T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

GELENEKSEL BİLYALI DÖVME VE ŞİDDETLİ BİLYALI DÖVME YOLUYLA AL-Sİ ALAŞIMLARI YÜZEYİNİN ŞİDDETLİ PLASTİK DEFORMASYONU VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İsa YİĞİT

Danışman
Doç. Dr. Simge İRİZALP

MANİSA–2024

İSA YİĞİT	GELENEKSEL BİLYALI DÖVME VE ŞİDDETLİ BİLYALI DÖVME YOLUYLA AL-Sİ ALAŞIMLARI YÜZEYİNİN ŞİDDETLİ PLASTİK DEFORMASYONU VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ	2024

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zekâ ve program kullanmadığımı beyan ederim.

İsa YİĞİT

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İsa YİĞİT

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Simge İRİZALP

Bu çalışmada, Al-Si alaşımlarının geleneksel bilyalı dövme (GBD) ve şiddetli bilyalı dövme (ŞBD) işlemleri kullanılarak şiddetli plastik deformasyon (ŞPD) etkisi ile malzeme özellikleri ve aşınma performansı incelenmiştir. Al-Si alaşımları, yüksek özgül mukavemetleri, korozyon direnci ve hafif yapıları nedeniyle otomotiv ve havacılık sanayisinde sıklıkla kullanılmaktadır. Çalışmanın amacı, farklı bilyalı dövme şiddetlerinin Al-Si döküm alaşımının mikroyapısı, mekanik özellikleri ve aşınma performansı üzerindeki etkilerini anlamaktır.

Araştırma, Al-Si alaşımlarının fiziksel özellikleri ve endüstriyel uygulamalarına odaklanarak kapsamlı bir literatür taramasıyla başlamıştır. Deneylerde, A356 Al-Si alaşım numunelerine GBD ve ŞBD uygulanmış ve yüzey morfolojisi, mikroyapı ve mekanik özelliklerdeki değişiklikler incelenmiştir. Yüzey ve yüzey altı değişikliklerini analiz etmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) gibi ileri karakterizasyon teknikleri kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Geleneksel Bilyalı Dövme, Şiddetli Bilyalı Dövme, Al-Si Alaşımları, Mikroyapı, Mekanik Özellikler, Aşınma Direnci

2024, 104 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

İsa YİĞİT

Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Education
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Simge İRİZALP

In this study, the material properties and wear performance of Al-Si alloys were investigated by using conventional shot peening (CSP) and severe shot peening (SSP) processes with the effect of severe plastic deformation (SPD). Al-Si alloys are widely used in the automotive and aerospace industries due to their high specific strength, corrosion resistance and light weight. The aim of the study is to understand the effects of different shot peening intensities on the microstructure, mechanical properties and wear performance of Al-Si cast alloy.

The research started with an extensive literature review focusing on the physical properties and industrial applications of Al-Si alloys. In the experiments, A356 Al-Si alloy specimens were subjected to CSP and SSP and the changes in surface morphology, microstructure and mechanical properties were investigated. Advanced characterization techniques such as scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) were used to analyze the surface and subsurface changes.

Keywords: Conventional Shot Peening, Severe Shot Peening, Al-Si Alloys, Microstructure, Mechanical Properties, Wear Resistance

2024, 104 pages

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında beni destekleyen, bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, akademik hayatım boyunca rehberlik eden ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Simge İrizalp'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalar sürecinde numune tedariği konusunda yardımları için CMS Jant ve Makina Sanayii A.Ş. firmasına, laboratuvar analizlerindeki değerli katkılarından dolayı Makine Yüksek Mühendisi Burçak Kardelen Köroğlu'na şükranlarımı iletmek isterim.

Deneysel çalışmalar sürecinde okulumuz makine mühendisliği lisans öğrencilerimizden Mehmet Can Acar ve Yusuf Ölmez'e sonsuz desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalar sürecinde okulumuz doktora öğrencilerinden Makine Yüksek Mühendisi Cansu Apaydın'a desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışmanın gerçekleşmesi için bana her konuda destek sağlayan Kraken Marine Industries firması kurucuları ve yöneticileri olan Mert Tepe, Can Oran ve Serdar Akça'ya en içten duygularımla teşekkür ederim.

Hayatım boyunca yanımda olan, bana her daim sevgi ve güven aşılayan eşime ve beni bu günlere getiren değerli aileme en derin minnet duygularımı ifade ederim.

Bana destek veren, isimlerini burada zikredemediğim tüm hocalarıma, iş arkadaşlarıma ve dostlarıma da teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının deneysel kısmında kullanılan hizmet alımları, MCBÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen ve proje numarası 2023-011 olan proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Sağlanan destek için teşekkür ederim.

İsa YİĞİT

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BD: Bilyalı Dövme

GBD: Geleneksel Bilyalı Dövme

ŞBD: Şiddetli Bilyalı Dövme

SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu

EDX: Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi

DEFAM: Deneysel Fen Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi

HB: Brinell Sertlik Birimi

HV: Vickers Sertlik Birimi

HRC: Rockwell Sertlik Birimi

Ra: Aritmetik Ortalama Pürüzlülük

Rz: Yüzey pürüzlülük profilinin en yüksek ve en düşük noktaları arasındaki dikey mesafe

XRD: X-Ray Diffaction (X Işını Difraksiyonu)

N: N tipi Almen şiddeti

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Alüminyum elementi genel bilgi 3
Şekil 2.2. Bazı mühendislik malzemelerinin Dayanım/Yoğunluk oranı 4
Şekil 2.3. Temel alüminyum alaşımları 7
Şekil 2.4. Al-Si faz denge diyagramı 11
Şekil 2.5. A356 alüminyum alaşımına ait tipik mikroyapı görüntüsü 11
Şekil 3.1. Bilyalı dövme işlemi şematik gösterimi ve (b) Bilyalı dövme işlemi sonrası oluşan plastik deformasyonu 14
Şekil 3.2. Bilyalı dövme işlemi 15
Şekil 3.3. Bilya çarpma açısı 17
Şekil 3.4. Bilyalı dövülen Almen şeridine ait sehimin ölçülmesi (Sarabi, 2017) 18
Şekil 3.5. Almen testi ölçümü a) Cihaz ve standart numunelerin şematik gösterimi b) Doyum noktası eğrisi 18
Şekil 3.6. Yüzey örtme oranı yüzdeleri 19
Şekil 3.7. Bilya tipleri ve sınıflandırılması 20
Şekil 3.8. Çelik bilyaların sınıflandırılması 21
Şekil 4.1. SEM yüzey fotoğrafları: a) Dövülmemiş b) Optimal c) Aşırı dövülmüş .. 22
Şekil 4.2. SEM yüzey gözlemleri a) Az dövülmüş (65 s) b) Optimal (130 s) c) Aşırı dövülmüş (390 s) 23
Şekil 4.3. Ra ve Rz pürüzlülük sonuçları ve topografi görüntüleri 24
Şekil 4.4. Bilya boyutu ve bilya püskürtme basıncının yüzey topografyasına etkisi 24
Şekil 4.5. Yağ jetiyle dövülmüş ve dövülmemiş yüzeyleri gösteren optik görüntüleri: a) Dövülmemiş AA6061-T4 (b) Dövülmüş AA6061 T4, dövme mesafesi 25 mm ve (c) Dövülmüş AA6061-T4, dövme mesafesi 40 mm 25
Şekil 4.6. Dövme mesafesinin kütle kayıp oranına etkisi 26
Şekil 4.7. PM7075-T6'nın genel yüzey SEM görünümü a) Bilyalı dövme işlemi öncesi, b) Bilyalı dövme işlemi sonrası 26
Şekil 4.8. Farklı bilyalı dövme işlemlerinden sonra Al-6063'ün yüzey mikro yapısı (a) Geleneksel bilyalı dövme (b) Aşırı bilyalı dövme (c) Aşırı ve tekrar bilyalı dövme 27
Şekil 4.9. AA1050- Tekrarlı dövülmüş ısıl işlem uygulanmamış numunenin pürüzlülük değişimi 29
Şekil 4.10. AA1050- tek dövülmüş ısıl işlem uygulanmamış numunenin pürüzlülük değişimi 29

Şekil 4.11. Bilyalı dövme metodu öncesi ve sonrasında numunelerin 3D görüntüleri: (a) Bilyalı dövülmemiş; (b) 0,35 mm A'da bilyalı dövme; (c) 0,45 mm A'da bilyalı dövme ve (d) yüzey pürüzlülük değerleri 31
Şekil 5.1. Farklı bilya örnekleri 33
Şekil 5.2. Çalışmada kullanılan S230 tip bilyanın stereo mikroskop görüntüsü 34
Şekil 5.3. Ergiyik A356 alaşımının kalıba dökülmesi 36
Şekil 5.4. Feder döküm kalıplarında soğuyan A356 malzemesi..... 36
Şekil 5.5. Döküm sonrası kalıptan çıkan numuneler 37
Şekil 5.6. Çekme Numunesi Ölçüleri 37
Şekil 5.7. Döküm sonrası talaşlı işlenmiş çekme numunesi örneği..... 37
Şekil 5.8. Bilyalı dövme deney düzeneği 38
Şekil 5.9. Sıkıştırılmış katman derinliğinin öngörülen değişimi Almen 'A' BD yoğunluğu..... 41
Şekil 5.10. Almen 'N' yoğunluğunun sıkıştırılmış katman derinliğine dönüştürülmesine ilişkin kılavuz diyagram 41
Şekil 5.11. Almen şiddeti ölçümü için bilyalı dövülmüş N-tipi şeritler ve Almen Şiddeti ölçümü 42
Şekil 5.12. Numunenin makineye bağlanışı 43
Şekil 5.13. Bilyalı dövme uygulanmış numuneler..... 43
Şekil 5.14. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm aleti..... 44
Şekil 5.15. (a) Nikon Marka Eclipse LV150N Model Optik Mikroskop (b) Nikon Marka SMZ 745T Model Stereo Mikroskop 45
Şekil 5.16. Micracut numune kesim cihazı..... 46
Şekil 5.17. Micro-Acrylic toz……47
Şekil 5.18. Micro-Acrylic hızlandırıcı..... 47
Şekil 5.19. Döküm öncesi kesilmiş numunelerin kalıplara alınması örnek görüntüsü 47
Şekil 5.20. Oluşturulan karışımın kalıplara doldurulması örnek görüntüsü 48
Şekil 5.21. Zımpara makinesi 49
Şekil 5.22. Parlatma keçeleri 49
Şekil 5.23. Parlatma Makinesi 50
Şekil 5.24. Emcotest mikrosertlik test cihazı..... 50
Şekil 5.25. A) Carl Zeiss 300VP SEM Cihazı b) Kaplama (QUORUM Q150 RES) 51
Şekil 5.26. Çekme testi makinesi..... 53

Şekil 5.27. Aşınma test cihazı 54
Şekil 5.28. XRD Test cihazı 54
Şekil 5.29. Yazılım ile FWHM değerinin belirlenmesi 56
Şekil 6.1. İşlem görmemiş numune yüzey pürüzlülük grafiği 57
Şekil 6.2. 8N Şiddetle dövülmüş numunenin yüzey pürüzlülük grafiği 58
Şekil 6.3. 11N Şiddetle dövülmüş numunenin yüzey pürüzlülük grafiği 58
Şekil 6.4. 18N Şiddetle dövülmüş numunenin yüzey pürüzlülük grafiği 59
Şekil 6.5. SP numunelerinin ortalama Ra ve Rz değerleri 59
Şekil 6.6. İşlem görmemiş numune stereo mikroskop görüntüleri 61
Şekil 6.7. 8N Bilyalı dövülmüş numune stereo mikroskop görüntüleri 61
Şekil 6.8. 11N Bilyalı dövülmüş numune stereo mikroskop görüntüleri 62
Şekil 6.9. 18N Bilyalı dövülmüş numune stereo mikroskop görüntüleri 62
Şekil 6.10. İşlem görmemiş, 8N, 11N ve 18N bilyalı dövülmüş numunelerin SEM incelemeleri 64
Şekil 6.11. İşlemsiz ve 8N bilyalı dövülmüş numunenin optik mikroskop görüntüleri 65
Şekil 6.12. 11N ve 18N bilyalı dövülmüş numunenin optik mikroskop görüntüleri. 66
Şekil 6.13. Bilyalı dövme öncesi A356 malzemesinin yüzey altı SEM mikroyapısı 68
Şekil 6.14. Geleneksel bilyalı dövülmüş (8N) numunenin yüzeyaltı SEM mikroyapıları 68
Şekil 6.15. Geleneksel bilyalı dövülmüş (11N) numunenin yüzeyaltı SEM mikroyapıları 70
Şekil 6.16. Geleneksel bilyalı dövülmüş (11N) numunenin yüzeyaltı SEM mikroyapıları 70
Şekil 6.17. Şiddetli bilyalı dövülmüş (18N) numunenin yüzey altı SEM mikroyapıları 71
Şekil 6.18. SEM görüntülerinin yüzeydeki çukurlar ve kesitteki poroziteler açısından kıyaslanması 72
Şekil 6.19. A356 alaşımının bilyalı dövme etkisiyle değişiminin detaylı SEM incelemeleri 73
Şekil 6.20. 8N GBD1 işlemi sonrası A356 alaşımının fazlarının SEM/EDX analizi 75
Şekil 6.21. 11N GBD işlemi sonrası A356 alaşımının fazlarının SEM/EDX analizi 76
Şekil 6.22. 18N ŞBD işlemi sonrası A356 alaşımının fazlarının SEM/EDX analizi 77
Şekil 6.23. Örnek mikrosertlik ölçüm izleri 78

Şekil 6.24. Mikrosertliğin derinliğe bağlı değişimi 78
Şekil 6.25.İşlem görmemiş numune XRD grafiği 79
Şekil 6.26. 8N bilyalı dövülmüş XRD grafiği 80
Şekil 6.27. 11N bilyalı dövülmüş XRD grafiği 81
Şekil 6.28. 18N bilyalı dövülmüş XRD grafiği 81
Şekil 6.29. XRD paternlerinin kıyaslaması..... 82
Şekil 6.30. XRD paterninde bilyalı dövme işlemi sonrası FWHM değişimi 82
Şekil 6.31. İşaretli pikin detay incelenmesi 83
Şekil 6.32. Kristalit boyut değişim grafiği..... 84
Şekil 6.33. İşlem görmemiş numunenin 1N altında aşınma testi sürtünme grafiği ... 85
Şekil 6.34. İşlem görmemiş numuneye uygulanan 1N aşınma testi iz alanı 86
Şekil 6.35. 8N Bilyalı dövülmüş 1N altında aşınma testi sürtünme grafiği 86
Şekil 6.36. 8N numuneye uygulanan 1N aşınma testi iz alanı..... 87
Şekil 6.37. 11N Bilyalı dövülmüş 1N altında aşınma testi sürtünme grafiği 87
Şekil 6.38. 11N numuneye uygulanan 1N aşınma testi iz alanı..... 88
Şekil 6.39. 18N Bilyalı dövülmüş 1N altında aşınma testi sürtünme grafiği 88
Şekil 6.40. 18N numuneye uygulanan 1N aşınma testi iz alanı..... 89
Şekil 6.41. NSP,8N,11N ve 18N Numunelerin 1N yük altında aşınma testi sonucunda oluşan izlerin ölçülmesi..... 91
Şekil 6.42. NSP,8N,11N ve 18N Numunelerin 1N yük altında aşınma testi sonucunda temel sürtünme elemanında oluşan aşınma iz genişlikleri..... 91
Şekil 6.43. NSP,8N,11N ve 18N Numunelerin 1N yük altında aşınma testi sonucunda karşı elemanda oluşan aşınma iz genişlikleri..... 91
Şekil 6.44. Aşınma testi sonrası temel sürtünme elemanında oluşan aşınma izinin hacim kaybı hesap grafiği 92
Şekil 6.45. NSP,8N,11N ve 18N Numunelerin 1N yük altında aşınma testi sonucunda oluşan sürtünme grafiği..... 93
Şekil 6.46. NSP,8N,11N ve 18N Numunelerinin 1N yük altında aşınma testi sonucunda oluşan ortalama sürtünme kat sayıları..... 93
Şekil 6.47. Almen şiddetine göre çekme dayanımı değişimi..... 95
Şekil 6.48. Almen şiddetine göre % uzama değişimi 95
Şekil 6.49. 11N ve 18N bilyalı dövülmüş alaşımlara ait gerilme birim değiştirme eğrileri 96

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri..... 5
Tablo 2.2. ANSI 35.1 standartına göre dövme alüminyum ve alaşımların ana grupları 6
Tablo 2.3. ANSI standartlarında belirtilen bazı alüminyum alaşımlarının ISO (International Organization For Standardization) karşıtları..... 6
Tablo 2.4. Döküm alüminyum alaşımlarının ANSI 35.1 standardına göre temel grupları..... 8
Tablo 2.5. Bazı döküm alaşımlarının tanıtımı..... 8
Tablo 2.6. Bazı döküm alaşımlarının kimyasal bileşimi..... 9
Tablo 4.1. AA1050 Isıl işlem yapılmamış numunenin eğme deney sonuçları..... 28
Tablo 4.2. AA1050 Isıl işlem uygulanmamış numunenin pürüzlülüğü, Ra..... 28
Tablo 4.3. AA1050 ısıl işlem uygulanmış numunenin eğme deney sonuçlar..... 30
Tablo 4.4. AA1050 Isıl işlem uygulanmış numunenin pürüzlülüğü, Ra..... 30
Tablo 4.5. Bilyalı dövme öncesi ve sonrası çekme mukavemeti değerleri..... 32
Tablo 5.1. A356 Kimyasal kompozisyonu..... 33
Tablo 5.2. Bilya tiplerinin standartları ve sertlik değerleri..... 34
Tablo 5.3. Çelik bilya boyutları..... 35
Tablo 5.4. 'A' şeritleri kullanılarak 0,20 mm'lik dövme yoğunluğu için Basma Gerilme Derinlikleri..... 39
Tablo 5.5. Basma Gerilme Derinlikleri (AMS 2432B standardı değerleri)..... 40
Tablo 5.6. Bilyalı Dövme Proses Parametreleri..... 43
Tablo 6.1. Bilyalı dövme sonucunda meydana gelen kristalit boyutu (nm), latis mikro-şekil değişimi (%) ve dislokasyon yoğunluğu (mm^{-2})..... 84
Tablo 6.2. İşlem Görmemiş,11N ve 18N çekme testi karşılaştırılması..... 94

İÇİNDEKİLER

ÖZET i
ABSTRACT ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ iv
ŞEKİLLER DİZİNİ v
TABLOLAR DİZİNİ ix
1. GİRİŞ 1
1.1. Motivasyon 1
1.2. Amaç ve Hedef 1
2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE ÖZELLİKLERİ 3
2.1. Dövme Alüminyum Alaşımları 5
2.2. Döküm Alüminyum Alaşımları 7
2.3. Dövme ve Döküm Alüminyum Alaşımlarının Farkları 9
2.4. Al-Si Döküm Alaşımları ve Kullanım Alanları 10
3. BİLYALI DÖVME 13
3.1. Bilyalı Dövmenin Amacı 14
3.2. Bilyalı Dövme Parametreleri 15
3.2.1. Bilyalı Dövme Şiddeti 17
3.2.2. Yüzey Örtme Oranı 19
3.2.3. Bilya Tipi 20
4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ BİLYALI DÖVÜLMESİ ÜZERİNE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR 22
4.1. Bilyeli Dövmenin Yüzey Pürüzlülük Değerine Etkileri 28
4.2. Bilyalı Dövmenin Mekanik Özelliklere Etkisi 31
5. MALZEME VE YÖNTEM 33
5.1. Malzeme 33
5.1.1. Hammadde 33
5.1.2. Bilyalar 33
5.2. Yöntem 35
5.2.1. Döküm İşlemi 35
5.2.2. Bilyalı Dövme İşlemleri 38
5.2.3. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri 44
5.2.4. Yüzey Mikroskop İncelemeleri 45
5.2.5. Metalografik Hazırlık 46

5.2.6. Mikrosertlik İncelemeleri **50**
5.2.8. SEM/EDX Analizleri **51**
5.2.9. Çekme Testleri **52**
5.2.10. Aşınma Testleri **53**
5.1.11. XRD (X-Işını Kırınım) Testi **54**
6. BULGULAR VE TARTIŞMA **57**
6.1. Yüzey İncelemeleri **57**
6.1.1. Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları **57**
6.1.2. Yüzey Topografisi **60**
6.2. Mikroyapısal İncelemeler **64**
6.2.1. Optik Mikroskop Görüntüleri **64**
6.2.2. SEM ve EDX Analizleri **67**
6.3.Mikrosertlik Ölçümleri **77**
6.4. XRD Analizi **78**
6.5. Aşınma Direnci **85**
6.5.1. 1N Yük Altında ve 1670 s süresinde A356 için Aşınma Testi **85**
6.5.2. 1N Yük Altında ve 1670 s süresinde 8N Bilyalı Dövülmüş A356 için Aşınma Testi **86**
6.5.3. 1N Yük Altında ve 1670 s süresinde 11N Bilyalı Dövülmüş A356 için Aşınma Testi **87**
6.5.4. 1N Yük Altında ve 1670 s süresinde 18N Bilyalı Dövülmüş A356 için Aşınma Testi **88**
6.5.5. Aşınma Sonuçlarının Karşılaştırılması **89**
6.6. Çekme Testi Sonuçları **94**
7. GENEL SONUÇLAR **97**
8. ARAŞTIRMANIN KATKILARI VE GELECEK ÇALIŞMALAR **99**
9. KAYNAKÇA **100**

1. GİRİŞ

1.1. Motivasyon

Alüminyum-silikon alaşımları hafif, yüksek mukavemetli ve korozyona dayanıklı olup otomotiv ve havacılık sanayisinde sıklıkla kullanılmaktadır. Enerji verimliliği ve performansın giderek daha fazla değerlendiği günümüzde, bu alaşımlar, yakıt tasarrufu ve çevresel sürdürülebilirlik açısından kritik malzemeler olarak öne çıkmaktadır. Ancak, Al-Si alaşımlarının yüzey özelliklerinin daha da iyileştirilmesi, onların kullanım ömrünü uzatmak ve mekanik performansını artırmak için sürekli bir araştırma gerektirmektedir.

Bilyalı dövme işlemleri, malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmede etkili bir yöntem olarak kabul edilir. Geleneksel bilyalı dövme (GBD) ve şiddetli bilyalı dövme (ŞBD) teknikleri, malzeme yüzeyinde oluşan gerilimleri azaltarak yorulma ömrünü artırma potansiyeline sahiptir. ŞBD' nin özellikle malzemenin mikroyapısında daha derinlemesine değişiklikler yaparak üstün mekanik özellikler kazandırdığı öngörülmektedir. Bu çalışmanın motivasyonu, Al-Si alaşımlarının endüstriyel uygulamalarda daha verimli kullanılabilmesi için bilyalı dövme tekniklerinin potansiyelini ortaya koymaktır. Araştırma sonuçlarının, daha dayanıklı ve uzun ömürlü malzemelerin geliştirilmesine katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

1.2. Amaç ve Hedef

Bu çalışmanın amacı, Al-Si alaşımlarında kullanılan geleneksel bilyalı dövme (GBD) ve şiddetli bilyalı dövme (ŞBD) işlemlerinin malzeme yüzeyinde oluşturduğu mikroyapısal değişiklikleri ve bu değişikliklerin mekanik özelliklere etkisini incelemektir. Çalışmanın spesifik hedefleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

GBD ve ŞBD işlemlerinin Al-Si alaşımlarının yüzey ve alt yüzey bölgelerinde meydana getirdiği mikroyapısal değişikliklerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ile incelenmesi.

Farklı bilyalı dövme tekniklerinin malzemelerin sertlik ve çekme özellikleri gibi mekanik özellikler üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi.

Farklı Almen şiddetinde dövülmüş alaşımların aşınma direncinin aşınma miktarı ve sürtünme katsayısı açısından değerlendirilmesi.

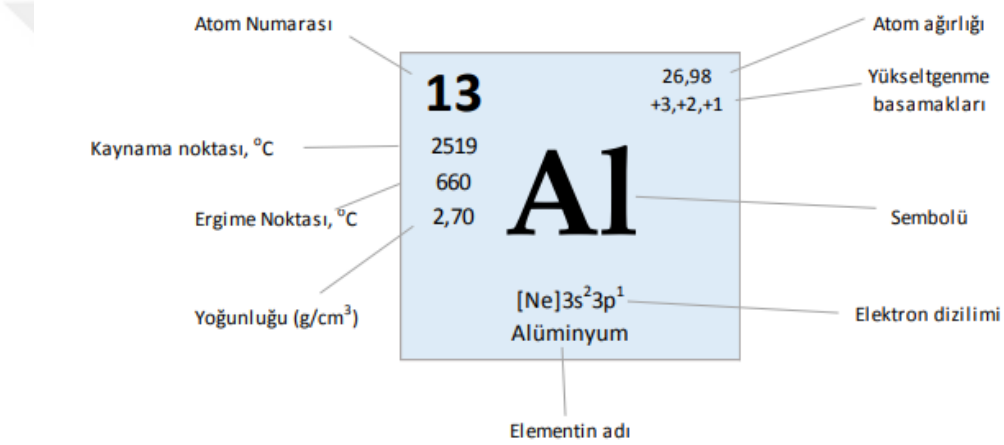
GBD ve ŞBD işlemlerinin malzeme performansı üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi ve ŞBD'nin potansiyel avantajlarının belirlenmesi.

Elde edilen sonuçların ışığında, Al-Si alaşımlarının endüstriyel uygulamalarda kullanımını optimize etmek için öneriler geliştirilmesi.

Bu araştırma, Al-Si alaşımlarının yüzey işleme teknikleriyle nasıl iyileştirilebileceğine dair bilimsel bilgi sağlayarak, mühendislik uygulamalarında daha üstün performans sergileyen malzemelerin geliştirilmesine katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE ÖZELLİKLERİ

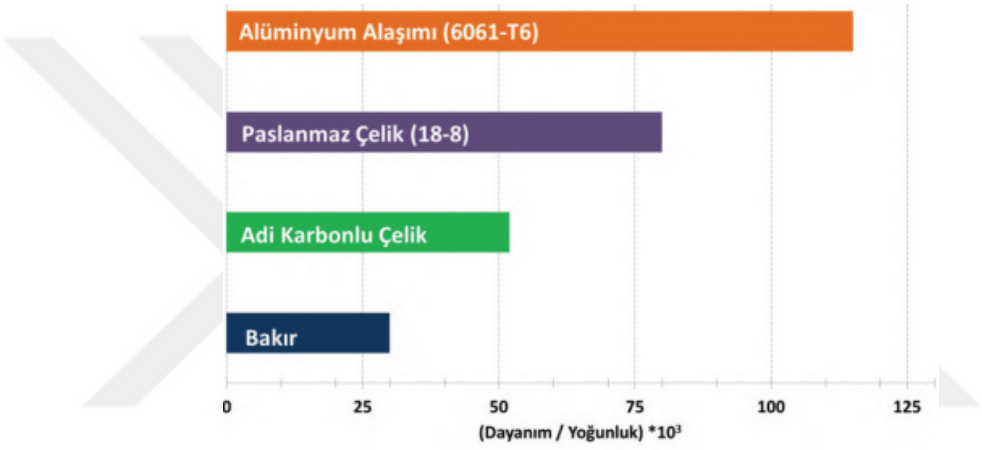
Alüminyum (Al), Şekil 2.1'de gösterildiği gibi 13 atom numarasına sahip ve öz kütlesi 2,70 g/cm^3 olan gümüş tonu renklerinde hafif bir metaldir. Oksijen ve silisyumdan sonra Dünya'da en çok görülen üçüncü elementtir. Doğada saf halde bulunmaz; oksit ve silikat mineralleri şeklinde yer alır. Alüminyum üretimi iki grupta incelenir: birincil ve ikincil üretim. Birincil alüminyum, boksit madeninden çıkarılırken, ikincil alüminyum geri dönüştürülmüş hurda malzemeden elde edilir. (Eroğlu, G; Şahiner, M, 2018).



Şekil 2.1 Alüminyum elementi genel bilgi (Eroğlu, G; Şahiner, M, 2018)

Alüminyum alaşımları yoğunluklarına göre yüksek mukavemetleri (mukavemet/yoğunluk oranı), korozyon ve aşınma dirençleri, yüksek elektrik ve ısı iletkenlikleri, kolay işlenebilmeleri, dökülebilirlikleri ve çevre dostu olmalarından dolayı otomotiv ve havacılık sanayisinde sıklıkla kullanılmaktadır. Parçaların hafifletilmesi ve bunun getirdiği enerji tasarrufu, alüminyum alaşımlarını diğer malzemelere kıyasla avantajlı hale getirmektedir. 1889 yılında mutfak eşyaları üretimiyle sanayiye adım atan alüminyum, denizcilik ve havacılık sektörlerinden konserve kutuları, boru hatları ve köprü inşaatlarına kadar geniş bir kullanım alanı bulmuş; 2000'li yıllarda ise motor blokları, otomotiv jantları, doğalgaz sıvılaştırma tesisleri ve zırh plakalarının üretiminde tercih edilmeye başlanarak sektördeki yerini daha da sağlamlaştırmıştır. (Campbell, 2003).

Çeliğin ardından en sık tercih edilen alüminyum alaşımları, metalik mühendislik malzemeleri arasında yer alır. Düşük özgül ağırlık, yüksek korozyon dayanımı ve elektrik iletkenliği gibi avantajlı özellikleri, alüminyum alaşımlarına duyulan ilgiyi artıran faktörlerdendir. Ayrıca, diğer mühendislik malzemelerine kıyasla daha yüksek özgül dayanımları da bu ilginin önemli sebeplerindendir, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi. Manyetik özellik taşımaması, manyetizma tabanlı elektronik cihazların üretiminde kullanılmasına olanak tanır. Bunun yanı sıra, alüminyum alaşımlarının yüksek ısı iletkenliği, yanıcı veya parlayıcı olmaması, geri dönüştürülebilirliği ve kaynak yapılabilirliği gibi nitelikleri, onu diğer mühendislik malzemeleri karşısında avantajlı hale getirir. (Altenpohl, 1980).



Şekil 2.2. Bazı Mühendislik Malzemelerinin Dayanım/Yoğunluk Oranı (Eroğlu, G; Şahiner, M, 2018)

Diğer kimyasallarla kolayca bileşik yapma yeteneği, alüminyumun birçok farklı alaşım türü oluşturma yeteneğini sağlar. Bunlar arasında alüminyum-bakır, alüminyum-silisyum-magnezyum, alüminyum-çinko-magnezyum, alüminyum-silisyum, alüminyum-kalay ve alüminyum-bor yer alır. Alüminyum eklemek bile metalin özelliklerini önemli ve büyük ölçüde değiştirir, bu da yeni kullanım alanları yaratır. Bu alaşımlar ve kullanım alanları şunlardır: (Eroğlu, G; Şahiner, M, 2018);

Al-Si-Mg alaşımı, iyi şekil değiştirme ve polisaj kabiliyetine sahip olup, orta mukavemet ve yüksek paslanma direnci ile ön plana çıkıyor; uçak yapımı, dekorasyon ve elektrik iletkenleri imalatında kullanılır ve ticari olarak Aludur 533, Anticaradal, Düralimün, K Legal, Polital, Silal V gibi isimlerle bilinir. Al-Cu-Mn alaşımı, yüksek

çekme mukavemeti sunar ve yüksek dayanım gerektiren yapılarda, makine parçaları, taşıtlar, kaldırma ekipmanları ve demiryolu vagonlarının üretiminde tercih edilir. Sertleştirilmiş hali St 52 çeliğinin mukavemetine ulaşır. Al-Cu-Ni alaşımı, ısıl işlemle oda sıcaklığında sertleşirken, sıcaklıkta mukavemetini korur ve patlamalı motorların silindir kafaları ile pistonlarının yapımında kullanılır. Al-Zn-Mg güçlendirilmiş alaşımı, bütün alüminyum alaşımları içinde en yüksek mukavemete sahiptir ve bu nedenle uçak sanayisinde yaygın olarak kullanılır. Al-Mg alaşımı ise deniz suyuna karşı yüksek dayanıklılık ve mukavemet sunar; gemi inşaatı, kimya ve gıda sanayileri ile gözlük çerçevelerinde tercih edilir. Tablo 2.1'de ise alüminyum alaşımlarının fiziksel özelliklerine yer verilmiştir. (Eroğlu, G; Şahiner, M, 2018).

Tablo 2.1. Alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri (Eroğlu, G; Şahiner, M, 2018)

Alüminyum Alaşım Serisi	Tipik Yoğunluk (g/cm^3)	Erime Noktası (°C)	Isıl İletkenlik (W/mK)	Elektrik İletkenliği (% IACS)	Çekme Mukavemeti (MPa)
1000	2.7	646-658	218-243	59-65	45.0-205
2000	2.75-2.84	502-643	121-140	39-50	172-670
3000	2.72-2.73	629-654	121-190	27-38	90.0-295
4000	2.7	532-632	120-180	23.26-32.26	110-470
5000	2.64-2.68	568-654	120-160	29-52	110-590
6000	2.69-2.7	554-655	130-226	50-55	89.6-565
7000	2.72-2.81	476-657	115-222	46-60	70.0-750

2.1. Dövme Alüminyum Alaşımları

Dövme alüminyum ve alaşımları, dört basamaklı bir numara ile tanımlanır. Bu numaranın ilk hanesi, alaşımın ana grubunu belirtir (Tablo 2.2). 2xxx dizisinden 7xxx serisine kadar her grup, en fazla bulunan alaşım elementi ile adlandırılır. Örneğin, 3xxx serisinin en kritik alaşım elementi mangandır. Ancak 6xxx serisi bu kuralın dışında kalır; çünkü bu seride hem magnezyum hem de 6silisyum bir arada bulunur. Bu iki element, magnezyum silisyum (Mg_2Si) adı verilen bir bileşik oluşturur. Tablo 2.2'de bazı dövme alaşımlarının kimyasal bileşimlerine örnekler verilmiş, Tablo 2.3'te ise bu alaşımların ISO karşılıkları gösterilmiştir. (Köşker, 2011).

Tablo 2.2. ANSI 35.1 standartına göre dövme alüminyum ve alaşımların ana grupları (Şaldır, 2002)

Element Grubu	Kod
Alüminyum > % 99.00	1XXX
Bakır	2XXX
Mangan	3XXX
Silis	4XXX
Magnezyum	5XXX
Magnezyum-Silis	6XXX
Çinko	7XXX
Diğer elementler	8XXX
Kullanılmayan dizi	9XXX

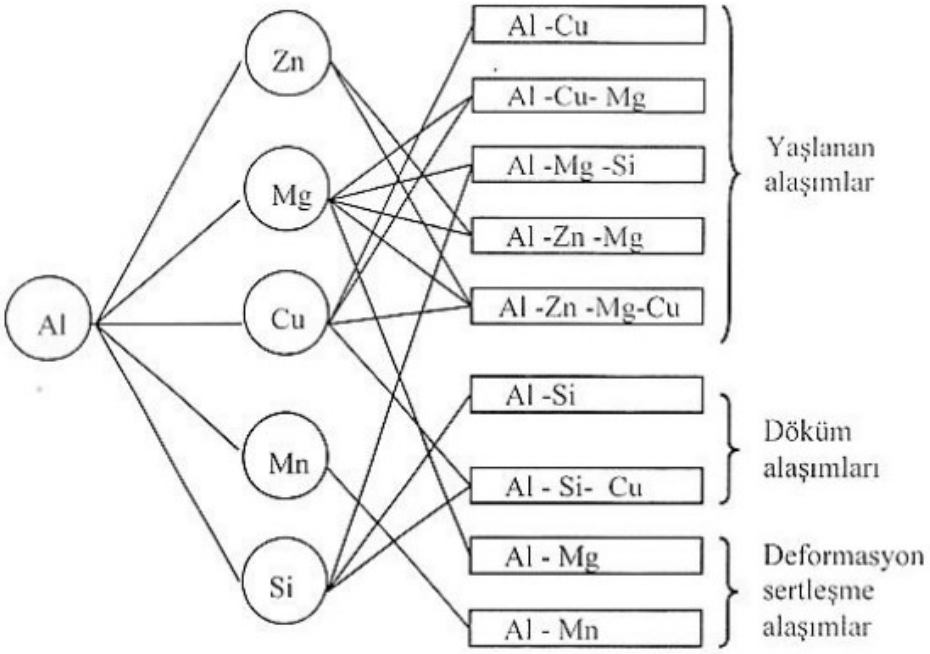
Tablo 2.3. ANSI standartlarında belirtilen bazı alüminyum alaşımlarının ISO (International Organization For Standardization) karşıtları (Şaldır, 2002)

ANSI	ISO	ANSI	ISO
1060	Al99,6	5083	Al Mg 4,5 Mn 0,7
1350	E-Al 99,5	5086	Al Mg4
1100	Al 99,0 Cu	5154	Al Mg 3,5
2014	Al Cu4 Si Mg	5454	Al Mg 3 Mn
2017	Al Cu4 Si Mg	6061	Al Mg 1 Si Cu
2117	Al Cu2, 5 Si Mg	6063	Al Mg 0,7 Si
2219	Al Cu 6 Mg	6101	E-Al Mg Si
2024	Al Cu 4 Mg 1	6262	Al Mg 1 Si Pb
3003	Al Mg 1Cu	6351	Al Si 1 Mg 0,5 Mn
3105	Al Mn 0,5Mg 0,5	7005	AlZn4,5Mg1,5 Mn
4043	Al Si 5	7049	Al Zn 8 Mg Cu
4047	Al Si 12	7050	Al Zn 6 Cu Mg Zr
5005	Al Mg 1	7075	Al Zn 5.5 Mg Cu
5050	Al Mg 1,5	7475	Al Zn 5,5 Mg Cu
5056	Al Mg 4,5 Cr	7178	Al Zn 7 Mg Cu

1- Alaşımlama elementlerinin alüminyuma eklenmesi genellikle malzemenin mukavemetini artırmak amacıyla yapılır. Bunun yanı sıra, diğer bazı özelliklerin iyileştirilmesi de büyük önem taşır. Alüminyuma eklenen bu elementler mukavemeti iki yolla artırabilir:

2- 1- Katı eriyik olarak çözünerek ve deformasyon yoluyla sertlik artışı sağlarlar (Deformasyonla sertleşen alaşımlar).

3- 2- Yüksek sıcaklıkta katı eriyik olarak çözünüp, düşük sıcaklıkta ince parçacıklar halinde çökelirler (Yaşlanmayla sertleşen alaşımlar). Şekil 2.3'de ticari alüminyum alaşımları, içinde yer verdiği alaşım elementleri ve bu alaşımların sertleştirme yöntemleri gösterilmektedir. (Köşker, 2011).



Şekil 2.3. Temel alüminyum alaşımları (Şaldır, 2002)

2.2. Döküm Alüminyum Alaşımları

ANSI, döküm yoluyla şekillendirilen alüminyum alaşımlarını üç haneli sayılarla kategorize eder. Döküm alaşımları Tablo 2.4'te gösterilen dövme alaşımlarında olduğu gibi, ilk basamak alaşımın içerdiği temel bileşen grubunu belirtir. (Köşker, 2011).

Tablo 2.4. Döküm alüminyum alaşımlarının ANSI 35.1 standardına göre temel grupları (Şaldır, 2002)

SERİ	Alaşım Ailesi
1xx	Min. %99,0 Al
2xx	Al-Cu
3xx	Al-Si-Mg, Al-Si-Cu, Al-Si-Cu-Mg
4xx	Al-Si
5xx	Al-Mg
7xx	Al-Zn
8xx	Al-Sn

1xx serisi alaşımlar, en az %99,0 alüminyum içeren saf alaşımlardır. 3xx serisinde ise ana alaşım elementi silisyum olup, bunun yanında bakır ve magnezyum gibi elementler de bulunur. Üç haneli rakamdan sonra bir nokta gelir ve ardından gelen sayı, alaşımın döküm mü yoksa ingot mu olduğunu belirtir. "0" döküm olduğunu gösterirken, "1" veya "2" ise ingot olduğunu bizlere gösterir. Bu metallerin kimyasal bileşimi, Tablo 2.5'te açıklayıcı şekilde ele alınmıştır. Tablo 2.6'da ise bazı döküm alaşımlarının kimyasal bileşimlerine yer verilmiştir. Bu alaşımların bazılarına yaşlandırma ile sertleştirme uygulanarak mekanik özellikleri iyileştirilirken, bazılarına tavlama işlemi uygulanarak süneklik artırılır. (Şaldır, 2002)

Tablo 2.5. Bazı döküm alaşımlarının tanıtımı (Şaldır, 2002)

No	Form	% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Zn	% Ti
356.0	Döküm	6,5–7,5	0,601	0,25	0,35	0,20–0,45	0,35	0,25
356.1	İngot	6,5–7,5	0,5	0,25	0,25	0,25–0,45	0,35	0,25
356.2	İngot	6,5–7,5	0,2	0,1	0,05	0,30–0,45	0,05	0,2

Tablo 2.6. Bazı döküm alaşımlarının kimyasal bileşimi (Şaldır, 2002)

Bileşim	% Si	% Fe	% Cu	% Mg	% Zn	Diğerleri %
201.0	<0,10	<0,15	4,6	0,35	-	0,7 Ag, 0,35Mn
208.0	3	<1,2	4	<0,10	<	-
222.0	<2,0	<1,5	10	0,25	<	-
242.0	<0,7	<1,0	4	1,5	<	2,0 Ni
319.0	6	<1,0	3,5	<0,10	<	-
355.0	5	<0,6	1,25	0,5	<	-
357.0	7	<0,15	<0,05	0,55	<	-
444.0	7	<0,6	<0,25	<0,10	<	-
512.0	1,8	<0,6	<0,35	4	<	-
713.0	<0,25	<1,1	0,7	0,35	7,5	-
851.0	2,5	<0.7	1	<0,10	-	6,25 Sn, 0,5 Ni

2.3. Dövme ve Döküm Alüminyum Alaşımlarının Farkları

Alüminyum döküm alaşımları ve dövme alaşımları, farklı üretim yöntemleriyle elde edilen iki ayrı malzeme türüdür. Bu iki alaşım türü arasındaki temel farklar şunlardır:

Üretim Süreci:

Alüminyum dövme alaşımları, alüminyumun sıcak veya soğuk dövme işlemleri ile şekillendirilmesiyle elde edilir. Bu süreçte genellikle sıcak dövme yöntemi tercih edilir; çünkü sıcak dövme, malzemenin şekillendirilmesini kolaylaştırırken mekanik özelliklerinde de iyileşme gözlemlenir. Öte yandan, alüminyum döküm alaşımları eritilmiş alüminyumun bir kalıba dökülmesiyle üretilir. Döküm işlemi, genellikle daha az maliyetli bir yöntem olmasına rağmen, kalıpların hazırlanması gerektiğinden belirli hazırlık süreçlerini gerektirir.

Mekanik Özellikler:

Alüminyum Dövme Alaşımları: Dövme işlemi, alüminyumun kristal yapısını yönlendirir ve bu da daha homojen bir malzeme yapısına ve yüksek mukavemete yol açabilir. Dövme işlemi, malzemenin yoğunluğunu ve direncini artırabilir.

Alüminyum Döküm Alaşımları: Döküm işlemi, malzemenin daha serbest bir şekilde katılaşmasına izin verir, bu da genellikle daha az öz kütleli ve daha az sıkı kristal yapılı bir malzeme ortaya çıkarabilir. Mekanik özellikler genellikle dövme alaşımlarına kıyasla daha düşük olabilir.

Uygulama Alanları:

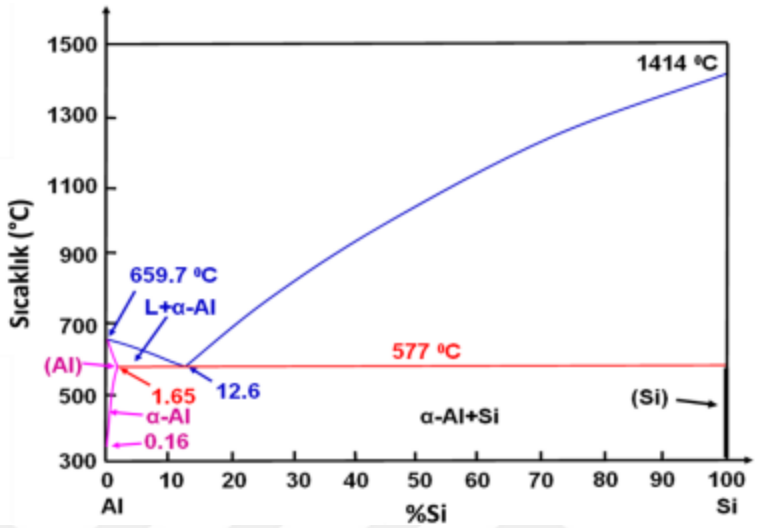
Alüminyum dövme alaşımları, yüksek mukavemet ve dayanım gerektiren uygulamalarda genellikle en çok tercih edilen bir malzemedir. Havacılık, otomotiv, askeri ve savunma endüstrileri gibi alanlarda kullanılan bu alaşımlar, zorlayıcı koşullara dayanabilme özellikleriyle öne çıkar. Öte yandan, alüminyum döküm alaşımları, daha karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde tercih edilmektedir. Geniş ölçekli üretim, otomotiv parçaları ve yapısal bileşenler gibi alanlarda kullanılan döküm alaşımları, ekonomik üretim avantajı sunar. Her iki alaşım türü de özel avantajlara sahip olup, uygulama gereksinimlerine göre seçilmektedir. Dövme alaşımları, yüksek mukavemet ve dayanıklılık sağlarken, döküm alaşımları daha karmaşık parçaların daha az maliyetli bir şekilde üretilmesine fırsat tanır.

2.4. Al-Si Döküm Alaşımları ve Kullanım Alanları

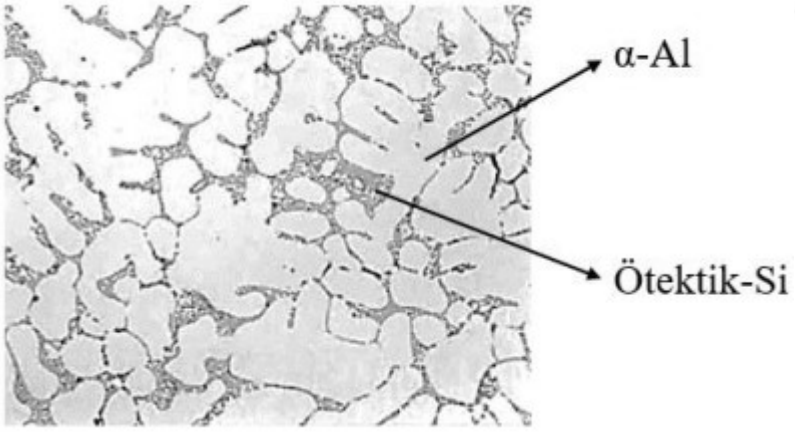
Alüminyum-silisyum alaşımları, alüminyum döküm sektöründe en yaygın tercih edilen alaşım grubudur. Bu alaşımlar, döküm alaşımları sınıflandırmasında 4XX.X koduyla tanımlanırken, magnezyum ve/veya bakır içeren versiyonları 3XX.X koduyla ifade edilir. Döküm yoluyla üretilen alüminyum alaşımlarının %90'ına kadar bu alaşımlar hakimdir. Silisyum, sıvı metalin akışkanlığını geliştirerek, karmaşık ve ince yapılı parçaların döküm yöntemiyle üretilmesine olanak tanır. Aynı zamanda silisyum, döküm sırasında parçaların çekinti eğilimini azaltarak daha sağlıklı bir üretim aşaması sağlar. (Ravi, 2008).

Şekil 2.4'de alüminyum-silisyum çift faz denge diyagramı gösterilmektedir. Bu diyagrama göre, saf alüminyumun ergime noktası 659,7°C (932,85ºK) olarak belirlenmiştir. Alüminyumun ergime sıcaklığı, silisyum adedinin ötektik bileşime dönüşmesiyle azalır. Ötektik nokta, 577°C (850ºK) sıcaklıkta ve %12,6 silisyum bileşimine karşılık gelmektedir. Bu nedenle, alüminyum dendritlerinin mikroyapıda bulunmasını ve alaşımların yüksek dayanım göstermesini sağlamak amacıyla silisyum

miktarının bu ötektik değerin altında olması istenmektedir. A356 gibi tercih edilen alüminyum döküm alaşımlarında silisyum miktarının genellikle %7 civarında olduğu görülür. Şekil 2.5'te, otomotiv endüstrisinde sık kullanılan A356 alaşımının tipik mikroyapı görüntüsü sunulmuştur. (Kaufman & Rooy, 2004).



Şekil 2.4. Al-Si faz denge diyagramı (Liao, 2006)



Şekil 2.5. A356 alüminyum alaşımına ait tipik mikroyapı görüntüsü (Kaufman ve Rooy, 2004)

Al-Si döküm alaşımlarında mikroyapıda yer almaması istenen elementlerin başında demir gelir. Demir, alüminyumla oldukça kararlı, ancak kırılgan yapıda olan metaller arası bileşikler oluşturur ve bu da iş parçasının sünekliğini azaltırken, korozyon direncini de olumsuz yönde etkiler. Kum ve kokil kalıba dökümlerde demir

oranı en fazla %0,6 civarında kabul edilebilirken, basınçlı dökümde bu oran %3'leri görebilir. Demirin döküm alaşımlarındaki bu istenmeyen etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla alaşıma genellikle mangan veya kobalt ilave edilir. (Fortini, Merlin, & Pirletti, 2016).

%15-20 silisyum içeren ötektik üstü alaşımlar, içlerinde Al-Si ötektik fazına gömülü birincil silisyum fazını barındırır. Bu alaşımlar, yüksek aşınma direnci sergiledikleri için motor pistonları gibi aşınmaya karşı dayanıklılık gerektiren endüstriyel uygulamalarda tercih edilirler. (Vatansever, Karabay, & Ertürk, 2018)

Buna ek olarak, Al-Si döküm alaşımlarında artan demir (Fe) içeriğinin, ikincil dendrit çatalları arası mesafenin (SDAS) küçülmesine ve ötektik yapının daha ince bir morfolojiye sahip olmasına yol açtığı bilinmektedir. Bunun yanı sıra, artan demir miktarının alaşım mikroyapısındaki intermetalik bileşiklerin morfolojisini de değiştirdiği kanıtlanmıştır. (Yağçı, 2021)

Döküm özellikleri açısından en iyi alaşım gruplarından biridir. Alaşıma bir miktar magnezyum (%0,2-0,8) veya bakır (%1,2-4) eklenmesi, alaşımın ısıl işlemle sertleştirilebilir hale gelmesini sağlar. GAlSi 10 Mg alaşımı, yaşlandırma işlemi ile 310-350 N/mm² mukavemete ulaşabilir. Yüksek korozyon dayanımına sahip olan bu alaşımlar, motor parçalarında yaygın olarak kullanılır. Silisyum miktarı ötektik noktaya yakındır ve ince cidarlı, karmaşık şekilli parçaların dökümünde tercih edilir. (Köşker, 2011).

Al-Si döküm alaşımları, geniş bir kullanım yelpazesi sunarak endüstriyel üretimde yaygın olarak tercih edilir. Otomotiv sektöründe motor parçaları, şanzıman karterleri ve fren sistemleri gibi bileşenlerin üretiminde, elektrik ve elektronik alanında bilgisayar kasaları, güç kaynakları ve termal yönetim parçalarında sıkça kullanılır. Enerji iletim hatları, transformatörler ve yapısal enerji parçalarının üretiminde de bu alaşımlar tercih edilmektedir. Hafiflik ve dayanıklılık özelliklerinden ötürü, havacılık ve uzay sanayisin de kritik bir yere sahiptir. Ayrıca, kapı ve pencere aksesuarları, valf gövdeleri, pompa parçaları gibi diğer imalata dayalı endüstriyel uygulamalar da sıklıkla kullanılmaktadır.

3. BİLYALI DÖVME

Bir plastik deformasyon yöntemi olan bilyalı dövme, basınçla yüzeye çarptırılan bilyaların malzemenin yüzeyini ve onun altındaki mikroyapıyı büyük ölçüde değiştirir. Malzemenin mekanik özellikleri, bu mikroyapısal değişiklikler nedeniyle değişir. Bu yöntem genellikle metal ve alaşımlarda kullanılır ve yüzey ve yüzey altı sertliğini artırır. Ek olarak, bu işlem sırasında oluşan kalıntı basma gerilmesi mikro çatlakların oluşmasını önler, bu da malzemenin yorulma direncini artırır. (Azar ve diğerleri, 2010).

Basınç, ilerleme hızı ve nozul mesafesi gibi birçok faktör bilyalı dövme işlemini etkiler. Havanın basıncını arttırarak uygulanacak bilyaların malzemesi ve boyutları, faaliyet göstereceği yere bağlı olarak değişebilir. Seçilen bilyalar, çeşitli örtme oranlarında kullanılabilir ve bu değişkenler yöntemin parametreleri arasındadır. (Jamalian ve Field, 2019; Maawad,2013).

Bilyalı dövme yöntemi uygulanan malzemelerin yüzeylerinin pürüzlülüğü tipik olarak artar. AlMangour ve ekibi tarafından yapılan bir araştırmaya göre bilyalı dövme, eklemeli imalat yöntemi kullanılarak yapılan paslanmaz çeliğin yüzey pürüzlülüğünü artırdığı belirlenmiştir. (AlMangour ve Yang, 2016).

Bu çalışmanın yanı sıra Rodopoulos ve ekibi, bilyalı dövme uygulanan 2024 alüminyum alaşımında yüzey pürüzlülüğünün arttığını buldu. İşlem öncesi yüzey pürüzlülüğü değerleri ve uygulama süresi, yüzey pürüzlülüğündeki değişiklikleri etkiler. (Rodopoulos ve diğ., 2003).

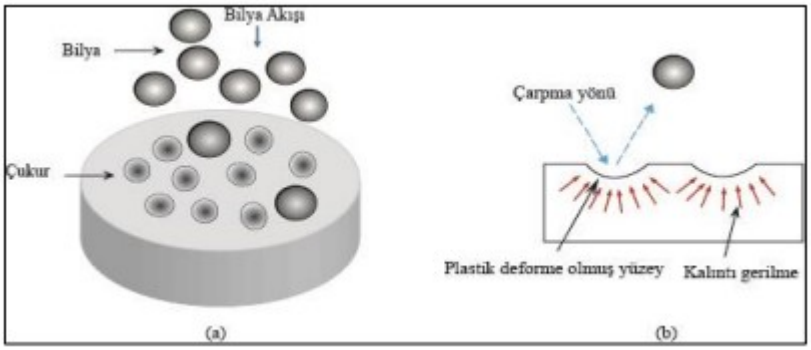
Yüksek mukavemetli çeliklerin, alüminyum ve titanyum alaşımlarının korozyon çatlağı direncini ve yorulma performansını artırmak için bilyalı dövme yüzey işlemi yaygın olarak kullanılır. Bu işlemin bir sonucu olarak, karakteristik yüzey topografyası dislokasyon yoğunluğunu artırır ve yüzeye yakın bölgelerde kalıntı basma gerilmeleri oluşur. Ayrıca, çatlakların başlangıcı ile ilerlemesini sınırlayan yüzey tabakaları oluşur. Sonuç olarak, metalik malzemelerin yorulmaya karşı direncini önemli ölçüde artırır. (Mhaede, 2012).

3.1. Bilyalı Dövmenin Amacı

Basınçlı hava çelik bilyaları malzeme yüzeyine püskürtür. Tekrarlanan çarpmalar, yüzeyin pürüzlülüğünü önemli ölçüde değiştirir ve mikro yapıda meydana gelen değişiklikler yüzeyin sertliğini artırır. Ek olarak, kalıntı basma gerilmeleri nedeniyle farklı yüzey koşulları ve mekanik özellikler oluşur. Bu, endüstriyel kullanım için daha az maliyetli ve uygulanabilir bir yüzey iyileştirme yöntemidir. (Mitroviç, Adamovic, Zivic, Dzunic, & Pantic, 2014).

Bilyalı dövme, malzemenin yüzeyindeki plastik parçalarını değiştirir. Bu işlem yüzeye yakınlaştıkça kalıntı basma gerilmeleri oluşturur. Plastik yüzeyi deforme ederek daha pürüzlü hale gelir ve malzemenin sertliğini arttırır. (Gariépy, Bridier, Hoseini, & Bocher, 2013).

Bilyalı dövme işleminin bir çıktısı olarak yüzey ve yüzeye yakın yerlerde meydana gelen plastik deformasyon ve kalıntı gerilmeler Şekil 3.1'de görselleştirilmiştir. Şekil 3.2 bilyalı dövme işleminin nasıl uygulandığını göstermektedir. (Gariépy, Bridier, Hoseini, & Bocher, 2013).



Şekil 3.1. Bilyalı dövme işlemi şematik gösterimi ve (b) Bilyalı dövme işlemi sonrası oluşan plastik deformasyonu (Gariépy, Bridier, Hoseini, & Bocher, 2013)



Şekil 3.2. Bilyalı dövme işlemi (Mitroviç, Adamovic, Zivic, Dzunic, & Pantic, 2014)

3.2. Bilyalı Dövme Parametreleri

Bilyalı dövme metodu, birçok faktörden etkilendiği için karmaşık bir yapısı vardır. Bilya, dövme uygulanacak iş parçası ve işlem koşulları olarak bilinen üç farklı parametre grubuna ayrılabilir. Bilya parametreleri, bilyanın boyutunu, şeklini, malzemesini ve hızını içerir. İş parçasının geometrik şekli ve kimyasal malzeme özellikleri iş parçası parametrelerinde yer alır. Bilyaların akış hızı, hava basıncı, çarpma açısı ve nozuldan iş parçasına olan mesafe gibi proses parametreleri vardır. (Nguyen, Poh, & Zhang, 2014)

Bilyalı dövme işleminin tam olarak kontrol edilmesi ve maksimum fayda sağlamak için tekrarlanabilir olması gerekir. Bunu başarmak için tüm işlem parametreleri belirlenmeli ve kontrol edilmelidir. Bilyalı dövme işlemi, birçok temel faktörden etkilenir. En bilinen olanları aşağıdaki gibidir:

- Dövme şiddeti
- Bilya sertliği ve boyutu
- Nozulun çapı, sapma açısı ve uzunluğu
- Hava basıncı
- Bilyaların numuneye çarpma açısı
- Bilyalı dövme uygulanacak süre

- Numunenin nozula göre doğrusal ve dönme hızı

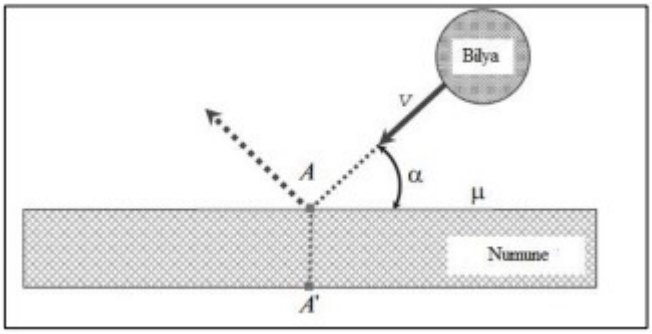
- Yüzey örtme oranı (Ganesh, Sha, & Ramanaiah, 2014)

Bilyalı dövme işlemini uygun kalitede ve standart düzeyde yürütmek için "Almen Şiddeti" ölçüsü geliştirilmiştir. Bilyanın türü, boyutu, sertliği ve hızı dövme şiddetini etkiler. Bilyalı dövmede kullanılan bilyanın boyutu, dövmenin şiddetini önemli ölçüde etkiler. Boyut dağılımı arttıkça dövme işleminde daha fazla çeşitlilik olur. Bilyalı dövme metodunda tercih edilen bilyanın sertliği, malzeme yüzeyinde çukurlaşmanın meydana gelmesinin en önemli belirleyicisidir. Bilyalı dövme işlemi, malzemenin bilyadan daha sert olduğu durumlarda bilyaların malzemenin yüzeyindeki etkisini sınırlar. (Yalçınkaya, 2019).

Bilya hızı da vektörel bir büyüklüktür. Skaler büyüklüğü ve yönü vardır. Püskürtme basıncı, bilya akış hızı, hava kalitesi, hortumun iç çapı ve nozul çapı bilyanın hızını doğrudan etkileyen faktörlerdir. Püskürtme basıncı, bilyalı dövme işleminde bilyanın hızını en çok etkileyen parametredir. Yüksek püskürtme basıncı bilyanın hızını artırdığı için yüksek dövme şiddeti değerleri elde edilebilir. (Yalçınkaya, 2019)

Bilyanın iş parçası yüzeyine çarpma açısı, bilyanın çarpmaya bağlı olarak hareket eden yönüdür. Sinüs çarpma açısına göre dövme şiddeti değişir. Nozul pozisyonu ve parçanın geometrisi değiştikçe bilya çarpma açısını değiştirir. (Yalçınkaya, 2019)

Bilya çarpma açısının mantığı Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Bilyalı dövme işleminin tam olarak kontrol edilmesi ve en yüksek verimle tekrarlanabilir bir şekilde uygulanması gerekir. Bunun için tüm işlem parametrelerinin belirlenmesi ve yönetilmesi çok önemlidir. Bilyalı dövme işlemini etkileyen en kritik etmenler arasında en yaygın olanları şunlardır: "Almen şiddet" fikri, uygun kaliteli ve standart bir bilyalı dövme işlemi gerçekleştirmek için geliştirilmiştir. Bilyanın türü, boyutu, sertliği ve hızı dövme şiddetini etkiler. Bilya boyutu, dövmenin şiddetini önemli ölçüde etkiler. Boyut dağılımının artması dövme işleminin çeşitliliğini artırır. Malzeme yüzeyinde delikler oluşurken kullanılan bilyanın sertliği en önemli bileşendir. Bilyalı dövme, bilyadan daha sert malzemeler kullanılarak yapılırsa daha az etkili olur.

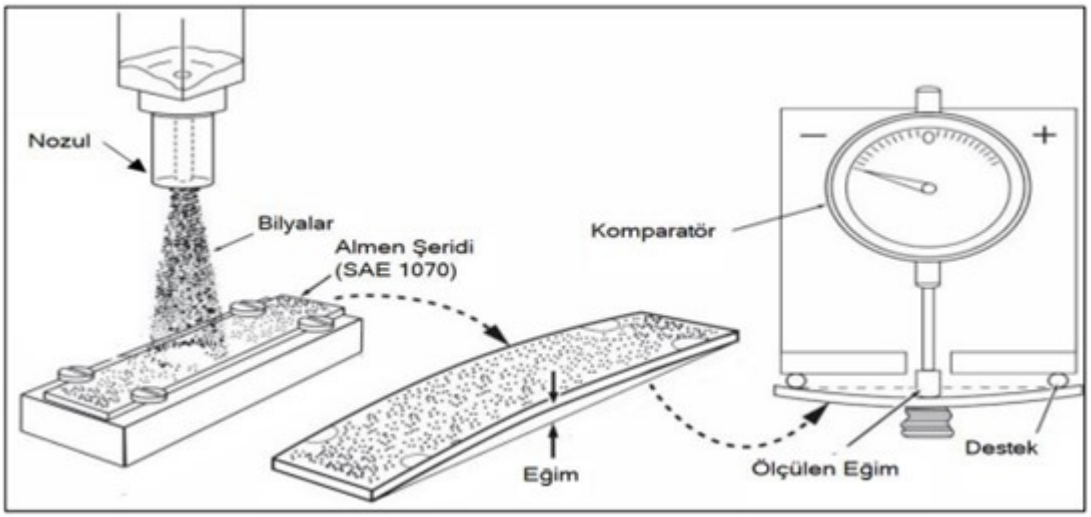


Şekil 3.3. Bilya çarpma açısı (Ahmadi, Sadeghi, Irani, & Rahimi, 2017)

3.2.1. Bilyalı Dövme Şiddeti

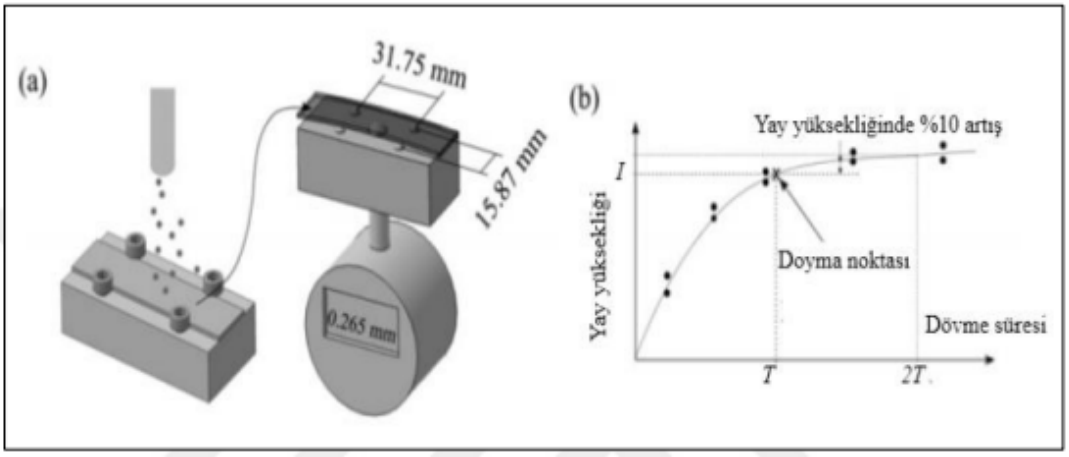
1943 yılında John Almen tarafından keşfedilen Almen Testi, bilya püskürtme öncesi bir test yöntemi olarak kullanılmaktadır ve endüstride hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Bilya püskürtme öncesi parametrelerin yeterliliği, SAE 1070 yay çeliği olarak bilinen özel bir test malzemesine uygulanarak ve elde edilen niceliksel ve grafiksel veriler yoluyla belirlenebilir. (Karahan & İnce, 2015).

Almen şiddeti, tüm parametrelerin birden fazla etkisini aynı anda temsil ettiğinden dövme uygulamalarında sıklıkla kullanılan bir proses kontrol yöntemidir. Önceden belirlenmiş dövme süresine kadar, almen şeridi bir tutucu içinde dövülür. Ardından yay tutucudan çıkarılır ve eğrilik yay yüksekliğini ölçmek için Almen ölçü aleti kullanılır. (Gariepy, Perron, Bocher, & Levesque, 2013). Şekil 3.4'te Almen testini ölçüm metodu gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Bilyalı dövülen Almen şeridine ait sehimin ölçülmesi (Sarabi, 2017)

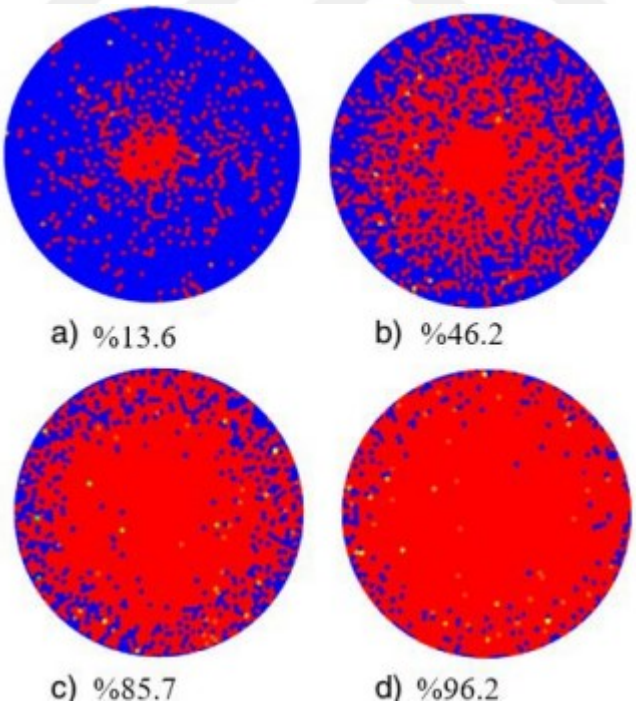
Bilyalı dövme, farklı parametreler altında farklı sürelerde dövme yaparak Almen şiddetini hesaplar ve doyum noktası eğrilerini oluşturur. Almen testinin şematik gösterimi ve doyum noktası eğrisi Şekil 3.5'te gösterilmektedir. Doyma noktası (T), bilyalı dövme süresinin iki katına çıktığında yay yüksekliğinde meydana gelen artışın yüzde onundan az olduğu ilk noktadır. Doyma noktasında elde edilen yayın yüksekliği, Almen şiddetidir.



Şekil 3.5. Almen testi ölçümü a) Cihaz ve standart numunelerin şematik gösterimi b) Doyum noktası eğrisi (Gariepy, Perron, Bocher, & Levesque, 2013)

3.2.2. Yüzey Örtme Oranı

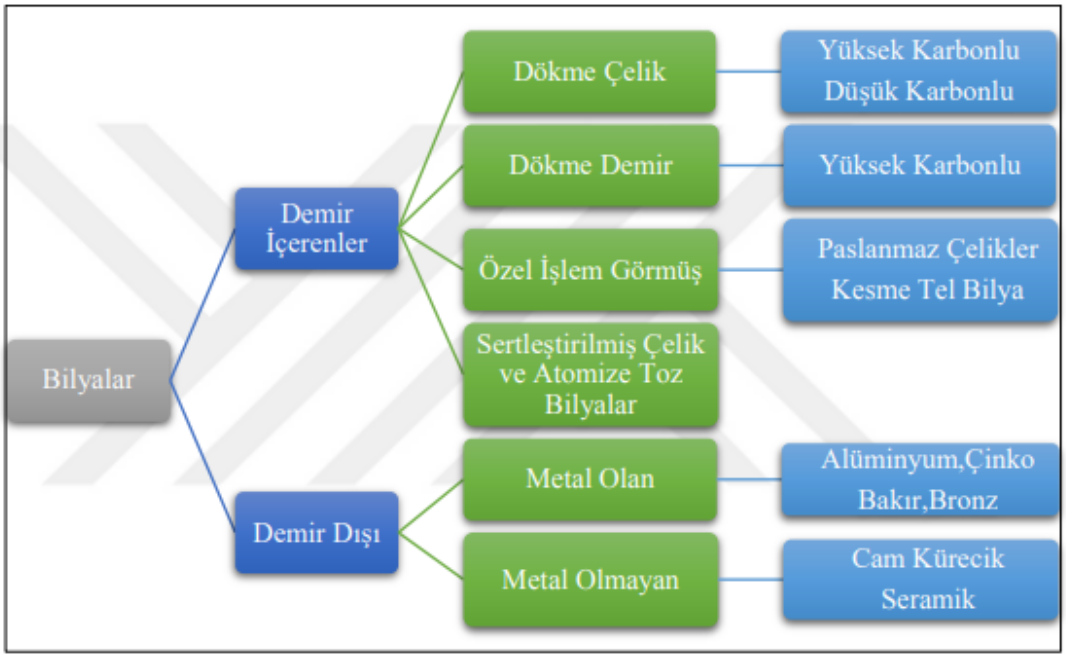
Bilyalı dövme sonrası girintiler ve çukurlar ile dövülen alanın toplam işlenmiş yüzey alanına oranı, yüzey örtme oranı isimlendirilmiştir. Kalıntı gerilme tabakasının kalınlığı ve işlenmiş yüzeyin emniyeti ve homojenliği, yüzey örtme oranı tarafından büyük ölçüde etkilenir. Bilyalı dövmede multi çarpma ve örtüşen tepecikler, yüzey örtme oranını oluşturur. Bilyanın boyutu, hızı, iş parçasına çarpma açısı ve dövme süresi yüzey örtme oranını belirler. Yüzey örtme oranını pratik olarak hesaplamanın üç yolu vardır. Bunlar görsel muayene, mavi mürekkep ve kopyalamadır. Yüzde 98 ve üzeri yüzey örtme oranı tam yüzey örtme oranı olarak kabul edilir. %98 yüzey örtme değerine ulaşmak için ihtiyaç olan sürenin iki katı kadar bilyalı dövülerek elde edilir. Van Bo Nguyen ve ekibi Ghost View görüntü işleme yazılımını kullanarak yüzey örtme oranını sayısal olarak hesapladılar. Şekil 3.6 yüzey örtme oranlarını göstermektedir. Fotoğraflarda mavi renk dövülmemiş alanları gösterirken, kırmızı renk dövülmüş alanları göstermektedir. (Nguyen, Poh, & Zhang, 2014).



Şekil 3.6. Yüzey örtme oranı yüzdeleri (Nguyen, Poh, & Zhang, 2014)

3.2.3. Bilya Tipi

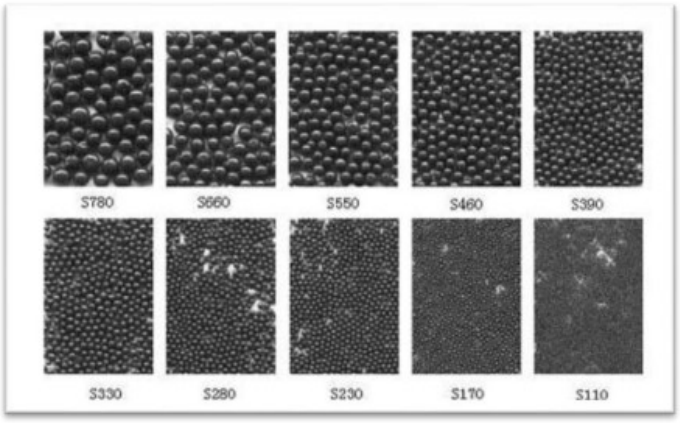
Demir içeren bilyalar ve demir içermeyen bilyalar iki ana kategoriye ayrılır. Malzeme üzerinde beklenen etkiyi sağlamak için bilyalar yüksek basınçla püskürtülür. Bu, bilyalı dövme işleminin temel bileşenidir. İşlem sırasında çarpmanın etkisiyle deforme olan bilyalar elde edilmek istenen sonuçlara etki edeceğinden, bu bilyaların tekrar kullanılmaması çok önemlidir. (Yalçınkaya, 2019). Şekil 3.7'de bilyalı dövme metodunda kullanılan farklı bilya tipleri verilmiştir (Harbelioğlu, 2018).



Şekil 3.7. Bilya tipleri ve sınıflandırılması (Harbelioğlu, 2018)

Society of Automotive Engineers "SAE", bilya türlerini sınıflandırmak için standartlar oluşturmuştur. Bilyayı tanımlamak için kullanılan "S" harfi, bilyanın yapıldığı malzemenin çelik olarak bilindiğini göstermektedir. SAE J444 standartına göre çelik bilyalar S70 ile S1320 değerleri arasında isimlendirilmektedir. Bu değerlerin on binde biri bilyanın inç cinsinden çapını ifade eder. (Balyalı, 2015)

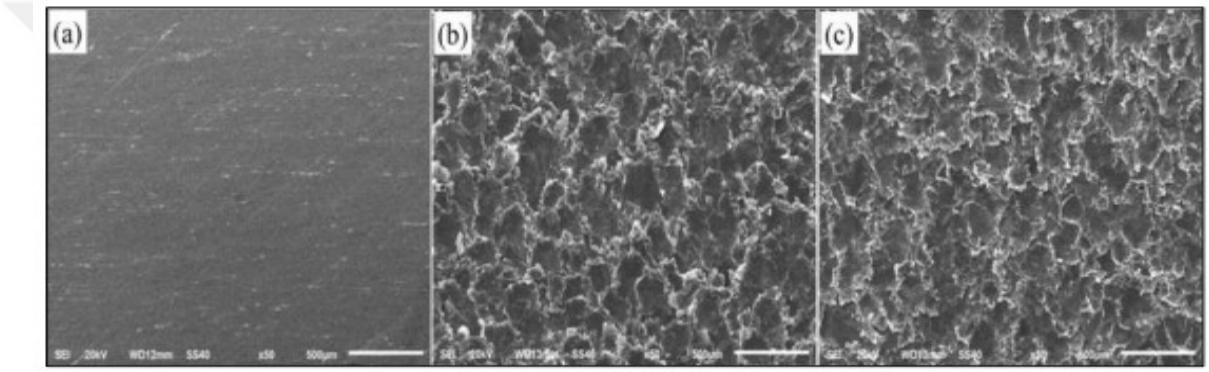
S550 için örneğin tane boyutu 1,4 mm'dir (550 x 25,4/10000=1,4 mm). Bilyeli dövme prosesinde tercih edilen çelik bilyalar boyutlarına göre Şekil 3.8 verilmiştir. (Saykar, 2019).



Şekil 3.8. Çelik bilyaların sınıflandırılması (Saykar, 2019)

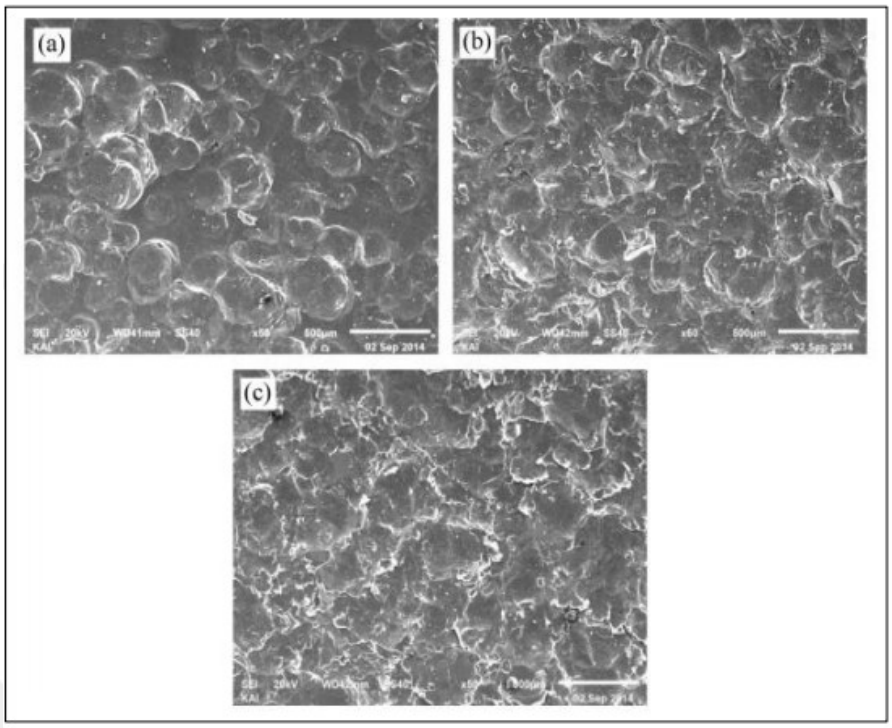
4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ BİLYALI DÖVÜLMESİ ÜZERİNE GERÇEKLEŞTİRİLEN ÇALIŞMALAR

Yong-Seog Nam ve ekibi (Nam, Yoon, Jeon, & Shin, 2016), havacılıkta kullanılan 2124-T851 alüminyum alaşımının Almen şiddeti ve yüzey örtme oranının çeşitli bilyalı dövme parametreleri (nozul mesafesi, basınç,iş parçasına çarpma açısı ve dövme uygulanan süre) altında nasıl etkilendiğini incelemek için üç aşamalı Box-Behnken tasarımını kullandılar. Bilya dövmek için en iyi koşullar (mesafe, basınç, açı ve zaman) 50 mm, 2 kg/cm2, 510 ve 180 s olarak belirlenmiştir. Optimum koşullarda daha büyük yüzeyler oluştuğunu Şekil 4.1'de göstermişlerdir.



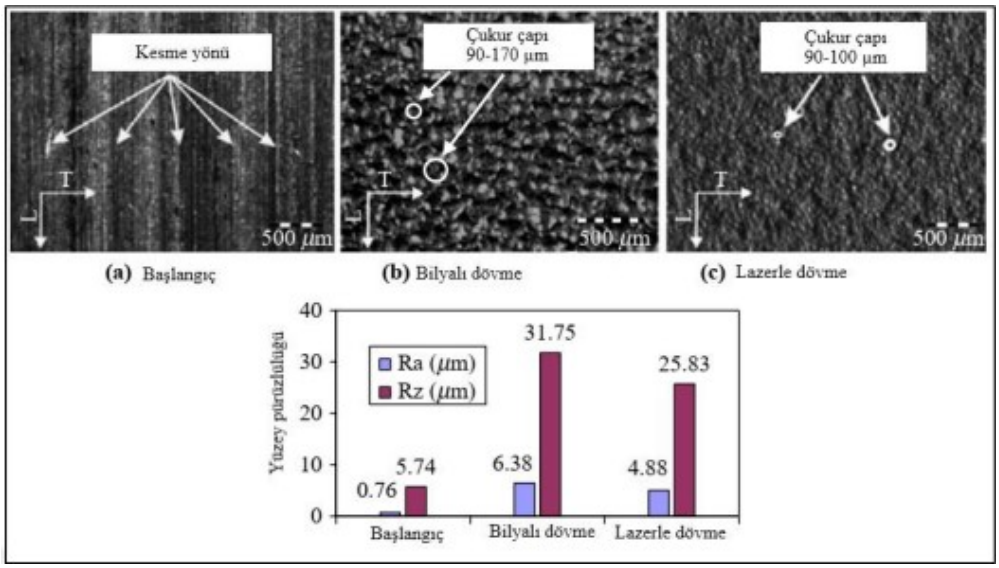
Şekil 4.1. SEM yüzey fotoğrafları: a) Dövülmemiş b) Optimal c) Aşırı dövülmüş (Nam, Yoon, Jeon, & Shin, 2016)

Bu ekip, bilyalı dövdükten sonra A2124-T851 alüminyum alaşımının yüzey tapografyasını SEM analizleriyle inceledi. Bilyalı dövme uygulanacak sürenin yüzey pürüzlülüğüne etkisini araştırmak için üç farklı sürede gerçekleştirilen deneylerde çalıştılar. Şekil 4.2'de SEM çalışmasıyla mikroyapıları incelemişlerdir. Farklı dövme sürelerine göre bu çalışmayı uyguladılar. Optimum sürede oluşan çukurları homojen şekilde ve belirli sınırlar içinde gözlemlemişlerdir. Dövme süresi ideal seviyeyi aştığı için çukurlar yükselmiş ve önemli lokal plastik deformasyonlar oluşmuştur (Nam, Yoon, Jeon, & Shin, 2015).



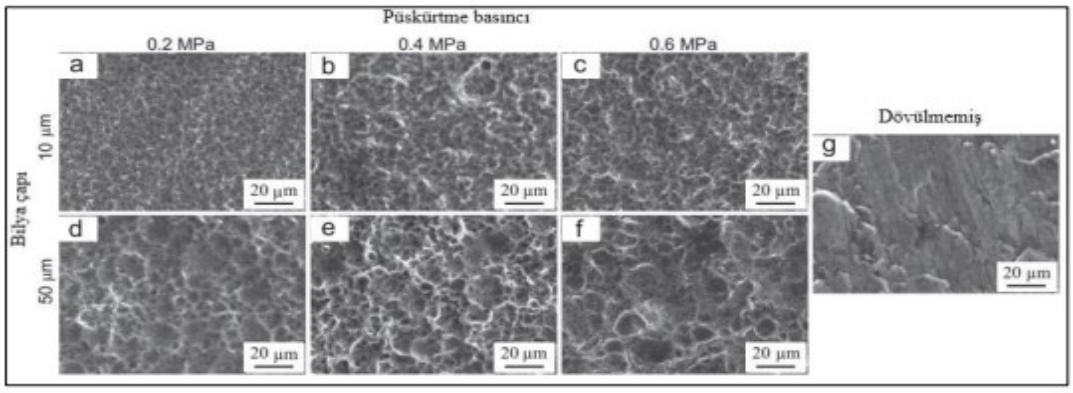
Şekil 4.2. SEM yüzey gözlemleri a) Az dövülmüş (65 s) b) Optimal (130 s) c) Aşırı dövülmüş (390 s) (Nam, Yoon, Jeon, & Shin, 2015)

Oros Trdan ve ekibi (Trdan, Zagar, & Grum, 2011), çökeltme ile sertleştirilmiş AA 6082-T651 alüminyum alaşımı üzerinde bilyalı dövmenin ve lazer dövmenin etkilerini araştırdılar. Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin sonuçları, lazerle dövmenin daha az pürüzlülük verileri için uygun olduğunu göstermiştir. Bilyalı ve lazer dövme işlemi görmüş numunenin Ra ve Rz değerleri ve topografi görüntüleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



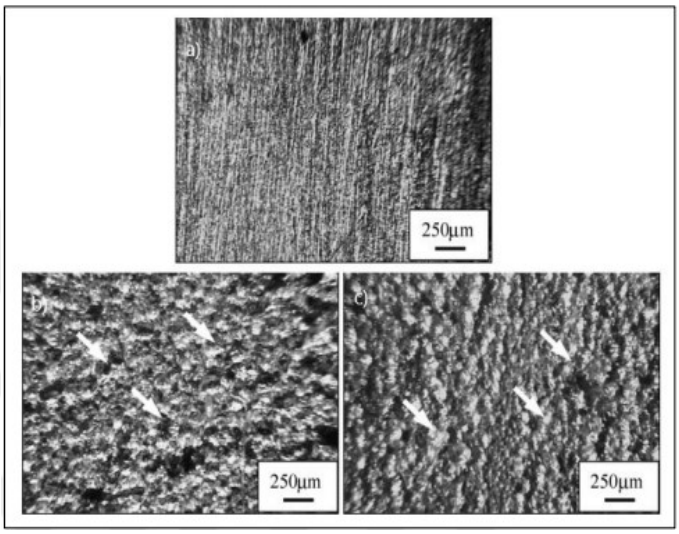
Şekil 4.3. Ra ve Rz pürüzlülük sonuçları ve topografi görüntüleri (Trdan, Zagar, & Grum, 2011)

Shoichi Kikuchi ve ekibi. (Kikuchi, Nakamura, Nambu, & Ando , 2016), bilyalı dövme metodunun 5056 seri alüminyum alaşımının yüzey mikroyapısı üzerindeki etkisini SEM görüntüleriyle incelediler. Bilya boyutu ve püskürtme basıncı bu etkiyi belirlemiştir. Bilya boyutu ve bilya püskürtme basıncı yüzey pürüzlülüğünün arttığını göstermektedir. Bilya boyutu ve bilya püskürtme basıncının yüzey topografyasına etkisi, Şekil 4.4'te gösterilmektedir.

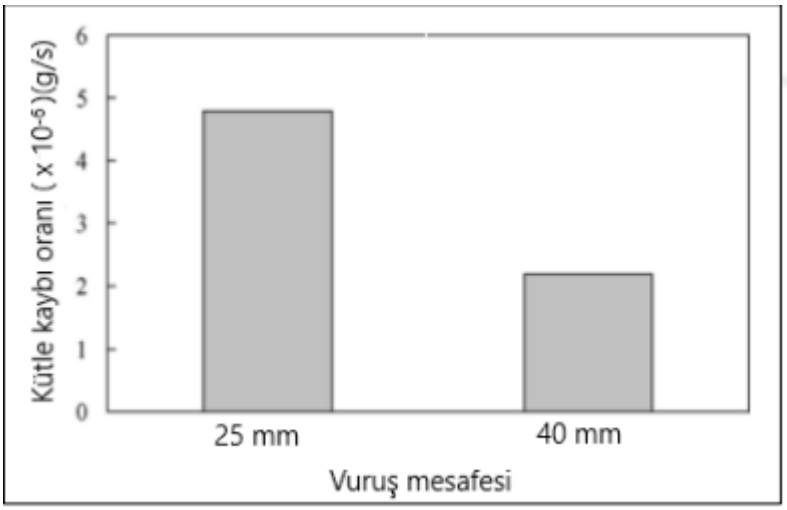


Şekil 4.4. Bilya boyutu ve bilya püskürtme basıncının yüzey topografyasına etkisi (Kikuchi, Nakamura, Nambu, & Ando , 2016)

Grinspan ve Gnanamoorthy, AA6061-T4 alüminyum alaşımının bilya püskürtme ucu ile iş parçası arasındaki mesafesine bağlı olarak yüzey morfolojilerini ve kütle kaybını incelediler. Yağ jetiyle dövülmüş ve dövülmemiş yüzeylerin optik mikroskop görüntülemeleri Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Çalışmalarında, dövülen AA6061-T4 alüminyum alaşımında dövme mesafesi arttıkça pürüzlülük değerleri azaldı, ancak işlem görmeyen alüminyum alaşımında pürüzlülük değeri en azdı. Kütle kaybı, dövme mesafesinin artmasıyla birlikte azalmaktadır. Oklar, dövülmüş yüzeyde meydana gelen girintileri göstermektedir (Grinspan & Gnanamoorthy, 2006). Şekil 4.6 da ise dövme mesafesinin kütle kaybına oranı gösterilmiştir. Dövme mesafesi arttıkça kütle kaybı azalmıştır.

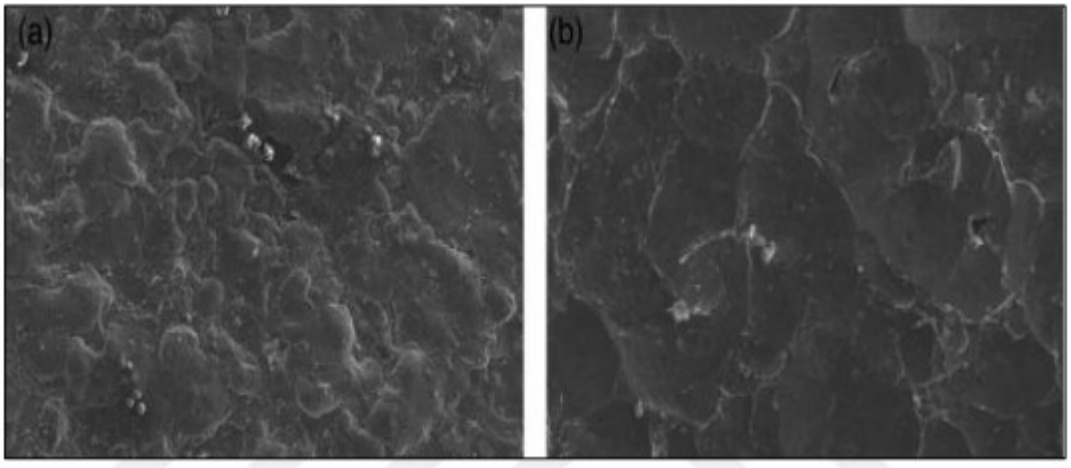


Şekil 4.5. Yağ jetiyle dövülmüş ve dövülmemiş yüzeyleri gösteren optik görüntüleri: a) Dövülmemiş AA6061-T4 (b) Dövülmüş AA6061 T4, dövme mesafesi 25 mm ve (c) Dövülmüş AA6061-T4, dövme mesafesi 40 mm (Grinspan & Gnanamoorthy, 2006)



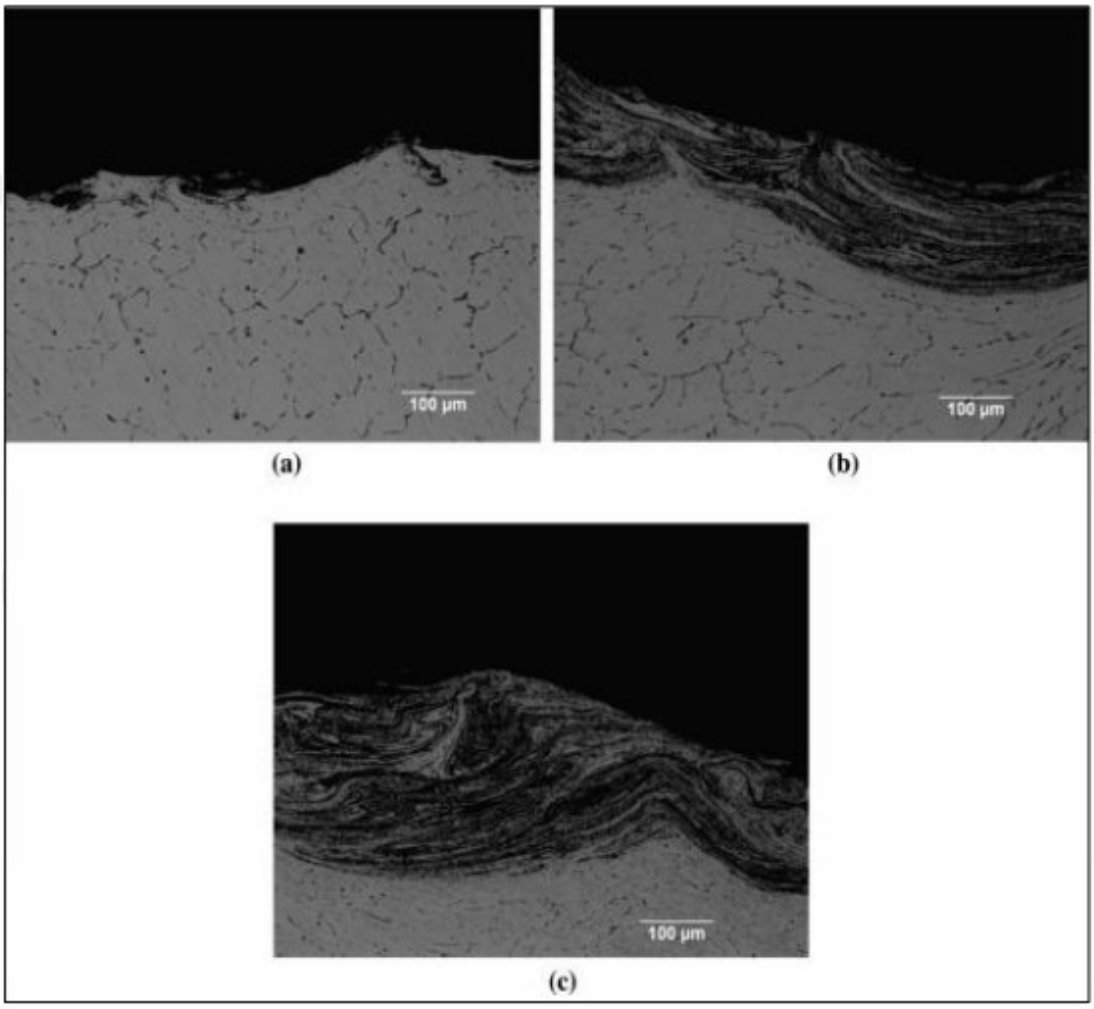
Şekil 4.6. Dövme mesafesinin kütle kayıp oranına etkisi (Grinspan & Gnanamoorthy, 2006)

Harding ve ekibi (Harding, Donaldson, Hexemer, Gharghouri, & Bishop, 2015), zirkonyum oksit bilyaları kullanarak bilyalı dövme işlemi sonrası Al-Zn-Mg-Cu (PM7075-T6) alaşımının fiziksel ve mekanik özelliklerini tanımlamayı ve bilyalı dövme işleminin etkilerini değerlendirmeyi amaçladı. Bilyalı dövme metodunun pekleşme ve kalıntı basma gerilmesini artmasına sebebiyet vermesi nedeniyle malzemenin sertliğini artırdığını keşfettikleri araştırmalarında keşfettiler. Bilyalı dövme işlemi sonrası SEM ile görüntülenen fotoğraflar Şekil 4.7' de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. PM7075-T6'nın genel yüzey SEM görünümü a) Bilyalı dövme işlemi öncesi, b) Bilyalı dövme işlemi sonrası (Harding, Donaldson, Hexemer, Gharghouri, & Bishop, 2015)

Juan González ve ekibi (Gonzalez, Bagherifard, Guagliano, & Pariente, 2017), AA 6063 alaşımının yüzey ve yüzey altı özelliklerine ve yorulma dayanımına geleneksel bilyalı dövme, aşırı bilyalı dövme ve tekrar bilyalı dövme tekniklerinin etkilerini araştırdılar. Şekil 4.8, çeşitli bilyalı dövme işlemleri kullanılarak elde edilen Al-6063'ün yüzey mikroyapılarını göstermektedir. Aşırı bilyalı dövme işleminin yüzeyi daha fazla deformasyona neden olduğunu belirttiler.



Şekil 4.8. Farklı bilyalı dövme işlemlerinden sonra Al-6063'ün yüzey mikro yapısı (a) Geleneksel bilyalı dövme (b) Aşırı bilyalı dövme (c) Aşırı ve tekrar bilyalı dövme (Gonzalez, Bagherifard, Guagliano, & Pariente, 2017)

4.1. Bilyeli Dövmenin Yüzey Pürüzlülük Değerine Etkileri

Fiziksel özellik ölçümlerinin yanı sıra pürüzlülük ölçümleri, CAD-CAM merkezinde yer alan Hommel Tester T500 marka yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ra ortalama pürüzlülük birimi kullanılarak ölçüldü. Dövülmüş dairesel alanlar üzerinden teste tabi tutulan üç ölçüm sonucunun ortalamaları, pürüzlülük ölçümünün sonuçlarıdır. Tablo 4.1' de ısıl işlem yapılmamış AA1050 malzemesinin eğme deney sonuçlarını göstermektedir. Tablo 4.2'de dövülmüş ısıl işlem yapılmamış AA1050 malzemesinin pürüzlülük sonuçlarını göstermektedir. (Alkan, 2014)

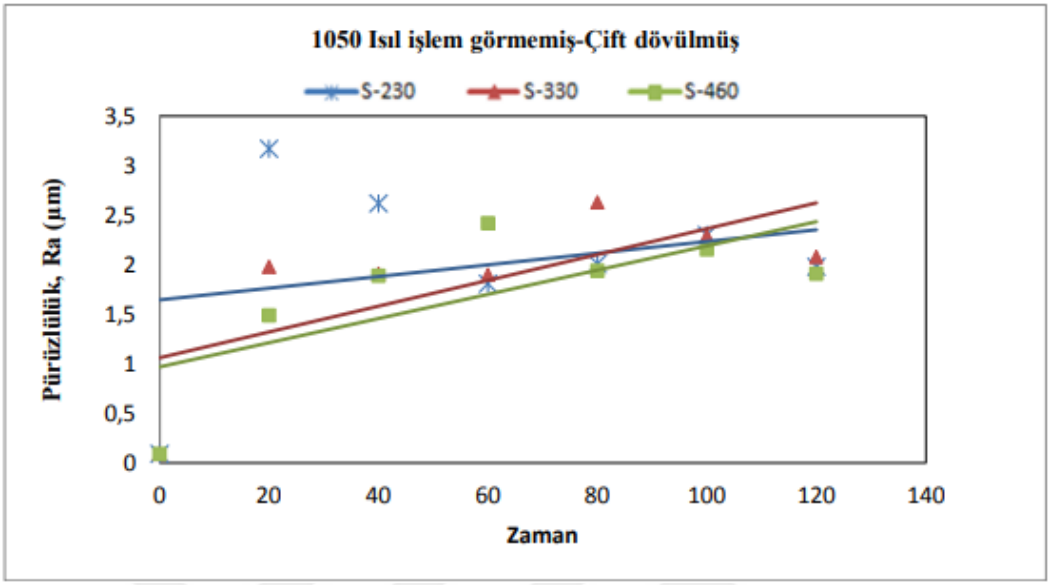
Tablo 4.1. AA1050 Isıl işlem yapılmamış numunenin eğme deney sonuçları (Alkan, 2014)

	Dövme İşlemi Yok	**S-230 Tek 120 s**	**S-230 Tek 180 s**	**S-230 Çift 120 s**	**S-230 Çift 180 s**	**S-460 Tek 120 s**	**S-460 Tek 180 s**	**S-460 Çift 120 s**	**S-460 Çift 180 s**
Açı (°)	160	162	160	160	163	163	161	162	160

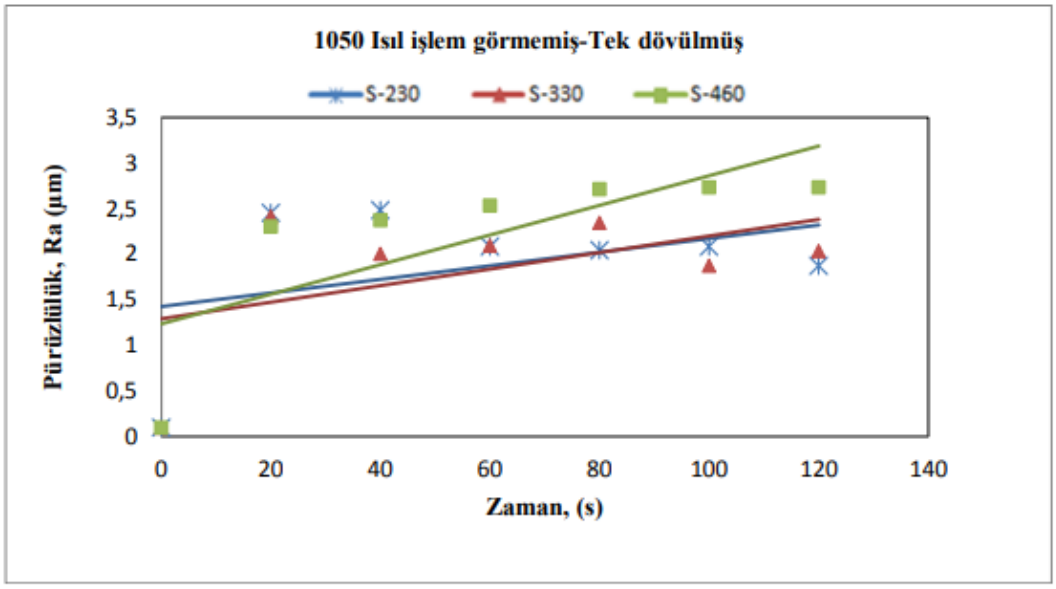
Tablo 4.2. AA1050 Isıl işlem uygulanmamış numunenin pürüzlülüğü, Ra (Alkan, 2014)

Süre	**S-230 Çift**	**S-330 Çift**	**S-460 Çift**	**S-230 Tek**	**S-330 Tek**	**S-460 Tek**
Dövme İşlemi Yok	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
20 s	3,17	1,98	1,49	2,45	2,41	2,3
40 s	2,62	1,91	1,89	2,48	2	2,37
60 s	1,81	1,9	2,42	2,08	2,09	2,53
80 s	2,01	2,63	1,94	2,04	2,34	2,71
100 s	2,3	2,29	2,15	2,08	1,87	2,73
120 s	1,98	2,08	1,91	1,87	2,03	2,73

Şekil 4.9 ve 4.10'da ısıl işlem görmemiş AA1050 malzeme için tek ve çift taraflı dövme işleminde pürüzlülük değerlerinin dövme süresinin artışı ile arttığı görülmektedir.



Şekil 4.9. AA1050- Tekrarlı dövülmüş ısıl işlem uygulanmamış numunenin pürüzlülük değişimi (Alkan, 2014)



Şekil 4.10. AA1050- tek dövülmüş ısıl işlem uygulanmamış numunenin pürüzlülük değişimi (Alkan, 2014)

Tablo 4.3. AA1050 ısıl işlem uygulanmış numunenin eğme deney sonuçlar (Alkan, 2014)

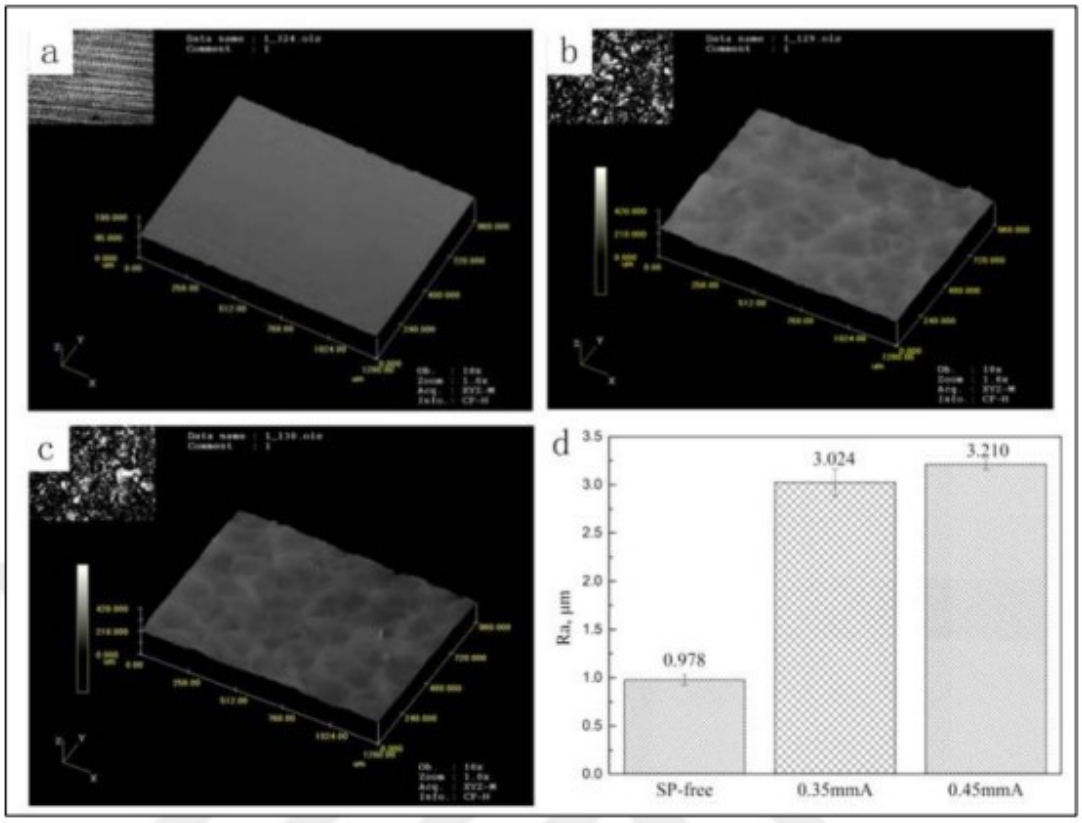
	Dövme İşlemi Yok	**S-230 Tek 120 s**	**S-230 Tek 180 s**	**S-230 Çift 120 s**	**S-230 Çift 180 s**	**S-460 Tek 120 s**	**S-460 Tek 180 s**	**S-460 Çift 120 s**	**S-460 Çift 180 s**
Açı (°)	160	164	161	161	161	165	164	162	162

Tablo 4.3' de ısıl işlem uygulanmış AA1050 malzemesinin eğme deney sonuçlarını göstermektedir. Tablo 4.4'te ise ısıl işleme uygulanmış AA1050 numunesinin pürüzlülük değerleri verilmektedir. (Alkan, 2014)

Tablo 4.4. AA1050 Isıl işlem uygulanmış numunenin pürüzlülüğü, Ra (Alkan, 2014)

Süre	**S-230 Çift**	**S-330 Çift**	**S-460 Çift**	**S-230 Tek**	**S-330 Tek**	**S-460 Tek**
Dövme İşlemi Yok	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
20 s	2,24	2,17	2,26	2,21	1,85	1,95
40 s	2,36	2,29	2,19	2,6	2,2	2,11
60 s	2,35	2,11	2,24	2,17	2,51	2,36
80 s	2,22	2,02	1,94	2,1	2,02	1,95
100 s	2,34	2,32	2,14	2,06	1,96	2,48
120 s	2,2	2,05	2,67	1,96	1,98	2,69

Zhang ve ekibi (Zhang, Qiu, Zhao, & Xu, 2019) alüminyum alaşımlarını farklı Almen şiddetleri ile döverek bilyalı dövme metodunun Al7075-T6511 alaşımının sürtünme ve aşınma davranışları üzerindeki etkisini araştırdılar. Bilyalı dövme işleminin Al7075-T6511 alaşımının sürtünme ve aşınma özelliklerini nasıl etkilediğini belirlemek için yüzey pürüzlülüğü, mikroyapı ve mikro sertlik gibi özellikleri incelediler. Bilyalı dövme uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonra numunelerinin 3 boyutlu profilleri ve çeşitli Almen şiddetleri kullanılarak dövülmesi sonucunda ulaşılan yüzey pürüzlülük grafiği Şekil 4.11'de gösterilmektedir. Kullandıkları malzeme ve Almen şiddeti etkileşiminde, şiddetin artmasının yüzey pürüzlülük değerini önemli ölçüde etkilemediğini keşfettiler.



Şekil 4.11. Bilyalı dövme metodu öncesi ve sonrasında numunelerin 3D görüntüleri: (a) Bilyalı dövülmemiş; (b) 0,35 mm A'da bilyalı dövme; (c) 0,45 mm A'da bilyalı dövme ve (d) yüzey pürüzlülük değerleri (Zhang, Qiu, Zhao, & Xu, 2019)

4.2. Bilyalı Dövmenin Mekanik Özelliklere Etkisi

AA5754 H111 malzemesinden 60 numune yapılmıştır. Bu örnekler 8A, 12A ve 15A ile S110-S170-S230 bilye çaplarına sahiptir. Bilye çapı ve Almen değeri arttıkça mekanik özelliklerdeki değişim incelenmiştir. Ayrıca bu işlemden sonra yapılan kaplama korozyona karşı dayanıklıdır. Tablo 4.5' de görüldüğü gibi çalışma sonucunda bilye çapı ve Almen şiddeti, mukavemet özellikleri ile doğru orantılı olarak arttı. S230-12A değerinde de maksimum mukavemet özelliği gösterilmiştir. S110 ve S170 bilyelerinde artan almen değeri, bilyelerin mukavemet özelliklerini geliştirmiştir. S230 bilyesi 8A-12A değerlerinde mekanik bir artış gösterirken 15A değerinde bir düşüş gösterdi. Bunun nedeni, bilye çapı ve almen değeri arttıkça malzemelerde proses stresinin artması ve iç gerilmelerin oluşmasıdır. Bilye çapı genişledikçe malzeme

gevrekleşir. S230 bilyede kopma uzaması %14,97 iken S110 bilyede %21,84 oldu. S110 bilyesi sünek bir kırılma gösterir, ancak S230 bilyesi gevrek bir kırılma gösterir. Bu bulgulara göre bilye çapı ve Almen değeri arttıkça malzeme daha sert bir yapıya sahip olduğunu bulmuşlardır.

Tablo 4.5. Bilyalı dövme öncesi ve sonrası çekme mukavemeti değerleri (Bozkurt & Demirer, 2023)

Malzeme ve Bilyeleri	Almen Şiddeti	Çekme Mukavemeti (MPa)
Dövülmemiş AA5754 H111	---	215,022
S110	8A	218,171
	12A	218,421
	15A	218,349
S170	8A	221,032
	12A	222,678
	15A	226,291
S230	8A	225,11
	12A	226,183
	15A	224,89

5. MALZEME VE YÖNTEM

5.1. Malzeme

5.1.1. Hammadde

Bu tez çalışmasında malzeme olarak A356 Al-Si döküm alaşımı TiB eklentisi ile kullanılmıştır. Tablo 5.1' de kimyasal bileşimi ve mekanik özelliği verilen A356 malzemesinin mikroyapısı dendritik bir yapıya sahiptir.

Tablo 5.1. A356 Kimyasal kompozisyonu

Elementler (ağ. %)	Al	Si	Mg	Fe	Ti	Cu	B	Zn
	91,1-93,3	6,5-7,5	0,25-0,45	0-0,2	0-0,2	0-0,2	0-0,1	0-0,1

5.1.2. Bilyalar

Bilyalar, dökme demir, dökme çelik, cam, seramik, paslanmaz çelik ve tellerden yapılır. Bilya çeşitleri Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Tablo 5.2, bilyaların malzemeye bağlı standartlarını ve sertlik değerlerini içerir. Tablo 5.3 de ise S70 ile S930 ise, çelik bilyaların standart değerlerini vermektedir. Bilyanın çelikten yapıldığını gösteren S harfi başındadır.

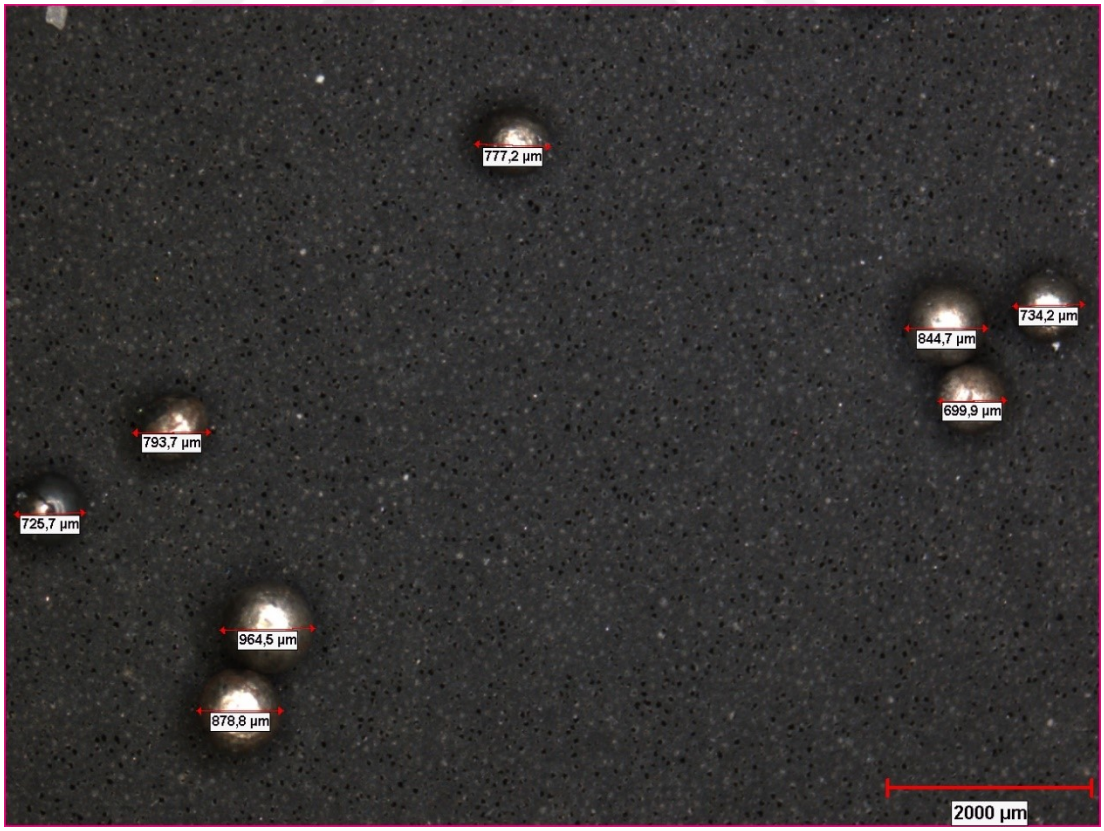


Şekil 5.1. Farklı bilya örnekleri (Savas, 2014)

Tablo 5.2. Bilya tiplerinin standartları ve sertlik değerleri (Savas, 2014)

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

Bilyalı dövmenin malzemeye uygulanan şiddeti, bilya büyüklüğünün artmasına neden olur. Kütlesi, bilyanın uygulanırken olan hızı doğrultusunda sahip olduğu kinetik enerjisinin yüzeye aynen aktarılması nedeniyle kinetik enerjisinin belirlenmesinde çok önemlidir. Şekil 5.2 de ise bu araştırmada kullanılan S230 dökme çelik bilyanın stereo mikroskop altında görseli verilmiştir.



Şekil 5.2. Çalışmada kullanılan S230 tip bilyanın stereo mikroskop görüntüsü

Tablo 5.3. Çelik bilya boyutları (Saykar, 2019)

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

5.2. Yöntem

5.2.1. Döküm İşlemi

Dökümleri, CMS firması Ar-Ge laboratuvarında gravite döküm yöntemi ile gerçekleşmiştir. A356 alüminyum malzemesi 770°C'de Protherm fırında; 4 kg ergiyik alaşım SiC A15 potalarda ergitilmiştir. Laboratuvar tipi gaz giderme cihazında; tane inceltme- ötektik Si modifikasyonu için 4 gr. (50 ppm) TiB eklentisi yapılan A356 alaşımı, 60 saniye gaz alma süresi olacak şekilde 148 saniyelik bir gaz giderme programı kullanılarak döküm için hazırlanmıştır. Gaz giderme işlemi esnasında Argon gazı kullanılmıştır.

Bu işlemde kullanılan döküm parametreleri; CMS ARGE bölümünün yaptığı optimizasyon çalışmaları sonucu ortaya çıkmıştır. Gaz giderme işlemi sonrasında ergitilen alüminyum, Şekil 5.3'te görüldüğü üzere, döküm uzmanı tarafından 350°C'ye ön ısıtılmış kalıba dökülmüştür. Feder kalıbı adı verilen kalıp H13 sıcak iş takım çeliğinden, jant dökümünü simüle edebilmek üzerine tasarlanmıştır. Şekil 5.4'te görüldüğü gibi kalıpta katılaşan alüminyum havada soğutulmuştur.

Soğuma sonrası, bir kalıptan 5 çubuk çıkacak şekilde döküm numuneleri talaşlı imalat için Şekil 5.5'te görüldüğü gibi hazır hale gelmiştir. Geleneksel ve şiddetli bilyalı dövme işlemi uygulanacak tüm numunelerin hazırlanması CMS Jant ve Makine Sanayi A.Ş.' de tarafından gerçekleştirilmiştir. Proje kapsamında hem mekanik hem de metalürjik incelemeleri yapılacak olan numuneler için; bilyalı dövme işlemi gerçekleştirilecek numune çubukları CNC tezgahlarında talaşlı imalat ile hazırlanmıştır. Numune ölçüleri ise Şekil 5.6 da görülebilir. Döküm sonrası talaşlı işlenmiş çekme numunesine ise Şekil 5.7'de yer verilmiştir.



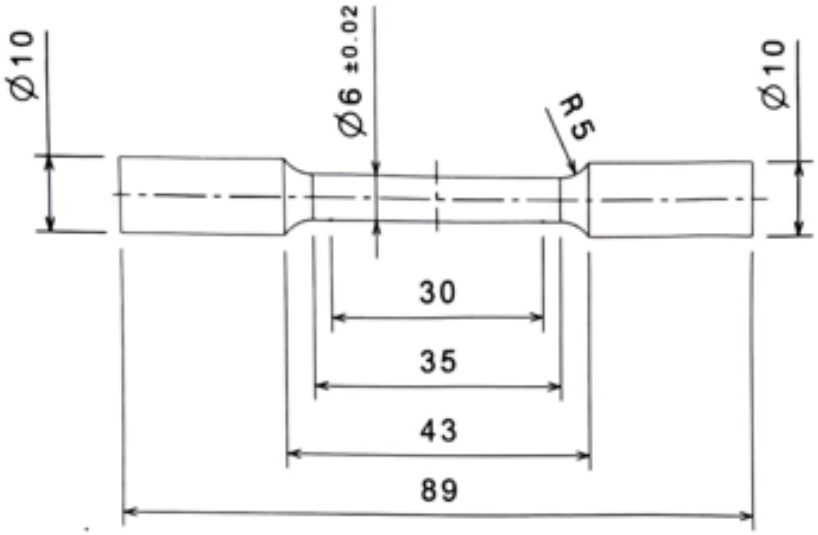
Şekil 5.3. Ergiyik A356 alaşımının kalıba dökülmesi



Şekil 5.4. Feder döküm kalıplarında soğuyan A356 malzemesi



Şekil 5.5. Döküm sonrası kalıptan çıkan numuneler



Şekil 5.6. Çekme numunesi ölçüleri



Şekil 5.7. Döküm sonrası talaşlı işlenmiş çekme numunesi örneği

5.2.2. Bilyalı Dövme İşlemleri

5.2.2.1. Bilyalı Dövme Deney Düzeneği

GBD ve ŞBD işlemleri, Makine Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan ve Şekil 5.8'de görülen deney düzeneğinde, basınçlı hava ile çalışan bilya püskürtme sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlem, 90° nozul açısına sahip kapalı bir ortamda yapılmıştır. Numuneler sabitlendikten sonra hazneye bilyalar yerleştirilmiş, ardından kontrol paneline ilgili parametreler girilerek cihaz çalıştırılmıştır. Püskürtme ucunun sabit olması nedeniyle, bilyalı dövme işleminin numune yüzeyine homojen olarak uygulanabilmesi için numune hareketli bir mekanizmaya bağlanmıştır.



Şekil 5.8. Bilyalı dövme deney düzeneği

Bilyeli dövme, artık basma gerilmesi içeren bir yüzey katmanına neden olur. Bileşenlerin geliştirilmiş yorulma performansından büyük ölçüde sorumlu olan şey bu sıkıştırılmış yüzey katmanıdır. Bu nedenle katmanın derinliği kullanıcılar için çok önemlidir. Almen yoğunluğu her bilyalı dövme işleminde mutlaka tespit edilmelidir, çünkü pek çok değişkene bağlı olduğundan, farklı değişkenler ile aynı Almen şiddetlerini farklı makinalarda elde etmek ve sürdürülebilirliği sağlamak mümkündür.

Almen yoğunluğunun sıkıştırılmış yüzey katmanının derinliğine olan ilişkisi yardımıyla farklı Almen şiddetleri arasında dönüştürmelerin yapılması mümkündür.

Almen şiddeti ölçümleri, Manisa Celal Bayar Üniversitesi tarafından temin edilen Almen şerit numune ve Almen ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, Almen şerit numune bilyalı dövme makinesine bağlanmış ve geleneksel dövme parametreleri kullanılarak işleme tabi tutulmuştur. Daha sonra, yeni bir numune daha bağlanarak şiddetli dövme parametreleri ile dövülmüştür. Dövme işlemi sonucunda şerit numuneler, dövme etkisiyle şekil değiştirmiştir. Bu numunelerin sehim miktarı, ölçüm cihazı ile ölçülmüş ve buna denk gelen Almen şiddeti belirlenmiştir.

AMS 2342B standardına göre Tablo 5.4'te ki bazı değerleri kullanan Tablo 5.5, malzeme mukavemetinin etkisini sayısallaştırır. Tablo 5.5'te 0,20 mm'lik sabit bir Almen 'A' yoğunluğu çeşitli malzemelere uygulanmıştır. Verilen değerler için, D için ölçülen ortalama 0,182 mm derinlik kesinlikle uygulanan 0,20 mm Almen 'A' BD yoğunluğuna yakındır.

Tablo 5.4. 'A' şeritleri kullanılarak 0,20 mm'lik dövme yoğunluğu için Basma Gerilme Derinlikleri (Kirk, 2014)

ŞERİT TİPİ	**N**	**A**	**C**
Yoğunluk-mm	0,2	0,2	0,2
Malzeme		**Basma Gerilimi Derinliği- mm**	
Alüminyum	0,08	0,25	0,69
Titanyum	0,05	0,18	0,46
Çelik <1379 MPa	0,06	0,2	0,64
Çelik> 1379 MPa	0,05	0,13	0,38
Nikel alaşımları	0,05	0,15	0,51
Ortalama	0,058	0,182	0,536

Tablo 5.5. Basma Gerilme Derinlikleri (AMS 2432B standardı değerleri) (Kirk, 2014)

ŞERİT TİPİ	A
Yoğunluk- mm	0,2
Malzeme	D- mm
Alüminyum	0,25
Titanyum	0,18
Çelik <1379 MPa	0,2
Çelik> 1379 MPa	0,13
Nikel Alaşımları	0,15
Ortalama	0,183

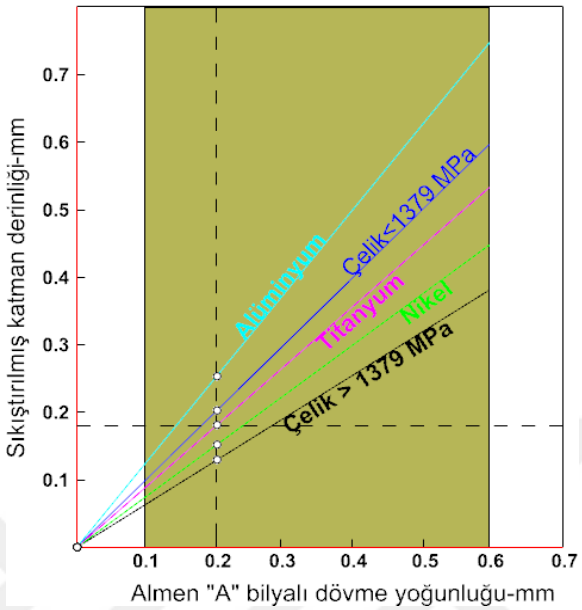
Basma geriliminin derinliği ortalama olarak Almen 'A' dövme yoğunluğuna yaklaşık olarak eşittir. Tablo 5.4'te verilen değerler belirli bir BD yoğunluğuna karşılık gelir – 0,20 mm A. Bununla birlikte, derinliğin (D), izin verilen BD yoğunlukları aralığı boyunca çekiçleme yoğunluğuyla doğrusal orantılı olacağını varsaymak mantıklıdır. Bu etki, 0,20 mm 'A' değerlerinin tahmin edildiği Şekil 5.9' da gösterilmektedir (Kirk, 2014).

Almen 'N' ve Almen 'C' şeritleri de dövme yoğunluğunu ölçmek için kullanılır; ancak Almen 'A' şeritleri kadar sık değildir. Almen 'N', 'A' ve 'C', 0,20 mm yoğunluklar çeşitli malzemelere uygulanmıştır ve karşılık gelen basınç gerilimi derinlikleri sunulmuştur. (Tablo 5.4) 3,14 (A/N için) ve 2,95 (C/A için) oranları SAE J442'de belirtilen 'dönüşüm faktörlerine' yakındır. Bu dönüşümler "C şerit okuması x 3,5 = A şerit okuması ve A şerit okuması x 3,0 = N şerit okumasıdır (Kirk, 2014).

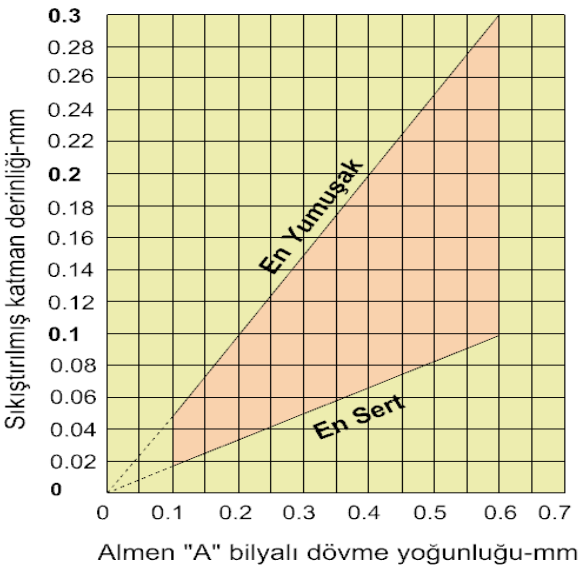
Almen BD yoğunluğunun ölçülen değeri kullanılarak, Şekil 5.9 ve 5.10'dan yaklaşık sıkıştırılmış katman derinliği okunabilir. Örneğin: 0,5 mm 'N' olarak ölçülen Almen dövme yoğunluğu, sıkıştırılmış katman derinliğinin bileşen sertliğine bağlı olarak 0,08 mm ile 0,25 mm arasında olacağını gösterir. Bileşenin ortalama sertlikte olduğu biliniyorsa derinlik 0,15 mm olarak belirtilir (Kirk, 2014).

Şekil 5.11 de ise Almen şiddeti ölçümü için bilyalı dövülmüş N-tipi şeritler ve Almen Şiddeti ölçümünün örnek çalışmasının görüntüleri verilmiştir. Bilyalı dövme işlemi için belirlenen parametreler, yapılan ön denemeler sonucunda tespit edilmiştir.

Bilyalı dövme çalışmasında kullanılan koşullar Tablo 5.4 'da sunulmuştur. Teste girecek numunenin makineye bağlanışı ise Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Bilyalı dövme cihazında dövülmüş numuneler Şekil 5.13'te gösterilmektedir.



Şekil 5.9. Sıkıştırılmış katman derinliğinin öngörülen değişimi Almen 'A' BD yoğunluğu (Kirk, 2014)



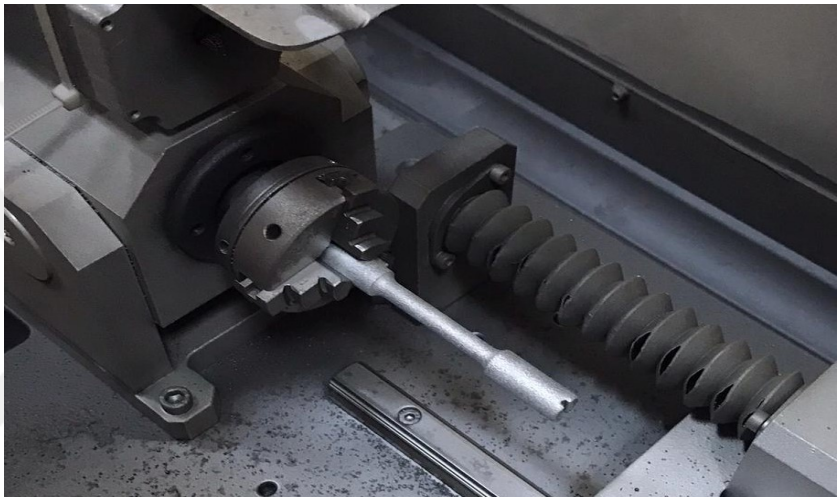
Şekil 5.10. Almen 'N' yoğunluğunun sıkıştırılmış katman derinliğine dönüştürülmesine ilişkin kılavuz diyagram (Kirk, 2014)

N-tipi Almen şeridi makine bağlantısı	N-tipi Almen şeridi yan görünüş
	
	

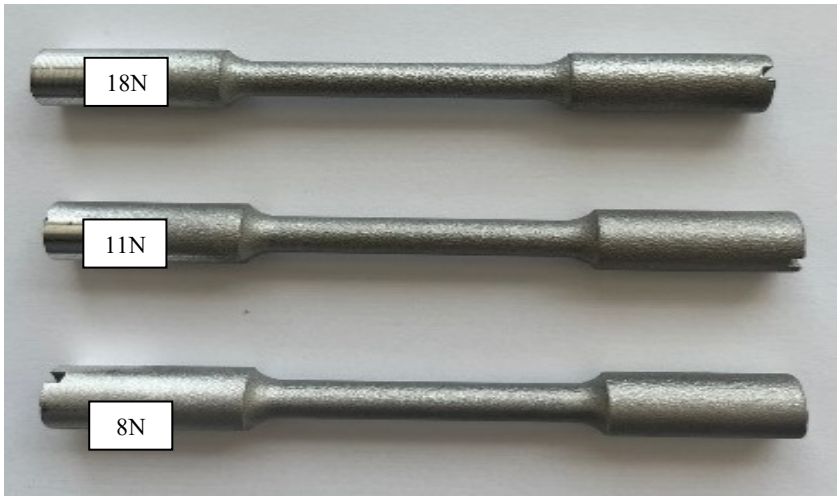
Şekil 5.11. Almen şiddeti ölçümü için bilyalı dövülmüş N-tipi şeritler ve Almen Şiddeti ölçümü

Tablo 5.6. Bilyalı Dövme Proses Parametreleri

Bilyalı Dövme	Almen Şiddeti	Bilya Boyutu	Kaplama Miktarı	Süre (s)	Hava Basıncı (bar)	Nozul Mesafesi (mm)
Bilyalı Dövme	8N	S230	100%	50	5	105
GBD (Geleneksel Bilyalı Dövme)	11N	S230	200%	100	5	105
ŞBD (Şiddetli Bilyalı Dövme)	18N	S230	400%	200	5	105



Şekil 5.12. Numunenin makineye bağlanışı



Şekil 5.13. Bilyalı dövme uygulanmış numuneler

5.2.2.2. Bilyalı Dövme İşlemleri

Bu çalışma, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan bilyalı dövme makinesi ile yürütülmüştür. Öncelikle makinenin bakımları ve temizliği yapılmıştır. Bu işlemler sırasında kişisel koruyucu donanımların kullanılması büyük önem taşımaktadır. Makineye, önceden üretilen silindirik tip döküm numunesi bağlanmıştır. S230 (0.8 mm boyutundaki) çelik bilyalar, makinenin üst kısmında bulunan bilya haznesine doldurulmuştur. Makine parametreleri ayarlandıktan sonra, 8N, 11N ve 18N Almen şiddetine göre proses devam ettirilmiştir. Numuneler dövüldükten sonra, her bir numune koruyucu ekipmanlara sarılarak yüzey durumunu korumaları için ayrı ayrı poşetlenmiş ve numaralandırılmıştır.

5.2.3. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

Mühendislik Fakültesi laboratuvarında yer alan Şekil 5.14'de verilen Mitutoyu SJ301 mekanik profilometre kullanılarak bilyalı dövme işlemleri sonrası yüzey pürüzlülük ölçümleri tamamlanmıştır.

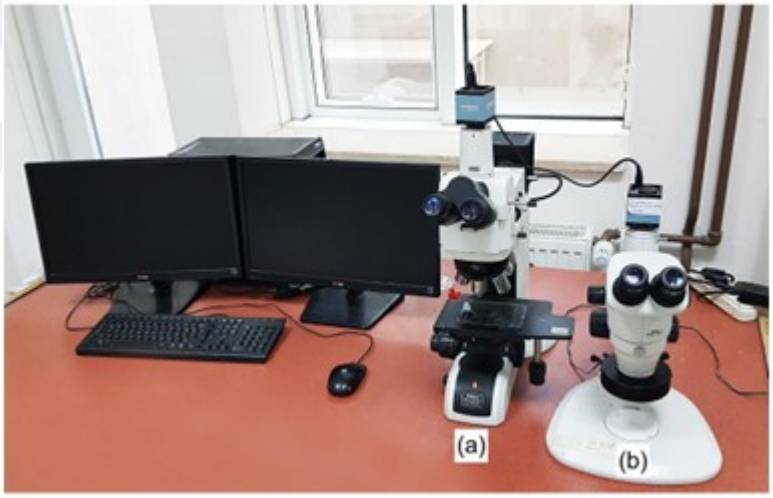


Şekil 5.14. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm aleti

Ölçümler 3 farklı Almen şiddeti ile dövülmüş numunelerden 3’ er kere tekrarlanarak sağlanmış ve ortalama değerleri Şekil 6.5’te ki grafikte sunulmuştur. Yüzey pürüzlülük değerlendirmeleri, yüzey profiline karşılık gelen y- koordinatlarının mutlak değerlerinin aritmetik ortalaması olan Ra ve yüzey pürüzlülük profilinin en yüksek ve en düşük noktaları arasındaki dikey mesafe olan Rz değerleri aracılığıyla yapılmıştır.

5.2.4. Yüzey Mikroskop İncelemeleri

Mikroyapı analizleri, fakültemizin laboratuvarında bulunan Şekil 5.15’ de yer verilen Nikon Eclipse LV150N model optik mikroskop (OM) ile gerçekleştirilmiştir. Makro düzeydeki incelemeler ise yine fakültemiz laboratuvarında yer alan Nikon SMZ 745T model stereo mikroskop (SM) kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 5.15. (a) Nikon Marka Eclipse LV150N Model Optik Mikroskop (b) Nikon Marka SMZ 745T Model Stereo Mikroskop

Stereo mikroskobu, malzeme yüzeylerini üç boyutlu bir perspektiften inceleme imkânı sunan bir optik mikroskop türüdür. İki ayrı optik yol ve objektif kullanarak, gözle bakıldığında derinlik hissi ve üç boyutlu bir görüntü elde edilmesini sağlar. Bu mikroskoplar, özellikle biyoloji, malzeme bilimi, elektronik ve mühendislik gibi alanlarda yüzey yapılarının incelenmesi için yaygın olarak kullanılır.

Yüzey Morfolojisi: Stereo mikroskopları, malzeme yüzeyindeki yapıların morfolojik özelliklerini belirlemek için kullanılır. Bu, malzeme yüzeyindeki çatlaklar, çizikler, kabarcıklar ve diğer yüzey hatalarının tespit edilmesine olanak tanır (Kuo, 2007).

Büyütme Kapasitesi: Stereo mikroskoplar genellikle düşük ila orta seviyede büyütme sağlar (5x ila 100x arası). Bu, geniş alanların incelenmesi ve makro yapıların gözlemlenmesi için idealdir.

Işık Kaynakları: Çoğu stereo mikroskop, yanal veya doğrudan ışıklandırma seçeneklerine sahiptir. Işık kaynağının konumu ve açısı, yüzey özelliklerinin daha iyi görünmesi için ayarlanabilir (Harris, Shyne, & Jones, 2010).

5.2.5. Metalografik Hazırlık

5.2.5.1. Kesme İşlemi

Her numuneden 2 eşit parça olacak şekilde kesme işlemi Makine Mühendisliği laboratuvarında yer alan Metkon marka Micracut 200 model Şekil 5.16' da verilen hassas kesme cihazında 150rpm değerinde gerçekleştirildi. Numuneler kesildikten sonra ölçülerek soğuk kalıplama alanına alındı.



Şekil 5.16. Micracut numune kesim cihazı

5.2.5.2 Soğuk Kalıplama İşlemi

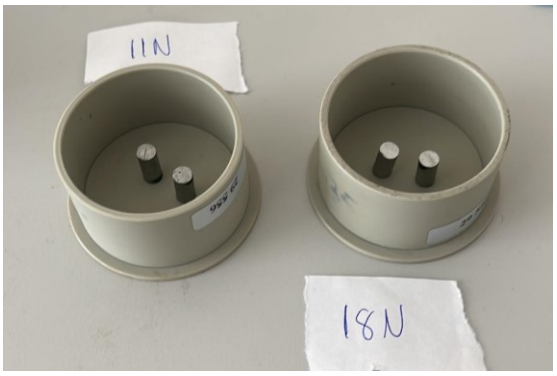
Numune yüzeyinin mikroskobik inceleme için zımparalanması ve parlatılması gerekir. Kesilen numunelerin boyutunun küçük olmasından dolayı zımparalama ve parlatma işleminin daha kolay gerçekleştirilmesi için kesilen parçalara soğuk bakalite alma işlemi uygulandı. Toz ve sertleştirici makine mühendisliği laboratuvarında 1 ölçek şekil 5.17' de görüntülenen toza 2 ölçek şekil 5.18 de yer verilen sertleştirici karışımı uygulanarak hazırlandı. Şekil 5.19 ve 5.20 de ise numunenin soğuk kalıplama için gerekli olan kalıpları ve karışımın ardından görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.17. Micro-Acrylic toz



Şekil 5.18. Micro-Acrylic hızlandırıcı



Şekil 5.19. Döküm öncesi kesilmiş numunelerin kalıplara alınması örnek görüntüsü



Şekil 5.20. Oluşturulan karışımın kalıplara doldurulması örnek görüntüsü

5.2.5.3. Zımpara ve Parlatma İşlemleri

Bu işlem, metalografik numunelerin hazırlanmasında kullanılan bir zımparalama prosedürüdür. Her aşamada daha ince taneli zımpara kağıtları kullanarak, numunenin yüzeyindeki çizikleri ve düzensizlikleri giderir ve daha düzgün bir yüzey elde edilir. İşlem sırasında numunenin her seferinde 90 derece döndürülmesi, önceki zımparalama aşamasında oluşan çizgilerin tamamen ortadan kalkmasını sağlar.

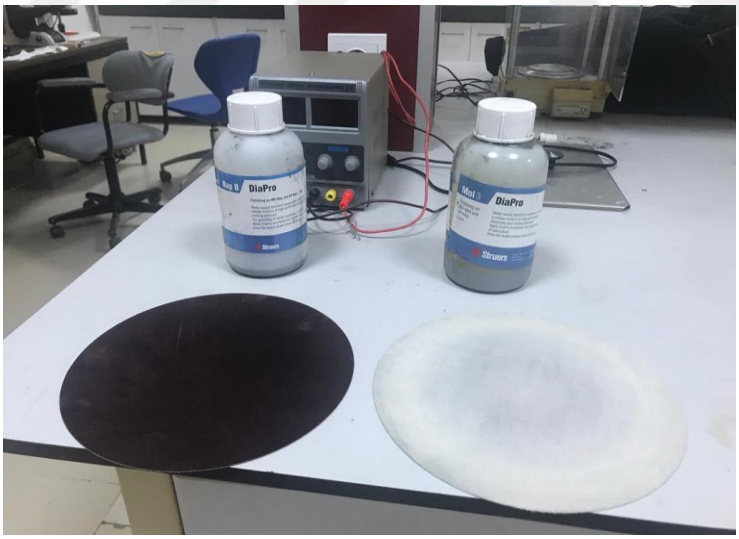
Metkon marka Forcipol 1V model zımpara makinesi kullanarak sırasıyla şu zımpara kağıtları ile çalışılır: 240 grid,320 grid,400 grid,600 grid,800 grid,1000 grid,1200 grid.

Her zımparalama aşamasında, bir önceki aşamanın oluşturduğu çizgiler gözle görülmeyecek hale gelene kadar devam edilir. Şekil 5.21'te verilen bu işlem, numunenin yüzeyini metalografik incelemeler için uygun hale getirir.



Şekil 5.21. Zımpara makinesi

Şekil 5.22'de görülen keçeler yardımıyla 3 µm ve 1 µm'luk elmas partiküller kullanılarak parlatma işlemi yapıldı. Kullanılan parlatma makinesi Şekil 5.23 de gösterilmiştir.



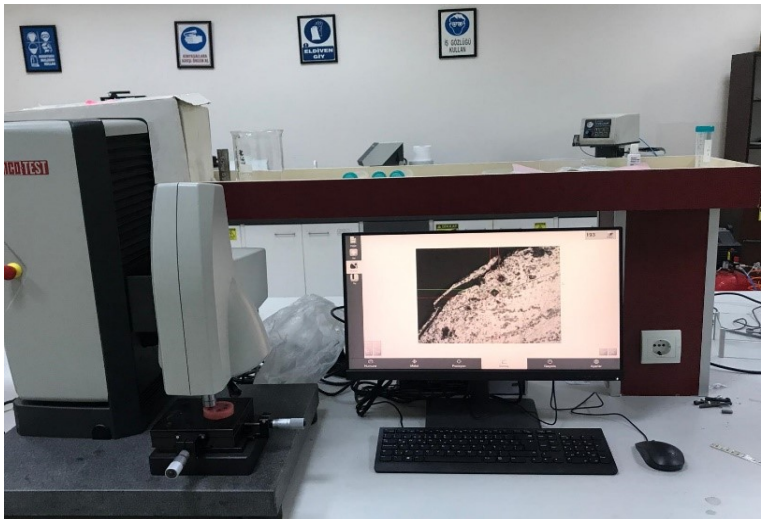
Şekil 5.22. Parlatma keçeleri



Şekil 5.23. Parlatma Makinesi

5.2.6. Mikrosertlik İncelemeleri

Kesitten mikrosertlik ölçümleri yüzeyin hemen altından başlanarak derinlik boyunca gerçekleştirilmiştir. Testler, Makine Mühendisliği laboratuvarında yer alan Şekil 5.24'te görüntüsü olan EmcoTest DuroScan 20 G5 model mikrosertlik cihazında 10gf yük altında 20µm aralıklarla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.24. Emcotest mikrosertlik test cihazı

5.2.8. SEM/EDX Analizleri

SEM-EDX analizi, malzemelerin yüzey morfolojisini ve kimyasal bileşimini incelemek için kullanılan güçlü bir tekniktir. Bu teknik, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisinin (EDX) bir kombinasyonudur. SEM, malzeme yüzeyinin yüksek çözünürlüklü görüntülerini elde etmek için kullanılırken, EDX, yüzeydeki elementlerin kimyasal bileşimini belirler. Bu tez çalışmasında İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi bünyesinde bulunan Şekil 5.25'te yer verilen Carl Zeiss 300VP SEM Cihazı ve EDX için QUORUM Q150 RES cihazı kullanılmıştır.



Şekil 5.25. A) Carl Zeiss 300VP SEM Cihazı b) Kaplama (QUORUM Q150 RES)

SEM, malzemenin yüzeyine odaklanmış bir elektron ışını göndererek, yüzeyden geri saçılan elektronları algılar. Bu işlem, malzemenin yüzey topografyası ve morfolojisi hakkında detaylı bilgi sağlar. SEM analizi, özellikle malzeme yüzeyindeki pürüzlülükler, çatlaklar ve partikül dağılımını incelemek için kullanılır. Örneğin, deniz ortamlarında korozyona uğrayan metal yüzeylerde korozyon ürünlerinin dağılımı ve yapısı, SEM ile incelenebilir (Goldstein, Newbury, & Lyman, 2017). EDX, SEM ile birlikte çalışarak malzemenin yüzeyindeki elementlerin enerji spektrumlarını analiz eder. Elektron ışınının malzeme yüzeyine çarpması sonucu

yayılan karakteristik X-ışınları, her bir elementin özgün enerji seviyelerine sahiptir. EDX analizi, bu enerji seviyelerini inceleyerek malzemenin elementel bileşimini nitel ve nicel olarak belirler. EDX, özellikle malzeme yüzeyindeki elementlerin dağılımını ve konsantrasyonunu haritalandırmak için kullanılır (Friel, 2004).

5.2.9. Çekme Testleri

Çekme testi olarak da bilinen gerilim testi, kontrollü bir gerilimle bir numuneye belirli bir seviyeye kadar veya malzeme tamamen kopana kadar kuvvet uygulandığında, numunenin davranışını belirlemek için yıkıcı bir mühendislik ve malzeme bilimi testidir. Bu, mekanik test için en yaygın yöntemlerden biridir. Bir malzemenin dayanıklılığını ve kırılmadan önce ne kadar gerilebileceğini tahmin etmek için kullanılır. Akma mukavemeti, maksimum çekme mukavemeti, kopma mukavemeti, üniform uzama miktarı, gerinim sertleştirme özellikleri, elastisite modülü gibi özellikler bu test yöntemi kullanılarak ölçülmektedir.

Bilyalı dövme işlemi, Al-Si alaşımına farklı parametrelerde uygulandıktan sonra malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testi uygulandı. Manisa Celal Bayar Üniversitesi'nde bulunan ve Şekil 5.26'da yer verilen Zwick Roell 100 kN üniversal çekme ve basma test cihazı, oda sıcaklığında 2 mm/dak sabit test hızında test edildi. Çekme deneyleri işlem görmemiş, 8N, 11N ve 18N bilyalı dövülen örnekler üç kez tekrarlandı ve ortalamalar elde edildi. Toplamda elde edilen 12 adet çekme testi verisi bilgisayarda grafik haline getirildi ve akma dayanımları ofset metodu kullanılarak belirlendi.

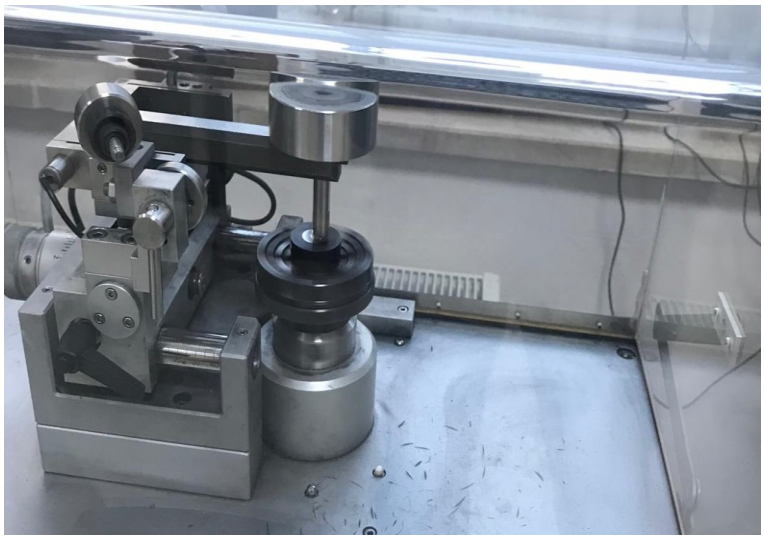


Şekil 5.26. Çekme testi makinesi

5.2.10. Aşınma Testleri

Aşınma testleri, malzemelerin sürtünme etkisi altında gösterdiği aşınma direncini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, belirli bir kuvvet altında malzeme yüzeylerinin aşındırıcı yüzeylerle temas ettirilmesiyle oluşan aşınma miktarı ve sürtünme katsayısı analiz edilmiştir.

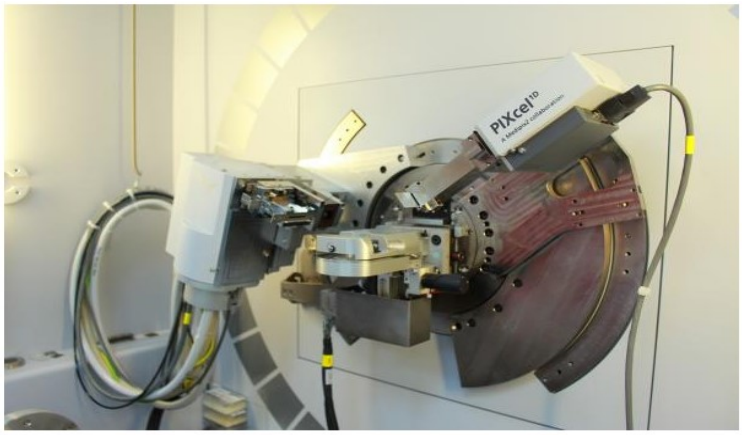
Deneyler, Makine Mühendisliği laboratuvarında yer alan ve Şekil 5.27 de yer verilen CSM Instruments marka ball-on-disk tipi aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde, 6 mm çapında, 100Cr6 alaşımı bilya, 15 cm/dk hızda dönen disk yüzeyine 1N kuvvetle temas ettirilmiştir. Sürtünme katsayısı değişimi test sırasında TriBox yazılımı sayesinde kaydedilmiştir. Sürtünme etkisiyle oluşan aşınma davranışı analiz edilmiştir. Aşınan izlerin genişlikleri stereo mikroskop altında ölçülerek mikrometre cinsinden kıyaslanmıştır. Hacim kayıpları, yüzey profilometresi ile elde edilen iki boyutlu grafiklerdeki alan hesaplarının aşınma izinin çevresi ile çarpılması yoluyla hesaplanmıştır. Bu yöntem, hacimsel aşınma miktarını daha hassas şekilde belirlemeyi sağlamıştır. Bu testler, malzeme performansının ve yüzey dayanıklılığının değerlendirilmesi için kritik bilgiler sağlamıştır.



Şekil 5.27. Aşınma test cihazı

5.1.11. XRD (X-Işını Kırınım) Testi

Bu çalışma kapsamında, XRD analizleri DEFAM bünyesinde bulunan PANalytical marka Empyrean model cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler, Bilyalı dövülmemiş, 8N,11N ve 18N olmak üzere 4 farklı silindirik numune üzerinde yapılmış olup, kırınım açısı aralığı 20°-90° olarak belirlenmiştir. Bu cihaz Şekil 5.28'de gösterilmektedir.



Şekil 5.28. XRD test cihazı

XRD yöntemiyle kristal yapı bozuklukları, kristal yönlenmeleri, fazlar, kristalit boyutları ve latis parametreleri gibi birçok özellik hakkında bilgi elde edilebilir.

Ayrıca, malzemedeki bileşenlerin pik şiddetleri bileşenlerin oranına bağlı olduğundan, nicel analiz de yapılabilmektedir (Ateş, 2018).

Analizler sonucunda, XRD piklerinden yarı maksimumun tam genişliği (FWHM) hesaplanmıştır. Bu değerler kullanılarak kristalit boyutu (1), latis gerinimleri (2) ve dislokasyon yoğunluğu (3) ilgili bağıntılar yardımıyla hesaplanmıştır. Kristalit boyutu ve latis mikro-gerinimi hesaplamalarında Scherrer eşitlikleri kullanılmıştır.

$$\beta = \frac{K\lambda}{Lcos\theta} \quad (1)$$

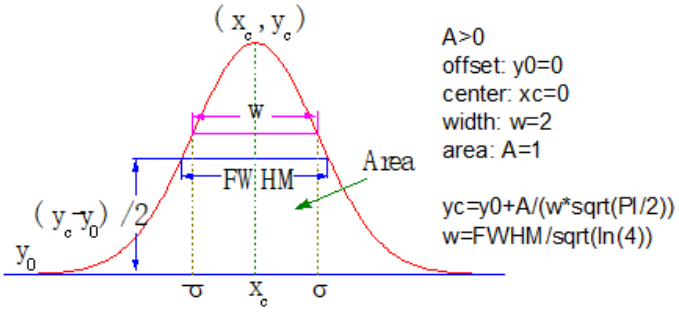
$$\beta = C\varepsilon\frac{\sin\theta}{cos\theta} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{1}{LxL} \quad (3)$$

FWHM (β), kırınım pik genişliğini, pikin maksimum yarı yüksekliğinde radyan cinsinden ifade eder. Kristalit boyutu (L), latis mikro-gerinimi (ε), x-ışını dalga boyu (λ), denklem sabiti (C), dislokasyon yoğunluğu (ρ) ve Scherrer sabiti (K) hesaplamalarda kullanılır. C sabiti, ε'nin homojen deformasyon olmadığı durumlarda genelde 4 olarak, K sabiti ise 0,89 olarak alınmıştır (Irizalp, Saklakoğlu, & Yılbaş, 2013).

Bir malzemenin latis mikro-şekil değişimi ve kristalit boyutu, X-ışını kırınımı yöntemi kullanılarak belirlenir. Bir kristal malzemeye X ışınları gönderildiğinde, malzemenin kristal düzlemleri bazı X ışınlarını yansıtır. Bu yansıyan ışınların şiddetini belirlemek için bir difraktometre dedektörü kullanılır. Genişliği olmayan bir çizgi ideal bir piktir. Bununla birlikte, pik genişlemesi, malzemedeki kristalit boyutu ve latis mikro-şeklindeki değişiklikleri gösterir. Kristalit boyutu, latis mikro şekil değişimi ve enstrümantal etkiler pik genişlemesini etkiler. Pek genişliği, maksimum şiddetin yarısında veya yarı yükseklikte bulunur. (Irızalp, 2014).

FWHM (β) değeri, yoğunluk-2θ grafiği kullanılarak özel bir yazılım programı üzerinden hesaplanmıştır. Program, seçilen piklerin FWHM değerlerini Şekil 5.29'da gösterildiği şekilde hesaplamaktadır.



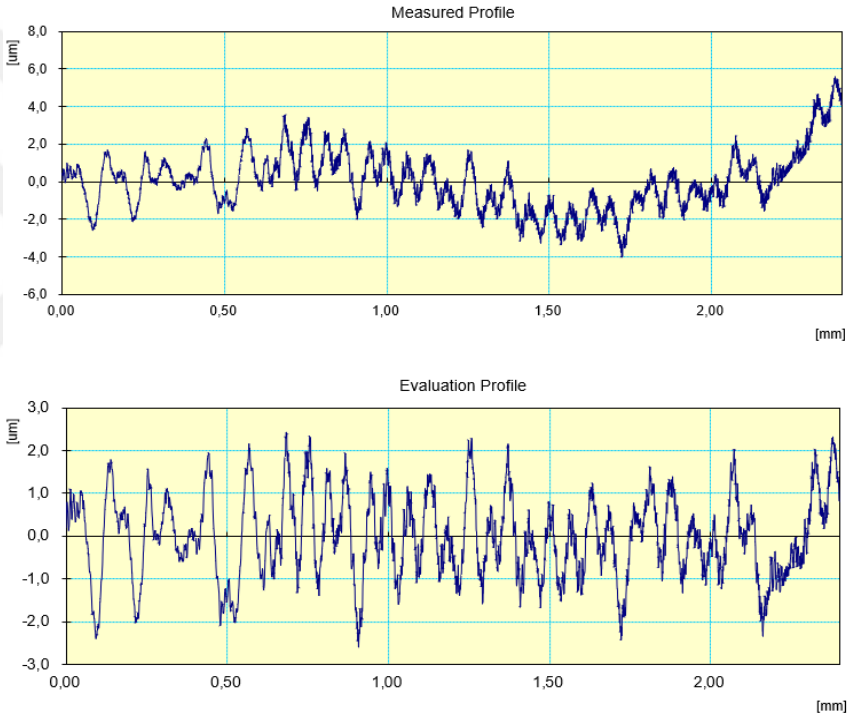
Şekil 5.29. Yazılım ile FWHM değerinin belirlenmesi

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

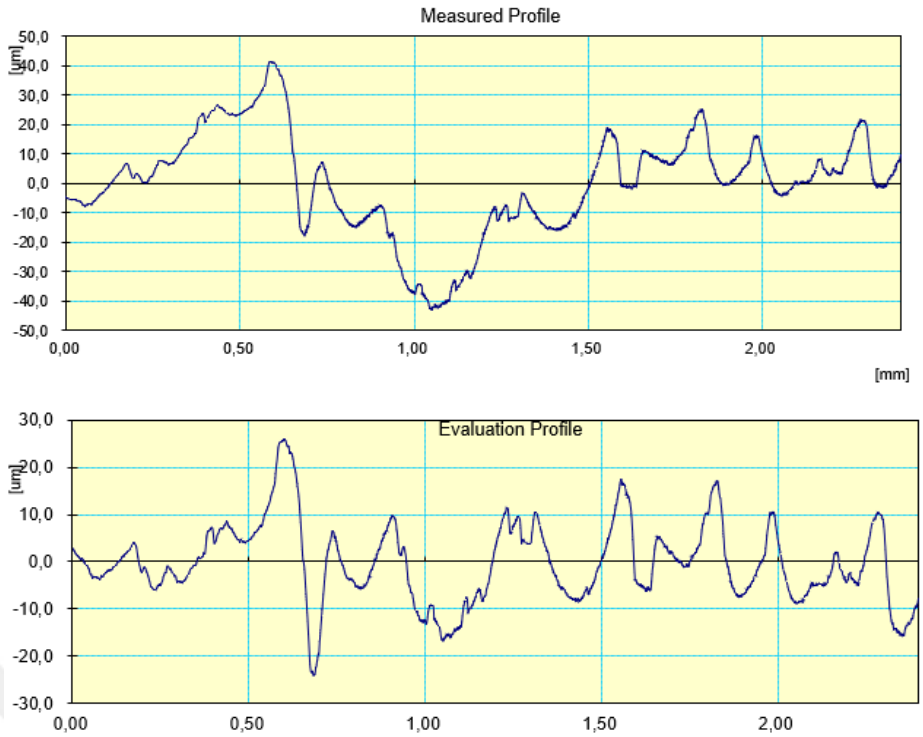
6.1. Yüzey İncelemeleri

6.1.1. Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları

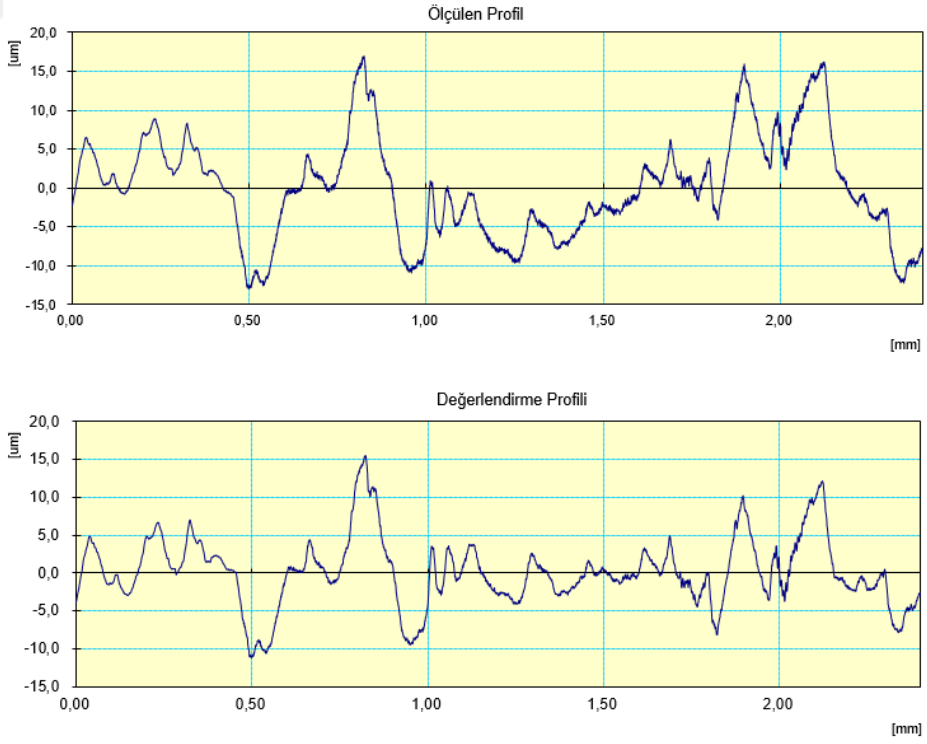
Bilyalı dövülmemiş (işlemsiz) A356 iş parçasının talaşlı işlem sonrası yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 6.1-6.4' te verilmiş, Ra 0,506µm ve Rz 3,14µm olarak bulunmuştur. Ortalama olarak ise Şekil 6.5'te görüldüğü gibi gerek geleneksel gerekse şiddetli bilyalı dövülmüş numunelerde ciddi bir yüzey pürüzlülüğü artışı meydana gelmiştir.



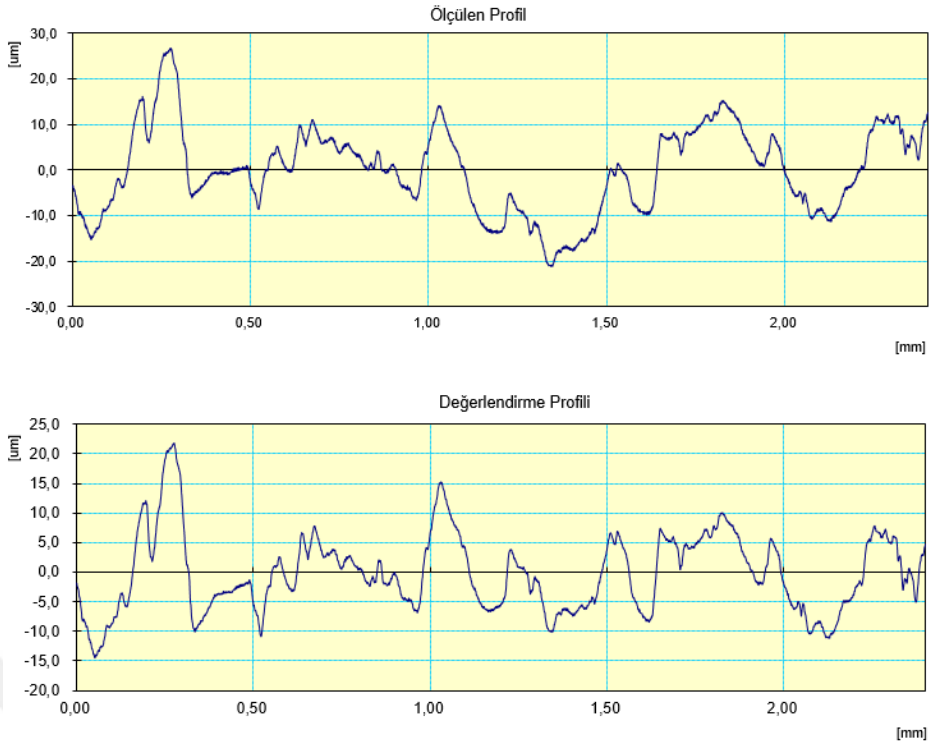
Şekil 6.1. İşlem görmemiş numune yüzey pürüzlülük grafiği



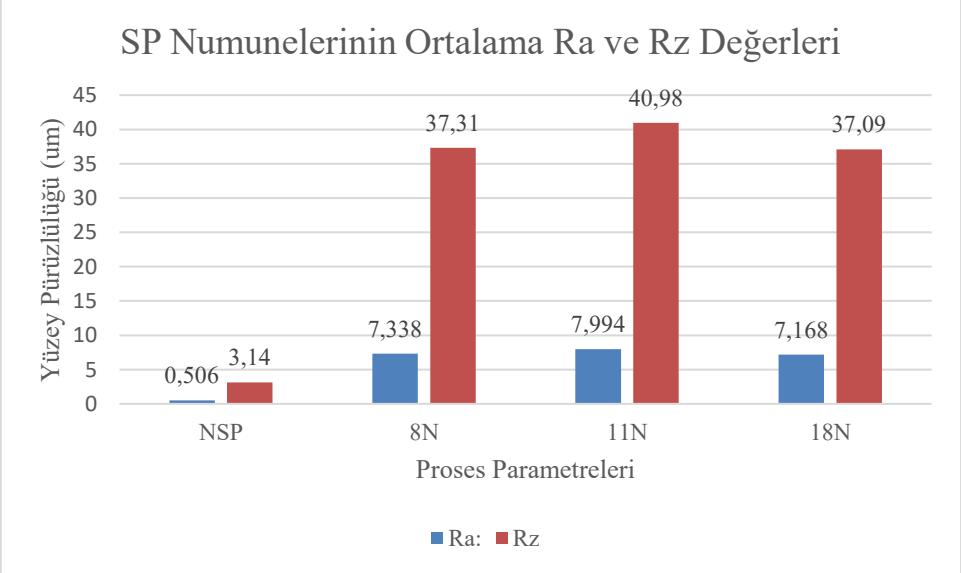
Şekil 6.2. 8N Şiddetle dövülmüş numunenin yüzey pürüzlülük grafiği



Şekil 6.3. 11N Şiddetle dövülmüş numunenin yüzey pürüzlülük grafiği



Şekil 6.4. 18N Şiddetle dövülmüş numunenin yüzey pürüzlülük grafiği



Şekil 6.5. SP numunelerinin ortalama Ra ve Rz değerleri

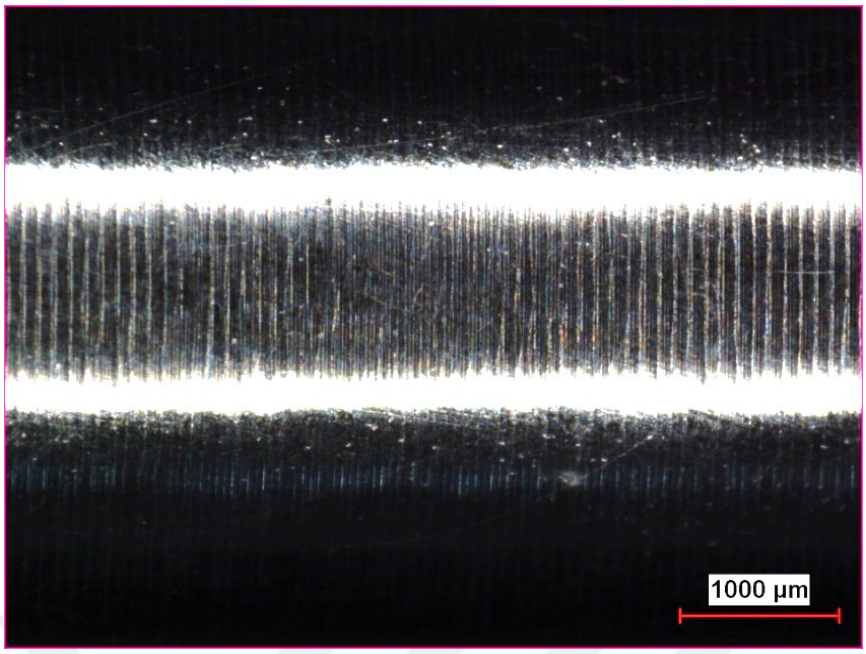
Yüzey pürüzlülük sonuçlarına göre ise bilyalı dövmenin şiddetinin arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlemlenmiştir. Ra değerlerinde 8N parametresinde 14.50 ,11N parametresinde değerinde 15,7 kat değerinde bir artış varken 18N Ra değerinde 14,16 katlık bir artış mevcuttur.8N Rz değerinde 11,8 kat,11N Rz değerinde ise 13,05 kat değerinde bir artış varken 18N Rz değerinde 11.8 katlık bir artış mevcuttur.

6.1.2. Yüzey Topografisi

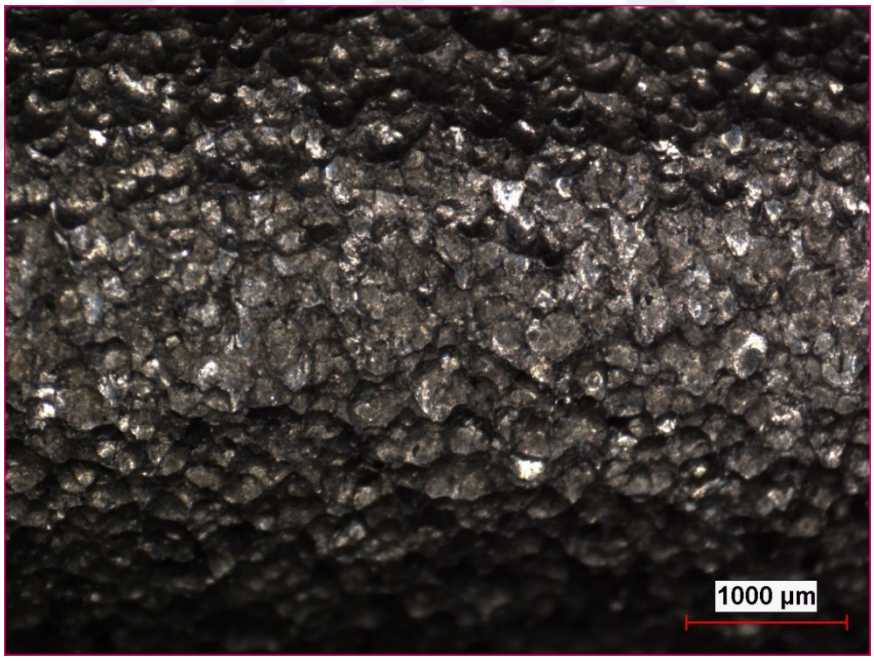
6.1.2.1. Stereo Mikroskop İncelemeleri

Şekil 6.6-6.9, A356' nın farklı bilyeli dövme işlemlerine tabi tutulmasından önceki ve sonraki yüzey SM morfolojilerini göstermektedir. Başlangıçta, işlenmemiş numunenin yüzeyi sığ talaşlı işlem çizgilerini içeren bir görüntüye sahiptir. Bunun aksine, tüm bilyalı dövülmüş numuneler, çok sayıda bilya darbesi çukuruna sahip pürüzlü bir yüzey sergilemektedir; bu da yüzeyde yoğun plastik deformasyon olduğunu gösterir. Özellikle, yüzey durumu bilyeli dövmenin yoğunluğuna göre değişmektedir ve tipik olarak zararlı olduğu düşünülen dalgalı yüzey gerilimi konsantrasyonunu potansiyel olarak kötüleştirir. Art arda gelen çarpışmalardan kaynaklanan kümelenmiş örtüşmelerin kanıtları yüzeyde açıkça görülür. Kapsama alanı arttıkça bu darbelerden kaynaklanan tepe noktaları azalarak yüzeyin daha az pürüzlü hale gelmesi sağlanmıştır. Bu değerlendirme, şiddetli dövmeyle giderek azalan Ra değerleri aracılığıyla da kolayca ölçülebilmiş ve kıyaslanabilmiştir

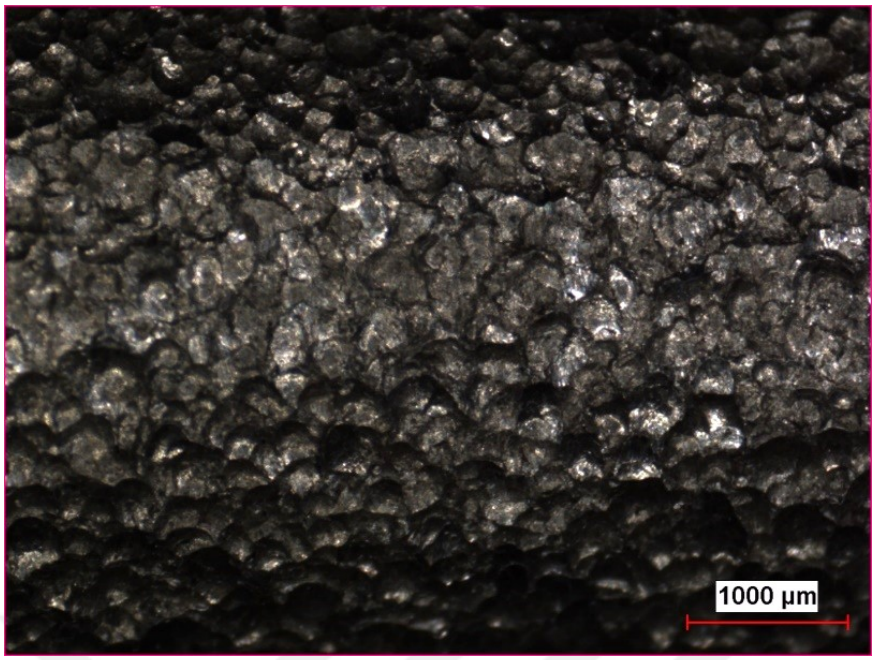
Farklı dövme yoğunluklarının yüzey morfolojisi üzerindeki etkileri çukurların boyutundan değerlendirilebilir. 18N dövülmüş örneğin çukurcuk boyutu, 11N örneğininkinden daha büyüktür ve ayrıca geleneksel bilyalı dövülmüş yüzey topografyası, şiddetli bilyalı dövülmüş örneğe kıyasla daha pürüzlüdür. Dövme işleminde kullanılan çelik bilyalar yüksek kinetik enerjiye sahip olup, Almen yoğunluğu 11N'den 18N' e çıktıkça numune yüzeyinde daha fazla deformasyona neden olurlar. Şiddetli bilyalı dövme örneğinde Almen yoğunluğunun artmasıyla birlikte kapsama alanı artarken yüzeyin daha homojen ve daha küçük çukurlara sahip olması dikkat çekmektedir. Bunun nedeni sertleşen çukurların şiddetli bilyalı dövme sırasında deformasyona karşı daha dayanıklı olmasıdır.



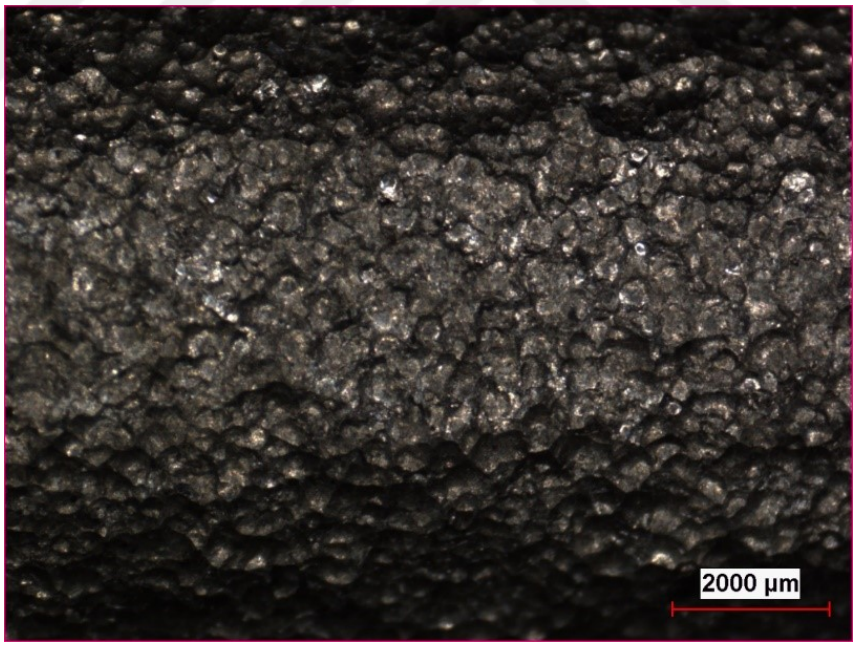
Şekil 6.6. İşlem görmemiş numune stereo mikroskop görüntüleri



Şekil 6.7. 8N Bilyalı dövülmüş numune stereo mikroskop görüntüleri



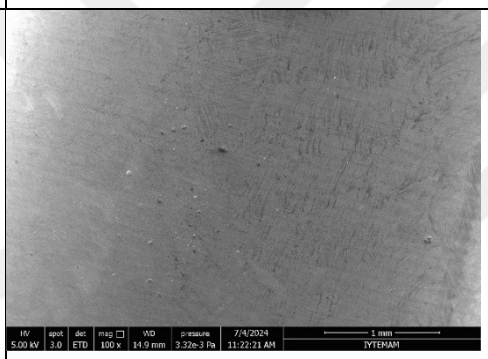
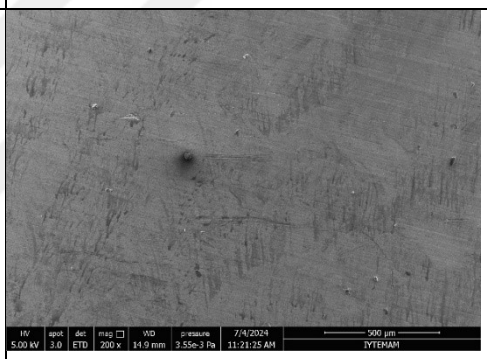
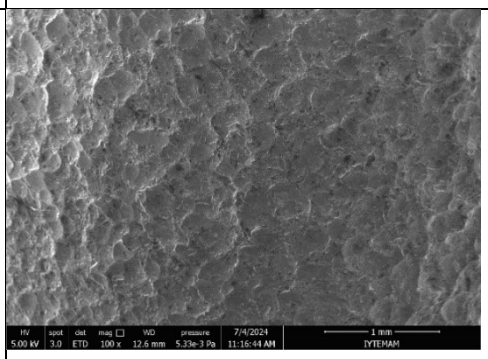
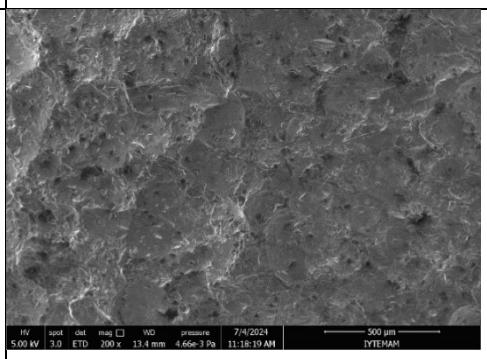
Şekil 6.8. 11N Bilyalı dövülmüş numune stereo mikroskop görüntüleri

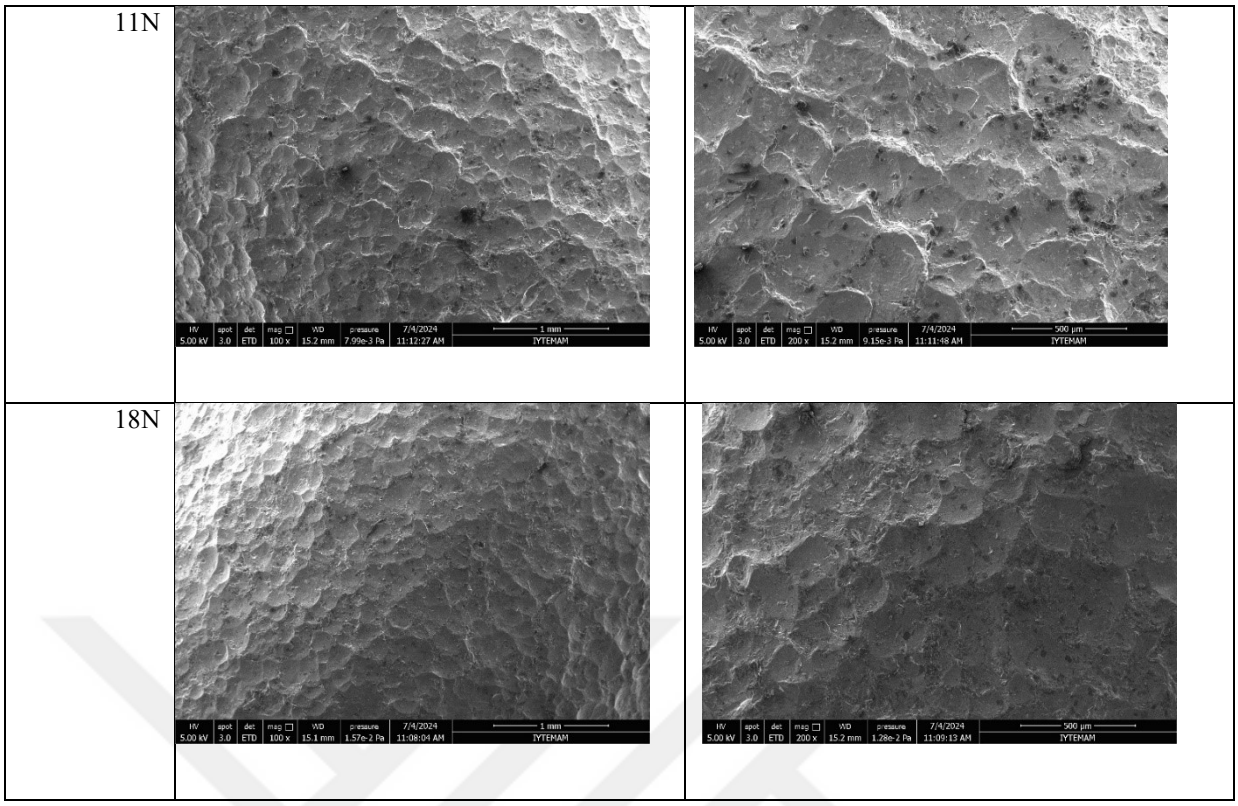


Şekil 6.9. 18N Bilyalı dövülmüş numune stereo mikroskop görüntüleri

6.1.2.2. SEM Yüzey İncelemeleri

A356 alaşımının bilyalı dövme işlemleri öncesi ve sonrası yüzey morfolojisi SEM ile incelenmiştir. Şekil 6.10'da ise bilyalı dövme işlemi uygulanmamış,8N,11N ve 18N bilyalı dövülmüş numunelerin SEM yüzey incelemeleri verilmiştir. İşlenmemiş numunenin yüzeyi pürüzsüz, ancak işlem çiziklidir. Bilyalı dövme uygulanan numunelerde yoğun plastik deformasyon ve çukur oluşumu nedeniyle pürüzlü yüzeyler gözlemlenmiştir. Dövme yoğunluğu arttıkça yüzey pürüzlülüğü azalmış ve yüzey daha homojen hâle gelmiştir. Çukur boyutları dövme yoğunluğuna bağlı olarak değişmiş, 11N şiddetiyle dövülmüş numune 8N'e göre daha büyük çukurlar ve engebeli bir yüzey göstermiştir. 18N şiddetiyle dövülmüş numunelerinde artan yoğunluk, homojen ve küçük çukurlu bir yüzey elde edilmesini sağlamıştır.

Numune Adı		
İşlemsiz Numune		
8N		



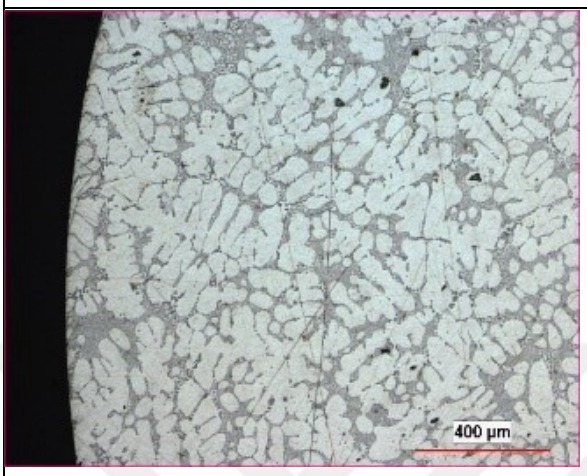
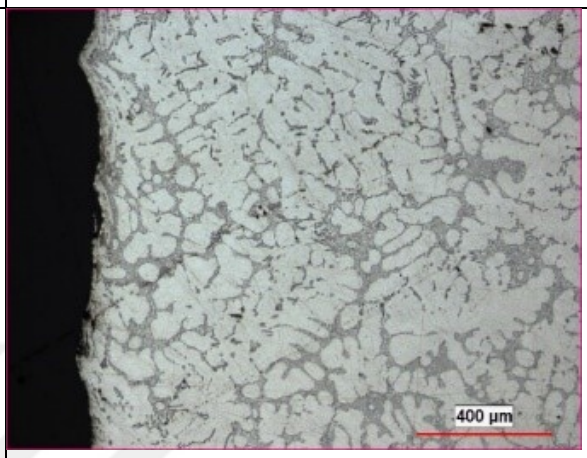
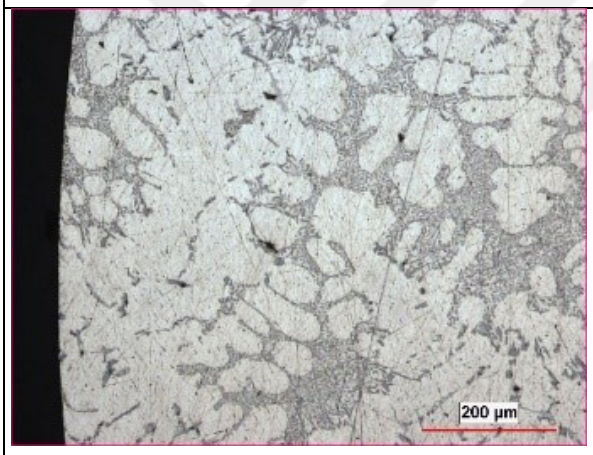
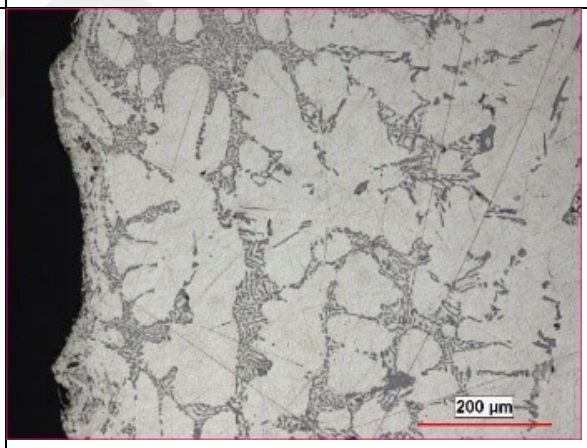
Şekil 6.10. İşlem görmemiş, 8N, 11N ve 18N bilyalı dövülmüş numunelerin SEM incelemeleri

6.2. Mikroyapısal İncelemeler

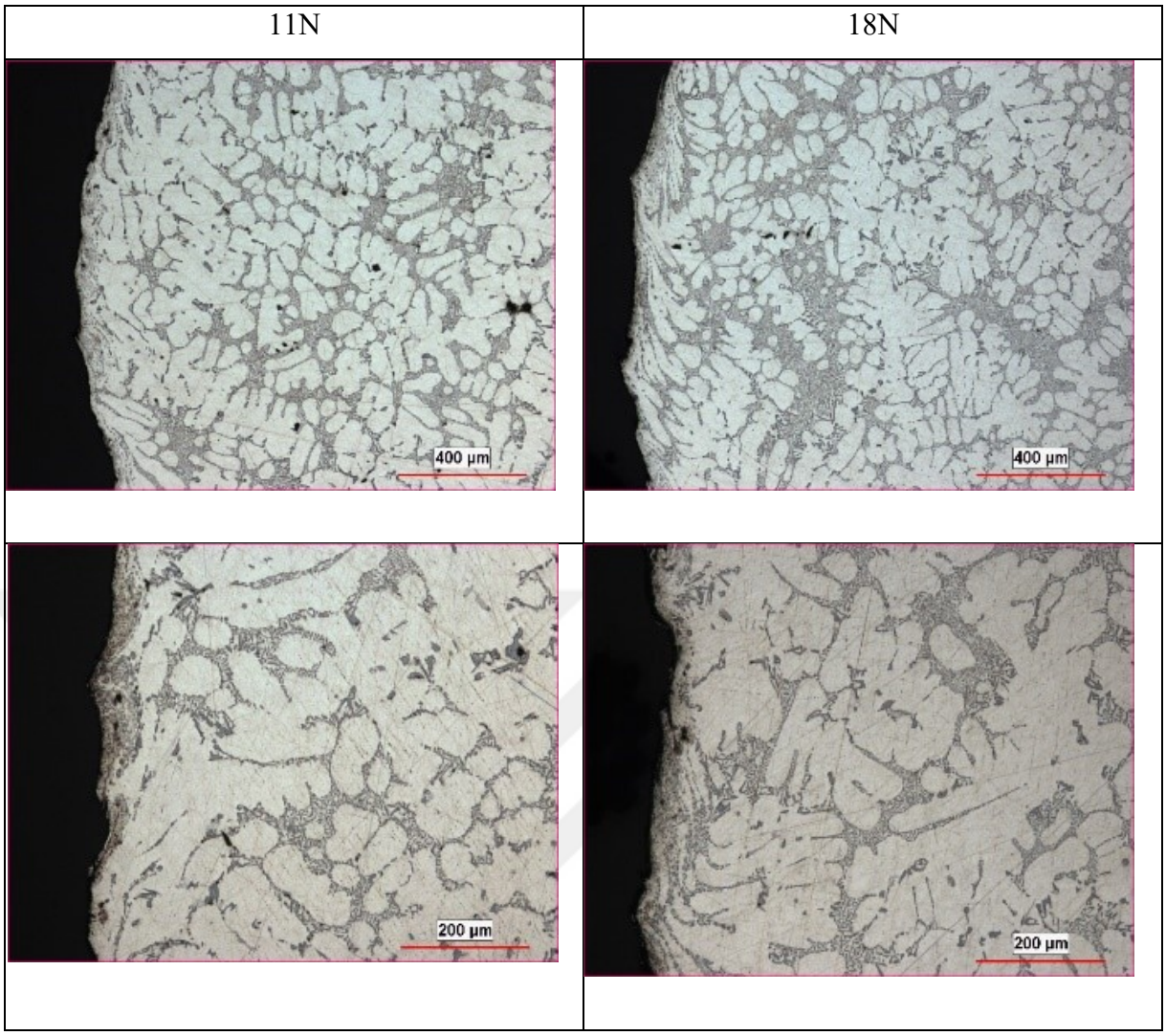
6.2.1. Optik Mikroskop Görüntüleri

A356 alaşımının bilyalı dövme öncesi ve sonrası kesitsel optik mikro grafileri Şekil 6.11 ve 6.12' de gösterilmiştir. Bilyalı dövme (NSP) öncesinde, α-matris ve ötektik yapı içindeki plaka benzeri ötektik Si fazı tüm Al-Si numunelerinde mevcuttu. Tane analizi, plaka benzeri ötektik Si fazının boyutunun küçüldüğü ve ötektik Si fazının alfa dendritleri arasında homojen olarak dağıldığını ortaya koymaktadır. A356 alaşımı bilyalı dövmeye tabi tutulduğunda, yüzeye yakın bölgelerde plastik deformasyon gözlenmiştir. Bilyalı dövme süresi arttıkça, Almen yoğunluğunun artmasıyla bilyalı dövme işleminin şiddeti artmış, plaka benzeri ötektik Si fazının yoğun plastik gerinim enerjisi nedeniyle incelmesine ve yüzey altı bölgesinde yeniden dağılmasına neden olmuştur. Yüzeyin hemen altında, alfa alüminyum taneleri ve ötektik faz, Almen yoğunluğu arttıkça birbirine kenetlenir ve ötektik Si fazları alfa alüminyum içinde dağılır (Şekil 6.12). Bu yeni oluşan yüzey altı tabakasının,

deformasyon sırasında dislokasyon hareketine bariyer görevi görerek mekanik dayanıklılığı artırması muhtemeldir.

Bilyalı Dövülmemiş Numune	8N
	
	

Şekil 6.11. İşlemsiz ve 8N bilyalı dövülmüş numunenin optik mikroskop görüntüleri



Şekil 6.12. 11N ve 18N bilyalı dövülmüş numunenin optik mikroskop görüntüleri

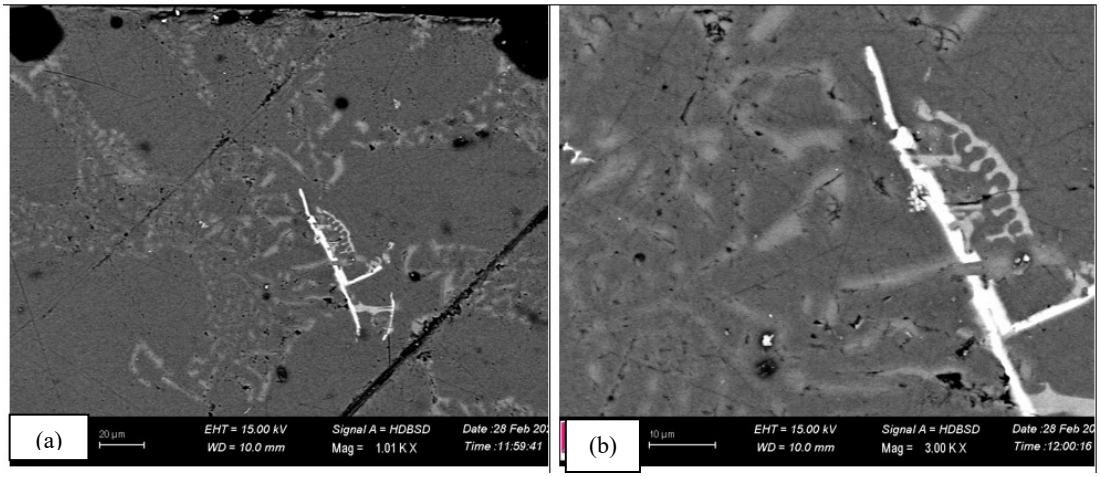
İki farklı bilyalı dövme parametresinin kesit mikroyapıları gösterilmektedir. GBD ve ŞBD numunelerin yüzeylerinde farklı derecelerde plastik deformasyona neden olduğu görülebilir. GBD-11N' de yüzeyin altında ortalama kalınlığı yaklaşık 140 µm olan bir plastik deformasyon tabakası mevcuttur. ŞBD-18N' den sonra da plastik deformasyon katmanları gözlemlenebildi, ancak kalınlık ortalama 115 µm olarak ölçüldü ve 11N şiddetindeki bilyalı dövmeden daha küçüktü. Bu, iki dövme şiddeti karşılaştırıldığında, %200 kaplama miktarı ile dövme yapıldığında numunenin yüzeyinde daha derin bir plastik deformasyon katmanı oluşturabildiğini gösterdi. %400 kaplama ile artık doyuma ulaşmış bir plastik deformasyon tabakası elde edildiği söylenebilir. Aynı bilyalı dövme hava basıncı altında, Al-Si döküm alaşımlarında, geleneksel çoklu bilyalı dövme şiddetli bilyalı dövmeye göre daha derin bir plastik

deformasyon katmanı oluşturabilir. Bilyalı dövülmüş parçaların merkez bölgesinde, matris α ve plaka şekilli ötektik Si fazı tüm Al-Si alaşımı örnekler için mevcuttur. Al-Si alaşımlarındaki plaka şeklindeki ötektik Si faz miktarının heterojen çekirdeklenmeden kaynaklı lokal bir araya gelen bölgelerin mevcut olduğu gözlemlenmiştir. Kaba birincil Si fazı gözlemlenmemiştir ve ayrıca plaka şeklindeki ötektik Si fazı tüm dendritler arası bölgelerde vardır. Al-Si alaşımları bilyeli dövüldüğünde yüzeye yakın bölgede şiddetli plastik deformasyon gözlenmiştir. Bilyalı dövme süresi arttıkça yoğun plastik gerinim enerjisi nedeniyle yüzey bölgesinde plaka şeklindeki ötektik Si fazı incelmiştir. Ek olarak, ciddi plastik deformasyon nedeniyle yüzey altı bölgesinde α-Al taneleri içerisine ötektik Si fazı adeta karışmış ve disperse olmuştur. Gözlem bölgesi yüzeyden derinlere doğru gidildikçe tanelerin ve Si parçacıklarının boyutu artar. Bu mikroyapı değişimi, Si parçacıklarının çevresinde yoğun dislokasyonların oluşması için elverişlidir. Şiddetli plastik deformasyonla oluşan rafine Si parçacığı, dislokasyon çoğalması bölgesi olarak rol oynar.

Morris ve ekibi. ECAP (Equal Channel Angular Pressing-eş kanallı açısal presleme) işlemi sırasında Al alaşımlarının Si içeriği arttıkça mekanik özelliklerin de arttığını bildirmişlerdir. Ancak alaşım kompozisyonunu değiştirmek yerine, tane incelmesinin Si parçacıkları etrafındaki dislokasyonların çoğalması ve yeniden düzenlenmesinden kaynaklandığını da öne sürmüşlerdir. Bu çalışmada, Si parçacıkları etrafındaki yoğun dislokasyonlar birikim potansiyeli Si parçacıklarının bilyeli dövmenin ciddi plastik deformasyonu sırasında dislokasyon çoğalma bölgeleridir (Morris & Munoz-Morris, 2012).

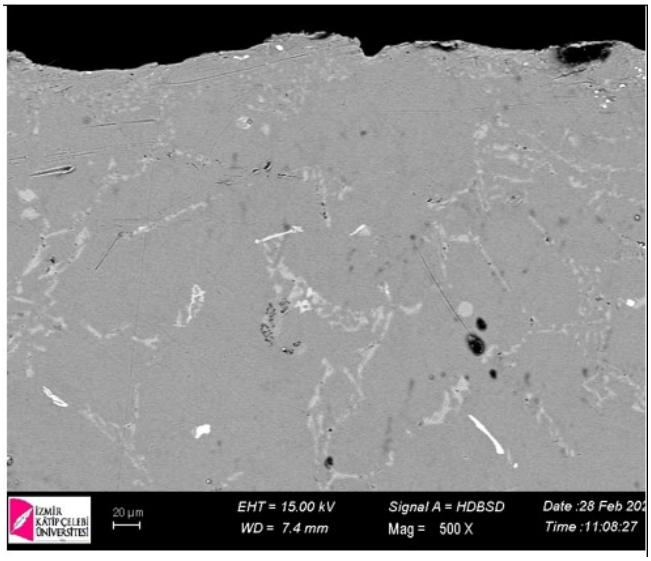
6.2.2. SEM ve EDX Analizleri

Şekil 6.13’ de dökümle üretilen A356 alaşımının kesit SEM incelemesi iki farklı büyütmede verilmiştir. Hem yüzeyin hemen altında hem de derinlerde poroziteler mevcuttur. Ayrıca büyük büyütmede 3 farklı kontrast ve morfolojiye sahip intermetalik fazlar gözlemlenmektedir. Birincil ötektik Si fazı nispeten kaba bir görünüme sahiptir.



Şekil 6.13. Bilyalı dövme öncesi A356 malzemesinin yüzey altı SEM mikroyapısı

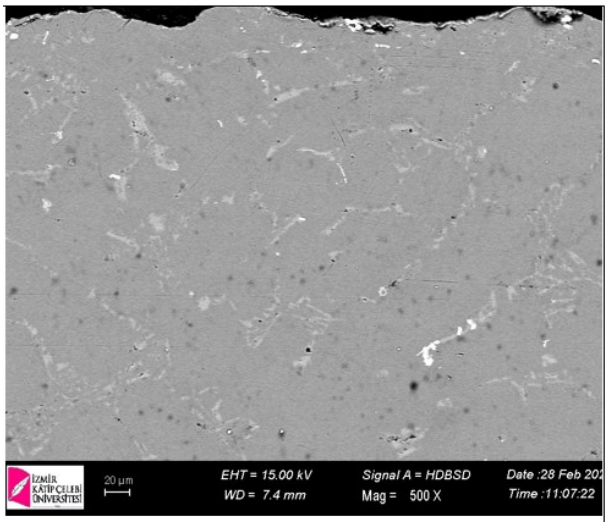
Şekil 6.14' de 8N bilyalı dövülmüş, A356 malzemesinin kesit SEM görüntüleri verilmiştir. Yüzeyin girintili çıkıntılı yapısı ayırt edilmektedir. Yüzeyin hemen altında yer alan birincil Si ötektiğinin küçüldüğü, ancak yüzeyden derinlere doğru daha kaba bir morfolojiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, 8N bilyalı dövme işleminin faz morfolojisini değiştirme etkisinin sınırlı bir derinlikle kısıtlı olduğunu göstermektedir.



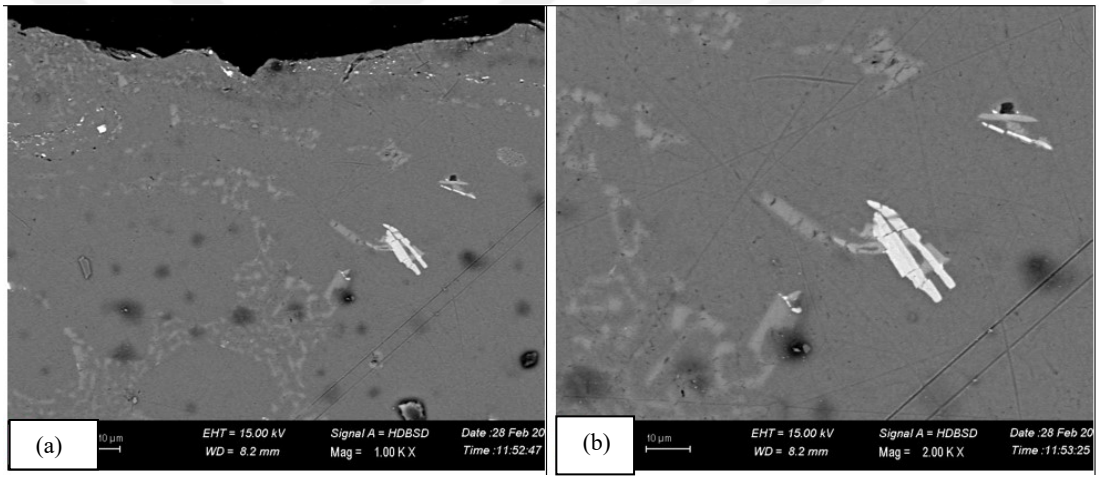
Şekil 6.14. Geleneksel bilyalı dövülmüş (8N) numunenin yüzeyaltı SEM mikroyapıları

Şekil 6.15'te 11N bilyalı dövülmüş, A356 malzemesinin kesit SEM görüntüleri verilmiştir. Yüzeyin girintili çıkıntılı yapısı mevcuttur. Yüzeyin altında ve derinlere doğru birincil Si ötektiğinin ve diğer intermetaliklerin küçüldüğü, intermetaliklerin deformasyon etkisiyle yeniden düzenlenmesi ile kaba alfa-Al fazının yer yer küçüldüğü dikkati çekmektedir. Bu durum, 11N bilyalı dövme işleminin 8N şiddetiyle dövülme etkisine göre faz morfolojisini daha etkili değiştirebildiğini ortaya koymaktadır. Şekil 6.16' da 11N ile dövülmüş numunenin kesit incelemelerinin daha büyük büyütmelerdeki hali sunulmuştur. Buna göre yüzeyin altındaki ötektik yapının derinlere göre daha büyük bir deformasyon etkisiyle inceldiği tespit edilmiştir. Adeta görece yumuşak faz olan alfa-Al'ları içerisinde disperse olmuş, yeni bir yüzey altı tabakası meydana gelmiştir. Şekil 6.16(a) dövme etkisiyle yüzeyde oluşan birkaç çatlağı da görüntülemektedir. Şekil 6.16(b) de deformasyon etkisiyle kırılarak incelen ötektiklerin yakından görüntüsü verilmiştir.

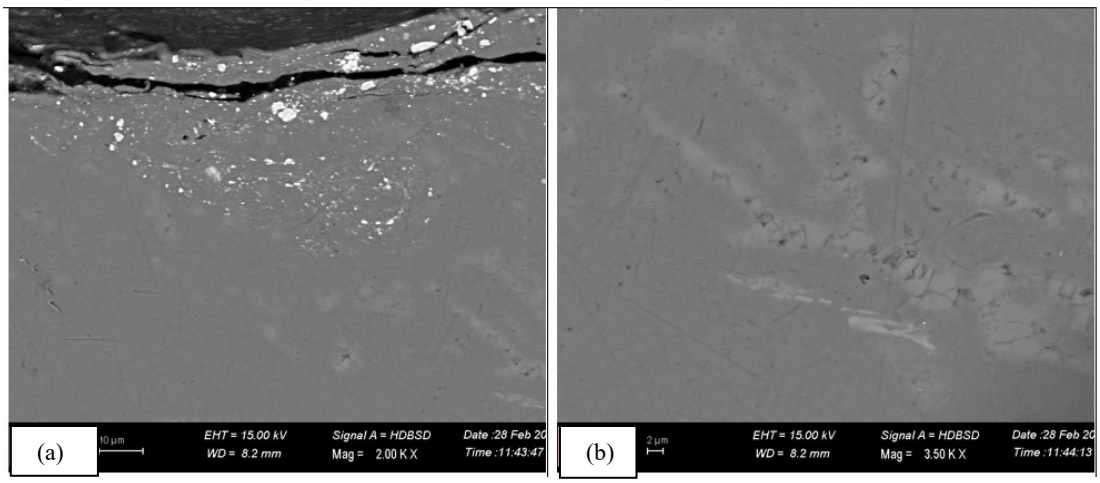
Şekil 6.17'de 18N ile şiddetli bilyalı dövülmüş numunenin kesit SEM mikroyapı incelemelerini sunmaktadır. Şekil 6.17(a) aşırı dövmenin etkisi ile yüzeyde oluşan derin çatlakları göstermektedir. Bilyeli dövme yoluyla rafine edilmiş Si parçacıklarını ayrıntılı olarak gözlemlemek için, bilyalı dövmeyle dövülmüş Al-Si numuneleri kesitsel SEM ile incelenmiştir. Bilyalı dövme sonrası rafine Si parçacıkları yüzeye yakın bölgede dağılmıştır. Al-Si alaşımlarının bilyalı dövülmüş numunelerde rafine edilen Si parçacıklarının boyutu azalmıştır. 8N ve 11N sonrası dövmelerde kısmen çatlaklar oluşsa da 18N ile daha kalın çatlak bölgeleri yer alır. Bu çatlakların dökümden gelen yüzeye açılan porozitelerin, plastik deformasyon etkisi ile yüzeye paralel çatlakların oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bozuk yüzey topografyası oluşumu, SEM ile de net olarak görülmektedir. Şekil 6.17(b) deformasyonun etkisi ile yüzey altı derinliklerinde bile kırılmış büyük birincil Si ötektiğini gösterir. Şekil 6.16(a) ve Şekil 6.17(d) kıyaslandığında aynı büyütmelerde ve 11N ve 18N olacak şekilde iki farklı dövme etkisinin farkı intermetalikler açısından özellikle dikkat çekmektedir. 18N sonucunu gösteren Şekil 6.17(d)' deki intermetalik fazlar Şekil 6.16(a)' ya göre derinlik boyunca daha küçüktür. 18N dövme etkisi ile yüzeyin hemen altında alfa-Al ile adeta karışma etkisi ile disperse olmuş yeni yüzey altı tabakasının kalınlığının daha büyük olduğu gözlemlenmektedir.

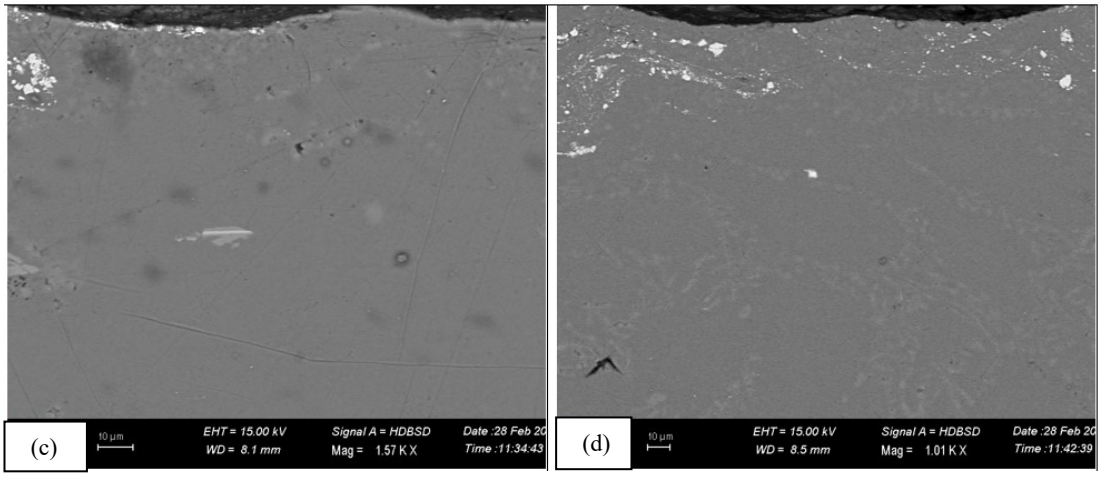


Şekil 6.15. Geleneksel bilyalı dövülmüş (11N) numunenin yüzeyaltı SEM mikroyapıları



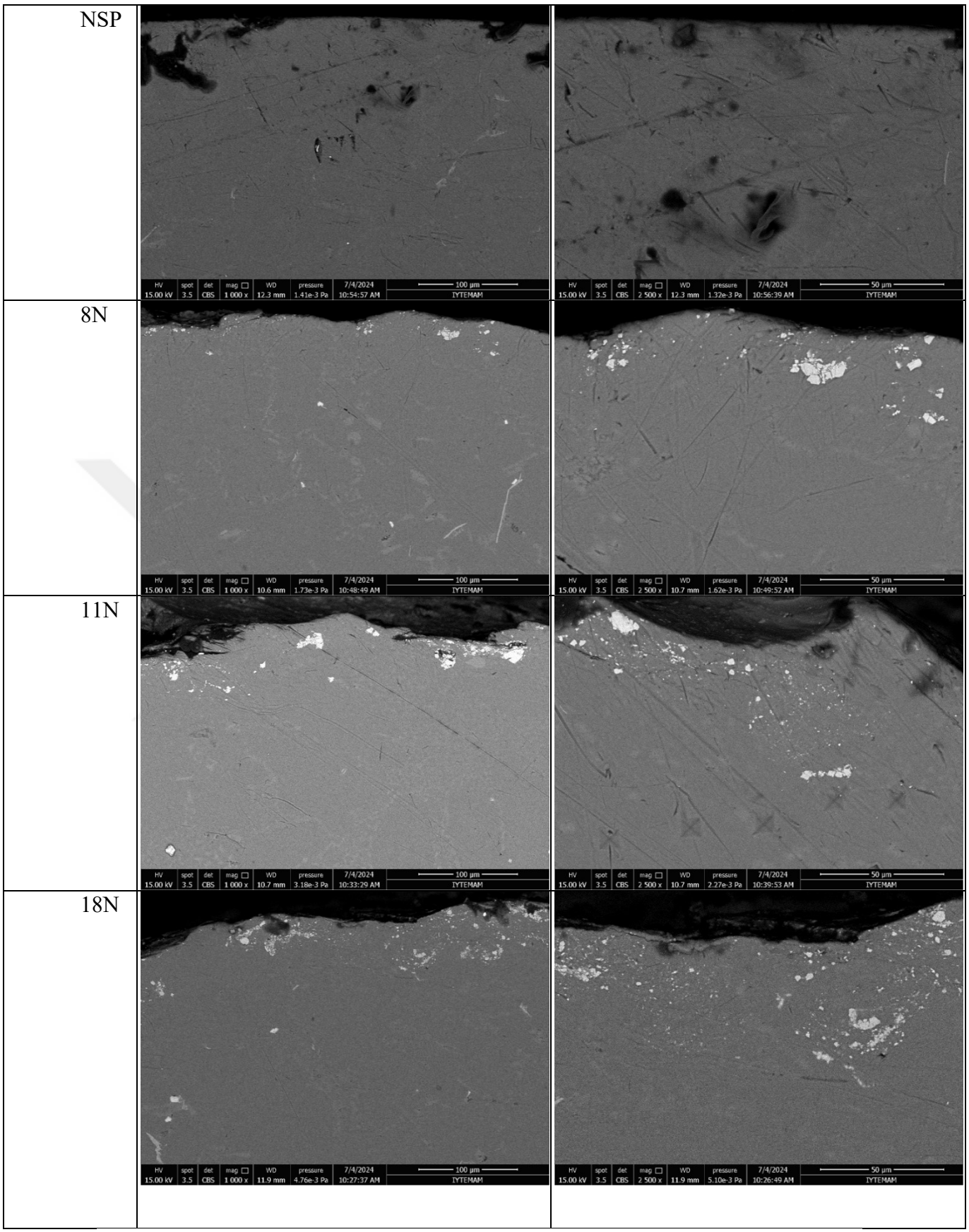
Şekil 6.16. Geleneksel bilyalı dövülmüş (11N) numunenin yüzeyaltı SEM mikroyapıları



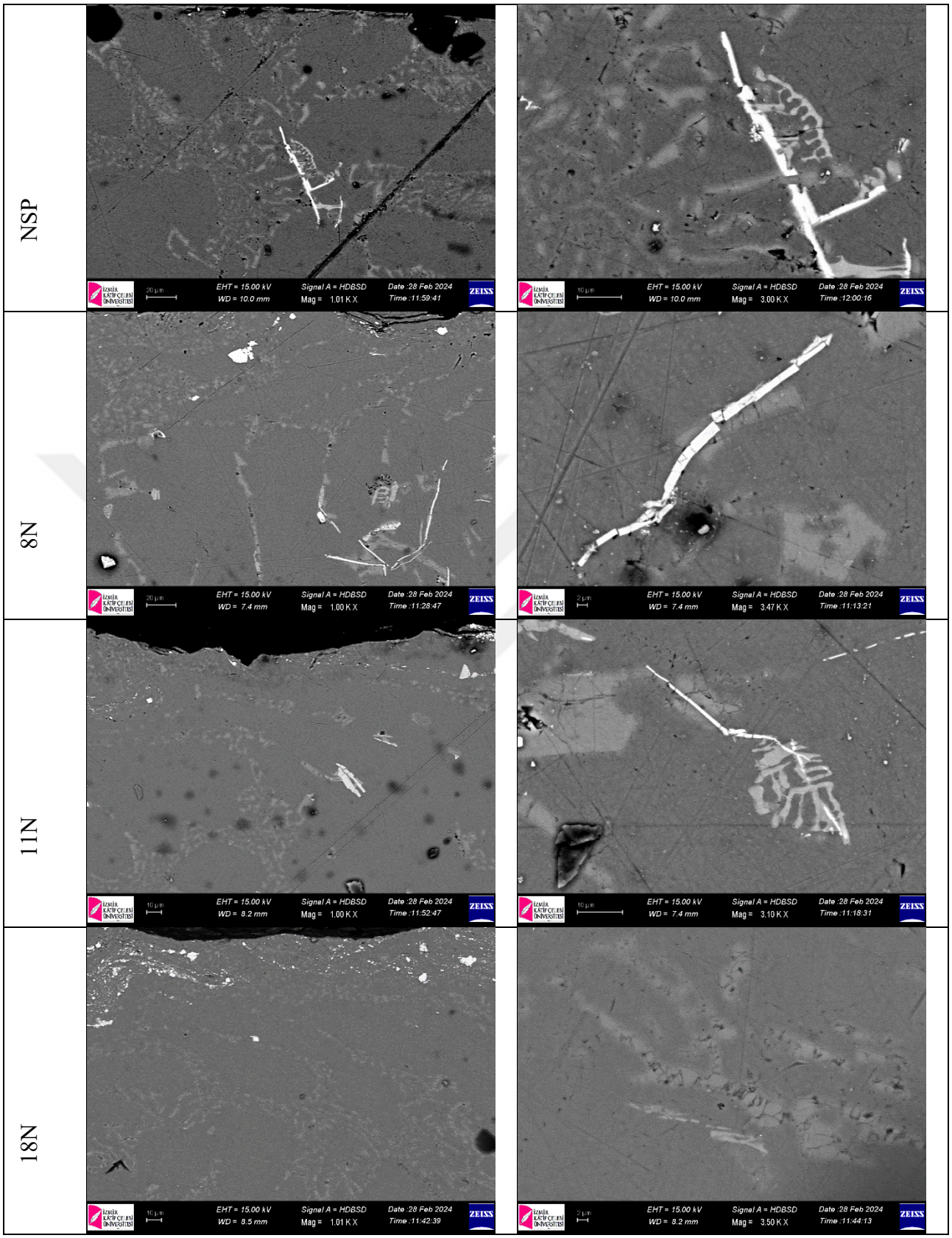


Şekil 6.17. Şiddetli bilyalı dövülmüş (18N) numunenin yüzey altı SEM mikroyapıları

Şekil 6.18 bilyalı dövme öncesi, yüzeyi talaşlı işlenmiş A356 malzemesine ait kesit SEM mikroyapı görüntülerini göstermektedir. Yüzeyin altında oldukça büyük döküm boşluklarının yer aldığı, bazı porozitelerin yüzeye açıldığı dikkati çekmektedir. Döküm prosesinde en yaygın görünen ve gaz giderme işlemlerinin sıvı eriyikte gerçekleştirilmiş olmasına rağmen meydana gelen boyutu 20µm' ye kadar olan poroziteler tespit edilmiştir. Şekil 6.18b' de daha büyük büyütmeye ait mikroyapıda, katılaşma sırasında oluşmuş kılcal çatlaklar tespit edilmiştir. A356 alaşımının kesit görüntüleri, işlemsiz numunede yoğun gözenekli bir yapı ortaya koymaktadır. Numune üzerinde 8N, 11N ve 18N şiddetlerinde bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır. Bilyalı dövme sonrası yapılan incelemeler, yüzey altındaki gözeneklerin sayıca azaldığını ve boyutlarının küçüldüğünü göstermiştir (Şekil 6.18). Ayrıca, uygulanan Almen şiddetinin artmasıyla yüzeyde oluşan çukurcukların genişlediği gözlemlenmiştir. Bu bulgular, bilyalı dövme işleminin A356 alaşımındaki gözeneklilik üzerinde iyileştirici bir etkisi olduğunu ve Almen şiddetinin yüzey topografyasında belirgin değişimlere yol açtığını ortaya koymaktadır.



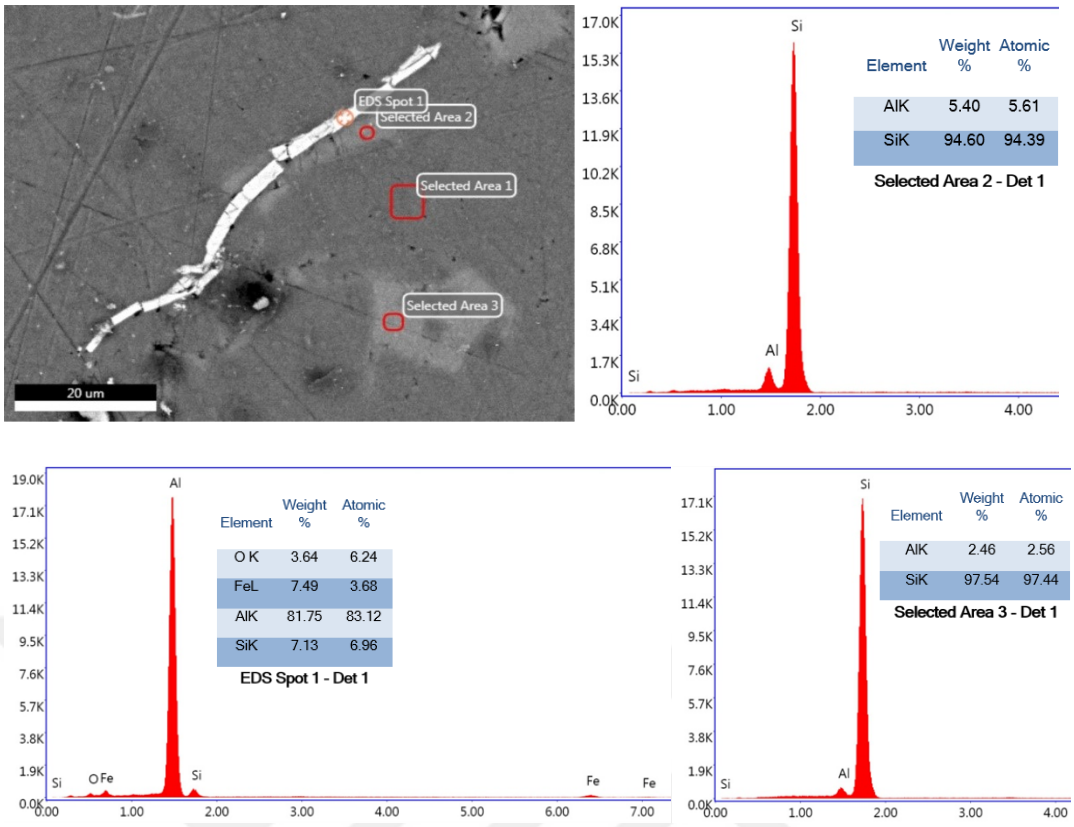
Şekil 6.18. SEM görüntülerinin yüzeydeki çukurlar ve kesitteki poroziteler açısından kıyaslanması



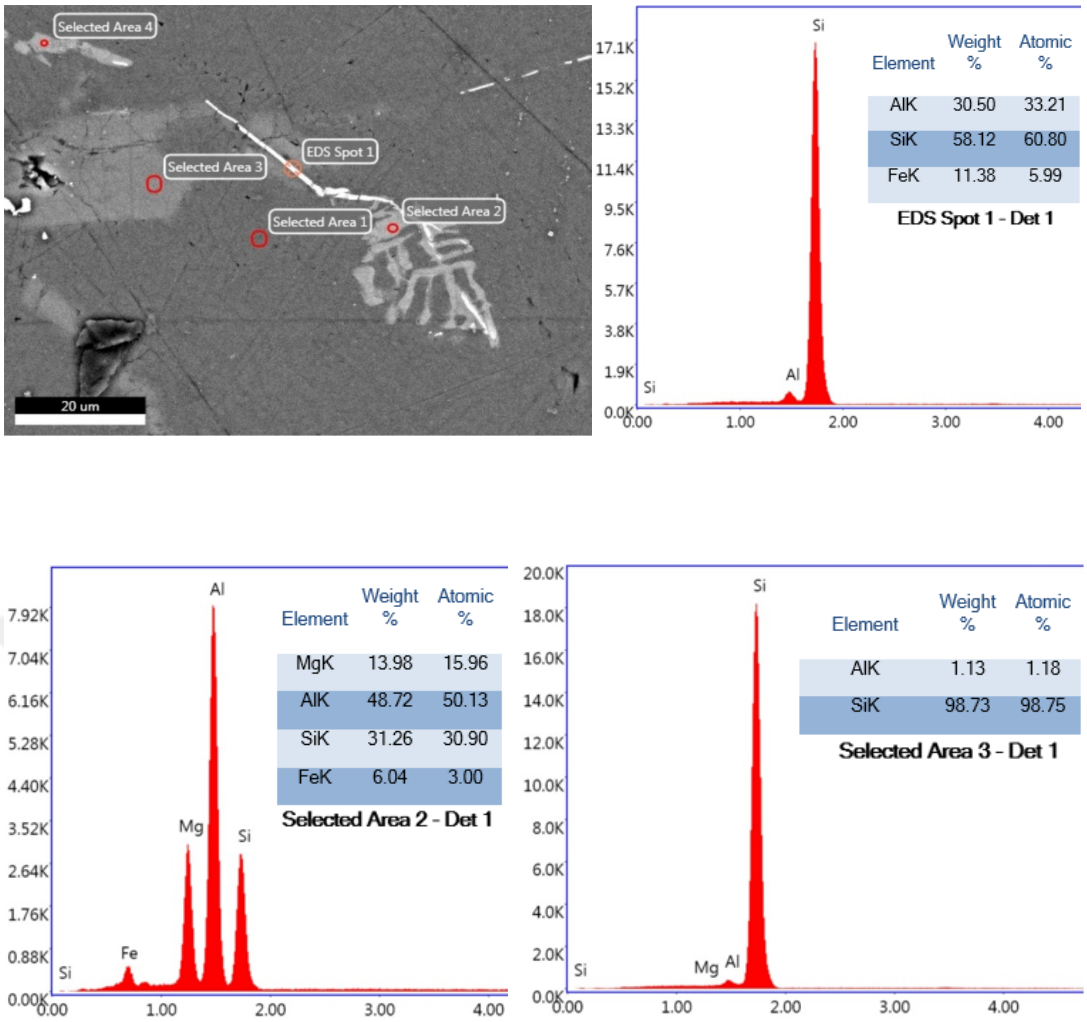
Şekil 6.19. A356 alaşımının bilyalı dövme etkisiyle değişiminin detaylı SEM incelemeleri

Çalışmada, fazların ayırt edilebildiği kesit SEM mikroyapıları Şekil 6.19 da görüldüğü gibi detaylı incelenmiş ve EDX ile de analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına ise Şekil 6.20-6.21-6.22 yer verilmiştir. Bu mikroyapılarda, özellikle yüzeyin hemen altındaki bölgede bilyalı dövme işleminin ikincil ötektik fazlar üzerinde küçültücü bir etkisi olduğu net olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca, uygulanan üç farklı Almen şiddetinde (8N, 11N, 18N) intermetalik fazlarda belirgin kırılmalar meydana geldiği tespit edilmiştir; bu kırılmalar, yüksek büyütme seviyelerinde net bir şekilde görülebilmektedir.

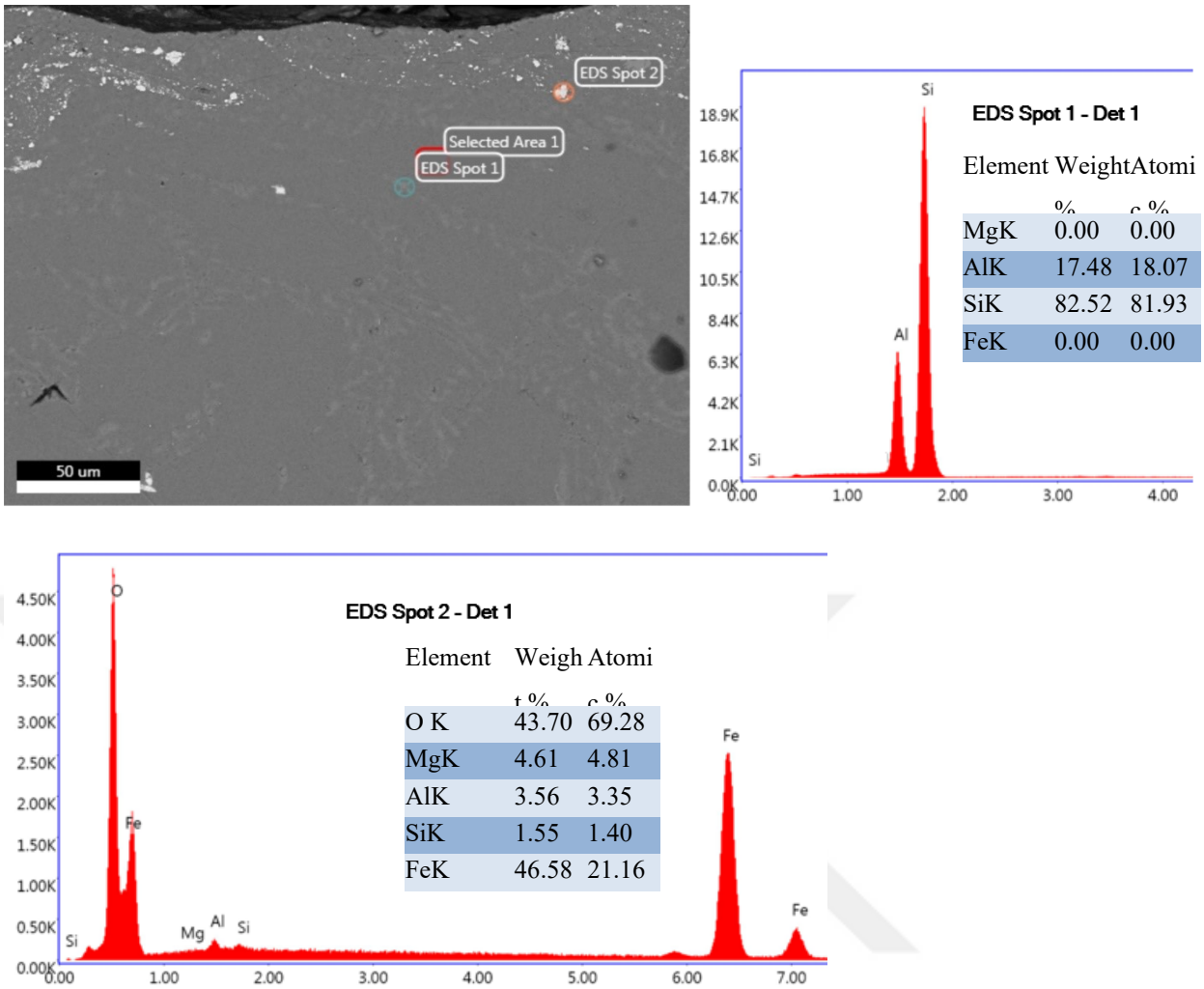
Farklı kontrastlarla ayırt edilen fazların kimyasal bileşimleri EDX analizleriyle doğrulanmış ve sonuçlar Şekil 6.20-6.21-6.22' de sunulmuştur. Özellikle, en gevrek nitelikte olan ve lamel şeklindeki morfolojisiyle mekanik dayanımı düşük olan AlFeSi fazında, 8N Almen şiddetinde dahi birçok kırık gözlenmiştir (Şekil 6.20). 8N şiddetindeki dövmede Si partikülünün kırılmaya uğramadığı tespit edilmiştir (Şekil 6.20). 11N bilyalı dövme etkisi ile büyük rozet tipi Si partikülünde kırılmalar ve elbette gevrek ve iğne yapılı AlFeSi intermetaliğinde kırılmalar mevcuttur. Mg_2Si fazında ise Şekil 6.21 de görüldüğü gibi herhangi bir kırılma gözlemlenmemiştir. Yüksek şiddetli dövme koşullarında (18N) ise rozet benzeri yapıda bulunan yüzeyin 140 µm derinliklerinde bile birincil Si fazlarının şiddetli plastik deformasyon etkisi ile şekil değişimi ve kırılmalara uğradığı saptanmıştır (Şekil 6.19 ve Şekil 6.22). Şekil 6.22, SEM görüntülerinde dikkati çeken düzensiz beyaz renkli alanların analizini sunar. Bu yapıların demir oksit fazlarını temsil ettiği belirlenmiş olup, bu fazlar EDX analizleriyle doğrulanmıştır. Bu yapılar, parlatma sırasında ortamdan bulaşmıştır. Tüm SEM ve EDX sonuçları, bilyalı dövme işleminin fazların morfolojisi üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 6.20. 8N GBD1 işlemi sonrası A356 alaşımının fazlarının SEM/EDX analizi



Şekil 6.21. 11N GBD işlemi sonrası A356 alaşımının fazlarının SEM/EDX analizi

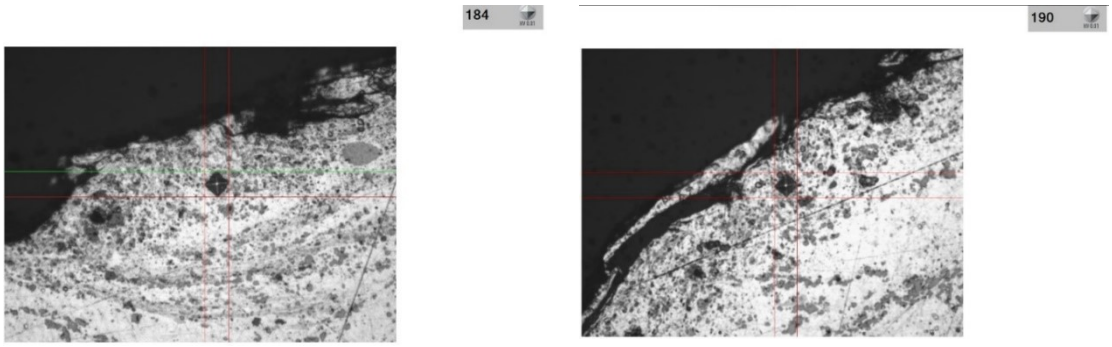


Şekil 6.22. 18N ŞBD işlemi sonrası A356 alaşımının fazlarının SEM/EDX analizi

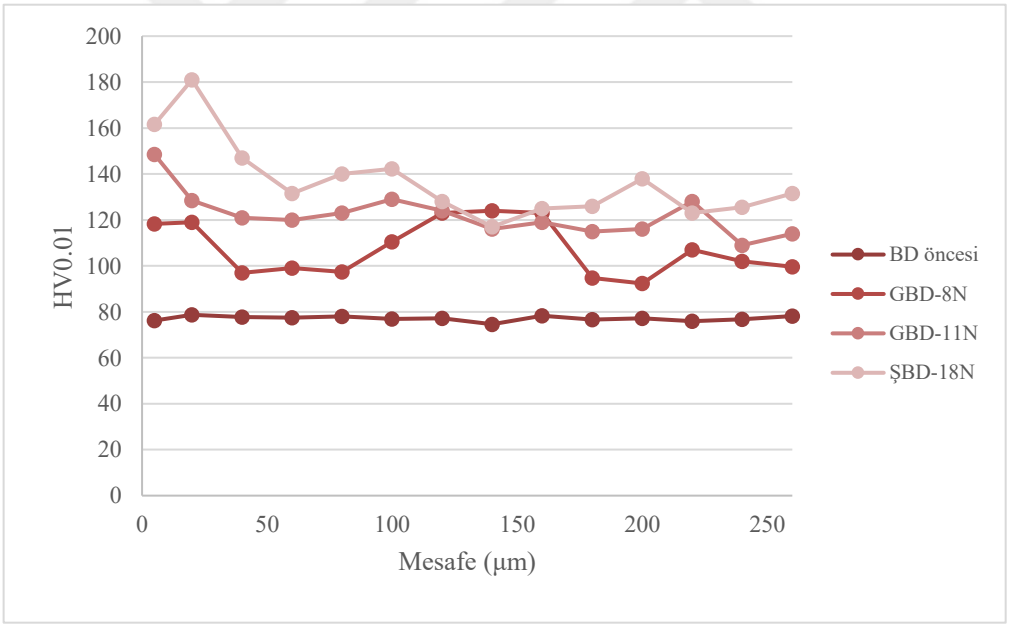
6.3.Mikrosertlik Ölçümleri

Kesitten mikrosertlik ölçümleri yüzeyin hemen altından başlanarak derinlik boyunca gerçekleştirilmiştir. Örnek mikrosertlik ölçüm izi görüntüleri Şekil 6.23' de verilirken, derinliğe bağlı sertlik değişimlerini sunan grafik Şekil 6.24' de verilmiştir. A356 Al-Si alaşımına sırasıyla 8N, 11N ve 18N Almen şiddetlerinde bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır. İşlem öncesinde ölçülen ortalama sertlik değeri 80 HV olarak belirlenmiştir. Uygulanan Almen şiddeti arttıkça, yüzey sertliğinde anlamlı bir artış gözlemlenmiştir. Sertlik değerleri sırasıyla 8N için %50 artışla 120 HV'ye, 11N için %81,25 artışla 145 HV'ye ve 18N için %127,5 artışla 182 HV'ye yükselmiştir. Ayrıca, bilyalı dövme işlemi sonucunda tüm numunelerde 250 mikrometre derinliğe kadar genel bir sertlik artışı kaydedilmiştir. Bu durum, artan Almen şiddetinin yüzey altındaki mikro yapıda kalıcı deformasyon ve sertleşmeye yol açtığını, dolayısıyla malzemenin mekanik dayanımının iyileştiğini göstermektedir. Bu durum, yoğun

şekilde dağılan Si parçacıkları ve bilyalı dövme işlemi sırasında Si parçacıkları etrafında meydana gelen dislokasyon düzenlemelerinin yol açtığı tane incelmesi ile ilişkilendirilmektedir. Mikroyapı bölümünde açıklanan, yüzeyin hemen altında yoğun şekilde küçük yapıda dağılmış olan Si partikülleri Şekil 6.23' da fark edilmektedir.



Şekil 6.23. Örnek mikrosertlik ölçüm izleri

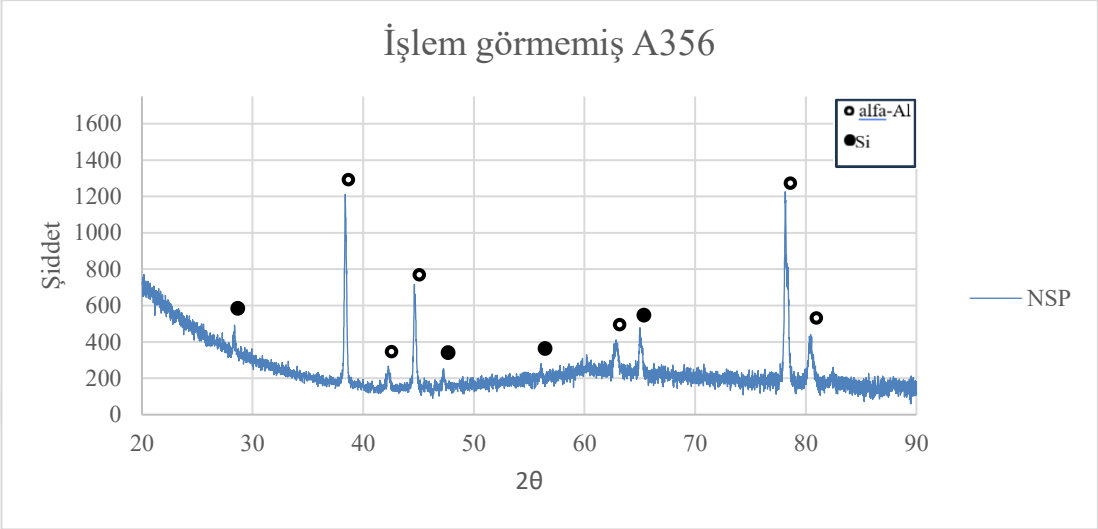


Şekil 6.24. Mikrosertliğin derinliğe bağlı değişimi

6.4. XRD Analizi

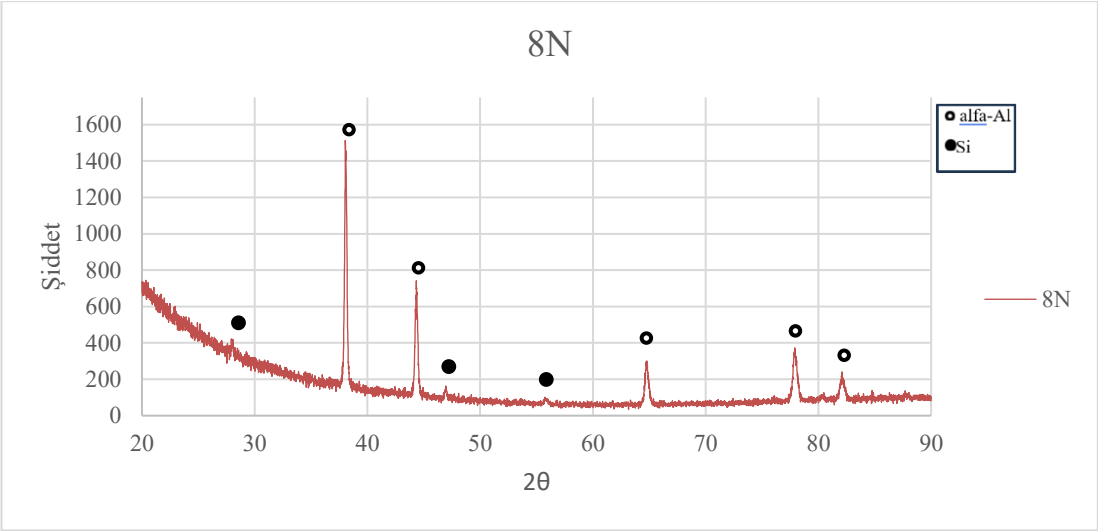
Bu çalışmada, farklı Almen şiddetlerinde bilyalı dövme işlemi uygulanmış numunelerin kristal yapı değişimleri X-Işını Difraksiyonu (XRD) yöntemi ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bilyalı dövme işleminin malzemelerin kristal yapısında önemli mikroyapısal değişikliklere neden olduğunu ve bu değişimlerin

malzemenin mekanik özelliklerine doğrudan etki ettiğini göstermektedir. Aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır:



Şekil 6.25.İşlem görmemiş numune XRD grafiği

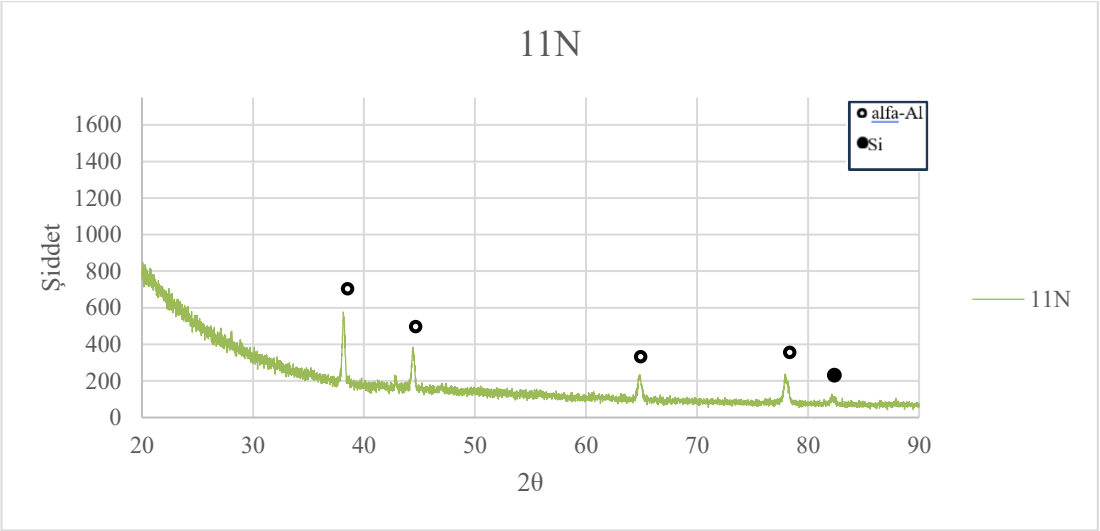
Şekil 6.25 de grafiği verilen bilyalı dövme uygulanmamış numune, kristal yapısında herhangi bir değişiklik gözlemlenmeyen kontrol numunesi olarak kullanılmıştır. XRD sonuçları, net ve keskin difraksiyon pikleriyle malzemenin orijinal faz yapısının korunduğunu göstermiştir. Bu sonuç, malzemenin plastik deformasyon ve iç gerilim oluşumu yaşamamış halini temsil etmektedir.



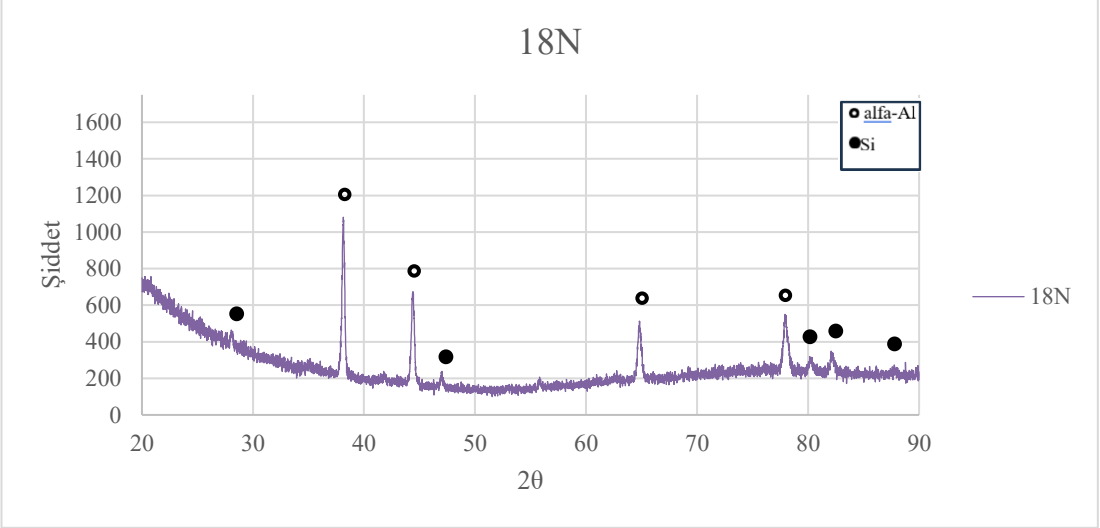
Şekil 6.26. 8N bilyalı dövülmüş XRD grafiği

Şekil 6.26 da grafiği verilen 8 N şiddetle bilyalı dövme uygulanmış numune, malzeme üzerinde ilk mikro yapısal değişikliklerin gözlemlendiği seviyedir. XRD analizleri, pik genişlemesi ve hafif kaymalarla plastik deformasyonun başladığını ve iç gerilimlerin oluştuğunu ortaya koymuştur. Bu durum, dövme işleminin malzemenin sertlik ve mukavemet gibi mekanik özelliklerinde iyileşmelere neden olduğunu göstermektedir.

Şekil 6.27 de grafiği verilen 11 N şiddetli bilyalı dövme uygulanmış numune, kristal yapıdaki daha belirgin değişiklikleri ortaya çıkarmıştır. Pik genişlemelerindeki artış ve faz yer değişiklikleri, malzemenin iç gerilimlerinin arttığını ve malzemenin daha büyük plastik deformasyona maruz kaldığını göstermiştir.XRD pik genişlemesi ve kayması bu tür pik genişlemelerinin malzemenin yorulma dayanımı ve mekanik özelliklerinde önemli artışlar sağladığını ortaya koymaktadır.

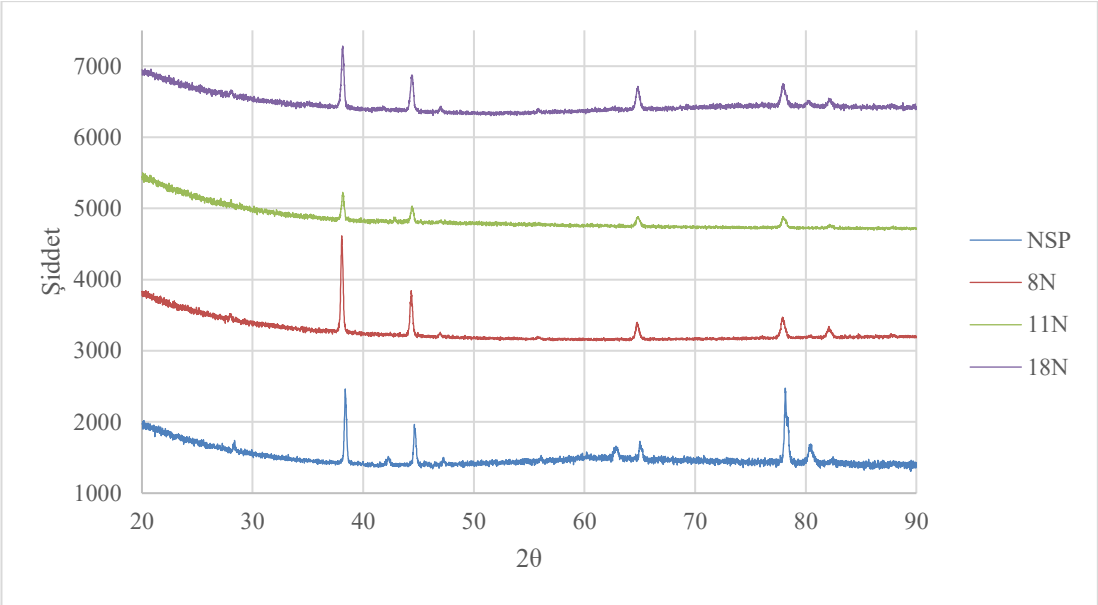


Şekil 6.27. 11N bilyalı dövülmüş XRD grafiği

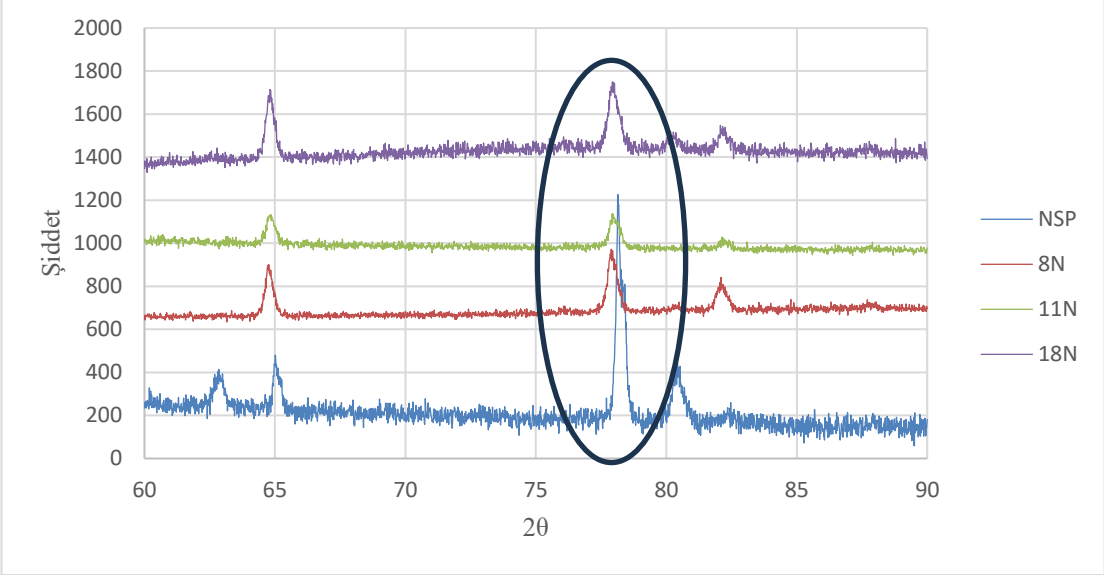


Şekil 6.28. 18N bilyalı dövülmüş XRD grafiği

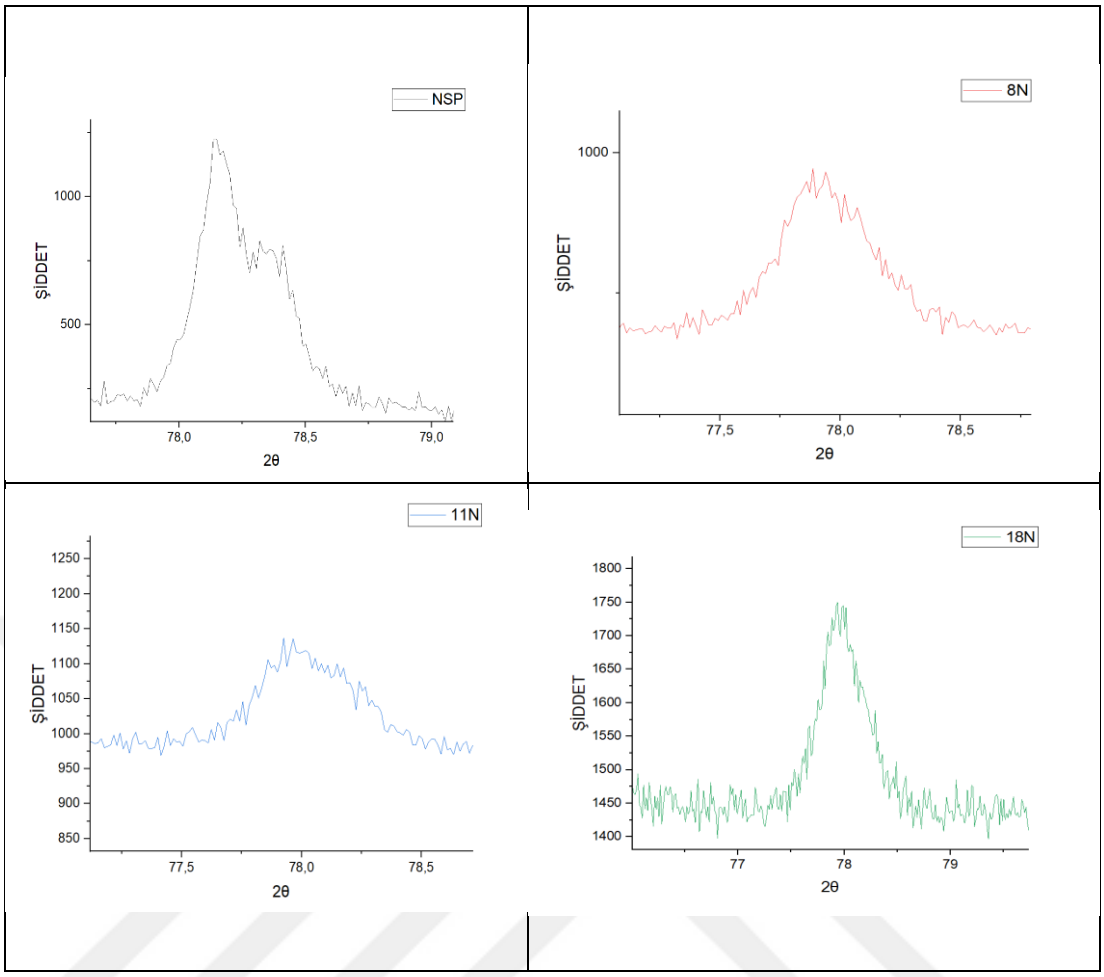
Şekil 6.28 de grafiği verilen 18 N Almen şiddeti ile bilyalı dövme uygulanmış numune, en yüksek şiddetle yapılan dövme işlemi sonucunda en büyük kristal yapı değişikliklerini göstermiştir. Difraksiyon piklerinde belirgin genişlemeler ve faz değişiklikleri, malzemenin mikroyapısal deformasyonunun yoğun olduğunu ve yüksek içsel gerilimlerin oluştuğunu göstermiştir. Bu dövme seviyesinde, malzemenin sertliğinde ve dayanımında önemli ölçüde artış sağlanmıştır.



Şekil 6.29. XRD paternlerinin kıyaslaması



Şekil 6.30. XRD paterninde bilyalı dövme işlemi sonrası FWHM değişimi

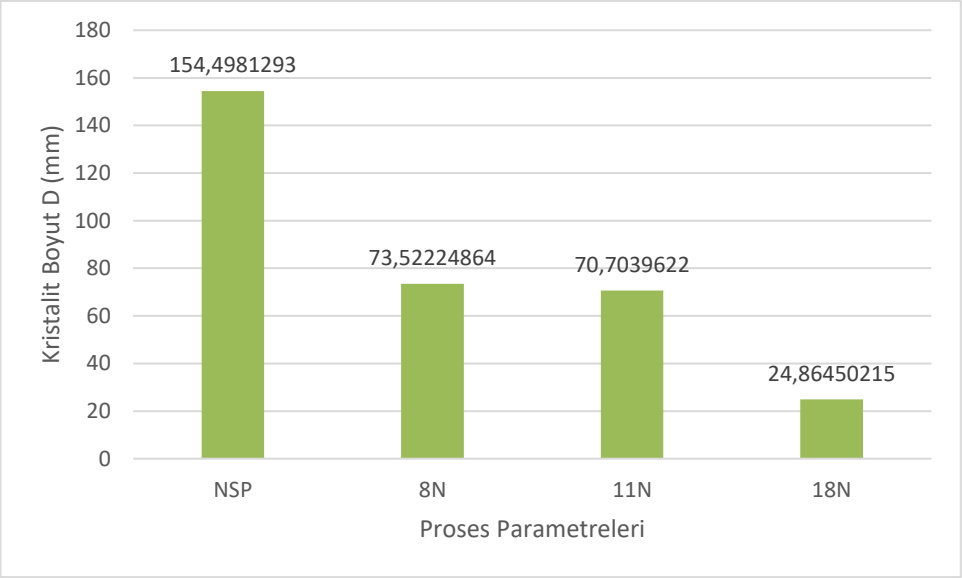


Şekil 6.31. İşaretli pikin detay incelenmesi

Şekil 6.29' da XRD patternlerinin kıyaslanmış hali verilmiştir. Şekil 6.30'da görülen elips içine alınmış alan için Şekil 6.31 de daha detaylı olarak büyütülmüş ve FWHM değeri ölçümü yapılmış ve oradan kristalit boyuttaki değişimler gözlemlenmiştir. Şekil 6.32'de görüldüğü üzere Almen şiddeti arttıkça kristalit boyutlarda doğrusal bir şekilde azalma olmuştur. Şiddetli dövmenin etkisi ile latis mikro-gerinimleri oldukça küçülmüş, öte yandan dislokasyon yoğunlukları da X-ışını penetrasyon derinliğinde arttığı raporlanmıştır.

Tablo 6.1. Bilyalı dövme sonucunda meydana gelen kristalit boyutu (nm), latis mikro-şekil değişimi (%) ve dislokasyon yoğunluğu (mm^{-2})

Numune İsmi	2θ	θ	FWHM (β)	λ	Kristalit boyutu D (nm)	C	ε	ρ
NSP	78,24	39,12	0,3596	0,15406	154,4981293	4	0,00236991	0,0000418942
8N	77,94	38,97	0,3820	0,15406	73,52224864	4	0,000515431	0,0001849960
11N	78,03	39,015	0,4654	0,15406	70,7039622	4	0,000529151	0,0002000380
18N	77,98	38,99	0,4925	0,15406	24,86450215	4	0,001515019	0,0016174858



Şekil 6.32. Kristalit boyut değişim grafiği

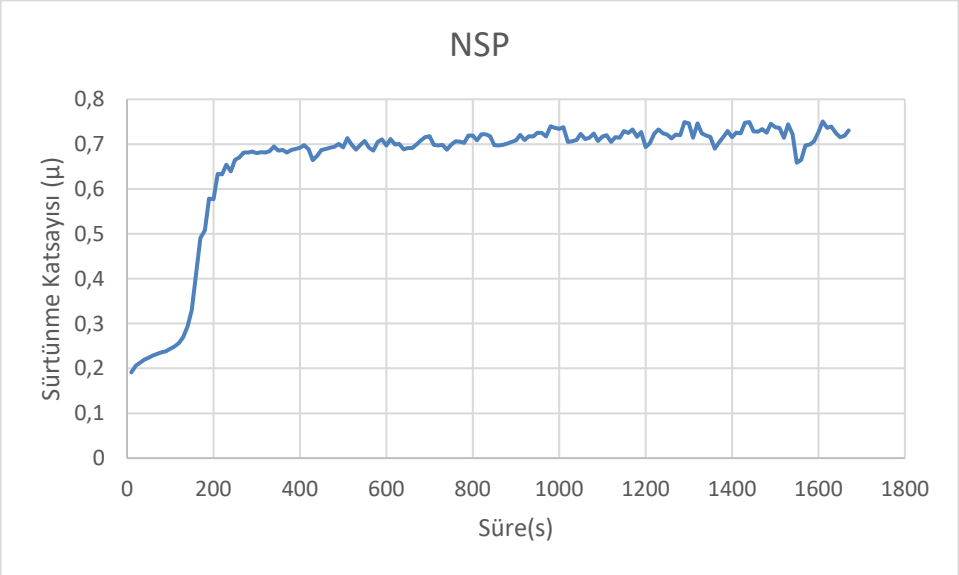
Başka bir araştırmada, bilyalı dövme işlemi 304 kalite paslanmaz çelik plakaya uygulandığında, kristallerin boyutları ve gerinim oranları deformasyon nedeniyle değişmektedir. Gelişen ultra ince tanelerin FWHM analizi pikler kullanılarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte, bilyalı dövmenin malzemelerde basma kalıntı gerilmeleri yarattığı bilinmektedir. Çoklu bilyalı dövme, kristalitin boyutunu önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Daha büyük bir genişleme, bilyalı dövme sonrası XRD piklerinde ortaya çıktı. Bu, gerilim sertleşmesinin neden olduğu yüksek deformasyon yoğunluğuna ve tane incelmesinin yüzeye yakın bölgelerde güçlü olmasına bağlanmaktadır (Dhakal & Swaroop, 2020).

Yapılan çalışmalar, XRD piklerinin maksimum yarı yüksekliği (FWHM) ile malzemenin sertlik değerleri arasında bir ilişki bulmuştur (Chen, Hing, Jiang, & Zhan, 2020). Bu araştırmanın sonuçları mevcut literatürle tutarlıdır.

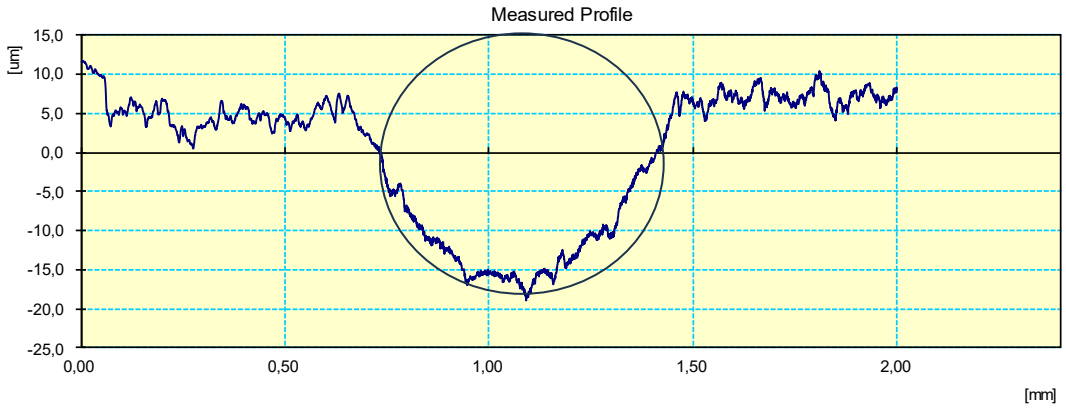
6.5. Aşınma Direnci

6.5.1. 1N Yük Altında ve 1670 s süresinde A356 için Aşınma Testi

Şekil 6.33, 35, 37 ve 39' da dövülmemiş,8N,11N ve 18N dövülmüş numunenin 1N altında aşınma testi sürtünme grafiklerine yer verilirken Şekil 6.34, 36, 38 ve 40' da aşınma izinin iki boyutlu grafik üzerinde gösterimine yer verilmiştir.

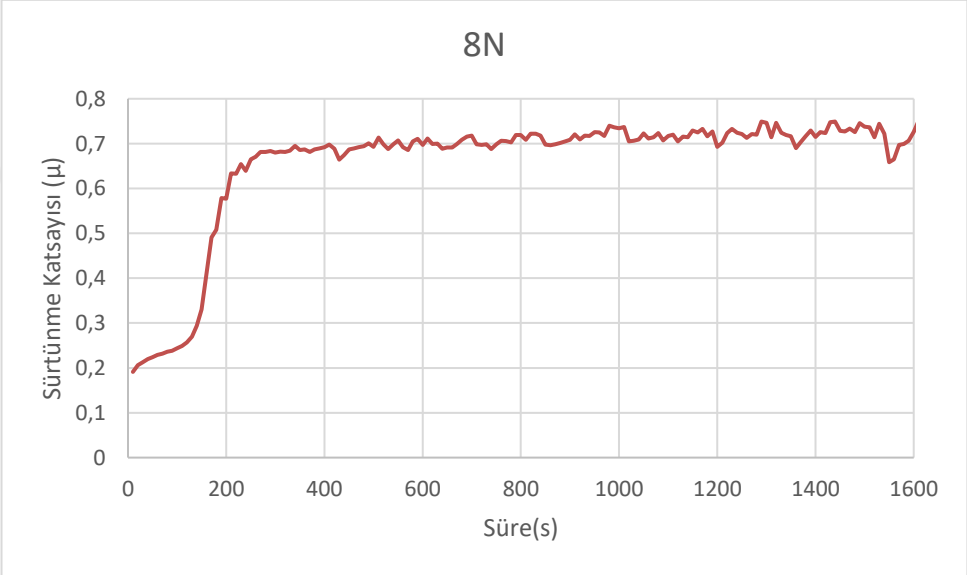


Şekil 6.33. İşlem görmemiş numunenin 1N altında aşınma testi sürtünme grafiği

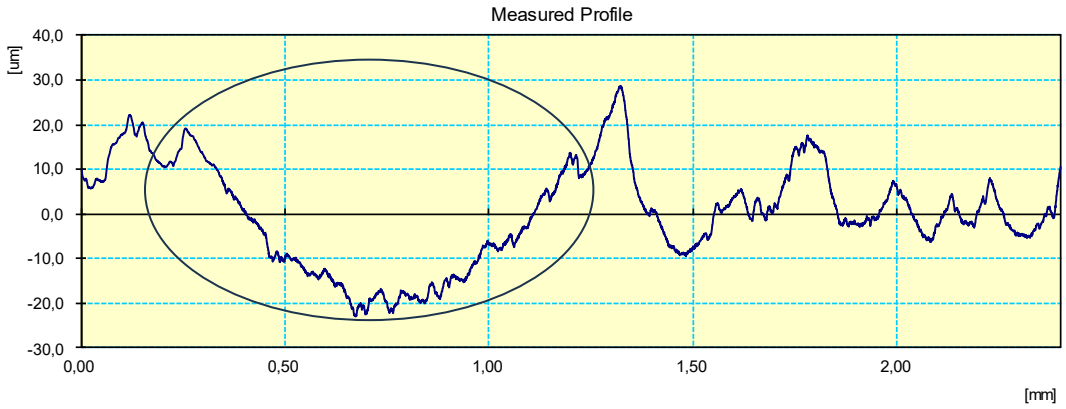


Şekil 6.34. İşlem görmemiş numuneye uygulanan 1N aşınma testi iz alanı

6.5.2. 1N Yük Altında ve 1670 s süresinde 8N Bilyalı Dövülmüş A356 için Aşınma Testi

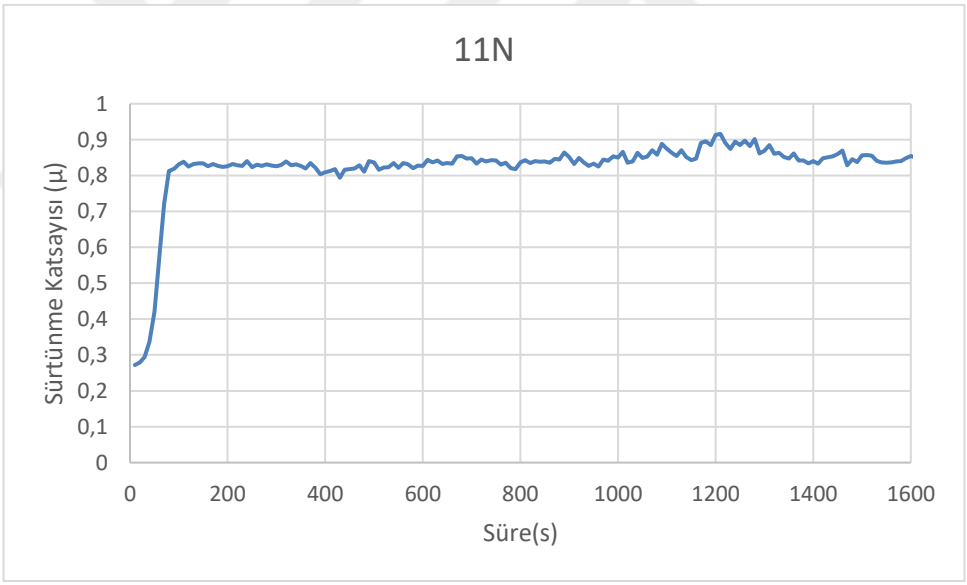


Şekil 6.35. 8N Bilyalı dövülmüş 1N altında aşınma testi sürtünme grafiği

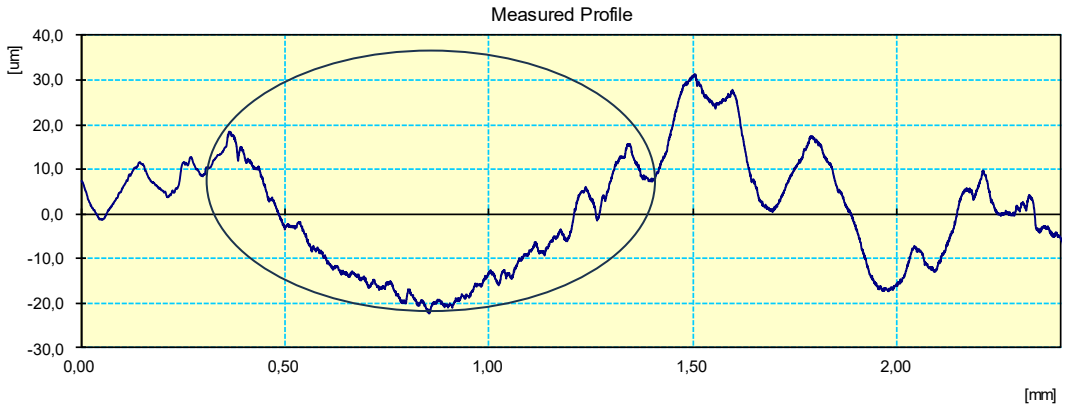


Şekil 6.36. 8N numuneye uygulanan 1N aşınma testi iz alanı

6.5.3. 1N Yük Altında ve 1670 s süresinde 11N Bilyalı Dövülmüş A356 için Aşınma Testi

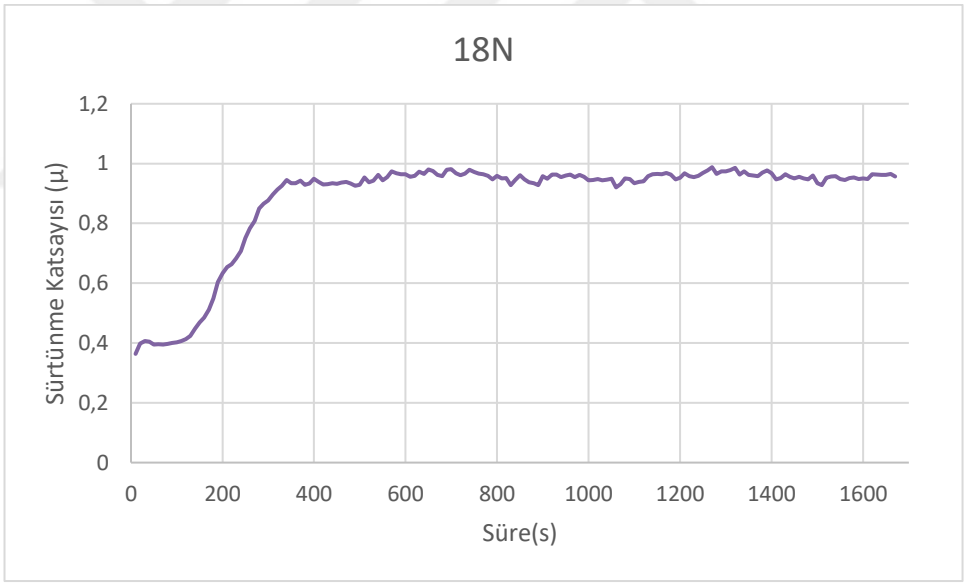


Şekil 6.37. 11N Bilyalı dövülmüş 1N altında aşınma testi sürtünme grafiği

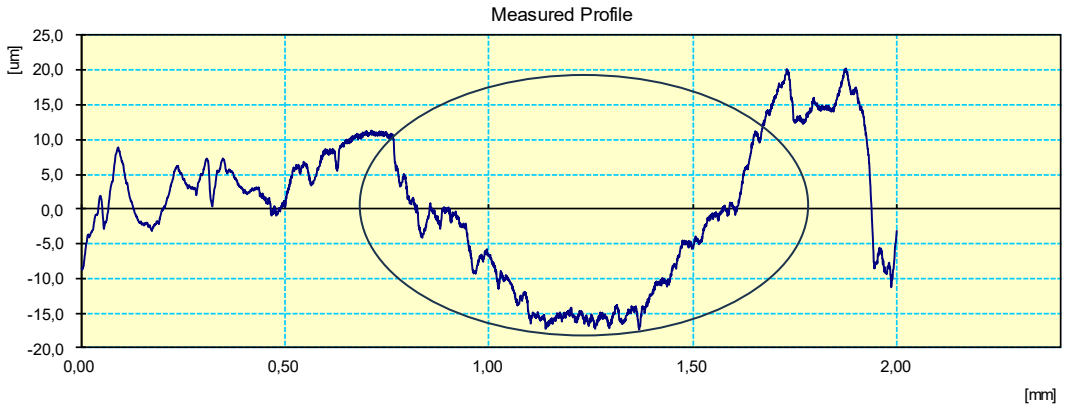


Şekil 6.38. 11N numuneye uygulanan 1N aşınma testi iz alanı

6.5.4. 1N Yük Altında ve 1670 s süresinde 18N Bilyalı Dövülmüş A356 için Aşınma Testi



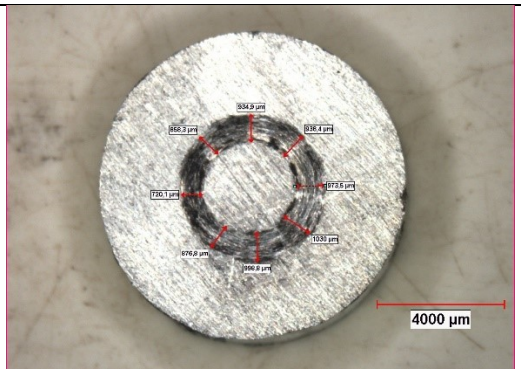
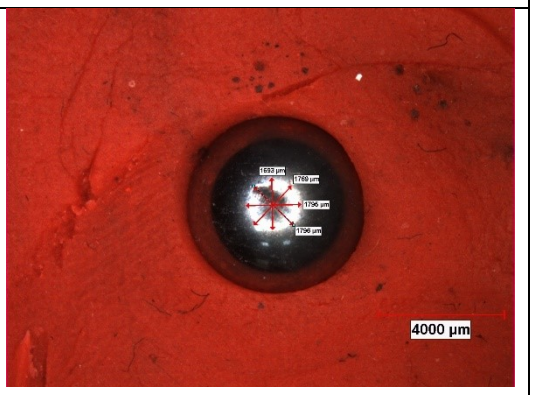
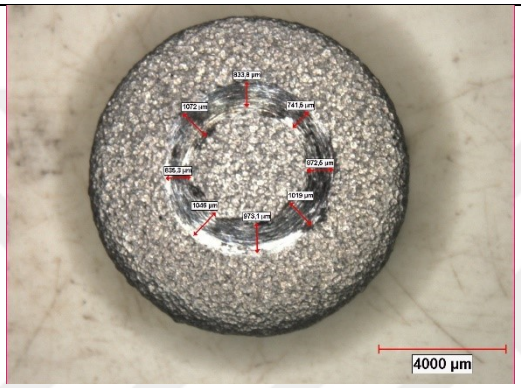
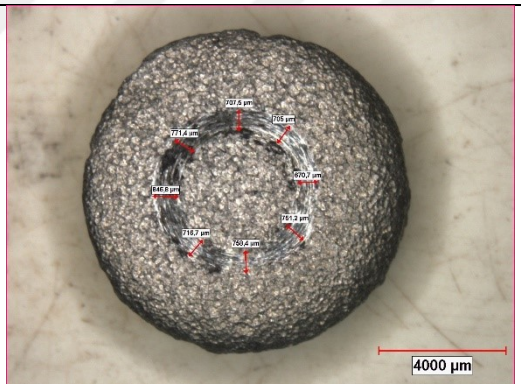
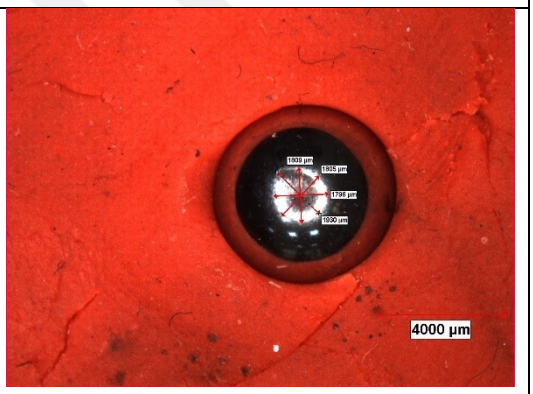
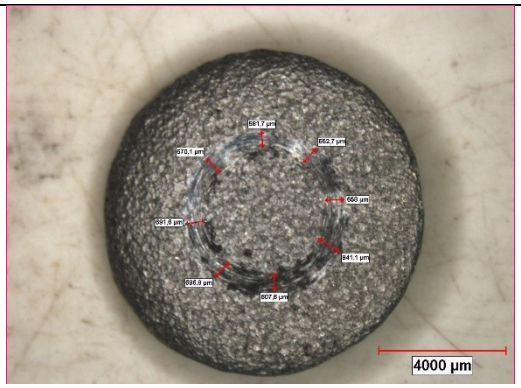
Şekil 6.39. 18N Bilyalı dövülmüş 1N altında aşınma testi sürtünme grafiği



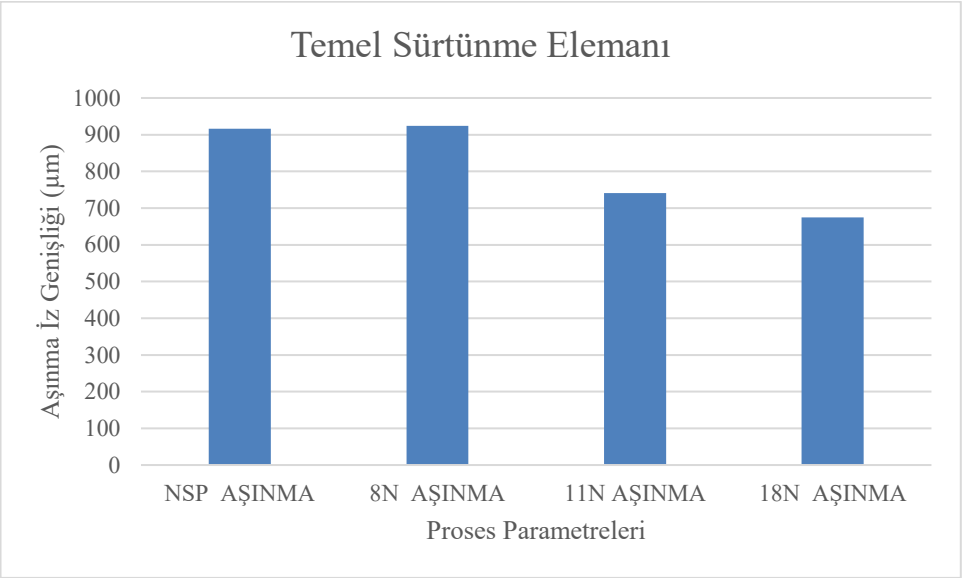
Şekil 6.40. 18N numuneye uygulanan 1N aşınma testi iz alanı

6.5.5. Aşınma Sonuçlarının Karşılaştırılması

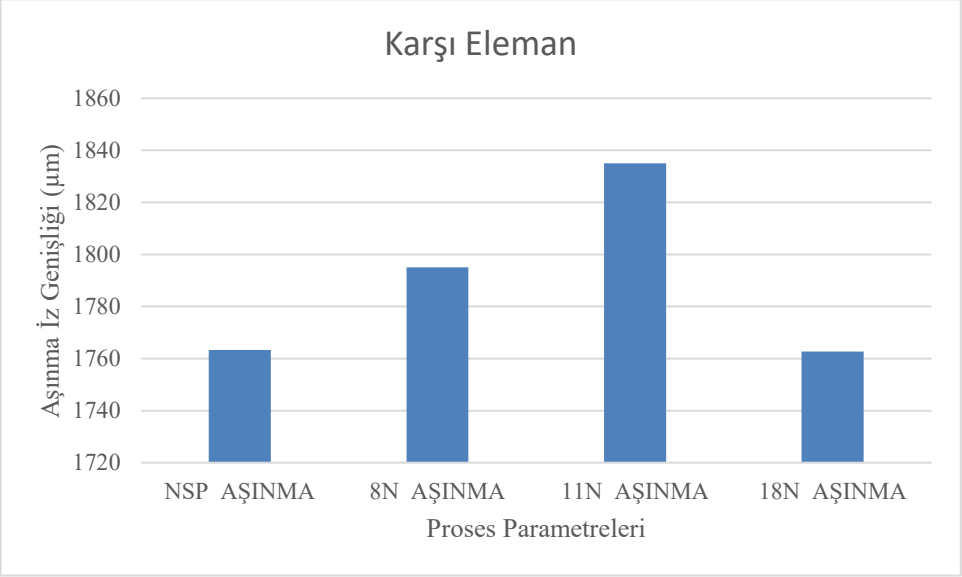
Şekil 6.41'de NSP,8N,11N ve 18N Numunelerin 1N yük altında aşınma testi sonucunda oluşan izlerin Stereo Mikroskop altında incelenmesine yer verilmiştir. Şekil 6.44' de ise yüzey profilometresi ile ölçülen aşınma iz alanlarından yola çıkarak hesaplanmış hacim kayıplarına ait grafik sunulmuştur. Burada da Şekil 6.42' ye benzer şekilde 8N şiddetiyle dövülmüş parçalarda aşınma performansında bir artış elde edilmemiştir. Hatta her ikisinde de aşınma miktarının 8N dövme sonrası küçük bir miktar da olsa arttığı raporlanmıştır. Bunun sebebi, 8N dövme ile yaratılan deformasyon sertleşmesinin ötesinde basma kalıntı gerilimi miktarının yetersiz olmasıdır. Genel olarak Şekil 6.45'e bakıldığında burada 8N şiddetiyle dövülen numunenin yüzey pürüzlülüğündeki artışın etkisi, genel aşınma kinetiğini değiştirerek sürtünmeyi arttırmış ve yüzey altında meydana gelen sertleşme ve basma kalıntı gerilimi oluşan bölgelere baskın gelmiştir. Ancak 11N ve 18N şiddetleriyle dövülmüş olan numunelerde yüzey pürüzlülüğü artarken, mikroyapı modifikasyonu ile deformasyon sertleşmesi etkisinin yanında daha büyük basma kalıntı gerilmelerinin oluşması aşınma direncinin artmasında etkin mekanizma halini almıştır. Şekil 6.46'da ise ortalama sürtünme katsayılarının farklı almen şiddetlerine oranla arttığını gözlemleyebiliriz.

AŞINMA İZ ÖLÇÜMÜ	TEMEL SÜRTÜNME ELEMANI	KARŞI ELEMAN
NSP		
8N		
11N		
18N		

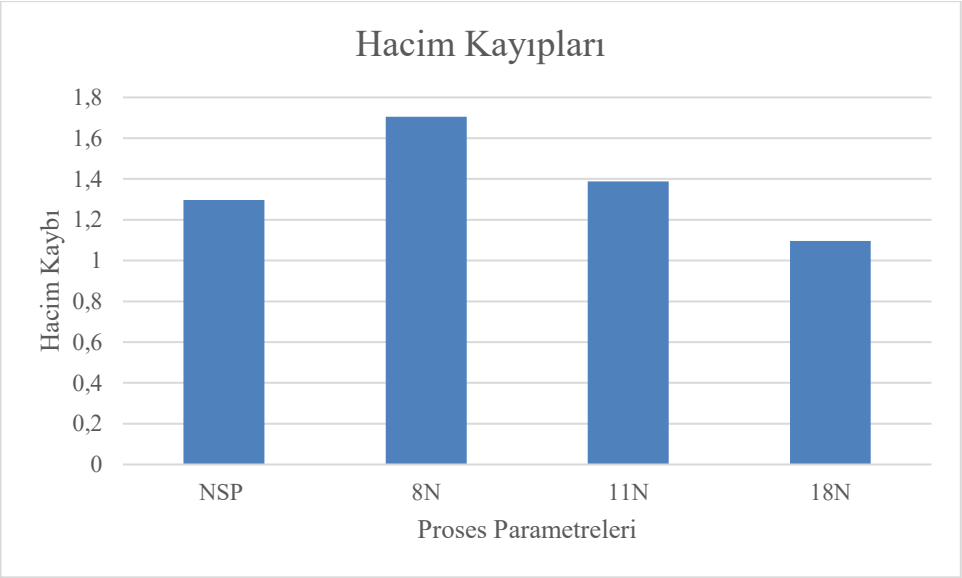
Şekil 6.41. NSP,8N,11N ve 18N Numunelerin 1N yük altında aşınma testi sonucunda oluşan izlerin ölçülmesi



Şekil 6.42. NSP,8N,11N ve 18N Numunelerin 1N yük altında aşınma testi sonucunda temel sürtünme elemanında oluşan aşınma iz genişlikleri



Şekil 6.43. NSP,8N,11N ve 18N Numunelerin 1N yük altında aşınma testi sonucunda karşı elemanda oluşan aşınma iz genişlikleri



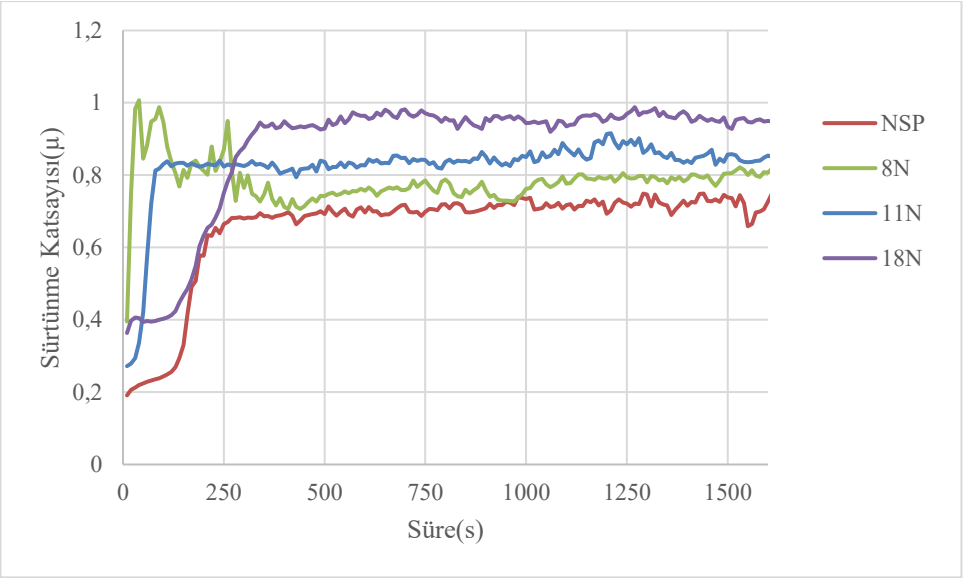
Şekil 6.44. Aşınma testi sonrası temel sürtünme elemanında oluşan aşınma izinin hacim kaybı hesap grafiği

İşlem görmemiş yüzey (NSP): En geniş aşınma izleri ölçülmüş ve bu, yüzeyin düşük aşınma direncini göstermektedir.

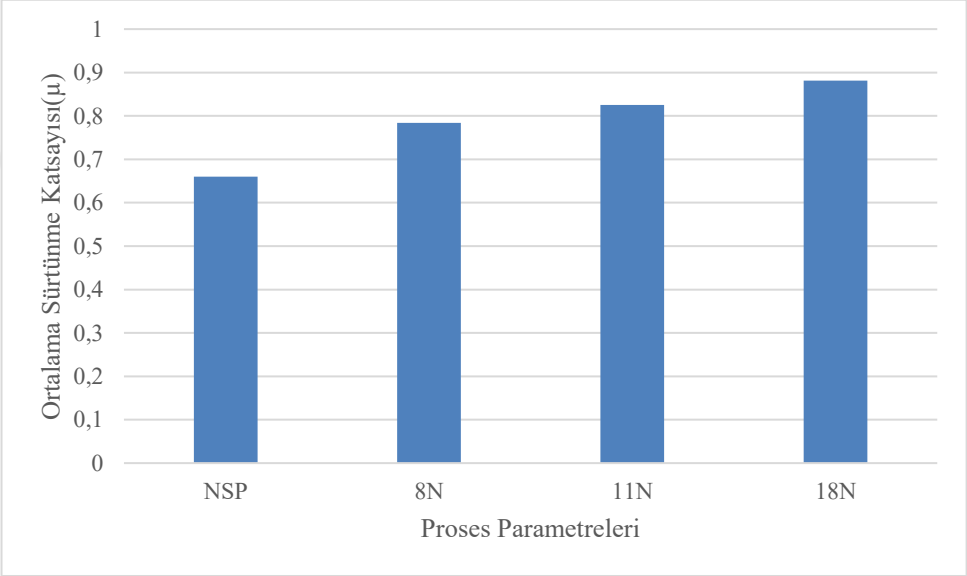
8N (GBD): Döküm numune ile hemen hemen aynı aşınma miktarı tespit edilmiştir, bu durum yüzey pürüzlülüğündeki artış nedeniyle aşınma direncinin başlangıçta etkilenmiş olabileceğini düşündürmektedir.

11N ve 18N (ŞBD): Daha yüksek Almen şiddetlerinde, daha dar aşınma izleri gözlenmiştir. Bu, yüzeyde oluşturulan basma tipi kalıntı gerilmeler ve sertlik artışının aşınma direncini artırdığını kanıtlamaktadır.

18N, en düşük aşınma izi genişliğini sunmuş ve en yüksek aşınma direncini sağlamıştır.



Şekil 6.45. NSP,8N,11N ve 18N Numunelerin 1N yük altında aşınma testi sonucunda oluşan sürtünme grafiği



Şekil 6.46. NSP,8N,11N ve 18N Numunelerinin 1N yük altında aşınma testi sonucunda oluşan ortalama sürtünme kat sayıları

Yüzeyler üzerinde topografik bozulma tabakalarının oluşmaya başlaması sürtünme katsayısını arttırmıştır. Grafiklerin değişkenlik göstermesi, dövme sonrası yüzeyde oluşan pürüzlülüğün bir sonucudur (Sezer, 2020).

6.6. Çekme Testi Sonuçları

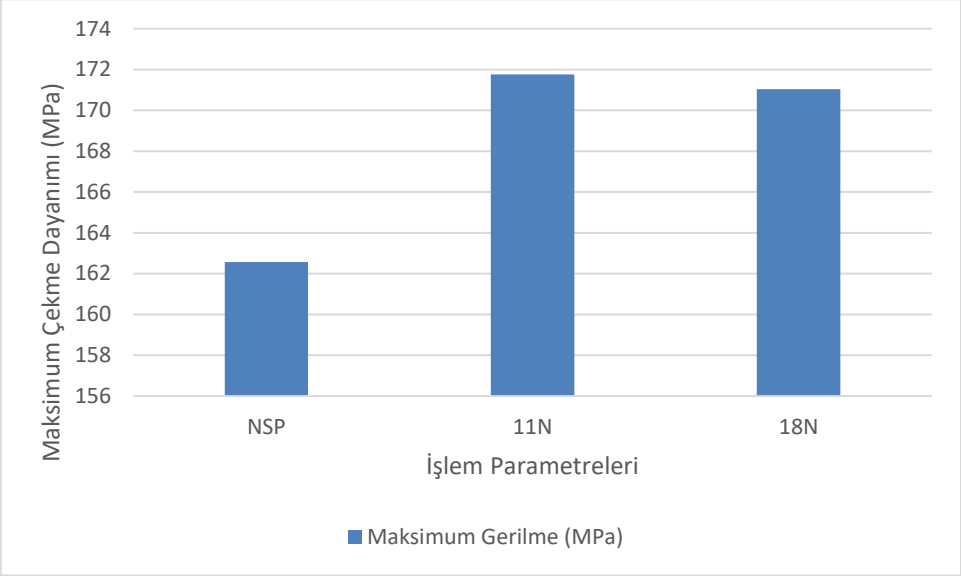
Ortalama sonuçlar Tablo 6.2' de verilmiştir. Görüldüğü gibi bilyalı dövülmemiş A356 çekme dayanımı 162,57 MPa iken 11N 171,75 MPa 18N ise 171,03 olarak ölçülmüştür. %5 oranında çekme dayanımında olumlu yönde bir artış gerçekleşmiştir.

Tablo 6.2. İşlem Görmemiş,11N ve 18N çekme testi karşılaştırılması

Numune Adı	Maksimum Gerilme (MPa)	% uzama
NSP	162,57	5,74
11N	171,755	3,35
18N	171,036	3,92

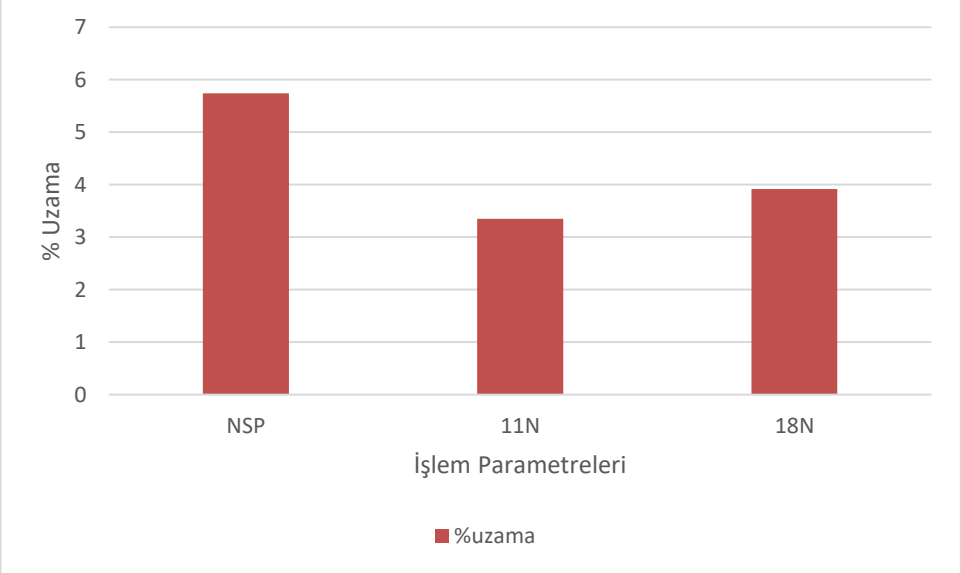
Bilyalı dövme işlemi, yüzeyde önemli bir dayanım artışı sağlarken, parçanın kesitine etki eden kayma gerilmesi altındaki plastik deformasyon davranışında da farklılık meydana gelmiştir. Şiddetli dövme işlemi uygulandığında, dayanımda meydana gelen ek artış, daha fazla dislokasyon oluşumu ve hareketiyle ilişkilendirilmektedir. Ancak, bilyalı dövme işleminin mikroyapısının, plastik deformasyona karşı sınırlı bir direnç oluşturduğu ortadadır. Dayanımın artmasına bağlı sünekliğin de bir miktar azaldığı bulunmuştur. Bilyalı dövme, bir yüzey işlemi olarak gerinimi tekdüze bir şekilde yaymaz; yüzeyden çekirdeğe doğru azalan bir gradyan oluşturur. Bu durumda merkezdeki hafif deforme olmuş iri taneler, dislokasyonların birikmesi ve yüksek deformasyon sertleşme oranının korunması için daha fazla alan sunarak daha yumuşak bölgeler gibi davranır (Yan., Liu, Tao, & Lu, 2012). Başka bir çalışmada, S230 çelik bilyelerin AA6061 T6, AA5754 H111 ve S235JR numuneleri kullanılarak 4, 6 ve 8 bar püskürtme basıncı kullanılarak bilyeli dövme işlemi yapılmıştır. Bilyelerin basınç ve yüzey örtme oranı, deney parçasının yüzeyine uygulanan bombardımanın etkisi ile mekanik özellikleri doğrudan etkilemiştir (Kocaman, 2021). Çekme mukavemetindeki artış Almen şiddetiyle doğru orantılı bir

şekilde artmıştır. Buradaki artış deformasyon sertleşmesi sonucunda, yüzeyde meydana gelen artık basma gerilmesi oluşumu ve tane yapılarındaki plastik deformasyonlar ile ilişkilendirilebilir (Kocaman, 2021).

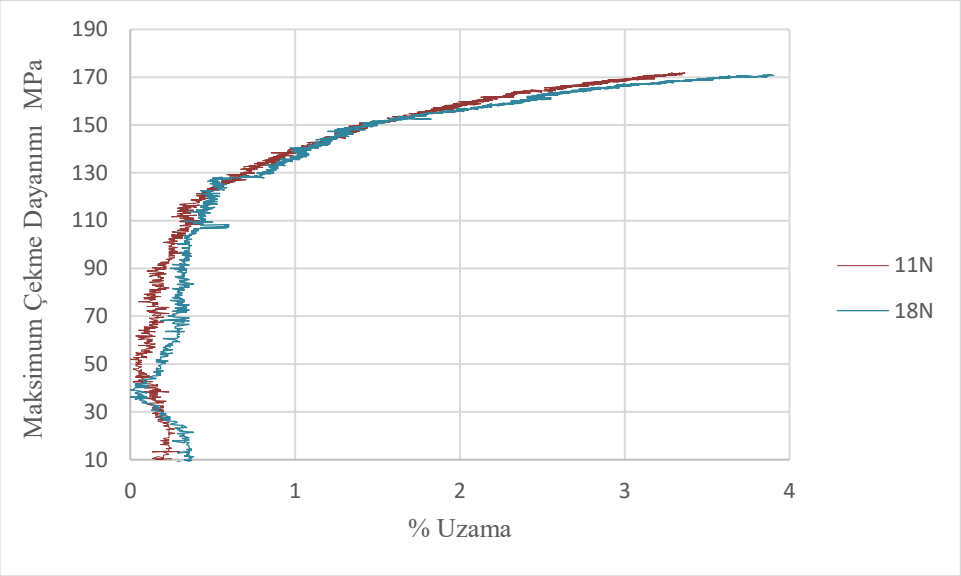


Şekil 6.47. Almen şiddetine göre çekme dayanımı değişimi

Şekil 6.47'de Almen şiddetine göre çekme dayanımı değişimi verilirken Şekil 6.48de Almen şiddetine göre % uzama değişimi grafiği verilmiştir.18N de meydana gelen yüzey altı çatlaklarının dayanımı kısmen azalttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.48. Almen şiddetine göre % uzama değişimi



Şekil 6.49. 11N ve 18N bilyalı dövülmüş alaşımlara ait gerilme birim değiştirme eğrileri

Şekil 6.49' de görüldüğü gibi, homojen plastik değişiminden sonra boyun vermeden kırılma gerçekleşmiştir.

7. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışma, Al-Si alaşımlarında uygulanan şiddetli bilyalı dövme işleminin, geleneksel bilyalı dövme ve işlem görmemiş numunelere kıyasla sağladığı mikroyapısal, mekanik ve aşınma davranışı iyileşmelerini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Şiddetli bilyalı dövmenin (18N), geleneksel bilyalı dövmede kullanılan daha büyük Almen şiddeti (11N) ve daha düşük Almen şiddeti (8N) ile işlem görmemiş numunelere göre elde ettiği sonuçlar, yöntemin üstünlüklerini açıkça ortaya koymaktadır.

İşlem görmemiş numunelerde taneler büyük ve düzensiz bir dağılıma sahip tipik dendritik döküm yapısını sergilemektedir. Bu durum, mikroyapı homojenliği açısından zayıf bir yapı ortaya koymaktadır. Geleneksel bilyalı dövme uygulanan numunelerde taneler bir miktar küçülmüş yüzey altında sığ bir tabakada alfa-alüminyum taneleri ile Si partiküllerinin homojen dağıldığı bir mikroyapı değişimi elde edilmiştir. Buna karşın, dislokasyon yoğunluğu işlem görmemiş numunelere göre artış gösterse de elde edilen iyileşmeler sınırlı kalmaktadır. Şiddetli bilyalı dövme yöntemi ise hem geleneksel bilyalı dövme hem de işlem görmemiş numuneler ile karşılaştırıldığında daha ince taneli ve yüzey altı homojen yapıyı sağlamıştır. Şiddetli bilyalı dövme ile dislokasyon yoğunluğu en yüksek seviyeye ulaşmış ve yüzey ile alt yüzey bölgelerinde daha sıkı ve stabil bir mikroyapı oluşumuna katkı sağlamıştır.

İşlem görmemiş numunelerde sertlik en düşük seviyededir. Bunun yanında, çekme dayanımı da işlemsiz numunelerde bilyalı dövme operasyonu uygulanmış numunelere kıyasla bir miktar düşüktür. Döküm sonrası tipik kaba ve düzensiz mikroyapı mekanik dayanımı olumsuz etkilemektedir. Geleneksel bilyalı dövme işlemi (8N), işlem görmemiş numunelere kıyasla yüzey sertliğinde bir artış sağlamış olsa da bu iyileşme sınırlı düzeyde kalmıştır. Daha yüksek Almen şiddetine sahip olan geleneksel bilyalı dövme (11N) işleminde ise bir miktar daha büyük deformasyon sertleşmesi etkisi meydana gelmiştir. Şiddetli bilyalı dövme işlemi ise geleneksel bilyalı dövülmüş ve işlem görmemiş numuneye kıyasla yüzey sertliğinde %50' ye varan bir artış sağlanmıştır. Üç farklı Almen şiddetinde dövülmüş numunelerin 260 mikrometre derinlik boyunca bir sertleşme etkisi koruduğu ortaya konmuştur. Öte yandan çekme dayanımı hem geleneksel hem şiddetli dövme sonrasında artmış, buna bağlı süneklik

azalmıştır. 11N de %5,64 ve 18N de %5,34 kadar çekme dayanımı artışı meydana gelmiştir.

Aşınma miktarı açısından, işlem görmemiş numuneler en zayıf performansı göstermiştir. Homojen olmayan ve kaba mikroyapının yanı sıra yüzeye açılan dökümden kaynaklı porozitelerin varlığı, aşınma miktarının yüksek olmasına neden olmuştur. Aşınma iz genişliği, en geniş olarak, işlem görmemiş numunede ölçülmüştür. 11N şiddetinde geleneksel bilyalı dövme ile aşınma miktarında pek bir değişiklik saptanmamıştır, işlemsiz numuneye benzer bir aşınma sonucu elde edilmiştir. Bunun sebebi 8N dövme ile yeterince basma kalıntı gerilmesi oluşmaması ve deformasyon sertleşmesi etkisinin düşük seviyede kalarak, yüzeyde meydana gelen çukurcukların aşınma davranışını etkilediği bir mekanizma oluşmuştur. 11N şiddetinde dövülmüş numuneler, işlem görmemiş numuneye kıyasla aşınma direncinde artış sağlasa da bu iyileşme şiddetli bilyalı dövme yönteminde daha fazladır. 11N ve 18N dövme ile küçülmüş ve homojen dağılmış yüzey altı mikroyapısının yanında olası basma kalıntı gerilme etkisinin de artmasıyla, yüzeyin topografik durumunun daha az etkin olduğu bir aşınma mekanizmasına değişmiştir. Şiddetli bilyalı dövme, aşınma direncini en fazla artıran yöntem olarak öne çıkmıştır. Bu sonuçları sürtünme katsayısı verileri de desteklemektedir. Sürtünme katsayısı doğrudan, yüzeyin topografik yapısı ile ilişkili olarak bulunmuştur. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça sürtünme kat sayısı artmıştır.

Endüstri de kullanım için ise 3 farklı numune örneğinin kullanabilecek alanları birbirinden farklıdır. İşlem görmemiş numuneler, düşük dayanıklılık ve performans nedeniyle uzun ömür gerektiren endüstriyel uygulamalarda sınırlı bir kullanım alanına sahiptir daha çok deformasyona maruz kalmayacak daha çok yük ile karşılaşmayacağı alanlarda kullanımı uygundur. Geleneksel bilyalı dövme yöntemi, işlem görmemiş numuneye kıyasla belirgin iyileşmeler sunsa da yüksek performans gerektiren uygulamalar için sınırlıdır. Şiddetli bilyalı dövme yöntemi hem geleneksel dövülmüş hem de dövülmemişe göre üstün mikroyapısal ve mekanik özellikler sunarak yüksek aşınma performansı ve dayanıklılık gerektiren endüstriyel uygulamalarda ideal bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde, daha uzun ömürlü ve güvenilir parça üretimi için önemli avantajlar sağlayabilir. Ancak yüzeyde oluşan çatlakların varlığı da göz önünde bulundurulmalıdır.

8. ARAŞTIRMANIN KATKILARI VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışma, şiddetli bilyalı dövme yönteminin Al-Si alaşımlarındaki olumlu etkilerinin ötesinde, farklı alaşımlar ve uygulama alanları üzerinde de araştırmalar yapılması gerektiğini vurgulamaktadır. Gelecekte, bu yöntemin farklı alaşım türlerindeki etkilerinin, işlem parametrelerinin iyileştirilmesinin ve endüstriyel uygulamalardaki potansiyelinin daha detaylı bir şekilde ele alınması öngörülmektedir.

Basma kalıntı gerilme analizi, malzeme yüzeyinde oluşan kalıntı gerilmelerin incelenmesi, bilyalı dövme işleminin malzeme üzerindeki etkisini anlamaya katkı sağlayabilir.

SEM ile aşınma izlerinin incelenmesi, Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak aşınma izlerinin detaylı analizleri yapılabilir. Bu incelemeler, aşınma mekanizmalarının daha iyi anlaşılmasını ve süreç optimizasyonunu destekleyecektir.

Yorulma ve korozyon testleri, malzemenin yorulma dayanımı ve korozyona karşı direncinin test edilmesi, endüstriyel uygulamalarda kullanım potansiyelini değerlendirmek açısından önemlidir.

İşlem parametrelerinin değerlendirilmesi, bilyaların boyutu ve malzeme türü ile püskürtme basıncı ve işlem süresi gibi faktörlerin yöntemin performansı üzerindeki etkilerinin ortaya konmasını sağlayabilir. Bu analizler, optimum işlem koşullarının belirlenmesine katkı sunabilir.

Uygulama odaklı çalışmalar kapsamında, yöntemin otomotiv ve havacılık sektörlerindeki performans artışı ve maliyet avantajı üzerinde durulabilir. Ayrıca savunma sanayii ve denizcilik gibi diğer mühendislik alanlarında sağladığı katkılar da araştırılarak, bu sektörlerdeki malzeme ihtiyaçlarının karşılanmasına yönelik yeni çözümler geliştirilebilir.

9. KAYNAKÇA

Ahmadi, M., Sadeghi, B., Irani, M., & Rahimi, F. (2017). Finite Element Simulation of Shot Peening of an Aluminum Alloy Considering Hardening Models.

Alkan, Z. (2014). Alüminyum Alaşımlarda Bilyalı Dövmenin Fiziksel,Mekanik ve Yüzey Özelliklerine Etkisi. Isparta.

Altenpohl, D. (1980). . Present Structure and Future Trends in Key Materials Industries. Materials in World Perspective: Assessment of Resources, Technologies and Trends for Key Materials Industries, Springer. Berlin.

Ateş, M. (2018). Nanoparçacıkların Ölçme ve İnceleme Teknikleri.

Balyalı, H. (2015). Metalik Malzemelerin Bilyalı Dövme Uygulaması Sonrası Tribolojik Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi. İstanbul.

Blanco, M., Tomas, J., & Moreno, J. (2008). Applications of Stereo Microscopy in the Study of Composite Materials.

Bozkurt, M., & Demirer, A. (2023). AA5754 Alüminyum Alaşımının Bilyeli Dövme Prosesi ile Mekanik Özelliklere Etkisi ve Dövme Üzerine Cr+6 Kaplamanın Korozyon Özelliklerine Bakış. Sakarya.

Campbell, J. (2003). The New Metallurgy of Cast Metals Castings. United Kingdom.

Chen, M., Hing, S., Jiang, & Zhan, K. (2020). Determination of surface mechanical property and residual stress stability for shot-peened SAF2507 duplex stainless steel by in situ X-ray diffraction stress analysis.

Dhakal, B., & Swaroop, S. (2020). Effect of laser shock peening on mechanical and microstructural aspects of 6061-T6 aluminum alloy.

Eroğlu, G; Şahiner, M. (2018). Dünyada ve Türkiyede Alüminyum. Ankara.

Fortini, A., Merlin, M., & Pirletti, S. (2016). On the influence of Mn and Mg additions on tensile properties, microstructure and quality index of the A356 aluminum foundry alloy. Procedia Structural Integrity.

Friel, J. (2004). Practical Guide to Image Analysis.

Ganesh, B., Sha, W., & Ramanaiah, N. (2014). Effect of Shotpeening on Sliding Wear and Tensile Behavior of Titanium Implant Alloys.

Gariépy, A., Bridier, F., Hoseini, M., & Bocher, P. (2013). Experimental and Numerical Investigation of Material Heterogeneity in Shot Peened Aluminium Alloy AA2024-T351.

Gariepy, A., Perron, C., Bocher, P., & Levesque, M. (2013). On the Effect of the Orientation of Sheet Rolling Direction in Shot Peen Forming.

Goldstein, J., Newbury, D., & Lyman, C. (2017). Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis.

Gonzalez, J., Bagherifard, S., Guagliano, M., & Pariente, I. (2017). Influence of Different Shot Peening Treatments on Surface State and Fatigue Behaviour of Al 6063 Alloy.

Goss, M. (2009). Optical Microscopy: Techniques and Applications.

Grinspan, A., & Gnanamoorthy, R. (2006). Surface Modification by Oil Jet Peening in Al Alloys, AA6063-T6 and AA6061-T4.

Harbelioğlu, E. (2018). Bilyalı Dövmenin AA7075-T6 Alaşımının Yüzey Özelliklerine ve Erozif Aşınma Davranışına Etkileri. Kocaeli.

Harding, M., Donaldson, I., Hexemer, J., Gharghouri, M., & Bishop, D. (2015). Characterization of the Microstructure, Mechanical Properties, and Shot Peening Response of an Industrially Processed Al–Zn–Mg–Cu PM Alloy.

Harris, C., Shyne, R., & Jones, C. (2010). Principles of Materials Characterization and Their Applications.

Irızalp, S. (2014). Lazer Şok İşleme Prosesinin 6061-T6 Alaşımının Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi ve Nano Ölçekte Karakterizasyonu.

Irizalp, S., Saklakoğlu, N., & Yılbaş, B. (2013). Characterization of microplastic deformation produced in 6061-T6 by using laser shock processing.

Karahan, B., & İnce, U. (2015). Bilya Püskürtmenin (Shot Peenıng) Teknik-Teknolojideki Yolculuğu ve Soğuk Dövme Prosesine Adaptasyonu.

Kaufman, J., & Rooy, E. (2004). Aluminum alloy castings: Properties, processes and applications. Amerika Birleşik Devletleri.

Kikuchi, S., Nakamura, Y., Nambu, K., & Ando , M. (2016). Effect of Shot Peening Using Ultra-Fine Particles on Fatigue Properties of 5056 Aluminum Alloy Under Rotating Bending.

Kirk, D. (2014). Estimate compressed layer depth by using Almen peening intensity.

Kocaman, A. (2021). Alüminyum alaşımlarında bilyeli dövme işleminin mekanik ve yüzey özelliklerine etkisinin incelenmesi.

Köşker, A. (2011). Alüminyum Alaşımlarının Asal Gaz Ortamında Kaynaklanması ve Mekanik,Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi. İstanbul.

Kuo, S. (2007). The Use of Stereo Microscopy in Material Science.

Liao, Y. (2006). Practical electron microscopy and database.

Mhaede, M. (2012). Influence of Surface Treatments on Surface Layer Properties,Fatigue and Corrosion Fatigue Performance of AA7075 T73.

Mitroviç, S., Adamovic, D., Zivic, F., Dzunic, D., & Pantic, M. (2014). Friction and Wear Behavior of Shot Peened Surfaces of 36CrNiMo4 and 36NiCrMo16 Alloyed Steels Under Dry and Lubricated Contact Conditions.

Morris, D., & Munoz-Morris, M. (2012). Microstructural refinement in alloys and intermetallics by severe plastic deformation.

Nam, Y., Yoon, H., Jeon, U., & Shin, B. (2015). Enhancing Surface Layer Properties of an Aircraft Aluminum Alloy by Shot Peening Using Response Surface Methodology.

Nam, Y., Yoon, H., Jeon, U., & Shin, B. (2016). Use of Response Surface Methodology for Shot Peening Process Optimization of an Aircraft Structural Part.

Nguyen, V., Poh, H., & Zhang, Y. (2014). Predicting Shot Peening Coverage Using Multiphase Computational Fluid Dynamics Simulations.

Park, J., Inkyu, Y., Inseok, J., & Sungho, J. (2019). Improvement of friction characteristics of cast aluminum-silicon alloy by laser shock peening.

Ravi, K. (2008). Fluidity of aluminum alloys and composites: A review. Journal of Alloys and Compounds.

Ravindran, A. (2008). Optimization of Parameters in the Processing and Forming of Hybrid Al-MMC for Improvements in Resistance to Failure using Taguchi Statistical Methodology.

Savas, S. (2014). Monitoring variation of surface residual stresses ın the shot-peened steel components by magnetic barkhausen noise method.

Saykar. (2019). https://www.saykar.net/celik_bilye adresinden alındı

Sezer, O. (2020). Havacılıkta kullanılan özel alaşım titanyum malzemelere uygulanan bilyalı dövme işleminin etkisinin incelenmesi.

Şaldır, R. (2002). Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti. İstanbul.

Trdan, U., Zagar, S., & Grum, J. (2011). Surface Modification of Laser- and Shot-Peened 6082 Aluminium Alloy.

Vatansever, F., Karabay, S., & Ertürk, A. (2018). Alüminyum-Silisyum alaşımlarının mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin T6 ısıl işlemi ile iyileştirilmesi. İzmir.

Yağçı, T. (2021). Alüminyum-Silisyum Alaşımlarının ve Alçak Basınçlı Döküm Prosesinin Simülasyın Destekli Tasarımı. İzmir.

Yalçınkaya, A. (2019). Bilyalı Dövme Prosesi Uygulanan Tank Palet Pimlerinin Yorulma Analizi. Ankara.

Yan., F. K., Liu, G. Z., Tao, N. R., & Lu, K. (2012). Strength and ductility of 316L austenitic stainless steel strengthened by nano-scale twin bundles.

Zhang, H., Qiu, X., Zhao, X., & Xu, D. (2019). Effect of Surface Self-Nanocrystallization on Friction and Wear Behavior of Al7075-T6511 Alloy.