



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN AISi10Mg
ALAŞIMLI ISIL İŞLEM VE BİLYALI DÖVME İŞLEMİNİN ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI

ÖMER SABAN

DANIŞMAN

DOÇ. DR. AZMİ ERDOĞAN

BARTIN-2025



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

METALÜRJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN AISi10Mg ALAŞIMLI ISIL
İŞLEM VE BİLYALI DÖVME İŞLEMİNİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖMER SABAN

JÜRİ ÜYELERİ

Danışman :

Üye :

Üye :

BARTIN-2025

KABUL VE ONAY

Ömer SABAN tarafından hazırlanan “EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN AlSi10Mg ALAŞIMLI ISIL İŞLEM VE BİLYALI DÖVME İŞLEMİNİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu çalışma, 20.08.2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan :

Üye :

Üye :

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitimi Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer CEYLAN
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Azmi ERDOĞAN danışmanlığında hazırlamış olduğum “EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN AlSi10Mg ALAŞIMLI ISIL İŞLEM VE BİLYALI DÖVME İŞLEMİNİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

20.08.2025

Ömer SABAN



ÖN SÖZ

Yüksek lisans programıyla tanışmış olduğum, bana olan yaklaşımı, saygısı ve sabrıyla yol gösterip her daim yanımda olan, tez konumu belirlemede ve çalışmalarımda desteğini benden esirgemeyen, bu aşamada tecrübeleriyle bana yol gösterip motive eden danışmanım Doç. Dr. Azmi ERDOĞAN hocama, laboratuvar çalışmalarımda yanımda olan, yardımseverliği ile desteğini esirgemeyen Öğr. Görevlisi İbrahim ÇALIŞ hocama çok teşekkür ederim. Ayrıca desteğini benden esirgemeyen, her daim yanımda olup ve beni motive eden eşim Ayşe Dilay SABAN'a, okul hayatım boyunca bana destek olan babam Sebahattin SABAN ve annem Esma SABAN'a, yüksek lisans yapmamda beni destekleyen ablalarım Büşra ERİŞOĞLU, Ayşegül YİĞİT, enişterim Serkan ERİŞOĞLU, Görkem YİĞİT'e ve kayınvalidem Selma YAVUZ'a çok teşekkür ederim.

Bu çalışma Bartın Üniversitesi BAP koordinatörlüğü tarafından 2024-FEN-TAP-001 nolu proje ile ve TÜBİTAK tarafından 224M479 nolu proje ile desteklenmiştir. Yazarlar koordinatörlüğe ve kurula finansal destek için teşekkür eder.

Ömer SABAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN AlSi10Mg ALAŞIMLI ISIL İŞLEM VE BİLYALI DÖVME İŞLEMİNİN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Ömer SABAN

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Azmi ERDOĞAN

Bartın-2025, sayfa: 75

Eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan seçici lazer ergitme (SLM) ile oluşturulan AlSi10Mg alaşımının yüzey pürüzlülüğü, stres birikimi ve iç kusurları gibi dezavantajları ekarte etmek için genellikle ikincil işlemler gereklidir. Bu çalışmada, AlSi10Mg alaşımına T6 ısıtılmasının (HT) etkilerinin yanı sıra farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde bilyalı dövme (VP) işlemi uygulanmış, bu uygulamaların hem tekli hem de çoklu etkileri araştırılmıştır. AlSi10Mg alaşımlarına hiç ısıtılma uygulanmayan ve sırasıyla 400 °C, 450 °C, 500 °C çözelti işlem sıcaklığı olan ısıtılma işlemleri uygulanmıştır. Uygulanan ısıtılma işlem sıcaklıklarında 2,5 dk, 5 dk, 10 dk ve 20 dk olacak şekilde titreşimli dövme (VP) işlemi uygulanmıştır. İşlem görmemiş (AB), titreşimli dövülmüş (AB+VP), ısıtılma işlem görmüş (AB+HT) ve titreşimli dövülmüş/ısıtılma işlem görmüş (AB+HT+VP) numunelerin mikroyapı, sertlik ve aşınma özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. SLM sonrası tek fazlı bir mikroyapı varken, uygulanan ısıtılma işlemi ile yapıda Si çökeltileri meydana gelmiş ve iki fazlı bir mikroyapı oluşmuştur. Oluşan yeni fazda Si çökeltilerinin boyutları, çözeltiye alma sıcaklığı arttıkça artmıştır. Titreşimli dövme işlemiyle yüzeylerdeki sertliğin artması sağlanmıştır ve VP süresinin artması yüzeye uygulanan etki derinliğini de arttırmıştır. Artan çözeltiye alma sıcaklığı sertliğin iyileşmesini sağlamıştır. Seçici lazer ergitmeyle üretilmiş olan AlSi10Mg alaşımına uygulanan ısıtılma işlemi (HT) sonucunda sertlikte büyük düşüş

olmasına rağmen, titreşimli dövme işlemi ile sertlikte artış sağlanmıştır. Titreşimli dövme, aşınma direncinin artmasını sağladığı için, uygulanan çözelti sıcaklıklarının artmasıyla bu sertlik değerleri hafifte olsa yükselmiştir ve aşınma kayıpları önemli ölçüde azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: AlSi10Mg, eklemeli imalat, ısıl işlem, titreşimli dövme



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HEAT TREATMENT AND SHOT PEENING ON AlSi10Mg ALLOY PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

Ömer SABAN

Bartın University

Graduate School

Department of Metallurgical and Materials Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Azmi ERDOĞAN

Bartın-2025, pp: 75

AlSi10Mg alloy formed by selective laser melting (SLM), one of the additive manufacturing methods, often requires secondary treatments to rule out disadvantages such as surface roughness, stress accumulation and internal defects. In this study, the effects of T6 heat treatment (HT) as well as ball forging (VP) at different temperatures and for different times were applied to AlSi10Mg alloy, and both single and multiple effects of these treatments were investigated. AlSi10Mg alloys were heat treated with no heat treatment and solution treatment temperatures of 400 °C, 450 °C, 500 °C, respectively. Vibratory peening (VP) was applied for 2.5 min, 5 min, 10 min and 20 min at the applied heat treatment temperatures. The changes in microstructure, hardness and wear properties of untreated (AB), vibration peening (AB+VP), heat treated (AB+HT) and vibration peening/heat treated (AB+HT+VP) specimens were investigated. While there was a single-phase microstructure after SLM, Si precipitates were formed in the structure with the heat treatment applied and a two-phase microstructure was formed. The size of Si precipitates in the new phase increased as the dissolution temperature increased. The hardness of the surfaces was improved by the vibratory forging process and the increase in VP time increased the depth of impact on the surface. Increasing the solution temperature led to an improvement in hardness. Although the hardness of the AlSi10Mg alloy produced by selective laser melting was significantly

reduced by heat treatment (HT), the hardness was increased by vibration forging. Since vibratory forging leads to increased wear resistance, these hardness values increased slightly with increasing solution temperatures and wear losses were significantly reduced.

Keywords: AlSi10Mg, additive manufacturing, heat treatment, vibratory peening



İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	ii
BEYANNAME	iii
ÖN SÖZ	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
TABLolar DİZİNİ.....	xiv
EKLER DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
1.GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
2.1. Eklemeli İmalat Yöntemi.....	3
2.1.1. Toz Yatağı Füzyonu;.....	6
2.1.2. Doğrudan Enerji Biriktirme;.....	7
2.1.3. Eriyik Yığılma Modelleme;.....	8
2.1.4. Fotopolimerleşme;.....	8
2.1.5. Yapıştırıcı Püskürtme;.....	9
2.1.6. Malzeme Jeti Teknolojisi;.....	9
2.1.7. Eklemeli İmalat Sonrası İkincil İşlemler	14
2.1.7.1. Kimyasal Parlatma / Polisaj	14
2.1.7.2. Elektrokimyasal Parlatma (ECP)	14
2.1.7.3. Elektro Kaplama	15
2.1.7.4. Kimyasal Aşındırma / Dağlama (CHE).....	15
2.1.7.5. Buharla Düzeltme / Yumuşatma.....	15
2.1.7.6. Sıcak İzostatik Presleme (HIP)	15
2.1.7.7. Lazerle Dövme	16
2.1.7.8. Lazerle Parlatma	16
2.1.7.9. Makineyle İşleme ve Aşındırma	17
2.2 Alüminyum ve Alaşımları.....	17
2.2.1. Dövme Alüminyum Alaşımları	19
2.2.2. Döküm Alüminyum Alaşımları.....	20
2.2.3. AlSi10Mg Alaşımı	21

2.3. Bilyalı Dövmeye İşlemi	25
2.3.1. Titreşimli Bilyalı Dövmeye.....	28
2.4. Çökelme Sertleştirme İşlemi.....	29
2.4.1. Isıl İşlem Aşamaları:	30
2.4.2. Isıl İşlem Türleri:	30
2.4.3. Alüminyum Alaşımları ve Isıl İşlemler	31
2.4.3.1. Çözeltide Sertleştirme	33
2.4.3.2. Su Verme	33
2.4.3.3. Yaşlandırma.....	33
3. MATERYAL VE YÖNTEM	35
3.1. Malzeme Seçimi.....	35
3.2. Numune Hazırlama İşlemi	36
3.3. Numuneye Uygulanan Isıl İşlemler:	36
3.4. Numuneye Uygulanan Titreşimli Dövmeye İşlemi:	36
3.5. Numunelerin Kesilmesi ve Bakalite Alınması İşlemi:.....	37
3.6. Bakalite Alınan Numunelerin Parlatılması İşlemi:.....	39
3.7. Parlatma İşlemi Sonrası Numunelerin Mikroyapılarının İncelemesi:.....	39
3.8. SEM Cihazı	39
3.9. XRD Cihazı	40
3.10. Mikro Vickers Sertlik Cihazı	41
3.11. Optik Profilometre Cihazı	42
3.12. Kuru Kayma Aşınma Testi	42
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	45
4.1 Mikroyapı Analizi	45
4.2. XRD Sonuçları.....	51
4.3. Mikrosertlik.....	53
4.4. Yüzey Morfolojisi ve Pürüzlülüğü	55
4.5. Kuru Kayma Aşınma Davranışı	57
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
2.1: Eklemeli imalat görseli (Siyambaş ve Turgut, 2022).....	4
2.2: Metal esaslı eklemli imalat yönteminin sınıflandırılması (Siyambaş ve Turgut, 2022)	10
2.3: Seçici lazer ergitme yöntemi (SLM) (Siyambaş ve Turgut, 2022)	11
2.4: Seçici lazer ergitme yöntemi (SLM) 3D görseli (Gebhardt, 2012).....	12
2.5: SLM yönteminde imalat parametreleri (Siyambaş ve Turgut, 2022).....	12
2.6: Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması. a) döküm alaşımları b) işlenmiş alaşımları. Isıl işlem görenler kırmızı, ısıl işlem göremeyenler mavi renkte gösterilmiştir. (Aktürk ve Korkmaz, 2021).....	22
2.7: Özel olarak tasarlanan bilyalı dövme test sistemi ve bileşenleri (Avcu, 2018)	25
2.8: Bilyalı dövme işlemi (Döleker, 2015).....	26
2.9: Bilyalı dövme makinalarının sınıflandırılması (Balyalı, 2015)	28
2.10: Doğal ve yapay yaşlandırma kademelerini gösteren ısıl işlem diyagramları (Patır, 2014)	34
3.1: Bir Yüzeyi titreşimli dövülmüş ve ısıl işlem görmüş numune.....	38
3.2: 400°C’de 2,5 dk, 5dk, 10dk ve 20 dk titreşimli dövülmüş numunelerin bakalite alınması	38
3.3: Etiketleme işlemi yapılmış bakalitler	38
3.4: Yüksek çözünürlüklü Nikon Shuttle Pix markalı dijital stereo mikroskoba yerleştirilmiş numuneler.....	39
3.5: RIGAKU/SmartLab XRD cihazı	41
3.6: QNESS Q10M otomatik mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı	42
3.7: Filmmetrics marka Profilm3D model optik profilometre cihazı.....	43
3.8: TURKYUS marka Ball-on-disk cihazı	43
3.9: TESCAN marka MAIA3 XMU model SEM cihazının görüntüsü	44
4.1: Eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg alaşımının (AB) ve ısıl işlem görmüş (AB+HT) numuneleri için mikroyapı görüntüleri: a) Stereo mikroskop şematik gösterimleri, b) Optik mikroskop görüntüleri	45
4.2: Eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg alaşımının (AB) ve ısıl işlem görmüş (AB+HT) numuneleri için mikroyapı görüntüleri: c) Optik mikroskop görüntüleri, d-g) SEM+EDS analizi.....	46

4.3: AlSi10Mg eriyik havuzları görüntüsü.....	47
4.4: AlSi10Mg alaşımındaki Al ve Si oranlarının SEM+EDS'deki mikroyapı görüntüleri a) AB, b) 400 °C	48
4.5: AlSi10Mg alaşımındaki Al ve Si oranlarının SEM-EDS'deki mikroyapı görüntüleri a) 450°C, b) 500°C	49
4.6: Titreşimli dövme işlemi sonucu AlSi10Mg numunesinin 500°C+20dk titreşimli dövülmüş görüntüsü	50
4.7: IPF-Z ve BC açısından EBSD analiz sonuçları: a) 500°C HT+VP 5dk, b) 500°C HT+VP 10dk, c) 500°C HT+VP 20dk	51
4.8: a) AB, AB+HT ve b) AB+20 dk VP, HT+20 dk VP örneklerinin XRD modelleri	52
4.9: Kesitten alınan mikrosertlik değerleri: a) AB+VP, b) HT+VP	54
4.10: a) Tüm numunelerin ölçülen pürüzlülüğü, b) AB, c) AB/2,5 dk, d) AB/5 dk, e) AB/10 dk, f) AB/20 dk. Yüzey morfolojisi.....	56
4.11: 5N yük uygulanan kuru kayma aşınma testlerinde AB, 400°C, 450°C ve 500°C'de meydana gelen hacim kayıpları	57
4.12: 3N yük uygulanan kuru kayma aşınma testlerinde AB, 400°C, 450°C ve 500°C'de meydana gelen hacim kayıpları	58
4.13: 1N yük uygulanan kuru kayma aşınma testlerinde AB, 400°C, 450°C ve 500°C'de meydana gelen hacim kayıpları	58
4.14: Aşınma izlerinin SEM+EDS analizleri: a) AB, b) AB+10dk titreşimli dövülmüş, c) AB+400°C, d) AB+400°C+10 dk titreşimli dövülmüş	60
4.15: Aşınma izlerinin SEM+EDS analizleri: a) AB+450°C, b) AB+450°C+10 dk titreşimli dövülmüş, c) AB+500°C, d) AB+500°C+10 dk titreşimli dövülmüş	61
4.16: a) 2,5 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 1N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı. b) 2,5 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 3N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı. c) 2,5 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 5N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı.....	62
4.17: a) 5 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 1N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı. b) 5 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 3N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı. c) 5 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 5N yük	

uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı.....	63
4.18: a) 10 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 1N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı. b) 10 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 3N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı. c) 10 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 5N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı.....	64
4.19: a) 20 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 1N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı. b) 20 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 3N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı. c) 20 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 5N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı.....	65
4.20: a) Titreşimli dövme işlemi yapılmamış olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 1N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı. b) Titreşimli dövme işlemi yapılmamış olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 3N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı. c) Titreşimli dövme işlemi yapılmamış olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 5N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı.....	66

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo No	Sayfa No
2.1: Eklemeli imalat yöntemleri (Aktürk ve Korkmaz, 2021)	5
2.2: Eklemeli imalat kategorileri (Aktürk ve Korkmaz, 2021)	6
3.1: AlSi10Mg alaşımının kimyasal bileşimi (Ağırlıkça %).....	36
3.2: Isıl işlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş numunelerin birer yüzeylerine uygulanan titreşimli dövme işlemi süreleri.....	37
4.1: AB, HT ve AB+HT+20 dk titreşimli dövmeden sonra FWHM değerleri ve kristal boyutu.....	53

EKLER DİZİNİ

Ek
No

Sayfa
No



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

μ	: mikron
mm	: milimetre
$^{\circ}\text{C}$	: santigrad derece
μm	: mikrometre
kV	: kilovolt
kx	: büyütme
$\text{\AA}$	: angstrom
Ra	: pürüzlülük parametresi
Rq	: pürüzlülük
HZ	: hertz
dk	: dakika
s	: saniye
W	: watt
N	: newton

KISALTMALAR

SLM	: Seçici lazer ergitme
HT	: Isıl işlem uygulanmış
CAD	: Bilgisayar destekli tasarım
CAM	: Bilgisayar destekli üretim
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
TYB	: Toz yatağı füzyon besleme
FDM	: Eriyik yığılma modelleme
ECP	: Elektro kimyasal parlatma
CHE	: Kimyasal aşındırma
HIP	: Sıcak izostatik presleme
EBM	: Elektron ışıını ergitme
T	: Isıl işleme tabi tutulmuş
O	: Tavlama
H	: Sertleştirme
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu

BSE	: Geri saçınma dedektörü
XRD	: X-ışını difraksiyonu
AB	: AlSi10Mg alaşımı
VP	: Titreşimli dövme
HV	: Vickers sertlik testi
FWHM	: Maksimum yarısı tam genişlik
HCl	: Hidroklorik asit
HNO ₃	: Nitrik asit
H ₂ SO ₄	: Hidroflorik asit
C ₂ H ₂ O ₄	: Oksalik asit
HCl+HNO ₃	: Aqua regia
PLA	: Poli laktik asit
ABS	: Akrilonitril bütadien stiren
Si	: Silisyum
Mg	: Magnezyum
Al	: Alüminyum
Cu	: Bakır
Zn	: Çinko
Ti	: Titanyum
B	: Bor
Sr	: Stronsiyum
Mn	: Manganez
Fe	: Demir
Li	: Lityum
UV	: ultraviole

1.GİRİŞ

Alüminyum, dünyada demir-çelikten sonra en fazla kullanılan elementtir. Dökülebilir olması, kolay işlenebilme yeteneği, hafif olması, iletken yapısı, ısı ve üstün korozyon direnci ve yaşlanma ile dayanımını güçlendirebilmesi gibi üst düzey özellikleri nedeniyle gıda, havacılık, elektrik-elektronik, inşaat, otomotiv ve tarım gibi birçok sektörde yaygın şekilde kullanılmaktadır (Bolton, 1993; Sharma ve Dwivedi, 2005). İkinci dünya savaşı bitimi ile kullanılan alüminyum ve alaşımları iyice artış göstermiştir. Günümüzde alüminyum üzerine yapılan çalışmalar çok fazla artmıştır. Mekanik özellikleri gün geçtikçe olumlu yönde iyileştirilmektedir (Demircioğlu, 2002). Alüminyuma alaşım olarak en çok ilave edilen element silisyumdur. Al-Si alaşımlarının sahip olduğu yüksek ısıl dayanımı, dayanım/ağırlık oranları, elektriksel özellikleri gibi birçok özelliği yüksek olduğu için tercih edilme nedenlerindendir. Döküm yöntemlerinden olan basınçlı döküm, sürekli döküm ve kum kalıba döküm gibi farklı döküm yöntemleriyle üretilebilmektedir. Döküm özellikleri ve dökülebilirliği iyi olduğu için geniş alanda kullanılabilmektedir (Osório vd., 2007). Al-Si alaşımının bir başka özelliği ise yüksek ısıl dayanıma sahip olmasıdır. Magnezyum, bakır ve nikel elementlerinin eklenmesi ile alaşım dayanımının artması sağlanabilmektedir. Alüminyum silisyum alaşımına genellikle ilave edilen element magnezyum elementidir (Zhu vd., 2012). Si elementi alaşımın döküm özelliklerini iyileştirirken, Mg elementi ise alaşımın akma ve kopma mukavemetlerini artırmaktadır (Thirugnanam vd., 2007).

Seçici lazer eritme (SLM) yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımının; stres birikimleri, iç kusurlar ve yüzey pürüzlülüğü gibi istenmeyen durumlar yapılan ikincil işlemler ile giderilmektedir. Oluşan bu dezavantajları yok etmek veya minimize hale getirmek için ikincil işlem olan ısıl işlem AlSi10Mg alaşımına uygulanmıştır. Isıl işlem, genellikle metal ve alaşımlarına uygulanan, malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla yapılan ısıtma ve soğutma işlemidir (Kaya, 2005). Farklı sıcaklıklarda AlSi10Mg alaşımına uygulanan ısıl işlemler sonrasında, farklı sürelerde uygulanan bilyalı dövme işleminin de alaşım üzerindeki etkileri araştırılmıştır. AlSi10Mg alaşımına ısıl işlem ile bilyalı dövme işleminin aynı anda farklı ısıl işlem sıcaklığı ve farklı bilyalı dövme sürelerinin etkileri tezimizin sonuçlar bölümünde paylaşılmıştır.

Seçici lazer yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımlarına uygulanan ısıl işlem çözelti sıcaklıklarımız sırasıyla; ısıl işlem uygulanmayan (HT0), 400 °C, 450 °C ve 500 °C'dir. Uygulanan ısıl işlemlerin alaşım üzerindeki etkileri tez kapsamında incelenmiştir. Isıl işlem sonrasında AlSi10Mg alaşımı numunelere titreşimli dövme işlemi uygulanmıştır. Bilyalı dövme işlemi, her alaşımın bir yüzeyine 2,5 dakika, 5 dakika, 10 dakika ve 20 dakika olacak şekilde uygulanmıştır. Yani örnek verecek olursak; 400 °C'de işlem görmüş olan 4 adet alaşım malzemesinin tek bir yüzeylerine sırasıyla 2,5 dakika, 5 dakika, 10 dakika ve 20 dakika bilyalı dövme işlemi ayrı ayrı uygulanmıştır. Böylece elimizde 400 °C ısıl işlem görmüş alaşım malzemesi için bilyalı dövülmüş olan dört farklı sonuç vardır. Uygulanan dört farklı sıcaklıktaki ısıl işlemlerden 4'er adet bilyalı dövme sonucu toplamda 16 farklı değer ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlar neticesinde eklemeli imalata uygulanan ısıl işlem ve bilyalı dövme işlemi etkilerinin olumlu ve olumsuz yönleri yapılan deneyler sonucunda ortaya çıkmıştır.

Uygulamalar sonucunda alaşım numunelerinin aşınma, sertlik ve mikroyapısal özelliklerindeki değişimleri incelenerek bu tezde bunlar raporlanmıştır. SLM sonrası tek fazlı olan mikroyapı, ısıl işlem ile silisyum çökeltileri oluşturmaya başlamış ve çözeltinin sıcaklığı ile doğru orantılı olarak işlem sıcaklığı arttıkça boyutlarda artmıştır. Bilyalı dövme işlemi, yüzeylerin sertliğini ve dayanımı artıran bir işlem olduğu için AlSi10Mg alaşımına uygulandığında yüzeyde aşındırma direnci olarak alaşıma iyileştirme sağlamaktadır. Bilyalı dövme amacı yüzey temaslı deformasyon olduğundan etki süresi arttıkça beklenen yüzey sertliğinin de artması beklenmektedir. Bunun yanı sıra ısıl işlem uygulanmamış (HT0) AlSi10Mg alaşımının sertliğinin düşük olmasına rağmen bilyalı dövme işlemi sayesinde uygulanan aşındırma kayıpları önemli ölçüde azalmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Tezimizin konusu olan eklemeli imalat ile üretilen alüminyum alaşımına uygulanan bilyalı dövme ve çökeltme sertleşmesi işlemlerinin literatür özetleri anlatılmıştır.

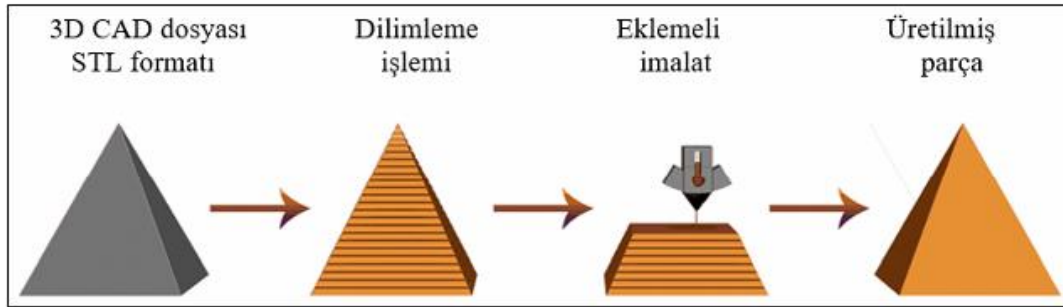
2.1. Eklemeli İmalat Yöntemi

Eklemeli imalat; üretilmesi istenilen nihai parçanın yapılmasında teknolojinin geldiği nokta olarak 3D çizimi yapılmış numunenin katman katman olacak şekilde üst üste inşa edilmesiyle, fiziksel bileşenlerin üç boyutlu modellerden baz alınarak yapılmasına olanak sağlayan teknolojidir. Eklemeli imalat, talaşlı imalat yönteminin aksine bir malzeme bloğunu (elle oyarak veya CNC makinesinde işleyerek gibi) talaş kaldırarak işlenmesi yerine eklemeli imalatta malzeme sıfırdan başlanıp katman oluşturularak parçanın bir bütün hale gelmesi işlemidir. Yani bütünden nihai ürüne gitmek yerine yoktan nihai ürüne gitmektir. Eklemeli imalat, istenen ürünün üst üste katmanlar halinde biriktirilmesi yöntemiyle üretilmesi sonucunda, atık malzemenin çok az veya hiç olmaması gibi avantajlarının önemi gün geçtikçe artarken teknolojik alanda da gelişmeleri devam etmektedir. Tasarım açısından karmaşık yapıları parçaların üretiminin de daha az kalıp ve takım ile üretilmesi kolaylığı sağlamaktadır. Dolayısıyla ürün imalatında montaj gereksinimi işlemlerine gerek duyulmamaktadır. Boşluklu üretim yapılabilmesi gibi avantajları nedeniyle de hafif yapıların üretilmesine izin vermektedir (Poyraz ve Kuşhan, 2017; Poyraz, 2018; Koç, 2021).

Eklemeli imalatın birçok avantajı vardır. Bunlardan bir tanesi elde edilmek istenilen nihai ürünün bir malzeme bloğundan çıkarıldığı eksiltici üretimin aksine, eklemeli üretimde aşırı atık malzeme verilmez. Kullanılan kesici takımlara ve ekstra makinalara gereksinim duyulmamaktadır. Ayrıca talaşlı imalatındaki üretimde, malzeme bloğundan nihai ürüne gidene kadar geçen zaman diliminden kurtulup çok daha kısa sürelerde istenilen parça üretilmekte ve böylelikle zamandan tasarruf edilmiş olunmaktadır. Eklemeli imalatın bu olumlu yanlarının yanında tabii ki olumsuz yönleri de bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi eklemeli imalatın üretimi, katmanların üst üste gelerek oluşmasından dolayı yüzeyin istenilen kalitede olmamasıdır. Yani talaşlı imalatındaki istenilen yüzey kalitesi eklemeli imalatla pek elde edilememektedir. Bunlarla birlikte eklemeli imalatta inanılmaz bir şekil özgürlüğü mevcuttur. Yani diğer üretim yöntemleriyle yapılması zor ve pahalı olan yüksek düzeyde optimize edilmiş parçalar üretilmesine olanak sağlamaktadır.

Bir 3D yazıcının girdisi hammadde artı bilgisayar destekli tasarım (CAD) dosyasıdır. Çıktısı ise son işlem için hazır bir parçadır. Birkaç yıl önce düşük kaliteli kırılğan plastiklerden günümüze yüksek kaliteli mühendislik polimerlerine, metallere ve seramiklere kadar mevcut malzeme yelpazesi giderek artmaktadır. Form özgürlüğü neredeyse sınırsızdır. Ayrıca, parçaya özel kalıplar gerekli olmadığından her parça benzersiz olabilir. Gerekli olan tek şey farklı bir CAD dosyasıdır. Ayrıca, katmanlı üretim için ekipman fiyatlarının önemli ölçüde düşmesi, bilgisayar okuryazarlığı giderek artan halk için katmanlı üretimi daha fazla kullanılabilir hale gelmektedir. (Gebhardt, 2012).

CAD programı ile 3 boyut kazandırılmış olan üretilmesi istenilen parçanın katman katman olarak üst üste biriktirilmesi işlemi olan eklemeli imalat; havacılık, otomotiv ve tıbbi uygulamalarda istenilen yüksek performans için yeni bir üretim tekniğidir. Eklemeli imalatın, talaşlı ve diğer imalat yöntemlerine göre karmaşık parçaların üretimine kıyasla daha az malzeme kullanımı, kaynak ve perçinleme işlemlerine gerek duyulmaması ve üretimin temiz olması gibi avantajları vardır. Eklemeli imalat görseli Şekil 2.1’de verilmiştir. Bunun aksine imalat sonrası oluşan kusurlar için gereken ekstra işlemler (ısıl işlem vb.) de bu üretim yönteminin dezavantajıdır.



Şekil 2.1: Eklemeli imalat görseli (Siyambaş ve Turgut, 2022)

Günümüzde yaygın olarak kullanılan 3D printerlarda hammadde olarak plastik filamentin tabla üzerine eritmeyle biriktirme işlemi olarak üretilen 3 boyutlu bir imalatır. Buna benzer üretim mantığı aynı veya yakın mantıkta olan metal esaslı eklemeli imalat için, gerekli olan bir enerji kaynağı ile metal telin veya metal tozunun eritilerek katman katman 3 boyutlu imal edilmesi günümüzde üretim için modern bir yöntemdir. Eklemeli imalat yöntemi ile üretilen metal esaslı ürünlerin; oksidasyon, korozyon direnci ve yüksek sıcaklıklardaki dayanımı ile mekanik özelliklerini kaybetmeme gibi belirli özellikleri vardır.

Eklemlı imalatta üretimi yapılacak nihai ürünün üretilme işlemi genellikle düzlemseldir. 3D çizimi yapılan ürün, bilgisayar programında (Computer Aided Manufacturing (CAM) programlarında) geometrik bir yapı oluşturmak için prizmatik olarak dilimleme şeklinde oluşturulmaktadır. Yani birinci düzlem işlendikten sonra diğer işlemler bu düzlemin üstüne (katman katman) gelecek şekilde malzemelerin ilavesi ile oluşan bir üretim şeklidir. Her katman bir sonrakinin üzerine merdiven şekline benzer şekilde eklenerek nihai ürün elde edilmektedir.

Eklemlı imalat teknolojileri, farklı yöntemlerle farklı ürünlerin üretilmesini sağlayan sistemlerdir. Üretimde kullanılan malzemelerin çeşidine ve işlem adımlarına bağlı olarak eklemlı imalat birbirinden ayrılmaktadır. Endüstride yaygın kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerin kısaca açıklamaları Tablo 2.1’de gösterilmiştir (Aktürk ve Korkmaz, 2021).

Tablo 2.1: Eklemlı imalat yöntemleri (Aktürk ve Korkmaz, 2021)

Eklemlı İmalat Teknolojisi	Tanımı
Binder Jetting (BJ)	Yapıştırıcı (bağlayıcı) püskürtme
Digital Light Processing (DLP)	Dijital ışık işleme
Direct Metal Deposition (DMD)	Direkt metal depozisyonu
Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Direkt metak lazer sinterleme
Electron Beam Melting (EBM)	Elektron ışını ile ergitme
Fused Deposition Modeling (FDM)	Birleştirmeli yığma modellemesi
Laser Metal Deposition (LMD)	Lazer metal biriktirme
Laminated Object Manufacturing (LOM)	Lamine nesne imalatı
Multijet Modeling (MJM)	Çok jetli modelleme
Plaster Based Printing (PP)	Alçı esaslı baskı
Selective Heat Sintering (SHS)	Seçici ısıtmalı sinterleme
Stereolithography (SLA)	Stereolitografi
Selective Laser Melting (SLM)	Seçici lazer eritme
Selective Laser Sintering (SLS)	Seçici lazer sinterleme

ASTM (Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu), eklemlı imalat yöntemlerini üretim aşamalarında kullanılan malzemelerin çeşidine ve katmanların işlem adımlarına göre 2012 yılında bu yöntemleri 6 kategoriye ayırmıştır. Eklemlı imalat yönteminde kullanılabilen materyaller ve yöntemler baz alınarak oluşturulan kategoriler Tablo 2.2’de gösterilmiştir (Aktürk ve Korkmaz, 2021).

Tablo 2.2: Eklemeli imalat kategorileri (Aktürk ve Korkmaz, 2021)

İşlem Kategorisi	Açıklama	Teknolojiler	Materyaller
Toz Yatağı Füzyonu	Toz yatağında seçili bölgelerin ısı ile birleştirilmesi	SLS, SLM, EBM, DMLS, SHS	Metaller ve polimerler
Doğrudan Enerji Biriktirme	Eriyik malzemenin ısı enerjisiyle birleştirilmesi	LMD, DMD	Metaller
Malzeme Yığma	Eriyik malzemenin nozül vasıtasıyla yığın haline getirilmesi	FDM	Polimer esaslı malzemeler
Fotopolimerleşme	Likit fotopolimer ham maddenin UV ışını ile katılaştırılması	SLA, DLP	Fotopolimerik reçineler
Yapıştırıcı Püskürtme	Toz yatağına yapıştırıcı püskürterek tozların birleştirilmesi	BJ, PP	Polimerler, metaller, alçı, kum
Malzeme Jeti	Malzemenin damlacıklar şeklinde biriktirilmesi	MJM, Polyjet	Polimerler mumlar

2.1.1. Toz Yatağı Füzyonu;

Lazer toz yatağı füzyon yöntemi metal eklemeli imalat yöntemlerinden birisidir. Bu yöntemde makine içindeki basım plakasının üzerine serilen metal tozları lazer enerji kaynağı ile ertitilir. Bir toz katmanının, üretilecek parçanın ilgili katmanına uygun olacak şekilde ertitilmesinden sonra basım plakası bir katman kalınlığı kadar aşağı iner. Ertitilen toz katmanının üzerine yeni bir toz tabakası serilir ve lazer tarama ve ertitme işlemi devam eder. İlgili prosesin katman katman ilerlemesi neticesinde nihai parça elde edilmiş olur (Volpato vd., 2022). Bu yöntemlerde, ince bir metal toz tabakası üzerine bir lazer (SLM) veya elektron ışını (EBM) seçici olarak taranarak toz taneciklerinin eriyip katılması sağlanır. Yüksek enerji girdisi ve hızlı soğuma hızları, ince taneli, dendritik veya sütunsal bir mikroyapının oluşmasına neden olabilir (Yadroitsev ve Smurov, 2011; Herzog vd., 2016). Katmanlar arası yeniden erime ve ısı döngüleri, tane sınırlarında ve faz dağılımında heterojenliklere yol açabilir. Ayrıca, yetersiz erime veya gaz hapsolmesi sonucu porozite oluşumu da yaygın bir problemdir (Thijs vd., 2010).

“Katman katman” üretim yöntemi sayesinde seçici lazer sintereleme/ertitme ve elektron ışını ertitme gibi Toz Yatak Füzyon Besleme (TYB) yöntemini kullanan cihazların, geleneksel yöntemler ile üretilemeyen karmaşık şekiller ve geometrileri üretilebilir kılması ile tasarım serbestliği kazanılmıştır (Chen vd., 2018; DebRoy vd., 2018). Eklemeli imalat sürecinde, kalıntı gerilme, toz besleme eksikliği, topaklanma, gözeneklilik, çatlama gibi kusurlar parçanın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir (Sames vd., 2016).

Toz yatağı füzyonun bazı avantajları şunlardır;

- Yüksek hassasiyet; Karmaşık geometriler için ve üretimi zor olan parçaların hassas bir şekilde üretilmesine olanak tanır.
- Malzeme çeşitliliği; Metal ve polimer malzemeler toz yatağı füzyonu için kullanılabilir.
- Malzeme israfının azaltılması; bu işlemde ergitme işlemi seçici olarak yapıldığı için sadece gerekli olan malzeme kullanılır ve böylelikle atıklar azaltılmış olur.

Toz yatağı füzyonun bazı dezavantajları ise şunlardır;

- Yüksek maliyet; malzemeler ve ekipmanların pahalı olması bu işlem için olumsuz durumdur.
- Üretim sürelerinin uzunluğu; üretim işlemi katmanlar üreterek üst üste yapıldığı için işlem süreci zaman alıcı olabilir.
- Destek yapılar; üretim işleminde geometrisi zor olan karmaşık yapıları ürünler üretilirken bazen destek yapılara ihtiyaç duyulur. Bu destek ihtiyaçları üretim sonrası çıkartılır.

Toz yatağı füzyonu genellikle havacılık, tıp ve otomotiv sektöründe kullanılmaktadır.

2.1.2. Doğrudan Enerji Biriktirme;

Doğrudan enerji biriktirme yönteminde, metal tozu veya tel formundaki malzeme doğrudan bir enerji kaynağı (lazer, elektron ışını veya plazma arkı) ile ergitilerek yüzeye eklenir. Daha düşük soğuma hızları ve daha büyük eriyik havuzu boyutları, genellikle daha kaba taneli bir mikroyapının oluşmasına neden olur (Rodríguez vd., 2018). Katmanlar arası süreklilik ve bağ kalitesi, mekanik özellikler açısından kritik öneme sahiptir.

Doğrudan enerji biriktirmenin avantajları şunlardır:

- Yüksek biriktirme oranı; büyük boyutlu ve kaba parçaların üretilmesi hızlıdır.
- Malzeme çeşitliliği; metaller ve alaşımları için uygundur.
- Ekleme işlemi veya onarım; mevcut üretilmiş olan parçalara ekleme işlemlerinin yapılabilirliği veya onarım işlemi yapılması mümkündür.

Doğrudan enerji biriktirmenin dezavantajları şunlardır:

- Çözünürlüğün düşük olması; zor ve karmaşık yapıları geometriler için uygun olmayabilir.
- Maliyet yüksekliği; malzemeler ve ekipmanlar pahalı olabilir.

2.1.3. Eriyik Yığma Modelleme;

Eriyik yığma modelleme (FDM) yönteminde, termoplastik bir filament ısıtılarak ergitilir ve bir nozülünden geçirilerek katman katman bir platform üzerine ekstrüde edilir. Katmanlar arasındaki bağ mukavemeti, eriyik sıcaklığı, ekstrüzyon hızı ve soğuma koşulları gibi parametrelere bağlıdır. Zayıf katmanlar arası bağlar, anizotropik mekanik özelliklere ve düşük dayanımlara neden olabilir (Domingo-Espin vd.,2016).

Eriyik yığma modellemenin avantajları şunlardır:

- Maliyet; 3D modellemelerin en ekonomidir.
- Malzeme çeşitliliği; termoplastik malzemelerden olan ABS, PLA ve PEKK gibi malzemeler kullanılabilir.
- Üretim kolaylığı; bakımı ve kullanımı diğer 3D modellemelere göre çok basittir.

Eriyik yığma modellemenin dezavantajları şunlardır:

- Yüzey kalitesi; modelleme katmanlar şeklinde olduğu için yüzey pürüzlülüğü oluşabilir.
- Çözünürlük; düşük çözünürlüğe sahiptir.

Bu modelleme yöntemi ürün geliştirmek için ve genellikle ürün prototipi oluşturmada kullanılmaktadır.

2.1.4. Fotopolimerleşme;

Fotopolimerleşme, sıvı bir fotopolimer reçinesi, UV ışığı veya bir projektör yardımıyla seçici olarak katılaştırılır. Yüksek çözünürlük ve pürüzsüz yüzeyler elde edilebilirken, polimer zincirlerinin çapraz bağlanma derecesi ve kalıntı stresler mekanik özellikleri etkileyebilir (Melchels vd., 2012).

Bu yöntem, detaylı işlerde ve yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda kullanılır. Genellikle dişçilik, tıp ve mücevherat sektörü alanlarında kullanılır.

2.1.5. Yapıştırıcı Püskürtme;

Yapıştırıcı püskürtme genellikle 'binder jetting' olarak bilinmektedir. Bu yöntemde, toz yatağına seçici olarak bir bağlayıcı sıvı püskürtülerek toz taneciklerinin birbirine yapışması sağlanır (Mostafaei vd., 2021). Bağlayıcının kullanılmasının nedeni, bağlayıcı ile toz parçacıklarının birbirine bağlanmasını sağlamaktır. Birbirine bağlanan ve katman haline gelen yapıların üzerinde yeni katmanlar oluşturulur. Böylelikle katmanlı imalat gerçekleştirilmektedir. Parça, toz yatağından çıkarılır, kullanılmayan toz, basınçlı hava yardımı ile işlem sonrası olarak alınır. Bu işlem, daha önce bahsedilen toz yatağı füzyon tekniklerinin avantajlarına sahiptir. Örneğin, toz yatağında üretilen parçalar, tozun fiziksel desteğinden dolayı destekleyici yapılara ihtiyaç duymaz. Bu nedenle bu yöntemde de destekleyici yapıların kullanımına gerek kalmaz. Ayrıca kullanılmayan tozlar, tıpkı toz yataklı füzyon yöntemlerinde olduğu gibi, geri dönüştürülebilir. Ek olarak malzeme püskürtme teknolojisinde olduğu gibi renkli parçalar da imal etmek mümkündür. Toz yataklı füzyon yöntemlerine benzer avantajlarının yanı sıra malzeme püskürtme yöntemindeki bazı avantajlara da sahiptir. Örneğin, daha hızlı parçalar üretilebilir ve malzeme sınırlaması daha azdır (Gibson vd., 2015; Konda Gokuldoss vd., 2017).

2.1.6. Malzeme Jeti Teknolojisi;

Yöntemin temel prensibi, fotopolimerlerin ışık etkisi altında kimyasal reaksiyona uğramasına dayanmaktadır. Fotopolimere ek olarak balmumu da kullanılabilir. Yöntem, farklı materyallerin birlikte basılmasını sağlamaktır. Bazı uygulamalarda gerekli olan destekleyici yapılar, bu yöntemde farklı malzemelerden üretilmektedir. Bu nedenle, ana parça ve destek yapıları için iki farklı reçine mevcuttur (Gibson vd., 2015; Yap vd., 2017). Fotopolimer damlacıklar halinde püskürtülür ve UV ışınları ile sertleştirilir. Ana madde formu damla olduğu için viskozite önemli bir parametredir. Damlaların katılma süreci de tekniğin başarısı için önemlidir. Damlaların uygun olmayan katılması istenmeyen sonuçlara neden olabilir. Parçanın başarılı bir şekilde üretilmesinde, bu parametrelerin önemi olduğu gibi, bitirme işlemlerinin de parçanın yüzey kalitesine etkisi büyüktür. Karmaşık, detaylı parçaların istenilen formda ve doğru ölçülerde üretilmesindeki başarısının

yanı sıra üretilen parçanın yüzey kalitesi yüksektir. Basılan kısımlar istenildiği gibi renklendirilebilir, renklendirme işlemleri diğer yöntemlere göre daha kolay ve daha az maliyetlidir. Süreç hızlandırılabilir. Sağladığı avantajların yanı sıra, reçinenin ana malzemesi kırılgandır, dolayısıyla baskılı parçanın mekanik özellikleri zayıftır. Ek olarak, kullanılan malzeme türü sınırlıdır. Ancak bu dezavantajların iyileştirilmesi ve yöntemin geliştirilmesi beklenmektedir (Gibson vd., 2015).

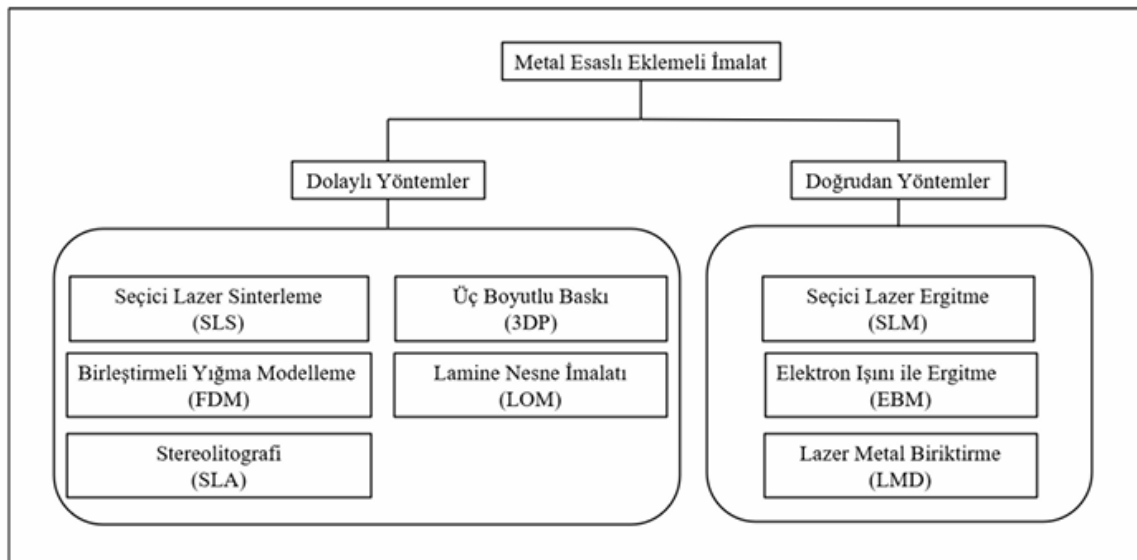
Malzeme jeti teknolojisinin avantajları;

- Detay işlemler ve yüksek hassasiyet; çok ince katmanlar üretilmesi nedeniyle yüksek çözünürlük sağlar.
- Çoklu malzeme kullanımı; aynı anda farklı malzemeler veya renkler kullanılabilir.
- Yüzeylerin kalitesi; yüksek kalitede pürüzsüz yüzeyler elde edilebilir.

Malzeme jeti teknolojisinin dezavantajları;

- Maliyet; ekipman ve malzemeler yüksek ücretler gerektirebilir.
- Malzeme çeşitliliği; sınırlı malzemeler kullanılır.

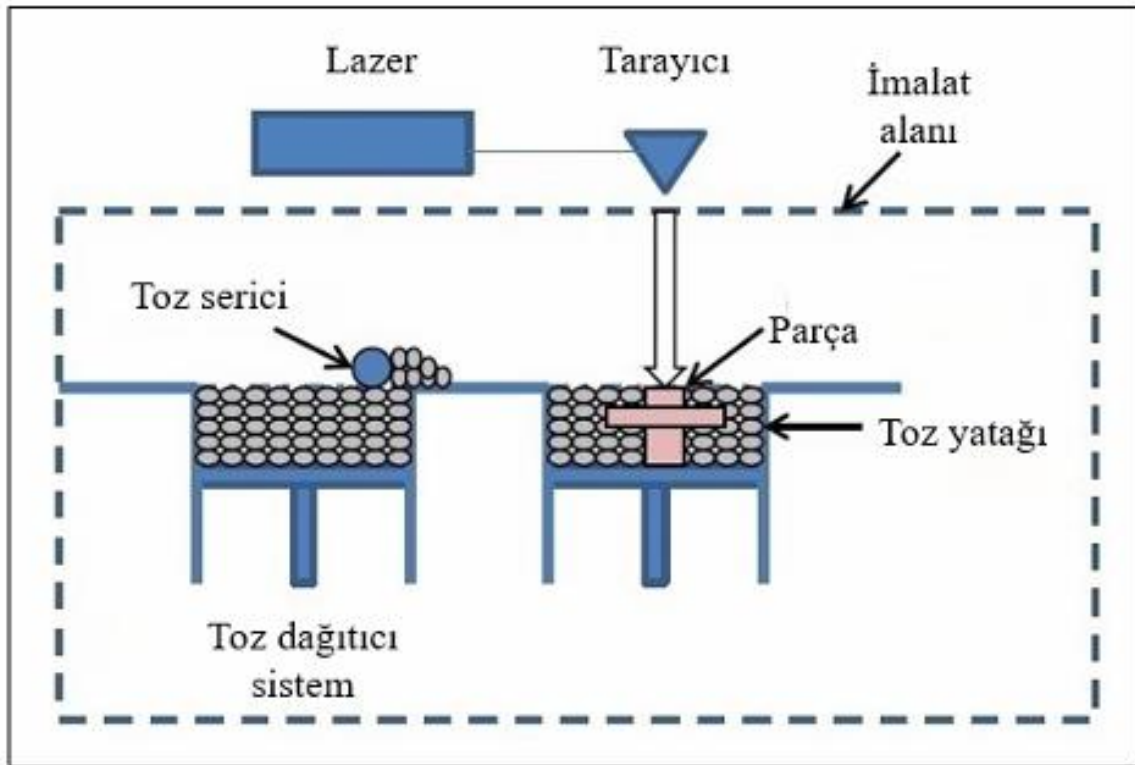
Metal esaslı olan eklemeli imalat yöntemleri ikiye ayrılır. Bunlardan biri dolaylı, bir diğeri ise doğrudan uygulanan yöntemlerdir. Dolaylı ve doğrudan yöntemlerinde kendi içlerinde üretim farklılıkları vardır. Metal esaslı imalat yönteminin sınıflandırılması Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



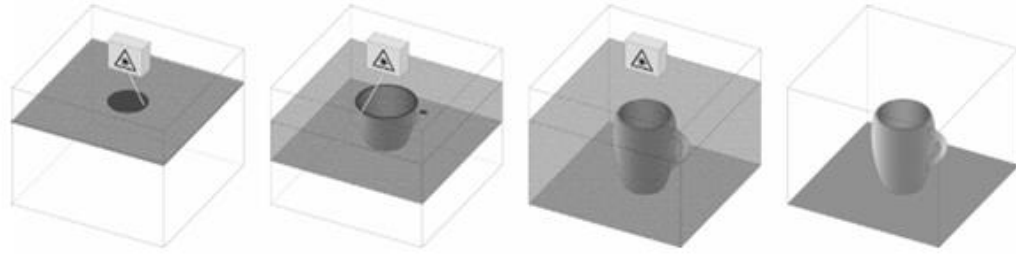
Şekil 2.2: Metal esaslı eklemeli imalat yönteminin sınıflandırılması (Siyambaş ve Turgut, 2022)

Karmaşık iç yapıya sahip ürünlerin üretilmesinde kullanılan metal esaslı eklemeli imalat yöntemi Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemidir. Bu yöntemde geometrik şekli üretebilmek için toz malzemenin ergimesi gerekmektedir. Yani CAD verisi sisteme yüklendikten sonra bir enerji kaynağı ile toz yatağına sürülen tozların tarama yönünde ergime işlemi yapılarak yüksek yoğunluğa sahip ürünler oluşturulur. Bu yöntemde (SLM) hızlı soğuma gerçekleştiği için ince mikroyapıya sahip ürünler oluşmaktadır. Bununla birlikte ürünlerin üstün mekanik özellikleri de oluşmaktadır. Ayrıca bu yöntemle üretilen ürünler diğer üretim yöntemlerine (geleneksel üretim yöntemi) göre daha iyi performansa ve yüksek yoğunluğa sahiptirler.

SLM yöntemi birden fazla kullanım alanında yer alsa da en yaygın olarak medikal, havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılmaktadır. Lazerle ergitme yönteminde öncelikle ince toz formundaki malzemeyi ergitmek için lazer kaynağı kullanılır. Lazer ışını tarama optikleri yardımıyla x ve y eksenlerinde ve yapının oluştuğu platform olan z ekseninde hareket eder (Evrensel ve Ertek, 2023). Seçici lazer ergitme yöntemi Şekil 2.3'te, seçici lazer ergitme yönteminin 3D görseli ise Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



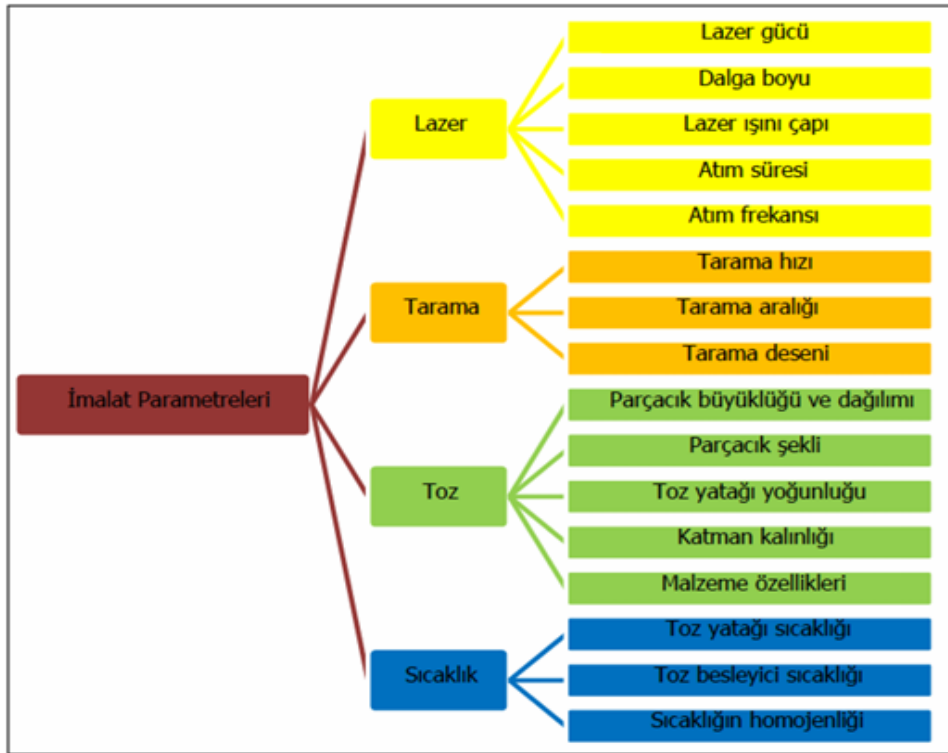
Şekil 2.3: Seçici lazer ergitme yöntemi (SLM) (Siyambaş ve Turgut, 2022)



Şekil 2.4: Seçici lazer ergitme yöntemi (SLM) 3D görseli (Gebhardt, 2012)

Eklemeli imalatla, üretim işlemi çok zor görünen veya üretilemeyecek olan bileşenler bu yöntemle rahatlıkla üretilebilir. Bu durum bizlere hem zaman konusunda hem de maliyet konusunda tasarruf sağlar. Ayrıca araştırmalar, eklemeli imalat yöntemiyle üretimin yapılmasında firmalarda stoklamanın önüne geçerek depolama maliyetlerini azaltabileceklerini göstermiştir. Eklemeli imalat makineleri kaynak olarak lazer veya elektron ışını kullandığından yedek parça üretiminde geleneksel üretime oranla dökme, dövme ve frezeleme üretim yöntemlerine oranla kıyaslandığında rakipsizdir.

Seçici lazer ergitme yöntemlerinde imalat parametreleri; lazer, tarama, toz ve sıcaklık olmak üzere bu ana başlıklara ayrılmıştır ve Şekil 2.5'te gösterilmiştir (Sun vd., 2017).



Şekil 2.5: SLM yönteminde imalat parametreleri (Siyambaş ve Turgut, 2022)

SLM yöntemi ile üretilen parçaların kalitesini bazı parametreler etkilemektedir. Bu parametreler giriş ve çıkış parametreleri olarak adlandırılır. Giriş parametresi olarak; lazerin gücü, taramanın hızı, taramanın aralığı, katmanın kalınlığı, tarama yönteminin deseni, inşanın yönü ve tozun özellikleri gibi değişkenler olarak belirlenirken, çıkış parametreleri ise; malzemenin yoğunluğu, mekanik özellikleri, yüzeyin pürüzlülüğü ve geometrik ve metalürjik yapı olarak ayrılmıştır (Duman ve Kayacan, 2017). Örneğin lazerin gücü az olduğunda toz eritmesi zorlaşır. Bununla birlikte tarama hızı düşer ve katman kalınlığı farklılaşır. Bunları en optimum seviyeye ayarlamak üretilen parçanın mekanik özelliklerini, tane yapısı ve yüzey kalitesini etkilemekle beraber üretilen parçanın ekstra işlemlere tabi tutulmasını (talaşlı imalat vb.) azaltır. Kısacası eklemeli imalatın kalitesini, imalat parametrelerin bütün adımlarından etkilenmektedir.

Şu an günümüzde ve gelecekte her evrede eklemeli imalatın önemi gün geçtikçe daha çok artacaktır. Hiçbir tasarımcının göz ardı edemeyeceği uygulama alanı kalıplardır. Plastik enjeksiyon ve metal döküm sektörlerindeki seri üretim tesislerinde kalıp hazırlama ve kalıp yapmanın ciddi sorumlulukları vardır. Kalıp işleri için ciddi emeğe, zamana ve harcamalara gereksinim duyulmaktadır. Fakat eklemeli imalat yöntemi ile kalıp hazırlamada yapılması güç olan yapılar için form özgürlüğünün olması, karmaşık ve kavisli soğutma kanallarının yapılabilirliği gibi geleneksel kalıp hazırlamayla imkânsız gibi görünen her detay eklemeli imalat ile günümüzde pek uygulanmasa da gelecek için büyük bir adım olacaktır.

Eklemeli imalatın avantajları kısaca şu şekilde özetlenebilir;

- Üretim maliyetlerinin azaltılması: pazarlama alanı düşük hacimli üretimlerde veya özellikle belirli kitlelere özelleştirilmiş fason üretimler için büyük yatırımlar gerektirmeden yapılabilirlik, ekonomik olarak büyük bir avantajdır.
- Karmaşık yapıli ürünlerin üretilmesi: geleneksel üretimin sınırlı olduğu veya çok zor olduğu durumlara kıyasla, eklemeli imalata uygun malzemelerin sıralı olarak üst üste katman şeklinde eklenmesi karmaşık yapıli bileşen imalatına uygundur.
- Özel malzemeler: eklemeli imalat üretimi istenilen birim malzemeleri benzersiz şekilde işler. Bu özellik nedeniyle geleneksel üretimde mümkün olmayan yapılar için malzeme biliminde, metalürjik yapıda malzeme yeniliğini mümkün kılar.
- Üretken tasarım çeşitliliği: eklemeli imalatın dijital yapısı, tasarımı zor olan karmaşık yapıli mühendislik sistemlerinin çizimleri, üretimi ve dokümantasyonları için bir kolaylık sağlar.

- Azaltılmış atık; eklemeli üretimde girdi olarak kullanılan malzemelerin verimli şekilde kullanımı sayesinde atık malzeme oluşmaz ve düşük maliyetle karmaşık yapıları geometrilerin üretimini mümkün kılar.
- Üretim için dağıtılabilirlik; eklemeli imalat yöntemi için oluşturulan dijital dosyalar, üretim merkezleriyle küresel olarak paylaşılabilir ve istenilen şekilde üretim yaptırılabilir. Bu durum eskiye oranla nakliye ve teslim süresine gerek kalmayacağından dolayı maliyetlerin azaltılmasına olanak sağlar.

3D printerlar ilk üretildiklerinde insanlar tarafından merakla takip edilmesi durumuyla işyerleri haricinde günümüzde birçok insanın evinde 3D printer portatifi bulunmaktadır. Buna istinaden gelecekte insanlar eklemeli imalat portatifleri ile evlerinde lazım olan her ürünü istedikleri gibi kendileri tasarlayıp üretebilecek düzeye gelinebilir.

2.1.7. Eklemeli İmalat Sonrası İkincil İşlemler

Eklemeli imalat ile üretilen malzemelerin avantajları büyük olmasına rağmen yüzey olarak nispeten düşük yüzey kalitesine sahiptir. Bundan dolayı kullanıma hazır ürünler elde etmek için bu malzemelere ikincil işlemler yapılır. Eklemeli imalatla üretilen malzemelere kimyasal, mekanik ve termal olmak üzere ikincil işlemler yapılır.

2.1.7.1. Kimyasal Parlatma / Polisaj

Metal yüzeylerinin kalitesini artırmak ve eklemeli imalat sırasında yüzeyde kısmen de olsa kalmış olan ergimiş haldeki toz parçacıklarının yüzeyden çıkarılması için gereken belirli bir süre kimsayal solüsyonlar kullanılarak uygulanan bir işlem yöntemidir.

2.1.7.2. Elektrokimyasal Parlatma (ECP)

Elektrokimyasal parlatma işlemi, geleneksel üretimle veya eklemeli imalat ile üretilmiş olan bir elektrot (katot) ve iletken olan bir metal numunenin (anot) elektrolitik yapı olarak elektrokimyasal çözünmesi işlemidir. Elektrokimyasal parlatma işleminde, elektrod ile ürün arasında fiziksel bir temas olmadığından; karmaşık yapıları şekillere sahip malzemeler, sertleştirilmiş malzemeler ve kırılabilir yapıları malzemeler için kullanılan bir parlatma

yöntemidir (Sunay vd., 2020).

2.1.7.3. Elektro Kaplama

Elektrokimyasal yöntemlerle metal veya metal olmayan malzemelerin yüzeylerine ince bir film oluşturulması yöntemidir. Yapılan işlem ürün için son işleme yöntemidir ve eklemeli imalatla yaygın şekilde kullanılmaktadır. Genellikle polimerik malzemeden yapılmış ürünlerin iletkenliğini ve mukavemeti artırmak için uygulanır. Kaplama malzemesi olarak en yaygın kullanılan malzemeler; bakır, altın, krom, gümüş, çinko, nikel ve pirinçtir (Sunay vd., 2020).

2.1.7.4. Kimyasal Aşındırma / Dağlama (CHE)

Malzeme yüzeyinde istenilen yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için uygulanan kimyasal işlemdir. Kimyasal aşındırma işleminde kullanılan kimyasal çözeltiler malzemenin yüzeyinde reaksiyon gerçekleştirir. Bu son işleme yöntemidir ve genellikle tıp endüstrisinde karmaşık yapılı olan alet ve ekipmanların yüzey pürüzlülüğünü gidermekte kullanıldığı bilinmektedir. Dağlama işleminde kullanılan çözeltiler; hidroklorik asit (HCl), nitrik asit (HNO₃), sülfürik asit (H₂SO₄), hidroflorik asit (HF), oksalik asit (C₂H₂O₄) ve aqua regia (HCl+HNO₃) gibi seyreltilmiş sulu çözeltilerdir (Sunay vd., 2020).

2.1.7.5. Buharla Düzeltme / Yumuşatma

Isıtılmış olan kimyasal buharı, malzeme yüzeyine belirlenen sürede temas olmadan yüzeyini pürüzsüzleştirdiği son işlem yöntemine buharlı yumuşatma işlemi denir. Genellikle termoplastik malzemelerden olan poli laktik asit (PLA) ve akrilonitril bütadien stiren (ABS) gibi malzemelerin; dikloroetilen, etil asetat, aseton ve tetra hidroflorür vb. gibi kimyasallarla parlatılmasıdır (Sunay vd., 2020).

2.1.7.6. Sıcak İzostatik Presleme (HIP)

Bu yöntem genellikle seramik ve metal malzemelerin iç yapılarını iyileştirmek için uygulanan imalat yöntemidir. Atmosfer ortamında (genellikle argon gazı) gerçekleştirilen bu yöntemde yüksek sıcaklık (≤ 1450 °C) ve yüksek basınç (≤ 2000 bar / 200 MPa) kullanılır.

Bu yöntemin amacı seramik ve ağırlıklı olarak kullanılan metal malzemelerin bileşenlerini yoğunlaştırarak mukavemetlerini artırmaktır. Yoğunlaşma sayesinde malzemenin korozyon direnci, yorulma ömrü ve süneklilik gibi özellikleri iyileştirilir.

HIP prosesi; nikel-kobalt alaşımı, krom-kobalt alaşımı, magnezyum, bakır, titanyum ve alüminyum içerikli alaşımlardan üretilmiş olan malzemeler için ideal bir yöntemdir. HIP yöntemi; döküm malzemelerinin yoğunlaştırılması, toz metalürjisi ile üretilen parçaların sinterlenmesi ve eklemeli imalat yöntemi ile üretilen malzemelerin iç yapısında bulunan kusurların yok edilmesi gibi birçok alanda kullanımı vardır. Nükleer sanayi, savunma sanayi, havacılık, medikal ve otomotiv gibi endüstrilerde içyapı iyileştirmek için kullanılan en etkili yöntemdir (Evrensel ve Ertek, 2023).

2.1.7.7. Lazerle Dövme

Malzeme yüzeyine gönderilen lazer ışınlarının malzemenin yüzeyini plastik deformasyona uğratması işlemine lazerle dövme yöntemi denilmektedir. Malzemelerin yorulma ömrünü iyileştirmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Genellikle yakıt depolama tankları, kompresör kanatları, uçak yapıları ve jet motoru fanlarında kullanılır. Lazerle dövme yöntemi işleminde yoğun ve kısa uygulanan lazer darbeleri, malzeme yüzeyinde plastik deformasyona neden olur ve yüzey pürüzlülüğünü de azaltır (Peng vd., 2021).

2.1.7.8. Lazerle Parlatma

Eklemeli imalat ile üretilen malzemelerin yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmede kullanılan bir yöntemdir. Lazerle parlatma sırasında lazer ışını malzeme yüzeyine çarparak malzemenin morfoloji tepe noktalarını hızlı şekilde ergime noktasına ulaştırır. Malzeme yüzeyinde ergimiş havuz oluşur ve yüzey gerilimi ve yerçekiminin etkisiyle bulunduğu yerde dağılır. Lazerle yüzey tarama işi durduğunda taranan bölgelerin sıcaklığı hızlı şekilde düşer ve oluşan ergimiş havuz katılaşır. Gerçekleşen bu işlemle malzeme yüzeyinde pürüzlülük azalır (Peng vd., 2021).

2.1.7.9. Makineyle İşleme ve Aşındırma

Makineyle işleme ve kumlama yöntemleri ile endüstride kullanılan parçaların şekil bütünlüğünü ve yüzeyinin kalitesini bozmadan, bu parçaların yüzey kalitesini daha da artırmak için kullanılan geleneksel bir yöntemdir. Bu yöntemin yüzeye nüfuz etme özelliği yüksek olduğundan, eklemeli imalat için son işleme yöntemi olarak kullanılırlar (Peng vd., 2021).

2.2 Alüminyum ve Alaşımları

Alaşım; iki veya daha fazla elementin birbirlerine belirli oranlarda ve homojen olacak şekilde karıştırılması ile oluşan malzemelerdir. Saf metallerin kendilerine özgü özelliklerini daha da iyileştirmek için oluşturulan alaşımlar, genellikle yüksek mukavemet, korozyon direnci, sertlik vb. özellikleri gibi belirgin özelliklerin geliştirilmesi amacıyla üretilen malzemelerdir.

Alaşımların özellikleri;

- Mukavemet ve Sertlik; alaşım malzemeleri, saf hallerinden daha yüksek mukavemet değerlerine ve sertliğe ulaşmaktadır.
- Korozyon Direnci; alaşım malzemeleri saf elementlerin çoğuna göre korozyona karşı çok daha dayanıklı yapıdadırlar.
- Isıl ve Elektriksel İletkenlik Durumu; istenilen ısı ve elektriksel iletkenlik durumu alaşımlar ile rahatlıkla oluşturulabilmektedir.
- İşlenebilirlik Durumu; alaşım malzemelerinin başka bir özelliği olarak işlenebilirliği ve şekil verilebilirliği kolay olmaktadır.

Günümüzde yaygın kullanılan alaşımlar şunlardır;

- Çelik: demirin elementinin karbon elementi ile oluşturduğu alaşımdır. Malzemenin mukavemetini artırmak ve dayanıklılığını yükseltmek için kullanılmaktadır.
- Bronz: Bakır elementi ile kalay elementinin oluşturduğu bir alaşımdır. Oluşan alaşım malzemesi ile işlenebilirliğini geliştirmektedir ve yüksek korozyon direnci sunmaktadır.
- Pirinç: Bakır elementi ile çinko elementinin oluşturduğu bir alaşımdır. Malzemeye dekoratiflik katmaktadır ve endüstriyel uygulamalarda sık şekilde kullanılmaktadır.

- Duralümin: Alüminyum ile bakır elementinin oluşturduğu bir alaşımdır. Oluşturulan alaşım malzemesi çok hafif olduğundan ve buna karşın yüksek mukavemeti sebebiyetiyle havacılıkta kullanılmaktadır.

Günümüzde alaşımlar; mühendislik, inşaat, otomotiv, havacılık ve birçok endüstri sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Demir ve çelikten sonra endüstri alanında en çok alüminyum ve alaşımları kullanılmaktadır. Alüminyumun günümüzde çok fazla tercih edilmesinin nedeni onun üstün özelliklere sahip olmasındandır. Alüminyumun hafif yapısı olmasına rağmen alaşımları yapı çeliklerinden daha fazla mukavemete sahiptir. Elektriksel özelliklerinin ve ısı iletkenliğinin de iyi olmasının yanında yüksek bir ısı ve ışık yansıtma gibi özellikleri de vardır. Korozyon direnci çok iyidir bunlara ek olarak döküm ve şekillendirilebilirliğinin de kolay olması sayesinde birçok alanda kullanılmaktadır (Erdoğan, 2001).

Magnezyum ve berilyum gibi hafif metallere sonra en hafif metal alüminyumdur. Özellikle mühendislik alanındaki uygulamalarda bu özellikleri nedeniyle geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Altenpohl, 2002).

Alüminyum metali, endüstri alanında mekanik özellikteki gereksinimleri karşılayabilmesi için alaşım yapılarak kullanılmaktadır. Alüminyum en fazla silisyum (Si) elementi ile alaşımlandırılmaktadır. Magnezyum (Mg), bakır (Cu), çinko (Zn), titanyum (Ti), bor (B), stronsiyum (Sr), manganez (Mn) ve demir (Fe) elementleri alüminyumun alaşım oluşturabildiği diğer elementlerdir. Alüminyumun ürün yelpazesinin çeşitliliği ve üretim kapasitesindeki artışın nedeni alaşımlama işleminden kaynaklanmaktadır. Alaşımlar, alaşımda kullanılan elementlerin özelliklerine göre mikroyapısal olarak farklılıklara oluşturmaktadır. Örneğin, mukavemeti yüksek istemeyen fakat korozyon için direncin yüksek olması istenen durumlarda yapısında Cu elementi içermeyen alaşımlar kullanılırken, tam tersi durumda yüksek mukavemet isteyen ve korozyon direncinin kritik olmadığı durumlarda ise %5'e kadar bakır elementi kullanılabilir. Başka bir alaşım elementi olan silisyumun özelliği, alaşımda sıvı metale akışkanlık kazandırırken aynı zamanda döküm sırasında iş parçasına çekinti oluşturma meyilini de azaltmaktadır. Al-Si döküm alaşımlarında yapısında en istenmeyen element demirdir. Demir elementi, alüminyum ile kararlı yapıda olmasına karşın kırılgan bir yapıya sahiptir. Demir alaşımın sünekliğini kötü yönde etkilediği gibi korozyon dayanımını da düşürmektedir (Yağcı vd., 2021)

Alüminyumun günümüzde bu kadar yaygın olarak kullanılmasının birçok nedeni bulunmaktadır. Düşük yoğunluğunun olması onu diğer metallerden ayırırken; korozyon dayanımı, mekanik ve fiziksel özellikleri, ekonomik oluşu, ısı ve elektrik iletkenliği ve birçok üretim yöntemiyle üretilebilir olması alüminyumu çelikten sonra gelen en önemli metal haline getirmiştir. Ambalaj, ulaşım, inşaat, elektrik endüstrisi gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır (Vatansever vd., 2018).

Alüminyumun elementler ile oluşturduğu alaşımlarda mikroyapılarını fiziksel, kimyasal ve mekanik olarak etkilemektedir. Alüminyumla en çok alaşım oluşturan elementler silisyum, mangan, magnezyum, çinko ve bakırdır. Alüminyum alaşımları iki gruba ayrılır. Bunlar; dövme alüminyum alaşımları ve dökme alüminyum alaşımlarıdır (Atay, 2017).

2.2.1. Dövme Alüminyum Alaşımları

Alüminyum alaşımları olan dövme ve döküm alaşımlarına ısı işlem yapılabilir. Dövme alüminyum alaşımları adından da anlaşılabilir gibi dövme işlemi şekillendirilirler. Deformasyon özellikleri iyi olduğundan dolayı kolay şekillenirler. Amerikan standartlarına göre dövme alüminyum alaşımları 4 harfle sınıflandırılırlar. Bunlar şu şekildedir;

- ♣ 1XXX: Bu sınıf alüminyumun saf alüminyum olduğunu gösterir ve genel olarak kimya alanında ve elektrik endüstrisinde kullanılır.
- ♣ 2XXX: Bakır elementi bu sınıfın ana alaşım elementidir. Bakırdan sonra gelen element ise magnezyumdur. Ayrıca, bu sınıfta diğer elementlerde bulunabilir. En çok havacılık sanayinde tercih edilen ve yüksek mukavemete sahip olan Al-Cu alaşımını ifade eder.
- ♣ 3XXX: Mangan elementi bu sınıfın ana alaşım elementidir. Mangan ile oluşturulan alüminyum alaşımından genellikle boru yapımı, sıvı tank yapımı ve mimari alan uygulamalarında kullanılmaktadır.
- ♣ 4XXX: Silisyum elementi bu sınıfın ana alaşım elementidir. Silisyum ile oluşturulan alüminyum alaşımının aşınma direnci ve korozyon direnci yüksek olup genleşme katsayısı ise düşüktür. Genellikle levha üretiminde ve kaynak içeren yapılarda kullanılmaktadır.
- ♣ 5XXX: Magnezyum elementi bu sınıfın ana alaşım elementidir. Magnezyum ile oluşturulan alaşımda magnezyum oranı arttıkça alaşımın sertlik ve mukavemeti artmaktadır.

Fakat sertliğin artmasına karşın süneklik ise azalır. Yüksek korozyon direncine sahip olduğundan dolayı gemi imalatında kullanılmaktadır.

♣ 6XXX: Silisyum ve magnezyum elementleri bu sınıfın ana alaşım elementleridir. Silisyum ve magnezyum ile yapılan alüminyum alaşımlarının sıcak şekillendirme kabiliyetleri çok yüksektir. Ekstrüzyon ile üretim imalatlarında kullanılmaktadır.

♣ 7XXX: Çinko bu sınıfın asıl alaşım elementidir. Çinko ile yapılan alaşımların yüksek dayanıma sahip özellikleri olmasından dolayı hafif ve yüksek dayanım istenilen yerlerde kullanılmaktadır. Bundan dolayı hafiflik ve yüksek dayanım istenen yerlerde kullanılırlar.

♣ 8XXX: Bu sınıfta ise alüminyumun diğer elementlerle oluşturmuş olduğu alaşımları ifade etmektedir. Örnek olarak bu alaşımlar Al-Li alaşımı verilebilir. Li elementi ile oluşturulan alaşımın yorulma ve tokluk dirençleri çok yüksektir. Bu nedenle uzay ve uçak yapımlarında kullanılmaktadır. Fakat bu sınıf alaşımın üretimi diğer alaşım sınıflarının üretimine göre maliyeti fazladır.

Isıl işlem; 8XXX, 7XXX, 6XXX ve 2XXX sınıflarını sertleştirebilirken, 5XXX, 4XXX, 3XXX ve 1XXX sınıflarını sertleştiremezler. Daha çok bu alaşımlar şekil değiştirme yöntemiyle sertleştirilirler (Atay, 2017)

2.2.2. Döküm Alüminyum Alaşımları

Alüminyum alaşım gruplarından olan döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması da dövme alüminyum alaşımlarına benzemektedir. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması aşağıda verilmiştir.

♣1XX.X: Saf Al.

♣2XX.X: Bakır elementi bu sınıfın ana alaşım elementidir. Al-Cu alaşımıdır.

♣3XX.X: Silisyum elementi bu sınıfın ana alaşım elementidir. Al-Si alaşımında magnezyum ve bakır elementleride sistemde bulunabilir. Sanayide %90 oranında en çok kullanılan döküm alaşımıdır.

♣4XX.X: Alaşımın ana bileşen elementi silisyumdur.

♣5XX.X: Alaşımın ana bileşen elementi magnezyumdur (Al-Mg).

♣6XX.X: Bu sınıftaki malzemeler neredeyse kullanılmamaktadır.

♣7XX.X: Alaşımın ana bileşen elementi çinkodur (Al-Zn).

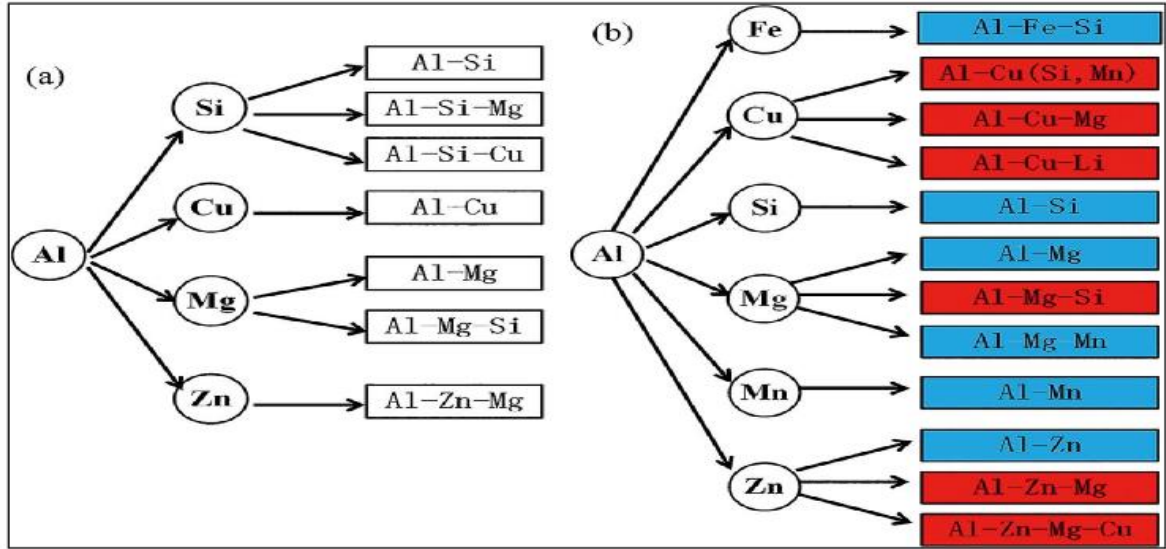
♣8XX.X: Alaşımın ana bileşen elementi kalaydır (Al-Sn) (Atay, 2017)

2.2.3. AlSi10Mg Alaşımı

Üretimi yapılacak olan parçaların kalitesi malzeme özellikleriyle doğru orantılı olduğundan dolayı, malzeme özellikleri eklemeli imalat yönteminde önemli rol oynar. Bu üretim yönteminde başarıyla kullanılmış malzemelerden biri AlSi10Mg alaşımıdır. AlSi10Mg alaşımının korozyon direncinin yüksek olması, yük taşıma kapasitesinin yüksek olması, döküm kabiliyetinin iyi olması, termal ve mekanik gibi aranan özelliklere sahip olması, hafif fakat sert yapısı gibi birçok özellikleri nedeniyle havacılık ve otomotiv sektöründe en çok tercih edilen malzemeden biridir.

Çok fazla alaşım çeşidine sahip olan alüminyumun, eklemeli imalat üretimi ile üretilen en yaygın alaşımı AlSi10Mg alaşımıdır. Kaynaklanabilirliğı kolay olan eklemeli imalat ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımının, geleneksel döküm ile üretilen alaşımlara oranla %25 daha güçlü, 400-450 MPa çekme mukavemetine sahip ve %4-6 değerinde uzama değerine sahiptir. Yüzeyindeki oksit tabakası nedeniyle korozyon direnci çok yüksektir.

Alüminyum endüstrisi 100 yılı aşkın süredir üretimde yer bulmaktadır. Alüminyumun yüksek kaynaklanabilir özelliğı ve yüksek mukavemet / ağırlık oranına sahip olması onu geniş uygulama alanlarında göz önünde tutmaktadır. Hafiflik olması, dayanıklı yapısı, şekillendirilebilirliğinin kolay olması, kaynaklanabilirlik özelliğı ve iletkenlik özelliğı gibi temel avantajları alüminyumu diğer metallere göre daha popüler kılmaktadır. Sürekli yapılan araştırma ve geliştirme, neredeyse sonsuz uygulama yelpazesi sayesinde alüminyum kullanımına yol açmıştır (Heinz vd., 2000; Williams ve Starke Jr, 2003). Alüminyum alaşımlarının ısıt işlemler uygulanmış ve uygulanmamış olarak ayrılması Şekil 2.6'da verilmiştir. (Kammer, 1999).



Şekil 2.6: Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması. a) döküm alaşımları b) işlenmiş alaşımları. Isıl işlem görenler kırmızı, ısıl işlem göremeyenler mavi renkte gösterilmiştir. (Aktürk ve Korkmaz, 2021)

Alüminyum ve alaşımlarının birçok endüstri uygulamaları kullanımının yanı sıra, çeşitli spesifik tasarımlar uygulamalarında da kullanılmaktadır. AlSi10Mg alaşımı Al-Si alaşımları içinde korozyona olan dayanımı ve yüksek mekanik özellikleri sayesinde ön planda yer alırken, eklemeli imalat tekniği ile oldukça iyi bir yüzey kalitesine sahip üretim yapılabilmektedir (Kahramanzade vd., 2021). Bunlara ek olarak AlSi10Mg alaşımının kaynaklanabilirlik özelliği, işlenebilirliğinin kolay olması, düşük boyutlu büzülme ve düşük ağırlık oranına sahip olması gibi birçok özelliğin bir arada olduğu alaşımdır (Nix ve Gao, 1998). Seçici lazer ergitme yöntemi bu alaşımların üretilmesindeki yeri oldukça önemlidir. SLM yöntemi, AlSi10Mg alaşımlarından yüksek yoğunluğa sahip parçaların üretilmesinde kullanılan en yaygın yöntemdir (Buchbinder vd., 2015). İstenilen kalitede metal parçaların üretilmesinde toz yatağındaki metal tozlarının eritilmesi ve istenilen şekilde katılaştırılması SLM yöntemi imalatı için oldukça önemli parametrelerdir.

AlSi10Mg alaşımı; yaklaşık olarak %10 silisyum ve %0,3 magnezyum kompozisyonuna sahiptir. Alaşım içinde silisyumun varlığı döküm özelliklerini iyileştirirken, magnezyum varlığı ise alaşımın mukavemetini artırır. Bundan dolayı AlSi10Mg alaşımı mükemmel döküm, iyi sertlik ve yüksek mukavemetli bir alaşım olarak bilinir. Ayrıca düşük yoğunluğa sahip olduğundan dolayı hafif yapılar için de ideal bir alaşımdır. Alaşımın içeriğinde magnezyumun olması sayesinde iyi korozyon direncine sahiptir. Korozyon direncinden dolayı otomotiv, havacılık ve denizcilik uygulamaları için uygun bir alaşımdır. AlSi10Mg

alaşımı, döküm yöntemi ile üretilenlere oranla eklemeli imalat ile üretilen parçaların daha iyi çekme mukavemeti olduğu görülmüştür.

AlSi10Mg alaşımı, toz metalürjisi ve eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmektedir. Toz metalürjisi ile AlSi10Mg alaşımının üretimi de şu şekilde olmaktadır.

1. Kalitesi yüksek malzeme; alaşımın bileşenleri yüksek saflıkta olacak şekilde seçilir.
2. Ergitme işlemi; malzeme yapısının homojen olması istendiği için ergitme işlemi yapılır.
3. Atomizasyon; ergitilmiş olan metal malzeme bu aşamada ince tozlar haline getirilir.
4. Filtreleme işlemi; tozlar filtrelenerek toplanır.
5. Kurulama ve sınıflandırma işlemi; kurutulan toz malzemeler fraksiyonlarına göre sınıflandırılır.
6. İnceleme; oluşan ürünlerin kontrolü yapılır.

Eklemeli imalatla üretim genel olarak, elektron ışını ergitme (EBM) işlemi ve seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi ile üretilir. Seçici lazer yönteminde (SLM) üretilen AlSi10Mg alaşımı şu sıralamayla üretilmektedir.

1. Toz hazırlığı; bu safhada saflık oranı çok yüksek AlSi10Mg tozu hazırlanır.
2. İlk katmanı oluşturma aşaması; platform üzerine tozlar ince tabaka şeklinde serilir.
3. Lazer ile ergitme işlemi; platform üzerindeki tozları lazer ışık kaynağı seçici olarak ertir ve katılaştırır.
4. Katmanların üst üste birleştirilmesi; bu aşamada seçici olarak ertirilip katılaştırılmış toz tabakası üst üste tekrarlı bir şekilde eklenerek nihai ürün oluşturulur.

AlSi10Mg alaşımını özelliklerini değerlendirmek için yapılan fiziksel ve mekanik testler aşağıdaki şekilde yapılmaktadır;

1. Sertlik Testi; malzemenin sertliğini ölçmek için yapılan bir işlemdir. Rockwell, Brinell ve Vickers sertlik ölçüm testleri ile yapılmaktadır.
2. Çekme Testi; malzemenin uzama oranını, akma ve çekme mukavemetlerini belirlemek için yapılan bir testtir.

3. Aşınma Testi; malzemenin aşınmalara karşı olan direncini belirlemede yapılan bir testtir. Malzemenin koşullara göre aşınma ve sürtünme performanslarına bakılıp değerlendirme işlemi yapılmaktadır.
4. Mikroyapı Analizi; malzemenin mikroskop ile iç yapısının incelendiği bir analizdir. Mikroyapısal özellikleri ve malzeme homojenliğine bakılarak malzeme özellikleri değerlendirilmektedir.
5. Isıl İşlem Testleri; ısıtıl işlem sonrası malzeme özelliklerinin değerlendirildiği bir testtir. Yapılan bu test ile malzemenin mukavemet, sertlik vb. gibi özelliklerini incelemek için kullanılmaktadır.

Yapılan bu testler AlSi10Mg alaşımının tüm özelliklerini, performansını ve uygun olup olmadığını belirlemektedir.

6xxx serisi (Al-Mg-Si) alaşımlarının ana alaşım elementleri silisyum ve magnezyumdur. Ekstrüzyon ile üretilen parçalarında şekillendirilebilirlik kabiliyeti yüksek olmasından dolayı sıklıkla kullanılır. Yüksek dayanım ve yüksek korozyon direncine sahiptir. AA6061 alaşımı karbon oranı düşük olan çeliklerle kıyaslanabilecek akma dayanımına sahip olduğundan en sık kullanılan alaşımlardan biridir. Özellikle otomotiv sektöründe araç hafifletme uygulamaları kapsamında çarpışma sırasındaki enerjiyi absorbe etme gibi yeteneği sayesinde üretilen araç parçaları 6xxx serisi malzemeden tasarlanmaktadır (Doruk, 2015).

Eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg alaşımının yüksek korozyon dayanımı ve mekanik özellikleri alaşımı ön planda tutarken, eklemeli imalat sayesinde pürüzsüz yüzeye ve yapısal hataya yer vermeden üretilebilmektedir. Ayrıca sıcak çatlamaya karşı direnci olduğundan AlSi10Mg alaşımının kaynaklanabilme özelliğine de sahiptir. Bu yöntemde kullanılan lazer ışınının gücü ve tarama hızı yüksektir (Kahramanzade vd., 2021).

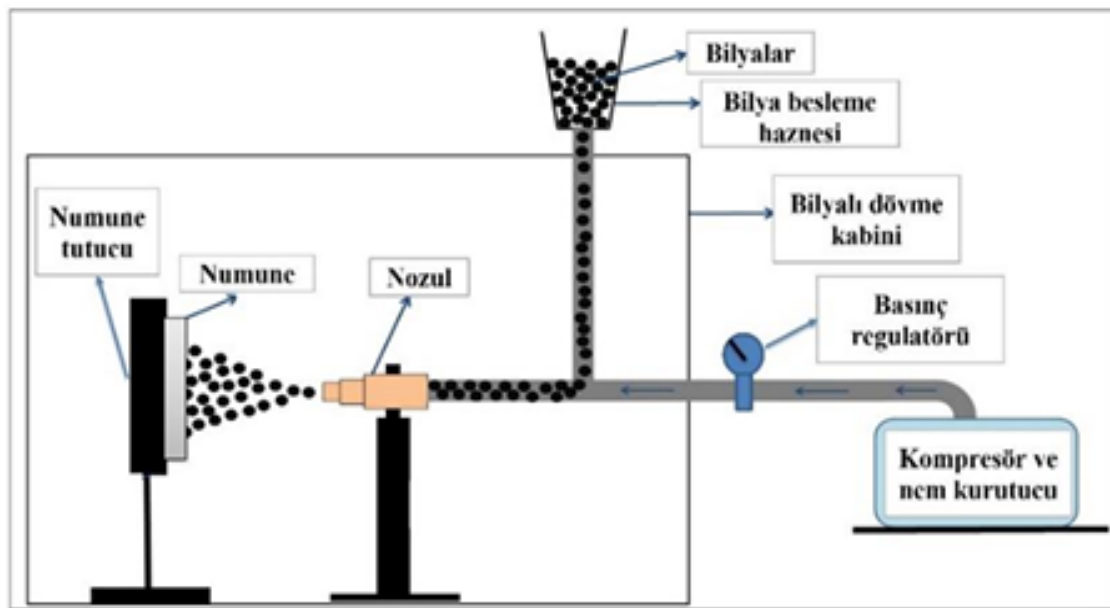
SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımlarının işlenmesi yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının işlenmesine oranla nispeten daha kolaydır. Ancak toz parçacık yüzeyinde ve ergiyik havuzunda oluşan oksitlerin varlığı, seçici gözeneklilik gelişimi için bir çekirdeklenme bölgesi görevi görür. Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının tüm davranışları derinlemesine incelenerek SLM’de oluşturulan yeni alaşımın geliştirilmesi için araştırılmıştır. Gaz atomizasyon işlemi ile üretilen AlSi10Mg alaşım tozu 20 ila 63 µm

parçacık boyutuna sahiptir. Eklemeli imalat, havacılık ve otomotiv sektörleri gibi çeşitli uygulamalarda başarıyla kullanılmaktadır (Evrensel ve Ertek, 2023).

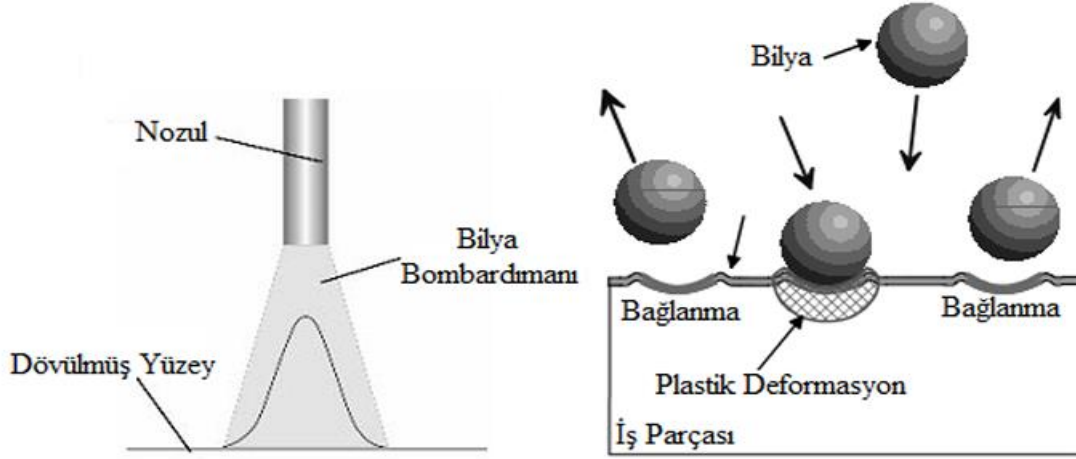
AlSi10Mg alaşımı için uygulama alanlarını şöyle özetleyebiliriz. Alaşım, otomotiv endüstrisinde dayanıklı ve hafif parçalar üretiminde kullanılır. Bunlar; motor bileşenleri, süspansiyon parçaları ve şasi parçalarıdır. Havacılık ve uzay endüstrisinde ise yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve mükemmel korozyon direnci özelliği olduğu için bu alanda da tercih sebebidir. Ayrıca biyouyumlu olması sayesinde medikal implant ve cihazlarda da kullanılmaktadır.

2.3. Bilyalı Dövme İşlemi

Bilyalı dövme işlemi malzeme yüzeyine yapılan mekanik bir işlemdir. Bilyalı dövme genelde soğuk işlem olarak yapılırsa da bazı durumlarda ılık şekilde de yapılabilir. Küçük çaplı bilyalardan oluşan bilya topluluğunun bir kaynak yardımıyla (bilya jeti) malzeme yüzeyine kontrollü bir şekilde püskürtülmesi işlemdir. Bilyalı dövme için özel olarak tasarlanan test sistemi ve bileşenleri Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Malzeme yüzeyine çarpan bilyalar darbe etkisi ile yüzeyde çukurcuklar ve tümsekler meydana getirir. Yani malzeme yüzeyinde plastik deformasyona maruz kalan ve homojen olmayan yüzeyde bası gerilmeli tabaka oluşur. Bilyalı dövme işlemi Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Özel olarak tasarlanan bilyalı dövme test sistemi ve bileşenleri (Avcu, 2018)



Şekil 2.8: Bilyalı dövme işlemi (Döleker, 2015)

Bilyalı dövme işleminin amacı metallerin gerilmeli korozyona ve yorulmalara karşı malzeme dayanımını artırmaktır. Ayrıca metal malzemelerde mekaniksel ve yüzeysel açıdan özelliklerini geliştirmek için kullanılan bir yöntemdir. Bilyalı dövme işleminde kullanılan bilya çeşitleri; paslanmaz çelik, çelik, dökme demir ve seramik malzemelerden oluşur ve dövme işlemi yapılacak malzeme özelliğine uygun bilya tercih edilir. Proseslerde malzeme yüzeyinde plastik deformasyon oluşturulması gerektiğinden bilyaların çapı, bilyaların özelliği (çeşiti) ve uygulama işleminde bilyaların hızları çok önemlidir. Metal malzemenin içinde olan çatlak başlangıcı veya artık gerilmeler, bilyalı dövme işlemi ile yüzeyde oluşan bası gerilmelerinin malzeme içindeki olumsuzlukları durdurarak malzemenin ömrünü uzatmaktadır.

Bilyalı dövme (shot peening), metal malzemelerin yorulma dayanımlarının artırılması ve yüzeylerini sertleştirilmesi için yapılan işlem türüdür. Bilyalı dövme işlemi neticesinde yüzeylerde oluşan basma gerilmeleri nedeniyle korozyon çatlakları engellenmektedir ve korozyona olan direnci arttırmaktadır. Maliyet konusunda malzemelere uygulanan yüzey işlemleri arasında en ekonomik olanıdır. Bilyalı dövme işlemi şu sıralama ile yapılmaktadır.

- Hazırlık aşaması; yüzey işlemi yapılacak olan malzeme, yağ-pislik gibi tüm yüzey artıklarından temizlenmektedir.
- Bilya seçimi; işlem uygulanacak parçanın malzemesine uygun olan bilya türü (seramik, cam veya çelik) seçilir. Bilyanın çapı, kütlesi ve hızı uygulanmak istenen parametrelere göre belirlenmektedir.

- Püskürtme işlemi; bu işlemde bilyalar belirli açılarla ve yüksek hızlarda parça üzerine püskürtülmektedir. Püskürtme işlemi özel makinelerde veya nozullarla yapılmaktadır.
- Kontrol etme; bu aşamada bilyalı dövülmüş parçanın yüzeyindeki gerilmeler ve oluşan sertlik kontrol edilmektedir.

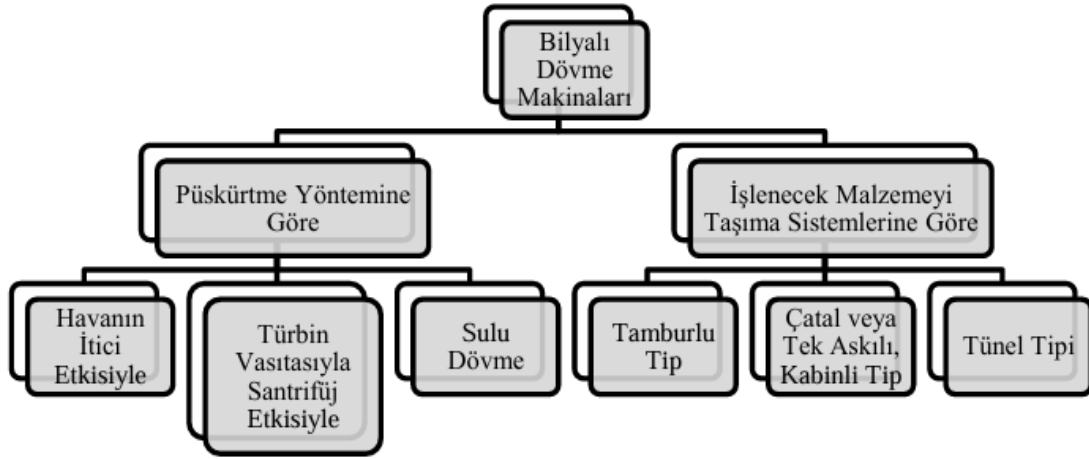
Bilyalı dövme işlemi metallerin mekanik ve yüzey işlemlerini geliştirmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bilyalı dövme işleminde yüksek hızlara sahip bilyaların malzeme yüzeyine ve yüzeyin alt kısmına tekrarlı bir şekilde uyguladığı deformasyona ait pozitif değişimler oluşmaktadır. Bilyalı dövme ile;

- i) Dövme işleminin meydana getirdiği plastik deformasyonların ve bölgesel mikro boyuttaki gerilmelerin sebebiyle kalıntı basma gerilmesi oluşumu,
- ii) Yüzey üstü ve yüzey altında oluşan sertlik artışı,
- iii) Dövme işlemi sonrası yüzey altı mikroyapısında meydana gelen dislokasyonların artışı ve tane yapılarının küçülmesi sebebiyle pekleşme gözlenmektedir (Avcu, 2018).

Uygulanan bilyalı dövmenin yüzey ve yüzey altında meydana getirdiği olumlu gelişmeler ile farklı birçok endüstride kullanılan malzemelerin yorulma dayanımı ve ömrü geliştirilmektedir. Bilyalı dövme işleminde malzeme yorulma davranışlarını etkileyen; bilyanın türü, bilyanın boyutu ve bilyanın sertliği vb. gibi dövme işlemi parametreleri bulunurken, bilya çarpma hızı, Almen şiddeti, örtme oranı, püskürtme basıncı, dövme süresi, vb. operasyon parametreleri bulunmaktadır. Bu işlemin düşük maliyeti ve kolay uygulanabilirliği sayesinde yüzey işlemede vazgeçilmez bir yöntemdir (Avcu, 2018).

Günümüzde bilyalı dövme makinaları kendi işlerinde çok farklı yapıda olduğundan bunlar işlem parametrelerine göre sınıflandırılmışlardır. Abrasif bilyaların püskürtülmesi ve işlem görece malzemenin mekanizma ile hareket ettirilmesine bağlı tasarımsal olarak Şekil 2.9'da gösterildiği gibi iki kategoride sınıflandırılmıştır. Temel olarak püskürtme işlemi basınçlı havanın itici gücü ve türbin vasıtasıyla santrifüjü sonucu püskürtme yöntemleri olup buna bağlı farklı makinalar bulunmaktadır. Basınçlı havayla çalışan makinelerde pozitif ve negatif basınçlı olarak ikiye ayrılmaktadır. Her iki basınçlı hava ile çalışan makinaların kendine ait özellikleri sayesinde çeşitli büyüklükteki partiküllerin nozul yardımıyla en dar girintileri ve

çıkıntıları işleyebilmesi en önemli avantajlarıdır. Türbin vasıtasıyla santrifüj etkisine dayalı bilyalı dövmelemlerin temelinde yüksek devirde dönen tamburun içerisinde olan malzemeleri yerçekimi ve vakum etkisiyle dövme işlemidir. Bilyalı dövme makinaları işlenecek malzemenin taşıma sistemlerine göre de gruplanmaktadır (Balyalı, 2015).



Şekil 2.9: Bilyalı dövme makinalarının sınıflandırılması (Balyalı, 2015)

Bilyalı dövme işlemi yüksek teknoloji gerektiren sanayilerden olan savunma ve uzay sanayinde, havacılık endüstrisinde ve otomotiv sanayinde çokça kullanılmaktadır. Örnek olarak hava araçlarının motor ve gövde kısımlarında, uçakların iniş takımlarında, türbinlerde, pervane ve kanat kısımlarında vb. uygulanırken otomotiv sektöründe ise dişlilerde, yay malzemelerinde, kam millerinde, krank millerinde, biyel kollarında vb. aksamalarda sıklıkla kullanılmaktadır.

Bilyalı dövme işleminin uygulama yöntemleri şunlardır;

1. Geleneksel Bilyalı Dövmeler
2. Titreşimli Bilyalı Dövmeler
3. Kavitasyonlu Bilyalı Dövmeler
4. Lazer destekli Bilyalı Dövmeler
5. Kuru Bilyalı Dövmeler

2.3.1. Titreşimli Bilyalı Dövmeler

Bu tez çalışmasında kullanılan AlSi10Mg alaşımımız, titreşimli bilya yöntemiyle dövülmüştür. Titreşimli bilyalı dövme işlemi, geleneksel bilyalı dövmeye eklenen titreşim

hareketiyle bilyalar yüzeylere daha etkili ve sert şekilde çarparak yüzeyi deformasyona uğratmaktadır ve işlem verimliliğini artırmaktadır. Titreşimli dövme, yorulma dayanımını artırmak ve yüzeylerin sertleştirilmesini sağlamak için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, yüksek hızda metal yüzeyine çarpan küçük bilyalar yüzeyde kalıcı basma gerilmeleri oluşturmaktadır. Titreşim ise dövme işlemini daha etkili hale getirmektedir. Titreşimli dövmenin özellikleri şu şekildedir;

- Yorulma Dayanımı: metalin yorulma dayanımı titreşimli dövme ile artmaktadır ve çatlak oluşumu engellenmektedir.
- Korozyon Direnci: dövme işlemi ile yüzeyde oluşan basma gerilmeleri, oluşacak olan korozyon çatlaklarını engellemektedir.
- Yüzey Sertliği: dövme işlemi ile yüzeyde oluşan sert tabaka malzemenin aşınmalara karşı direncini artırmaktadır.
- Etkili işlem: titreşim hareketi dövme işleminde bilyaların yüzeylere daha sert ve etkili çarpmasını sağlamaktadır.

Titreşimli bilyalı dövme işleminin uygulaması şu şekilde yapılmaktadır. İlk olarak işlemin yapılacağı metal parça temizliği yapılarak malzeme kir ve yağlardan arındırılmaktadır. Dövme işlemi için öncelikle malzemeye göre bilyalar (çelik, seramik veya cam) seçilmektedir. Titreşimli bilyalı dövme işleminde bilyaların çapları, kütleleri ve hızları çok önemli olduğundan, işlem parametrelerine göre bilya belirlenmektedir. Seçilen bilyalar malzeme yüzeyine yüksek hızda ve belirli açıyla olacak şekilde püskürtülme işlemi başladığında, artık işlem olarak dövme işlemine titreşim hareketi eklenmektedir. Titreşim hareketi özel nozullarla veya püskürtme makinaları ile yapılmaktadır. Dövme işlemi tamamlandıktan sonra yüzeyde oluşan gerilmeler ve yüzey sertliği kontrol edilmektedir.

2.4. Çökelme Sertleştirme İşlemi

Metal ve alaşımlarının özellikleri bazen istenilen boyutta olmayabilir. Bu özelliklerini geliştirebilmek için bazı ekstra işlemler gerekmektedir. Günümüzde kullanılan metal ve alaşımları genellikle ısıtılma işlemi ile istenilen özelliklere sahip olmaktadır. Isıtılma işlemi dediğimiz tabiri; metal ve alaşımlarının özelliklerinde istenilen sonuçlara varmak için katı halde ısıtılarak soğutulması ile mekanik yapılarının şekillenmesi işlemine denmektedir. Fakat ısıtılma işlemi her zaman istenen değişiklikler haricinde istenmeyen durumlarda yaratabilmektedir.

Isıl işlem isteğe bağlı yapılabileceği gibi bir başka işlem sonucunda da meydana gelebilmektedir.

Yapılan ısı işlem ile alaşımların bazılarında neredeyse yepyeni özelliklerde yüklenebilmektedir. Isıl işlem malzemelere istenilen özellikleri kazandırmanın yanında kalitesini artırmaktadır ve kullanım ömrünü geliştirmektedir. Mekanik özellik olarak ise sertlik ve mukavemet özelliklerini geliştirmektedir. Isıl işlem, metal veya alaşımlarının belirli sıcaklıklarda ısıtılarak bu sıcaklıklarda bir süre tutulup sonrasında soğutulması işlemidir. Belirli sıcaklıklara çıkıldığı için malzemenin iç yapısındaki düzensizlikler düzenli hale geçerek mekanik özelliklerini geliştirmektedir.

2.4.1. Isıl İşlem Aşamaları:

- **Isıtma:** metal veya alaşımları bu evrede belirlenen sıcaklığa kadar ısıtılır. Isıtılan bu sıcaklıklar, malzeme türlerinin özelliklerine göre değişmektedir.
- **Belirlenen Sıcaklıkta Tutma:** ısı işlem yapılacak olan malzeme belirlenen sıcaklığa geldikten sonra belirli bir süre bu sıcaklıkta bekletilmektedir. Tutulma süresi malzemenin istenilen mikroyapısal özelliklerinin gelişebilmesi için gerekli olan süredir.
- **Soğutma:** bu aşamada malzeme istenilen özellikler doğrultusunda hızlı veya yavaş olacak şekilde kontrollü olarak soğutulmaktadır. Soğutma hızı, malzemede istenilen özelliğe ve malzemenin türüne bağlı olarak değişim göstermektedir. Soğutma işlemi olarak ise; suda soğutma, havada soğutma, yağda soğutma ve fırında soğutma olarak gerçekleştirilmektedir.

2.4.2. Isıl İşlem Türleri:

- **Tavlama:** Malzemenin mikroyapısını geliştirmek ve iç gerilmelerini yok etmek için yapılmaktadır.
- **Normalizasyon:** Homojen bir iç yapı (mikroyapı) elde etmek için yapılmaktadır.
- **Sertleştirme:** Malzemenin sertliğini ve mukavemetini artırmak için yapılmaktadır.
- **Gerilim Giderme:** Malzemenin iç gerilmelerini gidermek için yapılmaktadır.

2.4.3. Alüminyum Alaşımları ve Isıl İşlemler

Alüminyum alaşımlarına uygulanan her farklı ısıt işlemler için farklı semboller kullanılmaktadır. Bunlar uygulanan işleme göre TX sembolü yanına alaşımların numarası yazılarak gösterilir.

“O: Tavlanmış, F: Üretildiği gibi, H: Sertleştirilmiş, T: Isıl işleme tabi tutulmuş

- T1: Al alaşımlarını sıcak şekillendirme işlemi sonrasında soğutulmuş ve tabii yaşlanmaya bırakılmıştır.
- T2: Al alaşımlarını sıcak şekillendirme işlemi sonrasında soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlanmaya bırakılmıştır.
- T3: Al alaşımlarına çözeltiye alma işlemi yapılmış sonrasında soğuk şekillendirilmiş ve tabii yaşlanmaya bırakılmıştır.
- T4: Al alaşımlarına çözeltiye alma işlemi yapılmış ve sonrasında tabii yaşlanmaya bırakılmıştır.
- T5: Al alaşımlarına sıcak şekillendirme işlemi sonrası soğutulmuş ve suni yaşlandırma yapılmıştır.
- T6: Al alaşımlarına çözeltiye alma işlemi yapılmış ve sonrasında suni yaşlandırma yapılmıştır.
- T7: Al alaşımlarına çözeltiye alma işlemi yapılmış ve sonrasında aşırı yaşlandırma yapılmıştır.
- T8: Al alaşımlarına çözeltiye alma işlemi yapılmış ve sonrasında soğuk şekillendirilmiş ve suni yaşlandırma yapılmıştır.
- T9: Al alaşımlarına çözeltiye alma işlemi yapılmış ve sonrasında suni yaşlandırma yapılmış ve son olarak soğuk şekillendirilmiştir.
- T10: Al alaşımlarını sıcak şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve sonrasında soğuk şekillendirilmiş ve suni yaşlandırma yapılmıştır” (Patır, 2014).

Alüminyum ve alaşımlarına için ısıt işlem türleri şunlardır;

1. Çözeltiye Alma: Alaşım, yüksek sıcaklığa çıkarılarak çözeltide içinde tutulur ve sonrasında hızla şekilde soğutulur. Yapılan bu işlem ile alaşımda bulunan elementlerin homojen dağılması sağlanmaktadır.
2. Su Verme: Alaşım, hızla soğutma işlemi ile çözelti fazda tutulur. Bu işlem ile alaşımların iç yapısı korunmaktadır.

3. Yaşlandırma: Alaşım, belirlenen sıcaklıkta bir süre tutulur ve ikinci faz parçacıkların çökmesi beklenir. Sonrasında bu parçacıklar, matris fazının içerisinde dağılma yapar ve bu işlem alaşımın sertliğini artırmaktadır.

Alüminyum alaşımlarına uygulama işlemi yapılan diğer ısıt işlemler şunlardır;

- Tavlama (O)
- Sertleştirme (H)
- Tabii Yaşlandırma (T1, T2, T3, T4)
- Suni Yaşlandırma (T5, T6, T7, T8, T9, T10)

Isıl işlem ile sertleştirilmiş olan alaşımlar sonrasında çökme sertleştirilmesi yapılarak mukavemet kazanabilmektedir. Yapılan çökme sertleştirilmesinin amacı, tane sınırlarına yığılan atomların homojen olmayan bir mikroyapıyı, ana fazın içinde düzenleyerek homojen yapıya dönüştürmektir. Doymuş olan katı çözeltilerin çökmesi devam ettikçe mukavemet artarak maksimum değere ulaşmaktadır. Çökeltir dislokasyonların hareketlerini zorlaştırdığı için ısıt işlem görmüş olan alaşımın dayanımı artmaktadır ve buna bağlı olarak uzama kabiliyeti azalmaktadır. Bir alaşıma çökme sertleştirilmesi yapılabilmesi için belirli şartlara sahip olması gerekir. Bunlar; alaşımın içindeki elementlerin veya bileşiklerin çözünmeleri yüksek sıcaklıklarda çok olurken düşük sıcaklıklarda ise az olması gerekmektedir. Tabii ek olarak iyi işlenebilirliği, yüksek kırılma tokluğu, iyi hasar toleransı, kötü korozyon dayanımı, kaynak edilebilirliği ve profil çekilebilirliği bu alaşımın diğer özellikleridir (Dilmeç vd., 2015).

Al alaşımlarında yapılan ısıt işlem süresince meydana gelen yapısal ve özellik değişimleri, belirli alaşım elementlerinin çözünme ve çökmesiyle oluşur. Çökme sertleşmesi, yapıda aşırı doymuş olan katı fazın sıcaklık ve zaman etkisiyle yeni bir fazın çökmesi sonucunda malzeme yapısındaki sertlik ve mukavemet artmasıdır. Sıcaklığa bağlı olarak; sıcaklık arttıkça alaşım elementinin çözünmeleri de artmaktadır (Doruk, 2015).

Çökme sertleşmesi ısıt işleminde yeni oluşan sert yapılı faz, ince parçacıklardan meydana gelmektedir. Yani çökme sertleşmesi, matris fazının içinde ikinci fazın (ince küçük parçacıklar) homojen şekilde dağılmasını sağladığı bir ısıt işlemdir. Alaşım sistemlerinde bu ısıt işlemin uygulanabilmesi için;

- Belirli bir sıcaklıkta bir elementin diğer element içerisinde çözünürlüğünün olması için tek bir eriyik fazına sahip olması gerekir.
- Ana elementin içinde gerçekleşen çözünme sıcaklık ile doğru orantılıdır. Sıcaklık düştükçe ana element içinde çözünme de düşer. Yani alaşımın faz diyagramının solvüs eğrisi içermesi gerekir.
- Alaşımın içinde bulunan katı eriyik fazı, oda sıcaklığında yavaş soğutulursa farklı iki faza dönüşmesi gerekir (Patır, 2014).

Çökelme sertleşmesi ısıtılma işlemi, metal alaşımlarının sertliğini ve mukavemetini arttırmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu işlem titanyum, nikel ve özellikle alüminyum bazlı alaşımlarda çok sık olarak kullanılır. Çökelme sertleşmesi ısıtılma işlemi 3 adımda gerçekleştirilir. Bu adımlar;

1. Çözeltide sertleştirme (çözeltiye alma)
2. Su verme
3. Yaşlandırma

2.4.3.1. Çözeltide Sertleştirme

Alaşım genellikle 450-550°C sıcaklığına kadar ısıtılır ve burada belirli bir süre bekletilir. Belirlenmiş olan sıcaklıkta beklemiş olan alaşımın içinde çözünebilir fazlar birbirinden ayrılarak çözülür ve homojen bir katı çözelti elde edilmiş olur.

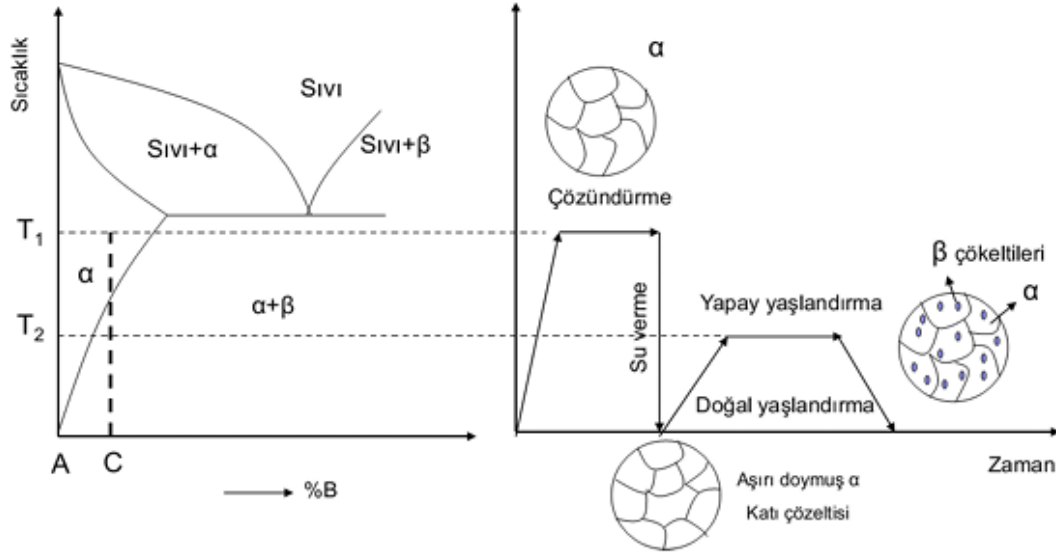
2.4.3.2. Su Verme

Belirli sıcaklıkta bekleyerek çözünen fazlara sahip alaşıma, hızlı bir şekilde soğutma işlemi yapılır. Soğutma işlemi genelde yağ veya su kullanılarak yapılmaktadır. Hızlı soğutma ile çözülmüş olan fazların oda sıcaklığında çözeltide kalmasını sağlar. Alaşımın iç yapısında katı çözelti oluşturur.

2.4.3.3. Yaşlandırma

Su verme işleminden sonra alaşım, daha düşük sıcaklık olan yaklaşık 150-200°C'ye kadar tekrar ısıtılır ve bir süre bekletilir. Katı çözeltideki atomlar yaşlandırma aşamasında ince ve

dağılmış çökeltiler oluşturur. Oluşan çökeltiler, dislokasyonları engelleyerek alaşımın sertliğini ve mukavemetini artırır. Doğal ve yapay yaşlandırmanın kademelerini gösteren ısıl işlem diyagramları Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10: Doğal ve yapay yaşlandırma kademelerini gösteren ısıl işlem diyagramları (Patır, 2014)

Alüminyum alaşımlarına başarılı bir ısıl işlemin uygulanabilmesi için alaşım bünyesinde bazı elementlerin bulunması gerekmektedir. Bu elementlerin ısıl işlem sonucunda çökelti oluşturması gerekir ve bunun neticesinde alaşımın dayanımı ve sertliği geliştirilmektedir. Isıl işlemin başarılı olması için alaşım içinde bulunması istenen elementler; Cu, Mg, Fe, Mn, Sn ve Zn elementleridir. Bu elementler Mg_2Si , $Mg_3Mn_2Al_{18}$, $Al-FeSi$, $AlCuMgSi$, $CuAl_2$ vb. gibi çökeltiler oluşturmaktadır ve dayanımı ve sertliği arttırmaktadır (MENTEŞE vd., 2019).

Çökelme sertleştirmesinin avantajları; yüksek mukavemet, iyi yorulma dayanımı ve iyi korozyon direncidir. Uygulama alanları ise havacılık ve uzay endüstrisi, otomotiv sektörü ve savunma sanayidir. Örnek olarak kullanım yerleri; uçak gövdeleri ve motor parçaları vb., otomobil motor parçaları, şasi ve süspansiyon sistemleri, zırh plakaları vb. yerlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde numune seçimi ve numuneye uygulanan işlemler anlatılmıştır. Yapılan işlemler sonrasında numunenin iç yapılarına bakılmak üzere kullanılan cihazlar anlatılmıştır.

3.1. Malzeme Seçimi

Bu tez çalışmasında eklemeli imalat yöntemi ile üretilen alaşımın; ısıl işlemlili ve ısıl işlemsiz haline uygulanan titreşimli dövme işlemi sonucunda mikroyapı, sertlik ve aşınma davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Buna bağlı olarak eklemeli imalatla üretimde ve bu ekstra yapılan işlemlere en uygun malzeme AlSi10Mg alaşımı olarak belirlenmiştir. Bu elementlerden oluşan alaşım kombinasyonunda yüksek mukavemet, döküm özelliklerinin iyi olması ve düşük yoğunluk özellikleri ortaya çıkmaktadır.

Alüminyum; yoğunluğu $2,70 \text{ g/cm}^3$ ve erime noktası $660,3^\circ\text{C}$ olan bir elementtir. Hafif olması, korozyon direncinin çok iyi olması yanında elektrik ve ısı iletkenliğinin yüksek olması, bunlara ek olarak mukavemet özelliğinin de yüksek olması alüminyum endüstriyel sanayi için aranan bir malzeme haline getirmektedir.

Silisyum; yoğunluğu 2.33 g/cm^3 ve erime noktası 1414°C olan bir elementtir. Kırılgan ve sert bir yapıya sahip olmasının yanında elektrik iletkenliği düşük olan ve ısı direnci ise yüksek olan bir elementtir.

Magnezyum; yoğunluğu 1.74 g/cm^3 ve erime noktası 650°C olan bir elementtir. Yüksek mukavemet sahip ve çok hafif olması özellikleri magnezyum için dikkat çeken özellikleridir. Bu özelliklerin yanında erime noktası düşüktür ve iyi bir titreşim sönümleyici özelliğine sahiptir.

Alüminyum ve silisyum alaşımlarının hafif olması, ısıl iletkenliğinin yüksek olması, düşük ısıl genleşmeye sahip olması ve yüksek mukavemete sahip olması özellikleri sayesinde bu alaşıma olan ilgi bir hayli artmıştır. Günümüzde malzeme seçimlerinde mekanik özelliklerin iyi olması, darbe dayanımının yüksek olması, yorulma direncinin yüksek olması, işlenebilirlik kabiliyetinin yüksek olması ve bunların yanında mukavemetli olması malzeme

seçimi için en önemli kriterleri oluşturmaktadır. Al-Si alaşımlarına düşük oranda magnezyum eklendiğinde mekanik özellikler dahada fazla artmaktadır. Magnezyum elementinin eklenmesi akma ve kopma dayanımlarında önemli rol oynamaktadır.

3.2. Numune Hazırlama İşlemi

Bu tez çalışmasında kullanılan AlSi10Mg alaşımının tozları EOS firmasından temin edilmiş olup, alaşımın kimyasal bileşimi Tablo 3.1’de verilmiştir. AlSi10Mg alaşımı, eklemeli imalat yöntemlerinden olan seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmiştir. Üretimde lazer gücü, tarama mesafesi, tarama hızı, ışın ofseti ve katman kalınlıkları sırasıyla 360 W, 0,2 mm, 1200 mm/s, 20 μ ve 30 μ olarak düzenlenmiştir.

Tablo 3.1: AlSi10Mg alaşımının kimyasal bileşimi (Ağırlıkça %)

Si	Mg	Fe	Mn	Ti	Zn	Ni	Pb	Sn	Al
9-11	0.2-0.42	<0.55	<0.45	<0.15	<0.1	<0.05	<0.05	<0.05	Balanced

3.3. Numuneye Uygulanan Isıl İşlemler:

Eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg alaşım T6 ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Isıl işlemin alaşım üzerindeki etkilerini görebilmek için 2 saatlik bir süre ile uygulanan ısıtılma işlemde 400 °C, 450 °C ve 500 °C çözeltiye alma sıcaklıkları kullanılarak çökeltili sertleşmesi ısıtılma işlemi uygulanmıştır. Isıl işlem, oksidasyonu önlemek için argon atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Isıl işlem gören numunelere belirtilen süre sonunda suda hızlıca oda sıcaklığına soğutulmuştur. Daha sonrasında soğutulmuş olan numunelere 170 °C’de ve 10 saat süre ile yapay yaşlandırma işlemi uygulanmıştır.

3.4. Numuneye Uygulanan Titreşimli Dövme İşlemi:

Eklemeli imalat ile üretilmiş ve sonrasında çökeltili sertleşmesi uygulanmış AlSi10Mg alaşımı numunelere dört farklı parametrik koşul altında titreşimli dövme işlemi uygulanmıştır. Numuneler, titreşim frekansı 50 Hz’de sabit tutulmuş ve içi AISI 52100 rulmanlı ve çapı 3 mm olan çelik bilyelerle dolu olan hazne içine sabitlenerek 20 N’luk ölü yük uygulanmıştır.

Titreşimli dövme işlemi, ısıl işlem uygulanmamış ve farklı sıcaklıklarda ısıl işlem uygulanmış olan numunelerin birer yüzeylerine Tablo 3.2’de gösterildiği gibi 2,5 dk, 5 dk, 10 dk ve 20 dk olacak şekilde uygulanmıştır.

Tablo 3.2: Isıl işlem görmemiş ve ısıl işlem görmüş numunelerin birer yüzeylerine uygulanan titreşimli dövme işlemi süreleri

Numune Adedi	Isıl İşlem Sıcaklıkları	Titreşimli Dövme İşlemi Uygulaması	Titreşimli Dövme Süreleri			
			2,5 dk	5 dk	10 dk	20 dk
4	Isıl İşlem Uygulanmamış	4 adet numunenin 1’er yüzeyleri	√	√	√	√
4	400 °C	4 adet numunenin 1’er yüzeyleri	√	√	√	√
4	450 °C	4 adet numunenin 1’er yüzeyleri	√	√	√	√
4	500 °C	4 adet numunenin 1’er yüzeyleri	√	√	√	√

Tabloda görüldüğü gibi; ısıl işlem görmemiş ve 400°C, 450°C ve 500°C de ısıl işlem görmüş AlSi10Mg alaşımlarının her birinden 4’er adet üretilmiştir. Bu 4’er adet üretilmiş olan numunelerin birer yüzeylerine sırasıyla 2,5 dk, 5 dk, 10 dk ve 20 dk titreşimli dövme işlemi uygulanmıştır. Örnek vererek açıklayacak olursak 4 adet üretilmiş olan 400 °C’de ısıl işlem uygulanmış alaşım numunelerinin her birinin bir yüzeyine 2,5 dk, 5 dk, 10 dk ve 20 dk olacak şekilde titreşimli dövme işlemi uygulanmıştır.

3.5. Numunelerin Kesilmesi ve Bakalite Alınması İşlemi:

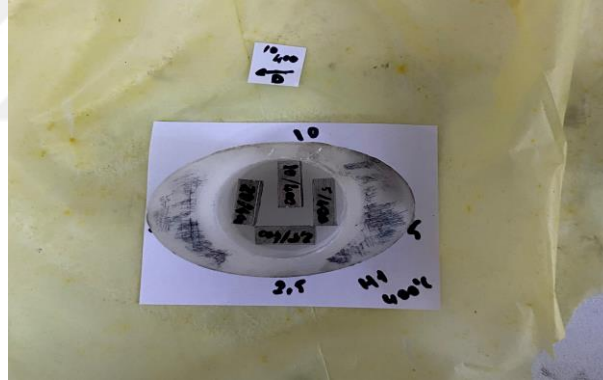
Bu aşamada ısıl işlem ve bilyalı dövme işlemi uygulanmış 16 numunenin küçük bir parçası Şekil 3.1’de gösterildiği gibi bakalite alınmak üzere kesilerek mikroyapılarının incelenmesi

için hazırlanmıştır.



şekil 3.1: Bir Yüzeyi titreşimli dövölmüş ve ısıı işlem görmüş numune

16 ürünün her birinden kesilen bu parçaların kendi ısıı işlem sıcaklıkları altında 4'lü olacak şekilde bakalite alınmıştır. şekil 3.2'de gösterildiği gibi çökelme sertleşme sıcaklığı aynı olan, fakat farklı sürelerde titreşimle dövölmüş numuneler aynı bakalit içine alınmıştır. Etiketleme işlemi yapılmış bakalitler şekil 3.3'te gösterilmiştir.



şekil 3.2: 400°C'de 2,5 dk, 5dk, 10dk ve 20 dk titreşimli dövölmüş numunelerin bakalite alınması



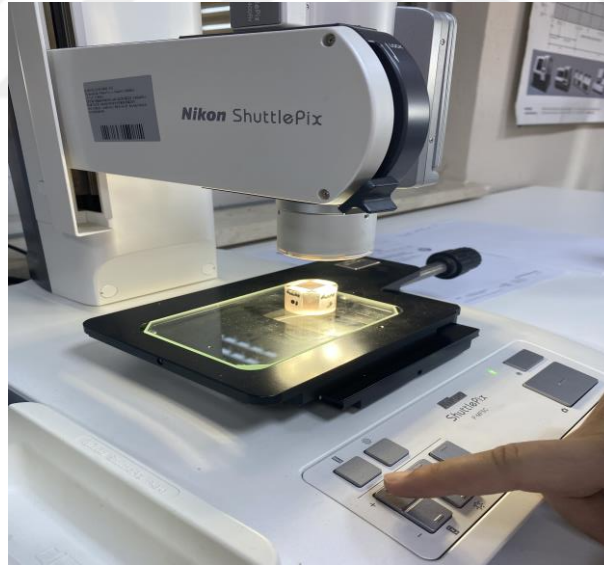
şekil 3.3: Etiketleme işlemi yapılmış bakalitler

3.6. Bakalite Alınan Numunelerin Parlatılması İşlemi:

Bu aşamada mikroyapılara bakılmak üzere bakalite alınan bu numunelerin yüzeylerinde oluşan yüzey pürüzlülüğünü yok etmek için zımparalama ve sonrasında parlatma işlemi yapılmıştır. Belirli devirde dönen zımpara makinasında öncelikle kalın zımparayla başlanarak her adımda daha ince zımparaya geçilerek (120-2500 arası SiC zımpara kağıtları kullanarak) zımparalama tamamlanmıştır. Zımpara işlemi biten numunelere parlatmak için parlatma çuhasında ve 1-3 μm elmas tozu içeren solüsyon ile parlatma işlemi uygulanmıştır.

3.7. Parlatma İşlemi Sonrası Numunelerin Mikroyapılarının İncelemesi:

Parlatma işlemi biten numuneler, hazırlanan Keller ile dağlama işlemine tabi tutularak mikroyapıları incelenmek üzere hazırlanmıştır. Daha sonra Şekil 3.4'te gösterildiği üzere yüksek çözünürlüklü Nikon Shuttle Pix markalı dijital stereo mikroskoba yerleştirilerek numunelerin iç yapıları incelenmiştir.



Şekil 3.4: Yüksek çözünürlüklü Nikon Shuttle Pix markalı dijital stereo mikroskoba yerleştirilmiş numuneler

3.8. SEM Cihazı

Eklemeli imalatla üretilmiş olan AlSi10Mg alaşımının mikroyapılarına SEM (taramalı elektron mikroskobu) cihazında incelenmiştir. Taramalı elektron mikroskobunun çalışma

prensibi; numune yüzeyinde çok küçük bir alana odaklanan yüksek enerjili elektronların yüzeyi taraması şeklinde çalışır. Yüksek çözünürlüklü görüntü elde edebilmek için SEM cihazı vakum ortamına ihtiyaç duyar. Vakum ortamında elektromanyetik lenslerle inceltirilmiş olan elektron demeti malzemeyi analiz eder. SEM analizinde görüntünün alınması, yüksek voltaj sayesinde hızlandırılmış olan elektronların malzeme üzerinde odaklanması ve elektron demetlerinin malzeme yüzeyini taraması sırasında malzeme ile elektron demetleri arasında oluşan etkilerin uygun algılayıcılar ile toplanarak sinyal güçlendiricilerden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpü ekranına yansıtılmasıyla yüzey görüntüsü alınmış olur (Suzuki, 2002; Johal ve Johnson, 2011). Elektron mikroskobu, uyarılmış katottan sistematik olarak gönderilen elektronlar manyetik bobinler yardımıyla malzeme üzerine düşürülür. Malzeme ile elektronlar arasındaki çeşitli etkileşimler sonucunda geri saçılmış elektronlar, Auger elektronlar, ikincil elektronlar ve X-ışınları oluşabilir. Oluşan bu elektronların uygun alıcılar yardımıyla toplanarak ekrana verilmesi ile görüntü elde edilir. Hızlandırılmış elektronlar yüksek vakum sayesinde havada bulunan moleküllerden etkilenmeden çok kısa dalga boylarına ulaşarak görüntüleme sağlarlar. Bu sayede angström seviyesinde görüntüleme sağlarlar. Işık mikroskopları 0.5-1 mikronda en küçük farklılıkları ayırt ederken, elektron mikroskobu 2-20 angstrom seviyesinde çözünürlük sağlamaktadır (Terim Kapakin, 2006).

SEM cihazı malzeme yapılarını mikro ve nano boyutta görüntüleme yaparak analiz etmektedir. EBSD tekniği kullanarak malzeme içerisinde faz analizini de yapabilmektedir. Tezimizde kullanılan SEM cihazının markası TESCAN / MAIA3 XMU' dur ve Şekil 19'da gösterilmiştir. Numunelere uygulanan SEM cihazındaki incelemeler; 20 kV, 400 kx (4000 büyütme), 20 µm (mikrometre) ve Det: BSE (geri saçılma dedektörü) özelliklerinden yararlanılarak ürünler incelenmiştir.

3.9. XRD Cihazı

X-Işını Difraksiyon (XRD) Spektroskopisi veya X-Işını Kırınım Spektroskopisi olarak bilinen, gamma ışınından daha zayıf enerjili fakat ultraviyole ışıktan daha kuvvetli olan X-ışınının kullanılmasıyla analiz edilen bir yöntemdir. X-ışınları malzemenin kırınım özelliğini kullanarak analiz yapmaktadır. Her kristal fazın kendine has atomik dizilimlerine bağlı olarak, X-ışınlarını karakteristik bir düzen içinde kırması esasına dayanmaktadır. Her kristal fazın kırınım deseni, o kristalin parmak izi olarak tanımlanmaktadır. XRD analiz metodunda,

yapılan analiz sırasında numune tahrip olmamaktadır ve numunenin miktarı çok az olsa dahi analizlerin yapılmasını sağlamaktadır. Atom numarası düşük elementler haricince periyodik cetvelde birçok elementin analizleri yapılabilmektedir. Kristali oluşturan atomların, atomlar arası mesafe boyunda olan X-ışınlarının dalga boyu (0.1-10 Å) sayesinde kristal yapısı, kusurları, tanecik büyüklüğü, örgü parametreleri ve faz geçişleri gibi yapısal birçok parametreyi incelemede kullanılmaktadır (Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi [DAYTAM], t.y.; Ateş, 2018). XRD cihazı, hızlandırılmış olan elektron demetlerinin bakır bir levhaya çarpması sonucu oluşan X-ışınları, numune üzerine yansıtılarak kırınıma uğrattılır. Kırılmış olan ışınlar dedektörler yardımıyla kaydedilip kırınım desenler sayesinde malzeme yapısının analizi ve fazların belirlenmesi hakkında bilgi vermektedir. Tezimizde kullanılan XRD cihazının markası RIGAKU / SmartLab'tır ve Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5: RIGAKU/SmartLab XRD cihazı

3.10. Mikro Vickers Sertlik Cihazı

Mikrosertlik cihazında Vickers HV elmas uç kullanılmaktadır. Bu elmas uç, numune yüzeye batırılarak numunenin yüzeyinde elmas ucun izi oluşmaktadır. Oluşan iz sayesinde numunenin sertliği hakkında bilgi alınmaktadır. Eğer izin derinliği fazla ise ürün yumuşak, iz derinliği azsa ürün sert demektir. Tezimizde kullanılan mikrosertlik ölçüm cihazının markası QNESS Q10M Otomatik Mikro Vickers Sertlik Ölçüm Cihazı'dır ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Numunelerin enine kesitine 25 g yük uygulaması ve 15 sn bekletme süresi

koşullarında Vickers sertlik değerleri elde edilmiştir ve sonrasında bu değerler mikrosertlik ölçüm cihazında ölçülmüştür.



Şekil 3.6: QNESS Q10M otomatik mikro Vickers sertlik ölçüm cihazı

3.11. Optik Profilometre Cihazı

Üretim yöntemi eklemeli imalat olan AlSi10Mg alaşımlarına uygulanan ısıtıl işlem ve titreşimli dövme işlemleri sonucu oluşan yüzey morfolojisi ve pürüzlülüklerine Şekil 3.7’de gösterilen Filmmetrics/Profil3D markalı optik profilometre cihazı ile bakılmıştır. Optik profilometre, malzemenin yüzey topografya verilerini yüksek hassasiyetle çıkarmak için kullanılmaktadır.

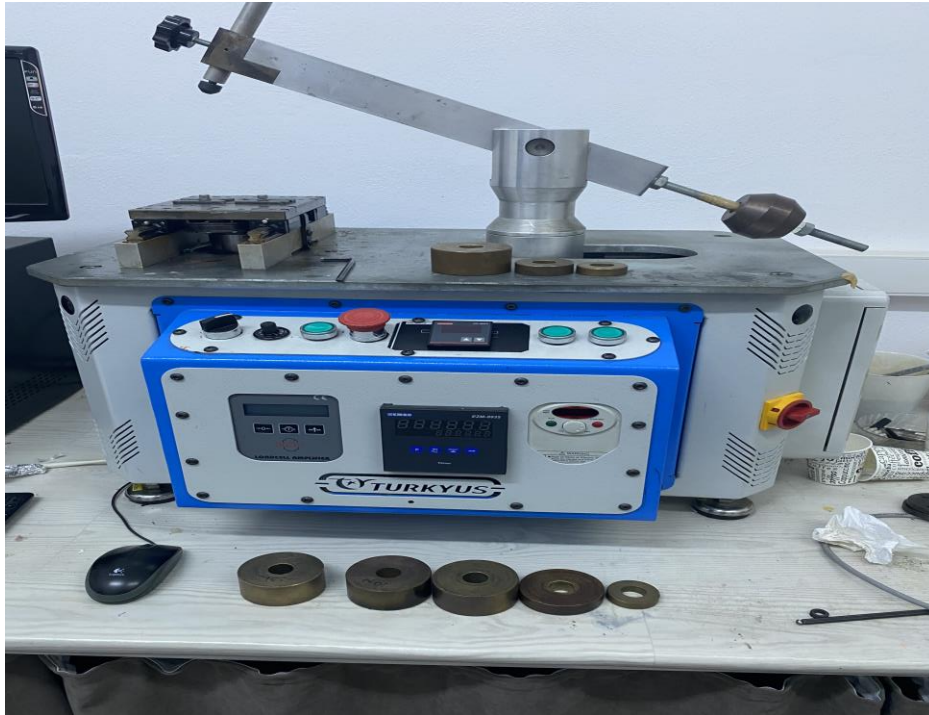
3.12. Kuru Kayma Aşınma Testi

Bu aşamada bakalite alma işlemi için kesilen malzemelerin geri kalan kısmı kullanılmıştır. Her bir numune için 1N, 3N ve 5N yükte kuru kayma aşınma testi uygulanmıştır. Çıkan sonuçlardan tezin amacı olan AlSi10Mg alaşımının, ısıtıl işlem ve titreşimli dövme işlemlerinin aşındırma üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Aşınma cihazında 6 mm çapında AISI 52100 çelik bilyesi kullanılmıştır. Aşınma yolu uzunluğu 5,5 mm ve toplam kayma mesafesi 72 m’dir. Tüm aşınma testleri oda sıcaklığında yapılmıştır ve bir bilgisayar yazılımı üzerinden sürtünme katsayısı sürekli olarak kaydedilmiştir. Aşınma testleri TURKYUS marka Ball-on-disk (Şekil 3.8) cihazında yapılmıştır. Aşınma testleri uygulanan ısıtıl işlem ve titreşimli dövme işlemlerinin etkilerini ayrı ayrı görebilmek için tüm numunelere (AB, AB+HT, AB+VP, AB+HT+VP) uygulanmıştır. Aşınma testleri sonucunda

meydana gelen hacim kayıpları Şekil 3.7’de gösterilmiş olan Filmmetrics marka optik profilometre ile belirlenmiştir. Aşınma izlerinin EDS+SEM analizleri Şekil 3.9’da gösterilen TESCAN marka SEM cihazında alınmıştır.



Şekil 3.7: Filmmetrics marka Profil3D model optik profilometre cihazı



Şekil 3.8: TURKYUS marka Ball-on-disk cihazı



Şekil 3.9: TESCOAN marka MAIA3 XMU model SEM cihazının görüntüsü

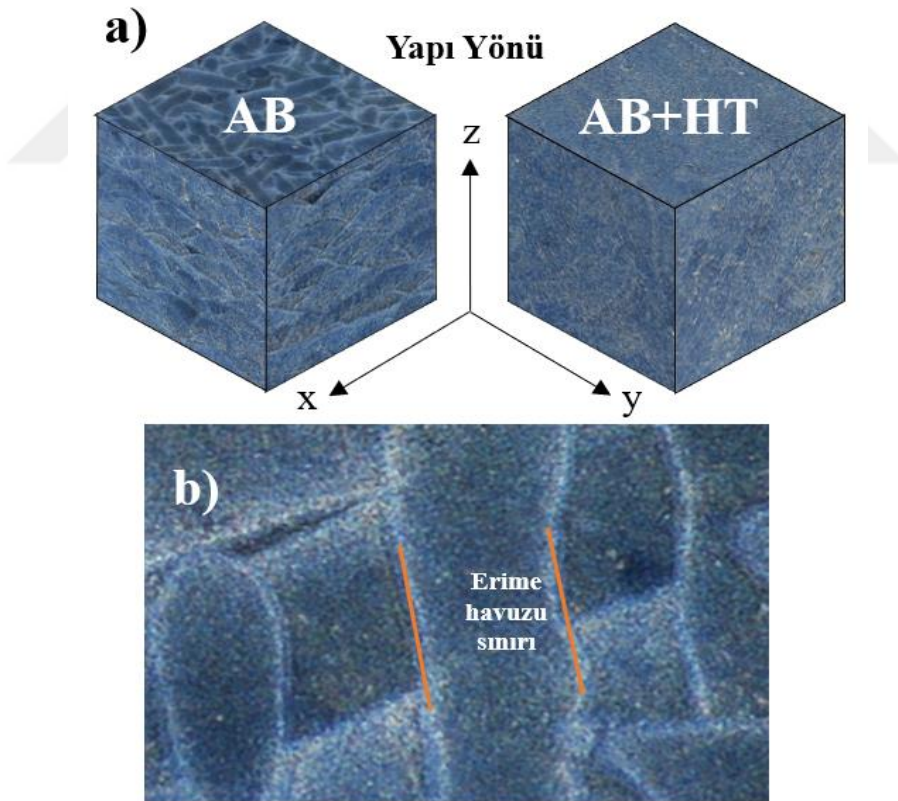
AB numunesinin, 2,5 dakika, 5 dakika, 10 dakika ve 20 dakika sürelerinde titreşimle dövülmüş olan yüzeyleri 45 dakika boyunca ve 36,5 Hz'de sırasıyla 1N, 3N ve 5N'luk yüklerde aşınma testi uygulanmıştır. Aşınma işlemleri sonucunda numunelerde meydana gelen hacim kayıpları belirlenmiş, aşınma izleri SEM+EDS ile analiz edilmiş ve sürtünme katsayısı grafikleri çizilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

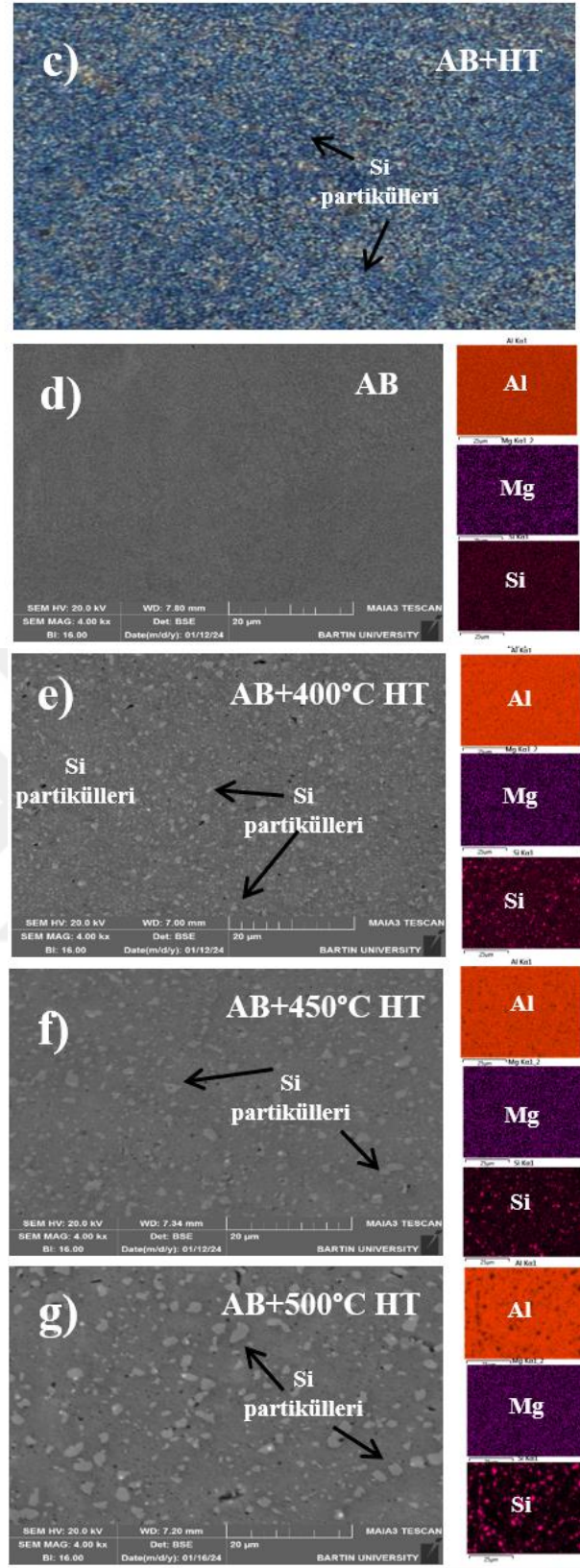
Yapılan deneysel işlemler sonucunda mikroyapı analizleri, XRD sonuçları, mikrosertlik, yüzey pürüzlülüğü ve kuru kayma aşınma sonuçları bu bölümde anlatılmıştır.

4.1 Mikroyapı Analizi

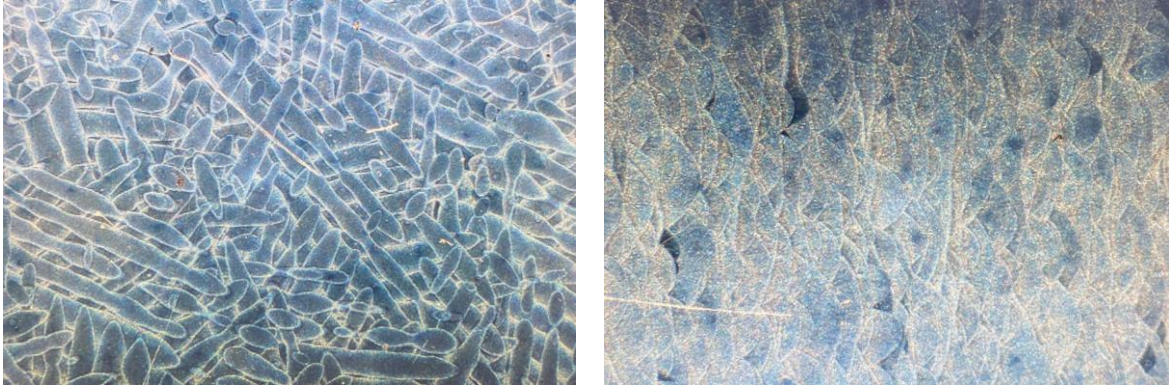
Şekil 4.1(a)'da eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg alaşımı (AB) ve ısıtıl işlem görmüş (AB+HT) numunelerinin stereo mikroskoptaki temsili 3D görüntüleri gösterilmiştir. Isıl işlem (HT) önce, eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg alaşımının lazerin etkisi nedeniyle farklı yönlerde yönlendirilmiş erimiş havuzlar ve alt tabakalar gözlenmiştir. Şekil 4.3'te gösterildiği gibi burada eriyik havuzunun farklı yönlerde olmasının nedeni taramanın 67°'lik bir açıyla yapılmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.1: Eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg alaşımının (AB) ve ısıtıl işlem görmüş (AB+HT) numuneleri için mikroyapı görüntüleri: a) Stereo mikroskop şematik gösterimleri, b) Optik mikroskop görüntüleri



Şekil 4.2: Eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg alaşımasının (AB) ve ısıt işlem görmüş (AB+HT) numuneleri için mikroyapı görüntüleri: c) Optik mikroskop görüntüleri, d-g) SEM+EDS analizi

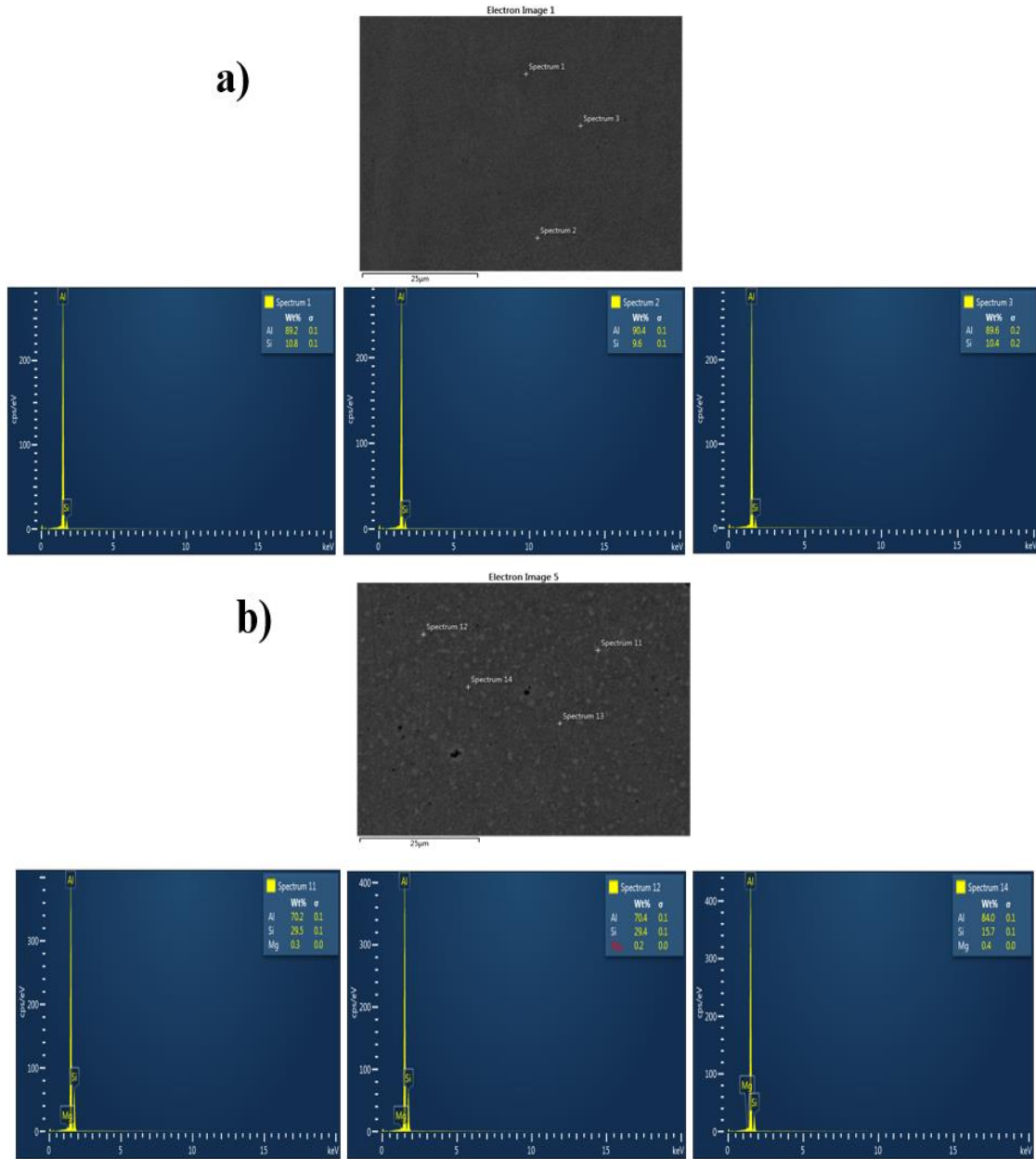


Şekil 4.3: AlSi10Mg eriyik havuzları görüntüsü

HT'den sonra eriyik havuzları ve tabakaları neredeyse belirsiz hale gelerek daha homojen bir yapı oluşmuştur. Şekil 4.1(b)'de AB numunesinin eriyik havuzu ve sınırlarının optik görüntüsünde açıkça görülebilmektedir. Eriyik havuzunda eş eksenli taneler ve daha ince tanelerin olduğu gözükmemektedir. Eriyik havuzu sınırlarının çevresinde daha iri ve uzun taneler vardır. Bu durum, üretim sırasında üst üste binen katmanlardan dolayı soğuma hızındaki değişiklik ve yeniden ısıtma etkileri ile ilişkilidir (Casati vd., 2018).

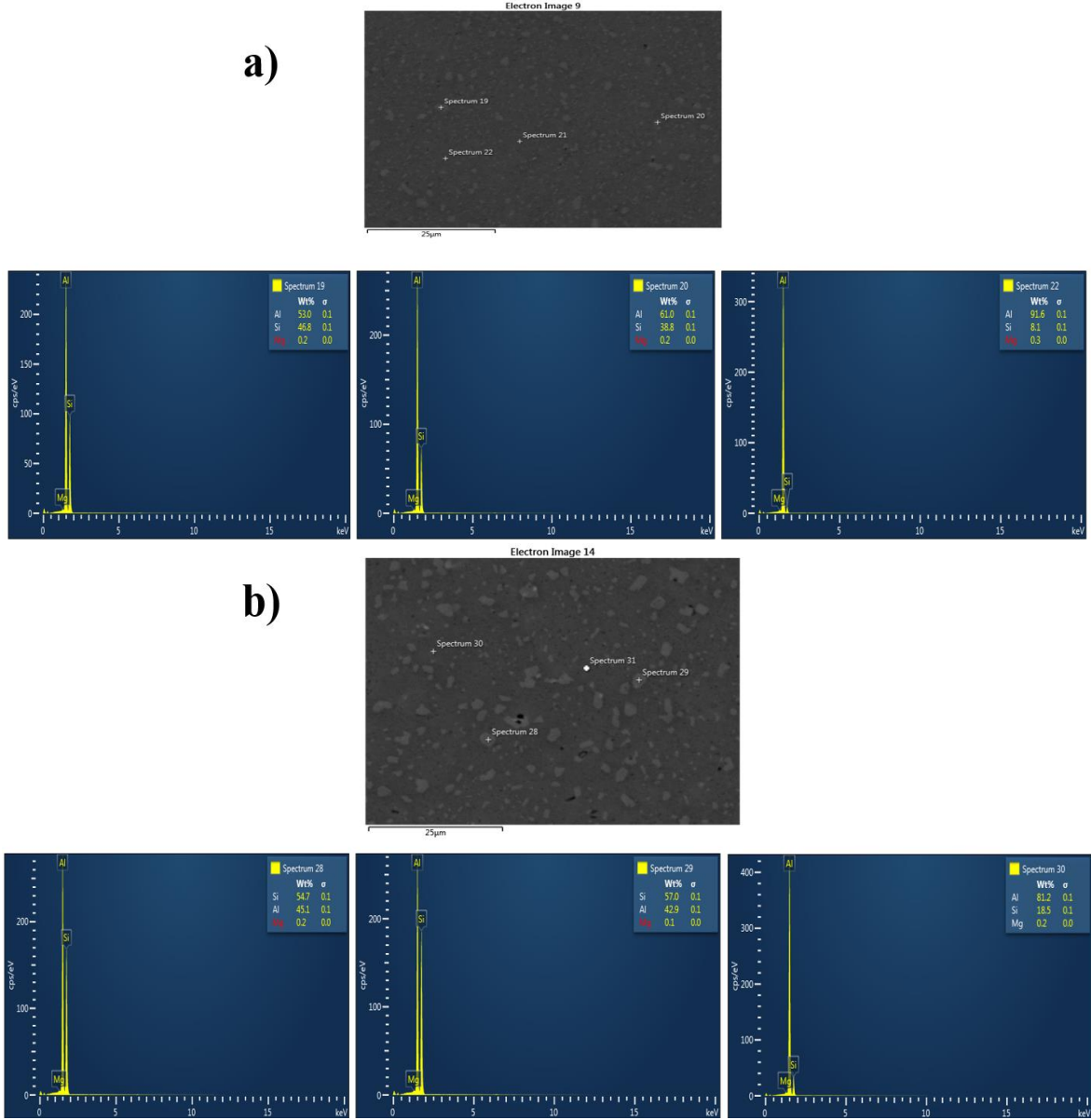
HT'nin bir sonucu olarak Şekil 4.2(c)'de SLM işleminin bir özelliği olan eriyik havuzları neredeyse tamamen kaybolmuştur ve Si çökeltileri oluşmuştur. Şekil 4.2(d)'de görüldüğü gibi AB numunesinin SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüsünde tek fazlı bir yapı vardır. Burada yüksek büyütmelemlerde bile görülmesi zor olan dentritik bir yapıdan bahsetmek mümkündür. Eriyik havuzunun içinde ve dışında bulunan farklı taneler burada görülebilir. EDS analizinde, elementlerin yapı içinde homojen şekilde dağıldığı görülmektedir. İkinci bir fazdan bahsetmek mümkün değildir. Yani, aşırı doymuş bir α -Al yapısından oluşan tek bir faz vardır ve bu XRD sonuçlarıyla tutarlıdır. Isıl işlemten sonra Şekil 4.2(e-g)'de eriyik, ısıtma işlem sıcaklığından bağımsız olarak ikincil bir faz oluşturmuştur. Bu ikinci fazı, alaşımdaki ikincil elementlerin çökmesi olarak tanımlayabiliriz. Isıl işlem prosesinde homojen olan yapı, oda sıcaklığına kadar hızlı şekilde soğutmada yapısını korumaktadır. Sonraki adımda yapılan yaşlandırma işlemi sürecinde ikincil fazın çökmesi sağlanır. Burada uygulanan ısıl işlem ergimesi sayesinde α -Al yapısından ayrılan Si fazı ikincil faz olarak çökmüştür. Çökelen fazın EDS analizi ayrıca bir Si elementi olduğunu gösterir. Artan çözeltiye alma sıcaklığına bağlı olarak Si çökeltilerinin boyutunun arttığı söylenebilir. Bu, artan çözeltiye alma sıcaklığına bağlı olarak yapıdan daha fazla Si'nin ayrılmasına bağlanabilir (Wei vd., 2021). AlSi10Mg alaşımının içinde bulunan Si elementinin ısıl işlem

ile ikinci faz oluşturması ve Si elementinin ısıı işlem sıcaklığının artışı sonucundaki tanecik yapısındaki artış oranları şekil 4.4-4.5'te gösterilmiştir.



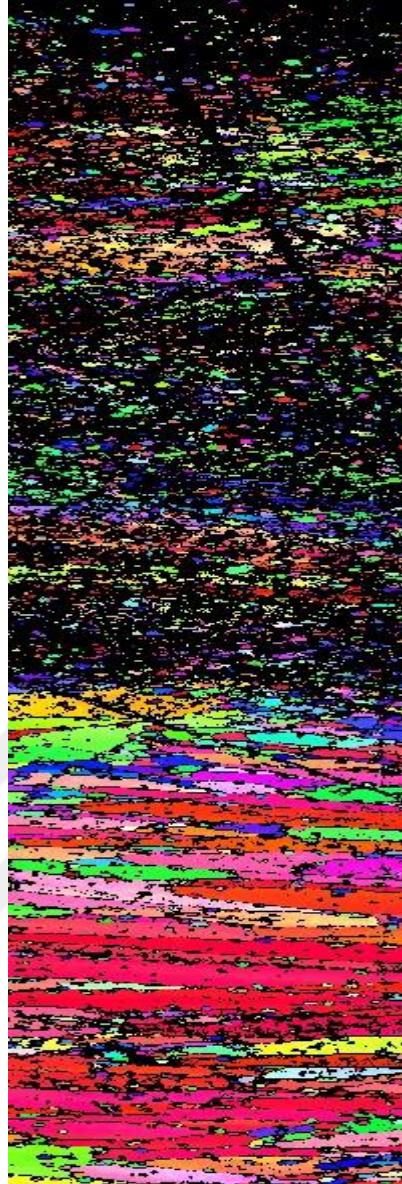
şekil 4.4: AlSi10Mg alaşımındaki Al ve Si oranlarının SEM+EDS'deki mikroyapı görüntüleri a) AB, b) 400 °C

şekil 4.4(a)'da gösterildiği üzere AlSi10Mg alaşımı yapısında ısıı işlem öncesinde tek faz yapı olan Al yapısı vardır. Alaşıma uygulanan ısıı işlem sonucunda Al fazının yanında ikinci bir faz olarak Si kelteleri oluşmuştur. şekil 4.4(b)-4.5'te görüldüğü üzere alaşımda oluşmuş olan ikinci fazda Si kelti boyutlarının ısıı işlem sıcaklığının artması ile arttığı grlmştir.



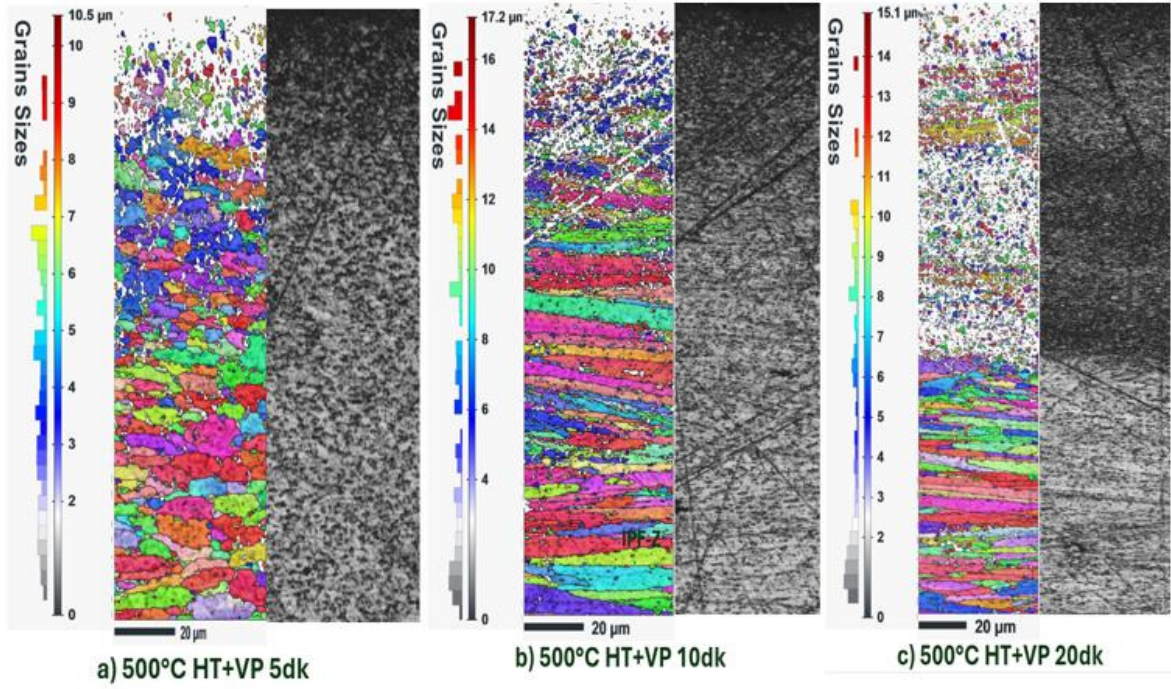
Şekil 4.5: AlSi10Mg alaşımındaki Al ve Si oranlarının SEM-EDS'deki mikroyapı görüntüleri a) 450°C, b) 500°C

AlSi10Mg alaşıma uygulanan titreşimli dövme işleminden sonra, yüzey bölümünden alınan elektron geri saçılma kırınımı (EBSD) analizi Şekil 4.6'te gösterilmektedir. Titreşimli dövme sürelerine bağlı olarak farklı etki oranlarından bahsedilebilir. Titreşimli dövülmüş alaşımın yüzey kesitine bakıldığından yüksek deformasyon nedeniyle üst kısımda ince taneler ve nanokristal bölgeler oluşmuştur. Yüzeyden daha iç kısımlara geldikçe titreşimli dövmenin etkisinin azalmasına bağlı olarak ince tanelerin aksine daha kalın taneler görülmektedir. Numunenin titreşimli dövülmesi ile oluşan deformasyonun sonucu yüzeydeki sertlik iç kısımlara oranla daha fazladır. Titreşimli dövme işlem süresinin artması ile deformasyondan etkilenen bölge artmaktadır.



Şekil 4.6: Titreşimli dövme işlemi sonucu AlSi10Mg numunesinin 500°C+20dk titreşimli dövülmüş görüntüsü

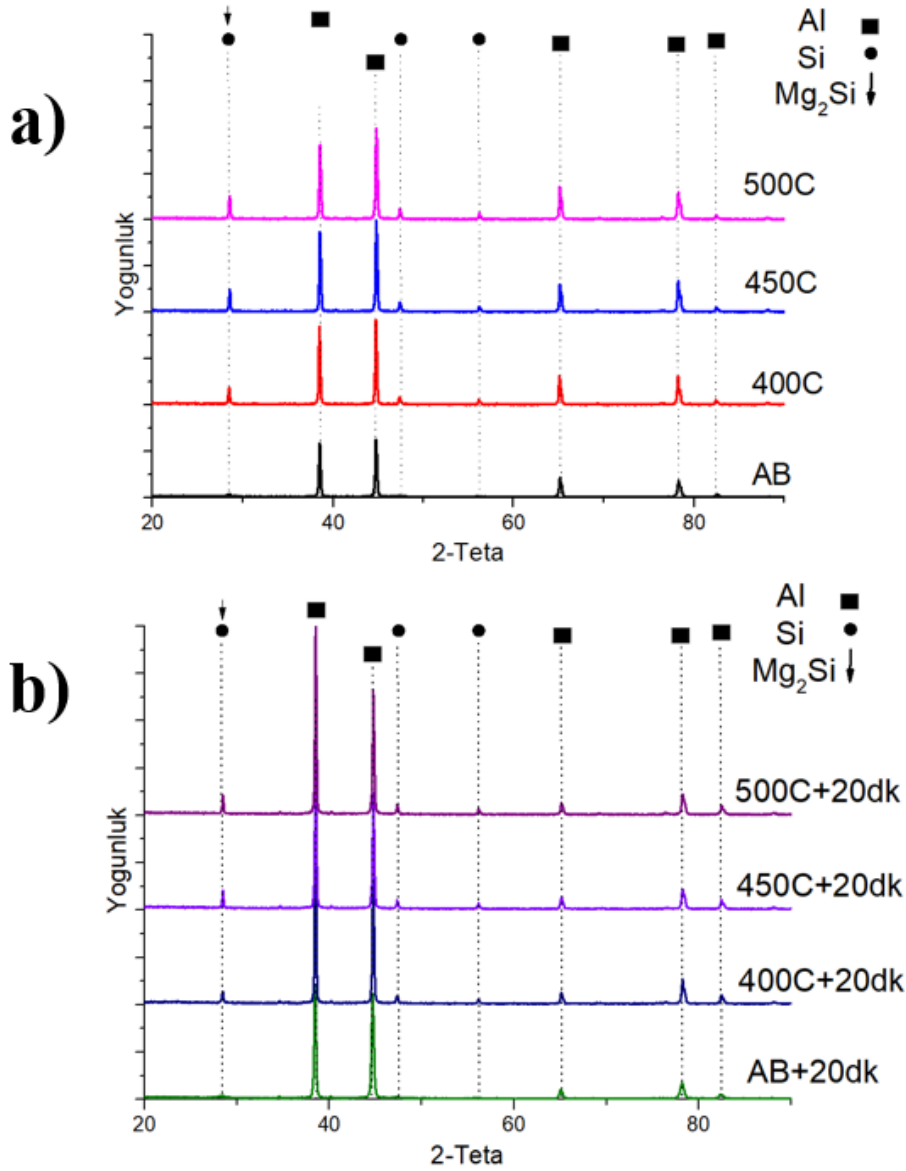
Şekil 4.7’de 500°C’de ısıtıl işlem görmüş AlSi10Mg alaşım numunelerine 5dk, 10 dk ve 20 dk şeklinde uygulanan titreşimli dövmenin etkisi ile EBSD analizlerinde yüzey sonuçları gösterilmiştir. Titreşimli dövme işlem süresinin artması ile deformasyondan etkilenen bölge artmıştır. 500 °C’de 5 dk titreşimli dövme işleminden sonra ortalama 20-25 mikronluk bir alanda nanokristal oluşumu gözlenirken, 20 dk süren titreşimli dövme uygulaması sonucunda plastik deformasyonun artmasına bağlı olarak 100-120 mikronluk bir kesitte nanokristal bölge oluşmuştur. Bu sonuç doğaldır ve deformasyon miktarı arttıkça daha derin etkiler görülmesi normaldir.



Şekil 4.7: IPF-Z ve BC açısından EBSD analiz sonuçları: a) 500°C HT+VP 5dk, b) 500°C HT+VP 10dk, c) 500°C HT+VP 20dk

4.2. XRD Sonuçları

AlSi10Mg alaışımının analizlerinde elde edilen XRD kırınım desenleri, eklemeli imalat ile üretilmiş (AB), farklı sıcaklıklarda ısıtıl işlem görmüş (AB+HT), AB+20 dk titreşimli dövülmüş, ısıtıl işlem görmüş 20 dk titreşimli dövülmüş (AB+HT+20dk) numuneler için Şekil 4.8’de verilmiştir. SLM işleminin hızlı soğutma etkisi ile pik noktalarında Al katı çözültisi gözükmemektedir. Isıtıl işlem sonucu olarak Si fazına ait pikler belirginleşmeye başlamıştır. Üstelik Mg₂Si fazının da varlığından az da olsa bahsetmek mümkündür. Yapay yaşlandırmadan sonra aşırı doymuş Al katı çözültisi yoluyla yayılan Si elementi, XRD analizlerinde belirlenmiş olan ayrı bir faz oluşturmuştur. Çözelti sıcaklıkları arttıkça pik noktalarında oluşan Si elementinin yoğunluğu da artmıştır. Bununla birlikte HT’nin bir sonucu olarak tüm pik noktalarında, yoğunluklarda ve açılarda küçük değişiklikler olmuştur. HT’nin bir sonucu olarak piklerde görülen bu değişim daha önce Wei ve ark. (2021) tarafından bildirilmiş ve Li ve ark. (2016) da çalışmalarında karşılaşmıştır. Si elementinin atom yarıçapı Al’dan daha düşüktür (Casati vd., 2018). HT’nin bir sonucu olarak, Si elementinin katı çözültiden ayrılması nedeniyle kafes parametrelerinde bir değişiklik ve bozulma meydana gelmiştir. Bu durum XRD 'de görülen pik hareketinin nedeni olarak gösterilebilir.



Şekil 4.8: a) AB, AB+HT ve b) AB+20 dk VP, HT+20 dk VP örneklerinin XRD modelleri

Hem AB hem de ısıtıl işlem görmüş numunelerin titreşimli dövme işlemi ile yapılan XRD analizlerinde, plastik deformasyona bağlı olarak herhangi bir faz değişimi meydana gelmemiştir. Aşırı plastik deformasyonun bir sonucu olan tane incilmesi, artan kafes deformasyonu ve artan dislokasyon yoğunluğunun XRD piklerinde değişiklikler meydana getirdiği sıklıkla karşılaşılan bir durumdur (Das vd., 2020). XRD piklerinde görülen bu hareketlilik, titreşimli dövmenin kanıtı olarak da gösterilebilir. Tepe yoğunluğu açısından, Al fazının tepe şiddetlerinde bir artış olurken, Si fazının tepe noktalarında bir azalma gözlenmiştir. Bu durum, titreşimli dövme işleminden sonraki aşamalarda meydana gelen farklı gerilmelere bağlanabilir (Chen vd., 2020). Vibrasyonlu kumlama işleminin bir diğer etkisi de FWHM değerleri üzerinde görülmüştür. FWHM, uygulanan yüzey modifikasyonu

sonrası tane boyutundaki küçülmeyi gösteren önemli verilerden biridir. Tablo 4.1'de farklı açılar için FWHM değerleri ve ortalama kristal boyutu değerleri verilmiştir. Her koşulda titreşimli dövme sonrası FWHM değerlerinde önemli bir artış olduğu gözlemlenmektedir. Bu, elektron geri saçılma kırınımı (EBSD) çalışmaları tarafından desteklendiği gibi, titreşimli dövme işleminin yüzeyde nanokristal bir yapı oluşturduğunu kanıtlıyor. FWHM, X-ışını kırınım analizi ile belirlenir ve şiddetli deformasyon sırasında dislokasyon miktarının artmasına, kafesteki deformasyonun artmasına ve tane boyutunun azalmasına bağlı olarak değişir (Das vd., 2020). Ortalama kristal boyutu göz önüne alındığında, en düşük tane boyutu ısıtıl işlem görmemiş numunede görülmüştür. Isıl işlem görmüş numuneler her ne kadar birbirine yakın olsa da çözelti sıcaklığının artmasına bağlı olarak tane boyutunun az da olsa küçüldüğü söylenebilir.

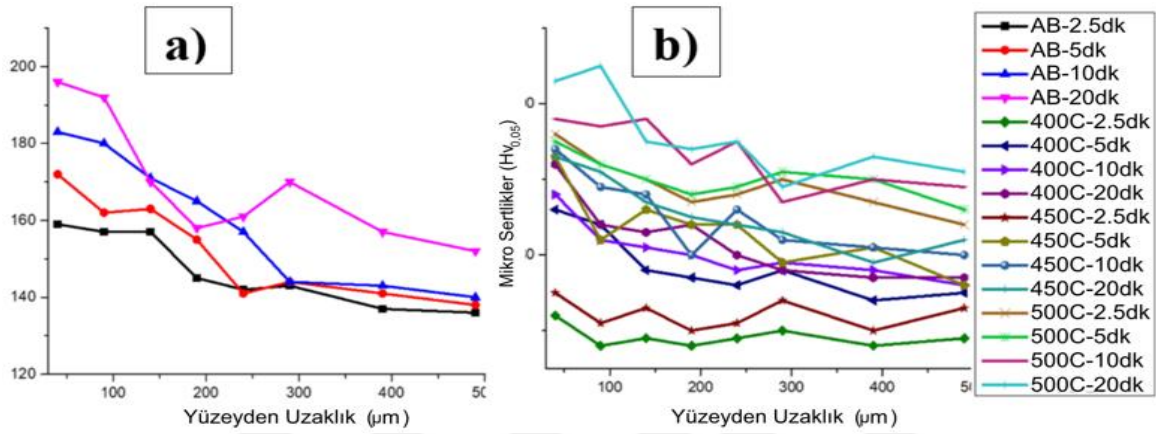
Tablo 4.1: AB, HT ve AB+HT+20 dk titreşimli dövmeden sonra FWHM değerleri ve kristal boyutu

	2θ	AB	AB+ 20dk	400°C	400°C+ 20dk	450°C	450°C+ 20dk	500°C	500°C+ 20dk
FWHM (derece)	44.7	0.148	0.248	0.129	0.160	0.154	0.169	0.155	0.158
	65.1	0.190	0.314	0.157	0.216	0.174	0.219	0.175	0.216
Kristal Boyutu (nm)	-	-	34.3±8	-	51.7±8	-	50.2±7	-	49.8±9

4.3. Mikrosertlik

SLM ile üretilen AlSi10Mg alaşımlarının sertlik ölçümleri mikrosertlik cihazında yapılmıştır. Eklemeli imalat yöntemlerinden olan SLM ile üretilen AlSi10Mg alaşımına uygulanan çökelme sertleşmesi ve titreşimli dövme işlemlerinin alaşımdaki sertlik profilleri Şekil 4.9'da verilmiştir. Daha önceki çalışmalarda AlSi10Mg alaşımının döküm ile üretimi sonucunda ortalama sertliğinin 45-46 HV olduğu tespit edilmiştir (Girelli vd., 2019; Shakil vd., 2021). Tabii ki soğuma ve katılaşma hızındaki değişime bağlı olarak farklı sertlik değerleri gözlemlenebilir. Tez çalışmamızda SLM tarafından üretilen AlSi10Mg alaşımının ortalama sertliği 137 HV olarak belirlenmiştir. Buradaki fark, normal döküm ile üretimin aksine lazer üretiminin olmasına bağlanabilir. Lazer üretim tekniğinin benzersiz doğası

nedeniyle, malzemenin yüksek bir soğuma hızı ile katılaşması, sertlikteki bu farkın ana nedenidir. Geleneksel üretim yöntemlerine göre çok ince taneli bir yapının ortaya çıkması sertliğin artmasına neden olur. Ek olarak, hızlı katılaşma nedeniyle, bileşenlerin difizyonu için yeterli zaman yoktur. Bileşenler tek bir fazda kalır ve böylece aşırı doymuş bir α -Al katı çözeltisi oluşturur. Bu durumda, atom çaplarındaki farka (Al: 0.143 nm-Si: 0.118 nm) bağlı olarak katı bir çözelti güçlenmesi meydana gelir ve dislokasyon hareketine karşı direnç de sertliğin artmasına katkıda bulunur (Shakil vd., 2021).



Şekil 4.9: Kesitten alınan mikrosertlik değerleri: a) AB+VP, b) HT+VP

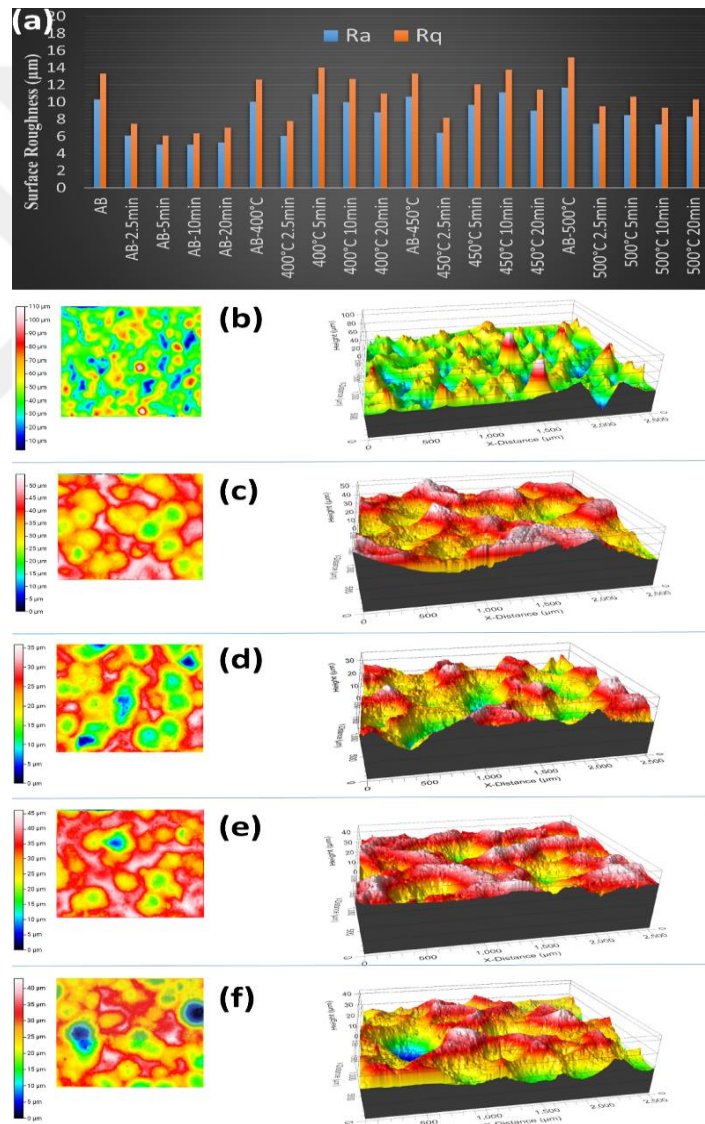
SLM yönteminde, üretimi sırasında yüksek ısının bir anda soğuması işlemi gerçekleştiği için yapının sertlik değeri yüksektir. Fakat daha sonra uygulanan ısı işlem ile bu sertlik değerinin büyük oranda düştüğü belirlenmiştir. Çalışmamızda SLM tarafından farklı sıcaklıklarda üretilen alaşımlara çökelme sertleşmesi HT uygulanmıştır. 400 °C, 450 °C ve 500 °C'de uygulanan çözeltiye alma işlemleri sonra 160 °C'de 2 saat süreyle yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuştur. Sertlik değerleri 400 °C, 450 °C, 500 °C çözelti sıcaklıklarından sırasıyla ortalama 69 ± 3 Hv, 74 ± 2 Hv ve 77 ± 4 Hv olarak ortaya çıkmıştır. Çıkan sonuçlar birbirine yakın olsa da çözelti sıcaklığı arttıkça sertliğin de arttığı görülmüştür. Bu durumla daha önceki çalışmalarda da karşılaşılmıştır. HT'nin bir sonucu olarak, mikro yapının kabalaşması, yani tanelerin kabalaşması nedeniyle tane sınırları azalır ve malzemenin sertliği azalmaktadır (Girelli vd., 2019). Ek olarak, SLM ile üretim sonrası Si açısından aşırı doymuş yapı ısı işlem ile değişmiştir. Yüksek sıcaklıklarda bekleme sonucunda yapıdaki Si taneleri bir araya gelerek ikinci fazı oluşturmuştur. Bu durumda, aşırı doymuş olan yapı bozulmuştur ve sertlik azalmıştır. Alaşımların SLM ile üretilmesine rağmen, HT sonrası sertlik değerleri geleneksel yöntemle üretilen AlSi10Mg alaşımına benzer sonuçlar göstermiştir (Shakil vd., 2021).

Farklı sürelerde uygulanan titreşimli dövme işlemi sonrasında AB numunelerinde %43'e, ısıtma işlemi görmüş numunelerde ise %34'e varan sertlik artışı gözlenmiştir. Bir tür yüzey modifikasyon yöntemi olan titreşimli dövme işlemi ile geleneksel titreşimli dövme işlemine benzer artık gerilme ve sertlik sonuçları elde edilmektedir (S. Wang vd., 2000). Bilyalı dövme işlemi, numune yüzeyine küresel şekilde küçük metal veya seramik malzemeden olan bilyaların yüksek hızda çok sert bir şekilde yüzeye uygulanması işlemidir. Toplar yüzeye çarptığında meydana gelen plastik deformasyon, tane boyutunda küçülmeye ve dislokasyon yoğunluğunda artışa neden olmaktadır. Hall-Patch denklemi, malzemelerin sertliğinin ve mukavemetinin tane boyutu azaldıkça arttığını göstermektedir. Ek olarak, dislokasyon yoğunluğunun arttırılması, dislokasyonların birbirlerinin hareketini bloke etmesine ve böylece mukavemetin artmasına neden olmaktadır (Qin vd., 2022). Bu çalışmada farklı sürelerde uygulanan titreşimli dövme işlemi sertliği arttırmıştır. Titreşimli dövme süresinin artması daha fazla deformasyon anlamına geldiğinden, sertliğin artmasına katkısı daha fazla olmuştur. 400 °C ve 450 °C'de çözelti içine alınan numuneler için 2,5 dakikalık işlem yetersiz kalmış ve asıl etki 5 dakika veya daha uzun süren titreşimli dövme işlemi ile görülmüştür. Çözelti sıcaklığı arttıkça, titreşimli dövme işleminin etkisi biraz daha belirgin hale gelmiştir. Buradaki farkın ikincil parçacık boyutundan kaynaklanmış olması mümkündür. İnce boyutlu ikincil partiküller, dislokasyon hareketini kısıtlayarak iş sertleştirme etkisinin azalmasına neden olmuş olabilir. Pekleşmenin sağlanabilmesi için yeterli miktarda deformasyonun meydana gelmesi ve buna bağlı olarak dislokasyon sayısının artması gerekmektedir. Nitekim daha önce Llaneza ve Belzunce (2015) tarafından yüksek deformasyon kapasitesine sahip olan malzemenin daha yüksek bir pekleşme kapasitesine sahip olduğu ifade edilmiştir.

4.4. Yüzey Morfolojisi ve Pürüzlülüğü

Şekil 4.10'da eklemeli imalat ile üretilmiş olan AlSi10Mg alaşımına (AB) uygulanan ısıtma işlemi ve titreşimli dövme işlemlerinden sonra numunelerde meydana gelen yüzey dokusunun pürüzlülük grafiğini verilmiştir. AB numunesi Ra: 10.3 µm ve Rq: 13.3 µm ortalama pürüzlülük değerlerine sahiptir. Sonrasında uygulanan titreşimli dövme işlemlerinin pürüzlülüğü önemli ölçüde azalttığı ve daha iyi bir yüzey dokusu oluşturduğu söylenebilir. Çalışmada kullanılan tüm örnekler arasında en iyi pürüzlülük değerleri AB+titreşimli dövme işleminde görülmüştür. Titreşimli dövme işlemine tabi tutulmayan numunelerdeki pürüzler daha sivri ve keskindir. Numunelerin uygulanan ısıtma işlemlere göre

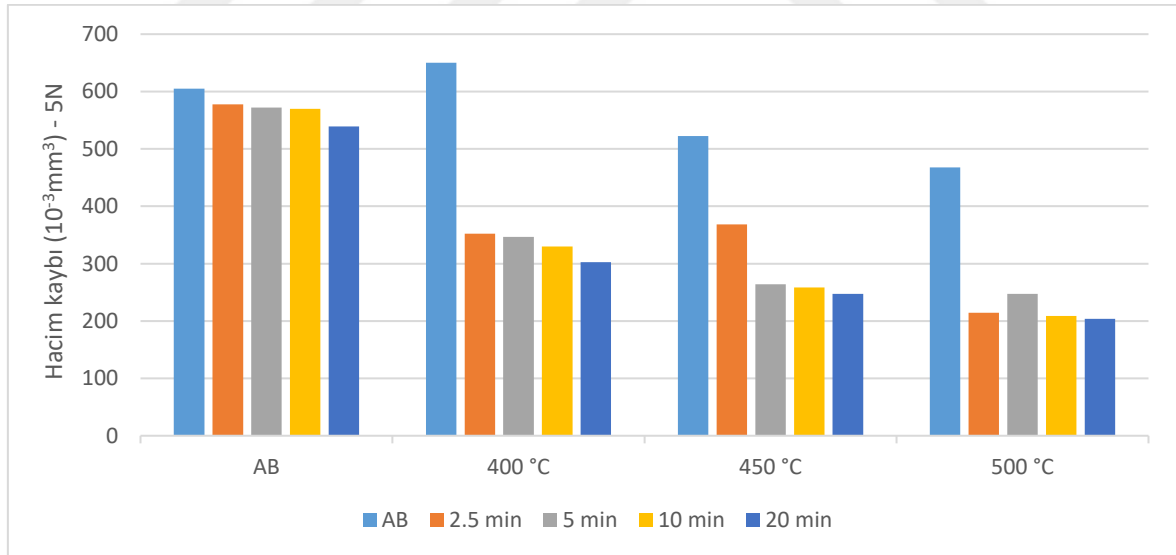
pürüzlülüğüne bakıldığında pürüzlülüğün önemli ölçüde değişmediği söylenebilir. Ek olarak, tüm yüzeylerin topografik görünümü Şekil 4.10(b-f)'de verilmiştir. Pürüzlülük değerleri birbirine yakın olmasına rağmen, numunelerin yüzey morfolojilerindeki farklılık dikkat çekicidir. Titreşimli dövme işlemine tabi tutulmayan numunelerdeki düzensizlikler daha sivri ve keskindir. Bununla birlikte, pürüzlülük arasındaki mesafenin küçük olduğu da söylenmelidir. Titreşimli dövme işleminden sonra bu sivri tepelerin kaybolduğunu ve bunların yerine etraflarında krater şeklinde çukurlar ve tümsekler olduğunu görmek mümkündür. Burada bir karşılaştırma yapmak gerekirse, küresel pürüzlülük daha fazladır ve pürüzler arasındaki mesafenin daha fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 4.10: a) Tüm numunelerin ölçülen pürüzlülüğü, b) AB, c) AB/2,5 dk, d) AB/5 dk, e) AB/10 dk, f) AB/20 dk. Yüzey morfolojisi

4.5. Kuru Kayma Aşınma Davranışı

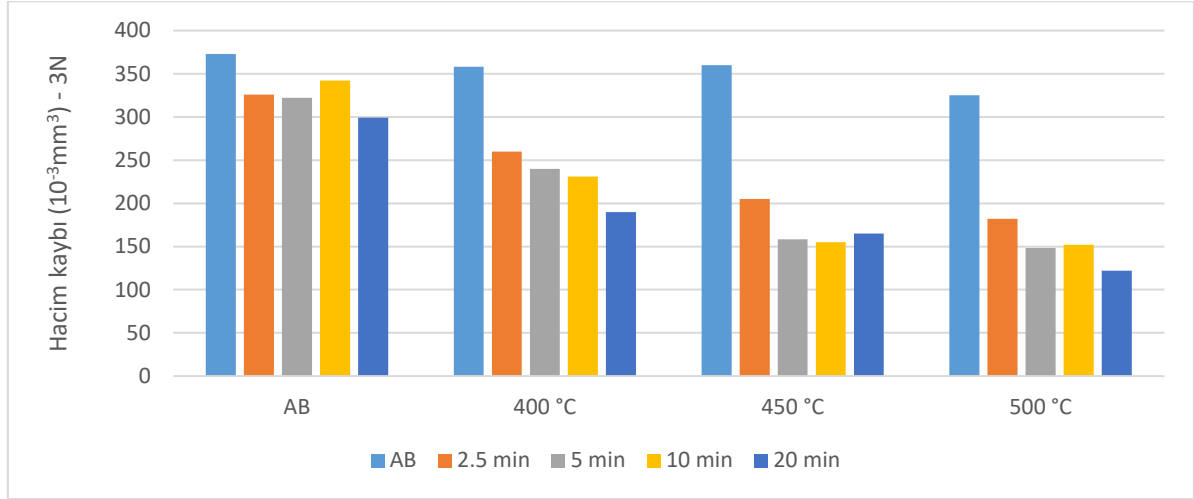
Tüm numunelere uygulanan 1-3-5N yük altında yapılan aşınma testlerindeki hacim kayıpları ölçülerek grafikler halinde verilmiştir. Aşınma sonuçlarını detaylandırmadan önce, aşınma direnci üzerinde birçok farklı faktörün etkili olduğu vurgulanmalıdır. Bunlara örnek olarak sertlik, süneklik, pürüzlülük, pürüzlülük şekli, kırılma tokluğu, aşınma çiftleri arasındaki yapışma, test sırasında meydana gelen oksidasyon verilebilir (Zammit vd., 2013; Thorat ve Thakur, 2021). Bu parametrelerin her biri aşınma sonuçlarını çok farklı şekillerde etkileyebilir. Örneğin yüksek sertliğin aşınma direncini olumlu yönde etkilediği genel bir bilgi olarak bilinmektedir. Bununla birlikte, sertliğin artmasıyla birlikte meydana gelen kırılma tokluğundaki azalmanın aşınma direncini etkileyebileceği de bilinmelidir (Moghaddam vd., 2020; Wei vd., 2023). Ya da oksidasyon hakkında konuşalım. Aşınma direnci, oluşan oksidin türüne ve yüzeydeki sürekliliğine bağlı olarak etkilenebilir. Yüksek oranda sürekli bir oksit tabakası, bir yağlayıcı görevi görerek sürtünme katsayısını azaltabilir ve aşınma kayıplarını azaltabilir (da Conceição ve D'Oliveira, 2016; Atam vd., 2025). 5N yükte yapılan aşınma testi sonucunda oluşan hacim kayıpları Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11: 5N yük uygulanan kuru kayma aşınma testlerinde AB, 400°C, 450°C ve 500°C’de meydana gelen hacim kayıpları

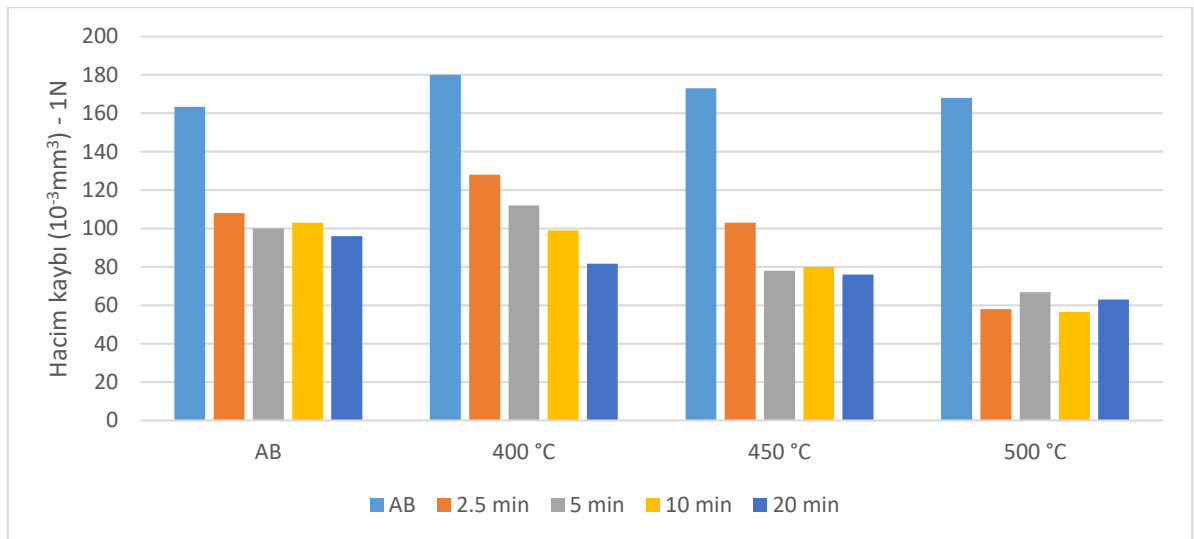
Öncelikle ısı işlem görmemiş AB numunelerini kendi içlerinde değerlendirecek olursak, titreşimli dövme işlem süresinin artması ile aşınma kayıplarının bir miktar azaldığını söylemek mümkündür. Yüzeyde meydana gelen sertlik artışı, aşınma direncine katkıda bulunmuştur. Ayrıca, AB+titreşimli dövülmüş numunelerde pürüzlülük önemli ölçüde

azaldığından, aşınma direncine olumlu katkıda bulunması beklenebilir. Ancak sertliğin artması ve pürüzlülüğün azalmasından elde edilen fayda, kırılabilirliğin artması nedeniyle muhtemelen yeterli etkiyi göstermemiştir. Şekil 4.12’de 3N yükte yapılan aşınma testi sonucunda oluşan hacim kayıpları verilmiştir.



Şekil 4.12: 3N yük uygulanan kuru kayma aşınma testlerinde AB, 400°C, 450°C ve 500°C’de meydana gelen hacim kayıpları

Hacim kayıplarında yükün 3N’a düşürülmesi ile oluşan kuru kayma aşınma test sonuçlarında bütün numunelerde gözle görülür bir düşüş meydana gelmiştir. Bu düşüşün aşınma yükünün azalması neticesinde gerçekleştiği grafiklerden anlaşılmaktadır. Şekil 4.13’te ise 1N yükte yapılan aşınma testi sonucunda oluşan hacim kayıpları verilmiştir.



Şekil 4.13: 1N yük uygulanan kuru kayma aşınma testlerinde AB, 400°C, 450°C ve 500°C’de meydana gelen hacim kayıpları

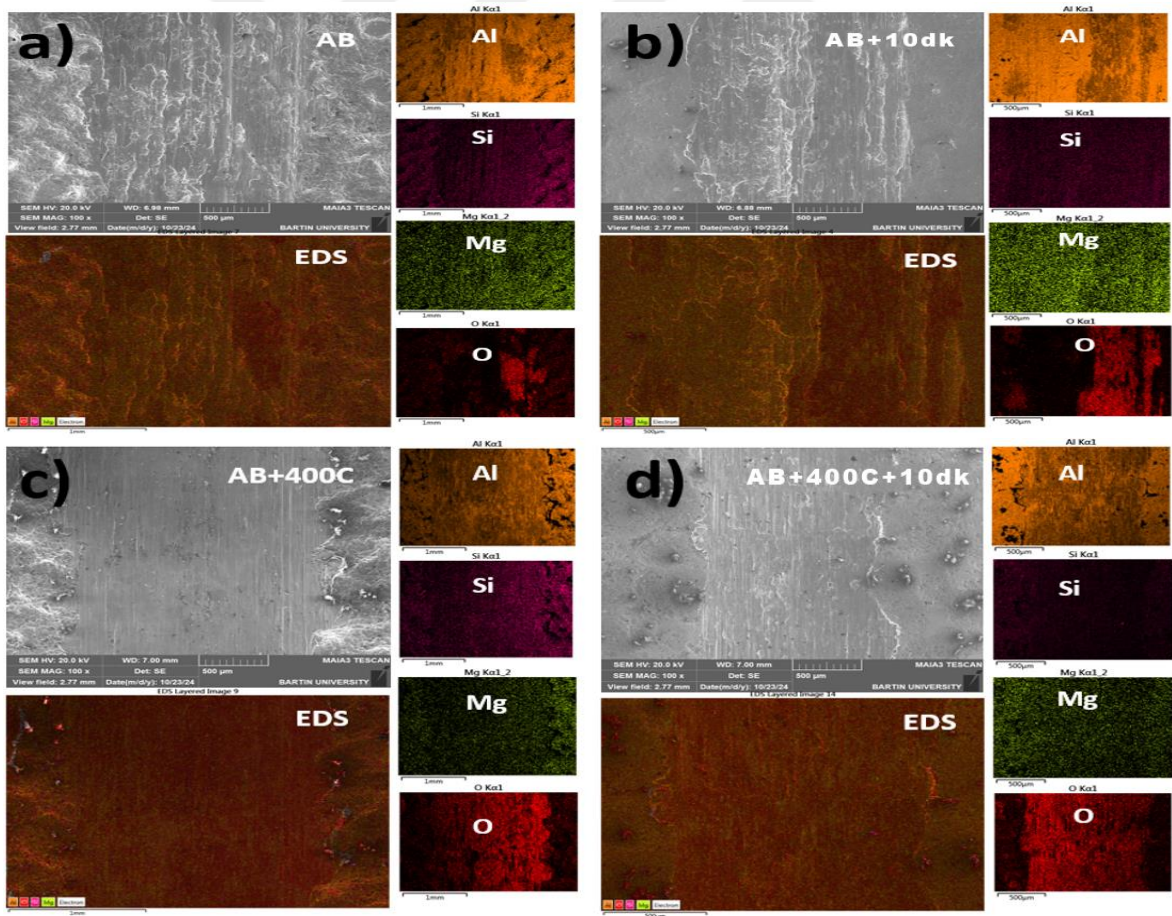
Aynı şekilde 1N yükte oluşan kuru kayma aşınma test sonuçlarında da 3N yük uygulamasına kıyasla AB+HT numunelerinin hacim kayıplarında düşüş görülmüştür. Bu düşüş aşınma yükünün azalması sonucudur. Uygulanan yükün azalmasıyla numune yüzeyinden parça koparmak daha zor hale gelmiştir ve bu nedenle numune yüzeyinde oluşan aşınma izi de azalmıştır. Aşınma izi görüntülerinden numunelerdeki hacim kayıplarının kendi aralarındaki farklılıkları anlaşılmaktadır. Numunenin sertliği ve uygulanan yük aşınma parametrelerini etkilemektedir.

Eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg zaten hızlı soğuma nedeniyle kararsız bir yapıya sahiptir. Uygulanan titreşimli dövme işlemi ile yüzeyde meydana gelen gerilme artışı da aşınma sonuçlarında beklenen iyileşmeyi sınırlamış olabilir (Novak vd., 2007; Cimenoglu vd., 2014). AB ve ısıtma işlemi görmüş numuneler arasındaki karşılaştırma için de aynı nedenler öne sürülebilir. AB numuneleri çok daha yüksek sertliğe sahip olmasına rağmen, ısıtma işlemi görmüş numunelerin aşınma kayıpları çok daha düşüktür. Yüksek kırılabilirlik ve stres birikimi, AB numunelerinde yüksek aşınma kayıplarına neden olmuştur. Bu çalışmada AB ve AB+HT numuneleri üzerinde etkili olabilecek bir diğer parametre ise numunelerin plastik deformasyon kabiliyetidir. AB numunelerinin yüksek sertliği ve yüksek gerilme durumu plastik deformasyona izin vermez. Ancak ısıtma işlemi görmüş numunelerin plastik deformasyon kabiliyeti ve sünekliği çok daha yüksektir. Yüksek plastik deformasyon kabiliyeti, aşınma testinde aşınma direncinde yapay bir artışa da neden olabilir. Yani aşınma testi sırasında çıkarılan parçalar yüzeye yüksek oranda yeniden sıvanabilir. Yeniden sıvanmış parçacıkların yüzeyden uzaklaştırılması da bir görevdir. Aşınma izinin beklenenden daha az genişlemesine ve derinleşmesine neden olabilir. İşte bu durum, sertliğin yüksek olmasına rağmen, AB numunelerinin AB+HT numunelerine göre daha yüksek aşınma kaybı vermesinin bir nedeni olarak gösterilebilir.

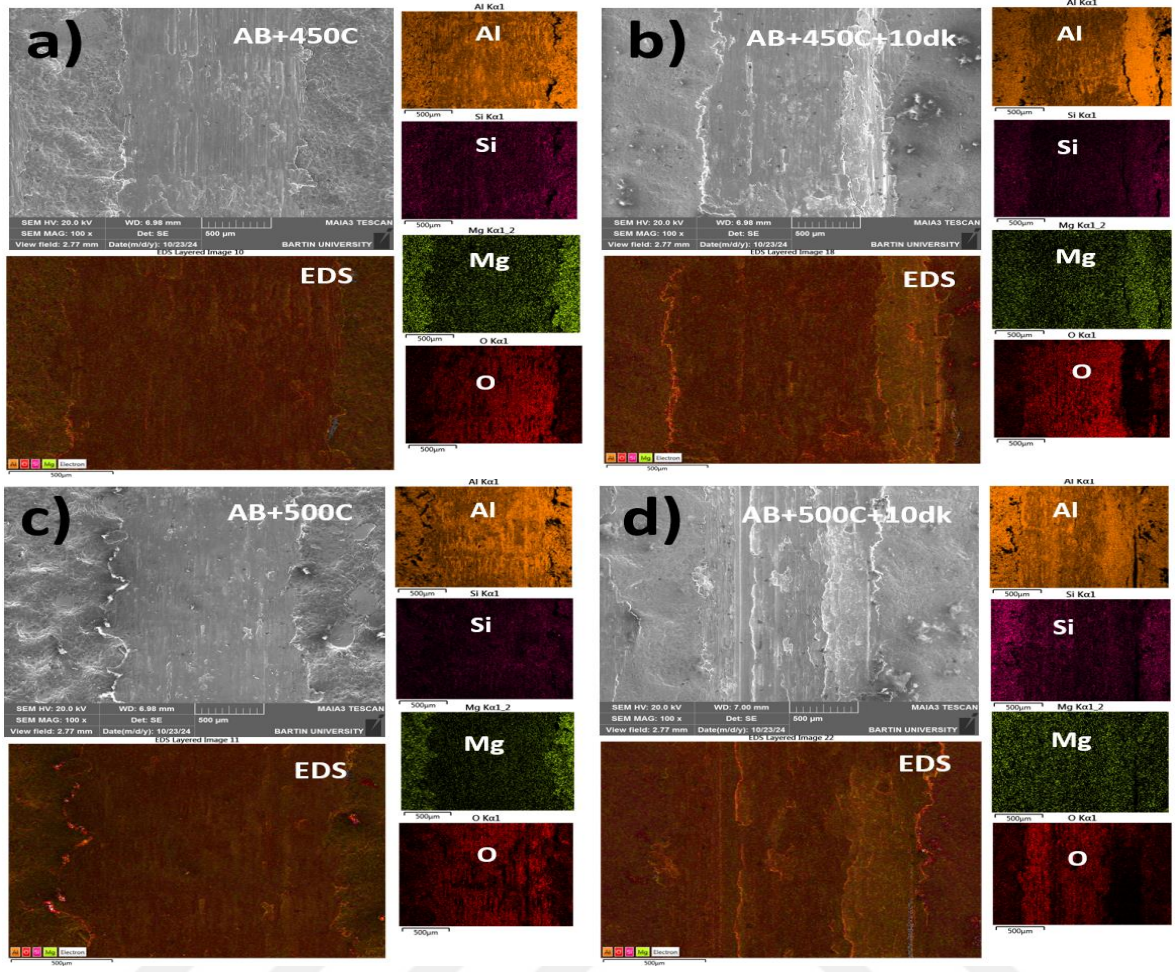
Çözelti sıcaklığının etkinliği, ısıtma işlemi görmüş numunelerde meydana gelen aşınma miktarını azaltabilmesi ile gösterilmiştir. Çözeltinin sıcaklığının artırılması genellikle aşınma kayıplarında bir azalma ile sonuçlanır. Artan çözelti sıcaklığı ile sertlikte hafif bir artış olmuştur. Aşınma kayıpları birbirine çok yakın olmasına rağmen 500 °C'lik çözeltiye alınan numune daha az aşınma kaybı vermiştir. HT'den sonra uygulanan titreşimli dövmede aşınma direncini arttırmıştır. Titreşimli dövme ile HT sonrası gerilme azalmasının kritik seviyelere ulaşmamış olması ve sertlik artışının aşınma direnci üzerinde olumlu bir etkiye sahip olması mümkündür. Burada belirtilmesi gereken bir diğer etki ise pürüzlülüktür.

Titreşimli dövme ile ısıtıl işlem görmüş numunelerde, genellikle pürüzlülükte hafif bir azalma olmuştur. Pürüzlülükteki azalma da aşınma direncine katkıda bulunabilir. Sertleştirilmemiş numunelerin keskin pürüzlülükleri, yüksek aşınma kaybında bir faktör olabilir.

5N yük altında aşınma testlerinden sonra aşınmış yüzeylerden alınan AB, AB+HT ve 10 dakikalık titreşimli dövme numunelerinin SEM-EDS analizleri Şekil 4.14-4.15'te gösterilmiştir. AB aşınma izinde yaklaşık 25-50 µm genişliğinde ekstrüde parçalar ile plastik deformasyon ve oksidasyon tipi aşınma mekanizmaları görülmektedir. AB+10 dk numunede de benzer mekanizmalar görülmekle birlikte, oksidasyon ve plastik deformasyon bölgelerinin daha geniş bir alana yayılmış olması dikkat çekmektedir. Burada önemli olan nokta yapının daha az ekstrüde edilerek plastik deformasyona uğramış olmasıdır. Bu durum, yüzeyde oluşan oksit tabakasının parçalanması ve yüzeyden ayrılması sonucu aşındırıcı tozun alttaki temiz alana ulaşması sonucu ortaya çıkar.



Şekil 4.14: Aşınma izlerinin SEM+EDS analizleri: a) AB, b) AB+10dk titreşimli dövülmüş, c) AB+400°C, d) AB+400°C+10 dk titreşimli dövülmüş

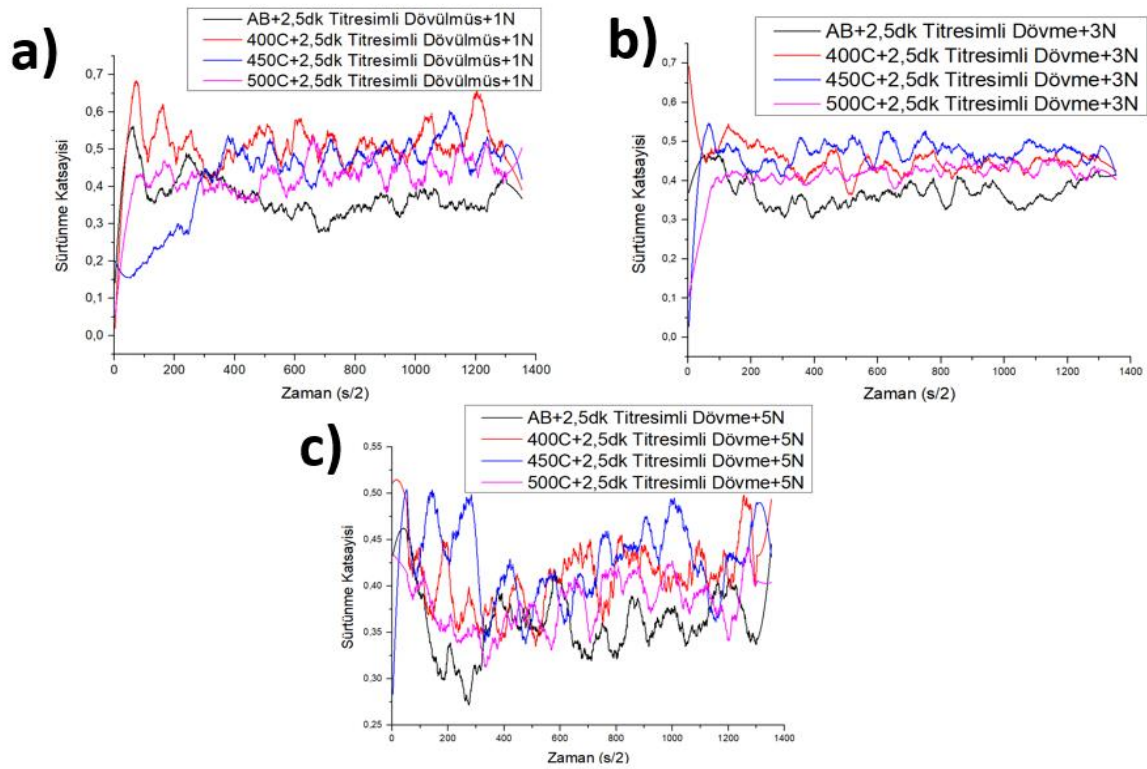


Şekil 4.15: Aşınma izlerinin SEM+EDS analizleri: a) AB+450°C, b) AB+450°C+10 dk titreşimli dövülmüş, c) AB+500°C, d) AB+500°C+10 dk titreşimli dövülmüş

400°C'de ısıtılmış numunenin yüzeyinde gözlemlenen ana aşınma mekanizmasının oksidasyon olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, daha yüksek büyütme ölçeklerinde, SEM aşınma izinde mikro çizikler, yapışma kaynaklı çatlaklar, plastik deformasyon, aşınma atıkları ve kenar birikimi görülebilir. 10 dakikalık titreşimli dövmeden sonra, oksidasyon, plastik yırtılma, oksitlerin parçalanmasından kaynaklanan plastik deformasyon ve aşınma artıklarının neden olduğu mikro çizikler gözlenir. Titreşimle dövülmüş ile dövülmemiş arasındaki çarpıcı fark, yapışma kaynaklı çatlaklar titreşimli dövülmüş numunelerde bulunmazken titreşimli dövülmemiş numunelerde bulunmaktadır. Aşındırıcı bilyenin önündeki çekme kuvvetleri ve arkasındaki basma kuvvetleri, daha yumuşak olan AB+400 °C numunede çekme çatlaklarına neden olmuştur. Aşınma mekanizmaları 500 °C ve 450 °C'de ısıtılmış numunede de 400 °C'de ısıtılmış numune ile aynıdır. Yüzeyde plastik yırtılma, kenar birikmesi ve kopmalarla birlikte yüksek oksidasyon vardır. Titreşimli dövülmüş numunelerde ise diğerlerinde olduğu gibi daha pürüzsüz bir yüzey ve

oksidasyon ağırlıklı aşınma mekanizmaları görülmektedir. Detaylı incelendiğinde gerilmelerin neden olduğu çatlak çekirdeklenmesi, kopan oksitlerin sıvanması, mikro çizikler ve aşınma kalıntıları görülmektedir.

AB, AB+400 °C, AB+450 °C ve AB+500 °C ısıtım işlem görmüş tüm numunelere 2,5 dk, 5 dk, 10 dk ve 20 dk sürelerle titreşimli dövme işlemleri uygulanmış olup bu numunelere 1N, 3 N ve 5 N yükler altında aşınma işlemleri yapılmıştır. Aşınmalar sonucunda oluşan sürtünme katsayılarına, titreşimli dövme süreleri baz alınarak ayrı şekilde bakılmıştır. 2,5 dakika titreşimli dövme işlemi uygulanmış olan numunelere 1N, 3N ve 5 N yükleri altında yapılan aşınma testleri sonucu oluşan sürtünme katsayıları Şekil 4.16’da verilmiştir.

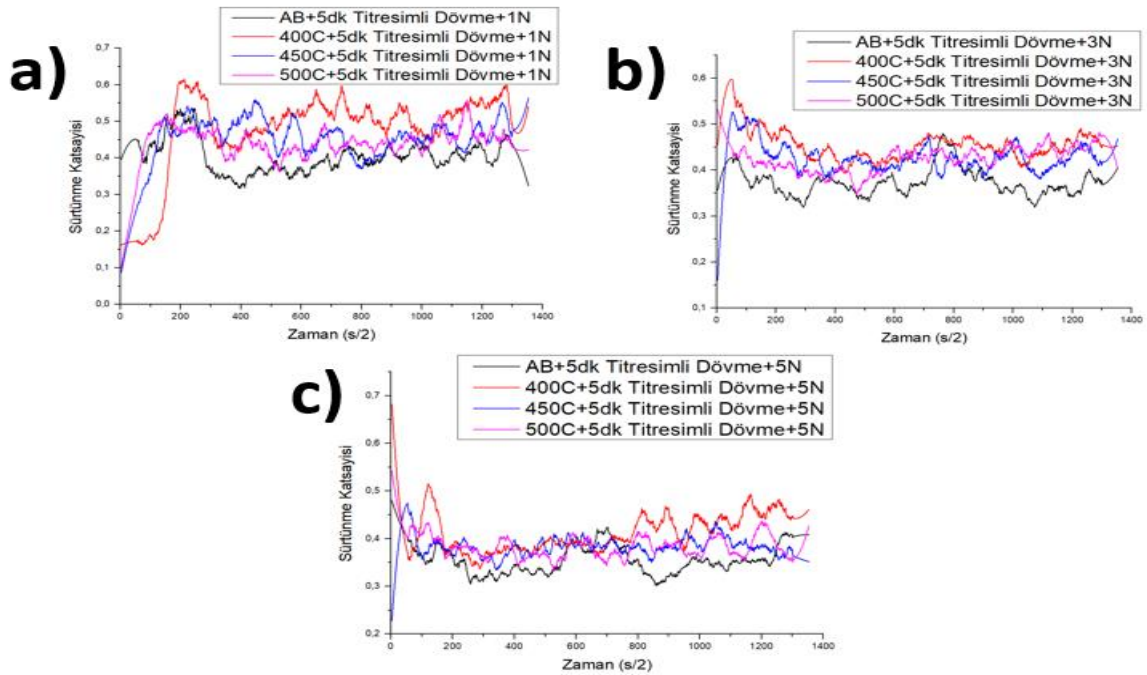


Şekil 4.16: a) 2,5 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 1N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı. b) 2,5 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 3N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı. c) 2,5 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 5N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı

AB numunesinin yüzeyi oksit tabakası ile kaplı olduğu için numune yüzeyinde yağlayıcı etki yapabilmektedir. Bu durum sürtünme katsayısını düşürebilmektedir. Ayrıca ısıtım işlem görmüş numunelerin yüzey sertliği AB numunesine göre daha düşüktür. Bu sebeple ısıtım

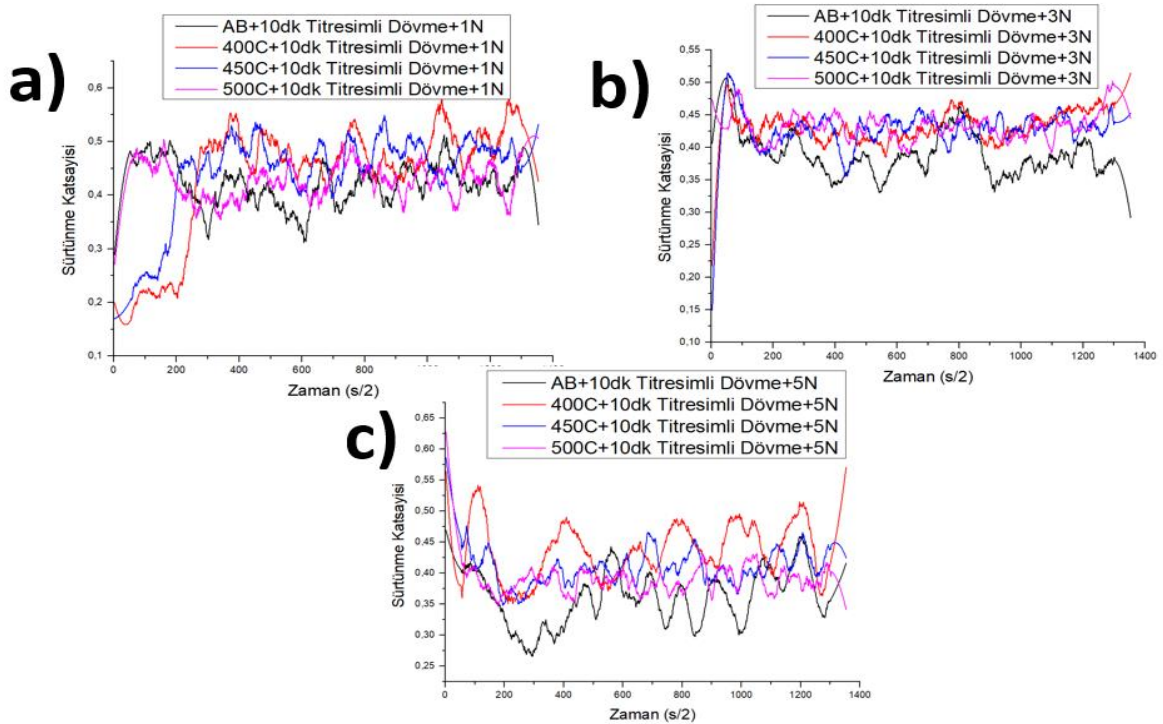
işlem görmüş numunelerin sürtünme katsayıları daha yüksektir. Titreşimli dövme işlemi uygulamasında en iyi pürüzlülük değerini AB+titreşimli dövme işleminde olduğu belirtilmiştir.

400 °C, 450 °C ve 500 °C’de ısıtılmış numunelerin işlem sıcaklığı arttıkça sertliğin de arttığı görülmüştür. Buna bağlı olarak sürtünme katsayıları sertlik arttıkça azalmaktadır. Titreşimli dövme sonrasında numune yüzeyinde oluşan deformasyon sonucu yüzeylerdeki pürüzlülükler önemli ölçüde azalmış ve daha düzgün yüzey dokusu görülmüştür. Titreşimli dövme işlemi uygulanmamış numunelerde pürüzler daha sivri ve keskin bir yapıdadır. Bu durum sürtünme katsayısını etkilemektedir. Titreşimli dövme sürelerinin artması sürtünme katsayılarını düşürmektedir. Ayrıca aşınma için uygulanan yüklerin grafiklerden de anlaşılacağı üzere 1N’luk yükte sürtünme katsayıları daha yüksekken, 3N ve 5N’luk yüklerde sürtünme katsayıları düşmektedir. 5 dakika titreşimli dövme işlemi uygulanmış olan numunelere uygulanan 1N, 3N ve 5 N yükler altında yapılan aşınmalar sonucu oluşan sürtünme katsayıları Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17: a) 5 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 1N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı. b) 5 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 3N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı. c) 5 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 5N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı

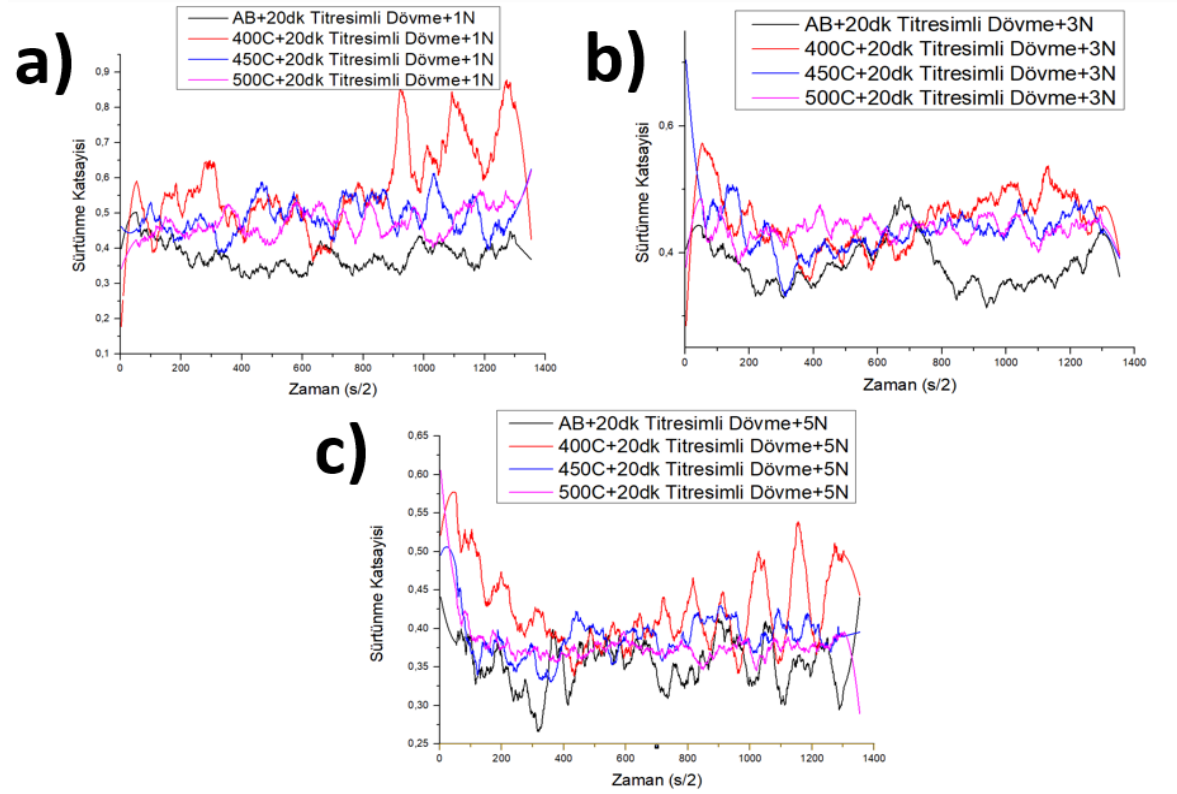
5 dakika titreşimli dövülmüş ve ısıtılmış numunelerde grafiklere bakıldığında yaklaşık olarak 0,65 ile 0,30 aralığında sürtünme katsayısı değerleri göstermiştir. Burada uygulanan yüke bağlı bir sürtünme aralığı oluşmuştur. En kötü sürtünme katsayısı sonucunu 400 °C’de ısıtılmış işlem görmüş numune vermiştir. AB numunesinin SLM üretimi neticesinde oluşan yüzey sertliği diğer ısıtılmış işlem görmüş numunelere oranla çok yüksektir. Isıtılmış işlem uygulamasıyla birlikte bu sertlik değerinde düşüş görülmüştür. Isıtılmış işlem sıcaklıkları kendi aralarında kıyaslandığında işlem sıcaklığı arttıkça sertlikte yine bir yükseliş görülmüştür. Bu nedenle 400 °C çökelme sertleşmesi uygulanmış numunenin sertliği diğer numunelere göre daha düşüktür ve bunun sonucunda sürtünme katsayısı da diğerlerine göre yüksektir. 10 dakika titreşimli dövme işlemi uygulanmış olan numunelere 1 N, 3N ve 5 N yükleri altında yapılan aşınmalar sonucu oluşan sürtünme katsayıları Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.18: a) 10 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 1N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı. b) 10 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 3N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı. c) 10 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 5N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı

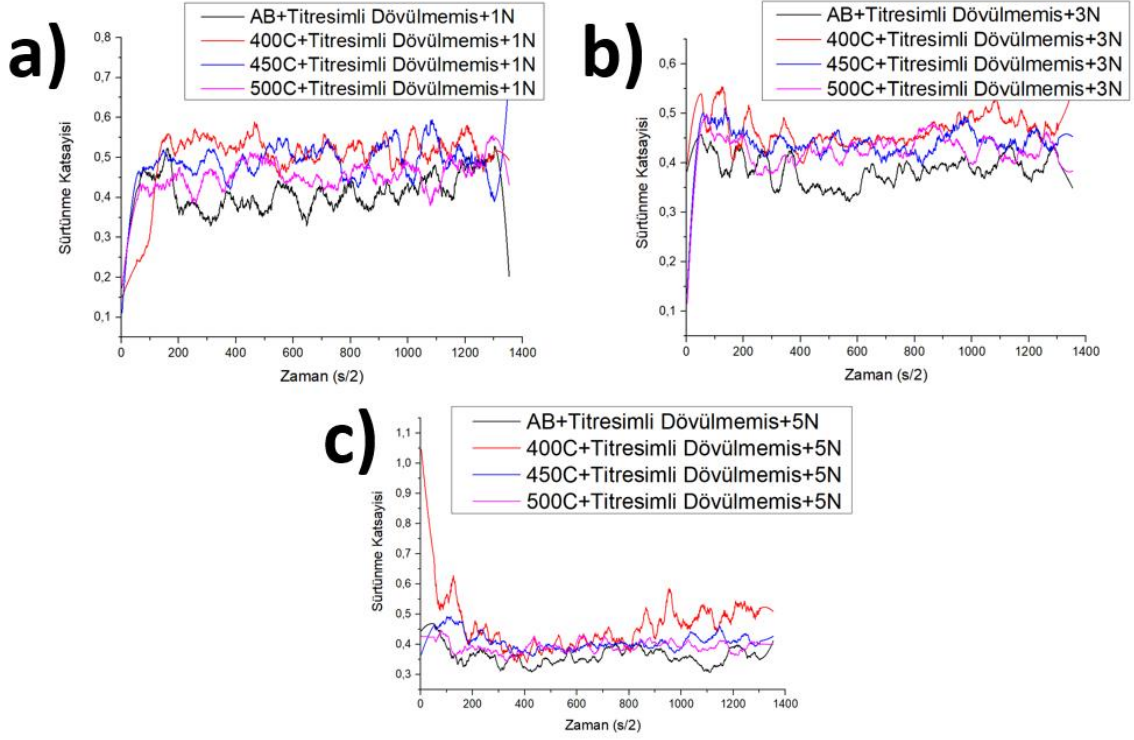
Sürtünme katsayısı grafiklerinde, uygulanan titreşimli dövme işlem süresinin artışıyla yüzeyde oluşan sertliğin aşınmayı etkilediği anlaşılmıştır. Sert yüzeyden kaldırılan parça yumuşak yüzeye kıyasla daha zor olmaktadır. Titreşimli dövme ve ısıtılmanın birlikte

uygulanması sürtünme katsayılarını düşürmüştür. 20 dakika titreşimli dövme işlemi uygulanmış olan numunelere 1 N, 3N ve 5 N yükleri altında yapılan aşınmalar sonucu oluşan sürtünme katsayıları Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19: a) 20 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 1N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı. b) 20 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 3N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı. c) 20 dk titreşimli dövülmüş olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 5N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı

Numuneler arasında en düşük sertliğe sahip olan 400 °C'deki numunenin grafiklerine bakıldığında sürtünme katsayısı daha yüksektir. Numuneye uygulanan yük arttıkça yüzeyden daha fazla parça kaldıracağından dolayı sürtünme katsayıları azalmaktadır. Son olarak titreşimli dövme işlemi yapılmamış olan numunelere uygulanan 1 N, 3N ve 5 N yüklerinin yapmış olduğu aşınmalar sonucu oluşan sürtünme katsayıları Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.20: a) Titreşimli dövme işlemi yapılmamış olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 1N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı. b) Titreşimli dövme işlemi yapılmamış olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 3N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı. c) Titreşimli dövme işlemi yapılmamış olan AB, AB+400°C, AB+450°C, AB+500°C numunelerine 5N yük uygulamasından sonraki sürtünme katsayısı

Titreşimli dövme işlemi sonucunda yüzeydeki pürüzlülüğün azalması sürtünme katsayısına da etkilenmektedir. Keskin pürüzlülüklere sahip olan sertleştirilmemiş numuneler, yüksek aşınma kaybına neden olacağı gibi daha fazla sürtünmede gösterebilir. Yüzey pürüzlülüğü azaldığında sürtünmede azalmaktadır. Yani ısıl işlem sıcaklıklarının artmasıyla ve titreşimli dövme işleminin etkisinin de artması sonucu yüzey pürüzlülüklerini azaltacağı için grafiklerden de anlaşılacağı üzere sürtünmelerde pek değişiklik görülmemiştir. Ayrıca AB numunelerinin yüksek sertliği ve yüksek gerilmesi nedeniyle aşınma sırasında yüzeyden kopan parçalar tekrar yüzeye sıvanabilir. Bu durum aşınma izinin daha az derinleşmesi ve genişlemesi neden olabilmektedir. Bundan dolayı AB numuneleri AB+HT numunelerine göre daha yüksek sürtünme gösterebilmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ısıtım işlem ve titreşimli dövme işlemlerinin SLM tarafından üretilen AlSi10Mg alaşımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Genellikle ayrı ayrı araştırılan bu ikincil süreçlerin etkileri birlikte incelenmiştir. Ayrıca ısıtım işlemdeki çözelti sıcaklığı ve titreşimli dövmedeki deformasyon süresi değiştirilmiştir. Böylece, bu süreçlerin bireysel etkilerinin yanı sıra eş zamanlı sonuçlarının da belirlenmesi amaçlanmıştır. Isıtım işlem ve titreşimli dövme işlemi yapılmış AlSi10Mg numunelerin küçük bir bölümü kesilerek bakalitlere alınmıştır. Yapılan zımparalama ve parlatma işlemlerinden sonra mikroyapı ve mikrosertlikleri incelenmiştir. AlSi10Mg alaşımından kalan diğer numuneye ise aşınma testi yapılarak aşınmaları, sürtünme katsayıları, yüzey morfolojisi ve pürüzlükleri incelenmiştir. Isıtım işlem sıcaklıkları (400°C, 450°C, 500°C) ve titreşimli dövme süreleri (2,5dk, 5dk, 10dk ve 20dk) parametrelerinin fazla olması, tez çalışmasının yürütülmesinde bize birden fazla sonuç ve gelecek adına yürütülebilecek çalışmalar hakkında bilgiler vermiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir;

- Eklemeli imalat ile üretildiğinde tek fazlı bir yapıdan oluşan AlSi10Mg alaşımının ısıtım işlem sonrasında iki farklı fazdan oluştuğu hem XRD hem de SEM+EDS analizleri ile tespit edilmiştir. Ayrıca, Si çökeltilerinin boyutu artan ısıtım işlem sıcaklığı ile artmıştır.

- Eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg alaşımının ortalama sertliği 137 HV'dir. Isıtım işlem uygulamasından sonra alaşımın sertliği 69-77 HV aralığına düşmüştür. Fakat alaşım ısıtım işlem gördükten sonra sertliklerinde sıcaklığın artırılmasıyla hafif bir artış olduğu görülmüştür.

- Titreşimli dövme işlemi sonucunda yüzeylerde pürüzlülük azalmış ve tüm numunelerin sertliğini artırmıştır. Artan titreşimli dövme süresi, etki derinliğine ve sertlik artışına daha fazla katkıda bulunmuştur. Isıtım işlem sıcaklığı arttıkça, titreşimli dövme ile sertlik artışı daha belirgin hale gelmiştir.

- Artan titreşimli dövme süresi ve ısıtım işlem sıcaklığı hacim kayıplarında azalma sağlamıştır. Bunun en önemli dayanağının artan sertlik olduğu gösterilmiştir. Ancak aşınma direncinde de alışılmadık durumlar gözlenmiştir. AB ve AB+titreşimli dövme numunelerinde çok daha

yüksek sertlik değerlerine rağmen HT+titreşimli dövme numunelerinde düşük hacim kayıpları gözlenmiştir.

- AB, AB+HT ve AB+HT+titreşimli dövme numunelerindeki aşınmaların uygulanan yükün artması ile arttığı görülmüştür. AB numunelerinde, ısıtma işlemi görmüş numunelere oranla sürtünme katsayıları daha düşüktür. Isıtma işlemi görmüş numuneler ise kendi aralarında kıyaslandığında işlem sıcaklığı artması ile artan sertliğin nedeni olarak sürtünme katsayıları birbirlerine oranla azalmaktadır. Buna ek olarak uygulanan titreşimli dövme işlemi süresinin artması da bu durumu daha belirgin hale getirmektedir.

- Numunelere öncelikle 2,5 dk, 5dk, 10 dk ve 20 dk sürelerde titreşimli dövme işlemi yapılması sonrasında 400 °C, 450 °C ve 500 °C sıcaklıklarda ısıtma işlemi uygulanması belki aşınma ve hacim kayıplarında farklılığa neden olabilir. Sonuçlar tamamen değişebilir veya numuneler AB numunesi davranışları gösterebilir. Bu durum bilinmediği için gelecekte araştırılabilir.

- Bu tez çalışmasında uygulanan bilyalı işlem parametrelerinin değiştirilmesi veya küresel olan bilya çaplarının büyütülmesi numune yüzeyindeki gözenekliliği dahada azaltabilir ve numunenin sertliğini artırabilir. Buna bağlı olarak yüzey morfolojisi ve pürüzlülüğü, mikroyapısı ve aşınması üzerindeki daha iyi sonuçlar ortaya çıkabilir.

- Eklemeli imalatla üretilen ve yapısında ısıtma işlemle birlikte üçüncü veya dördüncü faz olabilecek alaşımların denenmesi sonucunda alaşım malzemesinin ortaya koyacağı yüzey morfolojisi ve pürüzlülüğü, mikroyapısı, aşınması ve sertlik üzerindeki etkileri araştırılarak daha iyi sonuçlar ortaya çıkabilir.

- Eklemeli imalatın gelecekte daha fazla malzeme ile uyum sağlayarak geleneksel ve yüksek teknoloji üretimlerin yerini alabileceği düşünülebilir. Gelişen teknoloji, girdi ve üretim maliyetlerinin gün geçtikçe artması sebebiyle bu tarz arz-talep tepkileri oluşabilir.

KAYNAKLAR

- Aktürk, M., ve Korkmaz, M. E. (2021). Eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş alüminyum alaşımlarının malzeme yapısal parametrelerinin belirlenmesi üzerine bir derleme. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 2 (1), 49-60.
- Altenpohl, D., (2002). “Aluminium Viewed from Within Producing”, Internal Report 2-14.
- Atam, D., Sunbul, S. E., Icin, K., Döleker, K. M., Gök, M. S., ve Erdoğan, A. (2025). Boriding effect on CrFeMnNbNi high entropy alloy: Microstructure, micro-nano properties, wear behaviour. *Tribology International*, 203, 110410.
- Atatürk Üniversitesi Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM). (t.y.). *X-Işını Kırınımı (XRD)*. <https://daytam.atauni.edu.tr/altyapi/malzeme-sentezi-ve-karakterizasyonu/ileri-spektroskopi-laboratuvari/x-isini-kirimi-xrd/>
- Atay, G. (2017). *Titanyum borür içeren alsi10mg1 alaşımının üretimine malzeme özelliklerinin incelenmesi* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Ateş, M. (2018). Nanoparçacıkların ölçme ve inceleme teknikleri. *Türk Bilimsel Derlemeler Dergisi*, 11 (1), 63-69.
- Avcu, E. (2018). Bilyalı Dövme Parametrelerinin AA7075 Alüminyum Alaşımının Yüzey Altı Özelliklerine Etkileri. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 6 (4), 741-752.
- Bagherifard, S., Beretta, N., Monti, S., Riccio, M., Bandini, M., ve Guagliano, M. (2018). On the fatigue strength enhancement of additive manufactured AlSi10Mg parts by mechanical and thermal post-processing. *Materials & Design*, 145, 28-41.
- Balyalı, H. A. (2015). Metalik malzemelerin bilyalı dövme uygulaması sonrası tribolojik davranışının deneysel olarak incelenmesi.
- Bolton, W. (1993). *Engineering materials technology* (2nd ed.). B.H. Newnes.
- Buchbinder, D., Meiners, W., Wissenbach, K., ve Poprawe, R. (2015). Selective laser melting of aluminum die-cast alloy—Correlations between process parameters, solidification conditions, and resulting mechanical properties. *Journal of Laser Applications*, 27 (S2).
- Casati, R., Hamidi Nasab, M., Coduri, M., Tirelli, V., ve Vedani, M. (2018). Effects of platform pre-heating and thermal-treatment strategies on properties of AlSi10Mg alloy processed by selective laser melting. *Metals*, 8 (11), 954.
- Chen, M., Xing, S., Liu, H., Jiang, C., Zhan, K., ve Ji, V. (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. *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (4), 7644-7654.

- Chen, Y., Li, T., Jia, Z., Scarpa, F., Yao, C. W., ve Wang, L. (2018). 3D printed hierarchical honeycombs with shape integrity under large compressive deformations. *Materials & Design*, 137, 226-234.
- Cimenoglu, H., Atar, E., ve Motallebzadeh, A. (2014). High temperature tribological behaviour of borided surfaces based on the phase structure of the boride layer. *Wear*, 309 (1-2), 152-158.
- da Conceição, L., ve D'Oliveira, A. S. C. M. (2016). The effect of oxidation on the tribolayer and sliding wear of a Co-based coating. *Surface and Coatings Technology*, 288, 69-78.
- Das, T., Erdogan, A., Kursuncu, B., Maleki, E., ve Unal, O. (2020). Effect of severe vibratory peening on microstructural and tribological properties of hot rolled AISI 1020 mild steel. *Surface and Coatings Technology*, 403, 126383.
- DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., ... ve Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components–process, structure and properties. *Progress in materials science*, 92, 112-224.
- Demircioğlu, P. (2002). *Alüminyum alaşımlarının dökümünde gaz oluşumu ve gaz giderme tekniklerinin incelenmesi* (Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul).
- Dilmeç, M., Tınkır, M., ve Arıkan, H. (2015). Al 2024 alaşımının çökelme sertleşmesi işlemi koşullarının şekillendirilebilirliğe etkisinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30 (1), 231-248.
- Domingo-Espin, M., Puigoriol-Forcada, J. M., García-Granada, A. A., ve Llumà, J. (2016). Tensile strength of PLA and ABS parts manufactured by FFF using a desktop 3D printer: Influence of layer height, infill percentage and number of perimeters. *Materials & Design*, 87, 427-433.
- Doruk, E. (2015). *AA 6082 Alüminyum alaşımının yorulma davranışı üzerine temper durumunun etkisi* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Döleker, K. M. (2015). *Bilyalı Dövme İşleminin Termal Bariyer Kaplamaların Oksidasyon Davranışı Üzerine Etkisi* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Duman, B., ve Kayacan, M. C. (2017). Doğrudan metal lazer sinterleme/ergitme yöntemi ile imal edilecek parçanın mekanik özelliklerinin tahmini. *Teknik Bilimler Dergisi*, 7 (1), 12-28.
- Erdoğan, M. (2001). *Demir dışı alaşımlar: Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri* (Cilt 1, ss. 339–372). Nobel Yayın Dağıtım.
- Evrensel, R., ve Ertek, C. (2023). Eklemeli İmalatta Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Uygulamaları ve Topoloji Optimizasyonu. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13 (3), 2008-2025.

- Gebhardt, A., 2012. Understanding Additive Manufacturing. Hanser, Munich, Germany.
- Gibson, I., Rosen, D., ve Stucker, B. (2015). Direct digital manufacturing. In *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing* (pp. 375-397). New York, NY: Springer New York.
- Girelli, L., Tocci, M., Gelfi, M., ve Pola, A. (2019). Study of heat treatment parameters for additively manufactured AlSi10Mg in comparison with corresponding cast alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 739, 317-328.
- Heinz, A., Haszler, A., Keidel, C., Moldenhauer, S., Benedictus, R., ve Miller, W. S. (2000). Recent development in aluminium alloys for aerospace applications. *Materials Science and Engineering: A*, 280 (1), 102-107.
- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., ve Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371-392.
- Johal, M. S., ve Johnson, L. E. (2011). *Understanding nanomaterials* (pp. 195-196). Boca Raton, FL, USA:: CRC Press.
- Kahramanzade, H., Sert, Y., ve Küçükömeroğlu, T. (2021). Sürtünme Karıştırma İşleminin Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilen AlSi10Mg Alaşımının Tribolojik Özelliklerine Etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (28), 1159-1166.
- Kammer, C. (1999). Aluminium Handbook: Vol. 1: Fundamentals and Materials. Aluminium-Verlag Marketing & Kommunikation GmbH. Germany, 61–73
- Kaya, I. (2005). *Al7075 alaşımlarının şekillenme ve ısıtma işlemiyle özelliklerinin iyileştirilmesi* (Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul).
- Koç, O. O. (2021). *Eklemeli Üretim Yöntemiyle Üretilen Parçaların Farklı Yazdırma Parametrelerinin Akustik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi* (Master's thesis, Necmettin Erbakan University (Turkey)).
- Konda Gokuldoss, P., Kolla, S., ve Eckert, J. (2017). Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting—Selection guidelines. *materials*, 10 (6), 672.
- Li, W., Li, S., Liu, J., Zhang, A., Zhou, Y., Wei, Q., ... ve Shi, Y. (2016). Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism. *Materials Science and Engineering: A*, 663, 116-125.
- Llaneza, V., ve Belzunce, F. J. (2015). Study of the effects produced by shot peening on the surface of quenched and tempered steels: roughness, residual stresses and work hardening. *Applied Surface Science*, 356, 475-485.

- Melchels, F. P. W., Domingos, M. A. N., Streekstra, G. J., Planell, J. A., Boccaccini, A. R., ve Mol, J. M. C. (2012). Additive manufacturing of tissues and tissue constructs. *Progress in Polymer Science*, 37 (8), 1079-1104.
- MENTEŞE, E. B., AYDOĞAN, F., ve SAKLAÇOĞLU, N. AlSi10Mg ALAŞIMLI DÖKÜM PARÇALAR İÇİN ISIL İŞLEM PROSESİNDE OPTİMİZASYON ÇALIŞMALARI.
- Moghaddam, P. V., Rinaudo, M., Hardell, J., Vuorinen, E., ve Prakash, B. (2020). Influence of fracture toughness on two-body abrasive wear of nanostructured carbide-free bainitic steels. *Wear*, 460, 203484.
- Mostafaei, A., Li, W., Rastkar Kelishami, S., Cox, C., Leonard, D., Luo, A. A., ve Chmielus, M. (2021). Binder jetting additive manufacturing of metals: Process, materials, and challenges. *Applied Materials Today*, 23, 101034.
- Nix, W. D., ve Gao, H. (1998). Indentation size effects in crystalline materials: a law for strain gradient plasticity. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 46 (3), 411-425.
- Novak, S., Kalin, M., Lukas, P., Anné, G., Vleugels, J., ve Van der Biest, O. (2007). The effect of residual stresses in functionally graded alumina–ZTA composites on their wear and friction behaviour. *Journal of the European Ceramic Society*, 27 (1), 151-156.
- Osório, W. R., Garcia, L. R., Goulart, P. R., ve Garcia, A. (2007). Effects of eutectic modification and T4 heat treatment on mechanical properties and corrosion resistance of an Al–9 wt% Si casting alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 106 (2-3), 343-349.
- Patır, A. (2014). AA 2024-B4C Kompozitlerin Özelliklerine Yaşlandırma Parametrelerinin Etkisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi. *Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 111s, Trabzon*.
- Peng, X., Kong, L., Fuh, J. Y. H., ve Wang, H. (2021). A review of post-processing technologies in additive manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5(2), 38.
- Poyraz, Ö., ve Kuşhan, M. C. (2017). Metallerin lazer katmanlı imalatında farklı proses parametrelerin etkisinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33 (2), 729-742.
- Poyraz, Ö. (2018). Metallerin lazer katmanlı imalatında kullanılan proses parametrelerinin etkisinin, modelleme ve simülasyon yöntemleri kullanılarak incelenmesi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi*.
- Qin, Z., Li, B., Zhang, H., Wilfried, T. Y. A., Gao, T., ve Xue, H. (2022). Effects of shot peening with different coverage on surface integrity and fatigue crack growth properties of 7B50-T7751 aluminum alloy. *Engineering Failure Analysis*, 133, 106010.

- Rodríguez, A., Sola, A., López-Acevedo, V., Martín, A., ve Zapatero, J. (2018). Directed energy deposition (DED) for additive manufacturing: from basic principles to a real case study. *Materials*, 11(11), 1908.
- Sames, W. J., List, F. A., Pannala, S., Dehoff, R. R., ve Babu, S. S. (2016). The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International materials reviews*, 61 (5), 315-360.
- Shakil, S. I., Hadadzadeh, A., Shalchi Amirkhiz, B., Pirgazi, H., Mohammadi, M., ve Haghshenas, M. (2021). Additive manufactured versus cast AlSi10Mg alloy.
- Sharma, R., ve Dwivedi, D. K. (2005). Influence of silicon (wt.%) and heat treatment on abrasive wear behaviour of cast Al–Si–Mg alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 408 (1-2), 274-280.
- Siyambaş, Y., ve Turgut, Y. (2022). Defects, Mechanical Properties and Surface Roughness in AlSi10Mg Alloy Parts Produced by Selective Laser Melting (SLM) Method-A Study. *Gazi University Journal Science Part C Desing and Technology*, 10, 368-390.
- Sun, S., Brandt, M., ve Easton, M. J. L. A. M. (2017). Powder bed fusion processes: An overview. *Laser additive manufacturing*, 55-77.
- Sunay, N., Kaya, M., ve Kaynak, Y. (2020). Chemical post-processing methods for enhancing surface properties of parts fabricated by additive manufacturing: a review. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 38 (4), 2027-2042.
- Suzuki, E. (2002). High-resolution scanning electron microscopy of immunogold-labelled cells by the use of thin plasma coating of osmium. *Journal of microscopy*, 208 (3), 153-157.
- Terim Kapakin, K.A. (2006). Scanning- Elektron Mikroskobu. *Yeni Yüzyıl Üniversitesi Veterinerlik Fakültesi Dergisi*, 17 (1-2), 55-58.
- Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Van Humbeeck, J., ve Kruth, J. P. (2010). A study of the microstructural and mechanical properties of selective laser melted Ti–6Al–4V. *Acta Materialia*, 58(9), 3303-3312.
- Thirugnanam, A., Sukumaran, K., Pillai, U. T. S., Raghukandan, K., ve Pai, B. C. (2007). Effect of Mg on the fracture characteristics of cast Al–7Si–Mg alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 445, 405-414.
- Thorat, S. R., ve Thakur, A. G. (2021). Analysis of surface roughness and wear resistance in low plasticity burnishing process using multi-objective optimization technique. *Materials Today: Proceedings*, 41, 1082-1088.
- Vatansever, F., Ertürk, A. T., ve Karabay, S. (2018). Alüminyum-Silisyum Alaşımlarının Mikroyapısal ve Mekanik Özelliklerinin T6 Isıl İşlemi ile İyileştirilmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20 (60), 797-803.

- Volpato, G. M., Tetzlaff, U., ve Fredel, M. C. (2022). A comprehensive literature review on laser powder bed fusion of Inconel superalloys. *Additive Manufacturing*, 55, 102871.
- Wang, S., Timsit, R. S., ve Spelt, J. K. (2000). Experimental investigation of vibratory finishing of aluminum. *Wear*, 243 (1-2), 147-156.
- Wei, P., Chen, Z., Zhang, S., Fang, X., Lu, B., Zhang, L., ve Wei, Z. (2021). Effect of T6 heat treatment on the surface tribological and corrosion properties of AlSi10Mg samples produced by selective laser melting. *Materials Characterization*, 171, 110769.
- Wei, Z., Wang, W., Liu, M., Tian, J., ve Xu, G. (2023). Comparison of wear performance of bainitic and martensitic structure with similar fracture toughness and hardness at different wear conditions. *Wear*, 512, 204512.
- Williams, J. C., ve Starke Jr, E. A. (2003). Progress in structural materials for aerospace systems. *Acta materialia*, 51 (19), 5775-5799.
- Yadroitsev, I., ve Smurov, I. (2011). Selective laser melting technology: From the single powder particle to the metal part. *Physics Procedia*, 12, 192-197.
- Yağcı, T., Cöcen, Ü., Çulha, O., ve Korkmaz, A. (2021). ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARINA DAİR SON YILLARDAKİ AKADEMİK VE ENDÜSTRİYEL GELİŞMELERE GENEL BAKIŞ VE DEĞERLENDİRME. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26 (3), 1191-1210.
- Yap, Y. L., Wang, C., Sing, S. L., Dikshit, V., Yeong, W. Y., ve Wei, J. (2017). Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks. *Precision engineering*, 50, 275-285.
- Zammit, A., Abela, S., Wagner, L., Mhaede, M., ve Grech, M. (2013). Tribological behaviour of shot peened Cu–Ni austempered ductile iron. *Wear*, 302 (1-2), 829-836.
- Zhu, M., Jian, Z., Yang, G., ve Zhou, Y. (2012). Effects of T6 heat treatment on the microstructure, tensile properties, and fracture behavior of the modified A356 alloys. *Materials & Design (1980-2015)*, 36, 243-249.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Ömer SABAN

Doğum Yeri ve Tarihi :

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi :

Yüksek Lisans Öğrenimi :

Bildiği Yabancı Diller :

Bilimsel Faaliyet/Yayınlar : Tribological, Microstructural and Surface Characteristics of Additively Manufactured AlSi10Mg to Sequential Vibratory Peening and Heat Treatment

Aldığı Ödüller :

İş Deneyimi

Stajlar :

Projeler ve Kurs Belgeleri :

Çalıştığı Kurumlar :

İletişim

E-Posta Adresi :

Tarih : 20/08/2025 (Tez Savunma Tarihi)