

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

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BİLYALI DÖVME İŞLEMİNDE BİLYA ÇARPMA AÇISI VE  
BİLYA BOYUTUNUN AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ  
YÜZEY VE YÜZEY ALTI ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**AHMET BURAK ÇUBUK**

**KOCAELİ 2020**

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

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

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BİLYALI DÖVME İŞLEMİNDE BİLYA ÇARPMA AÇISI VE**  
**BİLYA BOYUTUNUN AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ**  
**YÜZEY VE YÜZEY ALTI ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

**AHMET BURAK ÇUBUK**

**Doç. Dr. Egemen Avcu**  
**Danışman, Kocaeli Üniversitesi**  
**Prof. Dr. Tamer Sınmazçelik**  
**Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi**  
**Prof. Dr. Şenol Yılmaz**  
**Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi**

  
.....  
  
.....  
  
.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 06.02.2020**

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bilyalı dövme metalik malzemelerin yüzeylerine genellikle çelikten üretilen bilyaların basınçlı hava yardımı ile hızlandırılarak tekrarlı olarak çarptırılması ile gerçekleştirilen mekanik bir yüzey işlemidir. Bilyalı dövme ile amaçlanan genellikle malzeme yüzeyinde kalıntı basma gerilmeleri oluşturarak dinamik yüklemeler altında oluşabilecek çatlakların engellenmesi ve çatlak ilerlemesinin yavaşlatılarak, malzemelerin yorulma dayanımlarının artırılmasıdır. Alüminyum alaşımları; yüksek mukavemet özelliği, iyi korozyon direnci, kolay işlenebilirliği, yüksek yorulma dayanımına sahip olmaları nedeni ile otomotiv ve havacılık endüstrilerinde yakıt tüketimini ve üretim maliyetlerini azaltmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Literatür çalışmaları incelendiğinde, alüminyum alaşımlarının bilyalı dövme işlemi ile yorulma dayanımlarının iyileştirilmesine yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Bununla birlikte bilyalı dövme işleminin ve işlem parametrelerinin alüminyum alaşımlarının yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkileri üzerine sınırlı sayıda çalışma yer almaktadır. Tez çalışmasında farklı bilyalı dövme parametrelerinde (bilya çarpma açısı ve bilya boyutu) işlem görmüş AA7075-T6 alüminyum alaşımının yüzey ve yüzey altı özelliklerindeki (yüzey pürüzlülüğü, yüzey morfolojisi, yüzey altı sertlik değişimi) değişimleri detaylı bir şekilde incelenmesi amaçlanmıştır.

Yüksek lisans eğitimimin başlamasından tezin son aşamasına gelene kadar hoşgörüsü, desteği ve bilgisiyle yol gösteren, yoğun iş temposu arasında çok değerli vakitlerini ayırarak bana destek olan, değerli danışmanım Doç. Dr. Egemen AVCU'ya sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin deney çalışmalarına önderlik eden ve tezimi okuyup gereken düzeltmeleri yapmamda yardımcı olan, Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Araştırma Görevlisi Dr. Yasemin YILDIRAN AVCU'ya teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans eğitimine birlikte başladığım, tez çalışmamda büyük emeği olan arkadaşım Okan YETİK'e sabrı ve ilgisi için çok teşekkür ederim. Numunelerin metalografik olarak hazırlanması ve bilyalı dövme çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Berkay GÖNÜL'e çok teşekkür ederim.

2017/049 numaralı projeye destek veren Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimine, SEM incelemelerindeki katkılarından dolayı Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Araştırma Görevlisi Dr. Fatih Erdem BAŞTAN'a ve Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Araştırma ve Uygulama Laboratuvarı ekibine teşekkürlerimi sunarım.

Beni yetiştiren ve bugünlere gelmemi sağlayan annemi rahmetle anıyorum. Ayrıca maddi ve manevi her konuda desteklerini esirgemeyen, cesaret veren babam Nurettin ÇUBUK'a, abim Ömer Faruk ÇUBUK'a, teyzem Reyhan SARGIN'a ve bütün aileme, arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLOLAR DİZİNİ .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT .....	x
GİRİŞ .....	1
1. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI .....	3
1.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Genel Özellikleri .....	3
1.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması .....	4
1.2.1. Dökme alüminyum alaşımları.....	5
1.2.2. Dövme alüminyum alaşımları.....	6
1.3. AA7075-T6 Alaşımının Özellikleri .....	8
2. BİLYALI DÖVME .....	10
2.1. Bilyalı Dövme İşlemi ve Amaçları.....	10
2.2. Bilyalı Dövme Makinaları.....	13
2.3. Bilyaların Sınıflandırılması .....	15
2.4. Bilyalı Dövme Parametreleri.....	16
2.4.1. Almen şiddeti .....	18
2.4.2. Yüzey örtme oranı.....	19
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	21
3.1. Alüminyum Alaşımlarının Bilyalı Dövme İşlemi .....	21
4. MALZEME VE YÖNTEM.....	33
4.1. Malzeme .....	33
4.1.1. AA7075-T6 numuneleri.....	33
4.1.2. Paslanmaz çelik bilya özellikleri .....	33
4.2. Yöntem .....	35
4.2.1. Numunelerin metalografik olarak hazırlanması .....	35
4.2.2. Bilyalı dövme cihazı ve işlemleri .....	36
4.2.3. Bilyalı dövme öncesi ve sonrası kütle kaybı .....	39
4.2.4. Bilyalı dövülen AA7075-T6 alaşımı numunelerin yüzey ve yüzey altı mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi .....	40
4.2.4.1. SEM incelemeleri .....	40
4.2.4.2. Optik mikroskop incelemeleri .....	41
4.2.4.3. Mikro sertlik ölçümleri .....	41
4.2.4.4. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü.....	42
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE İNCELENMESİ.....	44
5.1. Kütle Kaybının Bilyalı Dövme Parametrelerine Bağlı Değişimi.....	44
5.2. Yüzey Pürüzlülüğünün Bilyalı Dövme Parametrelerine Bağlı Değişimi .....	46
5.3. Yüzey Altı Mikrosertlik Değerinin Bilyalı Dövme Parametrelerine Bağlı Değişimi.....	48

5.4. Yüzey Altı Mikroyapısının Bilyalı Dövme Parametrelerine Bağlı Değişimi .....	51
5.5. SEM Çalışmaları .....	53
5.5.1. Bilya çarpma açısının yüzey morfolojisine etkisi .....	53
5.5.2. Bilya boyutunun yüzey morfolojisine etkisi .....	55
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	59
KAYNAKLAR .....	61
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	67
ÖZGEÇMİŞ .....	68



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Alüminyumun özellikleri .....	4
Şekil 1.2.	Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması.....	6
Şekil 1.3.	Isıl işlem çevrim grafiği .....	9
Şekil 2.1.	(a) Bilyalı dövme işlemi şematik gösterimi ve (b) Bilyalı dövme işlemi sonrası oluşan plastik deformasyonu.....	10
Şekil 2.2.	Bilyalı dövme işlemi .....	11
Şekil 2.3.	Bilya çeşitleri a) çelik bilya b) cam bilya.....	11
Şekil 2.4.	Havacılıkta kullanılan iniş takımı dişlisi.....	12
Şekil 2.5.	Formula 1 aracı.....	12
Şekil 2.6.	Bilyalı dövme makinaların sınıflandırılması.....	13
Şekil 2.7.	Bilyalı dövme makinası.....	14
Şekil 2.8.	Otomatik bilyalı dövme makinası .....	14
Şekil 2.9.	Bilya tipleri ve sınıflandırılması.....	15
Şekil 2.10.	Çelik bilyaların sınıflandırılması.....	16
Şekil 2.11.	Bilya çarpma açısı .....	18
Şekil 2.12.	Almen testi ölçüm cihazı ve standart numuneler .....	18
Şekil 2.13.	Almen testi ölçümü a) cihaz ve standart numunelerin şematik gösterimi b) doyum noktası eğrisi.....	19
Şekil 2.14.	Yüzey örtme oranı yüzdeleri .....	20
Şekil 3.1.	SEM fotoğrafları: a) dövülmemiş b) optimal c) aşırı dövülmüş .....	21
Şekil 3.2.	SEM gözlemleri a) az dövülmüş (65 s), b) optimal (130 s), c) aşırı dövülmüş (390 s).....	22
Şekil 3.3.	Yağ jetiyle dövülmüş ve dövülmemiş yüzeyleri gösteren optik görüntüleri: a) dövülmemiş AA6061-T4 (b) dövülmüş AA6061 T4, dövme mesafesi 25 mm ve (c) dövülmüş AA6061-T4, dövme mesafesi 40 mm.....	23
Şekil 3.4.	Dövme mesafesinin kütle kayıp oranına etkisi .....	23
Şekil 3.5.	$R_a$ ve $R_z$ pürüzlülük değerleri ve topografi görüntüleri.....	24
Şekil 3.6.	Bilya boyutu ve püskürtme basıncının yüzey pürüzlülüğüne etkisi .....	24
Şekil 3.7.	Bağlantı noktasının yüksek enerjili bilyalı dövme prosesi.....	25
Şekil 3.8.	Farklı basınç değerlerinin 3 boyutlu yüzey topografyasına etkileri a) 15 MPa, b) 20 MPa, c) 25 MPa, d) 30 MPa .....	25
Şekil 3.9.	AA7075 alüminyum alaşımının SEM morfolojileri a) dövülmemiş b) 35 s, c) 70 s, d) 105 s e) 140 s .....	26
Şekil 3.10.	Numunenin 30° çarpma açısında erozyon yüzeyi .....	27
Şekil 3.11.	Sonlu elemanlar yönteminin simülasyonu a) Tek çarpma modelinin geometrisi b) Belirtilen çarpma açısı ve hızda alüminyum alaşımını etkileyen tek atış .....	28
Şekil 3.12.	Farklı bilyalı dövme işlemlerinden sonra 6063 alüminyum alaşımının yüzey profilleri a) geleneksel bilyalı dövme, b) aşırı bilyalı dövme, c) aşırı bilyalı dövme-zımparalanmış.....	29

Şekil 3.13. Farklı bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak yüzey altı mikroyapısının optik mikroskop fotoğrafları (a) 2 bar ve S10 bilyası, (b) 4 bar ve S10 bilyası, (c) 2 bar S60 bilyası, (d) 4 bar ve S60 bilyası .....	29
Şekil 3.14. PM7075-T6'nın genel yüzey görünümü a) bilyalı dövme işlemi öncesi, b) bilyalı dövme işlemi sonrası .....	30
Şekil 3.15. Farklı bilyalı dövme işlemlerinden sonra Al-6063'ün yüzey mikro yapısı (a) geleneksel bilyalı dövme (b) aşırı bilyalı dövme (c) aşırı ve tekrar bilyalı dövme .....	31
Şekil 3.16. Bilyalı dövme işlemi öncesi ve sonrasında numunelerin 3D profilleri: (a) dövülmemiş; (b) 0,35 mmA'da bilyalı dövme; (c) 0,45 mmA'da bilyalı dövme ve (d) yüzey pürüzlülük değerleri.....	32
Şekil 4.1. S10 paslanmaz çelik bilya optik mikroskop fotoğrafı (1X büyütme).....	34
Şekil 4.2. S10 paslanmaz çelik bilya optik mikroskop fotoğrafı (3X büyütme).....	34
Şekil 4.3. S60 paslanmaz çelik bilya optik mikroskop fotoğrafı (1X büyütme).....	35
Şekil 4.4. S60 paslanmaz çelik bilya optik mikroskop fotoğrafı (3X büyütme).....	35
Şekil 4.5. AA7075 numunesi ve boyutları .....	36
Şekil 4.6. CNC kontrollü bilyalı dövme test cihazını 3 boyutlu şematik çizimi.....	37
Şekil 4.7. Bilyalı dövme işleminde kullanılan test sisteminin şematik gösterimi.....	37
Şekil 4.8. Ultrasonik banyo .....	38
Şekil 4.9. Mikro kesme cihazı .....	39
Şekil 4.10. Zımpara ve parlatma cihazı .....	39
Şekil 4.11. Hassas terazi .....	40
Şekil 4.12. SEM cihazı ve özellikleri .....	40
Şekil 4.13. Optik mikroskop.....	41
Şekil 4.14. Mikro sertlik ölçüm cihazı .....	42
Şekil 4.15. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı.....	42
Şekil 4.16. Yüzey pürüzlülük ölçümü a) Bilyalı dövme açısı parametreleri, b) Dövme yönüne paralel pürüzlülük ölçümleri, c) Dövme yönüne dik pürüzlülük ölçümleri .....	43
Şekil 5.1. Bilyalı dövme parametrelerine bağlı kütle kaybı değişimi .....	45
Şekil 5.2. Bilyalı dövme işlemi parametrelerinin çizgisel yüzey pürüzlülüğüne etkisi: (a) S10 ve S60, 30° (b) S10 ve S60, 45° (c) S10 ve S60, 60° (d) S10 ve S60, 75° (e) S10 ve S60, 90° .....	47
Şekil 5.3. Bilya boyutuna ve bilya çarpma açısı bağlı olarak yüzey altı mikrosertlik değerinin değişimi: (a) S10 ve S60, 15° (b) S10 ve S60, 30° (c) S10 ve S60, 45° (d) S10 ve S60, 60° (e) S10 ve S60, 75° (f) S10 ve S60, 90° .....	49
Şekil 5.4. Bilya çarpma açısı ve bilya boyutuna bağlı yüzey altı mikroyapısının değişimi a) 30° ve S10 bilyası, b) 60° ve S10 bilyası, c) 90° ve S10 bilyası, d) 30° ve S60 bilyası, e) 60° ve S60 bilyası, f) 90° ve S60 bilyası .....	51
Şekil 5.5. SEM fotoğrafı, bilya çarpma açısının yüzey morfolojisine etkisi.....	53

Şekil 5.6. SEM fotoğrafı, 30° bilya çarpma açısında bilya boyutunun yüzey morfolojisine etkisi.....	55
Şekil 5.7. SEM fotoğrafı, 90° bilya çarpma açısında bilya boyutunun yüzey morfolojisine etkisi .....	57





## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Saf alüminyumun teknik özellikleri .....	4
Tablo 1.2. Dökme alüminyum alaşımlarının standart gösteriliş biçimleri .....	5
Tablo 1.3. Dövme alüminyum alaşımlarının adlandırılması .....	7
Tablo 1.4. Dövme alüminyum alaşımlarının standart gösteriliş biçimleri .....	7
Tablo 1.5. AA7075 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi .....	8
Tablo 1.6. AA7075'in fiziksel özellikleri.....	8
Tablo 2.1. Çelik bilya boyutları.....	16
Tablo 4.1. AA7075 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri.....	33
Tablo 4.2. Paslanmaz bilya özellikleri.....	34
Tablo 4.3. Bilyalı dövme parametreleri.....	38
Tablo 5.1. Bilyalı dövme parametreleri sonrası elde edilen yüzey sertlikleri .....	50

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

cm	: Santimetre
gr	: Gram
kg	: Kilogram
mg	: Miligram
mm	: Milimetre
MPa	: Megapascal
N	: Newton
nm	: Nanometre
R <sub>a</sub>	: Çizgisel yüzey pürüzlülüğü
R <sub>z</sub>	: Ortalama pürüzlülük yüksekliği
sn	: Saniye
µm	: Mikrometre
α	: Bilya çarpma açısı

### Kısaltmalar

AA	: Alüminyum Alaşımı
ANSI	: American National Standards Institute (Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü)
CNC	: Computer Numerical Control (Bilgisayar Sayımlı Yönetim)
EBS	: Electron Backscatter Diffraction (Elektron Geri Yansıma Difraksiyonu)
EDS	: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (Enerji Dağılım Spektrometresi)
RRA	: Retrogression and Re-aging (Yeniden Çözeltiye Alma ve Yeniden Yaşlandırma İşlemi )
SAE	: Society of Automotive Engineers (Otomotiv Mühendisleri Topluluğu)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SP	: Shot Peening (Bilyalı Dövme)

# **BİLYALI DÖVME İŞLEMİNDE BİLYA ÇARPMA AÇISI VE BİLYA BOYUTUNUN AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ YÜZEY VE YÜZEY ALTI ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

## **ÖZET**

Bu tez çalışmasında, AA7075-T6 alaşımı özel olarak tasarlanan CNC kontrollü bilyalı dövme cihazı ile farklı bilyalı dövme parametreleri altında dövülmüştür. Bilyalı dövme işleminin kütle kaybına, yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkisi incelenmiştir. Her iki bilya boyutu için bilya çarpma açısının eğik olduğu değerlerde kütle kaybının daha fazla olduğu, açının dikleşmesi ile kütle kaybının azaldığı belirlenmiştir. İki farklı boyutlu paslanmaz çelik bilyalarla gerçekleştirilen dövme işlemleri sonrası yüzey pürüzlülüğünün  $60^\circ$  bilya çarpma açısında en yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Dik açılı bilyalı dövme işlemlerinde, büyük boyutlu bilyaların küçük boyutlu bilyalara oranla daha yüksek yüzey pürüzlülüğü oluşturduğu görülmüştür. Farklı bilya çarpma açılarında büyük boyutlu bilyalar ile gerçekleşen işlemlerde yüzey altı sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Dövme işlemleri sonucunda yüzeyde oluşan çukur derinliklerinin eğik açılarda daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Dövülmüş numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri ile dik açı ile dövülen numunelerin mikro yapılarında daha fazla deformasyon meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bilya boyutundan bağımsız olarak, bilya açısı  $30^\circ$  olduğunda, yüzeyde mikro sürme ve mikro kesme mekanizmaları, bilya açısı  $90^\circ$  olduğunda ise yüksek plastik deformasyon nedeni ile tepe ve çukurların oluştuğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** AA7075-T6 Alaşımı, Bilyalı Dövme Parametreleri, Sertlik, Yüzey Pürüzlülüğü, Yüzey Morfolojisi.

## **THE EFFECT OF SHOT IMPACT ANGLE AND SHOT SIZE ON THE SURFACE AND SUBSURFACE PROPERTIES OF AA7075 ALUMINUM ALLOY IN SHOT PEENING**

### **ABSTRACT**

In this thesis, AA7075-T6 alloy was shot peened under different shot peening parameters in specially designed CNC controlled shot peening device. The effect of shot peening on mass loss, surface and sub-surface properties was investigated. For both shot sizes, it was determined that the mass loss was higher at the values where the angle of impact of the shot was oblique, whereas the mass loss decreased with increasing impact angle. After shot peening with two different sized stainless-steel shots, it was observed that the surface roughness reached the highest values at 60° impact angle. In shot peening performed at a normal angle, large-sized shots caused higher surface roughness compared to that of small-sized shots. The subsurface hardness values were higher in the shot peening performed with large-sized shots at different shot impact angles. As a result of shot peening, it was observed that the depths of valleys formed on the surface were deeper at oblique angles. It has been observed that more deformation occurs in the microstructures of specimens peened at right angles according to the SEM analysis of the peened specimens. Regardless of the size of the shots, it has been observed that micro ploughing and micro-cutting mechanisms occur on the surface when the shot angle is 30°, and peaks and valleys are formed due to high plastic deformation when the shot angle is 90°.

**Keywords:** AA7075-T6 Alloy, Shot Peening Parameters, Hardness, Surface Roughness, Surface Morphology.

## GİRİŞ

Alüminyum alaşımları, yakıt tüketimini ve üretim maliyetlerini azaltmak için ağırlık kazancının önemli olduğu uygulamalarda demir esaslı alaşımların yerini almaktadır. Yüksek dayanımlı alüminyum alaşımları; iyi korozyon direnci, kolay işlenebilirliği, yüksek yorulma dayanımı ve mukavemetli yapısı ile birçok endüstriyel uygulamada önemli bir kullanım alanına sahiptir. Dövme alüminyum alaşımlardan AA7075, T6 ısıl işlemleri sonrasında yüksek sertlik ve dayanıma sahip olmaktadır. Bu nedenle otomotiv, havacılık ve denizcilik endüstrilerinde yaygın olarak tercih edilmektedirler.

Bilyalı dövme işlemi, uygulanan malzemenin yorulma ömrünü ve korozyon direnci arttırmak için malzeme yüzeyine çok sayıda bilyanın yüksek hızlarda ve tekrarlı bir şekilde çarpıtılması ile gerçekleştirilen mekanik bir yüzey iyileştirme yöntemidir. Bilyalı dövme işlemi malzemenin yüzey ve yüzey altı özelliklerinde önemli değişimler sağlamaktadır. Bilyalı dövme işlemi uygulama kolaylığı ve ekonomik işlem maliyeti nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

Literatürde bilya çarpma açısı parametresinin araştırıldığında, çarpma açısının erozif aşınma ile ilişkisinin daha çok irdelendiği ancak bilya çarpma açısının bilyalı dövme işlemi ile ilişkisinin daha sınırlı olarak çalışıldığı belirlenmiştir. Bilyalı dövme işlemi uygulanan çalışmalarda genellikle malzemenin yorulma ve korozyon dayanımının araştırılması üzerine gerçekleştirildiği görülmektedir. Alüminyum alaşımlara uygulanan bilyalı dövme işlemlerinde bilya çarpma açısı ve bilya boyutu parametrelerinin malzeme yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkisine yönelik kapsamlı çalışma eksikliği görülmektedir.

Bu tez çalışmasıyla, farklı bilyalı dövme parametreleri kullanılarak (bilya boyutu, bilya çarpma açısı) dövülen AA7075-T6 alüminyum alaşımının yüzey ve yüzey alt özelliklerinde (yüzey pürüzlülüğü, sertlik ve mikroyapı) meydana gelen değişimler incelenmiştir.

AA7075-T6 alaşımının endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmasına rağmen, bilyalı dövme işleminin yüzey morfolojisi, yüzey pürüzlülüğü, kesit mikroyapı ve derinliğe bağlı olarak sertlik değişimleri literatürde sınırlı şekilde incelenmiş olması bu çalışmaya özgünlük kazandırmaktadır.

Tez çalışmasında, bilyalı dövme işlemi; sabit püskürtme basıncı (3 bar) ve sabit bilya dövme süresi (60 saniye) ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerde değişken parametreler bilya boyutu (S10 (0,1-0,3 mm) ve S60 (0,4-0,9 mm)) ve bilya çarpma açısı (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) olarak belirlenmiştir. Farklı parametreler altında gerçekleştirilen bilyalı dövme işleminin AA7075-T6 alaşımın yüzey ve yüzey altı özellikleri etkisi incelenmiştir.

Tez çalışmanın ilk bölümlerinde alüminyum ve alüminyum alaşımlarının genel özellikleri ve sınıflandırılması anlatılmış ve bilyalı dövme işlemi konuları genel olarak ele alınmıştır. Takip eden literatür araştırması bölümünde farklı alüminyum alaşımlarına uygulanan bilyalı dövme işlemi ile ilgili örnek çalışmalara yer verilmiştir. Malzeme ve yöntem bölümünde tez çalışmasında kullanılan malzemeler, cihazlar ve kullanılan yöntemler ayrıntılı bir şekilde tanıtılmıştır. Deneysel sonuçlar ve incelenmesi bölümünde numunelerin farklı parametreler altında (bilya boyutu ve bilya çarpma açısı) dövülmesi ve dövülen numunelerin; yüzey pürüzlülükleri ve morfolojileri, yüzey ve yüzey altı sertliği, kesit mikro yapısı incelenmiştir. Son bölümde tez çalışmasının genel sonuçları ve elde edilen bilgiler sonucunda sunulan öneriler kısmı verilmiştir.

## 1. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Bu bölümde; alüminyum ve alaşımlarının genel özellikleri, sınıflandırılması ve tez çalışmasında kullanılan 7XXX serisi alüminyum dövme alaşımı olan AA7075-T6 alüminyum alaşımının özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

### 1.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Genel Özellikleri

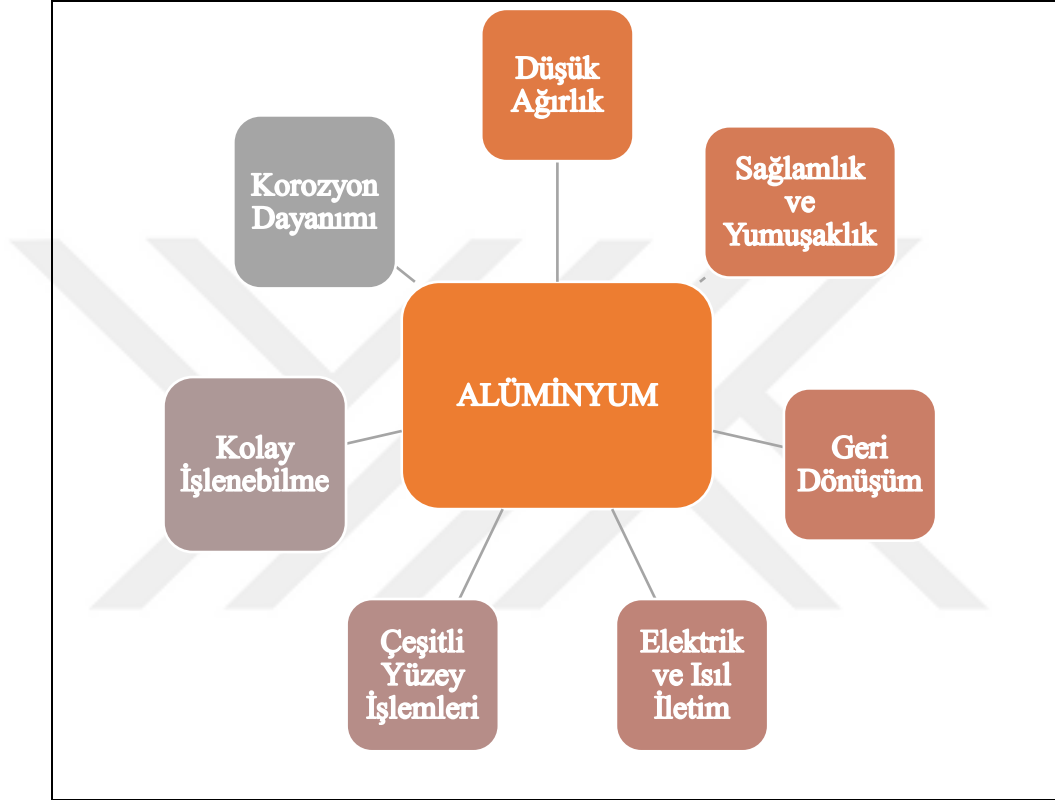
Alüminyum ve alaşımlarının çeşitli olumlu nitelikleri alüminyumu çok yönlü, ekonomik ve önemli metalik malzemelerden biri haline getirir. Alüminyum, yüksek sünek sarımlı folyodan en zorlu mühendislik uygulamalarına kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Alüminyum alaşımların kullanımı yapısal metal olarak kullanılan çeliklerden sonra ikinci sıradadır. Alüminyum  $2,7 \text{ g/cm}^3$  yoğunluğa sahiptir ve yaklaşık demirin ( $7,83 \text{ g/cm}^3$ ) yoğunluğunun üçte biri kadardır. Alüminyum alaşımlarının yüksek mukavemeti ile hafifliği birleştiğinde, uzay araçları ve uçakların yanı sıra her türlü arazide ve suda kullanılan araçlar için avantajlı, sağlam ve hafif yapıların üretimine olanak sağlar [1].

Alaşımsız alüminyumun çekme mukavemeti yaklaşık  $90 \text{ N/mm}^2$ 'dir. Bu değer alaşımlandırma ve çökeltme sertleştirme işlemleri ile sırasıyla  $220$  ve  $440 \text{ N/mm}^2$ 'ye yükseltilebilmektedir. Çökeltme sertleştirme ile elde edilen değerler yapı çeliğinin mukavemetine yakındır. Özgül mukavemet, çekme mukavemetinin yoğunluğa oranıdır. Alüminyum alaşımlarının özgül mukavemeti yapı çeliklerinin yaklaşık 3 katı olduğu görülür. Bu nedenle alüminyum alaşımları hafifliğin önemli olduğu otomotiv ve havacılıkta çok önemlidir [2].

Özellikle yüzey kalitesi ve korozyon dayanımı iyi olması gereken parçaların üretiminde teknik malzeme olarak saf alüminyum öncelikle tercih edilmektedir. Saf alüminyumun teknik özellikleri Tablo 1.1'de verilmiştir. Otomobillerin farlarında ve diğer yansıtıcılarda, kimya ve gıda endüstrisinde kullanılan çeşitli kutular, kaplar ve ince yapraklar (folyo), elektronik sanayinde özel iletkenler vb. geniş kullanım alanına sahiptir [3]. Alüminyum ve alaşımların geniş kullanım alanına sahip olmasının nedenleri Şekil 1.1'de belirtilmiştir [4].

Tablo 1.1. Saf alüminyumun teknik özellikleri [3]

Özgül ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Ergime sıcaklığı (°C)	Isıl genleşme katsayısı (25°C'de)	Elastiklik modülü (kN/mm <sup>2</sup> )	Çekme mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )	Akma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Sertlik (HB)
2,7	660	23,1	65-70	70-140	20-30	5-15



Şekil 1.1. Alüminyumun özellikleri [4]

## 1.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları farklı imal usulleri esas alınarak döküm ve dövme olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Plastik şekil verme ve dövme yöntemiyle şekillendirilen dövme alaşımları, döküm alaşımlardan farklı kimyasal bileşimlere ve mikro yapıya sahiptirler. Dökme alüminyum alaşımları ise sadece döküm yöntemiyle şekillendirilmektedir. Dövme ve döküm alüminyum alaşımları, ısıl işlem yapılabilir ve yapılamaz alaşımlar olmak üzere iki alt gruba ayrılmaktadırlar. Isıl işlem yapılabilir alaşımlar yaşlandırma işlemi ile sertleştirilebilirken, ısıl işlem yapılamayan alaşımlar ise katı eriyik sertleşmesi, pekleşme ve dağılım (dispersiyon) sertleştirilmesi ile mukavemetlendirilir [1, 2, 4-6].



### 1.2.1. Dökme alüminyum alaşımları

Genellikle kum döküm, pres döküm ve sabit kalıp yöntemleri kullanılarak dökülen dökme alüminyum alaşımları işlenmeye elverişlidir ve kaynak edilebilirler. Döküm alüminyum alaşımlarının çoğu, alaşımlara düşük erime sıcaklığı, iyi akışkanlık ve dökülebilirlik özelliği veren yeterli miktarda silisyum (%5-12 Si) içermektedir. Akışkanlık, sıvı metalin döküm sırasında kalıp içerisinde erken katılaşmadan hareketini sürdürmesidir. Dökülebilirlik ise döküm alüminyum alaşımından kolay bir şekilde ve iyi bir dökümün elde edilmesini ifade etmektedir [2-4, 7].

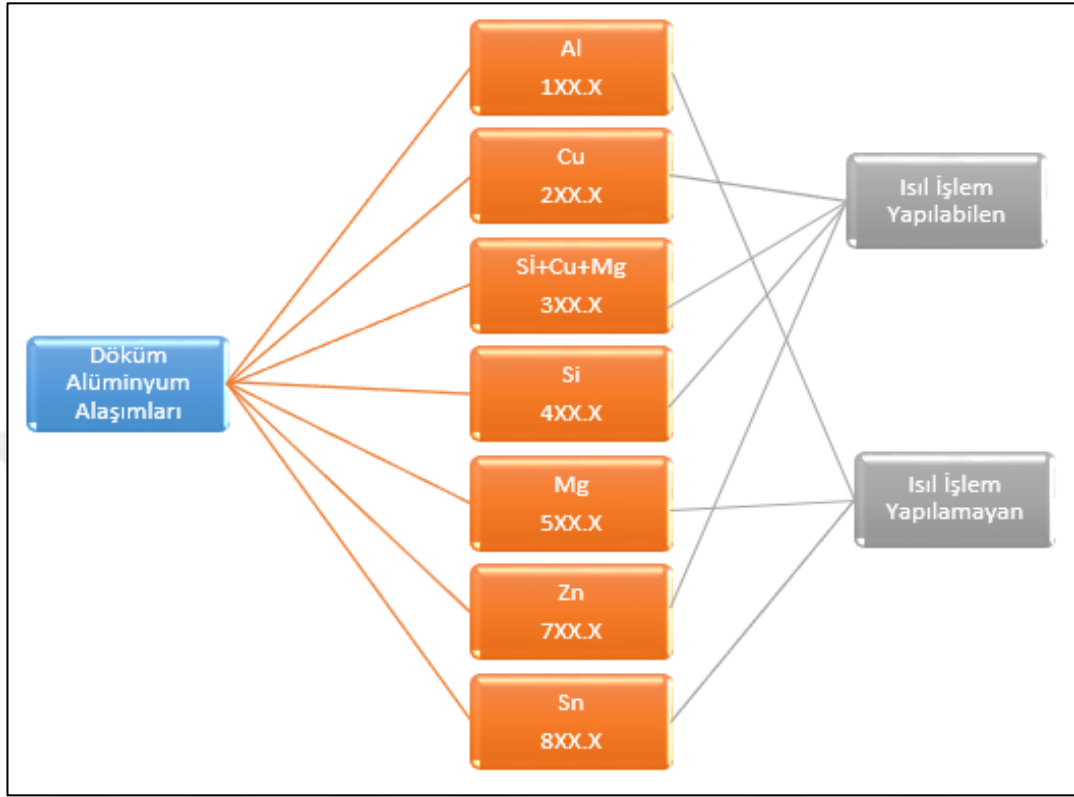
Dökme alüminyum ve alaşımları Amerikan Ulusal Standartlar Enstitüsü(ANSI) tarafından üç haneli bir sayı ile sınıflandırılmıştır. Döküm alaşımlarındaki ilk hane dövme alüminyum alaşımlarında olduğu gibi alaşım element grubunu ifade etmektedir. Dört rakamlı simgelemede tek fark üçüncü rakamın dördüncü rakamdan bir nokta ayrılmasıdır. Tablo 1.2’de dökme alüminyum ve alaşımlarının standart gösterimi verilmiştir. 1XX.X serisi döküm alüminyum alaşımları minimum % 99,0 alüminyum oranı sahiptir. Bu alaşımların tümünde son rakam 0 ise parça döküm, 1 ingot (külçe) veya 2 ise modifiye edilmiş ingotu belirtmektedir. Örneğin; 356,0 kum veya kokile dökülmüş parçayı ifade ederken 356,1 ve 356,2 ingotları ifade etmektedir [1, 8-10].

Tablo 1.2. Dökme alüminyum alaşımlarının standart gösteriliş biçimleri[2, 4, 7, 9]

Döküm Alüminyum Alaşımları	Alaşım Elementi	Yaşlandırılabilir
1XX.X	Ticari Saflıkta Alüminyum	Hayır
2XX.X	Al-Cu	Evet
3XX.X	Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si	Bazıları
4XX.X	Al-Si	Hayır
5XX.X	Al-Mg	Hayır
7XX.X	Al-Mg-Zn	Evet
8XX.X	Al-Sn	Evet

Döküm alüminyum alaşımları Şekil 1.2’de gösterildiği gibi; ısıl işlem yapılabilen ve ısıl işlem yapılamayan döküm alüminyum alaşımları olmak üzere iki alt grupta toplanır. Döküm alüminyum alaşım gruplarından bazıları çökeltme sertleştirilmesi

uygulanarak mekanik özellikler artırılırken bazılarına ise sadece tavlama ısıl işlemi yapılarak sünekliği artırılabilir [3, 9].



Şekil 1.2. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması[3]

### 1.2.2. Dövme alüminyum alaşımları

Alüminyum dövme alaşımları ekstrüzyon, haddeleme ve dövme gibi plastik şekil verme yöntemleriyle elde edilmektedirler. Dövme alaşımlarının, plastik deformasyon yetenekleri iyi olup rahat bir şekilde şekillendirilebilirler [3, 4]. Dövme alaşımlarının sayısal simgelenmesinde 4 haneli rakam kullanılmaktadır. Simgenin ilk rakamı, temel alaşım elementini göstermektedir. 1XXX dizisi saf alüminyum (%99,00) gösterir. İkinci rakam ise alaşımda yapılan bileşim değişikliğini veya yabancı madde limitlerini belirtir 1'den 9'a kadar değişebilmektedir. Örneğin, AA1060 alaşımı; %99,60 alüminyum taşıdığı anlamına gelmektedir. Son iki rakam % 99 değerinin noktadan sonraki rakamlarını belirtir [3, 7]. Dövme alüminyum alaşımlarının adlandırılması Tablo 1,3'de verilmiştir.

Tablo 1.3. Dövme alüminyum alaşımlarının adlandırılması [3, 4]

1. RAKAM	2. RAKAM	3. ve 4. RAKAM
Al alaşımını simgeler	Orijinal alaşımdaki değişimi tanımlar. Orijinal alaşım için "0" kullanılır.	1XXX serisi alüminyum alaşımlarında alüminyumun saflığını gösterir. Diğer serilerde çeşitli özellikteki alaşımları tanımlar.
	1050	
	2024	
	3003	
	4043	
	5154	
	6060	

Alüminyum dövme alaşımlarda istenilen dayanımı elde etmek için ısıtım işlemi uygulanmaktadır. Isıtım işlemi uygulanabilen (çökeltme ile sertleşebilen) alüminyum alaşımları 2XXX, 6XXX ve 7XXX ve bazı 8XXX serileri olmak üzere dört ana gruba ayrılmaktadır. Isıtım işlemi uygulanamayan alüminyum alaşımları 1XXX, 3XXX ve 5XXX serileriyle üç ana gruba ayrılmaktadır ve dayanımlarının artırılabilmesi sadece soğuk işleme mümkündür [1, 6]. Tablo 1.4'de dövme alüminyum alaşım serilerinin içerdiği alaşım elementlerine ve ısıtım durumlarına göre dizilişi verilmiştir.

Tablo 1.4. Dövme alüminyum alaşımlarının standart gösteriliş biçimleri [3, 4, 7]

Dövme Alüminyum Alaşımları	Alaşım Elementi	Yaşlandırılabilir
1XXX	Min. %99 Saflıkta Alüminyum	Hayır
2XXX	Al-Cu ve Al-Cu-Li	Evet
3XXX	Al-Mn	Hayır
4XXX	Al-Si, Al-Mg-Si	Evet
5XXX	Al-Mg	Hayır
6XXX	Al-Mg-Si	Evet
7XXX	Al-Mg-Zn	Evet
8XXX	Al-Li,Si,Zr,B	Evet

### 1.3. AA7075-T6 Alaşımının Özellikleri

Dövme alüminyum alaşımı olan 7XXX serisi alüminyum alaşımları (Al-Zn-Mg-Cu alaşımı) yüksek mukavemet özelliği, iyi korozyon direnci, kolay işlenebilirliği, yüksek yorulma dayanımına sahiptir. Bu nedenle yakıt tüketimini ve üretim maliyetlerini azaltmak için otomotiv, havacılık ve denizcilik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [11-15].

7xxx alaşımlarında esas alaşım elementi çinkodur. Bu alaşım grubunun bileşiminde kütlece yüksek olan diğer elementler magnezyum ve bakırdır. Bu alaşımlardaki Al-Zn-Mg-Cu bileşimi tüm alüminyum alaşımlarına kıyasla en yüksek dayanım değerlerini sağlar [16]. Ticari olarak satılan AA7075 alüminyum alaşımı, T6 ısıtılma işleminden (çökeltme sertleştirme) sonra 490 MPa akma mukavemeti ve yaklaşık 570 MPa çekme mukavemeti değerine ulaşır [17]. Tablo 1.5’de AA7075 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi, Tablo 1.6’da ise fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 1.5. AA7075 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi [18]

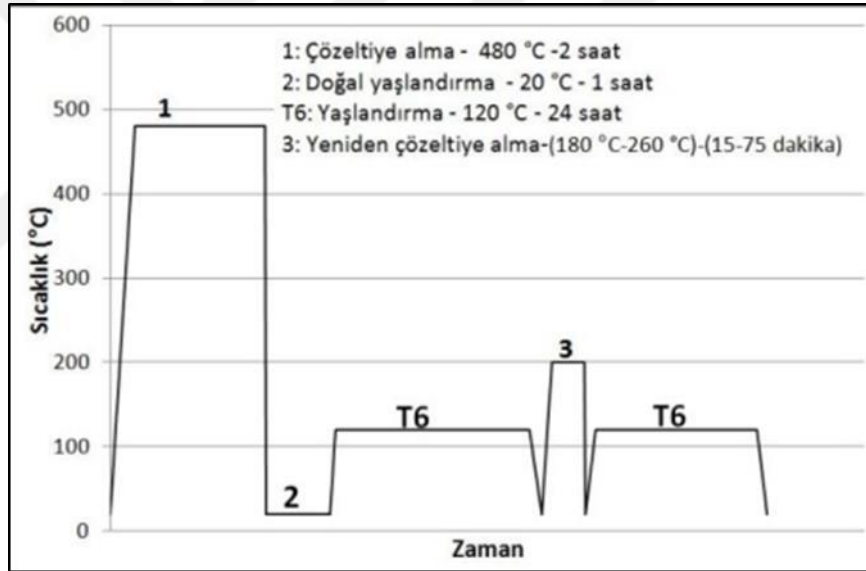
Elementler	Al	Cu	Zn	Mg	Fe	Si
Kütlece (%)	87,1-91,4	1,2-2	5,1-6,1	2,1-2,9	0,5	0,4

Tablo 1.6. AA7075’in fiziksel özellikleri [4, 9]

Özgül Ağırlık	2,81 gr/cm <sup>3</sup>
Elastik Modülü	7300 kg/mm <sup>2</sup>
Rijitlik Modülü	2750 kg/mm <sup>2</sup>
Ergitme Sıcaklığı Aralığı	477 - 635° C
Özgül Isı (0 - 100 °C arasında)	0,23 cal/gr .°C
Lineer Genleşme Katsayısı (20 - 100 °C, T6 için)	24-10-6 mm/° C
Özgül Elektrik Direnci (20°C, T6 için)	0,058 Ohm.mm <sup>2</sup> /m

AA7075 alüminyum alaşımı İkinci Dünya Savaşı sırasında hava kuvvetlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Soğuk işlem sırasında istenmeyen kalıntı gerilmeler meydana geldiğinden AA7075 alaşımlarının mukavemetinde artış elde etmek için ısıtılma işlemi tercih edilmektedir [16].

Uygulanan farklı ısıl işlemler, metallerin mikro yapısını ve mekanik özelliklerini artırmaktadır. 7xxx serisi alüminyum alaşımlarının yüksek sertlik ve dayanımı T6 ısıl işlemi ile sağlanmaktadır. 7xxx serisi alüminyum alaşımları katı çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma işlemleri sonrası oluşan çökelme sonucu dayanımları artırılmaktadır. T6 ısıl işlemi, İlk olarak alaşım 480°C civarında yüksek sıcaklıklarda çözeltiye alındıktan suda soğutma ve 121°C'de 24 saat yaşlandırma işlemi ile gerçekleştirilmektedir. Alüminyum alaşımlarının dayanımı uygun değerlere ulaşması amacıyla ilk olarak 1974 yılında Baruch M. Cina tarafından, yeniden çözeltiye alma ve yeniden yaşlandırma (RRA) ısıl işlemi önerilmiştir. RRA işlemi iki aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak alaşım T6 ısıl işlemi uygulanmakta sonrasında kısa süreli ve düşük sıcaklıkla yeniden çözeltiye alma işlemi gerçekleştirilmektedir. Uygulanan ısıl işlem çevrimi Şekil 1.3'de gösterilmiştir [19].

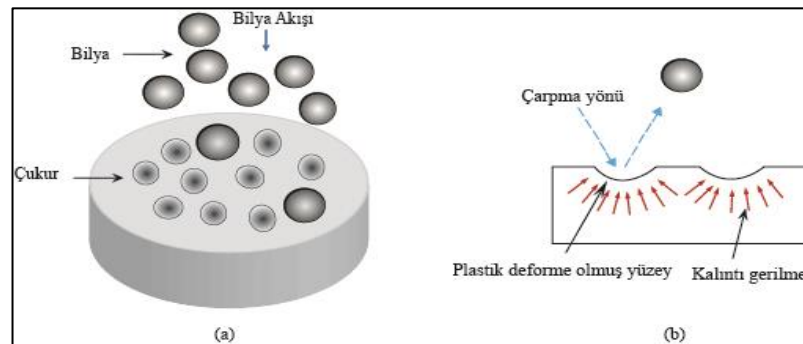


Şekil 1.3. Isıl işlem çevrim grafiği [19]

## 2. BİLYALI DÖVME

### 2.1. Bilyalı Dövme İşlemi ve Amaçları

Bilyalı dövme, yüksek mukavemetli çeliklerin, alüminyum ve titanyum alaşımlarının korozyon çatlağı direnci ve yorulma performansının artırılması amacıyla yaygın olarak kullanılan bir yüzey işlemidir. Bu yüzey işlemi karakteristik yüzey topografyasında, dislokasyon yoğunluğunda artışa, yüzeye yakın bölgelerde kalıntı gerilmelere, çatlakların başlaması ve ilerlemesine sınırlayan yüzey tabakalarının oluşumuna neden olur. Bu nedenle, metalik malzemelerin yorulma ömrünü önemli ölçüde arttırmaktadır [20]. Malzeme yüzeyi, basınçlı hava kullanılarak çelik bilya akımına maruz tutulur. Tekrarlanan çarpmalar yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde değiştirir, yüzey ve yüzey altı bölgelerinde mikro yapıda meydana gelen değişimlerden dolayı malzemenin yüzey sertliğini artırır ve oluşan kalıntı basma gerilmeleri malzemede farklı yüzey durumlarının ve mekanik özelliklerinin oluşmasına neden olur. Endüstriyel kullanıma uygun ekonomik ve güvenilir bir yüzey iyileştirme işlemidir [21]. Bilyalı dövme işlemi malzeme yüzeyinde plastik deformasyona neden olur. Bu işlem sonucunda yüzeye yakın bölgelerde kalıntı basma gerilmeleri meydana gelmektedir. Yüzey plastik deformasyonu yüzey pürüzlülüğünün artmasına ve malzemenin sertleşmesine neden olur [22]. Şekil 2.1’de bilyalı dövme işlemi ve işlem sonrası yüzeyde meydana gelen plastik deformasyon ile kalıntı gerilmeler şematik olarak gösterilmiştir [23]. Şekil 2.2’de ise bilyalı dövme işleminin uygulaması gösterilmiştir.

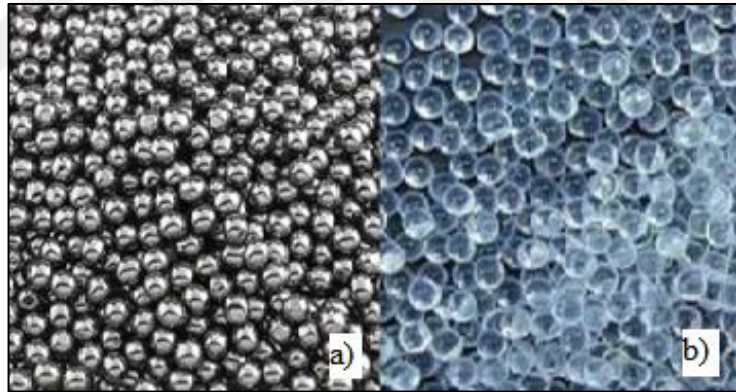


Şekil 2.1. (a) Bilyalı dövme işlemi şematik gösterimi ve (b) Bilyalı dövme işlemi sonrası oluşan plastik deformasyonu [23]



Şekil 2.2. Bilyalı dövme işlemi [24]

Bilyalı dövme işlemin en temel elemanı bilyalardır. Bilyalı dövme işleminde dökme demir, paslanmaz çelik, seramik, cam gibi farklı malzemelerden üretilen bilya türleri kullanılmaktadır. Hedef malzemenin yüzey özelliklerine ve yüzeyde istenen etkiye göre bilya türü ve bilya boyutu seçilebilmektedir [25]. Şekil 2.3’de bilyalı dövme işleminde kullanılan bazı bilya türleri görülmektedir.



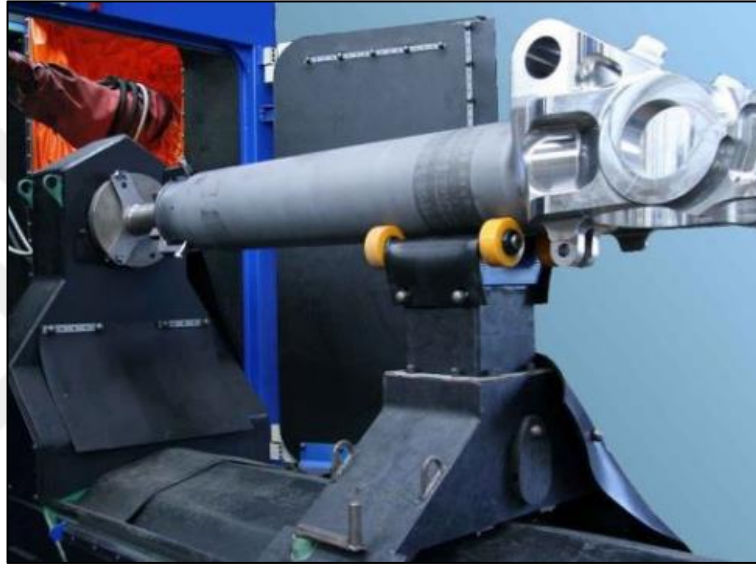
Şekil 2.3. Bilya çeşitleri a) çelik bilya b) cam bilya [26]

Bilyalı dövme işlemi ile yüzey sertleştirme dikkat gerektiren araştırma alanlarından biridir. Bu mekanik yüzey işlemi, ısıtma işlemine zayıf yanıt veren malzemelerin çeşitli mekanik özellikleri geliştirmek için kullanılabilen önemli bir uygulamadır. Günümüzde bu işlem, dövülen yüzeylerin mikro sertliğini artırmak için de kullanılmaktadır [27].

Bilyalı dövme işlemi, sürekli olarak basma ve çekme yüklemelerine maruz kalan parçaların yorulma ömrünü uzatır. Bilyalı dövme işlemi havacılık ve otomotiv sektöründe birçok makine elemanının yorulma dayanımının artırılması amacıyla uygulanmaktadır. Havacılıkta sektöründe, motor ve gövde aksamaları, iniş takımları,

türbin ve türbin kanatları, havalandırma bıçak ve pervaneleri bilyalı dövme işleminin en sık uygulandığı parçaların başında gelmektedir. Otomotiv sektöründe ise; dişliler, yük altında çalışan yaylar, kam milleri, krank milleri, biyel kolları, silindir bloklar ve pistonlar bilyalı dövme işleminin sık uygulandığı parçalardır [4, 25].

Şekil 2.4’de havacılıkta kullanılan iniş takımı dişlisinin bilyalı dövme işlemi gösterilmiştir [28]. Şekil 2.5’de ise Formula 1 aracı gösterilmiştir ve aracının yüksek gerilim altında çalışan kritik parçalarına bilyalı dövme işlemi uygulanmaktadır [29].



Şekil 2.4. Havacılıkta kullanılan iniş takımı dişlisi [28]

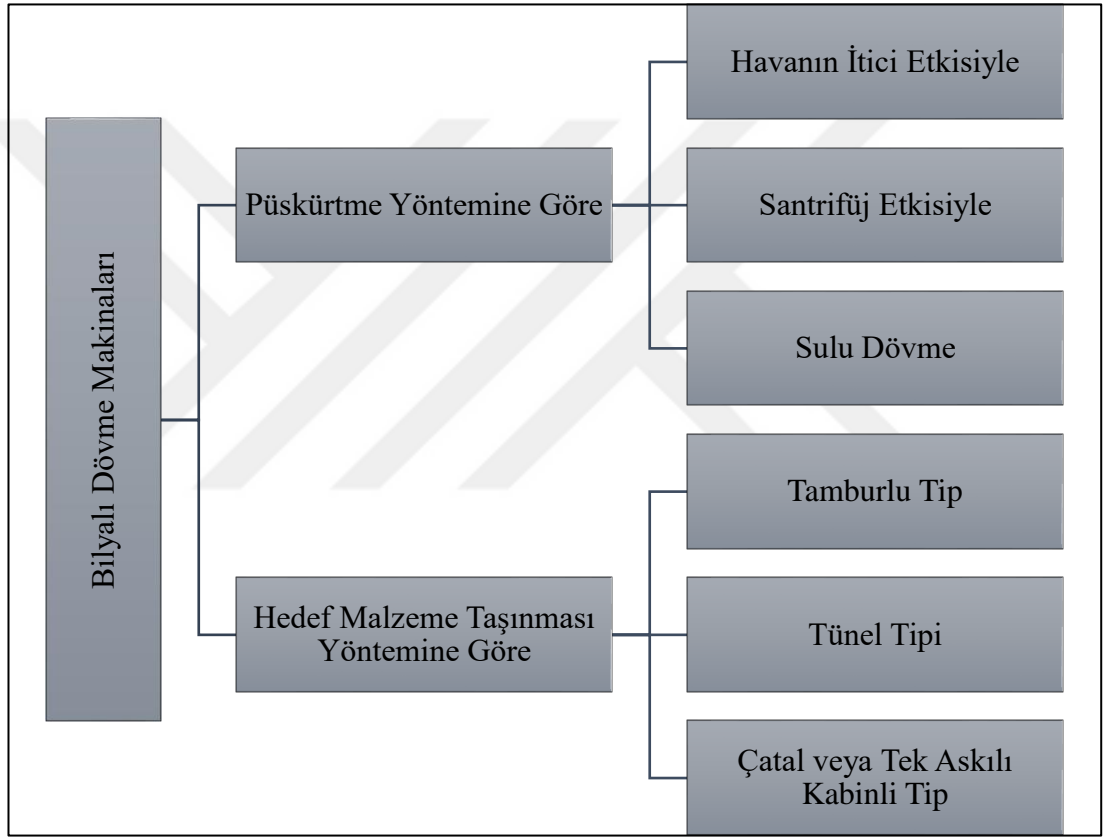


Şekil 2.5. Formula 1 aracı [29]



## 2.2. Bilyalı Dövme Makinaları

Bilyalı dövme işleminde kullanılan makinaları iki kategoride incelemek mümkündür. Bilyalı dövme makinaları bilyaların nasıl fırlatıldığına, hava basıncı gibi işlem parametrelerinin kullanım şekline bağlı olarak sınıflandırılırlar. Makine seçimi bilyalı dövme işlemi uygulanacak parçanın malzemesinin özelliklerine ve elde edilmek istenen bilyalı dövme işleminin kalitesine bağlıdır [30]. Şekil 2.6’da farklı özellik ve türlerdeki bilyalı dövme makinaları sınıflandırılmıştır [4, 31].



Şekil 2.6. Bilyalı dövme makinalarının sınıflandırılması [4, 31]

Bilyalı dövme işleminde hava basıncı, bilya besleme haznesinde bulunan bilyaların bir nozul yardımıyla malzeme yüzeyine fırlatılmasını sağlamaktadır. Şekil 2.7’de tez çalışmasında kullanılan hava püskürtmeli bilyalı dövme makinası görülmektedir. Bu tip bilyalı dövme makinaları ekonomik açıdan sınırlı sayıda işlem için avantajlıdır. Etkili dövme şiddetlerinin uygulanması, uzun bir nozul sayesinde karmaşık geometriye sahip makine parçalarının dövülebilmesi hava püskürtmeli bilyalı dövme makinalarını klasik bilyalı dövme makinalarından üstün kılmaktadır [32].



Şekil 2.7. Bilyalı dövme makinası

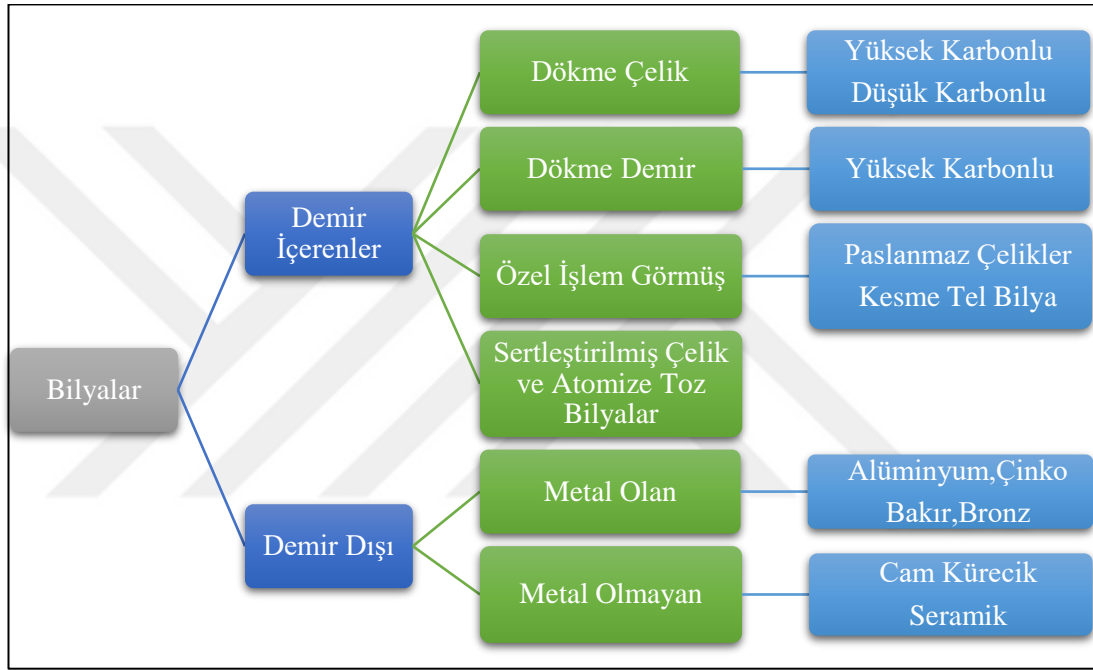
Bilyalı dövme sistemlerinde proses kontrollerini gerçekleştirebilmek için spesifik uygulamaların yapılması gerekmektedir. Otomatik bilyalı dövme makinalarında genellikle belirli tarzda iş parçalarına yönelik özel tasarım yapılmaktadır. Bu tip özel tasarımlara ihtiyaç duyulan havacılık uygulamalarında kullanılan otomatik bilyalı dövme makinasının görüntüsü Şekil 2.8’de verilmiştir [33].



Şekil 2.8. Otomatik bilyalı dövme makinası [33]

### 2.3. Bilyaların Sınıflandırılması

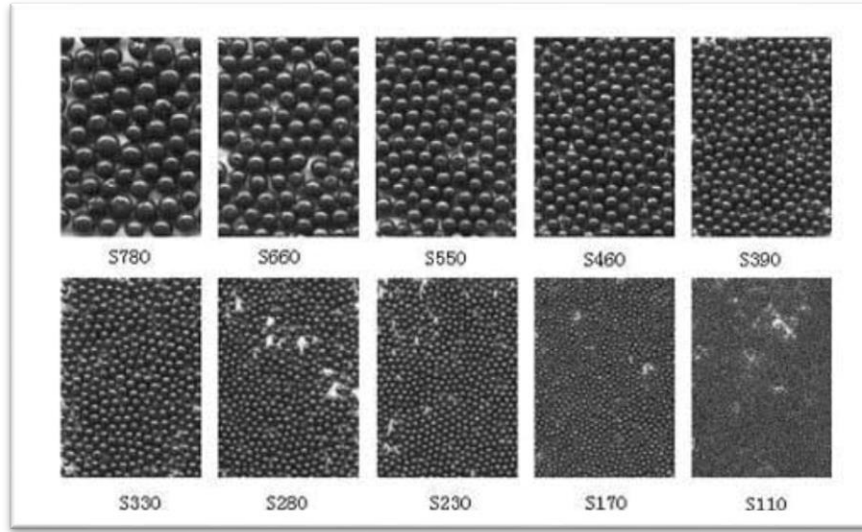
Bilyalar demir ve demir dışı bilyalar olmak iki ana gruba ayrılmaktadır. Bilyalar malzeme üzerinde beklenen etkiyi sağlamak üzere yüksek basınçlarla püskürtülen bilyalı dövme işleminin temel elemanıdır. İşlem süresince kullanımdan dolayı kırılan bilyalar elde edilmek istenen sonuçlara etki edeceğinden kırılan ve deformasyona uğrayan bilyaların tekrar kullanılmaması önemli bir husustur [25]. Şekil 2.9’de bilyalı dövme işleminde kullanılan çeşitli bilya tipleri verilmiştir [4].



Şekil 2.9. Bilya tipleri ve sınıflandırılması [4]

Bilya türlerinin sınıflandırılmasında Society of Automotive Engineers “SAE” tarafından hazırlanan standartlar yaygın kullanılmaktadır. Bilya tanımlarında kullanılan “S” harfi bilya malzemesinin çelik (steel) olduğunu belirtmektedir. Çelik bilyalar SAE J444 standartında boyutuna göre S70 ile S1320 değerleri arasında değişmektedir. Bu değerlerin on binde biri inç cinsinden bilya çapını belirtmektedir [31]. Örneğin S550 için tane boyutu  $1,4 \text{ mm} (550 \times 25,4 / 10000 = 1,4 \text{ mm})$  dir.

Şekil 2.10’da bilyalı dövme işlemlerinde kullanılan çelik bilyalar boyutlarına göre sıralanmış ve Tablo 2.1’ de ise bilyaların tane boyutları verilmiştir [34].



Şekil 2.10. Çelik bilyaların sınıflandırılması [34]

Tablo 2.1. Çelik bilya boyutları [34]

SAE	Tane Boyutu (mm)
S-70	0,20-0,40
S-110	0,30-0,60
S-170	0,40-0,70
S-230	0,60-0,90
S-280	0,70-1,00
S-330	0,90-1,20
S-390	1,00-1,40
S-460	1,20-1,70
S-550	1,40-2,00
S-660	1,70-2,40
S-780	2,00-2,40

#### 2.4. Bilyalı Dövme Parametreleri

Bilyalı dövme süreci birçok parametreden etkilendiğinden karmaşık bir süreçtir. Genel olarak bilya, iş parçası ve işlem koşulları olmak üzere üç parametre grubuna ayrılabilir. Bilya parametreleri bilyaların boyutunu, şeklini, bilya malzemesini ve bilya hızını içermektedir. İş parçası parametreleri, iş parçasının geometrik şeklini ve malzeme özelliklerini içerir. Proses parametreleri ise parçacık akış hızı, hava basıncı, çarpma açısı, nozul çıkışından iş parçasına olan mesafe vb. parametrelerdir [35].

Bilyalı dövme işlemi tam olarak kontrol edilmeli ve en yüksek fayda için tekrarlanabilir olmalıdır. Bunu gerçekleştirebilmek için tüm işlem parametreleri tanımlanmalı ve kontrol edilmelidir. Bilyalı dövme işlemi etkileyen birçok temel parametre vardır. En yaygın olanları aşağıdaki gibidir [27]:

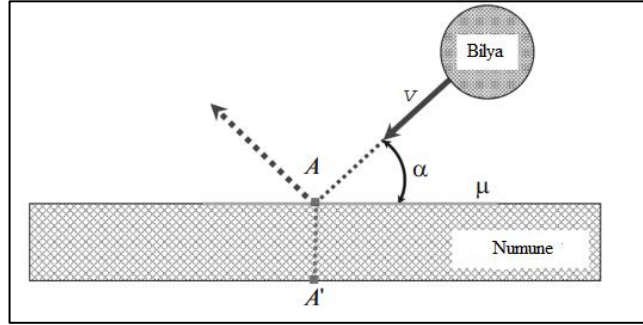
- Dövme şiddeti
- Bilya sertliği ve boyutu
- Nozul özellikleri (çap, sapma açısı, uzunluk)
- Hava basıncı
- Bilya çarpma açısı
- Bilyalı dövme süresi
- İş parçasının nozula göre doğrusal ve dönme hızı
- Yüzey örtme oranı

Bilyalı dövme işlemi standart şekilde ve uygun kalitede gerçekleştirebilmek için “dövme şiddeti” büyüklüğü geliştirilmiştir [4]. Bilya özellikleri (bilya türü, boyutu, sertliği, hızı) dövme şiddetine etki eden parametrelerdir. Bilyalı dövme işleminde kullanılan bilya boyutunun dövme şiddetine yüksek derecede etkisi vardır. Boyut dağılımı ne kadar fazla olursa dövme işleminde çok fazla çeşitlilik meydana gelir. Bilyalı dövme işleminde kullanılan bilyanın sertliği, malzeme yüzeyinin çukurlaşma oluşmasında en etken parametredir. Eğer bilyalı dövmeye maruz kalan malzeme bilyadan daha sert ise işlem sırasında bilyaların malzemenin yüzeyindeki etkisinin sınırlı kaldığı gözlemlenir [25].

Bir başka parametre olan bilya hızı vektörel bir büyüklüktür. Yönü ve skaler büyüklüğü vardır. Bilya hızına; püskürtme basıncı, akış hızı, hava kalitesi, hortum çapı, nozul çapı doğrudan etki eden faktörlerdendir. Bilyalı dövme işleminde bilya hızını en yüksek derecede etkileyen ve belirleyen parametre püskürtme basıncıdır. Püskürtme basıncı arttırıldığında bilyanın hızını arttıracağından yüksek basınç değerinde yüksek dövme şiddeti değerleri elde edilebilmektedir [25].

Bilya çarpma açısı çarpmaya bağlı olarak hareket eden bilyanın yönü olarak ifade edilmektedir. Dövme şiddeti, çarpma açısının sinüs değerine göre değişiklik göstermektedir. Nozul pozisyonu ve parça geometrisinin değişmesi ile bilya çarpma

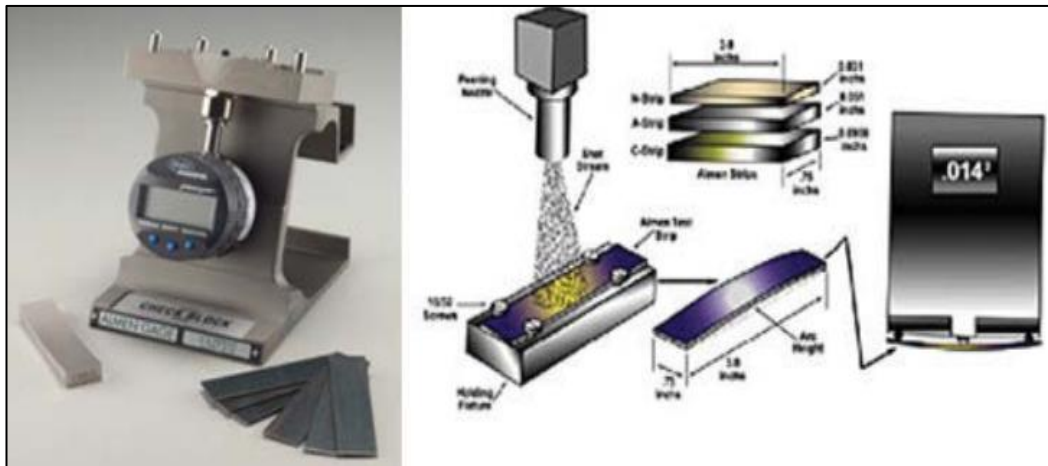
açısını değiştirmektedir [25]. Bilya çarpma açısının şematik gösterimi Şekil 2.11’de gösterilmiştir [36].



Şekil 2.11. Bilya çarpma açısı [36]

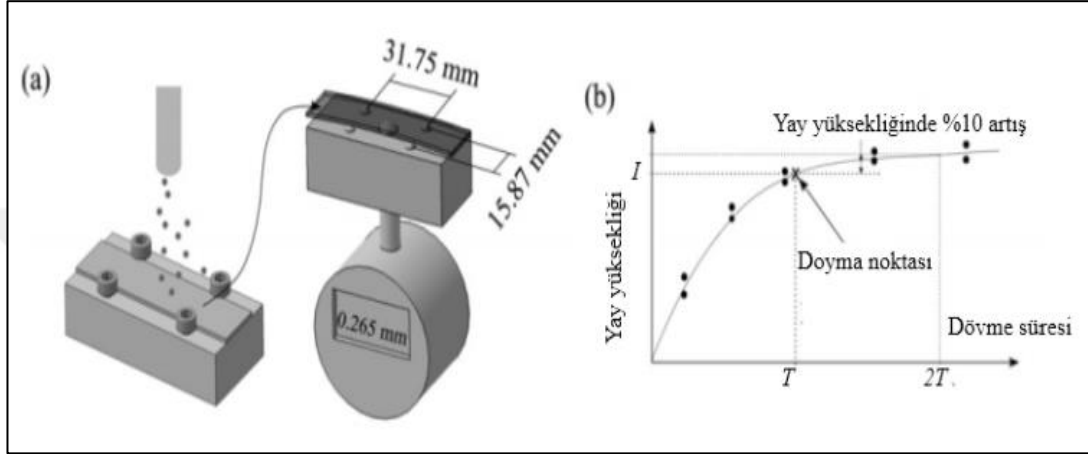
#### 2.4.1. Almen şiddeti

John Almen tarafından 1943 yılında geliştirilen Almen Testi bilya püskürtme öncesi bir muayene metodu olarak kullanılmakta ve endüstride halen yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Kendisine özgü bir test malzemesi (SAE 1070 yay çeliği) ve ölçüm cihazı bulunmakta olup, tercih edilecek proses parametreleri bu test malzemesine uygulanarak elde edilecek niceliksel ve grafiksel veriler ışığında bilya püskürtme öncesi parametrelerin yeterliliği tespit edilmektedir[37]. Almen şiddeti tüm parametrelerin birleşik etkisini aynı anda ve nispeten düşük bir maliyetle temsil ettiğinden dövme uygulamalarında yaygın bir proses kontrol metodudur. Almen şeridi önceden tanımlanmış dövme süresine kadar bir tutucu içinde dövülür. Daha sonra tutucudan çıkarılır ve eğrilik yay yüksekliği Almen ölçü aleti ile ölçülür[38]. Şekil 2.12’ de Almen testini ölçüm cihazı ve standart numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Almen testi ölçüm cihazı ve standart numuneleri [37]

Farklı parametreler altında gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemlerinde farklı sürelerde dövme işlemleri gerçekleştirilerek Almen şiddeti bulunur ve buna bağlı doyum noktası eğrileri edilmektedir. Şekil 2.13’de Almen testinin şematik gösterimi ve doyum noktası eğrisi gösterilmiştir. Doyum noktası (T), bilyalı dövme süresinin iki katına çıktığında yay yüksekliğinde meydana gelen artışın %10’dan az olduğu ilk noktadır (Şekil 2.13.b). Almen şiddeti, doyum noktasında elde edilen yayın yüksekliğidir.



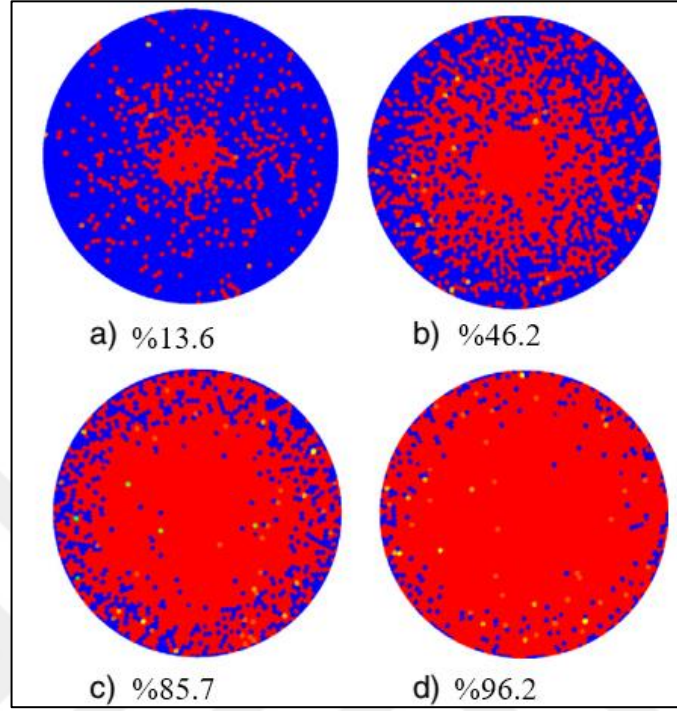
Şekil 2.13. Almen testi ölçümü a) cihaz ve standart numunelerin şematik gösterimi b) doyum noktası eğrisi [38]

#### 2.4.2. Yüzey örtme oranı

Yüzey örtme oranı bilyalı dövme işlemi sonrası girinti ve çukur ile kaplanan alanın toplam işlenmiş yüzey alanına oranı olarak tanımlanır [39]. Yüzey örtme oranı, kalıntı gerilme tabakasının kalınlığı ve işlenmiş yüzeyin emniyeti ve homojenliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüzey örtme oranı, bilyalı dövme işleminde çoklu çarpma ve örtüşen girintiler ile oluşur. Yüzey örtme oranı; bilya boyutuna, bilya hızına, bilya çarpma açısına ve dövme süresine bağlıdır. Deneysel olarak, yüzey örtme oranını pratik olarak belirlemenin üç farklı yolu vardır. Bunlar görsel muayene, mavi mürekkep ve kopyalamadır. Pratik olması için, % 98 yüzey örtme oranı ve üstü tam (100%) olarak kabul edilir. % 100'ün üzerindeki % 200 yüzey örtme oranında, % 98 yüzey örtme oranına ulaşmak için gereken sürenin iki katı kadar bilyalı dövülerek elde edilmektedir [35].

Van Bo Nguyen ve arkadaşları yüzey örtme oranını, Ghost View görüntü işleme yazılımı kullanılarak nicel olarak ölçmüşlerdir. Şekil 2.14’de yüzey örtme oranı

yüzdeleri verilmiştir. Fotoğraflardaki mavi renk dövülmemiş, kırmızı renkler ise dövülmüş alanları göstermektedir [35].



Şekil 2.14. Yüzey örtme oranı yüzdeleri [35]

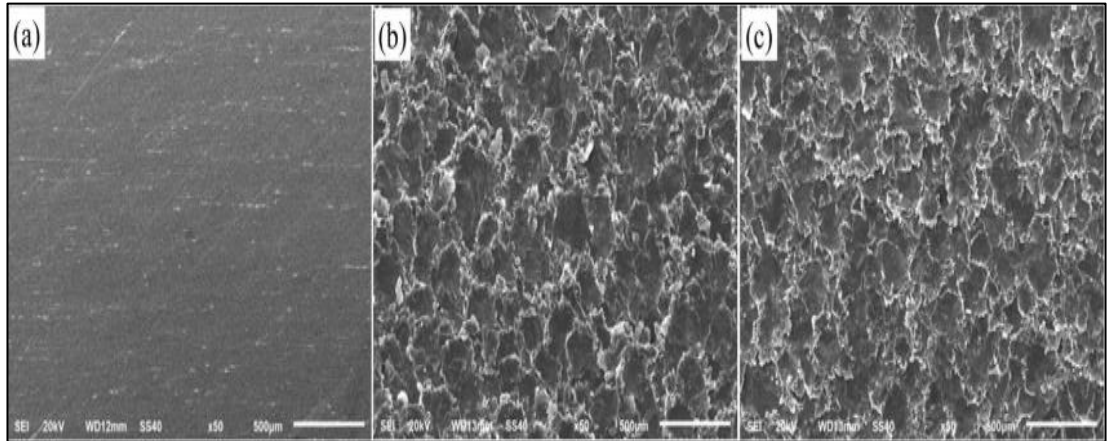


### 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

#### 3.1. Alüminyum Alaşımlarının Bilyalı Dövme İşlemi

Bu bölümde alüminyum alaşımlarına uygulanan bilyalı dövme işleminin malzemelerin mekanik ve yüzey-yüzey altı özelliklerine etkileri üzerine gerçekleştirilmiş yayınlar incelenmiştir. Tez çalışmasında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sunumundan önce konu ile ilgili literatürde gerçekleştirilen çalışmaların incelenmesi amaçlanmıştır.

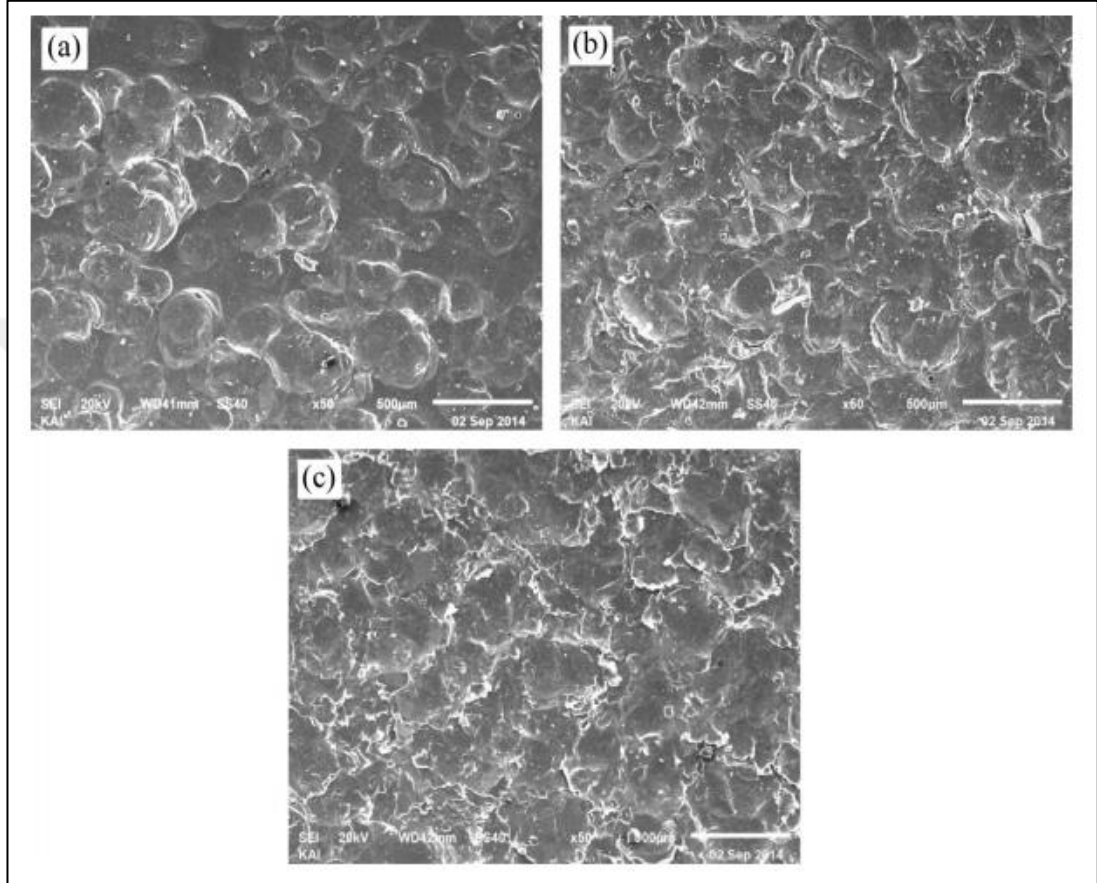
Yong-Seog Nam ve arkadaşları havacılıkta kullanılan 2124-T851 alüminyum alaşımı farklı bilyalı dövme parametreleri (nozul mesafesi, basınç, çarpma açısı ve dövme süresi) altında Almen şiddeti ve yüzey örtme oranı üzerindeki etkilerini incelemek için üç seviyeli Box-Behnken tasarımını kullanmışlardır. Optimum bilya dövme koşulları (mesafe, basınç, açı ve zaman) sırasıyla 50 mm, 2 kg/cm<sup>2</sup>, 51° ve 180 sn olarak belirlemişlerdir. Şekil 3.1’de optimum koşullarda daha büyük yüzeylerin oluştuğu gözlemlenmiştir [40].



Şekil 3.1. SEM fotoğrafları: a) dövülmemiş b) optimal c) aşırı dövülmüş [40]

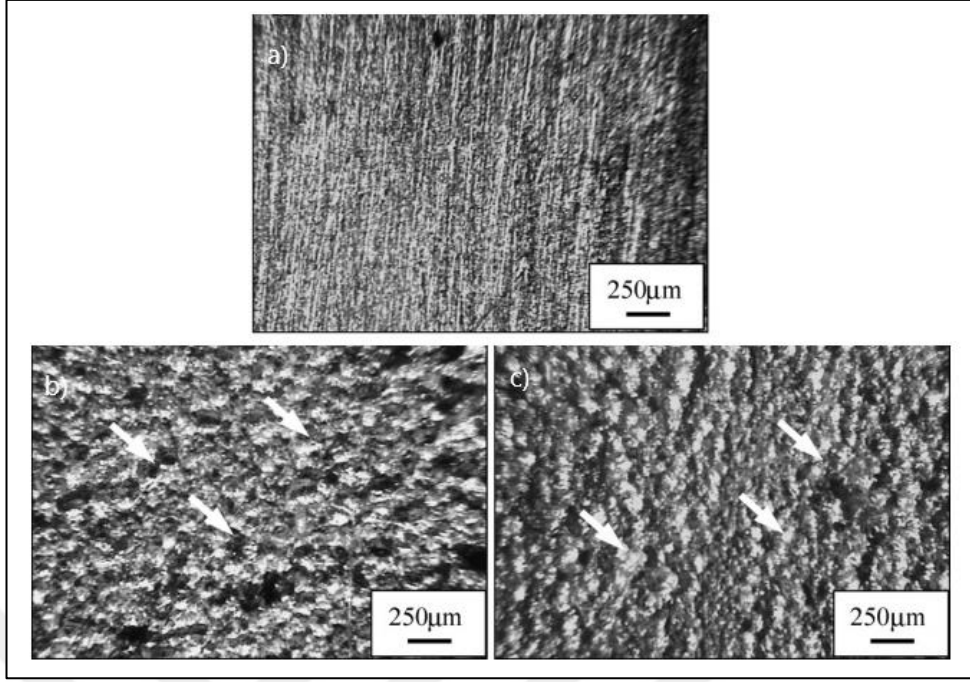
Bu ekibin gerçekleştirdiği diğer bir çalışmada A2124-T851 alüminyum alaşımını bilyalı dövdükten sonra yüzey özelliklerini SEM analizleriyle incelemişlerdir. 3 farklı sürede gerçekleştirilen deneylerde, bilyalı dövme süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemeyi amaçlamışlardır. Şekil 3.2’ de farklı dövme sürelerine göre SEM

çalışmasıyla mikroyapıları incelemişlerdir. Optimal sürede oluşan çukurları belli sınırlar içinde ve homojen olarak şekilde gözlemlemişlerdir. Dövme süresi optimum seviyeyi aştığından çukurlar üst üste geldiğini ve kritik lokal plastik deformasyonların oluştuğunu tespit etmişlerdir [41].

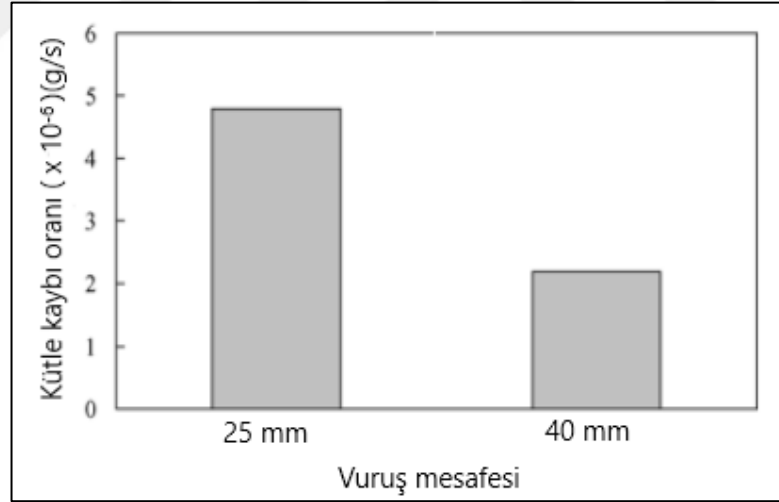


Şekil 3.2. SEM gözetimleri a) az dövülmüş (65 s) b) optimal (130 s) c) aşırı dövülmüş (390 s) [41]

A.Sahaya Grinspan ve arkadaşları yağlı jet ile yapılan dövme işleminin AA6061-T4 alüminyum alaşımının dövme mesafesine bağlı elde edilen yüzey morfolojilerini ve kütle kaybını incelemişlerdir. Şekil 3.3’ de yağ jetiyle dövülmüş ve dövülmemiş yüzeyleri gösteren optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Çalışmalarında, işlem görmeyen AA6061-T4 alüminyum alaşımında ortalama pürüzlülük değeri en az iken, dövülen AA6061-T4 alaşımında dövme mesafesinin artması ile ortalama pürüzlülük değerlerinde azalma gerçekleştiğini tespit etmişlerdir. Dövme mesafesinin artması kütle kaybı oranında da azalmaya sebep olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 3.4). Oklar, dövülmüş yüzeyde meydana gelen girintileri göstermektedir [42].

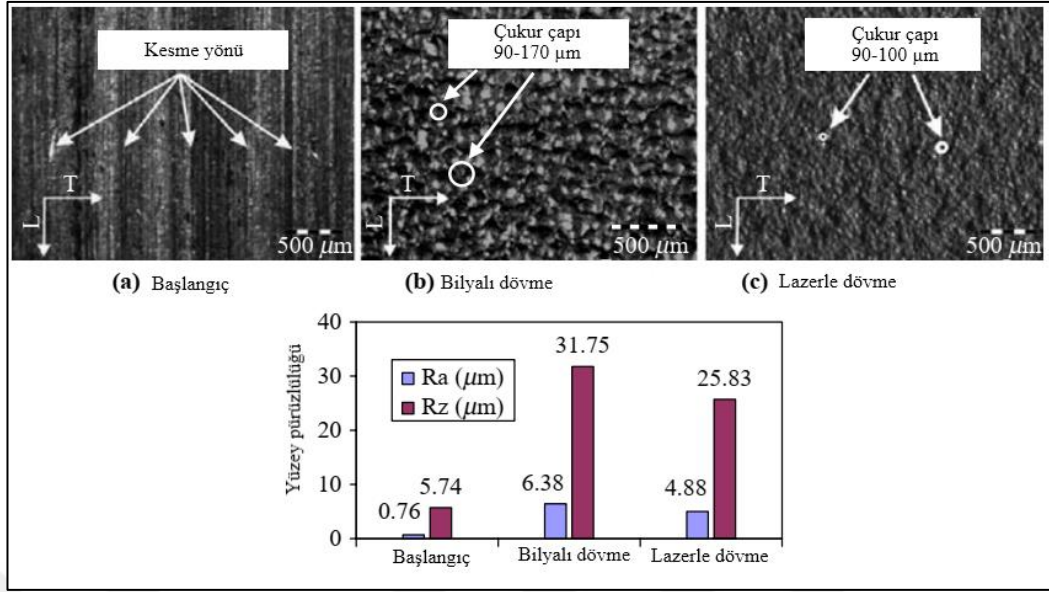


Şekil 3.3. Yağ jetiyle dövülmüş ve dövülmemiş yüzeyleri gösteren optik görüntüleri: a) dövülmemiş AA6061-T4 (b) dövülmüş AA6061 T4, dövme mesafesi 25 mm ve (c) dövülmüş AA6061-T4, dövme mesafesi 40 mm [42]



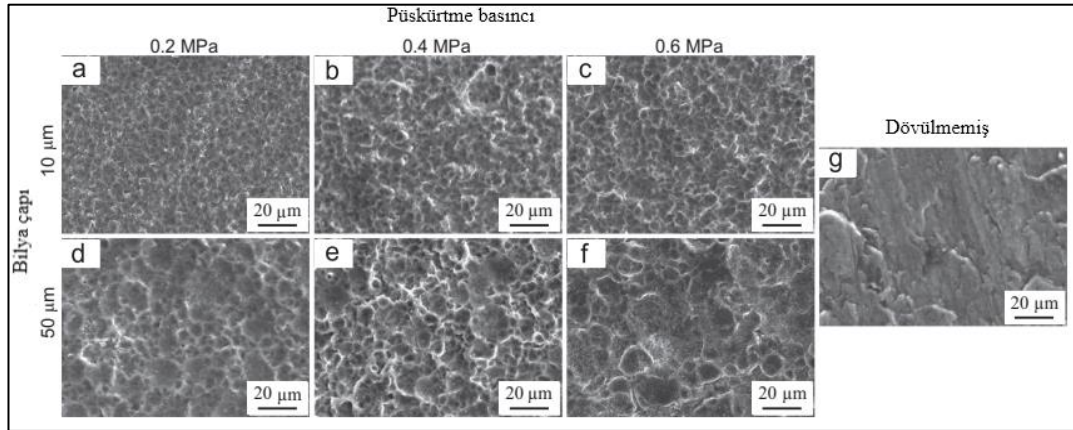
Şekil 3.4. Dövme mesafesinin kütle kayıp oranına etkisi [42]

Uros Trdan ve arkadaşları çökeltme ile sertleştirilmiş AA 6082 - T651 alüminyum alaşımı üzerinde lazerle dövmenin ve bilyalı dövmenin etkisini incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin sonuçları göre daha düşük pürüzlülük değerleri için lazerle dövmenin uygun olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 3.5'de lazerle ve bilyalı dövme işlemi görmüş numunenin  $R_a$  ve  $R_z$  pürüzlülük değerleri ve topografi görüntüleri verilmiştir [43].



Şekil 3.5.  $R_a$  ve  $R_z$  pürüzlülük değerleri ve topografi görüntüleri [43]

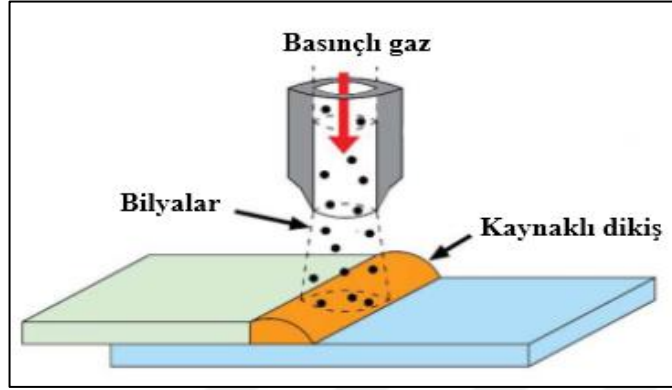
Shoichi Kikuchi ve arkadaşları bilyalı dövme işleminin 5056 alüminyum alaşımının yüzey mikroyapısı üzerindeki etkisini bilya boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak SEM görüntüleriyle incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünün bilya boyutunun ve püskürtme basıncının artmasına bağlı olarak arttığı sonucuna varmışlardır. Şekil 3.6'de bilya boyutu ve püskürtme basıncının yüzey pürüzlülüğüne etkisini gösteren fotoğraf verilmiştir [44].



Şekil 3.6. Bilya boyutu ve püskürtme basıncının yüzey pürüzlülüğüne etkisi [44]

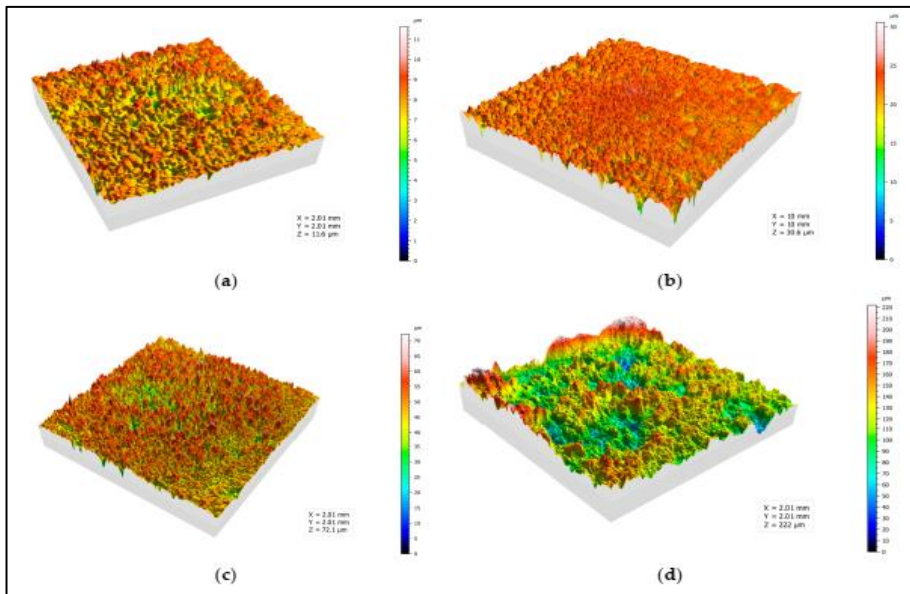
Haodong Wang ve arkadaşları TIG kaynak metodu ve bindirme kaynağı ile birleştirilmiş Al5052 / Ti6Al4V malzemeleri bilyalı dövme işlemine tabi tutmuştur. Çelik bilyalar kullanılarak gerçekleştirilen yüksek enerjili bilyalı dövme işleminden sonra Al5052 / Ti6Al4V TIG kaynak-lehim bağlantı noktalarının mikroyapısını

incelemişlerdir. Şekil 3.7’de yüksek enerjili bilyalı dövme işleminin şematik gösterimi verilmiştir. Çarpma yüzeyindeki mikro sertlik değerleri derinlik boyunca ölçülmüştür ve derinlik arttıkça mikro sertlik değerinin azaldığını gözlemlemişlerdir [45].



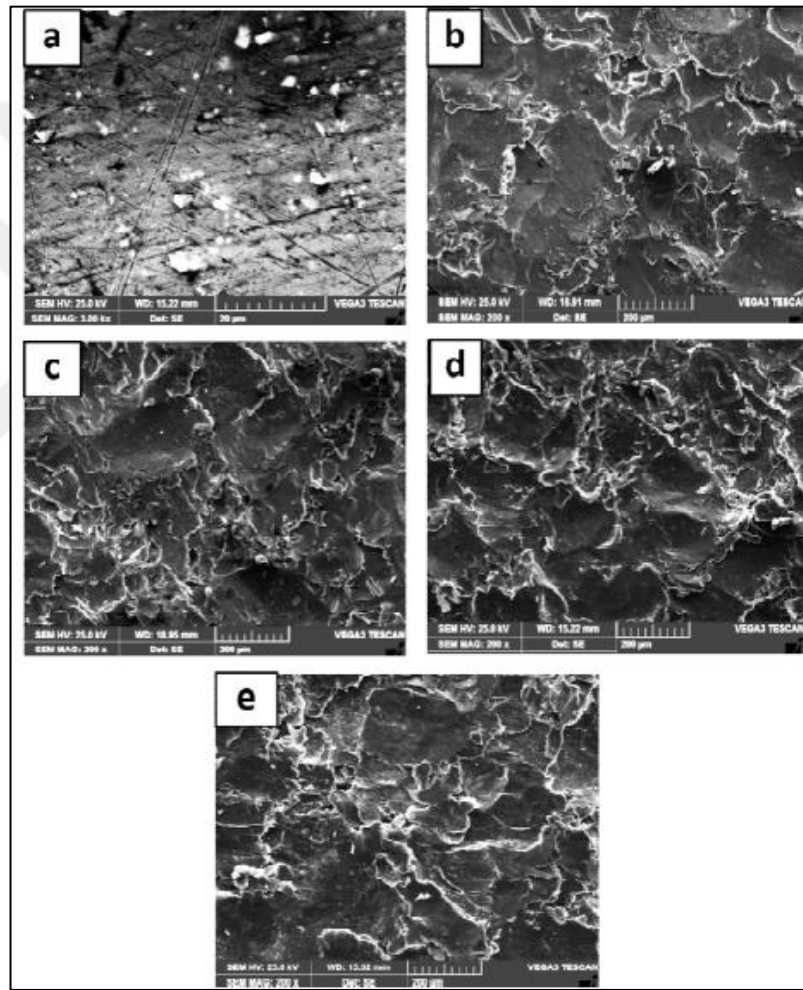
Şekil 3.7. Bağlantı noktasının yüksek enerjili bilyalı dövme prosesi [45]

Xiaolong Ding ve arkadaşları 5052 alüminyum alaşımına su jeti ile dövme işlemi uygulamışlar ve farklı parametrelerinin kütle kaybı, pürüzlülük ve yüzey sertliği üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünün basınç artışıyla arttığını ve işlenmemiş bir yüzey ile karşılaştırıldığında su jeti ile dövmenin yüzey sertliğini %61,69 oranında artırdığını gözlemlemişlerdir. Farklı basınç değerleri ve vuruş mesafesinin yüzey kalitesi üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Şekil 3.8’de farklı basınçlarda elde edilen 3D yüzey topoğrafyaları verilmiştir [46].



Şekil 3.8. Farklı basınç değerlerinin 3 boyutlu yüzey topoğrafyasına etkileri a) 15 MPa, b) 20 MPa, c) 25 MPa, d) 30 MPa [46]

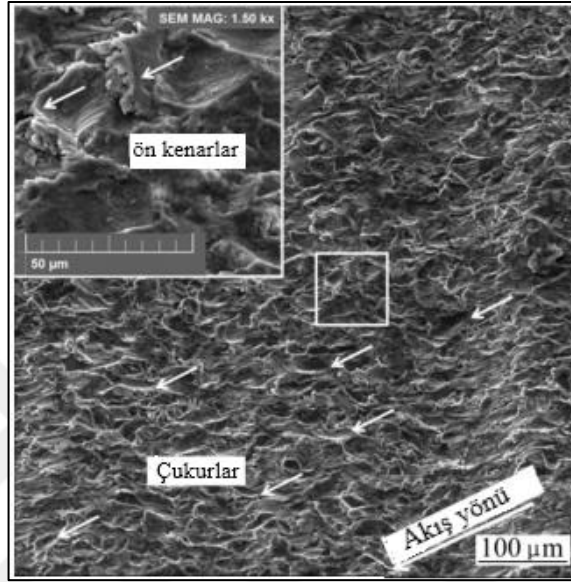
J. Venumurali ve arkadaşları farklı bilyalı dövme süreleri (35, 70, 105 ve 140 sn) altında çelik bilya ile yaptıkları bilyalı dövme işleminin AA7075 alüminyum alaşımının yüzey pürüzlülüğü, yüzey sertliği ve yüzey morfolojisi üzerindeki etkisini incelemiştirlerdir. Dövme süresi artışına paralel olarak mikro sertlik ve yüzey pürüzlülüğünde artış gözlemlemiştirlerdir. Ancak aşırı dövme ve yüzey aşınmasından dolayı 140 sn sonra yüzey pürüzlülüğünde düşüş tespit edilmiştir. Çarpma zamanını arttırdıkça yüzeyde oluşan tepe ve çukurların yoğunluğunda artış gözlemlemiştirlerdir. Şekil 3.9'de AA7075 alüminyum alaşımının SEM morfolojileri verilmiştir [47].



Şekil 3.9. AA7075 alüminyum alaşımının SEM morfolojileri a) dövülmemiş b) 35 s, c) 70 s, d) 105 s e) 140 s [47]

J. Ibarra ve arkadaşları lazer şok dövme işleminin 6061-T6 alüminyum alaşımının erozif aşınmaya etkisini incelemiştirlerdir. Silis partikülleri kullanarak farklı partikül çarpma açılarının ( $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ) erozif aşınma işlemi üzerindeki etkisini incelemiştirlerdir. Maksimum kütle kaybının  $15^\circ$  de, maksimum erozyon derinliğinin ise

30° darbe açısında meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Lazer şok dövme işlemi gerçekleştirilen 6061-T6 alüminyum erozyon direncinde bir fark olmadığı ve bulunan farklılıklar lazer işleminin oluşturduğu ilk pürüzlülüğten olduğunu tespit etmişlerdir. Şekil 3.10'de lazer şok dövme işlemi uygulanmamış 30° partikül çarpma açısındaki numunenin yüzey morfolojisi verilmiştir [48].

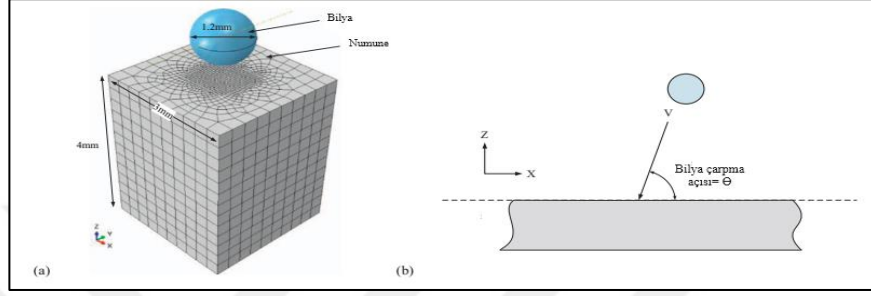


Şekil 3.10. Numunenin 30° çarpma açısında erozyon yüzeyi [48]

S. Das ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Al-Si alaşımının farklı çarpma açılarında (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) erozyon davranışını incelemişlerdir. Maksimum aşınmanın 45° çarpma açısı ile gerçekleştiğini, 15°-30° çarpma açılarında malzemede mikro sürme ve mikro kesme, 45°-60° çarpma açılarında kesme ve 75°-90° çarpma açılarında ise mikro kırılma aşınma mekanizmalarını gözlemlemişlerdir [49].

E. Avcu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, farklı partikül çarpma açılarında (30°, 45°, 60°, 75°, 90°) AA-6101 ve AA-1070 alüminyum alaşımlarının katı partikül erozyon davranışını inceleyip karşılaştırmışlardır. Her iki malzemede düşük partikül çarpma açılarında (30°-45°) mikro sürme ve mikro kesme erozif aşınma mekanizmaları gözlenmiş, dik çarpma açılarında (75°-90°) ise her iki malzemede mikro çatlaklar ve plastik deformasyona uğramış bölgeler görüntülemişlerdir. 30° çarpma açısında en yüksek erozyon oranının gerçekleştiğini ve 90° çarpma açısında yüzeye saplanmış partiküller olduğunu gözlemlemişlerdir [50].

Zhang Jiabin ve arkadaşları sonlu elemanlar yöntemi ile bilyalı dövme parametrelerinin (bilya çarpma hızı ve kütle akış hızı) AA 2024-T351 alüminyum alaşımının yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkilerini incelemiştir. Çalışmalarında, bilya çarpma açılarının  $35^\circ$  ve  $45^\circ$  olduğu durumlardaki pürüzlülük değerlerinin  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $85^\circ$  ve  $90^\circ$  olduğu durumlara göre oldukça düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Şekil 3.11'de sonlu elemanlar yönteminin simülasyonu verilmiştir [51].



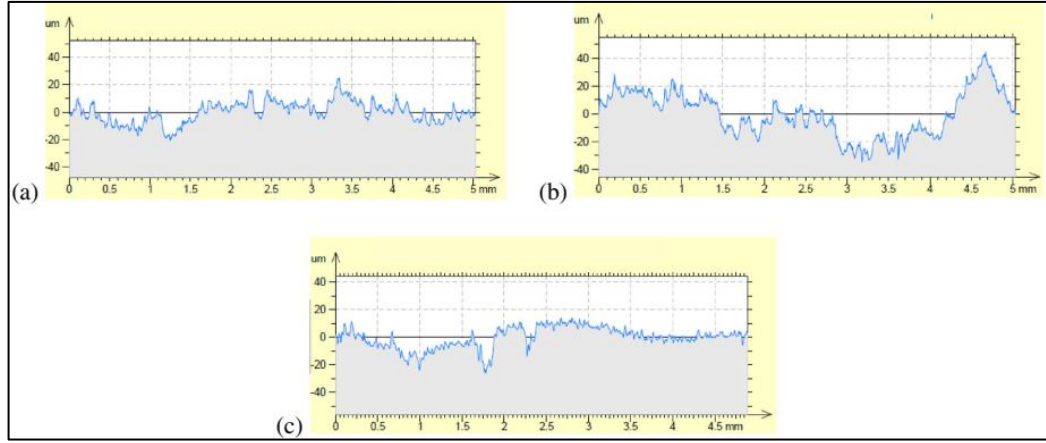
Şekil 3.11. Sonlu elemanlar yönteminin simülasyonu a) Tek çarpma modelinin geometrisi b) Belirtilen çarpma açısı ve hızda alüminyum alaşımını etkileyen tek atış[51]

A. Gariepy ve arkadaşları bilyalı dövme işlemi uyguladıkları AA2024-T351 alüminyum alaşımının mikroyapı kesitinde yüzeye yakın bölgelerde aşırı deformasyona uğramış tane yapısı belirlemişler ve bu yapının merkeze doğru gidildikçe ana malzeme yapısına dönüştüğünü göstermişlerdir [22].

Subhankar Biswas ve arkadaşları yumuşak çelik ve alüminyum numunelerinin farklı çarpma açıları ( $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ) ve farklı partikül hızlarında aşınma davranışlarını incelemiştir. Dar çarpma açılarında kesme aşınma mekanizması, daha yüksek darbe açısında ise deformasyon aşınma mekanizmasının baskın olduğunu ve her iki malzemede  $15^\circ$  çarpma açısında en yüksek erozyon değerine,  $90^\circ$  çarpma açısında ise en düşük erozyon değerine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir [52].

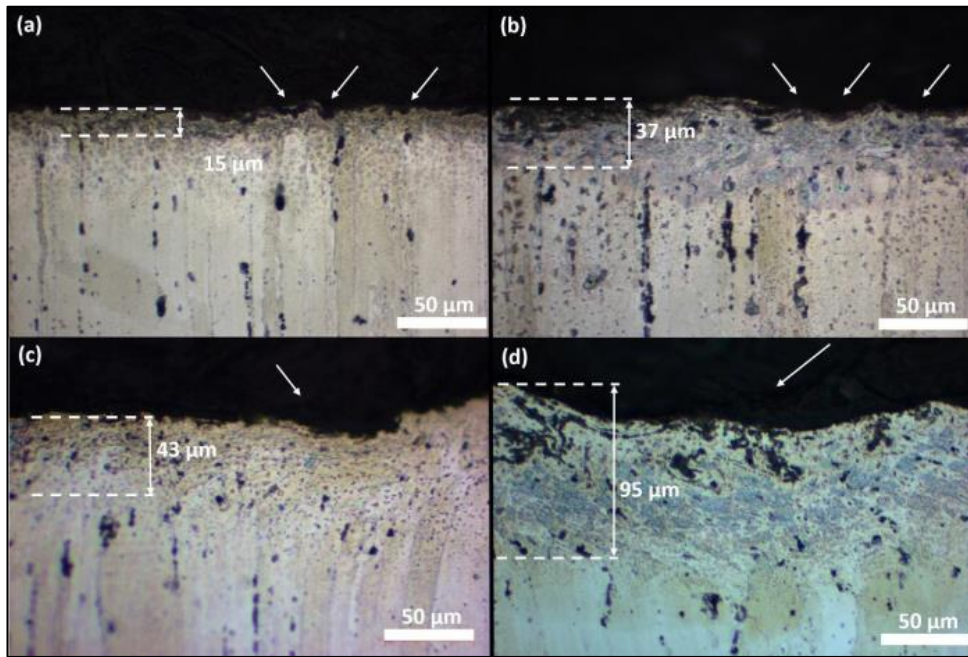
M. Palacios ve arkadaşları farklı bilyalı dövme işlemi altında 6063 alüminyum alaşımının aşınma davranışını, yüzey pürüzlülüğünü, yüzey mikro yapısını ve mikro sertlik eğilimlerini incelemiştir. Aynı mikroyapıya ve düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olan numunelerin yüzey pürüzlülüğü, uygulanan diğer bilyalı dövme işlemlere göre aşırı bilyalı dövme işleminde daha yüksek değerler aldığını belirlemişlerdir. Şekil 3.12'de 6063 alüminyum alaşımının farklı bilyalı dövme işlemlerinden elde edilen yüzey profilleri verilmiştir [53].





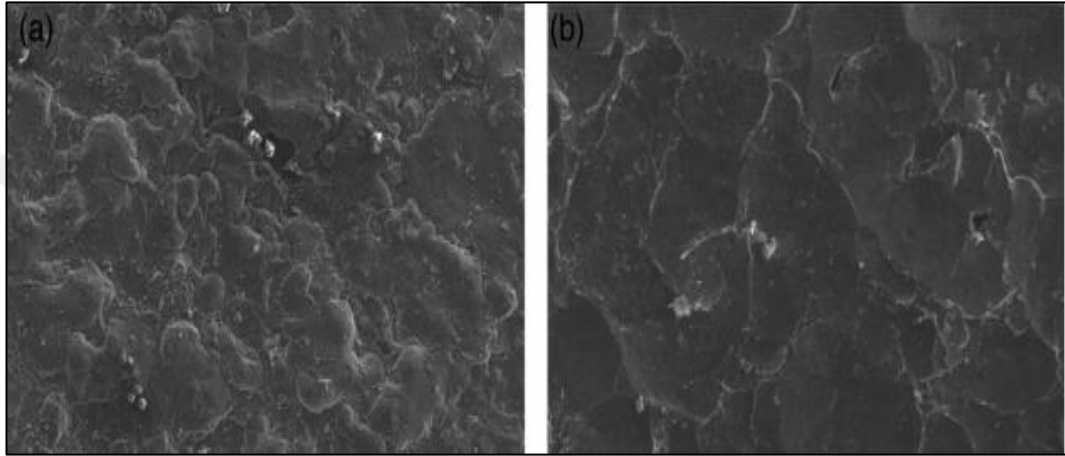
Şekil 3.12. Farklı bilyalı dövme işlemlerinden sonra 6063 alüminyum alaşımının yüzey profilleri a) geleneksel bilyalı dövme, b) aşırı bilyalı dövme, c) aşırı bilyalı dövme-zımparalanmış [53]

E. Avcu bilya boyutunun ve bilya püskürtme basıncının AA7075-T6 alüminyum alaşımının mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkilerini incelemiştir. Püskürtme basıncı ve bilya boyutu artışı alaşımın yüzey altı sertlik değerlerinde artışa neden olduğunu tespit etmiştir. Püskürtme basıncındaki ve bilya boyutundaki artış mikroyapıda meydana gelen değişimin şiddetini ve derinliğini arttırmıştır. Şekil 3.13'de farklı bilyalı dövme parametreleri ile dövülen numunelerin optik mikroskop ile elde edilen yüzey altı mikroyapı fotoğrafları verilmiştir [18].



Şekil 3.13. Farklı bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak yüzey altı mikroyapısının optik mikroskop fotoğrafları (a) 2 bar ve S10 bilyası, (b) 4 bar ve S10 bilyası, (c) 2 bar S60 bilyası, (d) 4 bar ve S60 bilyası [18]

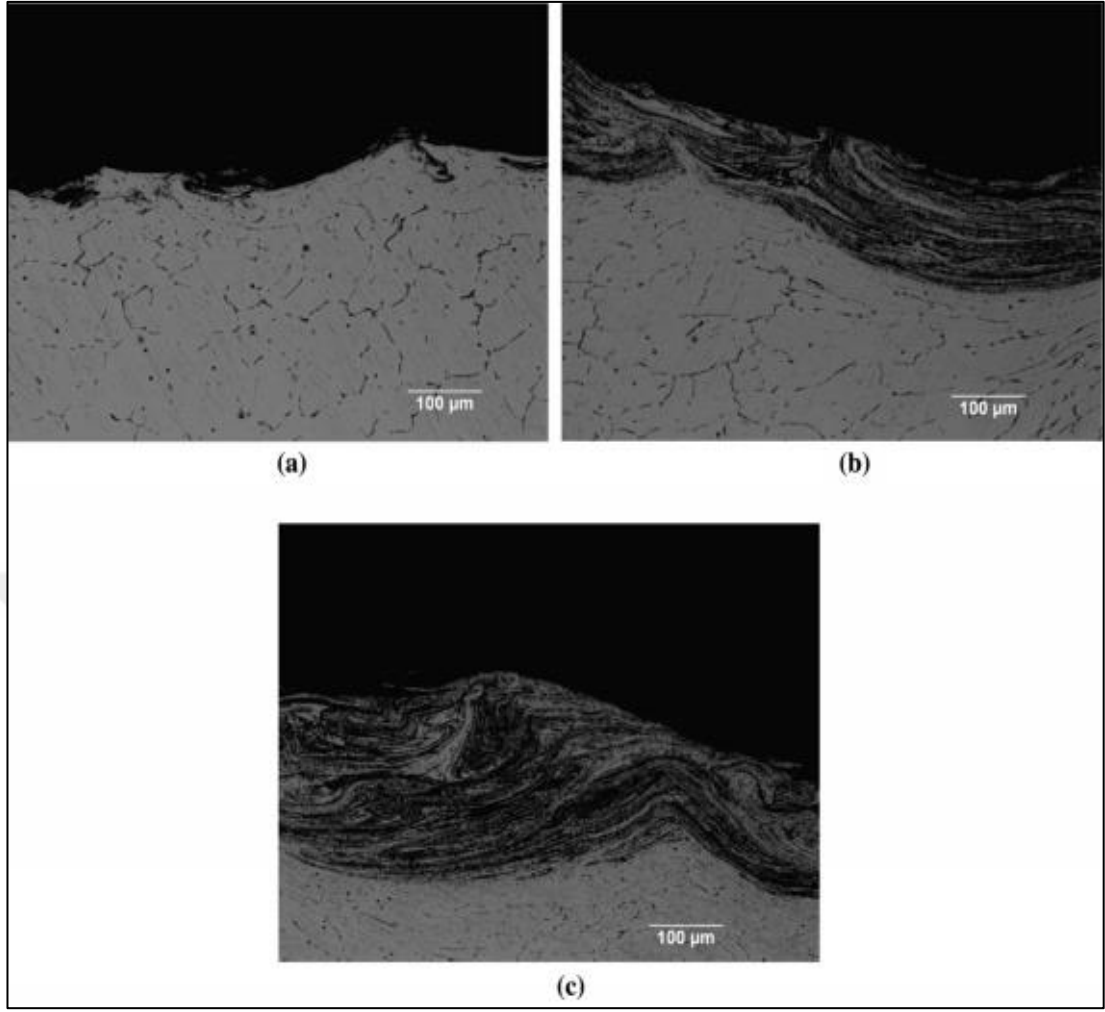
M.D. Harding ve arkadaşları zirkonyum oksit bilyaları kullanarak gerçekleştirdikleri bilyalı dövme işlemi sonrası Al-Zn-Mg-Cu (PM7075-T6) alaşımının mekanik ve fiziksel özelliklerini karakterize edip, bilyalı dövme işleminin etkilerini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda bilyalı dövme işleminin pekleşme ve kalıntı basma gerilme artışı nedeniyle malzeme sertliğini arttırdığını belirtmişlerdir. Şekil 3.14'de bilyalı dövme işlemi sonrası SEM ile elde edilen fotoğraflar verilmiştir [54].



Şekil 3.14. PM7075-T6'nın genel yüzey görünümü a) bilyalı dövme işlemi öncesi, b) bilyalı dövme işlemi sonrası [54]

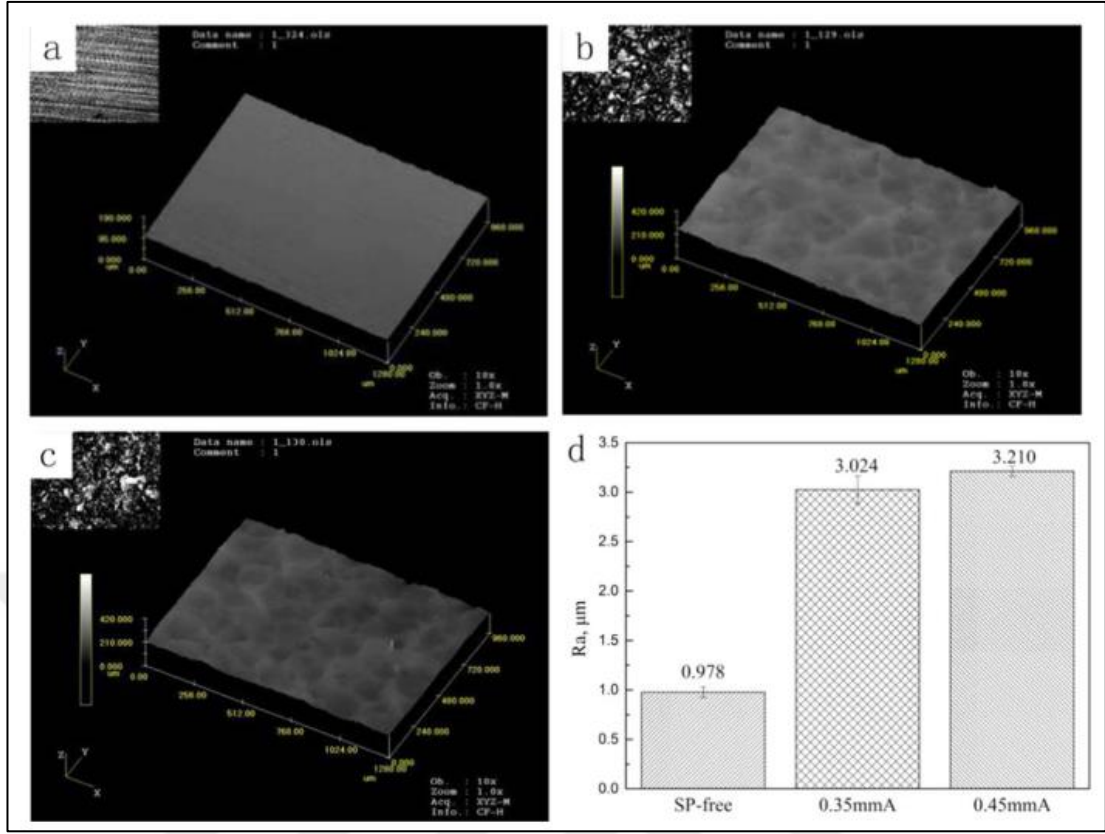
Žagar Sebastjan ve arkadaşı ENAW 7075-T651 alüminyum alaşımı üzerindeki farklı bilyalı dövme işlemi koşullarının (Almen şiddeti, yüzey örtme oranı) ve yaşlandırma sıcaklıklarının mikrosertlik üzerine etkisini incelemişlerdir. Maksimum mikro sertlik değerini 145°C yaşlandırma sıcaklığında ve %200 yüzey örtme oranında 210 Hv0.1 olarak ölçmüşlerdir. Bu değer, T651 temper durumundaki malzemeye kıyasla yaklaşık %36 daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir [55].

Juan González ve arkadaşları AA 6063 alaşımına geleneksel bilyalı dövme, aşırı bilyalı dövme, aşırı ve tekrar bilyalı dövme işlemleri ile malzeme yüzey ve yüzey altı özelliklerine ve yorulma dayanımına etkisini incelemişlerdir. Şekil 3.15'de farklı bilyalı dövme işlemleri sonrasında elde edilen Al-6063'ün yüzey mikroyapılarının görüntüleri verilmiştir. Aşırı bilyalı dövme işleminin yüzeyde daha fazla deformasyon meydana getirdiğini belirtmişlerdir [56].



Şekil 3.15. Farklı bilyalı dövme işlemlerinden sonra Al-6063'ün yüzey mikro yapısı (a) geleneksel bilyalı dövme (b) aşırı bilyalı dövme (c) aşırı ve tekrar bilyalı dövme [56]

Huijing Zhang ve arkadaşları bilyalı dövme işleminin Al7075-T6511 alaşımının sürtünme ve aşınma davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için alüminyum alaşımlarını farklı Almen şiddetleri ile dövmüşlerdir. Bilyalı dövme işleminin Al7075-T6511 alaşımının sürtünme ve aşınma davranışı üzerindeki etkisini ortaya koymak için yüzey pürüzlülüğü, mikroyapı ve mikro sertlik gibi özellikleri araştırmışlardır. Şekil 3.16'de bilyalı dövme öncesi ve sonrası numunelerinin 3D profilleri ve farklı Almen şiddetleri ile dövülmesi sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük grafiği verilmiştir. Almen şiddetinin artması yüzey pürüzlülük değerini çok az değiştirdiğini belirtmişlerdir [57].



Şekil 3.16. Bilyalı dövme işlemi öncesi ve sonrasında numunelerin 3D profilleri: (a) dövülmemiş; (b) 0,35 mA'da bilyalı dövme; (c) 0,45 mA'da bilyalı dövme ve (d) yüzey pürüzlülük değerleri [57]

#### 4. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde tez çalışmasında uygulanan yöntemler, gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, kullanılan cihaz ve malzemeler ayrıntılı bir şekilde açıklanacaktır. Numune temini ve numunelerin metalografik işlemler ile hazırlanması, farklı parametreler altında bilyalı dövme işlemleri ve bilyalı dövme işlemi sonrası yüzey ve yüzey altı özelliklerinin incelenmesi bölümleri sırasıyla verilmiştir.

##### 4.1. Malzeme

Tez çalışmasında gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemlerinde, AA7075-T6 alüminyum alaşımı ve iki farklı boyutta paslanmaz çelik bilyalar kullanılmıştır.

##### 4.1.1. AA7075-T6 numuneleri

AA7075-T6 alüminyum alaşımı 25 mm çapında çubuk malzeme olarak Teksa Metal ve Plastik Ürünleri İmalat San. ve Tic. Ltd. Şti. firmasından tedarik edilmiştir. Malzemeye ait kimyasal kompozisyon ve mekanik özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. AA7075 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri

Kimyasal Kompozisyon (Kütlece %)								
Elementler	Si	Zn	Mg	Cu	Fe	Mn	Ti	Cr
	0,110	5,70	2,30	1,350	0,220	0,170	0,170	0,210
Mekanik Özellikler								
Çekme Dayanımı (MPa)		Akma Dayanımı (MPa)		Kopmada Uzama (%)			Sertlik (HBW)	
620,78		571,82		8,00			154	

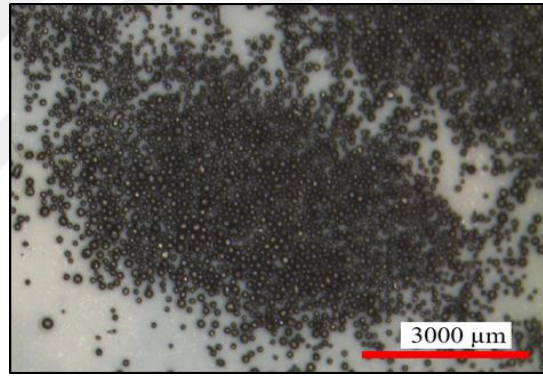
##### 4.1.2. Paslanmaz çelik bilya özellikleri

Bilyalı dövme işlemlerinde kullanılacak 2 farklı boyuttaki paslanmaz çelik bilyalar Fetaş Metalurji firmasından temin edilmiştir. Tez çalışmasında kullanılacak paslanmaz çelik bilyaların boyutları ve kodları; S10 (0,1-0,3 mm) ve S60 (0,4-0,9 mm)’ dir. Tablo 2’de paslanmaz çelik bilyaların fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşenleri verilmiştir.

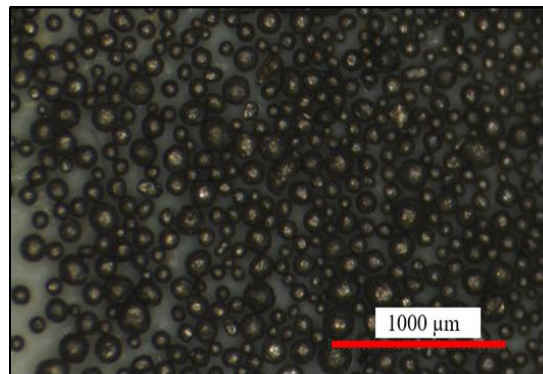
Tablo 4.2. Paslanmaz bilya özellikleri

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

Şekil 4.1. ve Şekil 4.2’de S10 (0,1-0,3 mm) boyutlu bilyaların 1X ve 3X büyütme ile elde edilen optik mikroskop fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 4.1. S10 paslanmaz çelik bilya optik mikroskop fotoğrafı (1X büyütme)

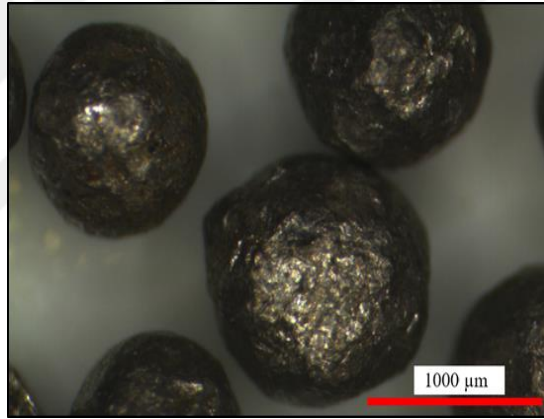


Şekil 4.2. S10 paslanmaz çelik bilya optik mikroskop fotoğrafı (3X büyütme)

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de S60 (0,4-0,9 mm) boyutlu bilyaların 1X ve 3X büyütme ile elde edilen optik mikroskop fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 4.3. S60 paslanmaz çelik bilya optik mikroskop fotoğrafı (1X büyütme)

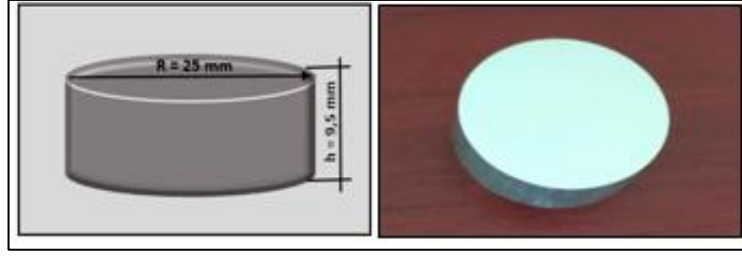


Şekil 4.4. S60 paslanmaz çelik bilya optik mikroskop fotoğrafı (3X büyütme)

## 4.2. Yöntem

### 4.2.1. Numunelerin metalografik olarak hazırlanması

Çubuk şeklinde tedarik edilen AA7075-T6 alüminyum alaşımı Kar Metal marka yarı otomatik şerit testere (M42 27x0,9x3000) ile kuru olarak Şekil 4.5’de gösterildiği şekilde 10 mm kalınlığında kesilmiştir. Kesme işlemi nedeniyle numunelerin yüzeyinde oluşan testere izlerinin temizlenmesi amacıyla alın tornalama işlemi yapılmıştır.



Şekil 4.5. AA7075 numunesi ve boyutları

Otomatik zımparalama ile numuneler sırasıyla 120, 320, 600, 1000 ve 2500 meshlik zımparalar ile zımparalanmış ve sonrasında 6 ve 1 mikronluk elmas solüsyonlar ile parlatılmıştır. Aşağıdaki reçete AA7075-T6 numunelerinin zımparalama ve parlatma işlemleri için kullanılmıştır:

- 180 mesh zımpara, 300 rpm dönüşte, 2,5x2 dakika, 20 N kuvvet,
- 320 mesh zımpara, 300 rpm dönüşte, 2,5x2 dakika, 20 N kuvvet,
- 600 mesh zımpara, 250 rpm dönüşte, 2,5x2 dakika, 15 N kuvvet,
- 1000 mesh zımpara, 250 rpm dönüşte, 2,5x2 dakika, 15 N kuvvet,
- 2500 mesh zımpara, 250 rpm dönüşte, 2,5x2 dakika, 15 N kuvvet,
- 6 ve 1 mikronluk elmas solüsyonlar, 150 rpm dönüşte, manuel

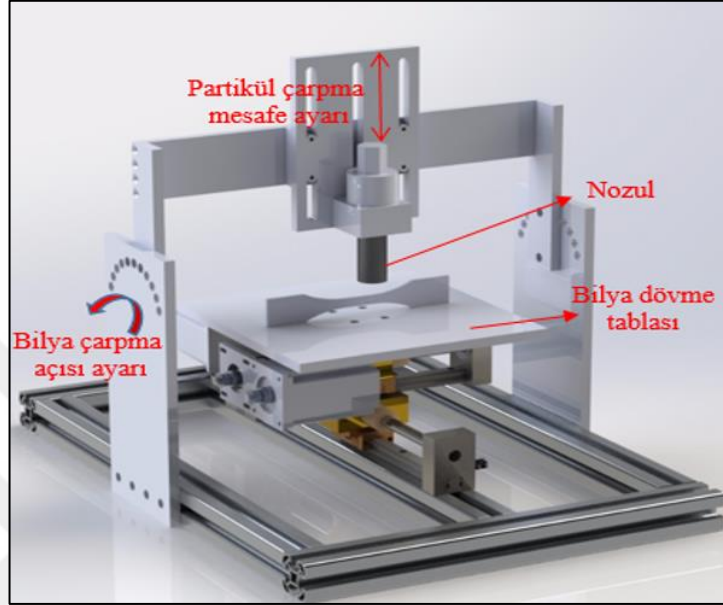
AA7075-T6 alaşımı numunelere parlatma işlemi uygulandıktan sonra Keller dağlayıcısı ile dağlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin metalografik olarak hazırlanması ile ilgili tüm işlemler Kocaeli Üniversitesi Ford Otosan İhsaniye Otomotiv Meslek Yüksekokul Yüzey İşlemleri Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

#### 4.2.2. Bilyalı dövme cihazı ve işlemleri

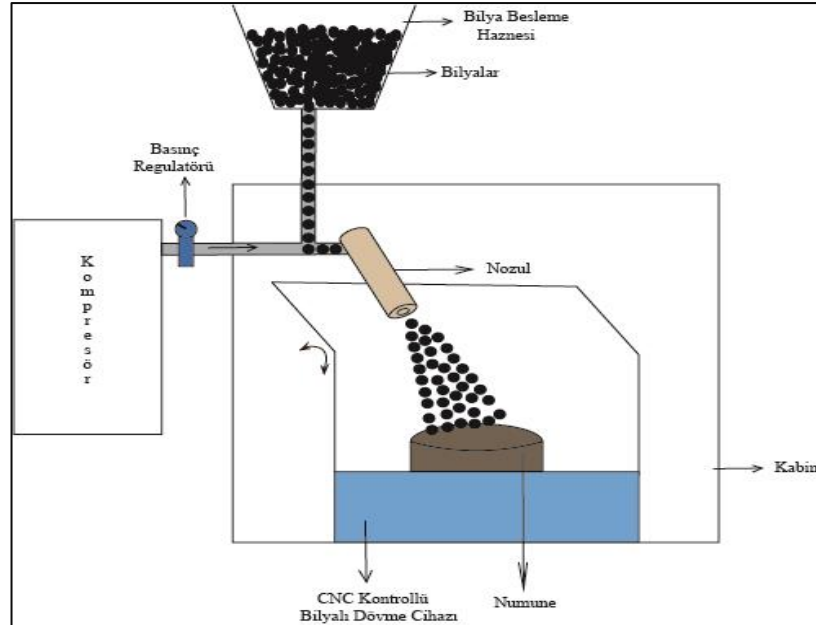
Yüksek lisans tez çalışmasında gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemleri Kocaeli Üniversitesi Ford Otosan İhsaniye Otomotiv Meslek Yüksekokulu Yüzey İşlemleri Laboratuvarı'nda bulunan CNC kontrollü bilyalı dövme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.6'da tez çalışmalarında kullanılan bilyalı dövme test cihazı ve Şekil 4.7'de ise cihazın şematik gösterimi verilmiştir. Test cihazı sayesinde nozul ile numune yüzeyi arasındaki mesafe, bilya çarpma açısı parametreleri ayarlanabilmektedir ve gerçekleştirilen testlerin hassasiyeti ve tekrarlanabilirliği sağlanmaktadır. Sistem hava kompresörü, bilya besleme haznesi, püskürtme nozulu,



basıncı hava ile birlikte bilyaların iletiminde kullanılan bağlantı elemanları, iki eksende hareket edebilen numunenin sabitlendiği bilya dövme tablasından oluşmaktadır. Numune yüzeyine çeşitli parametreler altında gönderilen bilyalar nozul yardımıyla yüzeye tekrarlı bir şekilde çarpmaktadır.



Şekil 4.6. CNC kontrollü bilyalı dövme test cihazını 3 boyutlu şematik çizimi



Şekil 4.7. Bilyalı dövme işleminde kullanılan test sisteminin şematik gösterimi

Tablo 4.3’de tez çalışmasında kullanılan bilyalı dövme test parametreleri verilmiştir. Bilyalı dövme işlemi 3 bar altında, 60 sn dövme süresinde, S10 ve S60 paslanmaz çelik bilyalar ile 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° olmak üzere altı farklı bilya çarpma açısıyla ve nozul-numune arası mesafe 30 mm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.3. Bilyalı dövme parametreleri

Bilya türü	Paslanmaz çelik bilya
Bilya boyutu	S10 (0,1-0,3 mm), S60 (0,4-0,9 mm)
Bilya çarpma açıları	15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°
Püskürtme basıncı	3 bar
Dövme süresi	60 sn
Test sıcaklığı	25°C
Nozul çapı	10 mm
Nozul uzunluğu	130 mm
Nozul-numune arası mesafe	30 mm

Bilyalı dövmeli işlemi sonrası numunelerin yüzey pürüzlülüklerinin incelenmeden önce ISOLAB marka ultrasonik banyo kullanılarak numunelerin derinlemesine temizlenmesi sağlanmıştır. Şekil 4.8’de numunelerin temizlenmesinde kullanılan ultrasonik banyo gösterilmiştir [58]. Ultrasonik banyonun haznesine yeterli miktarda alkol konulduktan temizlik işlemi 7 dakikada gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8. Ultrasonik banyo [58]

Bilyalı dövme işlemi sonrası optik mikroskop ve sertlik incelemeleri için numunelerin kesitleri alınmıştır. Kesit alma işlemi elmas kesme diski kullanılarak Metkon Micracut 125 marka hassas kesme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.9’de kesit alma işlemlerinin yapıldığı cihaz gösterilmiştir [59]. Daha sonra kesilen numuneler bakalite alınmıştır.



Şekil 4.9. Mikro kesme cihazı [59]

Kesiti alınan numunelerin bakalite alma işlemleri tamamlandıktan sonra yüzeylerinin ayna parlaklığına getirilmesi için Şekil 4.10’deki Metkon Forcipol 2V marka zımpara parlatma cihazı kullanılmıştır[60].



Şekil 4.10. Zımpara ve parlatma cihazı [60]

#### 4.2.3. Bilyalı dövme öncesi ve sonrası kütle kaybı

Tüm deney numuneleri bilyalı dövme işlemi öncesi ve sonrasında Shimadzu ATX-224 marka hassas terazi ile ölçülerek kütle değişimi hesaplanmıştır. Kullanılan hassas terazinin hassasiyeti 0,0001 gramdır. Şekil 4.11’de ağırlık ölçümlerinin yapıldığı cihaz gösterilmiştir [61].




Şekil 4.11. Hassas terazi [61]

#### 4.2.4. Bilyalı dövülen AA7075-T6 alaşımı numunelerin yüzey ve yüzey altı mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi

Tez çalışmasında bilyalı dövme işlem parametrelerinin AA7075-T6 alaşımının yüzey ve yüzey altı mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi ve bu özelliklerde meydana gelen değişimlerin bilyalı dövme operasyon parametreleri ile ilişkilendirilmiştir.

##### 4.2.4.1. SEM incelemeleri

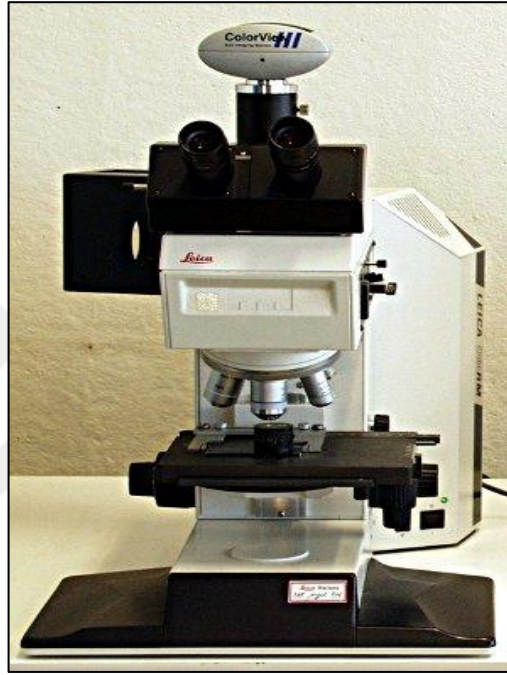
AA7075-T6 alüminyum alaşımının bilyalı dövme işlemleri sonrası taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yüzey morfolojileri incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Araştırma ve Uygulama Laboratuvarı'nda bulunan Vega Tescan II cihazı gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.12'de deneysel çalışmalarda kullanılan SEM cihazı ve özellikleri verilmiştir [62].

	Yüksek çekimde çözünürlük	3 nm
	Düşük çekimde çözünürlük	3,5 nm.
	Büyütme	3x - 1,000,000x
	İvme kazandıran voltaj	200 V - 30 kV.
	Prob akımı	1pA – 2uA
	Numune kabini	160 mm iç çap

Şekil 4.12. SEM cihazı ve özellikleri [62]

#### 4.2.4.2. Optik mikroskop incelemeleri

Bilyalı dövme işlemleri sonrası farklı parametreler altında dövülen numunelerin yüzey altı mikroyapıları incelenmiştir. Optik mikroskop incelemeleri Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği'nde bulunan Leica DMRM marka optik mikroskop yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.13'de numunelerin mikroyapı incelemelerinin gerçekleştirildiği optik mikroskop gösterilmiştir [63].



Şekil 4.13. Optik mikroskop [63]

#### 4.2.4.3. Mikro sertlik ölçümleri

Tez çalışmasında farklı parametreler altında gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemi sonrası AA7075-T6 alüminyum numunelerin mikro sertlik ölçümleri Şekil 4.14'de gösterilen Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği'nde bulunan Zwick Materialprüfung Vickers mikro sertlik cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan sertlik ölçümlerinde numune yüzeyinden merkeze doğru belirli adımlar ile sertlik ölçülerek derinliğe bağlı sertlik sonuçlar elde edilmiştir. Her numune için üç tekrar olacak şekilde mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 4.14. Mikro sertlik ölçüm cihazı [64]

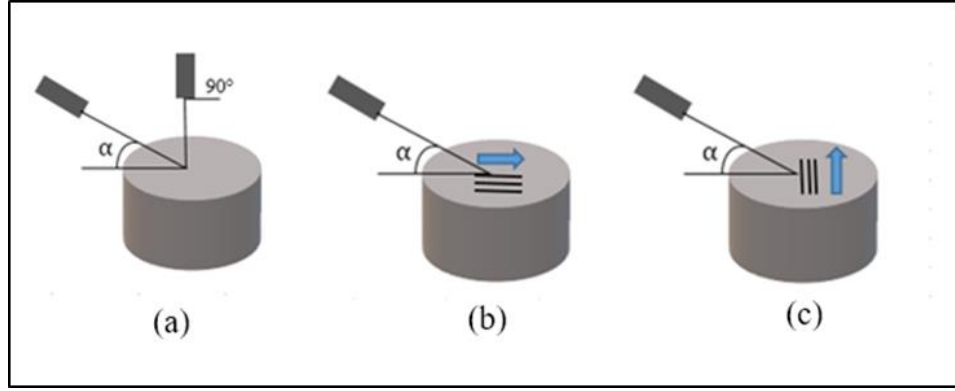
#### 4.2.4.4. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü

Bilyalı dövme işlemi sonrası AA7075 numunelerin yüzeyleri ultrasonik banyoda alkol ile temizlendikten sonra yüzey pürüzlülük ölçümleri Şekil 4.15’de verilen Mitutoyo Surftest SJ-301 marka çizgisel yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir [65]. Dövülen numunelerin yüzeyinde 4 mm uzunluğunda çizgiler taranmış ve ortalama çizgisel pürüzlülük ( $R_a$ ) değeri belirlenmiştir.



Şekil 4.15. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı [65]

Şekil 4.16’da görüldüğü gibi pürüzlülük değerleri ölçülürken dövme yönüne paralel ve dövme yönüne dik olacak şekilde 3’er ölçüm yapılmıştır.



Şekil 4.16. Yüzey pürüzlülük ölçümü a) Bilyalı dövme açısı parametreleri, b) Dövme yönüne paralel pürüzlülük ölçümleri, c) Dövme yönüne dik pürüzlülük ölçümleri

## 5. DENEYSEL SONUÇLAR VE İNCELENMESİ

Bu bölümde bilya boyutu ve bilya çarpma açısı parametrelerinin, AA7075-T6 alüminyum alaşımının kütle kaybına, yüzey pürüzlülüğüne, yüzey altı sertliğine, yüzey altı mikroyapısına ve yüzey morfolojisine etkileri detaylı şekilde irdelenecektir.

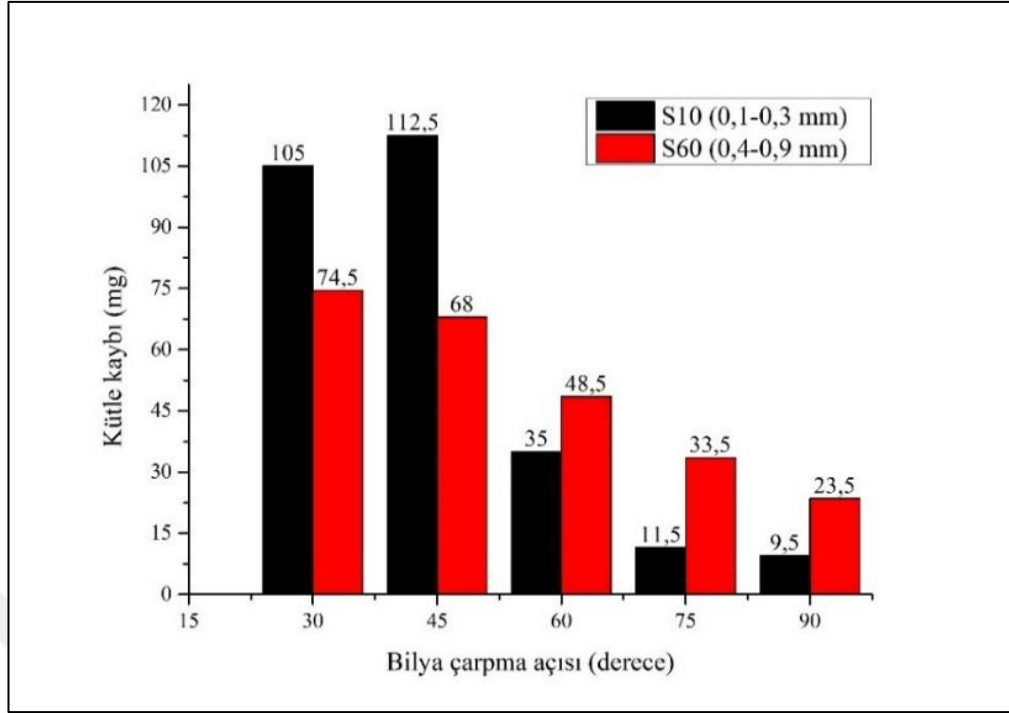
### 5.1. Kütle Kaybının Bilyalı Dövme Parametrelerine Bağlı Değişimi

Bu bölümde AA7075-T6 alüminyum alaşımına bilya çarpma açısı ve bilya boyutunun kütle kaybına etkileri incelenmiştir. Tez çalışması kapsamında 3 bar püskürtme basıncı altında farklı bilya çarpma açıları (30°, 45°, 60°, 75°, 90°) iki farklı bilya (S10 ve S60) kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Her iki bilya boyutunda da bilya çarpma açısına bağlı kütle kaybı gerçekleşmiştir. Gerçekleşen kütle kaybı değerleri çizilen grafik yardımıyla verilmiştir. Kütle kaybının farklı bilya çarpma açılarına ve bilya boyutuna bağlı değişimi gösterilmiştir. S10 ve S60 bilyaları ile gerçekleştirilen deneylerin sonuçları sırasıyla siyah ve kırmızı renkli sütunlar ile verilmiştir (Şekil 5.1).

Küçük bilyalar (S10), büyük bilyalara (S60) kıyasla alüminyum alaşımında eğik açılarda (30°, 45°) daha fazla kütle kaybına yol açtıkları belirlenmiştir. Küçük bilyalar hedef malzeme yüzeyine yüksek hızlarla çarparak büyük bilyalara göre eğik açılarda sıyırma etkisi oluşturduğu numunenin yüksek miktarda aşınmasına sebep olduğu şeklinde yorumlanabilir. 90° bilya çarpma açısında malzeme yüzeyine dik açıda çarpan bilyalar malzeme yüzeyini daha az aşındırarak derin çukurcuk ve yüksek tepecikler meydana getirmektedir. Büyük bilya ile yapılan bilyalı dövme işleminde bilya çarpma açısı artıkça kütle kaybının azaldığı gözlemlenmiştir.

Bilyalı dövme işleminde elde edilen kütle kaybı değerleri mg cinsindedir. Şekil 5.1'de verilen grafik incelendiğinde 45° bilya çarpma açısında küçük bilya ile dövülen numunenin kütle kaybı 112,5 mg, 30° bilya çarpma açısında büyük bilya ile dövülen numunenin kütle kaybı ise 74,5 mg olarak ölçülmüştür. Bu değerler her iki bilya boyutu için ölçülen en yüksek kütle kaybı değerleridir.





Şekil 5.1. Bilyalı dövme parametrelerine bağlı kütle kaybı değişimi

Şekil 5.1 incelendiğinde bilya çarpma açısının artışı ile malzemenin kütle kaybı değerinin azaldığı görülmektedir. AA7075-T6 alüminyum alaşımının kütle kaybı değerlerinin en fazla düşük bilya çarpma açılarında (30°, 45°) ortaya çıktığı görülmektedir. Normale yakın çarpma açılarında (60°, 75° ve 90°) ise kütle kaybı değerinin önemli miktarda azaldığı belirlenmiştir. Literatüre yapılan katı partikül erozif çalışmalarındaki sonuçlar, paslanmaz çelik bilyalar ile yapılan bilyalı dövme işleminde ortaya çıkan kütle kaybı sonuçlarıyla örtüşmektedir [50, 52]. Her iki bilya boyutu için en yüksek kütle kaybı değeri eğik çarpma açılarında, en düşük kütle kaybı değeri ise dik çarpma açısında meydana geldiği gözlemlenmiştir.

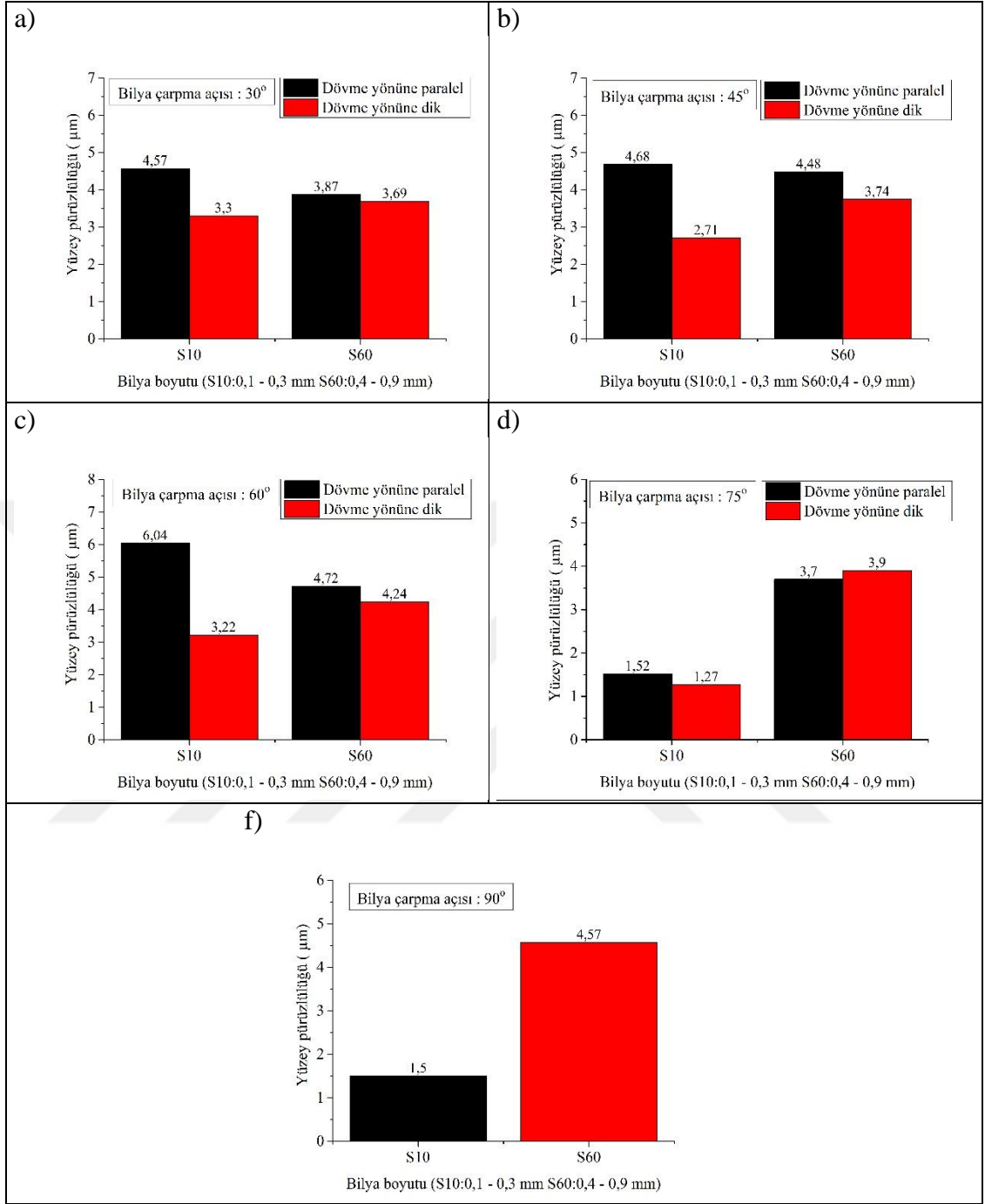
Şekil 5.1’de 3 bar püskürtme basıncında, tüm çarpma açısı değerlerinde gerçekleştirilen deneylerde bilya boyutunun kütle kaybına etkisi incelenmiş, eğik açılarda (30°, 45°) S10 bilyası ile gerçekleştirilen deneylerde kütle kaybı değerinin S60 bilyası ile gerçekleştirilen deneylere kıyasla yüksek olduğu görülmüştür. Normale yakın çarpma açılarında (60°, 75°, 90°) ise kütle kaybının S60 bilyası ile gerçekleştirilen deneylerde yüksek olduğu görülmüştür.

## 5.2. Yüzey Pürüzlülüğünün Bilyalı Dövme Parametrelerine Bağlı Değişimi

Bu bölümde, bilya çarpma açısı ve bilya boyutu bilyalı dövme parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değerine etkisi incelenmiştir.  $R_a$  değerleri bilya çarpma açısına ve bilya boyutuna bağlı olarak önemli değişim göstermiştir.

Elde edilen sonuçlara göre; S10 boyutundaki bilyalarla yapılan dövme işlemi sonucunda dövme yönüne dik ölçülen çizgisel yüzey pürüzlülük değerlerinin S60 boyutlu bilyalar kullanılarak elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinden küçük olduğu görülmektedir. Dövme yönüne dik ölçülen çizgisel yüzey pürüzlülük değerlerinin bilya boyutunun artışı ile paralel olarak artış göstermektedir. Dövme yönüne paralel ölçülen çizgisel yüzey pürüzlülük değerlerinin, S10 boyutundaki bilya için  $30^\circ$ - $60^\circ$  bilya çarpma açıları, S60 boyutundaki bilyalarda ise  $75^\circ$  ve  $90^\circ$  çarpma açıları daha yüksek olduğu görülmektedir.  $90^\circ$  bilya çarpma açısında dövme işlemi yüzeye dik şekilde gerçekleştirildiğinden dolayı dövme yönüne paralel ve dövme yönüne dik şekilde çizgisel pürüzlülük değerleri ölçülmemiştir.

Şekil 5.2'de çarpma açısının ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  ve  $90^\circ$ ) ortalama çizgisel pürüzlülük değerine ( $R_a$ ) etkisi sabit basınç değerinde iki farklı bilya boyutunda (S10 ve S60) ayrı ayrı verilmiştir. Bilya çarpma açısına bağlı olarak ortalama çizgisel yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde; S10 boyutunda bilyalar kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde dövme yönüne paralel ölçülen ortalama pürüzlülük değerinin  $60^\circ$  çarpma açısında, dövme yönüne dik ölçülen ortalama pürüzlülük değerinin  $30^\circ$  çarpma açısında en yüksek değere ulaştığı görülmektedir. Bu değerler sırasıyla  $6,04 \mu\text{m}$  ve  $4,68 \mu\text{m}$  ölçülmüştür. S60 boyutunda bilyalar kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde dövme yönüne paralel ölçülen ortalama pürüzlülük değerinin diğer çarpma açılarına göre  $60^\circ$  çarpma açısında daha yüksek olduğu görülmüştür ve  $R_a$  değeri  $4,71 \mu\text{m}$  ölçülmüştür.  $90^\circ$  bilya çarpma açısında ise S60 boyutundaki bilyanın pürüzlülük değeri  $4,57 \mu\text{m}$  ve S10 boyutundaki bilyanın pürüzlülük değeri ise  $1,50 \mu\text{m}$  ölçülmüştür. Ölçülen değerler dikkate alındığında 3 katlık bir oran söz konusudur. Yüksek bilya çarpma açıları bilyalar malzeme yüzeyini döverek plastik deformasyona neden olmaktadır.



Şekil 5.2. Bilyalı dövme işlemi parametrelerinin çizgisel yüzey pürüzlülüğüne etkisi: (a) S10 ve S60, 30° (b) S10 ve S60, 45° (c) S10 ve S60, 60° (d) S10 ve S60, 75° (e) S10 ve S60, 90°

Aynı bilya boyutunda dövülen numunelerin pürüzlülük değerleri kendi içerilerinde karşılaştırıldıklarında; S10 bilyası için dövme yönüne ölçülen en yüksek pürüzlülük değerinin 60° bilya çarpma açısında, S60 bilyası için 45°, 60° ve 90° bilya çarpma açısında yakın değerler ölçülmüştür. En düşük pürüzlülük değerleri ise her iki bilya boyutu için dövme yönüne paralel ölçülen 75° bilya çarpma açısında görülmüştür.

Şekil 5.2’de elde edilen grafiklerden malzeme yüzeyine gelen bilyaların eğik çarpma açılarında yüzeyde sıyırma etkisi gösterdiği, bilya çarpma açısı dikleştikçe bilyaların penetrasyon derinliğini artırdığı yüzeyde derin çukurcuklar oluşturduğunu SEM fotoğrafına bakarak yorumlanabilir.

Shoichi Kikuchi ve arkadaşları gerçekleştirdikleri bilyalı dövme işleminde 5056 alüminyum alaşımının yüzey pürüzlülüğü değerinin bilya boyutunun artışına bağlı arttığı sonucuna varmışlardır [44]. Tez kapsamında elde edilen sonuçların da paralel olması araştırmanın literatüre uygun olduğunu gösterir. Maliwemu E. U. K. ve arkadaşları bilya dövme işlemi uyguladıkları 316L paslanmaz çeliğini farklı dövme mesafesi ve bilya çarpma açısı (30°, 60°, 90°) altında S170 çelik bilyaları kullanarak yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Bilya çarpma açısının artmasıyla yüzey pürüzlülük değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir [66].

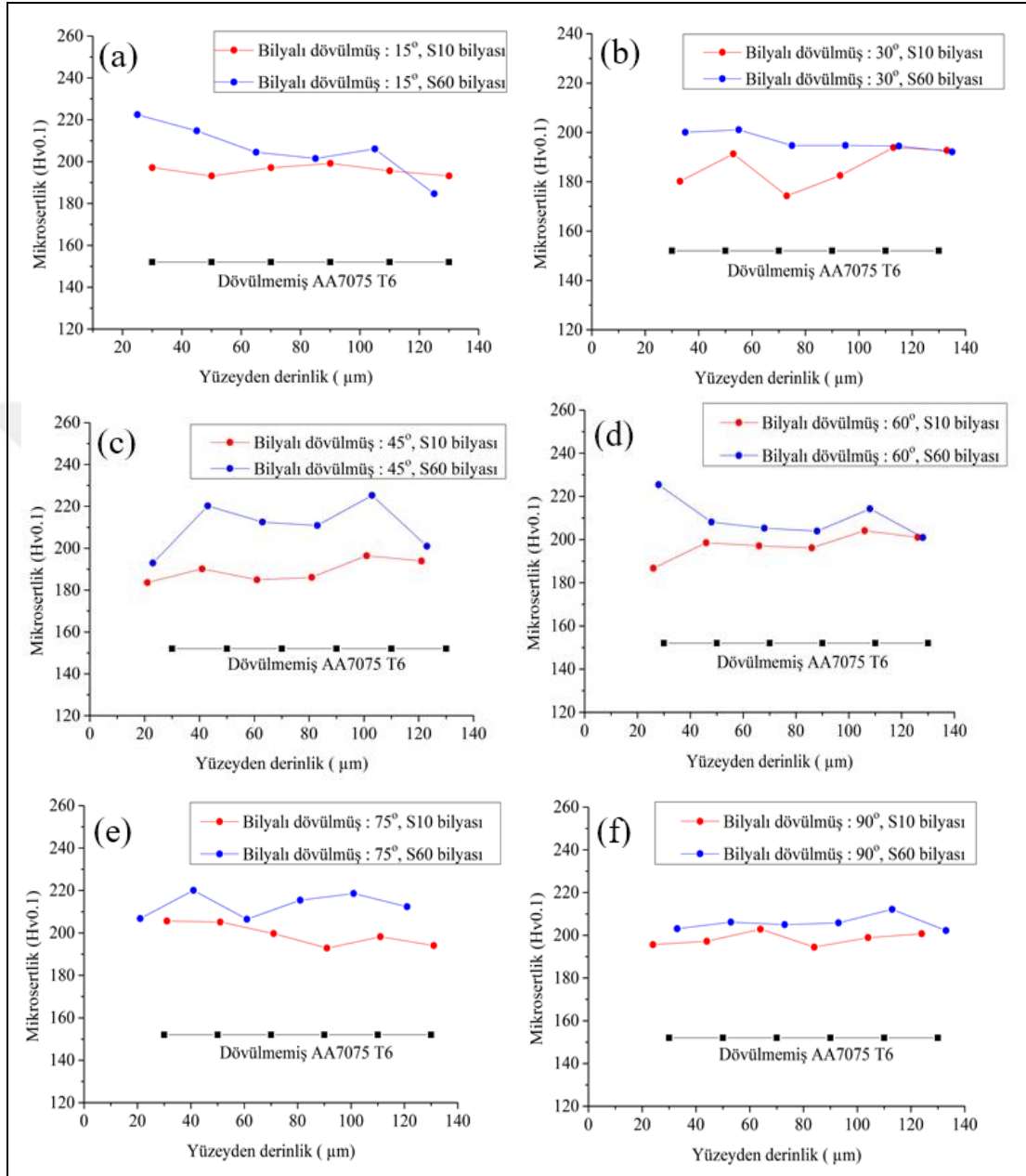
Tez çalışmasında, 30°-60° bilya çarpma açılarında S10 bilyası ile dövülen numunelerin dövme yönüne paralel ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerinin ve 75°-90° bilya çarpma açılarında S60 bilyası ile dövülen numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin yüksek olduğu görülmüştür. S10 bilyası ile gerçekleştirilen dövme işleminde 60° bilya çarpma açısında en yüksek pürüzlülük değerleri gözlemlenmiştir. Tez çalışmasında da dik açıda gerçekleştirilen dövme işleminde bilya boyutu artıkça malzeme yüzeyindeki pürüzlülüğün arttığı sonucuna varılmıştır.

### **5.3. Yüzey Altı Mikrosertlik Değerinin Bilyalı Dövme Parametrelerine Bağlı Değişimi**

Bu bölümde farklı parametreler altında bilyalı dövülen AA7075 T6 alüminyum alaşımının yüzey altı mikrosertlik değerlerinin derinliğe bağlı olarak değişimi incelenecektir. 3 bar püskürtme basıncı ve 60 sn dövme süresinde S10 (0,1-0,3 mm) ve S60 (0,4-0,9 mm) boyutlu paslanmaz çelik bilyalar ile farklı çarpma açıları ile (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) dövülen alüminyum alaşımının sertliğinin derinliğe bağlı olarak değişimi incelenmiştir.

25 mm çapında çubuk malzeme olarak temin edilen AA7075 T6 alüminyum alaşımının yüzey ve yüzey altı sertlik değeri 154 HBW (152 Hv0.1) olan işlem görmemiş alüminyum alaşımının farklı parametreler altında uygulanan bilyalı dövme

işlemleri ile sertliğinin önemli miktarda artış gösterdiği Şekil 5.3’de verilen tüm grafiklerde net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.3. Bilya boyutuna ve bilya çarpma açısı bağlı olarak yüzey altı mikrosertlik değerinin değişimi: (a) S10 ve S60, 15° (b) S10 ve S60, 30° (c) S10 ve S60, 45° (d) S10 ve S60, 60° (e) S10 ve S60, 75° (f) S10 ve S60, 90°

Bilyalı dövme parametrelerinin yüzey altı sertlik değerlerine etkisi incelendiğinde; farklı bilya çarpma açıları (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) bilya boyutunun artması ile sertlik değerlerinin önemli miktarda artış göstermektedir. Şekil 5.3’de verilen grafikler incelendiğinde S60 boyutlu bilyalar ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen

sertlik değerlerinin S10 boyutlu bilyalarla gerçekleştirilen deneylere göre daha yüksek değerler elde edilmiştir.

Mikrosertlik değerleri yüzeyden 140  $\mu\text{m}$  derinliğe kadar 20  $\mu\text{m}$  aralıklarla ölçülmüştür. Sertlik değerleri, uygulanan parametrelere bağlı olarak genelde yüzeyden merkeze gidildikçe azalmakta ve belirli bir derinlikten sonra ölçülen sertlik değerlerinin bazı derinliklerde azalış ve yükseliş göstermesine rağmen benzer değerlere sahip olduğu görülmüştür.

Haodong Wang ve arkadaşları da paslanmaz elik bilyalar kullanarak Al5052 / Ti6Al4V TIG kaynak-lehim bağlantısına yapılan yüksek enerjili bilyalı dövme işleminden sonra mikro sertlik değerlerini derinlik boyunca ölçmüşlerdir. Derinlik arttika mikro sertlik değerinin bu çalışmaya paralel olarak azaldığını gözlemlemişlerdir [45]. E. Avcu bilyalı dövme işlemi sonucunda bilya boyutu artışının alüminyum alaşımının yüzey altı sertlik değerlerinde artışa neden olduğunu belirtmiştir [18]. Benzer sonuçlar Şekil 5.3’de de görülmektedir. M.D. Harding ve arkadaşları Al-Zn-Mg-Cu (PM7075-T6) alaşımının zirkonyum oksit bilyaları ile dvrek gerçekleştirdikleri bilyalı dövme işleminin malzeme sertliğini arttırdığını belirtmişlerdir [54].

Tablo 5.1. Bilyalı dövme parametleri sonrası elde edilen yüzey sertlikleri

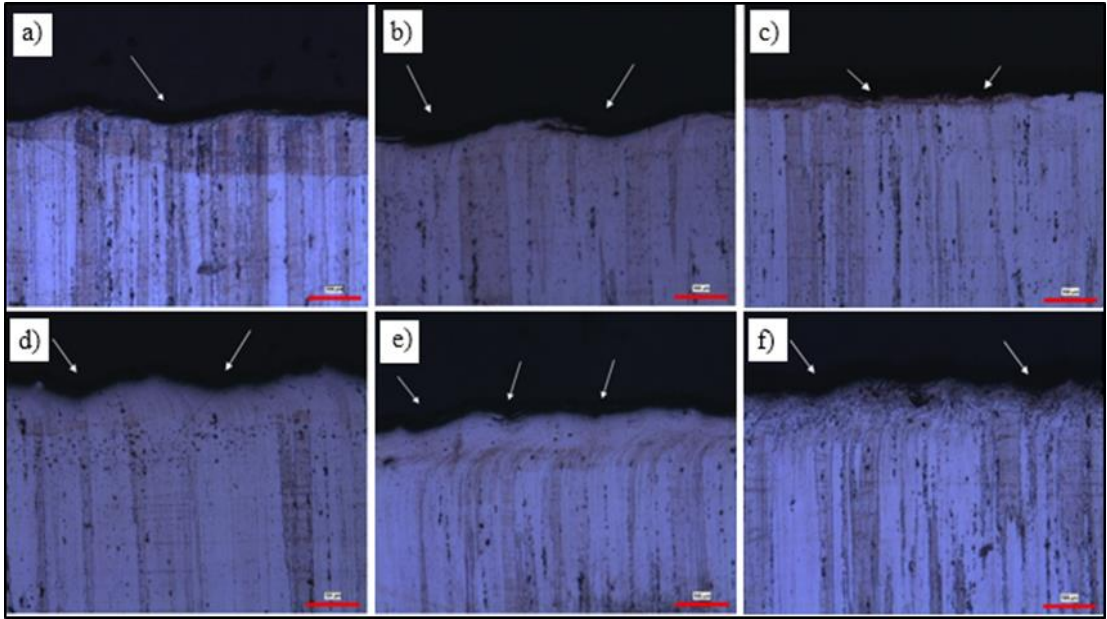
Bilya arpma Açısı	S10 (0,1-0,3)	S60 (0,4-0,9)
	Mikrosertlik (Hv0.1)	
15	202,2	222,42
30	193,84	201,06
45	196,44	225,29
60	204,14	225,45
75	205,57	220,05
90	202,86	212,16

Bilya arpma açısı parametresinin yüzey altı sertlik değerlerine etkisi incelendiğinde; elde edilen maksimum sertlik değerinin S10 bilyası için 75<sup>o</sup> bilya çarpma açısında 205 Hv0.1, S60 bilyası için 45<sup>o</sup> ve 60<sup>o</sup> bilya çarpma açılarında 225 Hv0.1 olarak ölçülmüştür. Her iki bilya boyutu için her bir bilya çarpma açısında elde edilen sertlik değerleri bakıldığında aının artması sonucu sertlik değerlerinde büyük değişiklikler görülmemiştir.

Tez çalışmasında farklı bilya çarpma açılarında gerçekleştirilen deneylerde bilya boyutunun artması ile yüzey altı mikrosertlik değerlerinin artış gösterdiği görülmektedir (Şekil 5.3). Elde edilen grafikler incelendiğinde en yüksek sertlik değerlerinin S60 bilyaları ile gerçekleştirilen dövme işlemlerinde elde edildiği görülmektedir. Bilya boyutu artışı ile AA7075-T6 alüminyum alaşımının yüzeyinde meydana gelen plastik deformasyon miktarında artış gösterdiğini söyleyebiliriz. G. Ongtrakulkij ve arkadaşları Ti6Al4V alaşımına SUS304 paslanmaz çelik bilyanın iki farklı boyutu ile gerçekleştirdikleri bilyalı dövme işlemi sonucu bilya boyutundaki artışla birlikte yüksek sertlik değerleri elde etmişlerdir [67].

#### 5.4. Yüzey Altı Mikroyapısının Bilyalı Dövme Parametrelerine Bağlı Değişimi

Bu bölümde farklı parametreler altında bilyalı dövülen AA7075 T6 alüminyum alaşımının yüzey altı mikroyapıları incelenecektir. Şekil 5.4’de farklı bilya çarpma açılarında ( $30^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $90^\circ$ ), S10 (0,1-0,3 mm) ve S60 (0,4-0,9 mm) bilyaları ile dövülen numunelerin optik mikroskop ile elde edilen mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Bilyalı dövme sonrası yüzeyde meydana gelen çukurcuklar beyaz oklar ile mikroyapı fotoğraflarında gösterilmiştir. Çukurların oluşumu yüzey pürüzlülük değerini etkilemektedir.



Şekil 5.4. Bilya çarpma açısı ve bilya boyutuna bağlı yüzey altı mikroyapısının değişimi a)  $30^\circ$  ve S10 bilyası, b)  $60^\circ$  ve S10 bilyası, c)  $90^\circ$  ve S10 bilyası, d)  $30^\circ$  ve S60 bilyası, e)  $60^\circ$  ve S60 bilyası, f)  $90^\circ$  ve S60 bilyası

Bilya boyutunun yüzey altı mikroyapısına etkileri incelendiğinde, yüzey pürüzlülük değerleri eğik bilya çarpma açılarında açılarda ( $30^\circ$  ve  $60^\circ$ ) S10 bilyaları ile gerçekleştirilen dövme işlemi sonucunda yüzeyde oluşan çukurcuk derinliği S60 bilyası ile yapılan dövme işlemine göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Dik açı ile dövülen numunelerin mikroyapılarının yüzey ve yüzeye yakın bölgelerinde deformasyon meydana geldiği gözlemlenmiştir. A. Gariepy ve arkadaşları bilyalı dövmeden sonra AA2024-T351 alüminyum alaşımının mikroyapı durumunu Elektron Geri Yansıma Difraksiyonu (EBSD) ile araştırmışlardır. Sırasıyla deformasyona uğramış yüzey, 75  $\mu\text{m}$  derinliğinde mikroyapısal değişiklikler, yaklaşık 175 ile 200  $\mu\text{m}$  derinliğinde sertleştirilmiş tabaka ve merkeze doğru gidildikçe mikroyapının ana malzeme yapısına dönüştüğünü gözlemlenmişlerdir [22]. Benzer durumların Şekil 5.4'de verilen mikroyapılarda da meydana geldiğini görülmektedir.

Bilya çarpma açısının yüzey altı mikroyapısına etkileri incelendiğinde; dik açıda her iki bilya ile dövülen numuneye ait mikroyapılar (Şekil 5.4.c ve 5.4.f) yüzey ve yüzeye yakın bölgelerde meydana gelen deformasyona bağlı olarak yüzeydeki değişim dikkat çekmektedir.  $30^\circ$  ve  $60^\circ$  bilya çarpma açılarında malzeme yüzeylerinde dalgalanma olduğu görülmüştür (Şekil 5.4.a, b, d ve e). Özellikle  $60^\circ$  bilya çarpma açısında her iki bilya boyutu için elde edilen dövme yönüne paralel pürüzlülük değerleri sırasıyla 6,03  $\mu\text{m}$  ve 4,75  $\mu\text{m}$  ölçülerek en yüksek değerler elde edilmiştir.

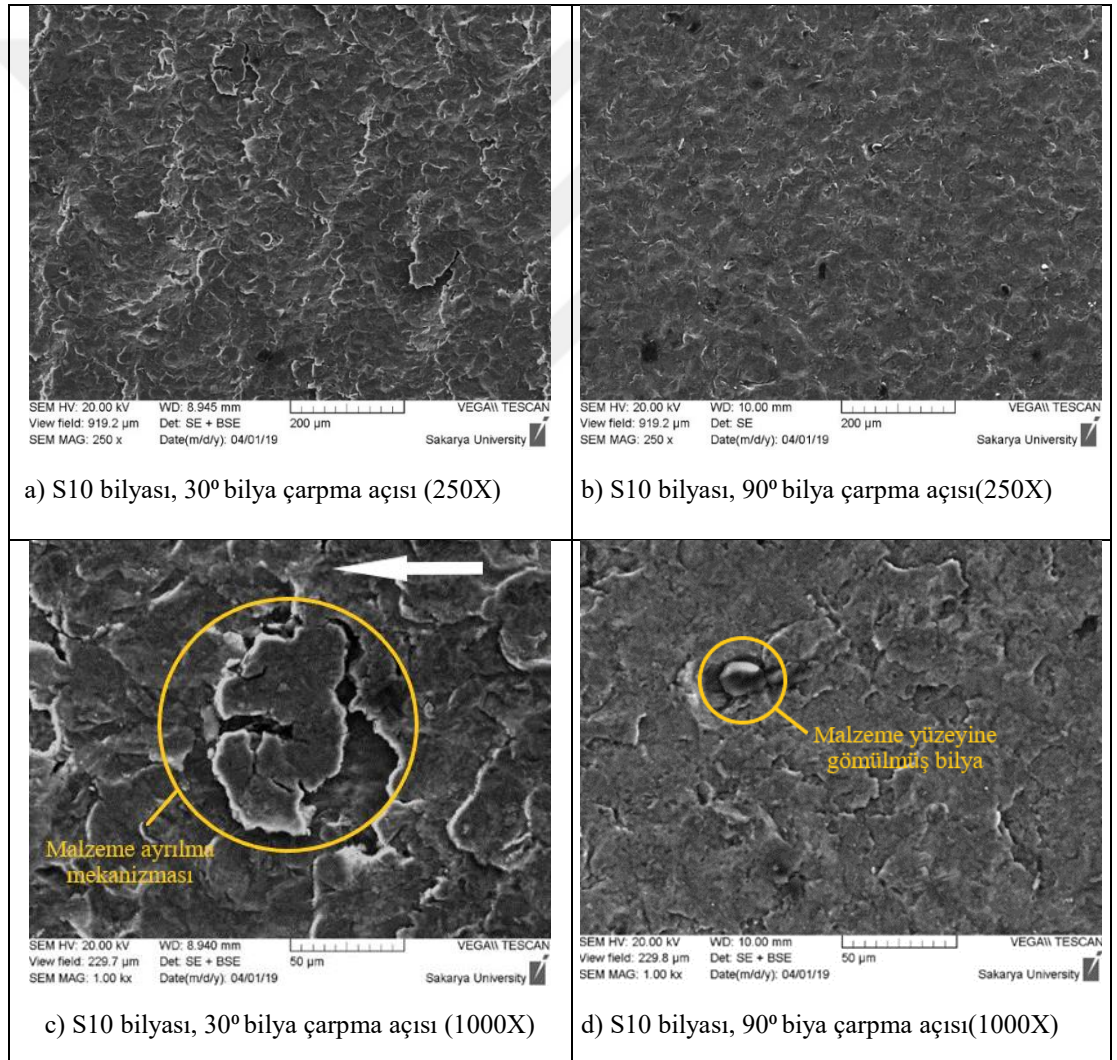
Bilya boyutunun yüzey altı mikroyapısına etkileri incelendiğinde; her bir bilya dövme açısında bilya boyutunun artması ile mikroyapıda değişim meydana geldiğini söyleyebiliriz (Şekil 5). Büyük boyutlu bilyalar ile dövülen alüminyum alaşımın optik mikroskop ve SEM fotoğraflarında yüzeyde meydana gelen plastik deformasyon görülmektedir. Numunelerin sertlik değerleri incelendiği zaman büyük boyutlu bilyalar gerçekleştirilen deneylerde daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Bilya dövme işlemi sonucu malzemede tane incelmeleri ve dislokasyon yoğunluğunun artması sonucu sertlik miktarında artış meydana geldiğini söyleyebiliriz. E. Avcu yaptığı çalışmada artan basınç ve bilya boyutu ile yüzey morfolojisinde aşırı deformasyon sonucu; derin ve geniş çukurcukların meydana geldiği ve yüzeyde dalga formu şeklinde hasar oluştuğunu belirtmiştir [18].



## 5.5. SEM Çalışmaları

### 5.5.1. Bilya çarpma açısının yüzey morfolojisine etkisi

Bilya çarpma açısının AA7075-T6 alüminyum alaşımının kütle kaybı ve yüzey pürüzlülük değerlerine olan etkisi tez çalışmasının önceki bölümlerinde verilmiştir. Farklı bilya çarpma açıları ( $30^\circ$  ve  $90^\circ$ ) ve S10 boyutlu bilya ile gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemleri sonrası değişen bilya çarpma açısının yüzey morfolojisine etkisi Şekil 5.5'da incelenmiştir. Şekilde bilyalı dövülen yüzeylerin 250x ve 1000x büyütmede SEM fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 5.5. SEM fotoğrafı, bilya çarpma açısının yüzey morfolojisine etkisi

Şekil 5.5.c incelendiğinde beyaz ok ile bilyalı dövme yönü belirtilmiştir. Eğik çarpma açısında ( $30^\circ$ ), S10 boyutlu bilya ile dövülen numunenin yüzeyinde malzeme ayrılma

mekanizması görülmektedir. Gözlemlenen malzeme ayrılma mekanizmalarının eğik açılarda meydana gelen yüksek kütle kaybının başlıca nedeni olduğu düşünülmektedir. Malzeme yüzeyine dik açıda çarpan S10 boyutlu bilyaların malzeme yüzeyine gömüldükleri gözlemlenmiştir (Şekil 5.5.d).

Bilya dövme işlemi sonrası elde edilen SEM fotoğrafları incelendiğinde; 30° bilya çarpma açısında numune yüzeyinde mikro sürme ve mikro kesme mekanizmaları görülürken, 90° çarpma açısında ise yüksek plastik deformasyona bağlı derin hasar bölgeleri olduğu her iki bilya boyutunda da belirlenmiştir.

E. Avcu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada AA 6101 ve AA 1070 alüminyum alaşımlarının katı partikül erozyonu davranışını incelemişlerdir. Her iki malzemede düşük partikül çarpma açılarında (30°, 45°) mikro sürme ve mikro kesme erozif aşınma mekanizmaları, dik çarpma açılarında (75°, 90°) ise her iki malzemede mikro çatlaklar ve plastik deformasyona uğramış bölgeleri görüntülemişlerdir. 30° çarpma açısında en yüksek erozyon oranının gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir. 90° çarpma açısında yüzeye saplanmış partiküller olduğunu tespit etmişlerdir [50].

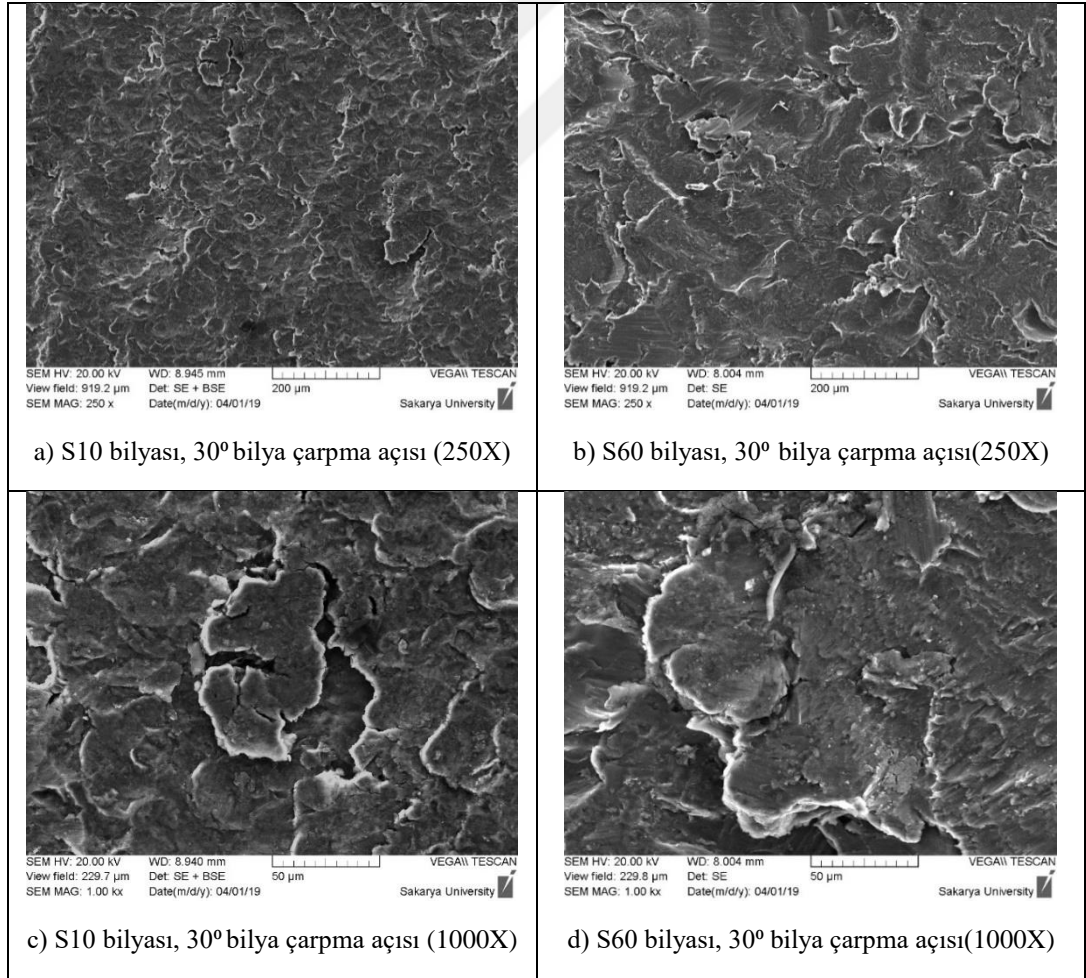
Şekil 5.5.c'de AA7075 alüminyum alaşımında yüksek kütle kaybının olduğu 30° bilya çarpma açısında malzeme yüzeyinde dövme yönüne paralel aşınma izlerinin meydana geldiği ve oluşan izlerin sonunda yüzeyde malzeme ayrılma mekanizması gözlemlenmiştir. Şekil 5.5.d'de ise 90° bilya çarpma açısında dövülen numunelerin 1000x büyütmedeki SEM fotoğrafı verilmiştir. Dik açıda bilyaların çarpması sonucu ortaya çıkan plastik deformasyonun baskın olduğu ve daha az kütle kaybı meydana geldiği gözlemlenmiştir. Dik açı ile gerçekleşen bilyalı dövme işlemi, malzeme yüzeyine dövme etkisi yaparak malzemede daha az kütle kaybına yol açmaktadır ve S10 boyutlu bilya ile elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri, 30° bilya çarpma açısına göre 90° bilya çarpma açısında daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Önceki bölümlerde incelenen kütle kaybı ve yüzey pürüzlülük değerleri ile elde edilen yüzey morfolojilerinin ve uyumlu olduğunu söylenebilir.

Malzeme yüzeyinde küçük bilyaların aşınma etkisiyle daha kolay malzeme kaldırebildiklerini söylenebiliriz. Büyük bilyalar ise malzeme yüzeyini plastik olarak şekillendirmektedir ve küçük bilyalara göre daha az kütle kaybına neden olmaktadır.

### 5.5.2. Bilya boyutunun yüzey morfolojisine etkisi

Şekil 5.6'deki SEM fotoğraflarında; sabit püskürtme basıncında (3 bar), sabit dövme süresinde (60 sn) ve 30° bilya çarpma açısında S10 ve S60 boyutlu bilyalar ile dövülen numunelerin yüzey morfolojileri verilmiştir. Bilyalı dövme işlemleri sonrası değişen bilya boyutunun yüzey morfolojisine etkisi incelenmiştir.

Şekil 5.6.a ve Şekil 5.6.b'deki SEM fotoğrafları incelendiğinde; 30° bilya çarpma açısında yüzeyde oluşan mikro sürme ve mikro kesme mekanizmalarının S10 boyutlu bilya ile yapılan dövme işlemlerinde sık görülürken, S60 boyutlu bilyalarda aynı mekanizmanın daha kaba formu görülmüştür. SEM fotoğraflarına ek olarak, bölüm 5.2'de elde edilen dövme yönüne paralel yüzey pürüzlülük sonuçları incelendiğinde; eğik açılarda gerçekleşen bilyalı dövme işlemlerinde S10 boyutlu bilyaların hedef malzeme yüzeyindeki pürüzlülüğü arttırdığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.6. SEM fotoğrafı, 30° bilya çarpma açısında bilya boyutunun yüzey morfolojisine etkisi

Bölüm 5.1’de kütle kaybının dövme parametrelerine bağlı değişiminde verilen grafik incelendiğinde 30° bilya çarpma açısında S10 boyutlu bilyaların AA7075 alüminyum alaşımlarını S60 boyutlu bilyalara kıyasla daha fazla aşındırdığı sonucuna varılmıştır. Ancak Şekil 5.6.c ve Şekil 5.6.d’deki verilen SEM fotoğrafları incelendiğinde S60 boyutlu bilyaların malzeme yüzeyinde daha ağır bir tahribata yol açtıkları görülmektedir.

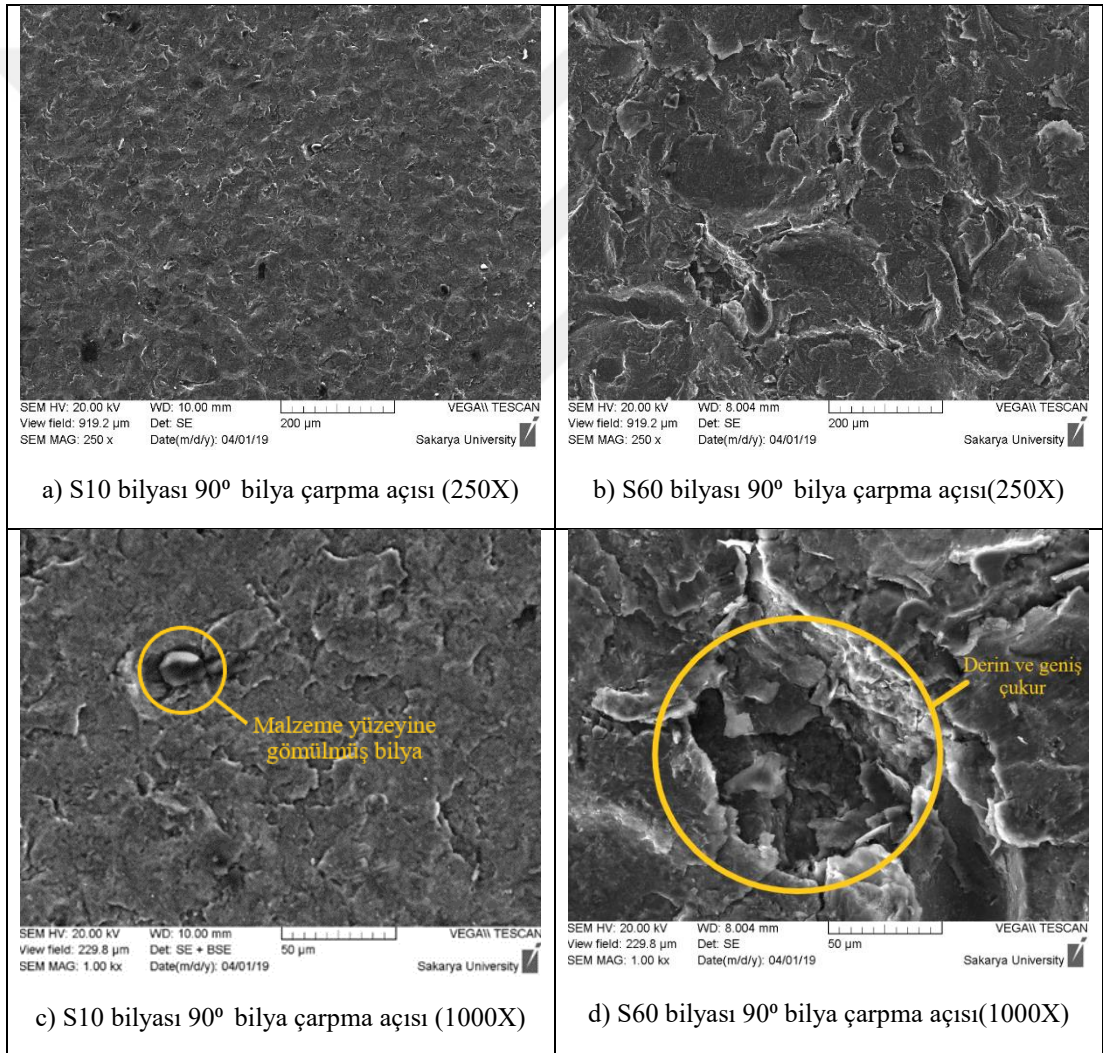
30° bilya çarpma açısında büyük çaplı bilyaların (S60) kullanımı ile yüzeyde daha fazla delaminasyonların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Küçük çaplı bilyaların (S10) kullanımı ile oluşan delaminasyon miktarı ve boyutu büyük bilyalara göre daha azdır. Küçük bilyaların 30° bilya çarpma açısında görülen mikrokese ve mikrosürme mekanizmaları ile yüzeyden malzeme koparmakta ve malzemede daha fazla kütle kaybına sebep olmaktadır.

Küçük bilyalar, malzeme yüzeyinde derinliği ve genişliği düşük izler oluşturmalarına rağmen yüzeyde çok sayıda aşınma izine ve hasarına yol açmaktadırlar. Bu durumda küçük boyutlu bilyalar tek başlarına büyük bilyalara göre daha az aşınma meydana getirmesine rağmen büyük bilyalar ile karşılaştırıldığında birim zamanda yüzeye çok daha fazla küçük bilya çarpması sonucu olarak daha fazla kütle kaybı meydana getirdiği söylenebilir.

Şekil 5.7’de verilen SEM fotoğraflarında; sabit püskürtme basıncında (3 bar), sabit dövme süresince (60 sn), 90° bilya çarpma açısında S10 ve S60 boyutlu bilyalar ile dövülen numunelerin yüzey morfolojileri verilmiştir. Bilyalı dövme işlemleri sonrası değişen bilya boyutunun yüzey morfolojisine etkisi incelenmiştir.

Şekil 5.7.a ve b’deki fotoğraflar, Şekil 5.7.c ve d’deki bilyalı dövülen yüzeylerin 250x büyütmedeki SEM fotoğrafları görülmektedir. Şekil 5.7.c’de SE ve BSE modunda çekilen SEM fotoğrafında malzeme yüzeyine dik açıda çarpan S10 boyutlu bilyaların malzeme yüzeyine gömüldükleri gözlemlenmiştir. Şekil 5.7.d’de verilen AA7075-T6 alüminyum alaşımının yüzey morfolojisinde S60 boyutlu bilyaların malzeme yüzeyine dik açı ile çarpması sonucu yüzeyde derin ve geniş çukurlar oluştuğu görülmüştür. Bu çukurların dövme işlemleri sırasında malzeme yüzeyinde meydana gelen plastik deformasyonlara bağlı olduğu düşünülebilir.

Büyük bilyaların kullanılması deformasyonu artırmakta ve malzeme yüzeyine dik bir açıda çarpması sonucunda oluşan derin ve geniş çukurcuklar küçük bilyalara göre daha fazla göze çarpmaktadır. Ayrıca 90° bilya çarpma açısında malzeme yüzeyine dik açıda çarpan bilyalar malzeme yüzeyinde parçacık koparamamakta buna karşın Şekil 5.7.b’de görülen derin çukurcuk ve tepecikleri oluşturmaktadır. Büyük bilyaların (S60) meydana getirdiği geniş vadileri görülmektedir. Şekil 5.7.a’de ise küçük bilyaların (S10) meydana getirdiği dar vadiler gözlenmektedir. Kütle kaybı bölümünde; küçük bilyaların, 90° bilya çarpma açısında alüminyum alaşımlarını büyük bilyalara kıyasla daha az aşındırdıkları görülmüştür.



Şekil 5.7. SEM fotoğrafı, 90° bilya çarpma açısında bilya boyutunun yüzey morfolojisine etkisi

A. A. Ahmed ve arkadaşları, AISI 316L paslanmaz çeliğine farklı boyutlardaki seramik bilyalar ile gerçekleştirdiği bilyalı dövme işlemi sonucunda bilya boyut artışı ile malzemenin yüzeyindeki plastik deformasyonun arttığı ve derin ve geniş çukurcuk oluşumunun meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Dolayısıyla yüzey pürüzlülük değerlerini arttırdığı sonucuna varmışlardır[68]. A. Gariépy ve arkadaşları bilya dövme işlemi sırasında malzeme yüzeyine gelen ve yüzeyden geri dönen bilyaların çarpışması sonucu bilyaların daha küçük parçalara bölünebildiğini ve bilyaların AA2024-T351 alüminyum alaşımının sünek olmasından dolayı alüminyum yüzeyine gömüldüğünü gözlemlemişler[22]. C. Ming ve arkadaşları farklı bilya türü (S230, S110 ve seramik) ve bilya boyutu ile SAF 2507 çeliğinin yüzey kalitesini iyileştirmek için bilyalı dövme işlemi uygulamışlardır. Ortalama yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değeri en yüksek S230 çelik bilya ile dövülmüş numunede gözlemişlerdir[69]. Shoichi Kikuchi ve arkadaşları bilyalı dövme işlemi sonucu 5056 alüminyum alaşımının SEM görüntülerinde bilya boyutunun artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünde artış gözlemlemişlerdir[44].

Tez çalışmasında da; eğik açılarda gerçekleşen bilyalı dövme işlemlerinde S10 boyutlu bilyaların, dikleşen açılarda ise S60 boyutlu bilyaların hedef malzeme yüzeyindeki pürüzlüğü arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca S10 bilyalarının yüzeye gömüldüğü, S60 bilyalarının yüzeyde derin ve geniş çukurcuklar meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında, bilyalı dövme işlem parametrelerinin (bilya boyutu ve bilya çarpma açısı) AA7075-T6 alaşımlarının yüzey ve yüzey altı özelliklerine (yüzey pürüzlülüğü, yüzey morfolojisi, yüzey ve yüzey altı sertliği, mikro yapısı ve kütle kaybına) etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Farklı parametreler altında CNC kontrollü bilyalı dövme test cihazında bilyalı dövme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bilyalı dövülen AA7075-T6 alaşımının yüzey ve kesit mikroyapıları optik mikroskop ve SEM ile incelenmiştir. Aşağıda genel sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

- Bilya çarpma açısı arttıkça her iki bilya boyutunda da kütle kaybının azaldığı, eğik çarpma açılarında küçük boyutlu bilyaların, dik açılarda ise büyük boyutlu bilyaların daha fazla kütle kaybına neden olduğu görülmüştür.
- Eğik açılarda yapılan bilyalı dövme işleminde, dövme yönüne paralel ölçülen çizgisel yüzey pürüzlülüğü değerleri küçük boyutlu bilyalarda yüksek olduğu görülmüştür. Dik açılarda ise büyük boyutlu bilyalarla dövülen numunelerin pürüzlülük değerlerinin yüksek olduğu belirlenmiştir.
- AA7075 T6 alaşımının bilyalı dövme işlemi için artan bilya boyutu yüzey altı sertliği üzerinde önemli bir etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Büyük boyutlu bilyalar kullanılarak gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen sertlik değerlerinin, küçük boyutlu bilyalarla gerçekleştirilen deneylere göre daha yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir. Farklı bilya çarpma açılarında dövülen numunelerinin kesit sertliğinin yakın değerlerde olduğu görülmüştür.
- Bilyalı dövme işlemi sonrası yüzey altı mikroyapısı optik mikroskop çalışmaları ile incelenmiştir. Küçük boyutlu bilyalar ile eğik açılarda yapılan dövme işlemi sonucu yüzeyde oluşan çukurcuk derinliği daha yüksek gözlemlenmiştir. Büyük boyutlu bilyalar ile dik açıda dövülen numuneye ait mikroyapıda yüzey ve yüzeye yakın bölgelerde plastik deformasyon meydana gelmiştir.

- Farklı bilyalı dövme işlemi altında dövülen numunelerin SEM analizleri incelendiğinde; Eğik açılarla gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemlerinde yüzeyde mikro sürme ve mikro kesme mekanizmaları ve malzeme ayrılma mekanizmaları olduğu görülmüştür. Dik açıda ise büyük boyutlu bilyaların plastik deformasyona bağlı tepe ve derin çukurlar oluşturduğu, küçük boyutlu bilyaların malzeme yüzeyine kısmen gömüldükleri gözlemlenmiştir.

Literatürdeki çalışmalarında çoğunlukla farklı bilyalı dövme metotlarının yorulma dayanımına etkisi incelenmiştir. Bunun yanında gerçekleştirilen çalışmalarda sertlik, pürüzlülük ve mikroyapı gibi farklı bilyalı dövme metotları ve bilyalı dövme işlem parametrelerine bağlı değişimleri incelenmiştir. Bilyalı dövme işlem parametrelerinin yüzey ve yüzey atlı özelliklerinin değişimine etkisi üzerine kapsamlı çalışmalar sınırlıdır.

Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar, alüminyum alaşımlarının farklı parametreler altında bilyalı dövme ile yüzey ve yüzey altı mekanik ve mikroyapısal özelliklerin değişimlerinin anlaşılması konusunda bir kaynak oluşturması ve endüstriyel uygulamalarda, özellikle bilyalı dövme parametrelerinin kontrolü ile malzemenin yüzey ve yüzey altı özelliklerinin geliştirilmesi noktasında yol gösterici olması ve uygulanabilir çözümler sunması beklenmektedir.

Tez çalışmasının kapsamı, çalışmada sunulan özgün bilyalı dövme test sistemi ve metodolojisi ile farklı bilyalı dövme parametrelerinin (püskürtme basıncı, bilya türü, yüzey örtme oranı, vb.) alüminyum alaşımlarının yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkileri incelenerek genişletilebilir. Bu çalışmalarda bilimsel değerin artırılması ve sonuçların daha detaylı irdelenmesi için mikro ve nano indentasyon ve yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskobu gibi ileri karakterizasyon tekniklerinden faydalanılması yararlı olacaktır.



## KAYNAKLAR

- [1] Davis J. R., Light Metals and Alloys, ASM international, 351-416, 2001.
- [2] Yıldırım Y., 3003 H14 Alüminyum Katı Partikül Erozyonu Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 342538.
- [3] Asma Y., AA7075 – AA6061 Malzeme Çiftinin Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2014, 355515.
- [4] Harbelioğlu E., Bilyalı Dövmenin AA7075-T6 Alaşımının Yüzey Özelliklerine ve Erozif Aşınma Davranışına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2018, 522097.
- [5] Yalçın E. D., AA7075 ve AA5754 Alüminyum Alaşımların Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2010, 276131.
- [6] Başer T. A., Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı, *Mühendis ve Makina*, 2012, **53**(635), 51-58.
- [7] Aktuğ S. L., İkiz Merdane Döküm Yöntemiyle Üretilmiş AA1050 ve AA3003 Alüminyum Alaşımlarının Termomekanik İşlemler Sonrası Mikro Yapı İncelemesi, Yüksek Lisans Tezi Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 2009, 245291.
- [8] Tımaç G., Uçak Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının TIG Kaynak Yöntemi ile Kaynaklanabilirliğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 185281.
- [9] Fakioğlu A., Yaşlandırılan AA7075 Alüminyum Alaşımlarının Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2012, 301806.
- [10] Aytaç A., Eşit Kanal-Açısal Presleme Yöntemi İle 7075 Alüminyum Alaşımlarında Nano Boyutlu Tane Üretimi ve Mikroyapısal Karakterizasyonun Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010, 269779

- [11] Paturi U. M. R., Reddy N. S. K., Singh P. R., Constitutive Flow Stress Sormulation, Model Validation and FE Cutting Simulation for AA7075-T6 Aluminum Alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2014, **605**, 176-185.
- [12] Lin Y. C., Jiang Y., Chen X., Wen D., Zhou H., Effect of Creep-aging on Precipitates of 7075 Aluminum Alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2013, **588**, 347-356.
- [13] Jin Y., Cai P., Wen W., Nagaumi H., Xu B., Zhang Y., Zhai T., The Anisotropy of Fatigue Crack Nucleation in an AA7075 T651 Al Alloy Plate, *Materials Science and Engineering: A*, 2015, **622**, 7-15.
- [14] Huo W., Hou L., Cui H., Zhuang L., Zhang J., Fine-grained AA 7075 Processed by Different Thermo-mechanical Processings, *Materials Science and Engineering: A*, 2014, **618**, 244-253.
- [15] Avcu E., Surface Properties of AA7075 Aluminium Alloy Shot Peened Under Different Peening Parameters, *Acta Materialia Turcica*, 2017, **1**(1), 3-10.
- [16] Alat E., Basınçlı Döküm Yöntemiyle Üretilmiş 7075 Alüminyum Alaşımının Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklerine Magnezyum Artışının, Hidrojen Porozitesinin ve T6 Isıl İşleminin Etkilerinin Analizi, Yüksek Lisans, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012, 318826.
- [17] Hu B., Richardson I. M., Microstructure and Mechanical Properties of AA7075(T6) Hybrid Laser/GMA Welds, *Materials Science and Engineering: A*, 2007, **459**(1-2), 94-100.
- [18] Avcu E., Bilyalı Dövme Parametrelerinin AA7075 Alüminyum Alaşımının Yüzey Altı Özelliklerine Etkileri, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 2018, **6**(4), 741-752.
- [19] Yılmaz R., Özyürek D., Kibar E., Yeniden Çözeltiyeye Alma Parametrelerinin 7075 Alüminyum Alaşımının Sertlik ve Aşınma Davranışlarına Etkisi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi*, 2012, **27**, 429-438
- [20] Mhaede M., Influence of Surface Treatments on Surface Layer Properties, Fatigue and Corrosion Fatigue Performance of AA7075 T73, *Materials & Design*, 2012, **41**, 61-66.
- [21] 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.
- [22] Gariépy A., Bridier F., Hoseini M., Bocher P., Perron C., Lévesque M., Experimental and Numerical Investigation of Material Heterogeneity in Shot Peened Aluminium Alloy AA2024-T351, *Surface and Coatings Technology*, 2013, **219**, 15-30.

- [23] 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.
- [24] <https://malzemebilimi.net/bilyali-dovme-nedir.html> (Ziyaret tarihi: 13 Eylül 2019).
- [25] Yalçinkaya A., Bilyalı Dövme Prosesi Uygulanan Tank Palet Pimlerinin Yorulma Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Milli Savunma Üniversitesi, Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2019, 555295.
- [26] <https://www.mikrometalurji.com.tr/icerik/paslanmaz-celik-bilya.html> (Ziyaret tarihi: 16 Eylül 2019).
- [27] 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.
- [28] <https://www.wheelabratorgroup.com/en-in/my-application/application-by-industry/aerospace/landing-gear-preparation> (Ziyaret tarihi: 16 Eylül 2019).
- [29] <http://www.sspst.com/icerik/goTo/5/shot-peening-bilyali-dovme-nedir.html> (Ziyaret tarihi: 16 Eylül 2019).
- [30] Savaş S., Monitoring Variation Of Surface Residual Stresses in The Shot-Peened Steel Components by Magnetic Barkhausen Noise Method, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010, 268469.
- [31] Balyalı H. A., Metalik Malzemelerin Bilyalı Dövme Uygulaması Sonrası Tribolojik Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015, 405035.
- [32] Ünal O., Bilyalı Dövme İşleminin Tane Boyutuna Etkisinin Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın, 2011, 294985.
- [33] <https://www.directindustry.com/prod/guyson/product-5723-2167637.html> (Ziyaret tarihi: 19 Eylül 2019).
- [34] [https://www.saykar.net/ceLIK\\_bilye](https://www.saykar.net/ceLIK_bilye) (Ziyaret tarihi: 21 Eylül 2019).
- [35] 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.
- [36] Ahmadi M., Sadeghi B. M., Irani M., Rahimi F., Finite Element Simulation of Shot Peening of an Aluminum Alloy Considering Hardening Models, *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2017, **57**(6), 565-571.
- [37] Karahan B., İnce U., Bilya Püskürtmenin (Shot Peening) Teknik-Teknolojideki Yolculuğu ve Soğuk Dövme Prosesine Adaptasyonu, *Derin*, 2015, 74-90.

- [38] Gariépy A., Larose S., Perron C., Bocher P., Lévesque M., On the Effect of the Orientation of Sheet Rolling Direction in Shot Peen Forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, **213**(6), 926-938.
- [39] Sheng X. F., Xia Q. X., Cheng X. Q., Lin L. S., Residual Stress Field Induced by Shot Peening Based on Random-shots for 7075 Aluminum Alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, **22**, 261-267.
- [40] Nam Y. S., Jeon U., Yoon H. K., Shin B. C., Byun J.H., Use of Response Surface Methodology for Shot Peening Process Optimization of an Aircraft Structural Part, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, **87**(9-12), 2967-2981.
- [41] 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.
- [42] Grinspan A. S., Gnanamoorthy R., Surface Modification by Oil Jet Peening in Al Alloys, AA6063-T6 and AA6061-T4, *Applied Surface Science*, 2006, **253**(2), 997-1005.
- [43] Trdan U., Zagar S., Grum J., Surface Modification of Laser- and Shot-Peened 6082 Aluminium Alloy, *International Journal of Structural Integrity*, 2011, **2**(1), 9-21.
- [44] Kikuchi S., Nakamura Y., Nambu K., Ando M., Effect of Shot Peening Using Ultra-Fine Particles on Fatigue Properties of 5056 Aluminum Alloy Under Rotating Bending, *Materials Science and Engineering: A*, 2016, **652**, 279-286.
- [45] Wang H., Yuan X., Wu K., Xu C., Jiao Y., Wang G., 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.
- [46] Ding X., Kang Y., Li D., Wang X., Zeng D., Experimental Investigation on Surface Quality Processed by Self-Excited Oscillation Pulsed Waterjet Peening, *Materials (Basel)*, 2017, **10**(9),
- [47] Venumurali J., Reddy G. B., Subramanyam J., Effect Of Shot Peening Exposure Time On Surface Properties Of AA7075 Aluminium Alloy, *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, Hindistan, 2019.
- [48] Ibarra J., Rodríguez E., Jiménez O., Gómez-Rosas G., Flores M., Verduzco J., Chávez J., Effect of Laser Shock Processing on Erosive Resistance of 6061-T6 Aluminum, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, **26**(6), 1522-1530.
- [49] Das S., Mondal D. P., Sawla S., Solid Particle Erosion of Al Alloy and Al-Alloy Composites: Effect of Heat Treatment and Angle of Impingement, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2004, **35**(4), 1369-1379.

- [50] Avcu E., Fidan S., Karabay S., Sımmazçelik T., Türkiye’de Enerji Nakil Hatlarında Kullanılan AA-1070 İle AA-6101 Alaşımlarının Katı Partikül Erozyon Davranışlarının Karşılaştırılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2012, **27**(4), 865-874.
- [51] Jiabin Zhang., Shihong Lu., Tianrui W., Zhen Z, Wei Z., An Evaluation on SP Surface Property by Means of Combined FEM-DEM Shot Dynamics Simulation, *Advances in Engineering Software*, 2018, **115**, 283-296.
- [52] Biswas S., Cenna A., Williams K., Jones M., Subsurface Behavior of Ductile Material by Particle Impacts and Its Influence on Wear Mechanism, *Procedia Engineering*, 2014, **90**, 160-165.
- [53] Palacios M., Bagherifard S., Guagliano M., Pariente I. F., Influence of Severe Shot Peening on Wear Behaviour of an Aluminium Alloy, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2014, **37**(7), 821-829.
- [54] Harding M.D., Donaldson I.W., Hexemer Jr. R. L., Gharghoury M.A., Bishop D.P. Characterization of the Microstructure, Mechanical Properties, and Shot Peening Response of an Industrially Processed Al-Zn-Mg-Cu PM Alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, **221**, 31-39.
- [55] Žagar S., Janez G., Surface Modification Analysis After Shot Peening of AA 7075 in Different States, *Materials Science Forum*, 2013, **768-769**, 519-525.
- [56] González J., Bagherifard S., Guagliano M., Pariente I. F., Influence of Different Shot Peening Treatments on Surface State and Fatigue Behaviour of Al 6063 Alloy, *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, **185**, 72-81.
- [57] Zhang H., Qiu X., Zhao X., Xu D. Effect of Surface Self-Nanocrystallization on Friction and Wear Behavior of Al7075-T6511 Alloy, *Materials Research Express*, 2019, **6**(11),
- [58] <https://isolab.com.tr/tr/temizlik-guevenlik-sterilizasyon/323-6237-banyolar-ultrasonik-standart.html> (Ziyaret tarihi: 16 Ağustos 2019).
- [59] [http://metallographicequipment.com/pdf/MICRACUT\\_125\\_150.pdf](http://metallographicequipment.com/pdf/MICRACUT_125_150.pdf) (Ziyaret tarihi: 16 Ağustos 2019).
- [60] <https://www.kemet.co.uk/images/downloads/Forcipol2V.pdf> (Ziyaret tarihi: 16 Ağustos 2019).
- [61] <https://www.labor.com.tr/SHIMADZU-ATX-224-Analitık-Terazi-Dahili-Kalibrasyon-220-Gr-01-mg,PR-22661.html> (Ziyaret tarihi: 16 Ağustos 2019).
- [62] [http://www.eicsac.com/vega\\_sb.pdf](http://www.eicsac.com/vega_sb.pdf) (Ziyaret tarihi: 16 Ağustos 2019).
- [63] [https://www.wzl.rwth-aachen.de/cms/www\\_content/en/228392fede74e844c1257e750028f3b0.htm](https://www.wzl.rwth-aachen.de/cms/www_content/en/228392fede74e844c1257e750028f3b0.htm) (Ziyaret tarihi: 16 Ağustos 2019).
- [64] <http://www.isfk.at/de/1600/> (Ziyaret tarihi: 12 Kasım 2019).

- [65] [https://www.bilginoglu.eu/quotsurftest\\_sj\\_301quot\\_portatif\\_yuzey\\_puruzluluk\\_olcum\\_cihazlari\\_sj\\_301\\_p-1-1-sayfa\\_id-111-id-42454](https://www.bilginoglu.eu/quotsurftest_sj_301quot_portatif_yuzey_puruzluluk_olcum_cihazlari_sj_301_p-1-1-sayfa_id-111-id-42454) (Ziyaret tarihi: 16 Ağustos 2019).
- [66] Maliwemu E. U. K., Viktor M., Tri I. P., Effect of Shot Peening in Different Shot Distance and Shot Angle on Surface Morphology, Surface Roughness and Surface Hardness of 316L Biomaterial, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Indonesia, 2018.
- [67] Ongtrakulkij G., Anak K., Katsuyoshi K., Effects of Media Parameters on Enhance Ability of Hardness and Residual Stress of Ti6Al4V by Fine Shot Peening, *Surfaces and Interfaces*, 2020, **18**, 100424.
- [68] 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.
- [69] Chen M., Liu H., Wang L., Wang C., Zhu K., Xu Z., Jiang C., Ji V., Evaluation of the Residual Stress and Microstructure Character in SAF 2507 Duplex Stainless Steel After Multiple Shot Peening Process, *Surface and Coatings Technology*, 2018, **344**, 132-140.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **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.
- [2] 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.

## ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında Elazığ'da doğdu. İlköğretim ve lise öğrenimini Eskişehir'de tamamladı. 2012'de başladığı İstanbul Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2016 yılında mezun oldu. 2014 yılında Çift Anadal Programı (ÇAP) kapsamında aynı üniversite ve fakültede Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne kaydoldu ve eğitimi 2017 yılında tamamladı. 2017 yılı bahar döneminde Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2018 yılı MEB YLSY bursiyeri olarak eğitime devam etmektedir.

