

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİYLE Ti6Al4V ALAŞIMININ
ÜRETİMİ ve BİLYALI DÖVME UYGULANARAK
ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Cansu APAYDIN

**Danışman
Doç. Dr. Simge İRİZALP**

MANİSA-2024

CANSU
APAYDIN

SEÇİCİ LAZER ERİTME YÖNTEMİYLE Ti6Al4V
ALAŞIMININ ÜRETİMİ VE BİLYALI DÖVME
UYGULANARAK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

2024

TAAHHÜTNAME

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

CANSU APAYDIN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Cansu APAYDIN

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Simge İRİZALP

Bu tez çalışması kapsamında ilk bölümde Ti6Al4V alaşımının SLM üretim parametreleri optimize edilmiştir. Katman kalınlığı, tarama hızı ve lazer gücü SLM yönteminde numune doluluk oranına etkisi en fazla olan parametrelerdir. Çalışmada katman kalınlığı, tarama hızı ve lazer gücü parametreleri ve onların seviyelerine göre L9 ortogonal deneysel tasarım düzeni oluşturulmuştur. Taguchi yöntemine dayalı gri ilişkisel analiz yöntemi kullanılarak optimizasyon yapılmış ve matematiksel modelleri regresyon analizi yardımıyla elde edilmiştir. İkinci bölüm olarak hem optimizasyon hem de deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında yoğunluk değeri en yüksek ve en düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip numune parametre seti seçilip bilyalı dövme işlemi için SLM numunelerinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Üçüncü bölümde ise numunelere geleneksel, şiddetli ve aşırı bilyalı dövme işlemleri uygulanmıştır. Bilyalı dövme işleminin SLM ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımının metalürjik ve yorulma özelliklerini geliştirdiği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Seçici lazer ergitme, Ti6Al4V, Taguchi, Gri ilişkisel analiz, Bilyalı dövme, Mikroyapı, Yorulma

2024, 172 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Cansu APAYDIN

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

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Simge İRİZALP

In the first part of this thesis, the SLM production parameters of Ti6Al4V alloy were optimized. Hatch spacing, scanning speed and laser power are the parameters that have the highest effect on density of the samples in the SLM method. In the study, L9 orthogonal experimental design was established according to the hatch spacing, scanning speed and laser power parameters and their levels. The grey relational analysis method based on the Taguchi method was used for optimization and mathematical models were obtained with the help of regression analysis. In the second part, when both the optimisation and experimental results were compared, the sample parameter set with the highest density value and the lowest surface roughness was selected and SLM samples were produced for the shot peening process. In the third part, conventional, severe and over shot peening processes was applied to the SLM samples. It was demonstrated that the shot peening process improves the metallurgical and fatigue properties of Ti6Al4V alloy produced by SLM.

Keywords: Selective laser melting, Ti6Al4V, Taguchi, Grey relational analysis, Shot Peening, Microstructure, Fatigue

2024, 172 pages

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında literatür araştırmaları, materyal ve metot, bulgular ve tartışma, sonuçlar ve öneriler olmak üzere 4 ana bölümden oluşmaktadır. Bu çalışma kapsamında, bilyalı dövme işleminde kullanılacak Ti6Al4V alaşımının SLM ile üretim parametreleri optimize edilerek, geleneksel ve şiddetli bilyalı dövme yöntemi ile malzeme özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu tez çalışmasında özgün olarak şiddetli bilyalı dövmenin SLM ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımına uygulanması çalışılmıştır.

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren akademik hayatımın tüm zorlu aşamalarında bana rehberlik eden ve desteğini hiç eksik etmeyen sevgili danışman hocam Sayın Doç. Dr. Simge İRİZALP'e gönülden teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalarında numunelerin tedarigi için Ermaksan Makine Sanayi ve Tic. A.Ş. şirketine, laboratuvar analizlerindeki kıymetli yardımlarından dolayı Metalürji ve Malzeme Yük. Müh. Konuralp SİVRİ'ye teşekkür ederim.

Çalışma hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her daim motive olmamı sağlayan çok değerli hocalarım Arş.Gör. Nail ASLAN'a, Arş.Gör. Sırrı Can POLAT'a, Makina Yük. Müh. Gökhan EYİCİ'ye ve proje çalışma arkadaşım Pr. Arş. Gör. Kemal AYAN' a teşekkür ederim.

Adlarını yazamadığım bütün hocalarıma, sevgili mesai arkadaşlarıma ve kıymetli dostlarıma da çok teşekkür ederim.

Beni tek başına yetiştiren, hayatım boyunca tüm gücüyle maddi ve manevi olarak destekleyen ve beni bugünkü halime getiren canım anneme çok teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışma 2022-139 no' lu proje kapsamında BAP tarafından ve bir kısmı da 121D012 no' lu proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

Cansu APAYDIN

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ABD	Aşırı Bilyalı Dövme
BD	Bilyalı Dövme
Cp-Ti	Commercially pure titanium (Ticari saflıkta titanyum)
EBM	Electron beam melting (Elektron ışını ergitme)
GBD	Geleneksel Bilyalı Dövme
E	Enerji yoğunluğu
FWHM	Yarı Yükseklikteki Tam Genişlik
gf	Gram-kuvvet
h	Tarama aralığı
HMK	Hacim Merkezli Kübik Yapı
HV	Vickers Sertlik
LSP	Laser shock peening (Lazer şok işleme)
P	Lazer gücü
R_a	Aritmetik Ortalama Pürüzlülük
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SLM	Selective laser melting (Seçici lazer ergitme)
SLS	Selective laser sintering (Seçici lazer sinterleme)
SPH	Sıkı paket hegzagonal
ŞBD	Şiddetli Bilyalı Dövme
v	Tarama hızı
W	Watt
XRD	X Işını Difraksiyonu
YMK	Yüzey Merkezli Kübik Yapı
α'	Alfa üssü (Martenzit Fazı)
α''	Ortorombik martenzit Fazı
β	Beta Fazı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. α tanelerinin a) eşksenli ve b) iğnesel olduğu Cp-Ti mikroyapı.....	3
Şekil 2.2. SPH α ile HMK β 'nın kristal yapıları.....	4
Şekil 2.3. Ti-Sn, Ti-Al, Ti-Mo ve Ti-Mn için faz diyagramları	6
Şekil 2.4. Ti6Al4V'un Vanadyum içeriğine bağlı faz yapıları.....	9
Şekil 3.1. SLS prosesi	12
Şekil 3.2. SLM prosesi.....	14
Şekil 3.3. EBM prosesi	16
Şekil 4.1. Çatlaklar için çekirdeklenme unsuru olan partiküller: erimemiş Ti6Al4V partiküllerinin bir kolonisini gösteren kırık yüzey	19
Şekil 4.2. Gaz porozitesinin SEM görüntüsü, (b) Füzyon eksikliğinin LOM görüntüsü.....	19
Şekil 4.3. (a) Keskin çatlak benzeri gözenekler ve (b) Ti6Al4V'ün SLM işleminden sonra yaygın olarak gözlemlenen küresel gözenekler.....	21
Şekil 4.4. Katılaşma tabakasının termal büzülmeden dolayı çekme kalıntı gerilme oluşumu	24
Şekil 4.5. SLM ile üretilmiş Ti6Al4V mikroyapısı	26
Şekil 6.1. Bilyalı dövme sonucu oluşan basma artık gerilmesi	36
Şekil 6.2. Bilyalı dövme işlemi sonrası oluşan deformasyon ve gerilmeler.....	36
Şekil 6.3. Bilyalı Dövme işlemi neticesinde oluşan başlıca değişimlerin şematik gösterimi.....	36
Şekil 6.4. Kullanılan farklı tip bilyalar a) seramik bilya b)cam bilya c) çelik bilya..	38
Şekil 6.5. Çelik bilyaların sınıflandırılması	38
Şekil 6.6. Almen test şeridi deneysel şematığı	40
Şekil 6.7. Almen Testi doyum noktası grafiği	40
Şekil 7.1. Ti6Al4V tozunun XRD grafiği.....	44
Şekil 7.2. Çalışmada kullanılan Ti6Al4V tozun SEM görüntüsü ve toz boyutları....	45
Şekil 7.3. Tüm numune üretimlerinin gerçekleştirildiği ENA 250 marka SLM tipi eklemeli imalat makinesi.....	46
Şekil 7.4. SLM deneyleri için örnek görüntü (tüm boyutlar mm cinsinden) (b) SLM tarama stratejisi	46
Şekil 7.5. SLM numune üretimi.....	46
Şekil 7.6. Bilyalı dövme için üretilen numune geometrisi	47
Şekil 7.7. (a) Bilyalı dövme için üretilmiş ve yüzeyi parlatılmış SLM numuneleri, (b) yakından görüntüsü	47
Şekil 7.8. Optimizasyon sürecinin metodolojisi	49
Şekil 7.9. Bilyalı dövme deney düzeneği	55
Şekil 7.10. Bilyalı dövme işleminde kullanılan hazne.....	55
Şekil 7.11. Bilyalı dövme cihazına numune bağlanması	56
Şekil 7.12. N, A ve C tipi Almen testi için kullanılan şerit ölçüleri	57
Şekil 7.13. Almen şiddeti ölçümü için bilyalı dövülmüş N-tipi şeritler ve Almen şiddeti ölçümü	58
Şekil 7.14. Arşimet deney düzeneği	61

Şekil 7.15. Mekanik profilometre	62
Şekil 7.16. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm yönü	62
Şekil 7.17. Hassas kesme cihazı	63
Şekil 7.18. a) Struers Citopress -1 bakalit cihazı, b) Bakalite alınmış bir numune örneği.....	63
Şekil 7.19. Metkon Forcipol 1V parlatma cihazı	64
Şekil 7.20. (a) Nikon Marka Eclipse LV150N Model Optik Mikroskop (b) Nikon Marka SMZ 745T Model Stereo Mikroskop	65
Şekil 7.21. İYTE SEM analiz cihazı ve numunelerin hazneye yerleştirilmesi.....	66
Şekil 7.22. (a) mikrosertlik cihazı (b) ölçüm alınan örnek bir numune	67
Şekil 7.23. (a) SHIMADZU marka EHF-LV020K2-020 model yorulma cihazı (b) çenelere numune bağlanması	68
Şekil 7.24. DEFAM bünyesindeki PANanalytical marka Empryan model XRD Cihazı	68
Şekil 8.1. SLM yüzey profili	75
Şekil 8.2. GRG değerine karşılık deneme sayısı	81
Şekil 8.3. GRG için S/N eğrileri	82
Şekil 8.4. Deneysel (EV) ve tahmin edilen (PV) yoğunluk değerleri.....	93
Şekil 8.5. Deneysel (EV) ve tahmin edilen (PV) yüzey pürüzlülüğü değerleri.....	94
Şekil 8.6. SLM numunelerinin SM görüntüleri	96
Şekil 8.7. SLM numunelerinin mikroyapı görüntüleri.....	100
Şekil 8.8. SLM L5, L6 ve L9 numuneleri mikroyapıları.....	102
Şekil 8.9. SLM L6 numunesinin 20X büyütme altında içyapı görüntüsü	102
Şekil 8.10. Bilyalı dövme uygulanmış numunelerin görselleri	104
Şekil 8.11. Farklı büyütme ölçeklerinde bilyalı dövme yüzey SM görüntüleri	106
Şekil 8.12. BD yapılmış numunelerin SM yüzey görüntülerinin karşılaştırılması..	106
Şekil 8.13. Farklı Almen şiddetlerinde BD sonrası <i>Ra</i> ve <i>Rz</i> değerlerinin karşılaştırılması	107
Şekil 8.14. Farklı Almen şiddetlerinde BD sonrası homojenlik için <i>Ra</i> karşılaştırması.....	108
Şekil 8.15. Bilyalı dövülmüş yüzeylerin 3D yüzey topografyası	109
Şekil 8.16. BD işlemi sonrası numunelerin yüzey topografya görüntüsü (a) 11N, (b) 18N, (c) 11N+0,6mm (d) 18N+0,6mm	110
Şekil 8.17. BD yapılmış numunelerin yüzeyaltı ve orta bölge mikroyapı görüntüleri	113
Şekil 8.18. Martenzit lamellerinin ölçümü	116
Şekil 8.19. 11N almen şiddetine sahip numunenin 1000X ve 3000X büyütmedeki SEM görüntüsü	117
Şekil 8.20. 18N almen şiddetine sahip numunenin 1000X ve 3000X büyütmedeki SEM görüntüsü	118
Şekil 8.21. 11N+0,6mm almen şiddetine sahip numunenin 1000X ve 3000X büyütmedeki SEM görüntüsü.....	119
Şekil 8.22. 18N+0,6mm almen şiddetine sahip numunenin 1000X ve 3000X büyütmedeki SEM görüntüsü.....	120

Şekil 8.23. Bilyalı dövme sonrası yüzeyaltı SEM incelemeleri (a) 11N, (b) 18N, (c) 11N+0.6mm, (d) 18N+0.6mm	121
Şekil 8.24. Farklı Almen şiddetlerinde dövülmüş Ti6Al4V alaşımının XRD patterni	123
Şekil 8.25. XRD paternlerinin kıyaslaması.....	124
Şekil 8.26. XRD paterninde BD ile FWHM değerinin değişimi	125
Şekil 8.27. Kristalit boyutu değişim değerleri	126
Şekil 8.28. Kristalit boyutu değişim grafiği.....	127
Şekil 8.29. Latis mikro gerinim değişim değerleri	128
Şekil 8.30. Dislokasyon yoğunluğu değişim değerleri	129
Şekil 8.31. Mikrosertlik ölçümleri	130
Şekil 8.32. BD yapılmış ve yapılmamış numunelerin yorulma analizi sonuçları....	132
Şekil 8.33. 230MPa gerilme seviyesinde zorlanmış ve hasara uğramış numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri; (a) ve (b) SLM, (c) ve (d) 11N GBD, (e) ve (f) 18N ŞBD	134

TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 2.1. Titanyum diğer en yaygın kullanılan metallerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	5
Tablo 4.1. Literatürde yer alan bazı SLM ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri.....	29
Tablo 4.2. Ti6Al4V numunelerinin artan ısı işlem sıcaklıkları ile mekanik değişimleri.....	32
Tablo 7.1. Çalışmada kullanılan Ti6Al4V tozun kimyasal kompozisyonu.....	44
Tablo 7.2. SLM yönteminde kullanılan faktörler ve seviyeler.....	51
Tablo 7.3. Bilyalı Dövme Proses Parametreleri	56
Tablo 7.4. Eğri yüksekliği-Almen yoğunluğu dönüşüm tablosu.....	59
Tablo 7.5. Kullanılan bilyalı dövme işlemi sonrası hesaplanan eğri yüksekliği ve Almen şiddeti	60
Tablo 8.1. L9 ortogonal düzenini kullanarak oluşturulan deneysel matris	70
Tablo 8.2. SLM işlem parametrelerine göre hesaplanan enerji yoğunluğu değerleri	71
Tablo 8.3. Arşimet test sonuçları.....	73
Tablo 8.4. SLM numunelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri	74
Tablo 8.5. Taguchi L9 deneysel ölçüm sonuçları.....	77
Tablo 8.6. Normalize edilmiş matris	78
Tablo 8.7. Gri ilişkisel katsayılar	79
Tablo 8.8. Performans özellikleri için gri ilişkisel derece.....	80
Tablo 8.9. GRG için ANOVA.....	82
Tablo 8.10. GRG'nin yanıt tablosu	83
Tablo 8.11. GRG'nin deneysel ve tahmini değerleri	85
Tablo 8.12. GRG için regresyon denklemi katsayıları	86
Tablo 8.13. Yüzey pürüzlülüğü için regresyon denklemi katsayıları.....	88
Tablo 8.14. Yoğunluk için regresyon denklemi katsayıları	90
Tablo 8.15. Tahmin edilen ve deneysel yoğunluk değerleri ve hatalar.....	92
Tablo 8.16. Tahmin edilen ve deneysel yüzey pürüzlülüğü değerleri ve hatalar	93
Tablo 8.17. BD sonucunda Ti6Al4V malzemesinde meydana gelen kristalit boyutu (nm), latis mikro-şekil değişimi (%) ve dislokasyon yoğunluğu	126
Tablo 8.18. Yorulma Analizi Sonuçları	132

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
TABLolar DİZİNİ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
1. TEZİN AMACI.....	1
2. TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARI	2
2.1. Titanyum'un Genel Özellikleri	2
2.2. Titanyum Alaşımlarının Kullanım Alanları.....	6
2.3. Ti6Al4V Alaşımı ve Metalürjisi	8
3. METALLERDE EKLEMELİ İMALAT.....	10
3.1. Metallerde Eklemeli İmalata Giriş	10
3.2. Toz Yataklı Füzyon Prosesleri	11
3.2.1. Seçici lazer sinterleme.....	12
3.2.2. Seçici lazer ergitme	13
3.2.3. Elektron ışını ergitme	15
4. Ti6Al4V ALAŞIMININ SEÇİCİ LAZER ERGİTME PROSESİ.....	17
4.1. Yoğunluk Davranışı	18
4.2. SLM ile Üretilmiş Ti6Al4V Mikroyapısı.....	24
4.3. SLM ile Üretilmiş Ti6Al4V Alaşımının Mekanik Özellikleri	27
4.4. SLM ile Üretilmiş Ti6Al4V Alaşımına Uygulanabilecek İlave İşlemler	30
5. OPTİMİZASYON.....	34
6. BİLYALI DÖVME	35
6.1. Bilyalı Dövme İşlem Parametreleri	37
6.1.1. Bilya türü ve boyutu	37
6.1.2. Bilya püskürtme basıncı	39
6.1.3. Nozul açısı	39
6.2. Almen Şiddeti ve Testi	39
6.3. Bilyalı Dövmenin Malzemeye Makro ve Mikro Etkileri	40

6.4.	SLM ile Üretilmiş Malzemelere Bilyalı Dövmenin Etkileri	42
7.	MATERYAL VE METOT.....	44
7.1.	Materyal	44
7.2.	Deneysel Yöntem	45
7.2.1.	SLM numunelerinin üretimi	45
7.2.2.	Deney tasarımı.....	48
7.2.2.1.	Taguchi methodu.....	50
7.2.2.2.	Gri ilişkisel analiz.....	51
7.2.3.	Bilyalı dövme düzeneği	54
7.2.3.1.	Almen şiddetinin belirlenmesi.....	57
7.3.	Karakterizasyon ve çalışmaları için cihazlar ve kullanılan parametreler	60
7.3.1.	SLM numunelerinin yoğunluk ölçümleri	60
7.3.2.	Yüzey durumu incelemeleri	61
7.3.3.	Numunelerinin metalografik işlem hazırlığı.....	62
7.3.3.1.	Kesme işlemi	63
7.3.3.2.	Bakalite alma	63
7.3.3.3.	Zımpara ve parlatma işlemi	64
7.3.3.4.	Dağlama	65
7.3.4.	Mikroyapı incelemeleri.....	65
7.3.5.	Mikrosertlik ölçümleri.....	66
7.3.6.	Yorulma testi	67
7.3.7.	XRD analizleri	68
8.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	70
8.1.	SLM Numunelerinin Optimizasyonu	70
8.1.1.	Taguchi metodu	70
8.1.1.1.	SLM numunelerinin yoğunluk sonuçları	72
8.1.1.2.	SLM numunelerinin yüzey pürüzlülük değerleri	73
8.1.2.	Gri ilişkisel analiz.....	76
8.1.3.	Doğrulama işlemi	84
8.1.4.	Regresyon modeli	85
8.2.	SLM Numunelerinin İncelemeleri	94
8.2.1.	Yüzey durumu incelemeleri	94
8.2.2.	Mikroyapı ve kusurların incelemeleri.....	97
8.3.	Bilyalı Dövme Numunelerinin İncelenmesi	103

8.3.1.	Bilyalı dövme numunelerinin yüzey durumu incelemeleri	103
8.3.2.	Mikroyapı incelemeleri.....	112
8.3.3.	XRD analizi sonuçları.....	122
8.3.4.	Mikrosertlik ölçümleri.....	129
8.3.5.	Yorulma testi sonuçları	130
9.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	135
10.	KAYNAKÇA	138



1. TEZİN AMACI

Bilyalı dövme işlemleri, Seçici Lazer Ergitme (SLM) ile üretilmiş titanyum alaşımlarının malzeme özelliklerini iyileştirme potansiyeline sahip olmasına rağmen, bilyalı püskürtme parametrelerinin yüzey ve yüzey altı özellikleri davranış üzerindeki etkilerini anlamaya yönelik sınırlı sayıda çalışma mevcuttur.

Bilyalı dövme işlemleri, yüzey güçlendirme konusunda olumlu etkiler sağlasa da SLM ile üretilen bileşenlerin yorulma performansı üzerindeki etkileri hâlâ netlik kazanmamış ve daha fazla araştırma gerektirmektedir. Geleneksel döküm ve dövme yöntemleriyle üretilen benzer parçalarla karşılaştırıldığında, SLM ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımının nispeten zayıf yorulma limiti ve ömrü dikkate alındığında bu çalışmada bilyalı püskürtme uygulanan Ti6Al4V alaşımının yüzey ve yüzey altı özelliklerinin (sertlik, mikroyapısal özellikler, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey morfolojisi) seçilen bilyalı dövme parametrelerinin etkisini araştırmayı amaçlanmaktadır. Ayrıca yorulma testleri sonrası kırık yüzeylerin incelenmesiyle çatlak başlangıçlarını belirlemeyi ve yorulma mekanizmalarını tartışmayı hedeflemektedir.

Bu tez çalışmasında özgün olarak çoklu bilyalı dövmenin yanında şiddetli ve aşırı bilya dövmenin SLM ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımına uygulanması çalışılmıştır.

2. TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARI

2.1. Titanyum'un Genel Özellikleri

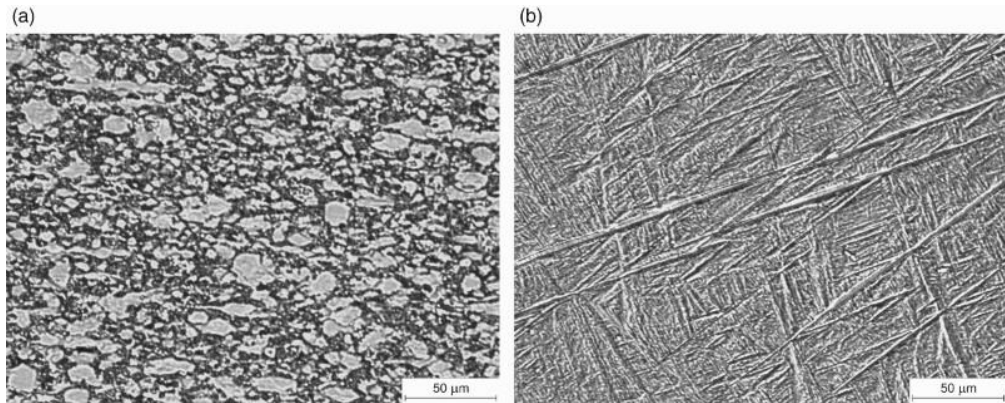
Titanyum yerkabuğunda yaklaşık %0,6 seviyesinde bulunur ve bu nedenle alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra en çok bulunan dördüncü yapısal metaldir. Titanyum için en önemli mineral kaynakları ilmenit (FeTiO_3) ve rutildir (TiO_2) (Bhattacharjee et al., 2017). Maden bilimci ve kimyacı William Gregor, 1791 yılında titanyumu keşfetti. Dört yıl sonra Martin Klaproth, Yunan çocuk mitolojisindeki Titanların hikayesine dayanarak bu elemente Titanyum adını verdi. Titanyum oksitinden titanyum metalini elde etmek için yaklaşık yüz yıldan fazla bir süre geçti. 1940'ların sonunda titanyum alaşımları geliştirilmiştir. Piyasada bulunan titanyum alaşımları arasında en yaygın olanı Ti6Al4V alaşımıdır. Bu nedenle, son altmış yılda Ti6Al4V alaşımının özelliklerini ve yoğunluğunu geliştirmek için çok sayıda çalışma yapılmıştır (Pushp et al., 2022).

Titanyum, organik maddelerden biridir. Düşük yoğunluk ($4,5 \text{ g/cm}^3$), yüksek spesifik dayanım, kırılma tokluğu, yorulma dayanımı, çatlak yayılımına karşı direnç, yüksek sıcaklıkta yüksek tokluk ve mükemmel korozyon direnci gibi güçlü özellikleri titanyumu tercih edilir kılar. Bazı titanyum alaşımlarının çalışma sıcaklıkları 550°C ile 700°C arasında değişmektedir (Cui et al., 2011; Ivasyshyn and Aleksandrov, 2008). Hafif metal alaşımları, çelikler, nikel alaşımları ve diğer çeşitli malzeme türleri ile karşılaştırıldığında, titanyum alaşımları belirli bir akma dayanımı ve yoğunluk arasındaki ilişkiye göre ($\sigma_{0,2}/\text{yoğunluk}$) daha dayanıklıdır. Bu avantajlarını yaklaşık 500°C 'ye kadar koruyabilirler. Böylece bazı titanyum alaşımları gaz türbinleri ve jet motorları için bileşenler yapmak için idealdir (Cui et al., 2011).

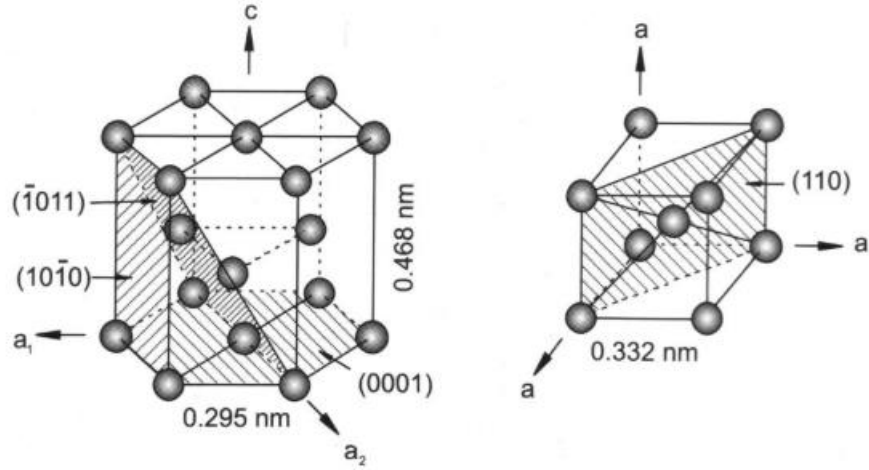
Titanyumun %98,4 ile %99,6 arasındaki alaşımları ticari saf titanyum (Cp-Ti) olarak adlandırılır. Bu tür alaşımlar genellikle korozyon direnci gerektiren uygulamalarda tercih edilirler. Cp-Ti alaşımları, düşük mukavemetleriyle birlikte yüksek süneklik özelliklerine sahiptirler. Oda sıcaklığında, Cp-Ti'nin kristal yapı olarak hegzagonal sıkı paketli alfa (α) fazı görülür. Ancak sıcaklık 882°C 'ye çıktığında, bu yapı hacim merkezli kübik beta (β) fazına polimorfik bir dönüşüm geçirir (Pushp et al., 2022).

Saf titanyum için, α fazı oda sıcaklığında sıkı paket hekzagonal (SPH) kristal yapısına sahip olması ve yaklaşık 885°C'de hacim merkezli kübik (HMK) yapıdaki β fazına dönüşmesi titanyumun allotropik malzeme özelliğinden kaynaklıdır. Bu dönüşüm sıcaklığına " β dönüşüm sıcaklığı" denir. Alaşım durumunda ara yer elementleri, özellikle oksijen, azot ve karbon gibi, α fazını stabil hale getirebilir ve dolayısıyla β dönüşüm sıcaklığını artırabilir. Dolayısıyla, alaşım elementleri titanyumun özelliklerini etkileyebilir ve dönüşüm sıcaklığını artırabilir veya azaltabilir. Bu, titanyum alaşımının bileşimine ve özelliklerine bağlı olarak değişir (Benjamin & Kirkpatrick, 1980).

Titanyumun alaşımsız formu (Cp-Ti), α fazının %100 oranında mikroyapıda bulunurken, katkı elementleri ve özellikle demir miktarının artmasıyla mikroyapıda β fazına rastlanabilir. Tavlanmış durumda, Cp-Ti'nin mikroyapısı eşeksenli veya iğnesel olabilir. İğnesel α fazının oluşumu, β fazından α fazına dönüşüm sırasında uygulanan soğuma hızına bağlıdır. Soğuma hızı arttıkça iğnesel α plakaların genişliği azalır. Eşeksenli α ise yeniden kristalleşme tavlama sonucu oluşur. Mikroyapıda iğnesel α fazının görülmesi, malzemenin β dönüşüm sıcaklığı üzerine kadar ısıtıldığını gösterir (Motyka et al., 2019; Pushp et al., 2022). Şekil 2.1 Cp-Ti mikroyapısını gösterir. Şekil 2.2 SPH α ile HMK β 'nin kristal yapılarını göstermektedir.



Şekil 2.1. α tanelerinin a) eşeksenli ve b) iğnesel olduğu Cp-Ti mikroyapısı (Pushp et al., 2022)



Şekil 2.2. SPH α ile HMK β 'nin kristal yapıları (Pushp et al., 2022)

Titanyum ve alaşımlarının mikroyapıları eşeksenli veya iğnesel olduğunda farklı mekanik özellikler sergilerler. Eşeksenli tane yapısına sahip alaşımlar genellikle yüksek süneklilik ve mukavemet, üstün şekillendirme kabiliyeti ve gerilmeli korozyon çatlamasına karşı yüksek direnç gösterirler. Öte yandan, iğnesel tane yapısına sahip alaşımlar iyi bir sürünme direnci ve yüksek kırılma tokluğu özellikleri sergilerler. Bu mikroyapılar, alaşımın belirli kullanım şartlarına uyum sağlaması ve istenen mekanik özellikleri sağlaması açısından önemlidir (Tanrıöver ve Taşçı, 1997). Tablo 2.1. Titanyum diğer en yaygın kullanılan metallerin mekanik verilmiştir.

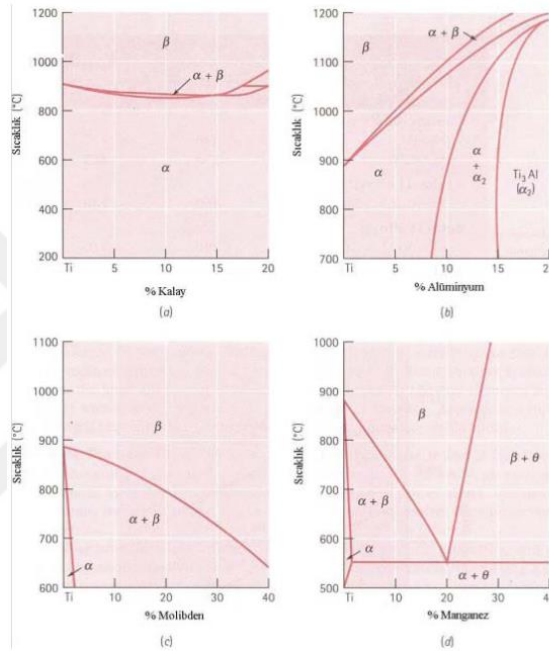
Tablo 2.1. Titanyum diğer en yaygın kullanılan metallerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması

	Titanyum	Demir	Alüminyum
Ergime Sıcaklığı (°C)	1660	1538	660
Allotropik Dönüşüm (°C)	882	912	-
Kristal Kafes Yapısı	Hegzagonal Sıkı Paket	Hacim Merkezli Kübik	Yüzey Merkezli Kübik
Elastisite Modülü (GPa)	115	190	69
Çekme mukavemeti (MPa)	200-1400	300-1500	50-700
Yoğunluk (g/cm³)	4,5	7,9	2,7

Titanyumun kristal yapısını etkileyen alaşım elementleri arasında alüminyum, galyum, germanyum, karbon, oksijen ve azot bulunmaktadır. Bu elementler, α fazını daha kararlı hale getirerek α - β dönüşüm sıcaklığını artırır. Diğer bir grup element ise molibden, vanadyum, tantal ve kolombiyumdan oluşan izomorf gruptur. Bunlar α - β dönüşüm sıcaklığını düşüren elementlerdir. Ayrıca, titanyumla ötektoid alaşımlar yapan elementler arasında manganez, demir, krom, kobalt, nikel, bakır ve silisyum bulunmaktadır. Bu elementler, α fazında düşük çözünürlüğe sahiptir ve dönüşüm sıcaklığını azaltır. β -izomorf grup elementleri, alaşım içine katılarak β fazını kararlı hale getirme ve yüksek sıcaklıktaki kullanımlarda metaller arası bileşiklerin oluşumunu azaltma veya önleme amaçlanmaktadır. Molibden, manganez ve kalay ile alüminyumun titanyumla oluşturdukları faz diyagramları Şekil 2.3. Ti-Sn, Ti-Al, Ti-Mo ve Ti-Mn için faz diyagramları. Kalay ve alüminyum hem α hem de β fazında önemli bir çözünürlüğe sahiptir (Atar et al., 2008; Paul et al., 2003).

Titanyum için etkili olan alaşım elementleri üç ana grupta özetlenebilir: (1) Al, O, N ve C gibi α -stabilizatörler; (2) Mo, V, Nb, Ta (izomorf), Fe, W, Cr, Si, Co, Mn ve H (ötektoid) gibi β -stabilizatörler ve (3) Zr gibi nötraller. α ve α' fazlarına yakın

titanyum alaşımları korozyona karşı mükemmel direnç göstermelerine rağmen sıcaklık dayanımları düşüktür. $\alpha + \beta$ alaşımları ise hem α hem de β fazlarının varlığı nedeniyle daha yüksek mukavemet sergiler. Malzemelerin özellikleri bileşime, α ve β fazlarının göreceli oranlarına, ısıtılma ve termo-mekanik işleme koşullarına bağlıdır. β alaşımları daha düşük elastisite modül ve daha yüksek korozyon direnci gibi özelliklere sahiptir (Froes, 2004). Titanyum alaşımları, oda sıcaklığındaki mikroyapıya bağlı olarak α , α' , $\alpha + \beta$, metastabil β veya stabil β olarak sınıflandırılabilir (IJ, 1996).



Şekil 2.3. Ti-Sn, Ti-Al, Ti-Mo ve Ti-Mn için faz diyagramları (Atar et al., 2008)

2.2. Titanyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

Geleneksel olarak titanyum, uzay, uçak ve deniz sanayi alanlarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Günümüzde otomotiv endüstrisi, bir aracın ağırlığını her bir kilogram azaltmak için 15 dolarlık maliyeti kabul edebilirken, havacılık endüstrisinde bu maliyet 1500 dolara kadar çıkabilmektedir. Uzay faaliyetleri gibi daha ileri teknoloji gerektiren alanlarda ise bu rakam 15000 dolara kadar çıkabilmektedir. Bu durum, titanyumun düşük yoğunluğu sayesinde havacılık endüstrisinde önemli bir

pazar bulunduğunu gösteren önemli bir örnektir, diğer üstün özellikleri ise bu durumu desteklemektedir (Akdaş, 2006).

Metalin sağlam ve sert yapısı, düşük yoğunluğu, yüksek sıcaklık dayanımı ve korozyona karşı direnci, özellikle bu özel alanlarda tercih edilmesine yol açmaktadır. Son otuz yılda titanyumun yeni işleme teknolojilerinin gelişimi paralelinde, biyomedikal cihazlar ve dental implantlar gibi alanlarda kullanımı hızla artmaktadır (Gökdemir et al., 2005). Titanyum özellikle korozyon ve biyomedikal uygulamalarında doğrudan ortamla temas halinde olduğundan, titanyumun yüzey özellikleri büyük önem taşımaktadır (Atar et al., 2008).

Titanyum ve alaşımlarının biyomedikal uygulamalarda tercih edilmesindeki bazı önemli faktörler şunlardır:

Mekanik Dayanıklılık: Titanyum ve alaşımlarının yeterli mekanik dayanıklılığa sahip olmaları.

Oksidasyon Direnci: Havada oluşan oksit tabakasının, materyalin vücut içinde kararlı kalmasını sağlaması.

Korozyona Direnç: Oksit tabakasının vücut içinde titanyumu korozyona karşı koruması.

Galvanik Akıma Karşı Direnç: Titanyumun pasif olmayan metallerle kaplanabilir olması ve vücutta galvanik akıma neden olmaması.

Elastisite Modülü: Titanyum alaşımlarının elastiklik modülünün diğer implant materyallerine kıyasla kemiğe daha yakın olması.

Biyolojik Uyum: Titanyumun biyolojik olarak uyumlu olması, yani vücutta kabul görmesi ve uzun süreli olarak tolerans gösterilmesi.

Bu özellikler, titanyum ve alaşımlarının çeşitli biyomedikal uygulamalarda tercih edilmesinde önemli rol oynamaktadır (Shamblen & Redden, 1967; Williams, 1976).

Titanyum ve alaşımlarının deniz ile temas eden yapılar ve kimyasal ortamlarda tercih edilmesinin başlıca nedenleri;

Düşük Yoğunluk: Titanyum ve alaşımları düşük yoğunluğa sahip olduğundan yapıların hafif olmasını sağlar.

Yüksek Yorulma Ömrü: Titanyum, yüksek yorulma ömrüne sahip olduğu için uzun süreli ve dayanıklı kullanım sağlar.

Yüksek Tokluk Verileri: Titanyum ve alaşımları, yüksek tokluk özelliklerine sahiptir, bu da darbe ve titreşimlere karşı dirençli olmalarını sağlar.

Yüksek Korozyon Direnci: Özellikle deniz suyu gibi korozyon etkisi yüksek ortamlarda titanyum ve alaşımları mükemmel bir korozyon direnci sunar.

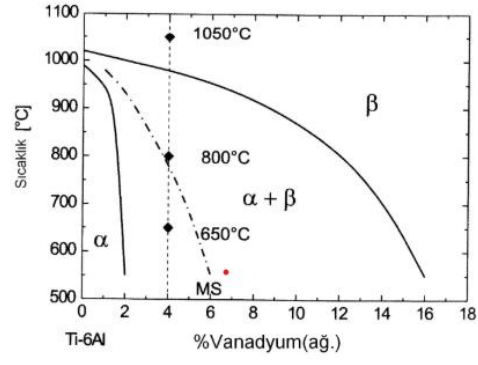
Kaynak Yapılabilirlik Özelliği: Titanyum ve alaşımları, çeşitli kaynak yöntemleriyle işlenebilir ve monte edilebilir, bu da yapıların tasarım ve imalat süreçlerinde esneklik sağlar.

Bu özellikler, titanyum ve alaşımlarının deniz yapıları, gemi parçaları, deniz altı uygulamaları ve kimyasal tesisler gibi çevresel koşullara dayanıklı ve uzun ömürlü uygulamalarda tercih edilmesini sağlar (Yücel Zafer, 2008).

2.3. Ti6Al4V Alaşımı ve Metalürjisi

Ti6Al4V alaşımı, α stabilizörü olarak ağırlıkça % 6 Al ve β stabilizörü olarak % 4 V içeren bir $\alpha+\beta$ alaşımdır. Bu alaşımın mikroyapısı, β fazı bölgesinden yavaş soğuma koşullarında, oda sıcaklığında yaklaşık olarak % 90'ı α fazı (hekzagonal sıkı paket) olurken, % 10'u ise yarı kararlı β fazı (hacim merkezli kübik) şeklinde bulunur. Ancak hızlı soğuma koşullarında, β fazının miktarı ve şekli değişiklik gösterebilir. Özellikle çok hızlı soğuma durumlarında, β fazının miktarı artabilir ve mikroyapıda daha fazla β fazı görülebilir (Lütjering, 1998).

Bu özellikler, Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde ve uygulamalarında önemli rol oynar. Yavaş soğuma koşullarında elde edilen mikroyapı genellikle daha istikrarlı ve mekanik özellikleri açısından daha tercih edilen bir yapıya sahiptir. Titanyumun üretim şekli de bu özelliklerin oluşumunda oldukça etkilidir. Şekil 2.4. Ti6Al4V'un Vanadyum içeriğine bağlı faz yapıları verilmiştir (Lütjering, 1998).



Şekil 2.4. Ti6Al4V'un Vanadyum içeriğine bağlı faz yapıları (Lütjering, 1998)

3. METALLERDE EKLEMELİ İMALAT

3.1. Metallerde Eklemeli İmalata Giriş

Eklemeli imalat (Additive Manufacturing-AM), 3 boyutlu dijital verileri kullanarak malzemeyi katman katman ekleyerek bir nesne üretme süreci olarak adlandırılan genel bir terimdir (Simonelli et al., 2014a). Son zamanlarda, seri üretim için önemli bir alternatif olarak eklemeli imalat ön plana çıkmaktadır. Bu yenilikçi teknoloji, parçaların katman katman üretimini sağlayarak çeşitli mühendislik malzemelerinden üstün özelliklere sahip, tam yoğunluklu parçaların üretimini mümkün kılar. Özellikle çelik, alüminyum ve titanyum gibi metalik malzemeler, eklemeli imalat teknolojisiyle üretilebilmektedir (Herzog et al., 2016).

Metalik malzemeleri imal etmek için eklemeli imalat teknolojilerini kullanmanın avantajları, yalnızca karmaşık geometriler üretmek değil, aynı zamanda monolitik, bimetalik veya çok malzemeli bileşimler kullanarak özelleştirilmiş özelliklere sahip yapılar tasarlamak ve imal etmektir (Zhang & Bandyopadhyay, 2018, 2019).

Eklemeli imalat kullanılarak işlenen malzemeler karmaşık termal işlem döngülerinden geçer. Eklemeli imalat ile üretilen parçalar için mikroyapı, işleme ve özellikler arasındaki bağlantıyı daha iyi anlamanın yanı sıra bir eklemeli imalat malzeme veri tabanı geliştirmeye ihtiyaç vardır. Eklemeli imalatla üretilen Ti6Al4V üzerinde çok fazla çalışma yapıldığını ancak hala son derece popüler bir alan olduğu dikkati çekmektedir (Özer, 2020). Bu çerçeveden bakıldığında, hala üretimsel anlamda geliştirilmesi gereken parametrelerin bulunduğu ve literatürdeki benzer çalışmalarda bile örtüşmeyen sonuçlar olabildiği göze çarpmaktadır.

Eklemeli imalat süreci, kesme, şekillendirme, döküm süreci gibi "geleneksel" imalat süreçlerinden farklıdır. Temel fark, geleneksel imalat süreçlerinde malzemelerin şekillendirilmesi istenen parçanın tüm fiziksel alanı boyunca gerçekleşirken, eklemeli imalat süreçlerinde malzemenin şekillendirilmesi öncelikle bir bütün olarak istenen parçayı oluşturan unsurların (tozlar, filamentler ve katmanlar gibi) oluşumunda gerçekleşir (L. Yang et al., 2017).

Eklemeli üretim teknolojilerinin benzersiz avantajları şunlardır:

- Üretim süreçlerini ve maliyeti azaltır.
- Ürün iyileştirmesini hızlandırır.
- Özel ürünlerin üretimini mümkün kılar.
- Hızlı prototipleme ve modelleme olanağı sağlar.
- Karmaşık geometrili parçaların üretimini mümkün kılar.
- Tasarım süreçlerinde zaman tasarrufu sağlar.
- Tasarım ile üretim arasındaki uyumu artırır.
- Ürünün işlevselliğini optimize etmeye olanak tanır (örneğin soğutma kanalları gibi).
- Üretim makinalarının sayısını azaltabilir.
- Daha kısa teslimat süreleri ve düşük stok ihtiyacı sağlar.
- Tasarım serbestliği sunar.
- Kalıp gerektirmez, bu nedenle kalıp maliyetlerinden kaçınılır.
- Az malzeme kullanımıyla atık miktarını azaltır.
- Lojistik açıdan avantaj sağlar.

Bu avantajlar, eklemeli üretim teknolojilerinin endüstriyel uygulamalarda ve ürün geliştirme süreçlerinde giderek daha fazla tercih edilmesini sağlamaktadır (Despeisse Mélanie and Ford, 2015; Mellor et al., 2014; Niaki & Nonino, 2018).

3.2. Toz Yataklı Füzyon Prosesleri

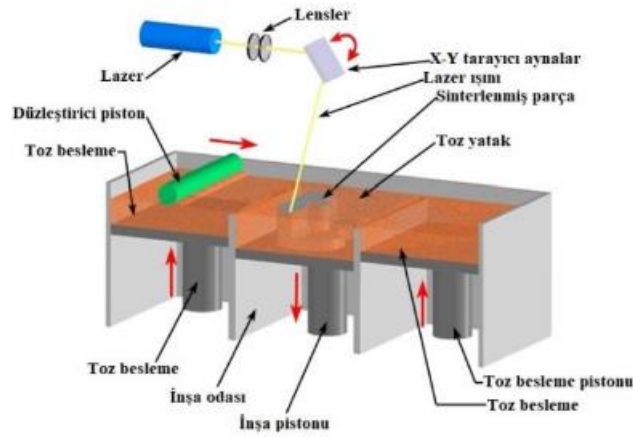
Toz yataklı lazer ergitmeli ve/veya sinterlemeli sistemlerde, malzemeyi işlemek için lazer veya elektron ışını kullanılır. Bu sistemlerde kullanılan ışınların çapı genellikle 20 ile 200 μm arasında değişirken, 20-80 μm aralığındaki tozlar imalat platformuna serildikten sonra ışınlar tarafından taranarak üç boyutlu tasarımın ilk katmanı veya tabakası oluşturulur. İlk katmanın üretimi tamamlandıktan sonra imalat platformu tek bir katman kalınlığı kadar aşağıya indirilir. Ardından, toz serme pabucu yeni toz tabakasını ilk katmanın üzerine serer ve bu işlem, üç boyutlu nesnenin tamamlandığı kadar tekrarlanır. Bu tür eklemeli imalat yöntemleri arasında yaygın olanlar şunlardır: Seçici Lazer Ergitme (SLM), Seçici Lazer Sinterleme (SLS), Elektron Işın Ergitme (EBM), Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS), Lazer

Geliştirilmiş Net Şekillendirme (LENS), Elektron Işın Eklemeli İmalat (EBAM) (Yalçın et al., 2019).

3.2.1. Seçici lazer sinterleme

Seçici Lazer Sinterleme (SLS), parça üretmek için tabaka tabaka ince tozların yayıldığı ve sinterlendiği bir eklemeli üretim işlemidir. İşlem şu adımlarla gerçekleşir:

1. Toz, inşa alanını tamamen kaplayacak şekilde düzleştirici bir silindir ile eşit şekilde dağıtılır ve yayılır.
2. Odaklanmış bir lazer ışını, toz katmanına tam olarak yönlendirilir ve parçanın enine kesitini tarar.
3. Her katman üretildikten sonra, bir rulo yatak üzerine taze bir toz tabakası yayılır.
4. Bu işlem, parça tamamlanana kadar tekrar edilir. Tozların bağlanmasında; katı hal sinterleme, kimyasal olarak indüklenen bağlama, sıvı faz sinterleme ve kısmi ergime olacak şekilde 4 adet temel mekanizma kullanılmaktadır. SLS prosesinin şematik gösterimi Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. SLS prosesi (Anderl et al., 2017)

SLS yöntemi, plastikler (örneğin poliamid gibi) ve çeşitli metal tozları (örneğin Ti6Al4V, AlSi10Mg, Maraging çeliği, 316L gibi) işlemek için uygundur. Bu özellikleriyle SLS, geniş bir uygulama alanına sahiptir ve endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır (Bineli et al., 2011; Duman & Cengiz Kayacan, 2017.; Kayacan & Yılmaz, 2019; Özer, 2020; Vaezi et al., 2013).

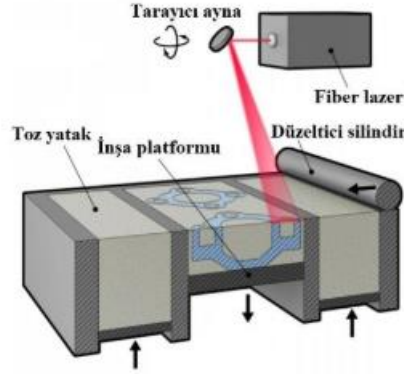
SLS işlemlerinde genellikle atımlı lazerler tercih edilir. CO2 lazerleri, Nd: YAG lazerlerine göre daha düşük katman yoğunlukları sağlar, ancak tarama hızı daha yüksektir (Das et al., 1998).

Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS), literatürde adı geçen bir SLS yöntemidir ve yalnızca metal tozları kullanılarak üretim yapılabilir. Bu yöntem, SLS ile benzer bir işleme prensibine sahiptir; metal tozları lazer ışını ile sinterlenerek ürünlerin oluşturulmasını sağlar (Önder & Saklakoğlu, 2022).

3.2.2. Seçici lazer ergitme

Seçici Lazer Ergitme (Selective laser melting-SLM), metalik tozları ergitmeye dayanan ve bunu gerçekleştirmek için yüksek güçlü bir lazer kullanan en yaygın Eklemeli İmalat yöntemlerinden biridir. SLM, karmaşık nesneleri üretme potansiyeline sahip olup diğer ek üretim sonrası işlemlerini gerektirmez (Riahi & Javidrad, 2020). Yöntem SLS tekniğine benzer, fakat SLS'den farkı tozların ergitilmesidir. Bu işlem, parça tamamlanıncaya kadar katman katman ilerler. Böylece birkaç saat içinde yüksek karmaşıklık ve hassasiyetle üç boyutlu parçalar üretebilir. Bu yöntemle, kobalt-krom, paslanmaz çelik, titanyum, inconel vb. metal tozlarından tamamen işlevsel parçalar üretmek mümkündür (Louvis et al., 2011; Poyraz & Kuşhan, 2018; Yap et al., 2015). SLM, 1980'lerin sonlarında ve 1990'larda ortaya çıkan yeni eklemeli üretim tekniklerinden biridir. SLM işlemi sırasında, metal tozu bir lazer ışınının etkileşimi ile ardışık toz katmanlarının seçici olarak eritilmesiyle bir ürün oluşturulur. Işınlama ile toz malzeme ısıtılır ve yeterli güç uygulanırsa erir ve bir sıvı havuzu oluşur. Daha sonra ergimiş havuz hızla katılıp soğur ve birleşmiş formda malzeme ürünü oluşturmaya başlar. Bir katmanın enine kesiti tarandıktan sonra, yapı platformu katman kalınlığına eşit bir miktarda alçaltılır ve yeni bir toz katmanı biriktirilir. Ürün bitene kadar bu işlem tekrarlanır. Işınlanmayan malzeme yapı silindiri kalır ve sonraki katmanları desteklemek için kullanılır. İşlemden sonra kullanılmayan toz elenir ve tekrar kullanılabilir. SLM işlemi sırasında oluşan termal gerilimler nedeniyle malzemenin kıvrılmasını önlemek için parça katı bir alt tabaka üzerine inşa edilmiştir. Titanyum alaşımlarının yüksek reaktivitesi nedeniyle, işlemin

inert bir argon atmosferi altında yürütülmesi gerekir (Tekdir et al., 2019).Tipik bir SLM yöntemi Şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. SLM prosesi (Özer, 2020)

SLM, havacılık, otomotiv, tıbbi implantlar, uzay endüstrisi gibi birçok endüstride kullanılan kritik parçaların üretiminde tercih edilir. Özellikle karmaşık geometrili parçaların ve özelleştirilmiş parçaların üretiminde avantaj sağlar (Gao et al., 2023).

Avantajlar:

- Karmaşık geometrilerin üretiminde yüksek hassasiyet ve doğruluk sağlar.
- Tasarım özgürlüğü sunar; kalıp gerektirmez.
- Üretim süreçlerinde zaman ve maliyet tasarrufu sağlar.
- Malzeme israfını minimize eder ve atık miktarını azaltır.
- Tek parça üretiminde bile çok çeşitli geometrilerde parçalar üretebilme kapasitesine sahiptir.

SLM teknolojisi, endüstriyel üretimde yüksek kaliteli ve dayanıklı parçalar elde etmek için önemli bir araç olarak kabul edilir ve sürekli olarak geliştirilmektedir (Gao et al., 2023).

SLM yönteminde üretim birçok değişkene bağlıdır. Bu değişkenler temelde iki grupta incelenir. İlk olarak lazer ile ilgili parametreler, ikinci ise geometri ve tarama yolları ile ilgilidir. Lazer ile ilgili parametreler; lazer gücü, lazerin odak çapı, tarama hızı sayılabilir. Geometri ile ilgili olarak ise; tabaka kalınlığı, inşa yönü, tarama mesafesi, tarama stratejileri gibi parametreler bulunmaktadır (Tekdir et al., 2019).

3.2.3. Elektron ışını ergitme

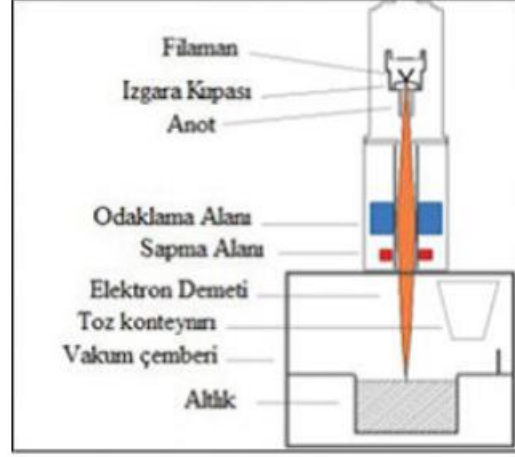
Elektron Işını Ergitme (Electron beam melting-EBM) metal tozlarını bir elektron ışını kullanarak eriterek katman katman bir parça oluşturma yöntemidir. Elektron ışını, yüksek hızda elektronların bir vakum odasında malzeme üzerine odaklanmasıyla oluşturulur (Murr, Quinones, et al., 2009). Tipik bir EBM'nin şematik gösterimi Şekil 3.3'te verilmiştir.

Son dönemlerde, EBM, femoral gövdeler ve omurga arası interbody füzyon kafesleri gibi hastaya özel gözenekli ortopedik implantların üretimi için uygun bir yöntem olarak araştırılmaktadır. Bu teknoloji, yeni nesil özel implantlar için yeni üretim imkanları sunmaktadır. Elektron ışınları, lazerlere kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir, bu da üretim sürelerinin kısalmasına ve dolayısıyla maliyetlerin azalmasına katkıda bulunur. Yüksek enerji seviyeleri, metal tozunu tamamen eriterek üretilen gözenekli parçaların mekanik özelliklerinin daha iyi kontrol edilmesine olanak tanıyabilir (Parthasarathy et al., 2010).

EBM, özellikle titanyum malzemeler üzerinde yoğunlaşarak, tam yoğunluklu ve önceden tanımlanmış dış şekiller ile iç mimarilere sahip gözenekli yapıların hatasız ve karmaşık ürünlerini üretme yeteneğine sahip olduğu rapor edilmiştir (Galarraga et al., 2016; Riedlbauer et al., 2017).

EBM, diğer eklemeli imalat yöntemleriyle karşılaştırıldığında metal parçaların katman katman üretimi için olgun bir teknoloji olarak kabul edilir. Bu teknolojiye, üretim sürecinde hızlı hareket eden yüksek enerjili bir elektron ışını kullanılır. Elektron ışını, toz yatağını tarar ve tozu hızla eriterek tamamen yoğun metalik parçaların üretilmesini sağlar. EBM süreci, metal bileşenlerin hızla prototiplenmesi yeteneği sunar ve geleneksel döküm sürecinden daha ileri düzeyde bir üretim seçeneği sunar.

Bu durum, ürün tasarımını büyük ölçüde hızlandırır ve özellikle karmaşık gözenekli yapıya sahip metal parçaların üretiminde geniş bir uygulama yelpazesi sağlar (Bruno et al., 2017; Yan et al., 2017).



Şekil 3.3. EBM prosesi (Bruno et al., 2017)

4. Ti6Al4V ALAŞIMININ SEÇİCİ LAZER ERGİTME PROSESİ

SLM ile üretilen Ti6Al4V alaşımının farklı işlemlerle süneklilik ve mukavemet özelliklerinin değiştirilebilmesi önemli avantajlar sağlamaktadır. Ancak gerek hasarlı havacılık parçalarının tadilatında gerek geleneksel yöntemlerle üretilmesi güç olan yapıların üretimini kolaylaştıran SLM yönteminin bazı temel problemleri vardır. İlk olarak kullanılan tozun kirli olmaması, toz tabaka kalınlığının lazer şiddeti ile uygun değerde olması gerekmektedir (Kruth et al., 2003).

SLM yönteminde yüksek enerjili lazer ışını hızlı bir şekilde katılaşma sağladığı için üründe termal gerilmelerin oluşmasına ve yapının gözenekli olarak oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca tam ergimenin olmadığı yerlerde tozlar arasında birleşme gerçekleşmediği için mikroyapı içerisinde iç kusurlar meydana gelmekte ve bunlar da mekanik özellikleri etkilemektedir (Kasperovich & Hausmann, 2015a).

SLM yöntemi birçok değişkene bağlıdır. Elde edilen ürünün mikroyapısı, mekanik özellikleri, yüzey özellikleri üretimdeki değişkenlerden etkilenir. Tablada duruş açısı inşa yönü olarak da bilinir. SLM ile üretilen ürünlerde yöne bağlı olarak anizotropik özellikler görülür. İnşa yönü üretimdeki katman sayısını, toz sarfiyatını, tarama süresini, tarama enerjisini ve destek yapılarının sayı ve konumlarını etkilemektedir. Üretim esnasında ergitme yapıldığından yüksek ısıl değişim yapıda kalıntı gerilmeler oluşmasına ve bu nedenle üründe çarpılma, çatlama gibi hasarlara neden olmaktadır (Kasperovich & Hausmann, 2015b).

Enerji yoğunluğu lazer gücü, tarama mesafesi ve tarama hızına bağlıdır. Enerji düşük yoğunlukta olduğunda içi boşluklu, parça yoğunluğu düşük ürünler üretilir. Katman kalınlığı parçaların yoğunluğu, yüzey kalitesi ve geometrik özelliklerini etkilemektedir. Bu kapsamda gelişmiş mekanik ve yüzey özelliklerine sahip ürünler elde etmek için ilgili parametreler en uygun şekilde belirlenip üretimler yapılmalıdır (Tekdir et al., 2019).

4.1. Yoğunluk Davranışı

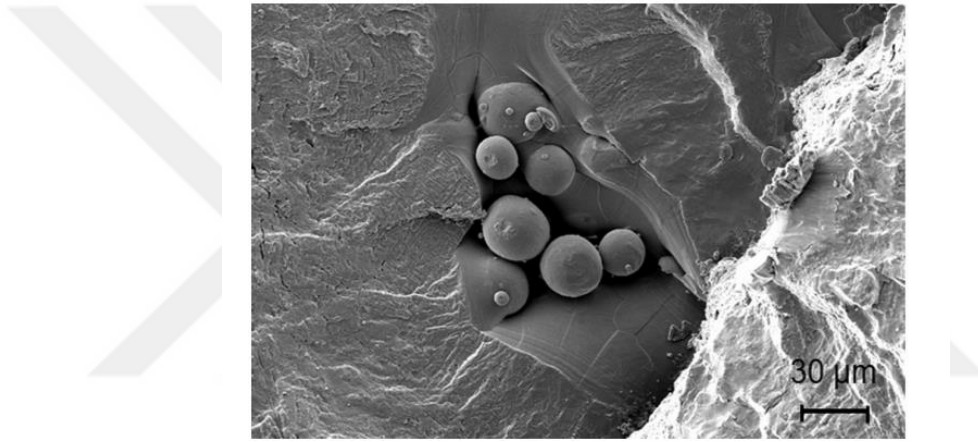
Her ne kadar SLM yüksek bağıl yoğunluğa sahip malzemeler üretme konusunda oldukça yetenekli olsa gözeneksiz malzemelerin basılması hala bir zorluktur. SLM işlemi sırasında gözeneklerin oluşumu büyük oranda eriyiğin akışına, erime havuzuna ve katılma hızına bağlı görünmektedir. Dolayısıyla eritme havuzunun boyutunu, derinliğini ve sıcaklığını etkileyen işleme parametreleri gözenekliliğin kontrol edilmesinde temel unsurlardır (du Plessis et al., 2018; Qiu et al., 2015).

SLM'nin tam eritme mekanizması, uygun olmayan proses parametreleriyle birlikte mikroyapısal kusurlara ve gözenekliliğe neden olabilen eriyik havuzu kararsızlığına eğilimlidir. Ti6Al4V alaşımının SLM ile üretilmesinde, topaklanma ve istenmeyen gözeneklilik gibi iki temel kusur türü önemlidir. Topaklanma, SLM sürecinde sıkça karşılaşılan bir sorundur ve bir sonraki katmanın düzgün birikimini engelleyerek kötü katman birikimine, çatlaklara ve hatta işlem başarısızlığına yol açabilir. Bu durum, eriyik malzemenin, eriyik havuzu boyunca termal özelliklerdeki değişimlerden kaynaklanan yüksek yüzey gerilimi farklılıkları sebebiyle alt tabakayı yeterince ısıtamamasından kaynaklanmaktadır (Gu et al., 2012; Leuders et al., 2013; Murr, Esquivel, et al., 2009; Murr, Quinones, et al., 2009).

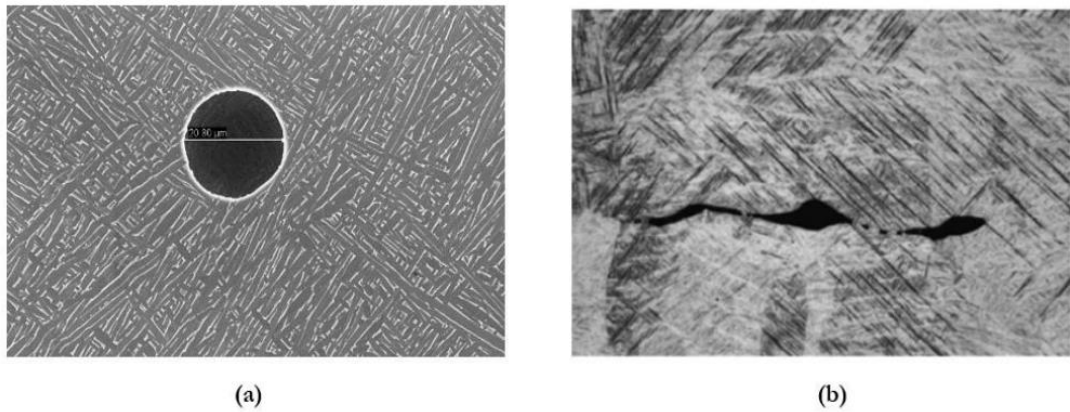
Önal ve ark., (2019) tek nokta maruz bırakma (nokta erimeye benzer) SLM işleminde kullanılan işlem parametrelerinin Ti6Al4V kafes yapılarının yoğunluğu, mikroyapısı ve sertliği üzerindeki etkilerini araştırdılar. Nokta eritme tarama stratejisindeki anahtar delik şeklindeki gözeneklerin, geleneksel ızgara tarama stratejilerinde gözlemlenenlerden önemli ölçüde (4 kata kadar) daha küçük olduğu sonucuna vardılar. Noktasal eritme taraması, daha uzun süren ve daha büyük bir erime havuzu oluşturur; bu da gaz gözeneklerinin kaçması için gerekli zamanı sağlar (Nandwana & Lee, 2020).

Literatüre göre, tarama aralığının azaltılması daha yüksek enerji yoğunluğuyla sonuçlanmaktadır. Tarama aralığının uygun şekilde azaltılması veya enerji yoğunluğundaki nispi artış, numunenin nispi yoğunluğunun artmasına yardımcı olacaktır. Daha yüksek enerji yoğunluğu iz örtüşmesini artırır ve füzyonu iyileştirir (Jia et al., 2021).

SLM'nin amacına ulaşmak, yani homojen, tam malzeme yoğunluğuna sahip yüksek kaliteli parçalar elde etmek, örneğin dövme/kalıplama işlemlerinde olduğu gibi mekanik basınç içermediğinden, gerçekleştirilmesi çok zordur. Metal tozunun işlenirken birleşmesi sadece sıcaklık etkileri, yerçekimi ve kapiler kuvvetler ile gerçekleştirilir. Optimum olmayan tarama parametreleri, işlem sırasında eriyik havuzunda kararsızlıklara neden olabilir ve bu da ergimemiş parçacıklar, küresel olarak sıkışmış gaz kabarcıkları, anahtar deliği kusurları ve füzyon eksikliği gibi iç kusurların oluşmasına neden olabilir (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2). Gaz gözenekliliği ve anahtar deliği kusurları, esas olarak yüksek girdi enerjisi nedeniyle oluşur (Barua et al., 2014).



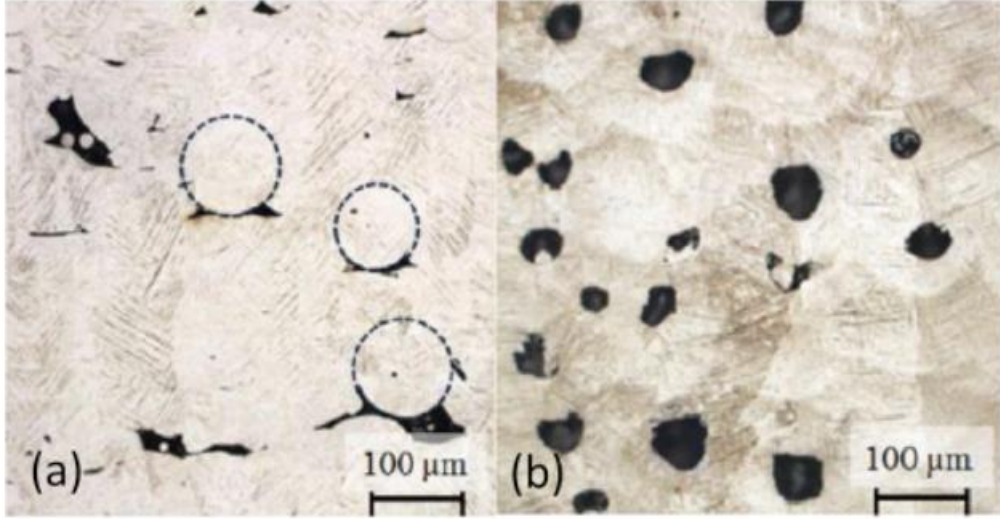
Şekil 4.1. Çatlaklar için çekirdeklenme unsuru olan partiküller: erimemiş Ti6Al4V partiküllerinin bir kolonisini gösteren kırık yüzey (Kasperovich & Hausmann,2015a)



Şekil 4.2. Gaz porozitesinin SEM görüntüsü, (b) Füzyon eksikliğinin LOM görüntüsü (Kasperovich & Hausmann, 2015a)

Bunun yanında ergiyik akışı, ergime havuzu ve katılaşma hızına da büyük ölçüde bağlılık göstermektedir (du Plessis et al., 2018; Qiu et al., 2015). Dolayısıyla ergime havuzunun boyutu, derinliği ve sıcaklığını etkileyen proses parametreleri gözenekliliği kontrol etmede kilit unsurlardır. Gaz gözenekliliğinin toz malzeme içinde hapsedilmiş oksijen gibi diğer kaynaklardan üretilebileceği belirtilmektedir ki bu durum SLM proses parametrelerinin optimize edilmesiyle giderilmesi mümkün değildir (Bauereiß et al., 2014). Füzyon eksikliği, yüksek tarama hızı veya tarama aralığı veya düşük lazer gücü nedeniyle giriş enerjisi düşük olduğunda oluşur (Taheri et al., 2017). Potansiyel olarak füzyon eksikliğine neden olabilecek bir diğer faktör, eriyik havuzundan uzaktaki ısı dağılımını kontrol eden substrat boyutu ve bileşimidir eğer ısı dağılımı çok yüksekse, füzyon eksikliği oluşumu eğilimi daha fazladır (Taheri et al., 2017). Füzyon eksikliği ve gaz gözenekliliğinin bir parçada aynı anda bulunabileceği de belirtilmektedir (Mandache, 2019; Murr et al., 2010). Mikro çatlaklar genellikle yüksek sıcaklık gradyanı sırasında oluşur (Javidrad & Salemi, 2020). Bu anomalilerin mekanik ve yüzey özelliklerini olumsuz etkilediği belirtilmektedir (Moussaoui et al., 2018).

Diğer bir yaygın kusur, SLM ile üretilmiş bileşenlerin hacminde küresel ve/veya keskin çatlak benzeri gözeneklerin varlığıdır (Shiple et al., 2018). Keskin çatlak benzeri gözenekler, yetersiz enerji girişi veya topaklanmaya atfedilirken, küresel gözenekler genellikle gaz sıkışması, eriyik havuzu etrafındaki denüstasyon veya anahtar deliği etkisinin bir sonucu olarak rapor edilir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. (a) Keskin çatlak benzeri gözenekler ve (b) Ti6Al4V'ün SLM işleminden sonra yaygın olarak gözlemlenen küresel gözenekler (Shipley et al., 2018)

SLM yöntemi birçok değişkene bağlıdır. En çok etkileyen parametreleri ilişkilendirmek için, çalışmalardan da anlaşılabacağı gibi, enerji yoğunluğu fonksiyonu oluşturulmuştur. Bu hacimsel enerji yoğunluğu (E) fonksiyonu eşitlik (1) ile temsil edildiği gibi lazer gücü (P), tarama hızı (v), tarama aralığı (h) ve katman kalınlığı (t) ile ilgilidir. Kusursuz üretim ihtiyacına göre, aşağıda belirtilen fonksiyon değerlerinin ayarlanması gereklidir (Thöne et al., 2012.).

$$E \left(\frac{J}{mm^3} \right) = \frac{P(W)}{v \left(\frac{mm}{s} \right) \cdot h(\mu m) \cdot t(\mu m)} \quad (1)$$

Gözeneklilik oluşumunu en aza indirmek için lazer gücü, tarama hızı, tarama alanı vb. işlem parametrelerinin parçanın geometrisine, mekanik özelliklerine ve malzemenin kimyasal bileşimine göre optimize edilmesi gerekir. Ayrıca proses parametrelerinin birbiriyle orantılı seçilmesi gerekmektedir (Khorasani et al., 2019).

Çok küçük tarama alanı, lazer enerjisinin aşırı yoğunlaşmasına neden olabilir; bu durum gözenek oluşumunu tetikleyip numunelerin yoğunluğunu etkileyen aşırı

ısınma ile ilişkilendirilebilir (Kasperovich et al., 2016; Thijs et al., 2010). Yüksek enerji yoğunluğu, birkaç anahtar delik gözenek oluşturabilir ve lazerle taranan izleri düzensiz hale getirebilir (Wei et al., 2020). Bu sebeple, enerji yoğunluğunun uygun aralıklarda kontrol edilmesi ve aşırı enerji girişinden kaçınılması, parçaların performansı açısından son derece önemlidir.

Katman kalınlığına ilişkin olarak, pek çok ticari makine, sabit bir toz katmanı kalınlığını korur, dolayısıyla proses optimizasyonu açısından nispeten keşfedilmemiş kalır. Qiu ve ark. (2013). 30 ila 90 μm arasındaki katman kalınlıkları için %99,5'ten daha yüksek yoğunluğa sahip numuneler üretmeyi başarmıştır. Qiu ve ark. (2015). genel gözenekliliğin ve gözenek boyutunun artan katman kalınlığıyla birlikte sürekli olarak arttığı sonucuna varmıştır. 20 ila 40 μm arasındaki katman kalınlıkları için gözeneklilik üzerinde çok az etki varken 60 μm 'de üst yüzey açık gözenekler sergilediğini ve böylece 60 μm 'den daha büyük katman kalınlıkları için gözenekliliğin önemli ölçüde arttığını bulmuşlardır.

Eriyik havuzunun stabilitesi, boyutları ve davranışının gözenekliliğin boyutunu belirlediği kabul edilmektedir. Dolayısıyla, eriyik havuzu üzerinde en büyük etkiye sahip olan lazer gücü ve tarama hızının gözeneklilik üzerinde de maksimum etkiye sahip olacağı sonucuna varılabilir (Kasperovich et al., 2016; Thijs et al., 2010a).

Thijs ve ark., (2010b) SLM ile üretilen Ti6Al4V alaşımının her tabaka taranmasından sonra lazer ışınının 90° döndürülmesiyle elde edilen numuneleri zigzag düzeninde üretmişlerdir. Üretim parametreleri ise; lazer gücü 42 W, tarama hızı 200 mm/s, katman kalınlığı 30 μm dir. Zigzag deseni, SLM üretiminde yüksek yoğunluk sağlamak için kullanılan yaygın bir tarama parametresidir. Üretim sonucu %99,6 bağlı yoğunluğa sahip numuneler elde etmişlerdir (Thijs et al., 2010b).

Han ve ark. (2017) 400 ile 1100 mm/s arasındaki tarama hızlarında %99'un üzerinde yoğunluğa sahip bileşenler elde etmiştir. Gong ve ark. (2013.) 600 ile 1600 mm/s arasındaki hızlar için %1'den az gözeneklilik rapor ederken (Zhao et al., 2016) ,2600 mm/s'ye kadar tarama hızları için %99,9 yoğunluk elde etmişlerdir. Ancak bu parametreleri bağımsız olarak ele almak yanlıştır. Tamamen yoğun parçaların

üretilebildiği pencere, her birinin ayrı ayrı sonucundan ziyade, tarama hızı ile lazer gücü arasındaki ilişkinin bir fonksiyonudur.

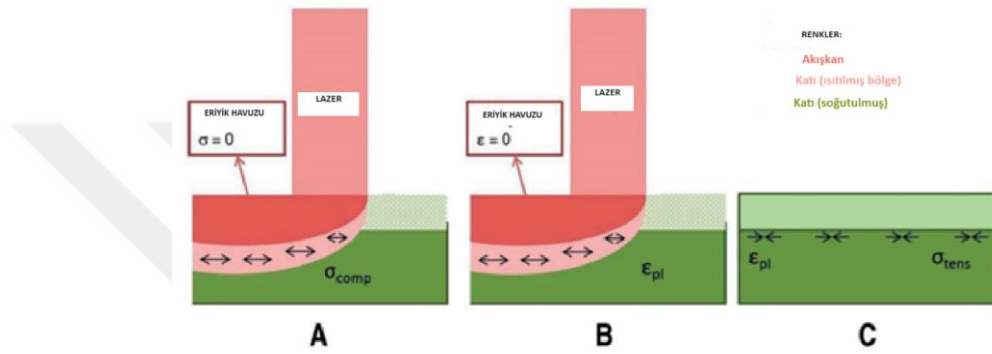
Bobby Gillham ve ark. (2010b) Ti6Al4V malzemesini lazer gücü 95 W, tarama hızı 300 mm/s, katman kalınlığı 25 μm , tarama aralığı 80 μm olacak şekilde üretmişlerdir. Bunun sonucu olarak %99,4 yoğunluk elde etmişlerdir (Gillham et al., 2021).

Alireza Dareh Baghi ve ark. (2021) Ti6Al4V SLM ile alaşımını parametre seti lazer gücü 270 W, tarama hızı 1800 mm/s, katman kalınlığı 30 μm , tarama aralığı 85 μm olacak şekilde üretmişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda araştırmacılar çalışmadaki SLM ile üretilmiş numunelerin yaklaşık %99,85 civarında neredeyse tamamen yoğun olduğunu göstermişlerdir (Dareh Baghi et al., 2021).

Dilip ve ark. (2017) gerçekleştirdikleri çalışmada SLM üretim parametrelerinden tarama aralığını sabit tutup 4 farklı lazer gücü ve 4 farklı tarama hızı kombinasyonu kullanarak ürettikleri Ti6Al4V tek çizgi ve bulk numunelerde farklı üretim parametrelerinin ergiyik havuzu ve gözeneklilik üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Düşük enerji yoğunluğu uygulandığında bulk numunelerde, ergimemiş toz parçacıklarının düzensiz şekilli gözenek ürettiği, yüksek enerji yoğunluğunun anahtar deliği etkilerinden kaynaklanan yuvarlak gözenekliliğe yol açtığı, uygun güç ve hız kombinasyonu ile üretilen numunelerin ise tamamen yoğun olduğu görülmüştür. Bulk numunelerde tam yoğunluk değerleri 150 W- 750 mm/s (66 J/mm³), 195 W- 1000 mm/s (65 J/mm³), 195 W- 1200 mm/s (54 J/mm³) kombinasyonlarında elde edilmiştir. Tam yoğunluğun elde edildiği enerji yoğunluğu aralığı 50- 66 J/mm³ olarak tespit edilmiştir. Bulk numunelerde 50 W uygulanan numunelerin tamamında düşük enerji yoğunluğuna bağlı olarak ergimemiş toz ve buna bağlı gözenek görülmüştür. 66 J/mm³ enerji yoğunluğu değerlerinden yüksek enerji yoğunluğuna bağlı olarak anahtar deliği etkisine dayalı gözeneklilik görülmüştür.

SLM'de ergimeyen parçacıklar, küresel olarak sıkışmış gaz kabarcıkları, anahtar deliği kusurları füzyon eksikliği gibi iç kusurların oluşmasının yanısıra hala birkaç doğal sınırlaması vardır, bunlardan biri zararlı çekme artık gerilmelerinin (TRS) birikmesidir. Eriyik havuzu soğuyup katılaştıkça termal büzülme nedeniyle büzülür. Bu hareket yine alttaki katı yapılar tarafından sınırlandırıldığından, TRS üst

katmanlarda ve CRS (basma tipi kalıntı gerilme) aşağıdaki katmanlarda oluşur, böylece bir denge durumuna ulaşır (Şekil 4.4). Böylece, bir katmandan diğerine, üretilen bileşenin içinde büyük TRS birikir, bu da yorulma ömrünün azalmasına veya son parçanın (J.-P. Kruth et al., 2012; Kunze et al., 2015; Mercelis & Kruth, 2006; A. S. Wu et al., 2014) bozulmasına /çarpılmasına neden olur. Yüksek gerilimler, imalat aşamasında proses hatasına (çatlamaya) bile yol açabilir (Kempen et al., 2014).



Şekil 4.4. Katılma tabakasının termal büzülmeden dolayı çekme kalıntı gerilme oluşumu (Kempen et al., 2014)

Bilindiği üzere gözeneklilik genel bir sorundur ve henüz hiç kimse %100 bağlı yoğunluğa sahip numuneler hazırlamamıştır. Her ne kadar Thijs ve ark (2010a) %99,9 yoğunluğa ulaşmış olsa da bazı gözenekler hala mevcuttu. Böyle bir başarı, çapraz taramalı tarama stratejisinin zigzag tarama vektörleri ile uygulanmasıyla elde edilmiştir. Özetle, SLM ile üretilen Ti6Al4V alaşımının yoğunluğu, kusur oluşumu ve lokalizasyonu, mikroyapısı ile mekanik özellikleri çeşitli proses parametrelerinden etkilenmektedir.

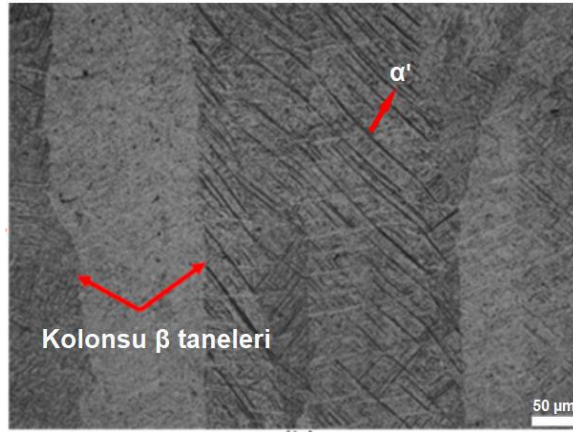
4.2. SLM ile Üretilmiş Ti6Al4V Mikroyapısı

Mikroyapılar metal ürünlerin mekanik özelliklerini doğrudan belirler. Çekme mukavemeti, süneklik ve yorulma ömrü gibi özelliklerin tümü, alaşımların termal geçmişi tarafından belirlenen mikroyapılar tarafından belirlenir (Liu & Shin, 2019). Ti6Al4V, ağırlıkça %6 α stabilize edici Al ve ağırlıkça %4 β stabilize edici V içeren

orta mukavemetli martenzitik $\alpha + \beta$ titanyum alaşımdır (L. C. Zhang et al., 2018). Bu fazların şekli ve boyutu, ısıtma işlemlerine ve termo-mekanik işlemlerine bağlıdır. Bununla birlikte, Ti6Al4V alaışımının mikroyapı evrimi çok karmaşıktır ve eklemeli imalat işlemlerinde kullanılan soğutma ve yeniden ısıtma hızları gibi ilgili parametrelerden etkilenebilir, ancak döküm alaşımlarına benzemesi gerekmez (Banerjee & Williams, 2013).

Ti6Al4V alaışımında, α plakalarının birincil β tanelere çekirdeklenme hızı, artan soğutma hızı ile artar. Bu α plakalarının genişliği ve uzunluğu esas olarak soğutma işlemi tarafından belirlenir. Ayrıca, tüm β bölgesinden su verme işlemi yapıldıktan sonra, Ti6Al4V alaışımı M_s sıcaklığından geçtiğinde, β 'dan α 'ya dönüşüm fazı olarak bilinen HSP martenzit gözlenir. Titanyumda martenzit, α' (asiküler martenzit) ve α'' (ortorombik martenzit) olmak üzere iki formda bulunur. α'/α'' fazının miktarı, alaışimdaki β stabilizatör elemanlarının kimyasal bileşimine bağlı olarak değişir. %100 β faz alanından su verme sonrasında, özellikle ağırlıkça %10 vanadyum içeren veya hidrojen eklenen durumlarda daha fazla sünek α'' martenzit oluşturulabilir (Zerina et al., 2020).

Ti6Al4V alaışimleri, eklemeli imalat prosesi sırasında tam bir erime ve katılaşma sürecinden geçer; bunlar, çok yüksek sıcaklığın sıvıya dönüşmesi nedeniyle $\alpha + \beta$ 'dan (yani, alaşımların ortam sıcaklığındaki başlangıç fazı) β 'ya dönüşür. Daha sonra β 'ya geri döner ve son olarak erimiş havuzun sıcaklığı transus β sıcaklığının altına düştüğünde $\alpha + \beta/\alpha'$ 'ya döner. Bu nedenle, α' martenzit oluşumu için 780 °C'deki martenzit başlangıç sıcaklığından daha düşük, yapım sıcaklığı ile yeterli bir soğutma hızı gerekli olacaktır (Liu & Shin, 2019). Isıtma aşamasında, α fazı β dönüşüm sıcaklığını aşarak β fazına dönüşürken, soğuma aşamasında ise 410 °C/s'den daha hızlı soğuma hızlarıyla neredeyse tamamen yarı kararlı SPH α' fazına dönüşür (Ahmed & Rack, 1998; Simonelli et al., 2014b). SLM prosesinin oluşturduğu bu karakteristik mikroyapı yapı, Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. SLM ile üretilmiş Ti6Al4V mikroyapısı (Önder & Saklakoğlu, 2022)

De Formanoir ve ark. (2019) martensitik α' fazının oluşumunun Ti6Al4V alaşımasının mukavemetini arttırdığını ancak plastisitesini azalttığını belirtmiştir. Karşılaştırmalı olarak, α fazının varlığı da mukavemet açısından faydalıdır ancak Ti6Al4V alaşımasının plastikliği üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, daha yüksek bir α/α' faz oranının (veya daha küçük bir α' fazı içeriğinin), Ti6Al4V alaşımı için daha iyi bir çekme plastisitesine neden olacağı sonucuna varılabilir (Zeng & Bieler, 2005). α/α' faz oranı dışında, α' fazından başka bir martenzit görevi gören α'' fazı, titanyum alaşımlarının plastisitesine büyük zararlar verebilir (Zeng & Bieler, 2005).

Do ve Li (2016) enerji yoğunluğundaki artışın soğuma hızını azaltacağını ve martenzitik yapı içinde çita boyutunun artmasına yol açacağını belirtmiştir. Han ve ark. (2017) enerji yoğunluğunun artmasıyla bireysel α' genişliğinin ve aralarındaki mesafenin azalacağını, sütunlu tanenin genişliğinin ise artacağını belirlemiştir.

4.3. SLM ile Üretilmiş Ti6Al4V Alaşımının Mekanik Özellikleri

SLM ile üretilen titanyum matrisli kompozitlere gelince, araştırmalar şu anda SLM parametrelerinin ve takviye içeriğinin kompozitlerin mikroyapı gelişimi ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisine odaklanmaktadır. Optimize edilmiş SLM parametrelerinin, kompozit numunelerin neredeyse tam yoğunluğunu sağlayabileceği ve dolayısıyla mükemmel bir mekanik performans elde edebileceği gösterilmiştir (Li et al., 2021).

SLM ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımı için mukavemet ve süneklik gibi mekanik özelliklerin geliştirmek için araştırmacıların bir kısmı (Facchini et al., 2010; Y. D. Jia et al., 2017; Xu, Brandt, et al., 2015) son işlem prosedürüne odaklanırken bazıları (Gong et al., 2015; Thijs et al., 2010a; Vandenbroucke & Kruth, 2007; Xu, Sun, et al., 2015) lazer gücü (P), katman kalınlığı (μm), lazer tarama hızı (v), tarama aralığı (h) ve odak ofset mesafesi gibi temel SLM parametrelerini optimize ederek alaşım performansını iyileştirmeyi amaçlamıştır.

Mikroyapıyı düzenlemek ve dolayısıyla malzemelerin mekanik performansını artırmak için temel SLM işleme değişkenlerinin uygun bir kombinasyonunu tasarlamak gerekmektedir (Z. Xie et al., 2020). Sert martenzit nedeniyle fabrikasyon SLM ürünleri yüksek çekme dayanımı gösterir ancak oldukça zayıf süneklik gösterir (Qiu et al., 2013).

Ti6Al4V alaşımını sırasıyla SLM-1 ve SLM-2 olarak kodladıkları farklı yapı yönelimlerine sahip şekilde üretmişlerdir. SLM-1 örneği kalınlık yönü (L1) boyunca oluşturulurken SLM-2 örneği kalınlık yönü (L2) boyunca oluşturulmuştur ($L2 > L1$). Çekme mukavemeti SLM-1 ve SLM-2 alaşımları için sırasıyla 1236 MPa ve 1065 MPa olarak elde etmişlerdir. Çekme kırılmasından sonra her numunenin uzunluk değişimi ölçülerek uzama değerleri SLM-1 ve SLM-2 alaşımları için sırasıyla %8,5 ve %13,6'dır. SLM-2 alaşımının uzaması SLM-1 alaşımına göre %5,1 daha yüksektir ancak çekme mukavemeti 171 MPa daha düşüktür (de Formanoir et al., 2019). Martenzitik α' fazının oluşumunun Ti6Al4V alaşımının mukavemetini arttırdığını ancak plastisitesini azalttığını belirtmiştir. Karşılaştırmalı olarak, α fazının varlığı da mukavemet açısından faydalıdır ancak Ti6Al4V alaşımının plastikliği üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahiptir (Zeng & Bieler, 2005). Bu nedenle, daha yüksek bir α/α'

faz oranının (veya daha küçük bir α' fazı içeriğinin), Ti6Al4V alaşımı için daha iyi bir çekme plastisitesine neden olacağı sonucuna varılabilir.

Sun ve ark. (2020) SLM prosesinde tarama yönünün çekme ve yorulma performansları üzerine etkisini raporlamışlardır. SLM tekniği ile üretilen Ti6Al4V' nin çekme ve yorulma performansına inşa yönünün etkilerini incelemek amacıyla, bu çalışmada üç farklı inşa yönü ile (0° numune, 45° numune, 90° numune) üretilmiştir. SLM için lazer gücü 350 W, lazer ışını çapı 80 μ m, tarama hızı 1000 mm/s ve katman kalınlığı 60 μ m olan parametre setini kullanmışlardır. 45°'lik numunenin çekme mukavemetleri 963,5 MPa ve sırasıyla 0° ve 90° numunelerinkinden 27,93 MPa ve 10,53 MPa daha yüksek olduğu bulunsa da % cinsinden değerlendirildiğinde önemli bir fark olmadığı görülür. İnşa yönünün yorulma dayanımı üzerinde belirgin bir etkisi olduğu görülmüştür. 10⁷ çevrimde 0° ve 90° numunenin yorulma mukavemeti sırasıyla 300 MPa ve 350 MPa'dır. Yüksek yükler altında yorulma kırılması, bir kesme kırılması göstermiştir. 45° numunenin yorulma çatlak büyüme hızı, sırasıyla 0° ve 90° numunelerinkinden yaklaşık 1,37 ve 1,19 kat daha fazladır. 0° numunelerin kırılma yüzeylerindeki kusurlar hem çekme hem de yorulma testlerinde belirgindir. Boşluklar, gözeneklilik ve ergimemiş tozlar, düşük süneklik ve zayıf yorulma performansının ana nedenleri olduğu söylenebilir. 45 ° numunenin çekme ve yorulma özellikleri, bu çalışmadaki üç imalat açısının en iyisi olarak bulunmuştur.

Tablo 4.1 SLM ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımının mekanik özelliklerini özetlemektedir. Çekme sünekliği, daha yüksek mukavemetlerine rağmen SLM ile üretilmiş Ti6Al4V'nin bir eksikliği olarak öne çıkmaktadır.

Tablo 4.1. Literatürde yer alan bazı SLM ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri

Üretim	Mikroyapı	Akma Gerilmesi $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Çekme Gerilmesi σ_{UTS} (MPa)	Yüzde Uzama	Referans
SLM	α' martenzit	1125	1250	6	(Vandenbroucke & Kruth, 2007)
SLM	α' martenzit	990	1095	8,1	(Facchini et al., 2010)
SLM	α' martenzit	1110	1267	7,28	(Vrancken et al., 2012)
SLM	α' martenzit	1137	1206	7,6	(Vilaro et al., 2011) .
SLM	α' martenzit	1029	1197	8,3	(Xu, Brandt, et al., 2015)
SLM	α' martenzit	1333	1407	4,54	. (Murr, Quinones, et al., 2009)

Xio ve ark. (2016) dikey ve yatay yönde olacak şekilde SLM ile Ti6Al4V alaşımını üretmişlerdir ve farklı yönde üretimin mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Dikey yöndeki SLM Ti6Al4V numuneleri, yatay yöndekilere göre daha yüksek nihai çekme mukavemetine, akma mukavemetine ve daha iyi sünekliğe sahiptir. Fark esas olarak önceki β taneciklerinin yönelimine göre çekme eksenel yönündeki bir değişikliğe atfedilir.

Ali ve ark. (2018) yaptığı çalışmada bu durumla uyumlu olarak soğuma hızının düşüşüne bağlı %uzama verisinde artış kaydedilmiş olup malzemenin çekme dayanımı ve sertlik verilerinde ise kayda değer bir değişiklik görmemişlerdir.

4.4. SLM ile Üretilmiş Ti6Al4V Alaşımına Uygulanabilecek İlave İşlemler

Tüm eklemeli imalat işlemlerinin, gözeneklilik riski, yüzey pürüzlülüğünün varlığı, oksijene yüksek afinite ve yüksek çekme kalıntı gerilmeleri dahil olmak üzere kendine özgü sınırlamaları vardır (Liu & Shin, 2019). Artık gerilimlerin parçada çatlak oluşumuna ve eğrilmeye katkıda bulunduğu, yapıların alt tabakadan ayrılmasına ve bitmiş parçalarda çatlaklara yol açtığı iyi bilinmektedir (Mercelis & Kruth, 2006). Seçici lazerle eritilmiş titanyum alaşımları için iyi bir mukavemet ve süneklik kombinasyonu elde etmek amacıyla, sonraki ısıl işlem, önceki birçok çalışmada etkili strateji olarak kabul edilmiştir.

Titanyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler, amaçları bakımından üç grupta incelenebilir:

1. **Kalıntı gerilmeleri gidermek (Gerilme giderme):** Bu işlem, malzemede oluşabilecek çekme kalıntı gerilmeleri gidererek parçanın mekanik özelliklerini iyileştirmeyi amaçlar.
2. **Tavlama:** Talaş kaldırmaya uygunluğu artırmak, süneklik gibi parametreleri optimize etmek için yapılan bir işlemdir. Bu işlem genellikle işlenebilirliği artırmak amacıyla gerçekleştirilir.
3. **Çözeltiye alma ve yaşlandırma:** Bu işlem, malzemenin mukavemetini artırmak için kullanılır. Önce alaşım ısıl olarak çözündürülür (çözeltiye alınır) ve ardından yaşlandırma işlemiyle mukavemet artışı sağlanır.

Tavlama işlemi, çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemi ise malzemenin mekanik özelliklerini değiştirmek için yapılırken, tavlama ve gerilme giderme işlemleri ise korozyon ortamlara direnci artırmak, çarpılmaları önlemek gibi amaçlarla da uygulanabilir (Ezugwu & Wang, 1997).

Khorsani ve ark. (2019) 2019 yılında yaptıkları çalışmada lazer gücü, tarama hızı, tarama alanı ve tarama deseni açısını içeren SLM proses parametrelerinin gözenek oluşumu ve ardından yoğunluk üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Yazarlar, mekanik özellikleri iyileştirmek için son işlem olan ısıl işlemin yapılmasını

önermektedir. Bu yapılan çalışmanın sonucunda yoğunluk üzerinde ısıtılmanın etkili bir parametre olduğu bulunmuştur.

Khorasani ve ark. (2017), farklı tavlama sıcaklıklarının, SLM ile üretilmiş Ti6Al4V'un mikroyapı gelişimi ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır ve 925 °C'de yeniden kristalizasyon tavlama sürecinin, çekme mukavemeti, sertlik ve çekme uzamasının en iyi kombinasyonunu elde edebileceğini bulmuştur.

Vrancken ve ark. (2012) SLM ile üretilmiş Ti6Al4V' un benzersiz başlangıç mikroyapısı nedeniyle standart ısıtılma işlemlerin, termomekanik olarak işlenmiş numunelerinki kadar beklenen sonuçları garanti edemediğini bulmuştur. Fırın soğutmalı 850 °C/2 saat ısıtılma işlemin genel mekanik performans açısından optimal olduğu da kanıtlanmıştır. Zhang ve ark. (2018) ısıtılma işlem sıcaklığının mekanik performansta soğutma hızından daha önemli bir rol oynadığını göstermiş ve SLM ile imal edilen Ti6Al4V alaşımı için yüksek sıcaklıkta subtransus işlemleri önerilmiştir.

Li ve ark. (2021) SLM ile üretilmiş Ti6Al4V numunelerine 650-750-850 ve 950 °C lerde ısıtılma işlem yapmışlardır. 950°C ısıtılma işlem sonrası Ti6Al4V α -Ti çıta genişliği 0,27 μ m'den 4,46 μ m'ye yükseldi.

Murr ve ark. (2009) EBM ve SLM ile üretilen numunelerin mekanik özelliklerini işlenmiş Ti6Al4V alaşımlarınıninkiyle karşılaştırmıştır. Deneyleri, SLM'de ortaya çıkan martensitik mikroyapı nedeniyle SLM ile üretilen parçaların EBM parçalarına göre daha az sünek olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, mikroyapıyı uyarlamak için bir ısıtılma işlemi gerekli görerek SLM parçalarını 843 ° C'de 2 saat boyunca işleminden geçirmişlerdir ve ardından fırında soğutmuşlardır. EBM ile işlenmiş parçalar %12 uzamaya sahipken, bu değer dövme Ti6Al4V'de %16'dır.

Thöne ve ark. (2012) farklı sıcaklıklarda yapılan ısıtılma işlemlerden sonra mekanik özellikte oluşan değişimi göstermek için SLM ile üretilen Ti6Al4V alaşım numunelere ısıtılma işlem gerçekleştirdiler. Her bir ısıtılma işleminden sonra tüm numuneler fırında soğutulmuştur.

Tablo 4.2’de gösterilen yarı-statik çekme testi sonuçları, artan ısıtım işlem sıcaklığı ile verim gücünün azaldığını raporlamışlardır. Isıtım işlem uygulanan numunenin akma dayanımı %12,5 azalmış olsa da, 1050°C’de 2 saat ısıtım işlem uygulandığında, bu numunenin uzaması yaklaşık %625 arttığını gözlemlemişlerdir (Thöne et al., 2012).

Tablo 4.2. Ti6Al4V numunelerinin artan ısıtım işlem sıcaklıkları ile mekanik değişimleri (Thöne et al., 2012)

	Isıtım işlemsiz Numune	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	5. Numune
Sıcaklık (°C)	-	750	800	950	950	1050
Zaman (h)	-	2	2	2	2	2
Akma Dayanımı (MPa)	1080	1065	1040	1009	972	945
Uzama %	1.6	3.7	5.1	5.2	10.1	11.6

Titanyum ve alaşımları, kendinden daha yumuşak malzemelere karşı iyi bir kayma özelliği gösterirler ancak genellikle düşük aşınma direnci ve tribolojik özellikler sergilerler. Bu durumun ana nedenlerinden biri, bu alaşımların düşük termal iletkenliğidir. Titanyum ve alaşımları düşük termal iletkenliğe sahip oldukları için, yüzeylerinde oluşan ısının dağılması yavaş olabilir. Bu durum aşınma direncini olumsuz etkileyebilir; çünkü yüksek sürtünme ve temas halinde yüzey ısınması artabilir. Ayrıca, düşük termal iletkenlik tribolojik performanslarını da olumsuz

etkileyebilir, çünkü yüzeydeki sıcaklık dağılımı kontrol altında tutulamaz ve aşınma hızı artabilir. Bu nedenle, titanyum ve alaşımlarının tribolojik performanslarını iyileştirmek için özel kaplama teknikleri veya bilyalı dövme yüzey işlemleri uygulanabilir. Bu teknikler, yüzey sertliğini artırarak aşınma direncini artırabilir veya tribolojik özellikleri geliştirebilir (Wiecinski et al., 2007).

Geleneksel LSP iyi bilinen bir yüzey işlemidir. Uygulandığı malzemenin yüzey altı bölgesinde plastik deformasyon ve CRS oluşturur. LSP ile oluşturulan bu CRS, malzemede birkaç milimetreye kadar ulaşabilir. Parçaya uygulanan dış çekme gerilmelerine karşı koyabilir ve çatlak yayılma oranını azaltabilir, böylece yorulma ömrünü uzatabilir. Zhang ve ark. (2012) Ti6Al4V malzeme üzerinde aynı noktaya çift dövmenin sertlikte %24 artışla sonuçlandığını göstermiştir. Metal bir yüzeye LSP gibi bir yüzey işlemi uygulandığında, malzeme plastik deformasyona uğrar. Malzemedeki bu plastik deformasyon, malzemede artık basma gerilmelerine neden olur. Bu basma artık gerilmeleri, çatlak yayılma oranını azaltarak yorulma ömrünü arttırır. Bu, metal bir parçanın ömrünü uzatır.

Noar Elad Uzan ve ark. (2018a) SLM ile üretilmiş AlSi10Mg numunelerinin BD' nin yorulma direnci üzerindeki etkisi araştırmışlardır. SLM ile üretilen AlSi10Mg numunelerinin bilyalı dövme öncesi ve sonrasındaki kırılma alanı, nispeten derin çukurlara sahip sünek bir kırılma sergilerken, pres döküm numunelerin son kırılma alanı, çok sayıda bölünme fasetleri ve mikro çatlaklar içeren bir gevrek kırılma yüzeyi sergilediğini raporlamışlardır.

5. OPTİMİZASYON

Taguchi yöntemi genellikle, kontrol faktörlerinin en iyi veya doğru parametrik kombinasyonunu belirleyerek üretilen ürünlerin kalitesini artırmak için modifiye edilmiş veya standart deney tasarımının kullanıldığı sağlam ve güçlü bir istatistiksel tasarım aracı olarak adlandırılır (Camposeco-Negrete, 2013; Montgomery, 2017). Taguchi yönteminden elde edilen sonuçlar optimal olmayabilir, ancak bu sonuçlar uygulandığında süreç şüphesiz iyileştirilir (Bacchewar et al., 2007; Camposeco-Negrete, 2013; Montgomery, 2017). Ayrıca Taguchi'nin sağlam tasarımı, gürültü faktörlerinin ürünün performansı üzerindeki etkisini en aza indirerek nihai ürünlerin kalitesini artırır. Bu yaklaşım, çok sayıda iterasyonu, yanıt varyasyonunu azaltarak ve kontrol faktörlerinin ve seviyelerinin izin verilen sınırı dahilinde deneyler yapmak için zaman alan deneme-yanılma yöntemini sınırlandırarak para ve zamandan tasarruf etmeye yardımcı olma eğilimindedir (Montgomery, 2017). Son olarak, Taguchi'nin sağlam tasarımı temel olarak DOE'yi tanımlamak için ortogonal diziler ve kaliteyi ölçmek için S/N oranları gibi en güçlü iki araca dayanmaktadır (Camposeco-Negrete, 2013). ANOVA, verilen veri setini etkileyen faktörlerin analiz edilmesinde birincil adımdır. ANOVA, iki veya daha fazla kategorik grup arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olup olmadığını belirlemek ve aynı zamanda aralarında bir ilişki olup olmadığını tespit etmek için kullanılan istatistiksel analiz testlerinden biridir. . ANOVA'nın sonucu (F-istatistiği veya F-oranı), örnekler arasındaki ve örneklerin içindeki değişkenliği belirlemek için çoklu veri gruplarının analiz edilmesini sağlar (Narasimharaju, 2023).

Taguchi yöntemi, birden fazla kritik faktörü dikkate alan istatistiksel deney tasarımı için en etkili prosedürlerden biridir. Bu yöntemde, ana noktalar, kapsamlı veri incelemeleriyle seçilerek ortogonaliteye dayanır, bu da deneylerin zamanını ve maliyetini azaltır. Ancak, Taguchi yöntemi genellikle tek bir performans özelliğine odaklanmıştır. Bu yöntemin birden fazla performans özelliğini optimize etmek için kullanılabilmesi için ek geliştirmelere ihtiyacı vardır. Gri ilişkisel analiz bu tür problemleri optimize etmek için kullanılan yöntemlerden biridir ve birden fazla faktör ve yanıtı içeren karmaşık problemlerde yaygın olarak uygulanmaktadır (Kasemsiri et al., 2017; Wojciechowski et al., 2017; Zou et al., 2013).

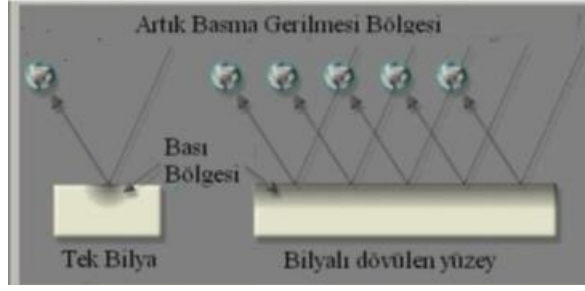
Çalışmada yapılan optimizasyon Bölüm 8'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

6. BİLYALI DÖVME

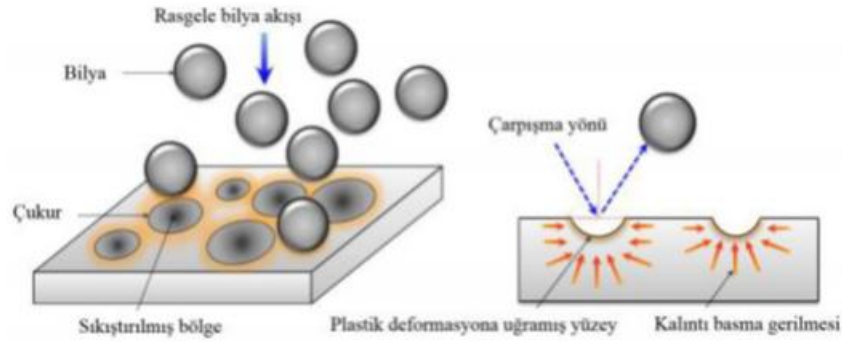
Bilyalı dövme (Shot Peening) mekanizması gereği bir soğuk işlem prosesidir. Ana amaç yüzeyde gerilim oluşturup mekanik özelliklerin modifiye edilmesidir. Bu amaçla yüzey bilya bombardımanına tabi tutulur. Bombardıman için kullanılan malzemeler çelik bilyalar, seramik bilyalar, cam küreler olabilmektedir. Bilyalı dövme işlemi özellikle otomotiv ve havacılık endüstrilerinde değişken yüklemeler altında çalışan makine elemanlarının yorulma ömürlerinin geliştirilmesi için yaygın olarak uygulanan önemli bir mekanik yüzey işleme yöntemidir. Yorulma ömrünün geliştirilmesi; bilyalı dövme ile malzeme yüzey altı mikroyapısı ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesini yanında basma kalıntı gerilme yaratılarak çatlak oluşumunun engellenmesi ve oluşan çatlakların ilerleme hızlarının yavaşlatılması ile sağlanmaktadır (Ünal et al., 2011).

Bilyaların yüzeye şiddetle çarpması ile deformasyona uğrayan bölgelerin genişlemeye çalışması yüzeyin alt kısımlarında sadece elastik deformasyona maruz kalan bölgelerce engellenmeye çalışılacaktır. Dolayısıyla yüzeyde ve yüzeyin hemen altında bilyalı dövmenin etki ettiği bölgelere kadar CRS meydana gelir. Yüzeyde çukur oluşmasına sebep olan çekme gerilmesi, yüzeyin hemen altında metali eski haline getirmeye çalışan bası gerilmesi tarafından engellenmeye çalışılır. Bu yüzden yüzeyin hemen altında metal yüksek basma gerilmesi ile yüklenir. Birbiri üzerine çakışan çukurcukların altında basma nitelikli kalıntı gerilme profili oluşur (Avcu, 2018).

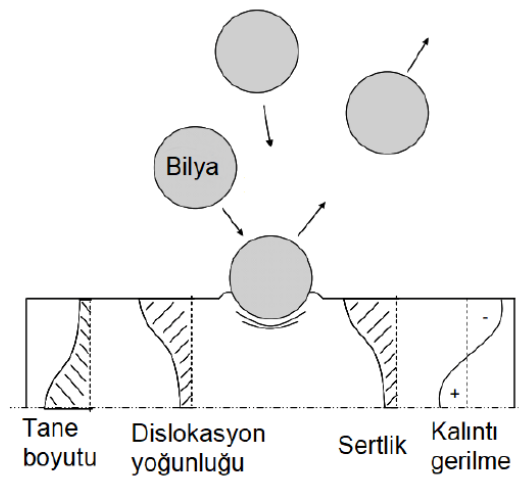
Şekil 6.1’de bilya dövme sonrasında oluşan basma tipi kalıntı gerilmenin şematik gösterimi verilmiştir. Şekil 6.2’de bilyalı dövme işleminin şematik ve dövme işlemi neticesinde oluşan plastik şekil değişimi şematik olarak görülebilmektedir. Şekil 6.3’te ise bilyalı dövme işlemi sonrasında malzemenin başlıca değişimlerinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 6.1. Bilyalı dövme sonucu oluşan basma artık gerilmesi (Ünal et al., 2011)



Şekil 6.2. Bilyalı dövme işlemi sonrası oluşan deformasyon ve gerilmeler (Mutlu, 2021)



Şekil 6.3. Bilyalı Dövme işlemi neticesinde oluşan başlıca değişimlerin şematik gösterimi (Kamel & Maawad, 2012)

Bilyalı dövme, düşük maliyetli bir işlem olup malzeme yorulma dayanımını artırmak için sıkça tercih edilir. Özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde, sürekli değişen yükler altında çalışan parçaların yorulma direncini artırma ihtiyacı nedeniyle bu işlem önem kazanmaktadır. Örneğin, dişli çarklar, kam mili, türbin kanatları, biyel kolları ve motor blokları gibi parçalar bilyalı dövme işlemine tabi tutulmaktadır (Heaton, 1989).

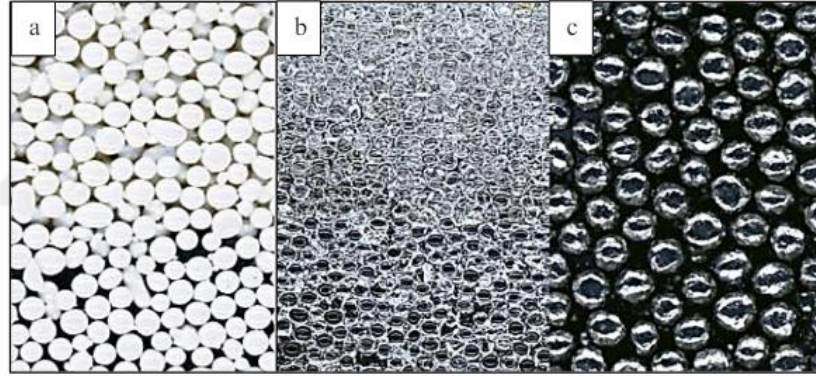
6.1. Bilyalı Dövme İşlem Parametreleri

Son yıllarda bilyalı dövme ile ilgili çalışmalarda sadece geleneksel parametrelerden daha yüksek parametreler kullanılarak mikroyapısal değişimlerde plastik deformasyonun etkisi ve ultra ince nano tanecik oluşumunun yüzeye entegrasyonu üzerinde durulmaktadır (Unal & Varol, 2015).

Literatür incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü ve mikrosertlik davranışını analiz etmek için; bilya cinsi, bilya boyutu, bilya püskürtme hızı ve nozul açısı gibi farklı bilyalı dövme parametreleri ile tek faktörlü deneyler kullandığı görülmektedir. Çoğu yazar, yüzey pürüzlülüğü, yüzey sertliği ve aşınma üzerindeki bilyalı dövme parametresinin etkisini incelemek için geleneksel yöntemleri kullanmıştır (Mahagaonkar et al., 2008).

6.1.1. Bilya türü ve boyutu

Bilyalı dövme işlemin en temel elemanı bilyalardır. Bilyalı dövme işleminde dökme demir, paslanmaz çelik, seramik, cam gibi farklı malzemelerden üretilen bilya türleri kullanılmaktadır (Şekil 6.4). Hedef malzemenin yüzey özelliklerine ve yüzeyde istenen etkiye göre bilya türü ve bilya boyutu seçilebilmektedir. Bilya büyüklükleri malzemeye uygulanan bilyalı dövmenin şiddeti ile artmaktadır. Bilyanın hızı doğrultusunda sahip olduğu kinetik enerjisi yüzeye aynen aktarılacağından kütlesi de kinetik enerjisini belirlemede önemli rol oynar (Çubuk, 2020).



Şekil 6.4. Kullanılan farklı tip bilyalar a) seramik bilya b)cam bilya c) çelik bilya (Önder & Saklakoğlu, 2022)

Bilyaların sınıflandırılmasında, Society of Automotive Engineers (SAE) tarafından hazırlanan standartlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bilya tanımlarında kullanılan "S" harfi, bilyanın çelik malzemesinden yapıldığını belirtmektedir. Çelik bilyalar, SAE J444 standardına göre S70 ile S1320 boyutları arasında değişmektedir. Şekil 6.5'te bilya dövme işleminde kullanılan çelik bilyaların sınıflandırılması verilmiştir.

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

Şekil 6.5. Çelik bilyaların sınıflandırılması (Çubuk, 2020)

6.1.2. Bilya püskürtme basıncı

Bilya püskürtme basıncı, bilyalı dövme enerjisinin kontrolü için en etkili ölçütlerden biridir. Bilya püskürtme basıncı, dövülecek iş parçasının türü, bilyanın türü ve çapı ve standartlar tarafından belirlenen aralıkta kabul edilebilir bir değer seçilmelidir. Sonuç olarak, bilya akış hızı ve çapına uygun bir nozul mesafesi seçmek bilyalı dövme işlemi için kritik öneme sahiptir (Barış, 2020).

6.1.3. Nozul açısı

Bir diğer önemli parametre ise nozul püskürtme açısıdır. Bilyalama işlemi en fazla enerjiyi iletmek için dik bir açıyla püskürtülmelidir, ancak bilyaların birbirine temas etmesini önlemek veya çeşitli çalışma koşulları oluşturmak için alternatif ila püskürtme açıları da seçilebilir (Barış, 2020).

6.2. Almen Şiddeti ve Testi

Bilyalı dövme işlemleri farklı parametreler altında gerçekleştirilir ve bu işlemler sırasında farklı sürelerde dövme işlemleri gerçekleştirilerek Almen şiddeti belirlenir. Bilyalı dövme işleminde birçok parametre olduğu için 1940 yılında J.O. Almen, günümüz endüstrisinde "Almen test plakaları" olarak bilinen ve bilyalı dövmenin şiddetini ölçmek için kullanılan işlemi geliştirmiş ve bu işlem için patent almıştır. Bu test plakaları, bilyalı dövmenin etkinliğini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Shives, 1991).

Almen şiddeti tüm parametrelerin birleşik etkisini aynı anda ve nispeten düşük bir maliyetle temsil ettiğinden dövme uygulamalarında yaygın bir proses kontrol metodudur. Almen şeridi önceden tanımlanmış dövme süresine kadar bir tutucu içinde dövülür. Daha sonra tutucudan çıkarılır ve eğrilik yay yüksekliği Almen ölçü aleti ile ölçülür. Almen şeritleri standartlaştırılmış olup AISI 1070 orta karbonlu çelikten imal edilir ve olup sertlikleri yaklaşık olarak 45 HRC mertebesinde. Bu şerit, mevcut üç kalınlık için 76 mm × 19 mm boyutlarındadır (tip A: 1,29 mm, tip N: 0,79 mm ve tip

yüzey pürüzlülüğü artış göstermektedir (A. A. Ahmed et al., 2015; Azhari et al., 2014; Harada et al., 2008; Trung et al., 2016).

Literatürde farklı yaklaşımlar bulunmakla birlikte, bilya boyutunun yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi konusunda çeşitli görüşler mevcuttur. Bazı araştırmacılar, bilya boyutunun artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülüğünde azalma olduğunu belirtirken, (A. A. Ahmed et al., 2015a, 2016a; Llaneza & Belzunce, 2015) diğer araştırmacılar ise bilya boyutunun artmasıyla yüzey pürüzlülüğünde artış yaşandığını gözlemlemişlerdir (Bagherifard et al., 2012; Trung et al., 2016; Yildiran et al., 2015).

Bilyalı dövme sonrasında oluşan yüzey pürüzlülükleri, malzeme yüzeyindeki çukur ve tümseklerin varlığıyla çentik etkisi gösterir ve bu durum malzemelerin yorulma dayanımını olumsuz etkileyebilir. Ancak, yüzey ve yüzey altı tane yapısının küçülmesi, çatlak ilerlemesini yavaşlatabilir ve dolayısıyla malzemenin yorulma dayanımına olumlu katkıda bulunabilir (Q. Yang et al., 2018; Zupanc & Grum, 2011). Bu nedenle, literatürde birçok araştırmacı bilyalı dövme sonrası malzemelerin yüzey pürüzlülüğünü incelemiş, bu pürüzlülüğün yorulma dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmış ve optimal bilyalı dövme parametrelerini belirlemiştir (Abdulstaar et al., 2014; A. A. Ahmed et al., 2016b; Arola et al., 2006; Trung et al., 2016; Unal & Varol, 2014).

Bilyalı dövme işlemi sırasında malzemelerin yüzey ve yüzey altı tane yapısı küçülür, dislokasyon yoğunluğu artar, faz yapısı değişir ve plastik deformasyonlar oluşur. Bilyalı dövme, yakın yüzey bölgesine ince alan, yüksek dislokasyon yoğunluğu ve CRS uygulayarak, döngüsel olarak yüklenen metalik bileşenlerin yorulma mukavemetini ve yorulma ömrünü önemli ölçüde artırabilir (Feng et al., 2013).

Quiang ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada bilyalı dövme işlemi sonrası yüzeye yakın bölgelerde daha yüksek dislokasyon yoğunluklarına ve tane boyutunda küçülmeye rastlamışlardır. Bilyalı dövme sonrası küçülen tane boyutundan kaynaklı yüzey ve yüzey altı sertliklerinde artış meydana gelmektedir. Ahmed H. Maamoun ve ark. (2018a) AlSi10Mg numunelerine bilyalı dövme işlemi uygulamışlardır. Bilya ile dövülmüş yüzey, 154 HV ile en yüksek mikrosertlik değerini sergilemiştir.

Mikrosertlik derinlik profili, yüzeyden 350 µm derinliğe kadar kademeli olarak azalan bir sertlik göstererek 119 HV' ye ulaşmıştır.

Bilyalı dövme sonrasında tane yapısının küçülmesi ve dislokasyon yoğunluğunun artmasıyla birlikte kalınlığı gerilme değerinde artışın gerçekleştiği, literatürde birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Büyük çaplı bilyalar kullanılarak yüksek Almen şiddetleriyle malzeme yüzeyinin dövülmesi, yüksek CRS değerlerine ulaşılmasını sağlamıştır (A. A. Ahmed et al., 2015b).

Zhan ve ark. (2013)3 farklı bilya dövme işlemlerini (geleneksel bilyalı dövme, ikili dövme, üçlü dövme) östenik paslanmaz çelik olan S30432'e uygulamışlardır. Artık gerilme dağılım haritalarının sonuçları karşılaştırıldığında, bilyalı dövme adımı arttıkça, yüzey basınç artık gerilme dağılımlarının daha homojen hale geldiği görülmüştür; bu da birkaç kez bilyalı dövme işleminden sonra daha homojen deformasyonun bir sonucu olarak açıklanabilir.

6.4. SLM ile Üretilmiş Malzemelere Bilyalı Dövmenin Etkileri

Noar Elad Uzan ve ark. (2018b) gerilme azaltılmış SLM AlSi10Mg numunelerinin bilyalı dövmenin yorulma direnci üzerindeki etkisi araştırmışlardır. SLM AlSi10Mg numunelerinin bilyeli dövme öncesi ve sonrasındaki kırılma alanı, nispeten derin çukurlara sahip sünek bir kırılma sergilerken, pres döküm numunelerin son kırılma alanı, çok sayıda bölünme fasetleri ve mikro çatlaklar içeren bir gevrek kırılma yüzeyi sergilediğini raporlamışlardır. Ahmed H. Maamoun ve ark. (2018b) bilyalı dövmenin SLM işlemi kullanılarak üretilmiş AlSi10Mg numunelerinin yüzey topografyası, mikroyapı özellikleri, sertlik ve artık gerilmeleri üzerindeki etkisi araştırmışlardır. Yüzey pürüzlülüğü iyileştirmesi, 22,9 A yoğunluk ve Gp165 cam boncuklar (yüksek yoğunluklu BD) kullanılarak oluşturulmuştur. Bilyalı dövülmüş yüzeyler işlem sonrası benzer değerler gösterdi. Bununla birlikte, bilyalı dövülmüş yüzeyde mekanik özelliklerini etkileyebilecek mikro çatlaklar tespit edildi. 20,3 N Almen yoğunluğunun ve Gp50'nin (daha düşük yoğunluklu BD) kullanılması, daha iyi bir yüzey kalitesi ve işlenmiş BD yüzeyinde mikro çatlak oluşumunun ortadan kaldırılmasıyla sonuçlandı.

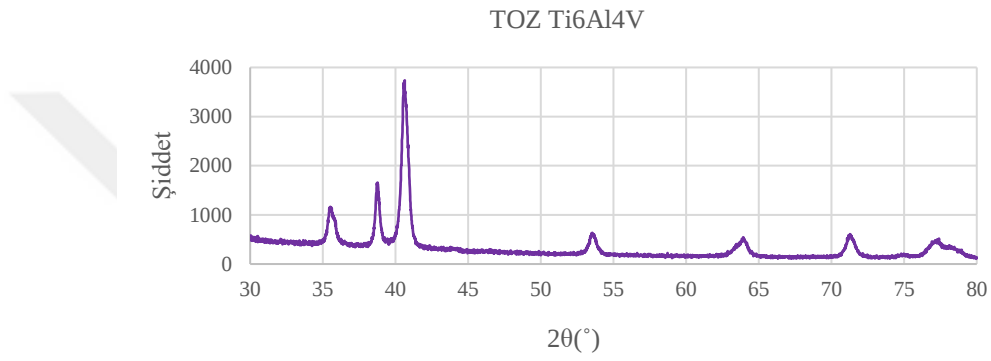
BD' den sonra hem yapılı hem de işlenmiş numunelerin üst yüzeyinde önemli bir yüzey sertleşmesi ölçülmüştür. Bilyayla dövülmüş yüzey, 154 HV ile en yüksek mikrosertlik değerini göstermiştir. Mikrosertlik derinlemesine profili, yüzeyden 350 µm derinlikte 119 HV' lik yerleşik değerlere ulaşana kadar kademeli olarak azalan bir sertlik gösterdi. Bilyalı dövülmüş yüzeylerde nispeten yüksek basma artık gerilmeleri tespit edildi. Kalıntı gerilimlerin derinlemesine profili, 90 µm derinlikte maksimum sıkıştırma gerilimi değerinin -170 ± 7 MPa olduğunu göstermiştir. Daha sonra, basınç gerilmeleri kademeli olarak azalmış ve 450-500 µm'de bitmiş parçalardan elde edilen ortalama değerlere ulaşmıştır.

SLM ile üretilen Ti6Al4V alaşımına bilyalı dövme prosesinin uygulanmasını içeren sınırlı sayıda çalışma vardır. Bu tez çalışmasında özgün olarak çoklu bilyalı dövmenin yanında şiddetli ve aşırı bilya dövmenin SLM ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımına uygulanması çalışılmıştır.

7. MATERYAL VE METOT

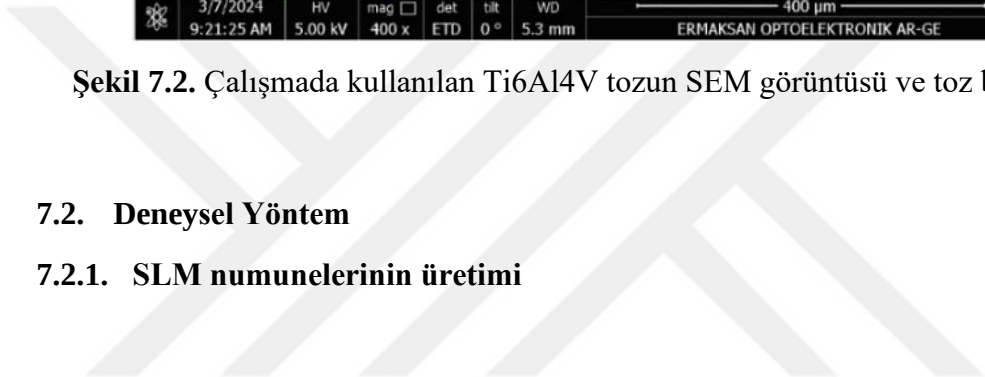
7.1. Materyal

Tablo 7.1’de bu tez çalışmasında kullanılan Ti6Al4V tozunun ASTM B348/B348M-19 standardına uygun özellikteki kimyasal kompozisyonu verilmiştir. Gaz atomasyon yöntemiyle üretilmiş, D10, D50 ve D90 değerlerinin sırasıyla 18 μm , 31 μm ve 43 μm olan küresel şekilli Ti6Al4V (Grade 5) tozu kullanılmıştır. Kullanılan tozun XRD grafiği Şekil 7.1’de ve SEM görüntüsü Şekil 7.2’de görülmektedir.



Tablo 7.1. Çalışmada kullanılan Ti6Al4V tozun kimyasal kompozisyonu

<Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
89.464	6.08	4.02	0.22	0.18	0.02	0.01	0.0053



7.2. Deneysel Yöntem

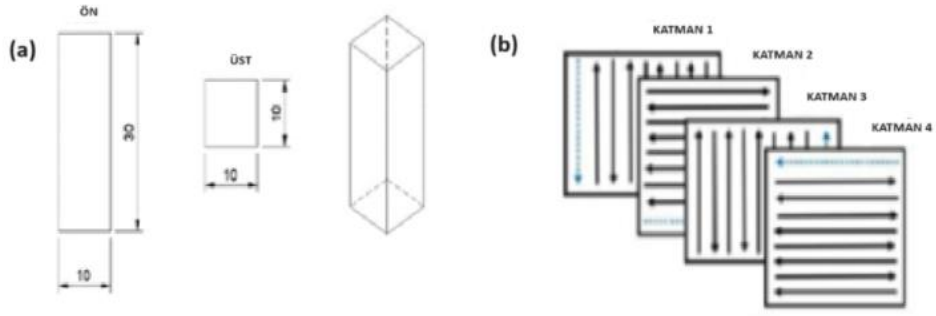
7.2.1. SLM numunelerinin üretimi

7.2.1. SLM numunelerinin üretimi

45



Şekil 7.3. Tüm numune üretimlerinin gerçekleştirildiği ENA 250 marka SLM tipi eklemeli imalat makinesi

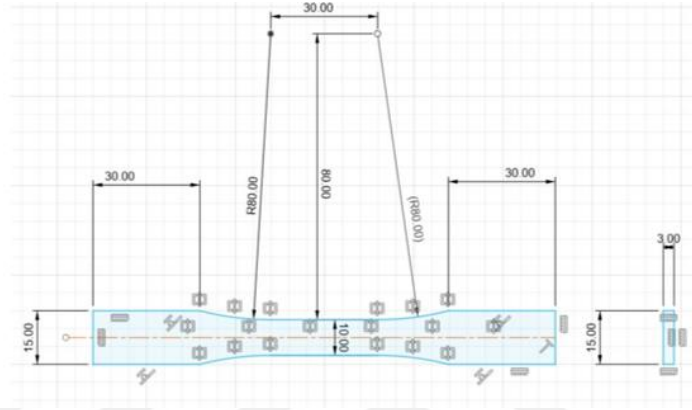


Şekil 7.4. SLM deneyleri için örnek görüntü (tüm boyutlar mm cinsinden) (b) SLM tarama stratejisi

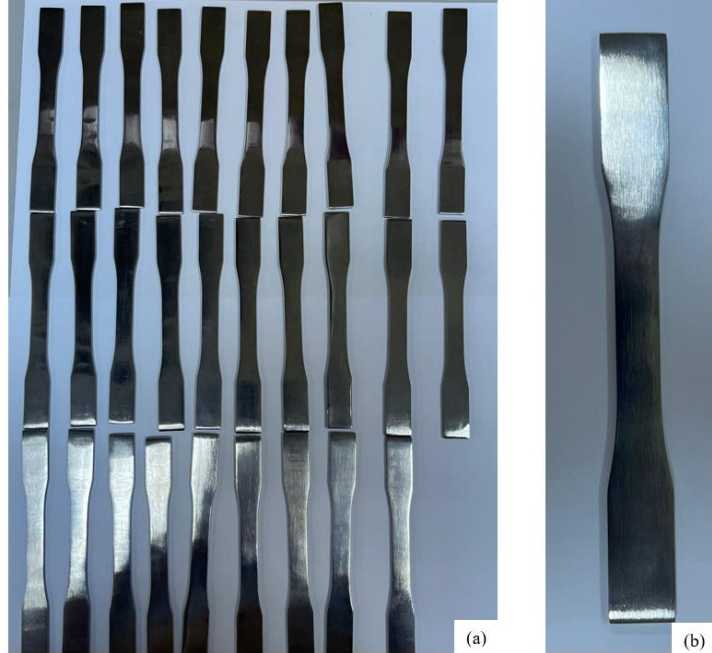


Şekil 7.5. SLM numune üretimi

Optimizasyon sonrası en iyi parametre olarak seçilen üretim seti ile numuneler artık yeni gepmetride üretilmiştir. Bilyalı dövme işlemi ve sonrasındaki karakterizasyon çalışmaları için Şekil 7.6.'de verilen geometride SLM numuneleri üretilmiştir. BD öncesinde yüzeyleri zımpara+parlatma kademesi ile hazırlanmıştır. Yüzeyi zımparalanmış ve parlatılmış olarak hazırlanan SLM numunelerinin görüntüsü ise Şekil 7.7.'de verilmiştir.



Şekil 7.6. Bilyalı dövme için üretilen numune geometrisi

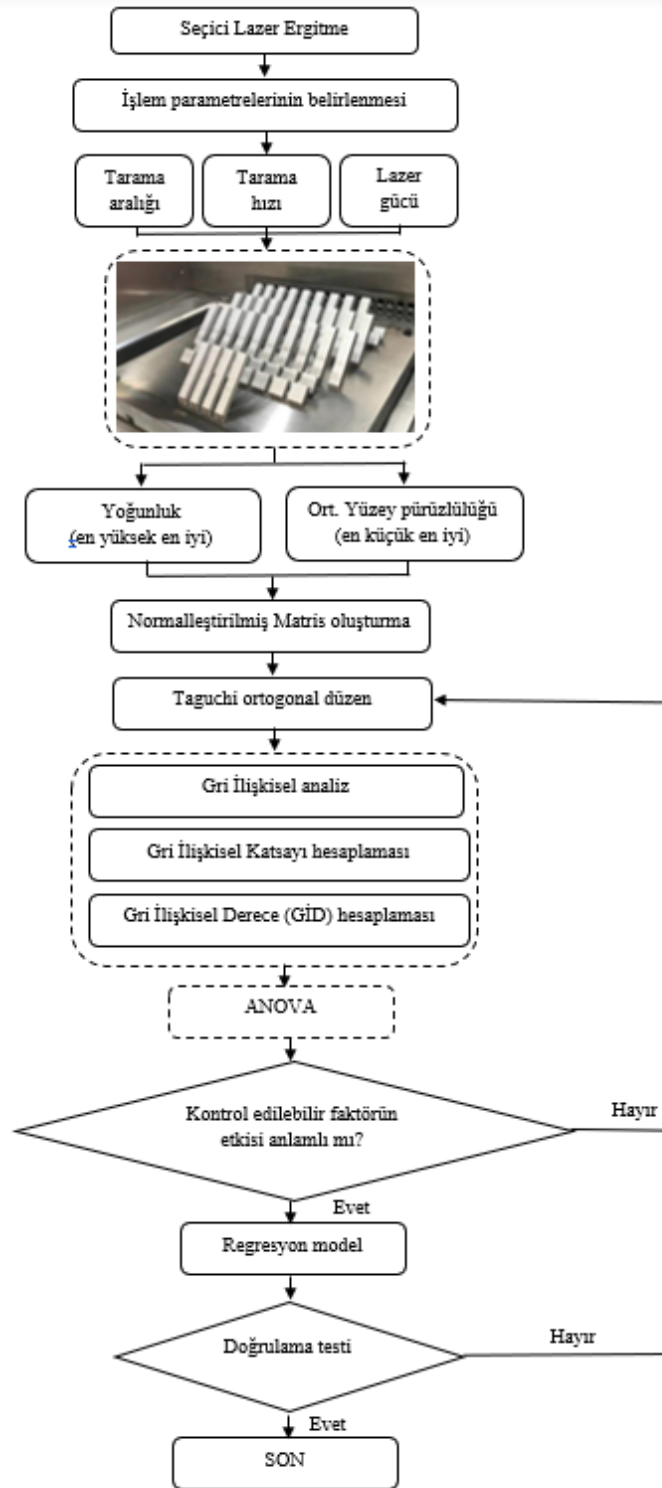


Şekil 7.7. (a) Bilyalı dövme için üretilmiş ve yüzeyi parlatılmış SLM numuneleri, (b) yakından görüntüsü

7.2.2. Deney tasarımı

Bu çalışmanın ilk aşaması SLM ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımının bilyalı dövme öncesi yoğunluk ve yüzey kalitesini optimize etmek için Taguchi ve GRA analizine dayalı bir deney tasarım yöntemi kullanmaktır. Bu yaklaşım kullanılarak yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü için tarama aralığı (h), tarama hızı (v), ve lazer gücü (P), SLM proses parametrelerinin optimizasyonu incelenmiş ve ANOVA tabloları ile eniyileme sonuçları elde edilmiştir. Yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü için kullanılan deneysel sonuçlardan regresyon analizi ile başka matematiksel modeller geliştirilmiştir. Performans özelliklerini analiz etmek için kullanılan akış şeması Şekil 7.8’de gösterilmektedir.





Şekil 7.8. Optimizasyon sürecinin metodolojisi

7.2.2.1. Taguchi methodu

Taguchi yönteminde S/N oranı analizinde “daha büyük daha iyi”, “daha küçük daha iyi” ve “nominal daha iyi” olarak bilinen üç farklı kalite özelliği bulunmaktadır. Daha büyük olan daha iyi özelliği ile S/N oranı değerinin hesaplanmasına yönelik denklem aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\frac{s}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \right)$$

Daha küçük olan daha iyi özelliği ile S/N oranı değerinin hesaplanmasına yönelik denklem aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\frac{s}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

SLM sürecinde nihai parça kalitesini etkileyen birçok farklı işlem parametresi vardır. Her bir parametre katkısının belirlenmesi hem zaman alıcı hem de maliyetlidir. Bu nedenle deneysel tasarım, proses parametrelerinin nihai ürün özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek için etkili bir çözümdür. Ortogonal düzen, herhangi bir işlemin seviyelerinin dengeli bir şekilde karşılaştırılmasını sağlayan tam veya kesirli bir faktöriyel matristir. Bu çalışmada tarama aralığı (h), tarama hızı (v), ve lazer gücü (P), gibi üç SLM işlem parametresi, üç farklı seviyeye sahip faktörler olarak seçilmiştir. (Tablo 7.2) Mevcut analizde deney tasarımı için Taguchi’ nin L9 ortogonal dizisi kullanılmıştır. Her üç faktör ve 9 çalışma için üç seviye mevcuttur. Her bir deney koşulu yani bu matristeki her bir satır için 3 numune üretilmiş, bir deney matrisi için toplam 27 adet üretim yapılmıştır. Sonuçlar SLM üretim makinasına bağlılığı da ortadan kaldırmak amacıyla (kontrol edilemeyen değişkenler) aynı tezgâhtan aynı ortogonal düzen için 9*3 olacak şekilde bir set daha üretim yaptırılmış ve analizler 27 adet yeni bir üretim ile tekrar edilmiştir.

Tablo 7.2. SLM yönteminde kullanılan faktörler ve seviyeler

Üretim Faktörleri	Kısaltma	SEVİYELER		
Tarama Aralığı (μm)	h	80	90	100
Tarama Hızı (mm/s)	v	800	900	1000
Lazer Gücü (W)	P	190	200	220

7.2.2.2. Gri ilişkisel analiz

Taguchi yöntemi tek bir performans karakteristiğini optimize etmeye giderken, gri ilişkisel analiz optimizasyon probleminde dikkate alınan tüm performans özelliklerini birleştirir (Suresha & Sridhara, 2010).

Birden fazla özelliğin karar vermesinde kullanılabilecek etkili bir tekniktir. GRA'da yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğüne ilişkin deneysel sonuçlar sıfır ile bir arasında normalleştirilir. Yoğunluk için veriler şu şekilde ifade edilir:

$$x'_i(j) = \frac{y_{ij} - \min_j y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}} \quad (2)$$

ve yüzey pürüzlülüğü için veriler şu şekilde ifade edilir:

$$x'_i(j) = \frac{\max_j y_{ij} - y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}} \quad (3)$$

Eşitlik (2) ve (3) ile normalize edilmiş bir matris üretilir. Normalleştirilmiş matristen her bir kriter için normalleştirilmiş değerlerin en büyüğü bir referans değer olarak belirlenir.

$$x'_0(j) = \max_{i=1}^n x'_i(j) \quad (4)$$

Bir sonraki adım, normalleştirilmiş hali ile referans değer arasındaki farkı alarak fark matrisini oluşturmaktır.

$$\Delta_{oi}(j) = |x'_0(j) - x'_i(j)| \quad (5)$$

Daha sonra eşitlik (6) kullanılarak gri ilişkisel katsayılar belirlenir. İstenen ve gerçek deneysel sonuçlar arasındaki ilişkiyi temsil eder.

$$\delta_{oi}(j) = \frac{\min_{i=1}^n \min_{j=1}^m \Delta_{oi}(j) + \zeta \times \max_{i=1}^n \max_{j=1}^m \Delta_{oi}(j)}{\Delta_{oi}(j) + \zeta \times \max_{i=1}^n \max_{j=1}^m \Delta_{oi}(j)} \quad (6)$$

Burada ζ ($0 \leq \zeta \leq 1$), ayırt edici katsayı veya ayırt edilebilirlik indeksi olarak bilinir. ζ değeri küçükse, daha yüksek ayırt edilebilirlik olacaktır. Çoğu durumda, ζ 0,5 değerini alır çünkü bu değer genellikle orta derecede ayırt edici etkiler ve iyi stabilite sağlar (Chang & Lin, 1999).

Ardından bir sonraki aşamada, her deney için gri ilişki derecesini hesaplamak için bir ağırlıklı yöntem kullanılır. Bu gri ilişkisel derece, çoklu performans özelliklerinin optimizasyonunu gösteren tek bir sayısal değerdir.

$$\gamma_{oi} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \delta_{oi}(i) \quad (7)$$

Gri ilişki derecesi, performans özellikleri için aynı ağırlık dikkate alınarak ve denklem (7) kullanılarak hesaplanır.

Denklem (7)'de m , performans özelliklerinin sayısını temsil eder. Ayrıca, önemli proses parametresini belirlemek için istatistiksel bir yazılım (MINITAB 17) kullanılarak gri ilişkisel derece üzerinde ANOVA ve Taguchi analizi yapılmıştır. Bu nedenle, optimum performans özellikleri için proses parametrelerinin en iyi kombinasyonunu tahmin etmeye yardımcı olur.

7.2.3. Bilyalı dövme düzeneği

Bilyalı dövme (BD) prosesi Manisa Celal Bayar Üniversitesi Makina Mühendisliği bölümü bünyesinde yer alan bilyalama deney düzeneğinde (Şekil 7.9) numunelerin hem ön hem de arka yüzleylerine bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır. Geleneksel bilyalı dövme (GBD), şiddetli bilyalı dövme (ŞBD) ve aşırı bilyalı dövme (ABD) işleminde Şekil 7.10'da verilen hazne kullanılmıştır. GBD işleminde 0,8 mm bilya ile dövme işlemi 2 hazne ile ve ŞBD işleminde kullanılan 0,8 mm bilya ile dövme işlemi 4 hazne olarak sabit kullanılmıştır. ABD işlemi için ise GBD ve ŞBD işlemlerinin üzerinde çoklu dövme uygulaması gerçekleştirilerek 0,8 mm bilya ile dövülmüş yüzeyler 0,6 mm bilya ile çoklu dövülmüştür. Tüm bu parametreler Almen şiddeti ile standartlaştırılmıştır. Bilyalı dövme işlem parametreleri Tablo 7.3'te verilmiştir.

Deney düzeneğinde basınçlı hava ile çalışan bilya püskürtme sistemi mevcuttur. İşlem, 90° nozul açısına sahip kapalı bir alanda gerçekleşir. Proses şu şekildedir: önce numuneler cihaz içindeki çenelere sabitlendikten sonra hazneye istenen çaptaki bilyalar doldurulur. Bilyalar ve numuneler hazırlandıktan sonra kontrol paneline belirlenmiş olan parametreler girilir ve cihaz kontrollü bir şekilde başlatılır. Püskürtme ucu sabit olduğundan numune yüzeyine bilyalı dövme işleminin homojen olarak yapılabilmesi için numune hareketli bir mekanizma yardımıyla homojen olarak işlenir. Bilyalı dövme cihazına bağlanmış örnek numune Şekil 7.11'de gösterilmektedir.



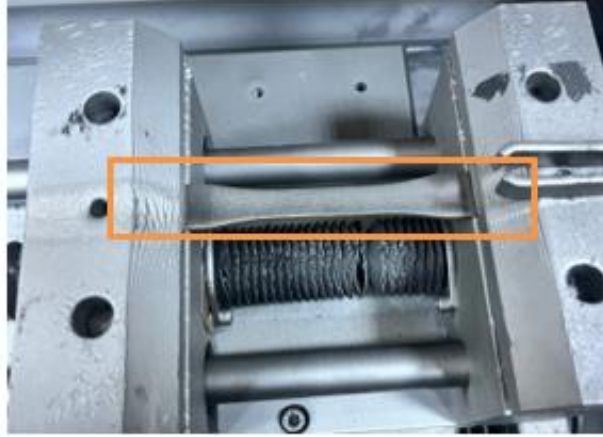
Şekil 7.9. Bilyalı dövme deney düzeneği



BD İŞLEMİ
BAŞLANGIÇ ÇİZGİSİ

BD İŞLEMİ BİTİŞ
ÇİZGİSİ

Şekil 7.10. Bilyalı dövme işleminde kullanılan hazne



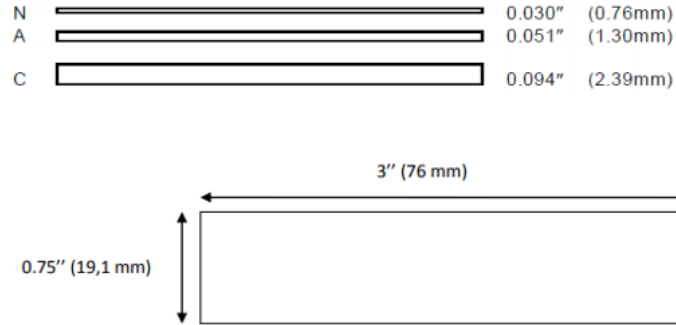
Şekil 7.11. Bilyalı dövme cihazına numune bağlanması

Tablo 7.3. Bilyalı Dövme Proses Parametreleri

Bilyalı Dövme	Dövme Sayısı	Dövme parametresi	Süre (s)	Yüzey örtme oranı	Hava basıncı (bar)	Nozul mesafesi (cm)
GBD	TEKLİ DÖVME	2 hazne 0,8 mm	100	%200	5	10,5
ŞBD		4 hazne 0,8 mm	200	%400	5	10,5
ABD	ÇOKLU DÖVME	2 hazne 0,8 mm + 2 hazne 0,6 mm	200	%400	5	10,5
ABD		4 hazne 0,8 mm + 2 hazne 0,6 mm	300	%600	5	10,5

7.2.3.1. Almen şiddetinin belirlenmesi

Bu tez kapsamında almen şiddeti ölçümünde N tipi kalınlığı 0,76 mm olan almen şeritleri kullanılmıştır. Almen şiddeti belirlemek için kullanılan standart almen şeritleri Şekil 7.12’de verilmiştir.



Şekil 7.12. N, A ve C tipi Almen testi için kullanılan şerit ölçüleri (Savaş, 2010)

Tekli ve çoklu dövme çalışmaları için Almen şiddeti ölçümlerinden örnek görüntüler Şekil 7.13’te verilmiştir. Aynı standartlarda almen şeriti üzerine uygulanan bilyalı dövme işlemi sonucu numunedeki eğri yüksekliği Tablo 7.4’te verilen eğri yüksekliği-Almen şiddeti dönüşüm tablosu kullanılarak almen şiddetine dönüştürülmüştür ve Tablo 6.5’te hesaplanan değerler verilmiştir.



Şekil 7.13. Almen şiddeti ölçümü için bilyalı dövülmüş N-tipi şeritler ve Almen şiddeti ölçümü

Tablo 7.4. Eğri yüksekliği-Almen yoğunluğu dönüşüm tablosu (Jain, 2001)

Bilyalı Dövme Almen Yoğunluğu	Test Numunesi Tipi	Eğri Yüksekliği (mm)
4N	N	0,1
6N		0,15
8N		0,2
16N		0,4
18N		0,45
6A	A	0,15
8A		0,2
10A		0,25
12A		0,3
14A		0,35
16A		0,4
7C	C	0,18
9C		0,23
11C		0,28
21C		0,53
23C		0,58

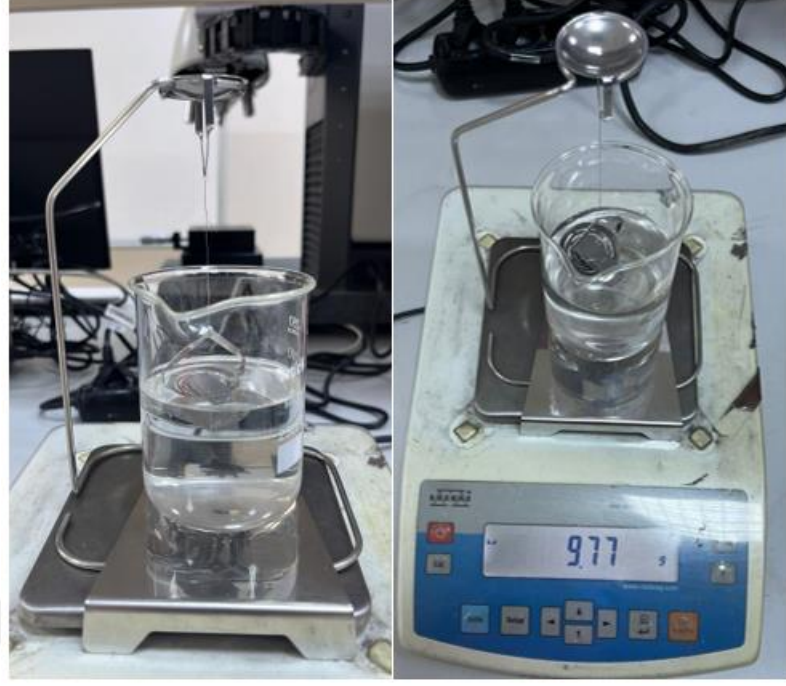
Tablo 7.5. Kullanılan bilyalı dövme işlemi sonrası hesaplanan eğri yüksekliği ve Almen şiddeti

Bilyalı Dövme	Dövme sayısı	Dövme parametresi	Eğri yüksekliği (mm)	Almen şiddeti
GBD	TEKLİ DÖVME	2 hazne 0,8 mm	0,22	11N
ŞBD		4 hazne 0,8 mm	0,46	18 N
ABD	ÇOKLU DÖVME	2 hazne 0,8 mm + 2 hazne 0,6 mm	0,77	30N (11N+0,6mm)
ABD		4 hazne 0,8 mm + 2 hazne 0,6 mm	0,78	30N (18N+0,6mm)

7.3. Karakterizasyon ve çalışmaları için cihazlar ve kullanılan parametreler

7.3.1. SLM numunelerinin yoğunluk ölçümleri

Şekil 7.5'te gösterilen numunelerin yoğunluk ölçümleri Fakültemiz laboratuvarında yer alan Arşimet prensibindeki deney setinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.14'te Arşimet deney düzeneği verilmiştir.



Şekil 7.14. Arşimet deney düzeneği

7.3.2. Yüzey durumu incelemeleri

Şekil 7.5’te verilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Manisa Celal Bayar Üniversitesi bünyesinde yer alan Mitutoyo marka SJ 301 model yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.15). R_a ve R_z değerleri numunelerin üzerinde 5’ er ölçüm yapılarak ve ortalamaları alınarak elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm yönü Şekil 7.16’da verilmiştir.



Şekil 7.15. Mekanik profilometre



Şekil 7.16. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm yönü

Farklı parametreler altında dövülmüş numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri ISO 25178-2012 standartlarına göre analiz edilmiştir. Kısaca, numunelerin bilyalı dövülmüş yüzeylerinden 10 mm'lik bir çizgi temaslı profilometre ile taranmış, ardından numunelerin 2D yüzey topografyaları elde edilmiştir. 3D yüzey topografyaları iki boyutlu verilerin sayısal görüntü işleme tekniği ile işlenmesi yoluyla elde edilmiştir.

Ayrıca, yüzeyleri SM ve SEM yoluyla da incelenerek yüzey topografyaları görüntülenmiştir.

7.3.3. Numunelerinin metalografik işlem hazırlığı

Mikroyapı, mikrosertlik gibi kesitten detaylı incelenecek numunelere metalografik işlem hazırlığı yapılmıştır. Aşamaları aşağıdaki gibidir.

7.3.3.1. Kesme işlemi

Kesme işlemi ölçümleri Manisa Celal Bayar Üniversitesi bünyesinde yer alan Struers marka Secotom-6 model hassas kesme cihazında gerçekleştirilmiştir. Hassas kesme cihazı Şekil 7.17. Hassas kesme cihazı verilmiştir.



Şekil 7.17. Hassas kesme cihazı

7.3.3.2. Bakalite alma

Numuneleri kestikten sonra kesitten inceleyebilmek için numuneler bakalite alınmalıdır. Bakalite alma işlemi Manisa Celal Bayar Üniversitesinde yer alan Struers Citopress -1 bakalit cihazı ile yapılmıştır (Şekil 7.18).



Şekil 7.18. a) Struers Citopress -1 bakalit cihazı, b) Bakalite alınmış bir numune örneği

7.3.3.3. Zımpara ve parlatma işlemi

Bakalite alınan numuneye ilk olarak 180 grid daha sonra 240, 320, 400, 600, 800 ve 1000 grid zımpara kağıtları kullanılarak her geçişte numuneyi 90 derece döndürüp, önceki işlemdeki zımpara izleri kaybolana kadar zımpara işlemi gerçekleştirildi. Son olarak ise keçe yardımıyla 3 µm ve 1 µm'luk elmas solüsyon kullanılarak parlatma işlemi yapıldı. Zımparalama ve parlatma işlemleri Manisa Celal Bayar Üniversitesinde yer alan Metkon marka Forcipol 1V model cihazda gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.19).



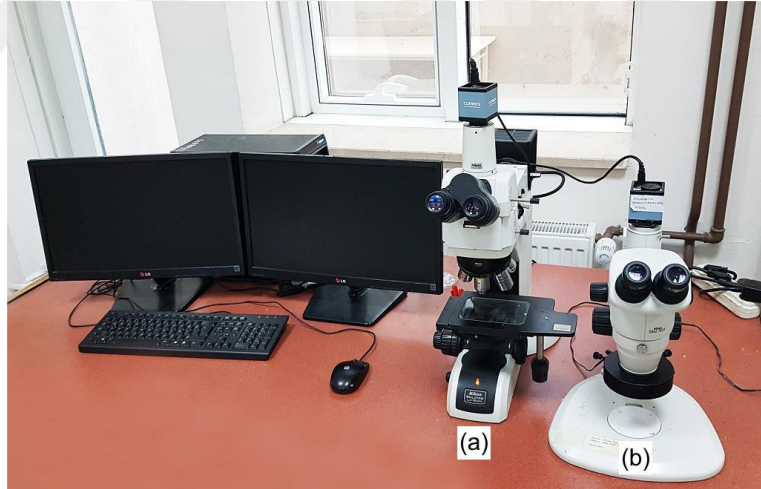
Şekil 7.19. Metkon Forcipol 1V parlatma cihazı

7.3.3.4. Dağlama

Parlatmanın işleminin ardından dağlama işlemine tabi tutulmuş olup dağlamada Kroll çözeltisi kullanılmıştır. Kroll çözeltisi; 10 ml Hidrojen Florür (HF), 5 ml Nitrik Asit (HNO_3), 85 ml saf su kullanılarak hazırlanmıştır. Dağlama işlemi 30-60 saniye aralığında kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir.

7.3.4. Mikroyapı incelemeleri

Mikroyapı incelemek için fakültemiz laboratuvarında bulunan Nikon Marka Eclipse LV150N Model Optik Mikroskop (OM) kullanılmıştır. Ayrıca makro incelemeler için fakültemiz laboratuvarında bulunan Nikon 73 marka SMZ 745T model stereo mikroskop (SM) kullanılmıştır. Kullanılan optik mikroskop ve stereo mikroskoplar görüntüsü Şekil 7.20’da verilmiştir.



Şekil 7.20. (a) Nikon Marka Eclipse LV150N Model Optik Mikroskop (b) Nikon Marka SMZ 745T Model Stereo Mikroskop

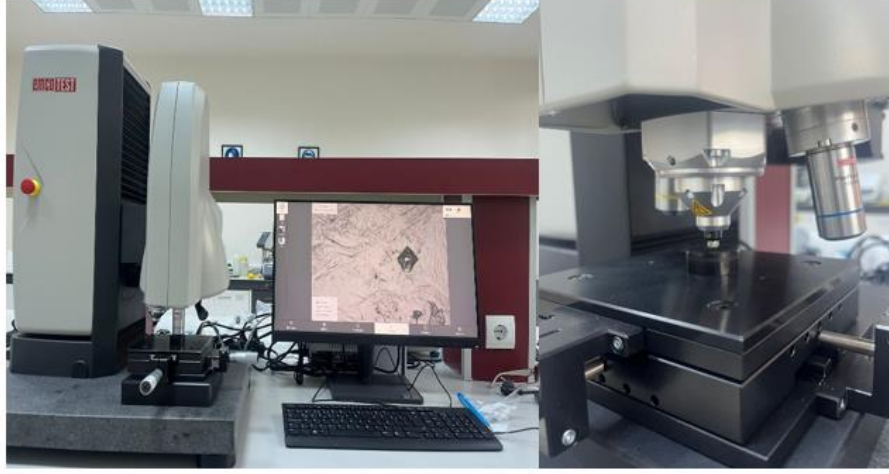
Taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri yapmak için İYTE laboratuvarında bulunan FEI marka Quanta FEG 250 model cihaz ile GBD, ŞBD ve ABD ile dövülmüş numuneler analiz edilmiştir. Şekil 7.21’de kullanılan cihaz ve örnek numune verilmiştir.



Şekil 7.21. İYTE SEM analiz cihazı ve numunelerin hazneye yerleştirilmesi

7.3.5. Mikrosertlik ölçümleri

Mikrosertlik ölçümleri fakültemiz laboratuvarında bulunan DuraScan 20 G5 mikrosertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır (Şekil 7.22). Mikrosertlik ölçümleri 10 gf yük altında ve 10 s süresince Vickers indenter ile kesitten 20 μm mesafe ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.22. (a) mikrosertlik cihazı (b) ölçüm alınan örnek bir numune

7.3.6. Yorulma testi

Bilyalı dövme işleminden önce ve sonra numunelere yorulma testi gerçekleştirilmiştir. Yorulma testi Ege Üniversitesi Merkezi Araştırma Test ve Analiz Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi (EGE-MATAL) bünyesinde bulunan 20 kN kapasiteli SHIMADZU marka EHF-LV020K2-020 model yorulma cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.23).

Yorulma analizleri; oda sıcaklığında, eksenel yük altında, sabit genlikte, $R=0,1$ gerilme oranında ve 10 Hz frekansta gerçekleştirilmiştir. Yorulma sınırı için limit çevrim 10^7 olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.23. (a) SHIMADZU marka EHF-LV020K2-020 model yorulma cihazı (b) çenelere numune bağlanması

7.3.7. XRD analizleri

Bu çalışma kapsamında XRD analizleri DEFAM bünyesinde bulunan Şekil 7.24'te gösterilen PANanalytical marka Empyrean model cihaz ile bilyalı dövülmüş ve dövülmemiş numunelere yapılmıştır. Kırınım açısı aralığı 10° - 80° arasında belirlenmiştir.



Şekil 7.24. DEFAM bünyesindeki PANanalytical marka Empyrean model XRD Cihazı

Yapılan analiz sonrasında XRD piklerinin şiddetlerinden yarı maksimumun tam genişliği [full width at half maximum (FWHM)] elde edilmiştir. Buradan kristalit boyutu, latis gerinimleri ve dislokasyon yoğunluğu eşitlik (8), (9) ve (10)'da verilen bağıntılar yardımıyla belirlenmiştir. Kristalit boyutu ve latis mikro-gerinimi için kullanılan Scherrer eşitlikleri aşağıdaki gibidir (Fultz ve Howe 2013)

$$\beta = \frac{K\lambda}{L\cos\theta} \quad (8)$$

$$\beta = C\varepsilon \frac{\sin\theta}{\cos\theta} \quad (9)$$

$$\rho = \frac{1}{L^2} \quad (10)$$

FWHM, pikin maksimumunun yarı yüksekliğinde “radyan cinsinden” kırınım piki genişliğidir. Burada pik genişliği β , L kristalit boyutunun ve ε latis mikro geriniminin katkılarından oluştuğu görülür. λ , X-ışını dalgaboyu ve K Scherrer sabitidir ve 0,9'dur. C sabitinin değeri tipik olarak 4'tür, burada ε homojen olmayan gerinimdir (Gencalp Irizalp et al., 2014).

X-ışını pik profil analizi, kristal yapıdaki kristalografik kusur olan ve esas olarak malzeme özelliklerini etkileyen malzemenin dislokasyon yoğunluğunu hesaplamak için kullanılır. Burada L kristal boyutu ve ρ malzemenin dislokasyon yoğunluğu olarak temsil edilir (S. Ali et al., 2020).

8. BULGULAR VE TARTIŞMA

8.1. SLM Numunelerinin Optimizasyonu

8.1.1. Taguchi metodu

Bu çalışmada, ANOVA analizi sonucunda güvenilir sonuçlar veren (R^2 değerleri %85'in üzerinde) bir ortogonal tasarım kullanılması amaçlanmıştır. Lazer gücü (P), tarama hızı (v) ve tarama aralığı (h) gibi üç SLM işlem parametresi, üç farklı seviyeye sahip faktörler olarak belirlenmiştir. Tablo 8.1'de, ilgili seviyelerdeki farklı işlem parametreleri için deneysel kurulumu göstermektedir. Arşimet yoğunluğu ölçümleri için her SLM parametresinden 3 örnek üretilmiş ve her örnekten Arşimet hacim yoğunluğu ölçümleri elde edilmiştir. Bu değerlerin ortalaması da ortogonal test sırası için elde edilmiştir. Pürüzlülük ölçümü için her numuneden 5 R_a ölçü alınmıştır. Bu değerlerin ortalaması ortogonal test sırası için elde edilmiştir.

Tablo 8.1. L9 ortogonal düzenini kullanarak oluşturulan deneysel matris

Numune	h (μm)	v (m/s)	P (W)
L1	80	900	200
L2	80	800	190
L3	80	1000	220
L4	90	900	190
L5	90	800	220
L6	90	1000	200
L7	100	900	220
L8	100	800	200
L9	100	1000	190

Enerji yoğunluğu (E), SLM sürecinde bir birim hacme giren toplam enerjiyi ölçen önemli bir parametredir (J/mm^3 olarak ifade edilir). Bu parametre, lazer gücü (P), tarama hızı (v), katman kalınlığı (t) ve tarama aralığı (h) olmak üzere dört temel

işlem parametresinden etkilenir (Thöne et al., 2012). Lazer gücü, birim zamanda lazer tarafından yayılan enerjiyi temsil eder; tarama hızı ise lazer noktasının birim zamanda katettiği mesafeyi ve maruz kalma süresini tanımlar. Tarama aralığı, ardışık lazer yolları arasındaki mesafe olarak bilinirken, katman kalınlığı ise yatağa yerleştirilen her bir katmanın kalınlığını ifade eder. Denklem, bu parametreler arasındaki ilişkiyi enerji yoğunluğu formülü olarak gösterir. Tablo 8.2 ise denklem kullanılarak çalışmada kullanılan numunelerin hesaplanan enerji yoğunluklarını gösterir. Özellikle, L9, deney matrisi içindeki parametreleri içeren bir denklemi temsil eder.

$$E \left(\frac{J}{mm^3} \right) = \frac{P(W)}{v \left(\frac{mm}{s} \right) \cdot h(\mu m) \cdot t(\mu m)}$$

Tablo 8.2. SLM işlem parametrelerine göre hesaplanan enerji yoğunluğu değerleri

Numune	$E (J/mm^3)$
L1	92.59259259
L2	98.95833333
L3	91.66666667
L4	78.18930041
L5	101.8518519
L6	74.07407407
L7	81.48148148
L8	83.33333333
L9	63.33333333

Taguchi yönteminde S/N oranı analizinde “daha büyük daha iyi”, “daha küçük daha iyi” ve “nominal daha iyi” olarak bilinen üç farklı kalite

özellığı bulunmaktadır. Daha büyük olan daha iyi özelliğı ile S/N oranı değeriinin hesaplanmasına yönelik denklem aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \right)$$

Daha küçük olan daha iyi özelliğı ile S/N oranı değeriinin hesaplanmasına yönelik denklem aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

Taguchi sonrası yapılacak olan ANOVA, Gri ilişkisel analiz ve regresyon model için SLM numunelerinin yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarına ihtiyaç vardır. Bu sonuçlar doğrultusunda optimizasyon devam edecektir.

8.1.1.1. SLM numunelerinin yoğunluk sonuçları

Çalışmada yoğunluk ölçümleri Şekil 7.14. Arşimet deney düzeneğı ile yapılmıştır. Arşimet deneyi ile elde edilen yoğunluk verileri denklem (11) kullanılarak her numune kodu için bağıl yoğunluk hesaplanmıştır. Tam yoğun Ti6Al4V Grade 5 malzeme için yoğunluk $4,43 \text{ g/cm}^3$ olarak alınmıştır. Tablo 8.3 Arşimet test sonuçları ve her numune için bağıl yoğunluk değerleri verilmiştir.

$$\text{Bağıl Yoğunluk} = \left(\frac{\text{Ölçülen arşimet yoğunluğu}}{4,43} \right) * 100 \quad (11)$$

Tablo 8.3. Arşimet test sonuçları

Numune	Ölçülen arşimet yoğunluğu (g/cm ³)	Bağıl yoğunluk (%)
L1	4,3645	98,5214
L2	4,3569	98,3506
L3	4,4164	99,6930
L4	4,4123	99,6004
L5	4,4179	99,7268
L6	4,4238	99,8600
L7	4,3979	99,2754
L8	4,4076	99,4923
L9	4,4389	99,0865

Yapılan arşimet deney sonucuna göre en yüksek yoğunluk L6 numunesindedir. L6 numunesinin SLM parametreleri ise tarama aralığı (h) 90 μm , tarama hızı (v) 1000 (m/s) ve lazer gücü (P) 200 W olan deney setidir.

8.1.1.2. SLM numunelerinin yüzey pürüzlülük değerleri

Bu çalışmada pürüzlülük ölçümü için her numuneden 5 adet R_a ölçümü alınmıştır. Bu değerlerin ortalaması ise taguchi ortogonal düzen için kullanılmıştır. Alınan 5 adet ölçümün ortalaması ise Tablo 8.4'te verilmiştir. Şekil 8.1'de SLM numunelerinin yüzey profili verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü, birçok endüstriyel alanda önemli bir parametredir. Yüzey pürüzlülüğü değerinin artması, malzemenin yorulma, aşınma vb. yüzey hasarları için stres konsantrasyon bölgelerine neden olabilir. Bu nedenle pürüzlülük değeri minimumda tutulmak istenmektedir (M. A. Abdulstaar et al., 2017).

Tablo 8.4. SLM numunelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri

Numune	Ortalama yüzey pürüzlülük değerleri R_a (μm)
L1	16,9
L2	20,7
L3	17,3
L4	17,5
L5	19,86
L6	16,41
L7	16,91
L8	17,64
L9	17,03



Şekil 8.1. SLM yüzey profili

Pürüzlülük, tarama hızının artmasıyla etkili bir şekilde azaldı ve bu azalma, orta güç bölgesinde (200 W) daha belirgindir. Pürüzlülükteki bu eğilimler erime izlerinin morfolojisi ile ilgilidir. Yüzey yapılarının erime modellerine göre değiştiği açıkta. Tüm lazer gücü seviyelerinde lazer ısı girişi, 30 μm kalınlığındaki toz katmanını tamamen erittiği bulundu. Bu nedenle yüzey topoğrafyaları süreklidir. Sonuç olarak numunelerin ortalama 17,75 μm değerinde pürüzlü yüzeylere sahip olduğu tespit edildi. Enerji yoğunluğunun 101 J/mm³'e çıkması aşırı ergimeye bağlı pürüzlülük seviyesinin maksimuma ulaşmasına neden olmuştur. Tarama hızının artırılması, lazerin birim alan başına enerji girişini azaltırken, lazer gücünün artırılması, lazer ısı girişini artırır, bu da mükemmel bir toz eritme etkisi ve yüksek miktarda doluluk (L6) ile sonuçlanır, bu da eriyiklerin üst üste binmesine neden olur izler. Enerji

yoğunluğunu kontrol etmek için tek bir proses parametresinin değerlendirilmesi yetersizdir. Ancak enerji yoğunluğu nedeniyle yüksek ısı girdisinin oluşacağı SLM malzemelerde, mikroyapının morfolojisine bağlı olarak mekanik özellikler değişmektedir. Enerji yoğunluğu tüm etkili proses parametrelerini içerdiğinden yüzey pürüzlülüğü ve yoğunluğu için doğrudan bir kriter olarak kabul edilmesi yetersizdir.

8.1.2. Gri ilişkisel analiz

Tablo 8.5'te Taguchi L9 deneysel ölçüm sonuçları özetlenmiştir. Yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları, istenen değerlerden sapmayı tanımlamak için bir kalite karakteristiği olarak sinyal-gürültü (S/N) oranına dönüştürülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü testleri için daha düşük-daha iyi kalite karakteristiği ve yoğunluk testleri için daha yüksek-daha iyi kalite karakteristiği, minimum yüzey pürüzlülüğü ve maksimum yoğunluk değerlerine sahip Ti6Al4V parçaları üretmek için optimum işlem parametreleri setini tahmin etmek üzere seçilmiştir. Sonuç olarak, 3 set üretim ile her bir SLM deney koşulu için yüzey pürüzlülüğünde toplam 45 ölçüm sonucu ve Arşimet yoğunluğu için toplam 9 ölçüm sonucu elde edilmiştir. Normalize edilmiş matrisin elemanları, referans dizi elemanı ile Tablo 8.6 'da gösterilmiştir. Bir sonraki adımda, gri ilişkisel katsayılar denklem 6 kullanılarak belirlenmiştir. En iyi (referans değer) ile gerçek normalleştirilmiş değer arasındaki ilişkiyi ifade eder. Gri ilişkisel katsayılar Tablo 8.7'de verilmiştir.

Tablo 8.5. Taguchi L9 deneysel ölçüm sonuçları

Numune	Yoğunluk (g/cm ³)	Ortalama yüzey pürüzlülük değerleri R_a (μm)
L1	4,3645	16,9
L2	4,3569	20,7
L3	4,4164	17,3
L4	4,4123	17,5
L5	4,4179	19,86
L6	4,4238	16,41
L7	4,3979	16,91
L8	4,4076	17,64
L9	4,4389	17,03

Tablo 8.6. Normalize edilmiş matris

Numune	Yoğunluk ρ	Yüzey Pürüzlülük R_a
L1	0,11316	1,00000
L2	0,00000	0,00000
L3	0,88933	0,78886
L4	0,82801	0,74245
L5	0,91176	0,19489
L6	1,00000	0,99535
L7	0,61266	0,87935
L8	0,75772	0,70997
L9	0,48753	0,85150

Tablo 8.7. Gri ilişkisel katsayılar

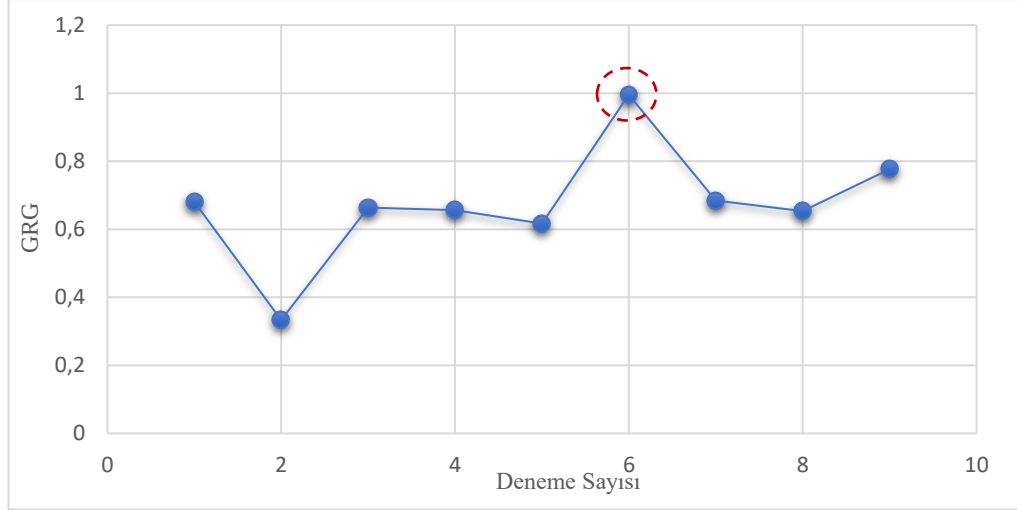
Numune	Yoğunluk ρ	Yüzey pürüzlülüğü R_a
L1	0,36053	1,00000
L2	0,33333	0,33333
L3	0,81877	0,70309
L4	0,74406	0,66003
L5	0,85000	0,38311
L6	1,00000	0,99080
L7	0,56348	0,80560
L8	0,67360	0,63289
L9	0,49384	0,77101

Mevcut analizde, performans niteliklerine eşit derecede önemli oldukları varsayılarak aynı değerler atanmıştır. Bu nedenle, birden fazla performans niteliği optimizasyon için tek bir gri ilişkisel dereceye dönüştürülebilir. Gri ilişkisel derece, referans dizisi ile karşılaştırılabilirlik dizisi arasındaki korelasyon seviyesini temsil ettiğinden, gri ilişkisel derecenin (GRG) daha büyük değeri, karşılaştırılabilirlik dizisinin referans dizisiyle daha güçlü bir korelasyona sahip olduğu anlamına gelir (Tosun, 2006). GRG'nin en büyük değeri, optimum performans özellikleri için süreç parametrelerinin seviyesini temsil eder.

Tablo 8.8. Performans özellikleri için gri ilişkisel derece

Numune	GRG
L1	0,68026
L2	0,33333
L3	0,76093
L4	0,70204
L5	0,61655
L6	0,99540
L7	0,68454
L8	0,65324
L9	0,63242

Karmaşık orijinal deneysel sonuçların dizileri, farklı unsurların ilişkisini elde etmek için sistematik bir veri dizisine çevrilmiştir (Khan & Dey, 2021). GRG değeri, her bir deneysel denemenin üç yanıt özelliğinin tümü için tek niteliksel özellikleri gösterir. En yüksek GRG değerine sahip işleme değişkenlerinin karşılık gelen değerleri, seçilen deneysel alan içerisinde en uygun işleme koşulları olarak kabul edilmiştir. Farklı deneysel denemeler için elde edilen GRG değerleri Şekil 8.2'de gösterilmektedir. En yüksek GRG değeri, SLM koşulunun işlem değişkenlerinin optimum ayarlarına yakınlığını gösteren L6 deney setinde bulunmuştur.



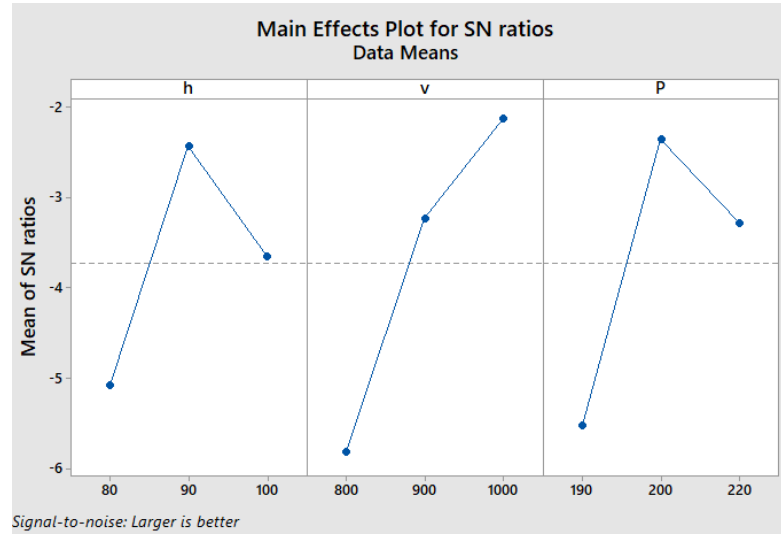
Şekil 8.2. GRG değerine karşılık deneme sayısı

ANOVA ve yanıt tablosu değerleri, önemli faktörleri, bunların arzu edilebilirliğini ve güvenilirliğini belirlemek için hesaplanmıştır. S/N eğrileri Şekil 8.3'te verilmiştir. Farklı proses parametreleri için bir yanıt tablosu (Tablo 8.9) oluşturulmuştur. Her bir işleme değişkeninin GRG'ye katkısını belirlemek için gri tabanlı Taguchi yöntemi yaklaşımını koordine etmek üzere ANOVA gerçekleştirilmiştir. Tarama hızı performans özellikleri üzerinde en büyük etkiye sahipken, lazer gücü en az etkiye sahiptir. Ayrıca, p-değeri 0,05'ten küçük olan bir işlem parametresinin performans özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve 0,05 ile 0,1 arasındaki bir p-değerinin düşük önemli bir etkiyi gösterdiği bilinmektedir. Üç parametre, p-değeri 0,05'ten küçük olan süreç üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, tüm proses parametrelerinin SLM Ti6Al4V'nin performans özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur (Tablo 8.9). Tarama hızının en önemli etkiye sahip olduğu, lazer gücünün ise en az etkiye sahip olduğu bulunmuştur. R-kare değeri 0,992'dir (0,85'ten büyük bir model iyi bir uyum sağlayabilir (H. Tian et al., 2022), (1'e yakındır). Modelin düzeltilmiş R-kare değeri 0,9679'dur; R-kare değerine yakın bir düzeltilmiş R-kare değeri kabul edilebilirdir ve yanıt değişkenlerindeki varyasyonların tasarım parametrelerine büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermektedir.

Tablo 8.9. GRG için ANOVA

SOURCE	DF	Seq SS	Katkı	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
<i>h</i>	2	0,063319	26,69%	0,063319	0,031660	33,30	0,029
<i>v</i>	2	0,115916	48,85%	0,115916	0,057958	60,97	0,016
<i>P</i>	2	0,056133	23,66%	0,056133	0,028067	29,52	0,033
error	2	0,001901	0,80%	0,001901	0,000951		
total	8	0,237270	100,00%	0,063319	0,031660		

S=0.0308329 R-Sq=%99.20 R-sq(adj)=%96.79

**Şekil 8.3.** GRG için S/N eğrileri

Tablo 8.10. GRG'nin yanıt tablosu

Level	<i>h</i>	<i>v</i>	<i>P</i>
1	0,5915	0,5344	0,5559
2	0,7713	0,6890	0,7763
3	0,6567	0,7963	0,6873
Delta	0,1798	0,2619	0,2204
Rank	3	1	2

Çoklu yanıt sürecinin performans özellikleri GRG'ye bağlıdır. GRG için yanıt tablosu dikkate alındığında, tarama hızı, tarama aralığı ve lazer gücünün etkili parametreler olduğu belirlenmiştir (Tablo 8.10). Taguchi analizi ile belirlenen optimum performans özellikleri yardımıyla, *h2v3P2* işlem parametrelerinin en iyi kombinasyonu olarak belirlenmiştir. Yani hem tabloya hem de S/N eğrilerine bakıldığında sonuçlar L6 parametresini vermektedir.

Gri ilişkinin optimum derecesi (γ_{ort}) aşağıdaki denklem kullanılarak tahmin edilmiştir:

$$\gamma_{opt} = \gamma_m + \sum_{i=1}^n (\gamma_i - \gamma_m) \quad (12)$$

Optimal gri ilişkisel derecenin tahmini değeri, gri ilişkisel derecenin ortalama değeri olan γ_m , optimum düzeyde gri ilişkisel derecenin ortalama değeri olan γ_i ve önemli ölçüde etkileyen işlem parametrelerinin sayısı olan *n* ile ilişkilendirilerek ifade edilir. Tarama hızı, tarama aralığı ve güç, optimal gri ilişkisel derecesini tahmin etmek için önemli parametrelerdir.

$$\gamma_{opt} = \gamma_m + \sum_{i=1}^3 (\gamma_i - \gamma_m)$$

13

$$= 0.6731 + (0.7713 - 0.6731) + (0.7963 - 0.6731) + (0.7763 - 0.6731)$$

$$= 0.9977$$

8.1.3. Doğrulama işlemi

Çalışmada, deneysel ve tahmini Gri İlişkisel Derece (GRG) değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu doğrulandıktan sonra, Taguchi ve gri ilişkisel analiz ile elde edilen optimizasyon sonuçlarından önerilen girdi parametreleri kombinasyonlarıyla deneyler yapılmıştır. Bu parametreler, aynı anda yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğünün en iyi kombinasyonunu elde etmek için optimal olarak kabul edilir.

Optimal parametrelerin belirlenmesinin ardından, bu parametreler kullanılarak üç deney gerçekleştirilmiş ve bunların performans karakteristikleri doğrulanmıştır. Özellikle, 90 µm tarama aralığı, 1000 mm/s tarama hızı ve 200W lazer gücü gibi parametreler zaten deneysel düzenimizde bulunmaktadır. Denklem 12 kullanılarak, Tablo 8.11'de verilen yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü değerleri hesaplandı. Bu nedenle, doğrulama için daha fazla deneye gerek duyulmamıştır. Bu yaklaşım ile SLM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V malzemesinin yoğunluğu ve yüzey pürüzlülüğü başarıyla optimize edilmiştir.

Tablo 8.11. GRG'nin deneysel ve tahmini değerleri

Performans özellikleri	Tahmini değer	Deneysel değer
Optimum parametreler	$h2v3P2$	$h2v3P2$
Yoğunluk (g/cm ³)		4,4238
Yüzey pürüzlülüğü (µm)		16,41
(GRG)	0,9977	0,9954

8.1.4. Regresyon modeli

GRG için regresyon analizi yapıldı, böylece işlem parametreleri ve GRG için matematiksel bir model oluşturuldu. Modelin girdisi olarak işlem parametreleri kullanılırken, çoklu amaçlı optimizasyon için yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğünün gri ilişkisel derecesi modelin çıktısı olarak kullanılır. Deneysel veriler, aşağıdaki gibi karesel polinom modeline uydurulur:

$$GRG = \alpha_0 + \alpha_1 h + \alpha_2 v + \alpha_3 P + \alpha_4 P^2 + \alpha_5 h^2 + \alpha_6 v^2 \quad (14)$$

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ regresyon katsayıları olup doğrusal terimlerdir. h, v ve P işlem parametreleridir. GRG ile işlem değişkenleri arasındaki non-lineer ilişkiyi açıklamak için karesel bir model geliştirildi ve işlem değişkenlerinin performans ölçütleri üzerindeki değişimleri gösterildi. Geliştirilen model, bağımsız değişkenlerin performans ölçütleri üzerindeki etkileşim ve belirgin etkilerini ortaya koyarak sistem davranışını araştırma imkânı sağlar.

Tablo 8.12. GRG için regresyon denklemi katsayıları

Source	DF	Adj SS	Adj Ms	F-Value	P-Value
Regresyon	6	0,235368	0,039228	41,26	0,024
<i>h</i>	1	0,033162	0,033162	34,88	0,027
<i>v</i>	1	0,000088	0,000088	0,09	0,790
<i>P</i>	1	0,054969	0,054969	57,82	0,017
<i>P*P</i>	1	0,054663	0,054663	57,50	0,017
<i>h *h</i>	1	0,031132	0,031132	32,75	0,029
<i>v *v</i>	1	0,000002	0,000002	0,00	0,965
Error	2	0,001901	0,000951		
Total	8	0,237270			
S=0,0308329 R-Sq=%99,20 R-sq(adj)=%96,79					

GRG tahmin modeli, deneysel verilerin regresyon analizi kullanılarak geliştirildi. Modelin P değeri 0.024'tür, bu değer $0.024 < 0.05$ olduğundan, modelin müdahale olasılığının sadece %0,024 olduğunu kanıtlar. R-kare değeri, regresyon modeli ile deneysel veriler arasındaki uyumun %99,20 olduğunu gösterir. R-kare değeri %96,79'dur, bu değer R-kare'ye yakın olduğundan modelin doğruluğunun oldukça yüksek olduğunu gösterir. *h* ve *P*'nin lineer ve kare terimleri en büyük öneme

sahiptir. Her noktanın deneysel değeri ile modelin hesaplanmış değeri arasındaki hata küçüktür ve model yüksek uyum derecesi gösterir. GRG'yi tahmin etmek için denklem 15 kullanılır. GRG tahmin modeli, Minitab yazılımı kullanılarak deneysel verilerin regresyon analizine dayanmaktadır.

$$GRG = -46,87 + 0,2319 h + 0,00119 v + 0,3474 P - 0,000842 P * P - 0,001248 h * h - 0,000275 h * v + 0,000000 v * v \quad (15)$$

Bu çalışmada kullanılan regresyon analizi, SLM kontrol parametreleri ile yoğunluk (ρ) ve yüzey pürüzlülüğü (R_a) arasındaki ilişkiyi matematiksel modeller kullanarak analiz etmektedir. Bu analiz, L9 ortogonal diziliminin sağlam tasarımına dayanmaktadır.

Yüzey pürüzlülüğü yanıt değişkenini etkileyen faktörlerle ilgili logaritmik terimleri içeren bir polinom regresyon modelini uygun bir deneysel tasarım kullanılarak uygulamak gereklidir. Böylece, yüzey pürüzlülüğü açısından gerçek tahmin edilen değerler logaritmik dönüşüm fonksiyonu kullanılarak elde edilir. Aynı şekilde, yoğunluk yanıt değişkenini etkileyen faktörlerle ilişkilendirmek için de değişkenlerin karesel terimlerini içeren bir polinom regresyon modeli uygun bir deneysel tasarım ile uygulanmalıdır.

İşlem parametrelerinin çarpanlarıyla varsayılan bir yanıt değişkeni arasında kurulan korelasyonlar ve modellerde kullanılan işlem parametreleri değerleri temel alınarak regresyon modelleri oluşturuldu. En iyi eğri uyumunu sağlamak için aşağıdaki iki model varsayıldı. Denklem 16, yüzey pürüzlülüğü (R_a) için regresyon modelidir:

$$\ln(R_a) = \beta_0 + \beta_1 h + \beta_2 v + \beta_3 P + \beta_4 \ln(h) + \beta_5 \ln(v) + \beta_6 \ln(P) \quad (16)$$

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6$ regresyon katsayılarıdır.

Denklem 17 yoğunluk için regresyon denklemidir.

$$\rho = \gamma_0 + \gamma_1 h + \gamma_2 v + \gamma_3 P + \gamma_4 h^2 + \gamma_5 v^2 + \gamma_6 P^2 \quad (17)$$

$\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6$ regresyon katsayılarıdır.

Yüzey pürüzlülüğü için yapılan regresyon analizinin sonuçları Tablo 8.13. Yüzey pürüzlülüğü için regresyon denklemi katsayıları gösterilmiştir. Denklem, yüzey pürüzlülüğü ile işlem parametreleri arasındaki aşağıdaki korelasyonu vermektedir:

$$\ln(R_a) = 246,3 + 0,0032 h + 0,014743 v + 0,183 P - 0,63\ln(h) - 13,67 \ln(v) - 37,35 \ln(P) \quad (18)$$

Tablo 8.13. Yüzey pürüzlülüğü için regresyon denklemi katsayıları

Source	DF	Adj SS	Adj Ms	F-Value	P-Value
Regression	6	0,057638	0,009606	35,92	0,027
<i>h</i>	1	0,000005	0,000005	0,02	0,900
<i>v</i>	1	0,013457	0,013457	50,31	0,019
<i>P</i>	1	0,016020	0,016020	59,89	0,016
$\ln(h)$	1	0,000030	0,000030	0,11	0,768
$\ln(v)$	1	0,014420	0,014420	53,91	0,018
$\ln(P)$	1	0,015825	0,015825	59,17	0,016
Error	2	0,000535	0,000267		
Total	8	0,058173			
S=0,0163545 R-Sq=%99,08 R-sq(adj)=%96,32					

Matematiksel model, ANOVA'ya dayalı olarak belirlenen önemli faktörler için oluşturuldu. Matematiksel model (Denklemler 18) temel alınarak, $v = 1000$ mm/s, $h = 90$ μm ve $P = 200$ W işlem değerleri için en az yüzey pürüzlülüğü hesaplandı. Bu durumda hesaplanan yüzey pürüzlülüğü parametreleri $R_a = 16.04$ μm 'dir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri deneysel olarak $R_a = 16.41$ μm olarak ölçüldü. Bu

tabloda, işlem parametrelerinin son yüzey kalite sonuçları üzerindeki etkisi bir katkı olarak gösterilmiştir. Matematiksel model, lazer gücü ve tarama hızının değerler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir, oysa tarama aralığının yüzey pürüzlülüğü sonuçları üzerinde neredeyse hiç etkisi yoktur. Tarama aralığı, erime karakteristiğinin çıktısı olan yoğunluk üzerinde etkisi vardır. Yüksek veya düşük tarama aralığı, yapının kalitesini etkileyebilir (Dutt et al., 2023; R. Li et al., 2010). Başka bir deyişle, lazer gücü ve tarama hızı, nihai yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için ana kriterlerdir. Bu tabloda, DF serbestlik derecesini, SS karesel toplamlarını ve MS ortalama karelerini ifade etmektedir. F-değeri, terimin yanıtla ilişkili olup olmadığını belirlemek için kullanılan test istatistiğidir. Yeterince büyük bir F-değeri, terimin önemli olduğunu gösterir. Ortalama yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için kullanılan matematiksel modelde, etkileşim terimleri modelin anlamlılık düzeyini artırmak için logaritmik fonksiyonlar olarak seçilmiştir. Ayrıca etkileşim terimlerinden lazer gücü ve tarama hızının yanıtla bağlı olduğu açıktır.

Regresyon analizinin yoğunluk için sonuçları Tablo 8.14'te yoğunluk için regresyon denklemini katsayıları gösterilmiştir. Yoğunluk ile işlem parametreleri arasındaki aşağıdaki korelasyonu vermektedir:

$$\rho = 3,635 + 0,06747h - 0,000407v - 0,02134P - 0,000017h * v + 0,000052P * P - 0,000275h * h + 0,000001v * v \quad (19)$$

Tablo 8.14. Yoğunluk için regresyon denklemi katsayıları

Source	DF	Adj SS	Adj Ms	F-Value	P-Value
Regresyon	6	0,004482	0,000640	352,74	0,041
<i>h</i>	1	0,002246	0,002246	1237,38	0,018
<i>v</i>	1	0,000008	0,000008	4,50	0,280
<i>P</i>	1	0,000143	0,000143	79,05	0,071
<i>P*P</i>	1	0,000697	0,000697	384,19	0,032
<i>h * h</i>	1	0,000147	0,000147	81,25	0,070
<i>v * v</i>	1	0,001515	0,001515	834,69	0,022
error	2	0,000294	0,000294	162,07	0,050
Total	8	0,000002	0,000002		
S=0,0013472 R-Sq=%99,96 R-sq(adj)=%99,68					

Lazer gücü, tarama hızı ve tarama aralığı açısından görelî yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü için öngörücü doğrusal regresyon matematiksel modeller geliştirildi. Belirlilik katsayısı (R-kare), deneysel veriler üzerinde türetilmiş ampirik modellerin doğruluğunu ölçmek için kullanılır. R-kare değeri, 0 (0%) ile 1 (100%) arasında değişir. R-kare değeri ne kadar yüksekse, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki korelasyon o kadar iyidir (Dutt et al., 2023). R-sq (adj) ve R-sq arasındaki farkın minimize edilmesi, modelin öngörü yeteneğini artırır. R-sq (adj) değerleri %85'ten büyükse iyi bir uyum gösterdiğini gösterir (Saha, 2017). Varyans analizi (ANOVA),

modelin uygunluğunu ve parametrelerin lineer, karesel etkileri ve etkileşimlerinin anlamlılığını kontrol etmek için yapılmıştır. Geliştirilen modelin kalitesi, R-kare katsayıları ile belirlenmiştir. Bu R-kare katsayıları 0 ile 1 arasında değerlere sahiptir ve R-kare ne kadar 1'e yakınsa, model yanıtı tahmin etme yeteneği o kadar iyidir. Ancak, R-kare önemsiz terimler modeline eklenirse artar. Bu nedenle, modelin uygunluğu kriteri olarak düzeltilmiş R-kare önerilmektedir (Bartolomeu et al., 2016). Yoğunluk modelinde, P , h ve v 'nin p-değerleri tümü de 0.05'ten küçüktür, bu da regresyon modelinde bu faktörlerin çok anlamlı olduğunu gösterir. Etkileşimler açısından, PP , hh ve vv terimleri bu model için anlamlı terimlerdir, çünkü p-değerleri 0.05'ten küçüktür. Bu durumda, yoğunluk için kullanılan matematiksel modelde $P*P$ ve $v*v$ etkileşim terimlerinin anlamlı olduğu söylenmektedir.

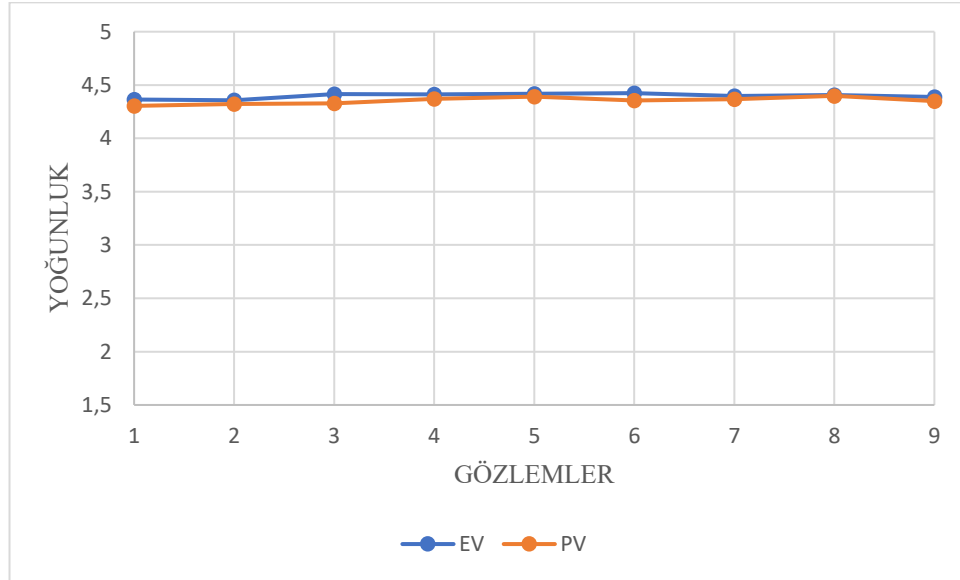
Deneyisel veriler ve tahmin edilen veriler Denklemler 18 ve 19 kullanılarak hesaplandı. Tablo 8.15. Tahmin edilen ve deneysel yoğunluk değerleri ve hataları, Tablo 8.16. Tahmin edilen ve deneysel yüzey pürüzlülüğü değerleri ve hataları göstermektedir. Ayrıca, 9 çalışma için deneysel ve tahmin edilen değerler grafik olarak çizildi (Şekil 8.4 ve Şekil 8.5).

Tablo 8.15. Tahmin edilen ve deneysel yoğunluk değerleri ve hatalar

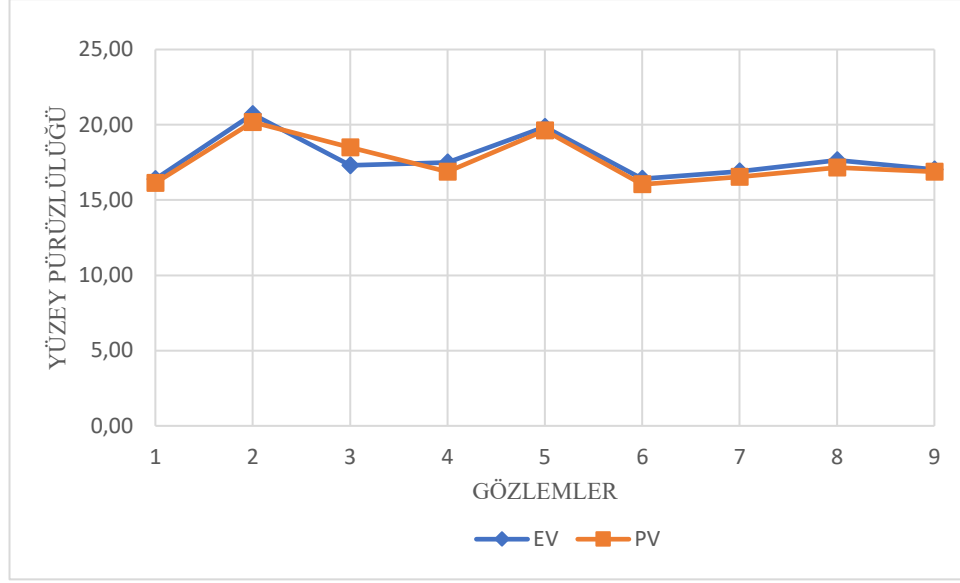
No.	Deneysel değer (EV)	Tahmini değer (PV)	Error (%)
1	4,3645	4,3043	1,37931
2	4,356933	4,3216	0,81096
3	4,4164	4,3276	2,010687
4	4,4123	4,3691	0,979081
5	4,4179	4,3922	0,581724
6	4,4238	4,3548	1,559745
7	4,3979	4,3677	0,686691
8	4,4076	4,3984	0,20873
9	4,389533	4,3476	0,955295

Tablo 8.16. Tahmin edilen ve deneysel yüzey pürüzlülüğü değerleri ve hatalar

No.	Deneysel değer (EV)	Tahmini değer (PV)	Error (%)
1	16,39	16,14	0,484084
2	20,70	20,18	0,838309
3	17,30	18,49	-2,33673
4	17,50	16,89	1,239133
5	19,86	19,62	0,395453
6	16,41	16,04	0,819878
7	16,90	16,55	0,749235
8	17,64	17,15	0,969358
9	17,02	16,88	0,303264



Şekil 8.4. Deneysel (EV) ve tahmin edilen (PV) yoğunluk değerleri



Şekil 8.5. Deneysel (EV) ve tahmin edilen (PV) yüzey pürüzlülüğü değerleri

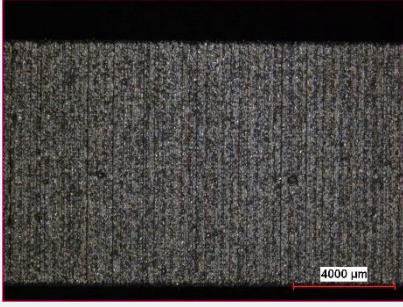
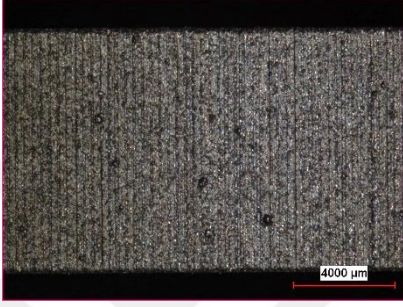
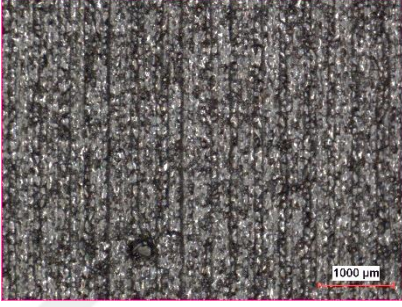
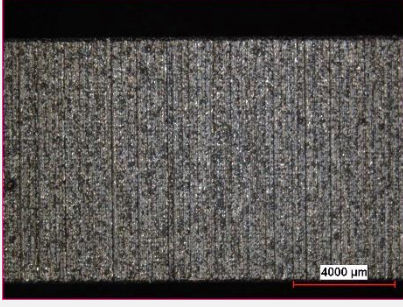
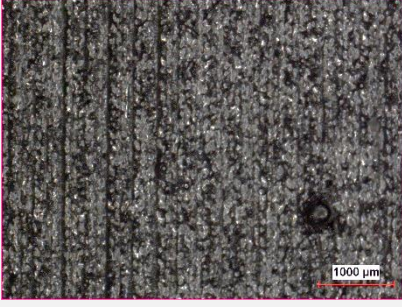
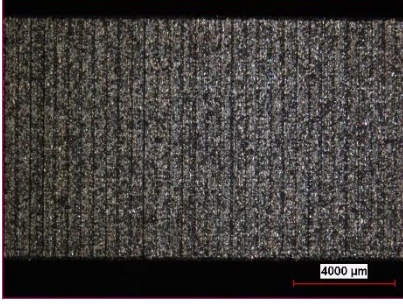
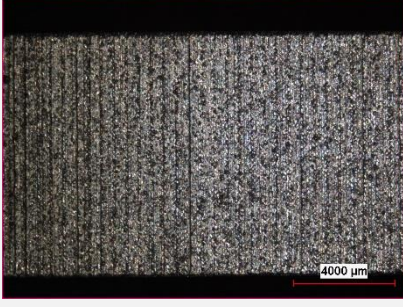
Bu çalışmanın sonucunda, 90µm tarama aralığı, 1000 mm/s tarama hızı ve 200 W lazer gücü ile hazırlanan örnek, daha yüksek yoğunluk (%99,86) ve optimum bir yüzey kalitesi (R_a 16,41 µm) sergilemiştir.

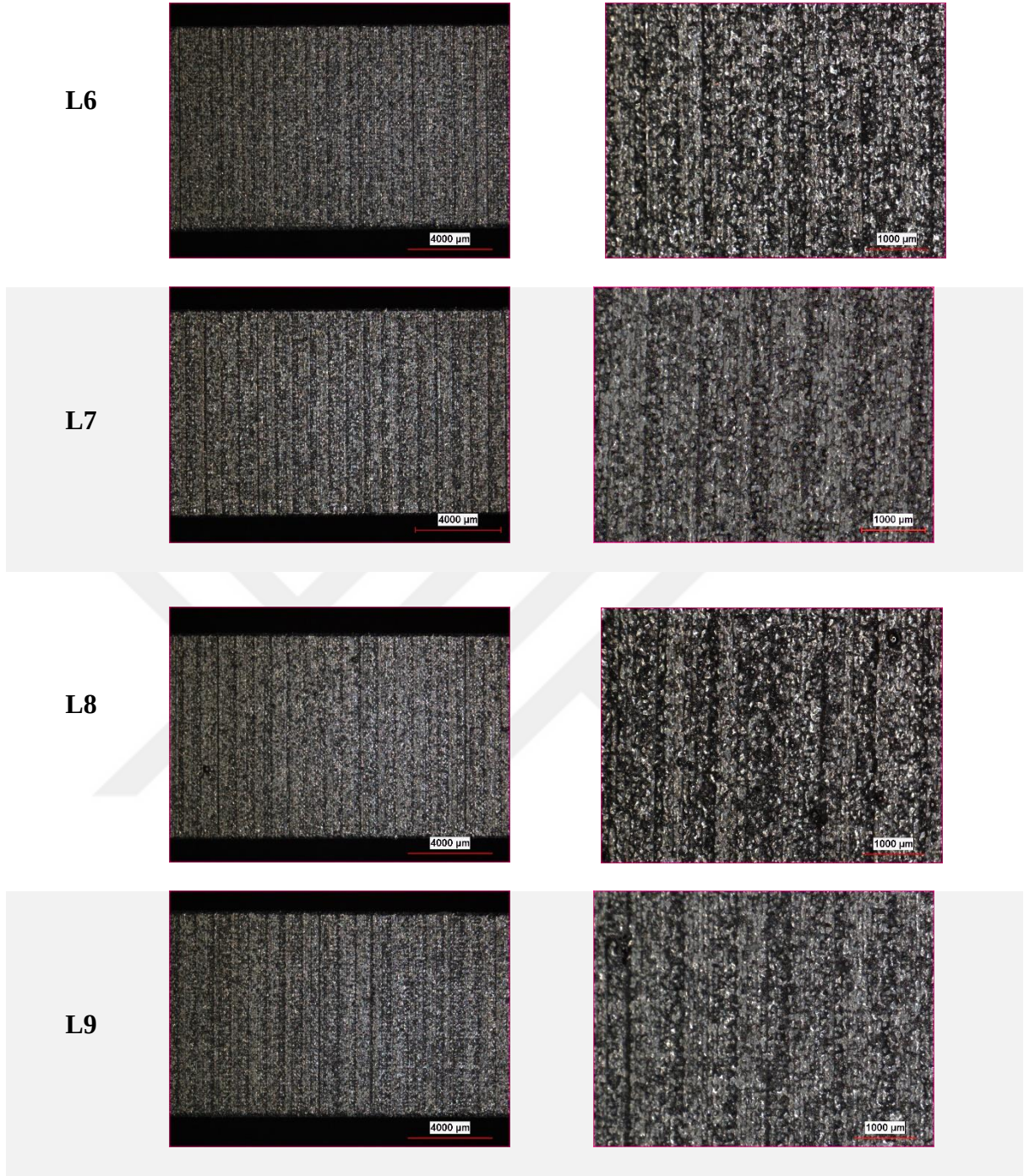
Yapılan optimizasyon sonucu Ermaksan firmasında üretilecek bilyalı dövme numuneleri için L6 parametre seti seçilmiştir.

8.2. SLM Numunelerinin İncelemeleri

8.2.1. Yüzey durumu incelemeleri

SLM numunelerindeki tarama izleri, yüzey SM görüntülerinde kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. Yazdırılan katman, 90°'lik lazer izi tarama yönlerine sahiptir ve tarama izleri, her SLM katmanında 90° döndürüldü. Şekil 8.6'de SLM numunelerinin SM görüntüleri verilmiştir.

Numune	6,7X büyütm	20X büyütm
L1		
L2		
L3		
L4		
L5		



Şekil 8.6. SLM numunelerinin SM görüntüleri

Üretilen SLM numunelerinin SM görüntülerine göre tüm numunelerin boyutsal doğruluğu iyi düzeydedir. Numunelerin üst ve alt yüzeyleri paraleldir. Düşük yoğunluğa sahip L2 ve en yüksek yoğunluğa sahip L6 serileri için tarama izleri arasındaki varsayılan tarama aralığı (h) sırasıyla 80 ve 90 µm olmalıdır, ancak

mikroskopik inceleme tarama aralığının erime nedeniyle biraz genişlediğini göstermektedir. Ancak yine de L2'nin tarama aralığının daha dar olduğu dikkat çekmektedir. Öte yandan L2 yüzeyindeki büyük gözenekler SM görüntülerinde bile fark edilmektedir.

8.2.2. Mikroyapı ve kusurların incelemeleri

β tanesinin önemli bir kısmını oluşturan α' fazının, büyük sıcaklık gradyanları (10^6 K/m), benzer şekilde yüksek soğutma hızları (10^8 K/s) ve çoklu ısıtma-soğutma döngülerinin bir sonucu olarak SLM işlemi sırasında oluşan ayırt edici mikroyapı olduğu bilinmektedir (J. Yang, Yu, et al., 2016).

Şekil 8.7'de SLM numunelerinin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Metalografik araştırmalar optimize edilen SLM parametresinin (L6) yanında en düşük enerji yoğunluğunun elde edildiği L9 parametresinde ve en yüksek enerji yoğunluğunun elde edildiği L5 parametresinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.18'de gösterilen SLM numunelerinin metalografik fotoğrafları, uygun parametreler altında güçlü bir metalürjik bağ bulunduğunu gösterir. 90° lik tarama açısına bağlı oluşabilecek ve tarama aralığı büyüklüğüne tekabül eden büyüklüklerde izlere rastlanmamıştır. SLM işleminin tipik bir özelliğini gösteren α' martenzitlerini çevreleyen sütunsu β taneleri kesitlerde açıkça görülebilir. Sütunsu tanelerin içinde enerji yoğunluğuna bağlı boylarının değiştiği çok miktarda ince iğnemsiz α' martenzitleri gözlenmiştir. Çoğu α' martenzit, önceki β tane sınırlarında çekirdeklenir ve birkaç α' martenzitin komşu β tanelerine yayılmasına rağmen, ana β taneleri içinde büyür (Sing et al., 2016; J. Yang, Yu, et al., 2016). Enerji yoğunluğu (E_v) arttıkça iğnemsiz martenzitlerin inceldiği farkedilmektedir. SLM sırasında, daha yüksek bir E_v , daha yüksek bir sıcaklık gradyanı ve soğutma hızı oluşturabilir (Sing et al., 2016). Sıcaklık gradyanı ile aşırı soğutma arasında ters bir korelasyon vardır (Tolou & Awwall, 1976). Yüksek bir E_v altındaki dik sıcaklık gradyanı, azalan aşırı soğumaya neden olur; böylece çekirdeklenme potansiyeli azalır ve kaba sütunlu bir tane yapısı oluşur. Daha yüksek bir E_v altında daha yüksek soğutma hızı, daha hızlı bir α' çekirdeklenme oranını indükleyebilir, bu da α' fazının inceltilmesine yardımcı olur. Dolayısıyla, SLM Ti6Al4V numunelerinin mikroyapılarının E_v ile yakından ilişkili olduğu ileri sürülür

(Bormann et al., 2014; Han et al., 2017). SLM parametrelerin işlevi, lazer ışınının hacimsel bir toz malzeme birimine sağladığı enerji miktarı anlamına gelen lazer enerji yoğunluğu olduğu ifade edilir (Attar, Calin, et al., 2014; Liverani et al., 2016; Qiu et al., 2013). Yoğunluğun artmasına yol açan çeşitli yaklaşımlar mümkündür. Tarama hızının azalması ve lazer gücünün artmasıyla yoğunluğun artması yönünde genel bir eğilim vardır. Proses parametrelerindeki bu tür bir değişiklik, daha yüksek enerji yoğunluğuna, dolayısıyla daha yüksek sıcaklığa ve daha yüksek miktarda erimeye neden olur. Bununla birlikte, toz tamamen eridiğinde, enerjinin daha da arttırılmasının pek bir faydası yoktur. Beta alaşımı Ti2448 için artan yoğunluğun 600 mm/s'nin altındaki hızlarda bir plato eğilimi gösterdiği, ancak eriyik havuzunda toplama ve cüruf oluşumu meydana geldikçe 300 mm/s'de tekrar düştüğü gösterilmiştir (Attar, Calin, et al., 2014). Kasperovich ve ark. (2010a) Ti6Al4V alaşımı için ideal enerji yoğunluğunun 117 J/mm³ olduğunu göstermiştir. Elbette gözeneklilik genel bir sorundur ve henüz hiç kimse %100 bağıl yoğunluğa sahip numuneler hazırlamamıştır. Her ne kadar Thijs ve ark. (2010a) %99,9 yoğunluğa ulaşmış, ancak bazı gözenekler hala mevcuttu. Böyle bir başarı, çapraz taramalı tarama stratejisinin zigzag tarama vektörleri ile uygulanmasıyla elde edilmiştir. Betaya yakın T-5553 alaşımı ile Schwab ve ark. (2016) %99,95 yoğunluğa bile ulaşıldı. Burada tarama stratejisinin önemi de vurgulandı.

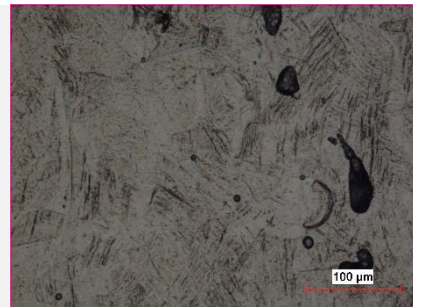
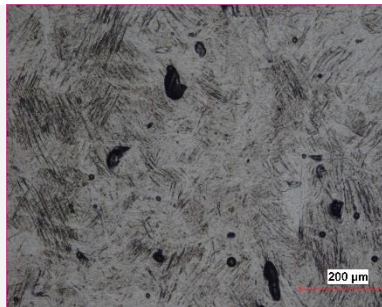
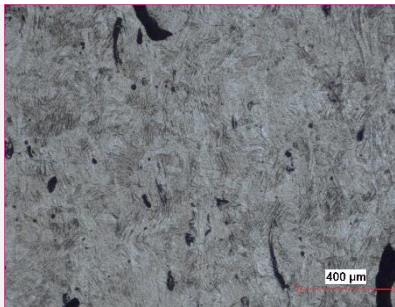
Numune

5X Büyütme

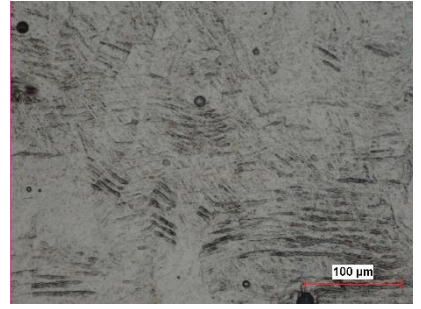
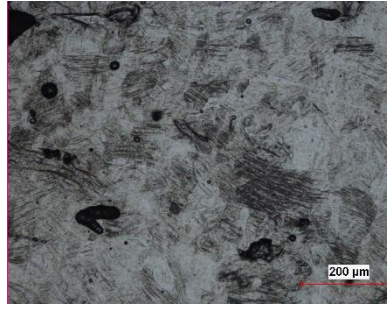
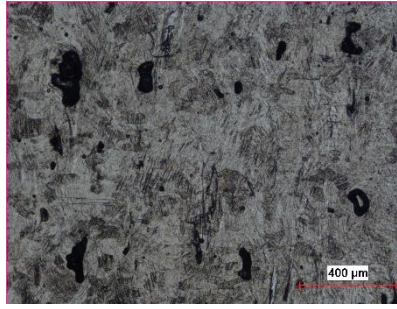
10X Büyütme

20X Büyütme

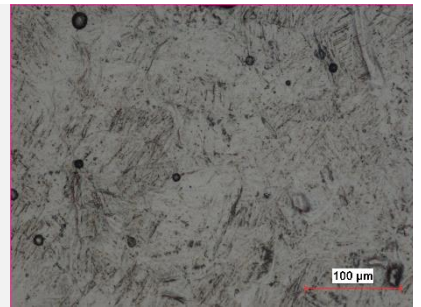
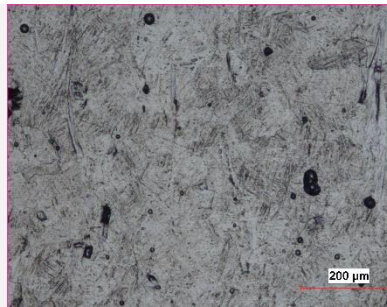
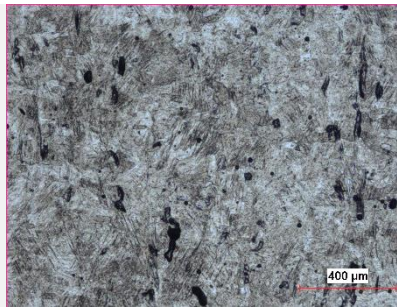
L1



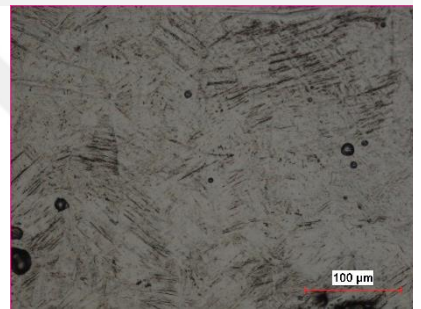
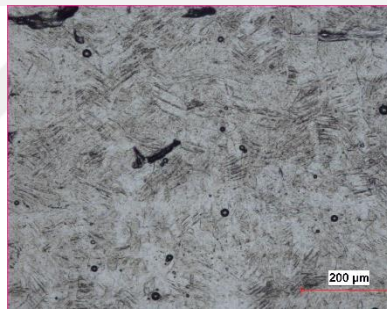
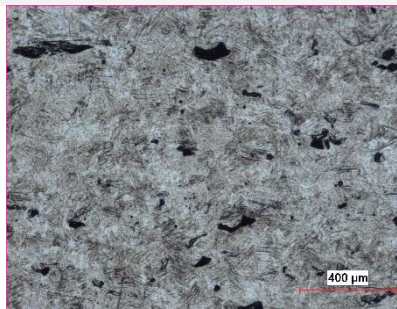
L2



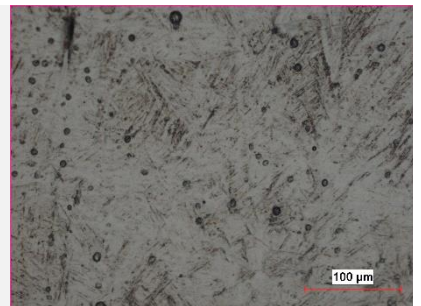
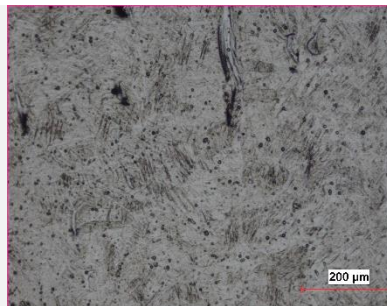
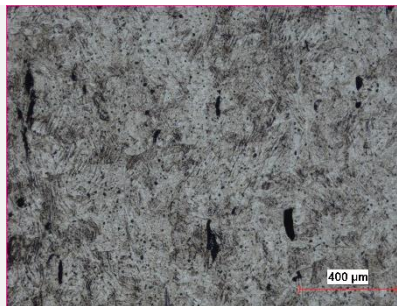
L3



L4



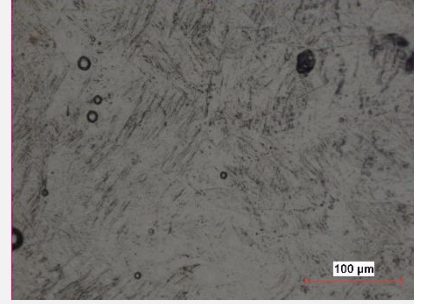
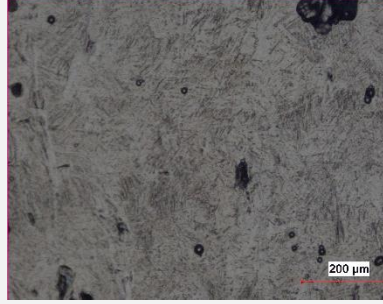
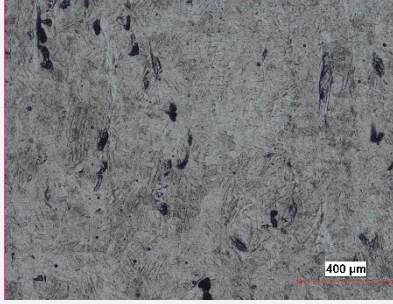
L5



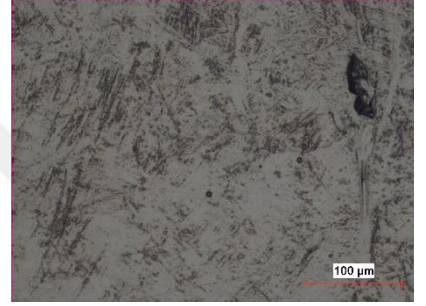
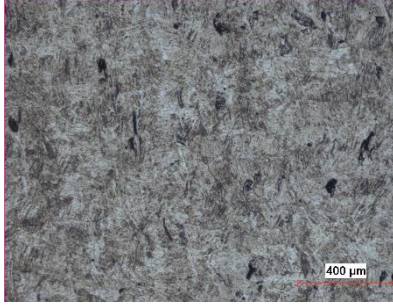
L6



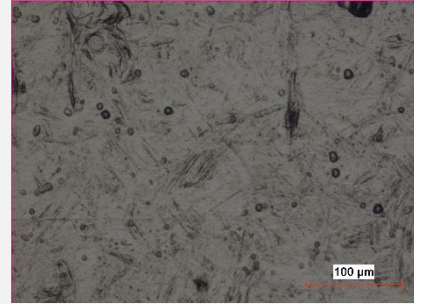
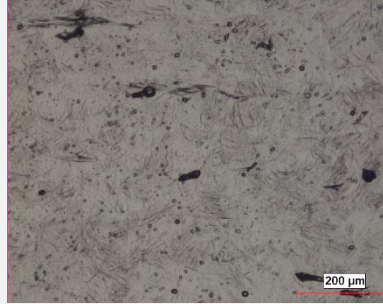
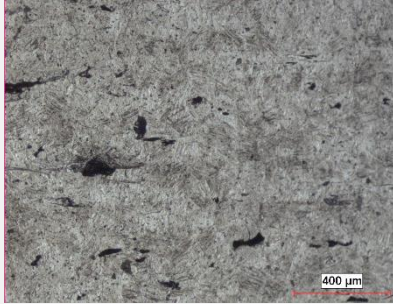
L7



L8



L9



Şekil 8.7. SLM numunelerinin mikroyapı görüntüleri

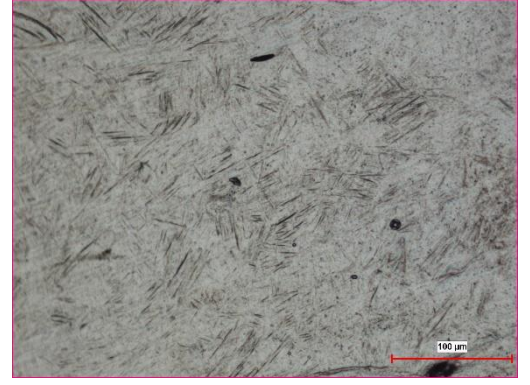
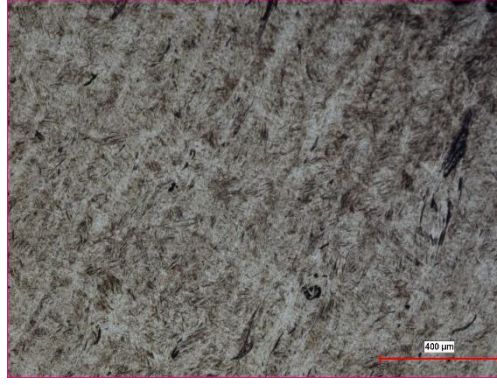
Kesit incelemelerde görüntülenen mikroyapılarda gözenek durumu parametrelere bağlı farklılık göstermektedir. Eniyilenmiş parametre olan (L6) 90μm tarama aralığı, 1000 m/s tarama hızı ve 200W lazer gücünde üretilen numunelerin mikroyapılarında oldukça az gözenek oluşumu raporlanmıştır. Bunun yanında en düşük ve en yüksek enerji yoğunluklarında elde edilen SLM numunelerinde görece

fazla gözenekler dikkat çekmektedir. Bu çalışmada seçilen enerji yoğunluğu büyüklüklerinden ister düşük ister yüksek seviyede olsun SLM üretimin handikaplarından olan füzyon eksikliğine bağlı erimemiş tozların bulunduğu iri gözeneklere rastlanmamıştır, doluya oldukça yakın numuneler elde edilmiştir. L6 parametresinde küresel olan sıkışmış gaz gözenekliliği yanında yer yer erime eksikliğinin olduğu kılcal gözenekler yer almaktadır. L5 ve L9’ da ise bütünde küçük boyutlu erime eksikliğine bağlı düzensiz geometrideki gözenekler bulunurken, füzyon eksikliğinin yanı sıra çatlak tipinde daha büyük gözeneklerin bulunduğu dikkati çekmektedir. Yüksek enerji yoğunluklarında daha düşük büyüklükte yaklaşık 1µm-15µm aralığında değişen gözenekler mevcutken, düşük enerji yoğunluğunda 2µm-50µm aralığında değişen gözenekler yer almaktadır (Şekil 8.8).

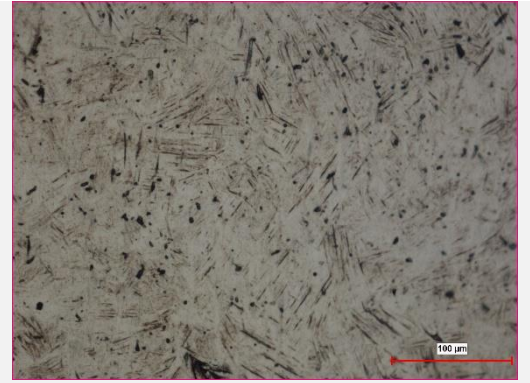
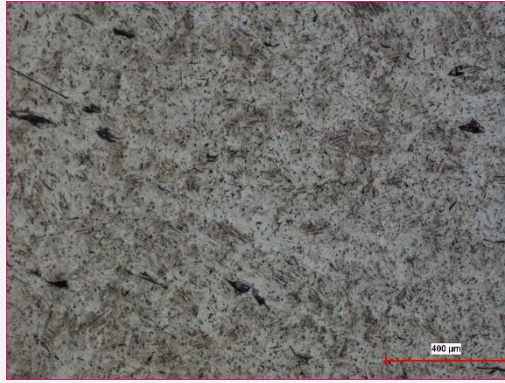
Gözeneklerin düzensiz şekilli olduğu ve düzleştiği fark edilebilir. Bu gözenekler, yetersiz erimenin veya daha sonra eriyen izlerin birbirine bağlanmasının bir sonucudur.



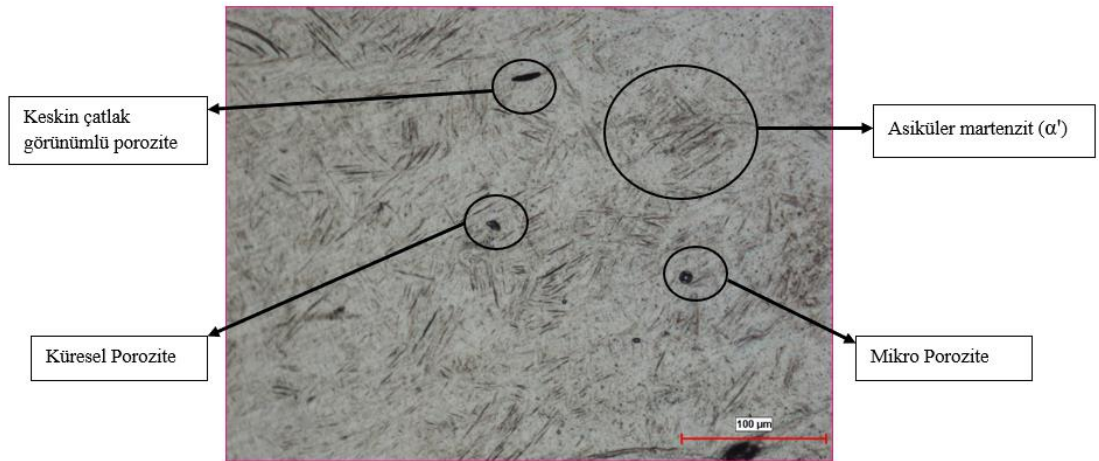
L6



L9



Şekil 8.8. SLM L5, L6 ve L9 numuneleri mikroyapıları



Şekil 8.9. SLM L6 numunesinin 20X büyütme altında içyapı görüntüsü

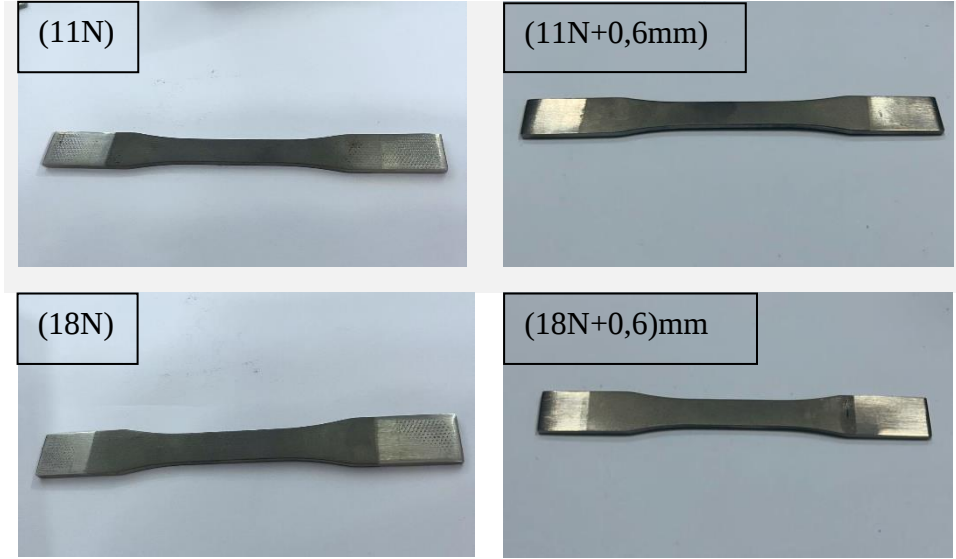
SLM L6 numunesine kesitten bakıldığında; az sayıda mikro poroziteler, küresel poroziteler ve keskin çatlak görünümlü poroziteler gözlenmiştir (Şekil 8.9). Az sayıda olan bu gözenekler numune toplamında bağıl yoğunluk olarak en yüksek çıkmasını sağlamıştır.

8.3. Bilyalı Dövme Numunelerinin İncelenmesi

8.3.1. Bilyalı dövme numunelerinin yüzey durumu incelemeleri

Farklı parametrelerde üretilen SLM numunelerinin Bilyalı dövülmüş alanın toplam alana oranına yüzey örtme oranı denir. BD sürecinin homojenliğinde kullanılan çok önemli bir ölçümdür. Yüzey örtme oranı öncelikle gözlem yoluyla belirlenir ve belirlenmiş bir metodolojiye sahip değildir. Doyma aşamasından sonra belirlenen almen yoğunluğu elde edilir ve daha sonra önceden belirlenen yüzey kaplama oranına ulaşıncaya kadar BD işlemi gerçekleştirilir. Uygulamalarda genellikle %100 ve %200 yüzey kaplama oranları kullanılır (Miao et al., 2010).

Bilyalı dövme işlemi uygulanmış numuneler Şekil 8.10'de verilmiştir. Çalışmada yüzey örtme oranını tespit etmek için stereo mikroskop ile bilyalı dövmenin homojenliğine bakılmıştır. Bilyalanmış numunelerin 6,7x büyütme, 10x büyütme ve 20x büyütmedeki ön ve arka yüzeylerinden alınmış stereo mikroskop görüntüleri Şekil 8.11'de gösterilmiştir. Böylece her iki yüzeyin homojen olarak işlendiği tespit edilmiştir.



Şekil 8.10. Bilyalı dövme uygulanmış numunelerin görselleri

Numune	6,7X Büyütme	10X Büyütme	20X Büyütme
11N Ön Yüzey			
11N Arka Yüzey			

**18N Ön
Yüzey**



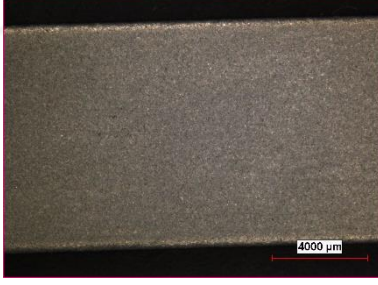
**18N Arka
Yüzey**



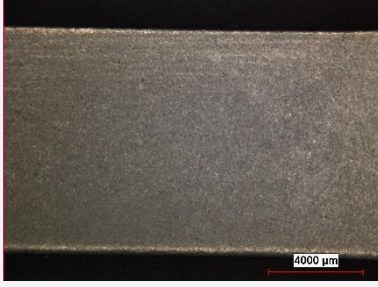
**11N+0,6mm
Ön Yüzey**



**11N+0,6mm
Arka Yüzey**



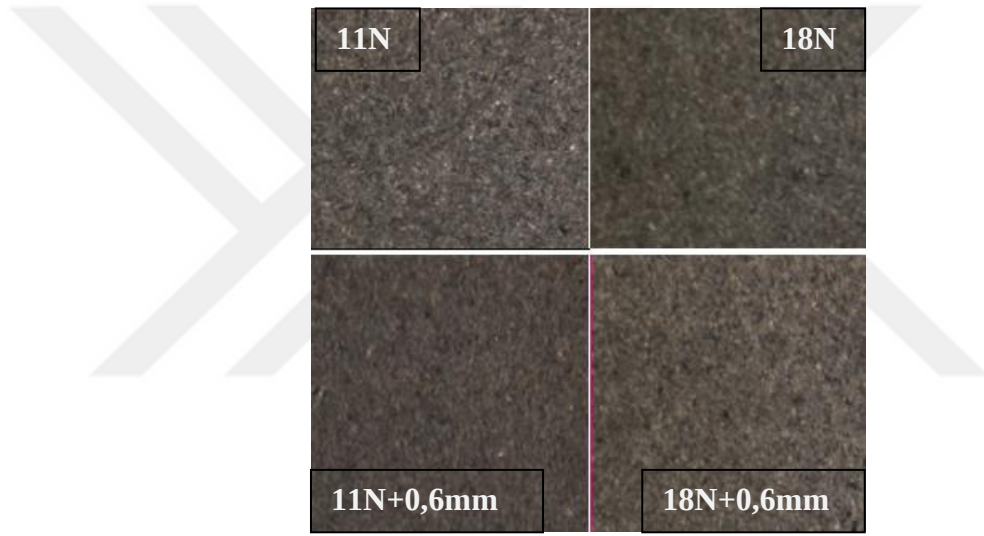
**18N+0,6mm
Ön Yüzey**



**18N+0,6mm
Arka Yüzey**



Şekil 8.11. Farklı büyütmelerde bilyalı dövme yüzey SM görüntüleri

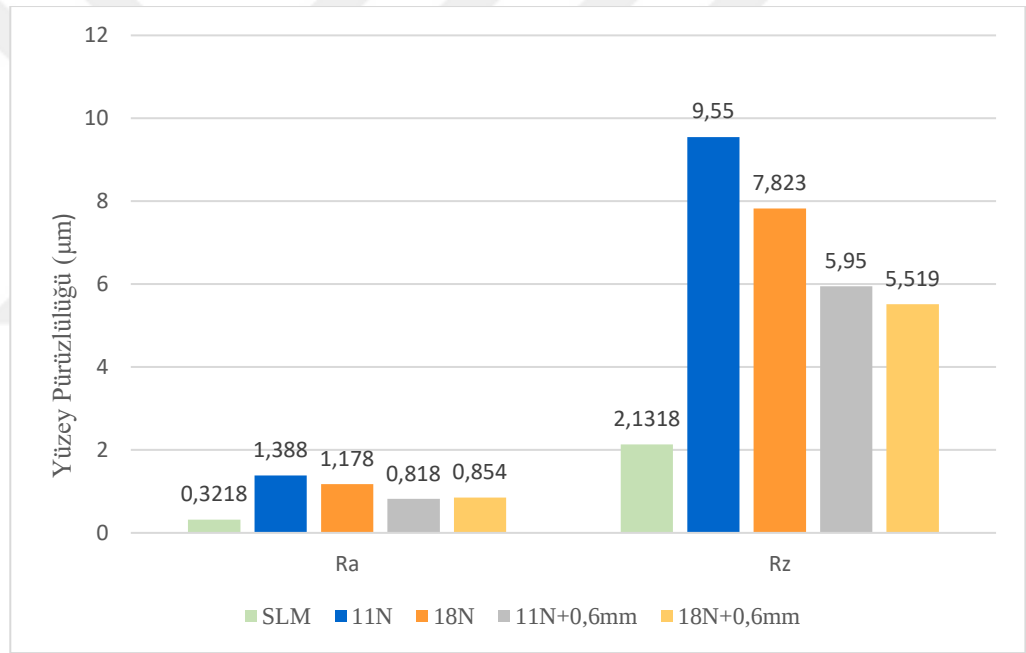


Şekil 8.12. BD yapılmış numunelerin SM yüzey görüntülerinin karşılaştırılması

Bilyalı dövme işlemi sonrası pürüzlülük ölçümleri Şekil 6.15'te görülen ölçüm yönü ile gerçekleştirilmiştir. Her numunenin hem arka hem de ön yüzeylerinden 5 adet ölçüm alınmıştır.

Düşük dövme şiddetindeki bilyalı dövme işlemi ve şiddetli bilyalı dövülmüş Ti6Al4V arasında yüzey morfolojisinde ciddi bir fark olmadığını gösterir. Düşük şiddette bilyalı dövme işlemi, malzeme üzerinde birçok küçük çukur oluşturmuştur (Şekil 8.12). Şiddetli Almen şiddetindeki dövmelerle arasında karşılaştırma yapıldığında 18N gibi şiddetli bir dövme ile bile yüzeyde geniş çukurların oluşmadığı ancak çok sayıda ve sık çukurların meydana geldiği görülür. Düşük Almen şiddetinde

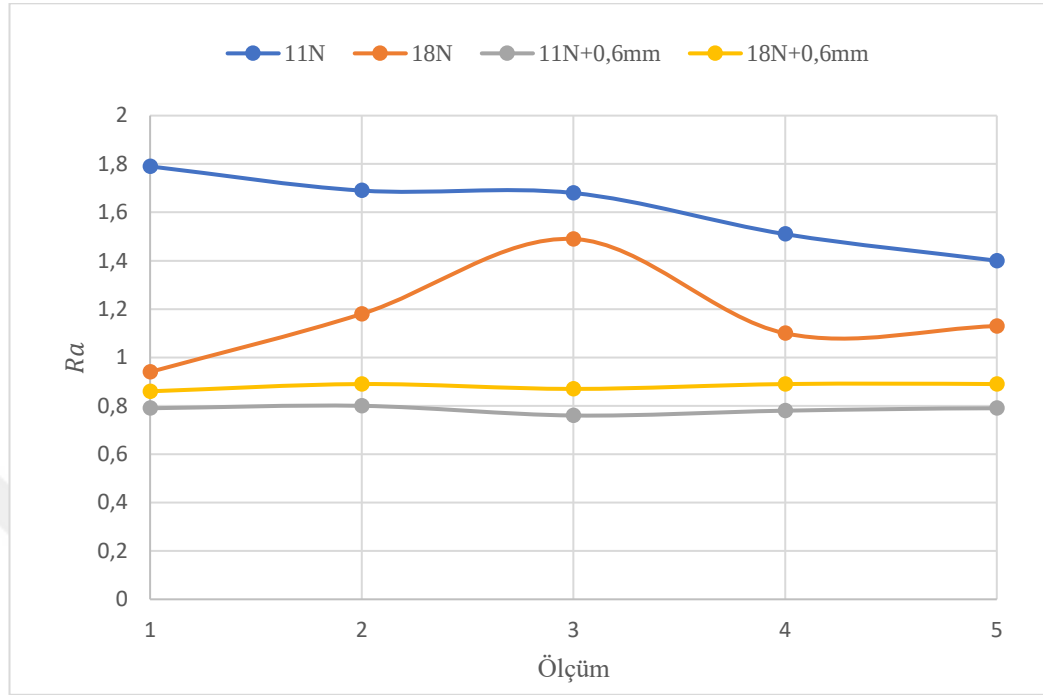
çukurlar daha net çukur yapısı oluşurken, Almen şiddeti arttıkça çukurların aslında küçülerek net olmayan bir görüntüye sahip olduğu dikkati çekmektedir. Bu durumu Şekil 8.13'te verilen YP grafikleri desteklemektedir. Almen şiddeti arttıkça hem R_a hem R_z değerleri açık şekilde düşmüştür. Dolayısıyla Almen şiddetinin Şiddetli dövme seviyesine çıkması ile SLM Ti6Al4V parçalarda yüzeyde daha küçük çukurlar oluşturarak malzeme yüzeyini değiştirmesi dikkat çekicidir. Bu da şiddetli bilyalı dövmenin bilyalama süresinin arttırılması yoluyla gerçekleştirildiği bu tez çalışmasında, bilyalı dövmenin başında dövülmüş ve sertleşmiş yüzeyin uzun süre dövülmenin sonucu nihai yüzeyde daha küçük çukurların yaratılması ile sonuçlandığını gösterir.



Şekil 8.13. Farklı Almen şiddetlerinde BD sonrası R_a ve R_z değerlerinin karşılaştırılması

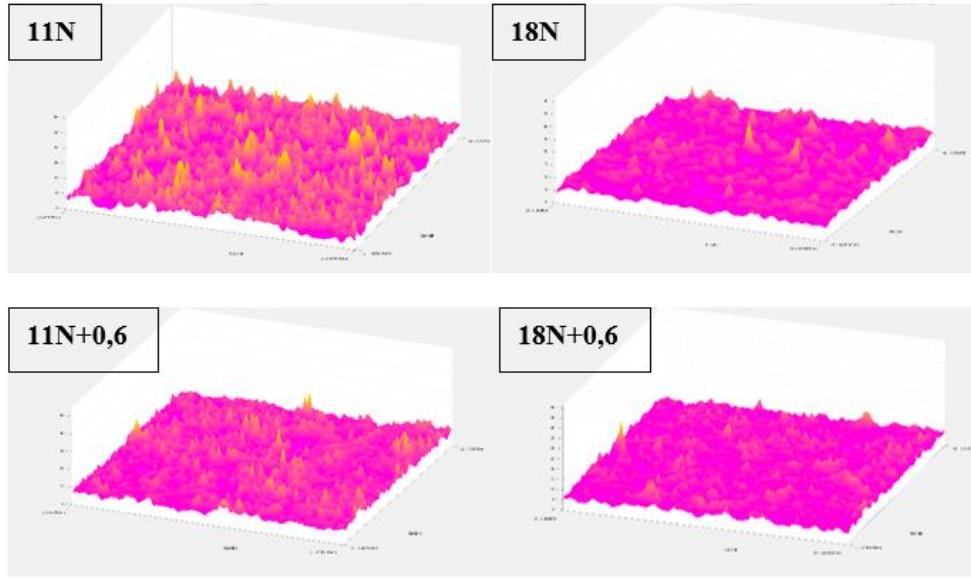
Şekil 8.14'te verilen grafiğe bakıldığında çoklu dövme ile ABD yapıldığında numunelerin YP değerleri birbirine çok yakın değerler çıkmıştır. Bunun sebebi olarak, bu çalışmada Almen şiddeti bilyalama süresinin arttırılması ile arttırıldığı dikkate alındığında, bilyalama süresinin artmasıyla bilyaların daha derin çukurlar oluşturmak yerine, bir önceki aşamada oluşmuş olan çıkıntıları döverek yüzeyi

iyileştirme etkisi yaratmasıdır. Artık yüzey sertliğinin doyuma ulaşması ile kullanılan bilya boyutları ile ulaşılabilecek R_a limiti de belirlenmiştir.



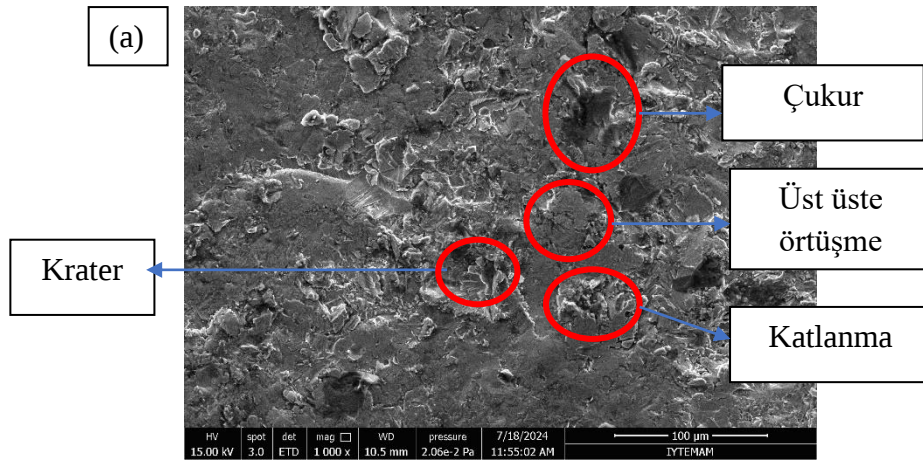
Şekil 8.14. Farklı Almen şiddetlerinde BD sonrası homojenlik için R_a karşılaştırması

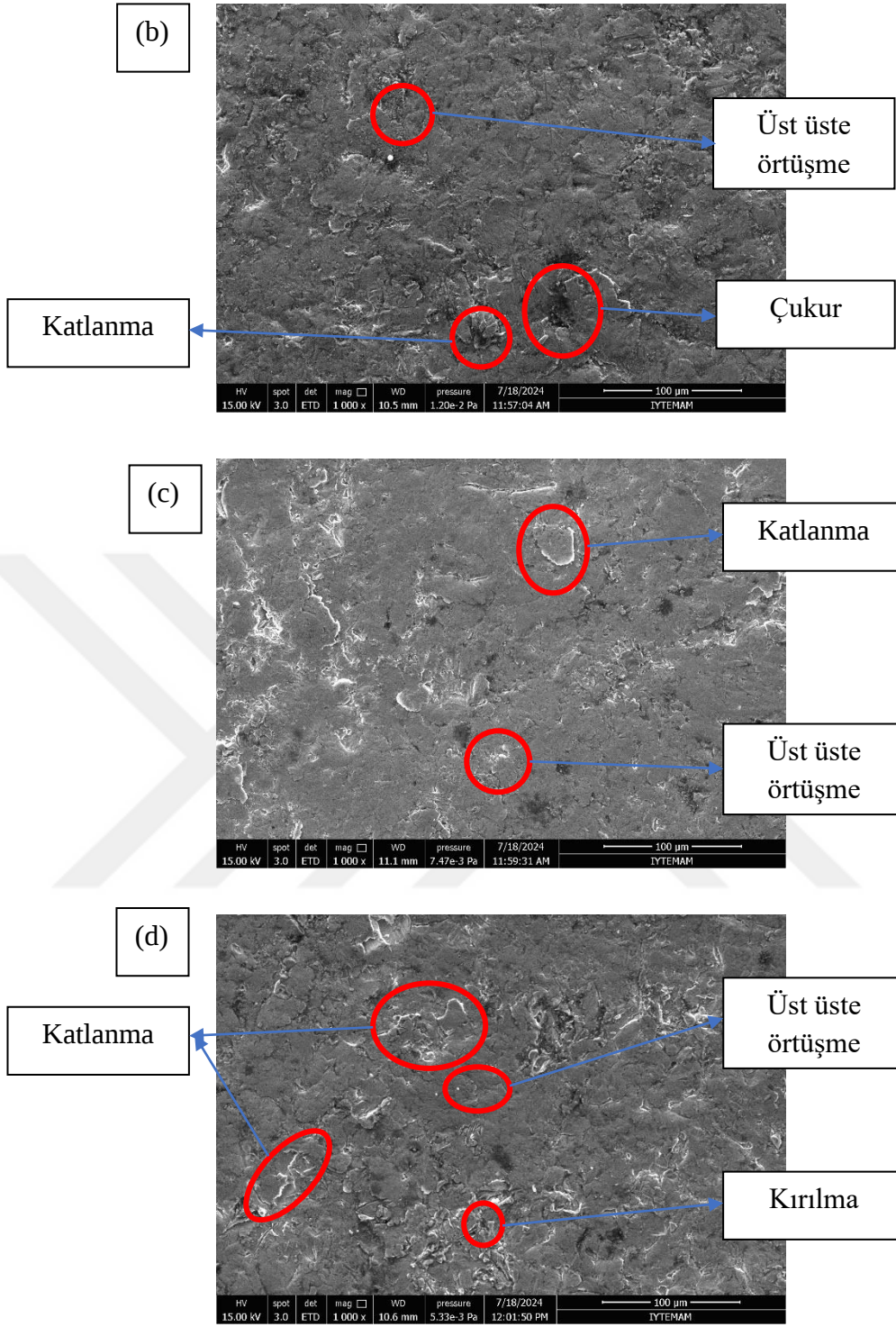
Bilyalı dövülmüş yüzeylerden stereo mikroskop yüzey görüntüleri işlenerek elde edilen 3D yüzey topografyası Şekil 8.15'te verilmiştir. Görüldüğü üzere Almen şiddeti attığında yani ŞBD ve ABD dövme yapıldığında malzemenin pik değerlerinde azalma meydana gelmiştir.



Şekil 8.15. Bilyalı dövülmüş yüzeylerin 3D yüzey topografyası

Bilyalı dövme işlemi sonrası yüzey topografyası ve yüzey pürüzlülüğü değişmektedir. Yüzey pürüzlülüğü genellikle geleneksel bilyalı dövmeden sonra artar ancak çoklu dövme işlemi gibi bazı özel uygulamalarda yüzey pürüzlülüğü değeri hafifçe iyileşebilir veya azalabilir. Pürüzlülük parametreleri tek başına bilyalı püskürtme sırasında ortaya çıkan tipik yüzey kusurlarını tam olarak yansıtmaz, kıvrımlar ve mikro çatlaklar gibi. Bu nedenle numunelerin yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak daha fazla analiz edilmiştir. Şekil 8.16’de BD işlemi sonrası numunelerin yüzey topografya görüntüsü verilmiştir.





Şekil 8.16. BD işlemi sonrası numunelerin yüzey topografya görüntüsü (a) 11N, (b) 18N, (c) 11N+0,6mm (d) 18N+0,6mm

Bilyalı dövmeden sonra tüm yüzeylerde plastik deformasyon meydana gelmiştir. Yüzeyin plastik deformasyonla modifikasyonu, artan yüzey pürüzlülüğünün ana nedeni olarak düşünülebilir (M. Abdulstaar et al., 2014; Trško et al., 2014; Vázquez et al., 2012).

Şekil 8.16 incelendiğinde 11N şiddeti ile dövülmüş GBD yüzey SEM görüntülerinde krater oluşumunun keskin hatlı şekilde kraterler ve kırık parçalar olduğu dikkati çekmektedir. Atışın yüksek kinetik enerjisi, basılı numunenin yüzey tabakasına nüfuz ederek yapısal kopukluğa neden olmuştur. Her bilyalı dövme kinetik enerjisini aktardıkça, numune yüzeyindeki plastik deformasyon kraterler oluşturabilir. Bu mekanizma, bilyalı dövme sırasında birkaç kez tekrarlanır ve yüzeyi bir dereceye kadar tepe noktaları (yığılmanın yüksek noktalarıyla karakterize edilir) ve vadiler (kraterlerin düşük noktalarıyla karakterize edilir) oluşturarak değiştirir (Trško et al., 2014; D. Wu et al., 2018). Bu durum 11N şiddetindeki dövme sonucu yüzeylerinde meydana gelmiştir.

ŞBD işlenmiş 18N numunelerinde ise krater oluşumu azalırken, katlanmaların daha fazla olmaya başladığı ve yüzeyin giderek düzeldiği göze çarpmaktadır. Yüzey bütünlüğünü iyileştirmek için, almen yoğunlukları arttırılmıştır. ABD operasyonunun çoklu dövme yöntemi ile meydana getirildiği numunelerde ise katlanma bölgelerinin yer aldığı tespit edilmiştir. Bu noktadan sonra, dövme süresinin artırılması ve üst üste binen sonraki izlerin yüzey topografyasını yeniden değiştirmesine neden olur (Luong & Hill, 2010; Nam et al., 2015) genellikle aşırı bilyalı dövme etkisi olarak adlandırılır ve mekanik özellikleri iyileştirmek yerine yüzeyde mikro çatlaklar ve delaminasyon oluşumuna neden olabilir (Nam et al., 2015; Scuracchio et al., 2013).

Özetlemek gerekirse, BD' nin neden olduğu plastik deformasyon başlangıçta vadiler ve tepelikler oluşturur ve bu da yüzey pürüzlülüğünde bir miktar artışa yol açar. Buna karşılık, dövme süresi arttıkça yüzey düzleşmeye ve katlanan bölgeler meydana gelmeye başlar. Belirli uygulamalar için pürüzsüz ve kusursuz bir yüzey gereksinimlerini karşılamak amacıyla, bilyalı dövme şiddetinin artması gömülü kalıntıları gidermek için kontrollü şekilde uygulanmalıdır. Bu uygulama, korozyon, aşınma ve yorulma gibi malzeme özelliklerinin daha da iyileştirilmesini sağlayabilir. Şiddetli plastik deformasyon (ŞPD) ve çoklu dövmenin etkisi ile elde edilen aşırı

plastik deformasyon (APD) özellikle mekanik özellik ve yorulma ömrü için yüzey ve yüzey altı çatlakları açısından mutlaka irdelenmelidir.

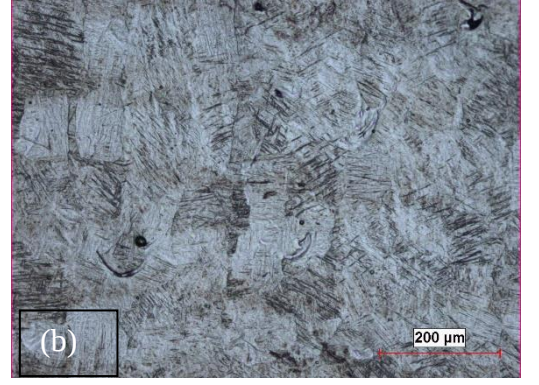
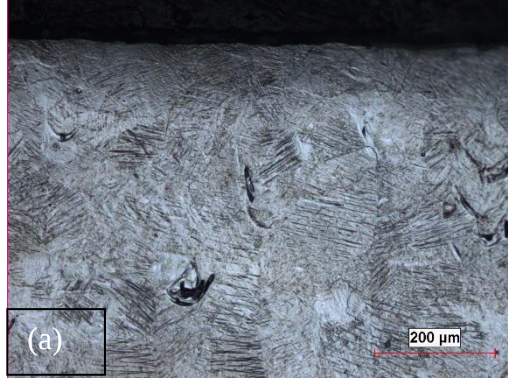
8.3.2. Mikroyapı incelemeleri

Literatürde bilyalı dövme işleminin malzeme yüzeyinde ve yüzeye yakın derinliklerde tane incelmeye yol açtığını göstermektedir (Unal & Varol, 2014; Wang et al., 2018). Wang ve ark. (2018) AISI 4340 çeliği üzerinde %100 kaplama oranı ile BD işlemi gerçekleştirmiş; tane boyutu, BD yapılan numune yüzeyinde yaklaşık 2 μm , 200 μm derinlikte yaklaşık 7 μm , 300 μm derinlikte ise 10 μm 'nin üzerinde ölçülmüştür. Kumar ve ark. (2017) Ti6Al4V alaşımı üzerinde BD prosesi gerçekleştirilmiş olup yapılan işlemin bilyalı dövülen yüzeyden 100 μm derinliğe kadarki bölümünde tane boyutunun 16 ± 3 nm seviyesine düştüğünü raporlamışlardır.

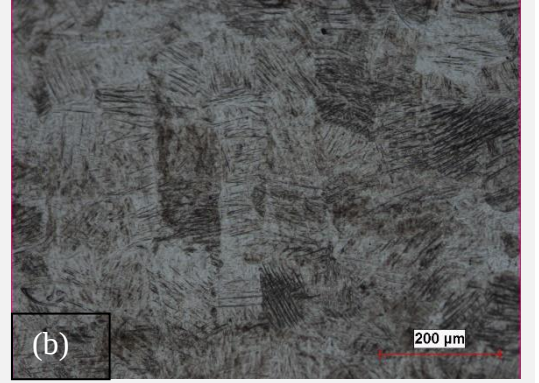
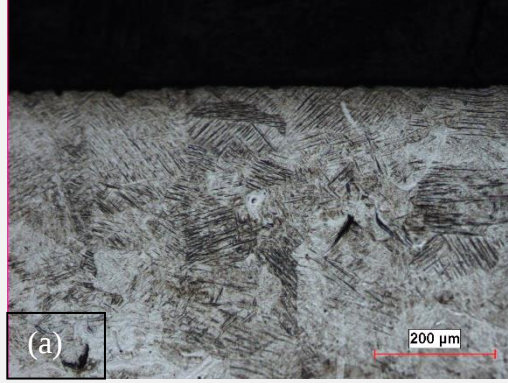
Bu çalışmada, bilyalı dövme işleminin taneler üzerindeki Şekil 8.17'de verilen mikroyapı görüntülerinde görülmektedir. Görüntülerde yapılan BD işleminin yüzey bölgelerinde α' iğnelerini belirgin şekilde küçülttüğü/incelttiği görülebilmektedir.



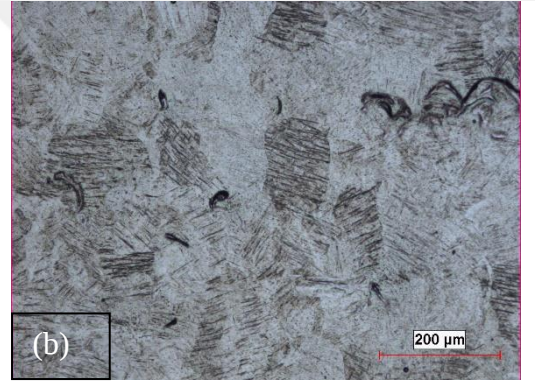
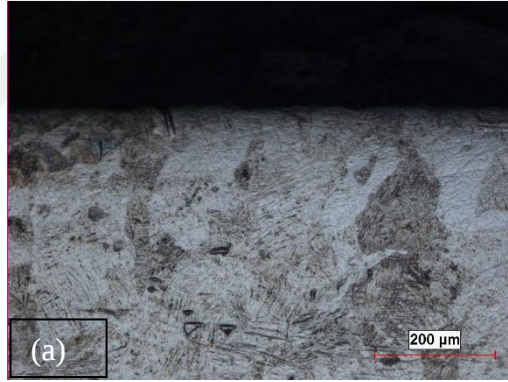
11N



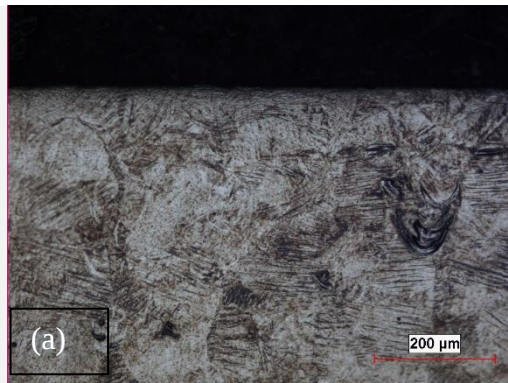
18N



11N+0,6mm



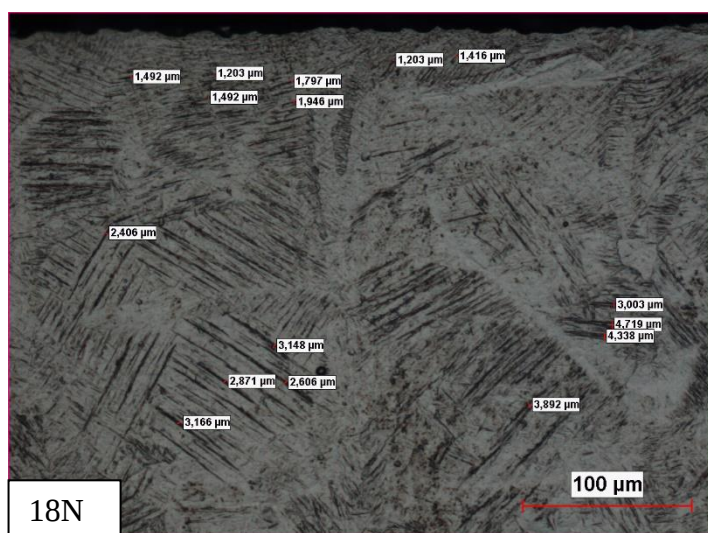
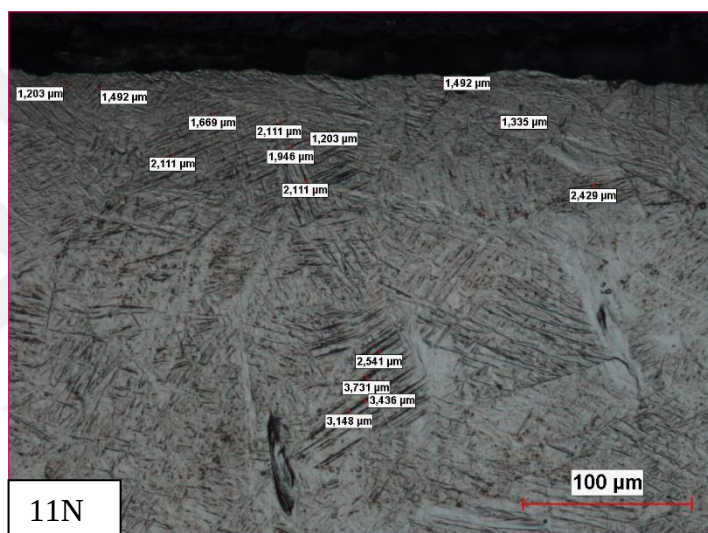
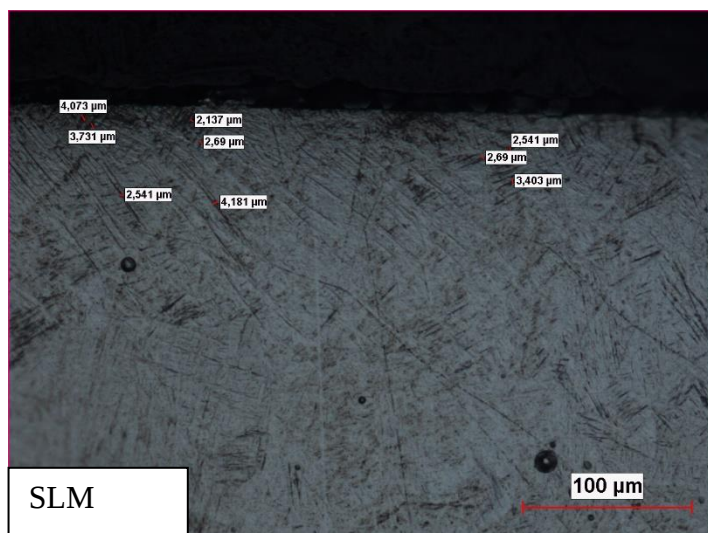
18N+0,6mm

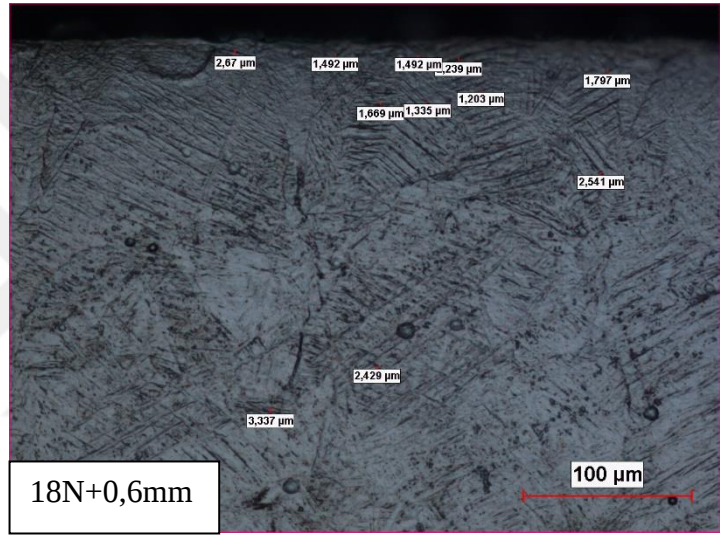
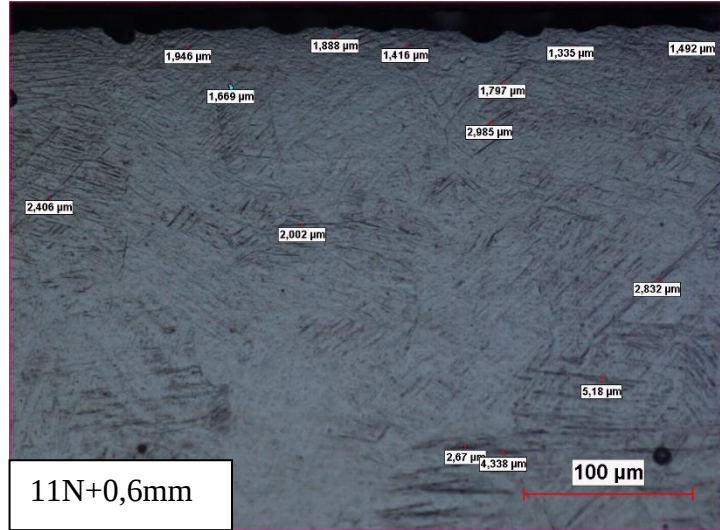


Şekil 8.17. BD yapılmış numunelerin yüzeyaltı ve orta bölge mikroyapı görüntüleri

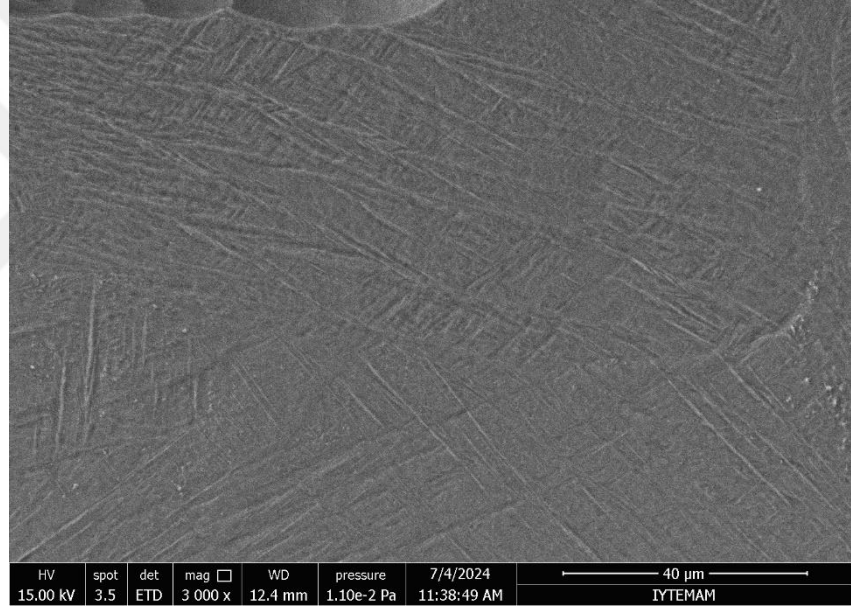
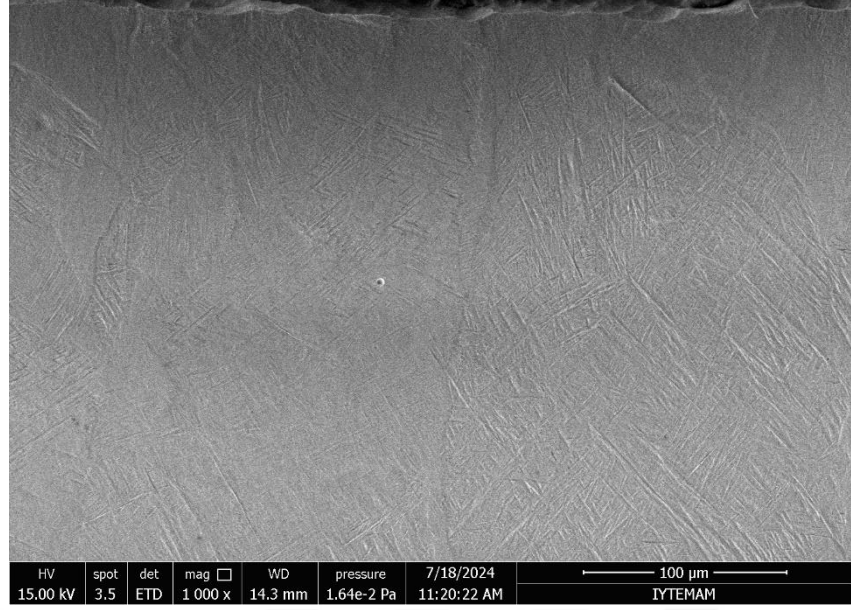
Numunelerin kesitinin metalografik mikro yapısı Şekil 8.17'de sunulmuştur. SLM numunesinin tipik mikro yapısı (Şekil 8.17(a)), birincil sütunlu β fazında uzun/ince iğne benzeri α' martensitinin dağılımını ortaya koymaktadır. SLM numunede yüzeyin altına doğru gidildikçe dikey yönündeki yüksek sıcaklık gradyanı nedeniyle, birincil β fazı SLM şekillendirme işlemi sırasında tipik olarak Z yönü boyunca sütunlu bir şekilde büyür (Simonelli et al., 2014a). Dahası, son derece hızlı soğutma hızı nedeniyle, α' martenziti katılaşma işlemi sırasında tam olarak büyümek için zar zor zamana sahip olur ve bu da iğne benzeri bir yapı ile sonuçlanır. SLM ile üretilen numunelerde az miktarda da olsa çeşitli büyüklük ve şekillerde gözenekler mevcuttur ve bu gözenekler, mekanik testler sırasında stres başlatıcı olarak işlev görerek mekanik özellikleri azaltır. Literatürde, BD ve LSP gibi üretim sonrası ikincil süreçlerin, malzemelerin yüzeyinde ve yüzeye yakın derinliklerinde gözeneklerin kapanmasına/iyileşmesine yardımcı olabileceğini gösteren araştırmalar vardır. Şekil 8.17'e BD yapılmış numune mikroyapılarına bakıldığında BD işlemi sonrası yüzeye yakın bölgelerde porozitellere rastlanmadığı tespit edilmiştir. Şekil 8.18'da kesit mikroyapısında martenzit lamellerine bakıldığında BD işleminin martenzit lamelleri üzerinde inceltici etkisi olduğu nicel gözlemlerle de doğrulanmaktadır. Tanelerin oldukça rafine edilmesi nedeniyle, başlangıçtaki sütunlu β tanesini ve yakın yüzey tabakasındaki iğne benzeri iç α' martenziti ayırt etmek zorlaşır. Derinlik arttıkça hem uygulanan gerinim hem de gerinim hızı azakıldığından, bununla ilişkili tanelerin rafine edilmesi kademeli olarak azalır. BD durumunun şiddetli versiyonun tane boyutunun küçülmesi dislokasyon yoğunluğunun da artması etkilerinden kaynaklanır. GBD, ŞBD ve ABD yüzeylerin yanyana görselleri incelendiğinde ŞBD ve ABD ile daha büyük bir derinlikte incelen taneler göze çarpmaktadır.

Şekil 19-22'te GBD, ŞBD ve ABD yapılmış numunelerin 1000x ve 3000x ile çekilmiş SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde bilyalı dövme işlemi ile yüzeyin altında oldukça ince asiküler martenzit yapısı görüntülenmiştir. ABD dövme işleminin yüzey bölgelerinde α' iğnelerinin boyutlarını belirgin bir şekilde incelttiği görülmektedir.

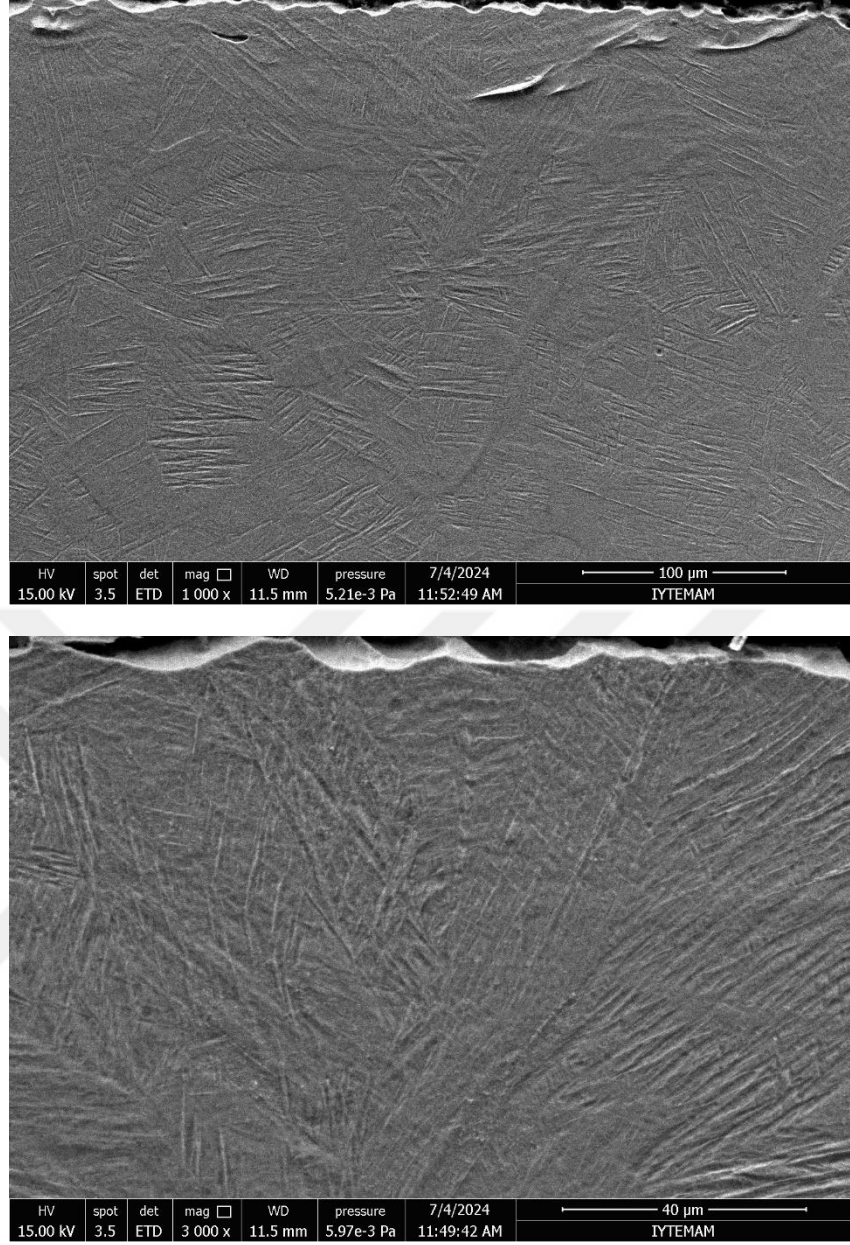




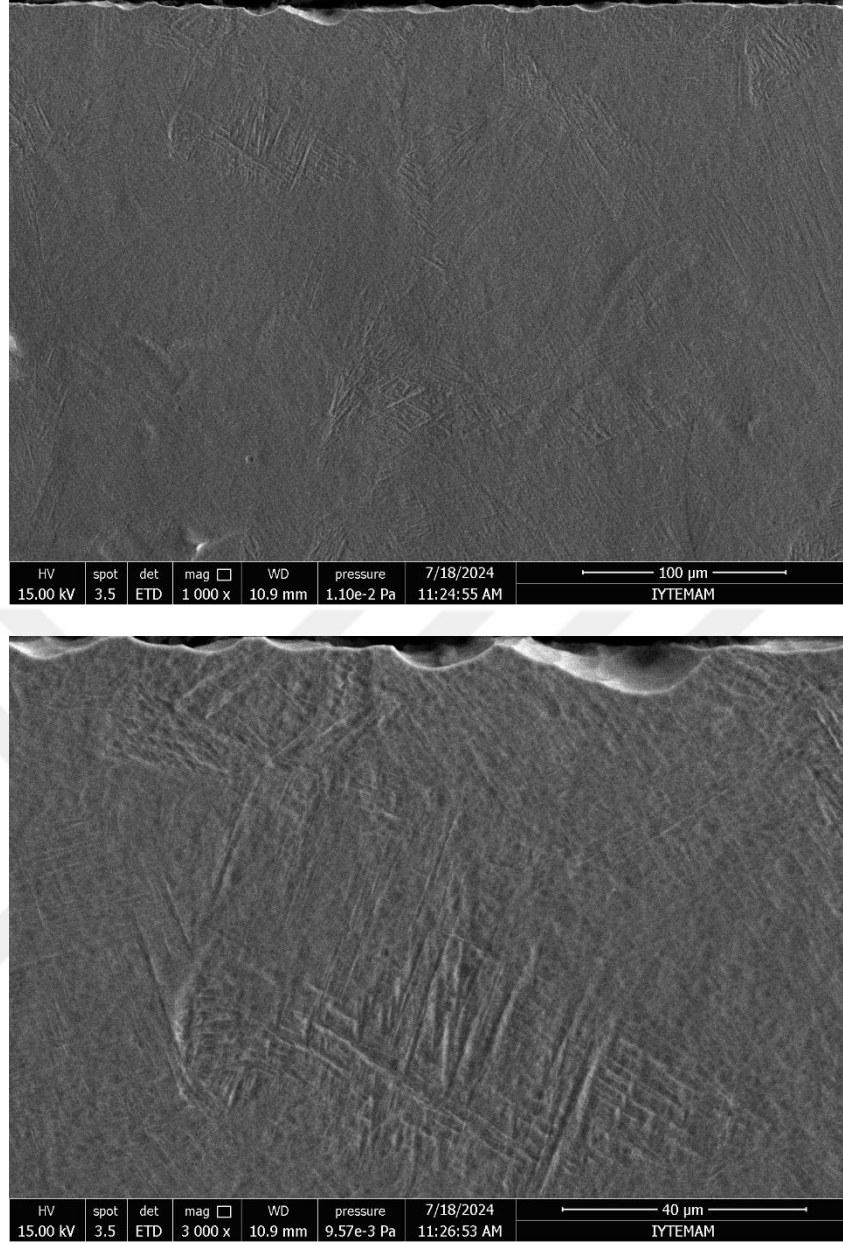
Şekil 8.18. Martenzit lamellerinin ölçümü



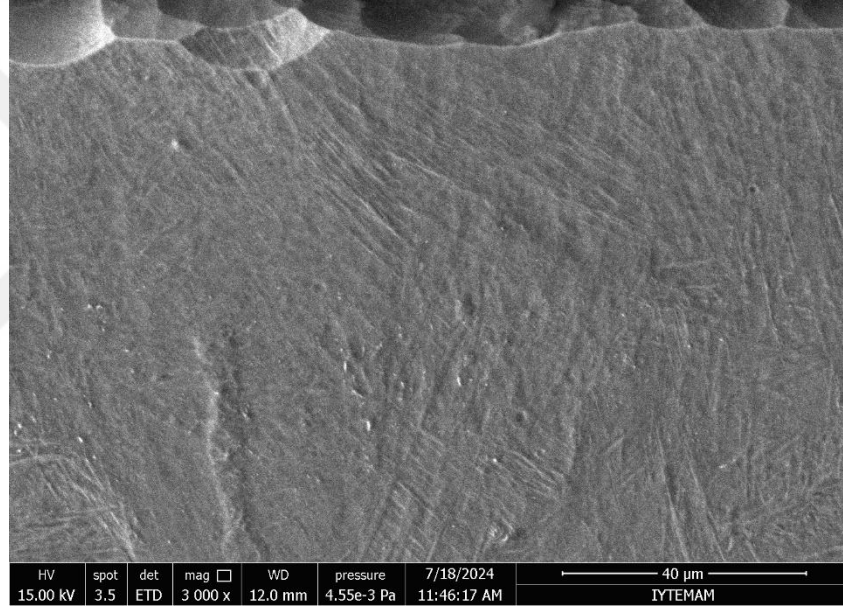
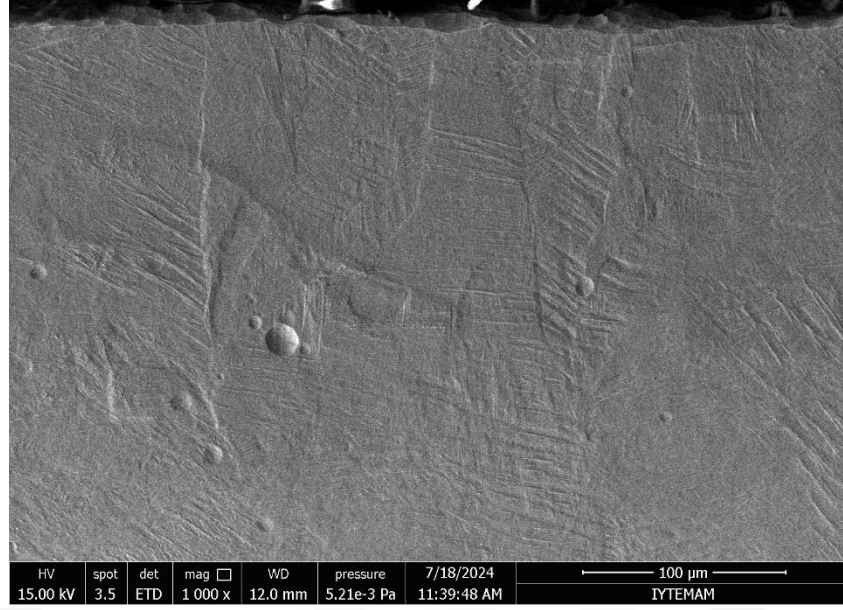
Şekil 8.19. 11N almen şiddetine sahip numunenin 1000X ve 3000X büyütmedeki SEM görüntüsü



Şekil 8.20. 18N almen şiddetine sahip numunenin 1000X ve 3000X büyütmedeki SEM görüntüsü



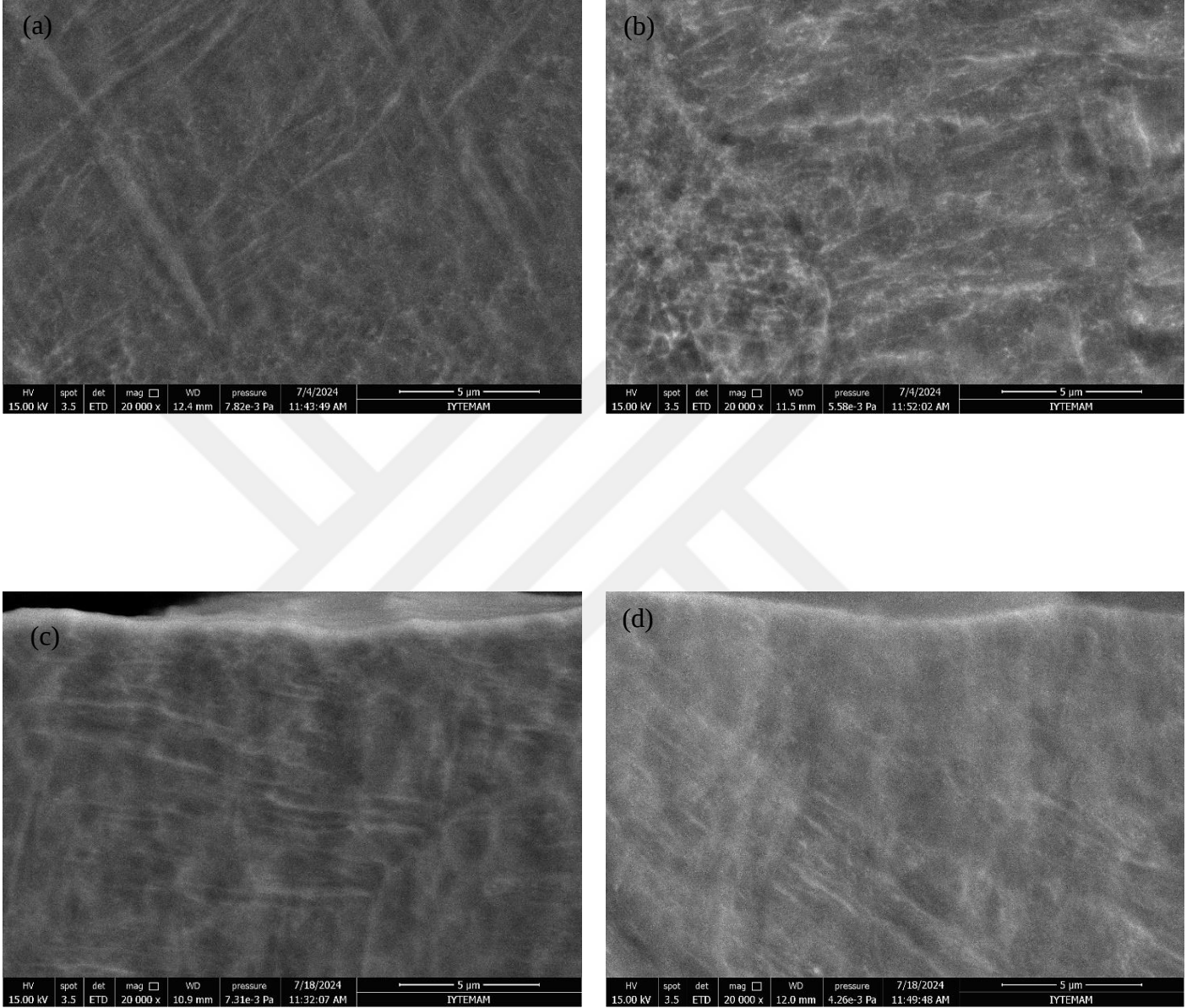
Şekil 8.21. 11N+0,6mm almen şiddetine sahip numunenin 1000X ve 3000X büyütmedeki SEM görüntüsü



Şekil 8.22. 18N+0,6mm almen şiddetine sahip numunenin 1000X ve 3000X büyütmedeki SEM görüntüsü

Bir sonraki bölümde detaylıca yer alan XRD analizlerinde dislokasyon kusur yoğunluğunun artması ve Şekil 8.22 ve 8.23’ de gösterilen tane boyutu incelmesinden pik genişlemeleri tespit edilmiştir. Şekil 8.22 ve 8.23 aynı zamanda bu sonuçları da işaret etmektedir. İkincil elektron görüntüleri, farklı yüzeyaltı durumlarının tane görünümünü ortaya koymuştur. Bilyalı dövme yapılmış durum, Bagherifard ve ark. (2009; 2016) tarafından vurgulandığı gibi, ağır plastik deformasyondan kaynaklanan

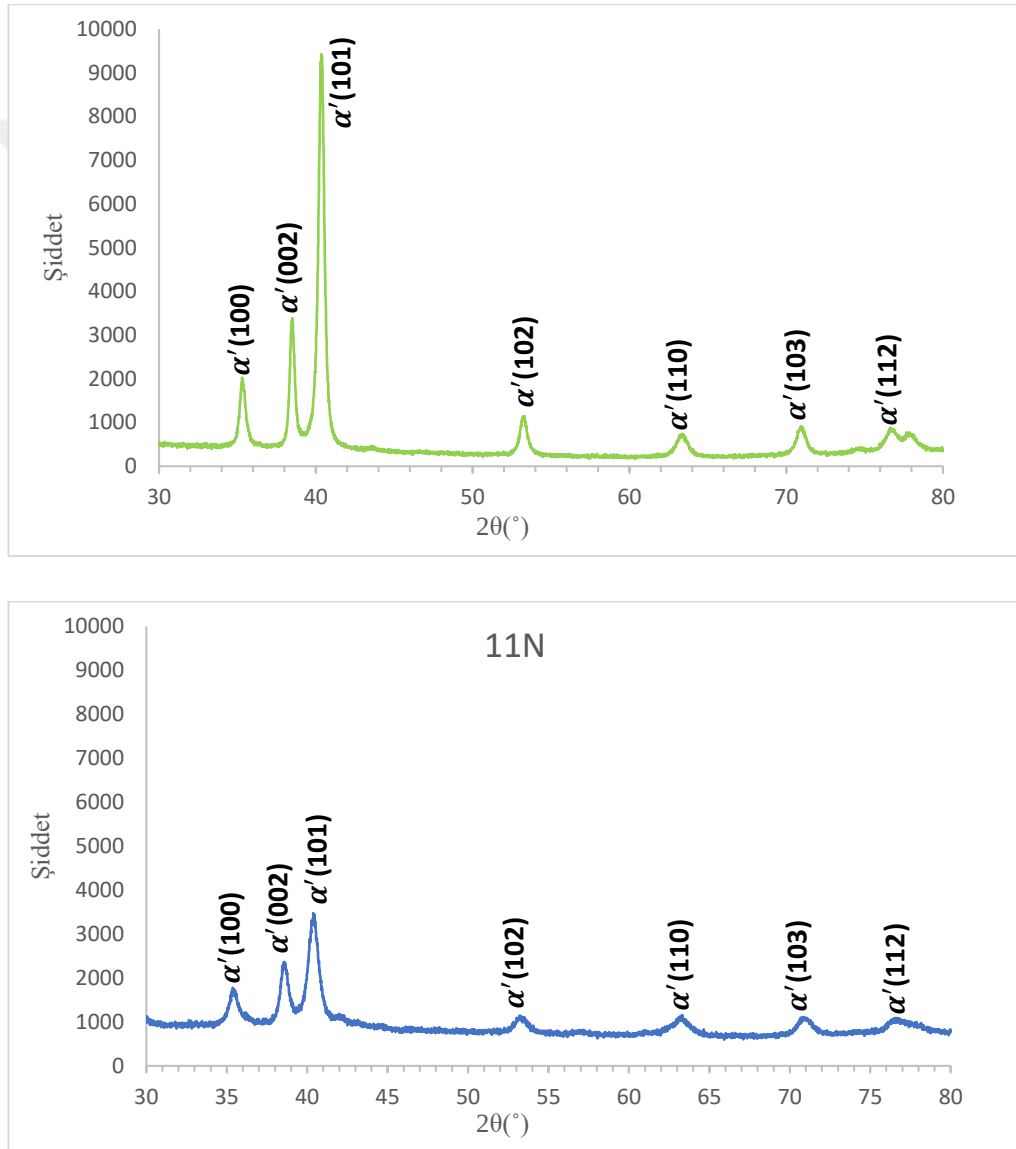
yüzeye yakın mikro, ultra ince taneli ve hatta nanokristalin α -fazı tabakası içeren bir gradyan gösterir.

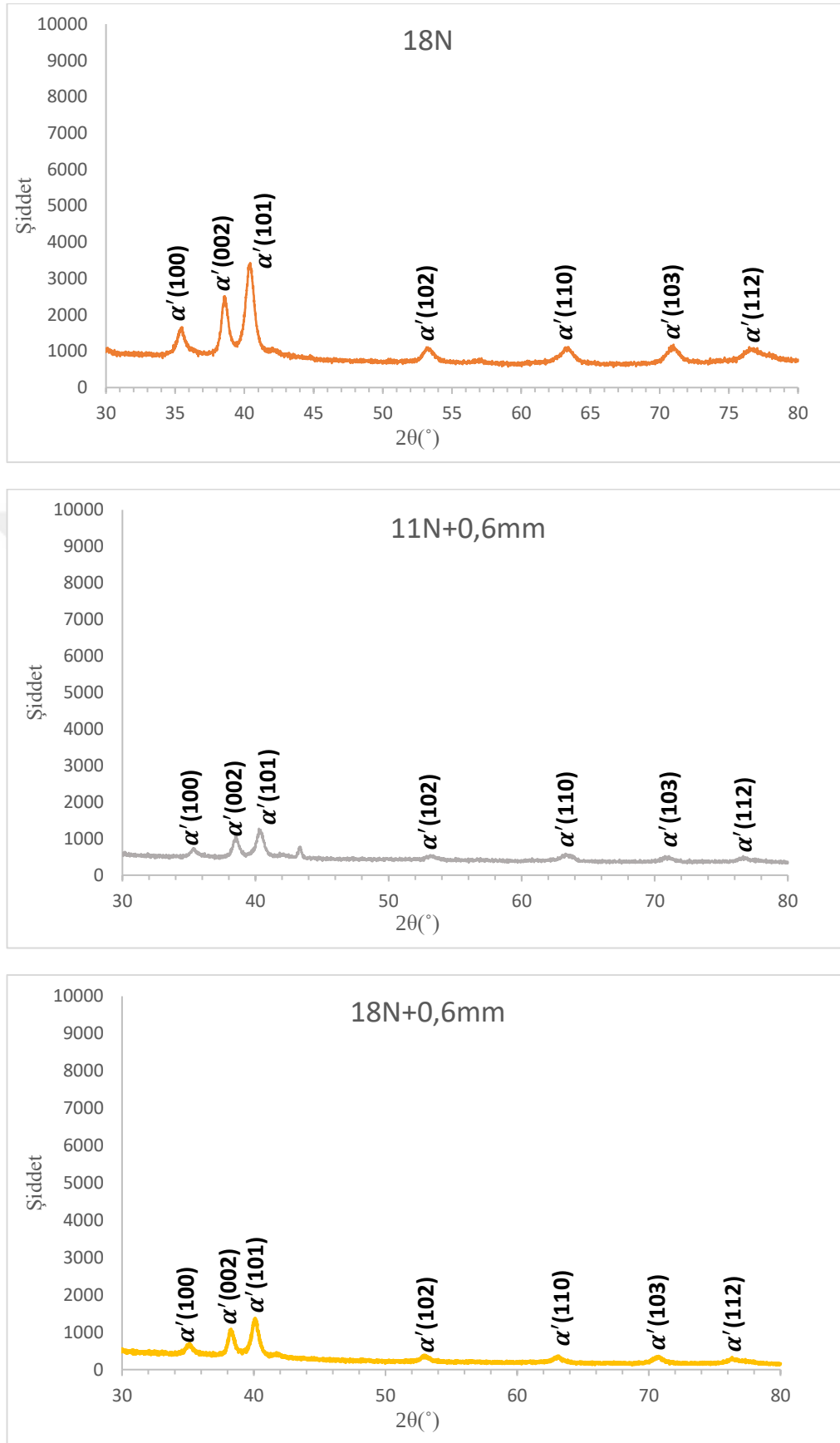


Şekil 8.23. Bilyalı dövme sonrası yüzeyaltı SEM incelemeleri (a) 11N, (b) 18N, (c) 11N+0.6mm, (d) 18N+0.6mm

8.3.3. XRD analizi sonuçları

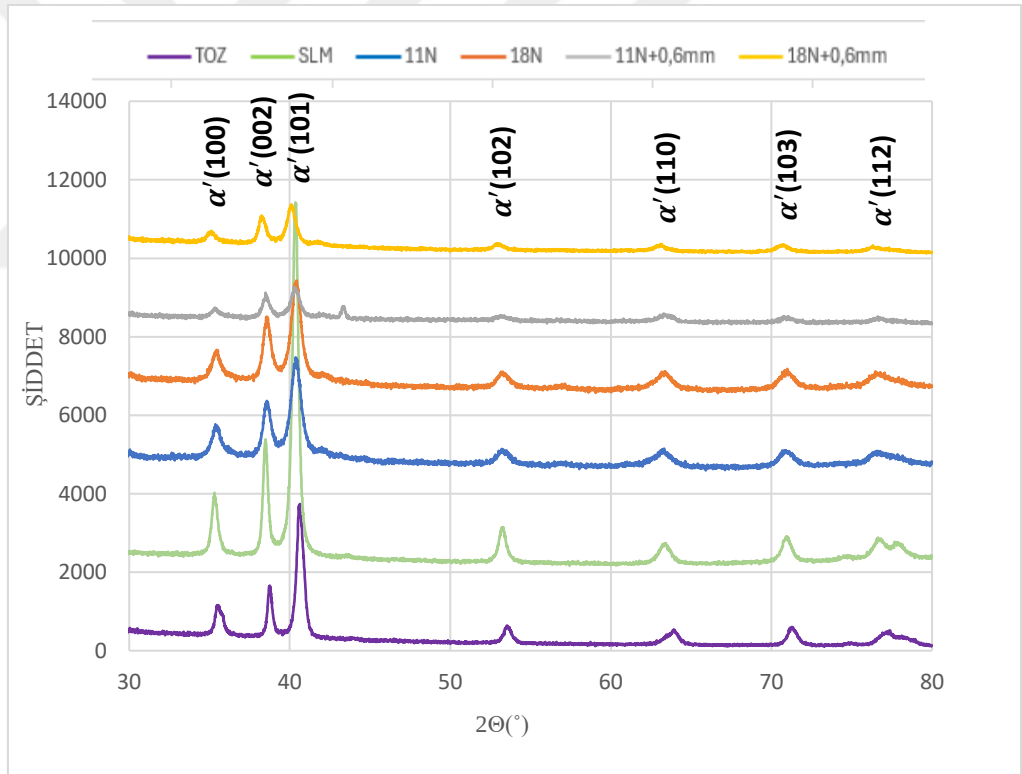
Şekil 8.24'te farklı Almen şiddetlerinde dövülmüş Ti6Al4V alaşımının XRD patterni sunulmuştur. XRD paternleri incelendiğinde elde edilen düzlemlerin Ti6Al4V alaşımı için literatürde var olan pikler olduğu tespit edilmiştir (P. Kumar et al., 2018). Gelişen ultra ince tanelerin değerlendirmeleri pikler üzerinden yarı maksimumdaki tam genişliği (FWHM) analizi ile yapılmıştır.





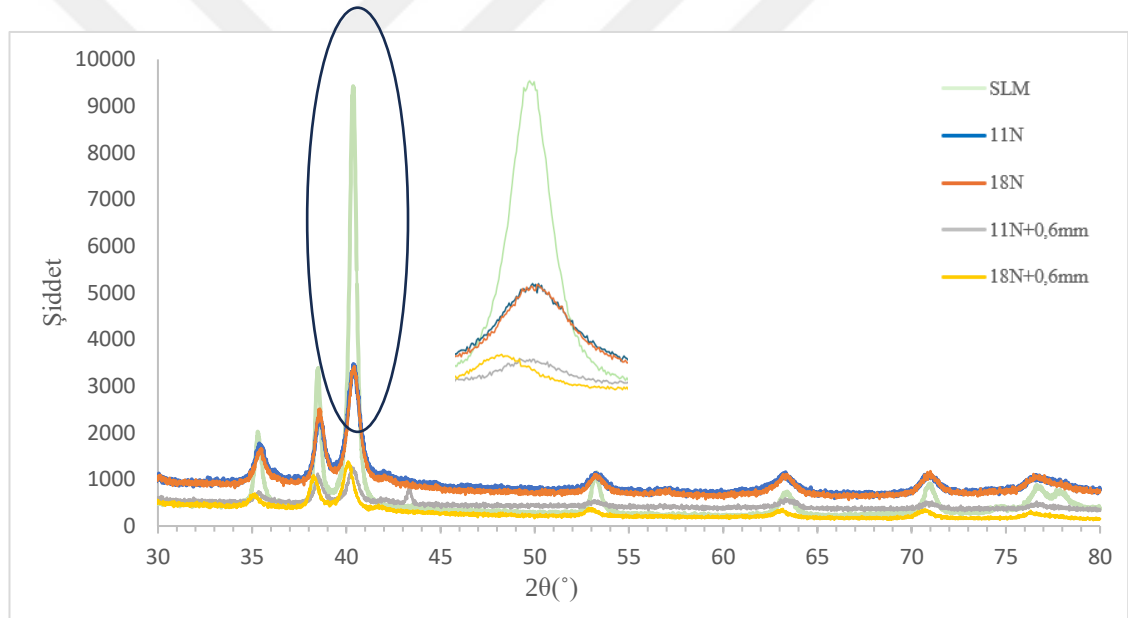
Şekil 8.24. Farklı Almen şiddetlerinde dövülmüş Ti6Al4V alaşımının XRD patterni

Şekil 8.25'te tüm XRD grafikleri karşılaştırmalı olarak tek bir grafik ekseninde sunulmuştur. Kırınım pikinin FWHM artar, bu da BD yoluyla SLM yapımı Ti6Al4V numunesinin yüzey katmanındaki tane inceltmenin bir sonucudur. Bu çalışmada gerçekleştirilen mikro yapısal analizle XRD sonuçları birleştirildiğinde, BD' den sonra tane görünümünde değişiklik gözlenmesi ve BD durumunun XRD patern tepe genişlemesi hem tane boyutu hem de mikro yapısal kusur etkilerinden kaynaklanmaktadır. Almen şiddeti arttıkça, GBD durumuna kıyasla daha büyük FWHM değerleri göstermesi çok daha büyük BD etkisini yansıtmaktadır. Bu çalışma, kusur yoğunluğunun nicel bir değerlendirmesini ve tartışmasını sunmaktadır. Bilyalı dövme durumları için mevcut olan dislokasyon yoğunluklarının ve tane boyutu etkilerinin nicel hesaplamaları gelecekteki çalışmaların bir parçası olacaktır.



Şekil 8.25. XRD paternlerinin kıyaslaması

Tanelerin çoğu nanokristalindir. Referans durumunda zaten ultraince tane/nanokristalin boyutuna sahip olan faz, daha incelmıştır. Kristalit boyutu düşük açılı tane sınırları tarafından nitelenen alt-yapının boyutunu ifade eder. Uygulanan bilyalı dövme işlemiyle numuneler deformasyona maruz kaldığı için numunelerin kristalit boyutu, latis mikro-gerinim oranları ve dislokasyon yoğunlukları değişmektedir. Şekil 8.26'de XRD paterninde BD ile FWHM değerinin değişimi verilmiştir. Piklere bakıldığında bir genişleme olduğu göze çarpmaktadır ve bunun sonucunda tüm numunelerin FWHM değerleri artmıştır. Bu çalışmada $\alpha'(101)$ piki üzerindeki FWHM değişimlerini incelenmiştir ve Tablo 8.17'de BD sonucunda Ti6Al4V malzemesinde meydana gelen kristalit boyutu (nm), latis mikro-şekil değişimi (%) ve dislokasyon verilmiştir.

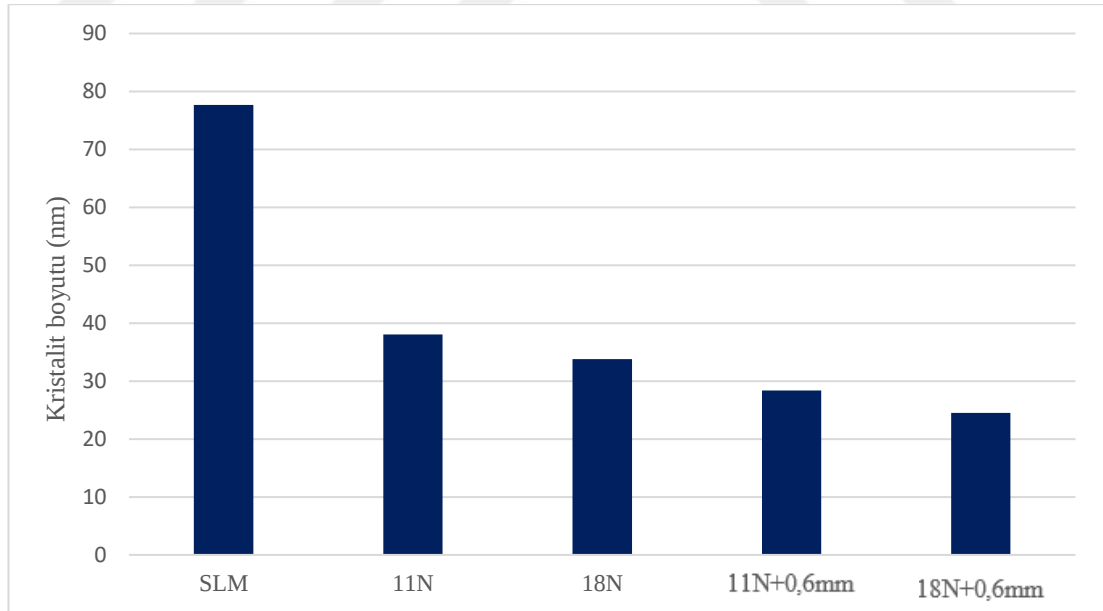


Şekil 8.26. XRD paterninde BD ile FWHM değerinin değişimi

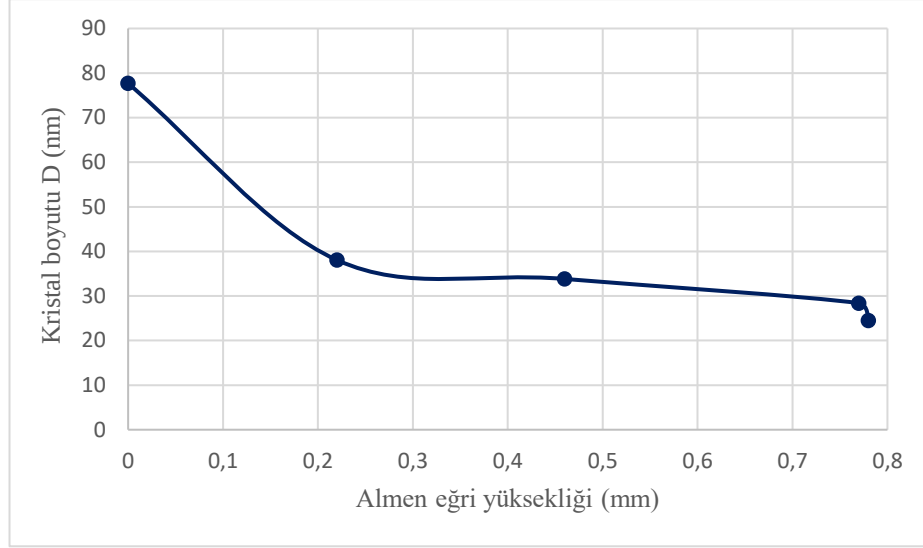
Tablo 8.17. BD sonucunda Ti6Al4V malzemesinde meydana gelen kristalit boyutu (nm), latis mikro-şekil değişimi (%) ve dislokasyon yoğunluğu

$\alpha'(101)$	2 θ	FWHM (β)	λ	Kristal boyutu D (nm)	C (sabit)	ε (%)	$10^{14} \rho \text{ mm}^{-2}$
SLM	40,365	0,4534	0,15406	77,6701767	4	0,00047963	0,000165764
11N	40,4044	1,0073	0,15406	38,06028549	4	0,00097432	0,000690329
18N	40,3812	1,0774	0,15406	33,81669564	4	0,00109949	0,000874455
11N+0,6mm	40,3518	1,2079	0,15406	28,38241589	4	0,00131467	0,00124137
18N+0,6mm	40,1286	0,9717	0,15406	24,4968186	4	0,00157681	0,001666405

Bilyalı dövme işlemi sonucunda Ti6Al4V alaşımında gerçekleşen kristalit boyutu değişimi Şekil 8.27’de gösterilmiştir. XRD grafikleri üzerinden $\alpha'(101)$ pik genişlikleri hesaplanarak elde ettiğimiz kristalit boyutu değerlerine bakıldığında BD işlemi numunelerin kristalit boyutunda azalma meydana getirmiştir (Şekil 8.28).



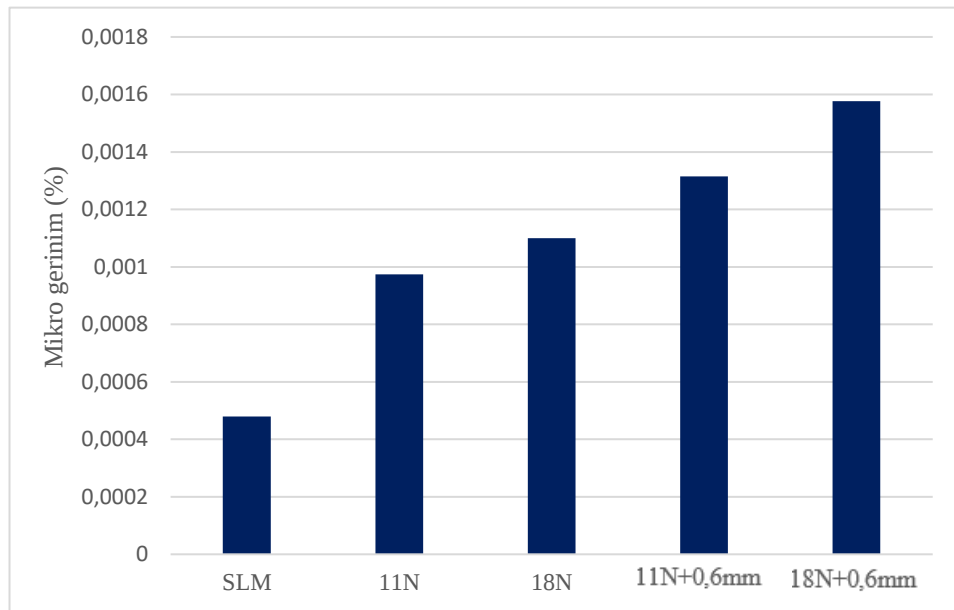
Şekil 8.27. Kristalit boyutu değişim değerleri



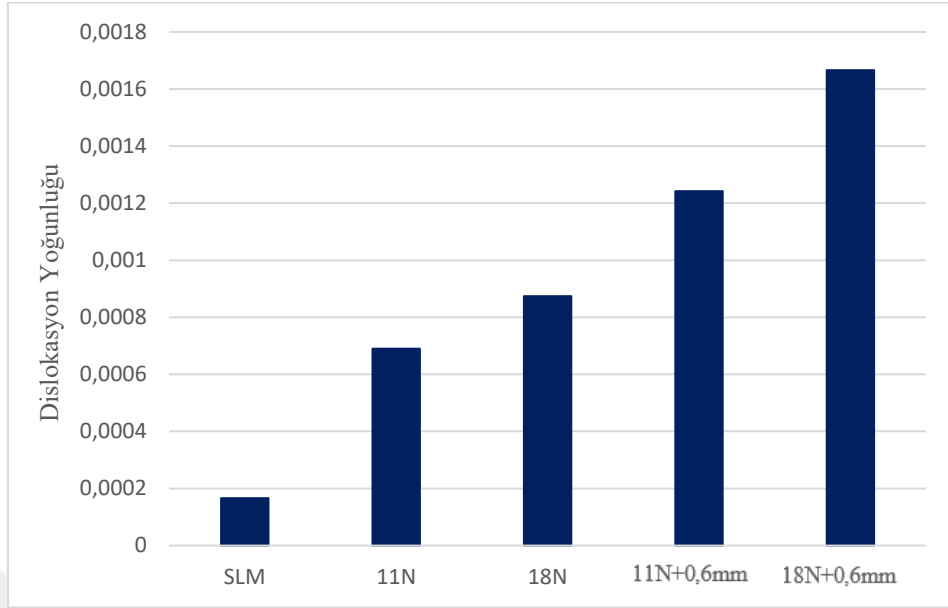
Şekil 8.28. Kristalit boyutu değişim grafiği

Bilyalı dövme işlemi sonucunda Ti6Al4V alaşımında gerçekleşen latis mikro gerinim değerlerindeki değişimi Şekil 8.29.'de verilmiştir. XRD grafikleri üzerinden $\alpha'(101)$ pik genişlikleri hesaplanarak elde edilen latis mikro gerinimlerine bakıldığında tüm numunelerde artış meydana gelmiştir. BD işleminde bilya bombardımanı hedef malzemenin yüzey tabakasında plastik deformasyon oluşturmaktadır. ŞBD'de bilyaların üst üste örtüşmesinden dolayı deformasyon bölgesinin üstüste binmesi söz konusudur, dolayısıyla, kristalit boyutu azalmakta ve mikro-şekil değişimi artmaktadır. 18N ve 18N üzerine yapılan çoklu dövme operasyonlarında hem kristalit boyutu 11N operasyonlarına göre daha küçük hem de latis gerinimi bir miktar daha fazla olarak hesaplanmıştır. Benzer trend ABD operasyonları sonrası yüzeyden yapılan analizlerle elde edilmiştir. Bu değerler çok küçük farklar olmakla birlikte plastik deformasyon miktarının doyuma ulaşmaya başlaması ile açıklanabilir. Şiddetli plastik deformasyonun etkisi ile artan dislokasyon yoğunluğunun yanı sıra mekanik ikiz oluşumları ve istif hataları da meydana gelir. Alaşımların bilyalı dövme veya lazerle dövme ile indüklenen mikro yapısal evrimi iyi bilinmektedir. Yüksek istifleme hatası enerjisine (SFE) sahip alüminyum alaşımları için, taneler şiddetli plastik deformasyondan sonra dislokasyon düğümlerinden dislokasyon hücrelerine, alt tanelere ve yüksek açılı tanelere doğru dislokasyon evrimine uğrar (Lu et al., 2010; Trdan et al., 2014). Düşük SFE'ye sahip titanyum alaşımının α fazının mikro yapısal evrimi, alüminyum alaşımlarından farklıdır. Örneğin, Lu ve ark. (2017) çoklu LSP'ye

tabi tutulan ticari olarak saf (Cp) titanyumda mikro yapısal tepkiyi ve tane alt bölünme sürecini araştırmıştır. Sonuçlar, tane inceltme mekanizmasının iki tür eş zamanlı alt bölünme modu içerdiğini gösterdi: mikrometre ölçeğinde çok yönlü mekanik ikiz – mekanik ikiz kesişimleri ve nanometre ölçeğinde ikincil mekanik ikiz-dislokasyon duvarları kesişimleri. Yang ve ark. (2017), LSP ile işlenen TC17 titanyum alaşımının (Ti-5Al-4Mo-4Cr-2Sn-2Zr'nin nominal bileşimi) mikro yapısal evrimini açıklamıştır. Taneler rafine edilmiştir ve LSP'den sonra nispeten daha az deformasyon ikizleri gözlemlenmiştir. LSP ile indüklenen yüksek gerinim hızının (107 s^{-1}) adiabatik sıcaklık artışıyla birlikte, yeniden kristalleşme kinetiğinin kantitatif hesaplanmasıyla kanıtlanmış dönme dinamik yeniden kristalleşmesine yol açtığını vurgulamışlardır. Lan ve ark (2020), 2 saat boyunca $760 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de tavlanan Ti6Al4V titanyum alaşımının mikro yapı evrimi üzerinde LSP'nin etkisini araştırmış ve çok yönlü ikiz kesişimlerinin ve alt tane sınırlarının bölünmesinin tane incelmeye yol açtığı sonucuna varmıştır. Yukarıda belirtilen LSP ile işlenen titanyum alaşımlarında istifleme hatası gözlenmemiştir. 18N ve 18N sonrası çoklu dövme ile nicel olarak dislokasyon yoğunluğunun arttığı hesaplanmıştır (Şekil 8.30). Oldukça artan dislokasyon yoğunlukları artık evrimleşmiş ve alttanelerin giderek küçülmesi ile ultraince taneli kristalinler yaratılmıştır (Lan et al., 2020).



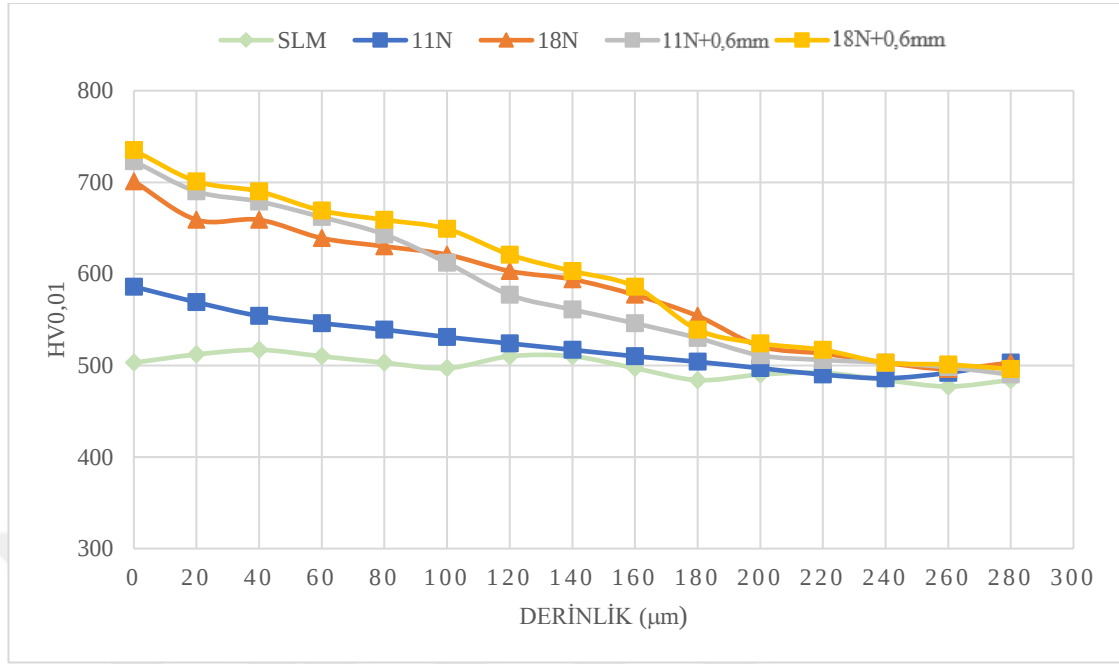
Şekil 8.29. Latis mikro gerinim değişim değerleri



Şekil 8.30. Dislokasyon yoğunluğu değişim değerleri

8.3.4. Mikrosertlik ölçümleri

Şekil 8.31’de BD işlemi öncesi ve sonrası mikrosertlik ölçümleri verilmiştir. Buna göre, mikrosertlik değeri; yüzeye en yakın bölgede 11N Almen şiddeti ile BD işlemi yapıldığı zaman %16,5 , 18N Almen şiddeti ile BD yapıldığı zaman %39,4, 11N+0,6mm Almen şiddeti ile BD yapıldığı zaman %43,8 , 18N+0,6mm Almen şiddeti ile BD yapıldığı zaman ise %46,2’ lik bir artış göstermiştir. Mikrosertliğin Almen şiddeti artmasıyla artmasının nedeni α fazının ince yapısına aittir. BD operasyonunda Almen eğri yüksekliğinin artmasıyla iş parçasında deformasyon sertleşmesi etkisi artmıştır. Deformasyon sertleşmesi etkisi ile malzemenin incelen tane yapısı, plastik deformasyona karşı direnç sağlayarak SLM Ti6Al4V'nin sertliğini artırır. Sertlik sonuçları incelendiğinde, 11N BD işlemi ile deformasyon sertleşmesi etkisi yaklaşık 80 mikron derinliğe kadarken diğer BD operasyonları ile yaklaşık benzer derinliklere kadar etki sağlanmış olup yaklaşık 200 mikrometredir.



Şekil 8.31. Mikrosertlik ölçümleri

8.3.5. Yorulma testi sonuçları

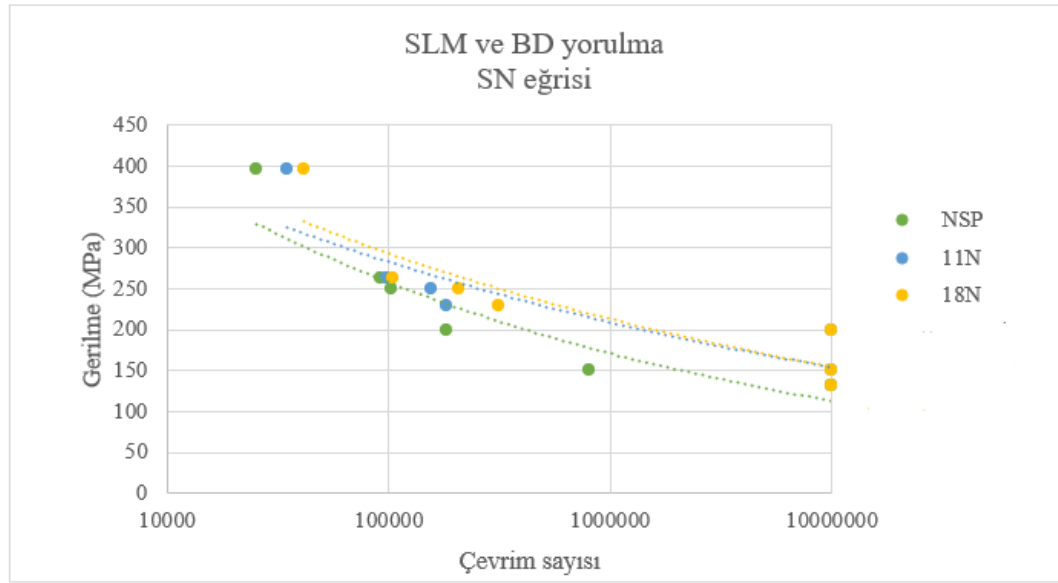
BD işlemi malzeme yüzeyinde ve yüzey altı derinliklerde basma tipi kalıntı gerilme yaratırken aynı zamanda parçaların yüzey pürüzlülüğünü de artırır (L. Xie et al., 2016; Q. Zhang et al., 2021). Basma tipi kalıntı gerilmeleri, yorulma kırılmalarının başlangıcını ve yayılmasını ertelemeye veya önlemeye yardımcı olurken, daha yüksek yüzey pürüzlülüğü, çentik etkisi nedeniyle bu kırılma üzerinde zararlı bir etkiye sahiptir (Bagheri & Guagliano, 2009; Rossini et al., 2012). ŞBD yoluyla aşırı plastik deformasyon oluşturmak, yüzey nanokristalizasyonunu sağlayabilir. Ancak yüzeyde ciddi plastik deformasyon yöntemleri yüzey sertliğini daha yüksek seviyelere çıkararak yüzeyde kırılma bir tabaka oluşmasına neden olur. Çoğu literatür çalışması, ŞBD işlemine tabi tutulan yüzeylerde nanokristalleşme yoluyla yorulma mukavemetinde iyileşme gözlemlendiğini göstermektedir (Bagheri & Guagliano, 2009; Jiang et al., 2006; Ochi et al., 2001; J. W. Tian et al., 2007).

Nadir durumlarda, yüzeyde nanokristal tabaka oluşmasına rağmen yorulma dayanımında belirgin bir iyileşme gözlenmeyebilir. Bu durumun nedeni, yüzey işlemi öncesinde ve sonrasında yüzey düzgünlüğünün eksikliği, malzeme davranışının değişmesi ve aşırı plastik deformasyonun etkisiyle yüzeyaltı çatlakların yaratılabilmesidir. Bu sebeple, sonuçların tartışılması için pek çok karakterizasyon yöntemi birlikte değerlendirilmelidir (Bagherifard et al., 2014; Maleki et al., 2018).

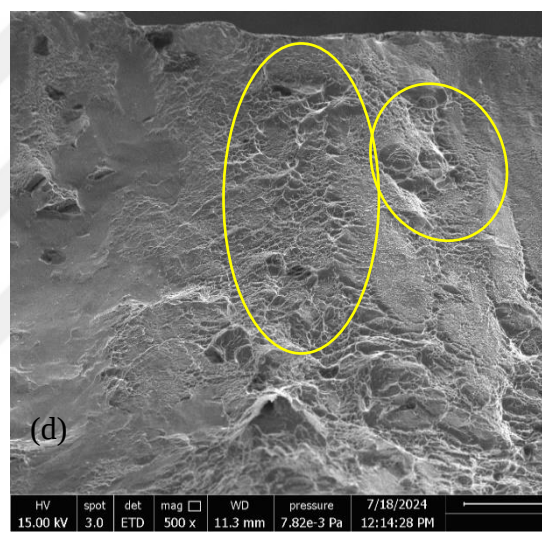
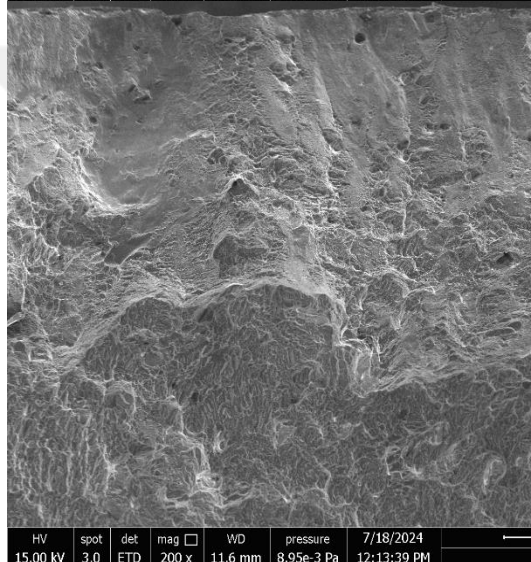
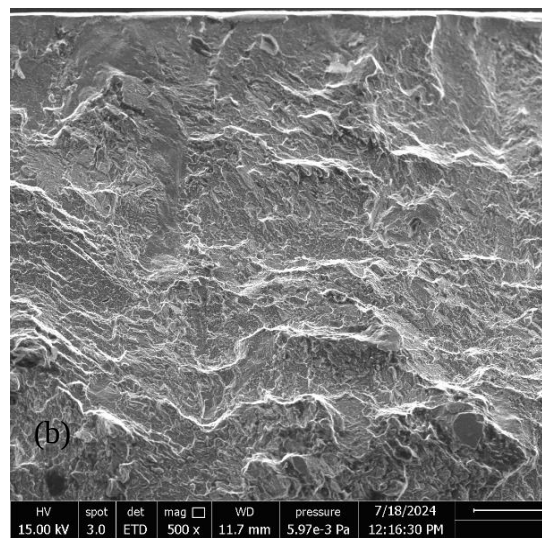
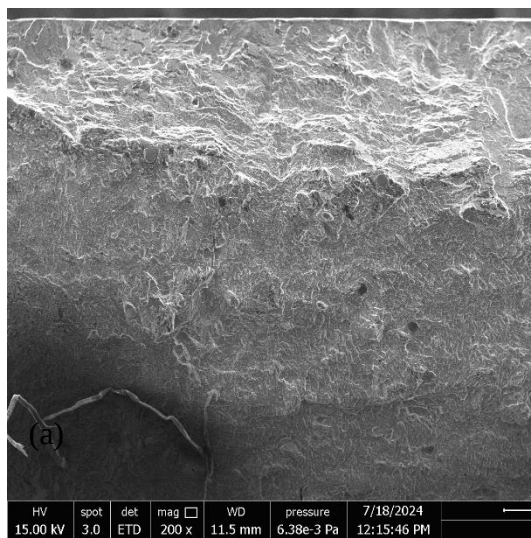
Tablo 8.18’de yorulma analizi sonuçları verilmiştir. Tabloya bakıldığı zaman BD işleminin malzemenin yorulma ömrünü arttırdığı görülmektedir. BD işlemi, işlemsiz numunede 10^7 çevrim olan $\sigma_{maks}=132$ MPa olan yorulma dayanımını $\sigma_{maks}=200$ MPa çıkarmıştır. Yani hem 11N şiddetiyle dövme hem de 18N şiddetiyle dövme yorulma dayanımını yaklaşık 1,5 kat arttırmıştır. Diğer gerilme seviyelerinde çevrim sayısını yani yorulma ömrünü arttırmıştır. Örneğin yorulma dayanımının üzerinde olan 230 MPa’da ŞBD ile yorulma ömrü 2,2 kat artmıştır. Bunun sebebi olarak BD işleminin malzemenin basma tipi yüzey kalıntı gerilmesinden kaynaklı olmasının yanında nanokristalin tane yapısının meydana gelmesi ve dislokasyon yoğunluğunun artarak çatlak başlangıcının ertelenmesidir. Şekil 8.32’te SLM ve BD yapılmış numunelerin SN eğrisi verilmiştir. Görüldüğü gibi tüm gerilme seviyelerinde ŞBD sonuçları GBD’ ye kıyasla daha üstündür. Bu da ŞBD sonrası yüzey pürüzlülüğünün azalması ve çalışmanın ilerleyen dönemlerinde tespit edilecek olan basma kalıntı gerilme seviyelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yüzeyaltı detaylı incelemelerinde aşırı plastik deformasyon seviyesinin artmasıyla çatlak vb. kusurların tetiklenmediği de açıktır. XRD araştırmasından elde edilen FWHM grafiklerinde (Şekil 8.26) daha yüksek pik genişlemesinin basma tipi yüzey kalıntı gerilmelerine karşılık geldiği literatür tarafından desteklenmektedir. Yorulma analizleri ile ŞBD’nin yorulma ömrünü daha fazla arttırdığı ispatlanmıştır ancak, yorulma sınırı benzer elde edilmiştir. Çalışmada çoklu dövmenin yorulma ömrüne etkisi ilerleyen dönemde genişletilecektir.

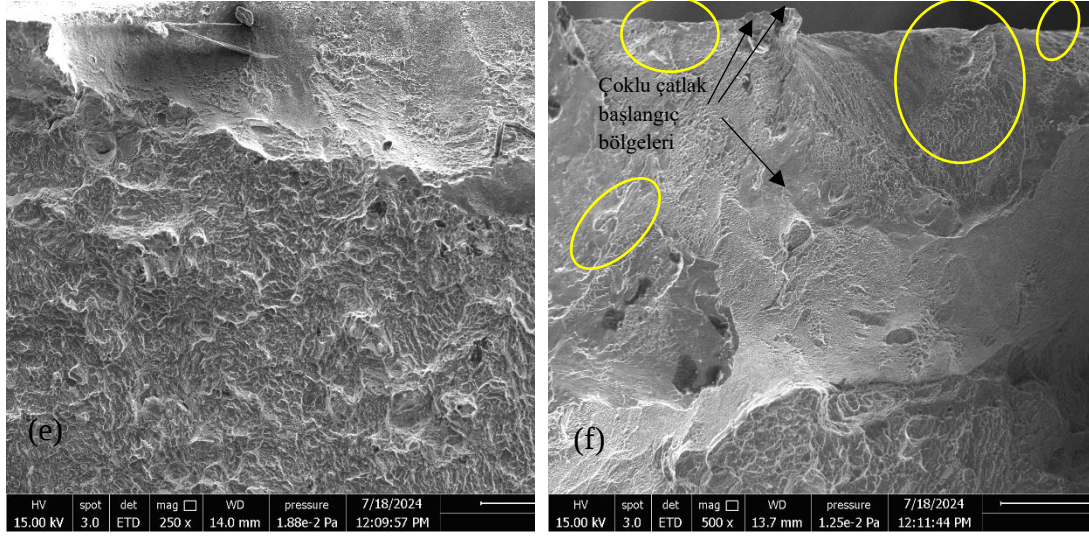
Tablo 8.18. Yorulma Analizi Sonuçları

	396 MPa	264 MPa	250 MPa	230 MPa	200 MPa	150 MPa	132 MPa
SLM	25489	92336	103000	141800	182016	808618	10^7
11N	34884	98299	157000	184000	10^7	10^7	10^7
18N	41321	105207	207000	317166	10^7	10^7	10^7

**Şekil 8.32.** BD yapılmış ve yapılmamış numunelerin yorulma analizi sonuçları

Şekil .33'te 230 MPa gerilme seviyesinde zorlanmış ve hasara uğramış numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri verilmiştir. Şekilde SLM numunesi 11N GBD numunesi ve 18N ŞBD numunelerinin kırık yüzeylerinin SEM fraktoğrafları incelenmiştir 11N almen şiddetine sahip numunede yorulma başlangıcına rastlanmıştır. SLM ve 18N numuneleri karşılaştırıldığında ise SLM numunesinde yorulma daha agresif yani daha hızlı şekilde ilerlemiştir, 18N numunesinde ise yorulma daha yavaş ilerlediği görülebilir.





Şekil 8.33. 230MPa gerilme seviyesinde zorlanmış ve hasara uğramış numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri; (a) ve (b) SLM, (c) ve (d) 11N GBD, (e) ve (f) 18N ŞBD

Kırık yüzeyinin detaylı gözlemleri incelendiğinde çatlak uzama alanında, BD işlenmiş numunelerde kayma birçok yarı-ayrılma düzlemi göstermiştir. BD işlenmiş numunelerin kırık yüzeyinin yüzeye yakın bölümü, lameller ayrılma yüzeyleri ve aralarında birkaç çukur da bulunan bir transkristalin kırık ortaya çıkmaktadır. Bu transkristalin kırık bölge her iki BD işlenmiş numunede de yüzeyin kenarında benzer şekilde ortadadır ve Şekil 7.33'te sarı ile yuvarlak işaretlenmiştir. Ancak ŞBD işlemi sonrası bu bölgede daha pürüzsüz bir ayrılma yüzeyi gözlemlenmiştir. Çatlak sırtları ise BD' den etkilenen alan ile alt tabaka arasındaki arayüz boyunca çatlağın hızla yayıldığını göstermektedir. BD işlemi ile ultra ince taneli yapı oluşumu sayesinde çukurlukların özelliği, tanelerin boyutsal değişimi nedeniyle parabolik çukur ve yarı oval yapıda bir toklaşma yuvasına dönüşür. Bu yuvadaki çukurlar 11N işlenmiş numunede daha büyükken 18N işlenmiş numunede daha küçüktür. Kenara yakın mikro çukurluklar, şiddetli plastik deformasyon tabakasında dağıtılmış onlarca nanometre çapındadır. Ayrıca, nanokristallerin ultra ince taneli bölgede elde edildiği sonucuna buradan da varılabilir. BD SLM-Ti6Al4V malzemesinin yorulma kırığı yer yer transkristalin plastik bölgelere sahiptir. Ultra ince taneli yüzeyaltı yapısına sahip olmayan SLM numunede ise daha gevrek bir modu temsil eden keskin ayrılma fasetleri gözlemlenmiştir.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında Ti6Al4V alaşımına SLM üretimi için yüzey pürüzlülüğü ve doluluk açısından parametre optimizasyon çalışması yapılmasının ardından ve en iyilenen SLM parametresine ait numunelerin numunelerin hem arka hem de ön yüzeylerine her iki yüzeyine de geleneksel bilyalı dövme (GBD), şiddetli bilyalı dövme (ŞBD) ve aşırı bilyalı dövme (ABD) operasyonları uygulanmıştır. GBD ve ŞBD tekli dövme adımlarını içerirken ABD çoklu dövme adımlarını içerir. GBD ve ŞBD uygulanmıştır. Genel sonuçlar aşağıda maddeler halinde yer alır:

- SLM optimizasyon için L9 ortogonal taguchi analizi deney tasarımı kullanılmıştır. Her üç faktör ve 3 seviye için 9 çalışma için üç seviye mevcuttur. Üretimler kontrol edilemeyen faktörlerin etkisini elimine etmek için tekrarlı olarak sağlanmıştır. Tarama aralığı (h), Tarama Hızı (v), Lazer Gücü (P) üretim faktörleri olarak seçilmiştir. Faktörlerin Sseviyeleri ise tarama aralığı 80, 90, 100 μm tarama hızı 800, 900, 1000 mm/s ve lazer gücü 190, 200, 220 W olarak belirlenmiştir.
- SLM üretimi için Taguchi methoduna dayalı gri Gri İlişkisel Aanaliz (GRA) ile optimizasyon yapılmıştır. GRA için yanıt değerlerinden yoğunluk değeri en büyük en iyi, yüzey pürüzlülüğü değeri ise en küçük en iyi olarak belirlenmiştir. Sonuçların önem derecesini tartışmak için ANOVA analizi kullanılmıştır. Güven seviyesi %95 olarak belirlenen analizlerinmiştir. Sonuçlarının doğruluğunu ispatlamak için doğrulama adımı da uygulanmıştır.
- Lazer gücü, tarama hızı ve tarama aralığı açısından göreceli yoğunluk ve ortalama yüzey pürüzlülüğü için öngörücü doğrusal regresyon analizi ile matematiksel modeller geliştirilmiştir. Regresyon matematik model denklemlerine göre yoğunluk ve YP ortalama yüzey pürüzlülüğü için tahmini değerler hesaplanmıştır. Tahmini ve deneysel sonuçlar birbirine oldukça yakın bulunmuştur.
- Yapılan optimizasyon sonuçlarına göre optimum parametre seti $h2v3P2$ yani tarama aralığı 90 μm tarama hızı 1000 mm/s ve lazer gücü 200 W olarak bulunmuştur. Bulunan bu parametre seti Taguchi deney tasarımındaki L6 numune parametre setine tekabül etmektedir.
- SLM numunelerinin yoğunluk analizi için arşimet prensibi kullanılmıştır. Arşimet onuçlarına göre en yoğun numune L6 numunesi olarak bulunmuştur.

- SLM ile üretilmiş tüm numunelerin mikroyapılarına bakıldığında β tanesi içerisindeki α' martenzit fazından oluştuğu, tüm numunelerde farklı oranlarda mikro porozite, küresel porozite ve keskin çatlak benzeri füzyon eksikliği/fazlalığına ait porozite bulunduğu gözlenmiştir.
- Hem deneysel hem de yapılan optimizasyona bağlı olarak belirlenen SLM parametrelerinde (tarama aralığı 90 μ m tarama hızı 1000 mm/s ve lazer gücü 200 W) bilyalı dövme işlemi için L6 numune seti seçilmiştir ve numune üretimleri yassı çekme tipi yorulma numunesi şeklinde yapılmıştır.
- Bilyalı dövme için GBD, ŞBD ve ABD dövme işlemleri yapılmıştır. Bilyalı dövme işlemleri YP yüzey pürüzlülüğünde beklendiği gibi bir artışa neden olmuştur, bilyalı dövme şiddeti arttıkça ise yüzey pürüzlülüğünün azaldığı raporlanmıştır. GBD dövme süresinin artması ile ŞBD işleminin gerçekleştirilmesi yüzey örtme oranının da artmasıyla R_a değerini bir miktar azaltmıştır fakat ABD işleminde uygulanan 0,8 mm çap üstüne 0,6 mm çap bilyalı dövme operasyonu yüzey pürüzlülüğünde düşüşe sebep olmuştur azalma trendine geçmiştir. Küçük çaplı bilya önceden oluşan bilya izlerini azaltmıştır. Ayrıca ŞBD yönteminde YP değerleri birbirine daha yakın çıkmıştır. Yüzey araştırmaları mekanik profilometre yanında SM ve SEM görüntüleri ile de desteklenmiştir.
- GBD, ŞBD ve ABD işlemi numunelerinde stereo görüntülerine bakıldığı zaman bilyalı dövme işleminin numunelerin hem ön hem de arka yüzeylerinde homojen uygulandığı doğrulanmıştır.
- Bilyalı dövme işlemi ile yüzey altı bölgelerinde tane incilmesi meydana gelmiştir. Bu sonuçlar OM görüntülerinde lamel kalınlığı ölçülerek nicel olarak ve SEM görüntüleri ile de nitel olarak ve martenzit lamelleri ölçüme ile kanıtlanmıştır. Bunun sonucu olarak numunelerin mikrosertlik değerlerinde beklenen artış gözlemlenmiştir.
- XRD pattern sonuçlarına bakıldığı zaman bilyalı dövme yöntemi ile FWHM değerlerinde pik genişlemesi mevcuttur ve kristalit boyutu azalmış, latis mikro gerinimleri artmış ve dislokasyon yoğunluğundaki artışta hesaplanmıştır.
- Yorulma sonuçlarına bakıldığında bilyalı dövme yönteminin SLM ile üretilmiş Ti6Al4V numunelerinin yorulma ömürlerini dayanımını arttırdığı bulunmuştur. Ayrıca, benzer gerilme seviyelerinde yorulma ömrü de artış göstermiştir. 11N şiddetiyle dövme hem de 18N şiddetiyle dövme yorulma dayanımını yaklaşık 1,5 kat arttırmıştır.

- Kırık yüzey SEM görüntülerine bakıldığında GBD bilyalı dövme işleminde almen Almen şiddetinin artması ile ultra ince tane yapısının gelişmesinden kaynaklı transkristalin kırık bölge gözlemlenmiş ve Almen yoğunluğu arttıkça daha ince çukurlu yapıların olduğu yuva bölgeler tespit edilmiştir. SLM numunede ise keskin fasetler içeren daha kırılğan bir kırık yüzey bölgesi meydana gelmiştir. Yorulma daha yavaş ilerlemiştir.
- Bu çalışma sonrası öneri olarak; ŞBD ABD dövme işlemi yapılan numunelerin yorulma analizlerinin testlerinin tamamlanması ve tüm yükler altında oluşan kırık yüzey görüntülerinin SEM ile daha detaylı analiz edilmesi, ayrıca bilyalı dövme işlemi ile elde edilen tüm numunelerde basma derinliğe bağlı kalıntı gerilme analizinin yapılması önerilmektedir.



10. KAYNAKÇA

- Abdulstaar, M. A., Al-Fadhalah, K. J., & Wagner, L. (2017). Microstructural variation through weld thickness and mechanical properties of peened friction stir welded 6061 aluminum alloy joints. *Materials Characterization*, 126, 64–73. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2017.02.011>
- Abdulstaar, M., Mhaede, M., Wollmann, M., & Wagner, L. (2014). Investigating the effects of bulk and surface severe plastic deformation on the fatigue, corrosion behaviour and corrosion fatigue of AA5083. *Surface and Coatings Technology*, 254, 244–251. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2014.06.026>
- Ahmed, A. A., Mhaede, M., Basha, M., Wollmann, M., & Wagner, L. (2015a). The effect of shot peening parameters and hydroxyapatite coating on surface properties and corrosion behavior of medical grade AISI 316L stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 280, 347–358. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2015.09.026>
- Ahmed, A. A., Mhaede, M., Basha, M., Wollmann, M., & Wagner, L. (2015b). The effect of shot peening parameters and hydroxyapatite coating on surface properties and corrosion behavior of medical grade AISI 316L stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 280, 347–358. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2015.09.026>
- Ahmed, A. A., Mhaede, M., Wollmann, M., & Wagner, L. (2016a). Effect of micro shot peening on the mechanical properties and corrosion behavior of two microstructure Ti–6Al–4V alloy. *Applied Surface Science*, 363, 50–58. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2015.12.019>
- Ahmed, A. A., Mhaede, M., Wollmann, M., & Wagner, L. (2016b). Effect of micro shot peening on the mechanical properties and corrosion behavior of two microstructure Ti–6Al–4V alloy. *Applied Surface Science*, 363, 50–58. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2015.12.019>
- Ahmed, T., & Rack, H. J. (1998). Phase transformations during cooling in $\alpha+\beta$ titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 243(1–2), 206–211. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00802-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00802-2)
- Akdaş, Y. F. (2006). *TERMAL OKSİDASYON YÖNTEMİ İLE CP-Ti VE Ti6Al4V ALAŞIMININ YÜZEY MODİFİKASYONU*.
- Ali, H., Ghadbeigi, H., & Mumtaz, K. (2018). Processing Parameter Effects on Residual Stress and Mechanical Properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(8), 4059–4068. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3477-5>

- Ali, S., Karunanithi, R., Prashanth, M., & Rahman, M. A. (2020). X-ray peak broadening on microstructure, and structural properties of titanium and Ti-6Al-4V alloys. *Materials Today: Proceedings*, 27, 2390–2393. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2019.09.137>
- Anderl, R., Schmid, H. J., Kage, M., & Karg, M. C. H. (2017). Additive manufacturing. *Acatech-National Academy of Science and Engineering, GERMANY*.
- Arola, D., Alade, A. E., & Weber, W. (2006). Improving fatigue strength of metals using abrasive waterjet peening. *Machining Science and Technology*, 10(2), 197–218. <https://doi.org/10.1080/10910340600710105>
- Atar, E., Kayali, E. S., & Cimenoglu, H. (2008). Characteristics and wear performance of borided Ti6Al4V alloy. *Surface and Coatings Technology*, 202(19), 4583–4590. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2008.03.011>
- Attar, H., Bönisch, M., Calin, M., Zhang, L. C., Scudino, S., & Eckert, J. (2014). Selective laser melting of in situ titanium–titanium boride composites: Processing, microstructure and mechanical properties. *Acta Materialia*, 76, 13–22. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2014.05.022>
- Attar, H., Calin, M., Zhang, L. C., Scudino, S., & Eckert, J. (2014). Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium. *Materials Science and Engineering: A*, 593, 170–177. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.11.038>
- AVCU, E. (2018). Bilyalı Dövme Parametrelerinin AA7075 Alüminyum Alaşımının Yüzey Altı Özelliklerine Etkileri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(4), 741–752. <https://doi.org/10.29109/gujsc.389828>
- Azhari, A., Schindler, C., Hilbert, K., Godard, C., & Kerscher, E. (2014). Influence of waterjet peening and smoothing on the material surface and properties of stainless steel 304. *Surface and Coatings Technology*, 258, 1176–1182. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2014.07.013>
- Bacchewar, P. B., Singhal, S. K., & Pandey, P. M. (2007). Statistical modelling and optimization of surface roughness in the selective laser sintering process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 221(1), 35–52.
- Bagheri, S., & Guagliano, M. (2009). Review of shot peening processes to obtain nanocrystalline surfaces in metal alloys. *Surface Engineering*, 25(1), 3–14. <https://doi.org/10.1179/026708408X334087>

- Bagherifard, S., Fernandez-Pariente, I., Ghelichi, R., & Guagliano, M. (2014). Effect of severe shot peening on microstructure and fatigue strength of cast iron. *International Journal of Fatigue*, 65, 64–70.
- Bagherifard, S., Ghelichi, R., & Guagliano, M. (2012). Numerical and experimental analysis of surface roughness generated by shot peening. *Applied Surface Science*, 258(18), 6831–6840. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2012.03.111>
- Bagherifard, S., Slawik, S., Fernández-Pariente, I., Pauly, C., Mücklich, F., & Guagliano, M. (2016). Nanoscale surface modification of AISI 316L stainless steel by severe shot peening. *Materials and Design*, 102. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.162>
- Banerjee, D., & Williams, J. C. (2013). Perspectives on Titanium Science and Technology. *Acta Materialia*, 61(3), 844–879. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2012.10.043>
- Barış, F. (2020). *MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ YÜKSEK LİSANS TEZİ MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI 50CrV4 ÇELİĞİN YÜZEYİNDE OLUŞTURULAN YAPAY YÜZEY KUSURLARINA BİLYALI DÖVME İŞLEMİNİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ.*
- Bartolomeu, F., Faria, S., Carvalho, O., Pinto, E., Alves, N., Silva, F. S., & Miranda, G. (2016). Predictive models for physical and mechanical properties of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting. *Materials Science and Engineering: A*, 663, 181–192. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.03.113>
- Barua, S., Liou, F., Newkirk, J., & Sparks, T. (2014). Vision-based defect detection in laser metal deposition process. *Rapid Prototyping Journal*, 20(1), 77–86. <https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2012-0036>
- Bauereiß, A., Scharowsky, T., & Körner, C. (2014). Defect generation and propagation mechanism during additive manufacturing by selective beam melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11), 2522–2528. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2014.05.002>
- Benjamin, D., & Kirkpatrick, C. W. (1980). *Properties and selection, stainless steels, tool materials, and special purpose metals* (Vol. 9, Issue 3). American Society for Metals.
- Bhattacharjee, A., Saha, B., & Williams, J. C. (2017). Titanium alloys: part 1—physical metallurgy and processing. *Aerospace Materials and Material Technologies: Volume 1: Aerospace Materials*, 91–115.
- Bineli, A. R. R., Peres, A. P. G., Jardini, A. L., & Maciel Filho, R. (2011). Direct metal laser sintering (DMLS): Technology for design and construction of

microreactors. 6^o CONGRESS OBRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 11.

- Bormann, T., Müller, B., Schinhammer, M., Kessler, A., Thalmann, P., & De Wild, M. (2014). Microstructure of selective laser melted nickel-titanium. *Materials Characterization*, 94, 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.05.017>
- Bruno, J., Rochman, A., & Cassar, G. (2017). Effect of Build Orientation of Electron Beam Melting on Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(2), 692–703. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2502-4>
- Camposeco-Negrete, C. (2013). Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA. *Journal of Cleaner Production*, 53, 195–203.
- Chang, T. C., & Lin, S. J. (1999). Grey relation analysis of carbon dioxide emissions from industrial production and energy uses in Taiwan. *Journal of Environmental Management*, 56(4), 247–257. <https://doi.org/10.1006/JEMA.1999.0288>
- Courtois, M., Carin, M., Masson, P. Le, Gaied, S., & Balabane, M. (2013). A new approach to compute multi-reflections of laser beam in a keyhole for heat transfer and fluid flow modelling in laser welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(50), 505305. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/50/505305>
- Çubuk, A. (2020). *KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI YÜKSEK LİSANS TEZİ BİLYALI DÖVME İŞLEMİNDE BİLYA ÇARPMA AÇISI VE BİLYA BOYUTUNUN AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ YÜZEY VE YÜZEY ALTI ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ.*
- Cui, C., Hu, B. M., Zhao, L., & Liu, S. (2011). Titanium alloy production technology, market prospects and industry development. *Materials and Design*, 32(3), 1684–1691. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.09.011>
- Dareh Baghi, A., Nafisi, S., Hashemi, R., Ebendorff-Heidepriem, H., & Ghomashchi, R. (2021). Effective post processing of SLM fabricated Ti-6Al-4 V alloy: Machining vs thermal treatment. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 1031–1046. <https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2021.06.035>
- Das, S., Wohler, M., Beaman, J. J., & Bourell, D. L. (1998). *Overview Direct Fabrication Producing Metal Parts with Selective Laser Sintering/Hot Isostatic Pressing*. www.tms.org/pubs/

- de Formanoir, C., Martin, G., Prima, F., Allain, S. Y. P., Dessolier, T., Sun, F., Vivès, S., Hary, B., Bréchet, Y., & Godet, S. (2019). Micromechanical behavior and thermal stability of a dual-phase $\alpha+\alpha'$ titanium alloy produced by additive manufacturing. *Acta Materialia*, 162, 149–162.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.09.050>
- Despeisse Mélanie and Ford, S. (2015). The Role of Additive Manufacturing in Improving Resource Efficiency and Sustainability. In M. and M. H. and H. H. and K. D. and von C. G. Umeda Shigeki and Nakano (Ed.), *Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth* (pp. 129–136). Springer International Publishing.
- Dilip, J. J. S., Zhang, S., Teng, C., Zeng, K., Robinson, C., Pal, D., & Stucker, B. (2017). Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting. *Progress in Additive Manufacturing*, 2(3), 157–167.
<https://doi.org/10.1007/s40964-017-0030-2>
- Do, D. K., & Li, P. (2016). The effect of laser energy input on the microstructure, physical and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloys by selective laser melting. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(1), 41–47.
<https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1142215>
- du Plessis, A., Yadroitsava, I., Yadroitsev, I., le Roux, S. G., & Blaine, D. C. (2018). Numerical comparison of lattice unit cell designs for medical implants by additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 13(4), 266–281.
<https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1491713>
- Duman, B., & Cengiz Kayacan, M. (2017). *Doğrudan Metal Lazer Sinterleme/Ergitme Yöntemi ile İmal Edilecek Parçanın Mekanik Özelliklerinin Tahmini*.
- Dutt, A. K., Bansal, G. K., Tripathy, S., Gopala Krishna, K., Srivastava, V. C., & Ghosh Chowdhury, S. (2023). Optimization of Selective Laser Melting (SLM) Additive Manufacturing Process Parameters of 316L Austenitic Stainless Steel. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 76(2), 335–345.
<https://doi.org/10.1007/s12666-022-02687-2>
- Egemen Avcu. (2020). *KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI YÜKSEK LİSANS TEZİ FARKLI YÜZEY ÖRTME ORANI VE BİLYA PÜSKÜRTME BASINÇLARINDA BİLYALI DÖVÜLEN AA1050 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ YÜZEY VE YÜZEY ALTI ÖZELLİKLERİ BERKAY GÖNÜL*.
- Ezugwu, E. O., & Wang, Z. M. (1997). Titanium alloys and their machinability—a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 68(3), 262–274.
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)00030-1)

- Facchini, L., Magalini, E., Robotti, P., Molinari, A., Höges, S., & Wissenbach, K. (2010). Ductility of a Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting of prealloyed powders. *Rapid Prototyping Journal*, 16(6), 450–459. <https://doi.org/10.1108/13552541011083371>
- Feng, Q., Jiang, C., Xu, Z., Xie, L., & Ji, V. (2013). Effect of shot peening on the residual stress and microstructure of duplex stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 226, 140–144. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2013.03.047>
- Froes, F. H. (Sam). (2004). Titanium Alloys. In *Handbook of Advanced Materials* (pp. 271–319). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/0471465186.ch8>
- Galarraga, H., Lados, D. A., Dehoff, R. R., Kirka, M. M., & Nandwana, P. (2016). Effects of the microstructure and porosity on properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM). *Additive Manufacturing*, 10, 47–57. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2016.02.003>
- Gao, B., Zhao, H., Peng, L., & Sun, Z. (2023). A Review of Research Progress in Selective Laser Melting (SLM). In *Micromachines* (Vol. 14, Issue 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/mi14010057>
- Gencalp Irizalp, S., Saklakoglu, N., & Yilbas, B. S. (2014). Characterization of microplastic deformation produced in 6061-T6 by using laser shock processing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(1–4), 109–115. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5481-0>
- Gillham, B., Yankin, A., McNamara, F., Tomonto, C., Taylor, D., & Lupoi, R. (2021). Application of the Theory of Critical Distances to predict the effect of induced and process inherent defects for SLM Ti-6Al-4V in high cycle fatigue. *CIRP Annals*, 70(1), 171–174. <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2021.03.004>
- Gong, H., Rafi, K., Gu, H., Janaki Ram, G. D., Starr, T., & Stucker, B. (2015). Influence of defects on mechanical properties of Ti-6Al-4 V components produced by selective laser melting and electron beam melting. *Materials & Design*, 86, 545–554. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2015.07.147>
- Gong, H., Rafi, K., Starr, T., & Stucker, B. (2013). *The Effects of Processing Parameters on Defect Regularity in Ti-6Al-4V Parts Fabricated By Selective Laser Melting and Electron Beam Melting*.
- Gu, D., Hagedorn, Y. C., Meiners, W., Meng, G., Batista, R. J. S., Wissenbach, K., & Poprawe, R. (2012). Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium. *Acta Materialia*, 60(9), 3849–3860. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2012.04.006>

- Han, J., Yang, J., Yu, H., Yin, J., Gao, M., Wang, Z., & Zeng, X. (2017). Microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V dependence on laser energy density. *Rapid Prototyping Journal*, 23(2), 217–226. <https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2015-0193>
- Harada, Y., Fukauara, K., & Kohamada, S. (2008). Effects of microshot peening on surface characteristics of high-speed tool steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 201(1–3), 319–324. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2007.11.247>
- Heaton, R. B. (1989). Shot peening. *Met. Finish.*, 87(7), 25–26.
- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371–392. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2016.07.019>
- IJ, P. (1996). Recent developments in light alloys. *Materials Transactions, JIM*, 37(1), 12–31.
- Ivasyshyn, O. M., & Aleksandrov, A. V. (2008). STATUS OF THE TITANIUM PRODUCTION, RESEARCH, AND APPLICATIONS IN THE CIS. In *Materials Science* (Vol. 44, Issue 3).
- Jain, A. (2001). *International Conference on Shot Peening and Blast Cleaning A DATABASE FOR SHOT PEENING PARAMETERS AND DESIRED RESIDUAL STRESS DISTRIBUTION*.
- Javidrad, H. R., & Salemi, S. (2020). Effect of the Volume Energy Density and Heat Treatment on the Defect, Microstructure, and Hardness of L-PBF Inconel 625. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 51(11), 5880–5891. <https://doi.org/10.1007/s11661-020-05992-x>
- Jia, H., Sun, H., Wang, H., Wu, Y., & Wang, H. (2021). Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 113, 2413–2435. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06810-3>/Published
- Jia, Y. D., Ma, P., Prashanth, K. G., Wang, G., Yi, J., Scudino, S., Cao, F. Y., Sun, J. F., & Eckert, J. (2017). Microstructure and thermal expansion behavior of Al-50Si synthesized by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*, 699, 548–553. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2016.12.429>
- Jiang, X. P., Wang, X. Y., Li, J. X., Li, D. Y., Man, C.-S., Shepard, M. J., & Zhai, T. (2006). Enhancement of fatigue and corrosion properties of pure Ti by sandblasting. *Materials Science and Engineering: A*, 429(1–2), 30–35.

- Kamel, E., & Maawad, S. (2012). *Eigenspannungsanalyse und Ermüdungsverhalten von mechanisch oberflächenbehandelten Titanlegierungen Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Ingenieurwissenschaften vorgelegt von.*
- Kasemsiri, P., Dulsang, N., Pongsa, U., Hiziroglu, S., & Chindaprasirt, P. (2017). Optimization of Biodegradable Foam Composites from Cassava Starch, Oil Palm Fiber, Chitosan and Palm Oil Using Taguchi Method and Grey Relational Analysis. *Journal of Polymers and the Environment*, 25(2), 378–390.
<https://doi.org/10.1007/s10924-016-0818-z>
- Kasperovich, G., Haubrich, J., Gussone, J., & Requena, G. (2016). Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting. *Materials & Design*, 105, 160–170.
<https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2016.05.070>
- Kasperovich, G., & Hausmann, J. (2015a). Improvement of fatigue resistance and ductility of TiAl6V4 processed by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 220, 202–214.
<https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2015.01.025>
- Kasperovich, G., & Hausmann, J. (2015b). Improvement of fatigue resistance and ductility of TiAl6V4 processed by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 220, 202–214.
<https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2015.01.025>
- Kayacan, M. Y., & Yılmaz, N. (2019). DMLS İLE EKLEMELİ İMALATTA DENGESİZ SICAKLIK DAĞILIMI ve PARÇAYA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(1), 1–1. <https://doi.org/10.21541/apjes.408921>
- Kempen, K., Vrancken, B., Buls, S., Thijs, L., Van Humbeeck, J., & Kruth, J. P. (2014). Selective Laser Melting of Crack-Free High Density M2 High Speed Steel Parts by Baseplate Preheating. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 136(6).
<https://doi.org/10.1115/1.4028513>
- Khan, M. M., & Dey, A. (2021). Selection of optimal processing condition during abrasive wear of in-situ ZA-37/TiCp composites using MCDM technique. *Ceramics International*, 47(14), 20090–20107.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.016>
- Khorasani, A. M., Gibson, I., Ghasemi, A. H., & Ghaderi, A. (2019). A comprehensive study on variability of relative density in selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Virtual and Physical Prototyping*, 14(4), 349–359.
<https://doi.org/10.1080/17452759.2019.1614198>

- Khorasani, A. M., Gibson, I., Goldberg, M., & Littlefair, G. (2017). On the role of different annealing heat treatments on mechanical properties and microstructure of selective laser melted and conventional wrought Ti-6Al-4V. *Rapid Prototyping Journal*, 23(2), 295–304. <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2016-0022>
- Kruth, J. P., Wang, X., Laoui, T., & Froyen, L. (2003). Lasers and materials in selective laser sintering. *Assembly Automation*, 23(4), 357–371. <https://doi.org/10.1108/01445150310698652>
- Kruth, J.-P., Deckers, J., Yasa, E., & Wauthlé, R. (2012). Assessing and comparing influencing factors of residual stresses in selective laser melting using a novel analysis method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226(6), 980–991. <https://doi.org/10.1177/0954405412437085>
- Kumar, P., Prakash, O., & Ramamurty, U. (2018). Micro-and meso-structures and their influence on mechanical properties of selectively laser melted Ti-6Al-4V. *Acta Materialia*, 154, 246–260. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2018.05.044>
- Kumar, S., Chattopadhyay, K., Singh, S. R., & Singh, V. (2017). Surface nanostructuring of Ti-6Al-4V alloy through ultrasonic shot peening. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 11(1), 23–35.
- Kunze, K., Etter, T., Grässlin, J., & Shklover, V. (2015). Texture, anisotropy in microstructure and mechanical properties of IN738LC alloy processed by selective laser melting (SLM). *Materials Science and Engineering: A*, 620, 213–222. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2014.10.003>
- Lan, L., Jin, X., Gao, S., He, B., & Rong, Y. (2020). Microstructural evolution and stress state related to mechanical properties of electron beam melted Ti-6Al-4V alloy modified by laser shock peening. *Journal of Materials Science & Technology*, 50, 153–161.
- Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H. A., & Maier, H. J. (2013). On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance. *International Journal of Fatigue*, 48, 300–307. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2012.11.011>
- Li, H., Jia, D., Yang, Z., Liao, X., Jin, H., Cai, D., & Zhou, Y. (2021). Effect of heat treatment on microstructure evolution and mechanical properties of selective laser melted Ti-6Al-4V and TiB/Ti-6Al-4V composite: A comparative study. *Materials Science and Engineering: A*, 801, 140415. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2020.140415>

- Li, R., Shi, Y., Wang, Z., Wang, L., Liu, J., & Jiang, W. (2010). Densification behavior of gas and water atomized 316L stainless steel powder during selective laser melting. *Applied Surface Science*, 256(13), 4350–4356.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.02.030>
- Liu, S., & Shin, Y. C. (2019). Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Materials & Design*, 164, 107552.
<https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2018.107552>
- Liverani, E., Fortunato, A., Leardini, A., Belvedere, C., Siegler, S., Ceschini, L., & Ascari, A. (2016). Fabrication of Co-Cr-Mo endoprosthetic ankle devices by means of Selective Laser Melting (SLM). *Materials and Design*, 106, 60–68.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.083>
- Llaneza, V., & 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.
<https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2015.08.110>
- Louvis, E., Fox, P., & Sutcliffe, C. J. (2011). Selective laser melting of aluminium components. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(2), 275–284.
<https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2010.09.019>
- Lu, J. Z., Luo, K. Y., Zhang, Y. K., Cui, C. Y., Sun, G. F., Zhou, J. Z., Zhang, L., You, J., Chen, K. M., & Zhong, J. W. (2010). Grain refinement of LY2 aluminum alloy induced by ultra-high plastic strain during multiple laser shock processing impacts. *Acta Materialia*, 58(11), 3984–3994.
- Lu, J. Z., Wu, L. J., Sun, G. F., Luo, K. Y., Zhang, Y. K., Cai, J., Cui, C. Y., & Luo, X. M. (2017). Microstructural response and grain refinement mechanism of commercially pure titanium subjected to multiple laser shock peening impacts. *Acta Materialia*, 127, 252–266.
- Luong, H., & Hill, M. R. (2010). The effects of laser peening and shot peening on high cycle fatigue in 7050-T7451 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 527(3), 699–707.
- Lütjering, G. (1998). Influence of processing on microstructure and mechanical properties of (α + β) titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 243(1–2), 32–45. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00778-8](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00778-8)
- Maamoun, A. H., Elbestawi, M. A., & Veldhuis, S. C. (2018a). Influence of shot peening on alsi10mg parts fabricated by additive manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(3).
<https://doi.org/10.3390/jmmp2030040>

- Maamoun, A. H., Elbestawi, M. A., & Veldhuis, S. C. (2018b). Influence of shot peening on alsi10mg parts fabricated by additive manufacturing. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(3).
<https://doi.org/10.3390/jmmp2030040>
- Maawad, E., Sano, Y., Wagner, L., Brokmeier, H. G., & Genzel, C. (2012). Investigation of laser shock peening effects on residual stress state and fatigue performance of titanium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 536, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.12.072>
- Mahagaonkar, S. B., Brahmanekar, P. K., & Seemikeri, C. Y. (2008). Effect of shot peening parameters on microhardness of AISI 1045 and 316L material: An analysis using design of experiment. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38(5–6), 563–574. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1222-6>
- Maleki, E., Unal, O., & Amanov, A. (2018). Novel experimental methods for the determination of the boundaries between conventional, severe and over shot peening processes. *Surfaces and Interfaces*, 13, 233–254.
<https://doi.org/10.1016/j.surfin.2018.09.003>
- Mandache, C. (2019). Overview of non-destructive evaluation techniques for metal-based additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 35(9), 1007–1015. <https://doi.org/10.1080/02670836.2019.1596370>
- Mellor, S., Hao, L., & Zhang, D. (2014). Additive manufacturing: A framework for implementation. *International Journal of Production Economics*, 149, 194–201. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2013.07.008>
- Mercelis, P., & Kruth, J. (2006). Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 12(5), 254–265.
<https://doi.org/10.1108/13552540610707013>
- Miao, H. Y., Lévesque, M., & Perron, C. (2010). *Titre: Title: Numerical and Theoretical Study of Shot Peening and Stress Peen Forming Process*.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & sons.
- Motyka, M., Baran-Sadleja, A., Sieniawski, J., Wierzbinska, M., & Gancarczyk, K. (2019). Decomposition of deformed $\alpha'(\alpha'')$ martensitic phase in Ti–6Al–4V alloy. *Materials Science and Technology*, 35(3), 260–272.
<https://doi.org/10.1080/02670836.2018.1466418>
- Moussaoui, K., Rubio, W., Mousseigne, M., Sultan, T., & Rezai, F. (2018). Effects of Selective Laser Melting additive manufacturing parameters of Inconel 718 on porosity, microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 735, 182–190. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2018.08.037>

- Murr, L. E., Esquivel, E. V., Quinones, S. A., Gaytan, S. M., Lopez, M. I., Martinez, E. Y., Medina, F., Hernandez, D. H., Martinez, E., Martinez, J. L., Stafford, S. W., Brown, D. K., Hoppe, T., Meyers, W., Lindhe, U., & Wicker, R. B. (2009). Microstructures and mechanical properties of electron beam-rapid manufactured Ti-6Al-4V biomedical prototypes compared to wrought Ti-6Al-4V. *Materials Characterization*, 60(2), 96–105.
<https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2008.07.006>
- Murr, L. E., Gaytan, S. M., Ceylan, A., Martinez, E., Martinez, J. L., Hernandez, D. H., Machado, B. I., Ramirez, D. A., Medina, F., Collins, S., & Wicker, R. B. (2010). Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting. *Acta Materialia*, 58(5), 1887–1894. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2009.11.032>
- Murr, L. E., Quinones, S. A., Gaytan, S. M., Lopez, M. I., Rodela, A., Martinez, E. Y., Hernandez, D. H., Martinez, E., Medina, F., & Wicker, R. B. (2009). Microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2(1), 20–32.
<https://doi.org/10.1016/J.JMBBM.2008.05.004>
- Mutlu, O. (2021). *MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ YÜKSEK LİSANS MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI AISI 304 PASLANMAZ ÇELİĞİNDE ÇOK ADIMLI BİLYALI DÖVME UYGULAMALARININ MİKROYAPI VE MALZEME ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ.*
- Nam, Y.-S., Jeong, Y.-I., Shin, B.-C., & Byun, J.-H. (2015). Enhancing surface layer properties of an aircraft aluminum alloy by shot peening using response surface methodology. *Materials & Design*, 83, 566–576.
- Nandwana, P., & Lee, Y. (2020). Influence of scan strategy on porosity and microstructure of Ti-6Al-4V fabricated by electron beam powder bed fusion. *Materials Today Communications*, 24, 100962.
<https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2020.100962>
- Narasimharaju, S. R. (2023). *INVESTIGATION OF SURFACE QUALITY, METALLURGICAL DEFECTS AND MECHANICAL PROPERTIES OF LASER POWDER BED FUSION PROCESSED 316L STAINLESS STEEL AND Ti6Al4V TITANIUM ALLOYS.*
- Niaki, M. K., & Nonino, F. (2018). The management of additive manufacturing. *Birmingham: Springer.*

- Ochi, Y., Masaki, K., Matsumura, T., & Sekino, T. (2001). Effect of shot-peening treatment on high cycle fatigue property of ductile cast iron. *International Journal of Fatigue*, 23(5), 441–448.
- Onal, E., Medvedev, A. E., Leeﬂang, M. A., Molotnikov, A., & Zadpoor, A. A. (2019). Novel microstructural features of selective laser melted lattice struts fabricated with single point exposure scanning. *Additive Manufacturing*, 29, 100785. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2019.100785>
- Önder, S., & Saklakoğlu, N. (2022). *DOKTORA TEZİ MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN Ti6Al4V NUMUNELERİN MEKANİK ve İÇYAPI ÖZELLİKLERİNE ÜRETİM PARAMETRELERİ ve DAYANIM ARTIRICI İŞLEMLERİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ*.
- Özer, G. (2020). Eklemeli Üretim Teknolojileri Üzerine Bir Derleme. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.626011>
- Pang, S., Chen, W., & Wang, W. (2014). A quantitative model of keyhole instability induced porosity in laser welding of titanium alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 45(6), 2808–2818. <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2231-3>
- Parthasarathy, J., Starly, B., Raman, S., & Christensen, A. (2010). Mechanical evaluation of porous titanium (Ti6Al4V) structures with electron beam melting (EBM). *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 3(3), 249–259. <https://doi.org/10.1016/J.JMBBM.2009.10.006>
- Paul, E., Black, J. T., & Ronald, A. K. (2003). *MATERIALS AND PROCESSES IN MANUFACTURING*. PRENTICE-HALL, Incorporated.
- Poyraz, Ö., & Kuşhan, M. C. (2018). Investigation of the effect of different process parameters for laser additive manufacturing of metals. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(2), 729–742. <https://doi.org/10.17341/GAZIMMFD.416479>
- Pushp, P., Dasharath, S. M., & Arati, C. (2022). Classification and applications of titanium and its alloys. *Materials Today: Proceedings*, 54, 537–542. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.01.008>
- Qiu, C., Adkins, N. J. E., & Attallah, M. M. (2013). Microstructure and tensile properties of selectively laser-melted and of HIPed laser-melted Ti–6Al–4V. *Materials Science and Engineering: A*, 578, 230–239. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2013.04.099>

- Qiu, C., Panwisawas, C., Ward, M., Basoalto, H. C., Brooks, J. W., & Attallah, M. M. (2015). On the role of melt flow into the surface structure and porosity development during selective laser melting. *Acta Materialia*, 96, 72–79. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2015.06.004>
- Riahi, M., & Javidrad, H. R. (2020). Production of Ultrasonic Test Piece by Utilization of Additive Manufacturing Technique. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 56(10), 843–852. <https://doi.org/10.1134/S106183092010006X>
- Riedlbauer, D., Scharowsky, T., Singer, R. F., Steinmann, P., Körner, C., & Mergheim, J. (2017). Macroscopic simulation and experimental measurement of melt pool characteristics in selective electron beam melting of Ti-6Al-4V. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(5–8), 1309–1317. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8819-6>
- Rossini, N. S., Dassisti, M., Benyounis, K. Y., & Olabi, A. G. (2012). Methods of measuring residual stresses in components. *Materials & Design*, 35, 572–588. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2011.08.022>
- Saha, A. (2017). Empirical modelling of machining parameters for turning operations using multiobjective Taguchi method. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 14(3), 4448–4461. <https://doi.org/10.15282/ijame.14.3.2017.5.0352>
- Savaş, S. (2010). *MONITORING VARIATION OF SURFACE RESIDUAL STRESSES IN THE SHOT-PEENED STEEL COMPONENTS BY MAGNETIC BARKHAUSEN NOISE METHOD A THESIS SUBMITTED TO THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES OF MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY.*
- Schwab, H., Palm, F., Kühn, U., & Eckert, J. (2016). Microstructure and mechanical properties of the near-beta titanium alloy Ti-5553 processed by selective laser melting. *Materials and Design*, 105, 75–80. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.103>
- Scuracchio, B. G., de Lima, N. B., & Schön, C. G. (2013). Role of residual stresses induced by double peening on fatigue durability of automotive leaf springs. *Materials & Design*, 47, 672–676.
- Shamblen, C. E., & Redden, T. K. (1967). Air contamination and embrittlement of titanium alloys. *The Science, Technology and Application of Titanium*, 199–208.
- Shipley, H., McDonnell, D., Culleton, M., Coull, R., Lupoi, R., O'Donnell, G., & Trimble, D. (2018). Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: A review. *International*

Journal of Machine Tools and Manufacture, 128, 1–20.
<https://doi.org/10.1016/J.IJMACHTOOLS.2018.01.003>

Shives, T. R. (1991). *Mechanical Failures Prevention Group Meeting. Advanced Technologies in Failure Prevention: Proceedings of the 43rd Meeting of the Mechanical*. Cambridge University Press.

Simonelli, M., Tse, Y. Y., & Tuck, C. (2014a). Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti–6Al–4V. *Materials Science and Engineering: A*, 616, 1–11.
<https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2014.07.086>

Simonelli, M., Tse, Y. Y., & Tuck, C. (2014b). Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti–6Al–4V. *Materials Science and Engineering: A*, 616, 1–11.
<https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2014.07.086>

Sing, S. L., An, J., Yeong, W. Y., & Wiria, F. E. (2016). Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs. In *Journal of Orthopaedic Research* (Vol. 34, Issue 3, pp. 369–385). John Wiley and Sons Inc.
<https://doi.org/10.1002/jor.23075>

Sun, W., Ma, Y., Huang, W., Zhang, W., & Qian, X. (2020). Effects of build direction on tensile and fatigue performance of selective laser melting Ti6Al4V titanium alloy. *International Journal of Fatigue*, 130, 105260.
<https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2019.105260>

Suresha, S., & Sridhara, B. K. (2010). Wear characteristics of hybrid aluminium matrix composites reinforced with graphite and silicon carbide particulates. *Composites Science and Technology*, 70(11), 1652–1659.
<https://doi.org/10.1016/J.COMPSCITECH.2010.06.013>

Taheri, H., Shoaib, M. R. B. M., Koester, L. W., Bigelow, T. A., Collins, P. C., & Bond, L. J. (2017). Powder-based additive manufacturing - a review of types of defects, generation mechanisms, detection, property evaluation and metrology. *International Journal of Additive and Subtractive Materials Manufacturing*, 1(2), 172–209. <https://doi.org/10.1504/IJASMM.2017.088204>

Tanrıöver, K., & Taşçı, A. (1997). Titanyum Alaşımlarının Isıl İşlemi. *Makine Magazin*, 58.

Tekdir, H., Lisans, Y., Mühendisliği, T. M., & Dalı, A. (2019). *SEÇİCİ LAZER ERGİTME (SLE) İLE ÜRETİLEN 316L/Tİ6AL4V TABAKALI YAPILARIN TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN PLAZMA OKSİDASYON İLE İYİLEŞTİRİLMESİ*.

- Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Humbeeck, J. Van, & Kruth, J. P. (2010a). A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti–6Al–4V. *Acta Materialia*, 58(9), 3303–3312.
<https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2010.02.004>
- Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Humbeeck, J. Van, & Kruth, J. P. (2010b). A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti–6Al–4V. *Acta Materialia*, 58(9), 3303–3312.
<https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2010.02.004>
- Thöne, M., Leuders, S., Riemer, A., Tröster, T., & Richard, H. A. (2012). *Influence of heat-treatment on Selective Laser Melting products – e.g. Ti6Al4V*.
- Tian, H., Lu, Z., & Chen, S. (2022). Predictive Modeling of Thermally Assisted Machining and Simulation Based on RSM after WAAM. *Metals*, 12(4).
<https://doi.org/10.3390/met12040691>
- Tian, J. W., Villegas, J. C., Yuan, W., Fielden, D., Shaw, L., Liaw, P. K., & Klarstrom, D. L. (2007). A study of the effect of nanostructured surface layers on the fatigue behaviors of a C-2000 superalloy. *Materials Science and Engineering: A*, 468, 164–170.
- Tolou, B., & Awwal, A. H. (1976). *PHASE SEPARATION AND UNDERCOOLING IN Al-Si EUTECTIC ALLOY-THE INFLUENCE OF FREEZING RATE AND TEMPERATURE GRADIENT*.
- Tosun, N. (2006). Determination of optimum parameters for multi-performance characteristics in drilling by using grey relational analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(5–6), 450–455.
<https://doi.org/10.1007/s00170-004-2386-y>
- Trdan, U., Skarba, M., & Grum, J. (2014). Laser shock peening effect on the dislocation transitions and grain refinement of Al–Mg–Si alloy. *Materials Characterization*, 97, 57–68.
- Trško, L., Bokůvka, O., Nový, F., & Guagliano, M. (2014). Effect of severe shot peening on ultra-high-cycle fatigue of a low-alloy steel. *Materials & Design*, 57, 103–113.
- Trung, P. Q., Khun, N. W., & Butler, D. L. (2016). Effects of shot peening pressure, media type and double shot peening on the microstructure, mechanical and tribological properties of low-alloy steel. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 4(4), 045001. <https://doi.org/10.1088/2051-672X/4/4/045001>
- Ünal, O., Fen, B. Ü., Enstitüsü, B., Mühendisliği, M., Dalında, A., Lisans, Y., Olarak, T., & Bartin, H. (2011). *BİLYALI DÖVME İŞLEMİNİN TANE BOYUTUNA ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ*.

- Unal, O., & Varol, R. (2014). Almen intensity effect on microstructure and mechanical properties of low carbon steel subjected to severe shot peening. *Applied Surface Science*, 290, 40–47. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.10.184>
- Unal, O., & Varol, R. (2015). Surface severe plastic deformation of AISI 304 via conventional shot peening, severe shot peening and repeening. *Applied Surface Science*, 351, 289–295. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2015.05.093>
- Uzan, N. E., Ramati, S., Shneck, R., Frage, N., & Yeheskel, O. (2018a). On the effect of shot-peening on fatigue resistance of AlSi10Mg specimens fabricated by additive manufacturing using selective laser melting (AM-SLM). *Additive Manufacturing*, 21, 458–464. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.030>
- Uzan, N. E., Ramati, S., Shneck, R., Frage, N., & Yeheskel, O. (2018b). On the effect of shot-peening on fatigue resistance of AlSi10Mg specimens fabricated by additive manufacturing using selective laser melting (AM-SLM). *Additive Manufacturing*, 21, 458–464. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2018.03.030>
- Vaezi, M., Seitz, H., & Yang, S. (2013). A review on 3D micro-additive manufacturing technologies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 1721–1754.
- Vandenbroucke, B., & Kruth, J. P. (2007). Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. *Rapid Prototyping Journal*, 13(4), 196–203. <https://doi.org/10.1108/13552540710776142>
- Vázquez, J., Navarro, C., & Domínguez, J. (2012). Experimental results in fretting fatigue with shot and laser peened Al 7075-T651 specimens. *International Journal of Fatigue*, 40, 143–153.
- Vilaro, T., Colin, C., & Bartout, J. D. (2011). As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 42(10), 3190–3199. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0731-y>
- Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J. P., & Van Humbeeck, J. (2012). Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 541, 177–185. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2012.07.022>
- Wang, C., Wang, L., Wang, X., & Xu, Y. (2018). Numerical study of grain refinement induced by severe shot peening. *International Journal of Mechanical Sciences*, 146–147, 280–294. <https://doi.org/10.1016/J.IJMECSCI.2018.08.005>

- Wei, K., Yang, Q., Ling, B., Yang, X., Xie, H., Qu, Z., & Fang, D. (2020). Mechanical properties of Invar 36 alloy additively manufactured by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 772, 138799. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2019.138799>
- Wiecinski, P., Garbacz, H., Ossowski, M., Wierzchoń, T., & Kurzydłowski, K. J. (2007). Ti – Al Intermetallic Layers Produced on Titanium Alloy by Duplex Method. *Key Engineering Materials*, 333, 285–288. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.333.285>
- Williams, D. F. (1976). Corrosion of implant materials. *Annual Review of Materials Science*, 6(1), 237–266.
- Wojciechowski, S., Maruda, R. W., Barrans, S., Nieslony, P., & Krolczyk, G. M. (2017). Optimisation of machining parameters during ball end milling of hardened steel with various surface inclinations. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 111, 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.07.020>
- Wu, A. S., Brown, D. W., Kumar, M., Gallegos, G. F., & King, W. E. (2014). An Experimental Investigation into Additive Manufacturing-Induced Residual Stresses in 316L Stainless Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 45(13), 6260–6270. <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2549-x>
- Wu, D., Yao, C., & Zhang, D. (2018). Surface characterization and fatigue evaluation in GH4169 superalloy: comparing results after finish turning; shot peening and surface polishing treatments. *International Journal of Fatigue*, 113, 222–235.
- Xie, L., Wen, Y., Wang, L., Jiang, C., & Ji, V. (2016). Characterization on Surface Properties of Ti–6Al–4V After Multiple Shot Peening Treatments. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 138(4). <https://doi.org/10.1115/1.4033577>
- Xie, Z., Dai, Y., Ou, X., Ni, S., & Song, M. (2020). Effects of selective laser melting build orientations on the microstructure and tensile performance of Ti–6Al–4V alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 776. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139001>
- Xu, W., Brandt, M., Sun, S., Elambasseril, J., Liu, Q., Latham, K., Xia, K., & Qian, M. (2015). Additive manufacturing of strong and ductile Ti–6Al–4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition. *Acta Materialia*, 85, 74–84. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2014.11.028>

- Xu, W., Sun, S., Elambasseril, J., Liu, Q., Brandt, M., & Qian, M. (2015). Ti-6Al-4V Additively Manufactured by Selective Laser Melting with Superior Mechanical Properties. *JOM*, 67(3), 668–673. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1297-8>
- Yalçın, B., Karakılınç, U., & Ergene, B. (2019). Toz yataklı/beslemeli eklemeli imalatla kullanılan partiküllerin uygunluk araştırması ve partikül imalat yöntemleri. *Politeknik Dergisi*.
- Yan, W., Ge, W., Qian, Y., Lin, S., Zhou, B., Liu, W. K., Lin, F., & Wagner, G. J. (2017). Multi-physics modeling of single/multiple-track defect mechanisms in electron beam selective melting. *Acta Materialia*, 134, 324–333. <https://doi.org/10.1016/J.ACTAMAT.2017.05.061>
- Yang, J., Han, J., Yu, H., Yin, J., Gao, M., Wang, Z., & Zeng, X. (2016). Role of molten pool mode on formability, microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy. *Materials & Design*, 110, 558–570. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2016.08.036>
- Yang, J., Yu, H., Yin, J., Gao, M., Wang, Z., & Zeng, X. (2016). Formation and control of martensite in Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting. *Materials & Design*, 108, 308–318. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2016.06.117>
- Yang, L., Hsu, K., Baughman, B., Godfrey, D., Medina, F., Menon, M., & Wiener, S. (2017). *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production Springer Series in Advanced Manufacturing*. <http://www.springer.com/series/7113>
- Yang, Q., Zhou, W., Zhong, Y., Zhang, X., Fu, X., Chen, G., & Li, Z. (2018). Effect of shot-peening on the fretting wear and crack initiation behavior of Ti-6Al-4V dovetail joint specimens. *International Journal of Fatigue*, 107, 83–95. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2017.10.020>
- Yang, Y., Zhang, H., & Qiao, H. (2017). Microstructure characteristics and formation mechanism of TC17 titanium alloy induced by laser shock processing. *Journal of Alloys and Compounds*, 722, 509–516.
- Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., & Sing, S. L. (2015). Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*, 2(4), 041101. <https://doi.org/10.1063/1.4935926>
- Yetişkan GÖKDEMİR, M., Danışmanı, T., & Hüseyin ÇİMENÖĞLU Diğer Jüri Üyeleri ProfDr Eyüp Sabri KAYALI ProfDr Mehmet DEMİRKOL, D. (2005). *İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ SAF TİTANYUM VE Ti6Al4V ALAŞIMININ YÜKSEK SICAKLIKTA OKSİDASYON DAVRANIŞI YÜKSEK LİSANS TEZİ*.

- Yildiran, Y., Avcu, E., & Sinmazçelik, T. (2015). Optimization of surface properties of shot peened Ti6Al4V alloy. *Acta Physica Polonica A*, 127(4), 984–986. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.127.984>
- Yücel Zafer. (2008). *LAZER VE KUMLAMA YÖNTEMLERİ İLE Tİ6AL4V ALAŞIMINDA FONKSİYONEL YÜZEYLERİN OLUŞTURULMASI*. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ.
- Zeng, L., & Bieler, T. R. (2005). Effects of working, heat treatment, and aging on microstructural evolution and crystallographic texture of α , α' , α'' and β phases in Ti–6Al–4V wire. *Materials Science and Engineering: A*, 392(1–2), 403–414. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2004.09.072>
- Zerina, E., Danişman, A., & Türk, A. (2020). *MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ YÜKSEK LİSANS TEZİ METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI SLE (SEÇİCİ LAZER ERGİTME) YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Tİ-6AL-4V ALAŞIMININ ISIL İŞLEMİ VE KARAKTERİZASYONU AD SOYAD*.
- Zhan, K., Jiang, C. H., & Ji, V. (2013). Uniformity of residual stress distribution on the surface of S30432 austenitic stainless steel by different shot peening processes. *Materials Letters*, 99, 61–64. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2012.08.147>
- Zhang, L. C., Liu, Y., Li, S., & Hao, Y. (2018). Additive Manufacturing of Titanium Alloys by Electron Beam Melting: A Review. In *Advanced Engineering Materials* (Vol. 20, Issue 5). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/adem.201700842>
- Zhang, Q., Duan, B., Zhang, Z., Wang, J., & Si, C. (2021). Effect of ultrasonic shot peening on microstructure evolution and corrosion resistance of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 1090–1099. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.091>
- Zhang, X. Y., Fang, G., Leeftang, S., Böttger, A. J., A. Zadpoor, A., & Zhou, J. (2018). Effect of subtransus heat treatment on the microstructure and mechanical properties of additively manufactured Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 735, 1562–1575. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.263>
- Zhang, Y., & Bandyopadhyay, A. (2018). Direct fabrication of compositionally graded Ti-Al₂O₃ multi-material structures using Laser Engineered Net Shaping. *Additive Manufacturing*, 21, 104–111. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2018.03.001>

- Zhang, Y., & Bandyopadhyay, A. (2019). Direct fabrication of bimetallic Ti6Al4V+Al12Si structures via additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 29, 100783. <https://doi.org/10.1016/J.ADDMA.2019.100783>
- Zhao, X., Li, S., Zhang, M., Liu, Y., Sercombe, T. B., Wang, S., Hao, Y., Yang, R., & Murr, L. E. (2016). Comparison of the microstructures and mechanical properties of Ti–6Al–4V fabricated by selective laser melting and electron beam melting. *Materials & Design*, 95, 21–31. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2015.12.135>
- Zou, S. Y., Huang, R., Chi, M. C., & Hsu, H. M. (2013). Factors affecting the effectiveness of inorganic silicate sealer material through multi-quality characteristics. *Materials*, 6(3), 1191–1204. <https://doi.org/10.3390/ma6031191>
- Zupanc, U., & Grum, J. (2011). Surface integrity of shot peened aluminium alloy 7075-T651. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 57(5), 379–384. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2010.142>