

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BİLYALI DÖVMENİN AA7075-T6 ALAŞIMININ YÜZEY  
ÖZELLİKLERİNE VE EROZİF AŞINMA DAVRANIŞINA  
ETKİLERİ**

**ESER HARBELİOĞLU**

**KOCAELİ 2018**

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BİLYALI DÖVMENİN AA7075-T6 ALAŞIMININ YÜZEY  
ÖZELLİKLERİNE VE EROZİF AŞINMA DAVRANIŞINA  
ETKİLERİ

ESER HARBELİOĞLU

Dr.Öğr.Görevlisi Egemen AVCU  
Danışman, Kocaeli Üniversitesi  
Prof.Dr.Tamer SINMAZÇELİK  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi  
Prof.Dr.Şenol YILMAZ  
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi

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

Tezin Savunulduğu Tarih: 08.06.2018

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Esası malzemelerin yüzeylerine çelik bilyaların yüksek hızlarda ve tekrarlı bir şekilde çarptırılmaları ile yüzeyde ve yüzeye yakın bölgelerde aşırı plastik deformasyonlar ile kalıntı basma gerilmeleri oluşturulmasına dayanan bilyalı dövme işlemleri kullanılarak malzemelerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi endüstride yaygın olarak tercih edilen mekanik yüzey işlemlerinden biridir. Bilyalı dövme işlemi malzemelerin özellikle yorulma ömürlerinin arttırılması amacıyla hedef malzeme yüzeyine tekrarlı şekilde bilyanın çarptırılmasıyla gerçekleştirilen mekanik bir yüzey işleme yöntemidir. Alüminyum alaşımları; hafiflik, yüksek mukavemet, kolay işlenebilirlik, yüksek yorulma dayanımı, düşük maliyet ve üstün tokluk nedeni ile havacılık ve otomotiv endüstrilerinde yaygın olarak tercih edilmektedirler. Literatürde bilyalı dövme ile alüminyum alaşımlarının yorulma dayanımlarının geliştirilmesine yönelik çok sayıda çalışma yer almaktadır. Ancak alüminyum alaşımlarının yüzey özelliklerine ve erozif aşınma davranışlarına bilyalı dövme işleminin etkileri üzerine gerçekleştirilmiş sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Tez çalışmasında temel amaç farklı bilyalı dövme parametrelerinde (püskürtme basıncı, bilya boyutu ve dövme süresi) işlenmiş AA7075-T6 alüminyum alaşımının yüzey özelliklerindeki değişimlerin detaylı bir şekilde incelenmesidir. Bununla birlikte bilyalı dövme nedeniyle değişen yüzey özelliklerinin alaşımının erozif aşınma davranışına etkilerinin irdelenmesi tezin diğer amacıdır.

Otomotiv sektöründeki yoğun çalışma koşullarına rağmen yüksek lisans eğitimime gösterdiği hassasiyet için ekip liderim Sayın Gökhan DOĞAN' a teşekkürü bir borç bilirim. Akademik çalışmalarıyla bana sürekli yol gösteren ve önder olan Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Araştırma Görevlisi Yasemin YILDIRAN AVCU' ya, tez çalışmamda büyük emekleri olan çalışma arkadaşlarım Okan YETİK ve Berzah YAVUZYEGİT'e ayrıca teşekkür ederim. Tez çalışmamdaki analizlerde desteğini esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Araştırma Görevlisi Dr. Fatih Erdem BAŞTAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarımın yanı sıra hayat yolunda da hep yanımda hissettiğim, hiçbir zaman desteğini esirgemeyen, yüksek lisans eğitimimin, akademik, endüstriyel ve kişisel gelişimim üzerinde önemini bana öğreten ve benimseten çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Egemen AVCU' ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemdeki emeklerin en büyüğünü veren, iyi bir mühendis ve sorumlu bir insan olmama vesile olan ailem ve tüm sevdiklerime sevgilerimi sunar, teşekkür ederim.

Nisan – 2018

Eser HARBELİOĞLU

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLOLAR DİZİNİ .....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
GİRİŞ .....	1
1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE GENEL ÖZELLİKLERİ.....	3
1.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Genel Özellikleri.....	3
1.2. Alüminyumun Yapısı ve Elde Edilmesi .....	4
1.3. Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması .....	5
1.3.1. Alüminyum dövme alaşımları .....	6
1.3.1.1. 1XXX serisi alaşımları.....	8
1.3.1.2. 2XXX serisi alaşımları.....	8
1.3.1.3. 3XXX serisi alaşımları.....	8
1.3.1.4. 4XXX serisi alaşımları.....	8
1.3.1.5. 5XXX serisi alaşımları.....	9
1.3.1.6. 6XXX serisi alaşımları.....	9
1.3.1.7. 7XXX serisi alaşımları.....	9
1.3.1.8. 8XXX serisi alaşımları.....	10
1.3.2. Dökme alüminyum alaşımları.....	10
1.3.2.1. Ticari saflıktaki alüminyum.....	11
1.3.2.2. Al-Cu alaşımları.....	11
1.3.2.3. Al-Cu-Si alaşımları .....	11
1.3.2.4. Al-Si alaşımları .....	12
1.3.2.5. Al-Mg alaşımları.....	12
1.3.2.6. Al-Zn alaşımları .....	12
1.3.2.7. Al-Zn-Mg alaşımları .....	12
1.3.2.8. Al-Sn alaşımları .....	13
1.4. AA7075-T6 Alaşımının Özellikleri.....	13
1.5. Alüminyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları.....	15
1.5.1. Otomotiv endüstrisinde alüminyum.....	15
1.5.2. Havacılık sektöründe alüminyum .....	17
1.5.3. Mimari sektöründe alüminyum.....	18
1.5.4. Ambalajlama sektöründe alüminyum .....	18
1.5.5. Elektrik-Elektronikte alüminyum .....	18
2. BİLYALI DÖVME .....	20
2.1. Bilyalı Dövme İşlemi ve Amaçları .....	20
2.2. Bilyalı Dövme Makinaları .....	24
2.3. Bilyaların Sınıflandırılması .....	26
2.4. Bilyalı Dövme Parametreleri.....	28
3. AŞINMA .....	32

3.1. Adhezif Aşınma.....	33
3.2. Abrasif Aşınma.....	34
3.3. Korozif Aşınma .....	34
3.4. Yorulma Aşınması.....	34
3.5. Eroziyon Aşınma (Katı Partikül Erozyonu).....	35
4. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI.....	41
4.1. Bilyalı Dövme ile Mekanik ve Yüzey Özelliklerinin Değişimi .....	41
4.2. Alüminyum Alaşımlarının Eroziyon Aşınma Davranışları .....	49
5. MALZEME VE YÖNTEM.....	53
5.1. Malzeme .....	54
5.1.1. AA7075-T6 numuneleri.....	54
5.1.2. Paslanmaz çelik bilya özellikleri .....	54
5.1.3. Alümina (Alüminyum Oksit) aşındırıcı partikül özellikleri .....	57
5.2. Yöntem .....	58
5.2.1. Numunelerin metalografik olarak hazırlanması .....	58
5.2.2. Bilyalı dövme işlemleri.....	59
5.2.3. Bilyalı dövme işleminde debi değişimi .....	61
5.2.4. Bilyalı dövme öncesi ve sonrası kütle kaybı .....	61
5.2.5. Bilyalı dövme öncesi ve sonrası mikro sertlik ölçümleri .....	62
5.2.6. Optik profilometre ile yüzey pürüzlülüklerinin incelenmesi.....	62
5.2.7. Bilyalı dövme sonrası eroziyon aşınma testleri.....	64
5.2.8. Bilyalı dövme ve eroziyon aşınma sonrası SEM analizleri.....	65
6. BİLYALI DÖVME PARAMETRELERİNİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİ .....	66
6.1. Püskürtme Basıncının Yüzey Özelliklerine Etkileri .....	66
6.1.1. Püskürtme basıncının yüzey pürüzlülüğüne etkileri.....	66
6.1.2. Püskürtme basıncının 3 boyutlu yüzey topoğrafyasına etkileri.....	68
6.1.3. Püskürtme basıncının yüzey morfolojisine etkileri .....	70
6.2. Bilya Boyutunun Yüzey Özelliklerine Etkileri .....	76
6.2.1. Bilya boyutunun yüzey pürüzlülüğüne etkileri.....	76
6.2.2. Bilya boyutunun 3 boyutlu yüzey topoğrafyasına etkileri.....	78
6.2.3. Bilya boyutunun yüzey morfolojisine etkileri .....	80
6.3. Bilyalı Dövme Süresinin Yüzey Özelliklerine Etkileri.....	86
6.3.1. Bilyalı dövme süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri .....	86
6.3.2. Bilyalı dövme süresinin 3 boyutlu yüzey topoğrafyasına etkileri .....	89
7. BİLYALI DÖVMENİN AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ EROZİYON AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİLERİ .....	92
7.1. Bilyalı Dövmenin AA7075 Alaşımının Eroziyon Aşınma Davranışına Etkisi .....	92
7.2. Farklı Bilyalı Dövme Parametrelerinin Eroziyon Aşınmaya Etkileri.....	97
7.2.1. Bilyalı dövmede kullanılan püskürtme basıncının eroziyon aşınmaya etkisi.....	98
7.2.2. Bilyalı dövmede kullanılan bilya boyutunun eroziyon aşınmaya etkisi.....	99
7.3. Bilyalı Dövme Sonrası Eroziyon Aşındırılmış Yüzeylerin SEM Analizleri .....	101
7.3.1. Bilyalı dövmenin eroziyon aşınma mekanizmalarına etkisi.....	101
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	115

8.1. Sonuçlar.....	115
8.1.1. Farklı bilyalı dövme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	115
8.1.2. Bilyalı dövmenin erozif aşınma davranışına etkileri .....	116
8.2. Öneriler.....	117
KAYNAKLAR .....	118
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	126
ÖZGEÇMİŞ .....	127



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Alüminyumun özellikleri .....	4
Şekil 1.2.	Audi A8 aracının alüminyum iskeleti .....	16
Şekil 1.3.	Audi A8 modelindeki alüminyum parçaları ve üretim yöntemleri .....	16
Şekil 1.4.	Mercedes S serisinde kullanılan alüminyum parçalar .....	16
Şekil 1.5.	Audi A3 levhadan üretilmiş ön iskelet.....	17
Şekil 1.6.	Alüminyum konstrüksiyon görünümü .....	18
Şekil 2.1.	Bilyalı dövme işleminin ana maddesi “ Bilya” .....	20
Şekil 2.2.	Bilyalı dövme işleminin temsili gösterimi .....	21
Şekil 2.3.	Bilyalı dövme işlemi .....	21
Şekil 2.4.	Helikopter parçası .....	23
Şekil 2.5.	Havacılıkta kullanılan iniş takımı dişlisi.....	23
Şekil 2.6.	Bilyalı dövme işlemi sonrası mikro yapı değişikliği .....	23
Şekil 2.7.	Otomatik bilyalı dövme makinası .....	24
Şekil 2.8.	Bilyalı dövme makinalarında kullanılan sistemler .....	25
Şekil 2.9.	Bilyaların sınıflandırılması .....	26
Şekil 2.10.	Bilyalarda SAE standartları ve içerikleri .....	26
Şekil 2.11.	Bilya çeşitleri; a) Seramik Bilya, b) Çelik Bilya, c) Cam Bilya .....	27
Şekil 2.12.	Çelik bilya boyutları ve “ S” kodları.....	27
Şekil 2.13.	Almen test şeridi ve boyutları .....	28
Şekil 2.14.	Almen şeritlerindeki eğrilik yüksekliği .....	29
Şekil 2.15.	Almen mastarı .....	30
Şekil 2.16.	Almen test şeridi tutucu elemanı .....	30
Şekil 3.1.	Havacılıkta aşınma.....	32
Şekil 3.2.	Adhezif aşınmaya uğramış kam mili .....	33
Şekil 3.3.	Yorulma aşınması şematik gösterim.....	34
Şekil 3.4.	Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler .....	35
Şekil 3.5.	Talaş kaldırma mekanizması.....	36
Şekil 3.6.	Katı partikül erozyonu sonucu oluşan mekanizmalar .....	36
Şekil 3.7.	Erozif aşınma türleri .....	37
Şekil 3.8.	Sünek ve gevrek malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri .....	38
Şekil 3.9.	Farklı partikül çarpma açılarında AA1070 ve AA6101 alüminyum alaşımlarının aşınma miktarları karşılaştırılması.....	39
Şekil 3.10.	Partikül hızının erozyon oranına etkisi .....	40
Şekil 4.1.	Bilyalı dövülen a) CE-B120, b) CE-Z425, c) CE- Comb SEM görüntüleri.....	41

Şekil 4.2.	Bilyalı dövülen AA7075 malzemede çatlak ilerlemesi a) Püskürtme basıncı 130 MPa, b) Püskürtme basıncı 180 MPa .....	42
Şekil 4.3.	Lazer dövme prosesi .....	42
Şekil 4.4.	Bilyalı dövülen yüzeylerin makro görüntüleri a) 9,6 N / %650 Bilyalı dövülmüş malzemenin kırık yüzey makro görüntüsü ( $\sigma_a = 185$ MPa) , b) Ana çatlak altında meydana gelmiş bir başka çatlak başlangıcı ( $\sigma_a = 194$ MPa).....	43
Şekil 4.5.	Bilyalı dövülen yüzeylerin makro görüntüleri a) 14,6A / %650 Bilyalı dövülmüş malzemenin kırık yüzey makro görüntüsü ( $\sigma_a = 185$ MPa), b) Ana çatlak altında meydana gelmiş bir başka çatlak başlangıcı ( $\sigma_a = 141$ MPa).....	43
Şekil 4.6.	Bilyalı dövmenin bağlayıcı astar üzerindeki etkisi.....	44
Şekil 4.7.	Bilyalı dövülmüş yüzeylerde pürüzlülük morfolojisi .....	44
Şekil 4.8.	Vuruş mesafesinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi .....	45
Şekil 4.9.	Alüminyum yüzeyi .....	45
Şekil 4.10.	Bilyalı dövülen ve işlem görmeyen yüzeylerin kesit profilleri.....	46
Şekil 4.11.	Bilyalı dövme öncesi ve sonrası AA7075 yüzey profilleri.....	46
Şekil 4.12.	Bilyalı dövme sonrası oluşan yüzey değişiklikleri a) Malzeme yüzeyine gömülü bilya, b) Malzeme yüzeyinde oluşan çukur.....	47
Şekil 4.13.	Bilya boyutunun yüzey pürüzlülüğüne etkisi .....	47
Şekil 4.14.	Ultrasonik bilyalı dövme sonucu yüzeyin 3D topoğrafik görünümü .....	48
Şekil 4.15.	Hedef malzemelerin erozyon oranı ve sertlik değerleri.....	49
Şekil 4.16.	Aşındırılan Al7034-T6 kompozit malzemenin SEM fotoğrafları a) 30°, aşındırıcı sıcaklığı 30°C, aşındırıcı ile aşındırılan yüzey arası mesafe 30 mm ve partikül hızı 50 m/s b) partikül açısı 90°, aşındırıcı sıcaklığı 60°C, aşındırıcı ile aşındırılan yüzey arası mesafe 50 mm ve partikül hızı 120 m/s.....	50
Şekil 4.17.	Lazer dövme uygulanmamış yüzeyde oluşan aşınma mekanizmaları.....	51
Şekil 5.1.	Tez çalışmasının akış şeması .....	53
Şekil 5.2.	S10 paslanmaz çelik bilya SEM fotoğrafı (100X büyütme).....	55
Şekil 5.3.	S10 paslanmaz çelik bilya SEM fotoğrafı (1000X büyütme).....	56
Şekil 5.4.	S60 paslanmaz çelik bilya SEM fotoğrafları (100X büyütme).....	56
Şekil 5.5.	S60 paslanmaz çelik bilya SEM fotoğrafları (1000X büyütme).....	56
Şekil 5.6.	Saflık derecesine göre alüminyum oksit çeşitleri .....	57
Şekil 5.7.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (alümina) aşındırıcı partiküllerin SEM fotoğrafı.....	58
Şekil 5.8.	AA7075-T6 numune boyutları.....	58
Şekil 5.9.	Mikro kesme cihazı “Metkon Micracut 151” .....	58
Şekil 5.10.	Zımpara ve parlatma cihazı “Metkon Forcipol IV” .....	59
Şekil 5.11.	Bilyalı dövme için kullanılan düzeneğin şematik gösterimi.....	60
Şekil 5.12.	Hassas terazi.....	61
Şekil 5.13.	Mikro sertlik ölçüm cihazı .....	62



Şekil 5.14.	Optik profilometre .....	63
Şekil 5.15.	Pürüzlülük ölçüm yöntemi .....	63
Şekil 5.16.	Katı partikül erozyonu test düzeneği şematik gösterimi .....	64
Şekil 5.17.	Erozif aşınma testlerinde partikül çarpma açısı şematik gösterimi .....	65
Şekil 5.18.	a) SEM cihazı özellikleri, b) Örnek analiz .....	65
Şekil 6.1.	Püskürtme basıncının ortalama çizgisel pürüzlülüğe ( $R_a$ ) etkisi .....	66
Şekil 6.2.	Püskürtme basıncının ortalama alansal pürüzlülüğe ( $S_a$ ) etkisi .....	67
Şekil 6.3.	Püskürtme basıncının çizgisel yüzey pürüzlülüğüne ( $R_a$ ) etkisi .....	67
Şekil 6.4.	Püskürtme basıncının alansal yüzey pürüzlülüğüne ( $S_a$ ) etkisi .....	68
Şekil 6.5.	Püskürtme basıncının 3 boyutlu yüzey topoğrafyasına etkileri .....	69
Şekil 6.6.	Püskürtme basıncı etkisinin incelendiği AA7075-T6 yüzey kesit profili .....	70
Şekil 6.7.	Püskürtme basıncının etkisi (2 bar – 4 bar – 100x büyütme) .....	71
Şekil 6.8.	Püskürtme basıncının etkisi (2 bar – 4 bar – 1000x büyütme) .....	72
Şekil 6.9.	Püskürtme basıncının etkisi (2 bar – 4 bar – 100x büyütme) .....	74
Şekil 6.10.	Püskürtme basıncının etkisi (2 bar – 4 bar – 1000x büyütme) .....	75
Şekil 6.11.	Bilya boyutunun çizgisel ( $R_a$ ) ve alansal ( $S_a$ ) yüzey pürüzlülüğüne etkisi .....	77
Şekil 6.12.	Bilya boyutunun çizgisel ( $R_a$ ) ve alansal ( $S_a$ ) yüzey pürüzlülüğüne etkisi .....	77
Şekil 6.13.	Bilya boyutunun 3 boyutlu yüzey topoğrafyasına etkileri .....	78
Şekil 6.14.	Bilya boyut etkisi için AA7075-T6 yüzey kesit profili .....	79
Şekil 6.15.	Bilya boyutunun etkisi (S10 – S60 – 100x büyütme) .....	81
Şekil 6.16.	Bilya boyutunun etkisi (S10 – S60 – 1000x büyütme) .....	82
Şekil 6.17.	Bilya boyutunun etkisi (S10 – S60 – 100x büyütme) .....	84
Şekil 6.18.	Bilya boyutunun etkisi (S10 – S60 – 1000x büyütme) .....	85
Şekil 6.19.	Bilyalı dövme süresinin ortalama çizgisel ( $R_a$ ) yüzey pürüzlülüğüne etkisi .....	87
Şekil 6.20.	Bilyalı dövme süresinin ortalama alansal ( $S_a$ ) yüzey pürüzlülüğüne etkisi .....	87
Şekil 6.21.	Bilyalı dövme süresinin çizgisel ( $R_a$ ) yüzey pürüzlülüğüne etkisi .....	88
Şekil 6.22.	Bilyalı dövme süresinin alansal ( $S_a$ ) yüzey pürüzlülüğüne etkisi .....	89
Şekil 6.23.	Bilyalı dövme süresinin 3 boyutlu yüzey topoğrafyasına etkileri .....	89
Şekil 6.24.	Bilya dövme süresinin etkisi için AA7075-T6 yüzey kesit profili .....	90
Şekil 7.1.	Bilyalı dövülen ve dövülmeyen yüzeylerde erozyon oranları (Bilyalı dövme parametreleri: S10, 2-4 bar, 60 saniye), (Erozif aşınma parametreleri: 1.5 bar, 10 saniye, 30 ve 90 derece) .....	93

Şekil 7.2.	Bilyalı dövülen ve dövülmeyen yüzeylerde erozyon oranları (Bilyalı dövme parametreleri: S60, 2-4 bar, 60 saniye), (Erozif aşınma parametreleri: 1.5 bar, 10 saniye, 30 ve 90 derece).....	94
Şekil 7.3.	Bilyalı dövmenin erozif aşınma mekanizmalarına etkisi.....	96
Şekil 7.4.	Bilyalı dövmenin erozif aşınma mekanizmalarına etkisi.....	97
Şekil 7.5.	Bilya püskürtme basıncının 30 derece partikül çarpma açısında erozif aşınmaya etkileri.....	98
Şekil 7.6.	Bilya püskürtme basıncının 90 derece partikül çarpma açısında erozif aşınmaya etkileri.....	99
Şekil 7.7.	Bilya boyutunun 30 derece partikül çarpma açısında erozif aşınmaya etkileri .....	100
Şekil 7.8.	Bilya boyutunun 90 derece partikül çarpma açısında erozif aşınmaya etkileri .....	101
Şekil 7.9.	Aşındırıcı partikül çarpma açısının bilyalı dövülmemiş yüzeylere etkisi .....	103
Şekil 7.10.	Aşındırıcı partikül çarpma açısının bilyalı dövülmemiş yüzeylere etkisi .....	104
Şekil 7.11.	Aşındırıcı partikül çarpma açısının bilyalı dövülen yüzeye etkisi.....	107
Şekil 7.12.	Aşındırıcı partikül çarpma açısının bilyalı dövülen yüzeye etkisi.....	108
Şekil 7.13.	Aşındırıcı partikül çarpma açısının bilyalı dövülen yüzeye etkisi.....	110
Şekil 7.14.	Aşındırıcı partikül çarpma açısının bilyalı dövülen yüzeye etkisi.....	111
Şekil 7.15.	Aşındırıcı partikül çarpma açısının bilyalı dövülen yüzeye etkisi.....	113
Şekil 7.16.	Aşındırıcı partikül çarpma açısının bilyalı dövülen yüzeye etkisi.....	114

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1.	Saf alüminyumun teknik özellikleri.....	3
Tablo 1.2.	Yaygın bulunan elementler kimyasal sembolleri ve bulunma sıklıkları .....	5
Tablo 1.3.	Alüminyum alaşımları için temper seri numaraları .....	6
Tablo 1.4.	Dövme alüminyum alaşımlarının adlandırılması.....	7
Tablo 1.5.	Dövme alüminyum alaşımlarının standartlarda göre gösteriliş biçimleri.....	7
Tablo 1.6.	Dökme alüminyum alaşımlarının standart gösterilişi.....	11
Tablo 1.7.	AA7075 kalite alüminyumun kimyasal bileşimi (% ağırlık).....	14
Tablo 1.8.	AA7075'in fiziksel özellikleri .....	14
Tablo 2.1.	Bilyalı dövme makinalarının sınıflandırılması .....	24
Tablo 2.2.	Bilya standartları ve sertlik değerleri.....	27
Tablo 2.3.	Standartlaştırılmış almen bantlarının özellikleri.....	29
Tablo 3.1.	Endüstrideki aşınma kaynaklı hasarlar ve oluşma sıklıkları.....	32
Tablo 5.1.	AA7075 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu ve önemli mekanik özellikleri .....	54
Tablo 5.2.	Paslanmaz çelik bilya sertifika bilgileri.....	55
Tablo 5.3.	Alümina aşındırıcı partikül sertifika bilgileri .....	57
Tablo 5.4.	Bilyalı dövme parametreleri .....	60
Tablo 5.5.	Farklı parametreler altında elde edilen almen şiddeti ve örtme oranları .....	61
Tablo 5.6.	Bilyalı dövme işlemlerinde kütleli debi değişimi.....	61
Tablo 5.7.	Bilyalı dövme sonrası AA7075 alaşımında meydana gelen yüzey sertlikleri.....	62
Tablo 5.8.	Pürüzlülük ölçüm parametreleri.....	63
Tablo 5.9.	Erozif aşınma test parametreleri .....	64

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

m	:Metre
cm	:Santimetre
$\mu\text{m}$	:Mikrometre
nm	:Nanometre
kg	:Kilogram
gr	:Gram
mg	:Miligram
s	:Saniye
dk	:Dakika
Pa	:Pascal
Mpa	:Megapascal
Gpa	:Gigapascal
W	:Watt
J	:Joule
N	:Newton

### Kısaltmalar

AA	:Alüminyum Alaşımı
AISI	:American Iron And Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
AMS	:Aerospace Materials Spesification (Uzay Malzemeleri Spesifikasyonları)
BS	:Back Scatter Electrons (Geri Saçılan Elektronlar)
EDS	:Enerji Dağılım Spektrometresi
EN-ISO	:European Norm-International Organization for Standardization (Avrupa normu-Uluslararası Standartlar Organizasyonu)
Ra	:Çizgisel Yüzey Pürüzlülüğü
Sa	:Alansal Yüzey Pürüzlülüğü
SAE	:Society of Automotive Engineers (Otomotiv Mühendisleri Topluluğu)
SE	:Seconder Electrons (İkincil Elektronlar)
SEM	:Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)

## **BİLYALI DÖVMENİN AA7075-T6 ALAŞIMININ YÜZEY ÖZELLİKLERİNE VE EROZİF AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİLERİ**

### **ÖZET**

Tez çalışmasında ilk aşamada; farklı bilyalı dövme parametrelerinin AA7075-T6 alaşımının yüzey özelliklerine etkileri irdelenmiştir. İkinci aşamada ise farklı parametreler altında dövülen ve yüzey özellikleri değişen alüminyum alaşımının, erozif aşınma davranışının değişimi incelenmiştir. Bu kapsamda özel olarak tasarlanan bilyalı dövme test düzeneğinde farklı bilyalı dövme parametreleri (püskürtme basıncı, bilya boyutu ve bilyalı dövme süresi) altında AA7075-T6 alüminyum alaşımının yüzeyleri işlenmiştir. Bilyalı dövme ile yüzeyleri işlenen numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve 3 boyutlu temazsız optik profilometre ile yüzey özellikleri ortaya konulmuştur. Daha sonra katı partikül erozyonu testlerine maruz tutulan bilyalı dövülmüş numunelerin erozyon oranlarının ve erozif aşınma mekanizmalarının bilyalı dövme işlemine bağlı olarak değişimleri araştırılmıştır. Elde edilen 3 boyutlu yüzey topoğrafyaları, çizgisel ve yüzeysel pürüzlülük değerleri ışığında bilya boyutunun ve püskürtme basıncının artmasıyla yüzeydeki pürüzlüğün arttığı gözlenirken, bilyalı dövme süresindeki artışın yüzey pürüzlülüğüne ciddi bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Püskürtme basıncı ve bilya boyutu parametrelerine bağlı olarak bilyalı dövme sonucunda alaşımın yüzeyinde meydana gelen plastik deformasyonlar SEM fotoğrafları ile detaylı şekilde ortaya konulmuştur. Eroziyon deneyleri bilyalı dövülmüş yüzeylerden işlem görmemiş yüzeylere kıyasla daha fazla malzeme uzaklaştığı ve bunun sonucunda erozyon oranının artış gösterdiğini göstermiştir. Buna karşın bilyalı dövme işlemi ve parametrelerinin alüminyum alaşımında görülen etkin erozif aşınma mekanizmaları üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür. Ancak bilyalı dövmenin AA7075-T6 alaşımının erozif aşınma dayanımını olumsuz yönde etkilediği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** AA7075 T6 Alaşımı, Bilyalı Dövme, Eroziyon Aşınma, Operasyon Parametreleri, Yüzey Özellikleri.

## **EFFECTS OF THE SURFACE CHARACTERISTICS AND EROSION WEAR BEHAVIOR OF AA7075-T6 ALLOY THAT SHOT PEENING**

### **ABSTRACT**

The first stage of the thesis; the effects of different shot peening parameters on the surface properties of AA7075-T6 alloy were investigated. In the second stage, the variation of the erosive wear behaviour of the aluminium alloy shot peened under different parameters it was investigated. In this context, surfaces of AA7075-T6 aluminium alloy were peened under different peening parameters (peening pressure, shot size and peening duration) in a specially designed shot peening test rig. The surface properties of the shot peened specimens peened were revealed by scanning electron microscopy (SEM) and 3D optical profilometer. Afterwards, shot peened specimens were exposed to the solid particle erosion tests and the changes in the erosive wear mechanisms due to the shot peening were investigated. The resulting 3D surface topography and surface roughness values resulted in an increase in the roughness with the increases in shot size and the peening pressure while increases in the peening duration did not have a significant effect on the roughness. The plastic deformations occurred on the surface depending on peening pressure and shot size were investigated via SEM in detail. Erosive wear tests were shown that erosion rates increases as more material is removed from the surface of the shot peened specimens than the untreated surface. However, it was found that shot peening process and its parameters did not have a significant effect on the effective erosive wear mechanisms seen in the aluminium alloy. Besides, shot peening deteriorated the erosive wear resistance of the aluminium alloy.

**Keywords:** AA7075-T6 Alloy, Shot Peening, Erosive Wear, Operation Parameters, Surface Properties.

## GİRİŞ

Günümüzde yakıt tasarrufu ve çevresel faktörler nedeniyle ağırlığın ön plana çıktığı pek çok endüstriyel alanda alüminyum alaşımları çelik malzemelerin yerini almaktadır. Alüminyum alaşımları (özellikle 7XXX serisi); yüksek mukavemeti, kolay işlenebilirliği, yüksek yorulma dayanımı, düşük maliyeti ve üstün tokluğu nedeni ile birçok endüstride yaygın olarak tercih edilmektedirler. Özellikle AA7075 alüminyum alaşımları, hafif olmaları ve T6 ısıl işlem şartlarında yüksek dayanım özellikleri sağlamaları nedeniyle uçak, uzay endüstrisinde ve otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bilyalı dövme, malzemelerin özellikle yorulma ömürlerinin artırılması amacıyla hedef malzeme yüzeyine çok sayıda bilyanın çarptırılmasıyla gerçekleştirilen mekanik bir yüzey işleme yöntemidir. Bilyalı dövme işlemi sırasında malzeme yüzeyine çarpan bilyalar, malzeme yüzeyi ve yüzey altında plastik deformasyona neden olarak, malzemenin yüzey ve yüzey altı özelliklerinin (yüzey pürüzlülüğü, sertlik, kalıntı gerilme, mikroyapı) değiştirilmesine ve yorulma dayanımının artırılmasını sağlarlar. Diğer yandan literatürde bilyalı dövme ile malzemelerin yüzey pürüzlülüklerinin artışa neden olabileceği, bu durumun yorulma dayanımının geliştirilmesini olumsuz yönde etkilediği ve korozyon dayanımını düşürdüğü belirtilmiştir. Bu bilgilere göre başarılı bir bilyalı dövme işlemi gerçekleştirilmesi için; bilyalı dövme işleminin ve işlem parametrelerinin malzeme yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkilerinin iyi anlaşılması gerektiği açıkça görülmektedir. Ancak literatür çalışmaları incelendiğinde konu ile ilgili çalışmaların genellikle bilyalı dövülmüş malzemelerin yorulma dayanımlarına etkileri üzerine gerçekleştirildiği görülmektedir. Bilyalı dövmenin malzemelerin yüzey özelliklerine etkileri üzerine az sayıda çalışma gerçekleştirildiği ve mevcut çalışmalarda konunun çok detaylı irdelenmediği görülmektedir.

Tez çalışmasında temel amaç farklı bilyalı dövme parametrelerinde işlenmiş AA7075-T6 alüminyum alaşımının yüzey özelliklerindeki değişimlerin detaylı bir şekilde incelenmesidir. Diğer yandan bilyalı dövme nedeniyle değişen yüzey özelliklerinin

alaşımının erozif aşınma davranışına etkilerinin irdelenmesi tezin diğer amacını oluşturmaktadır. Literatürde alüminyum alaşımlarının erozif aşınma davranışları üzerine yapılan çok sayıda çalışma olmasına rağmen, farklı bilyalı dövme parametrelerinin malzeme erozif aşınma davranışına etkisi araştırılmamış bir konu olarak göze çarpmaktadır.

Tez çalışmasının özgün değerinin ve sürdürülebilirliğinin artırılması amacı ile endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan AA7075-T6 alaşımına bilyalı dövme işleminde etkin olan; püskürtme basıncı (2 bar ve 4 bar), bilya boyutu (0,1-0,3 mm (S10) ve 0,4-0,9 mm (S60)), bilyalı dövme süresi (30 saniye ve 60 saniye) gibi üç farklı parametrenin kombinasyonu ile bilyalı dövme işlemleri uygulanarak, bilyalı dövme işlemlerinin AA7075-T6 alaşımının yüzey pürüzlülüğüne, yüzey morfolojisine ve yüzey topoğrafyasına etkisinin detaylı şekilde ortaya konması hedeflenmektedir. Daha sonra bilyalı dövülmüş AA7075-T6 alaşımlarına 30° ve 90° partikül çarpma açılarında erozif aşınma deneyleri uygulanarak, bilyalı dövme işleminin aşınma davranışına etkileri ve erozif aşınmaya neden olan aşınma mekanizmaları detaylı şekilde incelenmesi planlanmaktadır.

Tez çalışmasında ilk bölümlerde alüminyum alaşımları, bilyalı dövme ve aşınma konuları genel olarak ele alınmıştır. Bu bölümleri takiben tez çalışması üzerine literatürde gerçekleştirilmiş örnek çalışmalar kısaca verilmiştir. Daha sonra sırası ile tez çalışmasında kullanılan malzemeler ve yöntemler tanıtılmıştır. Bu bölümü takiben gerçekleştirilen deneysel sonuçlar ve tartışmalar, sonuçlar bölümünde detaylı bir şekilde verilmiştir. Son bölümde tez çalışmasının genel sonuçları ve konu ile ilgili gelecekte gerçekleştirilebilecek çalışmalar için öneriler verilmiştir.



## 1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE GENEL ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde; alüminyum malzemelerin genel özellikleri, kullanım alanları ve özellikle 7XXX serisi alüminyum alaşımlarından biri olan AA7075-T6 alaşımlarının önemli yapısal ve teknik özelliklerinin irdelenmesi amaçlanmıştır.

### 1.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Genel Özellikleri

Alüminyum ve alüminyum alaşımları; demir esaslı malzemelerle kıyaslandığında hafiflik, korozyona dayanıklılık, yüksek ısı ve elektriksel iletkenlik, güzel görünüş ve kolay işlenebilme açısından bazı üstün özellikleri sebebiyle endüstride önemli kullanım alanına sahiptirler. Özgül ağırlığı  $2,7 \text{ g/cm}^3$  olup demirin özgül ağırlığının üçte biri kadardır. Alaşımsız alüminyumun çekme mukavemeti  $90 \text{ N/mm}^2$  civarındadır. Fakat alaşımlandırma ile  $220 \text{ N/mm}^2$  ve ısı işleme (çökeltme sertleştirilmesi)  $440 \text{ N/mm}^2$ 'ye kadar yükseltilebilmektedir. Bu değer yapı çeliğinin mukavemetine benzerdir. Alüminyum alaşımlarının özgül mukavemetinin (çekme mukavemeti/özgül ağırlık) yapı çeliklerinin üç katına yakın olduğu görülür. Bu nedenle alüminyum alaşımları, hafifliğin ön planda olduğu otomotiv ve uçak endüstrisinde önemli bir yere sahiptir [1-4].

Saf alüminyum, teknik malzeme olarak korozyon dayanımı ve yüzey kalitesi özellikleri aranan parçaların üretiminde tercihen kullanılmaktadır (Tablo 1.1). Otomobillerde, far ve diğer yansıtıcılarda, kimya ve gıda endüstrisinde kullanılan çeşitli kutular, kaplar ve ince yapraklar (folyo), elektronik sanayinde özel iletkenler vb. gibi geniş kullanım alanlarına sahiptir [1, 5]. Alüminyum ve alaşımlarının geniş kullanım alanlarına sahip olması ve tercih edilmesinin birçok önemli nedenleri vardır (Şekil 1.1).

Tablo 1.1. Saf alüminyumun teknik özellikleri [1, 5]

Özgül ağırlık ( $\text{g/cm}^3$ )	Ergime sıcaklığı ( $0^\circ\text{C}$ )	Isıl genleşme katsayısı ( $25^\circ\text{C}$ 'de)	Elastiklik modülü ( $\text{kN/mm}^2$ )	Çekme mukavemeti ( $\text{N/mm}^2$ )	Akma Dayanımı ( $\text{N/mm}^2$ )	Sertlik (HB)
2,7	660	23,1	65-70	70-140	20-30	5-15



Şekil 1.1. Alüminyumun özellikleri

## 1.2. Alüminyumun Yapısı ve Elde Edilmesi

Alüminyum, doğada oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan üçüncü element olmasına rağmen, endüstriyel çapta üretimi özellikle elektroliz yönteminin kullanımının başlanması ile gerçekleşmiştir [1, 4, 6].

Tablo 1.2. Yaygın bulunan elementler kimyasal sembolleri ve bulunma sıklıkları [4]

Element	Kimyasal Sembol	Doğada Bulunabilirlik %
Oksijen	O	47,3
Silisyum	Si	27,7
Alüminyum	Al	7,9
Demir	Fe	4,5
Kalsiyum	Ca	3,5
Sodyum	Na	2,5
Potasyum	K	2,5
Magnezyum	Mg	2,2
Titanyum	Ti	0,5
Hidrojen	H	0,1

Tablo 1.2’ de görüldüğü gibi, yer kabuğunda %7,9 oranda alüminyum mevcuttur. Kimyasal aktivitesinden dolayı alüminyum doğada genelde saf halde bulunmaz, bu nedenle demir oksit ve alüminyum silikattan oluşan boksit cevherinden elde edilir. Yer kabuğunda yaklaşık 250 farklı alüminyum minerali bulunmaktadır. Bunlardan en önemli olanlar silikatlar ve oksit hidratlardır. Alüminyum üretiminde en önemli bileşik; boksit bir hidrattır [1, 4, 6].

### 1.3. Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları üretim metotları esas alınarak dövme ve döküm olmak üzere iki grupta toplanabilir. Bu iki grup birbirinden oldukça farklı mikroyapı ve kimyasal bileşime sahiptirler. Her iki ana grup içindeki alaşımlar, ısıtma işlemi uygulanabilen ve uygulanamayan alaşımlar olmak üzere, iki alt gruba ayrılmaktadır [6, 7]. Isıtma işlemi uygulanabilen alaşımların mekanik özellikleri soğuk şekil verme ve ısıtma işlemi ile geliştirilirken, ısıtma işlemi uygulanmayan alaşımlar ise sadece soğuk şekil verme işlemi ile geliştirilir [8].

Mukavemetlendirme derecesi, alaşımların ısıtma işlemi görebilir veya pekiştirilebilir olmasına göre temper tanımlaması “T” ve “H” ile gösterilmektedir (Tablo 1.3). Diğer tanımlamalar alaşımların tavlandığını (O), çözündürme uygulandığını (W) veya üretildiği şekilde kullanıldığını (F) göstermektedir. “T” ve “H” yi takip eden numaralar

pekleşme miktarını, gerçek ısı işlem tipini veya alaşımın diğer özel üretim işlem durumunu göstermektedir [1, 6, 9, 10].

Tablo 1.3. Alüminyum alaşımları için temper seri numaraları [6]

Temper no	Açıklama
F	İmal edildiği şekilde
0	Tavlanmış (Mümkün olan en yumuşak şartlarda)
H	Soğuk şekillendirilmiş
H1X	Sadece soğuk şekillendirilmiş ( x soğuk şekillendirme miktarına ve mukavemetlendirmeye işaret eder)
H12	Soğuk şekillendirme, 0 ve H14 temperleri arasında, ortalarda bir çekme dayanımı sağlar
H14	Soğuk şekillendirme, 0 ve H18 temperleri arasında bir çekme dayanımı sağlar
H16	Soğuk şekillendirme, H14 ve H18 temperleri arasında ortalarda bir çekme dayanımı sağlar
H18	Soğuk şekillendirme, yaklaşık %75 azalma sağlar
H19	Soğuk şekillendirme, H18 temperleme ile elde edilen çekme dayanımından 2000 psi fazla dayanım sağlar
H2X	Soğuk şekillendirilmiş ve kısmen tavlanmış
H3X	Düşük sıcaklıkta yapının yaşlanmasını önlemek için soğuk şekillendirilmiş ve dengelenmiş
W	Çözelti ısı işlemi görmüş
T	Yaşlandırılmış
T1	İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve doğal olarak yaşlandırılmış
T2	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
T3	Çözelti ısı işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
T4	Çözelti ısı işlemi uygulanmış ve esas olarak kararlı bir duruma doğal yaşlandırılmış
T5	Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden ve soğuduktan sonra yapay yaşlandırılmış
T6	Çözelti ısı işlemi görmüş ve yapay yaşlandırılmış
T7	Çözelti ısı işlemi görmüş ve kararlılaştırılmış
T8	Çözelti ısı işlemi uygulanmış, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış
T9	Çözelti ısı işlemi uygulanmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş
T	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış

### 1.3.1. Alüminyum dövme alaşımları

Bu alaşımlar; dövme, haddeleme ve ekstrüzyon gibi plastik şekil verme yöntemleriyle üretilmektedirler. Dövme alaşımlarının, plastik deformasyon yetenekleri iyi olup rahatça şekillendirilebilirler. Alüminyum dövme ve döküm alaşımlarının büyük bir kısmına ısı işlem uygulanabilmektedir. Amerikan alüminyum birliğine göre,

alüminyum dövme alaşımları dört harfle sınıflandırılmaktadır. Adlandırma Tablo 1.4’te detaylandırılmıştır [5, 7, 9, 11].

Tablo 1.4. Dövme alüminyum alaşımlarının adlandırılması [5, 7]

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 belirtir.
		<b>1050</b>
		<b>2024</b>
		<b>3003</b>
		<b>4043</b>
		<b>5154</b>
		<b>6060</b>

Tablo 1.5’te alüminyum serileri, ısıl işlem durumları ve oluşturdukları alaşım grupları verilmiştir. Genellikle dövme alüminyum alaşımların sınıflandırılması alaşım elementlerinin katkılarına göre yapılmaktadır, bunun yanında ısıl işlem uygulanabilirliği (yaşlandırma) açısından da bu alaşımlar ele alınmaktadır [5, 7].

Tablo 1.5. Dövme alüminyum alaşımlarının standartlarda göre gösteriliş biçimleri [1, 4, 12]

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, Sn, Zr, B	Evet
9XXX	Kullanılmayan Seri	-

#### **1.3.1.1. 1XXX serisi alaşımları**

1XXX serisi alüminyum alaşımları saf veya çok az alaşım elemanı bulunduran malzemelerdir. Basit işlemlerle levha, folyo ve profil haline getirilirler. Bu gruptaki alaşımlar yaşlanma sertleşmesi göstermezler ve bunlara sadece deformasyon sertleşmesi yolu ile kısmen mukavemet kazandırılabilir. Şekillendirme ve işlenebilirlik kabiliyeti yüksektir, ancak mukavemetleri düşüktür [5, 7, 13].

#### **1.3.1.2. 2XXX serisi alaşımları**

2XXX serisi Al-Cu alaşımlarının temel alaşım elementini bakır oluşturmaktadır. Bu alaşımın kullanım alanları uçak ve uzay uygulamalarıdır. Başlıca otomotiv, vagon, uçak, mühimmat sanayisinde, dişli ve bağlantı elemanlarında, voltaj yükselticilerinde, süspansiyon parçalarında, perçinlerde, vida mekanizmalarında yüksek dayanım ve hafifliğin gerekli olduğu yerlerde kullanılmaktadır [5, 7, 13]. Çözelti ısıl işlemi uygulanması ile karbonlu çeliklerin mekanik özelliklerine benzer özellik elde edilebilir. Bu seri genelde uçakların kanat yüzeylerinde kullanılır [4, 7].

#### **1.3.1.3. 3XXX serisi alaşımları**

3XXX serisinin ana alaşım elementi mangandır. Bu alaşımlara ısıl işlem uygulanmadığı halde mukavemet değerleri 1XXX Serisine göre % 20 oranında daha iyidir [4, 7]. Bu alaşımlar, saf alüminyum ile yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları arasındaki boşluğu doldururlar. Mangan ilavesi sünekliğin azalmasına neden olur [5]. 3XXX Serisi alaşımları yiyecek konserve kutularında, mutfak takımlarında, depolama tanklarında yaygın olarak kullanılmaktadır. En yaygın olarak kullanılan 3003 alaşımıdır. Bu alaşımın şekillendirilme kabiliyeti, korozyon direnci ve kaynak kabiliyeti yüksek olduğu ve mukavemeti normalin üzerinde olduğundan dolayı boru gaz ve yağ tankı, gıda kutusu gibi amaçlar için kullanılmaktadır [4, 7, 13].

#### **1.3.1.4. 4XXX serisi alaşımları**

4XXX serisinin ana alaşım elemanı silisyumdur. Al-Si alaşımlarının en önemli özelliği düşük silisyum katkılarında ergime sıcaklığının düşük olmasıdır. Bu nedenle kaynak çubukları ve sert lehim levhalar için özellikle uygundur. Artan silisyum oranı ergime sıcaklık aralığını azaltır ve dökülebilme yeteneğini artırır. Yüksek silisyum,

alüminyum alaşımlarına yüksek korozyon direnci ve yüksek aşınma direnci sağlar [5]. 4xxx serisi alaşımlarına ısıl işlem uygulanamaz. Fark edilir miktarlarda Si içeren alaşımlar anodik oksitlemeden sonra koyu gri renge dönüşür. 4032 alaşımı düşük ısıl genişleme katsayısı ve yüksek aşınma direncine sahiptir, bu nedenle bu alaşım dövme motor pistonlarının üretimine uygundur [7, 9, 13].

#### **1.3.1.5. 5XXX serisi alaşımları**

5XXX serisinin ana alaşım elementi ise magnezyumdur. Mekanik mukavemetleri de orta düzeyden yükseğe kadar geliştirilebilen malzemelerdir. Yüksek çekme dayanımı, sertlik, aşınma direnci, deniz atmosferine karşı iyi korozyon direnci önemli özellikleridir. Soğuk şekil değişimine elverişli değildir. 5xxx serisi alaşımlarda Magnezyum oranı arttıkça sertlik ve mukavemet artarken süneklik azalır [5, 9, 13]. Magnezyuma, mangan katıldığında yüksek mukavemetli dövme sertleşmesi gösteren ana alaşım ortaya çıkar. 5XXX serisindeki alaşımlar iyi kaynak yapılabilme özelliğine sahiptirler ve korozyon dirençleri yüksektir. Daha çok gemilerde, vinç parçalarında ve otomotiv sektöründe kullanılmaktadır [4, 7].

#### **1.3.1.6. 6XXX serisi alaşımları**

6XXX serisinin alaşımları yapılarında silisyum ve magnezyum içerirler. 2XXX ve 7XXX serisi alaşımları ile aynı mukavemet değerine sahiptirler fakat 6XXX serisi alaşımları şekillendirilme, kaynaklanabilirlik, işlenebilme ve korozyon dirençleri açısından daha iyidirler. Bu alaşımların korozyona gösterdikleri direnç, saf alüminyumun gösterdiği dirence kıyasla daha düşüktür. Mimari uygulamalar, köprü korkulukları ve kaynaklı yapılar kullanım alanlarına örnektir [4, 5, 7, 9].

#### **1.3.1.7. 7XXX serisi alaşımları**

7XXX serisi alüminyum alaşımları yüksek sertlik ve dayanıma sahip malzemeler olduğundan uçak ve uzay endüstrisinin yanında otomotiv sektöründe de yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Her ne kadar, katılma çatlakları ve yüksek gözeneklilik hacmi üreten füzyon kaynak yöntemiyle birleştirilmesi zor olsa da 7XXX serisi alüminyum alaşımları yüksek mukavemet/ağırlık oranı yönünden özellikle uçak gövde yapılarında ve yüksek gerilme altında çalışan parçalarda geniş kullanım alanı bulmaktadır [7, 9,

11, 14-16]. Ayrıca 7XXX Serisi alüminyumlar özellikle ağırlık/dayanım oranı bakımından, mükemmel tokluk değerleri ve iyi korozyon direnci sağladığından özellikle otomotiv ve havacılık endüstrisinde tercih edilmektedirler [11, 16]. Bu serinin en önemli alaşımı AA7075 olup, %5,6 çinko, %2,5 magnezyum, %1,6 bakır ve %0,25 krom ihtiva eder. AA7075-T6 alaşımının çekme dayanımı 504 MPa'dır. Bu seri yüksek dayanımın gerekli olduğu yerlerde kendisine uygulama alanı bulur. AA7075 alüminyum alaşımının yüksek bir dayanım modifikasyonu 1951 'de geliştirilmiştir [7, 13].

#### **1.3.1.8. 8XXX serisi alaşımları**

Son yıllarda özellikle uzay ve uçak sanayisi için düşük yoğunluklu, yüksek mukavemetli malzemeye duyulan talep, Al-Li alaşımlarını ön plana çıkarmıştır. Al-Li alaşımları düşük yoğunluğun yanında, yüksek elastisite modülü, yüksek yorulma direnci, düşük ve yüksek sıcaklıklarda tokluk özellikleri ile dikkat çekmektedir [5, 7, 13].

#### **1.3.2. Dökme alüminyum alaşımları**

Dökme alüminyum alaşımları genellikle kum döküm, pres döküm ve sabit kalıp yöntemleri kullanılarak dökülürler. Bu alaşımlar işlenmeye elverişlidirler ve kaynak edilebilirler. Genel alüminyum döküm alaşımlarının çoğu, alaşımlara düşük erime sıcaklığı, iyi akışkanlık ve iyi dökülebilirlik özelliği veren yeterli miktarda silisyum içermektedir. [2, 4, 8, 9, 12]. Dökme alüminyum ve alaşımları için kullanılan simgeleme şekli dövme alüminyum ve alaşımlarının simgelenmesine benzer. Dört rakamlı simgelemede tek fark dördüncü rakamın üçüncü rakamdan bir nokta ile ayrılmasıdır. Tablo 1.6' da dökme alüminyum ve alaşımlarının simgeleme şekli verilmiştir. 1XX.X için ikinci ve üçüncü rakamlar alüminyumun %99,00'dan daha yüksek olan saflık derecesini belirler. 2XX.X'den 9XX.X'e kadar olan dizilerde ilk rakam ana alaşım elementini belirtir. Bu alaşımların tümünde son rakam 0 ise parça döküm, 1 ise ingot olduğunu belirtir [4, 8].



Tablo 1.6. Dökme alüminyum alaşımlarının standart gösterilişi [2, 4, 7]

Dökme Alüminyum Alaşımları	Alaşım Elementi	Yaşlandırılabilir
1XX.X	Ticari Saflıkta Al	Hayır
2XX.X	Al-Cu	Evet
3XX.X	Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si	Bazıları
4XX.X	Al-Si	Evet
5XX.X	Al- Mg	Hayır
7XX.X	Al-Mg-Zn	Evet
8XX.X	Al-Sn	Evet
9XX.X	Kullanılmayan Seri	-

### 1.3.2.1. Ticari saflıktaki alüminyum

Bu seride % 99,0, 99,5 ve 99,7 saflık içeren alüminyum alaşımları yüksek elektriksel özelliklerinden dolayı bir transistör elemanı olan kollektör bileziği veya iletken çubuğu olarak kullanılmaktadır [2, 4, 7].

### 1.3.2.2. Al-Cu alaşımları

Kullanılan ilk döküm alaşımı %8 bakır içeren bir alaşım çeşididir. Daha sonra bu alaşım grubuna Zn, Si ve Ni ilavesiyle daha yüksek performans sergileyen alaşımlar elde edilmiştir. Yapısında bakır içerdiği için ısıtım işlemi uygulanarak yaşlandırılabilir alaşım grubundadır. İçten yanmalı motorların pistonlarında, uzay mekiği parçaları üretiminde kullanılabilirler [2, 4, 7].

### 1.3.2.3. Al-Cu-Si alaşımları

% 3-5'ten daha fazla bakır içeren Al-Cu-Si alaşımlarına ısıtım işlemi uygulanabilir. Ancak ısıtım işlemi çoğunlukla magnezyumu da içeren alaşımlara uygulanır, çünkü Mg alaşımının ısıtım işlemine verdiği tepkiyi artırır. Alaşım içindeki Si miktarı % 12-13'ü geçerse yapıda birincil silisyum kristalleri bulunur ve eğer bunlar düzgün dağılmışlarsa alaşıma mükemmel aşınma direnci sağlarlar. Otomobillerin motor blokları bu alaşımların önemli kullanım alanlarıdır [1, 9].

#### **1.3.2.4. Al-Si alaşımları**

Silisyumun ana alaşımlayıcı element olduğu alaşım grubudur, silisyumun kazandırdığı yüksek akışkanlıktan dolayı döküm kabiliyeti yüksek olan bir gruptur. Fiziksel ve mekanik özellikler bakımından geniş bir ölçüde performans göstermektedir. İkili Al-Si alaşımları yüksek korozyon direnci, iyi kaynaklanabilirlik ve düşük özgül ağırlık gibi önemli özellikleri bünyesinde barındırır. Mimari alanda dekoratif amaçlı, uçak ve otomobil parçaları olarak ta üretilmektedir [2, 4, 7].

#### **1.3.2.5. Al-Mg alaşımları**

Al-Mg alaşımları mükemmel korozyon direnci, iyi işlenebilirlik ve anodik kaplama yapıldığında çekici bir görünüme sahiptir. Al-Mg döküm alaşımları; Al-Si döküm alaşımlarıyla kıyaslandığında, üretiminde yolluk ve besleyicinin yeri ve boyutlarına biraz daha dikkat edilmelidir. Eriyik halde yapısında barındırdığı magnezyumdan dolayı yüksek oksitlenme eğiliminde olduğundan kontrollü bir ergitme ve dökme pratiği gerekmektedir [2, 4, 7].

#### **1.3.2.6. Al-Zn alaşımları**

Geçmişte kullanılan birçok Al-Zn alaşımı bugün pek kullanılmamaktadır. Al-Zn-Mg alaşımları döküm sonrası geçen kısa süre içinde oda sıcaklığında yaşlanmaya uğrar. Çökelme sertleşmesi olur. Kaliteli bir döküm yapabilmek için iyi soğutma ve alaşımı dengeli besleme için ise dikkatli yolluk tasarımı yapılmalıdır. Bu alaşımların kokil dökümleri çok daha zordur çünkü sıcak çatlama olabilir [2, 4, 7].

#### **1.3.2.7. Al-Zn-Mg alaşımları**

Bu alaşımlar, dökümden sonra oda sıcaklığında 20-30 gün doğal yaşlandırıldıklarında maksimum dayanımlarını kazanırlar. Bu dayanım arttırıcı işlem fırında yapılan yaşlandırma (yapay yaşlandırma) işlemi ile hızlandırılabilir. Diğer alaşımlarda (Al-Cu, Al-Si-Mg) gerekli olan yüksek sıcaklıktaki çözeltiye alma ısıl işlemi ve şiddetli su verme çoğu Al-Zn-Mg döküm alaşımlarında optimum özellikler için gerekli değildir. Al-Zn-Mg alaşımlarının dökülebilirliği zayıftır, fakat bazı gerilmeli korozyon şüphesine rağmen genelde korozyon dirençleri iyidir [9, 10].

### 1.3.2.8. Al-Sn alaşımları

Yük taşıma kapasiteleri ve yorulma dayanımları yüksektir. İçten yanmalı motorlarda yağlama yağının yaptığı aşındırıcı etkiye karşı dayanıklılık yatak malzemelerinde çok önemlidir ve bu açıdan bu alaşımlar diğer bütün metallere göre üstündürler [2, 4, 7, 10].

### 1.4. AA7075-T6 Alaşımının Özellikleri

AA7075 alüminyum alaşımı, hafif olması ve T6 ısıl işlem şartlarında yüksek dayanım özellikler sağlaması nedeniyle uçak, uzay endüstrisinde ve otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan bir yapısal malzemedir [10, 17, 18].

Alüminyum alaşımlarının mukavemetini artırılması amacıyla yapılan ısıl işlemler; çözeltiyeye alma, fazların özölmesi (katı çözeltinin oluşturulması), su verme; aşırı doymuş yapının oluşturulması, yaşlanma; çözünen atomların oda sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıklarda öknelmesi (öknelme sertleşmesi) olmak üzere üç basamaktan oluşur. öknelme sertleşmesi işlemi genel olarak kullanım sıcaklığında, termodinamik denge halinde en az iki fazlı yapıdayken, hızlı soğutmak sureti ile denge yapısı fazların oluşumuna fırsat verilmeyerek, tek fazlı yarı kararlı (aşırı doymuş katı eriyik) yapıya dönüştürülebilen alaşımlara uygulanabilir. AA7075 alüminyum alaşımları Al-Zn-Mg-Cu ihtiva etmesi sebebiyle farklı ısıl işlemlere maruz bırakılarak mekanik özellikleri iyileştirilerek ticari olarak kullanıma sunulmuştur [19, 20].

AA7075 alüminyum alaşımı ilk olarak 1943 yılında geliştirilmiştir. Diğer 7XXX serisi alaşımlarında olduğu gibi dayanımı öknelme sertleşmesi ısıl işlemi ile arttırılır. Genel olarak levha şeklinde üretilir. Kullanım alanının yaygınlaşması üzerine dövme, ekstrüzyon ve kalın levha şeklinde üretimi de yaygınlaşmıştır [10].

7XXX serisinin bu üstün üyesinin başarılı gelişimi, bu alaşımdan yapılan levhanın gerilim, korozyon, çatlama direncini büyük ölçüde iyileştiren kromun faydalı etkisi ile mümkün hale getirilmiştir. Tablo 1.7'de AA7075 kalite alüminyumun kimyasal bileşimi verilmiştir [20].

Tablo 1.7. AA7075 kalite alüminyumun kimyasal bileşimi (% ağırlık) [20]

<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Mn</b>	<b>Mg</b>	<b>Cr</b>	<b>Zn</b>	<b>Ti</b>
0,0567	0,2763	1,4024	0,0108	2.3800	0,2009	6,0294	0,0778
<b>B</b>	<b>Na</b>	<b>Ca</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>I</b>	<b>Sn</b>	<b>Co</b>
0,0007	0.0018	0,0052	0,0027	0,0015	0,0002	0,00023	0,00035
<b>V</b>	<b>Sb</b>	<b>Sr</b>	<b>Be</b>	<b>Hg</b>	<b>Zr</b>	<b>Bi</b>	<b>Al</b>
0,0013	0,0007	0,00001	0,00072	0,00056	0.00078	0,0002	89,5

Özellikle dayanım/ağırlık oranı, yüksek dayanım özellikleri ve tokluk sayesinde taşıma endüstrisinde yoğun bir kullanımı vardır. Fakat kaynak performansları kötüdür [19]. AA7075 alüminyum alaşımının yüksek bir dayanım modifikasyonu 1951 'de geliştirilmiştir. Bu tip, yüksek miktarda Zn, Mg ve Cu içermektedir. Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarından, 7XXX serisine ait, ticari AA7075 alüminyum alaşımı uçaklarda yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu alaşım % 5-6 Zn, % 2-3 Mg, yaklaşık olarak % 1,5Cu ve az miktarda Cr, Mn, Ti, Zr ve Ag içermektedir. Alaşımda Cr, Mn, Ti, Zr ve Ag kristalleşme davranışını kontrol etmek ve çökeltileri modifiye etmek için kullanılan elementlerdir [9-11].

Tablo 1.8. AA7075'in fiziksel özellikleri [10]

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

T6 yapay yaşlandırma işlemindeki amaç; AA7075 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerini arttırmaktır. Plaka ve sac gibi şekillerde üretilen AA7075 alüminyum alaşımlarına, alaşım elementlerinin düşük oranlarda katılması yoğunluğunun çok az arttırmasına karşılık olarak, mekanik özellikleri ile dökülebilirlik özeliğinde önemli artışlar gözlenmektedir. Yüksek mukavemet ile ortalama tokluk ve en önemli özelliklerinden biri olan hafifliği nedeniyle uzay ve havacılık sektöründe yoğun olarak kullanılmaktadır. AA7075'in fiziksel özellikleri Tablo 1.8'de detaylı şekilde verilmiştir [10].

AA7075 alüminyum alaşımlarına yaşlandırma ile istenilen özelliklere sahip malzeme elde edilmesi temel amaçtır. T6 işlemi ile sertlik ve çekme dayanımının en yüksek olduğu değerler elde edilir. Bu nedenle, AA7075 alüminyum alaşımlarına uygulanan yeniden çözeltiye alma ve yeniden sertleştirme ısıl işlemi ile mekanik özelliklerinde azalma olmadan korozyon dirençlerinin artırılması sağlanmaktadır [11].

## **1.5. Alüminyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları**

Alüminyum ve alaşımları; otomotiv, havacılık, mimari, ambalajlama ve elektrik-elektronik endüstrilerinde yaygın şekilde yapısal olarak demir dışı tercih edilen metallere dendir.

### **1.5.1. Otomotiv endüstrisinde alüminyum**

Alüminyum alaşımları, hafif olmaları, iyi ısıl ve elektrik iletkenlikleri, artırılabilen mukavemet özellikleri ve korozyona karşı dirençleri nedeniyle mühendis ve tasarımcılar için günümüzde önemli bir malzeme konumundadır [1, 4, 6, 21].

Alüminyum, çelik ve demire göre yaklaşık üç kat daha hafiftir. Otomobil toplam ağırlığındaki her %10'luk azalma %5-10 oranında yakıt tasarrufu sağlamaktadır. 1400 kg ağırlığındaki bir taşıtta geniş kapsamda alüminyum kullanımı taşıtın ağırlığında 300 kg azalmaya neden olmakta, taşıtın toplam ağırlığında %20'lik bir azalma sağlanmaktadır. Bir araç için kullanılan her 1 kg çeliğin 500 gr alüminyumla yer değiştirmesi aracın tüm kullanım ömrü için toplam 10 kg daha az emisyonu sebep olacaktır [1, 4, 6].

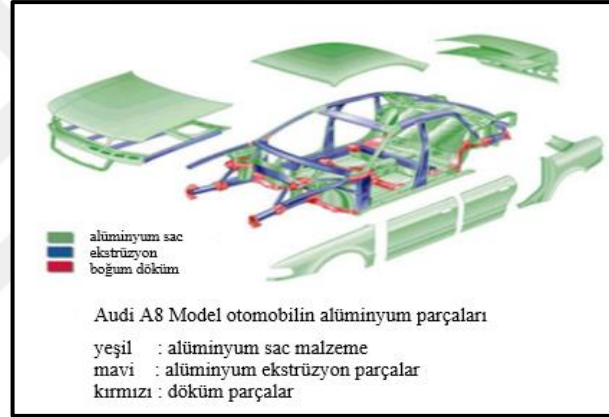
Son yıllarda otomotiv piyasasında çelik jant denilen gösterişli, parlak, boya ve bakım gerektirmeyen hafif alaşımlı jantlar literatürde AlSi7Mg, ticari olarak A356 alaşımı olarak bilinen ve otomotiv endüstrisinde yaygın kullanım alanı bulan Alüminyum–Silisyum–Magnezyum alaşımlarıdır [4, 22].

Güvenlikten ödün vermeden ve konfordan vazgeçmeden az yakıt tüketen otomobiller için hafif, fakat mukavemeti yüksek alaşımların geliştirilmesi, otomobil üreticilerinin önemli hedefleri arasında yer almaktadır. Şekil 1.2'de bu amaçla üretilmiş Audi A8 aracının iskelet fotoğrafları verilmiştir [4, 23].



Şekil 1.2. Audi A8 aracının alüminyum iskeleti [4, 23]

Ağırlıklı olarak alüminyum parçaların kullanıldığı Audi A8 modelindeki alüminyum parçaları ve üretim yöntemleri Şekil 1.3'te ve Mercedes S serisinde kullanılan alüminyum parçalar Şekil 1.4'te gösterilmektedir [6].

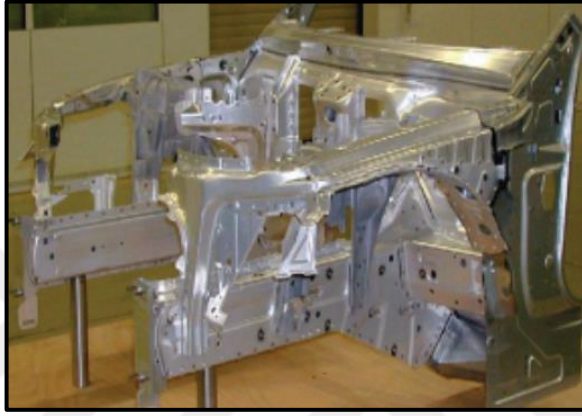


Şekil 1.3. Audi A8 modelindeki alüminyum parçaları ve üretim yöntemleri [6]



Şekil 1.4. Mercedes S serisinde kullanılan alüminyum parçalar [6]

Alüminyum endüstrisi, otomotiv sektörünün gelecekteki gelişimini hedef almıştır. Otomobil iskeletlerinde çelik yerine alüminyum kullanılarak ağırlık %50 oranında azaltılabilmektedir. Özellikle levha ürünü malzemelerin kullanılarak karmaşık geometrilere sahip parçaların, pres operasyonlarıyla imalatında, alüminyumun düşük akma mukavemetinden yararlanılarak parça imalatı daha az enerji harcanarak yapılabilmektedir. Şekil 1.5'te Audi A3 örneğinde olduğu gibi aracın motor bloğunu barındıran ön tarafı bu tip bir imalat metodunun ürünüdür [6].



Şekil 1.5. Audi A3 levhadan üretilmiş ön iskelet [6]

İşlenmiş olan AA2024 alüminyum alaşımı genellikle hafiflik ve mükemmel spesifik dayanımı sayesinde otomotiv ve havacılık endüstrisinin en geniş alanında kullanılmasını sağlayan özelliklerindedir [21, 24].

### 1.5.2. Havacılık sektöründe alüminyum

2124-T851 alüminyum alaşımı yüksek spesifik statik dayanımı sayesinde havacılık sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bilyalı dövülmüş alüminyum alaşımlarının mikro-setlikleri ve kalıntı gerilmeleri sebebiyle kullanıldığı birçok araştırmada ortaya konmuştur [25]. Alüminyum alaşımlarından özellikle 7XXX serisi; yüksek mukavemet özelliği, özel dayanım değerleri ve yorulma dayanımı sayesinde otomotiv endüstrisiyle beraber uçak endüstrisinde de geniş olarak kullanılmaktadır [15, 26]. Özellikle hava araçlarında kullanılan metalik malzemelerin yorulma ömürlerinin iyileştirilmesinde kullanılan bilyalı dövme işlemi alüminyum, titanyum ve çelik malzemeler için de kullanılmaktadır [21, 27].

### 1.5.3. Mimari sektöründe alüminyum

Alüminyum; binaların çatı ve cephe kaplamalarında, kapı ve pencerelerinde, merdivenlerde, çatı iskeletinde, inşaat iskelelerinde ve sera yapımında büyük miktarda kullanılır [4]. Şekil 1.6'de örnek bir alüminyum konstrüksiyon görünümü verilmiştir [28].



Şekil 1.6. Alüminyum konstrüksiyon görünümü [28]

### 1.5.4. Ambalajlama sektöründe alüminyum

Alüminyum, en kullanışlı ambalaj malzemelerinden birisidir. Alüminyum, konteyner imalatından ilaç kutularına kadar çok çeşitli ambalaj uygulamalarına mükemmel cevap verir. Banyoda diş macunu tüpünden, marketlerdeki sayısız ürünler (çikolata vb.) mutfakta folyoya sarılı fırın yemekleri ve buzdolabındaki soğuk meşrubatlara kadar, alüminyum pek çok ürünü sarar ve korur. Alüminyumun homojen yapısı, ince folyo (alüminyum kâğıt) şeklinde üretilebilmesi, hava geçirmezliği ve kolay şekillenebilmesi onu ideal bir ambalaj malzemesi yapar. Alüminyum folyo, hava ve mor-ötesi ışınları geçirmediğinden, gıdaları doğal renk ve tatları ile birlikte korur [4, 20].

### 1.5.5. Elektrik-Elektronikte alüminyum

Elektrik iletiminde motor, jeneratör, transformatör gibi cihazların muhtelif kısımlarında alüminyum kullanılmaktadır. Alüminyum iyi bir iletken metaldir. Alüminyum yoğun olarak enerji nakil hatlarında kullanılmaktadır. Çelik özlü alüminyum iletkenler, yüksek voltajlı elektrik nakil hatlarında tercih edilen tek



malzeme olmuştur. Alüminyum, yeraltı kablolarında, elektrik borularında ve motor bobin sarımında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Elektronikte, alüminyum kullanım yerleri arasında, şaseler, transistor soğutucuları, data kayıt diskleri ve elektronik cihazların kasaları bulunmaktadır [1, 4].



## 2. BİLYALI DÖVME

### 2.1. Bilyalı Dövme İşlemi ve Amaçları

Bilyalı dövme, küresel formdaki sert medyaların belirli işlem parametreleri ile (çarpma açısı, basınç, püskürtme mesafesi, süre) hedef malzeme yüzeyinin dövülmesi sonucunda, malzeme yüzey ve yüzey altı bölgesinde kalıntı basma gerilmelerinin oluşturulması temeline dayanmaktadır [29, 30]. Bilyalar malzeme yüzeyini adeta küçük çekiç darbeleriyle döverek malzeme yüzeyinde plastik deformasyona neden olur. Bu işlem sonucunda meydana gelen kalıntı basma gerilmeleri malzemenin yorulma dayanımını arttırmaktadır [27, 31-33]. Bilyalı dövme işlemi malzemelerin yorulma dayanımını arttırmasının yanı sıra, malzemede porozite kaynaklı istenmeyen gaz ve likitlerin yüzeye nüfuz etmesini önlemeye yönelik avantaj sağlamaktadır [34, 35].

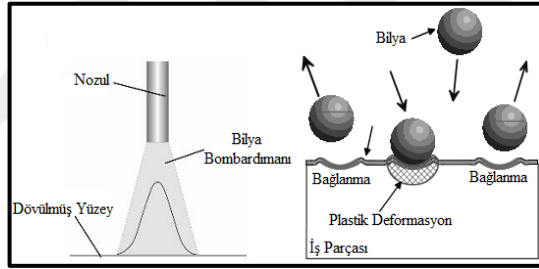
Bilyalı dövmenin, yorulma dayanımını arttırdığı 1928-1929 yılları arasında General Motor' un Buick Motor bölümündeki kumlama işlemleri esnasında tesadüf eseri ortaya çıkmıştır. Supap yayları kumlama ile temizlenirken bazı iri taneli medyalarla yapılan işlemin malzemenin yorulma ömrünü arttırdığı fark edilmiştir. II. Dünya Savaşı sırasında tank palet pimlerini bilyalı dövme uygulanarak, paletlerin yorulma ömürlerinde belirgin artışlar sağlanmıştır. Maliyetinin azlığı bununla birlikte malzeme ömrüne yaptığı pozitif etki bilyalı dövme işleminin gelişmesi için öncelikli sebeplerdir [36]. Şekil 2.1'de bilyalı dövme işleminde kullanılan metal bilyalar görülmektedir [37].



Şekil 2.1. Bilyalı dövme işleminin ana maddesi “Bilya” [37]

Bilyalı dövmenin; yüzey pürüzlülüğü, mikro sertlik profilleri, mikro yapı değişikliklerine, kalıntı gerilmesine etki ederek yorulma direncini arttırdığı öne sürülmektedir [33, 38, 39]. Bununla beraber bilyalı dövme; basma kalıntı gerilmeler oluşturur, yüzey sertliğini artırarak mekanik özellikleri iyileştirir, böylece aşınma direncini arttırmış olur [32, 33, 39-41].

Bilyalı dövme işleminde amaç, metallerin yorulmaya ve gerilmeli korozyona karşı dayanımlarını arttırmaktır. Etki eden bilya darbeleri ile metal yüzeyinde tümsek ve çukurcuklar meydana getirilmektedir. Şekil 2.2’de ve Şekil 2.3’te bilyalı dövme işlemi temsili olarak gösterilmiştir. Bu işlemde kullanılan bilya tipleri çelik, dökme demir, seramik veya paslanmaz çeliktir. Hedef malzemenin kullanım şartlarına bağlı olarak bilya malzemesi seçilebilmektedir. Bilya hızlarının, dövme işlemi sırasında hedef malzeme yüzeyinde kalıcı bir plastik şekil değişikliğine sebebiyet verecek kadar yüksek olmaması gerekmektedir [42, 43].



Şekil 2.2. Bilyalı dövme işleminin temsili gösterimi [42]



Şekil 2.3. Bilyalı dövme işlemi [43]

Bilyalı dövme işleminden sonra deforme olan bölgeler genişlemektedir. Bu genişleme deforme olan bölgeler tarafından engellenmeye çalışılır. Bu sebeple, yüzeyde ve yüzeyin hemen alt kısmında bilyalı dövmenin etkilediği bölgelere kadar kalıntı basma

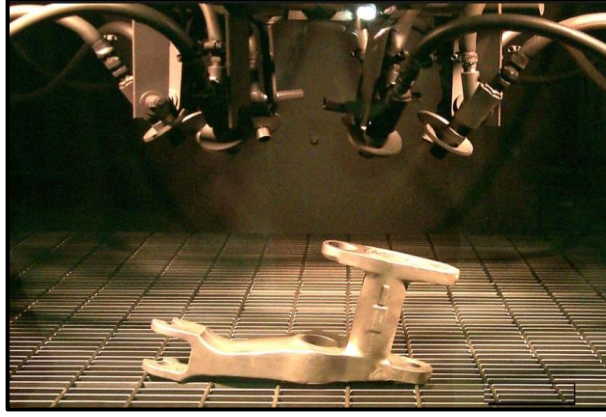
gerilmesi; malzemenin iç kesimlerinde genişlemeyi önlemeye çalışan elastik deformasyona maruz kalmış bölgelerde çekme gerilmesi meydana gelir. Yüzeyde çukur oluşmasına sebep olan çekme gerilmesi, yüzeyin hemen altında metali eski haline getirmeye çalışan bası gerilmesi tarafından engellenmeye çalışılır. Bu yüzden yüzeyin hemen alt kısmında metal yüksek basma gerilmesi ile yüklenir. Basma gerilmeleri akma dayanım değerinin üzerine çıkamaz. Elde edilen deneysel verilere göre; bilyalı dövme işlemi sonrası ortaya çıkan kalıntı basma gerilmesi yaklaşık olarak minimum akma dayanımının yarısı, maksimum o metalin akma dayanımı mertebelerindedir [34, 39, 44].

Bilyalı dövme işleminin malzemenin ömrünü uzatmasının temel sebebi kalıntı bası gerilmelerinin, çatlak başlangıcı ve ilerlemesini durdurmasıdır. Bunun yanında yüzeyden başlayan gerilmeli korozyonu engellemesinden kaynaklanmaktadır [42].

Bilyalı dövme sonucunda özellikle mikro sertliğin artması ve kalıntı gerilmesi profillerinin oluşması; sertleştirilmiş yüzey tabakasının ve dislokasyon yoğunluğunun artmasına sebebiyet vermektedir. Bilyalı dövme işlemleri sonrasında yüzey özelliklerinden; yüzey tokluğunu, yüzeydeki bozulmaları ve mikro-çatlakların yayılmasını olumlu yönde etkiler [45]. Malzemeye yorulma çatlaklarının ve basma kalıntı gerilmelerinin iyileştirilmesi bilyalı dövme işlemleriyle kazandırılabilir [25].

Hava taşıtlarının; motor ve gövde aksamalarında, uçak iniş takımlarında, türbin ve türbin kanatlarda, pervanelerde bilyalı dövme uygulaması sıklıkla karşılaşılır. Otomotiv sektöründe ise; dişlilerde, yük altında çalışan yaylarda, kam milleri, krank milleri, biyel kolları vb. elemanların yorulma dayanımının iyileştirilmesi için bilyalı dövme işlemi önemli yer tutar. Bilyalı dövme işlemi temelde kumlamadan farklı amaçla yapılmakla birlikte sonuç olarak bu yöntem ile malzeme yüzeyinin temizlenmesi de sağlanır [29, 30, 34, 46].

Şekil 2.4'de kritik helikopter rotor parçası, döner tabla üzerinde 8 adet nozul ile bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuştur [47]. Şekil 2.5'de ise havacılıkta kullanılmış bir iniş takımı dişlisinin bilyalı dövme işlemi belirtilmiştir [48].

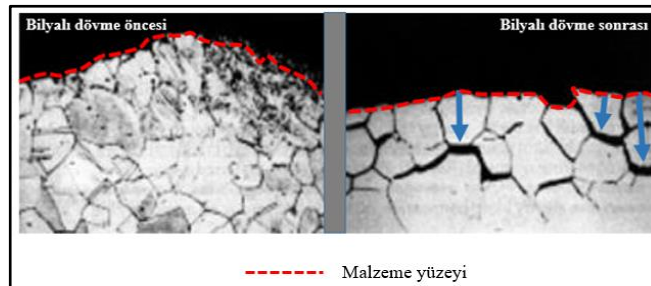


Şekil 2.4. Helikopter parçası [47]



Şekil 2.5. Havacılıkta kullanılan iniş takımı dişlisi [48]

Malzemelerde; mikro yapı ve yüzey özelliklerine bağlı olarak yorulma davranışları, aşınma, korozyon gibi özellikler bilyalı dövme işlemi ile iyileştirme amaçlanmaktadır [30, 33]. Şekil 2.6’da bir yüzeyin, bilyalı dövülmeden önce ve bilyalı dövüldükten sonraki mikro yapı görüntüsü belirtilmiştir [30].

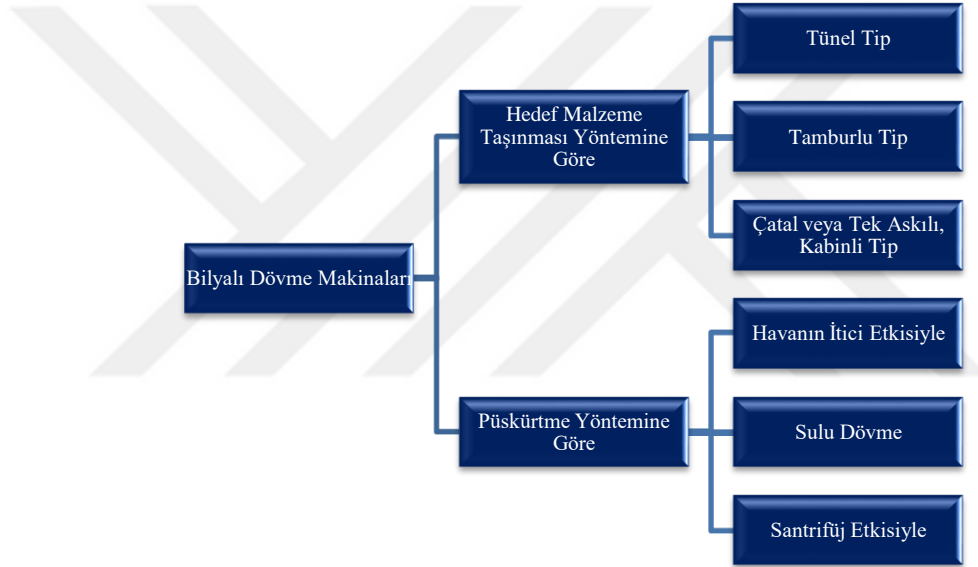


Şekil 2.6. Bilyalı dövme işlemi sonrası mikro yapı değişikliği [30]

## 2.2. Bilyalı Dövme Makinaları

Bilyalı dövme makinaları temelde iki kategoriden oluşmaktadır [44]. Gerçekleştirilen işlemlerin temelinde bilyaların tahrik edilmesi için; basınçlı havanın tahrikleyici olduğu sistemler veya bir türbin vasıtasıyla oluşturulan santrifüj etkisinin tahrikleyici olduğu sistemler kullanılmakta olup farklı tür ve prensibi olan makinalar da bulunmaktadır. Basınçlı havanın itici etkisiyle çalışan bilyalı dövme makinaları da abrasiflerin pozitif veya negatif basınç etkisiyle hızlandırılmasına göre iki gruba ayrılır. [30]. Tablo 2.1’de farklı türlerdeki bilyalı dövme makinaları belirtilmiştir [30].

Tablo 2.1. Bilyalı dövme makinalarının sınıflandırılması [30]



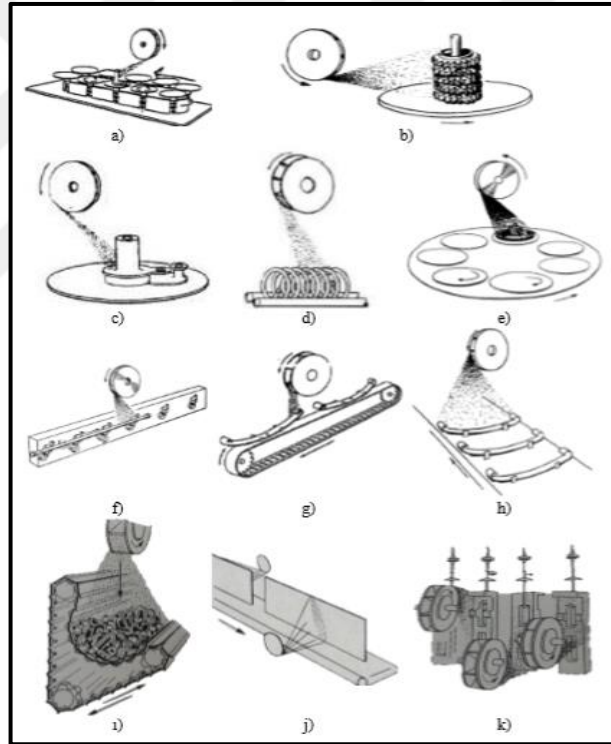
Şekil 2.7’de otomatik olarak kullanılan bilyalı dövme makinası görülmektedir. Bu makinalar özellikle endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır [49].



Şekil 2.7. Otomatik bilyalı dövme makinası [49]

Az sayıda işlem için ekonomik olarak avantajlı olmasıyla birlikte, etkili dövme şiddetlerinin uygulanması, uzun bir nozul sayesinde dişli gibi karmaşık geometriye sahip makine parçası veya makine elemanlarının kolaylıkla dövülebilmesi hava püskürtmeli bilyalı dövme makinalarını klasik bilyalı dövme makinalarından daha üstün kılmaktadır [44].

Türbin vasıtalı santrifüj etkisiyle çalışan bir bilyalı dövme makinalarda; bilya kendi ağırlığıyla veya düşük bir hızda üzerinde kanatçıklar veya bıçaklar olan ve dönen çarkın merkezine bırakılır. Çark üzerindeki kontrol üniteleri yardımıyla bilyalar bıçaklara doğru yönlendirilir ve böylece merkezkaç kuvvetinin etkisi ile dönen çarkın merkezinden dışarı doğru bilyalar fırlatılmış olurlar. İstenen akış yolu bıçaklarda yapılan açısal değişikliklerle elde edilir [36].

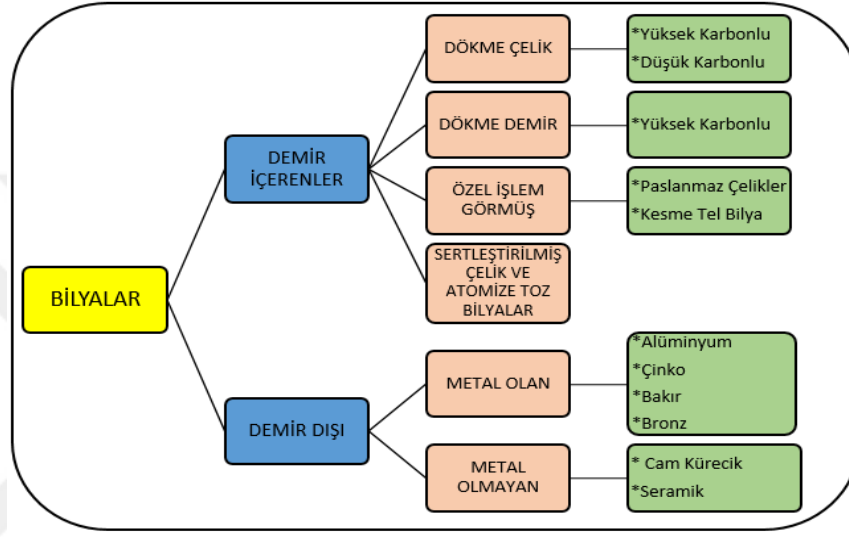


Şekil 2.8. Bilyalı dövme makinalarında kullanılan sistemler [30]

Şekil 2.8' de santrifüj etkisiyle gerçekleştirilen farklı bilyalı dövme yöntemleri gösterilmiştir. Bu sistemler; a'da düz hatlı sistem, b' de döner tutuculu sistem, c' de aksenal dönüşlü sistem, d' de lineer konveyörlü sistem, e' de dairesel hatlı sistem, f' de radyal dönüşlü sistem, a ve h' de kayış konveyörlü sistem, i ve j' de paletli sistem, k' da askılı sistemdir [30].

### 2.3. Bilyaların Sınıflandırılması

Bilyalı dövme işlemi için kullanılan bilya malzemeleri çelik, dökme demir, dökme çelik, cam, seramik, paslanmaz çelik ve çelik tellerdir. Çelik bilyaların adlandırılmasında S harfi bilyanın malzemesinin çelik olduğunu göstermektedir. Bu değerlerin on binde biri inç cinsinden merteye olarak bilya çaplarını belirtmektedir [44]. Bilya sınıflandırması Şekil 2.9’de verilmiştir.



Şekil 2.9. Bilyaların sınıflandırılması

Bilyalı dövme işlemlerinde kullanılan bilya boyutları ve özellikleri SAE standartları halinde düzenlenmiş olup bu standartlar ve içerikler Şekil 2.10’da verilmiştir [30].

STANDARTLAR	İÇERİKLER
<ul style="list-style-type: none"><li>• SAE J444</li><li>• SAE J827</li><li>• SAE J2175</li><li>• SAE J441</li><li>• SAE J1173</li><li>• SAE J1830</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bilya ve Grit Boyutları</li><li>• Yüksek Karbonlu Dökme Çelik</li><li>• Düşük Karbonlu Dökme Çelik</li><li>• Kesme Tel</li><li>• Cam Küre</li><li>• Seramik</li></ul>

Şekil 2.10. Bilyalarda SAE standartları ve içerikleri [30]

Uygulamalardaki bilya türlerinin sınıflandırılmasında bilya üreticileri, uluslararası kurumlar, kuruluşlar ve son kullanıcılar tarafından hazırlanan standartlar kullanılmaktadır. Society of Automotive Engineers “SAE” tarafından hazırlanan standartlar en yaygın olanlarıdır. SAE, “J” genel bilyalı dövme uygulamaları için



olduklarını belirlerken, Aerospace Materials Specification “AMS” havacılık sanayisi için hazırladıkları standartlardır [30]. Birçok uygulamada kullanılan bilyaların standartları ve bu bilyalara ait sertlik değerleri Tablo 2.2’de belirtilmiştir [30, 44].

Tablo 2.2. Bilya standartları ve sertlik değerleri [30, 44]

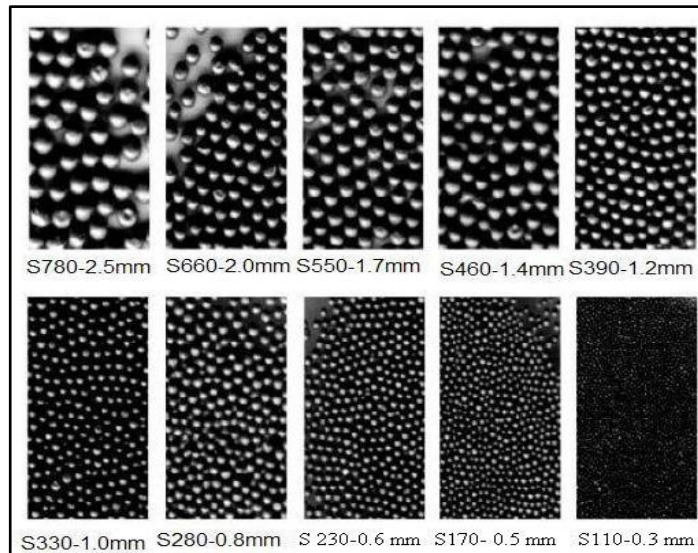
Bilya Tipi	Standart	Sertlik
Çelik Bilya	AMS 2431/1 veya AMS 2431/2	45-52 HRC veya 55-62 HRC
Tel Kesme	AMS 2431/3 veya AMS 2431/8	45-52 HRC veya 55-62 HRC
Cam Bilya	AMS 2431/6	48-52 HRC
Seramik Bilya	AMS 2431/7	58-63 HRC

Şekil 2.11’de piyasada kolayca temin edilen ve hedef malzemenin çalışma şartlarına bağlı olarak seçilebilen çeşitli türdeki malzemeden örnekler gösterilmiştir [50-52].



Şekil 2.11. Bilya çeşitleri; a) Seramik Bilya, b) Çelik Bilya, c) Cam Bilya [50-52]

Şekil 2.12’de çelik bilyaların büyüklükleri ve standart “S” kodları belirtilmiştir [44].



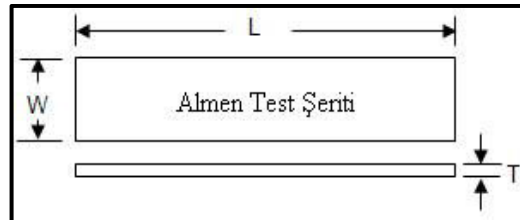
Şekil 2.12. Çelik bilya boyutları ve “S” kodları [44]

## 2.4. Bilyalı Dövme Parametreleri

Bilyanın boyutu, sertliği, bilyadaki kırılma hasarları ve bilya kalitesi bilya özelliklerinden kaynaklanan önemli parametrelerdir. Bunun yanında bilyanın hızı, çarpma açısı, dövme şiddeti, doyurma (coverage) oranı, dövme süresi, nozul çapı, nozul-parça arasındaki uzaklık, akış hızı, hedef malzeme geometrisi, hedef malzeme sertliği, deformasyon davranışı ve bilyalı dövme uygulanan ortamdaki sıcaklık diğer önemli parametrelerdir [30, 53].

Bilya boyutu yüzey pürüzlülüğü, nüfuziyet derinliği, yüzey deformasyon miktarı, dövme şiddeti ve hedef malzemenin geometrisi ile ilişkilidir. Bilya boyutlarının artması ile dövme şiddeti ve nüfuziyet derinliği artarken, yüzey doyurma oranı azalabilir. Bilya sertliğindeki azalma ile bilya hasarına bağlı olarak maliyet artışı gerçekleşir. Gönderilen bilyalar ne kadar sert olursa, bilya yüzeyinde o kadar az şekil değişimi gerçekleşir. Çok sert ve kırılğan malzemeler yerine sert ve tok malzemeler tercih edilmelidir [30, 53].

Bilyalı dövme işlemindeki parametreler içinde en önemlisi bilya seçimidir. Bilya seçimi esnasında özellikle bilya malzemesinin türü ve özellikleri dikkate alınmalıdır. Yüksek dövme şiddeti istenilen uygulamalarda (Almen C ve Almen A) kesme tel bilya veya çelik bilyalar, daha düşük dövme şiddeti (Almen N) uygulamaları için ise cam ve seramik bilyalar tercih edilebilir. Çelik bilyalar daha yaygın olarak özellikle santrifüj dövme makinalarında kullanılırlar. Kesme tel bilyaların karbon ve paslanmaz çelik türleri olup, paslanmaz çelik veya demir dışı malzemeler dövüleceği uygulamalarda paslanmaz çelik kesme tel, cam ve seramik bilyalar kullanılarak kirlenmenin önüne geçilmiş olunur [30, 36].



Şekil 2.13. Almen test şeridi ve boyutları [44]

Almen bantları, bilyalı dövme işlemi yapılmadan önce, işlem sonrası elde edilmek istenen almen şiddetinin belirlenmesi için kullanılırlar. Şekil 2.13'te almen bandının boyutları gösterilmektedir. Bilyalı dövme işlemini standart bir şekilde ve uygun kalitede sağlamak için "dövme şiddeti" büyüklüğü geliştirilmiştir. Hedef malzemenin dövülmesi istenen dövme şiddetinin belirlenmesi amacıyla almen şeritleri kullanılmaktadır. Almen şeritleri standartlaştırılmış olup AISI1070 orta karbonlu çelikten üretilmiştir. Bu Almen şeritlerinin sertlikleri 45 HRC mertebesindedir. Tablo 2.3'te standartlaştırılmış almen şeritlerinin özellikleri görülmektedir [31, 44].

Tablo 2.3. Standartlaştırılmış almen bantlarının özellikleri [31, 44]

Şerit Adı	Standart	Düzlemsellik	Sertlik	Kalınlık
A	SAE J442	+/-0,0025 mm	44-50 HRC	1,29 mm
C	AMS-S 13165	+/-0,0038 mm	44-50 HRC	2,39 mm
N	SAE AMS 2432	+/-0,013 mm	45-58 HRC	0,76 mm

Almen şiddeti bulunurken şeritler rijit bloğa bağlanır ve tek bir yüzey homojen olarak bilyalı dövme işlemine tabi tutulur. Dövme sonrası şerit geometrisi (yüzeyde oluşan kalıntı basma gerilmesine bağlı olarak) dövülen yüzeye doğru dış bükey olacak şekilde yay parçası şeklini alır. Oluşan eğriliğin sehim miktarına eğrilik yüksekliği denir. Bu yükseklik bir komperatör vasıtasıyla ölçülerek almen şiddeti belirlenir [44].

Şekil 2.14'te bilyalı dövme sonrasındaki almen şeritlerinde meydana gelen eğrilik yüksekliği görülmektedir [30, 44]. Ayrıca Şekil 2.15'te bu eğrilik yüksekliğini belirleyen almen mastarı görülmektedir [30, 44].

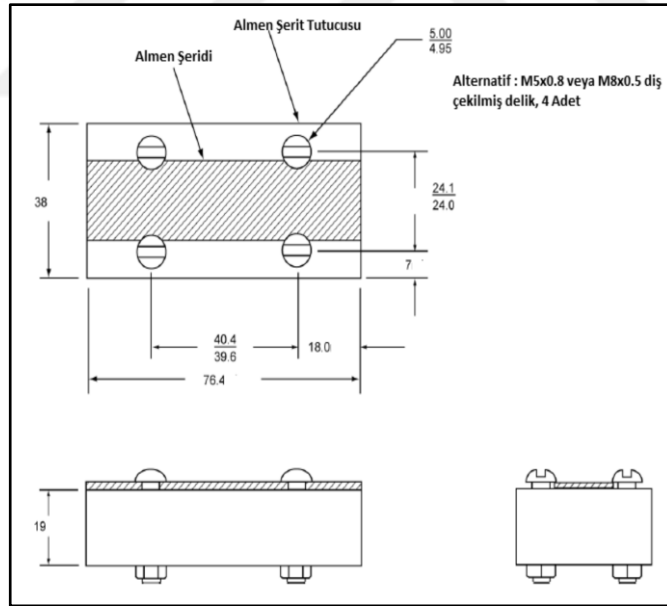


Şekil 2.14. Almen şeritlerindeki eğrilik yüksekliği [30, 44]



Şekil 2.15. Almen mastarı [30, 44]

Dövme şiddetini belirlemek için; eğrilik yayı yüksekliğinin inç biriminde binde biri olan değer olarak isimlendirilir. Örneğin; 10A şiddeti 0,010 inç 'in Almen A tipi test çubuğundaki eğrilik yay yüksekliğinin göstergesidir. Eğrilik yay yüksekliğinin milimetrik değeri de aynı şekilde kullanılmaktadır. Örneğin; 0,28 mm değerindeki eğrilik yay yarıçapına karşılık olarak 0,28 mm A olacak şekilde isimlendirme yapılabilmektedir [30].



Şekil 2.16. Almen test şeridi tutucu elemanı [36]

Almen test şeritlerinin bağlandığı tutucu takımlar da standartlaştırılmıştır. Şekil 2.16'da boyutları belirtilen bir Almen şerit tutucu verilmiştir. Özellikle üstünde durulması gereken doyurma oranı ise dövülen parçanın yüzeyine çarpan bilya sayısı ile ilişkilidir. Parça yüzeyinde birim alan başına bilya çarpma sayısı doyurma oranı olarak belirtilir. Doyurma oranının tespitinde görsel metotlar, Straub yöntemi, Valentine

yöntemi ve X-Ray kırınım metodu kullanılır. Tam veya dolu doyurma anlamı %100'dür. Bu da parça yüzeyinin her birim alanına bilyaların en az bir kez çarpması anlamına gelmektedir [36].



### 3. AŞINMA

Aşınma, malzemelerin birbiriyle temas etmesi ve mekanik etkenler ile yüzeyden küçük parçacıkların ayrıştırılması sonucunda yüzeyde meydana gelen deformasyondur [30, 54]. Mühendislik malzemelerinin aşınmış sayılabilmesi için gerekli bazı şartlar vardır. Bu şartlar, mekanik bir etkenin olması, sürtünmenin (bağlı hareketin olması) yavaş ve devamlı olması, malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi ve istem dışında meydana gelmesidir [30, 54-56]. Şekil 3.1’de bir uçak üzerinde meydana gelen aşınmalar gösterilmiştir [57].



Şekil 3.1. Havacılıkta aşınma [57]

Endüstride, aşınma nedeniyle görülen hasarlar ile pek çok alanda karşılaşmaktadır. Tablo 3.1’de farklı aşınma türlerine bağlı oluşan hasar miktarları verilmiştir [54]. Aşınma geri kazanılamayan bir madde kaybına sebep olmakta ve bu durum zaman geçtikçe ciddi maliyet kayıplarına neden olabilmektedir. Bu yüzden bu kayıpların önlenmesi veya en aza indirilmesi için önleyici tedbirlerin alınması gerekmektedir [30, 54, 58].

Tablo 3.1. Endüstrideki aşınma kaynaklı hasarlar ve oluşma sıklıkları [54]

Hasar	Oluşma Sıklığı
Abrasif Aşınma	% 50
Adhezif Aşınma	% 15
Erozif Aşınma	% 8
Kimyasal Aşınma	% 8
Korozif Aşınma	% 5
Yorulma ve Diğer Aşınmalar	% 14

Aşınma sistemi 5 temel unsurdan oluşmaktadır [58].

- (1) Ana malzeme (aşınan),
- (2) Aşındıran,
- (3) Ara malzeme,
- (4) Hareket,
- (5) Yük

Aşınma, ana cisimin ve karşı cisimin aralarında bir ara malzeme varken ve belirli bir yük altında hareket ettikleri koşullarda gerçekleşir. Ana malzeme; metal, mineral, plastik, kauçuk, ağaç, deri vs. gibi katı cisimler olabilir. Aşındıran karşı malzeme; mineral, plastik, metal, ağaç vs. şeklinde katı olabileceği gibi sıvı veya gazlarla karışım durumunda da olabilir. Ara malzeme katı, sıvı, gaz fazlarından birinde veya bunların karışımı şeklinde olabilir. Hareket kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, darbe gibi özelliklerde olabilir. Yük; gerilmenin az veya çok olmasının yanı sıra sabit, değişken, artan, azalan ve darbeli olabilmektedir [59].

### 3.1. Adhezif Aşınma

Adhezif aşınma, birbirini etkileyen ve birbirlerine göre göreceli olarak hareket eden iki yüzeyin birisinden bir parçacığın koparak diğer yüzeye yapışması sonucunda oluşur [54, 58]. Şekil 3.2’de kam milinde meydana gelen adhezif aşınma fotoğrafı verilmiştir [60].



Şekil 3.2. Adhezif aşınmaya uğramış kam mili [60]



### 3.2. Abrasif Aşınma

Abrasif aşınma yırtılma ve çizilme aşınması olarak da isimlendirilen, sistemde hızlı hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür. Bu aşınma çeşidi; iki veya üç elemanlı olmak üzere iki şekilde irdelenmektedir. İki elemanlı abrasif aşınma, sürtünen elemanların doğrudan birbirleriyle etkileşimleri sonucu meydana gelir ve sert malzemenin yüzeyinden parça kopması ile meydana gelir [54, 55, 61].

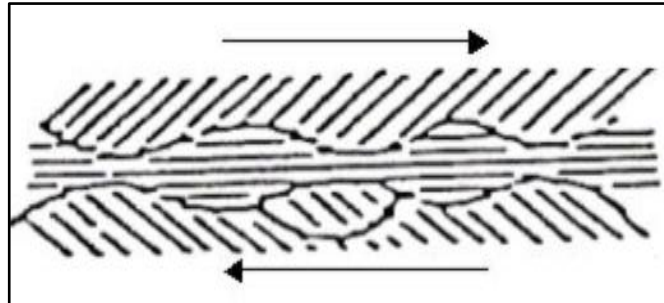
### 3.3. Korozif Aşınma

Korozif aşınma, çalışma ortamıyla parça yüzeyleri arasındaki etkileşim önemli rol oynamaktadır. Korozif aşınma için gerekli şartlar, korozyonun ve sürtünmenin olmasıdır. Korozif aşınmada aşınma olayı iki kademede gerçekleşmektedir:

- Temas halindeki yüzeyler ortamla reaksiyona girerler ve yüzeyde reaksiyon ürünlerinden oluşan bir tabaka meydana gelir.
- Daha sonra, temas noktasında çatlak oluşumu veya abrasif etkilerden dolayı reaksiyon tabakası hasara uğrar [55, 58].

### 3.4. Yorulma Aşınması

Makine parçalarında değişken ve tekrarlı yüklemeler sebebiyle yorulma aşınması meydana gelmektedir. Tekrarlı ve değişken yüklemeler malzeme yüzeyinde mikroçatlaklar meydana getirmektedir. Bu mikroçatlaklar zamanla ilerleyerek, malzemenin yüzeyinde mikro parçaların kopmasına sebep olmaktadır [54, 55, 62]. Şekil 3.3'de yorulma aşınmasının şematik gösterimi verilmiştir [55].

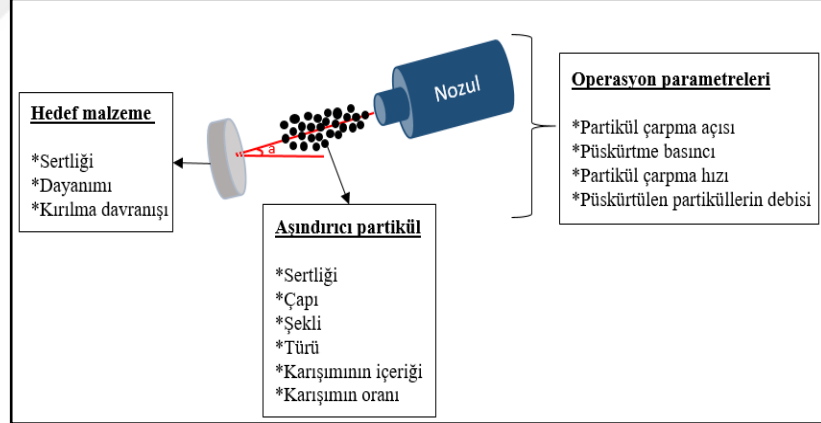


Şekil 3.3. Yorulma aşınması şematik gösterim [55]



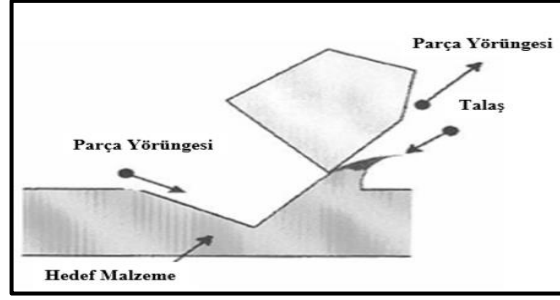
### 3.5. Eroziyonun Aşınma (Katı Partikül Erozyonu)

Hedef malzeme yüzeyine katı partiküllerin belirli bir hız ve tekrarlı olarak çarpması sonucu malzeme yüzeyinde meydana gelen kayıplara katı partikül erozyonu adı verilir. Katı partikül erozyonu yaygın olarak; türbin kanatlarında, valf deliklerinde, termik santrallerde kullanılan rotorların kanatçıklarında, pnömatik taşıma sistemlerinde, boru bağlantıları ile boru dirseklerinde görülmektedir [4, 7, 63-65]. Katı parçacık erozyonu, uzay ve havacılık sistemlerinde önemli bir sorun oluşturmaktadır. Katı partikül erozyonunun yanında, bazen de korozyon ve çarpma erozyonu gibi başka yüzey bozulma türleri görülmektedir [4, 63, 65]. Yüzey pürüzlülüğü, yüzey bozulması, mikroskobik kazıma görünümü ve yapının işlevsel ömründe azalma gibi aşınmanın olumsuz özelliklerine de katı partikül erozyonu öncülük etmektedir. Bu sebeple, katı partikül erozyonu mühendislik uygulamalarında birçok başarısızlıktan sorumludur [66]. Dolayısıyla katı partikül erozyonu önemli bir sorun olarak nitelendirilmektedir. Bu nedenle literatürde farklı mühendislik malzemelerinin katı partikül erozyonu davranışı üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir [4, 58, 62, 64, 66-68].



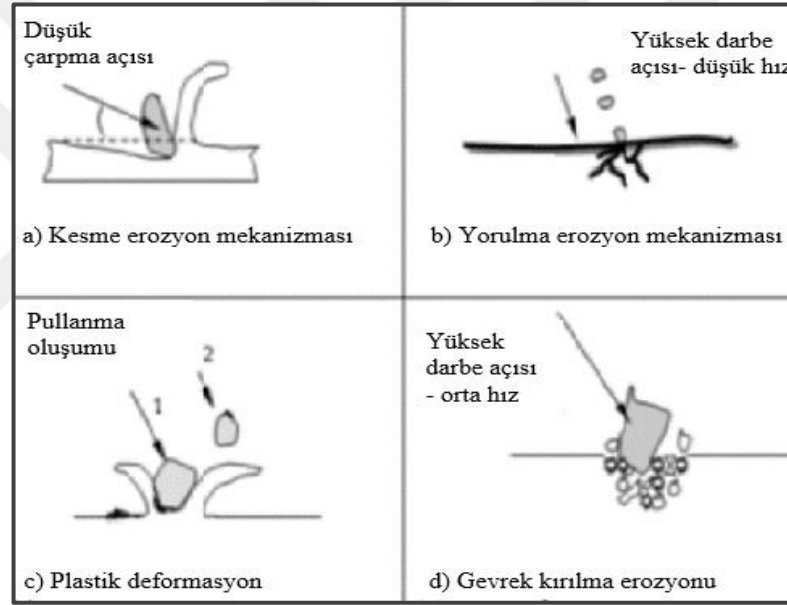
Şekil 3.4. Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler [4]

Katı partikül erozyonu; hedef malzeme özellikleri, operasyon parametreleri ve aşındırıcı partikül özellikleri gibi birçok faktöre bağlı olarak meydana gelmektedir (Şekil 3.4) [4]. Şekil 3.5'te katı partikül erozyonu esnasında gerçekleşen talaş kaldırma mekanizması şematik olarak verilmiştir [7].



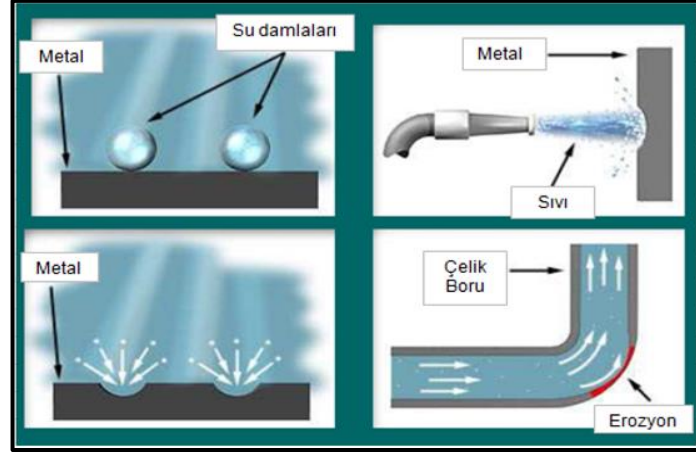
Şekil 3.5. Talaş kaldırma mekanizması [7]

Katı parçacığın çarpma açısı ve şiddeti ile yüzeydeki aşınmanın farklı şekillerde meydana gelmektedir. Şekil 3.6'de eroziv aşınmanın mekanizmaları şematik olarak verilmiştir [69].



Şekil 3.6. Katı partikül erozyonu sonucu oluşan mekanizmalar [69]

Erozif aşınmada; aşındırıcı taneciklerin ve bunları taşıyan akımın fiziksel ve kimyasal özellikleri farklılık göstermektedir. Sadece sıvı ya da gaz akımının aşındırıcı madde özelliği teşkil etmesi sebebiyle bu mekanizmaların tek başına, kombineli ve yüksek sıcaklık uygulamalarında malzemede bıraktıkları hasar türleri de farklılık göstermektedir [7, 55]. Eroziv davranış maksimum erozyonun oluşma açısına bağlı olarak sünek veya gevrek olarak sınıflandırılabilir [65].

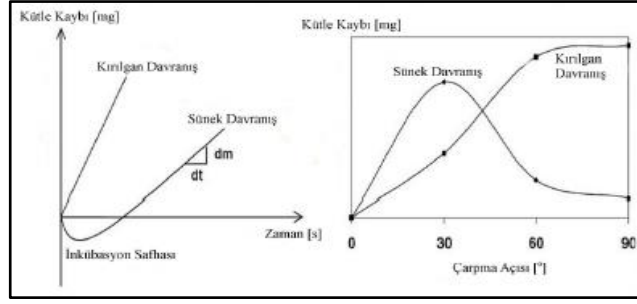


Şekil 3.7. Eroziyon türleri [58]

Patlama sonucu oluşan eroziyon bir gaz akışıyla taşınan veya belirli güçlerce hızlandırılan katı parçacıklar tarafından meydana getirilen bir eroziyon türüdür. Parçacıkların çarpma açıları aşınımı ciddi surette etkiledikleri gibi aşınım mekanizmasını da değiştirebilirler. Akış sonucu oluşan eroziyon katı parçacık taşıyan sıvı akışları tarafından meydana getirilen aşınım da bir eroziyon türüdür. Eroziyon türlerine bazı örnekler Şekil 3.7’de yer verilmiştir [58].

Sıvı çarpmasıyla meydana gelen erozyonda; bir sıvı yeterli momentum ve yeterli frekansta bir yüzeye çarpmaya devam ederse, yüzeyde yorulma sonucu aşınım oluşması beklenir. Bu yüzden yağışlar uçakların polimer radar kubbelerinin aşınmasına sebep olmaktadır [7]. Araştırmacıların çoğu katı partikül eroziyon konusunda çalışmalarda bulunmuş ve özellikle aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye çarpma açısının eroziyon üzerinde önemli etkisinin olduğunu vurgulamışlardır [64].

Partikül erozyonu düşük çarpma açıları gerçekte gerçekleşirse; iki cismin sürtünmesi gibi bir mekanizmaya sahip olmaktadır, çünkü partiküller etkileşim süresince malzeme yüzeyi boyunca bir yol izlemektedirler. Yüksek çarpma açıları; aşınım mekanizması tipik çarpma şeklinde gerçekleşir. Şekil 3.8’de grafiklerde görüldüğü üzere, gevrek malzemelerde maksimum malzeme kaybı yüksek çarpma açıları ortaya çıkmaktadır. Sünek malzemelerdeki maksimum malzeme kaybı düşük çarpma açıları ( $\sim 30^\circ$ ) meydana gelmektedir [4, 58].

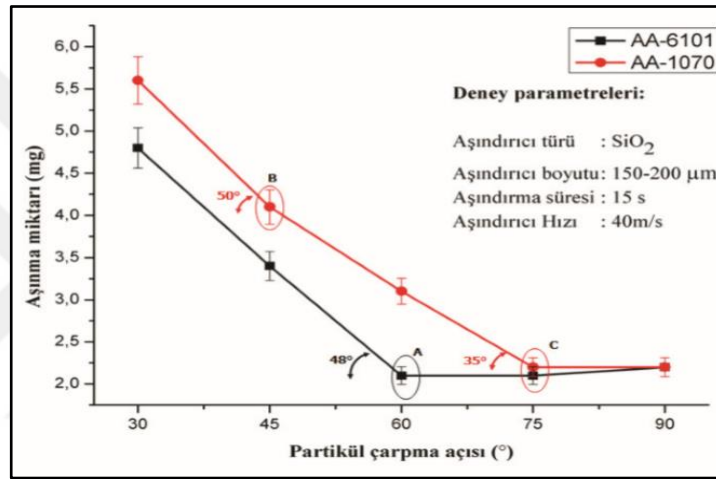


Şekil 3.8. Sünek ve gevrek malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri [4, 58]

Katı partikül erozyonu esnasında; kütle kaybı çarpma açısına bağlı olmak üzere sünek ve kırılgen malzemeler farklı özellikler gösterir. Sünek malzemeler düşük çarpma açılarında ( $15^{\circ}$ – $30^{\circ}$ ), kırılgen malzemeler dik çarpma açılarında ( $90^{\circ}$ ), fiber takviyeli kompozitler, ( $45^{\circ}$ – $60^{\circ}$ ) arasında maksimum erozyon oranına maruz kalırlar [4, 58, 65, 70, 71]. Katı partikül erozyonunda meydana gelen farklılıklar, kauçuk malzemede yırtılma ve yorulmaya sebep olmaktadır. Sünek metaller ve polimerler için kesme ve sürülme; seramikler, camlar ve gevrek polimerlerde çatlak oluşumu ve gevrek kırılma gibi çeşitli malzeme taşınması mekanizmaları şeklinde meydana gelmektedir [71, 72].

Partikül çarpma açısının malzemelerin katı partikül erozyonuna etkileri üzerine literatürde pek çok çalışma mevcuttur. J. Malik ve arkadaşları yaptıkları deneylerde; sünek malzemede meydana gelen en yüksek erozyon oranını  $15^{\circ}$  ile  $30^{\circ}$  lerdeki açı değerlerinde tespit etmişlerdir.  $90^{\circ}$  açı değerinde yapılan erozif aşınma deneylerinde ise aynı yüzeyde krater şeklinde çukur oluşumları ve yüzeyde kırılmalar oluştuğunu tespit etmişlerdir [73]. J.R. Laguna Camacho ve arkadaşları, AA6061 alaşımının katı partikül erozyonu üzerine gerçekleştirdikleri çalışmalarda, düşük açılarında malzeme yüzeyinde düzensiz kesme izleri ve az miktarda yüzeye gömülmüş aşındırıcı partiküller tespit etmişlerdir. Dik açılarda gerçekleştirdikleri çalışmalarda ise, yüzey pürüzlülüğünün arttığını ve partikül gömülmesi miktarında önemli bir artış meydana geldiğini gözlemlemişlerdir [74]. Alüminyum alaşımı üzerine gerçekleştirdikleri başka bir çalışmada ise, düşük partikül çarpma açılarında ( $30^{\circ}$ – $45^{\circ}$ ) maksimum erozyon oranına ulaşıldığını bu nedenle malzemenin sünek aşınma davranışı gösterdiğini bildirmişlerdir [75]. G. Amirhan ve arkadaşları Si/SiC üzerine yaptıkları deneylerde,  $90^{\circ}$ 'lik açılarda malzenin düşük partikül çarpma açılarında ( $20^{\circ}$ ) göre daha fazla aşındığını gözlemlemişlerdir. Bu durumun seramik malzemelerin gevrek karakterli olmasıyla ilişkili olduğunu bildirmişlerdir [76].

Egemen Avcu ve arkadaşları, katı partikül erozyonunun alüminyum alaşımları üzerindeki etkilerini araştırdıkları çalışmada; aşındırıcı partikül açısının yüzeydeki erozif aşınma mekanizmaları üzerinde büyük etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. 30° ile 45° düşük partikül çarpma açılarında mikro sürme ve mikro kesme mekanizmaları, 75° ile 90° yüksek partikül çarpma açılarında mikro çatlaklar ve plastik deformasyonlar tespit etmişlerdir. Her iki malzemenin de erozyon oranları 75° ve 90° çarpma açılarında keskin bir düşüş göstermiştir. Her iki malzemenin de 90° çarpma açısındaki erozyon oranlarının 30° çarpma açısındaki erozyon oranlarının yaklaşık yarısı kadar olduğunu tespit etmişlerdir (Şekil 3.9) [64].



Şekil 3.9. Farklı partikül çarpma açılarında AA1070 ve AA6101 alüminyum alaşımlarının aşınma miktarları karşılaştırılması [64]

Aşındırıcı partikül hızı, aşınma süreci üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Hızın çok düşük olduğu durumlarda, partiküllerin momentumu tam anlamıyla bir deformasyona sebebiyet veremeyeceği için aşınma yüzey yorulması şeklinde oluşmaktadır. Hızın arttırıldığı durumda, aşınan malzeme partikülün çarpmasına bağlı olarak plastik deformasyona uğrama olasılığı yükselmektedir. Şekil 3.10'de partikül hızının erozyon oranına etkisi belirtilmiştir [58].



Şekil 3.10. Partikül hızının erozyon oranına etkisi [58]

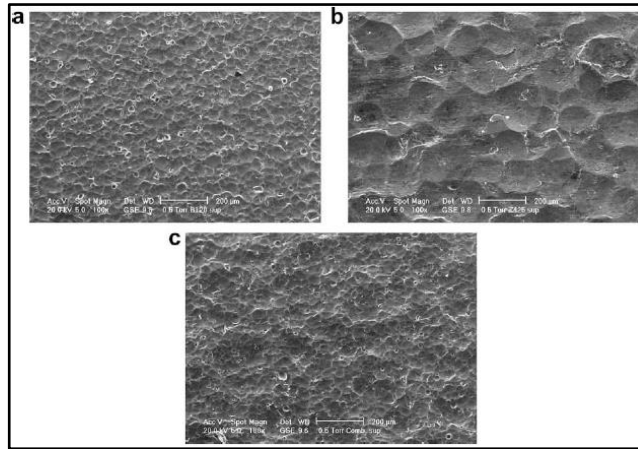
J.Malik ve arkadaşları yaptıkları aşınma deneylerinde kullandıkları dört metalin hepsinde parçacık çarpma hızının artmasıyla erozyon hızındaki artışı ve parçacık hızının erozyon hızına etkisinin malzeme özelliklerinden bağımsız olduğunu belirtmişlerdir [73]. B.A.Mudasar Pasha ve arkadaşları kompozitler üzerinde yaptıkları aşınma testlerinde, partikül hızını 50 m/s'den 120 m/s'ye yükseltilmesi sebebiyle kompozit yüzeyindeki deformasyonun daha fazla olduğunu, yüzeyde aşınma sonucu kalan parçacıklarının sıvandığını tespit etmişlerdir [21]. E.Bata ve arkadaşları Ti6Al4V alaşımı üzerinde yaptıkları katı partikül erozyonu deneylerinde; basıncı arttırarak hızı arttırılan partiküller sayesinde yüzeyde meydana gelen erozyon oranının arttığını tespit etmişlerdir [77]. K.V.Sreenivas Rao ve arkadaşları alüminyum-boron karpit kompozitler üzerindeki katı partikül erozyonu sonucu aşınma davranışlarını araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre partikül hızı ve aşındırma süresinin artmasına bağlı olarak erozyon oranının yükseldiğini tespit etmişlerdir [71]. J.Ibarra ve arkadaşları farklı partikül açısı ve farklı hızlarda gerçekleştirdikleri aşındırma testlerinde; partikül hızının erozyon oranını etkilemediği sonucuna varmışlardır [65].

## 4. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

### 4.1. Bilyalı Dövme ile Mekanik ve Yüzey Özelliklerinin Değişimi

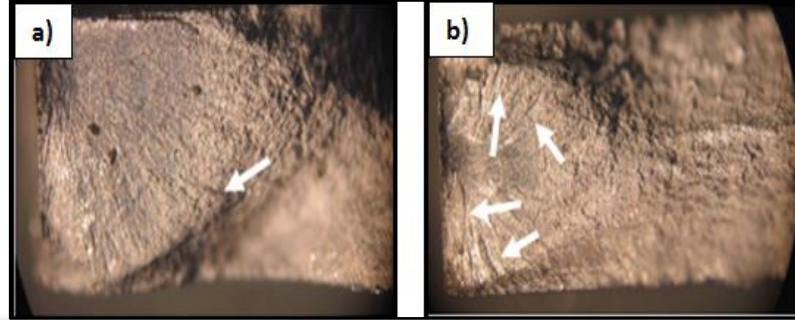
Bu bölümde özellikle alüminyum alaşımlarına uygulanan bilyalı dövme işleminin malzemelerin mekanik ve yüzey özelliklerine etkileri üzerine gerçekleştirilmiş yayınlar tartışılmıştır. Tez çalışmasında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sunumundan önce konu ile ilgili literatürde gerçekleştirilen çalışmaların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

G.H. Majzoobi ve arkadaşları, haddeleme ve bilyalı dövme yönteminin A7075-T6 alaşımı üzerindeki yorulma ömrünü araştırmışlardır. Derin çekme yapılırken bilyalı dövme yapılmasının, düşük çevrim sürtünme yorulması ömrünü %300 uzattığı, yüksek çevrim yorulması için, derin çekmenin bilyalı dövme göre; sürtünme yorulma direnci üzerindeki etkisi yaklaşık %700 'lük bir artış ile gözlenmiştir [78]. M.Benedetti ve arkadaşları, tersine bükülmüş Al7075-T651 malzemesine uygulanan farklı bilyalı dövme işlemlerinin etkisi araştırmışlardır. Şekil 4.1'de ayrı malzemede yaptıkları bilyalı dövme işlemi sonucunda yüzey morfolojisini SEM çalışmalarıyla incelemişlerdir. Şekil 4.1.a ve Şekil 4.1.c'de çukur oluşumunun Şekil 4.1.b'ye göre daha az olduğunu tespit etmişlerdir [14].



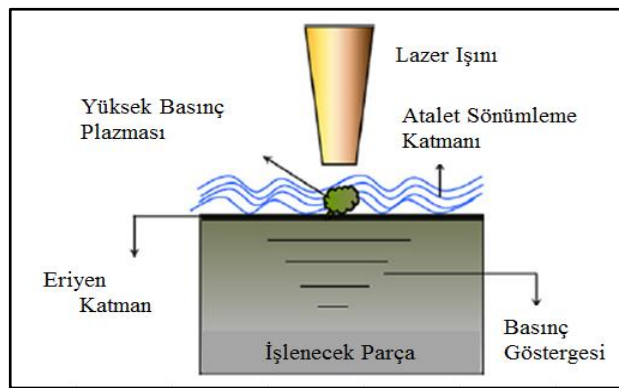
Şekil 4.1. Bilyalı dövülen a) CE-B120, b) CE-Z425, c) CE- Comb SEM görüntüleri [14]

G.H. Majzooobi ve arkadaşları, bilyalı dövme sonrası AA7075 alaşımında çatlak ilerlemesini iki farklı basınçta irdelemişlerdir. Şekil 4.2’de görüldüğü üzere, püskürtme basıncı arttırıldığında malzeme yüzeyindeki çatlak ilerlemesinin azaldığını tespit etmişlerdir [79].



Şekil 4.2. Bilyalı dövülen AA7075 malzemede çatlak ilerlemesi a) Püskürtme basıncı 130 MPa, b) Püskürtme basıncı 180 MPa [79]

Omar Hatamleh ve arkadaşları, A7075-T7351 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağındaki yorulma çatlak büyümesine bilyalı ve lazer ile dövme işleminin etkisini incelemeyi amaçlamışlardır. Lazer dövmenin kaynaksız ve kaynaklı numunelerde çatlak ilerleme hızını önemli bir miktarda düşürdüğünü, ancak bilyalı dövülen yüzeylerde yorulma davranışının dövülmeyen yüzeylerle benzer olduğunu görmüşlerdir [80].

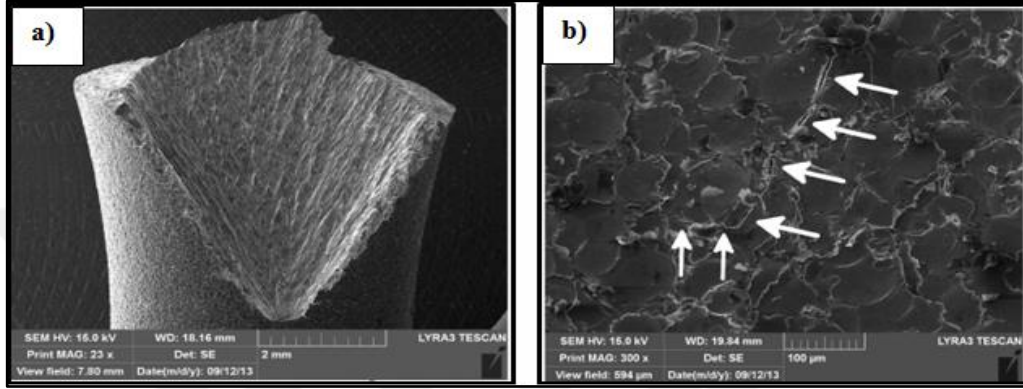


Şekil 4.3. Lazer dövme prosesi [80]

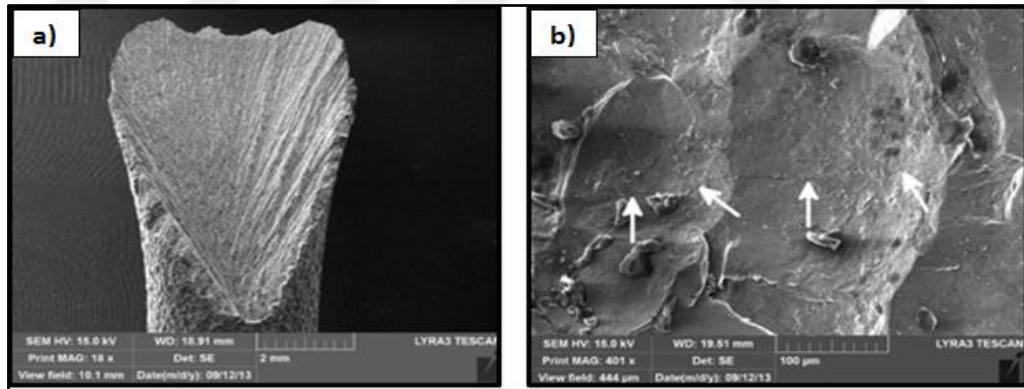
Libor Trsko; AW7075 alaşımının yorulma ömrü üzerinde şiddetli ve ultra şiddetli bilyalı dövme işleminin sonuçlarını araştırmıştır. Sonuçlara göre yorulma ömründe; 9,6 almen yoğunluğu ile %9 artış ve 14,9 almen yoğunluğu ile %21’lik bir artış tespit etmiştir. Şekil 4.4.a ve Şekil 4.5.a’da görüldüğü üzere; bilyalı dövmenin şiddetinin



artışına bağlı olarak yüzeylerdeki değişiklikleri makro görüntülerle incelemişlerdir. Şiddetli bilyalı dövme sonucunda mikro çatlakların arttığını ve daha net görüldüğünü görmüşlerdir. Bunun yanında, Şekil 4.4.b ve Şekil 4.5.b’de püskürtme basınç artışına bağlı olarak çatlak başlangıcının durumunu gözlemlemişlerdir. Bilyalı dövmenin, çatlakların kapanmasını sağlayarak basma kalıntı gerilmelerinin başlamasına sebebiyet verdiğini tespit etmişlerdir [81].

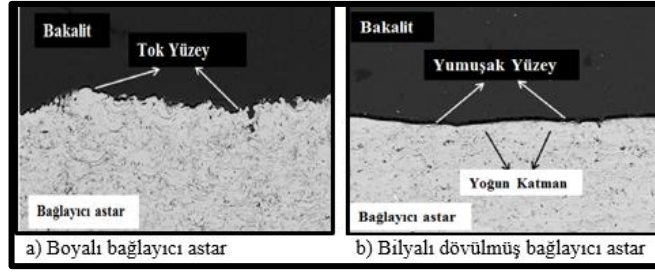


Şekil 4.4. Bilyalı dövülen yüzeylerin makro görüntüleri a) 9,6 N / %650 Bilyalı dövülmüş malzemenin kırık yüzey makro görüntüsü ( $\sigma_a = 185$  MPa) , b) Ana çatlak altında meydana gelmiş bir başka çatlak başlangıcı ( $\sigma_a = 194$  MPa) [81]



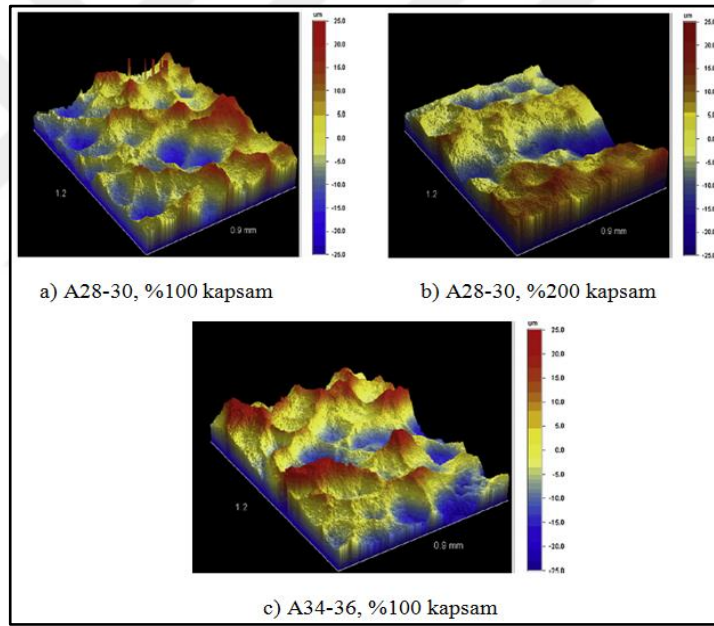
Şekil 4.5. Bilyalı dövülen yüzeylerin makro görüntüleri a) 14,6A / %650 Bilyalı dövülmüş malzemenin kırık yüzey makro görüntüsü ( $\sigma_a = 185$  MPa), b) Ana çatlak altında meydana gelmiş bir başka çatlak başlangıcı ( $\sigma_a = 141$  MPa) [81]

Abdullah Cahit Karaoğlanlı ve arkadaşları çalışmalarında, Almen yoğunluğunun artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığını tespit etmişlerdir. Şekil 4.6.b’de belirtildiği üzere bilyalı dövme yumuşak yüzey altında daha yoğun bir katman oluşumuna sebep olmaktadır. Şekil 4.6.a’da ise boyalı yüzeyde daha tok bir yüzey olduğu gösterilmiştir [35].



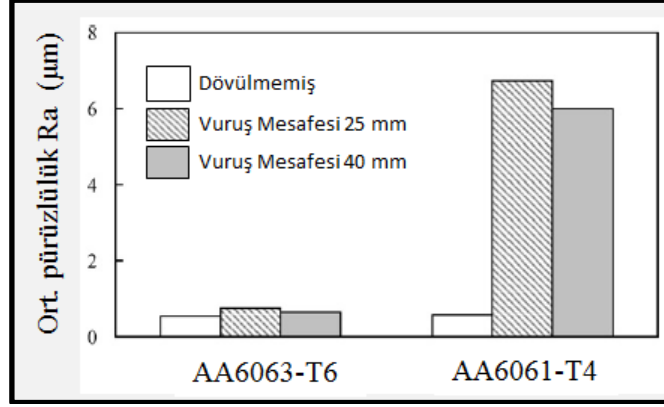
Şekil 4.6. Bilyalı dövmenin bağlayıcı astar üzerindeki etkisi [35]

Okan Unal ve Remzi Varol çalışmalarında Almen şiddetinin pürüzlülük üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Şekil 4.7 incelendiğinde almen şiddetinin ve yüzey kaplama oranının artması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığını (yüzeyde oluşan tepelerin yükseldiği ve çukurların derinleştiğini) gözlemlemişlerdir [82].



Şekil 4.7. Bilyalı dövülmüş yüzeylerde pürüzlülük morfolojisi [82]

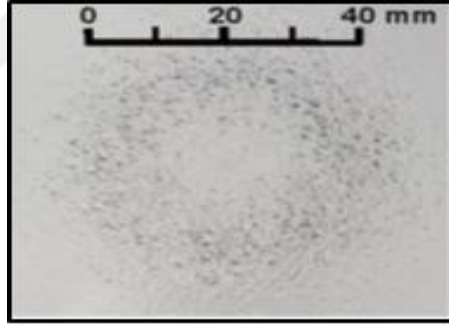
A.Sahaya Grinspan ve arkadaşı, yağlı jet ile yapılan dövme işlemlerinin AA6063-T6 ve AA6061-T4 alüminyum alaşımları üzerindeki yüzey morfolojisini irdelemişlerdir. Çalışmalarında, işlem görmeyen alüminyumlarda ortalama pürüzlülük en az iken, dövülen AA6063-T6 ve AA6061-T4 alaşımlarında vuruş mesafesinin artması ile ortalama pürüzlülük değerlerinde azalma gerçekleştiğini tespit etmişlerdir [83](Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Vuruş mesafesinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi [83]

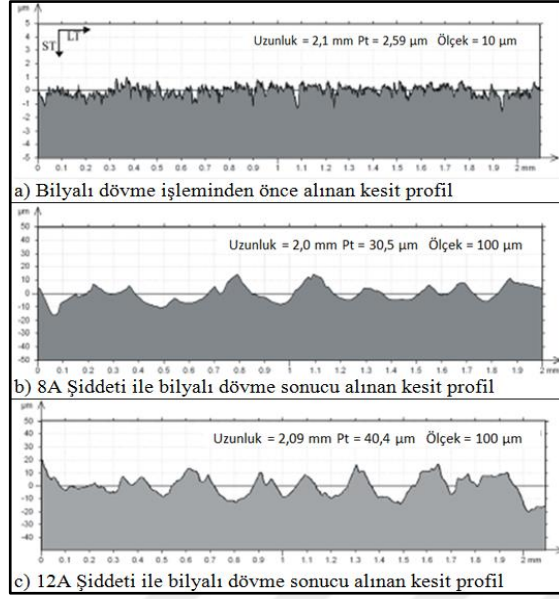
Hitoshi Soyama ve arkadaşları, kavitasyon ve normal bilyalı dövme üzerine yaptıkları çalışmada, tez çalışmasındaki benzer şekilde hedef alüminyum malzeme yüzeyindeki pürüzlülüğü

Şekil 4.9 Şekil 4.9'daki gibi irdelemeye çalışmışlardır [84].



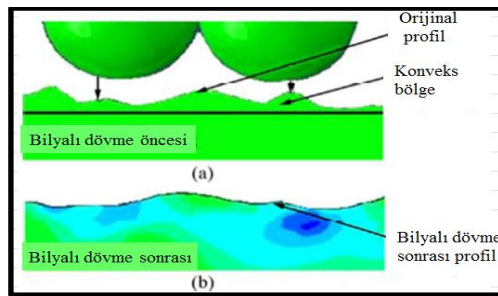
Şekil 4.9. Alüminyum yüzeyi [84]

Uros Zupanc ve arkadaşları, AA7075-T651 çalışmalarında; işlem görmeyen alüminyum ile belirli Almen şiddetinde dövülen malzemenin pürüzlülük değerlerini irdelemişlerdir. İşlemsiz alüminyumda herhangi bir yüzey deformasyonu olmadığı sonucuna varmışlardır (Şekil 4.10.a). Almen şiddetini ise iki farklı nozul uzaklığı, hava basıncı ve kütle akışı gibi parametrelerle 8A ve 12A olarak belirlemişlerdir. Şekil 4.10.(b) ve (c) irdelendiğinde; 12A şiddetindeki bilyalı dövme sonucunda oluşan tepe ve çukurların arasındaki farkın 8A şiddetli bilyalı dövme göre daha fazla olduğunu fark etmişlerdir. Böylece 12A şiddetli dövme sonucu oluşan yüzey pürüzlülüğünün daha fazla olduğu sonucuna varmışlardır [38].



Şekil 4.10. Bilyalı dövülen ve işlem görmeyen yüzeylerin kesit profilleri [38]

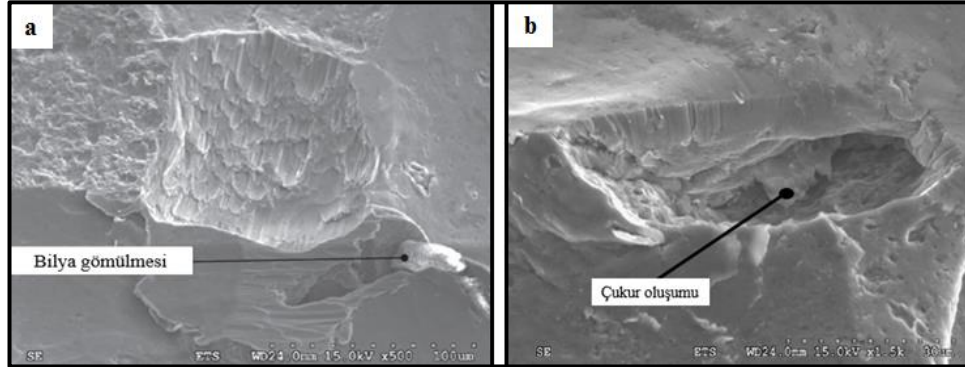
Sheng Xiang-Fei ve arkadaşları, bilyalı dövme ile AA7075 alüminyum malzeme yüzeyindeki pürüzlülük değişimini irdelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü değeri  $Ra=1$  olan yüzeyde yapılan bilyalı dövme işleminin pürüzlülüğü arttırdığını tespit etmişlerdir (Şekil 4.11.a). Şekil 4.11.b’de ise;  $Ra=2$  olduğu daha pürüzlü yüzeylerde yapılan bilyalı dövme işleminin pürüzlülüğü bir miktarda olsa azalttığını tespit etmişlerdir.  $Ra=2$  daha pürüzlü yüzeyde meydana gelen çarpışma yüzeyi daha geniş olacağı için deformasyona uğrayan tepelerde malzeme yüzeyinden kopan bölgelerin olduğunu ve daha yumuşak, düz bir yüzey haline gelmekte olduğunu gözlemlemişlerdir [85].



Şekil 4.11. Bilyalı dövme öncesi ve sonrası AA7075 yüzey profilleri [85]

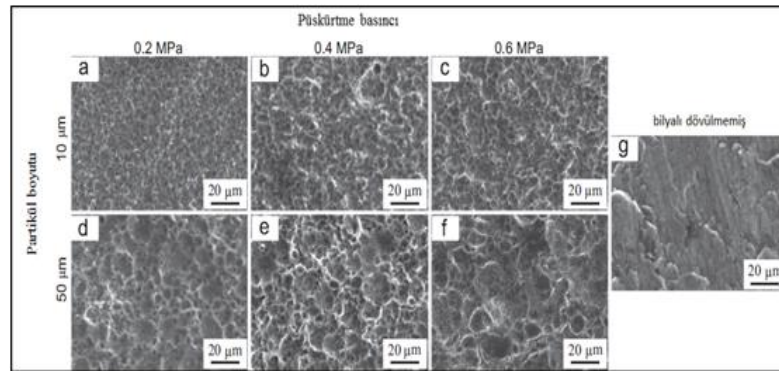
A.Gariepy ve arkadaşları, AA2024-T351 alüminyum malzeme üzerinde bilyalı dövme deneyleri yapmışlardır. Bilyalı dövme sonucunda, bilyaların yüzeye gömülü halde

olduklarını Şekil 4.12.a ve malzeme yüzeyinde ciddi çukurların, çatlakların varlığını tespit etmişlerdir (Şekil 4.12.b) [46].



Şekil 4.12. Bilyalı dövme sonrası oluşan yüzey değişiklikleri a) Malzeme yüzeyine gömülü bilya, b) Malzeme yüzeyinde oluşan çukur [46]

Shoichi Kikuchi ve arkadaşları, 5056 alüminyum üzerindeki bilyalı dövme işleminde bilya boyutu ve püskürtme basıncının yüzey pürüzlülüğüne etkisini SEM görüntüleriyle irdelemeye çalışmışlardır (Şekil 4.13). Şekil 4.13.(b) ve (e) karşılaştırıldığında; bilya boyutu daha büyük olan Şekil 4.13.e'deki deney sonucunda oluşan yüzeyde birçok tepe çukur ve belirgin halde deformasyonlar tespit etmişlerdir. Bu sonuçlara göre, yüzey pürüzlülüğünün bilya boyutunun artmasına bağlı olarak arttığı sonucuna varmışlardır [86].

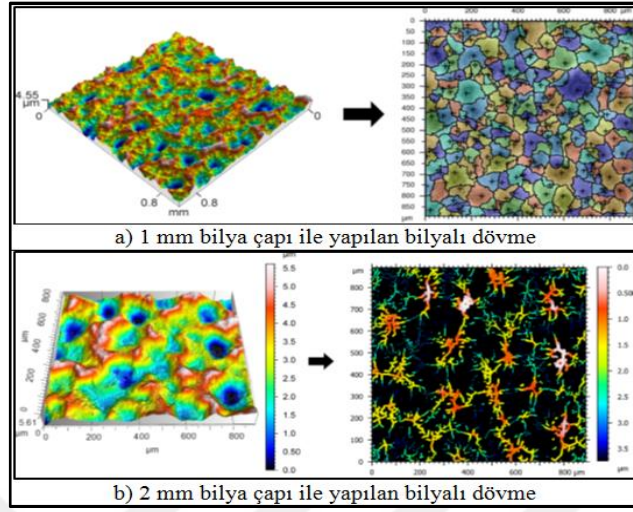


Şekil 4.13. Bilya boyutunun yüzey pürüzlülüğüne etkisi [86]

J.Marteau ve arkadaşları çalışmalarında, Şekil 4.14.a'da 1 mm çapındaki bilyalarla yapılan bilyalı dövme sonucu oluşan deformasyon ile Şekil 4.14.b'de 2 mm çapındaki bilyalarla yapılan dövme kıyaslamışlardır. Şekil 4.14.a'da oluşan tepe ve çukurların, Şekil 4.14.b'ye göre daha az olduğu tespit etmişlerdir. Şekil 4.14.b'de belirgin



olukların oluştuğu ve hedef malzeme yüzeyinde daha fazla deformasyon olduğu yorumlamışlardır [29].



Şekil 4.14. Ultrasonik bilyalı dövme sonucu yüzeyin 3D topoğrafik görünümü [29]

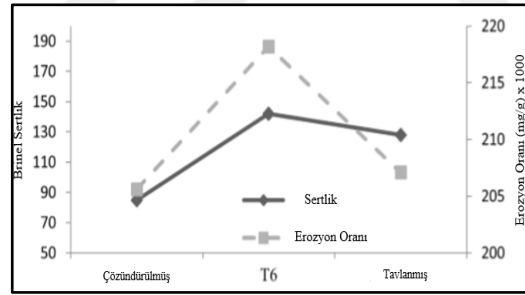
M.D. Harding ve arkadaşları çalışmalarında, bilyalı dövme öncesi pürüzlü yüzeydeki çukurlar daha sık olduğunu belirtmişlerdir. Bilyalı dövme sonrası çarpışmaların sıklığı mevcutta olan çukurların ve tepelerin deforme edilerek daha stabil (pürüzsüz) bir yüzey haline gelmesine sebep olduğunu tespit etmişlerdir [87].

Bu bölümde sunulan tüm çalışmalar irdelendiğinde; literatürde AA2000, A5000, AA6000 gibi farklı alüminyum alaşımlarına uygulanan bilyalı dövme işlemleri sonrası özellikle mikro yapı, sertlik, yorulma ömrü ve korozyon gibi mekanik özelliklerin üzerine odaklanıldığı, yüzey pürüzlülüğü, yüzey topoğrafyası ve yüzey morfolojisi gibi yüzey özelliklerinin daha az sayıda ele alındığı dikkat çekmektedir. Literatürde, tez çalışmasının amaçlarından biri olan bilyalı dövme işlem parametreleri ile yüzey özelliklerinin kapsamlı bir şekilde irdelendiği araştırma çalışmalarının yer almadığı görülmektedir. Tez çalışması ile literatürdeki bu boşluğun doldurulması ve alüminyum alaşımlarının az sayıda irdelenmiş olan yüzey özelliklerinin farklı bilyalı dövme parametrelerinden nasıl etkilendiği konusunu açığa çıkarmak amaçlanmıştır. Diğer yandan yüzey çalışmalarına paralel olarak tez çalışmasında bilyalı dövme ile yüzey özellikleri değişen alüminyum alaşımının erozif aşınma davranışının da ortaya konulması amaçlanmaktadır.

## 4.2. Alüminyum Alaşımlarının Eroziyon Davranışları

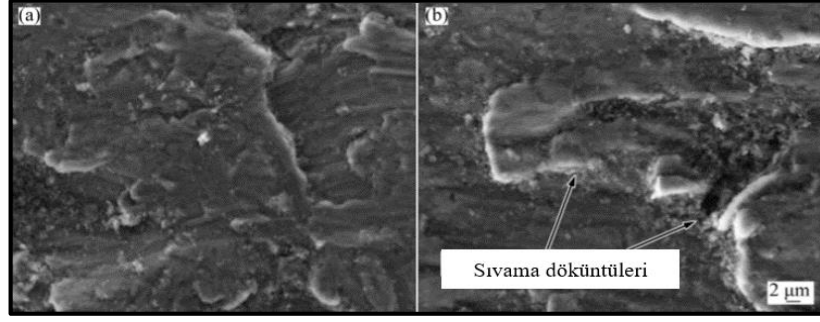
Literatürde aşınma mekanizmaları üzerine birçok çalışma mevcuttur. Özellikle aşınmaya uğramış malzemelerin yüzey özelliklerinde ve mekanik özelliklerinde ciddi değişimler meydana gelmektedir. Tez çalışmasının diğer bir amacı da bilyalı dövmenin eroziyon davranışına etkilerinin araştırılmasıdır. Literatürde henüz bu konu üzerine bir çalışma yer almamaktadır. Bu bölümde literatürde farklı alüminyum alaşımlarının eroziyon davranışlarının incelenmesi üzerine yapılan çalışmalar irdelenecektir.

S. Karabay ve arkadaşları; sertleştirilen AA7075 alaşımının erozyon oranı değişimini incelemişlerdir. Ayrıca sertleşen alaşımın erozyon oranını artacağını ortaya koymuşlardır. Sertleştirme işlemleri ile malzemenin gevrekleşmesine neden olarak hareketli parçacıkların yüzeyden daha kolay malzeme kaldırılmasına sebep olduğunu gözlemişlerdir. Çalışmalarında elde ettikleri sonuçlar Şekil 4.15’de, sabit erozyon süresi, çarpma açısı ve hava basıncı ile ölçülen farklı ısıl işlem görmüş AA7075 numunelerinin erozyon oranları ve sertlik değerleri gösterilmiştir [18].



Şekil 4.15. Hedef malzemelerin erozyon oranı ve sertlik değerleri [18]

B.A.Mudasar Pasha ve arkadaşları, Al7034-T6 kompozitleri üzerinde yaptıkları eroziyon aşınma deneylerinde, birçok parametrenin hedef malzeme yüzeyindeki etkisini araştırmışlardır. Şekil 4.16 incelendiğinde hızın 50 m/s’den 120 m/s’ye yükseltilmesiyle kompozit yüzeyinden önemli ölçüde parça kopartıldığını ve bu parçaların yüzeye sıvandığını tespit etmişlerdir [21].

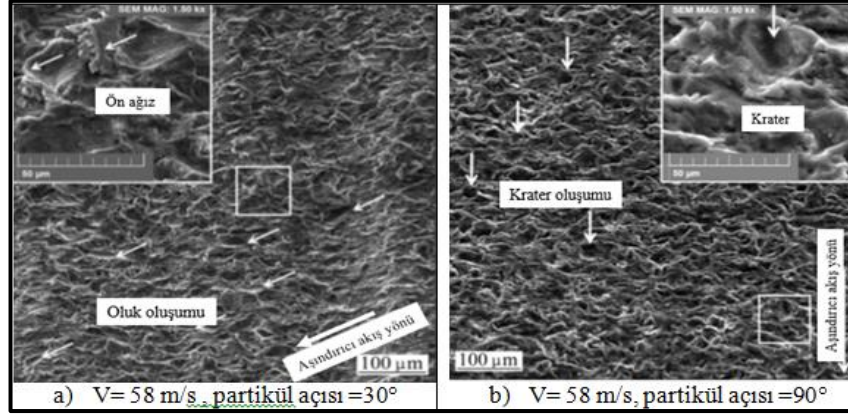


Şekil 4.16. Aşındırılan Al7034-T6 kompozit malzemenin SEM fotoğrafları a) 30°, aşındırıcı sıcaklığı 30°C, aşındırıcı ile aşındırılan yüzey arası mesafe 30 mm ve partikül hızı 50 m/s b) partikül açısı 90°, aşındırıcı sıcaklığı 60°C, aşındırıcı ile aşındırılan yüzey arası mesafe 50 mm ve partikül hızı 120 m/s [21]

J.R. Laguna-Camacho ve arkadaşları AA6061 alaşımını 30° ve 90° partikül çarpma açısında aşındırmışlardır. 30°'lik partikül çarpma açısında meydana gelen erozyon oranının, 90°'lik partikül çarpma açısında oluşan erozyon oranından daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. 30°'lik partikül çarpma açısında gerçekleştirilen erozif aşınma sonucu sünek olan AA6061 alüminyum alaşımı yüzeyinde mikro kesme ve oyuklara rastlamışlardır [74].

J.Ibarra ve arkadaşları lazer ile dövme işlemlerinin AA6061-T6 alaşımı erozif aşınma üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Aşındırıcı partikül açısının (15°, 30°, 60°, 90°) ve hızının (37–58 m/s) aşınma mekanizmaları üzerindeki etkisini irdelerken silika partikülleri kullanmışlardır. Şekil 4.17'de elde edilen SEM sonuçları lazer dövülmeyen yüzeylere uygulanan aşınma testleri sonucunda elde edilmiştir. Şekil 4.17.a'da 30° partikül çarpma açısında ve 58 m/s'lik partikül çarpma hızıyla yapılan aşındırma işlemleri sonucunda yüzeyde oluklar ve ağız şeklinde; kesme mekanizmaları tespit etmişlerdir. Şekil 4.17.b'de aynı hızda fakat 90° partikül çarpma açısında ise yüzeyde krater oluşumu ve partiküllerin çarptığı yerlerde partikül izi ve mikro çatlak oluşumlarını tespit etmişlerdir [65].





Şekil 4.17. Lazer dövme uygulanmamış yüzeyde oluşan aşınma mekanizmaları [65]

E. Avcu ve arkadaşları AA-7071 ile AA-6101 alaşımları üzerinde yaptıkları katı partikül erozyonu çalışmalarında; 30° ile 45° düşük partikül çarpma açılarında mikro sürme ve mikro kesme mekanizmaları, 75° ile 90° dik partikül açılarında mikro çatlaklar ve plastik deformasyonlar tespit etmişlerdir [64]. C.-K. Fang ve T.H. Chuang; AA6063 alaşımının düşük çarpma açılarında maksimum miktarda aşındığını tespit etmişlerdir. Aşındırıcı partikül boyutunun artırılmasıyla hedef malzeme yüzeyinde daha kapsamlı çarpışmalar sonucu daha fazla malzeme kaybı olduğu sonucuna varmışlardır [88]. M. Ö. Bora ve arkadaşları çalışmalarında, erozyona uğramış kompozit numunelerde, 90° partikül çarpma açısında mekanik özelliklerin erozif aşındırılmamış numunelere göre neredeyse eşit kaldığını tespit etmişlerdir. 30° partikül çarpma açısında ise ciddi derecede mekanik özelliklerde azalma meydana geldiğini irdelemişlerdir [89].

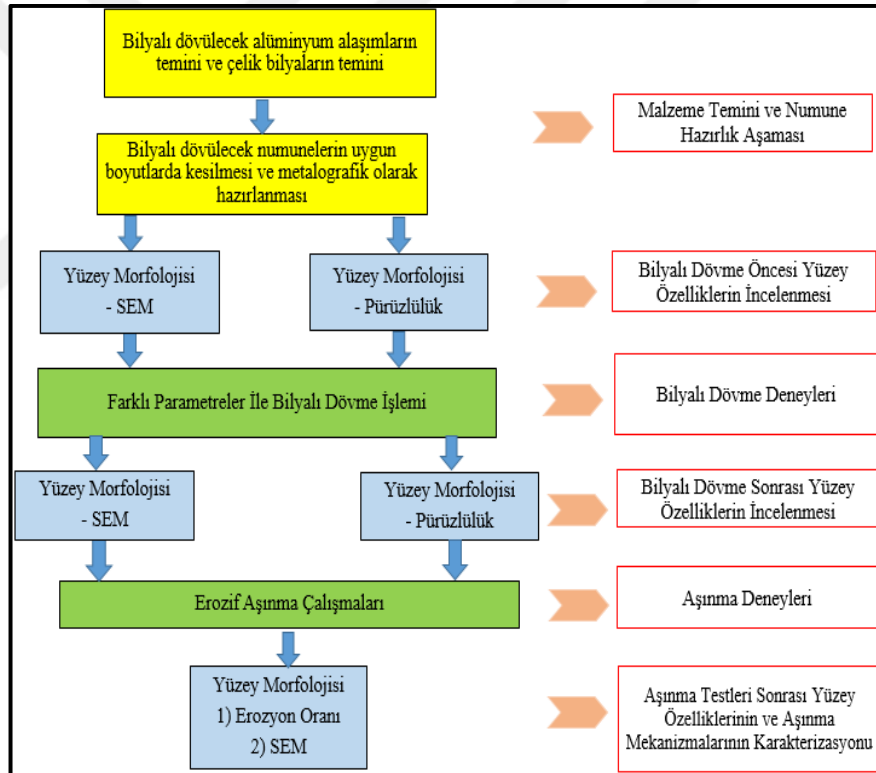
Yukarıda belirtilen ve literatürdeki yer alan bu çalışmalar değerlendirildiğinde yoğun olarak; AA6000 ve AA7000 serisi gibi işlem görmemiş alüminyum alaşımlarında uygulanan aşınma deneylerinde sertlik, partikül açısı, aşındırıcı sıcaklığı, partikül hızı, aşındırıcı ile aşınan yüzey arası mesafe gibi parametrelerinin etkileri incelendiği tespit edilmiştir. Özellikle bilyalı dövme gibi yüzey işleme sonrası malzemelerin erozif aşınma davranışları irdelenmemiş ve literatürde eksik bir araştırma konusu olarak göze çarpmaktadır. Tez çalışmasında özgün bir araştırma konusu olarak, farklı bilyalı dövme parametreleriyle dövülen AA7075-T6 alüminyum alaşımlarının aşınma dayanımları (erozyon oranı); 30° ve 90° partikül çarpma açılarında irdelenecektir. Böylece alüminyum alaşımlarının bilyalı dövme sonrası aşınma dayanımlarının nasıl

etkileneceği konusu da literatüre kazandırılmış özgün bir araştırma konusu olarak yer alacaktır. Literatürde yer alan birçok çalışmada sünek malzemelerin özellikle 30° ve altındaki açı değerlerindeki aşındırma sonuçlarında maksimum erozyon oranı ve mikro kesme, mikro sürme ve mikro sıvama gibi aşınma sonucu oluşan mekanizmalar tespit edilmiştir. Ayrıca sünek malzemelerin 90°'ye yaklaşan partikül çarpma açılarındaki aşındırma işlemleri sonucunda minimum erozyon oranı ve yüzeyde kırılma ve çatlama gibi aşınma sonucu oluşan mekanizmalar tespit edildiği gözlenmiştir. Bu sebeple tez çalışmasında, bilyalı dövülmüş numunelerin özellikle 30° ve 90° partikül çarpma açılarındaki erozif aşınma davranışları irdelenmesi amaçlanmıştır.



## 5. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde yüksek lisans tezinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar, kullanılan cihazlar, malzemeler ve yöntemler detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Tez çalışmasında; numunelerin temini ve metalografik olarak hazırlanması, bilyalı dövme öncesi numunelerin yüzey özelliklerinin karakterizasyonu, bilyalı dövme işlemleri, bilyalı dövme sonrası numunelerin yüzey özelliklerinin karakterizasyonu, erozif aşınma testleri ve erozif aşınma sonrası yüzey özelliklerinin karakterizasyonu çalışmaları uygulanmıştır. Tez çalışması Şekil 5.1'deki gibi iş bölümlerine ayrılmıştır.



Şekil 5.1. Tez çalışmasının akış şeması

## 5.1. Malzeme

Tez çalışmasında uygulanan bilyalı dövme işlemlerinde, hedef malzeme olarak AA7075-T6 alüminyum alaşımı, dövme işlemleri için bilya malzemesi olarak paslanmaz çelik ve erozif aşınma deneyleri için aşındırıcı partikül olarak alümina seçilmiştir. Kullanılan bu malzemelerin özellikleri sırası ile alt bölümlerde detaylandırılmıştır.

### 5.1.1. AA7075-T6 numuneleri

Tez çalışmasında hedef malzeme olarak, havacılık ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan AA7075-T6 alüminyum alaşımı seçilmiştir. Malzemeye ait kimyasal kompozisyon ve mekanik özellikler Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. AA7075 alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu ve önemli mekanik özellikleri

Kimyasal kompozisyon						
Elementler	Al Kütlece%	Zn Kütlece%	Mg Kütlece%	Cu Kütlece%	Fe Kütlece %	Si Kütlece %
	87,1-91,4	5,1-6,1	2,1-2,9	1,2-2	En fazla 0,5	En fazla 0,4
Mekanik özellikler						
Özellik	Sertlik (Vickers)	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopmada uzama (%)	Elastisite modülü (GPa)	
	175	503	570	11	71	

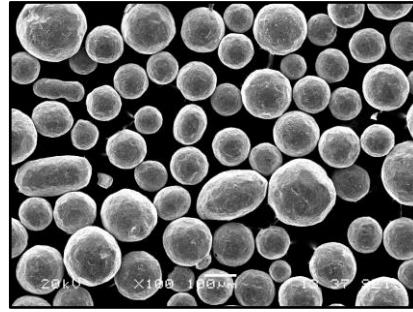
### 5.1.2. Paslanmaz çelik bilya özellikleri

Tez çalışmasında alüminyum alaşımı numuneler 0,1-0,3 mm (S10) ve 0,4-0,9 mm (S60) çaplarında iki farklı boyutta paslanmaz çelik bilya kullanılarak, bilyalı dövme işlemine tabi tutulmuştur. Bilyalar FETAŞ Metalurji ve Yüzey İşlemleri LTD. ŞTİ’nden temin edilmiştir. Bilyaların özellikleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

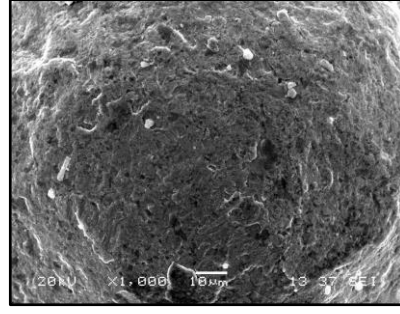
Tablo 5.2. Paslanmaz çelik bilya sertifika bilgileri

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

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de S10 (0,1-0,3 mm) boyutlu bilyaların 100X ve 1000X büyütülmesi ile elde edilen SEM fotoğrafları verilmiştir.

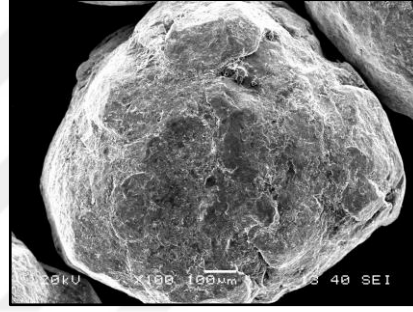


Şekil 5.2. S10 paslanmaz çelik bilya SEM fotoğrafı (100X büyütme)

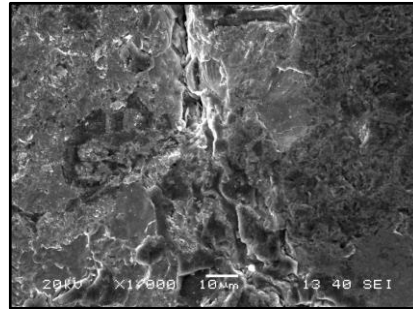


Şekil 5.3. S10 paslanmaz çelik bilya SEM fotoğrafı (1000X büyütme)

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de S60 (0,4-0,9 mm) boyutlarındaki bilya bilyaların 100X ve 1000X büyütme ile elde edilen SEM fotoğrafları verilmiştir.



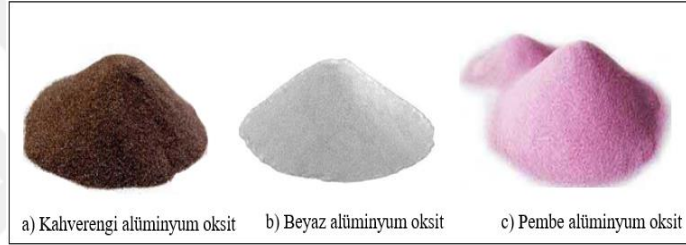
Şekil 5.4. S60 paslanmaz çelik bilya SEM fotoğrafları (100X büyütme)



Şekil 5.5. S60 paslanmaz çelik bilya SEM fotoğrafları (1000X büyütme)

### 5.1.3. Alümina (Alüminyum Oksit) aşındırıcı partikül özellikleri

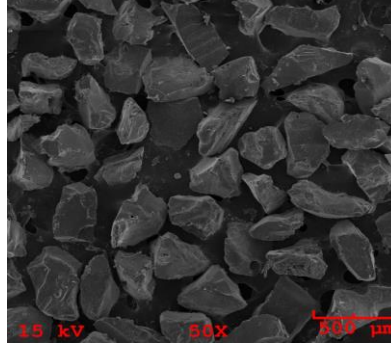
Alüminyum oksit (alümina), alüminyum metalinin oksijene karşı yüksek duyarlılığı sebebiyle meydana gelir. Saflık derecesine göre kahverengi, beyaz ve pembe alüminyum oksit olmak üzere 3 farklı renkte yer almaktadır (Şekil 5.6) [90]. Alüminyum oksitler keskin köşeli morfolojileri, yüksek sertlikleri ve dayanım ömürleri olan malzemelerdir. Yüksek aşındırıcı özelliklerinden dolayı tez çalışması kapsamında gerçekleştirilecek olan erozif aşınma testlerinde özellikleri Tablo 5.3' de verilen 60 mesh (212-312 µm) boyutlarında yüksek saflıktaki beyaz alüminyum oksit tercih edilmiştir (Şekil 5.7). Beyaz alüminyum oksit partiküller FETAŞ Metalurji ve Yüzey İşlemleri LTD.ŞTİ' nden temin edilmiştir.



Şekil 5.6. Saflık derecesine göre alüminyum oksit çeşitleri [90]

Tablo 5.3. Alümina aşındırıcı partikül sertifika bilgileri

Ticari adı	Beyaz Alüminyum Oksit						
Tanımı	Alümina Aşındırıcı Partikül						
Boyutu	F60 - 60 mesh ( 212-300 µm)						
Kimyasal Bileşenleri	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	Klor içeriği	Fe,Cu vb.metaller
% Ağırlık	%99,7	%0,02	%0,02	%2,60-3,20	%0,20	<50 ppm	eser miktarda
Özgül Ağırlığı	3,92 (gr/cm <sup>3</sup> )						
Kristal Şekli	Köşeli						
Sertliği	9 (mohs scale)						

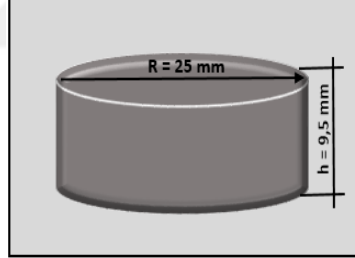


Şekil 5.7.  $Al_2O_3$  (alümina) aşındırıcı partiküllerin SEM fotoğrafı

## 5.2. Yöntem

### 5.2.1. Numunelerin metalografik olarak hazırlanması

Çubuk şeklindeki numuneler, parametreler ile belirlenen adetlerde; 25 mm çapında, 9,5 mm kalınlıkta ve Şekil 5.8’de belirtildiği üzere; Şekil 5.9’de görüntüsü verilen “Metkon Micracut 151” marka mikro-kesme cihazı ile kesilmiştir [91].



Şekil 5.8. AA7075-T6 numune boyutları



Şekil 5.9. Mikro kesme cihazı “Metkon Micracut 151” [91]



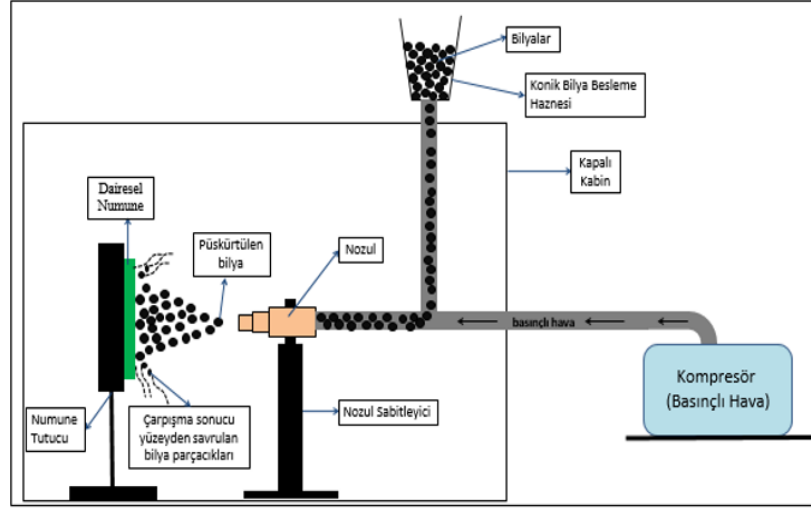
Numunelerin mikro yapılarının incelenebilmesi ve bilyalı dövme işlemleri için homojen bir yüzey hazırlanması amacıyla numune yüzeyleri metalografik olarak ayna parlaklığında hazırlanmıştır. Tüm metalografik işlemler “Kocaeli Üniversitesi Ford Otosan İhsaniye Meslek Yüksekokulu Yüzey İşlemleri Laboratuvar’ ında gerçekleştirilmiştir. Numuneler mikro kesme cihazında kesildikten sonra zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmıştır. Zımpara ve parlatma işlemleri ise Şekil 5.10’da görülen cihazda gerçekleştirilmiştir [92]. AA 7075-T6 numuneler 120, 320, 600, 1000, 1200 mesh’lik zımpara kâğıtları ile zımparalanmış, 1-6 mikronluk elmas solüsyonu dökülmüş çuha ile parlatılmıştır.



Şekil 5.10. Zımpara ve parlatma cihazı “Metkon Forcipol IV” [92]

### 5.2.2. Bilyalı dövme işlemleri

Yüksek lisans tez çalışmasında bilyalı dövme işlemleri Şekil 5.11’de şematik resmi verilen bilyalı dövme düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Bu düzenek yardımıyla bilya püskürtme basıncı, bilya boyutu, numune yüzeyi-nozul arası mesafe, bilya çarpma açısı ve bilyalı dövme süresi parametreleri kontrol edilebilmektedir. Sistem bilyaların püskürtülmesini sağlayan hava kompresörü ve hava kurutucu, bilyaların beslendiği besleme ünitesi, püskürtme nozulu, basınçlı havanın ve bilyaların iletimi için kullanılan bağlantı elemanları, bilya çarpma açısı ve numune nozul arası mesafenin ayarlanabildiği numune tutucudan oluşmaktadır. Nozul yardımıyla, numune üzerine yönlendirilen bilyalar; numune yüzeyine tekrarlı bir şekilde çarpmaktadır. Literatürde benzer çalışmalarda tez çalışmasında kullanılan düzeneğe benzer bilyalı dövme düzenekler kullanmışlardır [24].



Şekil 5.11. Bilyalı dövme için kullanılan düzeneğin şematik gösterimi

Tez çalışmasında kullanılan bilyalı dövme parametreleri Tablo 5.4' te verilmiştir. Bilyalı dövme işlemleri 2 bar ve 4 bar basınç altında, 30 ve 60 sn dövme süresinde, S10 ve S60 paslanmaz çelik bilyalar ile 90° bilya çarpma açısıyla ve 30 mm püskürtme mesafesinden gerçekleştirilmiştir. Tüm bilyalı dövme işlemleri numune yüzey merkezine sabit olarak ve 2 şer tekrar ile gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.5'te bilyalı dövme işlemleri öncesinde belirlenen parametreler altında Almen şiddetleri ve örtme oranları belirtilmiştir.

Tablo 5.4. Bilyalı dövme parametreleri

Bilya türü	Paslanmaz Çelik Bilya
Bilya çapı	0,1 - 0,3 mm (S10) 0,4 - 0,9 mm (S60)
Bilya çarpma açısı	90°
Püskürtme basıncı	2 bar, 4 bar
Dövme süresi	30 sn, 60 sn
Bilya sertliği (HV1)	450
Test sıcaklığı	25°C
Nozul çapı	7,5 mm
Nozul uzunluğu	130 mm

Tablo 5.5. Farklı parametreler altında elde edilen almen şiddeti ve örtme oranları

Nozul çapı (mm)	Nozul boyutu (mm)	Bilya boyutu (mm)	Püskürtme basıncı (bar)	Örtme oranı (%)	Almen şiddeti (mmA)
7.5	130	0,1-0,3 (S10)	2	100	0,08
		0,1-0,3 (S10)	4	100	0,16
		0,4-0,9 (S60)	2	100	0,32
		0,4-0,9 (S60)	4	100	0,70

### 5.2.3. Bilyalı dövme işleminde debi değişimi

Numunelerin bilyalı dövülmesi öncesinde 2 farklı basınç ve partikül boyutu için bilyaların akış debileri hesaplanmıştır. Akış debisi belirli bir sürede harcanan bilya miktarının hassas terazi yardımıyla ölçülmesi ve zamana bölünmesi ile hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen debi hesabı çalışmalarına göre elde edilen değerler Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6. Bilyalı dövme işlemlerinde kütleli debi değişimi

Numune No	Partikül Boyutu	Püskürtme Basıncı (bar)	Bilyalı Dövme Süresi (sn)	Debi (gr/sn)	Debi (kg/dk)
1	S10	2	30	24	1,44
2	S60	2	60	33,17	1,99
3	S10	4	30	32,29	1,94
4	S60	4	60	40,19	2,41

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

Bilyalı dövme öncesinde hassas terazi ölçülen numunelerin ilk ağırlıkları ile bilyalı dövme sonrası ölçülen son ağırlıklar arasındaki farklar tüm deney numuneleri için hesaplanmıştır. Tez çalışmasındaki tüm deneylerde numune ağırlıkları Şekil 5.12'deki hassas terazi ile ölçülmüştür ve hassasiyeti (0,0001 g)'dir [93].



Şekil 5.12. Hassas terazi [93]

### 5.2.5. Bilyalı dövme öncesi ve sonrası mikro sertlik ölçümleri

Tez çalışmasında AA7075-T6 alüminyum numunelerin yüzeylerinin bilyalı dövme işlemi öncesinde ve sonrasında sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri için “Metkon Duroline M” marka mikro-vickers sertlik cihazı kullanılmıştır. Şekil 5.13’e mikro sertlik ölçümlerinin yapıldığı cihaz gösterilmiştir [94]. Mikro sertlik ölçümleri her numune için üçer tekrar şeklinde yapılmıştır. Ölçümler sonrasında numune yüzeylerinde farklı parametreler altında ölçülen sertlik değerleri Tablo 5.7’de verilmiştir.



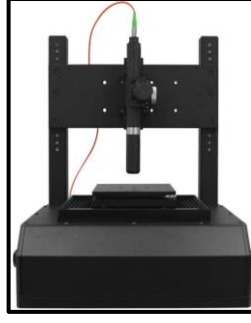
Şekil 5.13. Mikro sertlik ölçüm cihazı [94]

Tablo 5.7. Bilyalı dövme sonrası AA7075 alaşımında meydana gelen yüzey sertlikleri

Bilya boyutu (mm)	Püskürtme basıncı (bar)	Yüzey Sertliği (Hv0.1)
0,1-0,3 (S10)	2	183
0,1-0,3 (S10)	4	194
0,4-0,9 (S60)	2	193
0,4-0,9 (S60)	4	202

### 5.2.6. Optik profilometre ile yüzey pürüzlülüklerinin incelenmesi

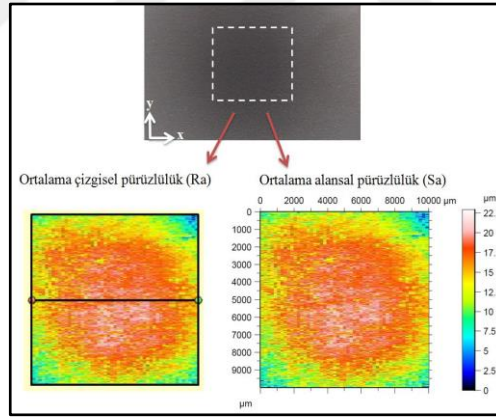
Tez çalışmasında bilyalı dövme öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük değerleri ve 3 boyutlu yüzey morfolojileri “Nanovea PS50” marka 3D temassız uçlu optik profilometre cihazı ile incelenmiştir. Bilyalı dövme operasyon parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemek amacı ile bilyalı dövülen numuneler Kocaeli Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi’nde bulunan “Nanovea PS50” marka optik profilometre yardımı ile incelenmiştir (Şekil 5.14)[95]. Pürüzlülük ölçüm parametreleri Tablo 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.14. Optik profilometre [95]

Tablo 5.8. Pürüzlülük ölçüm parametreleri

Sonuç	Tarama boyutu (mm)	Tarama sıklığı ( $\mu\text{m}$ )	Ölçüm standartı
Ortalama çizgisel pürüzlülük ( $R_a$ )	10 (x)	200	ISO 4287
Ortalama alan pürüzlülüğü ( $S_a$ )	10x10 (x,y)	200x20	ISO 25178

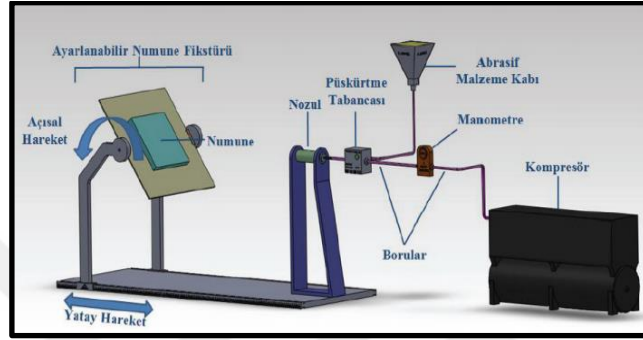


Şekil 5.15. Pürüzlülük ölçüm yöntemi

Şekil 5.15'te; bilyalı dövme işlemi uygulanan bir AA7075 numunenin pürüzlülük ölçüm yöntemi verilmiştir. Dövülen numunede 10 mm' lik bir çizgi taranarak, ortalama çizgisel pürüzlülük ( $R_a$ ) değerinin belirlenmiştir. Ortalama çizgisel pürüzlülük değerleri belirlenirken x eksenini doğrultusunda 200  $\mu\text{m}$ 'de bir ölçüm alınmıştır. Dövülen numunenin ortalama alan pürüzlülük ( $S_a$ ) değerinin belirlenmesinde 10x10 mm<sup>2</sup>'lik alan taranmıştır. Ortalama alan pürüzlülük değerleri belirlenirken x eksenini doğrultusunda 200  $\mu\text{m}$ ' de bir, y eksenini doğrultusunda 20  $\mu\text{m}$ ' de bir ölçüm alınmıştır.

### 5.2.7. Bilyalı dövme sonrası erozif aşınma testleri

Erozif aşınma deneyleri; özel olarak tasarlanmış katı partikül erozyonu test düzeneğinde “Kocaeli Üniversitesi Ford Otosan İhsaniye Meslek Yüksekokulu Yüzey İşlemleri Laboratuvar” ‘ında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.16’da katı partikül erozyonu testlerinin gerçekleştirilmesi için kullanılan test düzeneği şematik gösterimi verilmiştir [64, 89].

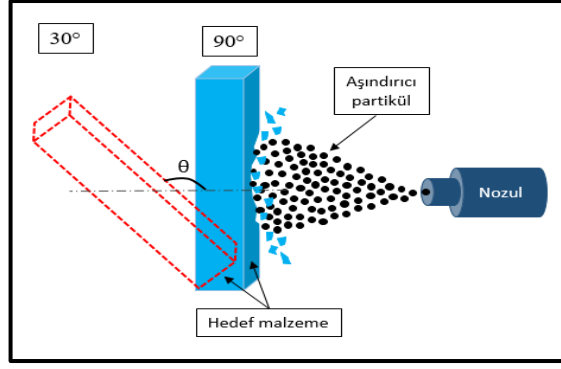


Şekil 5.16. Katı partikül erozyonu test düzeneği şematik gösterimi [64, 89]

Erozif aşınma testlerinde kullanılan parametreler Tablo 5.9’de verilmiştir. Şekil 5.17’de 30° ve 90° olarak aşındırılan numune ve numuneye püskürtülen partiküllerin çarpma açısı şematik gösterilmiştir.

Tablo 5.9. Eroziyon test parametreleri


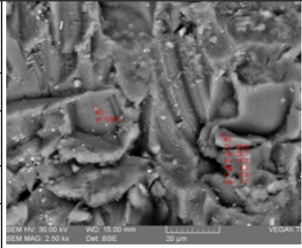
Partikül türü	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Alümina)
Partikül çapı	60 mesh (212-300µm)
Partikül çarpma açısı	30° , 90°
Püskürtme basıncı	1,5 bar
Test sıcaklığı	25°C
Aşındırma süresi	20 saniye
Nozul uzaklığı	10 mm
Nozul çapı	7,5 mm
Nozul uzunluğu	130 mm



Şekil 5.17. Eroziyon aşınma testlerinde partikül çarpma açısı şematik gösterimi

### 5.2.8. Bilyalı dövme ve eroziyon aşınma sonrası SEM analizleri

Tez çalışmasında AA 7075-T6 alüminyum alaşımının bilyalı dövme ve eroziyon aşınma testleri sonrası yüzey morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve bu cihaza ekli enerji dağılım spektrometresi (EDS) (Bruker Quantax EDS marka) dedektörü ile incelenmiştir. Analizler sonrası bilyalı dövme parametrelerinin yüzey morfolojilerine etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca eroziyon aşınma testleri sonrası bilyalı dövme ve eroziyon aşınma test parametrelerine bağlı olarak yüzey morfolojisinin değişimi ve bu değişimde rol oynayan etkin aşınma mekanizmaları irdelenmiştir. SEM çalışmaları Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.18'de deneysel çalışmalarda kullanılacak SEM cihazı ve özellikleri ile daha önce konu ile ilgili gerçekleştirdiğimiz çalışmalarda elde edilen yüzey fotoğrafı verilmiştir. Tez çalışmasında elde edilen SEM çalışmaları ileriki bölümlerde detaylı şekilde irdelenecektir.

	Çözünürlük	Yüksek vakum modunda 3nm, Düşük vakum modunda 3nm	
	Büyütme	6x – 1'000'000x	
	Hızlandırma Voltajı	200V - 30kV, 10V adimli	
	Prob akımı	1pA - 2uA	
	Tarama	Tarama hızı: piksel başına 160ns - 10ms, adimli veya sürekli	
	Resim boyutu	8192 x 8192 piksele kadar	
	Numune kabini	160 mm iç çap	
(a)		(b)	

Şekil 5.18. a) SEM cihazı özellikleri, b) Örnek analiz

## 6. BİLYALI DÖVME PARAMETRELERİNİN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİSİ

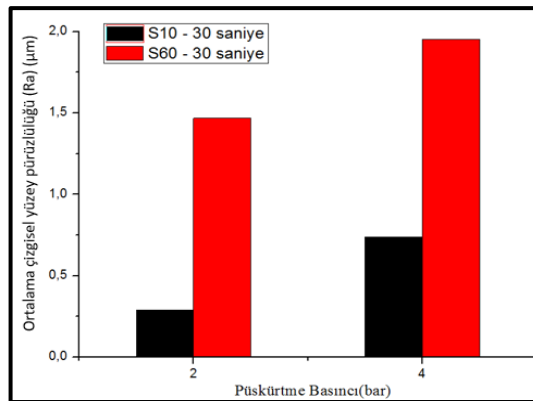
Bu bölümde, bilyalı dövme uygulanmış AA7075-T6 alaşımlarının yüzey pürüzlülüğüne, 3 boyutlu yüzey topoğrafyasına ve yüzey morfolojisine; püskürtme basıncı, bilya boyutu ve bilyalı dövme süresi parametrelerinin etkileri detaylı şekilde irdelenecektir.

### 6.1. Püskürtme Basıncının Yüzey Özelliklerine Etkileri

Bu bölümde bilyalı dövme parametrelerinden püskürtme basıncının sırasıyla ortalama çizgisel pürüzlülük ( $R_a$ ) ve ortalama alansal pürüzlülük ( $S_a$ ) değerlerine, 3 boyutlu yüzey topoğrafyasına ve yüzey morfolojisine etkisi irdelenecektir.

#### 6.1.1. Püskürtme basıncının yüzey pürüzlülüğüne etkileri

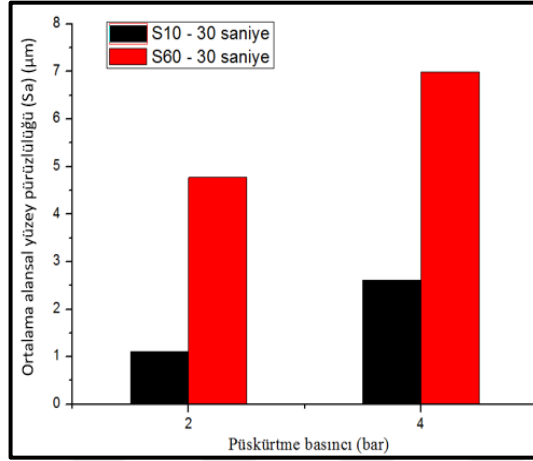
Bu bölümde püskürtme basıncı değişiminin ortalama çizgisel pürüzlülük ( $R_a$ ) ve ortalama alansal pürüzlülük ( $S_a$ ) değerlerine etkileri iki farklı bilya boyutu (S10 ve S60) ve iki farklı bilyalı dövme süresi (30 sn. ve 60 sn.) altında incelenmiştir (Şekil 6.1). Grafik incelendiğinde her iki bilya boyutunda (S10 ve S60) ortalama çizgisel yüzey pürüzlülüğünün basınç artışı ile arttığı sonucuna varılmaktadır. Basıncın artmasıyla, yüzeye çarpan bilyaların sahip olduğu kinetik enerji ve momentumun artış göstermesi sebebiyle yüzeydeki pürüzlülük değerlerinde artış tespit edilmiştir.



Şekil 6.1. Püskürtme basıncının ortalama çizgisel pürüzlülüğe ( $R_a$ ) etkisi

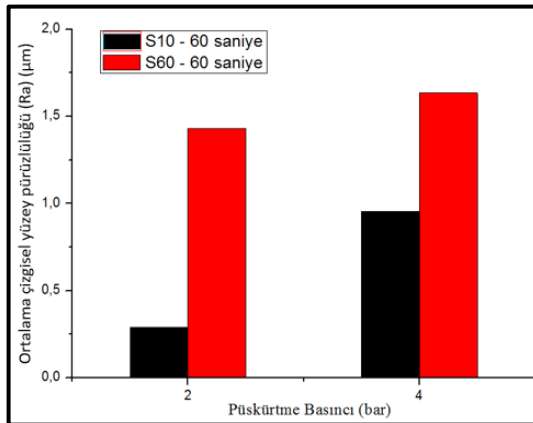


Şekil 6.2’de ortalama alansal pürüzlülük ( $S_a$ ) değerleri verilmiştir. Grafik irdelendiğinde, alansal yüzey pürüzlülüğü değerlerinin de, arttırılan püskürtme basıncına paralel olarak artış gösterdiği görülmektedir.

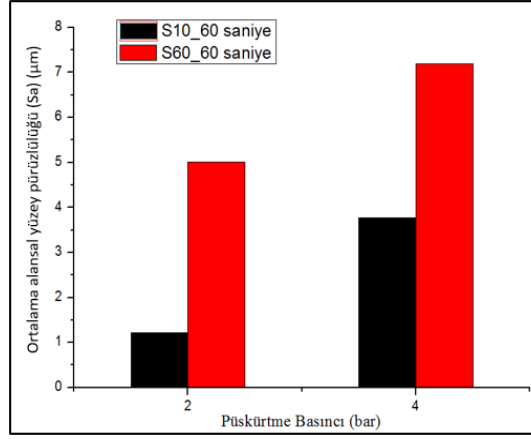


Şekil 6.2. Püskürtme basıncının ortalama alansal pürüzlülüğe ( $S_a$ ) etkisi

Şekil 6.3’de, S10 ve S60 boyutlarındaki bilyalarla 60 saniye boyunca uygulanan bilyalı dövme işlemlerinde püskürtme basıncının 2 bar’ dan 4 bar’a yükseltilmesiyle çizgisel yüzey pürüzlülüğü değerlerinde artış olduğu gözlenmiştir. Benzer sonuçlar Şekil 6.4’de belirtilen ve aynı parametrelerde uygulanan bilyalı dövme işlemleri sonucundaki alansal pürüzlülük değerlerinde de gözlenmiştir.



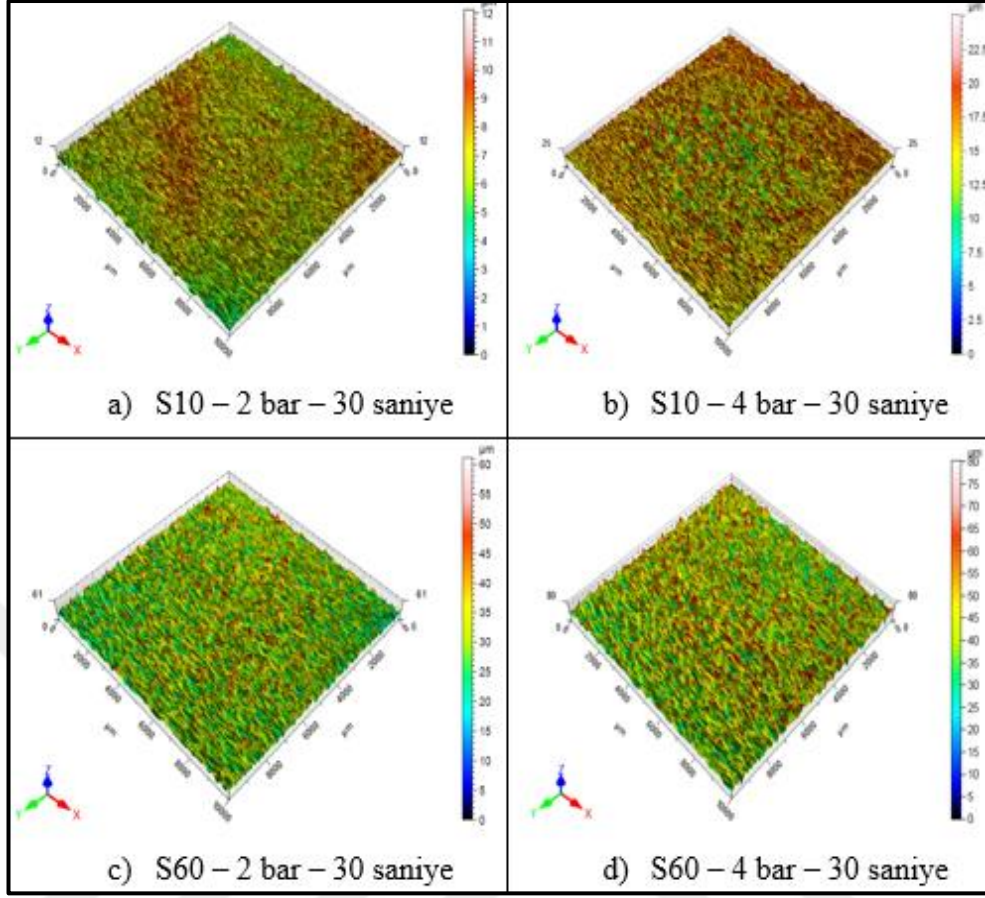
Şekil 6.3. Püskürtme basıncının çizgisel yüzey pürüzlülüğüne ( $R_a$ ) etkisi



Şekil 6.4. Püskürtme basıncının alansal yüzey pürüzlülüğüne ( $S_a$ ) etkisi

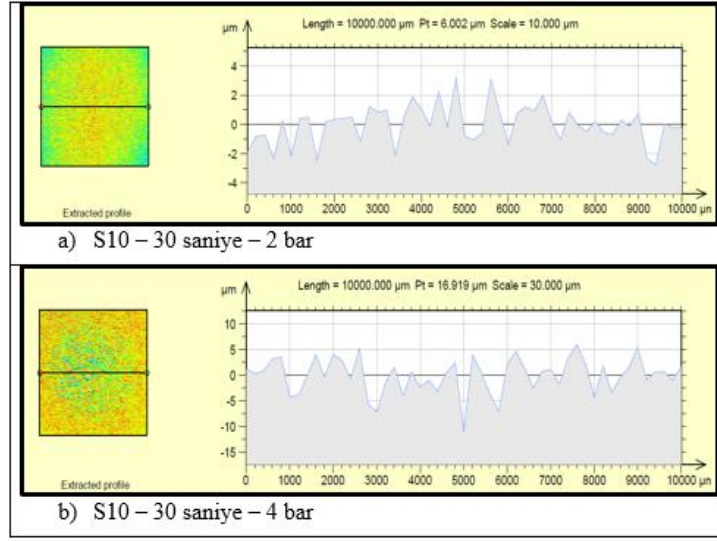
### 6.1.2. Püskürtme basıncının 3 boyutlu yüzey topoğrafyasına etkileri

Şekil 6.5' te farklı parametreler altında bilyalı dövülen numunelerin 3 boyutlu yüzey topoğrafyaları verilmiştir. Yüzey topoğrafyaları birçok tepe ve çukurdan meydana gelmektedir. Kırmızı bölgeler tepeleri, yeşil bölgeler ise çukurları temsil etmektedir. Şekil 6.5.b'de S10 boyutlu bilyalarla 10mm x 10mm' lik alanda yapılan yüzey pürüzlülüğünün Şekil 6.5.a' ya göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. S10 boyutlu bilyalarla dövülen AA7075-T6 numune yüzeyi 4 bar'da daha fazla deformasyona uğradığı ve yüzey topoğrafyasında 17,5-22,5 µm'lik yüksekliklerde tepelerin meydana geldiği görülmektedir. Şekil 6.5.a' da oluşan maksimum tepeler 9-11 µm yükseklikleri arasında yoğunlaşmıştır. Sonuç olarak Şekil 6.5.c'de görülen kırmızı tepelerin en yüksek değerlerinin 45-55 µm ve Şekil 6.5.d'de görülen kırmızı tepelerin en yüksek değerlerinin 60-75 µm değerinde olduğu görülmektedir. Püskürtme basıncının 2 bar'dan 4 bar'a yükseltilmesiyle partiküllerin kinetik enerjilerinin arttığı, bu durumun numune yüzeyinde daha fazla deformasyon meydana gelmesine ve yüzey topoğrafyasında belirgin değişikliklerin oluşmasına neden olduğu sonucuna varılmaktadır.



Şekil 6.5. Püskürtme basıncının 3 boyutlu yüzey topoğrafyasına etkileri

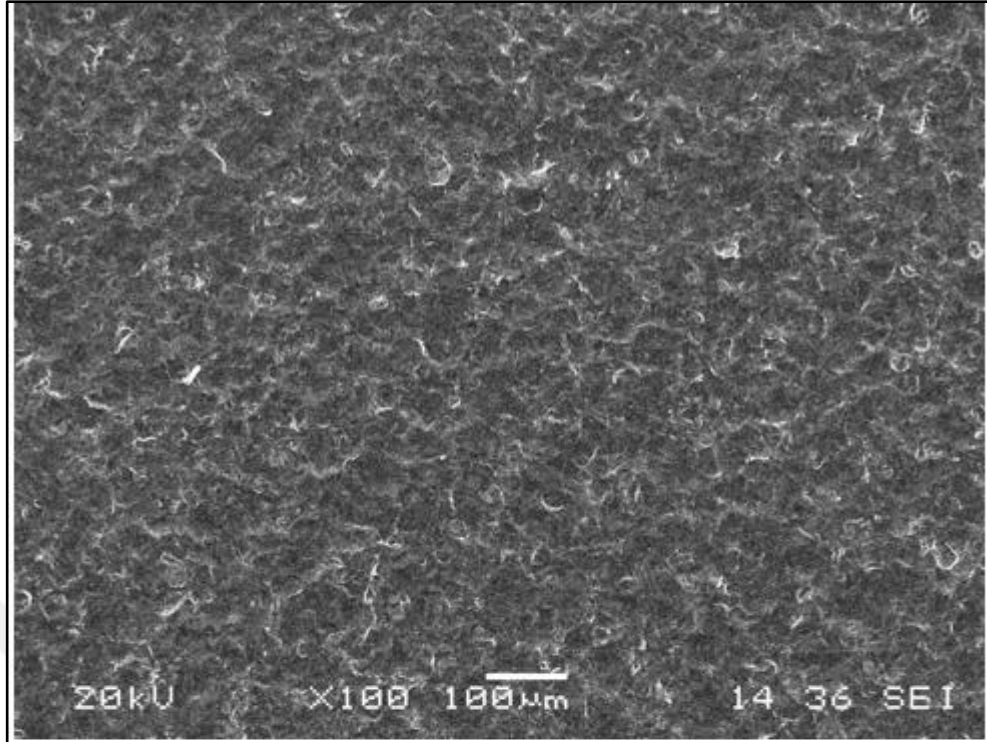
Şekil 6.6'da S10 boyutlu bilyalarla 2 bar ve 4 bar püskürtme basınçlarında bilyalı dövülen yüzeylerden alınan çizgisel pürüzlülük profilleri verilmiştir. Bilyalı dövülmüş bölgelerin yüzey profili, bu profili oluşturan tepe ve çukurlar görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü hakkında y eksenine denk gelen değerler kıyaslanarak bilgi edinilebilmektedir. Şekil 6.6.a'da; 2 bar'lık püskürtme basıncıyla gerçekleştirilen bilyalı dövme sonucunda numune yüzeyindeki pürüzlülük değerinin maksimum 3 µm olduğu belirtilmiştir. Şekil 6.6.b'de 4 bar'lık püskürtme basıncında ise yüzey pürüzlülük değerinin maksimum 5 µm olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak püskürtme basıncının 2 bar'dan 4 bar'a yükseltilmesiyle yüzey pürüzlülüğünün arttığı sonucuna varılabilmektedir.



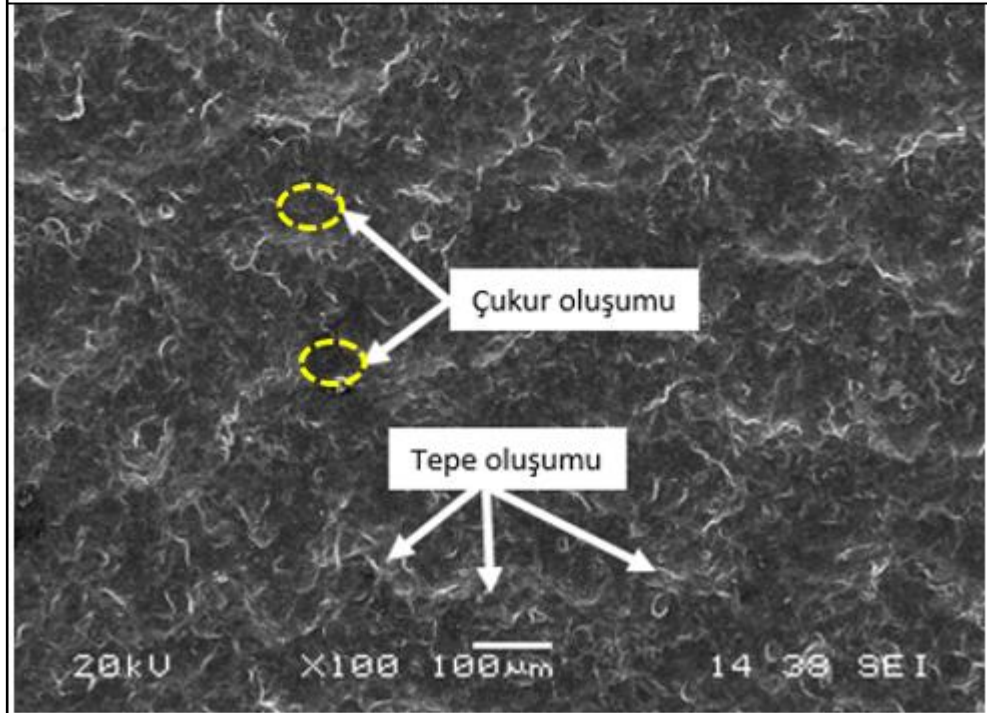
Şekil 6.6. Püskürtme basıncı etkisinin incelendiği AA7075-T6 yüzey kesit profili

### 6.1.3. Püskürtme basıncının yüzey morfolojisine etkileri

Şekil 6.7 ve Şekil 6.8’de görülen SEM fotoğraflarında; püskürtme basıncının (2 bar ve 4 bar) sabit bilya boyutu (S10) ve sabit dövme süresinde (60 sn) yüzey morfolojisine etkisi incelenmiştir. SEM analizleri incelendiğinde, Şekil 6.7.b’ de Şekil 6.7.a’ ya göre beyaz kontrastla gösterilen tepe bölgelerinin artış gösterdiği görülmektedir. Püskürtme basıncındaki artışın yüzeydeki çatlak miktarını arttırdığı ve belirgin şekilde tepe-çukur oluşumlarına neden olduğu tespit edilmiştir (Şekil 6.8). Bu durum artan püskürtme basıncına bağlı olarak partiküllerin kinetik enerjilerinin ve debilerinin artmasıyla açıklanabilir. Kinetik enerjinin artmasıyla bilyaların hedef malzeme yüzeyine çarpması sonucunda meydana gelen plastik deformasyon miktarının artması beklenir. Benzer şekilde Shoichi Kikuchi ve arkadaşları, 5056 alüminyum üzerindeki bilyalı dövme işlemlerinde bilyaların basınç artışına bağlı olarak yüzeydeki deformasyonun arttırdığını söylemişlerdir [86]. Öte yandan debi miktarındaki artış, birim alana çarpan patikül miktarının artmasına (doz oranının artışına) neden olacaktır. Bu durum yüzeyin daha yoğun bir şekilde deforme edilmesine ve yüzeyde oluşan tepe ve çukurların yüksekliklerinin artmasına neden olacaktır. Yüzey morfolojileri incelendiğinde elde edilen sonuçlar, püskürtme basıncının artması sonucu atan yüzeydeki pürüzlülük değerlerinin temel nedeninin açıkça ortaya koymaktadır.



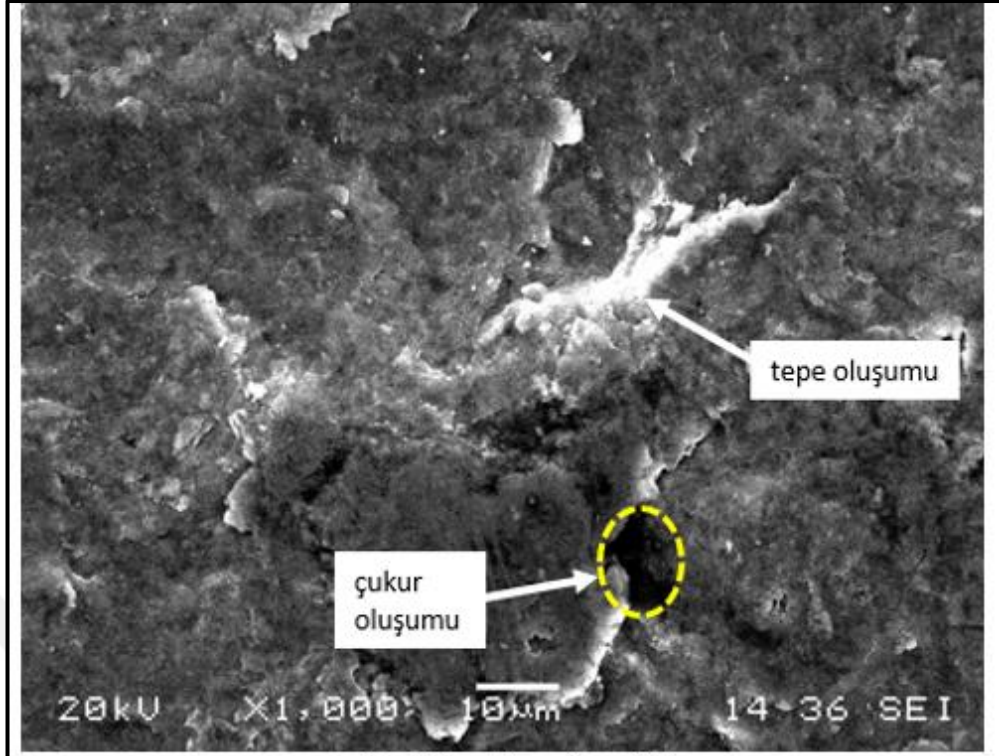
a) S10 – 60 saniye – 2 bar



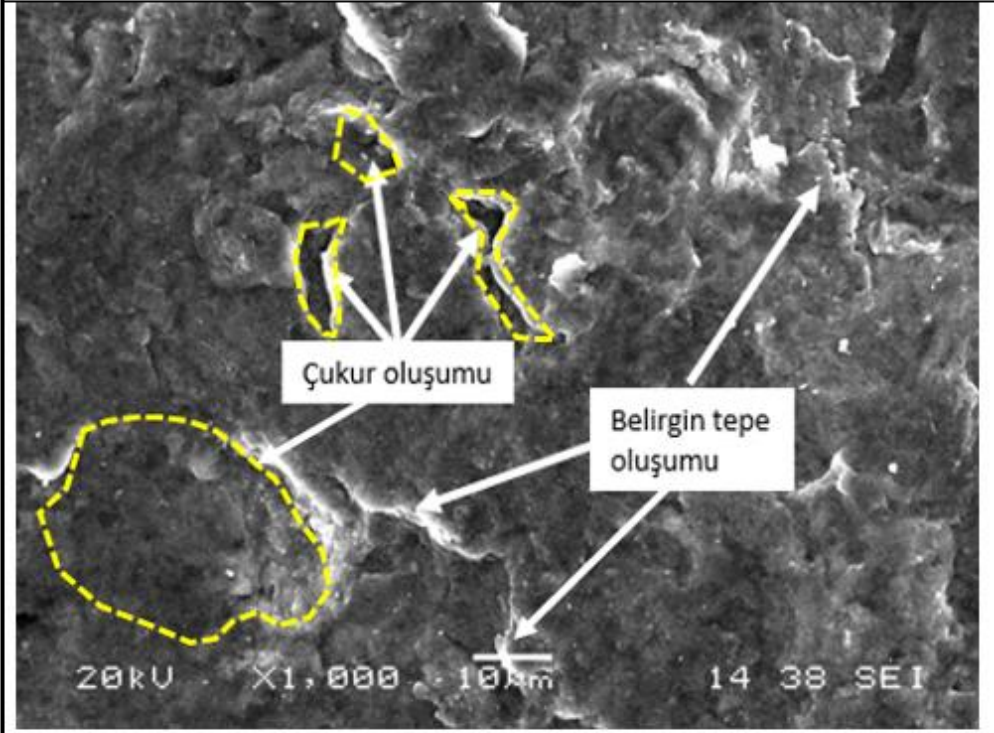
b) S10 – 60 saniye – 4 bar

Şekil 6.7. Püskürtme basıncının etkisi (2 bar – 4 bar – 100x büyütme)





a) S10 – 60 saniye – 2 bar

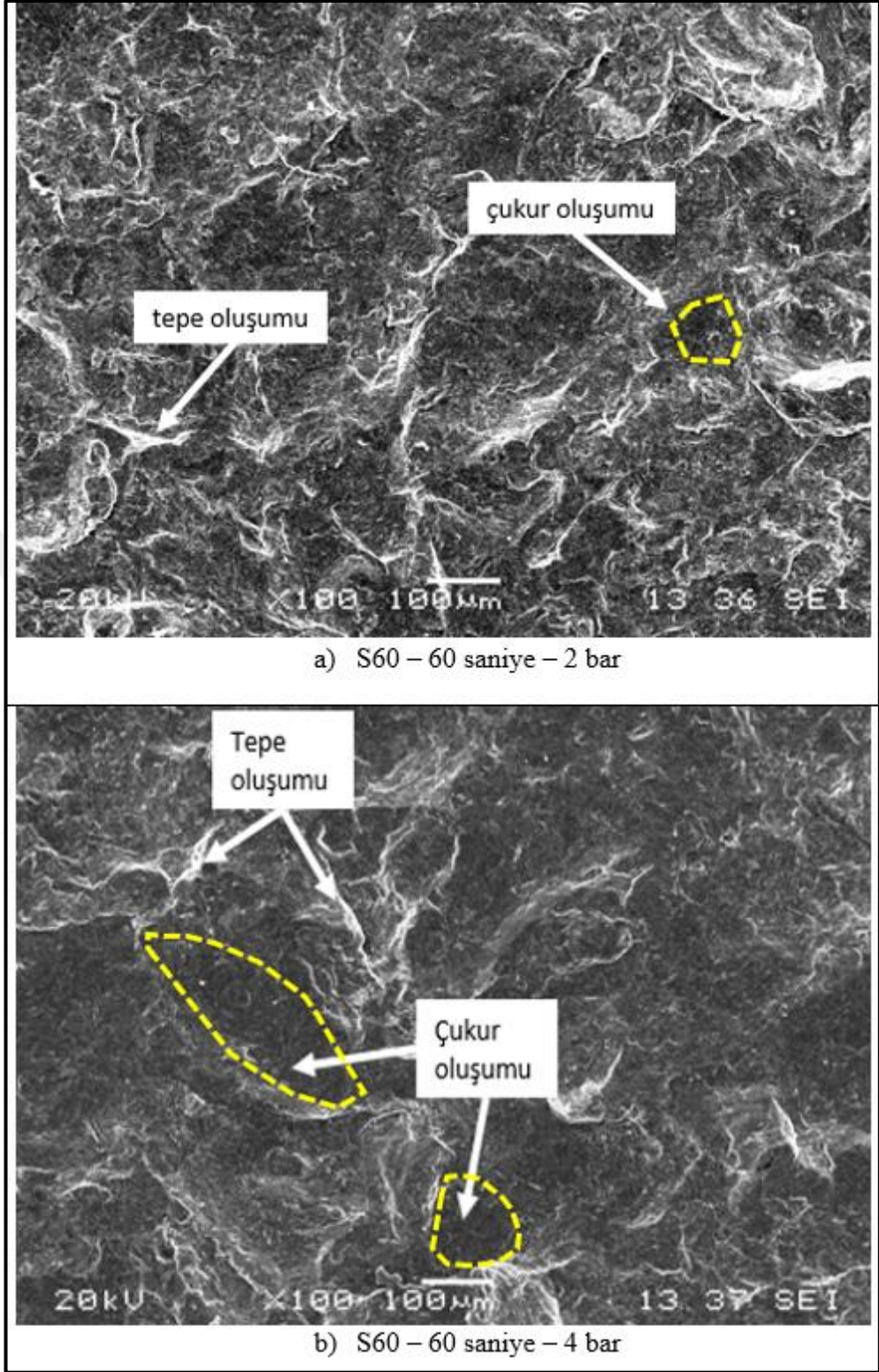


b) S10– 60 saniye – 4 bar

Şekil 6.8. Püskürtme basıncının etkisi (2 bar – 4 bar – 1000x büyütme)

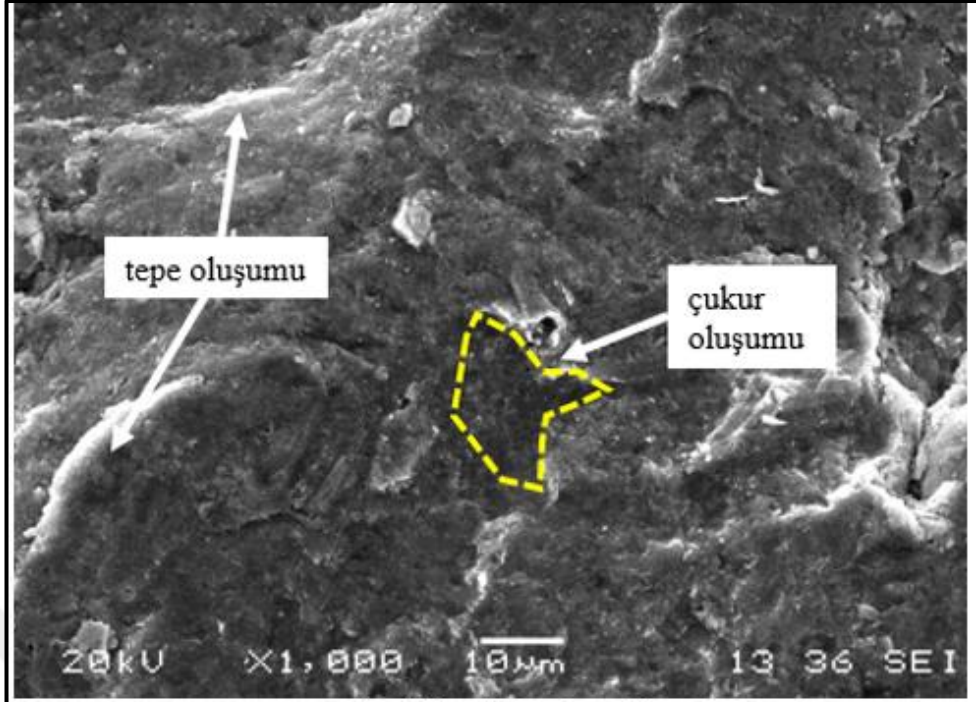
Püskürtme basıncı (2 bar – 4 bar) ile sabit boyutlu (S60) bilyalarla sabit süre boyunca (60 sn) bilyalı dövülen AA7075-T6 alaşımı yüzeyinden elde edilen SEM fotoğrafları Şekil 6.9 ve Şekil 6.10’da verilmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre; püskürtme basıncının 2 bar’dan 4 bar’a artırılması ile yüzeydeki tepe-çukur sayısının arttığı ve numune yüzeyindeki deformasyonların daha belirgin hale geldiği yorumları yapılabilmektedir. Şekil 6.10’da tepe ve çukurların daha net gözlenebilmesi amacıyla SEM fotoğrafı 1000x büyütme ile verilmiştir.



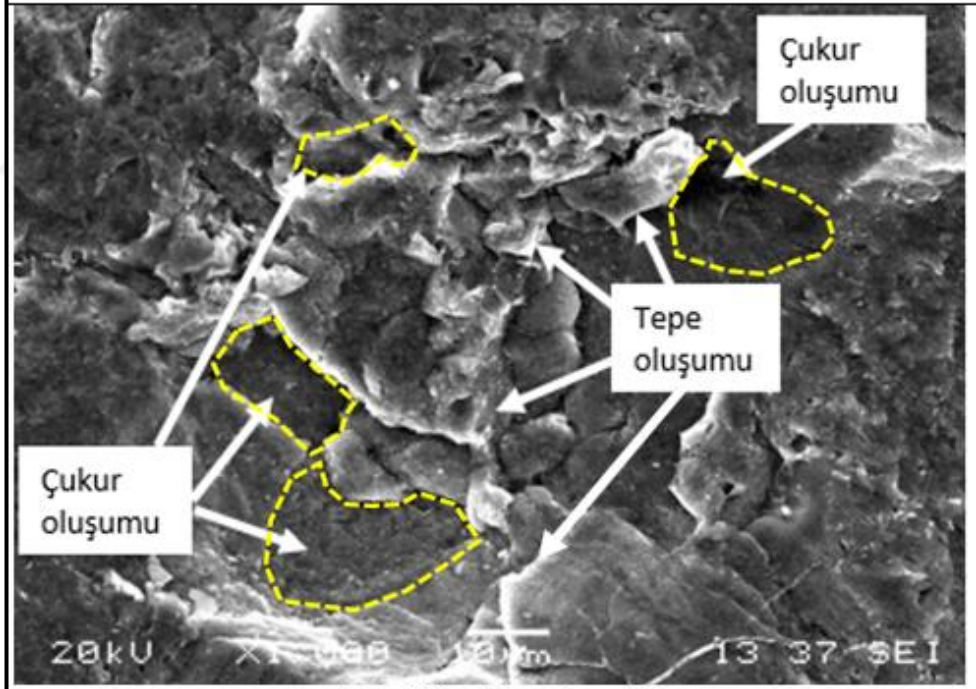


Şekil 6.9. Püskürtme basıncının etkisi (2 bar – 4 bar – 100x büyütme)





a) S60 - 60 saniye - 2 bar



b) S60 - 60 saniye - 4 bar

Şekil 6.10. Püskürtme basıncının etkisi (2 bar – 4 bar – 1000x büyütme)

Literatürde konuyla ilgili gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde; Uros Zupanc ve arkadaşları, AA7075-T651 bilyalı dövülmesi üzerine gerçekleştirdikleri çalışmalarda, bilyalı dövülen malzeme yüzeyinde keskin çatlaklar, kırılmalar, tepe ve çukurlar oluştuğunu tespit etmişlerdir. Malzeme yüzeyinde meydana gelen deformasyonların yüzeydeki pürüzlülük değerleri arttırdığını belirtmişlerdir [38]. B.K.C. Ganesh ve arkadaşları titanyum hedef malzeme üzerinde gerçekleştirdikleri bilyalı dövme işlemleri sonrasında püskürtme basıncındaki artışın yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığını tespit edilmiştir [41].

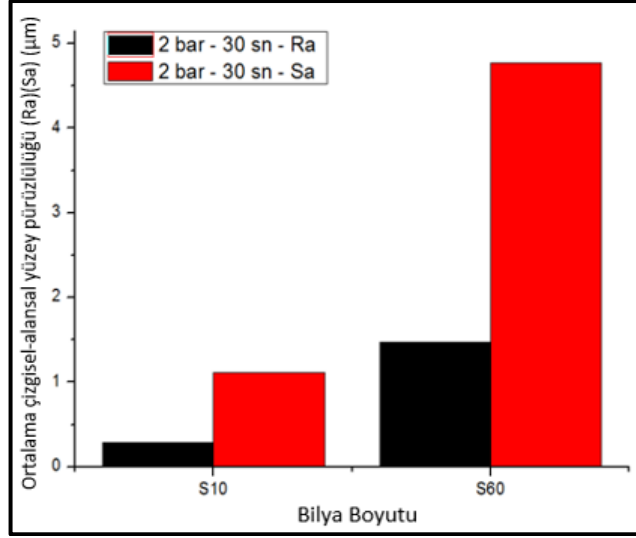
Gerçekleştirilen yüzey pürüzlülüğü analizleri, 3D topoğrafya ve SEM analizleri ve literatürde konuyla ilgili çalışmalar incelendiğinde püskürtme basıncının artmasıyla malzeme yüzeyinde meydana gelen deformasyon miktarının arttığı ve buna bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün arttığı sonucu açıkça ortaya konulmaktadır.

## **6.2. Bilya Boyutunun Yüzey Özelliklerine Etkileri**

Bu bölümde bilya boyutunun yüzey özelliklerine etkisi ele alınacaktır. Bilya boyutunun; sırasıyla yüzey pürüzlülüğüne, 3 boyutlu yüzey topoğrafyasına ve yüzey morfolojisine etkisi irdelenecektir.

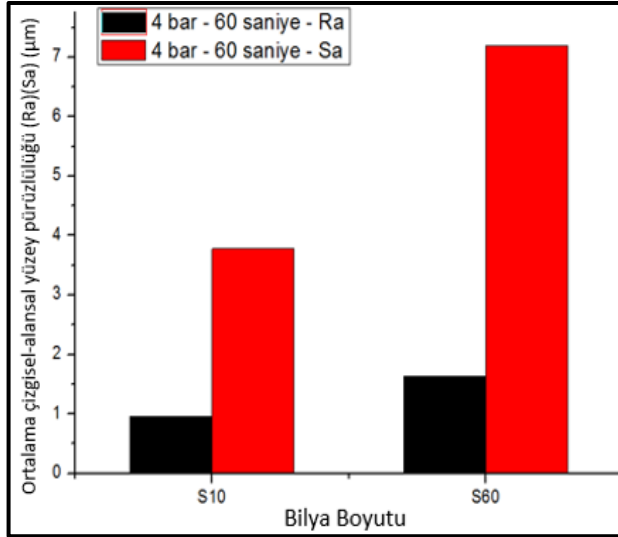
### **6.2.1. Bilya boyutunun yüzey pürüzlülüğüne etkileri**

Şekil 6.11’de S10 ve S60 bilya boyutları kullanılarak, sabit püskürtme basıncında (2 bar) ve sabit dövme süresinde (30 sn) gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemi sonucundaki çizgisel ( $R_a$ ) ve alansal ( $S_a$ ) yüzey pürüzlülüğü değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; S10 boyutundaki bilyalarla yapılan dövme işlemi sonucunda elde edilen çizgisel ve alansal yüzey pürüzlülüğü değerlerinin; S60 boyutlu bilyaların kullanıldığındaki yüzey pürüzlülüğü değerlerinden küçük olduğu görülmektedir. S10 boyutlu olan küçük bilyaların hedef malzeme yüzeyine S60 bilyalara göre daha düşük kütleleri nedeniyle daha düşük kinetik enerjilerde çarpması, hedef malzeme yüzeyinde daha az miktarda plastik deformasyon gerçekleşmesine sebebiyet vermektedir. Dolayısıyla küçük bilyalarla yapılan dövme işlemlerinde AA7075-T6 alaşımı yüzeyindeki pürüzlülük değerlerinin daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 6.11. Bilya boyutunun çizgisel ( $R_a$ ) ve alansal ( $S_a$ ) yüzey pürüzlülüğüne etkisi

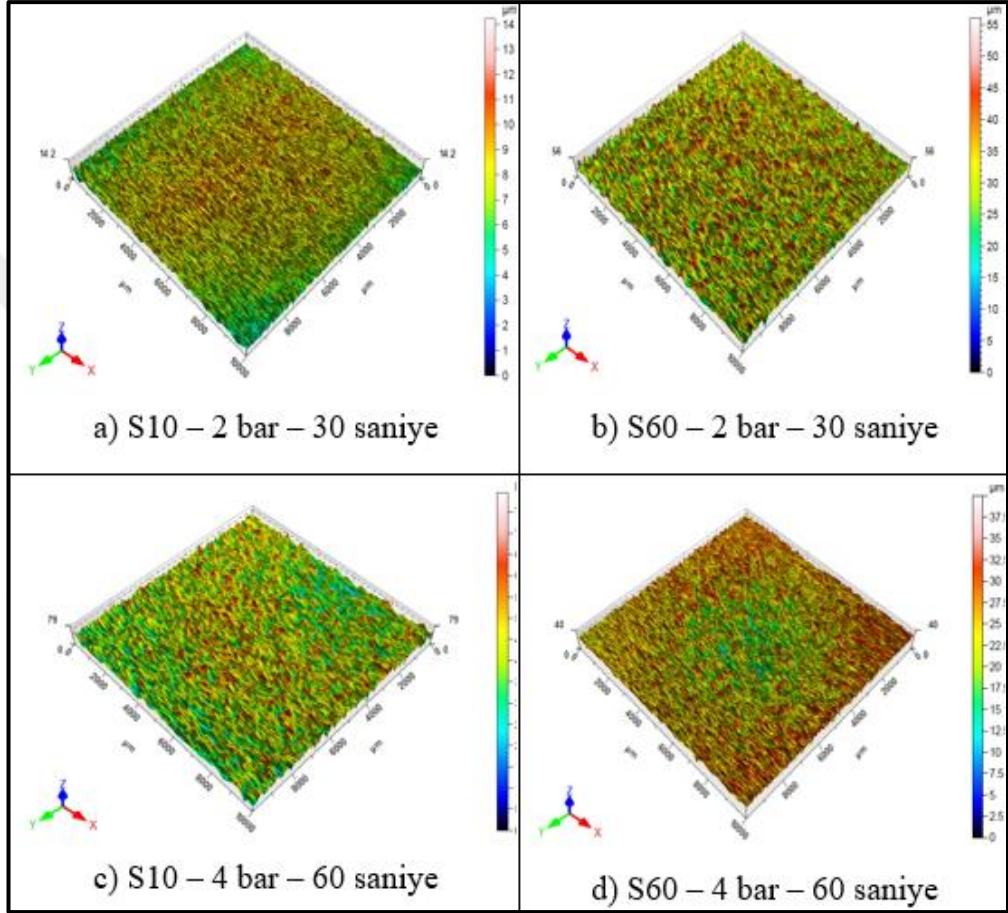
Şekil 6.12' de; sabit püskürtme basıncı (4 bar) ve sabit dövme süresince (60 sn); S10 ve S60 boyutlu bilyaların kullanıldığı bilyalı dövme işlemleri sonuçlarında AA7075-T6 alaşımı yüzeyinde meydana gelen pürüzlülük değerleri belirtilmiştir. Çizgisel ve alansal yüzey pürüzlülük değerlerinin bilya boyutunun artışı ile paralel olarak artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 6.12. Bilya boyutunun çizgisel ( $R_a$ ) ve alansal ( $S_a$ ) yüzey pürüzlülüğüne etkisi

### 7.2.2. Bilya boyutunun 3 boyutlu yüzey topoğrafyasına etkileri

Bu bölümde, S10 ve S60 boyutlu bilyalar kullanılarak, 2 bar ve 4 bar'lık püskürtme basınçları ile 30 ve 60 saniye süresince gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemleri sonucunda; bilya boyutunun AA7075-T6 alaşımının 3 boyutlu yüzey topoğrafyasına etkisi irdelenecektir.

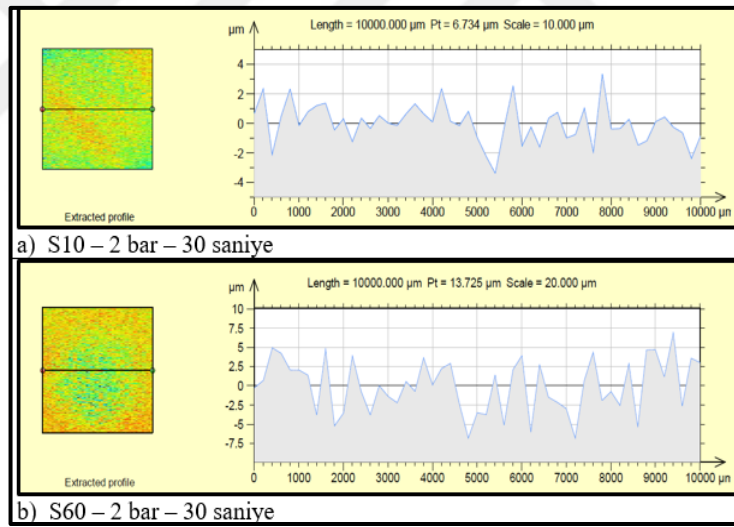


Şekil 6.13. Bilya boyutunun 3 boyutlu yüzey topoğrafyasına etkileri

Şekil 6.13.(a) ve (b)'de; sabit püskürtme basıncı (2 bar) ve sabit dövme süresin (30 sn) ile S10 ve S60 boyutlu bilyalar kullanılarak gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemleri sonucu numune yüzeylerinin 3 boyutlu yüzey topoğrafyaları verilmiştir. Şekil 6.13.a'da maksimum tepelerin 12-13  $\mu\text{m}$  olduğu, Şekil 6.13.b'de maksimum tepelerin 45-50  $\mu\text{m}$  olduğu görülebilmektedir. Bu sonuçlara göre; Şekil 6.13.b'de yani S60 olan daha büyük boyutlu bilyaların kullanıldığı bilyalı dövme işleminde yüzeydeki pürüzlülük değerlerinin, Şekil 6.13.a'da S10 küçük boyutlu bilyalı yapılan bilyalı dövme işlemindeki yüzey pürüzlülüğü değerlerinden büyük olduğu görülmektedir.

Bilya boyutu artışı ile yüzeyde meydana gelen deformasyon miktarının arttığı 3 boyutlu yüzey topografyaları yardımıyla net bir şekilde belirlenmiştir. Şekil 6.13’de sabit 4 bar püskürtme basıncında ve 60 saniye süresince bilyalı dövülen numunelerde de bilya boyutu artışı ile deformasyonun net bir şekilde arttığı görülebilmektedir.

Şekil 6.14’te, sabit püskürtme basıncında (2 bar) ve sabit bilyalı dövme süresince (30 sn) gerçekleştirilen; S10 ve S60 boyutlu bilyaların kullanıldığı bilyalı dövme işlemleri sonucunda, bilya boyutunun yüzey morfolojisine etkisinin irdelenmesi amacıyla numune yüzeyinden elde edilen bir kesit profil verilmiştir. Şekil 6.14’te farklı boyutlarda bilyalar ile dövülen numunelerin çizgisel pürüzlülük değerleri gösterilmiştir. Bilya boyut artışı ile yüzeyde oluşan çukur ve vadilerin yüksekliklerin değişimi net bir şekilde görülmektedir. Buna göre Şekil 6.14.a’daki yüzey pürüzlülüğünün Şekil 6.14.b’dekinin yaklaşık yarısı olduğu grafik skalasından yorumlanabilmektedir.



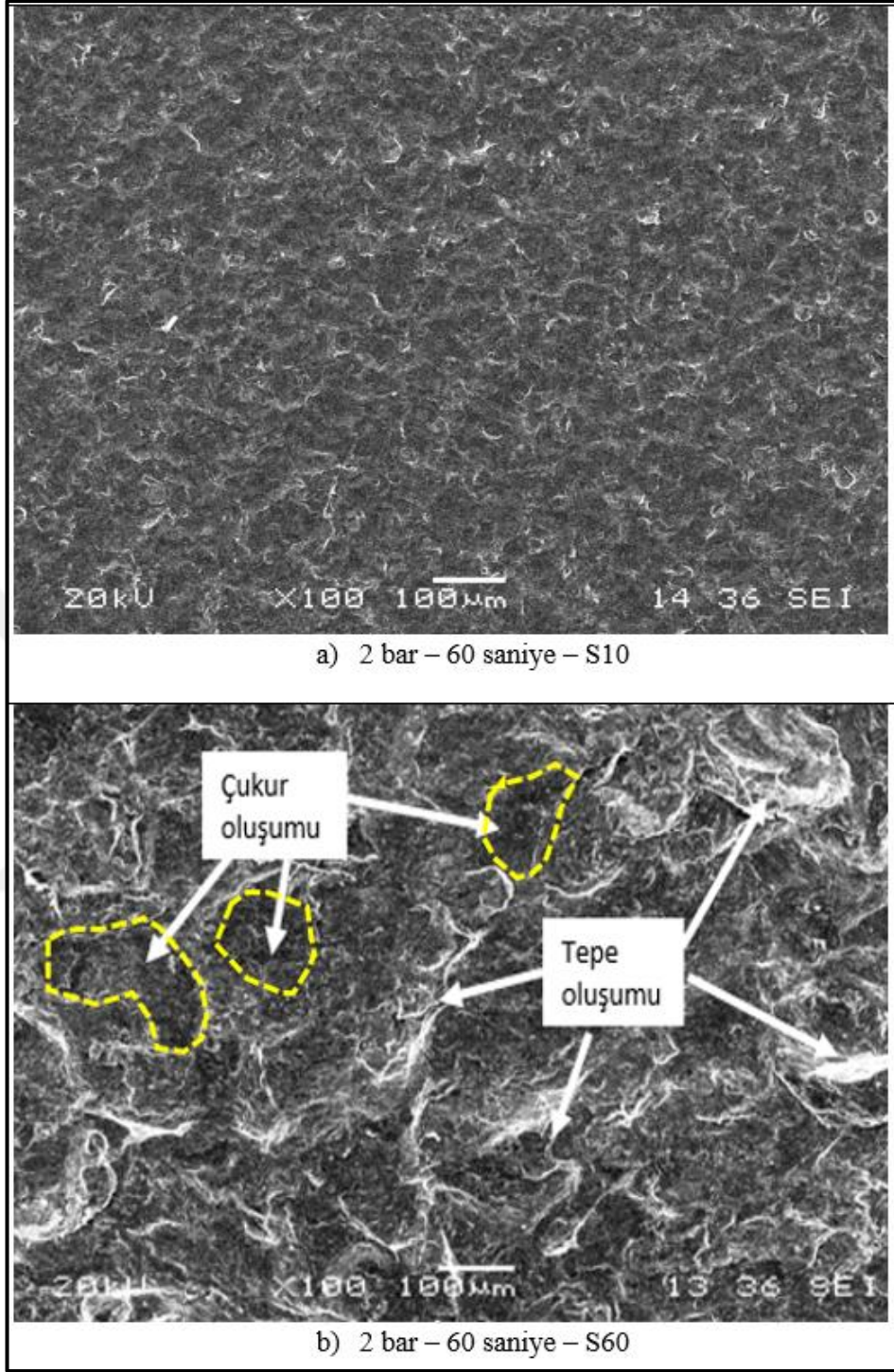
Şekil 6.14. Bilya boyut etkisi için AA7075-T6 yüzey kesit profili

### 6.2.3. Bilya boyutunun yüzey morfolojisine etkileri

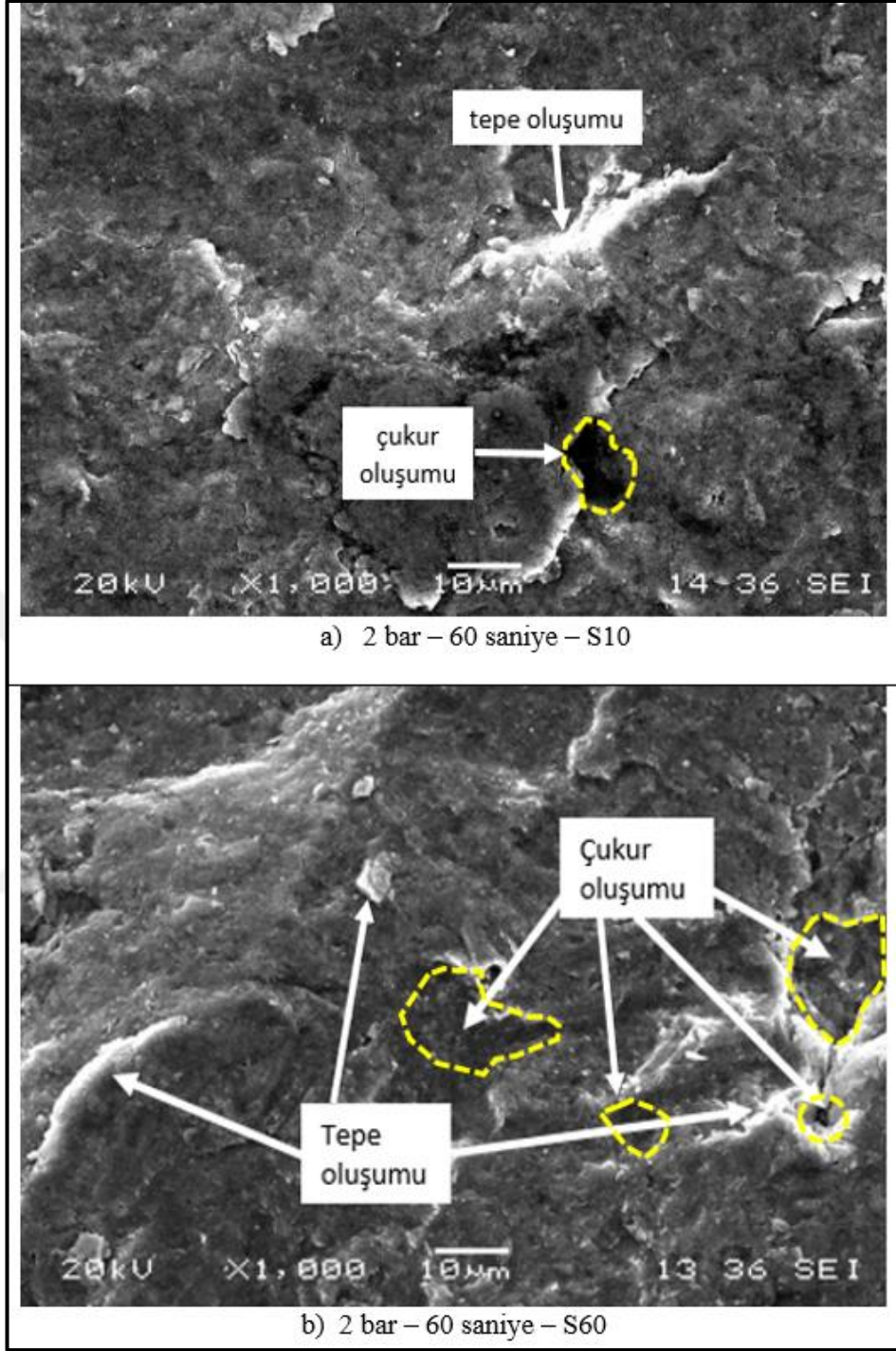
Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'daki SEM fotoğraflarında; sabit püskürtme basıncında (2 bar) ve sabit dövme süresince (60 sn), S10 ve S60 bilya boyutlu bilyalar ile dövülen numunelerin yüzey morfolojileri verilmiştir. Büyük boyutlu bilyalar ile dövülen numunelerin yüzeylerinde küçük boyutlu bilyalar ile dövülen numunelere göre daha belirgin deformasyon bölgelerinin oluştuğu, tepe ve çukurların arttığı tespit edilmiştir. Şekil 6.16'da daha yüksek büyütmede (1000x) verilen SEM fotoğraflarında bilya boyutunun yüzeyde meydana getirdiği tahribat daha net bir şekilde irdelenebilmiştir.







Şekil 6.15. Bilya boyutunun etkisi (S10 – S60 – 100x büyütme)

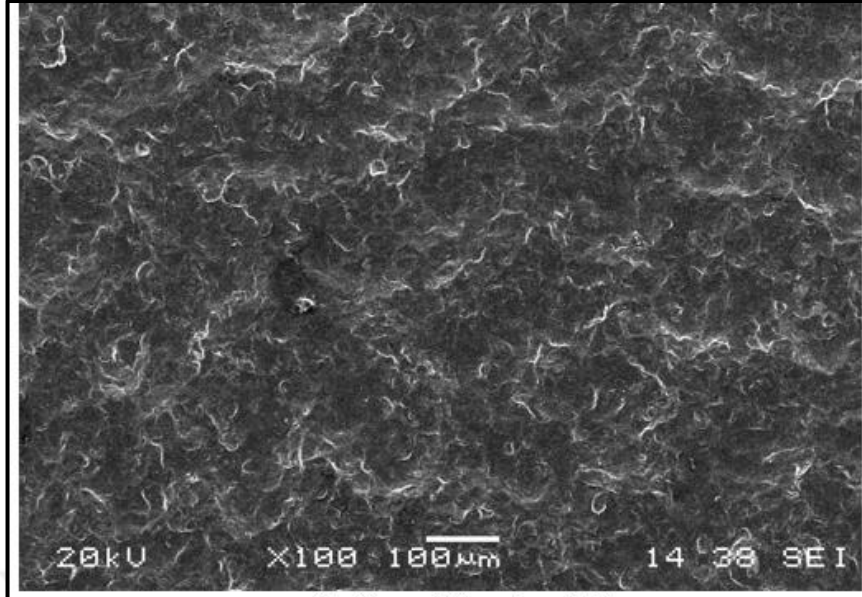


Şekil 6.16. Bilya boyutunun etkisi (S10 – S60 – 1000x büyütme)

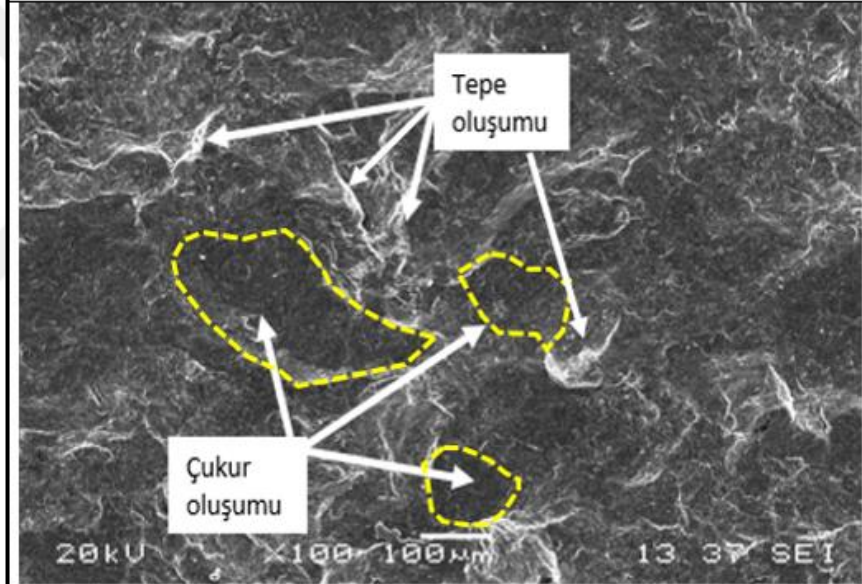


Şekil 6.17 ve Şekil 6.18’de; sabit püskürtme basıncında (4 bar) ve sabit dövme süresince (60 sn), S10 ve S60 boyutlarındaki bilyalarla yapılan bilyalı dövme işlemleri sonucunda elde edilen SEM fotoğrafları yer almaktadır. Bilya boyutu artışının AA7075-T6 malzeme yüzeyinde daha fazla deformasyona sebebiyet verdiği yorumları yapılabilmektedir. Şekil 6.18’de detaylı olarak verilen SEM fotoğraflarından yararlanarak, bilyalı dövme parametrelerinden bilya boyutu artışının yüzeyde meydana getirdiği tepe ve çukurların daha belirgin olduğu sonucuna varılabilmektedir.



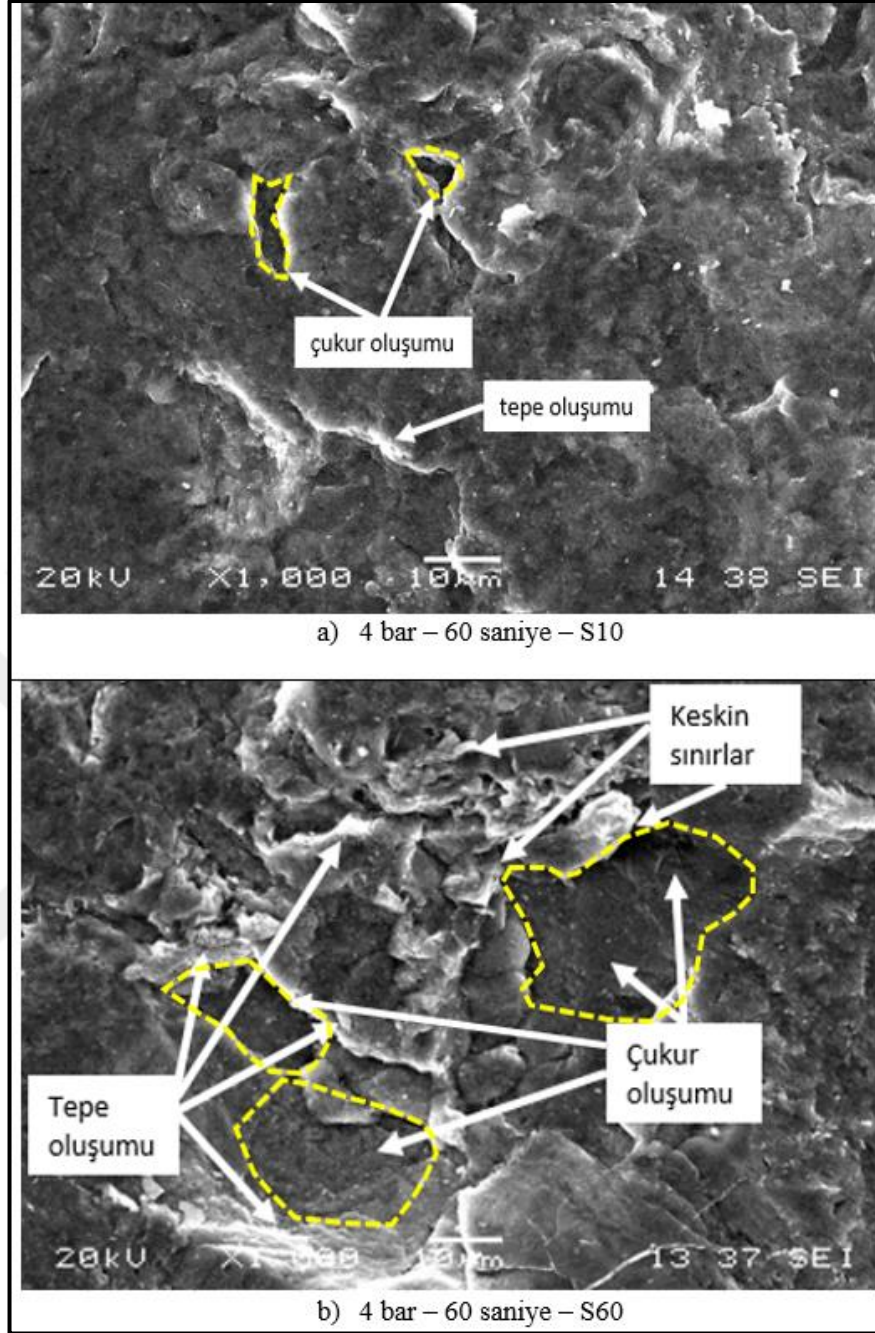


a) 4 bar – 60 saniye – S10



b) 4 bar – 60 saniye – S60

Şekil 6.17. Bilya boyutunun etkisi (S10 – S60 – 100x büyütme)



Şekil 6.18. Bilya boyutunun etkisi (S10 – S60 – 1000x büyütme)

Aymen A.Ahmed ve arkadaşları, çelik malzemeler üzerinde 3 farklı bilya boyutuyla yaptıkları bilyalı dövme işlemlerinin sonuçlarına göre; bilya boyutunun artışıyla yüzeyde oluşturulan plastik deformasyonun arttığını ve dolayısıyla yüzeydeki pürüzlülük değerlerini arttırdığı sonucuna varmışlardır [96]. Shoichi Kikuchi ve arkadaşları, 5056 alüminyum üzerindeki bilyalı dövme işleminde bilya boyutu ve püskürtme basıncının yüzey pürüzlülüğüne etkisini irdeledikleri çalışmalarında, yüzey pürüzlülüğünün bilya boyutunun artmasına bağlı olarak arttığı sonucuna varmışlardır [86].

Tez çalışmasında da; Bölüm 6.2.1’de elde edilen sonuçlara ek olarak; Bölüm 6.2.1’deki SEM fotoğrafları sonuçlarında incelendiğinde, bilyalı dövme işlemlerinde bilya boyutunun artırılmasıyla hedef malzeme yüzeyindeki pürüzlülüğünün arttığı sonucuna varılmıştır.

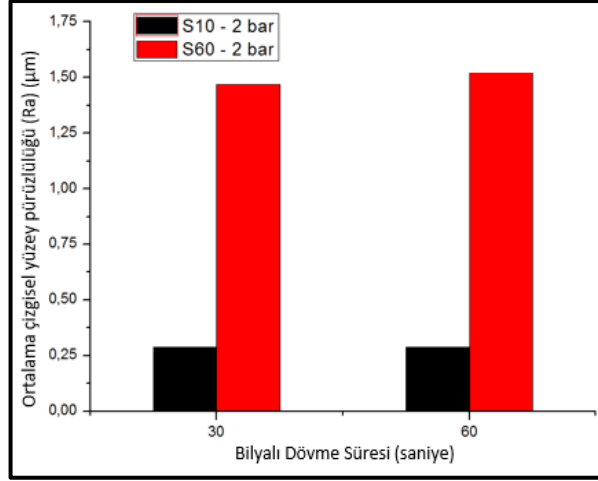
### **6.3. Bilyalı Dövme Süresinin Yüzey Özelliklerine Etkileri**

Bu bölümde bilyalı dövme parametrelerinden bilyalı dövme süresinin yüzey özelliklerine etkisi ele alınacaktır. Bilyalı dövme süresinin; sırasıyla yüzey pürüzlülüğüne ve 3 boyutlu yüzey topoğrafyasına etkileri irdelenecektir.

#### **6.3.1. Bilyalı dövme süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri**

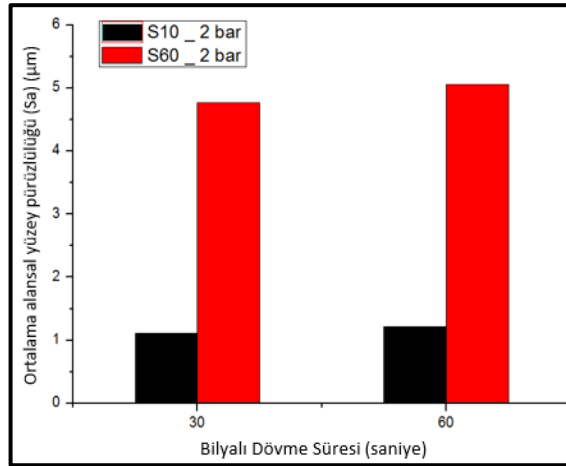
Tez çalışmasının bu bölümünde; S10 ve S60 boyutlu bilyalar kullanılarak, 2 bar ve 4 bar’lık püskürtme basınçlarıyla 30 ve 60 saniye boyunca yapılan bilyalı dövme işlemlerinde; AA7075-T6 alaşımlarının yüzeylerindeki ortalama çizgisel ve alansal yüzey pürüzlülüğü sonuçları değerlendirilmiştir.

30 ve 60 saniye süresince sabit püskürtme basıncında (2 bar), S10 ve S60 boyutlu bilyalar kullanılarak bilyalı dövülen AA7075-T6 numune yüzeyindeki ortalama çizgisel pürüzlülük değerleri Şekil 6.19’te verilmiştir. Şekil 6.19’deki ortalama çizgisel pürüzlülük değerlerinin değişiminden de anlaşılacağı üzere pürüzlülük değerine bilyalı dövme süresi değişiminin etkisi, püskürtme basıncı ve bilya boyutu değişiminin etkisine göre oldukça azdır. Dolayısıyla bilyalı dövme süresinin bilyalı dövme işlemine ciddi bir etkide bulunmadığı yorumu yapılabilmektedir.



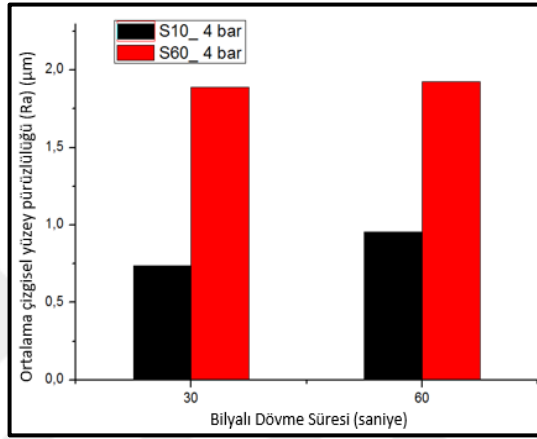
Şekil 6.19. Bilyalı dövme süresinin ortalama çizgisel ( $R_a$ ) yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Şekil 6.20’da sabit püskürtme basıncında (2 bar), S10 ve S60 boyutlu bilyalar ile 30 ve 60 saniye süresince gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemleri sonucunda AA7075-T6 alaşımı yüzeyinde meydana gelen alansal yüzey pürüzlülüğü değerleri verilmiştir. Alansal yüzey pürüzlülüğü sonuçlarına bakılarak da bilyalı dövme süresindeki artışın, yüzey pürüzlülük değerlerinde ihmal edilebilecek kadar bir artışa neden olduğu yorumu yapılabilmektedir.



Şekil 6.20. Bilyalı dövme süresinin ortalama alansal ( $S_a$ ) yüzey pürüzlülüğüne etkisi

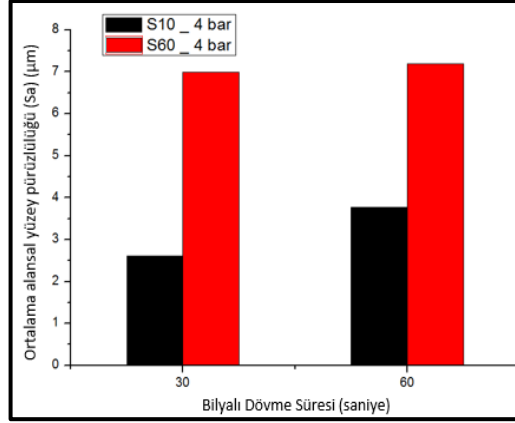
Şekil 6.21 ve Şekil 6.22’de bilyalı dövme süresinin irdelenmesi amacıyla S10 ve S60 boyutlu bilyaların kullanıldığı, sabit püskürtme basıncında (4 bar), 30 ve 60 saniye dövülen AA7075-T6 numune yüzeyindeki çizgisel ve alansal pürüzlülük değerleri de araştırılmıştır. Şekil 6.21’de çizgisel yüzey pürüzlülüğü Şekil 6.22’de alansal yüzey pürüzlülüğü değerleri irdelenmiştir. Bu iki grafikten elde edilen sonuçlara göre; bilyalı dövme süresindeki değişiklik çizgisel ve alansal yüzey pürüzlülüğü değerlerinde etkin bir değişime sebep olmamıştır.



Şekil 6.21. Bilyalı dövme süresinin çizgisel ( $R_a$ ) yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Şekil 6.22’de; S10 ve S60 boyutlu bilyaların 4 bar püskürtme basıncı ile 30 saniye ve 60 saniye boyunca numune yüzeyinde oluşturdukları alansal yüzey pürüzlülüğü araştırılmıştır. Çizgisel yüzey pürüzlülüğünde olduğu gibi alansal yüzey pürüzlülüğünde de elde edilen sonuçlara göre; bilyalı dövme süresinin arttırılması ile yüzey pürüzlülüğünün çok az da olsa artış göstermiş olduğudur. Fakat bu artışın yüzey pürüzlülük değerlerinde ciddi bir artışa sebep olmadığı yorumu yapılabilir.

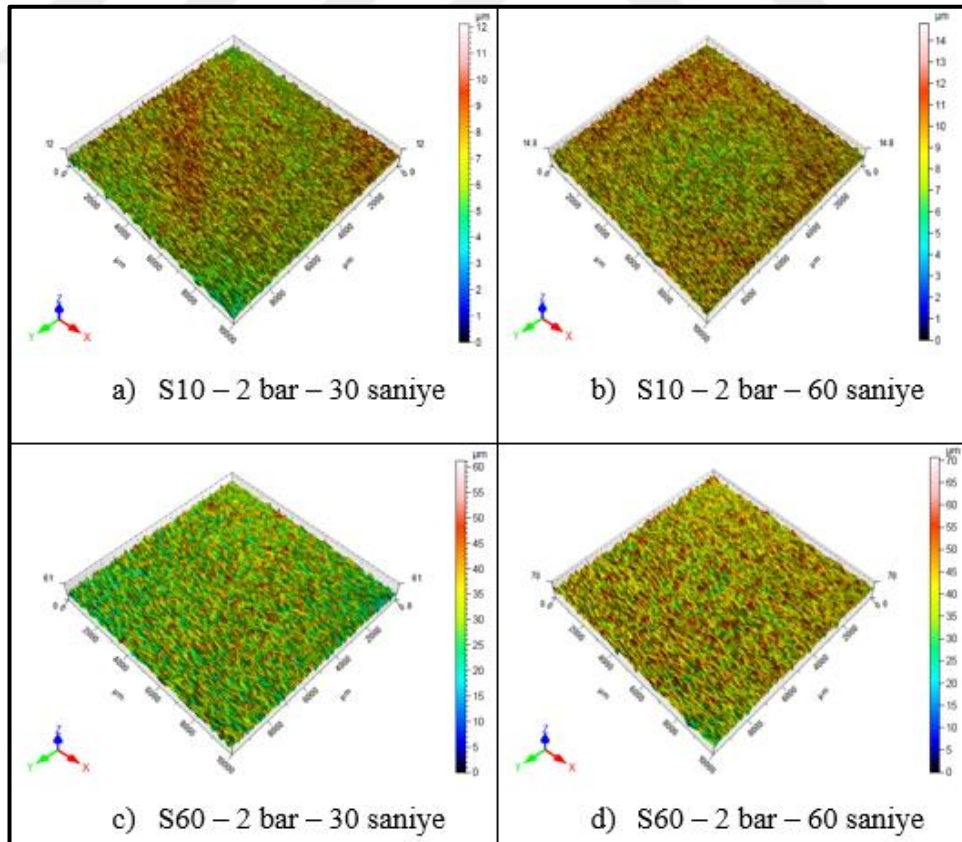




Şekil 6.22. Bilyalı dövme süresinin alansal ( $S_a$ ) yüzey pürüzlülüğüne etkisi

### 6.3.2. Bilyalı dövme süresinin 3 boyutlu yüzey topoğrafyasına etkileri

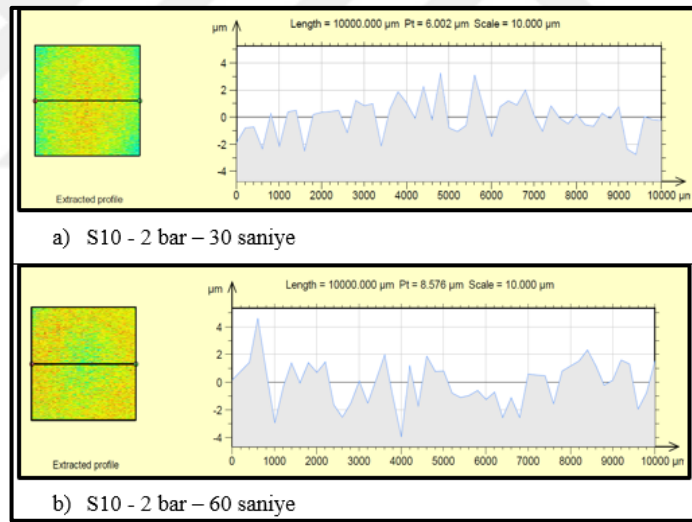
Bu bölümde, S10 ve S60 boyutlu bilyalar kullanılarak, sabit püskürtme basıncında (2 bar), 30 ve 60 saniye süresince gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemleri sonucunda; bilyalı dövme süresinin AA7075-T6 alaşımının 3 boyutlu yüzey topoğrafyasına etkisi irdelenecektir.



Şekil 6.23. Bilyalı dövme süresinin 3 boyutlu yüzey topoğrafyasına etkileri

Şekil 6.23.(a) ve (b)'de; sabit boyutlu bilyalarla (S10) ve sabit püskürtme basıncında (2 bar), 30 ve 60 saniye boyunca yapılan bilyalı dövme sonucu oluşan 3 boyutlu yüzey topoğrafyaları yer almaktadır. Yüzey pürüzlülüğü skalası irdelendiğinde bilyalı dövme süresinin; dövülen yüzeyin pürüzlülüğe ciddi bir etkide bulunmadığı yorumu yapılabilmektedir. Şekil 6.23.(c) ve (d) irdelendiğinde, kırmızı ile belirtilen yüzeydeki tepe değerlerinin maksimum değerlerinin iki topoğrafya sonucunda da birbirine oldukça yakın olduğu görülebilmektedir.

Şekil 6.24'te; sabit püskürtme basıncında (2 bar) ve sabit boyutlu bilyalarla (S10), 30 ve 60 saniye süresince gerçekleştirilen bilyalı dövme işlemleri sonucunda elde edilen yüzeyin çizgisel pürüzlülük profili verilmiştir. Bu sonuçlara göre; yüzey pürüzlülük değerlerinin birbirine yakın değerler olduğu; dolayısıyla bilyalı dövme süresinin numune yüzey pürüzlülüğü değerlerinde ciddi bir etkisinin olmadığı sonucuna varılabilmektedir.



Şekil 6.24. Bilya dövme süresinin etkisi için AA7075-T6 yüzey kesit profili

Yong-Seog Nam ve arkadaşları bilyalı dövdükleri A2124-T851 alüminyum alaşımının yüzey özelliklerini SEM analizleriyle incelemiştir. 2 ayrı sürede gerçekleştirilen deneylerde, bilyalı dövme süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemeyi amaçlamışlardır. Yapılan deneylerde 130 ve 260 saniye boyunca alüminyum yüzeyini bilyalı dövmeye maruz bırakmışlardır. Sonuç olarak belirlenen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri 7,20 µm ve 7,77 µm'dir.



Yüzeydeki pürüzlülük değerlerinde dövme süresinin artışına bağlı olarak; ihmal edilebilecek kadar bir artış tespit edilmiştir [25]. Tez çalışmasında da literatür çalışmasında elde edilen sonuçlara paralel olarak; yüzey pürüzlülük değerlerine bilyalı dövme süresinin etkisi ihmal edilebilecek kadar az olduğu sonucuna varılmıştır.

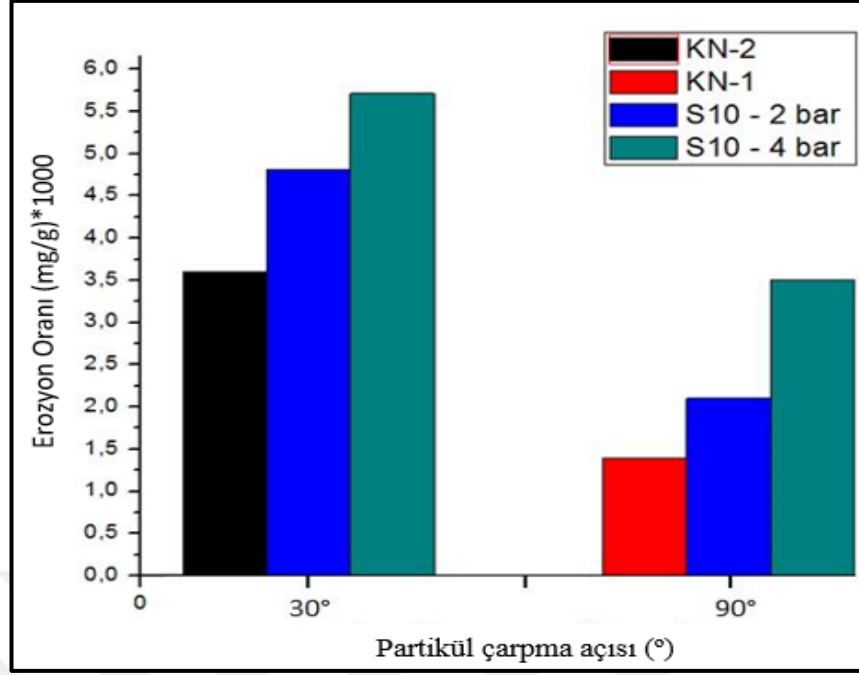


## **7. BİLYALI DÖVMENİN AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ EROZİF AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİLERİ**

Literatürde bilyalı dövmenin malzemelerin yüzey ve yüzey altı mekanik özelliklerini, mikro sertlik değerlerini, mikro yapılarını, kalıntı gerilmelerini değiştirdiği sıkça belirtilmiştir [32, 33, 38-40]. Literatür çalışmaları ve tez çalışmasında bu bölüme kadar sunulan çalışmalar göze alındığında bilyalı dövmenin alüminyum alaşımlarının erozif aşınma dayanımını nasıl etkileyeceği merak edilen bir araştırma konusudur. Bu bölümde ilk olarak bilyalı dövmenin alüminyum alaşımının erozif aşınma davranışı üzerindeki etkileri irdelenecektir. Bu incelemeyi takiben bilyalı dövmede püskürtme basıncı ve bilya boyutu parametrelerinin alüminyum alaşımının erozif aşınma davranışına etkileri ortaya konulacaktır.

### **7.1. Bilyalı Dövmenin AA7075 Alaşımının Erozif Aşınma Davranışına Etkisi**

Literatür taramasında, bilyalı dövmenin malzemelerin erozif aşınma davranışlarına etkilerini inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Tez çalışması kurgulanırken erozif aşınmanın oldukça karmaşık bir aşınma süreci olması ve bilyalı dövme ile AA7075 alaşımının yüzey ve yüzey altı özelliklerinde önemli değişimler meydana getireceği göz önünde bulundurulmuş ve bu nedenle bilyalı dövme sonrası malzemenin erozif aşınma davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Erozif aşınma deneylerinde kullanılan alümina partiküllerin boyutu 60 mesh (212-300  $\mu\text{m}$ ), aşındırma süresi 20 saniye, püskürtme basıncı 1,5 bar olarak sabit tutulmuştur ve numuneler 30° ve 90° olmak üzere 2 farklı partikül çarpma açısında aşındırılmıştır.



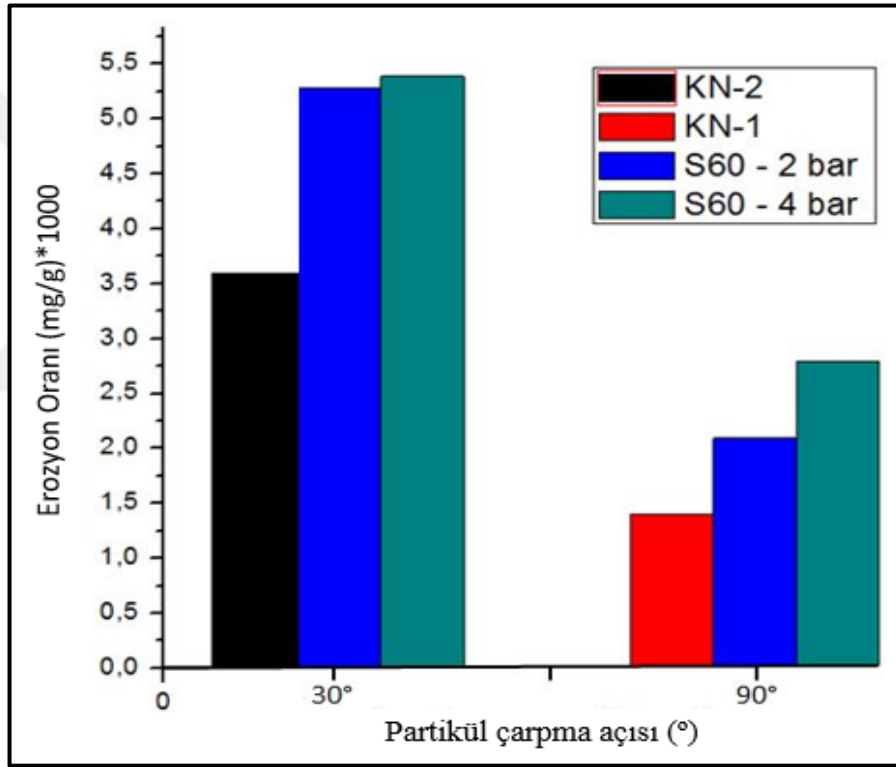
Şekil 7.1. Bilyalı dövülen ve dövülmeyen yüzeylerde erozyon oranları (Bilyalı dövme parametreleri: S10, 2-4 bar, 60 saniye), (Erozif aşınma parametreleri: 1.5 bar, 10 saniye, 30 ve 90 derece)

Şekil 7.1 ve Şekil 7.2’de bilyalı dövme işlemine tabi tutulan ve bilyalı dövme işlemi uygulanmayan AA7075-T6 kontrol numunelerinin yüzeylerinde gerçekleştirilen erozif aşınma deneylerinin sonuçları karşılaştırmalı bir şekilde yer almaktadır. Bilyalı dövülen numuneler; S10 ve S60 bilya boyutu, 2 bar ve 4 bar püskürtme basıncı, sabit bilyalı dövme süresi (60 sn) parametreleri ile bilyalı dövmeye tabi tutulmuşlardır. Bilyalı dövülmeyen yüzeyler; kontrol numuneleri (KN-1 ve KN-2) şeklinde ifade edilmektedir ve bu numunelerin yüzeyleri ayna parlaklığına kadar metalografik olarak parlatılmıştır.

Şekil 7.1’de, 30°’lik partikül çarpma açısıyla yapılan erozif aşınma sonuçları irdelendiğinde, sabit bilya boyutunda (S10), sabit bilyalı dövme süresince (60 sn) dövülen 2 ve 4 bar’lık püskürtme basınçlarında, 2 adet numune yüzeyindeki erozyon oranının; bilyalı dövülmeyen kontrol numunesinin (KN-2) yüzeyindeki erozyon oranına göre; yaklaşık olarak %58 oranında bir artış gösterdiği tespit edilmiştir. Tez çalışmasında yapılan bilyalı dövme deneyleri sonucunda hedef malzeme yüzeyinde artan pürüzlülük ve yüzeyde oluşan birçok tepe ve çukur gözlenmiştir (Bölüm 7.3.1 ve Bölüm 7.2.3). Erozyon aşınma deneylerinde bilyalı dövme ile deforme edilmiş yüzeylerde bilyalı dövülmemiş yüzeylere kıyasla yüzeyden daha fazla malzeme kaybı

gözenmiştir. Bu duruma bilyalı dövme ile topoğrafyası değişen ve yüzey pürüzlülüğü artan numunelerde aşındırıcı partikül ile yüzey arasında daha fazla etkileşim meydana geldiği ve bu neden ile yüzeyden daha fazla malzeme kopmasının neden olabileceği söylenebilir. Bu durum şematik gösterimler ile ileriki bölümlerde tekrar irdelenecektir.

Şekil 7.1’de, 90°’lik partikül çarpma açısıyla yapılan erozif aşınma sonuçları irdelendiğinde, sabit bilya boyutunda (S10), 2 ve 4 bar püskürtme basıncında, sabit bilyalı dövme süresince (60 sn) bilyalı dövülen 2 adet numune yüzeyindeki erozyon oranının, bilyalı dövülmeyen kontrol numunesi (KN-1) yüzeyindeki erozyon oranına göre maksimum %150 oranında daha yüksek olduğu gözlenmiştir.



Şekil 7.2. Bilyalı dövülen ve dövülmeyen yüzeylerde erozyon oranları (Bilyalı dövme parametreleri: S60, 2-4 bar, 60 saniye), (Erozif aşınma parametreleri: 1.5 bar, 10 saniye, 30 ve 90 derece)

Şekil 7.2’de 30°’de partikül çarpma açısıyla erozif aşındırılan; sabit boyutlu bilyalarla (S60), 2 ve 4 bar püskürtme basıncında, sabit bilyalı dövme süresince (60 sn) bilyalı dövülen 2 adet numune yüzeyinde oluşan erozyon oranının; bilyalı dövülmeyen kontrol numunesinin (KN-2) yüzeyinde oluşan erozyon oranına göre maksimum % 50 oranında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bilyalı dövülmüş yüzeyde oluşan

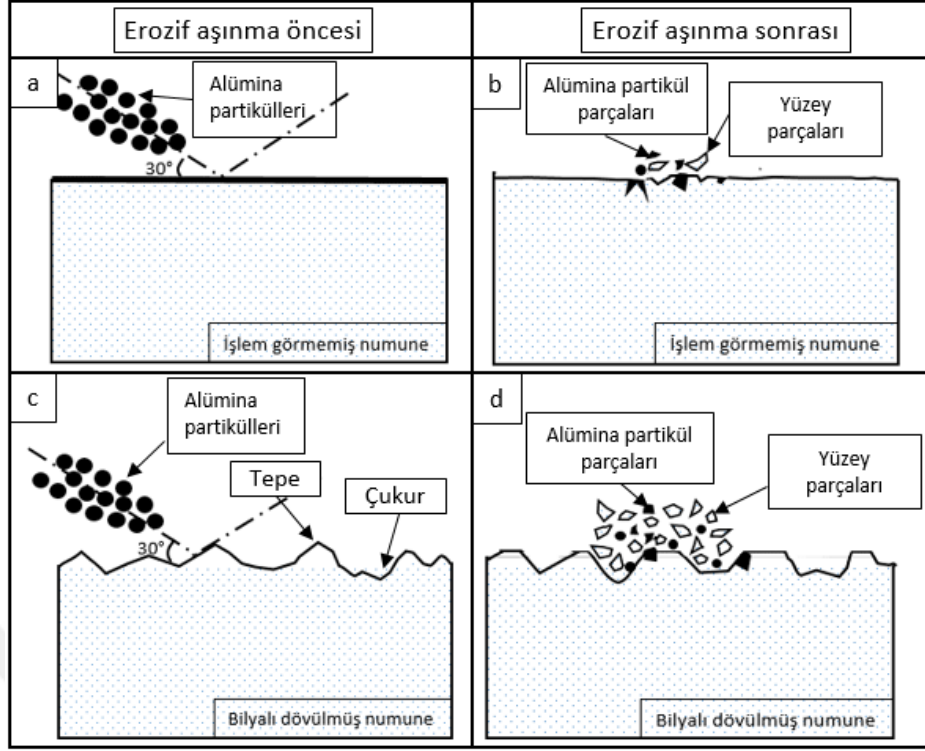
pürüzlülük sebebiyle, erozif aşınmanın bilyalı dövülmeyen parlak yüzeye göre daha fazla malzeme kaybına yol açtığı düşünülmektedir.

Şekil 7.2’de 90°’de partikül çarpma açısıyla aşındırılan; sabit boyutlu bilyalarla (S60), 2 ve 4 bar püskürtme basıncında, sabit bilyalı dövme süresince 60 (sn) bilyalı dövülen 2 adet numune yüzeyinin erozyon oranının; bilyalı dövülmeyen kontrol numunesi (KN-1) yüzeyinin erozyon oranına göre %100 daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre; bilyalı dövme işlemlerinin erozif aşınma dayanımını olumsuz yönde etkilediği sonucuna varılmıştır.

Erozif aşınma deneyleri öncesinde literatürde yer alan çalışmalar göz önünde bulundurularak bilyalı dövme ile malzemenin gelişen yüzey ve yüzey altı mekanik ve mikroyapısal özellikleri nedeniyle bilyalı dövme sonucunda alüminyum alaşımının erozif aşınma dayanımında artış gözlenmesi beklenmiştir. Tez çalışmasının önemli sonuçlarından biri; erozif aşınmanın bilyalı dövülen yüzeylerde öngörülenin aksine; bilyalı dövülmeyen yüzeylere göre daha fazla malzeme kaybına sebep olduğu, dolayısıyla bilyalı dövmenin erozif aşınma dayanımını kötüleştirmesidir. Bu sonucun daha önce literatürde çalışılmamış olduğunun altını tekrar çizilerek, bilyalı dövmenin erozif aşınmaya etkisinin literatüre kazandırıldığı söylenebilir.

Şekil 7.3’te bilyalı dövülmüş bir malzemenin erozif aşınma esnasında bilyalı dövme işlemi sebebiyle değişen erozif aşınma mekanizması şematik olarak açıklanmıştır. Şekil 7.3 incelendiğinde, bilyalı dövme ile oluşan tepelerin aşındırıcı partiküllerin tekrarlı darbesi ile kolayca koptuğu ve buna bağlı olarak bilyalı dövülmüş yüzeyin erozif aşınmanın hızlanmasına neden olan bir mekanizmanın ortaya çıkmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Şekil 7.3.c ve Şekil 7.3.d’de 30°’lik partikül çarpma açısı ile yüzeye yüksek hızlarda gelen aşındırıcı partiküllerin bilyalı dövme nedeniyle yüksek tepe ve derin çukurların olduğu yüzeyden kolayca parça kopardığı görülmektedir.

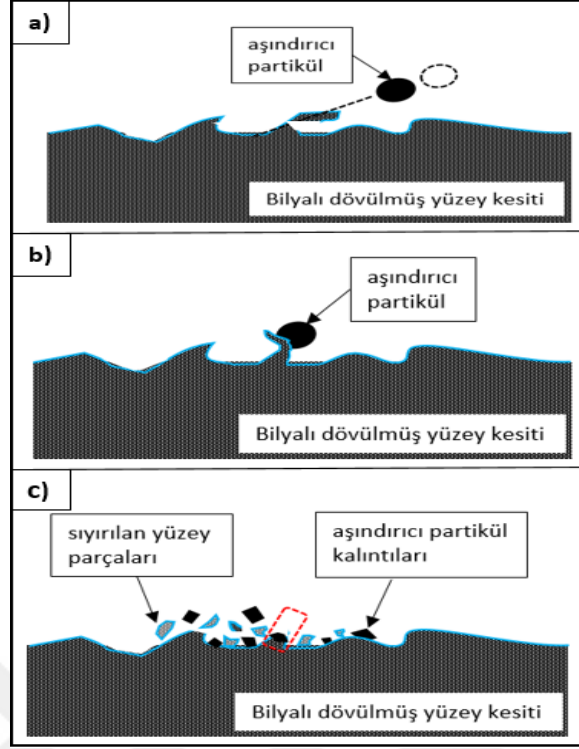
Bu sonuçlar irdelendiğinde, bilyalı dövülmüş olan sünek malzemelerde erozif aşınma ile yüzeyden kaybedilen malzeme miktarının arttığı gözlenmiştir. Böylece erozyon oranının arttığı sonucuna varılmaktadır. Özetle; sünek malzemelerde bilyalı dövme işleminin uygulanması, aşınma dayanımını olumsuz şekilde etkilediği sonucuna varılmıştır. Şekil 7.3’ te şematik olarak sunulan mekanizmalar ile bu sonucun kök nedeninin açıklanması amaçlanmıştır.



Şekil 7.3. Bilyalı dövmenin erozif aşınma mekanizmalarına etkisi

Şekil 7.4'te bilyalı dövme nedeniyle yüzeyi deformasyona uğramış malzemenin üzerine gönderilen aşındırıcı partiküllerden çarpışma görüntüleri şematik olarak verilmiştir. Şekil 7.4.b'de aşındırıcı partiküllerin bilyalı dövme ile meydana gelen şiddetli plastik deformasyonlar nedeniyle yüzeyde oluşmuş çapak benzeri tepelere çarpışma anı resmedilmiştir. Şekil 7.4.c'de ise; aşındırıcı partiküllerin bilyalı dövme ile oluşan, sertliği yüksek gevrek plastik deformasyon bölgelerinin aşındırıcı partiküllerin etkisi ile parçalanması şematik olarak gösterilmiştir.

Bilyalı dövme sonucunda alüminyum alaşımının yüzeyin sertleşmesi nedeniyle erozif aşınma dayanımının artacağı beklenebilir. Tez çalışmasında bilyalı dövme ile değişen yüzey topografyası Şekil 7.3'te ve yüzeyde meydana gelen pekleşmiş sert ve yüzeyden sıyrılmak üzere olan deformasyon bölgeleri Şekil 7.4'teki ilgili şekillerde şematik olarak gösterilen mekanizmalar ile gösterilmiş, bu durumun erozif aşınma sürecinde malzeme kaybını kolaylaştırdığı ortaya konulmuştur. Şematik olarak verilen bu mekanizmalar, bilyalı dövme sonucunda erozif aşınma davranışının değişimini ve erozif aşınma direncinin azalmasını net bir şekilde göstermektedir.



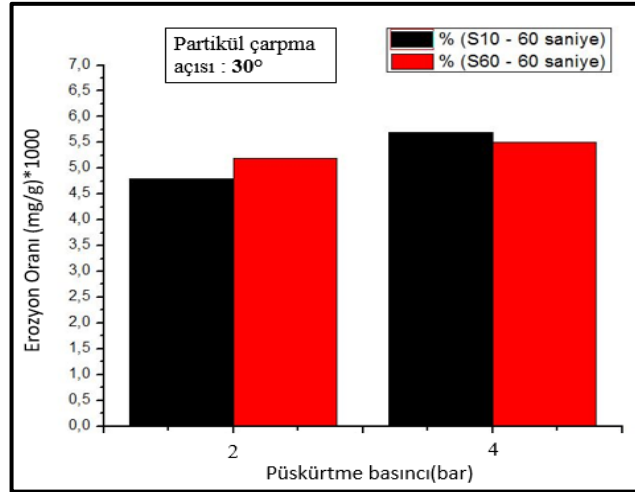
Şekil 7.4. Bilyalı dövmenin erozif aşınma mekanizmalarına etkisi

## 7.2. Farklı Bilyalı Dövme Parametrelerinin Erozif Aşınmaya Etkileri

Tez çalışmasında 6. bölümdeki deneysel çalışma sonuçlarıyla detaylı olarak belirtildiği üzere, bilya dövme işlemleri püskürtme basıncı, bilya boyutu ve bilyalı dövme süresi gibi 3 ayrı parametrenin değişimi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; püskürtme basıncının ve bilya boyutunun artışıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı tespit edilmiştir. Dövme süresinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde ciddi bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır. Bilyalı dövülen yüzeyler, daha sonra erozif olarak aşındırılarak bilyalı dövme parametrelerinin erozif aşınma üzerindeki etkisinin irdelenmesi amaçlanmıştır. Erozif aşınma deneyleri; 60 mesh boyutlarında alümina aşındırıcı partikülleri 30° ve 90°'lik partikül çarpma açısı ile 1,5 bar basınç ile bilyalı dövülmüş yüzeylere sabit 20 saniye boyunca uygulanmıştır. Dolayısıyla bu bölümde sırasıyla; püskürtme basıncı ve bilya boyutu parametrelerinin değişimiyle erozyon oranının, buna bağlı olarak bu parametrelerin erozif aşınma dayanımına olan etkisinin irdelenmesi amaçlanmıştır.

### 7.2.1. Bilyalı dövmede kullanılan püskürtme basıncının erozif aşınmaya etkisi

Bilyalı dövme işlemlerinde 2 ve 4 bar'lık püskürtme basınçları kullanılmıştır. Şekil 7.5'te sonuçları görünen erozyon oranları, S10 ve S60 boyutlu bilyalarla, 2 ve 4 bar'lık püskürtme basınçlarıyla, 60 saniye süresince bilyalı dövülen 4 ayrı numune kullanılmıştır. Şekil 7.5'te irdelenen bu adet 4 numune yüzeyi 30°'lik partikül çarpma açısıyla püskürtülen alümina partikülleriyle erozif aşındırma sonrasında elde edilmiştir. Bu sonuçlar karşılaştırıldığında; 4 bar püskürtme basıncıyla bilyalı dövme maruz bırakılan yüzeylerde, 2 bar püskürtme basıncıyla bilyalı dövülen yüzeye göre daha fazla pürüzlülük meydana geldiğini tez çalışmasında bölüm 7.1.1 'de irdelenmiştir. Şekil 7.5'te de daha pürüzlü olan ve 4 bar püskürtme basıncıyla dövülen yüzeyde gerçekleştirilen erozif aşınma testlerinde, daha fazla çarpışma olduğu; dolayısıyla bu deformasyonların yüzeyden daha fazla malzeme kaybına sebebiyet verdiği tespit edilmiştir. Arttırılan püskürtme basıncı, yüzeyi daha pürüzlü hale getirmiştir ve daha sonra yapılan erozif aşındırma işlemlerinde daha fazla erozyon meydana geldiği görülmüştür. Sonuç olarak, püskürtme basıncı arttırılarak uygulanan bilyalı dövme işlemini takiben uygulanan erozif aşındırma işlemlerinde, çok az miktarda daha yüksek erozyon oranı değerleri tespit edilmiştir. Dolayısıyla püskürtme basıncının erozif aşınma dayanımı üzerinde ciddi bir etkisinin olmadığı yorumları yapılabilmektedir.

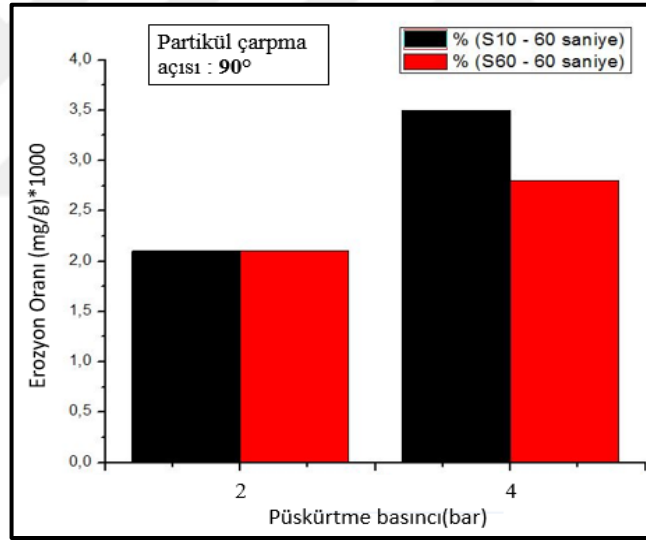


Şekil 7.5. Bilya püskürtme basıncının 30 derece partikül çarpma açısında erozif aşınmaya etkileri

Şekil 7.6'da AA7075 alaşımlarına; 2 ve 4 bar püskürtme basıncı ile 60 saniye boyunca, S10 ve S60 boyutlarındaki paslanmaz çelik bilyalar kullanılarak uygulanan bilyalı



dövme işlemlerini takiben 90°lik partikül çarpma açısıyla erozif aşındırma uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; püskürtme basıncı artırılarak yapılan bilyalı dövme işlemlerinden sonra gerçekleştirilen erozif aşındırma testleri sonucunda, malzeme yüzeyinde az miktar daha yüksek erozyon oranı değerleri tespit edilmiştir. Sabit dövme süresi ve bilya boyutun ile 4 bar püskürtme basıncı uygulanan bilyalı dövme işlemleri sonucundaki yüzey pürüzlülüğü daha fazladır. Bu yüzeylerdeki tepe ve çukurların daha derin olması ve sayılarının daha yüksek olması sebebiyle, erozif aşındırma işlemlerinin bu yüzeylerde daha kapsamlı gerçekleştiği gözlenmiştir. Erozif aşındırma işlemlerindeki bu deformasyon püskürtme basıncı artırılarak bilyalı dövülen yüzeylerde daha yüksek değerlerde tespit edilmiştir. Sonuç olarak, bilyalı dövme işlemleri esnasında artırılan püskürtme basıncı, aşınma dayanımını az miktarda olsa düşürmektedir, dolayısıyla yüzeyden kaybedilen malzeme miktarının ihmal edilebilecek seviyede bir artışa sebep olduğu yorumları yapılabilmektedir.

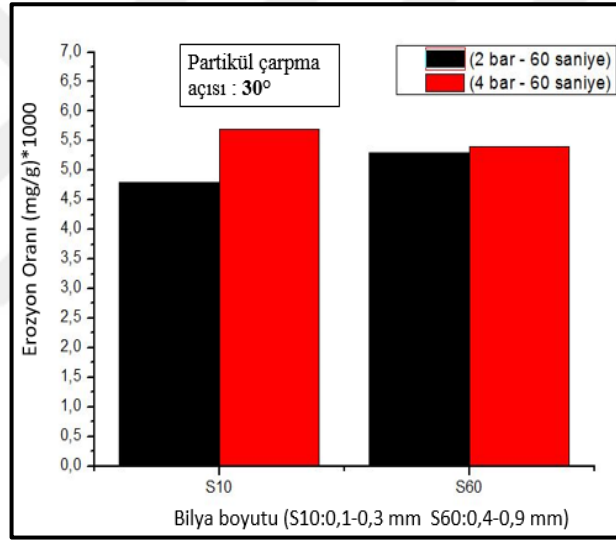


Şekil 7.6. Bilya püskürtme basıncının 90 derece partikül çarpma açısında erozif aşınmaya etkileri

### 7.2.2. Bilyalı dövmede kullanılan bilya boyutunun erozif aşınmaya etkisi

Bilyalı dövme işlemlerinde S10 (0,1-0,3 mm) ve S60 (0,4-0,9 mm) boyutlarında paslanmaz çelik bilyalar kullanılmıştır. Alüminyum numuneler, bilyalı dövme işlemlerini takiben 30° ve 90° partikül çarpma açılarında erozif aşınmaya maruz bırakılmıştır.

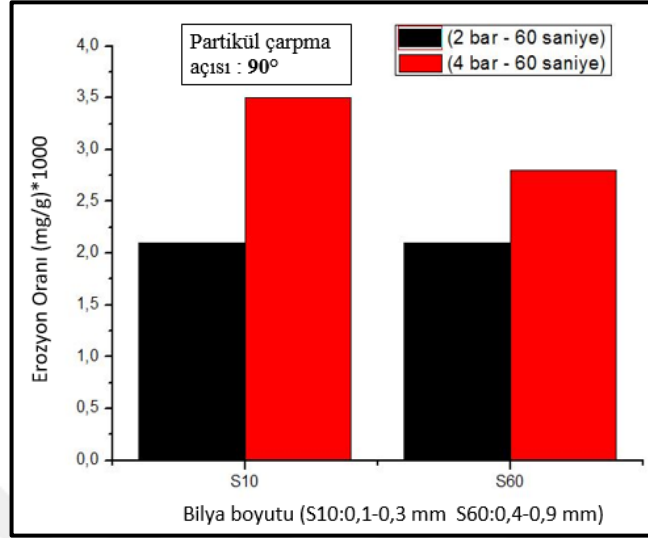
Şekil 7.7’de, sabit püskürtme basıncında (2 bar) ve sabit bilyalı dövme süresince (60 sn), S10 boyutlu bilyalarla dövüldükten sonra 30° partikül çarpma açısıyla erozif aşındırıldığında elde edilen erozyon oranı S60 boyutlu bilyalarla dövülüp erozif aşındırılan numunedeki erozyon oranından az bir miktar daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, sabit püskürtme basıncında (4 bar) ve sabit dövme süresince (60 sn), S60 boyutlu bilyalarla dövüldükten sonra 30° partikül çarpma açısıyla erozif aşındırıldığında elde edilen erozyon oranı, S10 boyutlu bilyalarla dövüldükten sonra erozif aşındırılan numunedeki erozyon oranından bir miktar daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, bilyalı dövme parametrelerinden bilya boyutunun erozyon oranına, dolayısıyla aşınma dayanımına ciddi bir etki etkisinin olmadığı yorumu yapılabilmektedir.



Şekil 7.7. Bilya boyutunun 30 derece partikül çarpma açısında erozif aşınmaya etkileri

Şekil 7.8’de, sabit püskürtme basıncı (2 bar) ve sabit bilyalı dövme süresince (60 sn), S10 boyutlu bilyalarla dövüldükten sonra 90° partikül çarpma açısıyla erozif aşındırılmasıyla elde edilen erozyon oranının, S60 boyutlu bilyalarla dövülüp erozif aşındırılan numunedeki erozyon oranı ile aynı olduğu tespit edilmiştir. Sabit tutulan püskürtme basıncı (4 bar) ve sabit dövme süresi (60 sn) boyunca S60 boyutlu bilyalarla dövüldükten sonra 90° partikül çarpma açısıyla aşındırılmasıyla elde edilen erozyon oranının, S10 boyutlu bilyalarla dövülüp erozif aşındırılan numunedeki erozyon oranından bir miktar daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu değişimin ihmal edilebilir seviyede olduğu öngörülmüştür. Bu sonuçlar yardımıyla bilyalı dövme

işlemindeki bilya boyutunun malzeme kaybı yani dolayısıyla erozyon oranı üzerinde etkin bir değişme sebep olmadığı yorumu yapılabilmektedir.



Şekil 7.8. Bilya boyutunun 90 derece partikül çarpma açısında erozif aşınmaya etkileri

### 7.3. Bilyalı Dövme Sonrası Erozif Aşındırılmış Yüzeylerin SEM Analizleri

Bilyalı dövme işlemleri sonucunda gerçekleştirilen erozif aşındırma işlemlerinin özellikle aç parametresinin etkisini irdelemek amacıyla; Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Laboratuvarı'nda AA7075 numunelerin SEM fotoğrafları alınmıştır. Tez çalışmasının bu bölümünde bilyalı dövme sonrası gerçekleştirilen erozif aşınma deneyleri sonucunda AA7075 yüzeylerinden elde edilen SEM çalışmalarının detayları incelenecektir.

#### 7.3.1. Bilyalı dövmenin erozif aşınma mekanizmalarına etkisi

Literatürde aşınma üzerine yapılmış birçok çalışmada özellikle partikül çarpma açısının, erozif aşınma mekanizmaları üzerinde ciddi etkisinin olduğu ortaya konulmuştur. Bu çalışmalarda; sünek malzemelerde düşük açılarda, gevrek malzemelerde ise yüksek çarpma açılarında maksimum oranda malzeme kaybı meydana geldiği belirtilmiştir. Ek olarak, gerçekleştirilen çalışmalarda malzemelerin aşındırılmaları esnasında 30° partikül çarpma açısında yüzeyde mikro kesme, mikro sürme ve mikro sıvama izleri tespit edilirken; 90°deki testlerde hedef malzeme yüzeyinde mikro çatlaklar ve yüzey kırılmaları olduğu tespit edilmiştir [4, 58, 65, 70,

71, 73-76]. Tüm bu çalışmalardan yola çıkılarak, tez çalışmasında bilyalı dövülmüş alüminyum alaşımının erozif aşınma davranışının irdelenmesi amacıyla 30° ve 90° olmak üzere 2 ayrı partikül çarpma açısının incelenmesi hedeflenmiştir.

Bilyalı dövme işlemine tabi tutulmayan ve metalografik olarak yapılan ayna ayarındaki parlatma işlemleri sonrası AA7075-T6 alaşımlarının partikül çarpma açısına (30° ve 90°) bağlı olarak erozif aşındırılan yüzeylerinin SEM fotoğrafları

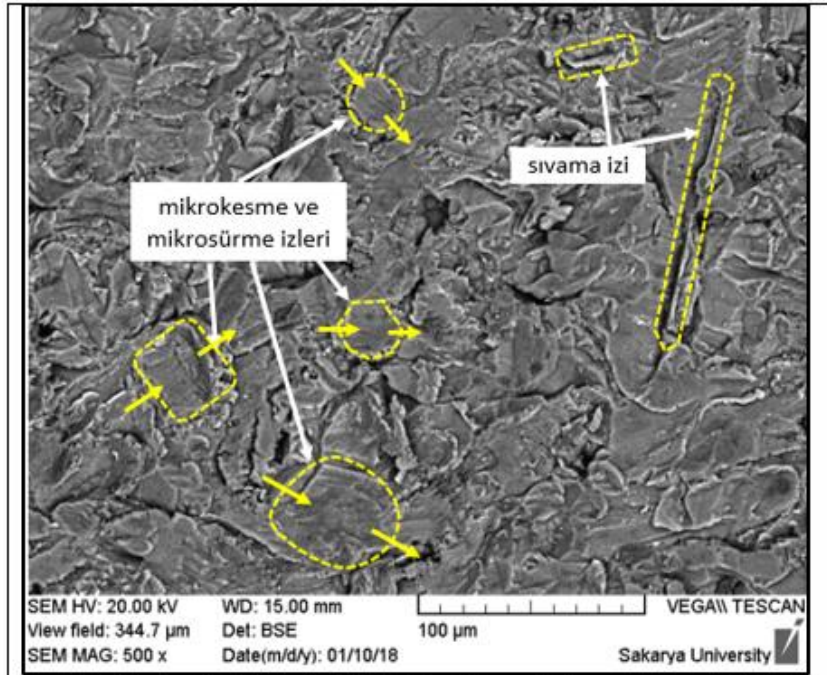
Şekil 7.9 ve Şekil 7.10'da belirtilmiştir.

Şekil 7.9'da verilen SEM fotoğraflarında, bilyalı dövülmeyen ve yüzeyi metalografik olarak ayna ayarında parlatılan AA7075-T6 alaşımının, 30° partikül çarpma açısında püskürtülen alümina partiküller ile erozif aşındırılması sonucu meydana gelen erozif aşınma mekanizmaları irdelenmiştir. Alümina partiküllerin ayna ayarında parlak olan yüzeyine püskürtülmesiyle

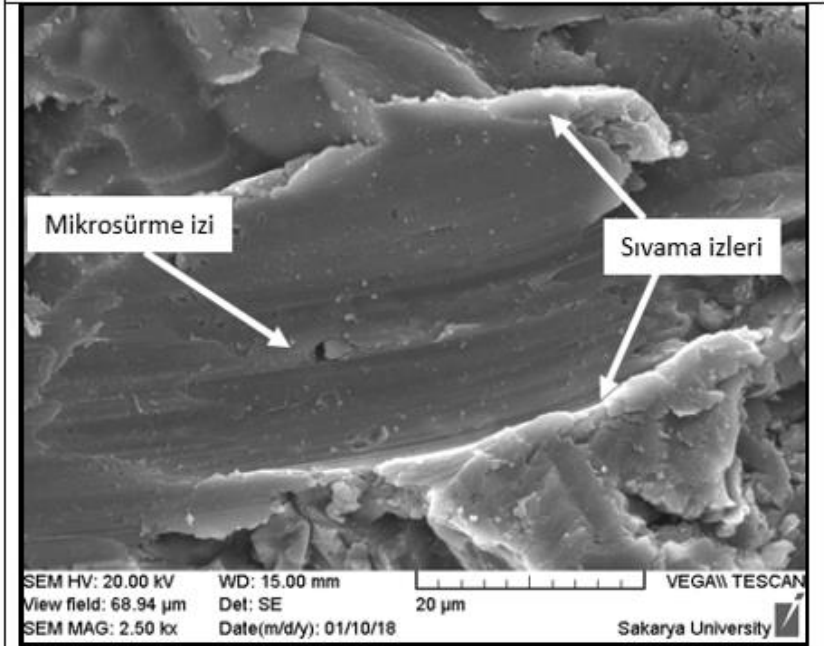
Şekil 7.9.a'da belirtilen SEM fotoğraflarında; mikro kesme ve mikro sürme izleri ile katlanan ve sıvanan yüzeylere rastlanmıştır.

Şekil 7.9.b'de belirtilen SEM fotoğrafında; aşındırıcı partikülün numune yüzeyinde meydana getirdiği mikro sürme ve sıvama izi daha büyük büyütme ile detaylı olarak gözlenebilmektedir.

Şekil 7.10'da belirtilen SEM fotoğrafında, bilyalı dövülmeyen ve yüzeyi metalografik olarak ayna ayarında parlatılan AA7075-T6 alaşımının, partikül çarpma açısı 90° olarak uygulanan erozif aşındırma işlemleri sonucunda meydana gelen mekanizmaları verilmiştir. Hedef numune yüzeyinde birçok mikro çatlak ve yüzey kırılmaları tespit edilmiştir. Dik açılarda gelen aşındırıcı alümina partiküllerinin, numune yüzeyinde meydana getirdiği etkin çarpışmalar sonucu ciddi çatlaklar oluştuğu gözlenmiştir. Şekil 7.10.b'de 2500x büyütme ile verilen SEM fotoğrafında, numune yüzeyinde meydana gelen yüksek şiddetli çarpışmalar sebebiyle aşındırıcı partiküllerin yüzeye gömüldükleri tespit edilmiştir.

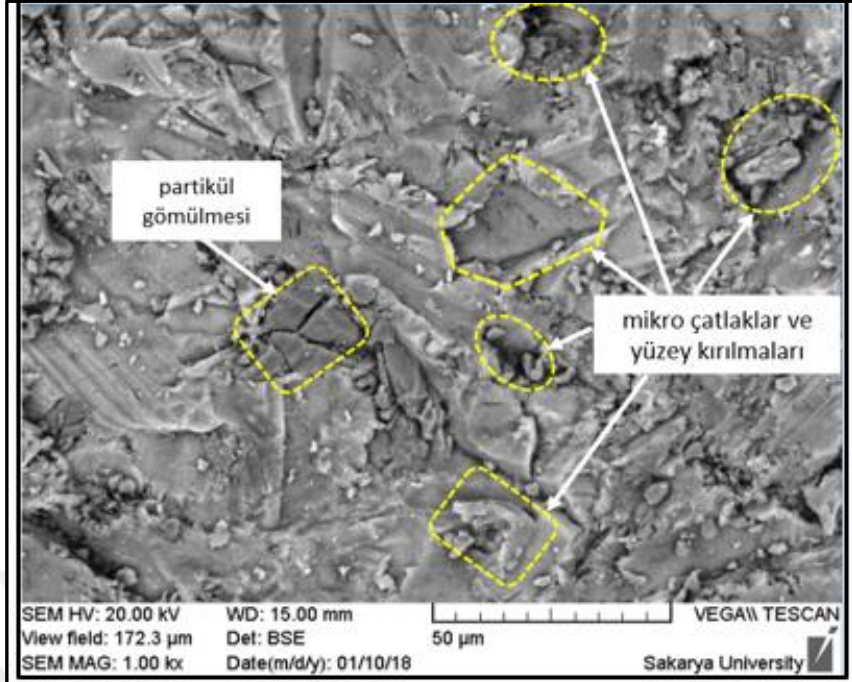


a) Bilyalı dövülmemiş AA7075 - 30° partikül çarpma açısı (500x)

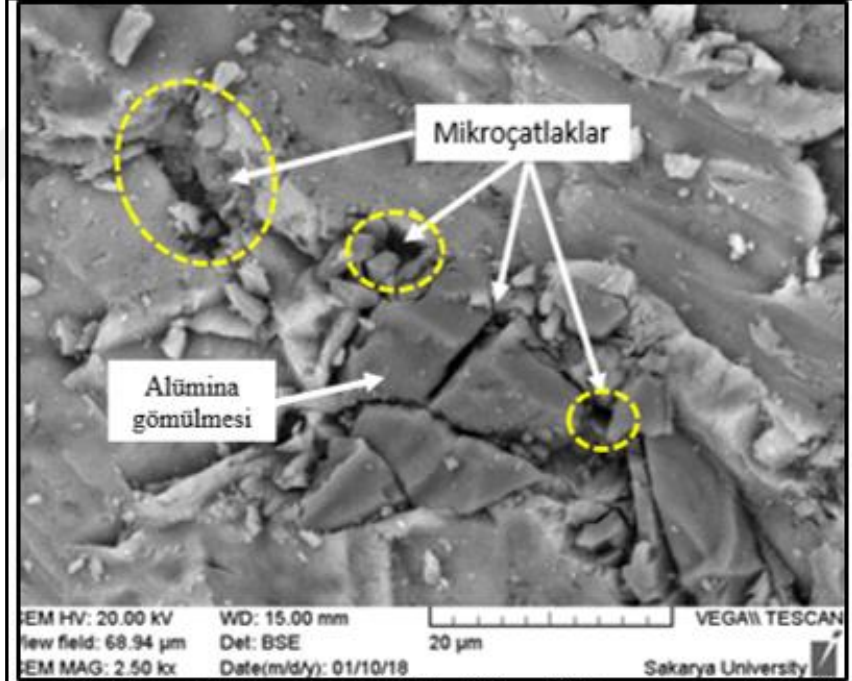


b) Bilyalı dövülmemiş AA7075 - 30° partikül çarpma açısı (2500x)

Şekil 7.9. Aşındırıcı partikül çarpma açısının bilyalı dövülmemiş yüzeylere etkisi



a) Bilyalı dövülmemiş AA7075 - 90° partikül çarpma açısı (1000x)



b) Bilyalı dövülmemiş AA7075 - 90° partikül çarpma açısı (2500x)

Şekil 7.10. Aşındırıcı partikül çarpma açısının bilyalı dövülmemiş yüzeylere etkisi



J.R.Laguna-Camacho ve arkadaşları AA6061 malzemede yapılan erozif aşınma deneylerinde, aşındırıcı partiküllerin 30° açıyla gönderilmesiyle düzensiz çizgiler ve bazı erozif aşınma parçaları tespit etmişlerdir. Partiküllerin 90° açıyla gönderilmesiyle daha pürüzlü bir yüzey, daha belirgin bir çukurlaşma gözlemlenmiştir [74]. J.Ibarra ve arkadaşları, lazer ile dövme işlemlerinin AA6061-T6 alaşımı üzerindeki erozif aşınma etkisini; aşındırıcı partikül açısının (15°, 30°, 60°, 90°) olduğu değerlerde araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre; 30° partikül çarpma açısındaki aşındırma işlemleri sonucunda yüzeyde oluk, ağız oluşumu ve kesme mekanizmaları tespit etmişlerdir. 90° partikül çarpma açısında yüzeyde krater oluşumu, partiküllerin çarptığı yerlerde partikül izi ve mikro çatlak oluşumları tespit etmişlerdir [65].

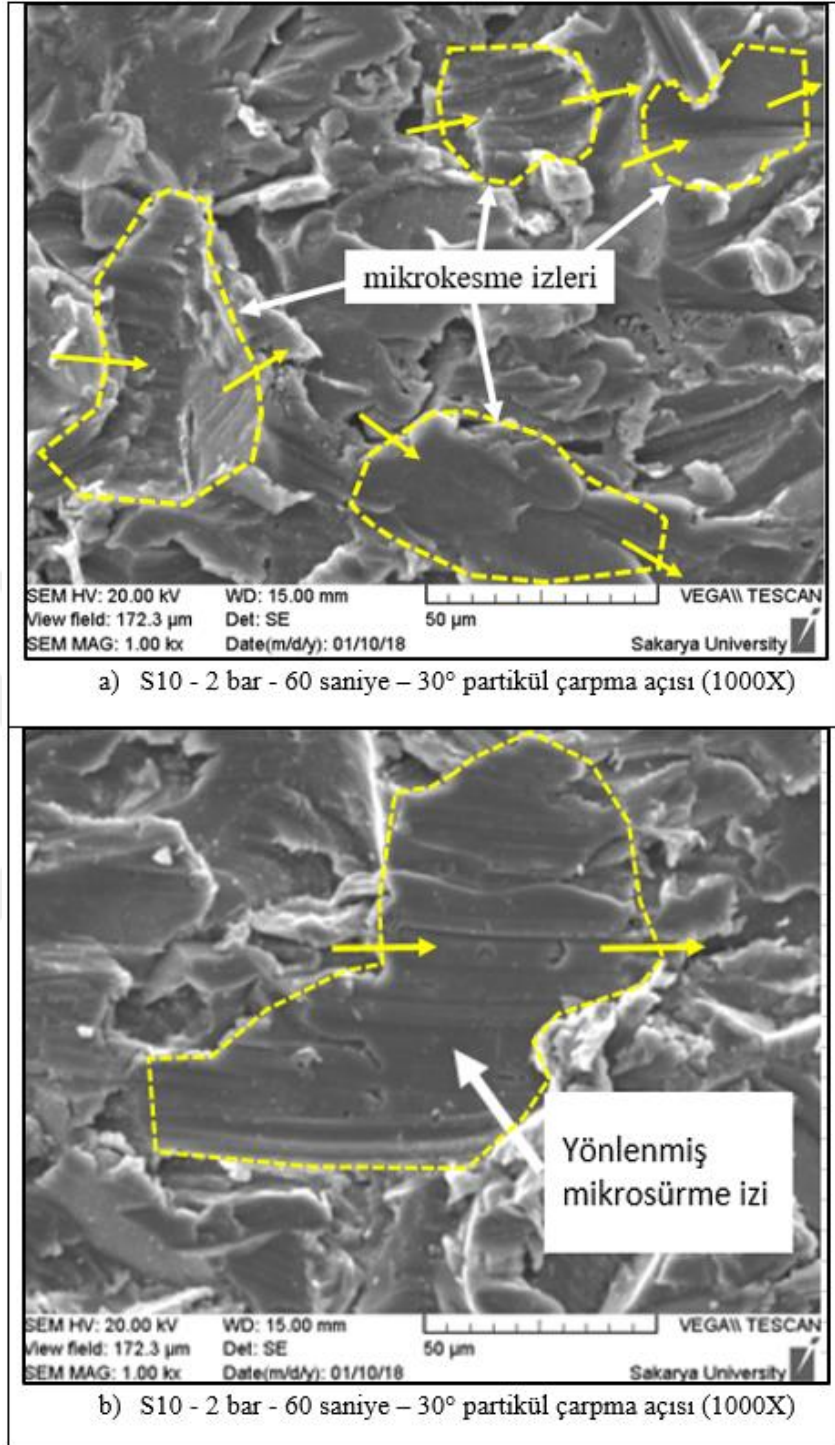
Egemen Avcu ve arkadaşları alüminyum alaşımları üzerinde yaptıkları katı partikül erozyonu çalışmalarında; 30° ile 45° düşük partikül çarpma açılarında mikro sürme ve mikro kesme mekanizmaları, 75° ile 90° dik partikül açılarında mikroçatlaklar ve plastik deformasyonlar tespit etmişlerdir [64]. S. DAS ve arkadaşları alüminyum alaşımları üzerinde irdelikleri katı partikül erozyonu sonrası inceledikleri aşınma mekanizmalarında, 30° aşındırıcı partikül çarpma açısında mikro kesme mekanizmalarına; 45° ve üzerindeki açılardaki partikül çarpma açılarında gerçekleştirilen erozif aşınma sonucunda yüzeyde plastik deformasyonlar gözlemlenmiştir [97].

Literatürde yer alan bu çalışmalar irdelendiğinde, tez çalışmasında araştırılan bilyalı dövme uygulanmış AA7075-T6 alüminyuma uygulanan erozif aşınma sonucunda meydana gelen aşınma mekanizmalarının benzer olduğu söylenebilmektedir. Erozif aşınma mekanizmalarının partikül çarpma açısına bağlı olarak değişim gösterdiği görülmektedir. Ancak literatür çalışmaları ile karşılaştırıldığında tez çalışmasında bilyalı dövme işleminin alüminyum alaşımının erozif aşınma davranışı ve bu davranışa neden olan erozif aşınma mekanizmaları üzerinde ciddi bir etkinliğin bulunmadığı yorumu yapılabilmektedir. Sonuç olarak SEM fotoğrafları ve literatür çalışmalarında, bilyalı dövülmüş AA7075 alaşımının sünek erozif aşınma davranışı gösterdiği belirlenmiştir.

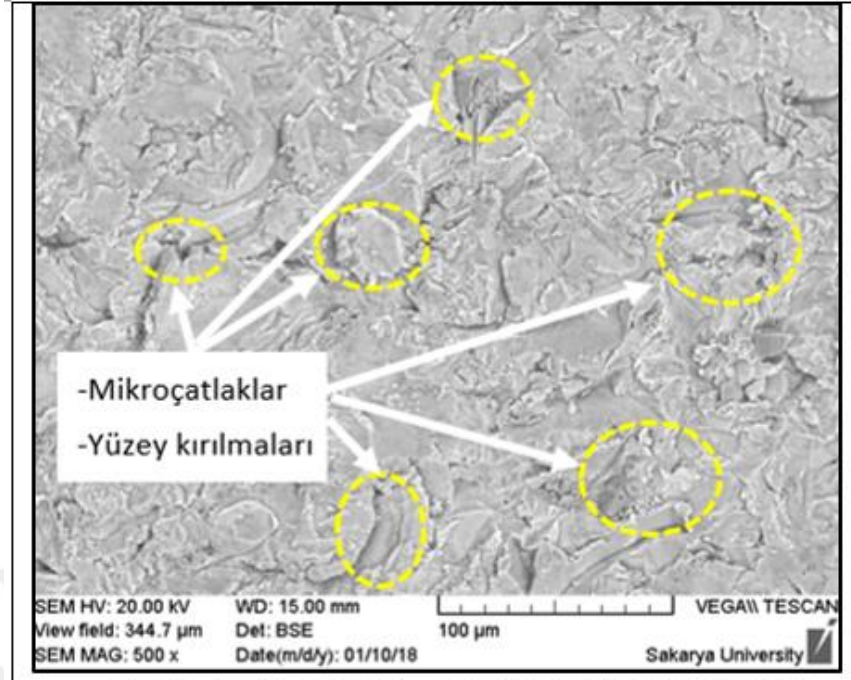
Şekil 7.11’de yer alan SEM fotoğraflarında (S10-2 bar-60 saniye) parametreleri bilyalı dövülen AA7075-T6 numune yüzeyinde 30° partikül çarpma açısıyla yapılan erozif aşındırma işlemleri sonucunda numune yüzeyinde yönlenmiş mikro kesme mekanizmaları tespit edilmiştir. Şekil 7.11’deki SEM fotoğrafları değerlendirildiğinde; 30° partikül çarpma açılarındaki sünek malzeme olan AA7075 alaşım yüzeyinde sıklıkla mikro-kesme, mikro-sürünme ve mikro sıvama gibi erozif aşınma mekanizmaları meydana geldiği tespit edilmiştir.

Şekil 7.12’de yer alan SEM fotoğraflarında (S10-2 bar-60 saniye) parametreleri ile bilyalı dövme uygulanmış AA7075 numune yüzeyi 90° partikül çarpma açısında erozif aşındırılması sonucu meydana gelen aşınma mekanizmaları yer almaktadır. Bu sonuçlara göre; 90° partikül çarpma açısında aşındırılan AA7075-T6 yüzeyinde çok sayıda mikro çatlak, yüzey kırılmaları tespit edilmiştir.

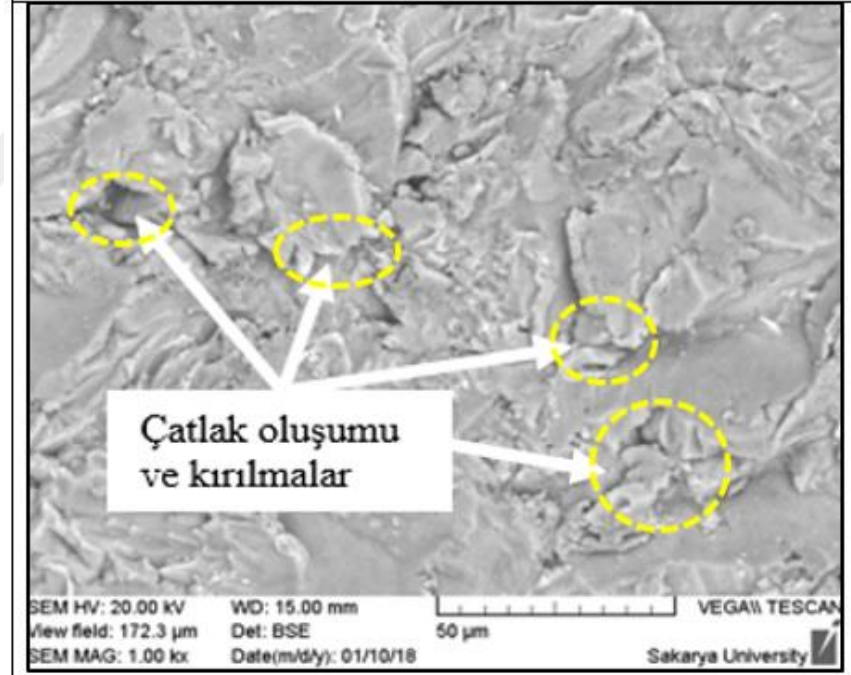




Şekil 7.11. Aşındırıcı partikül çarpma açısının bilyalı dövülen yüzeye etkisi



a) S10 - 2 bar - 60 saniye – 90° partikül çarpma açısı (500X)

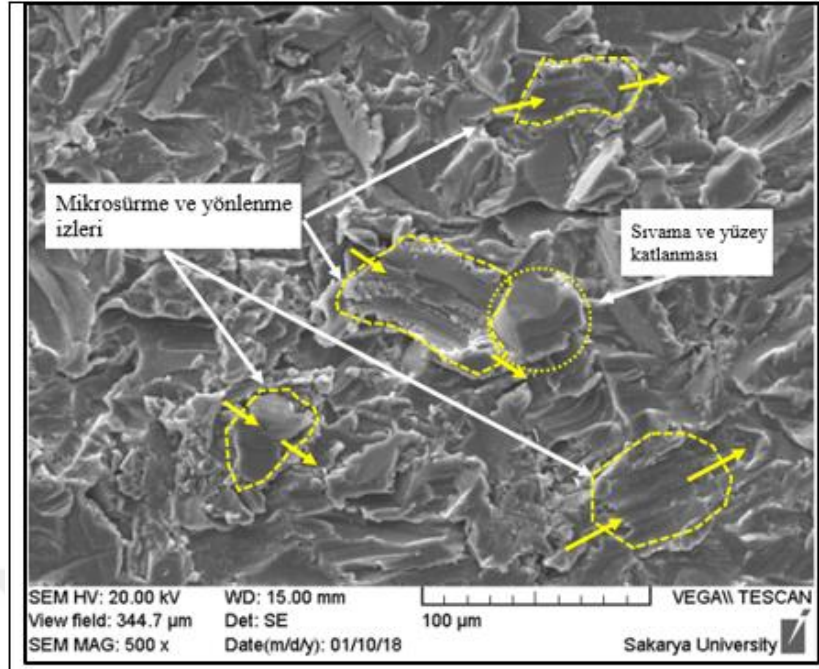


b) S10 - 2 bar - 60 saniye – 90° partikül çarpma açısı (1000X)

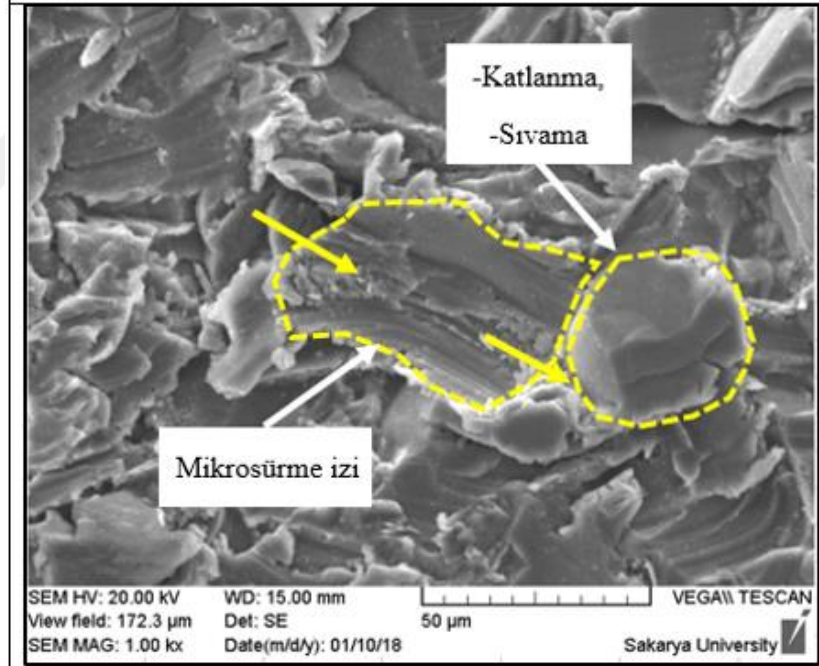
Şekil 7.12. Aşındırıcı partikül çarpma açısının bilyalı dövülen yüzeye etkisi

Şekil 7.13'te verilen SEM fotoğraflarında (S10-4bar-60saniye) parametreleriyle bilyalı dövülen AA7075-T6 numune yüzeyinin, 30° partikül çarpma açısında aşındırılması sonucu meydana gelen mekanizmalar irdelenmiştir. Öncelikle bilyalı dövme uygulanan ve ardından erozif aşındırılan AA7075 alaşımı yüzeyinde birçok mikro sürme ve yönlenme izlerine rastlanmıştır. Ek olarak erozif aşınma sonucu yüzeyde katlanma ve yüzeye çarpan partikülün çarpma yönüne paralel şekilde sıvama bölgeleri tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre, bilyalı dövülen numune yüzeylerinde, 30° partikül çarpma açısıyla erozif aşındırılması sonucu mikro kesme, mikro sürme ve sıvama izleri meydana geldiği sonucuna varılmıştır.

Şekil 7.14'te verilen SEM fotoğraflarında, bilyalı dövülen (S10-4bar-60saniye) AA7075-T6 yüzeyinde 90° partikül çarpma açısıyla yapılan erozif aşındırılması sebebiyle birçok mikro-çatlak ve kırılmalar tespit edilmiştir. İlk olarak bilyalı dövme sebebiyle hedef numune yüzeyi pürüzlü hale getirilmiş ve daha sonra uygulanan erozif aşınma testleri sonucunda AA7075 alaşımı yüzeyinde etkin çarpışmalar sonucu ciddi deformasyonlar meydana gelmiştir. Oluşan erozif aşınma mekanizmalarının daha detaylı irdelenmesi amacıyla Literatürdeki bazı çalışmalarda da tez çalışmasındaki bu sonuca paralellik gösteren sonuçlar yer almaktadır [64, 65, 97].



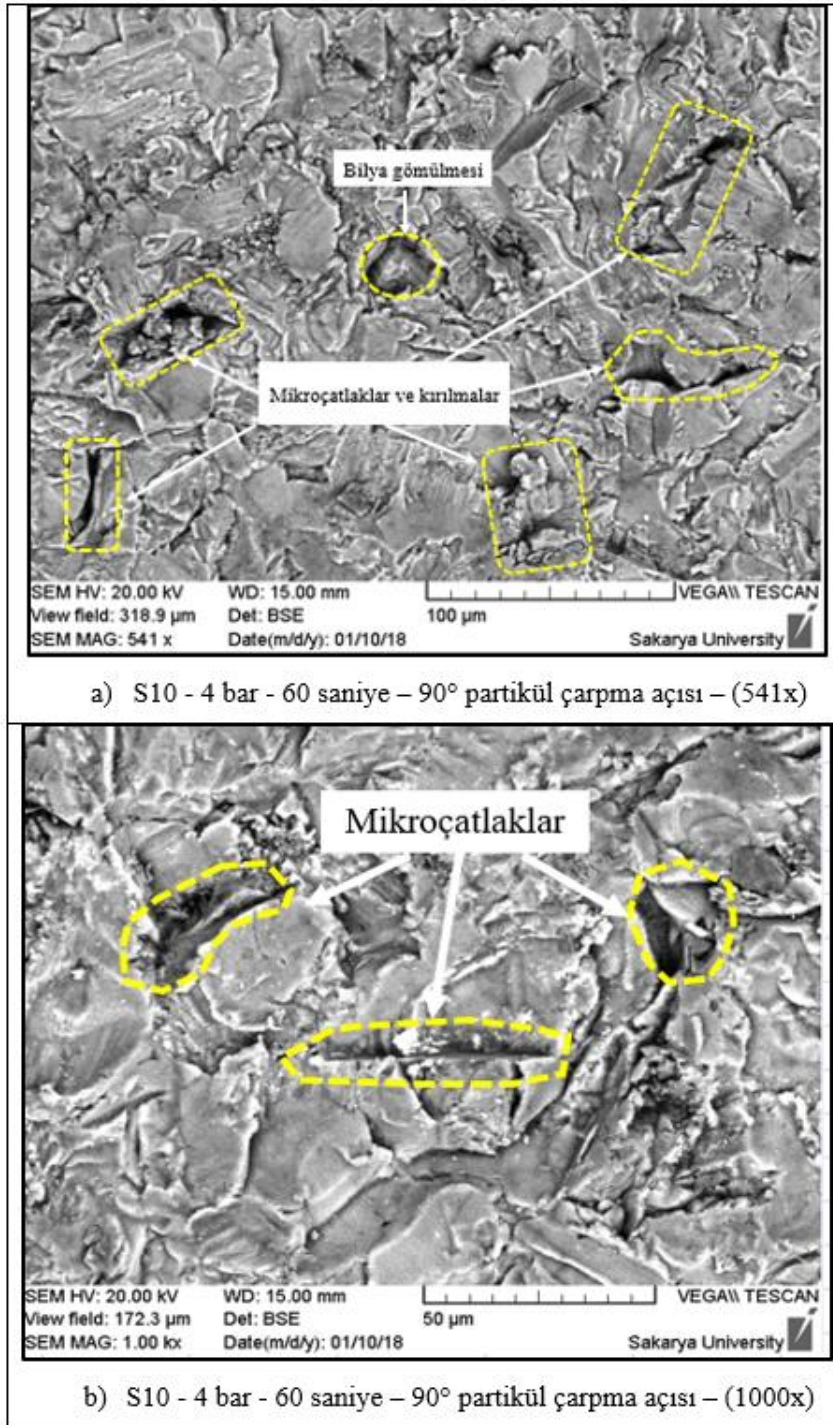
a) S10 - 4 bar - 60 saniye - 30° partikül çarpma açısı – (500x)



b) S10 - 4 bar - 60 saniye - 30° partikül çarpma açısı – (1000x)

Şekil 7.13. Aşındırıcı partikül çarpma açısının bilyalı dövülen yüzeye etkisi

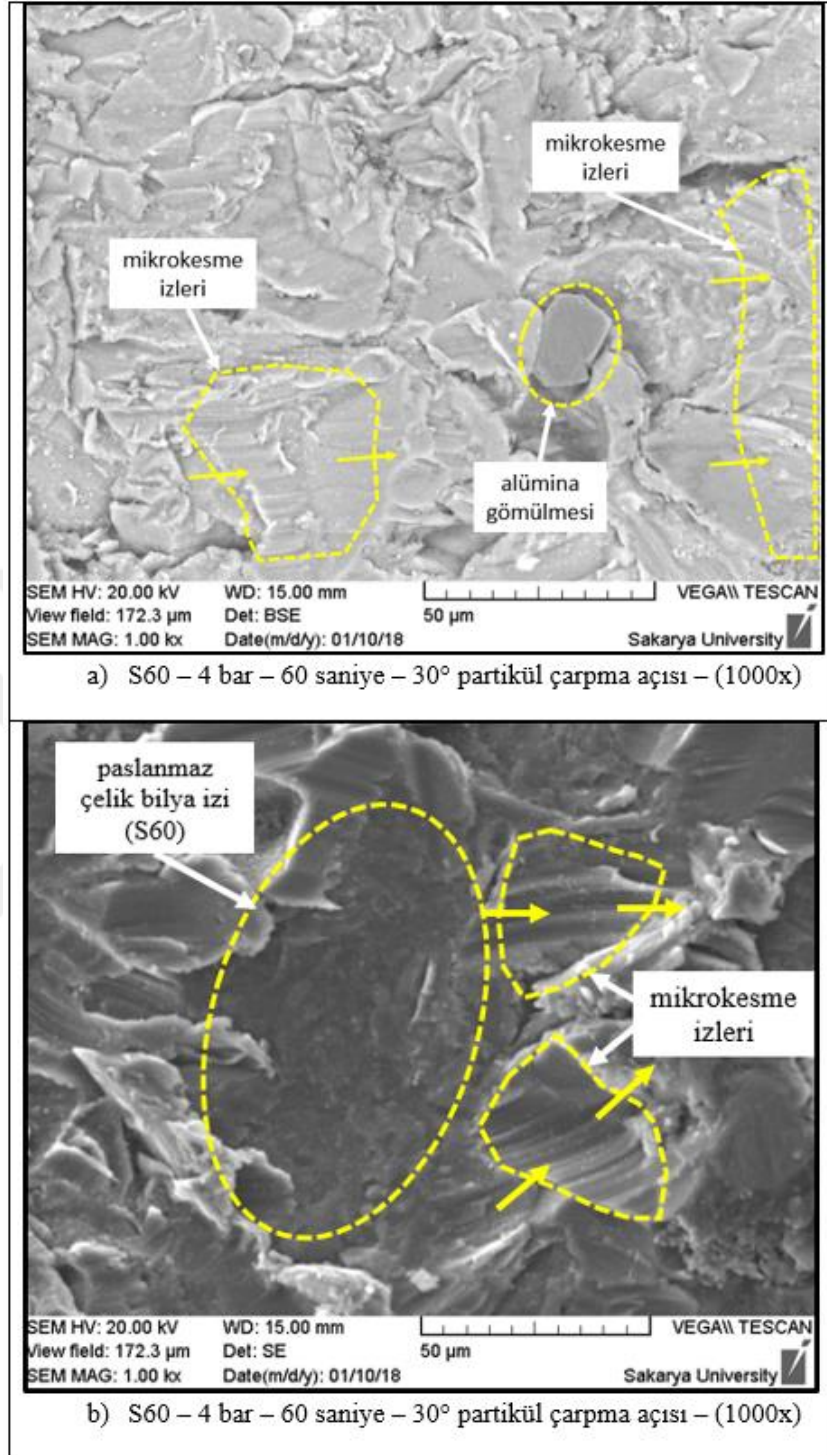




Şekil 7.14. Aşındırıcı partikül çarpma açısının bilyalı dövülen yüzeye etkisi

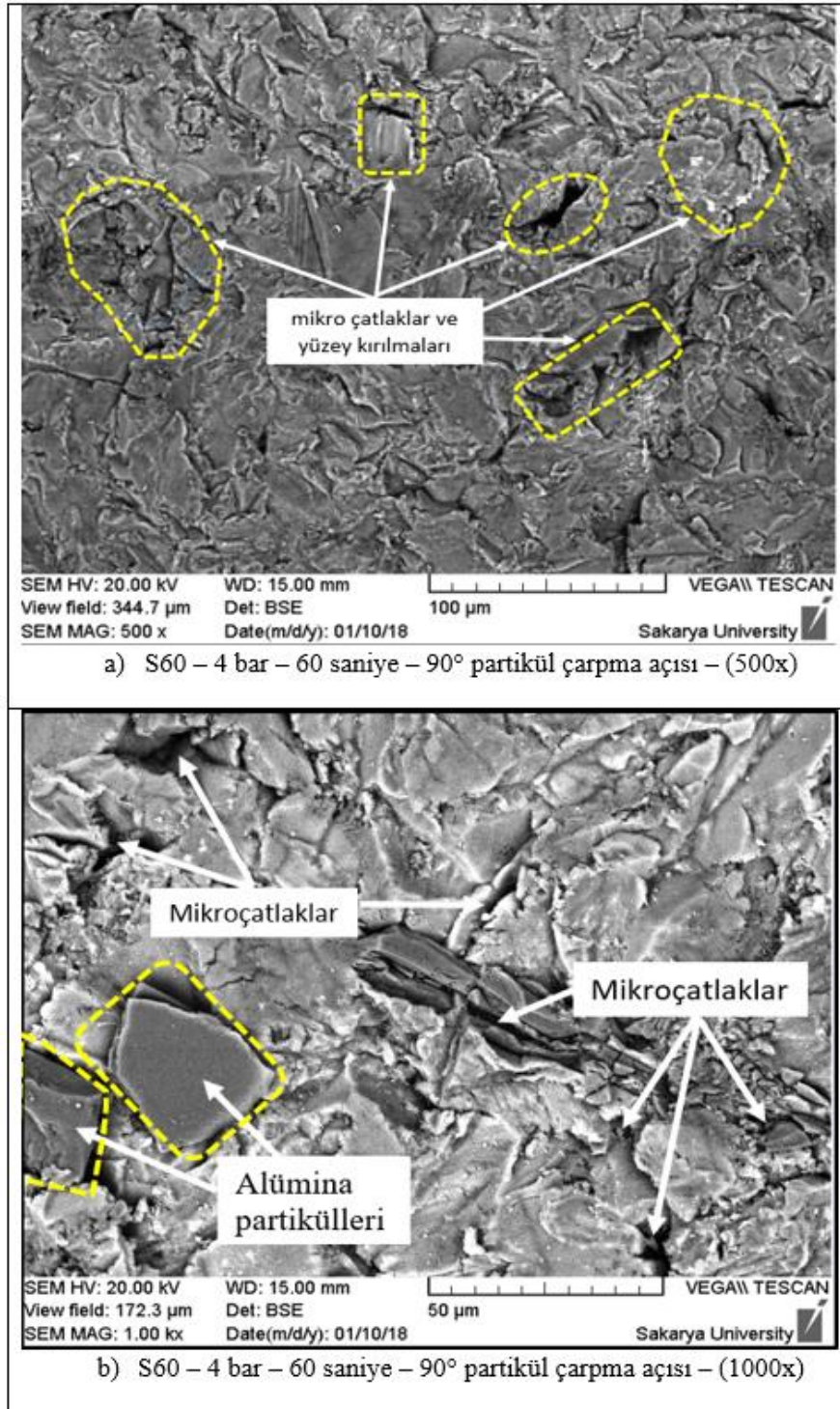
Şekil 7.15'teki SEM fotoğraflarında, bilyalı dövme parametreleri S60–4bar– 60 saniye kullanılarak yapılan dövme işleminden sonra 30° partikül çarpma açısıyla erozif aşındırılan AA7075 alaşımı yüzeyinde meydana gelen erozif aşınma mekanizmaları yer almaktadır. Bu sonuçlara göre; AA7075 numune yüzeyinde mikro sürme, mikro kesme ve mikro sıvama, katlanma şeklinde mekanizmalar gözlenmiştir. Şekil 7.15.b'de verilen SEM fotoğrafında; bilyalı dövme işlemleri esnasında meydana gelen paslanmaz çelik bilya izi ve daha sonrasında yapılan erozif aşınma işlemi sonucunda oluşan mikro kesme izlerine rastlanmıştır.

Şekil 7.16'daki SEM fotoğraflarında; bilyalı dövme parametreleri S60–4 bar–60 saniye ile bilyalı dövülen ve sonrasında 90° partikül çarpma açısında erozif aşındırılması sonucu elde edilen mekanizmaları irdelenmiştir. Bu SEM fotoğraflarında birçok mikro çatlak ve yüzey kırılmaları gözlenmiştir. Şekil 7.16.b'de 1000x büyütme ile numune yüzeyi daha detaylı irdelenmiştir. 90° partikül çarpma açısında yapılan erozif aşındırma işlemlerinde alümina partikül gömülmesi ve aşırı deforme olmuş bir yüzeye rastlanmıştır.



Şekil 7.15. Aşındırıcı partikül çarpma açısının bilyalı dövülen yüzeye etkisi





Şekil 7.16. Aşındırıcı partikül çarpma açısının bilyalı dövülen yüzeye etkisi



## 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 8.1. Sonuçlar

#### 8.1.1. Farklı bilyalı dövme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

- Bilya boyutunun yüzey pürüzlülüğüne etkileri incelendiğinde, bilya boyut artışı ile birlikte hedef malzeme yüzeyinin ortalama çizgisel ve ortalama alansal pürüzlülük değerlerinde artış meydana geldiği belirlenmiştir. Büyük çaplı bilyalar yüzeyde daha geniş ve daha derin çukurların oluşumuna neden olmuştur. 3 boyutlu yüzey topoğrafyaları yardımı ile oluşan çukur ve tümsekler belirlenmiştir. Gerçekleştirilen SEM analizleri ile bilyaların neden olduğu yüzeysel kırılmalar ve çatlaklar belirlenmiştir, artan bilya boyutu ile bu durum daha dramatik gerçekleştiği gözlemlenmiştir.
- Bilya püskürtme basıncının yüzey pürüzlülüğüne etkileri incelendiğinde, bilya püskürtme basıncının artması ile hedef malzeme yüzeyinde ortalama çizgisel ve ortalama alansal pürüzlülük değerlerinde artış meydana gelmiştir. Bilya püskürtme basıncının artması ile yüzey pürüzlülüğündeki artış her iki bilya boyutunda da gerçekleşmiştir. Artan bilya püskürtme basıncı bilyaların yüzeye çarpma hızlarının artmasına dolayısı ile bilyaların daha yüksek kinetik enerjilerle malzeme yüzeyine çarpmasına neden olmaktadır. Bu nedenle malzeme yüzeyine daha yüksek enerji ile çarpan bilyalar yüzeyde daha fazla plastik deformasyona neden olarak yüzeyde daha fazla pürüzlülük oluşturmaktadır. 3 boyutlu yüzey topoğrafileri ve SEM incelemeleri ile dövülen yüzeylerdeki plastik deformasyonlar ve çatlaklar belirlenmiştir.
- Bilya püskürtme süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri incelendiğinde, püskürtme süresinin artması ile farklı bilya boyutu ve farklı bilya püskürtme basıncında, hedef malzeme yüzeyinde ortalama çizgisel ve ortalama alansal pürüzlülük değerlerinde ve 3 boyutlu yüzey topoğrafileri üzerinde bariz bir değişim yaşanmadığı belirlenmiştir.

### 8.1.2. Bilyalı dövmenin erozif aşınma davranışına etkileri

- İşlem görmemiş (ayna parlaklığındaki) AA7075-T6 alaşımının; 30°'lik partikül çarpma açısındaki aşınmada maksimum erozyon oranı, 90°'lik partikül çarpma açısındaki aşınmada ise minimum erozyon oranına sahip olduğu tespit edilmiştir. Aynı şekilde bilyalı dövülen numuneler için de erozyon oranı 30°'lik partikül çarpma açısındaki aşınmada maksimum, 90°'lik partikül çarpma açısındaki aşınmada ise minimum olarak gözlenmiştir. Ancak bilyalı dövme işleminin öngörülen aksine hedef malzemenin aşınma dayanımı iyileştirmediği, aksine kötüleştiği ve bilyalı dövme ile alüminyum alaşımının erozyon oranının artış gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bilyalı dövme ile yüzeyde meydana gelen erozif aşınma şematik olarak modellenmiş ve bilyalı dövme ile artan erozyon oranı bu modeller üzerinden açıklanmıştır.
- Her iki bilya boyutu için, bilya püskürtme basıncının artması ile 30° ve 90° partikül çarpma açılarında gerçekleştirilen erozif aşınma testlerinde erozyon oranı değerlerinin işlem görmemiş numune sonuçlarına yakın olduğu belirlenmiştir. Bilya püskürtme basıncının arttırılmasını takiben farklı aşındırıcı partikül çarpma açılarıyla gerçekleştirilen aşınma testleri sonucunda; aşınma direncinin ciddi bir şekilde etkilenmediği yorumları yapılabilmektedir.
- Her iki bilya püskürtme basıncında, bilya boyutunun artması ile 30° ve 90° partikül çarpma açılarında gerçekleştirilen erozif aşınma testlerinde erozyon oranı değerlerinin işlem görmemiş numune sonuçlarına yakın olduğu belirlenmiştir. Bilyalı dövme işleminde bilya boyutunun arttırılması; farklı partikül açılarıyla gerçekleştirilen erozif aşınma testleri sonucunda malzeme kaybının ciddi bir değişikliğe uğramadığı yorumu yapılabilmektedir.
- Bilyalı dövülen ve işlem görmemiş numunelerin erozif aşınma sonrası elde edilen SEM analizleri irdelendiğinde; 30° partikül çarpma açısında yüzeyde mikro kesme, mikro sürme, sıvama, katlanma ve yönlenmiş izler gibi aşınma mekanizmaları tespit edilmiştir. 90° partikül çarpma açısında gerçekleştirilen aşınma sonrasında yüzeyde mikroçatlaklar, rastgele kırılmalar ve aşındırıcı partikül saplanması gibi aşınma mekanizmaları belirlenmiştir.

## 8.2. Öneriler

- Tez çalışmasında bilyalı dövmenin alüminyum alaşımı hedef malzemenin erozif aşınma dayanımını negatif yönde etkilediği belirlenmiştir. Çalışmada belirlenen bilyalı dövme parametreleri altında pürüzlü yüzeylerin aşınma davranışına negatif etki ettiği söylenebilir. Bu açıdan bakıldığında aşınma dayanımının yüksek olması beklenen koşullarda ayna parlaklığında (en pürüzsüz) alüminyum alaşımı yüzeylerin tercih edilmesi önerilmektedir.
- Ayrıca bu çalışmanın devamı olarak, aşınma testleri öncesi (bilyalı dövme sonrası) ve sonrası alüminyum alaşımı yüzeylerin kesitleri alınarak incelenmesi, yüzey ve yüzey altı özelliklerin belirlenerek bilyalı dövme ile değişen aşınma davranışının özellikle yüzey altına etkileri daha detaylı bir şekilde araştırılabilir.
- Yine bu çalışmanın devamı olarak özellikle bilya türü olmak üzere bilya çarpma açısı vb. diğer önemli bilyalı dövme işlemi parametrelerinin alüminyum alaşımının yüzey özelliklerine ve erozif aşınma davranışlarına etkileri incelenebilir.
- Son olarak tez çalışmasının en önemli bulgularından biri olan bilyalı dövme ile kötüleşen erozif aşınma dayanımının bilyalı dövme sonrası iyileştirilmesi için ilave mekanik yüzey işlemleri (kumlama, zımparalama ve parlatma gibi) kullanılarak bu problemin çözümüne yönelik yeni çalışmalar gerçekleştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Tımaç G., Uçak Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Yöntemi ile Kaynaklanabilirliğinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 185281.
- [2] Aktuğ S.L., İkiz Merdane Döküm Yöntemiyle Üretilmiş AA1050 Ve AA3003 Alüminyum Alaşımlarının Termomekanik İşlemler Sonrası Mikroyapı İncelemesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze, 2009, 245291.
- [3] Ali Algahtani, Anne Neville, Suman Shrestha, Tomasz Liskiewicz, Erosion resistance of surface engineered 6000 series aluminium alloy, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2013, **227**(11), 1204-1214.
- [4] Yıldırım Y., 3003 H14 Alüminyum Katı Partikül Erozyonu Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 342538.
- [5] Asma Y., AA7075 – AA6061 Malzeme Çiftinin Sürtünme Kaynağı İle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2014, 355515.
- [6] Başer T.A., Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 2012, **53**(635), 51-58.
- [7] Bayındır M.K., Katı Parçacık Erozyon Aşınmasının Alüminyum Alaşımları Üzerindeki Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya 2009, 237493.
- [8] Yetiştiren H., 2024 Alüminyum Alaşımında RRA İşleminin GKÇ Direncine Etkilerinin Araştırılması Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1993, 29186.
- [9] 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.
- [10] Fakıoğlu A., Yaşlandırılan AA7075 Alüminyum Alaşımlarının Yorulma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2012, 301806.
- [11] Kibar E., 7075 Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan RRA Isıl İşlemlerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2010, 258576.

- [12] Dwight J., *Aluminium Design and Construction*, E & FN Spon, an imprint of Routledge, London EC4P 4EE, 1999.
- [13] Aytaç A., Eşit Kanal-Açısal Presleme Yöntemİ ile 7075 Alüminyum Alaşımlarında Nano Boyutlu Tane Üretimi ve Mikroyapısal Karakterizasyonun Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010, 269779.
- [14] Benedetti M., Fontanari V., Scardi P., Ricardo C.L.A., Bandini M., Reverse bending fatigue of shot peened 7075-T651 aluminium alloy: The role of residual stress relaxation, *International Journal of Fatigue*, 2009, **31**(8-9), 1225-1236.
- [15] Bayazid S. M. ve ark., Effect of cyclic solution treatment on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 7075 Al alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2016, **649**(293-300).
- [16] Huo Wangtu, Hou Longgang, Cui Hua, Zhuang Linzhong, Zhang Jishan, Fine-grained AA 7075 processed by different thermo-mechanical processings, *Materials Science and Engineering: A*, 2014, **618**, 244-253.
- [17] Benedetti M., Fontanari V., Bandini, Savio M. E., High- and very high-cycle plain fatigue resistance of shot peened high-strength aluminum alloys: The role of surface morphology, *International Journal of Fatigue*, 2014, **70**, (451-462).
- [18] Karabay S, Bayraklılar M, Balcı E, Influence of different heat treatments on the solid particle erosion behavior of aluminum alloy AA 7075 in industrial applications, *Acta Physica Polonica A*, 2015, **4**(127), 1052-1054.
- [19] Hu B., Richardson I.M., Microstructure and mechanical properties of AA7075(T6) hybrid laser/GMA welds, *Materials Science and Engineering: A*, 2006, **459**(1-2), 94-100.
- [20] Güteryüz K. Kaçar R., Deformasyon Yaşlanmasının AA7075 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, Türkiye, 16-18 May 2011, 284274.
- [21] Mudasar Pasha B. A., Mohamed Kaleemulla, Taguchi approach to influence of processing parameters on erosive wear behaviour of Al7034-T6 composites, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, **27**(10), 2163-2171.
- [22] Demir E., Alüminyum Alaşımlarda Isıl İşlem Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2008, 244006.
- [23] Ws. Miller, Zhuang, L., Bottema J., Wittebrood, A.J., Smet P., Haszler A., Vierendege A., Recent Development In Aluminium Alloys For The Automotive Industry, *Materials Science and Engineering: A*, 2000, **280**(1), 37-49.

- [24] Kyun Taek Cho ve ark., Surface hardening of aluminum alloy by shot peening treatment with Zn based ball, *Materials Science and Engineering: A*, 2012, **543**, 44-49.
- [25] Nam Yong-Seog, Jeong Yoo-In, Shin Byung-Cheol, Byun Jai-Hyun, Enhancing surface layer properties of an aircraft aluminum alloy by shot peening using response surface methodology, *Materials & Design*, 2015, **83**, 566-576.
- [26] Yan Jin ve ark., The anisotropy of fatigue crack nucleation in an AA7075 T651 Al alloy plate, *Materials Science and Engineering: A*, 2014, **622**, 7-15.
- [27] Oguri Kazuyuki, Fatigue life enhancement of aluminum alloy for aircraft by Fine Particle Shot Peening (FPSP), *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, **211**(8), 1395-1399.
- [28] <http://Fcsaluminium.Com/Medya/Galeri/81421368529034.Jpg/>, (Ziyaret tarihi: 7 Şubat 2018).
- [29] Marteau J., Bigerelle M., Mazeran P. E., Bouvier S., Relation between roughness and processing conditions of AISI 316L stainless steel treated by ultrasonic shot peening, *Tribology International*, 2014, **82**, 319-329.
- [30] 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.
- [31] Haşçalık A., Yaprak Yay Yapımında Kullanılan 35Cr4 Çeliğinin Fretting Yorulma Davranışının Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 1998, 77662.
- [32] Mitrovic Slobodan, Adamovic Dragan, Zivic Fatima, Dzunic Dragan, Marko Pantic., Friction and wear behavior of shot peened surfaces of 36CrNiMo4 and 36NiCrMo16 alloyed steels under dry and lubricated contact conditions, *Applied Surface Science*, 2013, 290, 223-232.
- [33] Trško Libor, Bokůvka Otakar, Nový František, Guagliano Mario, Effect of severe shot peening on ultra-high-cycle fatigue of a low-alloy steel, *Materials & Design*, 2013, **57**, 103-113.
- [34] 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.
- [35] Karaoglanli Abdullah Cahit ve ark., Effect of shot peening on the oxidation behavior of thermal barrier coatings, *Applied Surface Science*, 2015, **354**, 314-322.
- [36] Yıldız H.K., Bilyalı Dövmenin Fe+%2 Cu + %0,5 C Toz Metal Çeliğin Yorulma Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Ankara, 1998, 76191.

- [37] <http://Www.Torkmetal.Com/Urun.Asp?Id=19/>, (Ziyaret tarihi: 7 Şubat 2018).
- [38] Zupanc Uroš, Grum Janez, Surface Integrity of Shot Peened Aluminium Alloy 7075-T651, *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 2010, **57**(05), 379-384.
- [39] Xie Lechun, Jiang Chuanhai, Lu Weijie, The influence of shot peening on the surface properties of (TiB+TiC)/Ti-6Al-4V, *Applied Surface Science*, 2013, **280**, 981-988.
- [40] Mhaede M., Influence of surface treatments on surface layer properties, fatigue and corrosion fatigue performance of AA7075 T73, *Materials & Design*, 2012, **41**, 61-66.
- [41] 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 (1980-2015)*, 2013, **56**, 480-486.
- [42] Döleker K.M., Bilyalı Dövme İşleminin Termal Bariyer Kaplamaların Oksidasyon Davranışı Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın, 2015, 390559.
- [43] [http://Www.Ipeenglobal.Com/Nozzle\\_Icon\\_MThen\\_Croped\\_Air\\_Sprayrd.Jpg/](http://Www.Ipeenglobal.Com/Nozzle_Icon_MThen_Croped_Air_Sprayrd.Jpg/), (Ziyaret tarihi: 7 Şubat 2018).
- [44] Ünal O., Bilyalı Dövme İşleminin Tane Boyutuna Etkisinin Deneysel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın 2011, 295985.
- [45] Žagar Sebastjan, Grum Janez, Surface Modification Analysis after Shot Peening of AA 7075 in Different States, *Materials Science Forum*, 2013, **768-769**, 519-525.
- [46] Gariépy A. ve ark., Experimental and numerical investigation of material heterogeneity in shot peened aluminium alloy AA2024-T351, *Surface and Coatings Technology*, 2013, **219**, 15-30.
- [47] [http://Nationalshotpeening.Com/Uploads/3/5/0/5/3505272/2891874\\_Orig.Jpg/](http://Nationalshotpeening.Com/Uploads/3/5/0/5/3505272/2891874_Orig.Jpg/), (Ziyaret tarihi: 7 Şubat 2018).
- [48] <http://I.Ytimg.Com/Vi/Uqxlerzfgau/Maxresdefault.Jpg/>, (Ziyaret tarihi:7 Şubat 2018).
- [49] <http://Www.Exportersindia.Com/Ushalshotblastingequipments/Shot-Peening-Machines-60607.Htm/>, (Ziyaret tarihi: 7 Şubat 2018).
- [50] <http://Metaldunyasi.Com.Tr/Upload/57988f4596fc8.Jpg/>, (Ziyaret tarihi: 7 Şubat 2018).
- [51] [http://Www.Emniyetrulman.Com/Tr/Urunler/Tane-Bilya-Ve - Masura- Tane-Bilya/Paslanmaz-Tane-Bilya/](http://Www.Emniyetrulman.Com/Tr/Urunler/Tane-Bilya-Ve-Masura-Tane-Bilya/Paslanmaz-Tane-Bilya/), (Ziyaret tarihi: 7 Şubat 2018).

- [52] <http://Www.Limbo.Com.Tr/>, (Ziyaret tarihi: 7 Şubat 2018).
- [53] Satıcı M.E., Kumlama İşleminin ve Bu İşleme Etkiyen Parametrelerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2004, 154681.
- [54] Kayalı Y., Borlanmış AISI 316L Paslanmaz Çeliğinin Korozyon ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2011, 283429.
- [55] Eryiğit H., Borlanmış Çift Fazlı Çeliklerin Aşınma Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2012, 325423.
- [56] Çam S., A356 Alüminyum Alaşımında Titanyum Miktarının Aşınma Davranışı Üzerinde Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, 2012, 316303.
- [57] <https://Www.Quora.Com/Why-Are-Airplanes-Commonly-Painted-White/>, (Ziyaret tarihi: 7 Şubat 2018).
- [58] Avcu E., Farklı Büyüklüklere Sahip Aşındırıcı Partikül Karışımlarının Ti6Al4V Alaşımının Eroziyon Aşınma Davranışına Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli/Türkiye, 2011, 283038.
- [59] Yürüker E., Aşındırıcı Partikül Boyut Dağılımının Eroziyon Aşınmaya Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli/Türkiye 2010, 259424.
- [60] [https://Budane.Net/Adezyon\\_Asinmasi/](https://Budane.Net/Adezyon_Asinmasi/), (Ziyaret tarihi: 7 Şubat 2018).
- [61] <http://W3.Balikesir.Edu.Tr/~Ay/Lectures /Ha/Lecture2.Pdf/>, (Ziyaret tarihi: 7 Şubat 2018).
- [62] Büyükkelleci Ü., Yeni Bir Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve Bazı Metallerin Aşınma Davranışlarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ/Türkiye, 2008, 232119.
- [63] Bağcı M., Mrek H., CuZn10 ve CuSn10 Bakır Alaşımının Eroziyon Aşınması *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük Üniversitesi, 13-15 Mayıs 2009.
- [64] Avcu E., Fidan S., Karabay S., Sınmazçelik T., Türkiye'de Enerji Nakil Hatlarında Kullanılan AA-1070 ile AA-6101 Alaşımının Katı Partikül Erozyon Davranışlarının Karşılaştırılması, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2012, **27**(4),



- [65] Ibarra J. ve ark., Effect of laser shock processing on erosive resistance of 6061-T6 aluminum, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, **26**(6), 1522-1530.
- [66] Sınmazçelik T., Sarı N.Y., Erodent size effect on the erosion of polyphenylene sulfide composite, *Polymer Composites*, 2010, **31**(6), 985-994.
- [67] Veinthal R., Tarbe R., Kulu P., Käerdi H., Abrasive erosive wear of powder steels and cermets, *Wear*, 2009, **267**(11), 1838-1844.
- [68] Naveed M., Schlag H., König F., Weiß S., Influence of the Erodent Shape on the Erosion Behavior of Ductile and Brittle Materials, *Tribology Letters*, 2016, **65**(1).
- [69] [https://www.researchgate.net/figure/Mechanisms-of-Erosive-Wear-a-Cutting-Erosion-B-Fatigue-Erosion-C-Plastic\\_316271862/](https://www.researchgate.net/figure/Mechanisms-of-Erosive-Wear-a-Cutting-Erosion-B-Fatigue-Erosion-C-Plastic_316271862/), (Ziyaret tarihi: 7 Şubat 2018).
- [70] Atapek Ş.H., Fidan S., Solid-particle erosion behavior of cast alloys used in the mining industry, *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2015, **22**(12), 1283-1292.
- [71] Sreenivas Rao K. V., Shivashankar G. S., Sanman S., Vineeth Kumar T. V., Effect of Standoff Distance on Solid Particle Erosion Wear Behavior of Chill Cast Aluminum – Boron Carbide Composites, *Materials Today: Proceedings*, 2017, **4**(9), 10015-10019.
- [72] Tewari Us, Harsha Ap, Häger Am, Friedrich K, Solid particle erosion of unidirectional carbon fibre reinforced polyetheretherketone composites, *Wear*, 2002, **252**(11), 992-1000.
- [73] Malik J. ve ark., Evaluating the Effect of Hardness on Erosion Characteristics of Aluminum and Steels, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, **23**(6), 2274-2282.
- [74] Laguna J. R. -Camacho ve ark., Solid particle erosion on coatings employed to protect die casting molds, *Progress in Organic Coatings*, 2011, **74**(4), 750-757.
- [75] Juan R. ve ark., Solid Particle Erosion on Different Metallic Materials, 2013,
- [76] Amirthan G., Udayakumar A., Bhanu Prasad V. V., Balasubramanian M., Solid particle erosion studies on biomorphic Si/SiC ceramic composites, *Wear*, 2010, **268**(1-2), 145-152.
- [77] Bata E. ve ark., Effect of Solid Particle Erosion on the Aqueous Corrosion Behaviour of a Ti6Al4V Sheet, *Mater. Sci. Eng. Adv. Res Special*, 2017, (26-33).
- [78] Majzoobi G. H., Azadikhah K., Nemati J., The effects of deep rolling and shot peening on fretting fatigue resistance of Aluminum-7075-T6, *Materials Science and Engineering: A*, 2009, **516**(1-2), 235-247.

- [79] Majzoobi G. H., Nemati J., Novin Rooz A. J., Farrahi G. H., Modification of fretting fatigue behavior of AL7075–T6 alloy by the application of titanium coating using IBED technique and shot peening, *Tribology International*, 2009, **42**(1), 121-129.
- [80] Hatamleh O., Lyons J., Forman R., Laser and shot peening effects on fatigue crack growth in friction stir welded 7075-T7351 aluminum alloy joints, *International Journal of Fatigue*, 2007, **29**(3), 421-434.
- [81] Trško Libor, Guagliano Mario, Bokůvka Otakar, Nový František, Fatigue life of AW 7075 Aluminium Alloy after Severe Shot Peening Treatment with Different Intensities, *Procedia Engineering*, 2014, **74**, 246-252.
- [82] Unal O., Varol R., Almen intensity effect on microstructure and mechanical properties of low carbon steel subjected to severe shot peening, *Applied Surface Science*, 2013, **290**, 40-47.
- [83] Grinspan A. Sahaya, Gnanamoorthy R., Surface modification by oil jet peening in Al alloys, AA6063-T6 and AA6061-T4, *Applied Surface Science*, 2006, **253**(2), 997-1005.
- [84] Soyama Hitoshi, Takeo Fumio, Comparison between cavitation peening and shot peening for extending the fatigue life of a duralumin plate with a hole, *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, **227**, 80-87.
- [85] Sheng Xiang-Fei, Xia Qin-Xiang, Cheng Xiu-Quan, Lin Lie-Shu, Residual stress field induced by shot peening based on random-shots for 7075 aluminum alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, **22**, s261-s267.
- [86] Kikuchi Shoichi, Nakamura Yuki, Nambu Koichiro, Ando Masafumi, Effect of shot peening using ultra-fine particles on fatigue properties of 5056 aluminum alloy under rotating bending, *Materials Science and Engineering: A*, 2015, **652**, 279-286.
- [87] Harding M. D. ve ark., 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.
- [88] Fang C-K, Chuang Th, The effect of humidity on the erosive wear of 6063 Al alloy, *Wear*, 1999, **236**(1-2), 144-152.
- [89] Bora M.Ö ve ark., The effect of TiO<sub>2</sub> filler content on the mechanical, thermal, and tribological properties of TiO<sub>2</sub>/PPS composites, *Polymer Composites*, 2013, **34**(10), 1591-1599.
- [90] [http://Www.Saykar.Net/Aluminyum\\_Oksit/](http://Www.Saykar.Net/Aluminyum_Oksit/), (Ziyaret tarihi: 7 Şubat 2018).
- [91] <https://Www.Kemet.Co.Uk/Images/Metallography/Micracut-151.Jpg/>, (Ziyaret tarihi: 7 Şubat 2018).

- [92] [http://Www.Metkon.Com/Tr/Kategori\\_Sertlik-Olcme\\_40.Html](http://Www.Metkon.Com/Tr/Kategori_Sertlik-Olcme_40.Html), (Ziyaret tarihi: 20 Şubat 2018).
- [93] [http://Evolucaopet.Com.Br/1433- Large\\_ Default/ Balanca - Analitica-Auw320.Jpg/](http://Evolucaopet.Com.Br/1433- Large_ Default/ Balanca - Analitica-Auw320.Jpg/), (Ziyaret tarihi: 7 Şubat 2018).
- [94] [http://Www.Metkon.Com /Timthumb.Php?Src= Fotogaleri /Image1\\_ 201601 28124235 .Jpg&W=300&H=332/](http://Www.Metkon.Com /Timthumb.Php?Src= Fotogaleri /Image1_ 201601 28124235 .Jpg&W=300&H=332/), (Ziyaret tarihi: 7 Şubat 2018).
- [95] [http://Img.Directindustry.Com.Ru/Images\\_Di/Photo-G/147949-11760783.Jpg/](http://Img.Directindustry.Com.Ru/Images_Di/Photo-G/147949-11760783.Jpg/), (Ziyaret tarihi: 7 Şubat 2018).
- [96] Aymen A. Ahmed ve ark., 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.
- [97] 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.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Avcu E., **Harbelioğlu E.**, AA7075 Alüminyum Alaşımının Bilyalı Dövme İşleminde Bilya Boyutunu Yüey Pürüzlülüğü, 3 Boyutlu Yüzey Topografyası ve Yüzey Morfolojisine Etkileri, *16<sup>th</sup> International Materials Symposium IMSP'2016 Pamukkale University*, Denizli, Turkey, 12-14 October 2016.

**Harbelioğlu E.**, Doğan G., Önhon F., *DIE IN DIE International Advanced Researches and Engineering Congress, IAREC (2017)*, Korkut Ata University, Osmaniye, Turkey, 16-18 October 2017.

## ÖZGEÇMİŞ

Mayıs-1989 tarihinde Hatay'da doğdu. İlköğretim ve lise öğrenimini Suudi Arabistan ve Hatay'da tamamladı. 2008'de başladığı Kocaeli Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden 2012 yılında Makina Mühendisi olarak mezun olmuştur. Eylül-2013 tarihinde Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2012-2014 yılları arasında Karel Kalıp 'ta Ar-Ge Tasarım ve Proses Mühendisi olarak görev almıştır. 2014 yılından beri FORD OTOSAN A.Ş. Takım Kalıp Bölümü'nde Kıdemli Yeni Projeler ve Proje Koordinasyon Mühendisi olarak görevini sürdürmektedir.

