidan S., Karabay S., Sınmazçelik T., Türkiye'de Enerji Nakil Hatlarında Kullanılan AA-1070 ile AA-6101 Alaşımlarının Katı Partikül Erozyon Davranışlarının Karşılaştırılması, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2012, **27**(4), 865-874.
- [189] Yaer X., Shimizu K., Qu J., Wen B., Cao X., Kusumoto Y.K., Surface Deformation Micromechanics of Erosion Damage at Different Angles and Velocities for Aero-Engine Hot-End Components *Wear*, 2019, **426-427**, 527-538.
- [190] Kanesan D., Mohyaldin M.E., Ismail N.I., Chandran C.J.L., An Experimental Study on The Erosion of Stainless Steel Wire Mesh Sand Screen Using Sand Blasting Technique, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, **65**, 267-274.

- [191] Hadavi V., Arani N.H., Papini M., Numerical and Experimental Investigations of Particle Embedment During The Incubation Period in The Solid Particle Erosion of Ductile Materials *Tribology International*, 2019, **129**, 38-45.
- [192] Liu R., Yao J.H., Zhang Q.L., Yao M.X., Collier R., Sliding Wear and Solid-Particle Erosion Resistance of A Novel High-Tungsten Stellite Alloy, *Wear*, 2015, **322-323**, 41-50.
- [193] Kovacı H., Hacısalihoğlu İ., Yetim A.F., Çelik A., Effects of Shot Peening Pre-Treatment and Plasma Nitriding Parameters on The Structural, Mechanical and Tribological Properties of AISI 4140 Low-Alloy Steel *Surface and Coatings Technology*, 2019, **358**, 256-265.
- [194] Kang J., Wang M., Yue W., Fu Z., Zhu L., She D., Wang C., Tribological Behavior of Titanium Alloy Treated by Nitriding and Surface Texturing Composites Technology, *Materials*, 2019, **12**(301), 1-12.
- [195] Jain A., Singh A., Singh A.P., Effect of Tribological Parameters Oon Sliding Wear and Friction Coefficient Which Relates to Preload Loss in Tapered Roller Bearing, *Industrial Lubrication and Tribology*, 2019, **71**(1), 61-73.
- [196] Lenart A., Pawlus P., Dzierwa A., Sęp J., Dudek K., The Effect of Surface Topography on Dry Fretting in The Gross Slip Regime, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2017, **17**(4), 894-904.
- [197] Góral A., Lityńska-Dobrzyńska L., Kot M., Effect of Surface Roughness and Structure Features on Tribological Properties of Electrodeposited Nanocrystalline Ni and Ni/Al₂O₃ Coatings, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, **26**(5), 2118-2128.
- [198] Rahaman M.L., Zhang L., Liu M., Liu W., Surface Roughness Effect on The Friction and Wear of Bulk Metallic Glasses, *Wear*, 2015, **332-333**, 1231-1237.
- [199] Amanov A., Cho I.S., Pyoun Y.S., Lee C.S., Park I.G., Micro-Dimpled Surface by Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification and Its Tribological Effects, *Wear*, 2012, **286-287**, 136-144.
- [200] Chang J.H., Tzeng S.K., Chou J.M., Hsieh R.I., Lee J.L., Effect of dry sliding wear conditions on a vacuum induction melted Ni alloy, *Wear*, 2011, **270**(3-4), 294-301.
- [201] La P., Ma J., Zhu Y.T., Yang J., Liu W., Xue Q., Valiev R.Z., Dry-Sliding Tribological Properties of Ultrafine-Grained Ti Prepared by Severe Plastic Deformation, *Acta Materialia*, 2005, **53**(19), 5167-5173.
- [202] Fridrici V., Fouvry S., Kapsa P., Effect of Shot Peening on The Fretting Wear of Ti-6Al-4V, *Wear*, 2001, **250**, 642-649.
- [203] Sedlaček M., Podgornik B., Vižintin J., Correlation Between Standard Roughness Parameters Skewness and Kurtosis and Tribological Behaviour of Contact Surfaces, *Tribology International*, 2012, **48**, 102-112.

- [204] Shaha K.P., Pei Y.T., Martinez-Martinez D., De Hosson J.T.M., Influence of Hardness and Roughness on The Tribological Performance of TiC/a-C Nanocomposite Coatings, *Surface and Coatings Technology*, 2010, **205**(7), 2624-2632.
- [205] Pasinli A., Biyomedikal Uygulamalarda Kullanılan Biyomalzemeler, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2004, **4**, 25-34.
- [206] Givissis P., Karataglis D., Pagonis T., Christodoulou A., A Unique Case of a Titanium Plate Failure Following Osteosynthesis of a Forearm Fracture, *International Journal of Orthopaedics*, 2014, **1**(3), 120-123.
- [207] Cürgül İ., *Makine Elemanları ve Çözümlü Problemleri Cilt 1*. 2012, İstanbul: Birsen Yayınevi.
- [208] Ramos-Saenz C.R., Sundaram P.A., Diffoot-Carlo N., Tribological properties of Ti-based alloys in a simulated bone–implant interface with Ringer’s solution at fretting contacts, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2010, **3**(8), 549-558.
- [209] Purcek G., Saray O., Kul O., Karaman I., Yapici G.G., Haouaoui M., Maier H.J., Mechanical and Wear Properties of Ultrafine-Grained Pure Ti Produced by Multi-Pass Equal-Channel Angular Extrusion, *Materials Science and Engineering: A*, 2009, **517**(1-2), 97-104.
- [210] Yamanoğlu R., Karakulak E., Zeren A., Zeren M., Effect of Heat Treatment on The Tribological Properties of Al–Cu–Mg/NanoSiC Composites, *Materials & Design*, 2013, **49**, 820-825.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] Avcu E., Baştan F.E., Abdullah H.Z., Rehman M.A.U., **Avcu Y.Y.**, Boccaccini A. R., Electrophoretic Deposition of Chitosan-based Composite Coatings for Biomedical Applications: A Review, *Progress in Materials Science*, 2019, **103**, 69-108.
- [2] **Avcu Y.Y.**, Yetik O., Koçoğlu H., Avcu E., Sınmazçelik T., Dry Sliding Wear Behaviour of Shot Peened Ti6Al4V Alloys at Different Peening Times, *Acta Physica Polonica, A*, 2018, **134**, 349-353.
- [3] Avcu E. **Avcu Y.Y.**, Baştan F.E., Rehman M.A.U., Üstel F., Boccaccini A.R., Tailoring the Surface Characteristics of Electrophoretically Deposited Chitosan-Based Bioactive Glass Composite Coatings on Titanium Implants via Grit Blasting, *Progress in Organic Coatings*, 2018, **123**, 362-373.
- [4] Baştan F.E., Rehman M.A.U., **Avcu Y.Y.**, Avcu E., Üstel F., Boccaccini A.R., Electrophoretic co-deposition of PEEK-hydroxyapatite composite coatings for biomedical applications, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2018, **169**, 176-182.
- [5] Kaplan M., Uyaner M., Avcu E., **Avcu Y.Y.**, Karaoğlanlı, A. C., Solid particle erosion behaviour of thermal barrier coatings produced by atmospheric plasma spray technique, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2018, 1-7.
- [6] Kanat-Ertürk B., Sarıdağ S., Köseleler E., Helvacıoğlu-Yiğit D., Avcu E., **Avcu Y.Y.**, Fracture strengths of endocrown restorations fabricated with different preparation depths and CAD/CAM materials, *Dental Materials Journal*, 2018, **37** (2), 256-265.
- [7] **Yıldıran Y.**, Avcu E., Sınmazçelik T., Optimization of surface properties of shot peened Ti6Al4V alloy, *Acta Physica Polonica A*, 2015, **127**(4), 984-986.
- [8] Önen B., Yıldıran Y., Avcu E., Çınar A., Investigation of effects of erosion test parameters on the particle impingement angle velocity by using CFD analysis, *Acta Physica Polonica A*, 2015, **127**(4), 1125-1229.
- [9] Avcu E., **Yıldıran Y.**, Şahin A. E., Fidan S., Sınmazçelik T., The influences of the particle impingement angle and velocity on surface roughness, erosion rate and 3D surface morphology of the solid particle eroded Ti6Al4V alloy, *Acta Physica Polonica A*, 2014, **125**(2), 541-543.
- [10] **Yıldıran Y.**, Avcu E., Şahin A. E., Fidan S., Yetiştiren Y., Sınmazçelik T., Effect of particle impact angle, erodent particle size and acceleration pressure on the solid particle erosion behavior of 3003 aluminium alloy, *Acta Physica Polonica A*, 2014, **125**(2), 523-525.

- [11] Şahin A. E., **Yıldıran Y.**, Avcu E., Fidan S., Sınmazçelik T., Mechanical and thermal properties of pumice powder filled PPS composites, *Acta Physica Polonica A*, 2014, **125**(2), 518-520.
- [12] Gönül B., Yetik O., Çubuk A. B., **Avcu Y. Y.**, Koçoğlu H., Ergün R. E., Avcu E., Cam Bilya ile Dövülen AA7075 Alüminyum Alaşımının Yüzey Özelliklerine Bilya Boyutu ve Bilya Çarpma Açısının Etkisi, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi (IMASCON)*, Kocaeli, Türkiye, 26-28 Nisan 2019.
- [13] Çubuk A. B., **Avcu Y.Y.**, Yetik O., Gönül B., Koçoğlu H., Ergün R. E., Avcu E., AA7075 Alüminyum Alaşımının Bilyalı Dövme İşleminde Bilya Boyutunun ve Bilya Çarpma Açısının Kütle Kaybı ve Pürüzlülüğe Etkisi, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi (IMASCON)*, Kocaeli, Türkiye, 26-28 Nisan 2019.
- [14] **Avcu Y.Y.**, Yetik O., Koçoğlu H., Avcu E., Sınmazçelik T., Dry sliding wear behaviour of shot peened Ti6Al4V alloys at different peening times, *7. International Advances in Applied Physics and Material Science Congress APMAS*, Muğla, Türkiye, 22-26 Nisan 2017.
- [15] Avcu E., **Avcu Y.Y.**, Yetik O., Koçoğlu H., Sınmazçelik T., Definition and investigation of plastic deformation rate during solid particle erosion of Ti6Al4V alloy under normal impingement angle, *7. International Advances in Applied Physics and Material Science Congress APMAS*, Muğla, Türkiye, 22-26 Nisan 2017.
- [16] Yetik O., Koçoğlu H., **Avcu Y. Y.**, Avcu E., Sınmazçelik T., The effects of grit size and blasting pressure on the surface properties of the grit blasted Ti6Al4V alloy, *7. International Advances in Applied Physics and Material Science Congress APMAS*, Muğla, Türkiye, 22-26 Nisan 2017.
- [17] Koçoğlu H., **Avcu Y. Y.**, Yetik O., Avcu E., Sınmazçelik T., Surface properties of titanium alloys grit blasted at various particle impingement angles, *7. International Advances in Applied Physics and Material Science Congress APMAS*, Muğla, Türkiye, 22-26 Nisan 2017.
- [18] Avcu E., **Yıldıran Y.**, Sınmazçelik T., The influences of the erodent particle size on the surface roughness parameter and 3D surface topography of blast cleaned Ti6Al4V alloy, *28. International Conference on Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications AES ATEMA*, Montreal, Kanada, 20-24 Haziran 2016.
- [19] Avcu E., **Yıldıran Y.**, Sınmazçelik T., The influences of the erodent particle size distribution on the solid particle erosion of Ti6Al4V alloy, *28. International Conference on Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications AES ATEMA*, Montreal, Kanada, 20-24 Haziran 2016.

- [20] Avcu E., **Yıldırım Y.**, Sınmazçelik T., Investigation of solid particle erosion mechanisms by using tilt angle SEM view methodology, 22. *International Conference on Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications AES ATEMA*, Montreal, Kanada, 15-19 Haziran 2015.
- [21] **Yıldırım Y.**, Avcu E., Sınmazçelik T., Investigation of erodent particle embedding in solid particle erosion of Ti6Al4V Alloy, 22. *International Conference on Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications AES ATEMA*, Montreal, Kanada, 15-19 Haziran 2015.
- [22] Aktaş G., **Yıldırım Y.**, Yörük M. C., Avcu E., Atapek Ş. H., Dry sliding wear behaviour of high Cr and Mn Alloyed Cast Alloys, 2. *International Iron & Steel Symposium*, Karabük, Türkiye, 01-03 Nisan 2015.
- [23] Helvacıoğlu-Yiğit D., Yılmaz A., Sarıdağ S., Avcu E., **Yıldırım Y.**, Vertical fracture resistance of retreated teeth using different instrumentation techniques, 18. *World Congress on Dental Traumatology*, İstanbul, Türkiye, 19-21 Haziran 2014.
- [24] Avcu E., **Yıldırım Y.**, Özcan B., Sınmazçelik T., Optimization of volume loss and surface roughness of Ti6Al4V alloy in grit blasting process by using Taguchi Analysis, 4. *International Advances in Applied Physics and Material Science Congress APMAS*, Antalya, Türkiye, 24-27 Nisan 2014.
- [25] Önen B., **Yıldırım Y.**, Avcu E., Çınar A., Investigation of the effects of erosion test parameters on the particle impingement velocity by using CFD analysis, 4. *International Advances in Applied Physics and Material Science Congress APMAS*, Antalya, Türkiye, 24-27 Nisan 2014.
- [26] **Yıldırım Y.**, Avcu E., Sınmazçelik T., Optimization of surface properties of shot peened Ti6Al4V alloy, 4. *International Advances in Applied Physics and Material Science Congress APMAS*, Antalya, Türkiye, 24-27 Nisan 2014.
- [27] **Yıldırım Y.**, Avcu E., Şahin A. E., Fidan S., Yetistiren H., Sınmazçelik T., Effect of particle impact angle, erodent particle size and acceleration pressure on the solid particle erosion behavior of 3003 aluminum alloy, 3. *International Advances in Applied Physics and Material Science Congress APMAS*, Antalya, Türkiye, 24-28 Nisan 2013.
- [28] Avcu E., **Yıldırım Y.**, Sahin A. E., Fidan S., Sınmazçelik T., The influences of the particle impingement angle and velocity on the surface roughness, the erosion rate and the 3D surface morphology of the solid particle eroded Ti6Al4V, 3. *International Advances in Applied Physics and Material Science Congress APMAS*, Antalya, Türkiye, 24-28 Nisan 2013.
- [29] Şahin A. E., **Yıldırım Y.**, Avcu E., Fidan S., Sınmazçelik T., Mechanical and thermal properties of pumice powder filled PPS composites, 3. *International Advances in Applied Physics and Material Science Congress APMAS*, Antalya, Türkiye, 24-28 Nisan 2013.

- [30] Şahin A. E., **Yıldırım Y.**, Avcu E., Fidan S., Sınmazçelik T., Günay V., Aşındırıcı partikül boyutu, partikül çarpma açısı ve püskürtme basıncının alümina seramik malzemenin katı partikül erozyonu davranışına etkileri, *14. International Materials Symposium (IMSP'2012)*, Denizli, Türkiye, 10-12 Ekim, 2012.
- [31] **Yıldırım Y.**, Şahin A. E., Avcu E., Fidan S., Sınmazçelik T., Aşındırıcı partikül boyutu ve püskürtme basıncının Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu davranışına etkileri, *14. International Materials Symposium (IMSP'2012)*, Denizli, Türkiye, 10-12 Ekim, 2012.
- [32] Yetik O., **Yıldırım Y.**, Yavuzyeğit B., Avcu E., Aşındırıcı boyutunun ve püskürtme basıncının Ti6Al4V alaşımının yüzey topografyasına etkisi, *16. International Materials Symposium (IMSP'2016)*, Denizli, Türkiye, 12-14 Ekim 2016.
- [33] Yetik O., Yavuzyeğit B., **Yıldırım Y.**, Pekkan G., Sarıdağ S., Avcu E., Mikro kumlama ile monolitik zirkonyaların hazırlanması işleminde püskürtme basıncı ve açısının 3 boyutlu yüzey topografyasına ve özelliklerine etkisi, *16. International Materials Symposium (IMSP'2016)*, Denizli, Türkiye, 12-14 Ekim 2016.
- [34] **Yıldırım Y.**, Okan Yetik O., Yavuzyeğit B., Avcu E., Effects of shot peening parameters on the surface properties of Ti6Al4V alloy, *16. International Materials Symposium (IMSP'2016)*, Denizli, Türkiye, 12-14 Ekim 2016.
- [35] Yavuzyeğit B., Yetik O., **Yıldırım Y.**, Pekkan G., Sarıdağ S., Avcu E., The effects of erodent particle size and acceleration pressure on the 3D surface topography and surface properties of conventional zirconia, *16. International Materials Symposium (IMSP'2016)*, Denizli, Türkiye, 12-14 Ekim 2016.
- [36] Önen B., **Yıldırım Y.**, Avcu E., Çınar A., The effects of nozzle design on the particle impingement velocity and erosion rate in sand blasting process, *1. International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences*, Afyon, Türkiye, 21-22 Nisan 2016.
- [37] Önen B., **Yıldırım Y.**, Avcu E., Çınar A., The effects of nozzle design on the surface roughness of target material, *1. International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences*, Afyon, Türkiye, 21-22 Nisan 2016.
- [38] Balyalı H. A., Koçoğlu H., Harbelioğlu E., **Yıldırım Y.**, Avcu E., Sınmazçelik T., The effects of erodent particle properties on the erosion behaviour of Ti6Al4V alloy, *15. International Materials Symposium (IMSP'2014)*, Denizli, Türkiye, 15-17 Ekim 2014.
- [39] **Yıldırım Y.**, Avcu E., Ölmez Ş., Demir I., Güven A. T., Sınmazçelik T., The effects of shot peening methods and shot size on the surface roughness of spring steel, *15. International Materials Symposium (IMSP'2014)*, Denizli, Türkiye, 15-17 Ekim 2014.

- [40] Fidan S., Avcu E., **Yıldırım Y.**, Şahin A. E., Sınmazçelik T., Cam fiber takviyeli polyesterlerde düşük hızlı darbe sonucu delaminasyon haritaları, 2. *Ulusal Kompozit Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 07-09 Kasım 2013.
- [41] Şahin A. E., **Yıldırım Y.**, Avcu E., Fidan S., Sınmazçelik T., Pomza tozu takviyeli polifenilen sulfid(pps) matrisli kompozitlerin katı partikül erozyonu davranışı, 2. *Ulusal Kompozit Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 07-09 Kasım 2013.
- [42] Balyalı H. A., Kocoglu H., Oztürk A., **Yıldırım Y.**, Avcu E., Fidan S., Şahin A. E., Sınmazçelik T., Cam fiber takviyeli polyester matrisli kompozitlerin erozif asınma davranışlarının Taguchi deney tasarımı ile incelenmesi, 2. *Ulusal Kompozit Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 07-09 Kasım 2013.
- [43] **Yıldırım Y.**, Şahin A. E., Avcu E., Fidan S., Sınmazçelik T., Aşındırıcı partikül özelliklerinin cam keçe takviyeli PPS kompozitlerin katı partikül erozyonu davranışına etkileri, 4. *Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı*, Türkiye, 12-14 Eylül 2012.
- [44] Şahin A. E., **Yıldırım Y.**, Fidan S., Avcu E., Sınmazçelik T., Aşındırıcı partikül karışımlarının Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu davranışına etkileri, 4. *Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı*, Türkiye, 12-14 Eylül 2012.

ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Kırklareli’nde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli’de tamamladı. 2007 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü’nden 2011 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. 2011-2013 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2012 yılından beri Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesinde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

