KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI YÜZEY ÖRTME ORANI VE BİLYA PÜSKÜRTME BASINÇLARINDA BİLYALI DÖVÜLEN AA1050 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ YÜZEY VE YÜZEY ALTI ÖZELLİKLERİ

BERKAY GÖNÜL

KOCAELİ 2020

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI YÜZEY ÖRTME ORANI VE BİLYA PÜSKÜRTME BASINÇLARINDA BİLYALI DÖVÜLEN AA1050 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ YÜZEY VE YÜZEY ALTI ÖZELLİKLERİ

BERKAY GÖNÜL

Doç. Dr. Egemen AVCU
Danışman, Kocaeli Üniversitesi .....

Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Prof. Dr. Şenol YILMAZ
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 06.02.2020

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bilyalı dövme işlemi malzemelerin yüzeyine genellikle basınçlı hava ile hızlandırılmış bilyaların çarptırılmasına dayanan bir mekanik yüzey işlemidir. Bilyalı dövme işlemi uygulama kolaylığı ve düşük maliyeti sebebiyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bilyalı dövme işlemi malzemelerin yüzey ve yüzey altında deformasyona yol açarak malzemelerin mekanik özelliklerini (özellikle yorulma dayanımlarını) iyileştirmeyi amaçlayan bir yöntemdir. Alüminyum alaşımları hafif olmalarına rağmen yüksek dayanıma sahip olmaları, iyi ısı ve elektrik iletkenlikleri, korozyon dirençleri gibi özellikleri ile endüstriyel alanlarda kullanımda ön plana çıkmaktadırlar. Günümüz literatürü incelendiğinde alüminyum alaşımlarının bilyalı dövülmesi sonrası yorulma dayanımları, korozyon dirençleri, elektrik iletkenlikleri, kalıntı gerilme oluşumu gibi konular üzerine yoğun bir ilgi olmasına rağmen bilyalı dövmenin alüminyum alaşımlarının yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkileri üzerine çalışmalar sınırlıdır. Yapılan tez çalışmasında AA1050 alüminyum alaşımının farklı bilyalı dövme parametreleri (yüzey örtme oranı, püskürtme basıncı, tarama hızı) ile bilyalı dövülmesi sonucunda yüzey ve yüzey altı mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmesi amaçlanmıştır.

Yüksek lisans tezimin deneysel planlaması, elde edilen sonuçların tartışılması ve yorumlanması konusunda bana her zaman yol gösteren Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Dr. Yasemin YILDIRAN AVCU'ya, tez çalışmamın ön deneylerinde ve analiz aşamasında her zaman yanımda olan çalışma arkadaşlarım Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü yüksek lisans öğrencileri Okan YETİK ve Ahmet Burak ÇUBUK'a, Kocaeli Üniversitesi Malzeme Laboratuvarı'nda yapılan analizler sırasında yardımcı olan Arş. Gör. Beysim ÇETİN ve Arş. Gör. Erhan BALCI'ya teşekkür ederim.

2017/049 numaralı bilimsel araştırma projesi ile bilgisayar kontrollü bilyalı dövme düzeneğinin üretimine desteklerinden dolayı Kocaeli Üniversitesi BAP Koordinasyon Birimi'ne ve tez çalışmasındaki elektron mikroskobu görüntülerinin elde edilmesini sağlayan Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Laboratuvarı yönetimi ve Sakarya Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Dr. Fatih Erdem BAŞTAN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmamın her aşamasında hiçbir zaman desteğini esirgemeyen, önemli fikirlerini sunan ve bana yol gösteren tez danışmanım değerli hocam Doç. Dr. Egemen AVCU'ya teşekkür ederim.

Hayatımın her anında yanımda olan ve desteğini esirgemeyen annem Sibel GÖNÜL, babam Nevzat GÖNÜL ve tüm sevdiklerime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Şubat – 2020 Berkay GÖNÜL

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ vii
ÖZET viii
ABSTRACT ix
GİRİŞ 1
1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI 3
1.1. Alüminyum Alaşımları ve Sınıflandırılması 3
1.1.1. Dövme alüminyum alaşımları 3
1.1.1.1. 1xxx alüminyum alaşımlar 4
1.1.1.2. 2xxx alüminyum alaşımlar 4
1.1.1.3. 3xxx alüminyum alaşımlar 4
1.1.1.4. 4xxx alüminyum alaşımlar 5
1.1.1.5. 5xxx alüminyum alaşımlar 5
1.1.1.6. 6xxx alüminyum alaşımlar 5
1.1.1.7. 7xxx alüminyum alaşımlar 6
1.1.1.8. 8xxx alüminyum alaşımlar 6
1.1.2. Dökme alüminyum alaşımları 6
1.2. AA1050 Alüminyum Alaşımı 7
2. BİLYALI DÖVME 9
2.1. Bilyalı Dövme İşlemi 9
2.2. Bilyaların Sınıflandırılması 10
2.3. Bilyalı Dövme Parametreleri 12
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI 14
4. MALZEME VE YÖNTEM 26
4.1. Malzeme 26
4.1.1. AA1050 alüminyum alaşımı numuneler 26
4.1.2. Paslanmaz çelik bilyalar 26
4.2. Yöntem 27
4.2.1. Numunelerin hazırlanması 27
4.2.2. Bilyalı dövme 29
4.2.3. Kütle kaybı ölçümleri 30
4.2.4. Pürüzlülük ölçümleri 30
4.2.5. Mikro sertlik ölçümleri 31
4.2.6. Mikroyapı analizleri 31
4.2.7. Yüzey örtme oranı hesaplanması 32
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 34
5.1. Bilyalı Dövme Parametrelerine Bağlı Olarak Yüzey Altı Mikroyapı Değişimi 34
5.2. Bilyalı Dövme Parametrelerine Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğünün Değişimi 36

5.3. Bilyalı Dövme Parametrelerine Bağlı Olarak Yüzey Altı Sertliğin Değişimi 38
5.4. Bilyalı Dövme Parametrelerine Bağlı Olarak Kütle Değişimi 42
5.5. SEM Çalışmaları 43
5.5.1. Yüzey morfolojileri 43
5.5.2. Kesit mikroyapıları 50
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 54
KAYNAKLAR 56
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 62
ÖZGEÇMİŞ 63

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Bilyalı dövme işlemi şematik gösterimi 10
Şekil 2.2. Bilyalı dövme işlemlerinde kullanılan bilya çeşitleri 11
Şekil 2.3. Farklı boyutlarda standart çelik bilyalar 11
Şekil 2.4. Almen test şeridi deneysel şematiği 13
Şekil 2.5. Almen deneyi ile doyum noktası tespit etme 13
Şekil 3.1. Bilyalı dövme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi 14
Şekil 3.2. Püskürtme basıncının ortalama pürüzlülüğe etkisi 15
Şekil 3.3. Farklı parametreler ile dövülmüş AA6061 alaşımının yüzey SEM görüntüleri, a) Dövülmemiş, b) 1,10 Bar & 44 gr/s, c) 1,24 Bar & 44 gr/s, d) 1,39 Bar & 44 gr/s, d) 1,39 Bar & 38 gr/s 16
Şekil 3.4. Pürüzlülük parametrelerinin yüzey örtme oranına bağlı değişimi 17
Şekil 3.5. Sertliğin yüzeyden derinliğe bağlı değişimi, SP1) 1,10 Bar & 44 gr/sn, SP2) 1,24 Bar & 44 gr/sn, SP3) 1,39 Bar & 44 gr/sn, SP4) 1,39 Bar & 38 gr/sn 17
Şekil 3.6. Mikrosertlik değerinin püskürtme basıncı ve bilya boyutuna bağlı değişimi (a) 2 bar & S10 (b) 4 bar & S10, (c) 2 bar & S60 (d) 4 bar & S60 18
Şekil 3.7. Bilyalı dövme süresinin yüzey altı mikrosertlik trendine etkisi 19
Şekil 3.8. Almen şiddetinin yüzey altı mikrosertlik trendine etkisi 20
Şekil 3.9. Püskürtme basıncının yüzey altı mikrosertlik trendine etkisi 21
Şekil 3.10. Kesitten alınmış SEM görüntüleri, (a-e) dövülmemiş, (f-j) 180 saniye bilyalı dövülmüş 22
Şekil 3.11. Al-Li alaşımının yüzey morfolojileri, (a) dövülmemiş, (b) bilyalı dövülmüş 23
Şekil 3.12. Bilyalı dövülmüş karbon çeliğinin yüzey altı mikroyapısındaki yönelimler 24
Şekil 3.13. AA2024 malzeme yüzeyine gömülmüş bilya parçasının SEM görüntüsü 25
Şekil 4.1. AA1050 numuneler, a) bilyalı dövme öncesi, b) kalıplara alınmadan öncesi 27
Şekil 4.2. Metkon Micracut 125 model hassas kesim cihazı 28
Şekil 4.3. Metkon Forcipol 2V ve Metkon Forcimat otomatik zımpara ve parlatma cihazı 28
Şekil 4.4. Özel tasarımlı CNC kontrollü bilyalı dövme cihazının CAD görüntüsü 29
Şekil 4.5. Shimadzu ATX224 model hassas terazi 30
Şekil 4.6. Mitutoyo Surftest SJ-301 marka taşınabilir yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı 31
Şekil 4.7. Zwick Roell 3212 marka Vickers mikro sertlik ölçüm cihazı 31
Şekil 4.8. Nikon Eclipse MA100 model ters optik mikroskop 32
Şekil 4.9. Vega Tescan II (Taramalı elektron mikroskobu) 32
Şekil 4.10. Test numunesi ImageJ analizi (1 bar, 2 saniye) 33

Şekil 5.1. Bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak yüzey altı mikroyapı değişimi 35
Şekil 5.2. Bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak yüzey altı mikroyapı değişimi (devamı) 36
Şekil 5.3. Bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğünün (R_a) değişimi 37
Şekil 5.4. Bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünde maksimum yükseklik (R_y) değişimi 38
Şekil 5.5. Yüzey örtme oranına bağlı mikrosertlik değerinin değişimi 39
Şekil 5.6. Püskürtme basıncına bağlı mikrosertlik değerinin değişimi 40
Şekil 5.7. Tarama hızına bağlı mikrosertlik değerinin değişimi 40
Şekil 5.8. Literatürde AA1050 alüminyum alaşımının sertlik artışı 41
Şekil 5.9. Bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak kütle değişimi 43
Şekil 5.10. Püskürtme basıncı ve yüzey örtme oranına bağlı yüzey mikroyapı SEM görüntüleri 44
Şekil 5.11. Yüzey SEM görüntüleri, a) 1 bar, %100, 8000x büyütme, b) 1 bar, %1000, 2500x büyütme 45
Şekil 5.12. Yüzey SEM görüntüleri, 5 bar, %100, a) 100x büyütme, b) 2500x büyütme 45
Şekil 5.13. Yüzey SEM görüntüleri, 5 bar, %1000, 2500x büyütme 46
Şekil 5.14. SEM ile yüzey EDS analizi (1 bar, %100) 48
Şekil 5.15. SEM ile yüzey EDS analizi (5 bar, %1000) 49
Şekil 5.16. Püskürtme basıncı ve yüzey örtme oranına bağlı kesit mikroyapı SEM görüntüleri 50
Şekil 5.17. Kesit SEM görüntüleri, 2500x büyütme, a) 1 bar, %100, b) 1 bar, %1000 51
Şekil 5.18. Kesit SEM görüntüleri, 2500x büyütme, a) 5 bar, %100, b) 5 bar, %1000 52
Şekil 5.19. Kesit SEM görüntüsü, 5 bar, %100, 10000x büyütme 53

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Dövme alüminyum alaşımlarının adlandırılması 4
Tablo 1.2. Dökme alüminyum alaşımlarının adlandırılması 6
Tablo 1.3. AA1050 alüminyum alaşımının fiziksel özellikleri 7
Tablo 1.4. AA1050 alaşımının karakteristik mekanik özellikleri 8
Tablo 2.1. Bilyalı dövme işlemi sonuçlarını etkileyen parametreler..... 12
Tablo 4.1. AA1050 alüminyum alaşımının kimyasal ve mekanik özellikleri 26
Tablo 4.2. Paslanmaz çelik (Chronital S60) bilyaların kimyasal ve fiziksel özellikleri..... 27
Tablo 4.3. Bilyalı dövme deneysel işlem parametreleri 29

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

µm	: Mikrometre
cm	: Santimetre
m	: Metre
mg	: Miligram
mm	: Milimetre
MPa	: Megapascal
R_a	: Ortalama çizgisel pürüzlülük
s	: Saniye

Kısaltmalar

AA	: Alüminyum Alaşımı
ARB	: Accumulative Roll Bonding (Haddeleme ile Birleştirme)
BSE	: Back Scattered Electron (Geri Saçılan Elektron)
EDS	: Energy Dispersive Spectroscopy (Enerji Dağınımlı Görünge Gözlemi)
EKAP	: Eş Kanallı Açısal Presleme
HPT	: High Pressure Torsion (Yüksek Basınçla Burulma)
HV	: Hardness Vickers (Vickers Sertlik)
SE	: Secondary Electrons (İkincil Elektronlar)
SEM	: Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)

FARKLI YÜZEY ÖRTME ORANI VE BİLYA PÜSKÜRTME BASINÇLARINDA BİLYALI DÖVÜLEN AA1050 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ YÜZEY VE YÜZEY ALTI ÖZELLİKLERİ

ÖZET

Bu çalışmada AA1050 alüminyum alaşımı farklı bilyalı dövme parametreleri (tarama hızı, yüzey örtme oranı ve püskürtme basıncı) ile bilyalı dövülmüştür. Çalışmanın amacı, bilyalı dövme işleminde püskürtme basıncının ve aşırı bilyalı dövme olarak kabul edilen yüzey örtme oranlarının endüstriyel olarak saf kabul edilen AA1050 alüminyum alaşımının yüzey ve yüzey altı özelliklerine (mikroyapı, yüzey pürüzlülüğü, mikro sertlik ve kütle değişimi) etkilerini incelemektir. Mikroyapı görüntüleri incelenerek yüzey ve yüzey altındaki plastik deformasyonlar tespit edilmiş, yüksek püskürtme basıncı ile dövülen numunelerde çatlak ve çatlak oluşumları gözlemlenmiştir. Kütle değişimleri göz önüne alındığında sadece yüksek yüzey örtme oranı oranlarında kütle değişimi gözlenmiş olup düşük basınçlı dövülen numunelerde kütle artışı, yüksek basınçlı dövülen numunelerde ise kütle kaybı görülmüştür. Bilyalı dövme işleminde yüzey pürüzlülüğüne etki eden temel parametre püskürtme basıncıdır. Artan püskürtme basıncı, yüzey pürüzlülüğünde artışa neden olmaktadır. Tarama hızı ve yüzey örtme oranına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünde belirgin değişiklik görülmemiştir. Mikro sertlik değişimleri incelendiğinde püskürtme basıncı artışına paralel olarak mikro sertlik değerinin arttığı gözlemlenmiştir, yüzey örtme oranı arttığında ise yüzeye yakın bölgelerde mikro sertlik değerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. SEM görüntüleri incelendiğinde yüksek yüzey örtme oranlarında yüzey hasarları gözlemlenmiş, yapılan EDS analizleriyle ise yüzeye gömülmüş bilya taneleri tespit edilmiştir. Bilyalı dövme işlemi ile AA1050 alüminyum alaşımının yüzey sertliğinin iki katına çıkartılabildiği görülmüştür. Endüstride AA1050 alaşımının sadece yüzey ve yüzey altı katmanında daha yüksek sertlik elde etmeyi gerektiren durumlarda bilyalı dövme etkili, ucuz ve kolay uygulanabilen bir yöntem olduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum Alaşımları, Bilyalı Dövme Parametreleri, Mikro Sertlik, Mikroyapısal Özellikler, Yüzey Pürüzlülüğü.

INVESTIGATION OF SURFACE AND SUB-SURFACE PROPERTIES OF AA1050 ALUMINIUM ALLOY SHOT PEENED UNDER DIFFERENT COVERAGE RATE, PEENING PRESSURE

ABSTRACT

In this study, AA1050 aluminum alloy is shot peened with different parameters such as scanning speed, coverage and peening pressure. The aim of the study is to investigate the effects of peening pressure and high coverage rates (overpeening) on the surface and sub-surface properties (microstructure, surface roughness, micro hardness and mass change) of AA1050 aluminum alloy, which is accepted as industrially pure. Microstructure images were examined and plastic deformations were detected on the surface and subsurface. When the mass changes were investigated, mass gain is only observed for high coverage rates where low peening pressure resulted in mass gain, and high peening pressure resulted in mass loss. The main parameter affecting the surface roughness in shot peening process is peening pressure, and high peening pressure results in high surface roughness. There was no change observed in surface roughness for different scanning speed and coverage rates. Microhardness trend is observed to be increasing as the peening pressure increases, however, coverage increase only resulted in higher microhardness near the surface. SEM analysis showed that higher coverage rate caused damage on the surface, moreover, the EDS analysis proved that there are embedded stainless steel shots on the surface of the AA1050 material. It is shown that shot peening can double the surface hardness of an AA1050 alloy. It has been introduced that shot peening is an effective, inexpensive and easy-to-apply method when higher hardness is only required on the surface and subsurface of an AA1050 aluminum alloy.

Keywords: Aluminum Alloy, Shot Peening Parameters, Microhardness, Microstructural Properties, Surface Roughness.

GİRİŞ

Günümüzde alüminyum alaşımları hafif olmaları, kolay şekil almaları, yüksek korozyon direnci ve düşük maliyetlerinden dolayı otomotiv ve havacılık endüstrilerinde yüksek kullanım potansiyeline sahiptir. Ancak, diğer metalik malzemelere göre daha düşük mukavemete sahip olduğundan dolayı alüminyum alaşımlarının uygulama alanı sınırlıdır. Bu nedenle, alüminyum ve alaşımlarının mekanik özelliklerini arttırmak için aşırı deformasyon teknikleri kullanılarak endüstrideki kullanım alanları genişletilmeye çalışılmaktadır. AA1050 alaşımının mekanik özelliklerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılan aşırı deformasyon yöntemleri çok yüksek kuvvetler gerektirmekte ve gerekli makineler yüksek maliyetlere sebep olmaktadır. Bu alaşımın sadece yüzey ve yüzey altı katmanlarının mekanik özelliklerini geliştirmek hedeflendiğinde bilyalı dövme uygulaması uygun maliyet ve kolay uygulanabilirliği ile öne çıkmaktadır.

Bilyalı dövme bir yüzey işleme uygulaması olup, bilyaların genellikle basınçlı hava ile hızlandırılarak hedef yüzeye çarptırılması işlemidir. Yüzeye çarpan bilyalar yüzeyde çukur şeklinde deformasyonlar oluştururlar. Birçok bilyanın yüzeye çarpması ile birlikte yüzey ve yüzey altı bölgelerde deformasyon tabakası oluşur. Bu bölgelerde deformasyona bağlı tane incelmesi ve kalıntı gerilme tabakaları meydana gelir ve malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesini sağlar. Günümüzde bilyalı dövme üzerine yapılan çalışmalar genellikle bilyalı dövmenin malzemelerin yorulma dayanımı, korozyon direnci, elektrik iletkenliği ve yüzey altında oluşan kalıntı gerilme tabakası üzerine odaklanmaktadır, ancak bilyalı dövmenin yüzey özelliklerine etkisi de bir o kadar önemli olup bu konu hakkında literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Yüzey ve yüzey altı özelliklerinin önemli olmasının sebebi literatürde yüzey özelliklerine ve yüzeyde meydana gelebilecek istenmeyen potansiyel hasarlara bağlı malzemenin yorulma dayanımında azalma görülmesi ihtimali yaratması ile açıklanmaktadır.

Bu tez çalışmasının amacı, farklı bilyalı dövme parametrelerinin AA1050 alüminyum alaşımının yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkilerinin incelenmesi ve bu parametrelerin sonraki çalışmalarda nasıl optimize edilebileceğini tespit etmektir. Tez çalışmasında AA1050 alüminyum alaşımının bilyalı dövülmesinde kullanılan farklı bilyalı dövme parametreleri; püskürtme basıncı (1 bar, 5 bar), yüzey örtme oranı (%100, %200, %1000) ve yüzey tarama hızı (1 mm/s, 10 mm/s, 20 mm/s) olarak sıralanabilir. Bu parametreler ile dövülmüş AA1050 alüminyum alaşımlarında kütle değişimleri, yüzey pürüzlülüğü, mikro sertlik ve mikroyapı değişimleri incelenerek yüzey ve yüzey altı mekanik özelliklerindeki iyileşmelerin gözlemlenmesi hedeflenmektedir.

Tez çalışmasında AA1050 alaşımları özel olarak tasarlanan CNC kontrollü bilyalı dövme sistemi ile dövülmüştür. Bilyalı dövme öncesi ve sonrası kütle değişimini gözlemlemek amacıyla kütle ölçümleri yapılmış, sonrasında malzeme yüzeyinde pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Bu işlemler sonrasında malzemeler hassas kesim cihazı ile parçalara ayrıldıktan sonra polyester kalıba alınarak parlatılmış ve metalografik çalışmalar için hazır hale getirilmiştir. Sonrasında kesitten mikrosertlik ölçümleri yapılmış ve optik mikroskop ile görüntülenmiştir. En son olarak numunelerin yüzey ve kesit bölgelerinden SEM görüntüleri alınmış ve yüzey EDS analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasının ilk bölümünde alüminyum alaşımlarının temel özellikleri ve sınıflandırılmaları hakkında genel bilgiler verilmiştir. Tezin ikinci bölümünde bilyalı dövme işlemi, kullanılan bilyaların sınıflandırılması ve bilyalı dövme parametreleri konuları açıklanmıştır. Sonraki bölümde bilyalı dövme işleminin literatürde (öncelikle alüminyum olmak üzere) malzemelerin yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkisi incelenmiştir. Devamında kullanılan malzeme ve yöntem ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Son olarak deneysel çalışmalar kısmında sonuçlar verilmiş, sonuçlar ve öneriler kısmında ise deneysel çalışma sonuçları tartışılmış ve ileriye yönelik çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

1.1. Alüminyum Alaşımları ve Sınıflandırılması

Alüminyum, %8'lik oranı ile oksijen ve silisyumdan sonra doğada en çok bulunan elementtir. Ancak alüminyum doğada saf olarak bulunmamaktadır. Doğada en yaygın bulunan alüminyum bileşikleri alüminyum sülfat ve alüminyum oksittir. Saf alüminyum, yaklaşık 2,7 g/cm^3 yoğunluğa sahiptir ve yoğunluğu yaklaşık 7,8 g/cm^3 olan çelik ile kıyaslandığında çelik yoğunluğunun üçte biri kadardır. Saf alüminyumun erime noktası 660 °C'dir. Bu değer demir, bakır gibi birçok diğer yapısal materyalden daha düşüktür. Yeni üretilen bir alüminyum malzeme hava ile temas ettiğinde yüzeyinde ince bir alüminyum oksit tabakası oluşur. Alüminyum, yüzeyinde alüminyum oksit ön tabakası oluşumu gerçekleştikten sonra korozyona karşı yüksek direnç gösterir. Saf alüminyum, düşük mukavemet ve yüksek sünekliğe sahiptir. Elastik modülü çeliğin üçte biri kadar olan alüminyum, çeliğe göre üç kat daha fazla deforme olabilir ve enerji soğurabilir [1-4].

Alüminyumun alaşımlandırılmasında sıklıkla kullanılan malzemeler bakır, manganez, silikon, magnezyum ve çinkodur. Ayrıca, tane inceltme ve diğer mekanik özellikleri geliştirmek amacıyla diğer elementlerde küçük miktarlarda kullanılmaktadır. Birçok alüminyum alaşımı olduğundan dolayı Aluminum Association kurumu alaşımları ayırt edebilmek amacıyla ve alaşımın metalürjik durumu veya uygulanmış ısıl işlemleri belirtmek adına alüminyumları sınıflandırma yoluna gitmiştir. Alüminyum ve alaşımları üretim şekillerine göre dövme ve dökme olarak iki ana grupta sınıflandırılmışlardır (Tablo 1.1. ve Tablo 1.2.) [1].

1.1.1. Dövme alüminyum alaşımları

Tablo 1.1.'de dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasında kullanılan başlıca seriler ve bu serilerdeki alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementleri gösterilmiştir. Aşağıda bu dövme alüminyum alaşımı serilerinin ayrıntılı olarak mekanik özellikleri ve kullanım alanları verilmiştir.

Tablo 1.1. Dövme alüminyum alaşımlarının adlandırılması [1]

Alaşım	Ana alaşım elementi
1xxx	Minimum %99 alüminyum
2xxx	Bakır
3xxx	Manganez
4xxx	Silikon
5xxx	Magnezyum
6xxx	Magnezyum ve silikon
7xxx	Çinko
8xxx	Diğer element
9xxx	Kullanılmayan seri

1.1.1.1. 1xxx alüminyum alaşımlar

1000 serisi alüminyum alaşımları ticari sınıflandırmada saf alüminyum olarak bilinen alüminyum alaşımı serisidir. Bu seri %90,00 saflıktaki AA1100'dan başlayarak saflığı %99,50 olan AA1050/1350 ve %99,75 saflıkta AA1175 alaşımlarını içermektedir. 1000 serisi alaşımlar; kolay şekil değiştirebilmeleri, yüksek korozyon direnci ve elektrik iletkenliği gibi özelliklerinden dolayı genellikle elektrik ve kimyasal uygulamalarda kullanımlarıyla öne çıkmaktadır [2, 5, 6].

1.1.1.2. 2xxx alüminyum alaşımlar

2000 serisi alüminyum alaşımları ısıl işlem görmeye uygundur. Yüksek sıcaklıklarda dahi yüksek mukavemete sahip olup yüksek tokluk göstermektedir. Bu seri bazı özel durumlarda kaynak ile birleştirilmeye uygundur. 2000 serisi alaşımlar korozyona dayanıklı olmadıklarından dolayı genellikle boya veya kaplama gibi yöntemler ile korozyona karşı korunmalıdırlar. Bu serideki alüminyumların çekme dayanımları 190-430 MPa aralığındadır ve yüksek dayanıma sahip 2000 serisi alüminyum alaşımları (AA2014/AA2024 gibi) kamyon karoseri ve havacılık alanlarında kullanılmaktadır. AA2019/AA2048 gibi kaynaklanabilir alaşımlar ise genellikle havacılık alanında kaynak gerektiren montaj uygulamalarında tercih edilmektedir [2, 5, 6].

1.1.1.3. 3xxx alüminyum alaşımlar

3000 serisi alüminyum alaşımları pekleşebilir, çok iyi korozyon direnci özelliği gösterir ve kaynak uygulamalarında kullanılabilmektedir. 3000 serisi alüminyum

alaşımları 110-280 MPa aralığında çekme dayanımına sahip olup, diğer alüminyum alaşımları ile kıyaslandığında orta seviyede bir dayanım sergilemektedirler. Genellikle ısı transferi, paketleme ve çatı kaplama gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. AA3003/AA3004/AA3104 alaşımları gıdalar ve kimyasal ürünler ile etkileşime girmediği için mutfak ürünleri ve kimyasal ekipmanlarda kullanılan 3000 serisi alaşımlarına örnek olarak verilebilir [2, 5, 6].

1.1.1.4. 4xxx alüminyum alaşımlar

4000 serisi alüminyum alaşımları ısıl işlem görmeye uygun olup iyi akma özellikleri göstermektedir. Bu serideki alaşımların çekme dayanımları yaklaşık olarak 170-380 MPa aralığında değişmektedir. İyi akma özelliği sağlayan 4000 serisi genellikle piston üretiminde ve kompleks şekilli dövme işlemlerinde tercih edilmektedir. 4000 serisi alüminyum alaşımları iyi akma özelliğini içeriğindeki silikon ile kazanmaktadır ve bu özelliği sebebiyle dövme uygulamalarında kompleks kalıpların tamamını doldurabilmektedir [2, 5, 6].

1.1.1.5. 5xxx alüminyum alaşımlar

5000 serisi alüminyum alaşımları pekleşebilir, yüksek dayanıma sahiptir. Bu seri tuzlu sularda bile çok iyi korozyon dayanımına ve mutlak sıfıra (-273 °C) yakın sıcaklıklarda bile çok yüksek tokluğa sahiptir. 5000 serisi alüminyum alaşımlarının çekme dayanımları 125-350 MPa aralığında değişmektedir. Bu seriye ait alaşımlar 20 cm kalınlığa kadar kaynak işlemine elverişlidir. Bu özelliklerinden dolayı 5000 serisi alaşımlar inşaat, karayolu yapıları, denizcilik ve otomotiv alanlarında geniş bir kullanım alanı bulmaktadır [2, 5, 6].

1.1.1.6. 6xxx alüminyum alaşımlar

6000 serisi alüminyum alaşımları ısıl işleme uygundur, korozyon dayanımları çok yüksektir ve çekme dayanımları 125-400 MPa arasında değişmektedir. Bu seriye ait alaşımlar kolayca kaynaklanabilir ve en önemli özellikleri ise mükemmel ekstrüzyon elverişliliğine sahip olmasıdır. 6000 serisi alüminyum alaşımları kolay ekstrüzyon edilebilmelerinden dolayı mimari ve yapısal uygulamalarda tercih edilmektedirler. Bu seride en çok endüstriyel uygulama alanı bulan iki alaşımdan AA6061 yapısal

elemanların kaynağında kullanılmakta, AA6063 ise alüminyum köprülerin ekstrüzyon ile üretilen elemanlarında kullanılmaktadır [2, 5, 6].

1.1.1.7. 7xxx alüminyum alaşımlar

7000 serisi alüminyum alaşımları ısıl işleme uygundur ve çok yüksek mukavemete sahiptirler. Bu seriye ait alaşımların mukavemetleri 220-610 MPa arasında değişmektedir. Yapısındaki Al-Zn-Mg-Cu elementleri ile en yüksek dayanıma sahip alüminyum alaşımları 7000 serisine aittir. 7000 serisi alüminyum alaşımları hafif olmalarına rağmen yüksek dayanım sergilediklerinden dolayı havacılık endüstrisinde yoğun ilgi görmüştür. Fakat, 7000 serisi alüminyum alaşımları 5000 ve 6000 serisi alüminyum alaşımları kadar yüksek korozyon direnci sağlayamadıkları için genellikle yüzey kaplaması uygulanmaktadır [2, 5, 6].

1.1.1.8. 8xxx alüminyum alaşımlar

8000 serisi alüminyum alaşımları ısıl işlem görebilir ve bunun yanında yüksek iletkenlik, mukavemet ve sertlik gibi mekanik özelliklere sahiptirler. Genellikle elektrik ve havacılık alanları ve rulman imalatlarında kullanılmaktadır. 8000 alaşımları Fe-Ni-Li gibi nadir kullanılan alaşım elementlerini içeren bir seridir. Bu seriye dahil alaşımların mukavemetleri 120-240 MPa arasında değişim göstermektedir [2, 5, 6].

1.1.2. Dökme alüminyum alaşımları

Tablo 1.2. Dökme alüminyum alaşımlarının adlandırılması [1]

Alaşım	Ana alaşım elementi
1xx.x	Minimum %99 alüminyum
2xx.x	Bakır
3xx.x	Silikon, bakır ve/veya magnezyum
4xx.x	Silikon
5xx.x	Magnezyum
6xx.x	Kullanılmayan seri
7xx.x	Çinko
8xx.x	Kalay
9xx.x	Diğer element

Tablo 1.2.'de dökme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasında kullanılan başlıca seriler ve bu serilerdeki alüminyum alaşımlarının ana alaşım elementleri gösterilmiştir. Dövme alaşımlara kıyasla dökme alüminyum alaşımlarında daha yüksek oranda silikon ve bakır alaşım elementi bulunmaktadır ve bunun sonucunda dövme alaşımlara göre daha heterojen bir yapı oluşmaktadır. Heterojen yapıdan dolayı dökme alüminyum alaşımlarının yorulma direnci, dövme alüminyum alaşımlarına göre daha düşüktür [1, 2, 7].

1.2. AA1050 Alüminyum Alaşımı

AA1050 alüminyum alaşımı parlak yüzeyi, mükemmel korozyon dayanımı ve yüksek süneklik özellikleri ile ön plana çıkan bir 1000 serisi alüminyum alaşımıdır. AA1050 alüminyum alaşımı endüstride ticari olarak saf alüminyum olarak niteliklendirilmektedir. Kimyasal içeriğinde %99,5 Al, %0,40'a kadar Fe, %0,25'e kadar Si, %0,05'e kadar Cu, Mg, Mn, Ti ve %0,07'ye kadarda Zn bulunmaktadır [8]. AA1050 alaşımının fiziksel özellikleri Tablo 1.3.'te, karakteristik mekanik özellikleri ise Tablo 1.4.'te verilmiştir.

Tablo 1.3. AA1050 alüminyum alaşımının fiziksel özellikleri [9]

Özellik	**Değer**
Yoğunluk	2,71 g/cm³
Erime noktası	650 °C
Termal genleşme	24 $x10^{-6}$ /K
Esneklik modülü	71 GPa
Termal iletkenlik	222 W/m.K
Elektrik direnci	0,0282 $x10^{-6}$ Ω .m

AA1050'nın korozyon dayanımının yüksek olması ve ısıyı iyi iletmesi gibi özelliklerinden dolayı şu alanlarda kullanılmaktadır; Kimyasal üretim tesisi ekipmanlarında, gıda endüstrisi saklama kaplarında, piroteknik tozları, mimari yapılarda, lamba reflektörleri ve kablo kaplamaları [10].

Tablo 1.4. AA1050 alaşımının karakteristik mekanik özellikleri [11]

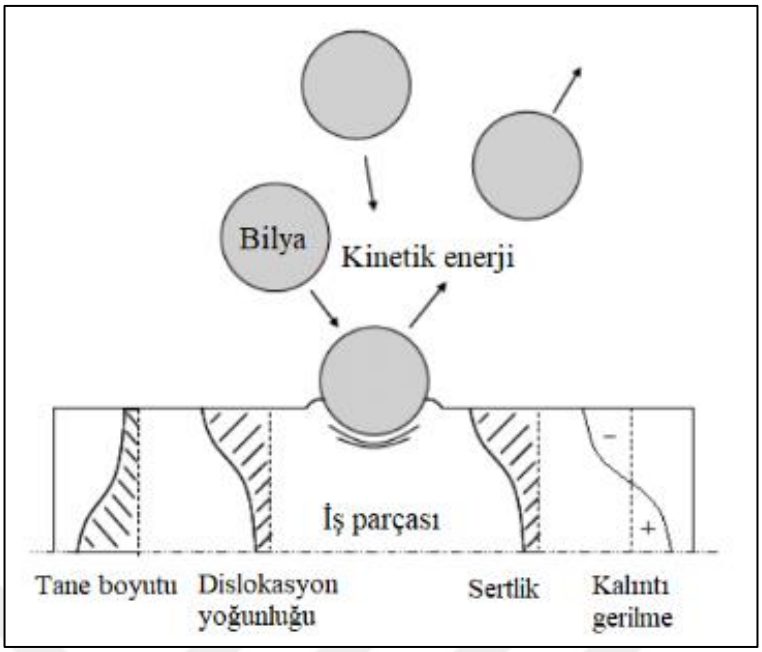
Özellik	**Değer**
Çekme dayanımı	76 MPa
Akma dayanımı	28 MPa
Uzama	%39
Sertlik	20 HV

2. BİLYALI DÖVME

2.1. Bilyalı Dövme İşlemi

Bilyalı dövme yöntemi, genellikle metal ve metal alaşımlarının yüzeylerinin yüksek hızlı, küçük ve küresel bilyalar ile dövülerek malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmeyi amaçlayan bir yöntemdir [12, 13]. Bu yöntemde malzeme yüzeyine küçük bir çekiç etkisiyle çarpan her bir bilya malzeme yüzeyinde çukurlar oluşturmaktadır. Bu çukurun oluşabilmesi için bilyaların enerjisinin malzeme yüzeyinde plastik deformasyona sebep olabilecek büyüklükte olması gerekmektedir [13]. Bilyalı dövme işlemi sonucunda malzemenin yüzeyinde ve yüzey altında; kalıntı gerilme, mikro yapı, sertlik, yüzey pürüzlülüğü, mikro çatlaklar, dislokasyon yoğunluğu gibi mekanik değişimler oluşmaktadır. Bilyalı dövme işleminin bu parametrelerin yüzey altındaki etkileri Şekil 2.1'de görsel olarak verilmiştir [14, 15]. Bilyalı dövme işlemi malzeme yüzeyinde ve yüzey altında belirli bir derinliğe kadar basma kalıntı gerilmesine sahip bir katman oluşturmakta ve pekleşmeye sebep olmaktadır. Bilyalı dövme işlemi ile oluşturulan kalıntı gerilme katmanı yüzeyde çatlak oluşumu ve bu çatlağın ilerlemesini engellemekte ve bunun sonucunda malzemenin yorulma direncinde artış gözlemlenmektedir [16, 17]. Ancak, bilyaların yüzeye aktardığı enerji ile doğru orantılı olarak yüzey pürüzlülüğünde artış gözlemlenmektedir [16].

Bilyalı dövme, düşük maliyet ile uygulanan bir işlem olmasından dolayı malzeme yorulma dayanımını arttırmada sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Havacılık ve otomotiv endüstrilerinde sürekli değişken yükler altında çalışan parçaların yorulma direncini arttırma gereksinimi fazla olduğundan, bilyalı dövme işlemi yaygın olarak tercih edilmektedir [18, 19]. Bilyalı dövme işleminin uygulandığı parçalara örnek olarak; dişli çarklar, kam mili, türbin kanatları, biyel kolu ve motor blokları söylenebilir [20].



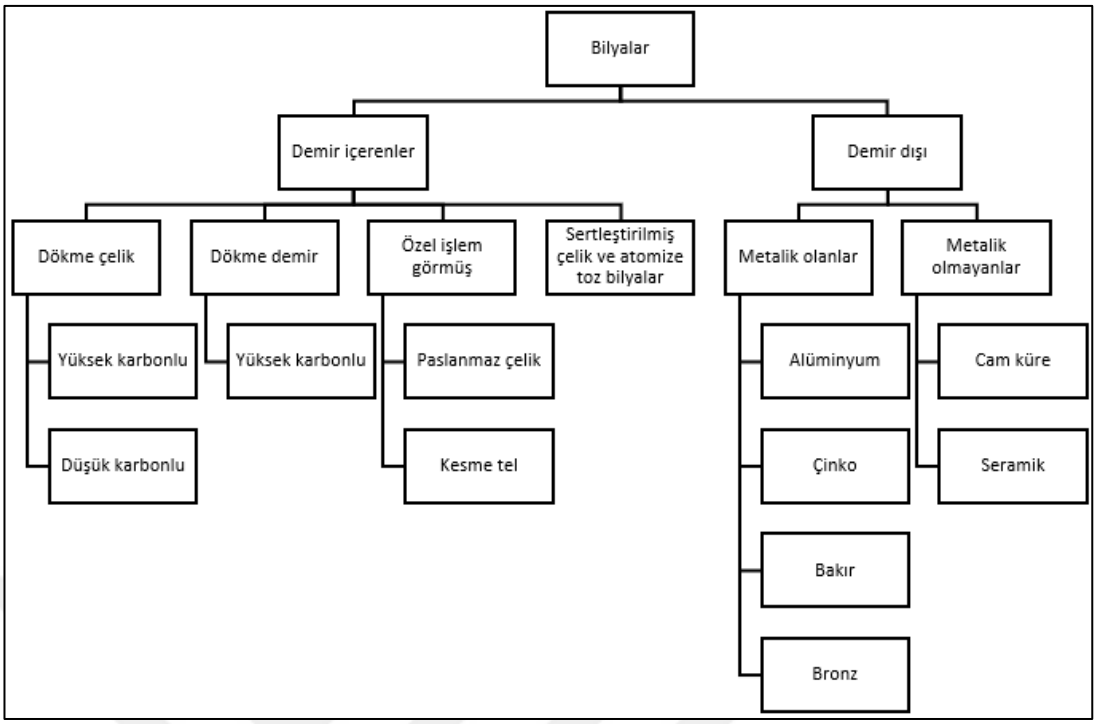
Şekil 2.1. Bilyalı dövme işlemi şematik gösterimi [15]

Bilyalı dövme işlemi; taşlama, elektro erozyonla işleme, plazma püskürtme, kaynak ve kaynak onarımı, çeliklerde dekarbürizasyon, östemperlenmiş sünek demir, aşınma, kavitasyon hasarı gibi işlemler veya hasarlardan dolayı yorulma dayanımı azalmış malzemelerin yorulma dayanımını arttırmakta etkili bir çözümdür [21].

Bilyalı dövme işleminin materyallerin yorulma ömrünü uzattığı 1920'li yıllarda keşfedilmiş ve ilk olarak yay bobinleri üzerinde uygulanmaya başlanmıştır. Bilyalı dövme işleminde belirli işlem parametrelere ait standartları bulmak için çalışmalar 1940'lı yıllarda yoğun bir şekilde yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda John O. Almen tarafından geliştirilmiş dövme şiddeti ölçeği (Almen şiddeti) ve yüzey örtme oranı parametreleri bilyalı dövmede ölçüm yöntemleri olarak genel kabul görmüştür [22].

2.2. Bilyaların Sınıflandırılması

Bilyalı dövme işleminde malzeme yüzeyini dövmek için genellikle küçük ve olabildiğince küresel döküm ya da karbon çelik, kesme tel, seramik veya cam bilyalar kullanılmaktadır. Bu bilya çeşitleri arasından döküm ve karbon çeliği bilyalar en sık kullanılanlarıdır [13, 23, 24]. Ancak yüzeyin demir kalıntılarıyla kirlenme riski olan durumlarda paslanmaz çelik, cam ve seramik bilyalar tercih edilmektedir [13, 21]. Şekil 2.2'de günümüz endüstrisinde kullanılan farklı bilya malzemeleri görülmektedir [12, 24].



Şekil 2.2. Bilyalı dövme işlemlerinde kullanılan bilya çeşitleri [12, 24]

Endüstriyel uygulamalarda çeşitli sertlik değerine sahip çelik teller kullanılmaktadır. Bu teller kesme tel bilyalara göre daha dayanıklı olması, yüzeyi eşit oranlarda dövebilmesi ve temini kolay olması sebebiyle endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir. Cam bilyalar ise diğer bilyalara göre daha hafiftir ve daha küçük bilyaların üretilmesi kolay olduğundan keskin köşeli malzemeler üzerinde bilyalı dövme uygulamasını kolaylaştırdığından dolayı tercih sebebidir [13, 25]. Şekil 2.3'te farklı boyutlardaki standart çelik bilyalar ve ortalama bilya çapları görülmektedir [26].



Şekil 2.3. Farklı boyutlarda standart çelik bilyalar [26]

2.3. Bilyalı Dövme Parametreleri

Tablo 2.1'de bilyalı dövme işleminde yüzey özelliklerini etkileyen işlem parametreleri verilmiştir. Birçok parametre olmasından dolayı 1940 yılında J.O. Almen günümüz endüstrisinde ismi Almen test plakaları olarak bilinen ve bilyalı dövmenin şiddetini ölçmekte kullanılan işlemi geliştirmiş ve patentini almıştır [27].

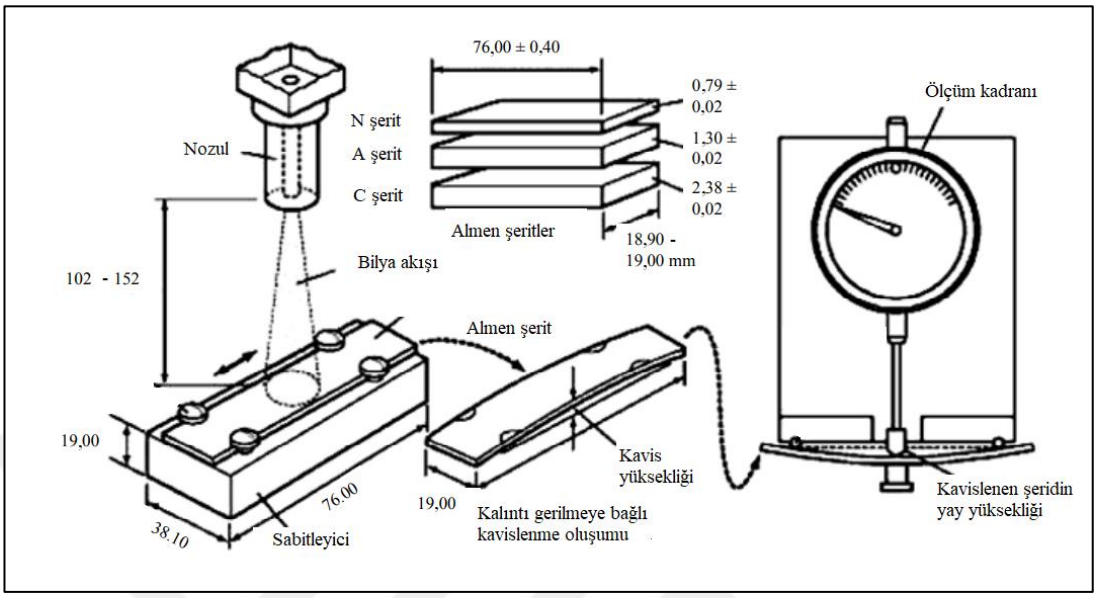
Tablo 2.1. Bilyalı dövme işlemi sonuçlarını etkileyen parametreler [27]

Bilyalı dövme prosesi	Bilya özellikleri	Hedef malzeme
Bilya hızı	Şekil	Geometri
Bilya çarpma açısı	Sertlik	Elastik-plastik deformasyon davranışı
Debi	Kütle	Sertlik
Dövme süresi	Boyut	Kristal yapı
Yüzey örtme oranı	Malzeme	Sıcaklık
Nozul çapı	Aşınma durumu	Ön gerilme
Nozul -hedef arası mesafe		

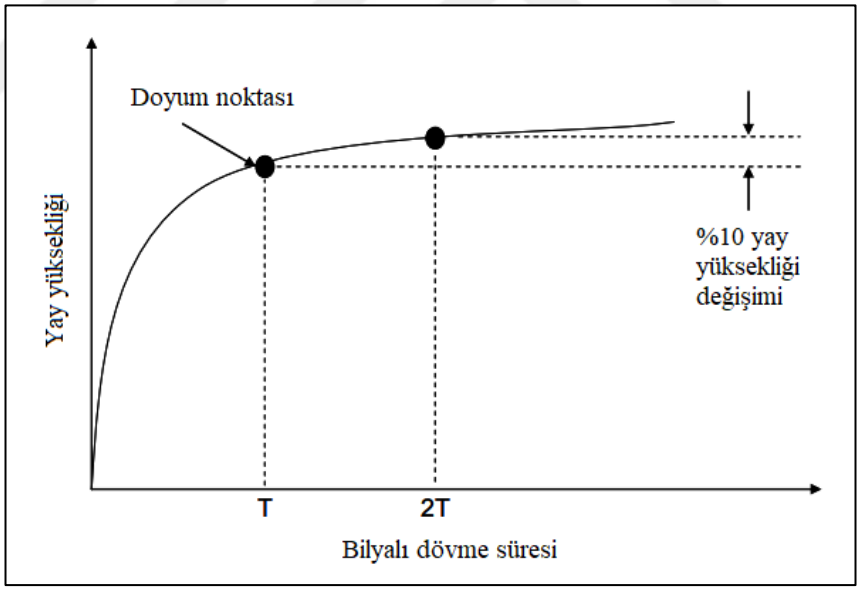
Şekil 2.4'te Almen test şeridi deneysel şematiği görülmektedir. Almen test şeritleri SAE 1070 çelik malzemeden üretilmektedir. Bu şeritler N, A ve C olmak üzere üç farklı kalınlıkta sınıflandırılmaktadır ancak hepsi 76 mm uzunluk ve 19 mm genişliğe sahiptirler. Test işlemi için bu Almen şeritleri sabitleyiciye bağlandıktan sonra şeritler farklı sürelerde dövülür. Bilyalı dövme işlemi ile Almen şeridinin üst yüzeyinde meydana gelen kalıntı gerilme tabakası şeritte kavislenme oluşturur. Kavislenen Almen şeritlerinin yay yükseklikleri ölçüm kadranı yardımı ile ölçülür ve deneysel sonuçlar kullanılarak Şekil 2.5'te örneği görüldüğü gibi bir grafik elde edilir. Grafikte dövme süresi iki katına çıktığında (Şekil 2.5.) yay yüksekliği değişiminin %10 olduğu süre değeri tespit edilir ve T süresinde doyum noktasına ulaşıldığı kabul edilir [27, 28].

Bilyalı dövme işleminde önemli bir diğer kontrol parametresi ise yüzey örtme oranıdır. Yüzey örtme oranı, yüzeyde en az bir kez bilya isabet etmiş bölgelerin yüzey alanına oranı olarak tanımlanmaktadır [29]. Yüzey örtme oranının bilyalı dövme işleminin kalitesi ve fonksiyonelliğinde önemli bir parametre olduğu bilinmektedir. Ayrıca, Almen şiddeti ile birlikte bilyalı dövme işleminin en önemli ölçülebilir parametresi olarak kabul edilmektedir [29, 30]. Yüzey örtme oranı ile ilgili literatürde herhangi bir standart bulunmamaktadır. Pratikte bir yüzeyin tamamını %100 oranda dövmek mümkün değildir ve uygulama açısından yüzeyin %98'i dövüldüğünde yüzey tamamen dövülmüş kabul edilmektedir. Bu tanıma göre %200 yüzey örtme oranı elde

etmek için yüzey %98 örtme alanı için gereken sürenin iki katı süreyle bilyalı dövülmelidir [31].



Şekil 2.4. Almen test şeridi deneysel şematiği [27]

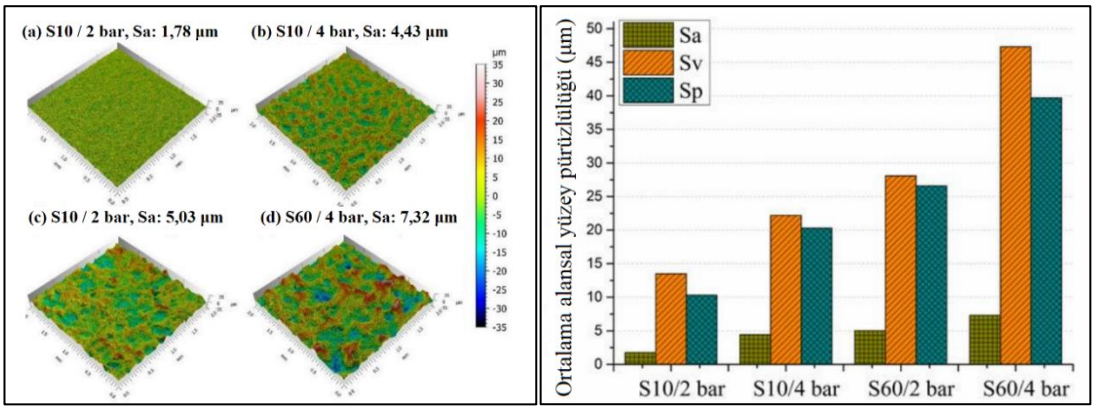


Şekil 2.5. Almen deneyi ile doyum noktası tespit etme [27]

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

Bu bölümde bilyalı dövme işlem parametrelerinin (yüzey örtme oranı, püskürtme basıncı ve yüzey tarama hızı), öncelikle alüminyum alaşımları olmak üzere malzemelerin yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkileri incelenecektir.

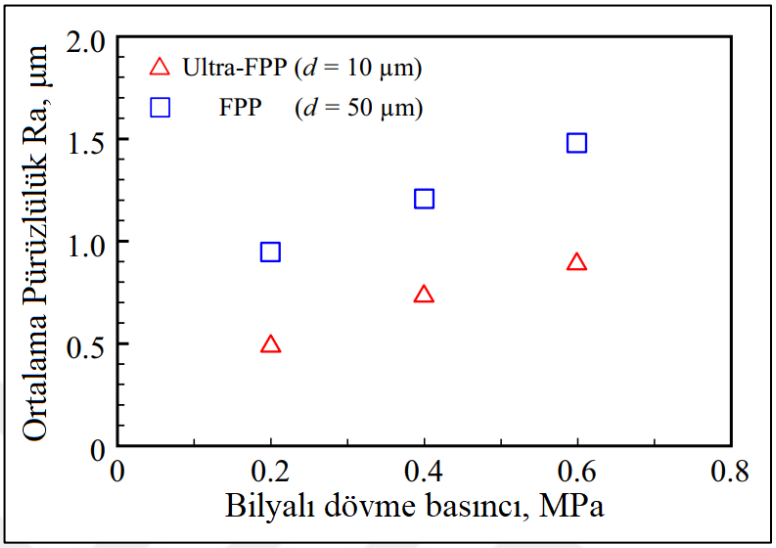
Avcu yaptığı çalışmalarda bilya boyutu ve püskürtme basıncı parametrelerinin AA7075-T6 alüminyum alaşımının yüzey topografyası, morfolojisi ve pürüzlülüğüne etkilerini incelemiştir. Avcu bu çalışmalar sonucunda püskürtme basıncı ve bilya boyutu arttıkça AA7075 alaşımı yüzeyinde daha fazla plastik deformasyon oluştuğunu, bunun sonucunda ise yüksek basınç ve büyük boyutlu bilyalar ile dövülmüş yüzeylerde düşük basınç ve küçük boyutlu bilyalarla dövülmüş yüzeylere göre daha kompleks ve pürüzlü bir yüzey topografyası elde edildiğini ifade etmiştir. Şekil 3.1'de Avcu'nun çalışmasında elde ettiği yüzey pürüzlülüğü sonuçları verilmiştir [32].



Şekil 3.1. Bilyalı dövme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi [32]

Kikuchi ve arkadaşları yaptıkları bilyalı dövme çalışmalarında farklı boyutlardaki bilyalar ve bilyalı dövme basıncı parametrelerinin AA5056 alüminyum alaşımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmalarda ortalama 10 ve 50 mikron olmak üzere iki farklı boyutta bilya kullanmışlar ve küçük bilyalar ile dövdükleri numune yüzeylerinde büyük bilya ile dövülen yüzeylere göre daha düşük bir yüzey pürüzlülüğü gözlemlemişlerdir. Bunun yanında farklı püskürtme basınçları ile

yaptıkları bilyalı dövme deneylerinde ise püskürtme basıncı arttıkça bilya boyutuna bağlı olmaksızın ortalama yüzey pürüzlülüğünün arttığını ortaya koymuşlardır. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar Şekil 3.2'de verilmiştir [33].

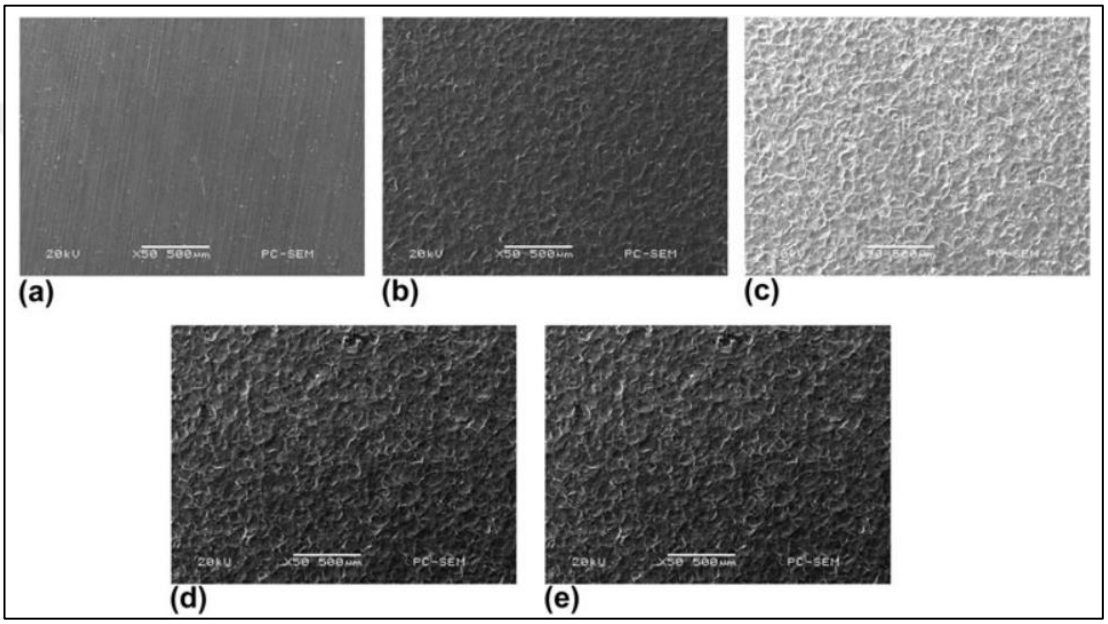


Şekil 3.2. Püskürtme basıncının ortalama pürüzlülüğe etkisi [33]

Chen ve arkadaşları püskürtme basıncı ve bilya debisinin AA6061 alaşımının yüzey özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada farklı parametreler ile bilyalı dövülmüş AA6061 alaşımı numune yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 3.3'te verilmiştir. Bilyalı dövme işleminden önce (Şekil 3.3a) numune yüzeyinde açık bir şekilde taşlama işleminden kalma izler mevcuttur. Bilyalı dövme işlemi sonrası bilyaların yüzeyde oluşturduğu girintiler net bir şekilde görülmekte, bunun yanında birçok girintinin birbiri ile çakışarak örtüştüğü ve girintiler arasında deformasyon sınırları oluştuğu gözlemlenmektedir. Girinti boyutları (çap ve derinlik) püskürtme basıncına bağlıdır ve püskürtme basıncı arttıkça girinti boyutları da artmaktadır. Yüzeydeki bu değişimler yüzey pürüzlülüğündeki değişim ile doğru orantılıdır. Buna bağlı olarak bilya debisi sabit iken püskürtme basıncı arttıkça malzemenin yüzey pürüzlülüğünde artış meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır [34].

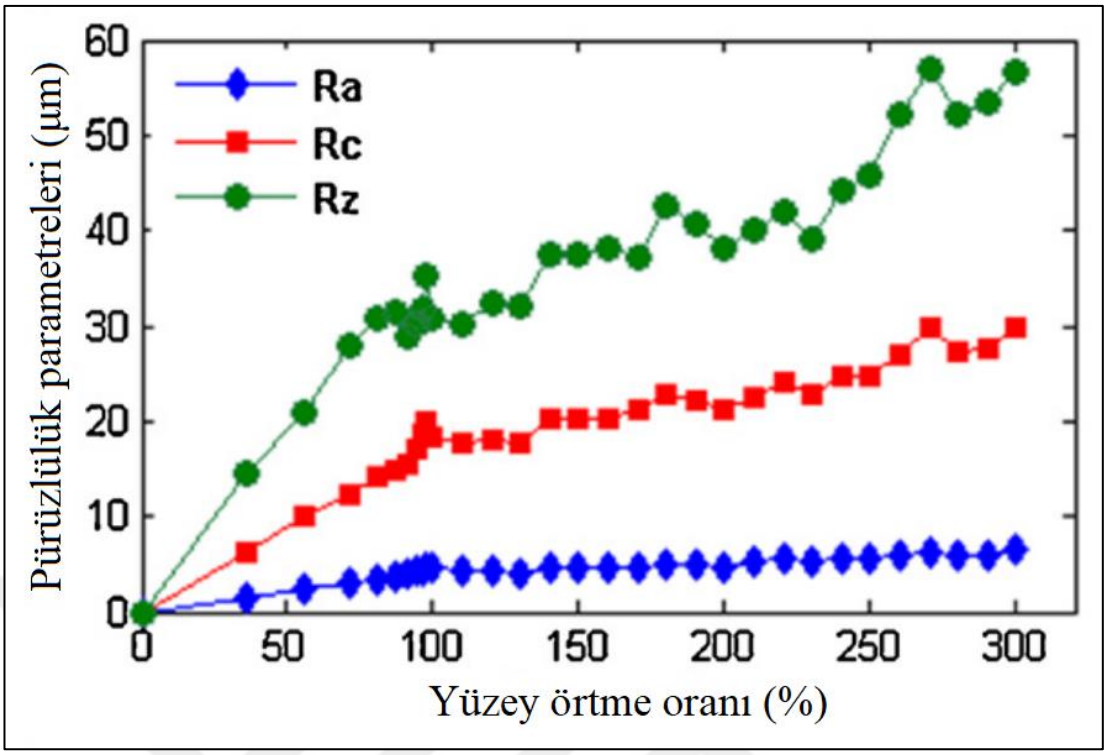
Bagherifard ve arkadaşları yaptıkları bilyalı dövme çalışmalarında yüzey örtme oranının pürüzlülüğe etkisini araştırmış ve deneylerinde hedef malzeme olarak 39NiCrMo3 çelik kullanılmıştır. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi farklı pürüzlülük parametreleri (R_a, R_c, R_z) yüzey örtme oranı değişimi ile farklı trendler sergilemiştir.

Bütün pürüzlülük parametreleri %100 yüzey örtme oranına kadar hızlı ve lineer bir şekilde artış gösterdikten sonra her parametre farklı oranlarda değişim göstermiştir. Parametreler arasında R_a %100 yüzey örtme oranından sonra doyum noktasına ulaşmış ve stabil kalmış. Bunun yanında R_c (yüzey tepelerinin ortalama yüksekliği) ve R_z yükselmeye devam etmiştir. Bagherifard bu değişimleri yüzey örtme oranı arttıkça yüzey topografyasındaki yükseltilerin aritmetik ortalamaları sabit kalmasına rağmen yüzeydeki tepe ve çukur yükseklikleri arasındaki farkın artmasından kaynaklandığını öne sürmüştür [35].

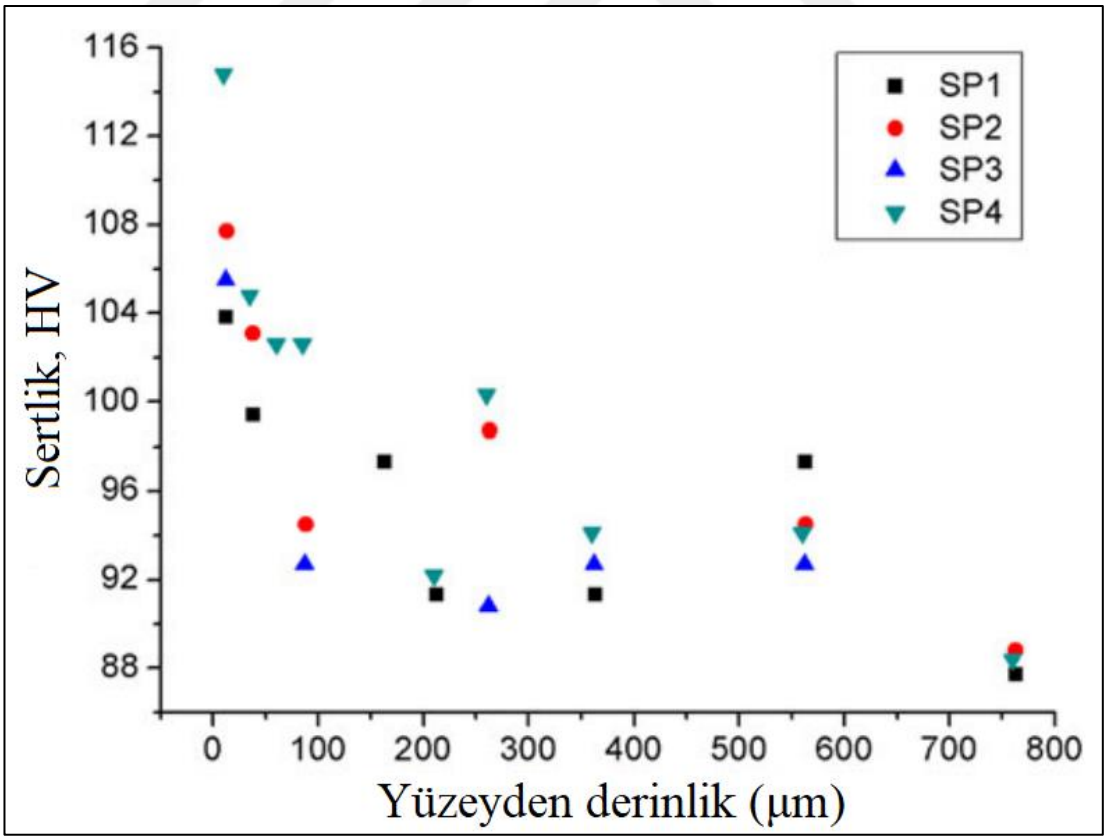


Şekil 3.3. Farklı parametreler ile dövülmüş AA6061 alaşımının yüzey SEM görüntüleri, a) Dövülmemiş, b) 1,10 Bar & 44 gr/s, c) 1,24 Bar & 44 gr/s, d) 1,39 Bar & 44 gr/s, d) 1,39 Bar & 38 gr/s [34]

Chen ve arkadaşları farklı bilyalı dövme parametrelerinin (püskürtme basıncı ve bilya debisi) AA6061 alüminyum alaşımına etkilerini incelemişlerdir. Şekil 3.5'te farklı parametreler ile dövülmüş AA6061 alaşımında mikrosertlik değişimi sonuçları verilmiştir. Bilyalı dövme işlemi ile yüzey katmanında oluşan nano boyutlu taneler nedeniyle sertlikte önemli bir artış yaşandığı sonucuna varılmıştır. Bilyalı dövülmüş yüzeylerde ilk 40 mikronluk derinlikte yüksek sertlik değerleri görülmüş ancak bu derinlikten sonra sertlik değerinde ani bir düşüş gözlemlenmiş ancak daha derine inildikçe sertlik değeri daha kararlı bir eğilim izlemiştir. Parametreler dikkate alındığında püskürtme basıncı arttıkça mikro sertlikte artış gözlemlenmiştir [34].

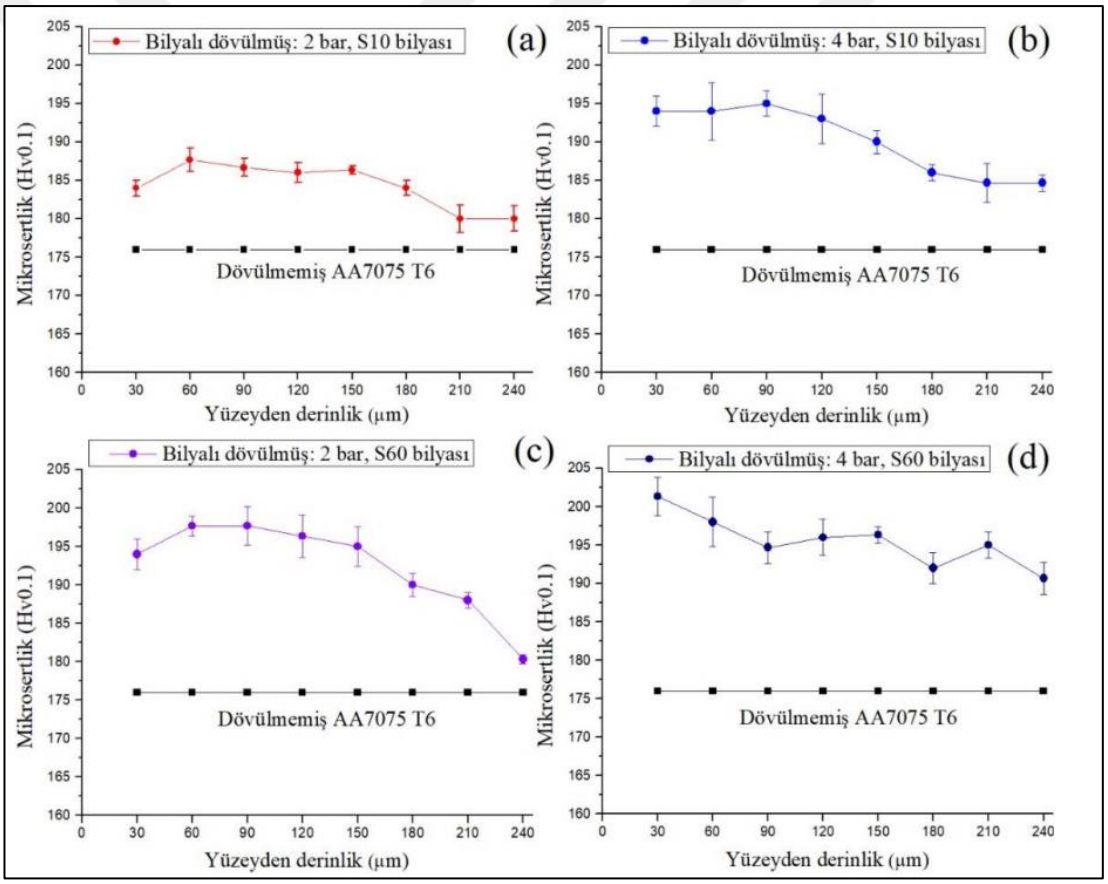


Şekil 3.4. Pürüzlülük parametrelerinin yüzey örtme oranına bağlı değişimi [35]



Şekil 3.5. Sertliğin yüzeyden derinliğe bağlı değişimi, SP1) 1,10 Bar & 44 gr/sn, SP2) 1,24 Bar & 44 gr/sn, SP3) 1,39 Bar & 44 gr/sn, SP4) 1,39 Bar & 38 gr/sn [34]

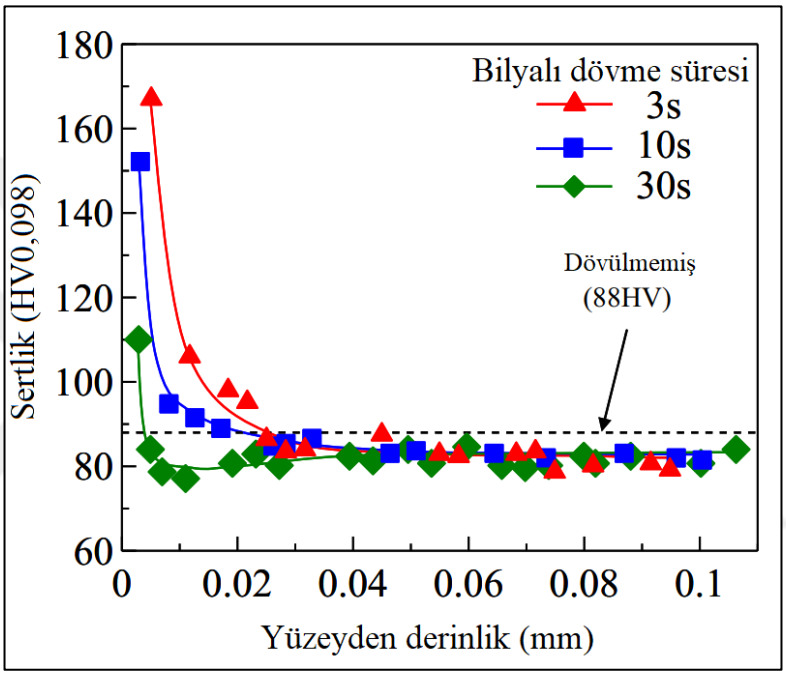
Avcu yaptığı çalışmada püskürtme basıncı (2-4 bar) ve bilya boyutu (S10-S60) parametrelerinin AA7075-T6 alaşımının yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkilerini incelemiştir ve bu sonuçlar Şekil 3.6'da verilmiştir. Elde edilen sonuçlarda görüldüğü üzere püskürtme basıncı arttıkça yüzeye yakın bölgelerde daha yüksek sertlik değerleri gözlemlenmiş, ayrıca sertlik değerindeki artışın daha derin bölgelere kadar devam ettiği görülmüştür. Büyük bilyalar ile küçük bilyalar kullanılarak dövülen numuneler karşılaştırıldığında ise büyük bilyaların yüzeyden çok daha derin bölgelerde dahi malzemede yüksek sertlik değerleri oluşturduğu görülmektedir. Avcu bu sertlik değişimlerini bilya boyutu ve püskürtme basıncı ile değişen bilyaların kinetik enerjisi ile ilişkilendirmiştir [36].



Şekil 3.6. Mikrosertlik değerinin püskürtme basıncı ve bilya boyutuna bağlı değişimi (a) 2 bar & S10 (b) 4 bar & S10, (c) 2 bar & S60 (d) 4 bar & S60 [36]

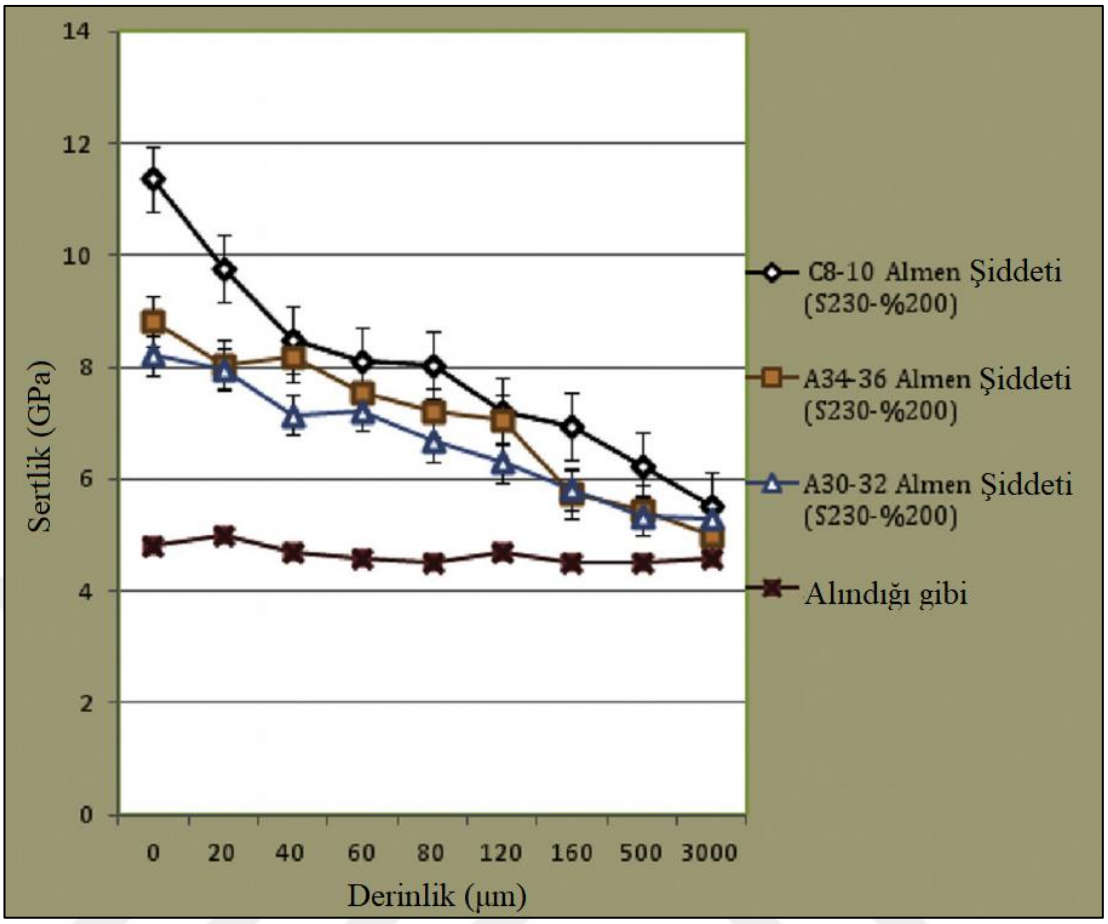
Kikuchi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada AA5056 alaşımını farklı sürelerde 10 mikron boyutlu (ultra küçük bilyalar) ile bilyalı dövmüş ve mikro sertlik değişimlerini incelemiştir. Şekil 3.7'de deneysel mikro sertlik sonuçları verilmiştir. Bu işlemlerde sabit bilyalı dövme parametreleri olarak nozulun numuneye uzaklığı 30 mm ve

püskürtme basıncı 0,6 MPa seçilmiştir. Yüzeye yakın bölgelerde daha yüksek sertlik değerleri gözlemlenmiş ve süreye bağlı olmaksızın sertlik değerleri aynı derinlikte dövülmemiş malzemenin sertlik değerine kadar azalmıştır. Geleneksel bilyalı dövme işleminden farklı olarak daha az süreli bilyalı dövülmüş malzemede daha yüksek sertlik değerleri gözlemlenmiştir. AA5056 alaşımının ultra küçük bilyalar ile dövülerek yüzey sertliğini arttırmak istendiğinde düşük nozul uzaklığı ve düşük bilyalı dövme süresi tercih edilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır [37].



Şekil 3.7. Bilyalı dövme süresinin yüzey altı mikrosertlik trendine etkisi [37]

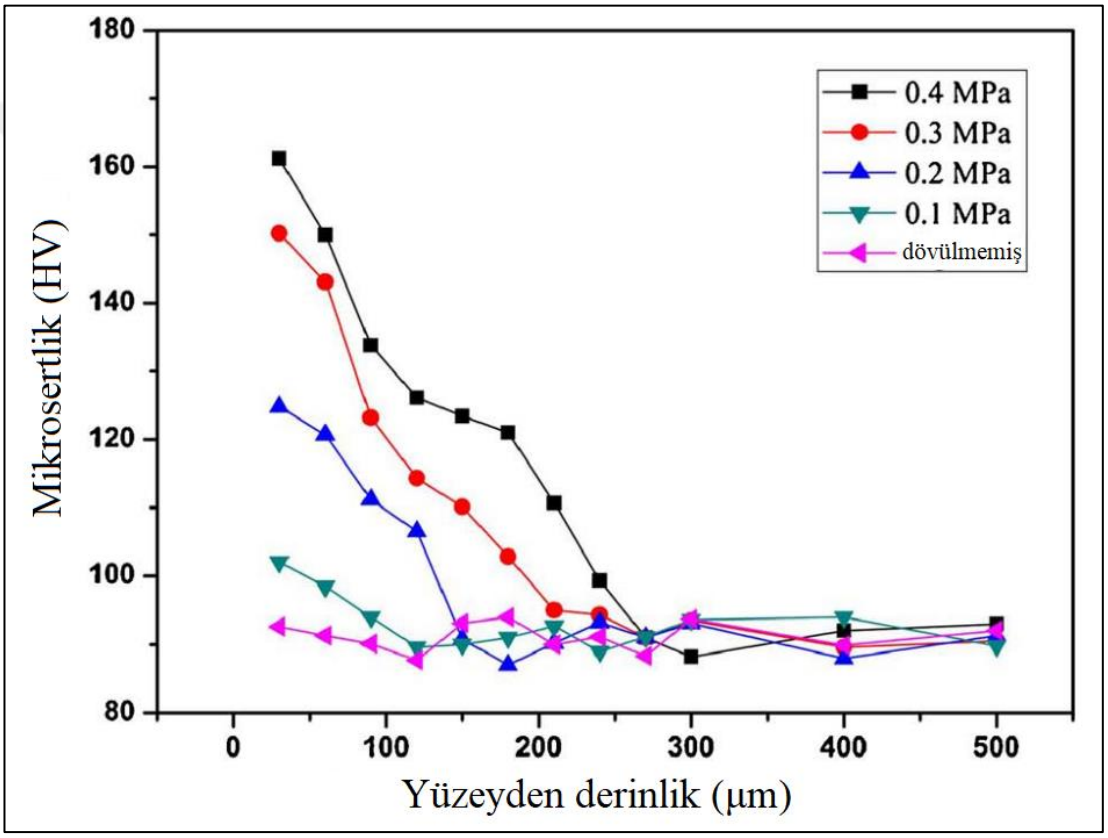
Ünal ve Varol yaptıkları çalışmalarda AISI1017 düşük karbonlu çeliği farklı Almen şiddetleri (büyükten küçüğe; C8-10, A34-36, A30-32) ile bilyalı dövmüşlerdir. Şekil 3.8'de mikro sertlik ve derinlik arasındaki ilişkiyi gösteren deneysel sonuçlar görülmektedir. Tüm sonuçlarda yüzeye en yakın bölgede sertliğin en yüksek olduğu ortaya koyulmuş ve bunun sebebinin yüzeydeki yüksek dislokasyon ve tane incelmesi ile doğrudan bağlantılı olduğu vurgulanmıştır. Yüzeyden derine inildikçe plastik deformasyonun azaldığından dolayı sertlikteki artışın daha az olduğu vurgulanmıştır. Sonuçlarda görüldüğü üzere bilyalı dövme işleminde Almen şiddetindeki artış sertlik artışı ile doğru orantılıdır [38].



Şekil 3.8. Almen şiddetinin yüzey altı mikrosertlik trendine etkisi [38]

Wang ve arkadaşları Al5052/Ti6Al4V malzemelerinin bindirme kaynak yüzeyleri üzerinde bilyalı dövme çalışmaları yapmışlardır. Çalışmalarında farklı püskürtme basınçlarının mikro sertliğe etkilerini incelemişler, yüksek püskürtme basınçlarında yüzeye yakın bölgelerde daha yüksek sertlik değerleri gözlemlemişlerdir. Yüzeye yakın katmanlarda %10'a kadar tane incelmesi tespit etmişler, deformasyona bağlı dislokasyonların yüzey altı yapıyı değiştirdiğini söylemişlerdir. Bunun yanında yüzey ve yüzey altı katmanlarında kalıntı gerilme ölçümleri yapmışlar ve bu ölçümleri mikrosertlik değişimleri ile ilişkilendirmişlerdir. Şekil 3.9'da elde edilen mikrosertlik değerleri verilmiştir [39]. Wang ve arkadaşları yaptıkları bir diğer çalışmada C63020 nikel alüminyum bronz alaşımı malzemenin bilyalı dövme uygulaması sonucunda mikroyapı ve korozyon direnci özelliklerinin nasıl değiştiğini incelemişlerdir. Bilyalı dövme işlemi sonucunda nikel alüminyum bronz alaşımı yüzey katmanında nano boyutlu taneler ve kalıntı gerilme tabakası gözlemlenmiştir. Bu oluşumların malzemenin mukavemetini ve korozyona bağlı çatlak oluşumu direncini arttırabileceğini ifade etmişlerdir. Bilyalı dövme şiddeti arttıkça kalıntı gerilmenin

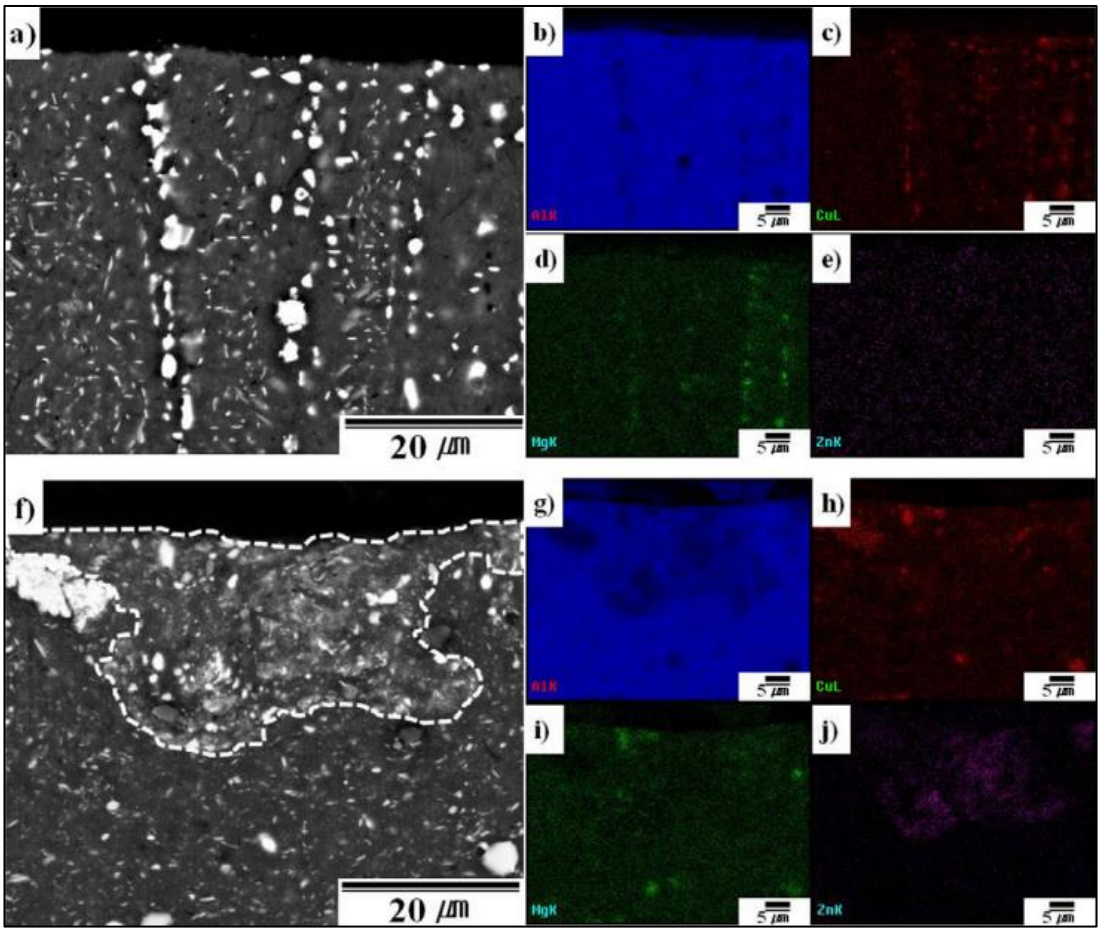
arttığı ve yüzeyden daha derinlere etki ettiği belirlenmiş, bunun sebebi olarak bilyaların kinetik enerjisinin daha yüksek olması gösterilmiştir. Fakat bilyalı dövme şiddetinin çok yüksek olduğu durumlarda düşük korozyon direnci gözlemlenmiş, bunun aşırı bilyalı dövme sonucu meydana gelen aşırı plastik deformasyona bağlı yüzey pürüzlülüğünün artışından kaynaklandığını savunmuşlardır. Bunun sonucunda yüksek mikrosertlik, tane inceltmesi, kalıntı gerilme gibi değerler bilyalı dövme şiddeti ile iyileştirilebilmelerine rağmen korozyon direncini kötü etkileyebildiği için optimum bilyalı dövme parametrelerinin kullanılması çok önemlidir [40].



Şekil 3.9. Püskürtme basıncının yüzey altı mikrosertlik trendine etkisi [39]

Cho ve arkadaşları yaptıkları çalışmada AA2024 alüminyum alaşımını bilyalı dövmüş ve bu işlemin malzemenin mikro yapısına etkilerini incelemişlerdir. Şekil 3.10'da AA2024 alüminyum alaşımının bilyalı dövme öncesi (a-e) ve sonrası (f-j) SEM görüntüleri verilmiştir. Bilyalı dövme işlemi ile yüzey ve yüzeye yakın bölgelerde nano yapılı tanelerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda Hall-Petch ilişkisiyle orantılı olarak tane incelmesi sonucunda yüzey sertliğinde artış meydana gelmiştir. Ayrıca çinko bilyalar ile dövülen yüzeyde alaşımın çinko oranı artmış ve

lamelli bir yapı oluşturmuş ve bununla beraber yüzey bölgesinde çok daha ince taneli bir bölge oluşmasını sağlamıştır. Çinko alüminyuma göre daha düşük sıcaklıklarda yeniden kristalleşebildiği için farklı boyutlu tanecikler ile iki faz ve lamel gözlemlenmiş ve bu durumun yüzey sertliğini arttıran en önemli faktör olduğu yorumlanmıştır [41].

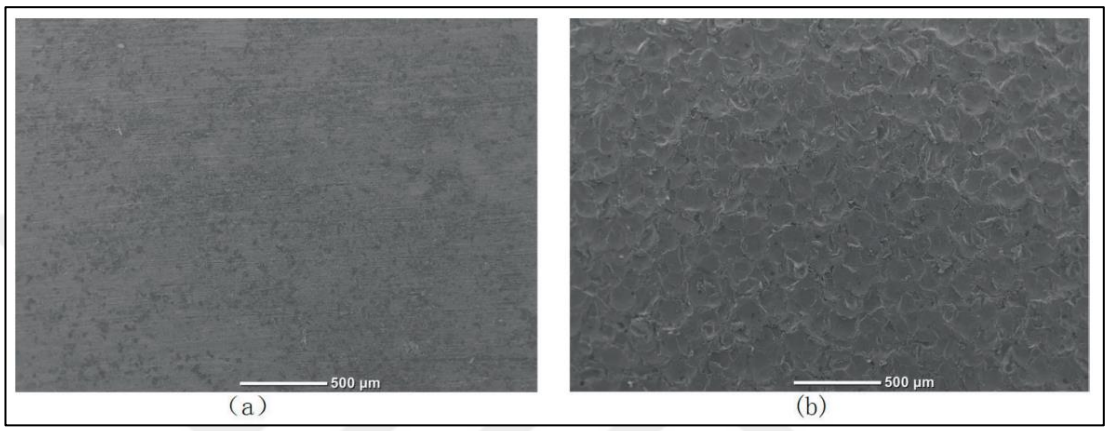


Şekil 3.10. Kesitten alınmış SEM görüntüleri, (a-e) dövülmemiş, (f-j) 180 saniye bilyalı dövülmüş [41]

Mitrovic ve arkadaşları bilyalı dövme işleminin hedef malzeme topografyasını dövülmemiş haline göre tamamen değiştirdiğini söylemişlerdir. 36CrNiMo4 çeliği üzerine bilyalı dövme çalışmaları yapan araştırmacılar, yüksek pürüzlülük değerleri elde etmiş ve pürüzlü yüzeylerin yağ yatağı görevi görerek yüzeyin korozyon dayanımını arttırdığını iddia etmişlerdir [42].

Sun ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda AA2196 alüminyum-lityum alaşımının bilyalı dövme uygulaması sonucu yüzey morfolojisi, kalıntı gerilme, mikrosertlik ve yüzey pürüzlülüğü değişimlerini incelemişlerdir. Şekil 3.11'de a) dövülmemiş yüzey

ve b) bilyalı dövülmüş yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir. Bilyalı dövme öncesi pürüzsüz görülen yüzeyde, işlem sonrası gözle görülür bir pürüzlülük artışı gözlemlenmiştir. Bilyalı dövme sonrası Al-Li alaşımının yüzeyindeki çukur çevrelerinde delaminasyon ve çatlaklar şeklinde hasarlar gözlemlenmektedir. Bilyalı dövme işlemi malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirebildiği gibi aynı zamanda malzeme yüzeyine zarar vermesi mümkün olduğu görülmüştür [43].

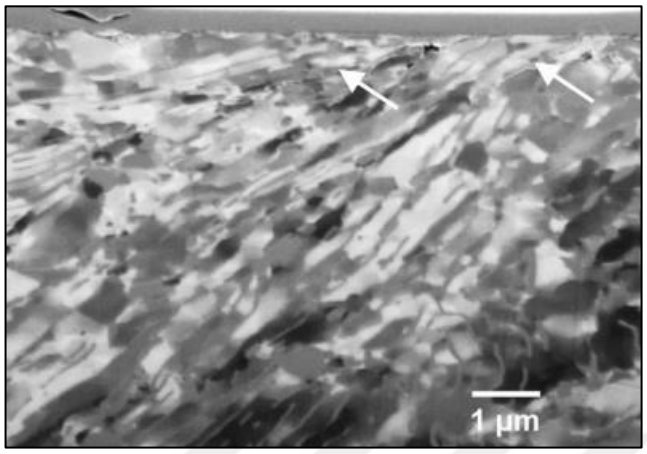


Şekil 3.11. Al-Li alaşımının yüzey morfolojileri, (a) dövülmemiş, (b) bilyalı dövülmüş [43]

Okolo ve arkadaşları bilyalı dövme işleminin yüzey altı mikroyapıyı nasıl etkilediğini incelemek amacıyla bilyalı dövülmüş AISI 1080 çelik üzerinde odaklanmış iyon ışını kullanarak çalışmalar yürütmüştür. Yaptıkları çalışmalarda yüzeyden 1-2 mikron derinliklerde mikroyapının yüzeye göre dikey şekilde yöneldiğini ve bu mikroyapısal değişimin malzemenin yorulma dayanımını etkileyebileceğini vurgulamışlardır. Şekil 3.12'de odaklanmış iyon ışını yöntemi kullanılarak çekilen görüntüler verilmiş, beyaz oklar ile bilyalı dövmeye bağlı yüzeyde çatlak oluşumları gösterilmiştir. Çatlak oluşumunun temel sebebi olarak yüzeyden kopan malzemenin başka bölgelere sıvanması olarak değerlendirilmiştir [44].

Benedetti ve arkadaşları AA7075-T651 alüminyum alaşımı üzerinde yaptıkları bilyalı dövme çalışmalarında yüzey morfolojisindeki değişimlerin yorulma dayanımına etkilerini incelemişlerdir. Bilyalı dövmenin yorulma dayanımına etkisi yüzey altında oluşturulan kalıntı gerilme ve yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır. Bilyalı dövme düşük şiddetlerde ve küçük boyutlu bilyalar ile yapıldığında, yüksek şiddet ve büyük bilyalar kullanıldığındakine göre yorulma dayanımını daha çok arttırmıştır. Bunun sebebi

olarak yüzeyde daha az pürüzlülük olması ve oluşturulan kalıntı gerilme tabakasının yüzeye daha yakın olması verilmiştir [45].



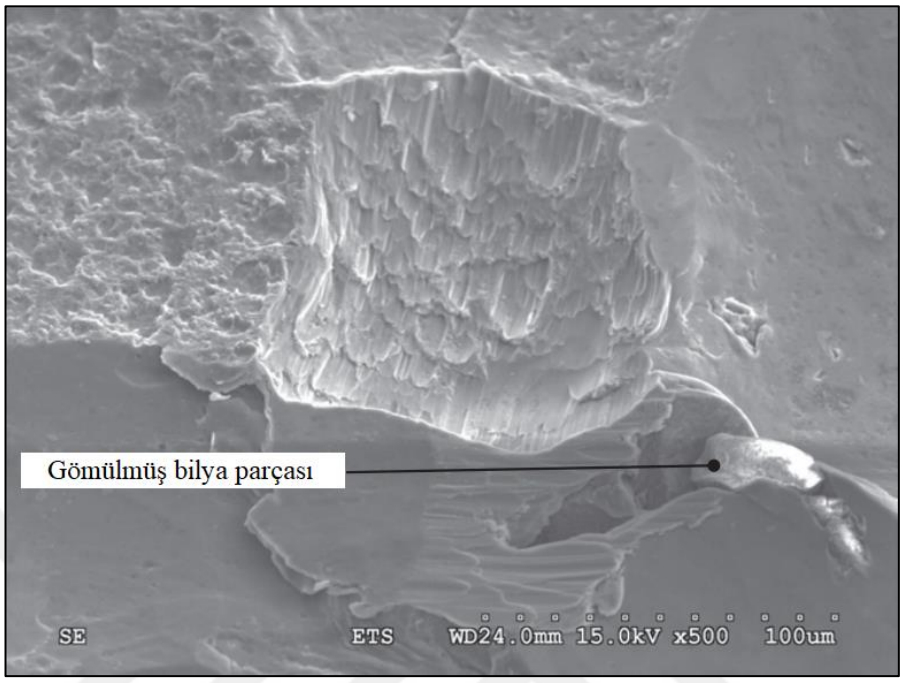
Şekil 3.12. Bilyalı dövülmüş karbon çeliğinin yüzey altı mikroyapısındaki yönelimler [44]

Nam ve arkadaşları bilyalı dövme işlem parametrelerinin AA2024-T851 alüminyum alaşımının yüzey özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Yüksek püskürtme basıncı ve daha uzun süreli yapılan bilyalı dövme işlemi sonucunda daha yüksek mikrosertlik ve kalıntı gerilme elde edilmiştir. Bilyalı dövme işlemi yüzey ve yüzey altında plastik deformasyona sebep olmakta, yüzey pürüzlülüğünü arttırmakta ve kalıntı gerilmeyi önemli miktarlarda arttırmaktadır. Mikroyapı incelendiğinde bilyalı dövülmüş numunelerde tane incelmesi ve dislokasyonlar gözlemlenmiştir [46].

Gariepy ve arkadaşları AA2024-T351 alüminyum alaşımını bilyalı döverek kalıntı gerilme, deformasyon sertleşmesi ve materyalde meydana gelen hasarları incelemiştir. Bilyalı dövme işlemi sonucunda, Şekil 3.13'te görüldüğü gibi, boyutları yaklaşık 40 mikron olan kırılmış bilya parçalarının yüzeye saplandığını tespit etmişlerdir. Yüzeye saplanan parçalar, potansiyel çatlak oluşumları gibi yüzey hasarlarının malzemenin yorulma direncini ciddi seviyede azaltabileceğini söylemişlerdir [47].

Mhaede ve arkadaşları yaptıkları çalışmada bilyalı parlatma ve bilyalı dövme işlemlerinin AA7075 alüminyum alaşımının yüzey özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Bilyalı dövmenin bilyalı parlatmaya göre çok daha yüksek yüzey pürüzlülüğü oluşturduğu görülmüştür. Bilyalı dövme ve bilyalı parlatma işlemleri sonucunda malzemenin yorulma dayanımında ciddi bir artış gözlemlenmiş, ancak iki

işlemde de Almen şiddeti sabit olduğundan yorulma direncini aynı oranda artırmışlardır [48].



Şekil 3.13. AA2024 malzeme yüzeyine gömülmüş bilya parçasının SEM görüntüsü [47]

4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1. Malzeme

4.1.1. AA1050 alüminyum alaşımı numuneler

Hedef malzeme olarak kullanılan AA1050 alüminyum alaşımı 6 mm kalınlığında levha olarak Teksa Metal ve Plastik Ürünleri İmalat San. ve Tic. Ltd. Şti. firmasından temin edilmiş olup, ürün sertifikası Assan Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş. firmasına aittir. AA1050 alüminyum alaşımının kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. AA1050 alüminyum alaşımının kimyasal ve mekanik özellikleri

	Kimyasal Kompozisyon (%)							
Elementler	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Zn	Al
Minimum	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	99,500
Maksimum	0,250	0,400	0,050	0,050	0,050	0,050	0,070	100,000
Sertifika	0,123	0,259	0,001	0,004	0,003	0,010	0,008	99,560

	Mekanik Özellikler					
Özellik	Yoğunluk (kg/m^3)	Erime sıcaklığı (°C)	Elastiklik modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopmada Uzama (%)	Sertlik (HV)
Değer	2,71	650	71	78	36	27

4.1.2. Paslanmaz çelik bilyalar

Bilyalı dövme işleminde bilya malzemesi Fetaş Metalürji A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Paslanmaz çelik malzeme bilyaların ticari ismi Chronital S60 olup, bilya çapları 0,7-1,25 mm aralığındadır. Chronital S60 paslanmaz çelik bilyalara ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 4.2'de verilmiştir.

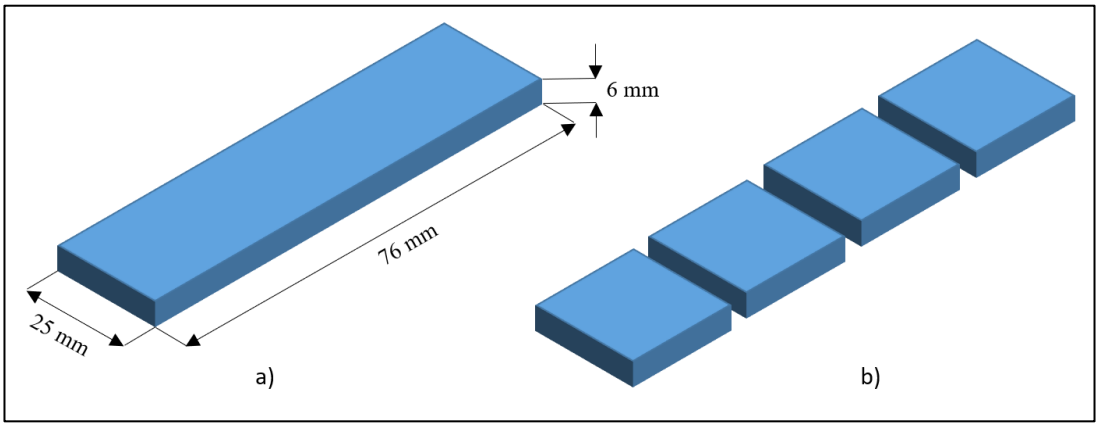
Tablo 4.2. Paslanmaz çelik (Chronital S60) bilyaların kimyasal ve fiziksel özellikleri [49]

Kimyasal Kompozisyon (%)				
C	Cr	Ni	Si	Mn
0,17	18	10	1,8	1,2
Fiziksel Özellikler				
Mikroyapı	Sertlik	Spesifik yoğunluk	Özgül ağırlık	
-	(HV)	(gr/cm^3)	(kg/cm^3)	
Östenitik	450	4,7	7,9	

4.2. Yöntem

4.2.1. Numunelerin hazırlanması

AA1050 alüminyum alaşımı malzeme 6 mm kalınlığında levha olarak temin edilmiştir. Numuneler yatay şerit testere ile kesilerek boyutları Şekil 4.1a'da verilmiş olan dikdörtgen prizma numuneler elde edilmiştir. Numuneleri bilyalı dövme işlemine hazırlamak için 400°C sıcaklıkta 4 saat süre ile homojenizasyon ısıl işlemi uygulanmıştır.



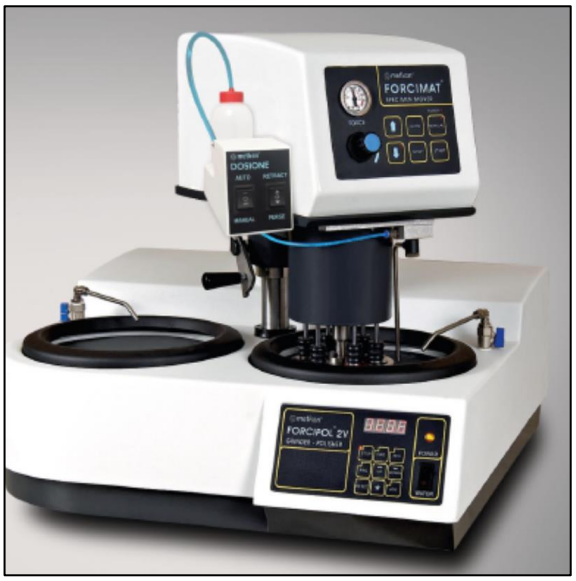
Şekil 4.1. AA1050 numuneler, a) bilyalı dövme öncesi, b) kalıplara alınmadan öncesi

Bilyalı dövme işlemleri, kütle kaybı ölçümleri ve pürüzlülük ölçümleri sonrası numuneler Şekil 4.2'de görülen Metkon Micracut 125 model hassas kesim cihazı ile Şekil 4.1b'de görüldüğü gibi 4 ayrı parça elde edilmiş ve bu parçalar polyester reçine ile kalıplara alınmıştır.



Şekil 4.2. Metkon Micracut 125 model hassas kesim cihazı [50]

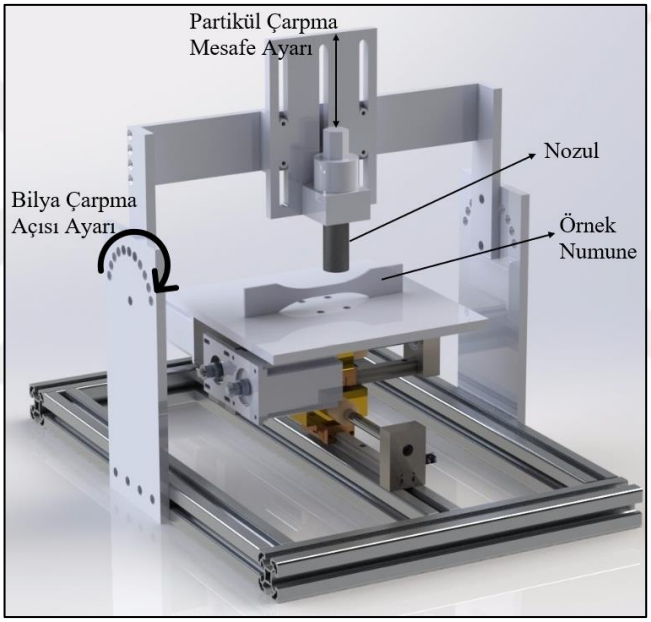
Şekil 4.3'te görülmekte olan Metkon Forcipol 2V ve Metkon Forcimat otomatik numune zımpara parlatma cihazları ile sırasıyla 180, 320, 600, 1000, 2500 mesh zımparalar ile zımparalanmış ve ardından sırasıyla 6 mikron ve 1 mikronluk elmas solüsyonlar kullanılarak parlatılmıştır. Parlatma işlemleri sonrasında dağlayıcı olarak modifiyeli Keller çözeltisi (10 ml HNO_3, 1,5 ml HCl, 1 ml HF, 87,5 ml saf su) kullanılmıştır [51]. 30 saniye süre ile dağlanan numunelerin kesit bölgeleri metalografik incelemeye hazır hale gelmiştir.



Şekil 4.3. Metkon Forcipol 2V ve Metkon Forcimat otomatik zımpara ve parlatma cihazı [52]

4.2.2. Bilyalı dövme

Bilyalı dövme işlemi Kocaeli Üniversitesi Ford Otosan İhsaniye Otomotiv Meslek Yüksekokulu atölyesinde bulunan özel tasarımlı CNC kontrollü bilyalı dövme sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4'te bilyalı dövme deney düzeneğinin bilgisayar destekli tasarım görüntüsü verilmiştir. Bilya besleme ve basınçlı hava hortumları birbirine bağlı olup, basınçlı havanın yarattığı vakum etkisi ile bilyaların sürekli akışı sağlanmaktadır. Nozul istenilen açıda ve mesafede ayarlanabilir olduğundan bilyaların yüzeye çarpma açısı ve nozulun malzemeye uzaklığı kolaylıkla istenilen parametre değerine ayarlanabilmektedir.



Şekil 4.4. Özel tasarımlı CNC kontrollü bilyalı dövme cihazının CAD görüntüsü

Tablo 4.3. Bilyalı dövme deneysel işlem parametreleri

Bilya türü	S60 Chronital
Bilya çapı (mm)	0,7 - 1,25
Bilya sertliği (HV)	450
Püskürtme basıncı (bar)	1, 5
Çarpma açısı (°)	90
Nozul uzaklığı (mm)	100
Nozul çapı (mm)	10
Yüzey örtme oranı (%)	100, 200, 1000
Tarama hızı (mm/s)	1, 10, 20

Bilyalı dövme deneylerinde kullanılan işlem parametreleri Tablo 4.3'te verilmiştir. AA1050 alaşımı numuneler paslanmaz çelik bilyalar ile 1 bar ve 5 bar olmak üzere iki farklı basınçla dövülmüştür. Bu basınç değerlerinde üç farklı yüzey örtme oranı (%100, %200, %1000) ve üç farklı yüzey tarama hızı (1, 10, 20 mm/s) ile numune yüzeyleri bilyalı dövülmüştür.

4.2.3. Kütle kaybı ölçümleri

Bilyalı dövme işlemi sırasında numunelerde gerçekleşen kütle değişimlerini tespit etmek amacıyla bilyalı dövme işlemi öncesi ve sonrasında Şekil 4.5'te görülen Shimadzu ATX224 model hassas terazi ile numunelerin kütleleri ölçülmüştür. Shimadzu ATX224 hassas terazinin standart sapması ürün kataloğunda 0,1 mg'dan daha az olarak verilmiştir.



Şekil 4.5. Shimadzu ATX224 model hassas terazi [53]

4.2.4. Pürüzlülük ölçümleri

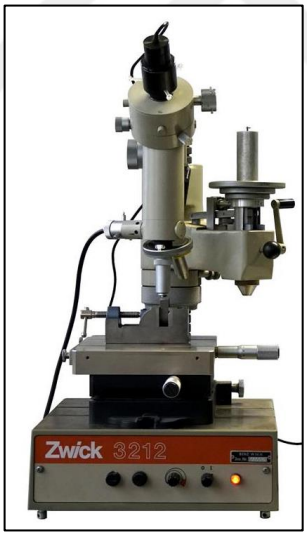
Bilyalı dövme işlemleri sonrası Şekil 4.5'te görümekte olan Mitutoyo Surftest SJ-301 marka taşınabilir yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile numunelerin yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Her numune için ölçümler yedi tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir ve 4 mm uzunluğundaki bir bölge taranmıştır. Pürüzlülük ölçüm cihazının hassaslığı 0,01 mikrondur ve maksimum 350 mikronluk yüzey pürüzlülük değerlerine kadar ölçüm yapabilmektedir.



Şekil 4.6. Mitutoyo Surftest SJ-301 marka taşınabilir yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı [54]

4.2.5. Mikro sertlik ölçümleri

Şekil 4.7'de görülmekte olan Zwick Roell 3212 marka Vickers mikro sertlik ölçüm cihazı kullanılarak numune kesitlerinde yüzeyden 500 mikron derinliğe kadar 50 mikron aralıklarla HV0,05 yük ile indentasyonlar yapılmıştır. Mikro sertlik ölçüm deneyleri her numune için üç tekrarlı şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7. Zwick Roell 3212 marka Vickers mikro sertlik ölçüm cihazı [55]

4.2.6. Mikroyapı analizleri

Şekil 4.8'de görülen Nikon Eclipse MA100 model ters optik mikroskop ile numune yüzey altı mikro yapıları görüntülenmiş ve sonraki deneysel aşamalarda elde edilen sertlik iz boyutları ölçülmüştür.



Şekil 4.8. Nikon Eclipse MA100 model ters optik mikroskop [56]

Şekil 4.9'da tez çalışmasında yüzey ve kesit görüntülerinin elde edilmesinde kullanılan Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Laboratuvarı'nda bulunan Vega Tescan II model taramalı elektron mikroskobu (SEM) verilmiştir.

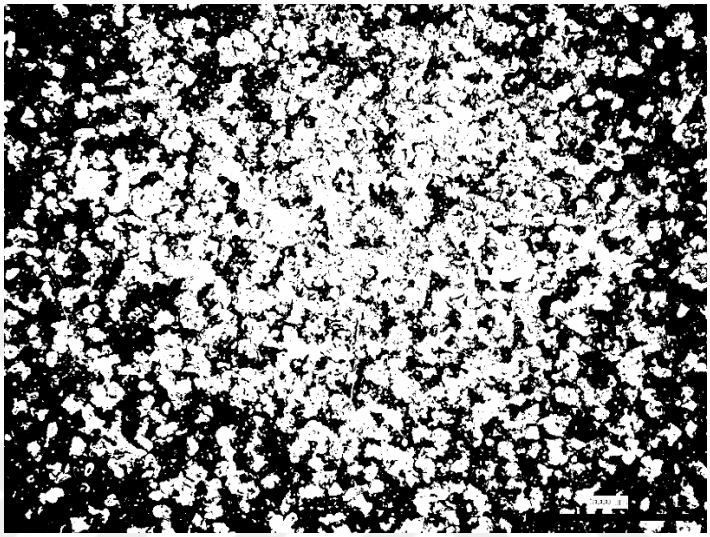


Şekil 4.9. Vega Tescan II (Taramalı elektron mikroskobu) [57]

4.2.7. Yüzey örtme oranı hesaplanması

Deney numunelerinden önce test numuneleri farklı sürelerde bilyalı dövüldü. Sonrasında test numuneleri yüzeylerinden alınan stereo mikroskop görüntüleri ImageJ programında "8-bit" renk haline getirilip, "threshold" komutu ile bilyaların yüzeye

isabet ettiği oranlar belirlendi. Şekil 4.10'da örnek ImageJ analizi ile örnek numunenin yüzeyine çarpan bilyaların oluşturduğu deformasyonlar beyaz alan ile gösterilmiştir. Şekildeki beyaz bölge %50,51 oranındadır ve yüzey örtme oranını vermektedir. Bu işlem farklı parametreler ile tekrarlanmış ve sonucunda 1 bar ve 5 bar için %100 yüzey örtme oranının elde edildiği bilyalı dövme süreleri hesaplanmıştır.



Şekil 4.10. Test numunesi ImageJ analizi (1 bar, 2 saniye)

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

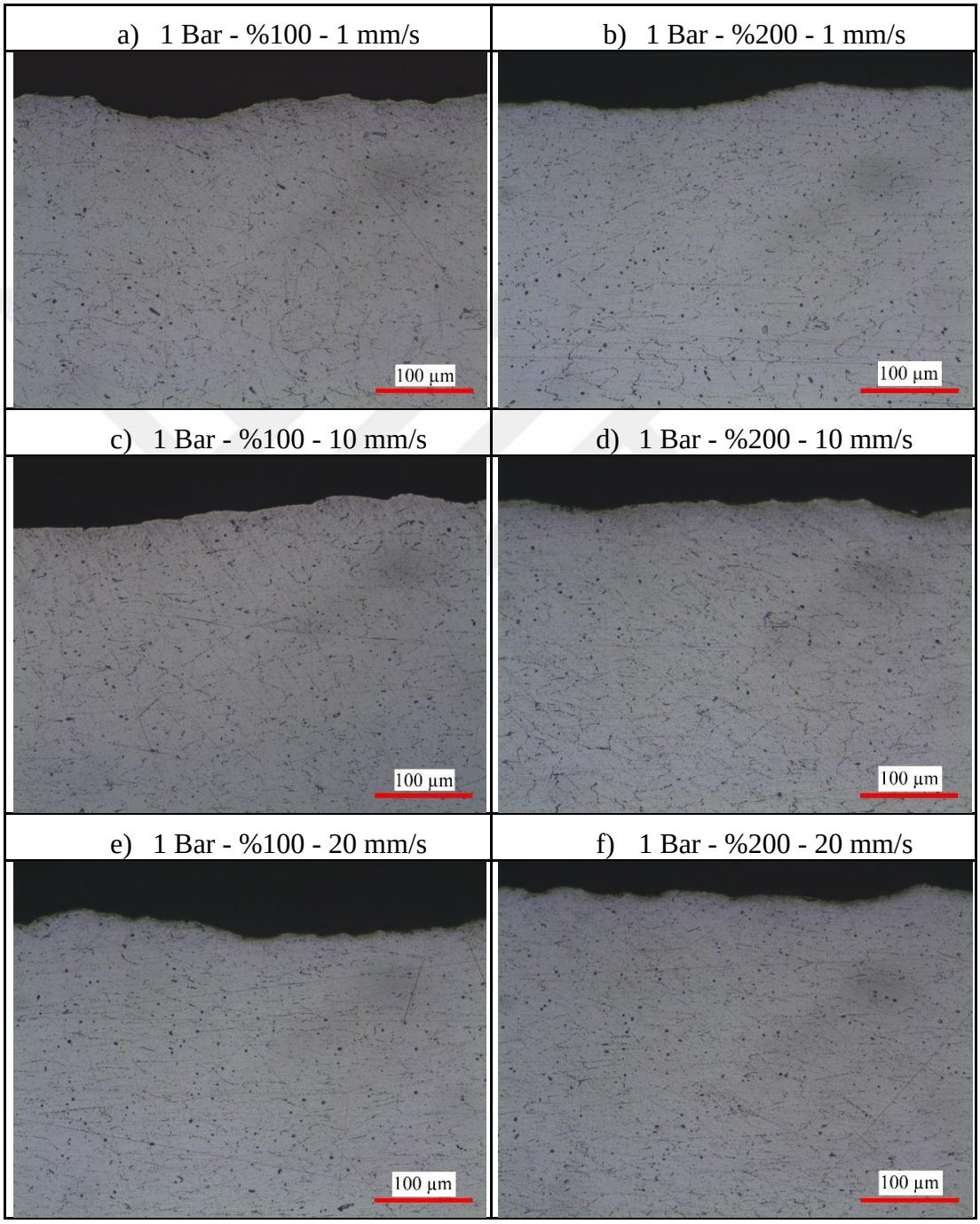
5.1. Bilyalı Dövme Parametrelerine Bağlı Olarak Yüzey Altı Mikroyapı Değişimi

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak yüzey altı mikroyapı değişimlerini gösteren optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.1a-c-e'de 1 bar püskürtme basıncı, %100 yüzey örtme oranı ile sırasıyla 1 mm/s, 10 mm/s ve 20 mm/s tarama hızları ile dövülmüş numunelerin kesit görüntüleri, Şekil 5.1b-d-f'de ise 1 bar püskürtme basıncı, %200 yüzey örtme oranı ile sırasıyla 1 mm/s, 10 mm/s ve 20 mm/s tarama hızları ile dövülmüş numunelerin kesit görüntüleri yer almaktadır.

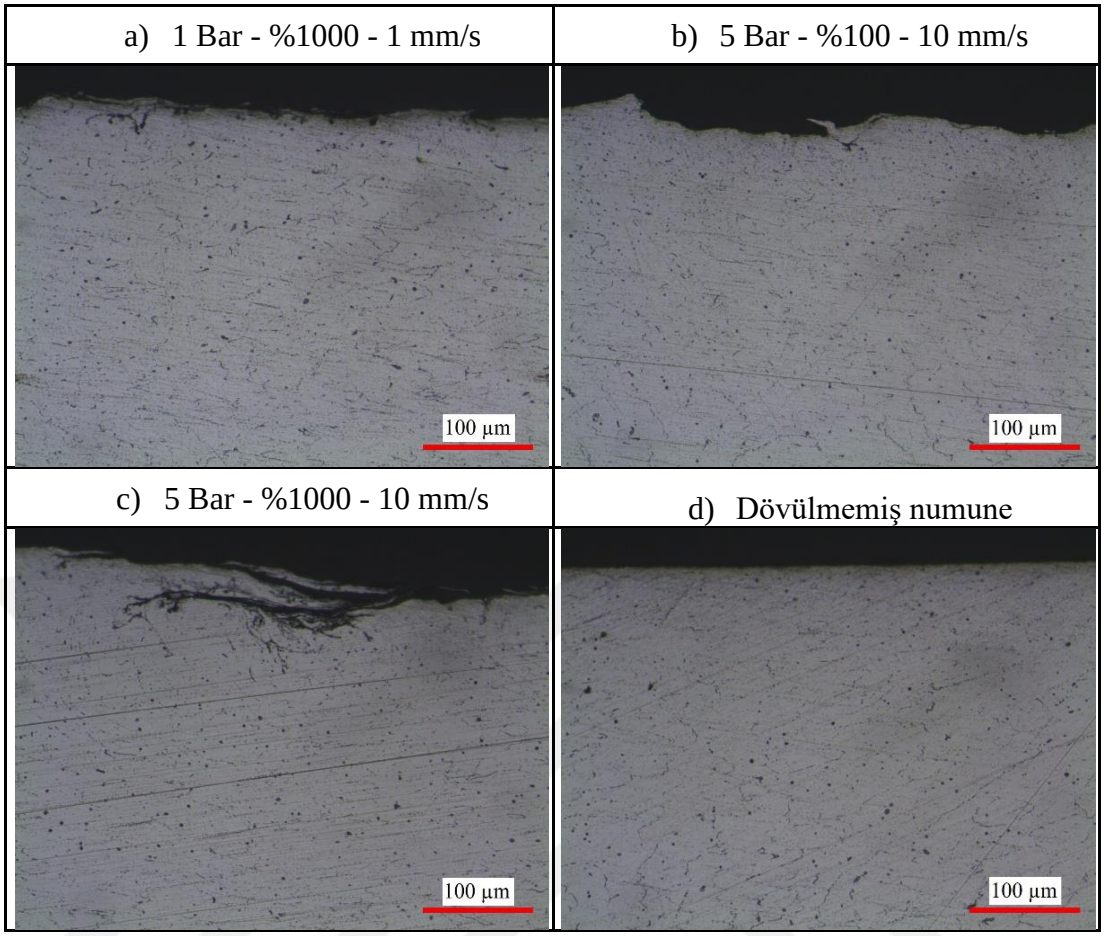
Optik mikroskop ile çekilmiş kesit görüntüleri incelendiğinde bilyalı dövülmüş numunelerin kesit görüntüleri dövülmemiş numune ile karşılaştırıldığında yüzey ve yüzey altında meydana gelmiş deformasyonlar açık bir şekilde görülmektedir. Şekil 5.2'de mikroyapı görüntüleri incelendiğinde 5 bar ve %1000 yüzey örtme oranında yapılan bilyalı dövmenin malzeme yüzeyinde tahribata yol açtığı görülmektedir. Bunun sebebi olarak işlem sırasında numune yüzeyinde gerçekleşen yüzey aşınması ve yüksek püskürtme basıncı sebebiyle yüksek kinetik enerji ile yüzeye çarpan bilyaların malzeme yüzeyinde kopmalara sebep olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.2'de b ve c görüntülerinde bilyalı dövme sırasında yüzeyde oluşan çatlaklar ve yüzeyden kopan parçaların yüzeye sıvanmış olduğu görülmektedir. Bu gözlemlerden yola çıkarak AA1050 alaşımının S60 bilyalar ile bilyalı dövme uygulamasında yüzey örtme oranı artışı sonucunda hem düşük hem de yüksek püskürtme basınçlarında yüzey hasarları oluşabileceği tespit edilmiştir. Bunun sonucunda AA1050 alüminyum alaşımının bilyalı dövülmesinde düşük yüzey örtme oranları kullanılmasının daha uygun olduğu kanısına varılmıştır.

Frija ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda bilyalı dövme uygulamasında yüzeyin aşırı hasar görebileceğini söylemiştir [58]. Trsyko ve arkadaşları yaptıkları bilyalı dövme

çalışmasında AW7075 alüminyum alaşımını bilyalı dövmüş, sonrasında yaptıkları SEM çalışmasında malzeme yüzeyinde mikro boyutlarda çatlaklar tespit etmişlerdir. Bunun yanında deformasyon tabakasının derinliğinin yüzey örtme oranı ile doğru orantılı olarak arttığını yorumlamışlardır [59].



Şekil 5.1. Bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak yüzey altı mikroyapı değişimi



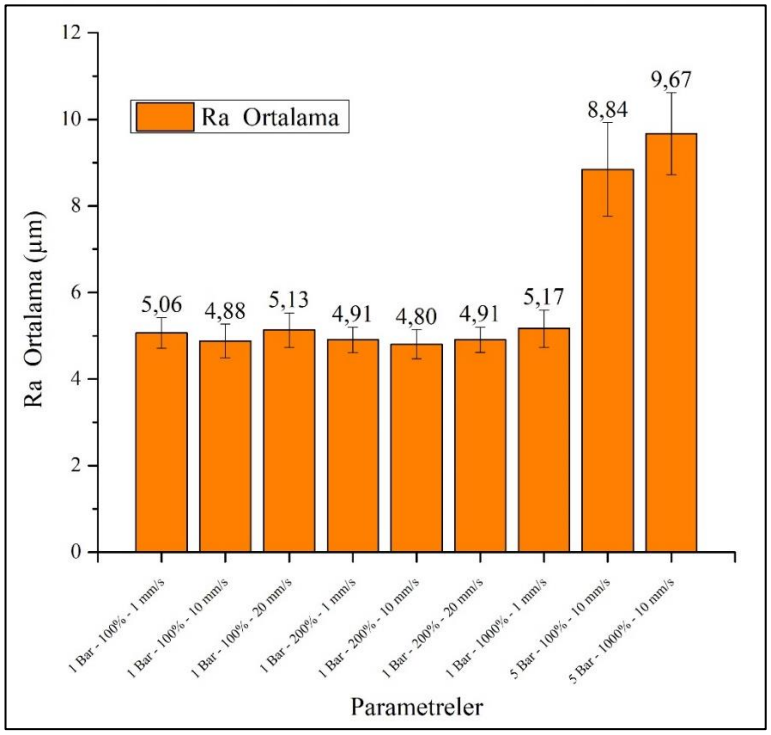
Şekil 5.2. Bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak yüzey altı mikroyapı değişimi (devamı)

5.2. Bilyalı Dövme Parametrelerine Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğünün Değişimi

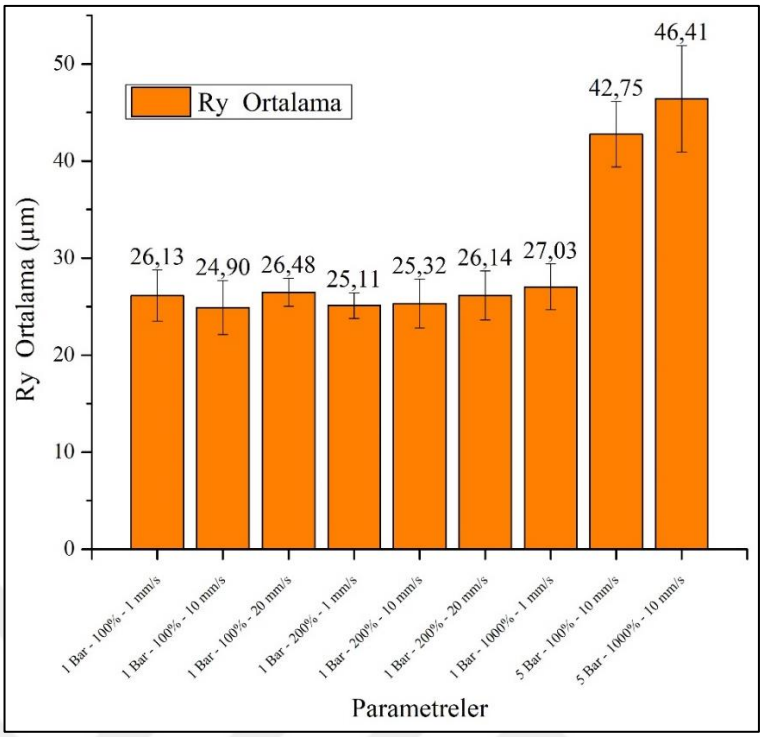
Şekil 5.3'te verilen grafikte AA1050 alüminyum alaşımı numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinin (R_a) farklı bilyalı dövme parametrelerine (püskürtme basıncı, yüzey örtme oranı, tarama hızı) bağlı değişimleri verilmiştir. Yüksek püskürtme basıncı (5 bar) ile dövülen yüzeylerde, düşük püskürtme basıncı (1 bar) ile dövülmüş yüzeylere göre daha pürüzlü bir yüzey elde edilmiştir. 1 bar püskürtme basıncı ile dövülen yüzeylerde yüzey örtme oranına bağlı önemli bir değişim saptanmazken, 5 bar püskürtme basıncı ile dövülen yüzeylerde yüzey örtme oranı arttıkça yüzey pürüzlülüğü değerinde de artış gözlemlenmiştir. Diğer dövme parametreleri sabit kalmakla beraber farklı tarama hızlarında dövülen yüzeylerde gözle görülür bir değişiklik tespit edilmemiştir. Şekil 5.4'te verilen grafikte bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünde çukur tepe maksimum yüksekliği

(R_y) değişimi incelendiğinde, Şekil 5.3'te görülen ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) ile benzer bir eğilim izlediği görülmektedir. Yüksek püskürtme basıncı (5 bar) ile bilyalı dövülen numunelerde R_y değerinin düşük püskürtme basıncı (1 bar) ile dövülmüş yüzeylere göre daha yüksek olması basınç arttıkça bilyaların yüzeyde yarattığı deformasyona bağlı çukur ve tepe yükseklik farklarının daha fazla olduğunu göstermektedir.

Zagar ve Grum yaptıkları çalışmalarda AA6082 ve AA7075 alüminyum alaşımlarını sırasıyla 1,6 bar, 4 bar ve 8 bar püskürtme basınçları ile bilyalı dövmüşler ve yüzey pürüzlülük değerlerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda yüksek püskürtme basıncı ile dövülen yüzeylerde düşük püskürtme basıncı ile dövülmüş yüzeylere göre çok daha fazla pürüzlülük tespit etmişler, bunun sebebini ise yüksek basınç ile fırlatılan bilyaların daha fazla kinetik enerjiye sahip olmasına ve bu bilyaların yüksek deformasyona sebep olmalarına bağlamışlardır. Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 incelendiğinde Zagar ve Grum'un çalışmalarında buldukları sonuçlara paralel olarak yüksek enerjiye sahip bilyaların malzeme yüzeyinde daha fazla deformasyona sebep olduğu ve buna bağlı daha yüksek yüzey pürüzlülüğü elde edildiği görülmektedir [60].



Şekil 5.3. Bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğünün (Ra) değişimi

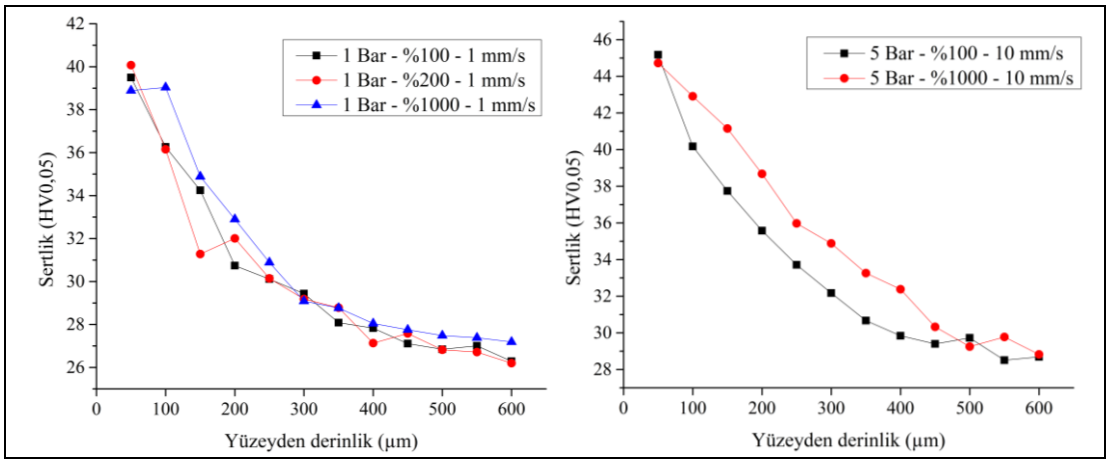


Şekil 5.4. Bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünde maksimum yükseklik (R_y) değişimi

5.3. Bilyalı Dövme Parametrelerine Bağlı Olarak Yüzey Altı Sertliğin Değişimi

Şekil 5.5'da farklı püskürtme basınçlarında yüzey örtme oranına bağlı olarak mikrosertlik değerinin değişimi verilmiştir. 1 bar püskürtme basıncı ve üç farklı yüzey örtme oranı (%100, %200, %1000) ile yapılan deneylerde, %100 ve %200 yüzey örtme oranlarında belirgin bir değişim gözlemlenemezken %1000 yüzey örtme oranı ile yapılan deneyler sonucunda 100 ve 300 mikron derinlikler arasında biraz daha yüksek bir mikrosertlik trendi gözlemlenmiştir. Ancak her üç yüzey örtme oranında da 350 mikron derinlikten sonra sertlik değerleri kararlı bir hal alıp eşit seviyede devam etmiştir. 5 bar püskürtme basıncı ve iki farklı yüzey örtme oranı (%100, %1000) ile yapılan deneylerde her iki yüzey örtme oranında da yüzeye yakın bölgede aynı sertlik değerine ulaşılmasına rağmen yüzeyden derine inildikçe yüzey örtme oranının yüksek olduğu durumlarda daha yüksek mikrosertlik değerleri gözlemlenmiştir.

Vielma ve arkadaşları çelik hedef malzeme üzerinde yaptıkları bilyalı dövme uygulamalarında farklı yüzey örtme oranlarının mikrosertliğe etkilerini incelemiş ve bu çalışmada yapılan tespitlere benzer şekilde yüzey örtme oranının artmasına bağlı olarak mikrosertlik değerinde de artış gözlemlemişlerdir [30].

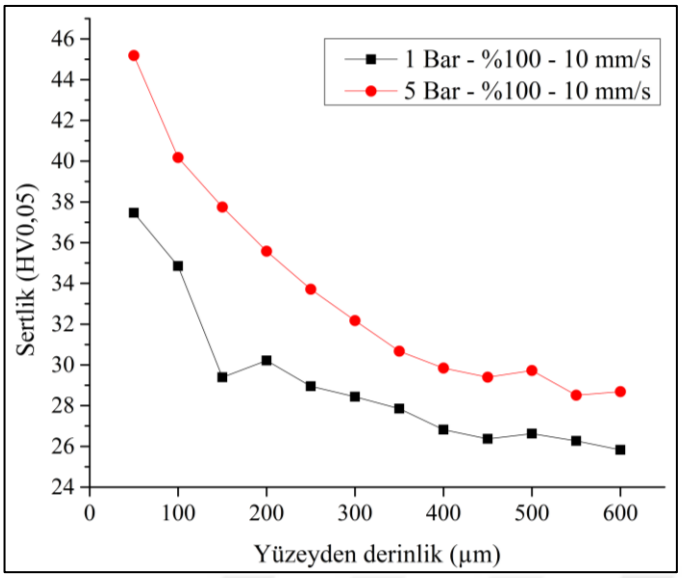


Şekil 5.5. Yüzey örtme oranına bağlı mikrosertlik değerinin değişimi

Şekil 5.6'da püskürtme basıncına (1 bar, 5 bar) bağlı mikrosertlik değerinin değişimi verilmiştir. Şekilde net bir şekilde görüldüğü üzere yüksek püskürtme basıncı ile dövülen numunelerde düşük püskürtme basıncı ile dövülen numunelere göre daha yüksek bir mikrosertlik trendi gözlemlenmiştir. Diğer parametreler (yüzey örtme oranı ve tarama hızı) genellikle sadece belirli bölgelerde mikrosertlik değişimleri yaratırken, püskürtme basıncının artışı hem yüzey hem de yüzey altında belirgin farklar yarattığını görmek mümkündür.

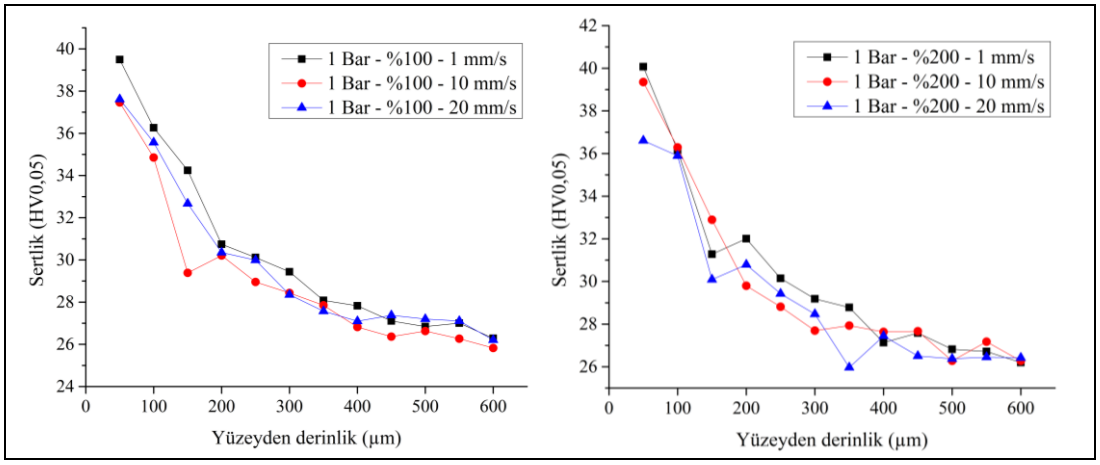
Wang ve arkadaşları Al5052/Ti6Al4V malzemelerinin kaynaklanması üzerine yaptıkları çalışmalarda püskürtme basıncının artması ile mikrosertlik değerlerinde artış gözlemlemişlerdir ve bulguları AA1050 alaşımının mikrosertlik değişimleri ile örtüşmektedir [39].

Şekil 5.7'de tarama hızına (1 mm/s, 10 mm/s, 20 mm/s) bağlı olarak mikrosertlik değerindeki değişimler verilmiştir. Sonuçlarda görüldüğü üzere düşük tarama hızı (1 mm/s) ile dövülmüş numunelerin bazı bölgelerindeki sertlik ölçümleri çok daha az yüksek olmasına rağmen ölçümlerde meydana gelmesi muhtemel hata payları da dikkate alındığında yüzey tarama hızına bağlı ciddi bir mikrosertlik değişimi olmadığı söylenebilir. Ayrıca parametrelere bağlı sertlik artışları, Şekil 5.4'te verilen pürüzlülük sonuçları ile birebir örtüşmektedir. Bu bilgiden yola çıkarak sertlikte görülen artışın malzeme yüzeyinde meydana gelen deformasyon ile doğru oranda değiştiği net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.6. Püskürtme basıncına bağlı mikrosertlik değerinin değişimi

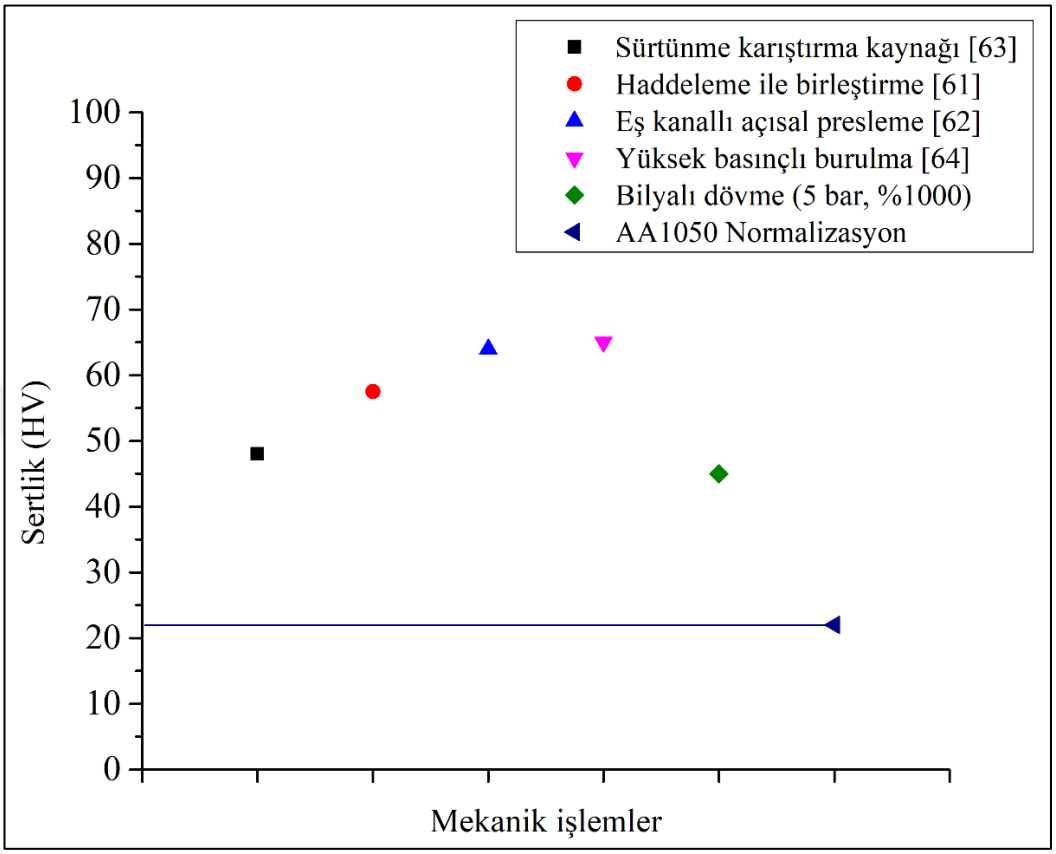
Avcu AA7075-T6 alüminyum alaşımı üzerinde yaptığı bilyalı dövme çalışmalarında yüksek püskürtme basıncının malzemenin mikrosertlik profilinde artış göstermesine sebep olduğunu ortaya koymuştur. Bu değişimin bilyalı dövme uygulamasında yüzey ve yüzey altı mikro yapısında tane küçülmesinden dolayı meydana geldiğini yorumlamıştır. Bunun yanında püskürtme basıncı arttıkça yüzeyde elde edilen maksimum sertlik değerinin arttığını, ayrıca malzemenin yüzeyden daha derin bölgelerinde sertlik artışları görüldüğünü ortaya koymuştur [36].



Şekil 5.7. Tarama hızına bağlı mikrosertlik değerinin değişimi

Sun ve arkadaşları bilyalı dövme işleminde mikrosertlik değerinin artmasının ana sebebi tane incelmesi ve deformasyon sertleşmesi olduğunu öne sürmüşlerdir. Bilyalı

dövme işleminde yüzey ve yüzey altı bölgelerde malzeme deformasyona uğramakta, büyük taneler incelerek küçülmektedir. Bunun sonucunda malzeme yüzeyinde sertlik artışı ve aşınma direncinde artış yaşanmaktadır [43].



Şekil 5.8. Literatürde AA1050 alüminyum alaşımının sertlik artışı [61-64]

Şekil 5.8'de literatürde AA1050 alüminyum alaşımına uygulanan farklı mekanik işlemler (sürtünme karıştırma kaynağı, haddeleme ile birleştirme, eş kanallı açısal presleme (EKAP), yüksek basınçlı burulma) sonucunda elde edilen sonuçlar ile beraber bu çalışmada 5 bar püskürtme basıncı ve %1000 yüzey örtme oranı kullanıldığında elde edilmiş sertlik sonuçları verilmiştir [61-64]. Homojenizasyon işlemi sonrası sertliği 22 HV olan AA1050 alaşımının sertliğinin farklı yöntemler ile 45-65 HV'ye kadar arttırılabildiği görülmektedir [65]. Şekildeki mekanik işlemler incelendiğinde bilyalı dövme dışındaki bütün sertleştirme yöntemleri malzemenin tamamının deformasyona uğraması ile gerçekleştiği görülmektedir. Bilyalı dövme işlemi ise malzemenin yüzeyine uygulanan bir mekanik işlem olduğundan dolayı mekanik etkileri sadece yüzey ve yüzey altında görülmektedir. Endüstride dış yüzeyi sert bir malzeme ihtiyacı duyulduğunda bilyalı dövme işlemi uygulama kolaylığı,

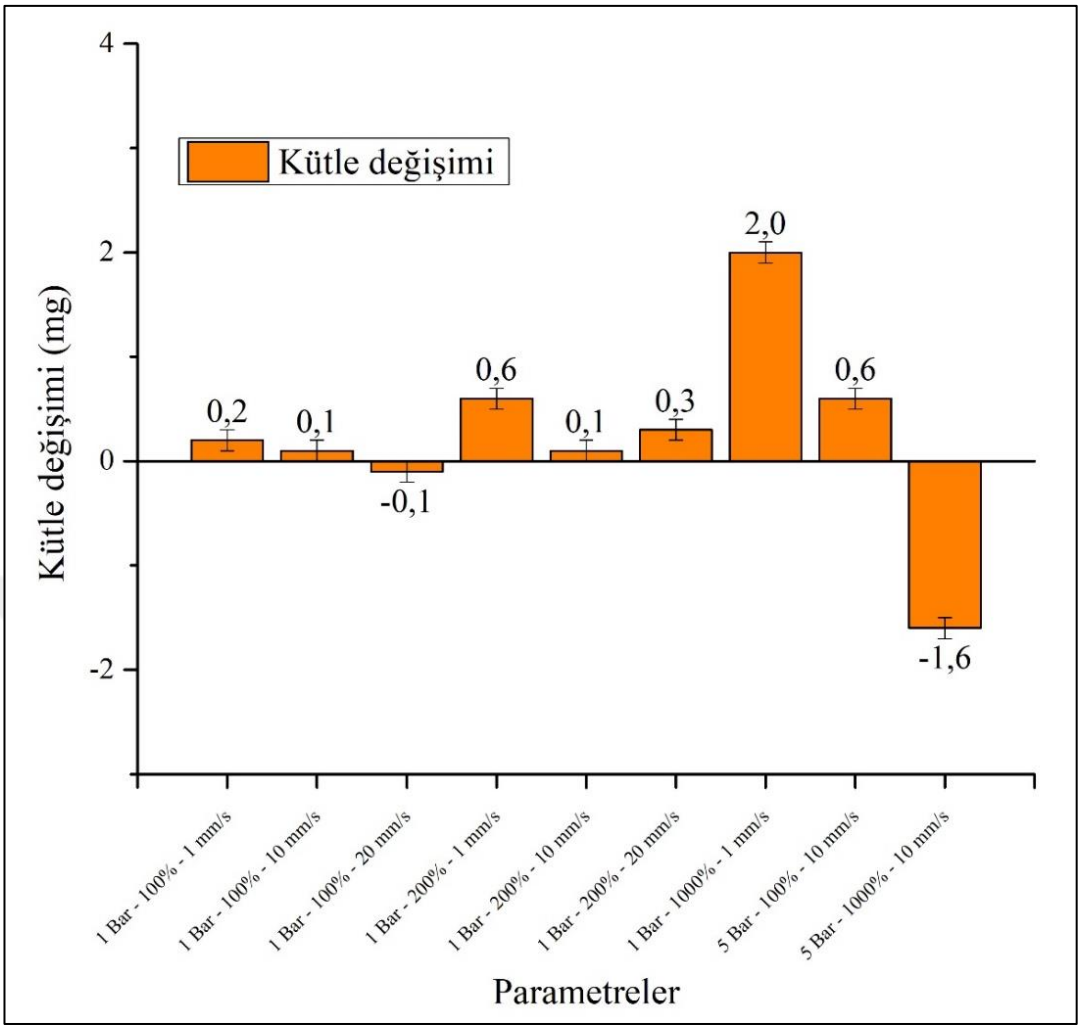
düşük maliyeti ile öne çıkmakta ve elde edilen içi sünek dışı sert olan malzeme ile birçok uygulama için ideal bir çözüm olmaktadır.

5.4. Bilyalı Dövme Parametrelerine Bağlı Olarak Kütle Değişimi

Tez çalışmasında farklı parametreler ile bilyalı dövülmüş AA1050 alaşımının bilyalı dövme öncesi ve sonrası kütlesi ölçülerek kütle değişimleri hesaplanmış ve Şekil 5.9'de sonuçlar verilmiştir. Verilen sütun grafikte pozitif değerler kütle artışını, negatif değerler ise kütle kaybını ifade etmektedir. Şekil 5.9'de 1 bar püskürtme basıncı ve %100-%200 yüzey örtme oranı ile dövülmüş numuneler incelendiğinde tarama hızına bağlı olarak düşük tarama hızlarında (1 mm/s) diğer tarama hızlarına göre daha fazla kütle artışı gözlemlenmiştir. 1 bar püskürtme basıncı ile farklı yüzey örtme oranlarında bilyalı dövülen numunelerde yüzey örtme oranı arttıkça gözlemlenen kütle değişiminde artış gözlemlenmiştir. Yüksek püskürtme basıncı (5 bar) ile dövülen numunelerde ise düşük yüzey örtme oranı ile yapılan deneylerde (%100) kütle artışı gözlemlenirken, yüksek yüzey örtme oranı ile yapılan deneylerde (%1000) ise kütle kaybı gözlemlenmiştir. Bilyalı dövme işleminde kütle değişimi yüzeye gömülen bilyalar veya bilya parçaları ve bilya çarpan yüzeylerden malzemenin aşınarak veya hasar görerek kopmasına bağlı olduğu düşünülmektedir. Bilyalı dövülen numunelere gömülen bilyaların hasara bağlı kütle kaybından fazla olduğu durumlarda kütle artışı, daha az olduğu durumlarda ise kütle kaybı oluştuğu düşünülmektedir.

Şekil 5.2'de verilen mikro yapılar incelendiğinde 5 bar ve %1000 yüzey örtme oranında yapılan bilyalı dövmenin malzeme yüzeyinde tahribata yol açtığı görülmektedir. İşlem sırasında numunede yüzey aşınması gerçekleşmiş ve yüksek püskürtme basıncı sebebiyle yüksek kinetik enerji ile yüzeye çarpan bilyalar malzeme yüzeyinde kopmalara sebep olarak kütle azalması yaşandığı düşünülmektedir. Frija ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda bilyalı dövme uygulamasının bazı durumlarda bu çalışmaya paralel olarak yüzeylerde hasara yol açtığını ortaya koymuşlardır [58].

Sharp ve arkadaşları bilyalı dövme işlemi sırasında bilyaların hedef malzeme yüzeyine gömülebilme ihtimalleri olduğunu SEM çalışmaları yaparak tespit etmişlerdir. Bu bilgiden yola çıkarak numune yüzeylerine gömülen bilyaların kütle artışına sebep olmaları muhtemeldir [66].

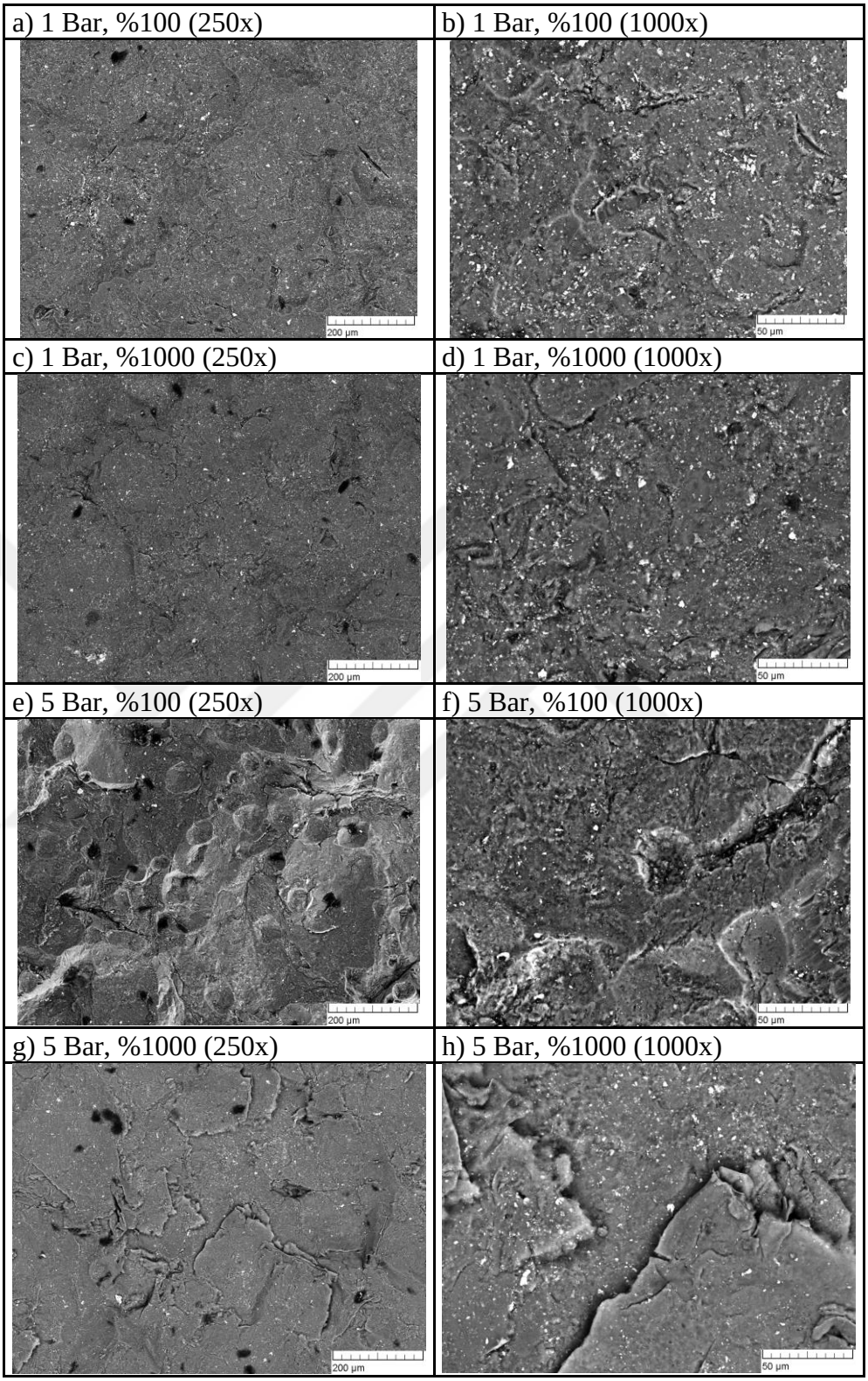


Şekil 5.9. Bilyalı dövme parametrelerine bağlı olarak kütle değişimi

5.5. SEM Çalışmaları

5.5.1. Yüzey morfolojileri

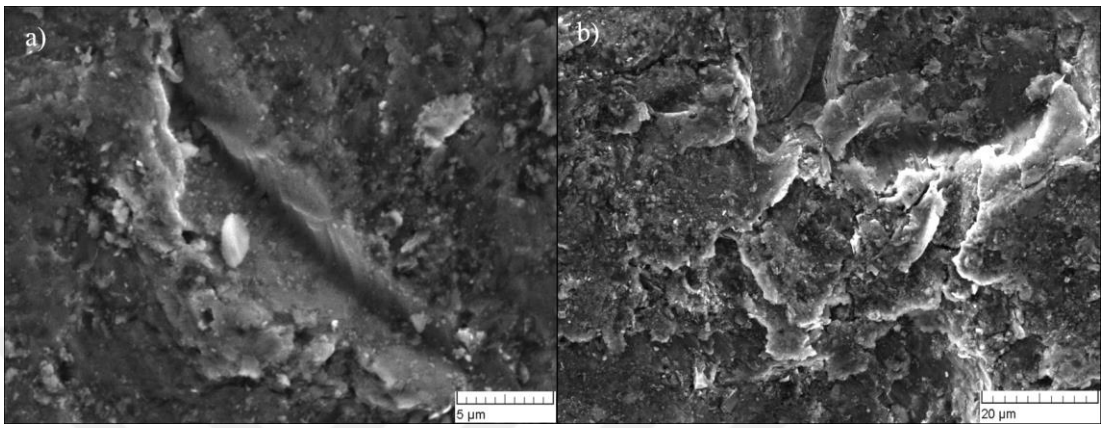
Şekil 5.10'da farklı püskürtme basıncı ve yüzey örtme oranlarında bilyalı dövülmüş AA1050 numunelerin yüzey mikroyapı SEM görüntüleri 250x ve 1000x büyütmelerde verilmiştir. Şekilde 250x büyütmede görüntüler (Şekil 5.10 a, c, e, g) incelendiğinde 1 bar püskürtme basıncı ile dövülen yüzeylerde belirgin bilya izleri görülmemekte, ancak 5 bar püskürtme basıncı ile dövülen yüzeylerde %100 yüzey örtme oranında bilyaların yüzeyde oluşturduğu plastik deformasyona bağlı çukurlar açıkça görülmekte ve %1000 yüzey örtme oranında ise aşırı deformasyona bağlı yeni bir yüzey oluştuğu görülmektedir.



Şekil 5.10. Püskürtme basıncı ve yüzey örtme oranına bağlı yüzey mikroyapı SEM görüntüleri

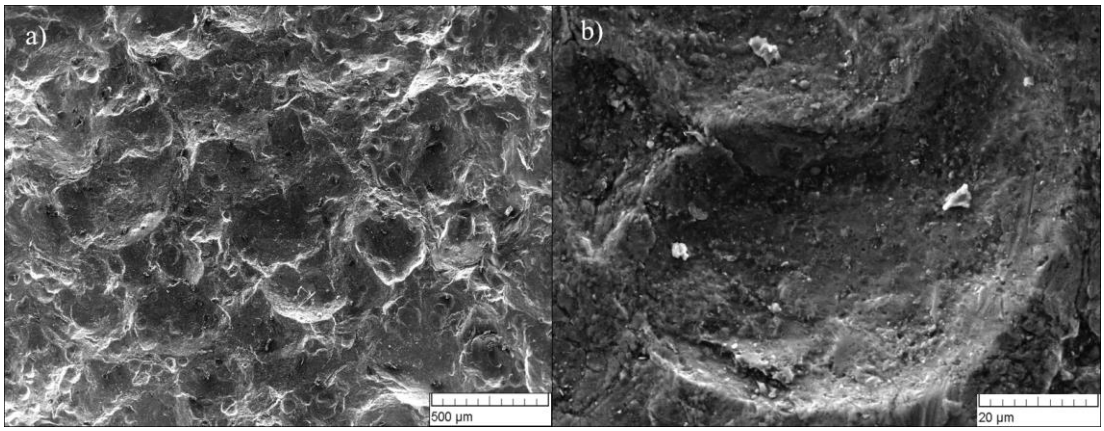
Şekil 5.10'da 1000x büyütmede görüntüler (Şekil 5.10 b, d, f, h) incelendiğinde 5 bar püskürtme basıncı ile dövülmüş yüzeylerin 1 bar ile dövülmüş numunelere göre daha

fazla deformasyona uğradığı görülmektedir. Bu sonuçlar Şekil 5.3'te verilen yüzey pürüzlülüğü değerleri ile örtüşmektedir. Şekil 5.10h'de yüksek püskürtme basıncı ve yüzey örtme oranına bağlı olarak yüzeyden kopmalar gerçekleştiği ve bu kopmalar sonucunda yüzeyde keskin kenarlar oluştuğu gözlemlenmektedir.



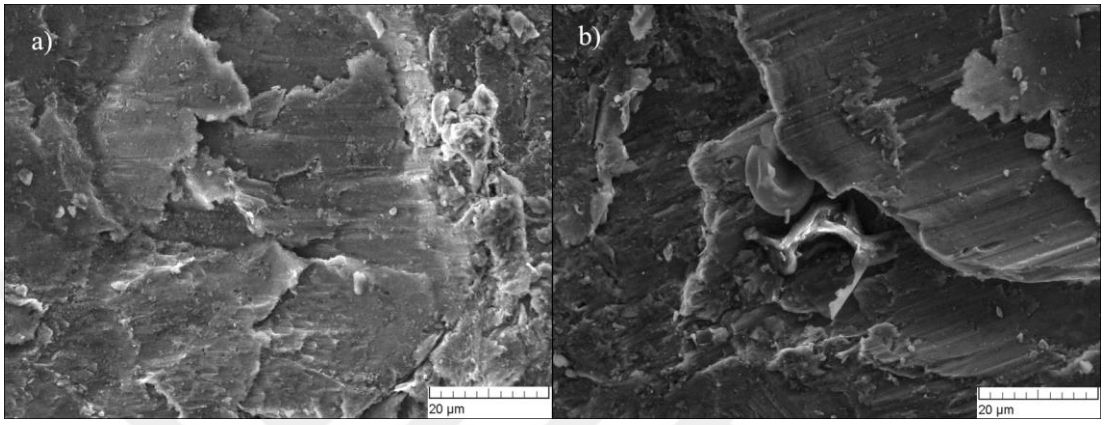
Şekil 5.11. Yüzey SEM görüntüleri, a) 1 bar, %100, 8000x büyütme, b) 1 bar, %1000, 2500x büyütme

Şekil 5.11'de 1 bar püskürtme basıncında a) %100, b) %1000 yüzey örtme oranları ile dövülmüş yüzeylerde yüksek büyütmede tespit edilmiş plastik deformasyonlar detay resim olarak verilmiştir. 1 bar püskürtme basıncı ile dövülen yüzeyler genel olarak hasarsız ve temiz görünmelerine rağmen yüksek büyütme oranlarında istisnai çatlak ve delaminasyonlara rastlanılmıştır (Şekil 5.11-a). Diğer yandan %1000 yüzey örtme oranı ile dövülmüş numunenin tüm yüzeyinde şiddetli plastik deformasyona bağlı olarak yoğun bir çatlak ve delaminasyon oluşumuna rastlanmıştır (Şekil 5.11-b).



Şekil 5.12. Yüzey SEM görüntüleri, 5 bar, %100, a) 100x büyütme, b) 2500x büyütme

Şekil 5.12’de 5 bar püskürtme basıncı ve %100 yüzey örtme oranı ile dövülen bir yüzey a) 100x, b) 2500x büyütme oranlarında verilmiştir. Şekil 5.12a’da bilyalı dövme sonucunda yüzeyde oluşan çukurlar, bu çukurların birbirleri ile sınırları ve yüzeye eşit oranda dağılmış oldukları net bir şekilde görülmektedir. Şekil 5.12b’de bilyalı dövülen yüzeyde bir bilyanın oluşturduğu çukur yakından görüntülenmiştir.

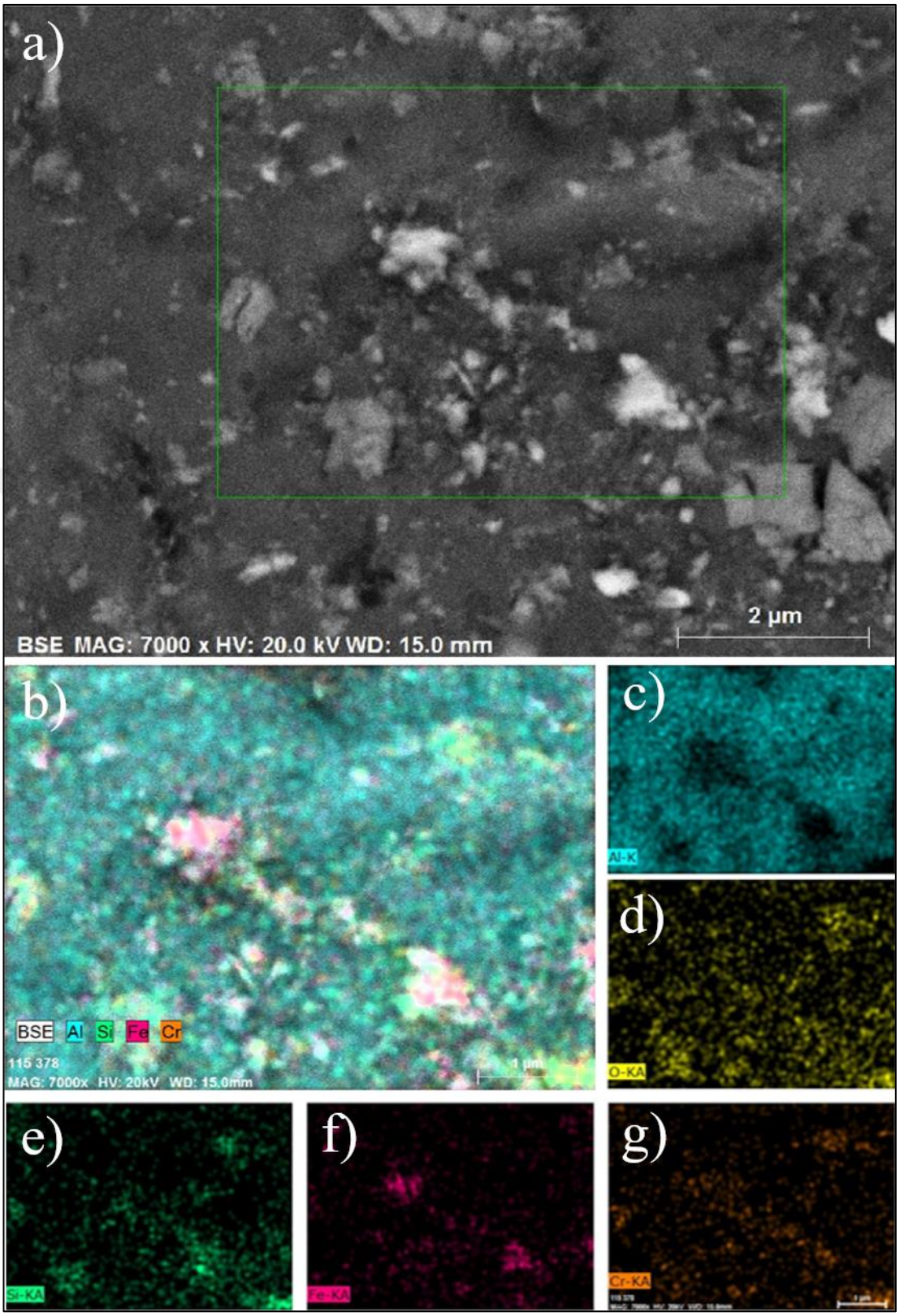


Şekil 5.13. Yüzey SEM görüntüleri, 5 bar, %1000, 2500x büyütme

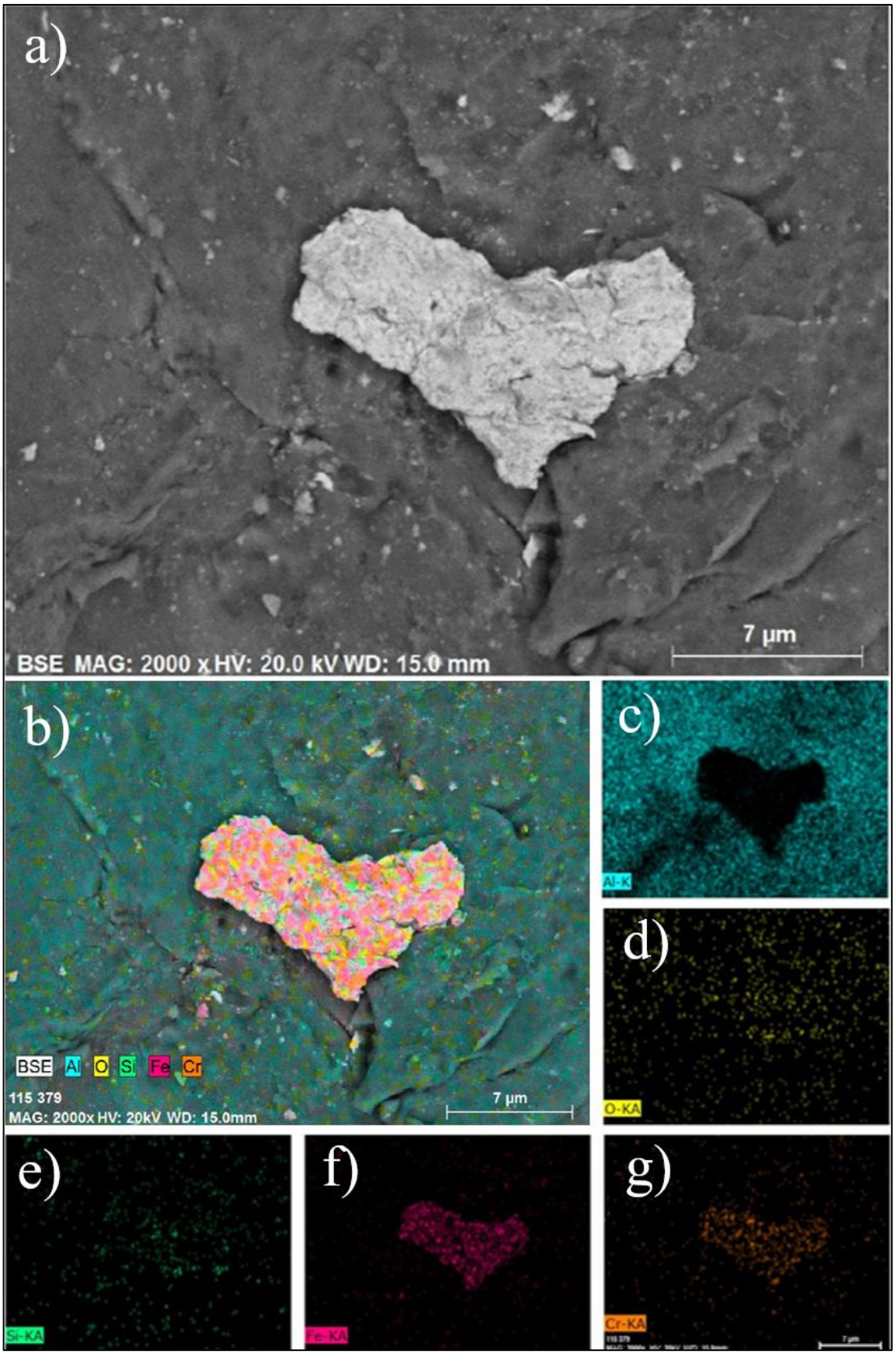
Şekil 5.13’te 5 bar püskürtme basıncı ve %1000 yüzey örtme oranı ile dövülen numune yüzeyinden iki farklı bölge (a, b) verilmiştir. Bilyalı dövme sırasında yüzey örtme oranı %100’ün üzerine çıktığında aynı bölgeye birden fazla bilya isabet etmesinden dolayı yüzeyde oluşan çukurlar birbirleri ile örtüşerek çok daha yüksek bölgesel deformasyonlara sebep olmuşlardır. Yüzeye çarpan bilyaların sebep olduğu plastik deformasyon ile oluşan çukur sınırlarında çapak benzeri yapılar gözlemlenmiştir. Nam ve arkadaşları aşırı bilyalı dövme işlemlerinde meydana gelen bu tip keskin çapak oluşumlarının çatlak başlatıcı işlev görebileceklerini ve malzemenin yorulma direncini olumsuz etkileyebileceğini söylemiştir [46].

Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’te sırasıyla 1 bar, %100 yüzey örtme oranı ve 5 bar, %1000 yüzey örtme oranı ile bilyalı dövülmüş numuneler üzerinde yapılmış EDS analizlerine yer verilmiştir. Bu çalışmalarda yüzeyde en yoğun rastlanılan elementler alüminyum, oksijen, silisyum, demir ve kromdur. Tablo 4.2 hatırlandığında deneysel çalışmalarda kullanılan paslanmaz çeliklerin kimyasal içeriğinde bulunan en yaygın elementler demir (Fe) ve kromdur (Cr). Bu bilgilerden yola çıkarak numune yüzeylerinde parlak beyaz renkte görülen bölgelerin bilyalı dövme işlemi sırasında kırılarak küçük parçalara ayrılan ve kırıldıktan sonra keskin köşelere sahip oldukları için malzeme

yüzeyine saplanan paslanmaz çelik parçaları olduğu sonucuna varılmıştır. Bilyalı dövme esnasında bilyaların tekrarlı olarak kullanılmaları nedeniyle işlem esnasında kırılmaları ve bu kırılma sonrasında boyut olarak küçülen ve yuvarlaklığını yitiren bilyaların yüzeye saplanmalarının kaçınılmaz bir sonuç olduğu söylenebilir. SEM incelemelerinde genel olarak püskürtme basıncı ve yüzey örtme oranının artışı ile yüzeye saplanan ve gömülen bilya miktarının da artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bilyaların alüminyum alaşımı yüzeylerine yoğun olarak saplanmasının bir diğer nedeninin de bilya materyali ile (paslanmaz çelik) numuneler arasındaki (AA1050 alüminyum alaşımı) yüksek sertlik farkı olduğu söylenebilir. Şekil 5.15'te yüzeye saplanan bilya incelendiğinde, yuvarlaklığını yitiren bilyaların malzeme yüzeyinde derin kesme izleri oluşturduğu ve yüzeye saplanan bilyanın işlemin devamında bu bilyaya çarpan diğer bilyaların oluşturduğu dövme etkisi ile yüzeye gömüldüğü düşünülmektedir. Alüminyum alaşımlarının bilyalı dövülmesi işlemi ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde bilyalı dövme esnasında yüzeye bilya saplanması ve gömülmesi üzerinde çok fazla durulmadığı görülmektedir. Ancak tez çalışmasındaki bu bulgular bu durumun dövülen malzemenin hem yüzey özellikleri hem de buna bağlı olarak mekanik özellikleri üzerinden önemli bir rol oynayacağını göstermektedir. Bu durumun ileride konu ile ilgili gerçekleştirilecek çalışmalar için önemli bir araştırma konusu olduğu söylenebilir.

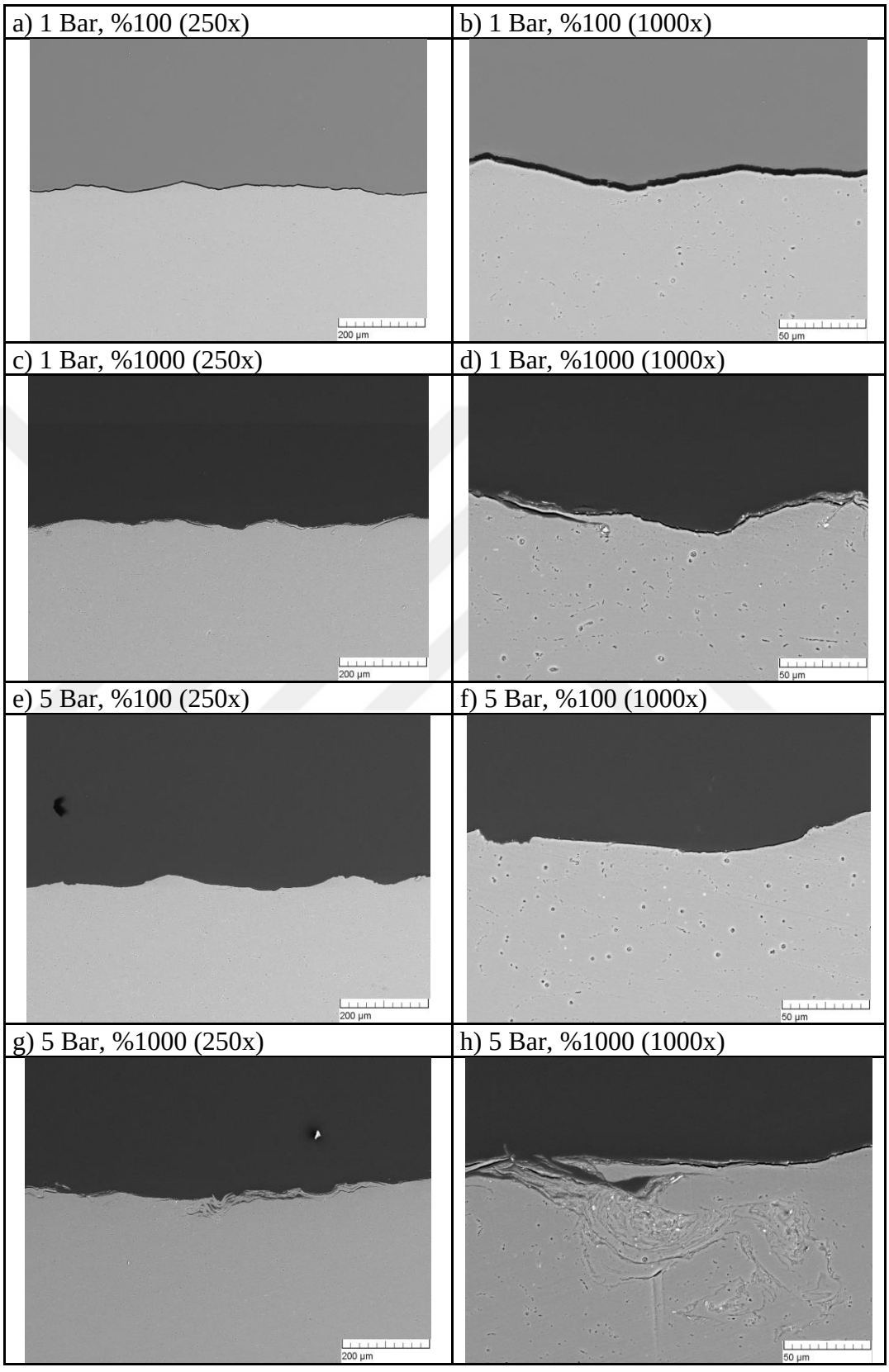


Şekil 5.14. SEM ile yüzey EDS analizi (1 bar, %100)



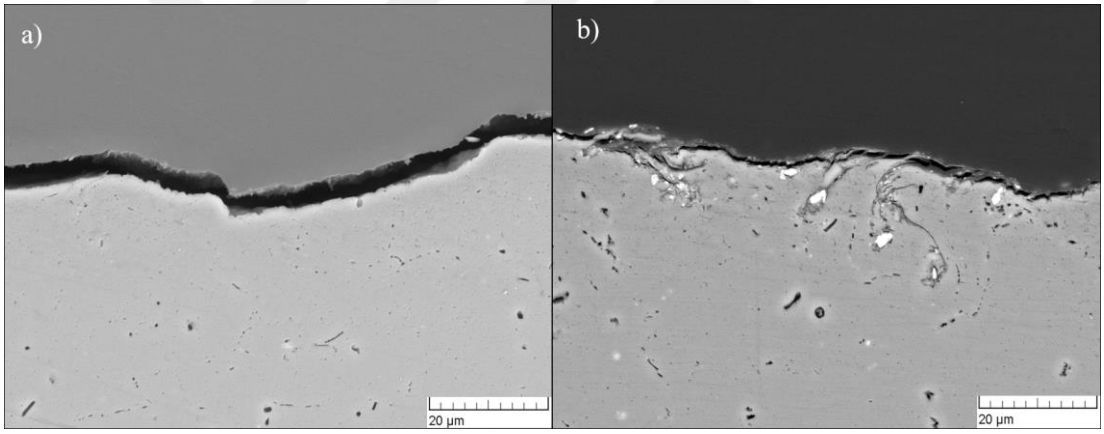
Şekil 5.15. SEM ile yüzey EDS analizi (5 bar, %1000)

5.5.2. Kesit mikroyapıları



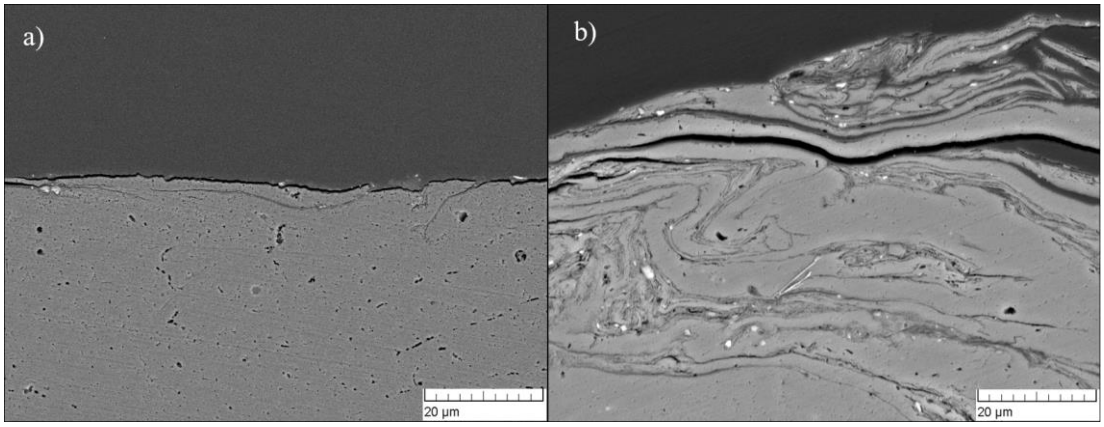
Şekil 5.16. Püskürtme basıncı ve yüzey örtme oranına bağlı kesit mikroyapı SEM görüntüleri

Şekil 5.16'da farklı püskürtme basıncı ve yüzey örtme oranları bilyalı dövülmüş AA1050 numunelerin kesit bölgelerinden alınmış SEM görüntüleri 250x ve 1000x büyütme oranlarıyla verilmiştir. Şekil incelendiğinde hem 1 bar hem de 5 bar püskürtme basıncında %100 yüzey örtme oranı ile dövülen yüzeylerde deformasyona bağlı yüzeyde girinti ve çıkıntılar (pürüzlülük artışı) gözlemlenmesine rağmen gözle görülür kopma veya çatlak gibi yüzey hasarı tespit edilmemiştir. Ancak %1000 yüzey örtme oranı ile dövülen numunelerde yüzey tabakasında aşırı deformasyona bağlı kopmalar, mikro çatlaklar meydana gelmiş ve yüzey altında aşırı deformasyon bölgeleri oluşmuştur. Bagherifard ve arkadaşları yaptıkları bilyalı dövme çalışmalarında benzer kesit görüntüleri elde etmişler, yüzey ve yüzey altı bölgelerdeki mikro çatlakların yorulmaya olumsuz etkisi olduğunu söyleyerek bilyalı dövme işlemi uygulanmış malzemelerin yorulma dayanımlarının sadece pürüzlülük değerindeki değişime bağlı olmadığını ortaya koymuşlardır [67].



Şekil 5.17. Kesit SEM görüntüleri, 2500x büyütme, a) 1 bar, %100, b) 1 bar, %1000

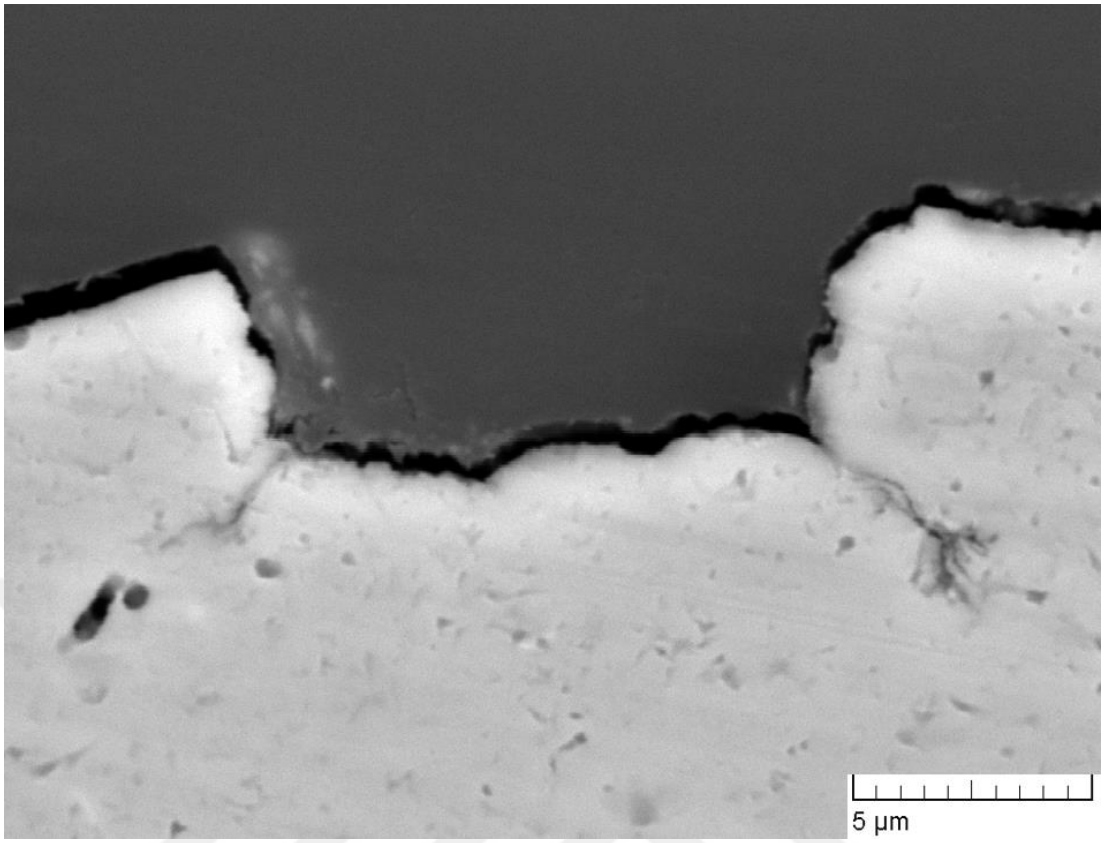
Şekil 5.17'de 1 bar püskürtme basıncında farklı yüzey örtme oranları ile dövülen numunelerin kesit mikroyapı SEM görüntüleri verilmiştir. %100 yüzey örtme oranı ile dövülen yüzeyde deformasyona bağlı tepe ve çukur oluşumu gözlenirken, %1000 yüzey örtme oranı ile dövülen yüzeyde mikro çatlaklar gözlemlenmiştir. ImageJ programında yapılan analizde SEM görüntüsü alınan bölgede en derin çatlağın yüzeyden 19,5 mikron derinliğe kadar ulaştığı görülmüş ve bu çatlağın genişliği 0,25 mikron olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.18. Kesit SEM görüntüleri, 2500x büyütme, a) 5 bar, %100, b) 5 bar, %1000

Şekil 5.18'de 5 bar püskürtme basıncı ve iki farklı yüzey örtme oranı (%100 ve %1000) ile dövülmüş numunelerin 2500x büyütme ile çekilmiş yüzey görüntülerine yer verilmiştir. Şekil 5.18a incelendiğinde 5 bar ve %100 yüzey örtme oranı ile bilyalı dövülen numunenin yüzeye yakın bölgelerinde yüzeye göre hem yatay hem de dikey eksenlerde çatlak oluşumları gözlemlenmiştir. Şekil 5.18b incelendiğinde ise 5 bar ve %1000 yüzey örtme oranı ile dövülen bölgede malzemenin aşırı plastik deformasyona maruz kaldığı görülmektedir. Bu bölgede yüzeyden kopan malzemenin bilyalı dövme sırasında yüzeye tekrar sıvanması sonucunda Şekil 5.18b'de görülen yüzey katmanı yapısının oluştuğu düşünülmektedir. Şekillerde yüzeyin alt katmanlarında görülen beyaz partiküller kırılan paslanmaz çelik bilya parçalarıdır. Gonzalez ve arkadaşları yaptıkları aşırı bilyalı dövme çalışmalarında AA6061 malzeme yüzeyinde benzer yapılar elde etmişler, bu yapıları aşırı deformasyona uğramış yüzey katmanı olarak adlandırmışlardır [68]. Literatürdeki çalışmalarda çok yoğun bir şekilde deformasyona uğramış bu yüzey tabakasının yüzeye yakın katmanlarda tane incelmesi gerçekleştiğini ifade ettiği söylenmiştir [38, 69].

Şekil 5.19'da 5 bar püskürtme hızı ve %100 yüzey örtme oranı ile dövülmüş bir numunenin SEM ile kesitten çekilmiş görüntüsü verilmiştir. Şekilde görülen çukurun bir bilya parçasının yüzeye gömülmesi ve sonrasında kesit numuneleri hazırlanırken zımpara veya parlatma aşamalarında yüzeyden ayrılmış olduğu tahmin edilmektedir. Çukur bölgenin sağ ve sol alt köşelerinde 45 derece açılar ile çatlaklar ve çatlak ilerlemesi gözlemlenmektedir.



Şekil 5.19. Kesit SEM görüntüsü, 5 bar, %100, 10000x büyütme

Görülen bu çatlaklar yüzey altına doğru fazla ilerleyememiştir. Çatlakların ilerleyememesinin sebebi olarak malzemenin sünek olmasının yanında bilyalı dövme işlemi ile yüzey altında oluşturulan kalıntı gerilme katmanının etkili olduğu düşünülmektedir [70]. ImageJ programı ile yapılan analizlerde sağ alt köşedeki çatlak uzunluğunun 4,1 mikron, genişliğinin ise 0,4 mikron olduğu, sol alt köşedeki çatlak uzunluğunun ise 3,4 mikron ve genişliğinin 0,2 mikron olduğu bulunmuştur. Çukur bölgenin yüzeyden derinliği 4,4 mikron, genişliği ise 11,3 mikrondur. Çalışmada kullanılan paslanmaz çelik bilyaların ortalama çapları 0,70-1,25 mm arasında olduğu bilindiğinden yüzeye saplanan bilyanın kırılarak hasara uğramış bir bilya olduğu düşünülmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında, bilyalı dövme parametrelerinin (yüzey örtme oranı, püskürtme basıncı ve yüzey tarama hızı) AA1050 Alüminyum alaşımının yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada incelenen yüzey ve yüzey altı özellikleri; numunelerin mikro yapıları, yüzey pürüzlülükleri, mikro sertlikleri ve kütle değişimleridir. Aşağıda genel sonuçlar ve öneriler verilmiştir;

Bilyalı dövme işleminin mikro yapıya etkisi incelendiğinde, bilyalı dövme işleminin yüzeye yakın bölgelerde plastik deformasyona yol açtığı kesit mikroyapısı, yüzey morfolojisinin değişimi ve sertliğin derinliğe bağlı değişimleri incelenerek kanıtlanmıştır. Yüksek basınçlarda yüzeyde çatlak oluşumu başlangıcı görülmüş ve yüzey örtme oranı arttığında daha derin çatlaklar oluştuğu gözlemlenmiştir.

Bilyalı dövme işleminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelendiğinde; yüzey tarama hızı ve yüzey örtme oranının pürüzlülüğe etkisi olmadığı görülmüş, ancak yüksek püskürtme basınçlarında daha yüksek pürüzlülük değerleri gözlemlenmiştir.

Bilyalı dövme işleminin yüzey altı sertliğe etkisi incelendiğinde; farklı tarama hızlarının yüzey altı sertliğe belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Farklı yüzey örtme oranları incelendiğinde ise yüzeyde aynı sertlik değerlerine ulaşılmasına rağmen yüksek yüzey örtme oranı ile dövülen numunelerde yüzeyden derine inerken daha yüksek sertlik değerleri gözlemlenmiştir. Püskürtme basıncına bağlı olarak ise yüksek basınçlarda bahsedilen diğer parametrelere göre çok daha fazla sertlik artışı gözlemlenmiştir.

Bilyalı dövme işleminin kütle değişimine etkisi incelendiğinde; püskürtme basıncı ve yüzey örtme oranının düşük olduğu durumlarda genellikle çok düşük kütle artışları gözlemlenmiş, ancak düşük basınç ve yüksek yüzey örtme oranlarında daha fazla kütle artışı tespit edilmiştir. Bu kütle artış sebebinin bilyaların malzeme yüzeyine gömülmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüksek püskürtme basıncı ile bilyalı

dövülen numuneler incelendiğinde düşük yüzey örtme oranında küçük kütle artışları gözlemlenirken, yüksek yüzey örtme oranında kütle kaybı görülmüştür. Bu kütle kaybının sebebi olarak yüzeye yüksek hızla çarpan bilyaların yüzeyi aşındırarak yüzeyden partikül kopmasına sebep olduğu düşünülmektedir.

Yapılan SEM çalışmalarında yüksek yüzey örtme oranlarında kesit görüntülerinde yüzeye yakın bölgelerde aşırı deformasyona bağlı mikro çatlak oluşumları tespit edilmiştir. Yüzeyden alınmış SEM görüntülerinde ise yüksek yüzey örtme oranlarında yoğun çatlak oluşumu ve yüzeyden malzeme kopmasına bağlı keskin köşeler gözlemlenmiştir. Yapılan EDS analizlerinde yüzeye gömülmüş paslanmaz çelik buluntularına rastlanmıştır. Bunun sebebinin tekrarlı olarak kullanılan paslanmaz çelik bilyaların kırılarak keskin köşeli parçalara ayrılarak yüzeye saplanmaları ve arkadan gelen bilyalar ile yüzeye tamamen gömülmüş olmaları düşünülmektedir.

Bu çalışma AA1050 alaşımının farklı parametreler ile bilyalı dövülmesi ile yüzey ve yüzey altı özelliklerinde ne gibi değişiklikler gözlemlenebileceğine dair sonuçları ortaya çıkararak ileride yapılabilecek akademik ve endüstriyel çalışmalara bir zemin hazırlanması amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlardan da anlaşılabileceği gibi bilyalı dövme işlemi ile AA1050 alaşımının mekanik özelliklerini iyileştirmek mümkündür ve bu alaşımın yüzey özelliklerini geliştirmek için önemli bir yöntem olduğu ortaya konulmuştur.

Bilyalı dövme işleminde birçok değiştirilebilir işlem parametresi olduğundan ileride diğer bilyalı dövme parametreleri ile çalışmalar yapılarak, belirli mekanik özellikleri geliştirmek için hangi bilyalı dövme işlem parametrelerinin değiştirilmesi gerektiğine dair daha geniş bir bilgi birikimine sahip olmak mümkündür. Bilyalı dövme üzerine yapılan çalışmalar genellikle malzemelerin yorulma dayanımını arttırmaya yönelik olup, malzemelerin yüzey ve yüzey altı özellikleri ile ilgili çalışma sayısı kısıtlıdır. Bu sebepten dolayı farklı bilyalı dövme parametrelerinin malzemelerin yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkileri araştırılmalı ve bu sonuçların malzemelerin yorulma direnci, korozyon direnci gibi mekanik özelliklerine etkileri tespit edilmelidir.

KAYNAKLAR

[1] Totten G. E., Mackenzie D. S., *Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes*, 1, CRC press, 2003.

[2] Dwight J., *Aluminium Design and Construction*, CRC Press, 2002.

[3] Kaufman J. G., *Introduction to Aluminum Alloys and Tempers*, ASM International, 2000.

[4] Witkowska M., Interogation of the Manufacturing Route of Aluminium AA 1050 Used in Lithographic Application, The University of Manchester (United Kingdom), 2013.

[5] Mandal N. R., *Aluminium Welding*, Woodhead Publishing, 2001.

[6] Lumley R., *Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, Processing and Applications*, Elsevier, 2010.

[7] Kaufman J. G., Rooy E. L., *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications*, ASM International, 2004.

[8] Din E., 573-3: Aluminium and Aluminium Alloys-Chemical Composition and Form of Wrought Products-Part 3: Chemical Composition and Form of Products, 2009.

[9] Aluminum Alloy Datasheet, http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aalco-Metals-Ltd_Aluminium-Alloy-1050A-H14-Sheet_57.pdf.ashx, (Ziyaret tarihi: 28 Kasım 2019).

[10] Aluminium Alloys - Aluminium 1050 Properties, Fabrication and Applications, https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2798, (Ziyaret tarihi: 28 Kasım 2019).

[11] Chandler H., *Heat Treater's Guide: Practices and Procedures For Nonferrous Alloys*, ASM international, 1996.

[12] Balyalı H. A., Metalik Malzemelerin Bilyalı Dövme Uygulaması Sonrası Tribolojik Davranışının Deneysel Olarak Incelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2015.

[13] Becker A., The Effect of Laser Shock Peening and Shot Peening on the Fatigue Performance of Aluminium Alloy 7075, University of Cape Town, 2017.

[14] Withers P. J., Bhadeshia H. K. D. H., Residual Stress. Part 1–Measurement Techniques, *Materials Science Technology,* 2001, **17**(4), 355-365.

[15] Brokmeier H.-G., Avalos M. C., Bolmaro R. E., Surface Microstructure Modification in Square Extruded Al-Nb Powder Composites by Shot Peening, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2014, **63**, 012015.

[16] Ahmed A. A., Mhaede M., Wollmann M., Effect of Micro Shot Peening on the Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Two Microstructure Ti–6Al–4V Alloy, *Applied Surface Science,* 2016, **363**, 50-58.

[17] Bagherifard S., Colombo C., Guagliano M., Application of Different Fatigue Strength Criteria to Shot Peened Notched Components. Part 1: Fracture Mechanics Based Approaches, *Applied Surface Science*, 2014, **289**, 180-187.

[18] Oguri K., Fatigue Life Enhancement of Aluminum Alloy for Aircraft by Fine Particle Shot Peening (FPSP), *Journal of Materials Processing Technology,* 2011, **211**(8), 1395-1399.

[19] Ciuffini A. F., Barella S., Peral Martinez L. B., Influence of Microstructure and Shot Peening Treatment on Corrosion Resistance of AISI F55-UNS S32760 Super Duplex Stainless Steel, *Materials (Basel)*, 2018, **11**(6).

[20] Automated Shot Peening Machines, https://www.engineeredabrasives.com/shot-peening-machines.html, (Ziyaret tarihi: 13 Ekim 2019).

[21] Peters D. M. D., The Effects of Shot Pening on Low Cycle Fatigue Life of 7075-T6 Aluminium Alloy Round Bar, 2014.

[22] Clitheroe L. S., The Physical and Microstructural Properties of Peened Austenitic Stainless Steel, The University of Manchester (United Kingdom), 2010.

[23] Champaigne J., Shot Peening Overview, *Metal Improvement Company*, 2001.

[24] Ünal O., Bilyalı Dövme Işleminin Tane Boyutuna Etkisinin Deneysel Incelenmesi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.

[25] Company M. I., *Shot Peening Applications Ninth Edition*, 2005.

[26] Abrasive Media Materials, https://www.blastingworksolution.com/abrasive-media-materials.html, (Ziyaret tarihi: 12 Kasım 2019).

[27] Maawad E. K. S., *Residual Stress Analysis and Fatigue Behavior of Mechanically Surface Treated Titanium Alloys:(Vom Promotionsausschuss Der Technischen Universität Clausthal Im Jahr 2012 Als Dissertation Angenommene Arbeit)*, Helmholtz-Zentrum Geesthacht, 2013.

[28] Bhuvaraghan B., Srinivasan S. M., Maffeo B., Numerical Simulation of Almen Strip Response Due to Random Impacts With Strain-Rate Effects, *International Journal of Mechanical Sciences,* 2011, **53**(6), 417-424.

[29] Bagherifard S., Ghelichi R., Guagliano M., On the Shot Peening Surface Coverage and Its Assessment By Means of Finite Element Simulation: a Critical Review and Some Original Developments, *Applied Surface Science*, 2012, **259**, 186-194.

[30] Vielma A. T., Llaneza V., Belzunce F. J., Effect of Coverage and Double Peening Treatments on the Fatigue Life of a Quenched and Tempered Structural Steel, *Surface and Coatings Technology*, 2014, **249**, 75-83.

[31] Institute A. N. S., *Procedures for Using Standard Shot Peening Test Strip: SAE J443 JAN84*, SAE, 1985.

[32] Avcu E., Surface Properties of AA7075 Aluminium Alloy Shot Peened Under Different Peening Parameters, *Acta Materialia Turcica*, 2017, **1**, 3-10.

[33] Kikuchi S., Nakamura Y., Nambu K., Effect of Shot Peening Using Ultra-Fine Particles on Fatigue Properties of 5056 Aluminum Alloy Under Rotating Bending, *Materials Science Engineering: A*, 2016, **652**, 279-286.

[34] Chen B., Huang B., Liu H., Surface Nanocrystallization Induced By Shot Peening and Its Effect on Corrosion Resistance of 6061 Aluminum Alloy, *Journal of Materials Research*, 2014, **29**(24), 3002-3010.

[35] Bagherifard S., Ghelichi R., Guagliano M., Numerical and Experimental Analysis of Surface Roughness Generated By Shot Peening, *Applied Surface Science*, 2012, **258**(18), 6831-6840.

[36] Avcu E., Bilyalı Dövme Parametrelerinin AA7075 Alüminyum Alaşımının Yüzey Altı Özelliklerine Etkileri, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 2018.

[37] Kikuchi S., Nakamura Y., Nambu K., Effect of Shot Peening Using Ultra-Fine Particles on Fatigue Properties of 5056 Aluminum Alloy Under Rotating Bending, *Materials Science and Engineering: A*, 2016, **652**, 279-286.

[38] Unal O., Varol R., Almen Intensity Effect on Microstructure and Mechanical Properties of Low Carbon Steel Subjected To Severe Shot Peening, *Applied Surface Science*, 2014, **290**, 40-47.

[39] Wang H., Yuan X., Wu K., Effect of High Energy Shot-Peening on The Microstructure and Mechanical Properties of Al5052/Ti6Al4V Lap Joints, *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, **255**, 76-85.

[40] Wang C., Jiang C., Chai Z., Estimation of Microstructure and Corrosion Properties of Peened Nickel Aluminum Bronze, *Surface and Coatings Technology*, 2017, **313**, 136-142.

[41] Cho K. T., Song K., Oh S. H., Surface Hardening of Aluminum Alloy By Shot Peening Treatment With Zn Based Ball, *Materials Science and Engineering: A*, 2012, **543**, 44-49.

[42] Mitrovic S., Adamovic D., Zivic F., Friction and Wear Behavior of Shot Peened Surfaces of 36crnimo4 and 36nicrmo16 Alloyed Steels Under Dry and Lubricated Contact Conditions, *Applied Surface Science,* 2014, **290**, 223-232.

[43] Sun B. L., Wang Y. J., Xiao J. Y., Evolution of Microstructure and Properties of 2196 Al-Li Alloy Induced By Shot Peening, *Procedia Engineering*, 2014, **81**, 1043-1048.

[44] Okolo B., Pérez-Willard F., Hawecker J., Focused Ion Beam Study of the Effects of Shot Peening on the Subsurface Microstructure of Normalized Pearlitic Steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, **183**(2-3), 160-164.

[45] Benedetti M., Fontanari V., Bandini M., High- and Very High-Cycle Plain Fatigue Resistance of Shot Peened High-Strength Aluminum Alloys: The Role of Surface Morphology, *International Journal of Fatigue,* 2015, **70**, 451-462.

[46] Nam Y.-S., Jeong Y.-I., Shin B.-C., Enhancing Surface Layer Properties of an Aircraft Aluminum Alloy By Shot Peening Using Response Surface Methodology, *Materials & Design*, 2015, **83**, 566-576.

[47] Gariépy A., Bridier F., Hoseini M., Experimental and Numerical Investigation of Material Heterogeneity in Shot Peened Aluminium Alloy AA2024-T351, *Surface and Coatings Technology*, 2013, **219**, 15-30.

[48] Mhaede M., Influence of Surface Treatments on Surface Layer Properties, Fatigue and Corrosion Fatigue Performance of AA7075 T73, *Materials & Design,* 2012, **41**, 61-66.

[49] Paslanmaz Çelik Bilyalar, http://www.fetasmetalurji.com/v2/tr/urun_detay.php?lang_id=1&menu_id=3&urun_kategori_id=1&urun_id=3&yer=alt_kategori, (Ziyaret tarihi: 5 Kasım 2019).

[50] Micracut Precision Cutting Machines, http://www.gmd.co.th/micracut_precision_cutting_machines_en.php, (Ziyaret tarihi: 5 Kasım 2019).

[51] Roy R. K., Das S., New Combination of Polishing and Etching Technique for Revealing Grain Structure of an Annealed Aluminum (AA1235) Alloy, *Journal of Materials Science,* 2006, **41**(1), 289-292.

[52] Metkon Forcipol & Forcimat, https://www.pmiis.com.my/metallography/grinding-polishing-machine/product/45-metkon-forcipol-forcimat, (Ziyaret tarihi: 5 Kasım 2019).

[53] Shimadzu ATX/ATY Series, https://www.shimadzu.com/an/balance/qn504200000065ni-att/c054-e066c.pdf, (Ziyaret tarihi: 5 Kasım 2019).

[54] Surftest SJ-301, https://www.bergeng.com/mm5/downloads/mti/sj301.pdf, (Ziyaret tarihi: 5 Kasım 2019).

[55] Hardness Tester - ZWICK ROELL 3212, http://www.strec.chula.ac.th/base/equipments-rates/vicker-hardness-tester-hardness-vicker, (Ziyaret tarihi: 5 Kasım 2019).

[56] Nikon Metrology Industrial Microscopes Inverted MA100, https://www.nikonmetrology.com/images/products/industrial-microscopes/inverted-microscopes/MA100/nikon-metrology-industrial-microscopes-inverted-MA100.jpg, (Ziyaret tarihi: 5 Kasım 2019).

[57] Metalografi ve Karakterizasyon Laboratuvarı, Sakarya Üniversitesi, http://teslab.sakarya.edu.tr/tr/icerik/10692/41992/metalografi-ve-karakterizasyon -laboratuvari, (Ziyaret tarihi: 28 Aralık 2019).

[58] Frija M., Hassine T., Fathallah R., Finite Element Modelling of Shot Peening Process: Prediction of the Compressive Residual Stresses, the Plastic Deformations and the Surface Integrity, *Materials Science Engineering: A,* 2006, **426**(1-2), 173-180.

[59] Trško L., Fintová S., Nový F., Study of Relation Between Shot Peening Parameters and Fatigue Fracture Surface Character of an AW 7075 Aluminium Alloy, *Metals,* 2018, **8**(2), 111.

[60] Žagar S., Grum J., Analysis of Surface and Subsurface Layers After Shot Peening of Various Aluminium Alloys, *Advanced Materials Research,* 2010, **89-91**, 53-58.

[61] Su L., Lu C., Li H., Investigation of Ultrafine Grained AA1050 Fabricated By Accumulative Roll Bonding, 2014, **614**, 148-155.

[62] El-Danaf E., Soliman M., Almajid A., Enhancement of Mechanical Properties and Grain Size Refinement of Commercial Purity Aluminum 1050 Processed By ECAP, 2007, **458**(1-2), 226-234.

[63] Kwon Y., Shigematsu I., Saito N., Mechanical Properties of Fine-Grained Aluminum Alloy Produced By Friction Stir Process, *Scripta Materialia,* 2003, **49**(8), 785-789.

[64] Kawasaki M., Alhajeri S. N., Xu C., The Development of Hardness Homogeneity in Pure Aluminum and Aluminum Alloy Disks Processed By High-Pressure Torsion, *Materials Science Engineering: A*, 2011, **529**, 345-351.

[65] Mhedhbi M., Khlif M., Bradai C., Investigations of Microstructural and Mechanical Properties Evolution of AA1050 Alloy Sheets Deformed By Cold-Rolling Process and Heat Treatment Annealing, *Journal of Materials Environmental Sciences, JMES,* 2017, **8**(8), 2967-2974.

[66] Sharp P., Clayton J., Clark G., The Fatigue Resistance of Peened 7050-T7451 Aluminium Alloy—Repair and Re-Treatment of a Component Surface, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures,* 1994, **17**(3), 243-252.

[67] Bagherifard S., Fernandez-Pariente I., Ghelichi R., Effect of Severe Shot Peening on Microstructure and Fatigue Strength of Cast Iron, *International Journal of Fatigue*, 2014, **65**, 64-70.

[68] González J., Bagherifard S., Guagliano M., Influence of Different Shot Peening Treatments on Surface State and Fatigue Behaviour of Al 6063 Alloy, *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, **185**, 72-81.

[69] Bagherifard S., Fernandez-Pariente I., Ghelichi R., Fatigue Behavior of Notched Steel Specimens With Nanocrystallized Surface Obtained By Severe Shot Peening, *Materials Design*, 2013, **45**, 497-503.

[70] Carvalho A. L. M., Voorwald H. J. C., The Surface Treatment Influence on the Fatigue Crack Propagation of Al 7050-T7451 Alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 2009, **505**(1-2), 31-40.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Gönül B.**, Yetik O., Çubuk A. B., Avcu Y. Y., Koçoğlu H., Ergün R. E., Avcu E., Cam Bilya ile Dövülen AA7075 Alüminyum Alaşımının Yüzey Özelliklerine Bilya Boyutu ve Bilya Çarpma Açısının Etkisi, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi (IMASCON),* Kocaeli, Türkiye, 26-28 Nisan 2019.

[2] Çubuk A. B., Avcu Y. Y., Yetik O., **Gönül B.**, Koçoğlu H., Ergün R. E., Avcu E., AA7075 Alüminyum Alaşımının Bilyalı Dövme İşleminde Bilya Boyutunun ve Bilya Çarpma Açısının Kütle Kaybı ve Pürüzlülüğe Etkisi, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi (IMASCON),* Kocaeli, Türkiye, 26-28 Nisan 2019

ÖZGEÇMİŞ

Berkay Gönül 1994 yılında Kocaeli'de doğdu. Lise öğrenimini Muammer Dereli Anadolu Öğretmen Lisesi'nde tamamladı. 2012 yılında girdiği Orta Doğu Teknik Üniversitesi Kuzey Kıbrıs Kampusü'nde 1 yıl hazırlık programı dahil 2017 yılında Makine Mühendisliği bölümünü bitirdi. 2018 yılında Kocaeli Üniversitesi'nde Makine Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitine başladı, 2020 yılında mezun oldu.