

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TOZ METALÜRJİK TİCARİ SAFLIKTA TİTANYUM  
ALAŞIMININ BİLYALI DÖVME SONRASI AŞINMA  
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**AYŞE ÖZTÜRK**

**KOCAELİ 2024**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**TOZ METALÜRJİK TİCARİ SAFLIKTA TİTANYUM**  
**ALAŞIMININ BİLYALI DÖVME SONRASI AŞINMA**  
**DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**AYŞE ÖZTÜRK**

**Doç. Dr. Egemen AVCU**

**Danışman, Kocaeli Üniversitesi**

.....

**Prof. Dr. Rıdvan YAMANOĞLU**

**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi**

.....

**Dr. Öğr. Üyesi Mustafa ARMAĞAN**

**Jüri Üyesi, İstanbul Medeniyet Üniversitesi**

.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 09.02.2024**

## ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler ..... tarafından ..... no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

(İmza)

AYŞE ÖZTÜRK

## YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim,

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir,
- Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

(İmza)

AYŞE ÖZTÜRK

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Son yıllarda, gelişen malzeme ve imalat işlemleri teknolojileri ile mühendislik malzemelerin fonksiyonel özellikleri artmakta buna bağlı olarak kullanım alanları ve uygulamaları artış göstermektedir. Mühendislik malzemelerine, kullanıldıkları alanlara göre fonksiyonel özellikler kazandırılabilmesi için yenilikçi imalat işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin, biyomedikal uygulamalar için malzemelerin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi (biyolojik özellikler, pürüzlülük değerleri, mikroyapısal ve mekanik özellikler) önem arz etmektedir. Bilyalı dövme yöntemi malzemelerin yüzey ve yüzey altı özelliklerinin geliştirilmesinde etkin olarak kullanılabilen bir mekanik yüzey işleme yöntemidir. Bilyalı dövme işlemi sayesinde, malzemelerin aşınma davranışı, sertlik, sürtünme katsayısı gibi yüzey ve yüzey ile bağlantılı özelliklerinde önemli derecede iyileşmeler sağlanabilmektedir.

Bu tez çalışmasında kullanılan Cp-Ti titanyum alaşımı, yüksek yorulma ve korozyon direnci, yüksek mukavemet, yüksek biyouyumluluk sebebiyle en çok tercih edilen mühendislik alaşımlarından birisidir. Bu alaşımların mevcut mekanik özelliklerini geliştirmek ve aynı zamanda, yüksek sürtünme katsayısı, düşük yüzey sertliği ve zayıf aşınma direnci gibi dezavantajlarını da ortadan kaldırmak için yüzey özelliklerinin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında, birçok alanda kullanılan Cp-Ti alaşımının mekanik ve özellikle sürtünme direncini iyileştirmek için, malzeme yüzeyine, bilyalı dövme yöntemi ile uygulayarak yenilikçi bir metodoloji oluşturulması amaçlanmıştır.

Yüksek lisans ve Lisans eğitimlerimin ilk aşamasından itibaren hem psikolojik hem de teknik açıdan her zaman tüm desteğini hissettiren, verdiği güven ve motivasyon sayesinde araştırma ve başarıya hevesi uyandıran, bizlerden hiçbir bilgi birikimini esirgemeyen, gelişmemiz ve faydalı bilgiler üretmemiz için her türlü emeği ve çabayı sarf eden değerli danışman hocam Doç. Dr. Egemen AVCU'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tezimin tüm aşamasında, tüm istek ve yüksek enerjisiyle yanımda olan, tüm deneysel çalışmalarım bana yol gösteren, aile hayatından feragat ederek tüm emeklerini bizim üzerimizde hissettiren, her zaman neşesi ve motive edici kişiliği ile bizde çalışma arzusu uyandıran sevgili hocam Dr. Öğr. Üyesi Yasemin YILDIRAN AVCU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tezimin deney aşamasında Kocaeli Üniversitesi Malzeme Laboratuvarında bize her zaman destek olan, tüm cihazların kullanımında bize yol gösteren Prof. Dr. Rıdvan YAMANOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tezimin 3 boyutlu yüzey topografyalarının ölçümlerinde Sakarya Üniversitesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği laboratuvarının imkanlarını kullanımımıza sunan değerli hocalarım Prof. Dr. Akın AKINCI ve Dr. Öğr. Üyesi. Eray ABAKAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Tüm akademik hayatım boyunca hiçbir desteğini benden esirgemeyen, akademik kariyer hevesimin ve isteğimin oluşmasını sağlayan, sevgili annem Nurhayat ÖZKILINÇ ve sevgili babam Mehmet ÖZKILINÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Tezimi tamamlamamda psikolojik olarak her zaman tüm desteğini üzerimde hissettiğim sevgili hayat arkadaşım, değerli eşim Osman ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Ocak - 2024

Ayşe ÖZTÜRK



## İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI .....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	x
ÖZET .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI .....	3
2.1. Titanyum ve Titanyum Alaşımları.....	3
2.2. Bilyalı Dövme.....	4
2.3. Bilyalı Dövme Sonrası Özelliklerinin İncelenmesi .....	8
2.3.1. Bilyalı Dövme Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü İncelemeleri.....	8
2.3.2. Bilyalı Dövme Sonrası Sertlik İncelemeleri .....	13
2.3.3. Bilyalı Dövme Sonrası Kalıntı Basma Gerilmesi İncelemeleri .....	15
2.3.4. Bilyalı Dövme Sonrası Yüzey Morfolojisi İncelemeleri .....	16
2.3.5. Bilyalı Dövme Sonrası Yüzey Altı Mikroyapı İncelemeleri .....	16
2.3.6. Bilyalı Dövme Sonrası Korozyon Davranışının İncelenmesi.....	18
2.3.7. Bilyalı Dövme Sonrası Yorulma Davranışının İncelenmesi.....	18
2.3.8. Bilyalı Dövme Sonrası Aşınma Davranışının İncelenmesi .....	19
2.4. Titanyum Alaşımlarının Bilyalı Dövme Sonrası Aşınma Davranışlarının İncelenmesi .....	22
3. MALZEME VE YÖNTEM .....	25
3.1. Malzeme.....	25
3.1.1. Saf Titanyum Alaşımı .....	25
3.1.2. Bilya.....	26
3.2. Yöntem.....	27
3.2.1. Numunelerin Metalografik Hazırlığı .....	27
3.2.2. Bilyalı Dövme İşlemleri.....	28
3.2.3. Pürüzlülük Ölçümleri.....	28
3.2.4. Numunelerin Kesit İncelemeleri Hazırlığı.....	28
3.2.5. Sertlik Ölçümleri.....	29
3.2.6. Aşınma Testleri.....	29
3.2.7. Yüzey Morfolojisi İncelemeleri.....	29
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	30
4.1. Saf Titanyum Alaşımı .....	30
4.2. Yüzey Pürüzlülüğü ve Topografisi .....	30
4.2.1. Desenli Yüzeylerin Tekstür Yönleri ve Tekstür İzotropisi.....	32
4.2.2. Abbot Eğrisi İncelenmeleri .....	32
4.3. Yüzey Morfolojisi İncelemeleri.....	34
4.4. Kesit Sertlik İncelemeleri .....	34
4.5. Aşınma Testleri Sonuçları.....	35
4.6. Aşınma Testleri Sonrası Yüzey Topografisi İncelemeleri.....	36
4.7. Aşınma Testleri Sonrası Yüzey Morfolojisi İncelemeleri .....	38

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	43
KAYNAKLAR.....	44
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER.....	48
ÖZGEÇMİŞ.....	49



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Titanyumun kristal yapısı a) $\alpha$ fazı birim hücre, b) $\beta$ fazı birim hücre .....	4
Şekil 2.2.	Bilyalı Dövme Sistemi .....	5
Şekil 2.3.	Bilyalı dövme sonrası yüzey ve yüzey altı özelliklerin değişimi .....	5
Şekil 2.4.	Farklı sürelerde bilyalı dövülen Almen şeritleri a) 45 s, b) 80 s, c) 130 .....	6
Şekil 2.5.	Yüzey örtme oranının belirlenmesi a) Yüzey morfolojisi, b) Yüzdece dövülen alan grafiği .....	7
Şekil 2.6.	Doyum Noktası Grafiği .....	7
Şekil 2.7.	Farklı boyutta seramik bilyalarla dövülen AA7075 alaşımının 3 boyutlu topografik incelemeleri ve pürüzlülük değerleri; a) 0,30 mm, b) 0,18 mm ve c) 0,045 mm çapında .....	11
Şekil 2.8.	Farklı çaptaki cam kürelerin 2 ve 7 bar basınçta oluşturduğu yüzey pürüzlülüğü .....	11
Şekil 2.9.	Farklı yüzey örtme oranının yüzey pürüzlülüğüne etkisi .....	12
Şekil 2.10.	Farklı dövme süreleri a) 5 s, b) 400 s dövülen saf titanyumun 2 ve 3 boyutlu yüzey topografisi incelemeleri, c) bilyalı dövme süresine bağlı değişen ortalama çizgisel pürüzlülük değerleri .....	13
Şekil 2.11.	Yüzeyden derinliğe bağlı sertlikte değişim a) Bilya püskürtme basıncı 0,1 MPa, b) Bilya püskürtme basıncı 0,5 MPa .....	14
Şekil 2.12.	Bilyalı dövme sonrası derinliğe bağlı sertlikte değişim .....	14
Şekil 2.13.	Kalıntı basma gerilmesine Almen şiddetinin etkisi .....	15
Şekil 2.14.	Bilyalı dövme sonrası yüzey morfolojisi ve topografisi incelemeleri a) 10 Psi, b) 40 Psi, c) 80 Psi püskürtme basıncı .....	16
Şekil 2.15.	Bilyalı dövme parametrelerine bağlı yüzey altı mikroyapısal değişim; a) 2 bar, 0,1-0,3 mm, b) 4 bar, 0,1-0,3 mm, c) 2 bar, 0,4-0,9 mm, d) 4 bar, 0,4-0,9 mm .....	17
Şekil 2.16.	Bilyalı dövme sonrası kesit-mikroyapı incelemeleri a) 0,46 mm A şiddeti, b) 0,46 mm A + 0,23 A şiddeti, c) 0,46 mm A + 0,23 A + 0,17 A şiddetinde .....	17
Şekil 2.17.	Yorulma ömrüne Almen şiddetinin etkisi .....	19
Şekil 2.18.	Farklı Almen şiddetiyle dövülen AISI 4140 çeliğinin aşınma davranışı .....	21
Şekil 2.19.	Aşınma izi topografileri ve morfolojisi a) İşlem yapılmamış yüzey, b) Bilyalı dövme sonrası (S230 bilya, 40 psi), c) Bilyalı dövme sonrası (S230 bilya, 40 psi+S110 bilya 20 psi) .....	21
Şekil 2.20.	Bilyalı dövme sonrası aşınma oranları ve yüzey topografileri .....	22
Şekil 3.1.	a) ve b) Saf titanyum alaşımı tozlarının SEM görüntüsü .....	25
Şekil 3.2.	a) Sinterleme eğrileri, b) Grafit kalıbın şematik gösterimi .....	25
Şekil 3.3.	Paslanmaz çelik bilyanın SEM görüntüsü .....	26
Şekil 3.4.	Yöntem akış şeması .....	27
Şekil 3.5.	Bilyalı dövme işleminin şematik gösterimi .....	28
Şekil 4.1.	Cp-Ti alaşımının kesit görüntüleri a) SEM ve b) optik mikroskop .....	30
Şekil 4.2.	Referans yüzeyin 3 boyutlu yüzey topografisi .....	31
Şekil 4.3.	Bilyalı dövme sonrası yüzeyin 3 boyutlu yüzey topografisi .....	31
Şekil 4.4.	Bilyalı dövme öncesi ve sonrası alansal pürüzlülük değerleri .....	32

Şekil 4.5.	2 boyutlu yüzey görüntüsü; a) referans yüzey, b) desenli yüzey, tekstür yönleri ve tekstür izotropisi; c) referans yüzey, d) desenli yüzey.....	33
Şekil 4.6.	Yüzey pürüzlülüğü dağılımı eğrileri; a) Referans yüzey, b) Desenli yüzey.....	33
Şekil 4.7.	Bilyalı dövme sonrası SEM görüntüleri a) ve c) düşük büyütme, b) ve d) yüksek büyütme.....	34
Şekil 4.8.	Kesit-Sertlik incelemeleri.....	35
Şekil 4.9.	Aşınma testleri sonrası sürtünme katsayısı değerleri a) 300 m aşınma mesafesi, b) 600 m aşınma mesafesi .....	37
Şekil 4.10.	Aşınma testleri sonrası spesifik aşınma oranları .....	37
Şekil 4.11.	İşlem görmemiş Cp-Ti alaşımının aşınma testleri sonrası yüzey topografisi a) 300 m, b) 600 m .....	38
Şekil 4.12.	Bilyalı dövülen Cp-Ti alaşımının aşınma testleri sonrası yüzey topografisi a) 300 m, b) 600 m .....	39
Şekil 4.13.	Aşınma izi – derinlik ilişkisi .....	40
Şekil 4.14.	Referans Cp-Ti alaşımının 600 mm aşınma mesafesi sonrası yüzey morfolojisi a) Düşük büyütmede, b) ve c) Yüksek büyütmede görüntüleri .....	41
Şekil 4.15.	Bilyalı dövme sonrası Cp-Ti alaşımının 600 mm aşınma mesafesi sonrası yüzey morfolojisi a) Düşük büyütmede, b) ve c) Yüksek büyütmede görüntüleri.....	41
Şekil 4.16.	Aşınma testleri sonrası oluşan partiküller a) Referans yüzey, b) Bilyalı dövülen yüzey .....	42

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1.	Mühendislik malzemelerinin bilyalı dövme sonrası yüzey pürüzlülüğü incelemeleri.....	9
Tablo 2.2.	Mühendislik malzemelerinin bilyalı dövme sonrası aşınma davranışının incelemeleri .....	19
Tablo 2.3.	İlgili literatür çalışmaları .....	23
Tablo 3.1.	Paslanmaz çelik bilyaların kimyasal kompozisyonları .....	26



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
Bar	: $10^5$ Pa
C	: Karbon
Cr	: Krom
dk	: Dakika
Fe	: Demir
k	: Spesifik aşınma oranı
kgf	: Kilogram-kuvvet
kN	: Kilonewton
L	: Kayma Mesafesi
m	: Metre
mm	: Milimetre
mm <sup>3</sup>	: Milimetreküp
Mn	: Mangan
MPa	: Megapaskal
Ni	: Nikel
N	: Newton
s	: Saniye
S	: Çukur Yoğunluğu, (%)
Si	: Silisyum
Ra	: Ortalama Çizgisel Pürüzlülük, ( $\mu\text{m}$ )
Ry, Rz	: Taranan çizgide en yüksek tepe ve en düşük çukur arası mesafe, ( $\mu\text{m}$ )
Sa	: Ortalama Alansal Pürüzlülük
Sp, Sv	: Taranan alanda en yüksek tepe, taranan alanda en düşük çukur
Sz, Sy	: Taranan alanda en yüksek tepe ve en düşük çukur arası mesafe, ( $\mu\text{m}$ )
Ti	: Titanyum
V	: Vanadyum
V	: Hacim
W	: Yük
$\mu\text{m}$	: Mikrometre
$\mu, f$	: Sürtünme Katsayısı
$\rho$	: Yoğunluk, ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat derece
$^{\circ}$	: Derece
$\alpha$	: Alfa
$\beta$	: Beta
%	: Yüzde
$\emptyset$	: Çap

### Kısaltmalar

EDS	: Enerji Dağılımı Spektrometresi
HV	: Hardness Vickers (Vickers Sertlik)
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Teşkilatı)

Rpm : Revolutions per Minute (Dakikadaki Devir Sayısı)  
SEM : Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)  
SPH : Sıkı Paket Hegzagonal  
3D : Üç Boyutlu



# TOZ METALÜRJİK TİCARİ SAFLIKTA TİTANYUM ALAŞIMININ BİLYALI DÖVME SONRASI AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

## ÖZET

Tez çalışmasında toz metalürjik saf titanyum alaşımı numuneler, 33 – 45 µm boyutlarında düzensiz morfolojide saf titanyum tozların, grafit kalıplar arasında 14 kN basınç altında 890 °C’ de sinterlenmesiyle üretilmiştir. Bilyalı dövme işlemleri 5 bar püskürtme basıncında, 600-1000 µm boyutunda paslanmaz çelik bilyalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bilyalı dövülen numunelerin 3 boyutlu yüzey topografyası, alansal pürüzlülük değerleri, tekstür yönleri, tekstür izotropisi ve yüzey morfolojileri temassız optik profilometre ve taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiş ve işlem görmemiş referans yüzeyler ile karşılaştırılmıştır. Bilyalı dövülen yüzeylerin ortalama alansal pürüzlülük değerleri 0,998 µm, maksimum tepe yüksekliği 5,177 µm ve çukur derinliği 5,874 µm olarak ölçülmüştür. Tekstür izotropi oranı %71,53 ve en fazla yönlenme görülen açı 36° olarak belirlenmiştir. Bilyalı dövme sonrası yüzeylerde morfolojik değişimlerin, aşırı plastik deformasyon sonucunda mikro-sürme ve mikro-kesme mekanizmaları ile gerçekleştiği belirlenmiştir. Aşınma testleri 300 ve 600 metre mesafede, 15 N yük altında ve karşıt yüzey olarak alümina bilyalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bilyalı dövülen yüzeyler, işlem görmemiş yüzeylere kıyasla daha düşük spesifik aşınma oranı göstermiştir. Her iki yüzeyde de mikro-sürme ve mikro-kesme mekanizmaları ile yüksek oranda adhezif aşınma davranışının hâkim olduğu görülmüştür. Aşınma esnasında numune yüzeylerinde oksidasyon ve üç cisimli aşınma mekanizmaları da tespit edilmiştir. Topografik incelemelerde aşınma izinin kenarlarında görülen tepe oluşumu, aşınma esnasında adhezyon ile meydana gelen plastik deformasyonu ortaya çıkarmıştır. Bilyalı dövülen ve referans numunelerde benzer aşınma davranışı gözlemlendiği, ancak bilyalı dövülen numunelerde az miktarda da olsa daha iyi bir aşınma direnci saptanmıştır. Bu sonuçlar, bilyalı dövmenin tribolojik şartlar altında çalışan mühendislik alaşımlarında güvenli bir şekilde uygulanabilirliğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Aşınma Mekanizmaları, Bilyalı Dövme, Kuru Sürtünme Aşınması, Titanyum Alaşımları, Yüzey Morfolojisi.

# INVESTIGATION OF THE WEAR BEHAVIOR OF POWDER METALLURGICAL COMMERCIAL PURE TITANIUM ALLOY AFTER SHOT PEENING

## ABSTRACT

The thesis investigation included the production of powder metallurgical pure titanium alloy samples by the sintering of pure titanium powders with irregular morphology and diameters ranging from 33 to 45  $\mu\text{m}$  between graphite molds at a temperature of 890  $^{\circ}\text{C}$  and 14 kN of pressure. Stainless steel shots ranging in size from 600 to 1000  $\mu\text{m}$  were shot-peened at 5 bar of pressure. Using a non-contact optical profilometer and a scanning electron microscope, the 3D surface topography, areal roughness values, texture orientations, texture isotropy, and surface morphologies of shot peened samples were analyzed and compared with untreated reference surfaces. The shot peened surfaces had an average areal roughness value of 0.998  $\mu\text{m}$ , a maximum peak height of 5.177  $\mu\text{m}$ , and a pit depth of 5.874  $\mu\text{m}$ . The angle with the maximum orientation was found to be 36 $^{\circ}$ , and the texture isotropy rate was found to be 71.53%. It has been shown that excessive plastic deformation leads to micro-sliding and micro-cutting processes, which cause morphological alterations on the surfaces after shot peening. Alumina balls were used as counter surfaces and wear tests were conducted at 300 and 600-meters with a 15 N load. In comparison to untreated surfaces, shot peened surfaces exhibited a decreased specific wear rate. It was observed that both surfaces were dominated by micro-sliding and micro-cutting mechanisms and highly adhesive wear behavior. Oxidation and three-body wear mechanisms were also detected on the sample surfaces during wear. The plastic deformation resulting from adhesion during wear was shown by the peak development seen at the boundaries of the wear scar in topographic evaluations. The shot peened samples showed slightly better wear resistance than the reference samples, but both showed similar wear behavior. These findings show that shot peening may be safely used to engineering alloys that are subjected to tribological conditions.

**Keywords:** Wear Mechanisms, Shot Peening, Dry Sliding Wear, Titanium Alloys, Surface Morphology.

## 1. GİRİŞ

Tez çalışmasında; havacılık, uzay ve biyomedikal gibi birçok alanda üstün özellikleri nedeniyle sıklıkla tercih edilen titanyum alaşımı (Cp-Ti) kullanılmıştır. Titanyum alaşımlarının yüksek spesifik mukavemeti ve yüksek korozyon direnci gibi üstün özelliklerine kıyasla, düşük aşınma dayanımı ve kesme mukavemeti vb. gibi özellikleri nedeniyle kullanımı sınırlanmaktadır. Literatür çalışmaları incelendiğinde, birçok araştırmacının çeşitli mekanik yüzey işlemleri ile titanyum alaşımlarının düşük olan aşınma dayanımının iyileştirmeye yönelik çalışmalar gerçekleştirdiği belirlenmiştir. Bu çalışmada, mekanik yüzey işlemlerinden biri olan bilyalı dövme işlemi uygulanan Cp-Ti alaşımının aşınma davranışı incelenmiştir.

Bilyalı dövme, küresel formdaki bilyaların hedef malzeme yüzeyine yüksek hızlarla çarptırılması ile oluşan mekanik yüzey işleme yöntemidir. Literatürde bilyalı dövme ile hedef malzemenin mekanik özelliklerinde iyileştirmeler gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu iyileştirmeler; yüzey ve yüzey altı bölgede tane incelmesinin gerçekleşmesi, sertlik artışının gerçekleşmesi, kalıntı gerilmenin oluşumu ve yüzey pürüzlülüğünün artışı olarak örneklendirilebilir. Özellikle dinamik kuvvetlerin etkisi altında makine elemanlarının yorulma mukavemetinin ve kullanım sürelerinin arttırılması amacıyla bilyalı dövme işlemleri sıklıkla tercih edilmektedir ve literatür bu konu ile ilgili pek çok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bilyalı dövme sonrası malzemelerin aşınma dayanımı incelendiğinde literatürde konunun tam olarak açıklığa kavuşturulmadığı ve bu neden mühendislik malzemelerinin farklı şartlar altında tribolojik davranışına yönelik daha fazla çalışma gerçekleştirilmesi gerekliliği ifade edilmiştir. Bu noktada, özellikle bilyalı dövmenin titanyum alaşımlarında kullanılmasına yönelik çalışmaların çok sınırlı olduğu söylenebilir.

Bu çalışma, malzeme yüzeyinde bilyalı dövme işleminin gerçekleştirilmesi ve bilyalı dövmenin aşınma davranışlarına etkilerini inceleyerek, titanyum alaşımlarının aşınmaya maruz kalan bölgelerde kullanımında yaşanan problemler için önemli bir kaynak olacaktır. Aşınma, her alanda karşımıza çıkan, malzemelerin ömrünü azaltan böylece maddi olarak zarara uğratan bu durumdur. Aşınma konusunda geliştirmeler yapılması ihtiyacı mevcuttur. Bu nedenle tez çalışmasında elde edilen sonuçların hem akademik anlamda hem de endüstriyel anlamda büyük sorun teşkil eden aşınma konusunun

geliştirilmesi amacıyla yapılacak araştırma ve geliştirme faaliyetlerine destek olması amaçlanmaktadır.

Tez çalışması kapsamında; Cp-Ti tozları ticari olarak temin edilmiştir. Toz metalurjisi yöntemiyle üretimleri gerçekleştirilmiştir. Sonrasında çeşitli parametreler altında bilyalı dövme yöntemi gerçekleştirilmiş ve sonrasında numunelerin morfolojik ve topografik özellikleri optik profilometre ve taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Ardından aşınma testleri (ball on disk) gerçekleştirilmiş ve numunelere ait sürtünme katsayısı değerleri, kütle kaybı, yüzey topografisi ve morfolojisi incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma mekanizmaları detaylı olarak incelenmiştir.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

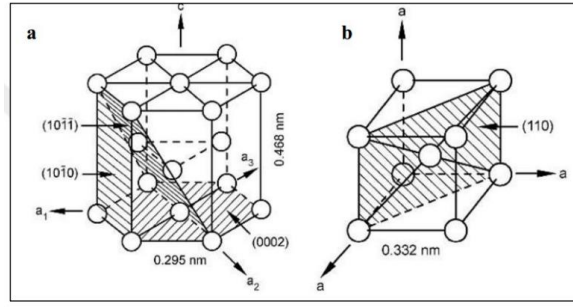
Tez çalışması kapsamında toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Cp-Ti alaşımına bilyalı dövme işlemi uygulanmış ve sonrasında malzemenin aşınma davranışları incelenmiştir. Bu ilk bölümde titanyum ve titanyum alaşımları, sonraki bölümde bilyalı dövme ve sonrasında gelişen yüzey ve yüzey altı özellikleri ve son bölümde titanyum ve alaşımlarının bilyalı dövme sonrası aşınma davranışlarını içeren literatür çalışmalarının derlenmiş hali sunulmuştur.

### 2.1. Titanyum ve Titanyum Alaşımları

Titanyum; alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra yeryüzünde en bol bulunan ve mühendislik uygulamalarında en çok tercih edilen malzemelerdendir. Ancak saf titanyumun elde edilmesi yüksek maliyetlidir. Titanyum alaşımları, yüksek spesifik mukavemeti, biyouyumlulukları ve üstün korozyon özellikleri nedeni ile otomotiv, havacılık ve biyomedikal uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Demirden daha düşük yoğunluğa sahip olması, elastisite modülünün alüminyumdan yüksek olması aynı zamanda ergime sıcaklığının hem demir hem de alüminyumdan yüksek olması spesifik alanlarda kullanımı açısından tercih sebebi olmuştur (Çelik, 2015; Yıldırım Avcu, 2019).

Titanyum allotropik yapıda, farklı sıcaklıklarda iki farklı kristal yapısı olan bir geçiş elementidir.  $\alpha$  fazı, oda sıcaklığında sıkı paket hekzagonal (SPH) yapıdır. 883°C sıcaklıkta  $\beta$  fazı; hacim merkezli kübik yapıya dönüşmektedir (Şekil 2.1). Dönüşüme başladığı sıcaklık “ $\beta$  dönüşüm sıcaklığı” olarak tanımlanır. Titanyum içerisinde bulunan metalik kalıntılar veya alaşım elementlerinin oranlarına göre bu dönüşüm sıcaklığı farklılık göstermektedir. Bu sıcaklık sınır olarak belirlenir ve altındaki sıcaklara “ $\alpha$  dönüşüm sıcaklığı”, üstündeki sıcaklıklara da “ $\beta$  dönüşüm sıcaklığı” denmektedir (İlçe Bahadır, 2022; Yıldırım Avcu, 2019).

Ti6Al4V alaşımı, titanyum alaşımları içerisinde en çok kullanılan alaşımdır. Ti6Al4V alaşımı  $\alpha + \beta$  formunda olup içeriğinde, %6 alüminyum ve %4 vanadyum bulunmaktadır. Endüstride kullanım oranı %45’dir. Yüksek korozyon direnci ve yüksek mukavemetlerinden dolayı başta biyomedikal olmak üzere, havacılık ve uzay endüstrisi gibi birçok alanda kullanımlarına rastlanmaktadır (Yıldırım Avcu, 2019).



Şekil 2.1. Titanyumun kristal yapısı a)  $\alpha$  fazı, b)  $\beta$  fazı (Yıldıran Avcu, 2019)

Biyomedikal alanda sıklıkla tercih edilen bir alaşım olan Ti6Al4V, kolay şekil alabilen, yüksek mukavemeti, biyouyumlu ve yüksek korozyon direnci gibi özelliklere sahip olması bu alanda kullanım sebeplerindedir. Ortopedik implantlarda üstün mekanik özellikleriyle tercih edilen bu alaşım, paslanmaz çelik ile karşılaştırıldığında korozyon dayanımı olarak önemli derecede yüksektir. Aynı zamanda bazı düşük yüzey özellikleri (örneğin; düşük aşınma direnci, yüksek sürtünme katsayısı, düşük yüzey sertliği vb.) aşınmanın önemli olduğu alanlarda kullanımını kısıtlamaktadır (Ganesh ve diğ., 2012; Ganesh ve diğ., 2014; Moradi ve diğ., 2022; Taşlıçukur Öztürk ve Sezer, 2021; Wen ve diğ., 2011; Yıldıran Avcu ve diğ., 2020). Bu nedenle çeşitli mekanik ve kimyasal yüzey işleme yöntemleri kullanılarak titanyum alaşımlarının aşınma dayanımının artırılması hedeflenmiştir.

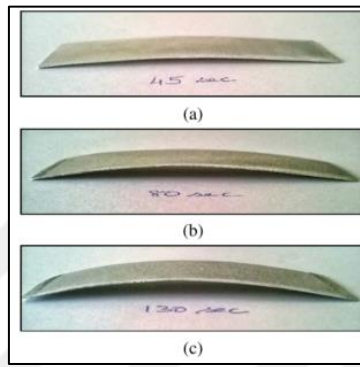
## 2.2. Bilyalı Dövme

Titanyum ve alaşımlarının diğer üstün özelliklerine kıyasla düşük aşınma dayanımına sahip olmaları nedeniyle biyomedikal, uzay ve havacılık endüstrilerinde kullanım alanları sınırlanmaktadır (Wen ve diğ., 2011; Ganesh ve diğ., 2012). Bu nedenle tez çalışmasında mühendislik malzemelerine sıklıkla uygulanan bir mekanik yüzey işleme yöntemi olan bilyalı dövme işlemi, saf titanyum alaşımına uygulanarak yüzey ve yüzey altı özelliklerinin geliştirilmesi sağlanması ve böylelikle aşınma dayanımının artırılması hedeflenmiştir.

Bilyalı dövme, mühendislik malzemelerinin yüzey ve yüzey altı özelliklerini geliştiren mekanik bir yüzey işleme yöntemidir. Hedef malzeme yüzeyine yüksek hızlarda gönderilen bilyaların tekrarlı bir şekilde malzeme yüzeyine çarpması ile gerçekleşmektedir (Yıldıran Avcu ve diğ., 2020; 2021). Şekil 2.2' de basınçlı hava ile



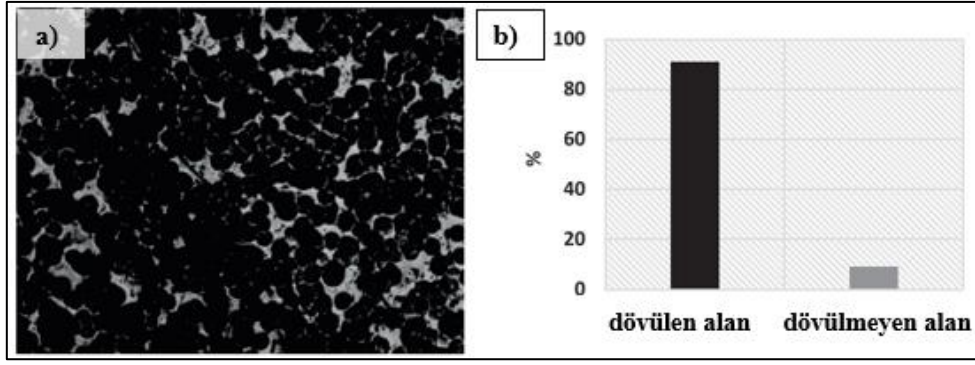
eğrilik çapı bize dövmenin şiddetini vermektedir. Almen bandı yay çeliğinden üretilmiş olup, dövmenin şiddetine göre uygun kalınlıkta olan şeritler (N, A ve C türü) seçilerek dövme şiddetinin belirlenmesi, sistemin doğru bir şekilde çalışması ve tekrarlanabilirliğinin sağlanması amacıyla kullanılmaktadır. Almen şeritleri dövme öncesi tutucusuna dört cıvata tarafından sabitlenir ve sabitlendiği bölgenin temiz olmasına önem verilir. Dövme işleminin gerçekleştirilmesi ile Almen şeritlerinde dövme şiddetine bağlı olarak sehim oluşur. Sehimin yüksekliği bize dövme şiddeti konusunda bilgi verir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Farklı sürelerde bilyalı dövülen Almen şeritleri a) 45 s, b) 80 s, c) 130 s (Rajesh ve Ashoka Varthanan, 2020)

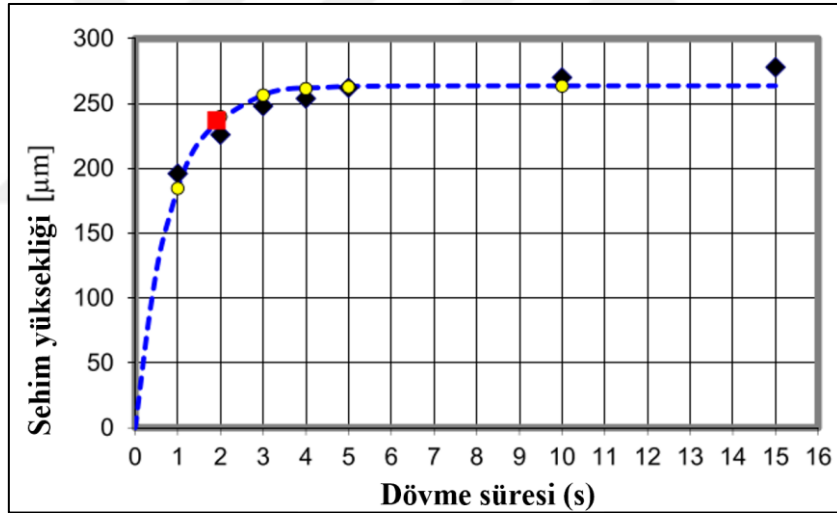
Almen şeritleri ile dövme esnasından testler yapılarak dövme cihazlarının kararlı bir şekilde çalıştığını kontrol etmek amaçlı kullanılmaktadır. Ayrıca sürekli bilyalı dövme yapan cihazlar için, metal bilyalar kullanılanlarda dövme şiddeti düzenli aralıklarla kontrol edilmelidir.

Yüzey örtme oranı; hedef malzeme yüzeyine çarpan bilya sayısı ile ilişkilidir. Yüzey örtme oranının belirlenmesinde görsel metotlar kullanılmaktadır. Şekil 2.5'te verilen örnekte TT680 çeliğinin bilyalı dövmesi sonrası yüzeyi incelenerek, dövülen alan yüzde hesaplanmıştır (Peral ve diğ., 2023). Tam yüzey örtme oranı %100 dövülmüş yüzey demektir yani hedef malzemenin yüzeyinin tamamına bilyalar en az bir kez çarpmıştır. Tam yüzey örtme oranı, %100 yüzey örtme oranı için gerekli zaman dilimidir ve eğer %200 yüzey örtme oranı isteniyorsa bunun için iki katı dövme süresine ihtiyaç vardır. Yüzey örtme oranının belirlenmesinde optik mikroskopta kullanılarak x10 büyütmede görüntüleme en sık kullanılan yöntemdir.



Şekil 2.5. Yüzey örtme oranının belirlenmesi a) Yüzey morfolojisi, b) Yüzdece dövülen alan grafiği (Peral ve diğ., 2023)

Standartlarla (SAE J443) Almen bantları benzer püskürtme basıncı ve bilyalarla artan sürelerde dövülürler ve oluşan sehimin yükseklik değerleri ölçülür. Sehimi yüksekliği - zaman grafiği çizilir, sehimin %10'u geçmediği nokta dövmenin doyum noktasına ulaştığı süreyi verir (Şekil 2.6).



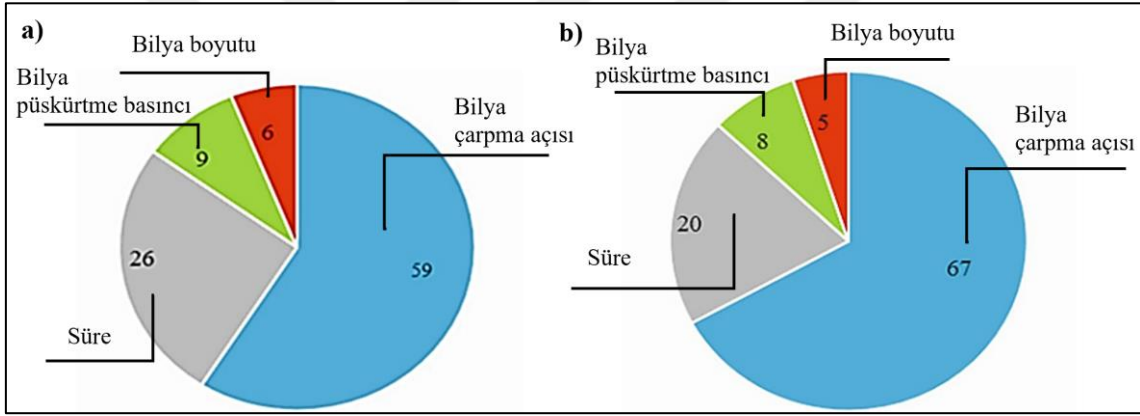
Şekil 2.6. Doyum Noktası Grafiği (Peral ve diğ., 2023)

Bilyalı dövme işlemleri hassas bir şekilde uygulanmalı ve optimum özelliklerin eldesi için tekrarlanabilir olmalıdır. Tüm süreç değişkenlerinin tanımlanması ve parametrelerin kontrol edilmesi gerekir. Dövme işlemlerini etkileyen çok sayıda temel parametre mevcuttur (Ganesh ve diğ., 2014);

- Bilya debisi,
- Bilya sertliği
- Bilya boyutu,

- Nozul çapı ve uzunluğu
- Püskürtme basıncı,
- Çarpma açısı,
- İşlem süresi,
- Malzeme ve nozulun birbirine göre doğrusal ve rotasyonel hareket hızı

Moradi A. ve ark. Ti6Al4V alaşımına Taguchi test deseni (L9) kullanarak çeşitli parametrelerde (bilya boyutu, bilya hızı, çarpma açısı ve süre) bilyalı dövme işlemi uygulamışlardır. Bilya çarpma açısının, bilyalı dövme işleminde en etkin faktör olduğunu ve bu parametrenin kalıntı basma gerilmesini (%59), aşınma dayanımını (%64) ve yüzey sertliğini (%67) etkilediğini belirlemiştir. Şekil 2.7’de kalıntı basma gerilmesine ve sertliğe etki eden parametrelerin yüzdece oranı verilmiştir (Moradi ve diğ., 2022).



Şekil 2.7. Bilyalı dövme parametrelerinin a) kalıntı basma gerilmesi üzerine ve b) sertliğe yüzdece etkisi (Moradi ve diğ., 2022)

## 2.3. Bilyalı Dövme Sonrası Özelliklerinin İncelenmesi

### 2.3.1. Bilyalı Dövme Sonrası Yüzey Pürüzlülüğü İncelemeleri

Bilya çapı ve malzemesi, püskürtme basıncı, bilya çarpma açısı, Almen şiddeti, yüzey örtme oranı, dövme süresi, vb. parametreler bilyalı dövülen mühendislik malzemelerini yüzey pürüzlülüğü değerlerine etki etmektedir. Tez çalışmasında bilyalı dövme sonrası Cp-Ti alaşımının aşınma davranışının incelenmesi hedeflenmektedir. Bu bölümde bu amaçla literatürde yüzey pürüzlülüğüne etki eden bilyalı dövme parametreleri ve pürüzlülük ölçüm yöntemleri detaylı olarak incelenmiş Tablo 2.1’de özetlenmiştir.

Tablo 2.1. Mühendislik malzemelerinin bilyalı dövme sonrası yüzey pürüzlülüğü incelemeleri

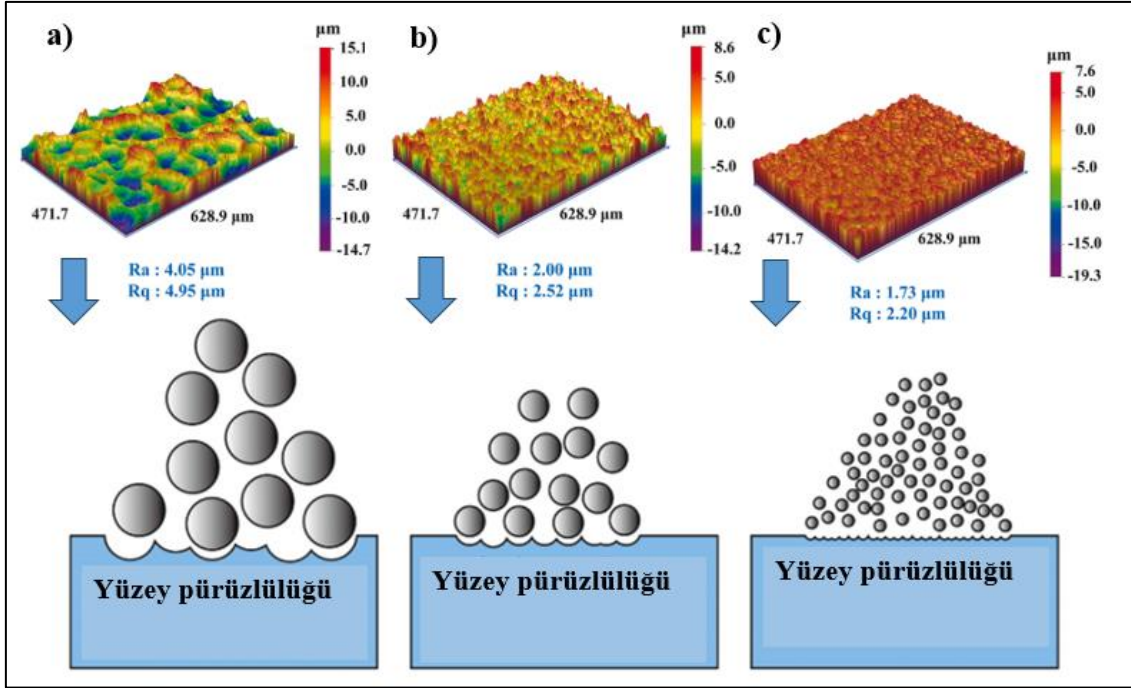
Referans	Yıl	Malzeme	Bilyalı dövme parametreleri	Pürüzlülük ölçüm yöntemi	Sonuçlar
Yıldıran Avcu (Yıldıran Avcu, 2019)	2019	Ti6Al4V	Paslanmaz çelik bilya (1 mm çapında), 7 bar püskürtme basıncı, 5 ve 15 dk dövme süresi	Optik profilometre	Bilyalı dövme ile yüzey pürüzlülüğü artış göstermiştir, büyük çaplı bilyalar daha yüksek yüzey pürüzlülüğü oluşturmuştur.
Unal ve ark. (Unal ve diğ., 2022)	2022	AISI 1050	Farklı Almen şiddetlerinde (12A, 18A, 24A ve 36A), S230 ve S330 çelik bilyalar, %200 yüzey örtme oranı	Temaslı çizgisel ölçüm	Bilyalı dövme ile yüzey pürüzlülüğü artmıştır, artan Almen şiddeti ile yüzey pürüzlülüğünde artış gerçekleşmiştir.
Bao ve ark. (Bao ve diğ., 2022)	2022	AA7075	ZrO <sub>2</sub> bilyalar (0,045, 0,18, 0,3 mm çapında), çarpma açısı 90°, %100 yüzey örtme oranı	3-boyutlu optik profilometre	Bilya çapına bağlı olarak, bilyalı dövme sonrası yüzey pürüzlülüğünün değişim gösterdiği belirlenmiştir.
Yetik ve ark. (Yetik ve diğ., 2021)	2021	AA7075	Farklı boyutta cam küre (70-110 µm ve 300-400 µm çapında), 2 ve 7 Bar püskürtme basıncı	Temaslı çizgisel ölçüm	Yüzey pürüzlülüğü bilya boyutu ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişmektedir. Yüksek püskürtme basıncında küçük çaplı cam küre daha pürüzlü yüzey oluşturmuştur.
Wu ve ark. (Wu ve diğ., 2020)	2020	18CrNi Mo7-6	Bilya (çelik kesme tel, 0,6 mm çapında, 55-60 HV), çarpma açısı 90°, 0,4 MPa bilya püskürtme basıncı, 10 s dövme süresi, yüzey örtme oranı %100 ve %200	Beyaz ışık interferometresi	Yüzey örtme oranının artması ile her zaman yüzey pürüzlülüğünde artış meydana gelmediğini belirlemiştir.
Liu ve ark. (Liu ve diğ., 2017)	2017	Ti6Al4V	Bilyalı dövme, çelik bilya (0,6 mm), bilya püskürtme basıncı 0,15-0,35 MPa, süre 15-60 dk, çarpma açısı 90°	Lazer taramalı konfokal mikroskop	Düşük püskürtme basıncında ve uzun dövme sürelerinde optimum yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir.

Tablo 2.1.(Devam) Mühendislik malzemelerinin bilyalı dövme sonrası yüzey pürüzlülüğü incelemeleri

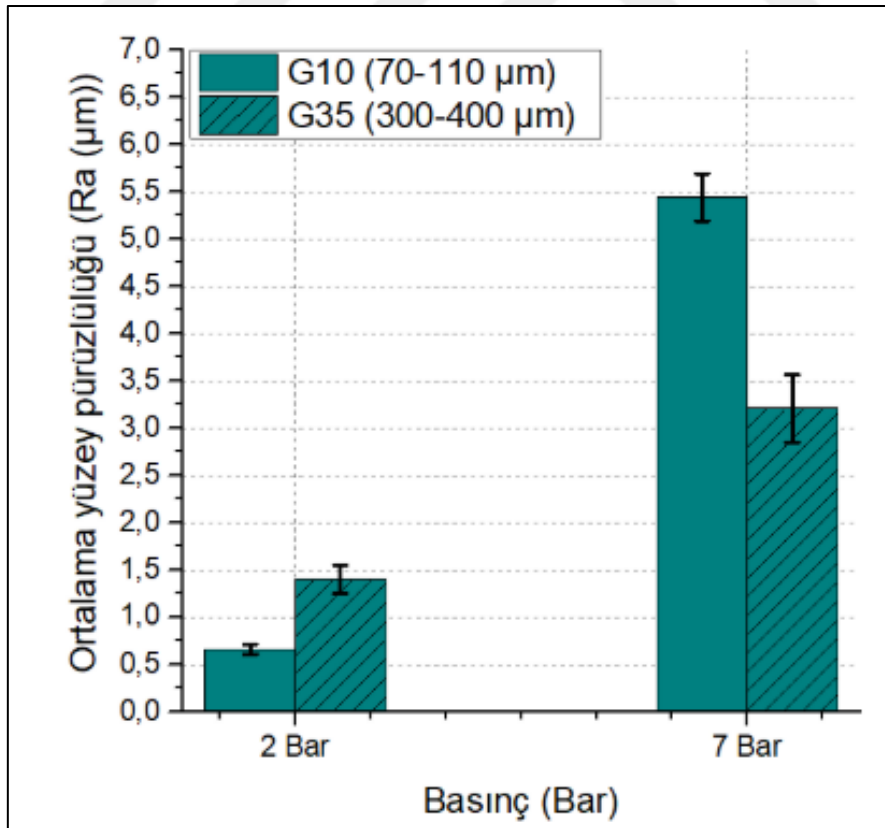
Zhu ve ark. (Zhu ve diğ., 2017)	2017	Saf Ti	Ultrasonik bilyalı dövme, dövme süresi (5, 10, 20, 50, 100, 200, 400, 800 s), bilya çapı (1,4, 2 ve 3 mm)	Optik profilometre	Bilyalı dövme süresinin artması ile yüzeye çarpan bilya sayının arttığı ve yüzeyde oluşan çukurların arttığı buna bağlı olarak pürüzlülük değerlerinde artış olduğu belirlenmiştir. Belirli bir süre sonra yüzeyin sertleşmesi ile dövme süresi artsa dahi pürüzlülükte artış gerçekleşmediği belirlenmiştir.
Unal ve ark. (Unal and Varol, 2014)	2014	AISI 1017	Bilyalı dövme, çelik bilya (AISI 1070), farklı Almen şiddetinde (A24-26, A30-32, A34-36, C8-10)	-	Almen şiddetini artması ile yüzey pürüzlülüğünde artış sağlanırken, yüzey örtme oranının artması ile pürüzlülük değerinde azalma gerçekleşmiştir.

Bao ve ark. AA7075 alüminyum alaşımına farklı boyutlarda ZrO<sub>2</sub> bilyalar (0,045, 0,18 ve 0,3 mm çapında) kullanarak bilyalı dövme işlemi gerçekleştirmiş ve yüzeylerin 3 boyutlu topografik incelemelerini ve pürüzlülük değerlerini araştırmıştır (Bao ve diğ., 2022). Şekil 2.8 incelendiğinde; büyük çaplı (0,3 mm çap) bilyaların küçük çaplı (0,045 ve 0,18 mm) bilyalara göre yüzeylerde büyük çukurlar oluşturduğu ve ortalama pürüzlülük değerinin 4,05 µm olduğu sunulmuştur. Şematik gösterimlerde ise farklı boyutlarda bilyaların malzeme yüzeyine gönderilmesi ile yüzey pürüzlülüğünde oluşan değişim açıklanmıştır (Şekil 2.7).

Yetik ve ark. farklı boyutta cam küreler (70-110 µm ve 300-400 µm çapında) kullanarak 2 bar ve 7 bar basınçta AA7075 alaşımına bilyalı dövme işlemi uygulamışlar ve temaslı yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı yardımı ile ortalama pürüzlülük değerini incelemişlerdir (Yetik ve diğ., 2021). Çalışma incelendiğinde yüzey pürüzlülüğünde artışın bilya boyutunun ve püskürtme basıncının yükselmesi ile arttığı, küçük çaplı bilyaların yüksek basınçla (7 bar) yüzeye çarpması ile yüzeyleri büyük çaplı cam kürelere göre daha fazla pürüzlendirdiği belirlenmiştir (Şekil 2.8).



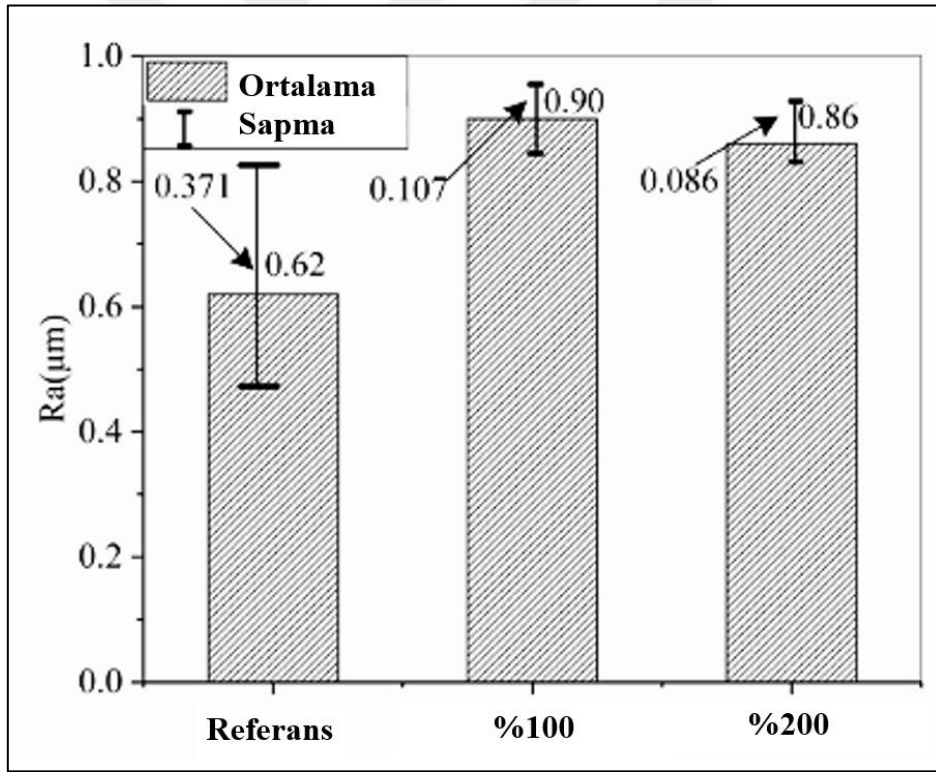
Şekil 2.7. Farklı boyutta seramik bilyalarla dövülen AA7075 alaşımının 3 boyutlu topografik incelemeleri ve pürüzlülük değerleri; a) 0,30 mm, b) 0,18 mm ve c) 0,045 mm çapında (Bao ve diğ., 2022)



Şekil 2.8. Farklı çaptaki cam kürelerin 2 ve 7 bar basınçta oluşturduğu yüzey pürüzlülüğü (Yetik ve diğ., 2021)

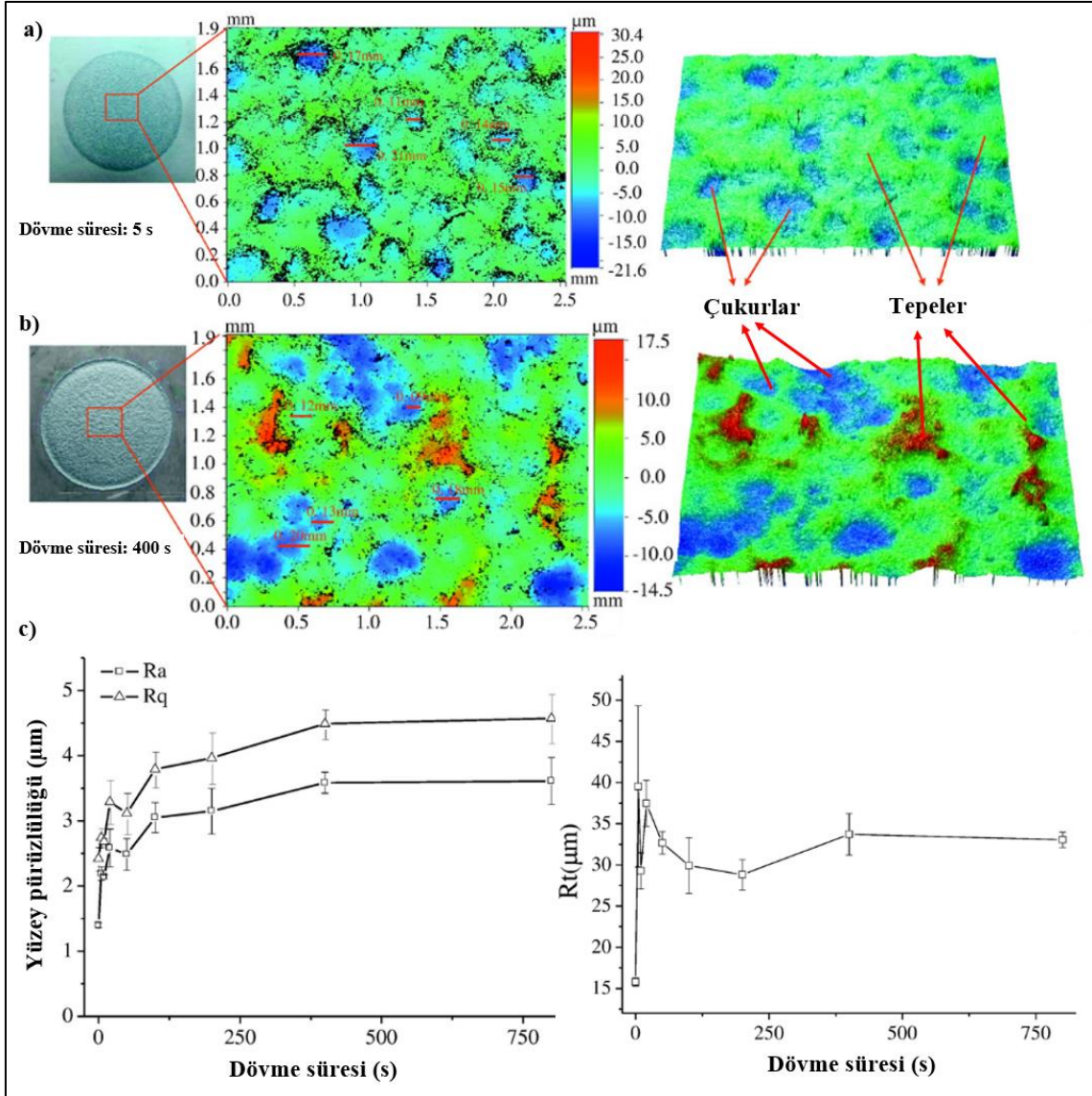
Wu ve ark. düşük karbonlu 18CrNiMo7-6 çeliğine farklı yüzey örtme oranları (%100 ve %200) ile dövüldükten sonra ortalama yüzey pürüzlülüğündeki değişimi incelemiştir. İşlem yapılmamış (referans) yüzeyde başlangıçta 0,62  $\mu\text{m}$  yüzey pürüzlülüğü mevcut iken, %100 yüzey örtme oranı ile dövme sonrası 0,9  $\mu\text{m}$ , %200 yüzey örtme oranı ile dövme sonrası 0,86  $\mu\text{m}$ 'ye yükselmiştir (Şekil 2.9). Yüzey örtme oranının artması ile her zaman yüzey pürüzlülüğünde artışın gerçekleşmediği ve optimal bir örtme oranı değerinin olabileceğini belirtmişlerdir (Wu ve diğ., 2020).

Zhu ve arkadaşları saf titanyuma farklı dövme sürelerinde (5, 10, 20, 50, 100, 200, 400 ve 800 s) ultrasonik bilyalı dövme işlemi uygulamıştır. Bilyalı dövme süresinin artması ile yüzeyde oluşan çukur sayısında artış meydana geldiğini (Şekil 2.10) ancak sürenin artması ile bilyanın sahip olduğu hızın artmadığı ve zamanla sertleşen yüzeyde yeni çukurların oluşmadığını belirlemiştir (Şekil 2.10-c) (Zhu ve diğ., 2017).



Şekil 2.9. Farklı yüzey örtme oranının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Wu ve diğ., 2020)

Dövme süresinin belirli bir değere (400 s) ulaşmasından sonra yüzey sertliğinin en üst değere ulaşması ile bilyaların yüzeyde plastik deformasyon oluşturmadığı böylelikle yüzey pürüzlülük değerinin sabit kaldığını belirlemiştir (Şekil 2.10-c) (Zhu ve diğ., 2017).

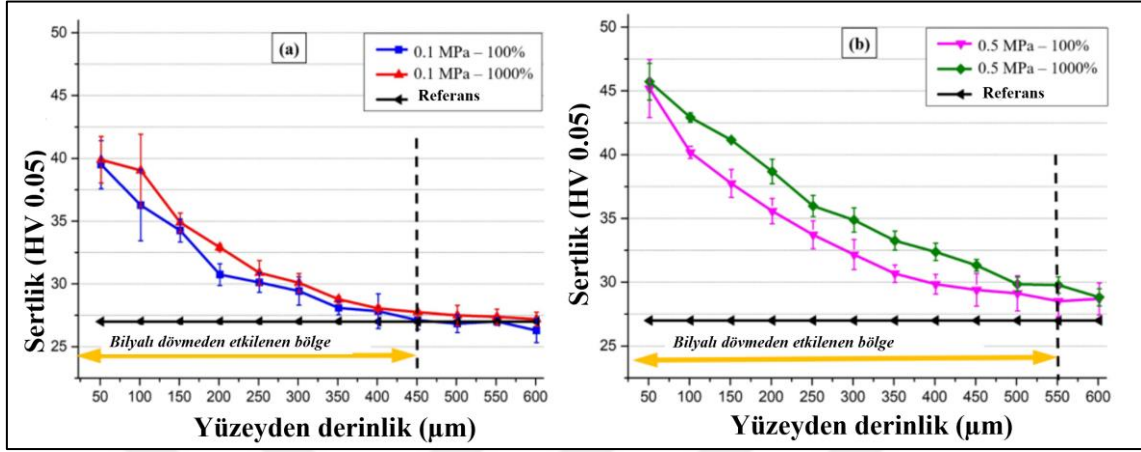


Şekil 2.10. Farklı dövme süreleri a) 5 s, b) 400 s dövülen saf titanyumun 2 ve 3 boyutlu yüzey topografisi incelemeleri, c) bilyalı dövme süresine bağlı değişen ortalama çizgisel pürüzlülük değerleri (Zhu ve diğ., 2017)

### 2.3.2. Bilyalı Dövme Sonrası Sertlik İncelemeleri

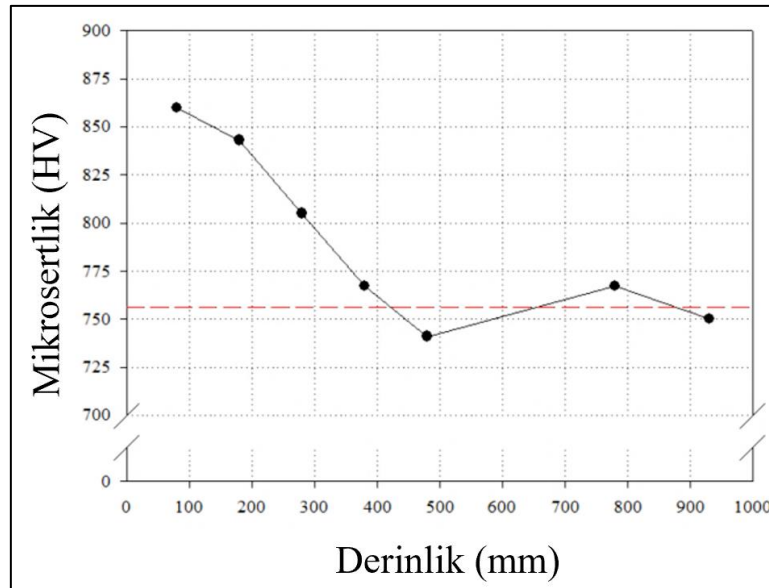
Yüksek kinetik enerjiye sahip bilyaların hedef malzeme yüzeyine çarpması ile yüzeyde ve yüzey altında plastik deformasyon gerçekleşmektedir. Bu nedenle yüzeyde ve yüzey altında pekleşmeye bağlı olarak sertlikte artış oluşmaktadır. Avcu ve ark. AA1050 alaşımına 0,1 ve 0,5 MPa bilya püskürtme basıncında %100 ve %1000 yüzey örtme oranlarında bilyalı dövme işlemi uygulamışlardır (Avcu ve diğ., 2021). Sertlik değerinin bilyalı dövme ile arttığını, bu artışın 0,1 MPa bilya püskürtme basıncında %48 ve 0,5 MPa bilya püskürtme basıncında %70 olarak gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Yüzey

örtme oranının artması ile sertlik değerinde bariz bir artışın gerçekleşmediğini ve bilyalı dövmenin yüzeyden yaklaşık 350-400  $\mu\text{m}$  derinliğe kadar etkin olduğunu belirlemiştir (Şekil 2.11)(Avcu ve diğ., 2021).



Şekil 2.11. Yüzeyden derinliğe bağlı sertlikte değişim a) Bilya püskürtme basıncı 0,1 MPa, b) Bilya püskürtme basıncı 0,5 MPa (Avcu ve diğ., 2021)

Toparlı, tungsten karbür – kobalt tozlarından üretilen sert metal malzemeye bilyalı dövme işlemi uygulamış sonrasında yüzey ve yüzey altı sertlik değerini incelemiştir. Malzemenin sertlik değeri %13 sertlik artışı göstererek 841 HV'e yükseldiğini, bu etkinin derinliğe bağlı azaldığını ve yaklaşık 350  $\mu\text{m}$  derinliğe kadar etkili olduğunu belirlemiştir (Şekil 2.12) (Toparlı, 2022).

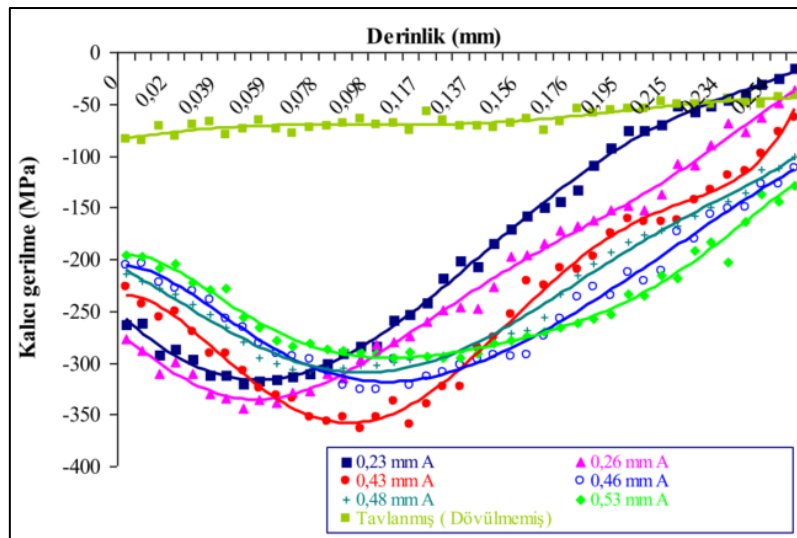


Şekil 2.12. Bilyalı dövme sonrası derinliğe bağlı sertlikte değişim (Toparlı, 2022)

### 2.3.3. Bilyalı Dövme Sonrası Kalıntı Basma Gerilmesi İncelemeleri

Yorulma kırılması, aşınma ve korozyon gibi mühendislik malzemelerinin ana hasar mekanizmaları, tipik olarak bu arızaların kaynağı olan malzemelerin yüzey özelliklerine çok duyarlıdır (Trung ve diğ., 2016). Yorulma çatlaklarının başlamasını ve büyümesini önlemek böylelikle yorulma ömrünü arttırmak amacıyla mekanik bileşenlerin yüzeyine ve yüzey altında kalıntı basma gerilmesi çeşitli mekanik yüzey işlemleri (lazer dövme, bilyalı dövme, derin haddeleme vb.) uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemlerden en fazla kullanılanı ise bilyalı dövmedir (Trung ve diğ., 2016).

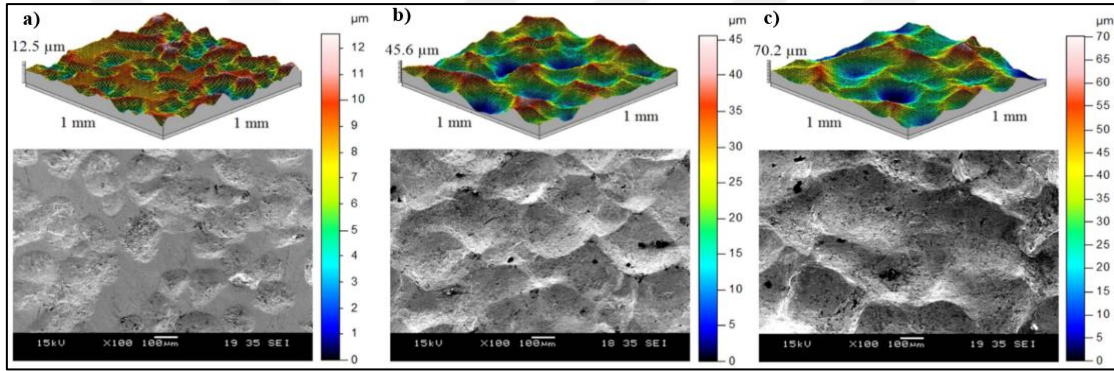
Dülek ve ark. 1020 çeliğini tavlama işlemi yapıldıktan sonra çeşitli Almen şiddetlerinde (0,26, 0,43, 0,48 ve 0,53mm A) bilyalı dövme işlemi uygulanmış sonrasında katman kaldırma tekniği ile bilyalı dövmenin yüzey ve yüzey altında oluşturduğu kalıntı basma gerilmesi değerini belirlemişlerdir (Dülek ve diğ., 2005). Tavlama işlemi yapılan numunelerde kalıntı basma gerilmesinin  $-84$  MPa, 0,26 mm A şiddetinde yapılan dövme sonrası yüzeyde en yüksek kalıntı basma gerilmesi değerine ( $-276$  MPa) ulaşıldığı belirlenmiştir. Aşırı dövme şiddetinde (0,43, 0,48 ve 0,53mm A) malzemeyi dövmenin yüzeydeki kalıntı basma gerilme değerini artırmadığını, aşırı dövmenin yüzey tabakasına zarar vererek bilyalı dövme ile yüzeyde ve yüzeyin hemen altında pekleşmeye uğrayan bölgeye zarar verdiğini ve bu tabakayı kaldırdığını belirtmişlerdir (Şekil 2.13) (Dülek ve diğ., 2005).



Şekil 2.13. Kalıntı basma gerilmesine Almen şiddetinin etkisi

### 2.3.4. Bilyalı Dövme Sonrası Yüzey Morfolojisi İncelemeleri

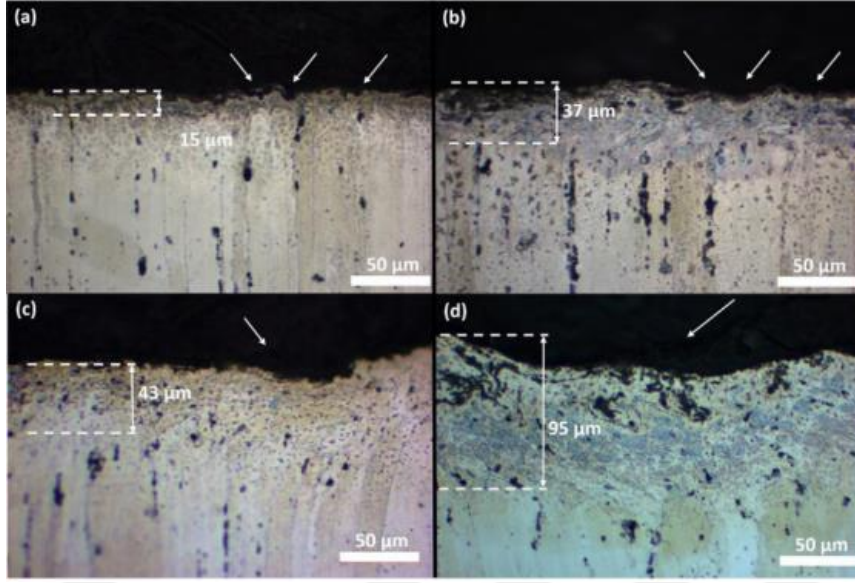
Trung ve ark. farklı bilyalı dövme parametreleri altında AISI 4340 çelik alaşımına bilyalı dövme işlemleri uygulamışlar ve sonrasında yüzeylerin morfolojilerini ve topografilerini taramalı elektron mikroskobu ve optik profilometre yardımı ile incelemişlerdir (Şekil 2.14) (Trung ve diğ., 2016). Düşük dövme basıncında (10 Psi) yüzeylerin tamamının dövülmediğini (%68 dövülmüş), basıncın artması ile yüzeylerin tamamının dövüldüğünü (40 Psi) belirlemişlerdir. Basınç altında hızlandırılan bilyaların yüzeye çarptıklarında sahip oldukları kinetik enerjinin bir kısmı ile yüzeyde plastik deformasyon (çukurlar) oluşturduğunu, çukurların sayısının ve derinliğinin (Şekil 2.14) bilya püskürtme basıncının artması ile arttığından bahsetmişlerdir (Trung ve diğ., 2016).



Şekil 2.14. Bilyalı dövme sonrası yüzey morfolojisi ve topografisi incelemeleri a) 10 Psi, b) 40 Psi, c) 80 Psi püskürtme basıncı (Trung ve diğ., 2016)

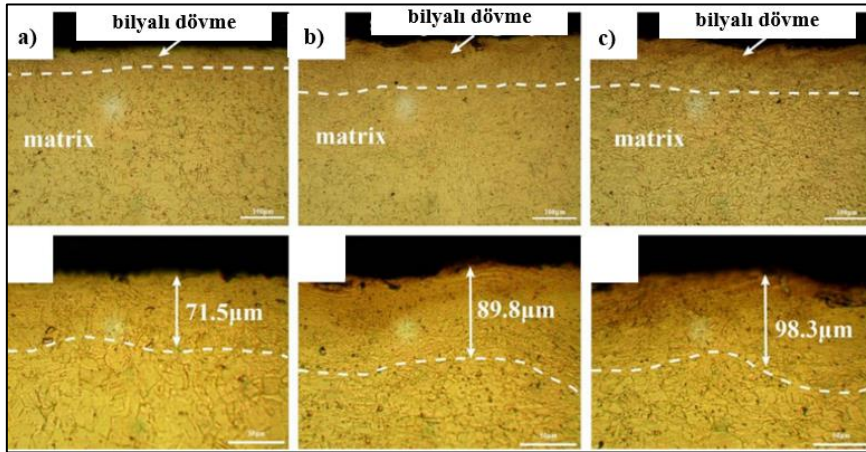
### 2.3.5. Bilyalı Dövme Sonrası Yüzey Altı Mikroyapı İncelemeleri

Avcu, farklı parametreler (püskürtme basıncı 2 ve 4 bar, çelik bilya boyutu (0,1-0,3 mm) ve (0,4-0,9 mm)) kullanarak AA7075 alaşımına bilyalı dövme işlemi uygulamışlar ve yüzey altı mikroyapısının derinliğe bağlı olarak değişimini optik mikroskop kullanarak incelemiştir (Şekil 2.15) (Avcu, 2018). Kesit mikroyapıları incelendiğinde yüzeyde şiddetli deformasyon sonucu ince tanelerin olduğu ve merkeze doğru ilerledikçe işlem görmemiş malzeme yapısına dönüştüğünü belirlemiştir. Ayrıca bilyalı dövme ile yüzeyde çukurcukların olduğu (beyaz oklar ile gösterilmiş), aşırı plastik deformasyon ile yüzeyde derin çukurcukların olduğu, bilyalı dövme sonrası yüzey pürüzlüğünün önemli ölçüde artmasına neden olduğu ve büyük boyutlu bilyaların küçük bilyalara kıyasla yüksek çarpma enerjileri nedeniyle yüzeyde daha derin ve geniş çukurlar oluşturduğunu belirlemiştir (Şekil 2.15- c ve d) (Avcu, 2018).



Şekil 2.15. Bilyalı dövme parametrelerine bağlı yüzey altı mikroyapısal değişim; a) 2 bar, 0,1-0,3 mm, b) 4 bar, 0,1-0,3 mm, c) 2 bar, 0,4-0,9 mm, d) 4 bar, 0,4-0,9 mm

Zhan ve ark. S30432 çeliğine farklı Almen şiddetlerinde (üç farklı kademedede; i) 0,46 mm A şiddetinde, ii) 0,46 mm A + 0,23 A şiddeti ve iii) 0,46 mm A + 0,23 A +0,17 A şiddetinde) bilyalı dövme işlemi uygulamışlar ve kesit mikroyapısını incelemiştirler. Kademe sayısı arttıkça bilyalı dövmeden etkilenen bölgenin derinliğinin arttığını (71,5 µm'dan 98,3 µm'ye ulaştığı) ve martenzetik dönüşümün oluşmadığını belirlemiştirler (Şekil 2.16) (Zhan ve diğ., 2021).



Şekil 2.16. Bilyalı dövme sonrası kesit-mikroyapı incelemeleri a) 0,46 mm A şiddeti, b) 0,46 mm A + 0,23 A şiddeti, c) 0,46 mm A + 0,23 A +0,17 A şiddetinde (Zhan ve diğ., 2021)

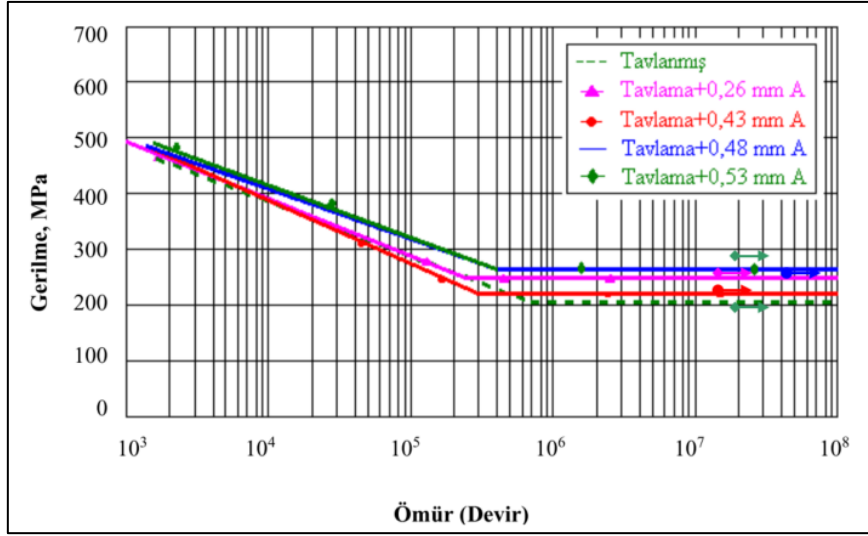
### **2.3.6. Bilyalı Dövme Sonrası Korozyon Davranışının İncelenmesi**

Walczak ve Szala eklemeli imalat yöntemi ile üretilen 17-4PH çeliği numunelerine farklı parametreler altında (püskürtme basıncı (0,3 ve 0,6 MPa), üç farklı türde bilya (CrNi, seramik ve ceviz kabuğu)) bilyalı dövme işlemleri uygulamış ve bilyalı dövmenin korozyon dayanımına olan etkisini araştırmıştır (Walczak ve Szala, 2021). Bu parametreler içerisinde seramik bilya ile 0,6 MPa basınçta dövülen numunelerin optimum yüzey morfolojisine, sertlik ve mikroyapıya sahip olduğunu böylece aşınma ve korozyon dayanımının arttığını ortaya çıkarmışlardır (Walczak ve Szala, 2021). Wu ve ark. 2205 dubleks çeliğinin bilyalı dövme sonrası korozyon dayanımı incelemişler ve bilyalı dövme ile artan yüzey pürüzlülüğü değerinin korozyon dayanımına negatif etkisi olurken, tane küçülmesinin pozitif etkisi olduğunu açıklamışlardır (Wu ve diğ., 2022). Zhan ve ark. S30432 çeliğinin bilyalı dövülmesi ile tane yapısı küçülmesine rağmen korozyon dayanımda bariz bir artış görülmediğini hatta pürüzlülüğün fazla olduğu numunelerde korozyon dayanımının kötüleştiğini ifade etmişlerdir (Zhan ve diğ., 2021).

### **2.3.7. Bilyalı Dövme Sonrası Yorulma Davranışının İncelenmesi**

Dülek ve ark. 1020 çeliğini tavlama ve tavladıktan sonra çeşitli Almen şiddetlerinde (0,26, 0,43, 0,48 ve 0,53mm A) bilyalı dövme işlemi uygulamış sonrasında bilyalı dövmenin malzemenin yorulma davranışına olan etkilerini dönen eğmeli yorulma test cihazıyla incelemişlerdir (Dülek ve diğ., 2005). Tavlandıktan sonra bilyalı dövülen numunelerin yorulma dayanımının arttığı (205 MPa' dan 265 MPa'a yükseldiği), 0,26 mm A şiddetinde dövülme ile %22, 0,43 mm A şiddetinde dövülme ile %7, 0,48 ve 0,53 mm A şiddetinde dövülme ile ise yorulma dayanımı %29 oranında artış gösterdiğini belirlemişlerdir (Şekil 2.17) (Dülek ve diğ., 2005).

Rajest ve ark. 2024 alüminyum alaşımını, çeşitli parametreler altında nikel bilyalar kullanarak bilyalı dövme işlemi uygulamışlar ve bilyalı dövmenin yorulma dayanımına olan etkisini yüksek döngülü yorulma test cihazı kullanarak incelemişlerdir. Optimum bilyalı dövme parametreleri ile (5,67MPa dövme basıncı ve 30 mm mesafe) yorulma dayanımını %34 arttığı belirlemiştir (Rajesh ve Ashoka Varthanan, 2020).



Şekil 2.17. Yorulma ömrüne Almen şiddetinin etkisi (Dülek ve diğ., 2005)

### 2.3.8. Bilyalı Dövme Sonrası Aşınma Davranışının İncelenmesi

Literatürde az sayıda çalışma mühendislik malzemelerinin bilyalı dövme sonrası aşınma davranışını incelemiştir. Tablo 2.2’te mühendislik malzemelerinin bilyalı dövme sonrası aşınma davranışını inceleyen çalışmalar özetlenmiştir.

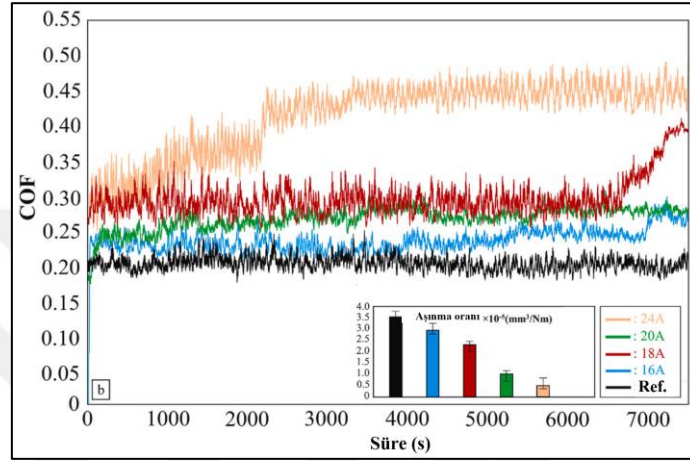
Tablo 2.2. Mühendislik malzemelerinin bilyalı dövme sonrası aşınma davranışının incelemeleri

Referans	Yıl	Malzeme	Bilyalı dövme parametreleri	Aşınma testi ve parametreleri	Sonuçlar
Xiao ve ark. (Xiao et al. 2022)	2022	AISI 1045	Ultrasonik bilyalı dövme, seramik bilya (1 mm), dövme süresi 3 dk	Lineer ball on disc aşınma testi, GCr15 çelik bilya (7,85 mm çap), yük 20 N, hız 20 mm/s	Bilyalı dövme sonrası sürtünme katsayısı değerinde azalma belirlenmiştir.
Wu ve ark. (Wu, Kang, and Chen 2022)	2022	2205 dupleks paslanmaz çelik	Bilyalı dövme, paslanmaz çelik bilya (0,3 mm çapında), 0,25 MPa basınçta, %200 yüzey örtme oranı	Lineer ball on disc aşınma testi, GCr15 çelik bilya (6 mm çap), yük 20 N, hız 0,03 mm/s, süre 30 dk	Bilyalı dövmenin tane küçülmesini sağlayarak korozyon ve aşınma dayanımını arttırdığını ancak pürüzlülüğü artırması nedeniyle negatif etkiler oluşturduğu belirlenmiştir.
Han ve ark. (Han et al. 2022)	2022	AISI 5160	Bilyalı dövme, %100 yüzey örtme oranı, çelik bilya (1,25 mm çapında), süre 2 dk	Lineer ball on disc tribo-aşınma testi, PAO4 sıvısında, 6 mm kayma mesafesi, yük 320 N, 2 Hz frekansında, süre 10 dk	Bilyalı dövme, su verilmiş ve temperlenmiş yüzeylerde daha fazla aşınmaya ve plastik deformasyona neden olmuştur.

Tablo 2.2.(Devam) Mühendislik malzemelerinin bilyalı dövme sonrası aşınma davranışının incelemeleri

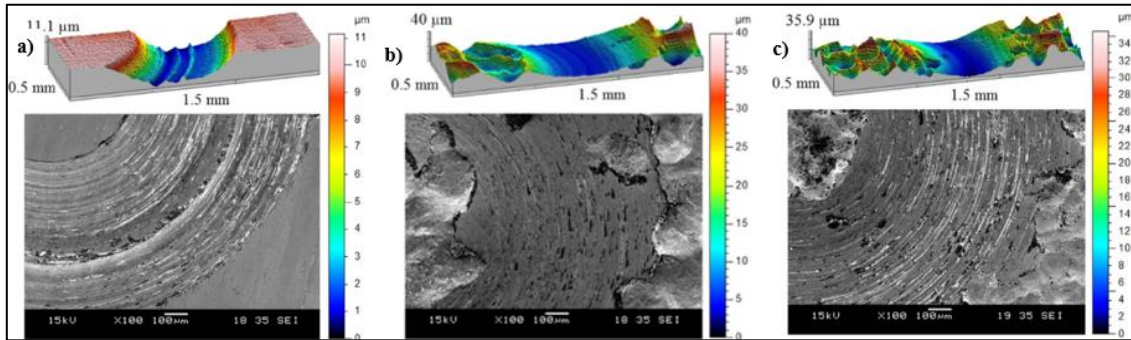
Bozkurt ve ark. (Bozkurt ve diğ., 2022)	2022	AISI 4140	Bilyalı dövme, %200 yüzey örtme oranı, çelik bilya (S230), 16A, 18A ve 20A Almen şiddeti	Lineer ball on disc tribo-aşınma testi, yük 3N, kayma mesafesi 8 mm, süre 7500 s, alümina top (6 mm çapında), kütlece % 3,5 NaCl çözeltisi	Tribokorozyon davranışının bilyalı dövme sonrası sertlikteki artışla beraber artış gösterdiği belirlenmiştir.
Zhan ve ark. (Zhan ve diğ., 2021)	2021	S30432	Bilyalı dövme; 1.tur dövme: paslanmaz çelik bilya, 0,46 A şiddetinde 2.tur dövme: paslanmaz çelik bilya, 0,23 A şiddetinde 3. tur dövme: seramik bilya (0,3 mm), 0,17 A şiddetinde	Lineer ball on disc aşınma testi, yük 5 - 10 N, kayma mesafesi 5 mm, süre 20 dk, alümina top (10 mm çapında)	Bilyalı dövme sonrası (3 farklı dövme şartında) aşınma dayanımı artmıştır.
Gopi ve ark. (Gopi ve diğ., 2020)	2020	316L paslanmaz çelik	Bilyalı dövme, çelik bilya kullanılmış.	Pin on disc aşınma test cihazı, yük 5, 10 ve 15 N, kayma mesafesi 500, 1000 ve 1500 m, kayma hızı 0,2, 0,5 ve 0,75 m/s	Bilyalı dövme aşınma dayanımını iyileştirmiştir.
Efe ve ark. (Efe ve diğ., 2020)	2020	AA7075	Bilyalı dövme, S230 çelik bilya, 20A Almen şiddetinde, %200 yüzey örtme oranı, süre 15 s, bilya püskürtme basıncı 45 psi	Ball on disc aşınma testi, yük 10 ve 20 N, kayma mesafesi 100, 200 ve 1000 m, kayma hızı 0,5 m/s	Bilyalı dövme aşınma dayanımı arttırmıştır.
Trung ve ark. (Trung ve diğ., 2016)	2016	AISI 4340	Bilyalı dövme, çelik bilya (S230 ve S110), bilya püskürtme basıncı (68.9–551.6 kPa)	Ball on disc aşınma testi, yük 5 N, kayma hızı 5 mm/s, aşındırıcı bilya 100Cr6 (6 mm çapında)	Yüksek püskürtme basıncı ve büyük bilya boyutu ile dövülen yüzeylerde sürtünme katsayısı değerlerinin yüksek olduğu ancak bu yüzeylerdeki sertliğin ve pürüzlülüğün yüksek olması ile aşınma sonrası oluşan hacim kaybının az olduğu belirlenmiştir.

Bozkurt ve ark. tribokorozyon hasarlarının malzemelerin yüzey özellikleriyle doğrudan ilişkili olduğunu ve malzemelerin tribokorozyon performansını arttırmak amacıyla farklı yüzey modifikasyonlarının (bilyalı dövme) uygulanması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu amaçla farklı Almen şiddetlerinde AISI 4140 çeliğine bilyalı dövme işlemleri uygulamışlar ve tribokorozyon dayanımının yüzey sertliğinin artması ile artış gösterdiğini belirlemişlerdir (Şekil 2.18) (Bozkurt ve diğ., 2022).



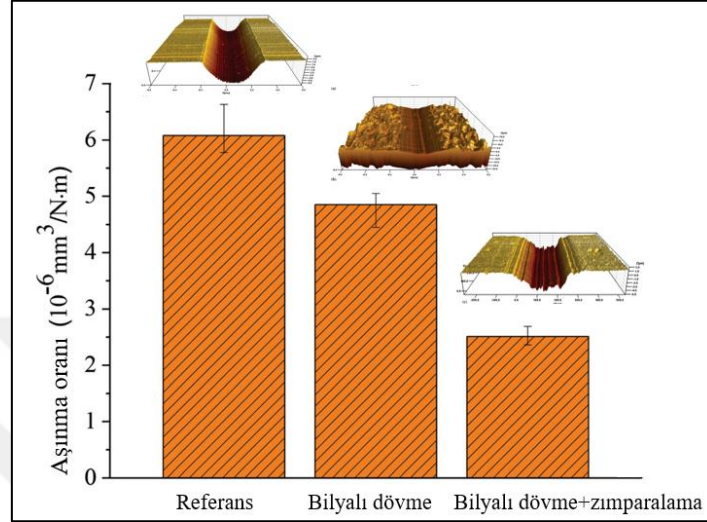
Şekil 2.18. Farklı Almen şiddetiyle dövülen AISI 4140 çeliğinin aşınma davranışı (Bozkurt ve diğ., 2022)

Trung ve ark. AISI 4340 çeliğine, çeşitli bilya boyutu (S110 ve S230), çeşitli püskürtme basıncı değerlerinde (20 ve 40 psi) ve tekrarlı bilyalı dövme) bilyalı dövme işlemleri uygulamışlar ve bilyalı dövme parametrelerinin aşınma davranışına olan etkilerini araştırmışlardır. Püskürtme basıncının ve bilya boyutunun yükselmesi ile sürtünme katsayısında artış gerçekleşirken bilyalı dövme sonrası artan pürüzlülük ve sertliğin aşınan hacimde azalma sağladığını belirlemişlerdir (Şekil 2.19) (Trung ve diğ., 2016).



Şekil 2.19. Aşınma izi topografileri ve morfolojisi a) İşlem yapılmamış yüzey, b) Bilyalı dövme sonrası (S230 bilya, 40 psi), c) Bilyalı dövme sonrası (S230 bilya, 40 psi+S110 bilya 20 psi) (Trung ve diğ., 2016)

Wu ve ark. 2205 dubleks çeliğinin bilyalı dövme sonrası aşınma ve korozyon dayanımındaki değişimi incelemişlerdir. Dövme ile yüzeyin altında gerçekleşen tane küçülmesinin ve buna bağlı olarak artan sertliğin aşınma oranını azalttığını ancak pürüzlülüğün negatif etki oluşturduğunu belirlemişlerdir (Şekil 2.20) (Wu ve diğ., 2022).



Şekil 2.20. Bilyalı dövme sonrası aşınma oranları ve yüzey topografileri (Wu ve diğ., 2022)

#### 2.4. Titanyum Alaşımlarının Bilyalı Dövme Sonrası Aşınma Davranışlarının İncelenmesi

Titanyum alaşımları, dişlerde, kalça, eklem ve diz bölgelerinde ve kemik yapılarının birçok bölgesinde kullanılmaktadır. Titanyum alaşımları elastik modülünün kemik dokusuna yakın olması, mukavemetli ve düşük yoğunlukta aynı zamanda biyouyumluluğunun yüksek olması nedeniyle tercih sebebidir. Ayrıca alerjik reaksiyon oluşumunun az olması, vücut içerisine enjekte edilen maddelerle reaksiyona girmemesi, anti manyetik özelliği ile röntgen çekimlerinde problem oluşturmaması gibi özellikler titanyum ve alaşımlarının avantajlarından (Yıldıran Avcu ve diğ., (2020, 2021); Fridrici ve diğ., 2001; Ganesh ve diğ., (2012, 2014); Moradi ve diğ., 2022; Zhou ve diğ., 2019).

Ancak daha önce de bahsettiğimiz gibi titanyum alaşımlarının aşınma dayanımının düşük olması bu alanda büyük bir engel oluşturmaktadır. İmplantların sürtünme katsayılarının yüksek olması sebebiyle vücut içerisinde, çevresindeki dokunun iltihaplanmasına neden olmaktadır. Ayrıca aşınan partiküller vücut sıvısı ile temas ettiğinde korozyona

uğramaktadır. Bu nedenle yüzeylerdeki aşınma durumunun ciddiyeti ve önemi büyüktür. Tribolojik özelliklerin zayıflığı ve korozyon problemlerinin getirmiş olduğu problemleri önlemek amacıyla malzemelerin yüzey ve yüzey altı davranışlarının iyileştirilmesi gerekmektedir(Ganesh ve diğ., 2012; Çelik, 2015).

Literatürlerde çeşitli araştırmacıların titanyum alaşımlarının bilyalı dövme sonrası tribolojik özelliklerinin incelemesi amacıyla gerçekleştirdikleri aşınma testleri ve elde edilen sonuçlar Tablo 2.3' te özetlemiştir.

Tablo 2.3. İlgili literatür çalışmaları

Referans	Malzeme	Bilyalı dövme parametreleri	Aşınma testi parametreleri	Sonuçlar
Yıldırım Avcu ve ark. (Yıldırım Avcu ve diğ., 2020)	Ti6Al4V	Paslanmaz çelik bilya (1 mm çapında), 7 bar püskürtme basıncı, 5 ve süre 15 dk	Ball on disc, alümina bilya (6 mm çapında), 10N yük altında, 150 m	Bilyalı dövme öncesi ve sonrası sürtünme katsayısı değerleri ve kütle kaybı değerleri yakın çıkmıştır.
Moradi ve ark. (Moradi ve diğ., 2022)	Ti6Al4V	Bilya boyutu (0,4, 0,6 ve 1 mm), çarpma açısı (30°, 60° ve 90°), püskürtme basıncı (1, 2 ve 4 bar), dövme süresi (20, 40 ve 60 dk)	Pin on disc	Plastik deformasyon sonucu sertliğin yüksek olduğu ve tane küçülmesinin etkin olduğu derinliğin fazla olduğu numunelerde aşınma dayanımının yüksek olduğu belirlenmiştir.
Fridrici ve ark. (Fridrici ve diğ., 2001)	Ti6Al4V	Bilya boyutu (0,315 mm), 0,15 mm Almen Şiddeti	Fretting aşınması	Bilyalı dövme sonrasında malzemenin aşınma davranışında belirgin bir değişim gözlenmemiştir.
Ganesh ve ark. (Ganesh ve diğ., 2012)	Ti6Al4V	MIL-13165 standardı kullanılmıştır. S230 türü çelik bilya (0,6 mm çap), %100 yüzey örtme oranı, 90° çarpma açısı, 30 dk dövme süresi.	Hız 1 m/s, kayma mesafesi 500 m, yük 50N, pin çapı 10 mm	Sertliğin artması ile aşınma dayanımında artış belirlenmiştir.
Taşlıçukur Öztürk ve ark. (Taşlıçukur Öztürk ve Sezer, 2021)	Ti6Al4V	S230 çelik bilya (sertlik 52-62 HRC), bilya püskürtme basıncı (0,5 1 ve 1,5 bar), 90° çarpma açısı, süre 20 dk	Ball on plate aşınma test düzeneği. Yük (2 ve 5N), hız 20 mm/s, kayma mesafesi 50 mm, aşındırıcı bilya malzemesi 100Cr6	Bilyalı dövme ile aşınma dayanımının arttığı belirlenmiştir.
Ganesh ve ark. (Ganesh ve diğ., 2014)	Ti6Al4V Ti6Al7Nb	S230 çelik bilya (0,6 mm çap), bilya püskürtme basıncı (3,5-5,5 bar), 90° çarpma açısı, süre 60 s	Pin on disc (ASTM G99), hız 1m/s, mesafe 500m	Yüzey sertliğinin bilyalı dövme ile artması, aşınma dayanımında artış meydana getirmiştir.

Tablo 2.3.(Devam) İlgili literatür çalışmaları

Wen ve ark. (Wen ve diğ., 2011)	Cp-Ti	Titreşimli bilyalı dövme, frekansı 50 Hz, paslanmaz çelik bilya (8 mm çapında), oda sıcaklığında vakumlu ortam.	Ball on disc, Yük (1-5N), lineer hız 20 mm/s, aşınma izinin yarıçapı 2,5 mm, kayma mesafesi 30 mm	Sürtünme katsayısının ve aşınan hacmin dövme sonrası tane küçülmesi ve sertlik artışı ile azaldığı belirlenmiştir.
Zhou ve ark. (Zhou ve diğ., 2019)	Ti6Al4V	Lazer dövme	Ball on disc aşınma testi, Hank solüsyonunda, yük 5N, 8 mm çapında GCr15 aşındırıcı top	Lazer dövme ile ortalama sürtünme katsayı değeri %50 ve kütle kaybı %29,2 oranında azalmış. Lazer dövme ile alaşım aşınma ve sürtünme özellikleri gelişmiştir.

Fridrici ve ark. Ti6Al4V alaşımına bilyalı dövme ( 0.15 mm A şiddetinde) uyguladıktan aşınma davranışını incelemişlerdir. Bilyalı dövülen ve işlem uygulanmayan numunelerin tüm aşınma test koşullarında benzer şekilde aşındığını, herhangi bir fark olmadığını belirlemişlerdir (Fridrici ve diğ., 2001).

Avcu ve ark. farklı parametreler altında gerçekleştirdikleri bilyalı dövme işlemleri sonrası Ti6Al4V alaşımının aşınma oranında bariz bir değişim belirlenmemiştir (Yıldıran Avcu ve diğ., 2020).

Ganesh ve ark. ise bilyalı dövme sonrası Ti6Al4V alaşımının aşınma dayanımının sertlik artışına bağlı olarak artış gösterdiğini raporlamışlardır (Ganesh ve diğ., 2012; 2014). Morfolojik incelemelerinde, düşük kayma hızlarında gerçekleşen aşınma testlerinde oksidatif aşınma hâkimken, yüksek kayma hızında delaminasyon mekanizmalarının oluştuğunu belirlemişlerdir (Ganesh ve diğ., 2012).

Bilyalı dövme sonrası yüzeyde oluşan tane küçülmesi ve kalıntı basma gerilmesinin Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme sonrası aşınma dayanımını %57 oranında arttırdığını Moradi ve ark. tarafından açıklanmıştır (Moradi ve diğ., 2022).

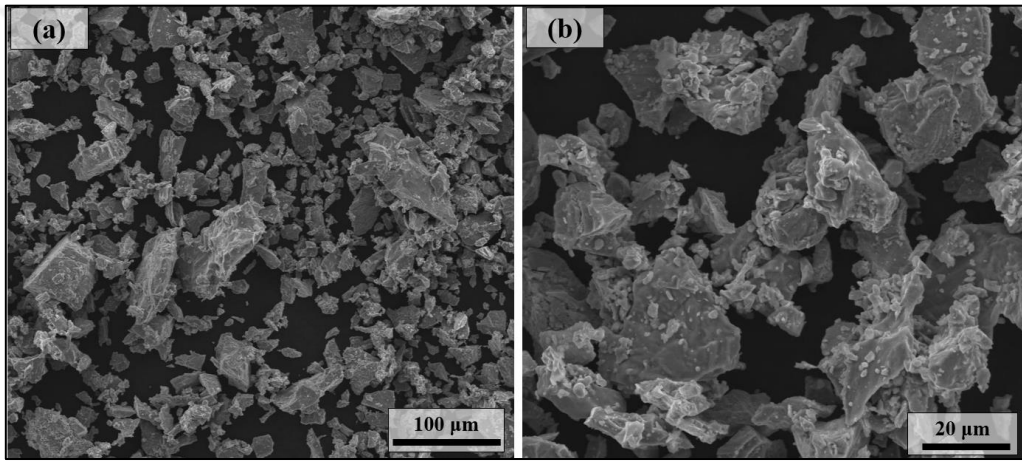
Literatürde az sayıda çalışmada bilyalı dövme sonrası titanyum ve alaşımlarının aşınma davranışına etkisini incelenmiştir. Sınırlı sayıdaki çalışma detaylı incelendiğinde birbirinden farklı sonuçların olduğu gözlemlenmiştir.

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

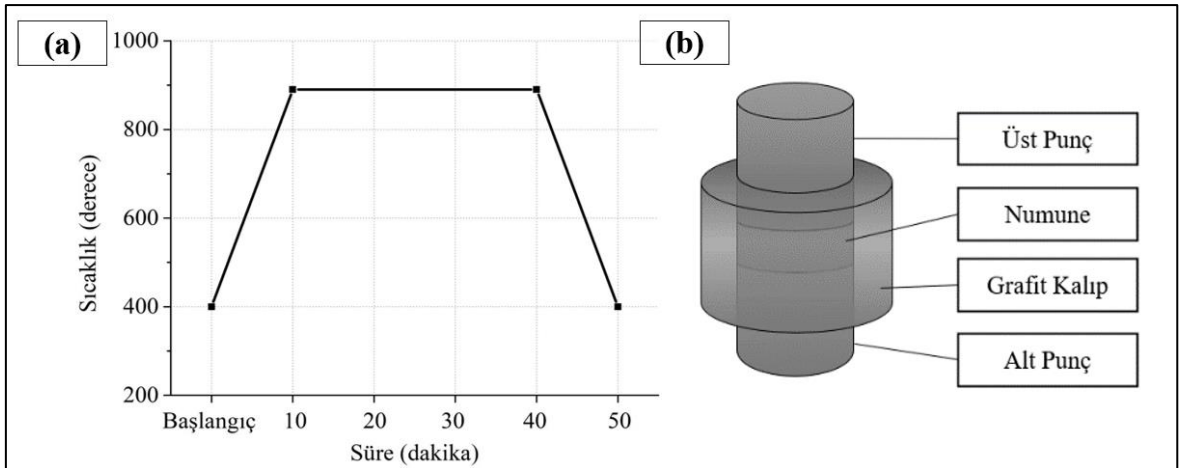
#### 3.1. Malzeme

##### 3.1.1. Saf Titanyum Alaşımı

Toz metalürjik saf titanyum alaşımı (Cp-Ti) numuneler, 33 – 45  $\mu\text{m}$  boyutlarında düzensiz morfolojide saf titanyum tozların (Şekil 3.1-a ve b), grafit kalıplar arasında 14 kN basınç altında 890 °C’ de sinterlenerek sıcak pres cihazında üretilmiştir (Şekil 3.2-a ve b). Üretilen saf titanyum alaşımı (Cp-Ti) numunelerin yoğunlukları Arşimet Prensibi ile %93,14 olarak belirlenmiştir.



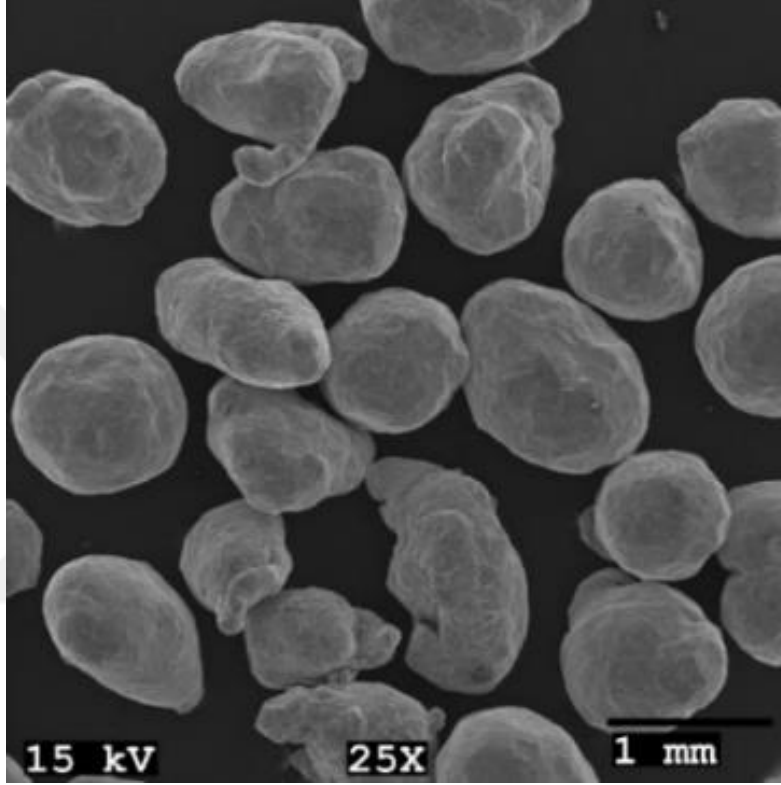
Şekil 3.1. a) ve b) Saf titanyum alaşımı tozlarının SEM görüntüsü



Şekil 3.2. a) Sinterleme eğrileri, b) Grafit kalıbın şematik gösterimi

### 3.1.2. Bilya

Tez çalışmasında bilyalı dövme işlemlerinde 600 – 1000 µm çapında paslanmaz çelik bilyalar kullanılmıştır. Bilyalar, Mikro Metalürji End. Malz. San. Tic. Ltd. Şti. firmasından ticari olarak temin edilmiştir (Şekil 3.3). Kullanılan bilyalara ait kimyasal kompozisyon değerleri Tablo 3.1’de verilmiştir.



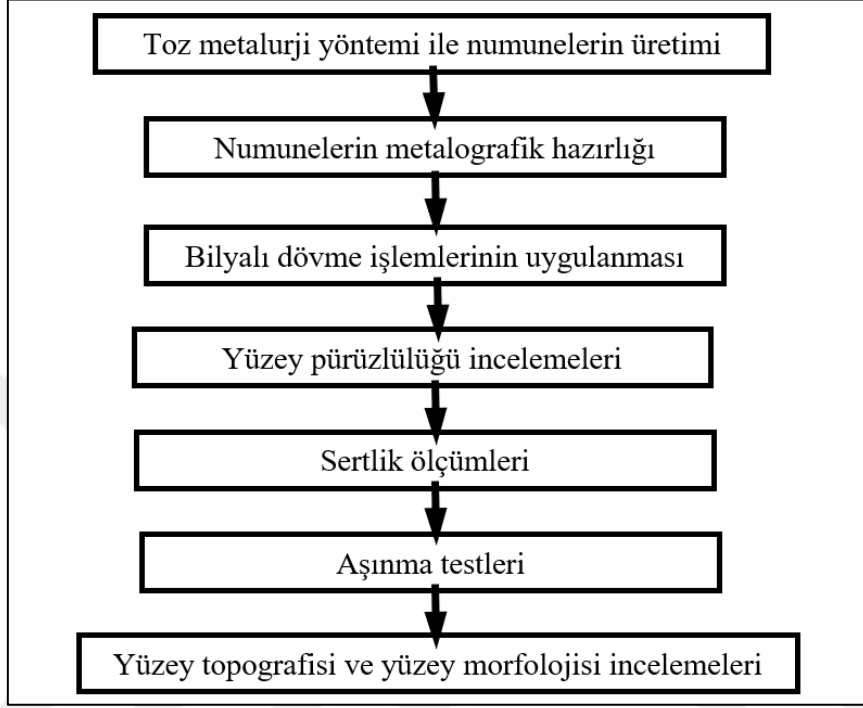
Şekil 3.3. Paslanmaz çelik bilyanın SEM görüntüsü

Tablo 3.1. Paslanmaz çelik bilyaların kimyasal kompozisyonları

Kimyasal Kompozisyon						
Elementler (kütlece %)	Cr	Ni	C	Si	Mn	Fe
	17,7	7,53	0,24	2,25	1,27	Kalan

### 3.2. Yöntem

Çalışmada kullanılan yöntemler Şekil 3.4' de verilen iş akış şeması doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.



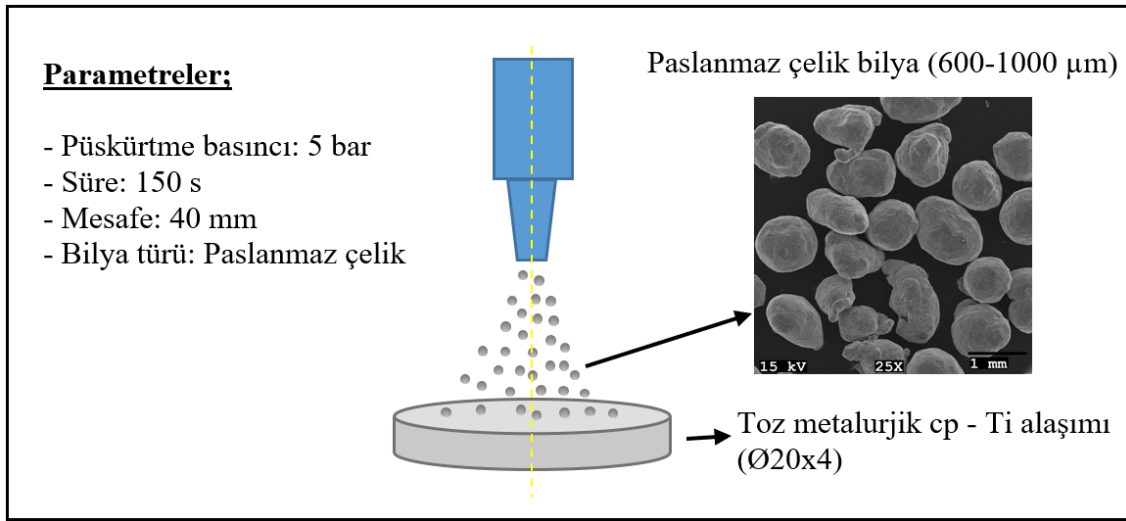
Şekil 3.4. Yöntem akış şeması

#### 3.2.1. Numunelerin Metalografik Hazırlığı

Toz metalurji yöntemi ile üretilen Cp-Ti alaşımı numuneler bilyalı dövme işlemi öncesi, Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarında bulunan Metkon Forcipol 2V marka cihazda zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Numuneler sırasıyla 320, 600, 1000 ve 2000 meshlik zımparalarda yaklaşık 4 dakika boyunca zımparalanmıştır. Zımparalama işlemi numunenin her iki yüzeyine de uygulanmıştır. Parlatma işleminde ise parlatma çuhaları ve 9 µm, 3 µm ve 1 µm'lik elmas solisyonlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.2. Bilyalı Dövme İşlemleri

Bilyalı dövme işlemleri, Kocaeli Üniversitesi Ford Otosan İhsaniye Otomotiv MYO'da bulunan Yüzey İşlemleri Laboratuvarında yer alan CNC kontrollü özel tasarım bilyalı dövme cihazında (Şekil 3.5) gerçekleştirilmiştir. Numunelere, paslanmaz çelik bilyaların kompresör tarafından hızlandırıldığı bir sistemde 5 bar püskürtme basıncında, 2,5 dakika boyunca, 40 mm mesafeden bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır.



Şekil 3.5. Bilyalı dövme işleminin şematik gösterimi

Bilyalı dövme sonrası dövülen numunelerin temizlenmesi amacıyla numuneler ultrasonik banyoda etil alkol içerisinde 10 dakika boyunca temizlenmiştir.

### 3.2.3. Pürüzlülük Ölçümleri

Dövme işlemi ile toz metalurjik numunelerin 3D pürüzlülük değerleri, Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği laboratuvarında bulunan Huvitz (Güney Kore) marka 3D optik profilometre cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve yüzeylerin 3 boyutlu yüzey topografyaları haritalandırılmıştır. 3 boyutlu yüzey topografyası, ISO 25178 standardına göre alansal pürüzlülük değerleri, tekstür yönleri, tekstür izotropisi ve Abbot eğrisi değerleri detaylı olarak incelenmiştir.

### 3.2.4. Numunelerin Kesit İncelemeleri Hazırlığı

Cp-Ti alaşımı numuneler, Kocaeli Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nde yer alan Metkon Micracut 150 (Türkiye) marka hassas kesim cihazında kesilmiştir. Hassas

kesme işlemi gerçekleştirilen numuneler kesit incelemeleri için soğuk bakalite alınmıştır. Ardından zımparalama ve parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir (Başlık 3.2.1). Kroll dağılayıcısı (Yıldıran Avcu ve diğ., 2020) ile dağılanarak numuneler mikroyapı incelemeleri için hazırlanmıştır.

### 3.2.5. Sertlik Ölçümleri

Dövme işleminin yüzey altı sertlik değerlerine etkisini incelemek amacıyla, mikro Vickers sertlik cihazı kullanılmıştır. Sertlik testleri 0,2 kgf yük altında, 10 sn süre ile 60 µm aralıklarla 3 tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.6. Aşınma Testleri

Aşınma testi türü olarak ‘ball-on-disc’ tercih edilmiştir. Aşınma testlerinde karşıt yüzey olarak alümina bilya (Ø6 mm) kullanılmıştır. Alümina bilyaya 15 N normal yük uygulanmış ve numuneler 150 rpm hız ile 300 ve 600 m mesafelerinde koşturulmuştur. Deneysel şartlarında ve kuru sürtünme koşullarında 3 tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Sürtünme katsayısı değerleri, aşınma testleri sırasında test cihazı tarafından otomatik olarak oluşturulmuştur. Aşınan yüzeyde oluşan hacim kaybı değeri, optik profilometre cihazı kullanılarak, aşınma izi çevresinde birim alanda gerçekleşen hacim kaybının 10 farklı bölgeden alınması ve bu değerlerin ortalamasının alınması sonrasında aşınma izi çevresi ile çarpılması ile elde edilmiştir. Elde edilen bu değer spesifik aşınma oranının bulunmasında kullanılmıştır. Spesifik aşınma oranının (k) belirlenmesinde, Denklem (3.1)’de verilen eşitlik kullanılmıştır (Gobber ve diğ., 2021). Denklem (3.1)’de;  $V$  ile hacim kaybı ( $\text{mm}^3$ ),  $W$  ile uygulanan yük (N) ve  $L$  ile kayma mesafesi (m) belirtilmektedir (Gobber ve diğ., 2021);

$$k = \frac{V}{W \times L} \quad (3.1)$$

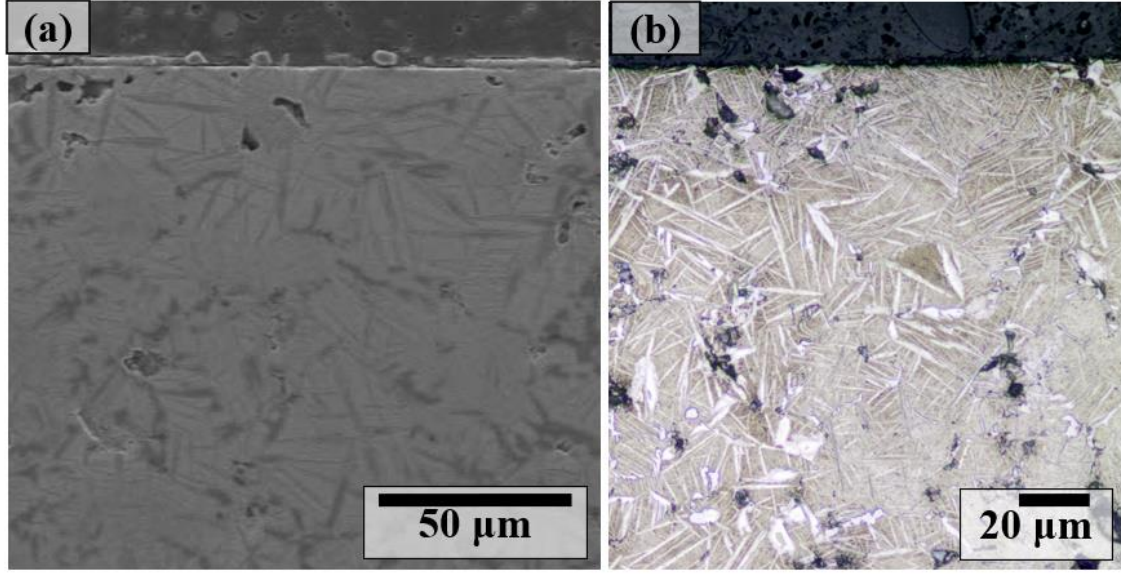
### 3.2.7. Yüzey Morfolojisi İncelemeleri

Dövülen numunelerin aşınma testleri sonrası yüzey morfolojileri üniversitemiz Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında yer alan Jeol JSM-6060 (Japonya) marka Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanner Electron Microscope-SEM) cihazı yardımı ile incelenmiştir.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Saf Titanyum Alaşımı

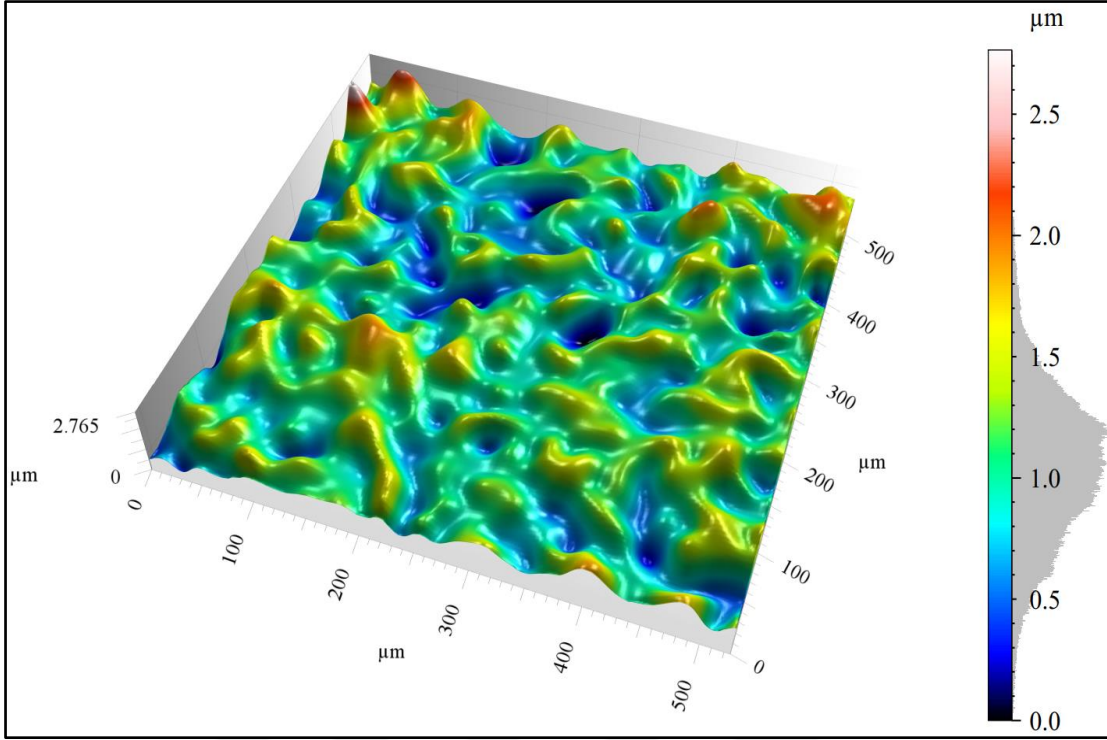
Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Cp-Ti alaşımının kesit optik mikroskop ve SEM görüntüleri Şekil 4.1’ de verilmiştir.



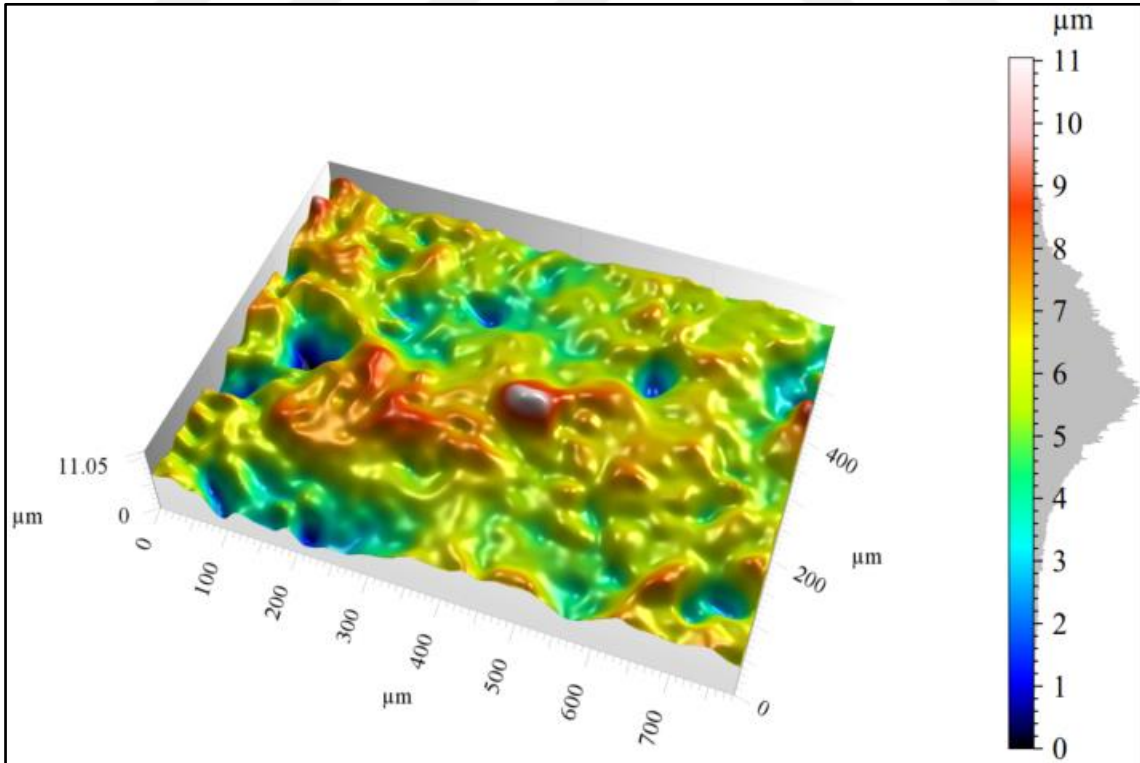
Şekil 4.1. Cp-Ti alaşımının kesit görüntüleri a) SEM ve b) optik mikroskop

### 4.2. Yüzey Pürüzlülüğü ve Topografisi

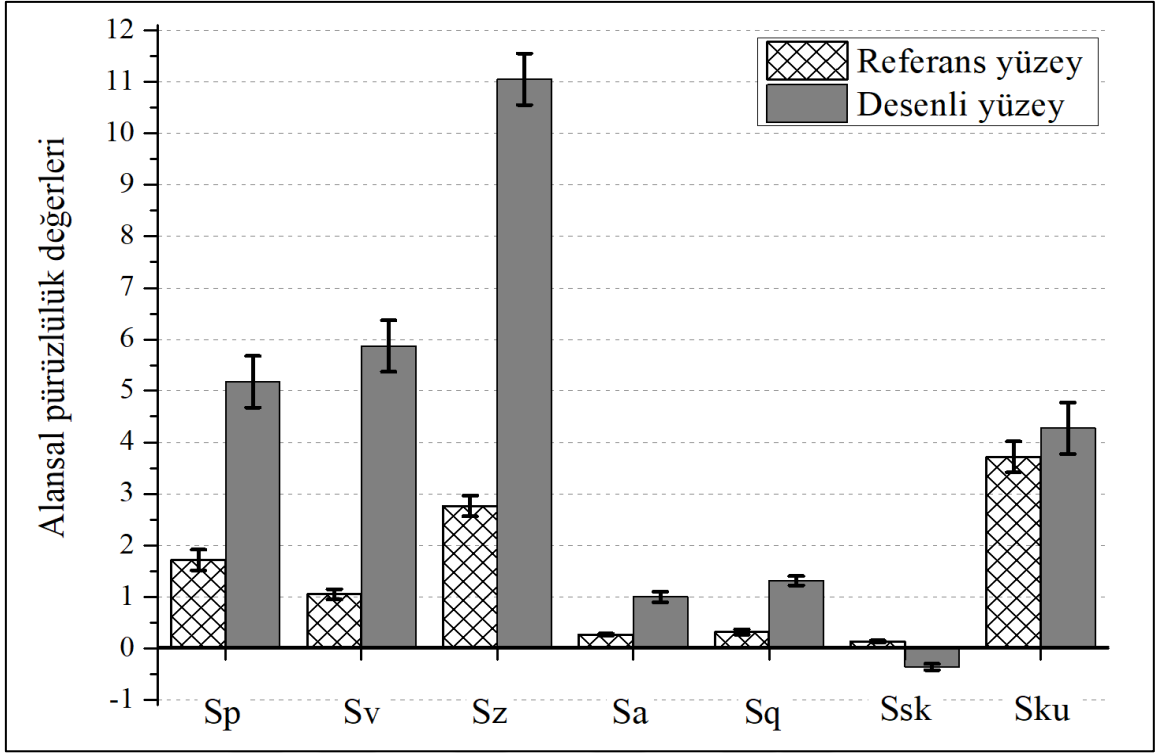
Bilyalı dövme sonrası numunenin 3 boyutlu yüzey topografileri ve alansal pürüzlülük değerleri Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de detaylı olarak verilmiştir. Referans numune ile kıyaslandığında bilyalı dövme yöntemi ile numunelerde tepe (kırmızı renk ile) ve çukurların (mavi renk ile) oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 4.2-4.3). Alansal pürüzlülük değerleri incelendiğinde; bilyalı dövme ile yüzeyde oluşan alansal pürüzlülük değerlerinde (en yüksek tepe noktası (Sp), en derin çukur (Sv), en yüksek tepe ve en derin çukur arası mesafenin (Sz), ortamala alansal pürüzlülük (Sa) ve ortalama alansal pürüzlülüğün karesi (Sq)) değerinde artış gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 4.4). Bilyalı dövme sonrası yüzeyin pürüzlülük değerinin sapma derecesi (Ssk) negatif yönde ve pürüzlülük profilinin keskinliğinin (Sku) pozitif yönde artış gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 4.2. Referans yüzeyin 3 boyutlu yüzey topografisi



Şekil 4.3. Bilyalı dövme sonrası yüzeyin 3 boyutlu yüzey topografisi



Şekil 4.4. Bilyalı dövme öncesi ve sonrası alansal pürüzlülük değerleri

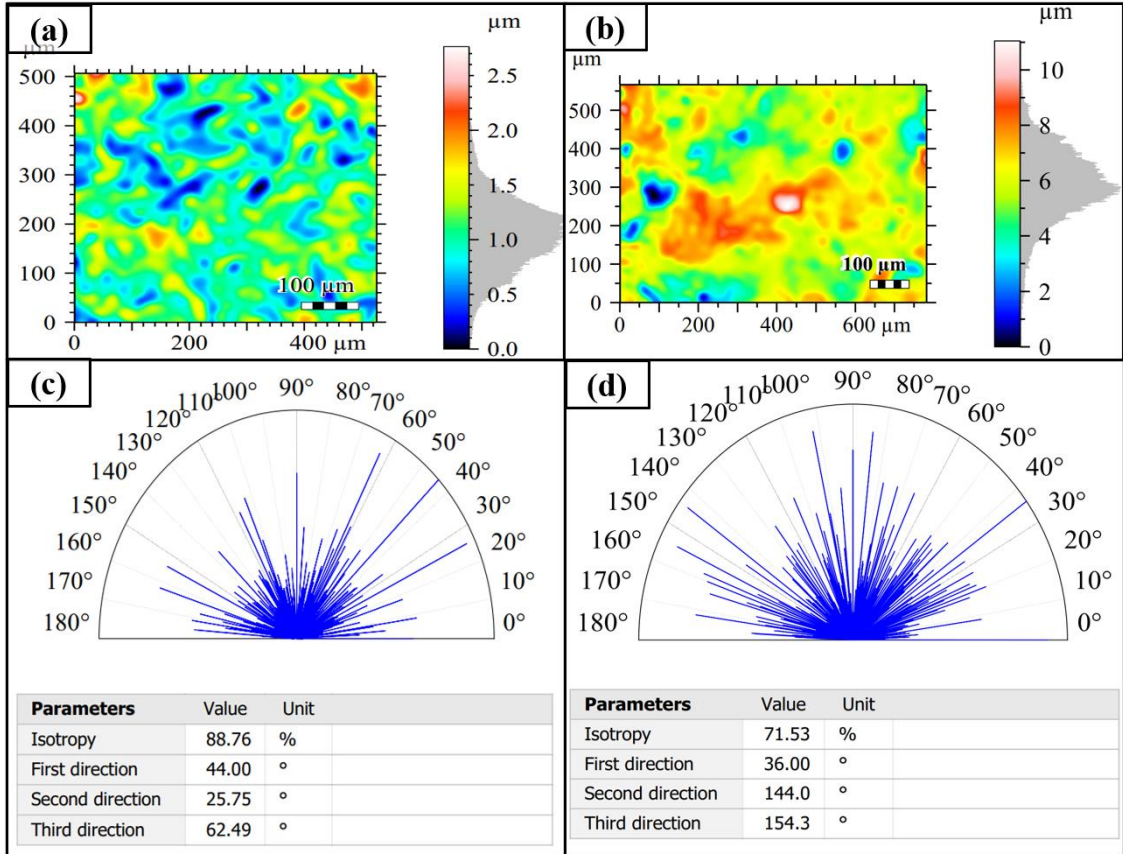
Literatürde bu özelliklere (negatif Ssk ve pozitif Sku) sahip yüzeylerde aşınma testleri gerçekleştirildiğinde düşük sürtünme ve daha iyi sürtünme direnci olduğu belirlenmiştir (Sedlaček ve diğ., 2016).

#### 4.2.1. Desenli Yüzeylerin Tekstür Yönleri ve Tekstür İzotropisi

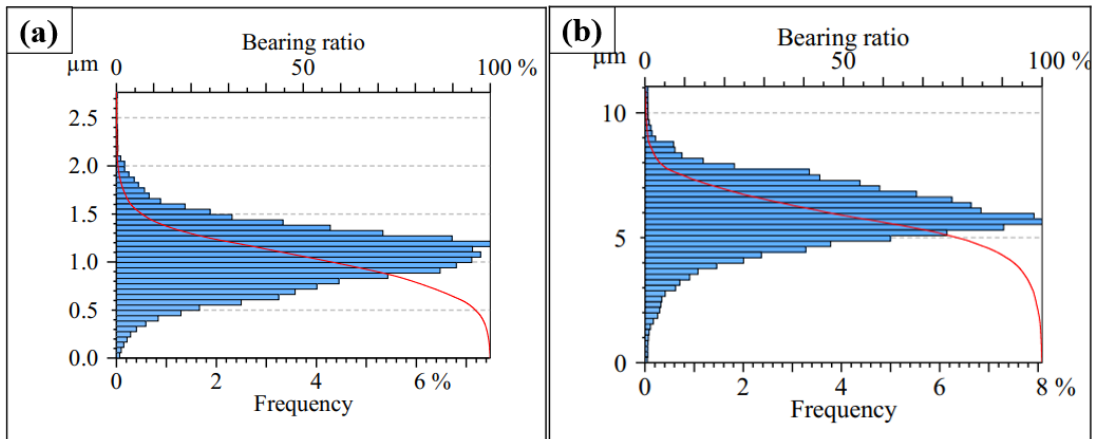
Bilyalı dövme yöntemi ile desenlendiren yüzeylerin tekstür yönleri ve tekstür izotropilerinde değişim gerçekleşmiştir (Şekil 4.5). Referans yüzeyde tekstür izotropisi %88,76 ve sıklıkla görülen açılar; 44°, 25° ve 62° iken, desen verilen yüzeylerde tekstür izotropisi %71,53 ve sıklıkla görülen açılar; 36°, 144° ve 154° olarak yönlenmiştir (Şekil 4.5 c ve d).

#### 4.2.2. Abbot Eğrisi İncelenmeleri

Bilyalı dövme ile yüzey deseni verilen numunenin Abbot eğrileri incelemelerinde; referans yüzey ile kıyaslandığında Sz değerinde ve sıklığında değişim meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 4.6). Referans yüzeyde en sık görülen pürüzlülük değerinin 1,17 µm ve % 7,22 sıklığında iken, desenlendirilen yüzeylerde bu değer 5,177 µm olarak % 8,1 sıklığında olduğu belirlenmiştir.



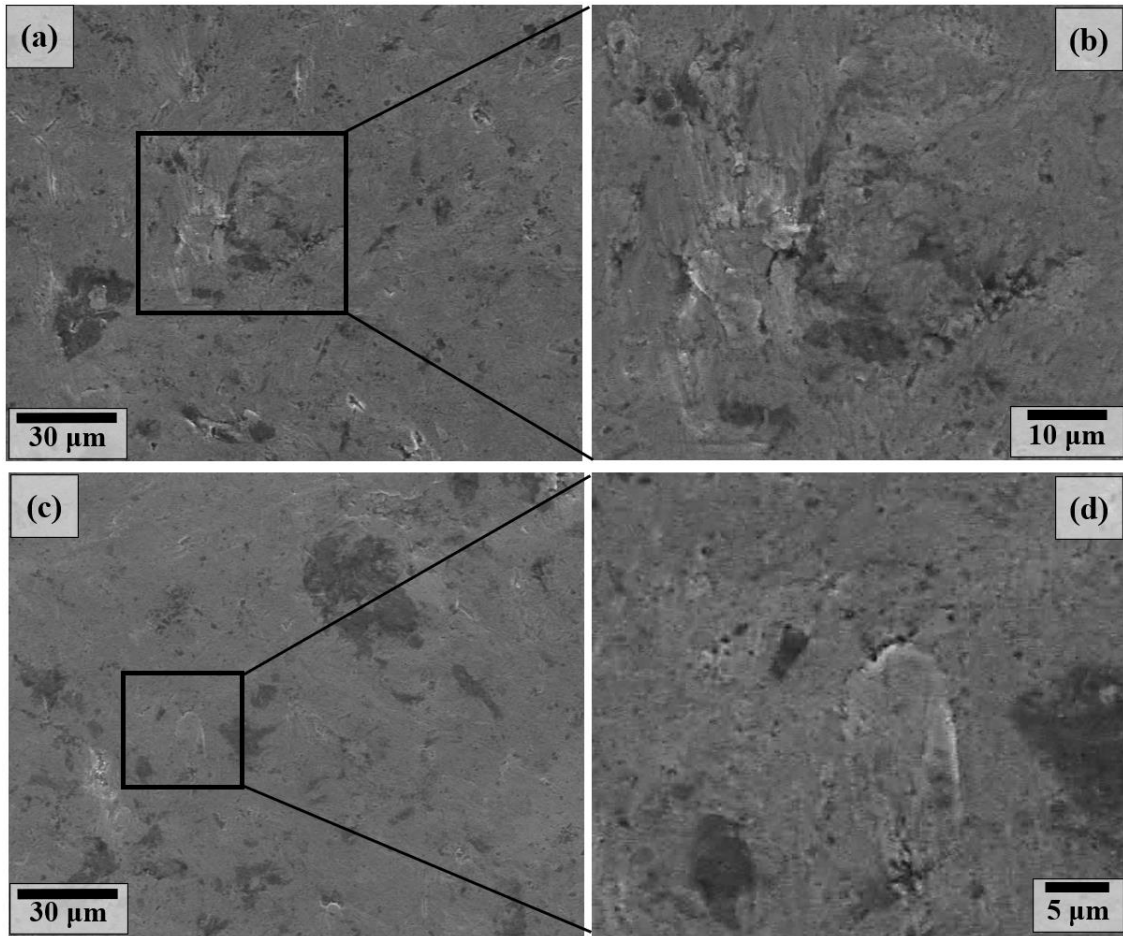
Şekil 4.5. 2 boyutlu yüzey görüntüsü; a) referans yüzey, b) bilyalı dövme sonrası yüzey, tekstür yönleri ve tekstür izotropisi; c) referans yüzey, d) bilyalı dövme sonrası yüzey



Şekil 4.6. Yüzey pürüzlülüğü dağılımı eğrileri; a) Referans yüzey, b) bilyalı dövme sonrası yüzey

### 4.3. Yüzey Morfolojisi İncelemeleri

Bilyalı dövme sonrası toz metalürjik Cp-Ti alaşımının yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımı ile detaylı incelenmiştir (Şekil 4.7). Bilyalı dövme yönteminde kullanılan paslanmaz çelik bilyaların hedef malzeme yüzeyine yüksek hızlarda çarpması nedeni ile yüzeyde plastik deformasyon, mikro-sürme ve mikro-kesme mekanizmaları oluşmuştur.

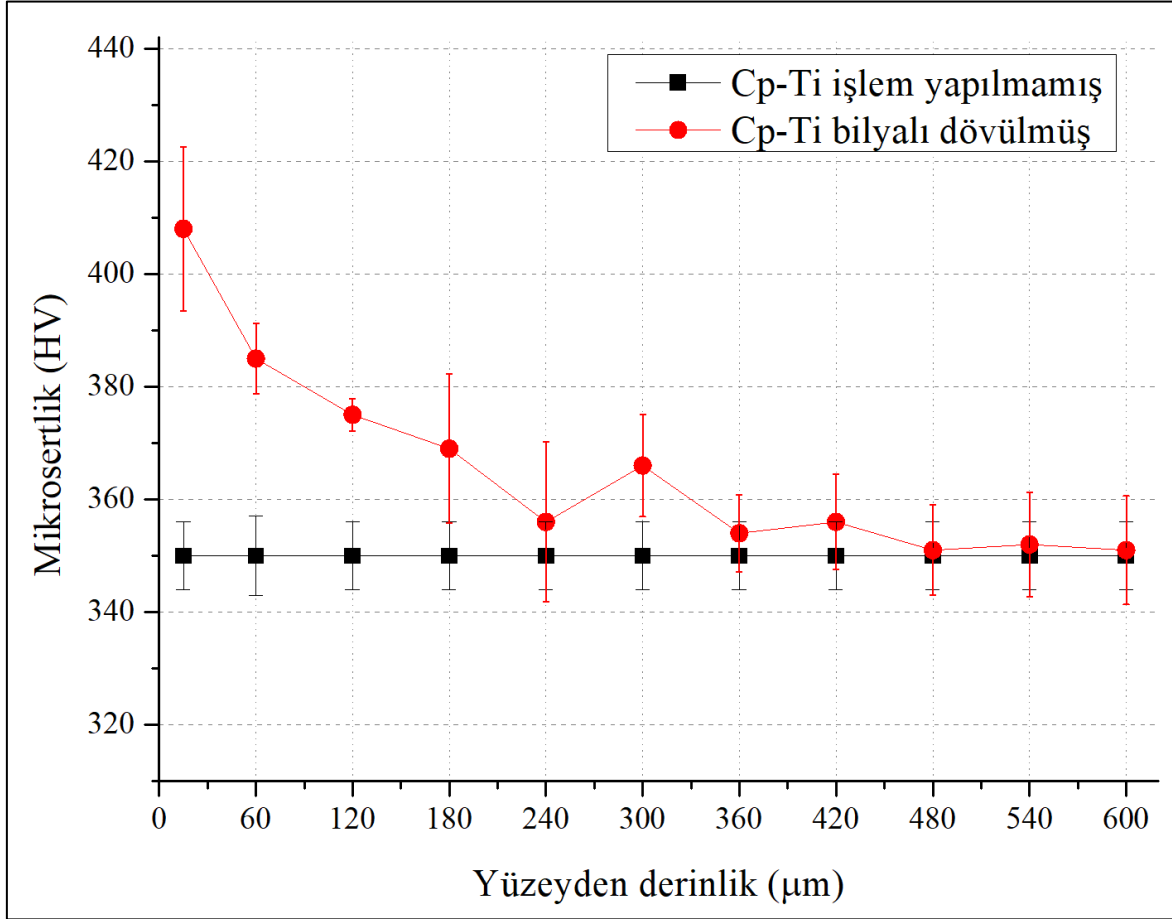


Şekil 4.7. Bilyalı dövme sonrası SEM görüntüleri a) ve c) düşük büyütme, b) ve d) yüksek büyütme

### 4.4. Kesit Sertlik İncelemeleri

Bilyalı dövme işlemleri sonrası Cp-Ti alaşımını yüzey ve yüzey altı sertlik değerlerinde artış gerçekleşmiştir. Bilyalı dövme öncesi 350 HV sertliğe sahip malzemenin bilyalı dövme sonrası yüzey ve yüzeye yakın bölgelerde ortalama 408 HV sertlik değerine sahip olduğu, sertlikte yaklaşık %16 artış elde edildiği belirlenmiştir. Derinliğe bağlı sertlik

değerindeki artışta azalma meydana geldiği (bilyalı dövmenin etkisinin azaldığı), sertlik değerinin yaklaşık 300 mikrondan sonra işlem görmemiş numuneyle eşit olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Kesit-Sertlik incelemeleri

#### 4.5. Aşınma Testleri Sonuçları

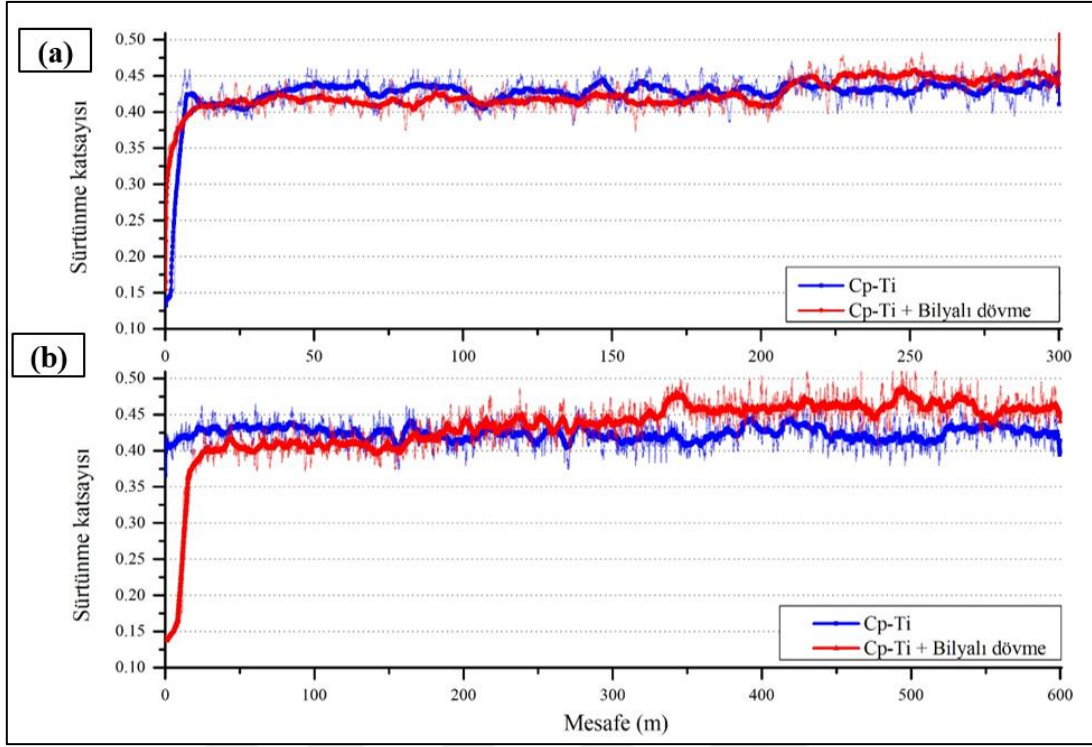
Bilyalı dövme sonrası Cp-Ti alaşımının ortalama alansal yüzey pürüzlülüğü ( $S_a$ ) 0,266  $\mu\text{m}$ ' den 0,998  $\mu\text{m}$ ' ye yükselmiştir. Artan yüzey pürüzlülüğünün Cp-Ti' nin aşınma davranışına etkisini incelemek amacı ile bilyalı dövülen ve referans numuneler sabit koşullar altında (15 N yük, 150 rpm, Ø6 mm alümina bilya karşıt yüzey ve oda şartları altında kuru sürtünme koşullarında) 300 ve 600 m mesafelerinde aşındırılarak sürtünme katsayı değerleri (Şekil 4.9), spesifik aşınma oranı değerleri (Şekil 4.10) ve 3 boyutlu ve 2 boyutlu yüzey topografisi analizleri (Şekil 4.11 ve 4.12) gerçekleştirilmiştir.

Referans ve bilyalı dövülen yüzeylerde, sürtünme katsayısı değerleri, 300 m aşınma mesafesinde gerçekleşen deneylerde sırası ile 0,425 ve 0,423 olarak elde edilmiştir (Şekil 4.9-a). 600 m aşınma mesafesinde gerçekleşen deneylerde ise referans ve bilyalı dövülen yüzeylerde sırası ile sürtünme katsayısı değerlerinin birbirine yakın olduğu (0,423 ve 0,433 olarak) belirlenmiştir (Şekil 4.9-b). Sürtünme katsayısı değerinin referans yüzeyde mesafeye bağlı değişim göstermediği, ancak bilyalı dövülen yüzeyde artan mesafe ile çok az da olsa artış gerçekleştiği belirlenmiştir.

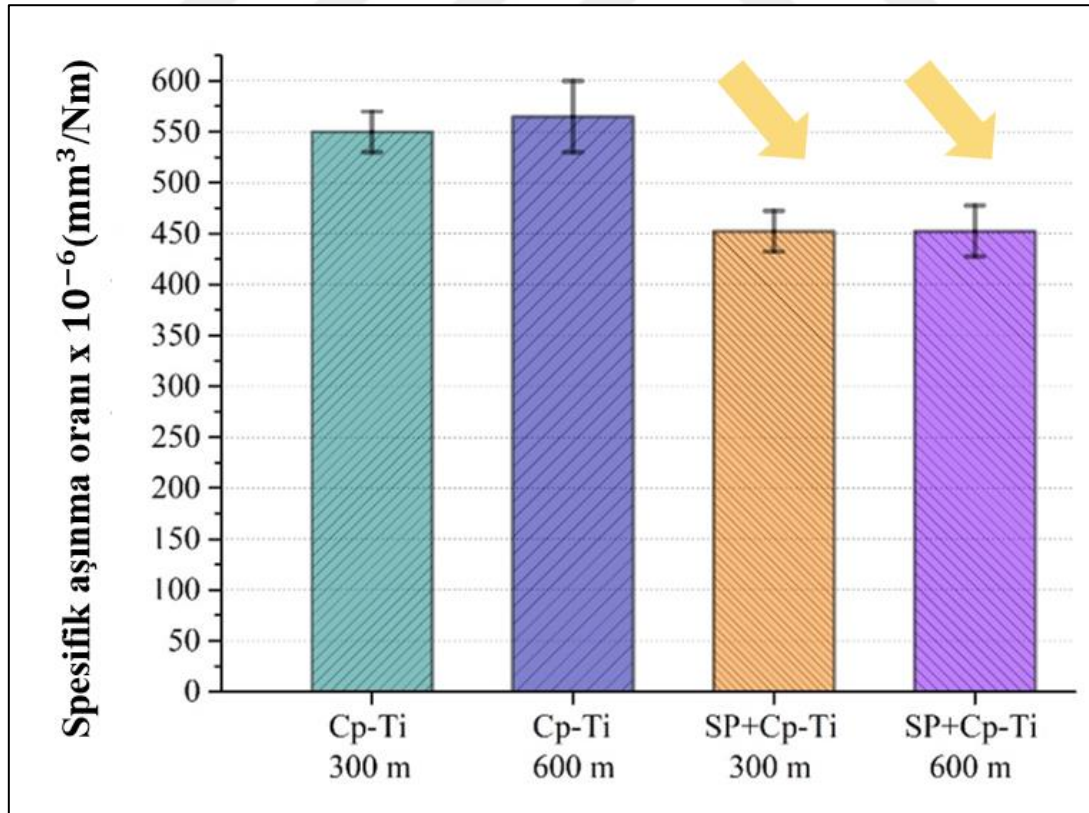
Bilyalı dövülen ve referans yüzey kıyaslandığında bilyalı dövülen yüzeyde sürtünme katsayısının kısa aşınma mesafesinde (300 m) birbirine yakın olduğu, artan mesafe (600 m) ile çok az artış gösterdiği belirlenmiştir. Sürtünme mesafesine bağlı bilyalı dövülen yüzey ve referans yüzeye ait spesifik aşınma oranı değişimleri Şekil 4.10'da detaylı olarak verilmiştir. Spesifik aşınma oranı değerlerinin referans yüzeylerde, bilyalı dövülen yüzeylere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Spesifik aşınma oranları aşınma mesafesinin artması ile referans yüzeyde az miktarda artış göstermekte iken bilyalı dövülen yüzeyde artan aşınma mesafe ile değişim göstermemiştir.

#### **4.6. Aşınma Testleri Sonrası Yüzey Topografisi İncelemeleri**

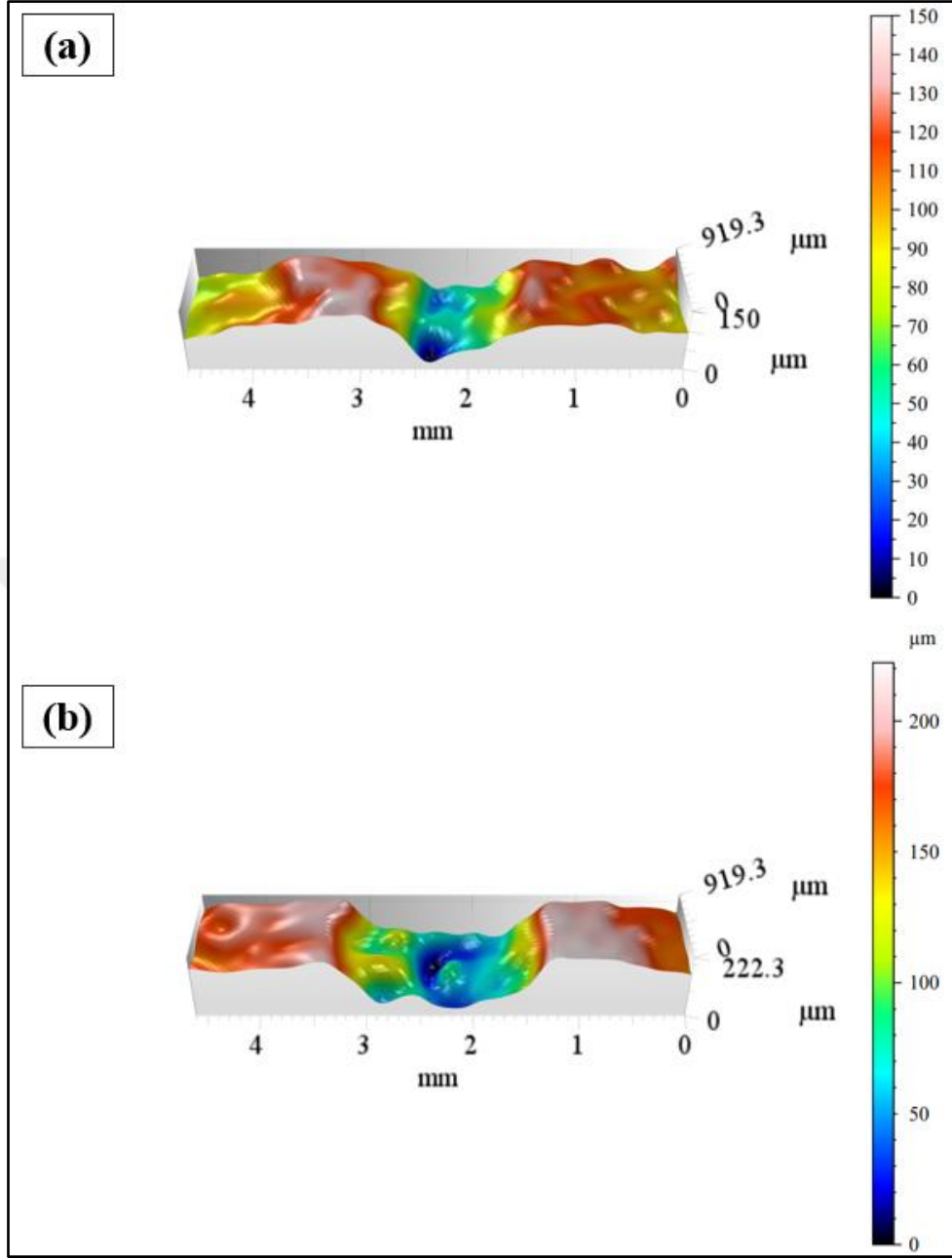
Farklı aşınma mesafelerinde gerçekleştirilen aşınma testleri sonrasında referans ve bilyalı dövülen Cp-Ti alaşımına ait 3 boyutlu yüzey topografisi inceleme sonuçları sırası ile Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmiştir. 3 boyutlu yüzey topografisi analizlerinde koyu mavi renk çukur bölgeler, kırmızı-beyaz renklerle de tepe bölgeler gösterilmektedir. Referans ve bilyalı dövülen yüzeylerde 300 ve 600 m aşınma mesafelerinde 3 boyutlu topografilerinin birbirine yakın değerlerde olduğu, 300 m aşınma mesafesinde skalanın 0 - 150  $\mu\text{m}$  ve 600 m aşınma mesafesine ise 0 – 240  $\mu\text{m}$  aralığında değişim gösterdiği belirlenmiştir. Artan mesafe ile oluşan izin derinliğinin ve genişliğinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca bilyalı dövülen yüzeylerde her iki aşınma mesafesinde oluşan izin derinliğinin daha az olduğu görülmektedir (Şekil 4.13).



Şekil 4.9. Aşınma testleri sonrası sürtünme katsayısı değerleri a) 300 m aşınma mesafesi, b) 600 m aşınma mesafesi



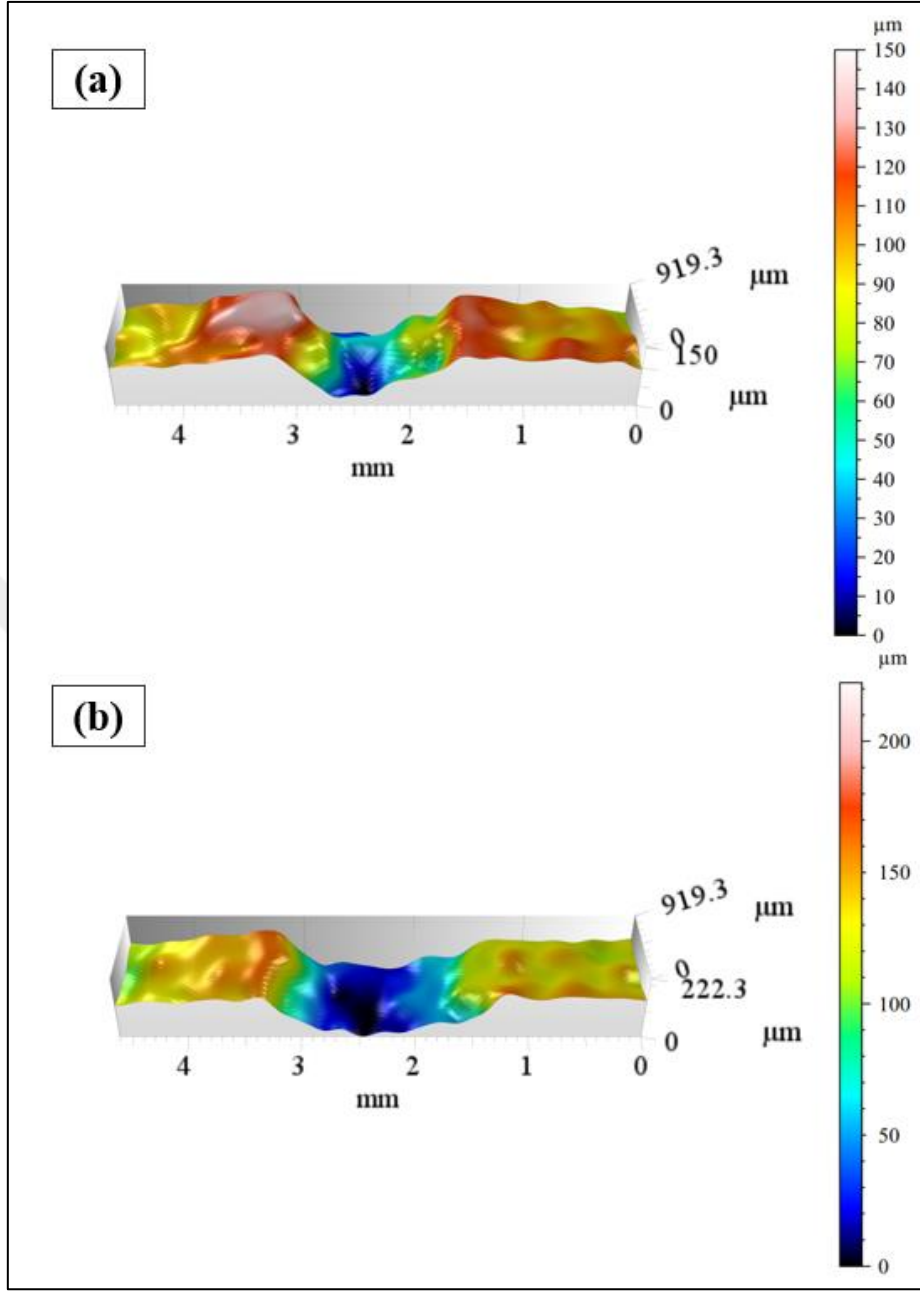
Şekil 4.10. Aşınma testleri sonrası spesifik aşınma oranları



Şekil 4.11. İşlem görmemiş Cp-Ti alaşımının aşınma testleri sonrası yüzey topografisi a) 300 m, b) 600 m

#### 4.7. Aşınma Testleri Sonrası Yüzey Morfolojisi İncelemeleri

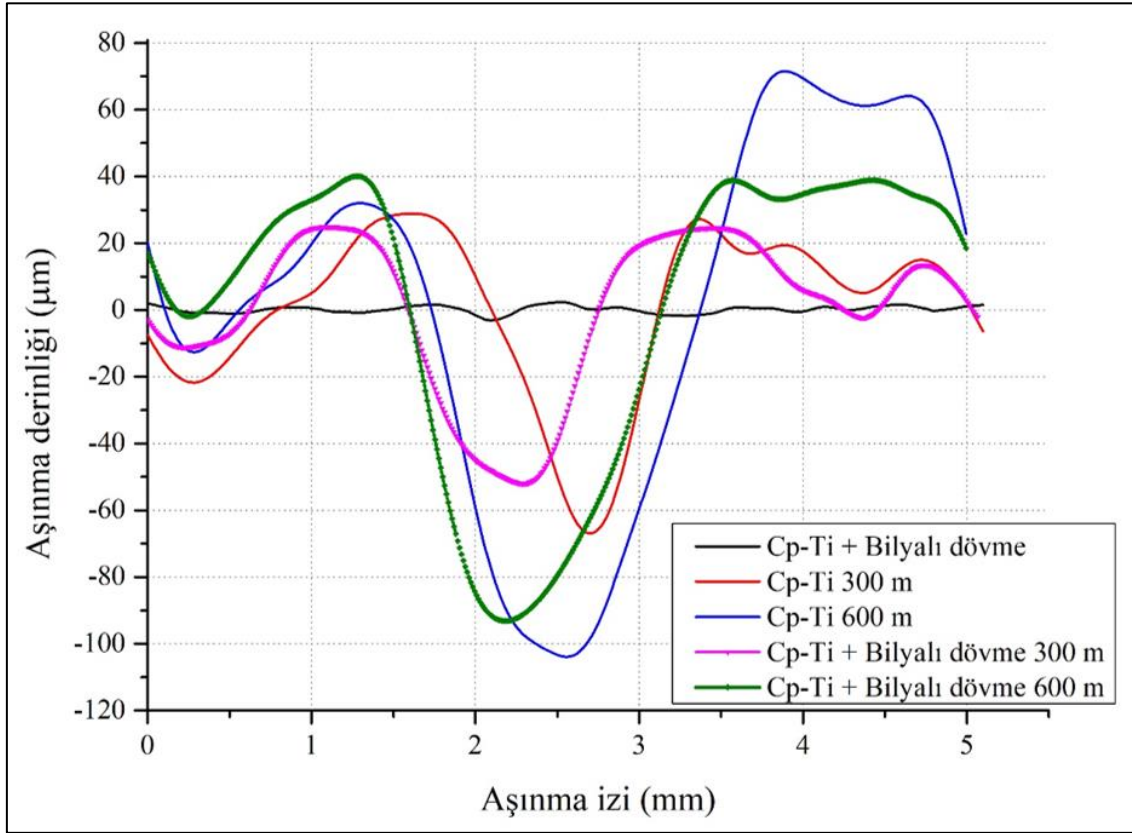
Şekil 4.14 ve 4.15’ de 600 m kayma mesafesinde gerçekleştirilen aşınma testleri sonrası referans ve bilyalı dövülen yüzeylerin farklı büyütmelerde SEM görüntüleri verilmiştir. Her iki yüzeyde plastik deformasyon, mikro-sürme, mikro-kesme ve oksidatif aşınma mekanizmaları ile daha yüksek oranda adhezif aşınma davranışının hâkim olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.12. Bilyalı dövülen Cp-Ti alaışımının aşınma testleri sonrası yüzey topografisi a) 300 m, b) 600 m

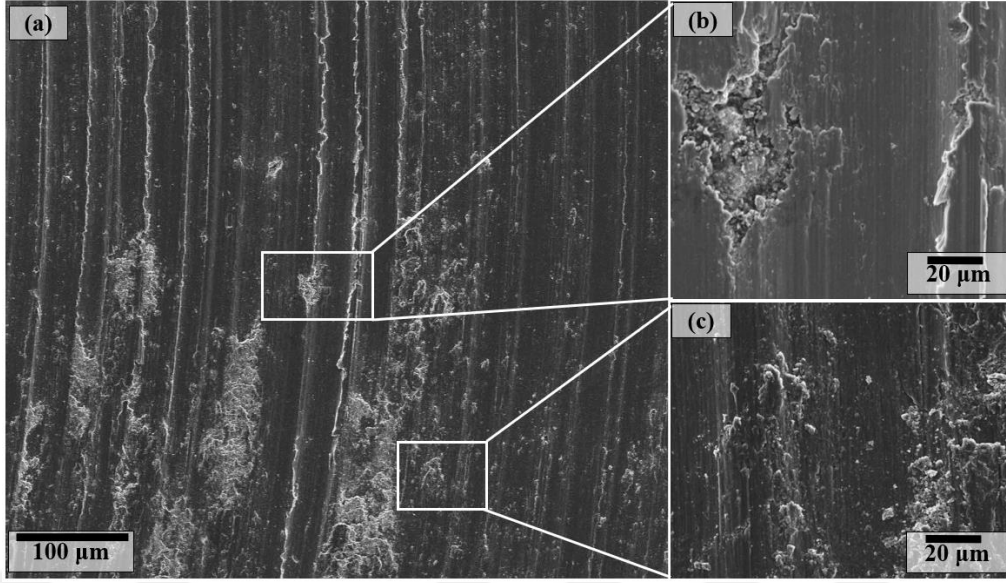
Aynı tribolojik test koşulları altında, işlem görmemiş (Şekil 4.14) ve bilyalı dövülmüş (Şekil 4.15) yüzeylerin baskın aşınma mekanizmaları belirli benzerlikler gösterdiği belirlenmiştir. Her iki yüzeyde de aşınma, oksidasyon, adezyon ve üç cisimli aşınma gözlemlenmiştir. Temas sırasında, yüzeyler önemli ölçüde plastik deformasyona uğramıştır. Pürüzsüz yüzeylerden, Ti matrisi çoğunlukla mikro kesme (Şekil 4.14-a) ve mikro sürme (Şekil 4.14-b) yoluyla uzaklaştırılmıştır. Ti bakımından zengin oksitler, her

iki yüzeyde de sürtünme sırasında oluşan ısıdan dolayı bir tribotabaka oluşturmuştur (Şekil 4.14-c, Şekil 4.15-c).

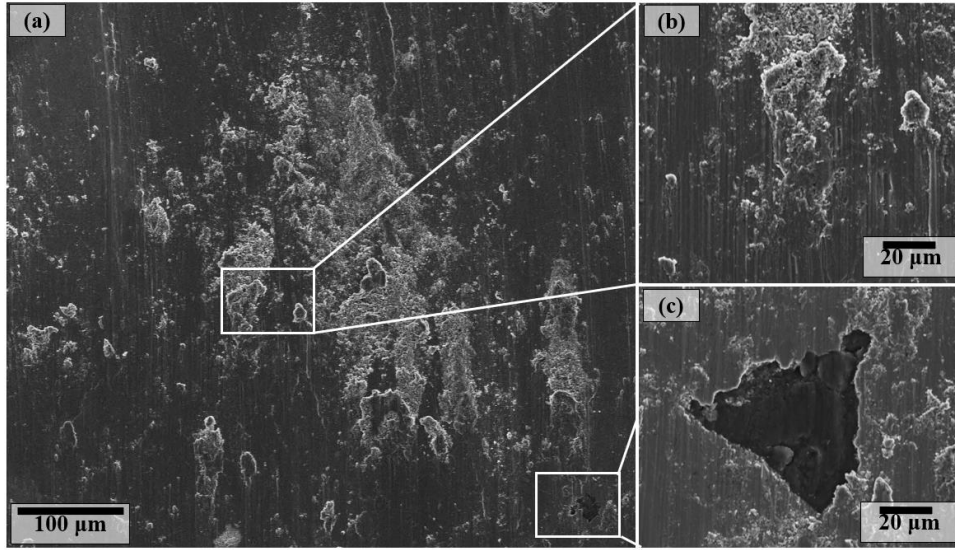


Şekil 4.13. Aşınma izi – derinlik ilişkisi

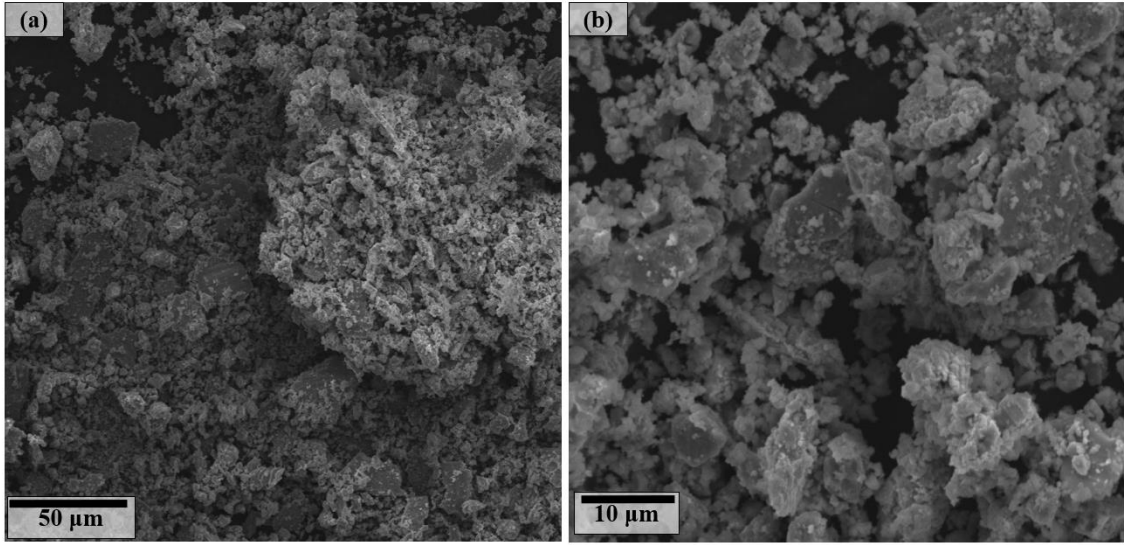
Ti bakımından zengin oksitler, her iki yüzeyde de sürtünme sırasında oluşan ısıdan dolayı bir tribotabaka oluşturmuştur (Şekil 4.14-c, Şekil 4.15-c). Bunun aksine, bilyalı dövülmüş yüzeylerden malzeme, mikro kesme olmaksızın mikro sürme mekanizması ile aşınmıştır. Bilyalı dövülmüş yüzeylerde daha fazla oksit adacıkları oluşmuştur, bu da dövülmemiş yüzeylere kıyasla daha yoğun bir aşınma tabakasının oluşumuna işaret etmektedir. Bu oksit adacıklarının parçalanması (Şekil 4.15-c) ile aşınma artıkları parçacıklar üretilmiş (Şekil 4.16); mikro çizikler (Şekil 4.14-a, -b), test sırasında tribolojik sistemin ara yüzünde aşınan partiküllerin kayması ve yuvarlanması ile üç elemanlı aşınma görülmüştür. Aşınma kalıntısı parçacıklarının EDS spektrumu (Şekil 4.16), yüzey oksidasyonu ve oksit adalarının oluşumunu kanıtlayan net O ve Ti pikleri göstermiştir.



Şekil 4.14. Referans Cp-Ti alaşımının 600 mm aşınma mesafesi sonrası yüzey morfolojisi a) Düşük büyütmede, b) ve c) Yüksek büyütmede görüntüleri



Şekil 4.15. Bilyalı dövme sonrası Cp-Ti alaşımının 600 mm aşınma mesafesi sonrası yüzey morfolojisi a) Düşük büyütmede, b) ve c) Yüksek büyütmede görüntüleri



Şekil 4.16. Aşınma testleri sonrası oluşan partiküller a) Referans yüzey, b) Bilyalı dövülen yüzey

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında toz metalurjisi yöntemi ile Cp-Ti alaşımı numuneler üretilmiş ve bilyalı dövme yöntemi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bilyalı dövme sonrası Cp-Ti numunelerin yüzeylerinde oluşturulan yüzey topografisi ve yüzey morfolojisi detaylı olarak incelenmiştir. Numunelerin kesit mikroyapı ve sertlik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bilyalı dövme sonrası numunelerin kuru sürtünme aşınma davranışı, aşınma sonrası yüzey morfolojisi ve topografisi detaylı olarak incelenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir:

- Cp-Ti alaşımının yüzeyinde bilyalı dövme yönetimi ile yüzey pürüzlülüğünün oluştuğu, referans yüzeye göre Sp, Sv, Sz, Sa ve Sq değerlerinde artış meydana geldiği,
- Bilyalı dövülen Cp-Ti alaşımının, Ssk değerinden negatif yönde ve Sku değerinde ise pozitif yönde artış gerçekleştiği,
- Referans yüzeyde tekstür izotropisi %88,76 ve sıklıkla görülen açılar; 44°, 25° ve 62° iken bilyalı dövülen yüzeylerde tekstür izotropisi %71,53 ve sıklıkla görülen açılar; 36°, 144° ve 154° olarak yönlendiği,
- Bilyalı dövülen yüzeylerde en fazla oluşan pürüzlülük değerinin (Sz) 5,177 µm olarak ve % 8,1 sıklığında oluştuğu,
- Bilyalı dövme ile yüksek hızda çarpan bilyaların oluşturduğu plastik deformasyon, mikro sürme ve mikro kesme mekanizmalarının oluştuğu,
- Bilyalı dövülen Cp-Ti alaşımı ile referans yüzeyin benzer aşınma şartları altında yakın değerlerde sürtünme katsayısına sahip olduğu,
- Aşınma izinin derinliğinin her iki kayma mesafesinde (300 m ve 600 m) bilyalı dövülen Cp-Ti alaşımında daha az olduğu,
- 3 boyutlu yüzey topografisi incelemelerinde hacim kaybının bilyalı dövülen Cp-Ti alaşımında daha az olduğu,
- Spesifik aşınma oranının referans numuneye göre her iki kayma mesafesinde (300 m ve 600 m) bilyalı dövülen Cp-Ti alaşımında daha az olduğu ve bu değer bilyalı dövülen Cp-Ti alaşımında her iki mesafede birbirine yakın olduğu,
- Bilyalı dövülen Cp-Ti alaşımı ile referans numunelerde aşınma testleri sonrası yüzeylerde plastik deformasyon, mikro-kesme, mikro-sürme ve oksidatif aşınma mekanizmaları belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Avcu, E. (2018). Bilyalı Dövme Parametrelerinin AA7075 Alüminyum Alaşımının Yüzey Altı Özelliklerine Etkileri, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(4), 741-52.
- Avcu, Y. Y., Gonul, B., Yetik, O., Sonmez, F., Cengiz, A., Guney, M. and Avcu, E., (2021). Modification of Surface and Subsurface Properties of AA1050 Alloy by Shot Peening, *Materials*, 14(21), 6575.
- Bao, L., Li, K., Zheng, J., Zhang, Y., Zhan, K., Yang, Z., Zhao, B. and Ji, V. (2022). Surface Characteristics And Stress Corrosion Behavior of AA 7075-T6 Aluminum Alloys After Different Shot Peening Processes, *Surface and Coatings Technology*, 440, 128481.
- Bozkurt, Y. B., Kovacı, H., Yetim, A. F. and Çelik, A., (2022). Tribocorrosion Properties And Mechanism of a Shot Peened AISI 4140 Low-alloy Steel, *Surface and Coatings Technology*, 440, 128444.
- Çelik, İ. (2015). Biyomedikal Sektöründe Kullanılan Titanyum ve Alaşımlarının Tribolojik Özelliklerini İyileştirme Yöntemler, *Ordu Üniv. Bil. Tek. Derg.*, 5(1), 67-75.
- Dülek, E., Orman, Ş., Karataş, Ç. and Sarıtaş, S., (2005). Bilyalı Dövme Parametrelerinin Ç1020 Çeliğinin Yorulma Dayanımına Etkisi ve Oluşan Kalıcı Gerilmenin Katman Kaldırma Yöntemi ile Araştırılması, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 20(3).
- Efe, Y., Karademir, İ., Husem, F., Maleki, E., Karimbaev, R., Amanov, A. and Unal, O., (2020). Enhancement in Microstructural and Mechanical Performance of AA7075 Aluminum Alloy via Severe Shot Peening and Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification, *Applied Surface Science*, 528, 146922. DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.146922
- Fridrici, V., Fouvry, S. and Kapsa, Ph., (2001). Effect of Shot Peening on the Fretting Wear of Ti-6Al-4V, *Wear*, 250, 642-649.
- Ganesh, B. K. C., Ramanaiah, N. and Chandrasekhar Rao, P. V., (2012). Effect of Surface Treatment on Tribological Behavior of Ti-6Al-4V Implant Alloy, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 11(7), 735-43. DOI: 10.4236/jmmce.2012.117061
- Ganesh, B. K. C., Sha, W., Ramanaiah, N. and Krishnaiah, A., (2014). Effect of Shotpeening on Sliding Wear and Tensile Behavior of Titanium İmplant Alloys, *Materials & Design (1980-2015)*, 56, 480-486. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.11.052

- Gobber, F. S., Fracchia, E., Spotorno, R., Fais, A. and Manfredi, D., (2021). Wear and Corrosion Resistance of AlSi10Mg-CP-Ti Metal-Metal Composite Materials Produced by Electro-Sinter-Forging, *Materials (Basel)*, 14(22), 6761. DOI: 10.3390/ma14226761
- Gopi, R., Saravanan, I., Devaraju, A. and Ganesh, B.L., (2020). Investigation of Shot Peening Process on Stainless Steel and Its Effects for Tribological Applications, *Materials Today: Proceedings*, 22(3), 580-84. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.08.215
- Han, X., Zhang, Z., Wang, B., Thrush, S.J., Barber, G.C. and Qiu, F. (2022). Microstructures, Compressive Residual Stress, Friction Behavior, and Wear Mechanism of Quenched and Tempered Shot Peened Medium Carbon Steel, *Wear*, 488-489, 204131. DOI: 10.1016/j.wear.2021.204131
- İlçe Bahadır, M. (2022). Bilyalı Dövme ile Ti6Al4v Alaşımına Özel Yüzey Desenlerinin İşlenmesi ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 747185.
- Lin, Q., Liu, H., Zhu, C., Chen, D. and Zhou, S. (2020). Effects of Different Shot Peening Parameters on Residual Stress, Surface Roughness and Cell Size, *Surface and Coatings Technology*, 398, 126054. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126054
- Liu, Y. G., Li, M. Q. and Liu, H. J., (2017). Nanostructure and surface roughness in the processed surface layer of Ti-6Al-4V via shot peening, *Materials Characterization*, 123(January), 83-90. DOI: 10.1016/j.matchar.2016.11.020
- Moradi, A., Heidari, A., Amini, K., Aghadavoudi, F. and Abedinzadeh, R., (2022). Taguchi Analysis of Shot Peening Parameters for Surface Hardness, Wear Resistance, Roughness and Residual Stress in Ti-6Al-4V Alloy, *Kovove Materialy-Metallic Materials*, 60(4), 267-279. DOI: 10.31577/km.2022.4.267
- Peral, L. B., Ebrahimzadeh, P., Gutiérrez, A. and Fernández-Pariente, I., (2023). Effect of Tempering Temperature and Grain Refinement Induced by Severe Shot Peening on the Corrosion Behavior of a Low Alloy Steel, *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 932(March), 117207. DOI: 10.1016/j.jelechem.2023.117207
- Rajesh, A., and Ashoka Varthanan, P. (2020). Investigation of Fatigue Strength of Aluminium 2024-T3 Subjected to Shot Peening Process by Ni Phos, *Materials Research Express*, 7(1), DOI: 10.1063/5.0108072
- Sedlaček, M., Gregorčič, P. and Podgornik, B., (2016). Use of the Roughness Parameters Ssk and Sku to Control Friction—A Method for Designing Surface Texturing, *Tribology Transactions*, 60(2), 260-66. DOI: 10.1080/10402004.2016.1159358
- Taşlıçukur Öztürk, Z. and Sezer, O., (2021). Bilyalı Dövme İşleminde Sonra Ti6Al4V Alaşımının Tribolojik Özellikleri, *Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*(219), 96-106

- Toparli, M. B., (2022). Bilyalı dövme işlemi sonrası Tungsten Karbür-Kobalt (WC-Co) Sertmetal Malzemelerin Yorulma Performansının İncelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(1), 269-82. DOI: 10.17341/gazimmfd.894192
- Trung, P.Q., Khun, N.W. and Butler, D.L. (2016). 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*, 4(4). DOI: 10.1088/2051-672X/4/4/045001
- Unal, O., Maleki, E., Karademir, İ., Husem, F., Efe, Y. and Das, T. (2022). Effects of Conventional Shot Peening, Severe Shot Peening, Re-shot Peening and Precised Grinding Operations on Fatigue Performance of AISI 1050 Railway Axle Steel, *International Journal of Fatigue*, 155(February), 106613. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106613
- Unal, O. and Varol, R. (2014). Almen Intensity Effect on Microstructure and Mechanical Properties of Low Carbon Steel Subjected to Severe Shot Peening, *Applied Surface Science*, 290(January), 40-47. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.10.184
- Walczak, M. and Szala, M., (2021). Effect of Shot Peening on the Surface Properties, Corrosion and Wear Performance of 17-4PH Steel Produced by DMLS Additive Manufacturing, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 21(4), 1-20. DOI: 10.1007/s43452-021-00306-3
- Wen, M., Wen, C., Hodgson, P.D. and Li, Y.C. (2011). Tribological Behaviour of Pure Ti with a Nanocrystalline Surface Layer Under Different Loads, *Tribology Letters*, 45(1), 59-66. DOI: 10.1007/s11249-011-9862-y
- Wu, J., Liu, H., Wei, P., Zhu, C. and Lin, Q. (2020). Effect of Shot Peening Coverage on Hardness, Residual Stress and Surface Morphology of Carburized Rollers, *Surface and Coatings Technology*, 384(February), 125273. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2019.125273
- Wu, Y., Kang, Y. and Chen, Y. (2022). Effect of Shot Peening on the Corrosion and Wear Resistance of 2205 Duplex Stainless Steel, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32(7), 3186-3201. DOI: 10.1007/s11665-022-07310-5
- Xiao, J., Zhao, Z., Xie, X., Liang, Z., Liu, Z., Liu, X. and Tang, R. (2022). Micromorphology, Microstructure, and Wear Behavior of AISI 1045 Steels Irregular Texture Fabricated by Ultrasonic Strengthening Grinding Process, *Metals*, 12(6), 1027. DOI: 10.3390/met12061027
- Yetik, O., Yıldırım Avcu, Y., Güney, M. and Avcu, E. (2021). Cam küre ile dövülen AA7075 alaşımının mekanik ve yüzey özelliklerinin incelenmesi. In *III. International Turkic World Congress on Science and Engineering*, Niğde, Türkiye, 14-15 Haziran 2021.

- Yıldıran Avcu, Y. (2019). Ti6Al4V Titanyum Alaşımın Bilyalı Dövme Sonrası Aşınma Davranışının İncelenmesi. Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 575805.
- Yıldıran Avcu, Y., Yetik, O., Guney, M., Iakovakis, E., Sinmazcelik, T. and Avcu, E. (2020). Surface, Subsurface and Tribological Properties of Ti6Al4V Alloy Shot Peened under Different Parameters, *Materials*, 13(19), 4363. DOI: 10.3390/ma13194363
- Yıldıran Avcu, Y., Yetik, O., Guney, M., Sinmazçelik, T. and Avcu, E. (2021). Tailoring Surface Morphology And Topography Of Shot-Peened Ti6al4v Via Grit Blasting, *MaterialS in Tehnologies*, 55(5), 625-628. DOI: 10.17222/mit.2021.032
- Zhan, K., Zhang, Y., Zhao, S., Yang, Z., Zhao, B. and Ji, V. (2021). Tribological Behavior and Corrosion Resistance of S30432 Steel after Different Shot Peening Processes, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31, 1250-1258. DOI: 10.1007/s11665-021-06249-3
- Zhou, J., Sun, Y., Huang, S., Sheng, J., Li, J. and Agyenim-Boateng, E. (2019). Effect of Laser Peening on Friction and Wear Behavior of Medical Ti6Al4V Alloy, *Optics & Laser Technology*, 109(January), 263-69. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.08.005
- Zhu, L., Guan, Y., Wang, Y., Xie, Z., Lin, J. and Zhai, J. (2017). Influence of Process Parameters of Ultrasonic Shot Peening on Surface Roughness and Hydrophilicity of Pure Titanium, *Surface and Coatings Technology*, 317(May), 38-53. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.03.044

## KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

**Özkılınç A.**, Yıldırım Avcu Y., Yamaoğlu R., Avcu E. (2022), Investigation of Dry Friction Behavior of Surface Textured Powder Metallurgical Commercially Pure Titanium Alloy. *Al Farabi 4<sup>th</sup> International Congress on Applied Sciences*, Erzurum, Türkiye, 19-21 Ağustos 2022.

Yıldırım Avcu Y., **Özkılınç A.**, Güney M., Avcu E. (2022), Obtaining Patterned Surface Topographies and Analyzing Surface Properties in Powder Metallurgical Pure Titanium Alloy. *IV Uluslararası Ankara Multidisiplinler Çalışmalar Kongresi*, Ankara, Türkiye, 29-31 Temmuz 2022.



## ÖZGEÇMİŞ

Ayşe Öztürk, ilk ve orta öğrenimini İstanbul'da, lise öğrenimini Kocaeli'nde tamamladı. 2013 yılında Kocaeli Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2012-2013 yılları arasında İzgen Mühendislikte Saha ve Teklif mühendisi olarak çalıştı. 2014 yılında Avusturya-Viyana'ya Almanca dil eğitimi görmeye gitti. 2018 yılında CMS Cam Makinaları firmasında Ar-Ge merkezi süreç yönetimi ve Proje yönetimi görevinde 3,5 sene çalıştı. 2021 yılından itibaren test, laboratuvar ve belgelendirme hizmeti veren QVV Mühendislik bünyesinde İş Geliştirme Yöneticisi olarak mesleğine devam etmektedir.

