

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI**

**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN Ti6Al4V
NUMUNELERİN KALINTI GERİLME, İÇYAPI ve MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE ÜRETİM PARAMETRELERİ ve İKİNCİL
İŞLEMLERİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Sinan ÖNDER

Prof. Dr. Nurşen SAKLAKOĞLU



MANİSA-2022

**SİNAN
ÖNDER**

**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN Ti6Al4V NUMUNELERİN KALINTI
GERİLME, İÇYAPI ve MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ÜRETİM PARAMETRELERİ ve
İKİNCİL İŞLEMLERİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

2022

TEZ ONAYI

Sinan ÖNDER tarafından hazırlanan "**Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Ti6Al4V Numunelerin Kalıntı Gerilme, İçyapı ve Mekanik Özelliklerine Üretim Parametreleri ve İkincil İşlemlerin Etkilerinin İncelenmesi**" adlı tez çalışması 24/11/2022 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak savunulmuş ve **oybirliği** ile başarılı olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Prof. Dr. Nurşen SAKLAKOĞLU Manisa Celal Bayar Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Simge İRİZALP Manisa Celal Bayar Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. CAN ÇİVİ Manisa Celal Bayar Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Uğur ÇAVDAR İzmir Demokrasi Üniversitesi	
Jüri Üyesi	Dr. Öğretim Üyesi Ege Anıl DİLER Ege Üniversitesi	

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Sinan ÖNDER



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
TABLO DİZİNİ	X
TEŞEKKÜR.....	XI
ÖZET.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1. Titanyum ve Alaşımları	3
2.1.1. Titanyumun Tarihçesi ve Titanyum Hakkında Genel Bilgiler	3
2.1.2. Titanyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları	4
2.1.2.1. Biyomedikalde Titanyum ve Alaşımlarının Kullanımı.....	4
2.1.2.2. Titanyum ve Alaşımlarının Havacılık Uygulamaları.....	5
2.1.2.3. Titanyum ve Alaşımlarının Otomotiv Uygulamaları	6
2.1.2.4. Titanyum ve Alaşımlarının Diğer Kullanım Alanları	6
2.1.3. Titanyum ve Alaşımlarının İyapı Özellikleri	6
2.1.4. Titanyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması	7
2.1.4.1. Ticari Saf Titanyum (CP-Ti).....	8
2.1.4.2. Alfa (α) Fazlı Titanyum Alaşımları	8
2.1.4.3. Alfa (α)-Yakın Fazlı Titanyum Alaşımları	8
2.1.4.4. Alfa-Beta ($\alpha+\beta$) Titanyum Alaşımları	8
2.1.4.5. Beta (β) Fazlı Titanyum Alaşımları	9
2.1.5. Ti6Al4V Alaşımı	9
2.1.6. Titanyum ve Alaşımlarının Isıl İşlemleri.....	13
2.1.6.1. Gerilme Giderme Tavlama.....	13
2.1.6.2. Tavlama.....	14
2.1.6.2. Çözeltiye Alma ve Yaşlandırma	15
2.2. Metalik Malzemelerin Eklemeli İmalatı.....	16
2.2.1. Toz Yatak Füzyonu.....	17
2.2.1.1. Seçici Lazer Sinterleme (SLS).....	18
2.2.1.2. Seçici Lazer Ergitme (SLM)	19
2.2.1.3. Elektron Işını Ergitme (EBM).....	21
2.2.2. Direkt Enerjili Biriktirme (DED).....	22
2.2.3. Bağlayıcı Püskürtme (BJ)	24
2.2.4. Levha Laminasyonu (LL)	24
2.2.5. Metal Eklemeli İmalat Türlerinin Karşılaştırılması.....	25
2.3. Bilyalı Dövme (SP) İşlemi.	26
2.3.1. SP Proses Kontrol Metodları	28
2.3.1.1. Almen Şiddeti ve Doygunluk Süresi.....	28
2.3.1.2. Yüzey Örtme Oranı	29
2.3.2. SP Proses Parametreleri	29
2.4. SLM Proses Parametrelerinin Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkilerini İnceleyen Geçmiş Çalışmalar.....	30
2.5. Ti6Al4V Malzemelerde Yapılan İkincil İşlemlerin Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkilerini İnceleyen Geçmiş Çalışmalar	38
2.6. Tezin Amacı.	43

3. MATERYAL VE YÖNTEMLER.....	45
3.1. Materyal.....	45
3.2. Yöntemler.....	46
3.2.1. Numune Üretimleri.....	46
3.2.2. Talaş Kaldırma İşlemleri	50
3.2.3. Isıl İşlem	58
3.2.4. SP İşlemleri.....	59
3.2.5. Bağlı Yoğunluk Ölçümleri.....	63
3.2.6. Çekme Analizleri	64
3.2.7. Vickers Mikrosertlik Ölçümleri.....	64
3.2.8. Kalıntı Gerilme Analizleri	67
3.2.9. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri	70
3.2.10. Yorulma Analizleri	71
3.2.11. Optik Mikroskop, Stereo Mikroskop ve SEM Analizleri	72
3.2.12. Üç Nokta Eğme Analizleri.....	75
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	77
4.1. Parametre Çalışması Bulguları ve Tartışma	77
4.1.1. Bağlı Yoğunluk Ölçümleri	77
4.1.2. İçyapı Analizleri	78
4.1.3. Çekme Analizleri	81
4.1.4. Mikro Sertlik Analizleri.....	87
4.1.5. Kalıntı gerilme Analizleri	88
4.2. İkincil İşlem Çalışması Bulguları ve Tartışma	91
4.2.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri	91
4.2.2. İçyapı Analizleri	95
4.2.3. Mikro Sertlik Analizleri.....	103
4.2.4. Kalıntı Gerilme Analizleri	104
4.2.5. Yorulma ve Fraktografi Analizleri	107
4.2.6. Üç Nokta Eğme Analizleri	114
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	120
KAYNAKLAR	123

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α	Alfa
a	Talaş derinliği
Al	Alüminyum
Ar	Argon
β	Beta
BJ	Binder jetting (Bağlayıcı püskürtme)
C	Karbon
°C	Santigrat
CAD	Computer aided design (Bilgisayar destekli tasarım)
CNC	Computer numerical control (Bilgisayarlı sayısal kontrol)
CP-Ti	Commercially pure titanium (Ticari saflıkta titanyum)
Cr	Krom
Co	Kobalt
CO ₂	Karbon dioksit
Cu	Bakır
DED	Direct energy deposition (Direkt enerjili biriktirme)
dev.	Devir
dk.	Dakika
DMLS	Direct metal laser sintering (Direkt metal lazer sinterleme)
ε	Gerinim
ε_e	Eğilme gerinimi
EBM	Electron beam melting (Elektron ışıını ergitme)
ESPI	Electronic speckle pattern interferometry (Elektronik benek deseni interferometrisi)
E_v	Enerji yoğunluğu
SEY	Sabit enerji yoğunluğu
f	İlerleme hızı
Fe	Demir
FS	Fırında soğutma
gf	Gram-kuvvet
H	Hidrojen
HCl	Hidroklorik asit

HF	Hidro florik asit
HNO ₃	Nitrik asit
HIP	Hot isosstatic pressing (Sıcak izostatik presleme)
HMK	Hacim merkezli kübik
HV	Vickers sertliği
Hz	Hertz
HT	Heat treatment (Isıl işlem)
J	Joule
K	Kelvin
kN	Kilonewton
LL	Levha laminasyon
LENS	Laser engineering net shape (Lazer tasarımlı net şekillendirme)
LMD	Laser metal deposition (Lazer metal biriktirme)
LOM	Laminated object manufacturing (Lamine nesne üretimi)
LSP	Laser shock peening (Lazer şok işleme)
mbar	Mili bar
µs	Mikro saniye
µm	Mikro metre
MPa	Mega paskal
Mn	Manganez
Mo	Molibden
MR	Manyetik rezonans görüntüleme
N	Azot
Nb	Niyobyum
Nf	Yorulma çevrim sayısı
Ni	Nikel
nm	Nano metre
O	Oksijen
<i>P</i>	Lazer gücü
PBF	Powder bed fusion (Toz yatak füzyonu)
<i>S</i>	Tarama aralığı
s	Saniye
σ	Normal gerilme

σ_e	Eğilme gerilmesi
Si	Silisyum
SEM	Scanning Electron Microscope (Taramalı elektron mikroskobu)
SLM	Selective laser melting (Seçici lazer ergitme)
SLS	Selective laser sintering (Seçici lazer sinterleme)
SMD	Shaped metal deposition (Şekillendirilmiş metal biriktirme)
SPH	Sıkı paket hegzagonal
SP	Shot peening (Bilyalı dövme)
T	Katman kalınlığı
τ	Kayma gerilmesi
Ta	Tantal
TiCl ₄	Titanyum tetra klorür
TiO ₂	Titanyum dioksit
UAM	Ultrasonic additive manufacturing (Ultrasonik eklemeli imalat)
V	Vanadyum
V	Tarama hızı
V_c	Kesme hızı
W	Watt
ω	Omega
XRD	X-ray diffraction (X ışını difraktometresi)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Titanyumun bazı medikal uygulamaları a) dental implant b) kalça eklemi protezi c) koroner stent.....	5
Şekil 2.2. Titanyumun birim kafes yapıları a) α fazı b) β fazı	7
Şekil 2.3. Ti6Al4V alaşımının faz diyagramı	10
Şekil 2.4. β dönüşüm sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıktan farklı soğuma hızlarıyla soğutma koşullarında Ti6Al4V alaşımında oluşan fazlar a) 23,1 °C/s soğuma hızında b) 0,94 °C/s soğuma hızında c) 0,015 °C/s soğuma hızında d) 0,012 °C/s soğuma hızında.....	11
Şekil 2.5. SLM prosesi neticesinde Ti6Al4V alaşımında oluşan içyapı örneği.	12
Şekil 2.6. Metal malzemelerin kullanılabildiği eklemeli imalat türleri	17
Şekil 2.7. Toz yatak füzyonu prosenin şematik gösterimi.....	18
Şekil 2.8. SLM prosenin şematik gösterimi	20
Şekil 2.9. EBM prosesi şematik gösterimi	22
Şekil 2.10. Lazer tabanlı, toz beslemeli bir DED prosenin şematik gösterimi	23
Şekil 2.11. BJ prosenin şematik gösterimi	24
Şekil 2.12. UAM prosenin şematik gösterimi	25
Şekil 2.13. Şematik gösterim a) SP işlemi b) SP sonucu oluşan plastik şekil değişimi	27
Şekil 2.14. SP işlemi neticesinde oluşan başlıca değişimlerin şematik gösterimi	27
Şekil 2.15. Doyum noktası eğrisi	28
Şekil 2.16. SP işleminde kullanılan bilya türleri.....	30
Şekil 2.17. SLM proses parametrelerinden bazılarının şematik gösterimi	31
Şekil 2.18. SLM prosesinde kullanılan tarama stratejilerinden bazılarının şematik gösterimi (a) 45° dönüşümlü çizgi tarama stratejisi (b) 90° dönüşümlü çizgi tarama stratejisi c) stranç tahtası modeli tarama stratejisi	31
Şekil 2.19. Simonelli ve ark. çalışmasında farklı üretim oryantasyonlarında üretilen numuneler	33
Şekil 2.20. Yadroitsev ve ark. çalışmasında lazer gücü ve maruziyet süresinin kaynak havuzu boyutları üzerindeki etkisi.....	34
Şekil 2.21. Manvaktar ve ark. çalışmasında lazer gücü ve tarama hızında yaşanan değişimin soğuma hızı üzerindeki etkisi	34
Şekil 2.22. Ali ve ark. çalışmasında ön ısıtmanın soğuma hızı ve kalıntı gerilme üzerindeki etkisi	35
Şekil 2.23. Ilie ve ark. çalışmasında azalan lazer gücü-artan maruziyet süresi kombinasyonunun çekme eğrileri üzerindeki etkisi.....	36
Şekil 2.24. Ali ve ark. çalışmasında azalan lazer gücü-artan maruziyet süresi kombinasyonunun soğuma hızı ve kalıntı gerilme üzerindeki etkisi	37
Şekil 2.25. Ali ve ark. çalışmasında azalan lazer gücü-artan maruziyet süresi kombinasyonunun akma dayanımı, % uzama ve % porozite üzerindeki etkisi	37
Şekil 2.26. Kahlin ve ark. çalışmasında a) yüzey pürüzlülüğü sonuçları b) kalıntı gerilme sonuçları.....	40
Şekil 2.27. Xie ve ark. çalışmasında a) yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları b) sertlik ölçümü sonuçları	42

Şekil 2.28. Zhang ve ark. çalışmasında a) mikro sertlik ölçüm sonuçları b) kalıntı gerilme ölçüm sonuçları.....	43
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan Ti6Al4V tozun SEM görüntüsü	45
Şekil 3.2. Tüm numune üretimlerinin gerçekleştirildiği ENA 250 marka SLM tipi eklemeli imalat makinesi	46
Şekil 3.3. Üretimleri tamamlanmış parametre numunelerinin görüntüsü.....	49
Şekil 3.4. Üretimleri tamamlanan yorulma numunelerinin görüntüleri (a) perspektif görüntü (b) yandan görüntü.....	49
Şekil 3.5. Üç nokta eğme numuneleri ile farklı türden ikincil işlemlerde kullanılan numunelerin üretim sonrasında alınan görüntüsü	50
Şekil 3.6. Çekme numunelerinin üretim ölçüleri	51
Şekil 3.7. Çekme numunelerinin talaş kaldırma işlemi sonrası ASTM E8/E8M 16ae1 standarında uygun nihai ölçüleri.....	51
Şekil 3.8. Çekme numunelerinin talaş kaldırma işlemlerinin gerçekleştirildiği Haas marka VF3 model CNC freze tezgahı	52
Şekil 3.9. Tos Kurim marka manuel freze tezgahı.....	53
Şekil 3.10. Manuel frezeleme işlemleri tamamlanan numuneler (a) bir adet üç nokta eğme numunesi (b) 15x15x5 ölçüsündeki bir adet numune.....	53
Şekil 3.11. Goodway marka GLS-200 model CNC torna tezgahı	54
Şekil 3.12. Haas marka VF4 model CNC freze tezgahı.....	54
Şekil 3.13. Yorulma numunesinin tornalanması esnasında alınan bir görüntü...	55
Şekil 3.14. İşlemsiz yorulma numunesi ölçüleri	56
Şekil 3.15. Talaş kaldırma işlemleri tamamlanmış, ASTM 466E-15 standardına uygun nihai ölçülerine ulaşmış yorulma numunesinin ölçüleri	56
Şekil 3.16. Yorulma numunesi görüntüleri (a) işlenmemiş (b) tüm talaş kaldırma işlemleri tamamlanmış	56
Şekil 3.17. (a) Henüz üretim tablasından alınmamış numunede üretim yönü ile x ve y eksenlerinin birlikte gösterimi (b) birinci aşamada frezelemenin yapıldığı yüzeylerin görüntüsü (c) talaş kaldırma işlemleri tamamlanmış numune görüntüsü.....	57
Şekil 3.18. Gerçekleştirilen tavlama prosesinin detayları.....	58
Şekil 3.19. (a) Protherm marka HLF 140 model ısıtma işlem fırını (b) numunelerin ısıtma işlem öncesi fırın içinde alınan görüntüsü	59
Şekil 3.20. Sigma marka SGM-1000P model bilyalı dövme makinesi	59
Şekil 3.21. (a) Electronics Marka TSP-M model almen ölçüm cihazı (b) almen tutucu ve A tipi almen plakası.....	61
Şekil 3.22. SP2 % 100 kaplama süresi tespitinde kullanılan numuneler	61
Şekil 3.23. SP işlemleri tamamlanmış ES1 ve ES2 kodlu numune görüntüleri	62
Şekil 3.24. SP işlemleri tamamlanmış KS1 ve KS2 kodlu numune görüntüleri.	62
Şekil 3.25. SP işlemleri tamamlanmış YS2 kodlu numune görüntüsü	62
Şekil 3.26. Micromeritics marka AccuPyc II 1340 model gaz piknometresi	63
Şekil 3.27. Shimadzu marka AG-IS 100 kN model çekme cihazı	64
Şekil 3.28. Future Tech marka FM-700 model Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı	65
Şekil 3.29. Metkon Marka Miracut 152 Model Hasas Kesme Cihazı	66
Şekil 3.30. (a) Vickers mikrosertlik ölçümleri için kesilmiş KS1 numunesi görüntüsü (b) ölçümlerin alındığı yüzey görüntüsü	66
Şekil 3.31. Ölçüm eksenlerinin de gösterildiği kalıntı gerilme ölçümüne hazır durumdaki Bp numunesi görüntüsü	67

Şekil 3.32. Kalıntı gerilme ölçümler için hazırlanan Prism ESPI/Hole Drilling deney düzeneği.....	67
Şekil 3.33. Stresstech marka G2R XStress 3000 model XRD kalıntı gerilme ölçüm cihazı	68
Şekil 3.34. (a) KS1 numunesinde katman kaldırma işlemi sırasında alınan görüntü (b) KS1 numunesinde 50 µm derinliğinde katman kaldırma sonrası alınan görüntü.....	69
Şekil 3.35. K, KS1 ve KS2 numunelerinde yüzeyden kalıntı gerilme ölçümü alınması esnasında alınan görüntüler	69
Şekil 3.36. Mitutoyo marka SJ 301 model yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı	70
Şekil 3.37. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri esnasında alınan bir görüntü	70
Şekil 3.38. (a) SHIMADZU marka EHF-LV020K2-020 model yorulma cihazı (b) cihaz çeneleri arasında teste hazır durumdaki Y kodlu yorulma numunesi görüntüsü.....	72
Şekil 3.39. (a) Struers marka bakalit cihazı (b) Metkon marka Forcipol 1V model zımparalama ve parlatma cihazı.....	73
Şekil 3.40. (a) Nikon Marka Eclipse LV150N Model Optik Mikroskop (b) Nikon Marka SMZ 745T Model Stereo Mikroskop	74
Şekil 3.41. Zeiss marka Sigma 300 VP model SEM cihazı	75
Şekil 3.42. Üç nokta eğme analizlerinde kullanılmak üzere 5 farklı grupta hazırlanmış numuneler	76
Şekil 3.43. Üç nokta eğme analizine hazır durumdaki bir adet numunenin görüntüsü.....	76
Şekil 4.1. Ap (140 W-549 mm/s) numunesinin x100 büyütme altında içyapı görüntüsü.....	79
Şekil 4.2. Bp (130 W-510 mm/s) numunesinin x100 büyütme altında içyapı görüntüsü.....	79
Şekil 4.3. Cp (125 W-490 mm/s) numunesinin x100 büyütme altında içyapı görüntüsü.....	80
Şekil 4.4. Dp (120 W-470,5 mm/s) numunesinin x100 büyütme altında içyapı görüntüsü.....	80
Şekil 4.5. Parametre numunelerinin çekme analizi sonuçları	82
Şekil 4.6. Parametre çalışması çekme numunelerinin kırılma yüzeylerinin makro görüntüleri (a) Ap (140 W-549 mm/s) (b) Bp (130 W-510 mm/s) (c) Cp (125 W-490 mm/s) (d) Dp (120 W-470,5 mm/s).....	83
Şekil 4.7. Ap (140 W-549 mm/s) çekme numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü.....	84
Şekil 4.8. Bp (130 W-510 mm/s) çekme numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü.....	84
Şekil 4.9. Cp (125 W-490 mm/s) çekme numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü.....	85
Şekil 4.10. Dp (120 W-470,5 mm/s) çekme numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü.....	85
Şekil 4.11. Parametre numunelerinin Vickers mikro sertlik analizi sonuçları....	87
Şekil 4.12. Parametre numunelerinin σ_x kalıntı gerilmeleri	88
Şekil 4.13. Parametre numunelerinin σ_y kalıntı gerilmeleri	89
Şekil 4.14. Parametre numunelerinin σ_1 kalıntı gerilmeleri.....	89
Şekil 4.15. K, KS1 ve KS2 kodlu numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçlarının karşılaştırmalı gösterimi	92

Şekil 4.16. Y-işlemsiz, Y ve YS2 kodlu numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçlarının karşılaştırmalı gösterimi	93
Şekil 4.17. E, ES1 ve ES2 kodlu numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçlarının karşılaştırmalı gösterimi	94
Şekil 4.18. K numunesine ait optik mikroskop içyapı görüntüsü	96
Şekil 4.19. K numunesine ait SEM içyapı görüntüsü	96
Şekil 4.20. KI numunesine ait optik mikroskop içyapı görüntüsü	97
Şekil 4.21. KI numunesine ait SEM içyapı görüntüsü	98
Şekil 4.22. (a), (b) ve (c): KS1 numunesinde SP yapılan yüzeyin altındaki derinliklerden alınan içyapı görüntüleri	99
Şekil 4.23. (a) ve (b): KS1 numunesinde SP yapılmayan yüzeyin üzerindeki derinliklerden alınan içyapı görüntüleri	100
Şekil 4.24. (a) KS1 numunesinde SP yapılmayan yüzeyin üzerindeki derinliklerde alınan içyapı görüntüsü (a') içyapıda görülen ergime eksikliği kusurunun detaylı görünümü	101
Şekil 4.25. KS2 numunesinde gerçekleştirilen SP prosesinin α' iğnelerinin boyutları üzerindeki etkisi (a) Bilyalı dövülmemiş yüzey üzerindeki derinliklerden alınan görüntü (b) bilyalı dövülmüş yüzeyin hemen altındaki derinliklerden alınan görüntü	102
Şekil 4.26. K, KS1, KS2 ve KI numunelerinde farklı derinliklerde ölçülen Vickers mikro sertlik sonuçları	103
Şekil 4.27. K, KS1 ve KS2 numunelerinin σ_x kalıntı gerilme sonuçları	104
Şekil 4.28. K, KS1 ve KS2 numunelerinin σ_y kalıntı gerilme sonuçları	105
Şekil 4.29. Cp ve K numunelerinde ölçülen σ_x kalıntı gerilmeleri	106
Şekil 4.30. Y, YS2 ve YI numunelerinin yorulma analizi sonuçları	107
Şekil 4.31. Bulunduğu konum bakımından yorulma kırılması yüzeylerinde görülen kusur tipleri a) yüzey kusuru b) yüzeyle temas halindeki kusur c) iç kusur.....	108
Şekil 4.32. Yorulma kırılması yüzey görüntüleri (a), (a') and (a''): Y, $\sigma_{maks} = 600$ MPa, Nf: 93.900 çevrim; (b), (b') and (b''): Y, $\sigma_{maks} = 400$ MPa, Nf: 2.702.031 çevrim.....	109
Şekil 4.33. Yorulma kırılması yüzey görüntüleri (a), (a') and (a''): YS2, $\sigma_{maks} = 400$ MPa, Nf: 2.375.459 çevrim; (d), (d') and (d''): YI, $\sigma_{maks} = 450$ MPa, Nf: 1.312.468 çevrim.....	110
Şekil 4.34. $\sigma_{maks} = 600$ MPa'da testi gerçekleştirilen YS2 numunesine ait yorulma kırılma yüzeyi görüntüsü	111
Şekil 4.35. Üç nokta eğme numunelerinin $\sigma_{e,maks}$ sonuçları.....	115
Şekil 4.36. Üç nokta eğme numunelerinin σ_e - ϵ_e grafiği.....	115
Şekil 4.37. Eğilme Numuneleri Hasar Görüntüleri (a), (a'): E-işlemsiz, (b), (b'): E, (c), (c'): ES1, (d), (d'): ES2, (e), (e'): EI.....	116
Şekil 4.38. Eğilme sırasında oluşan gerilmelerin dağılımları	117

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Titanyumun bazı fiziksel özelliklerinin diğer bazı metallerle karşılaştırmalı gösterimi.....	4
Tablo 2.2. Ti6Al4V alaşımının üretim yöntemine göre sahip olması gereken minimum çekme testi verileri.....	12
Tablo 2.3. Üretim yöntemine göre Ti6Al4V alaşımının içeriğindeki elementlerin izin verilen ağırlıkça oranları	13
Tablo 2.4. Bazı titanyum alaşımları için gerilme giderme parametre önerileri ..	14
Tablo 2.5. Metal eklemeli imalat türlerinin karşılaştırması	26
Tablo 2.6. Almen test plakalarının kalınlık değerleri	29
Tablo 2.7. Xie ve ark. çalışmasında SP parametreleri	41
Tablo 3.1. Çalışmada kullanılan Ti6Al4V tozun kimyasal kompozisyonu	45
Tablo 3.2. Çalışmalarda kullanılan numune kodları ve kodların açıklamaları ...	47
Tablo 3.3. Yoğunluk ölçüm numunelerinin üretim parametreleri	48
Tablo 3.4. Parametre numunelerinin üretim parametreleri	49
Tablo 3.5. İkincil işlem çalışmalarında kullanılan numunelerin üretim parametreleri	50
Tablo 3.6. Yorulma numunelerinin CNC torna tezgahındaki işleme parametreleri	55
Tablo 3.7. Yorulma numunelerinin CNC freze tezgahındaki işleme parametreleri	55
Tablo 3.8. İkincil işlem çalışmasında kullanılan 15x15x5 ölçüsündeki numunelerin frezeleme parametreleri	58
Tablo 3.9. SP işlemleri gerçekleştirilen numunelerin tür ve adetleri.....	60
Tablo 3.10. SP1 ve SP2 işlemleri için doygunluk süresi tespiti	60
Tablo 3.11. SP1 ve SP2 proses parametreleri	62
Tablo 3.12. Elektro-parlatma ile katman kaldırma parametreleri	68
Tablo 3.13. Dağlanmada kullanılan çözeltide bulunan kimyasalların hacimsel oranı.....	73
Tablo 4.1. Yoğunluk analiz numunelerinin bağıl yoğunluk sonuçları.....	77
Tablo 4.2. Parametre çalışması numunelerinin bağıl yoğunluk sonuçları	78
Tablo 4.3. Bu çalışmada alınan çekme analizi sonuçlarının literatürde yer alan benzer çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırması.....	86
Tablo 4.4. K kodlu numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları.....	91
Tablo 4.5. Y kodlu yorulma numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları	92
Tablo 4.6. E kodlu üç nokta eğme numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları	93
Tablo 4.7. Y numunelerine ait yorulma analizi sonuçları	107
Tablo 4.8. YS2 numunelerine ait yorulma analizi sonuçları.....	108
Tablo 4.9. YI numunelerine ait yorulma analizi sonuçları.....	108
Tablo 4.10. Bu çalışmada yorulma analizleri neticesinde alınan sonuçların literatürde yer alan benzer çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılması	114

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren, akademik hayatta bugünlere gelmemde çok önemli katkıları bulunan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Nürşen SAKLAKOĞLU'na, bilgi ve tecrübesi ile lisansüstü öğrenim hayatımın tüm zorlu aşamalarında her yönden yardımcı olan, tecrübeleri ile beni aydınlatan, destekleyen ve yol gösteren sevgili hocam Sayın Doç. Dr. Uğur ÇAVDAR'a, doktora tez çalışmalarım sırasında fikir ve önerileriyle çalışmama katkı sağlayan, kritik noktalarda yönlendiren, bilgi ve tecrübeleri ile tüm tez izlemelerde motivasyonumun artmasına vesile olan Sayın hocam Doç. Dr. Simge İRİZALP'e, gerek doktora sürecine başlamamda gerekse de çalışmalarım süresince sunduğu bilgi, tecrübe ve manevi desteklerinden ötürü Sayın hocam Öğr. Gör. Dr. Mehmet AYVAZ'a ve Arş. Gör. Dr. Emre ÖZER'e teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalarımda 2020-121 kodlu projeyle numune üretimi ve ikincil işlem süreçlerinde desteklerini sunan Ermaksan Makine Sanayi ve Tic. A.Ş. şirketine, bu süreçlerde bilgi ve deneyimleriyle bana sonuna kadar destek olan, fikir paylaşımından büyük keyif aldığım Ermaksan Makine Sanayi ve Tic. A.Ş. Ar-Ge Mühendisi Ahmet SEVER'e, numunelerin ikincil işlem süreçlerinde ellerinden gelen tüm yardımı gösteren DC Kalıp Makine Plastik İmalatı San. ve Tic. Ltd. Şti. ve Anç Ltd. Şti. firmalarına teşekkür ederim.

Laboratuvar analizlerindeki kıymetli yardımlarından dolayı bölümümüz laboratuvar sorumlusu Gökhan EYİCİ'ye, EGE MATAL çalışanı Konuralp SİVRİ'ye teşekkür ederim.

Doktora eğitimim boyunca araştırmama 2020-121 ve 2021-068 kodlu projelerle sağladıkları maddi imkân ve desteklerden dolayı Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine ve Manisa Celal Bayar Üniversitesi Rektörlüğüne teşekkür ederim.

Hayatım boyunca desteklerini her zaman yanımda hissettiğim bugünlere gelmemde önemli pay sahibi annem Nermin ÖNDER, babam Hacı ÖNDER ve abim Mustafa KERBEYAZ'a,

Tez çalışmalarım boyunca anlayışını, desteğini ve sabrını hiçbir zaman esirgemeyen, tüm stresli ve zorlu zamanlarımda yanımda olan, sevgili eşim Sema ÖNDER'e çok teşekkür ederim.

Sinan ÖNDER
Manisa, 2022

ÖZET

Doktora Tezi

Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Ti6Al4V Numunelerin Kalıntı Gerilme, İçyapı ve Mekanik Özelliklerine Üretim Parametreleri ve İkincil İşlemlerin Etkilerinin İncelenmesi

Sinan ÖNDER

**Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Nurşen SAKLAKOĞLU

Seçici lazer ergitme; diğer üretim yöntemleriyle üretimi mümkün olamayan geometriye sahip parçaları dahi üretme yeteneğine sahip, yüksek dayanımlı ürünleri hızlı ve net şekle yakın üretebilen, önemi her geçen gün biraz daha artan bir prosestir. Proses, sahip olduğu avantajların yanı sıra bazı dezavantajlara da sahiptir. Üretilen ürünler, dövme malzemelerle karşılaştırıldığında genellikle daha düşük süneklik, daha yüksek porozite, yüksek kalıntı gerilme ve yüzey pürüzlülüğü verileri ile sonuçlanmaktadır. Ti6Al4V alaşımı, seçici lazer ergitme yöntemiyle parça üretiminde akademik ve endüstriyel uygulamalarda üzerinde çok çalışılan bir alaşımdır.

Çalışmanın ilk bölümünde bir parametre çalışması gerçekleştirilmiştir. Sabit enerji yoğunluğunda dört farklı parametre setinde numuneler üretilerek azalan lazer gücü ve tarama hızının numunelerin mekanik, içyapı, kalıntı gerilme ve bağıl yoğunluk özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sabit enerji yoğunluğunda azalan lazer gücü ve tarama hızının kalıntı gerilme, çekme dayanımı, yüzde uzama ve bağıl yoğunluk değerlerinin azalması veya artması üzerinde doğrusal bir etki göstermediği görülmüştür. Çalışmanın ikinci bölümünde, ilk bölümde en iyi sonuçların alındığı parametre setinde numuneler üretilmiş; ardından numuneler üzerinde talaş kaldırma, tavlama, bilyalı dövme işlemleri farklı kombinasyonlarda uygulanarak ikincil işlemlerin numunelerin yüzey pürüzlülüğü, kalıntı gerilme, yorulma, eğilme, içyapı ve sertlik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Gerçekleştirilen tavlama neticesinde içyapıda $\alpha+\beta$ dönüşümü gözlenmiştir. Geleneksel ve çoklu bilyalı dövme işlemleri numunelerde 0-250 μm derinlik aralığında mikro sertlikte belirgin bir artış sağlamıştır. Geleneksel ve çoklu bilyalı dövme, numunelerde 0-150 μm derinlik aralığında kalıntı gerilme tipinin basma tipi olmasını sağlamıştır. Yorulma dayanımı açısından en iyi sonuçlar tavlandıktan sonra talaş kaldırılan numunelerde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Seçici lazer ergitme, Ti6Al4V, proses parametreleri, ikincil işlemler, mekanik özellikler, kalıntı gerilme, yorulma

2022, 136 sayfa

ABSTRACT

PhD Thesis

Investigation of the Effects of Production Parameters and Post Processes on Residual Stress, Microstructure and Mechanical Properties of Ti6Al4V Specimens Produced by Additive Manufacturing

Sinan ÖNDER

**Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Nurşen SAKLAKOĞLU

Selective laser melting; is a process whose importance is increasing day by day, capable of producing even parts with geometry that cannot be produced with other production methods, producing high-strength products quickly and close to a net shape. The process has some disadvantages as well as its advantages. Manufactured products generally result in lower ductility, higher porosity, higher residual stress and surface roughness values compared to wrought materials. Ti6Al4V alloy is a much-study alloy in academic and industrial applications in the production of parts by selective laser melting.

In the first part of the study, a parameter study was carried out. At constant energy density, the effects of decreasing laser power and scanning velocity on the mechanical, microstructure, residual stress and relative density properties of the specimens were investigated by producing specimens in four different parameter sets. It was observed that decreasing laser power and scanning velocity at constant energy density did not have a linear effect on the decrease or increase in residual stress, tensile strength, percent elongation, and relative density values. In the second part of the study, specimens were produced in the parameter set which the best results were obtained in the first part; then machining, annealing, shot peening processes were applied on the specimens in different combinations and the effects of post-processes were investigated on the surface roughness, residual stress, fatigue, bending, microstructure and hardness properties of the specimens. As a result of the annealing, $\alpha+\beta$ transformation was observed in the microstructure. Traditional and multiple shot peening processes provided a significant increase in microhardness values of the specimens in the 0-250 μm depth range. Traditional and multiple shot peening ensured that the residual stress type was compression type in the depth range of 0-150 μm in the specimens. In terms of fatigue strength, the best results were obtained on the specimens that were machined after annealing.

Keywords: Selective laser melting, Ti6Al4V, process parameters, post processes, mechanical properties, residual stress, fatigue

2022, 136 pages

1. GİRİŞ

Ti6Al4V alaşımı sahip olduğu yüksek spesifik mukavamet, düşük yoğunluk, yüksek korozyon dayanımı, yüksek biyouyumluluk gibi üstün özellikleriyle başta havacılık ve biyomedikal olmak üzere denizcilik, enerji, otomotiv gibi pek çok sektörde kullanılan önemli bir alaşımdır [1, 2].

Seçici lazer ergitme (SLM), doğrudan bilgisayar destekli tasarım (CAD) modellerine dayalı olarak üretim gerçekleştirebilen bir toz yatağı füzyon lazer eklemeli imalat teknolojisidir. SLM prosesi, karmaşık kafes yapıları da dahil olmak üzere diğer üretim yöntemleriyle üretimi mümkün olamayan geometriye sahip parçaların bile üretimini sağlayabilen, önemi her geçen gün biraz daha artan ve gerek akademik gerekse de endüstriyel açıdan üzerinde son yıllarda yoğun şekilde çalışılan bir prosestir. SLM prosesi yüksek dayanıma sahip ve net şekle yakın ürünler sunabilmektedir [3–5].

SLM prosesi sahip olduğu avantajların yanı sıra bazı dezavantajlara da sahiptir. Bu proses ile üretilen ürünler dövme ürünlerle karşılaştırıldığında genellikle daha düşük süneklik, daha yüksek porozite, kalıntı gerilme ve yüzey pürüzlülüğü verileri sunmaktadır [6–8]. Bu durum SLM prosesinde gelişen termomekanik süreçlerden kaynaklanmaktadır. Proses yüksek termal gradyanlar, yüksek soğuma hızları ve tekrarlayan ısınma soğuma çevrimlerini içermektedir. SLM prosesinin sahip olduğu termomekanik prosesler nedeniyle üretilen Ti6Al4V numunelerin içyapısı β tanesi içinde yer alan α' martenzit fazından oluşmaktadır. SLM prosesinin neden olduğu ince taneli yapı, α' martenzit fazı ve yoğun dislokasyonlar yüksek dayanım ve sertlik verilerini beraberinde getirirken düşük süneklik ve yorulma dayanımı değerlerini de beraberinde getirmektedir. Ayrıca prosesin içerdiği yüksek termal gradyanlar ve buna bağlı gelişen yüksek soğuma hızları da yüksek kalıntı gerilme değerleriyle sonuçlanmaktadır [9–14].

Proses parametrelerinin üretilen ürünlerin mekanik, kalıntı gerilme, içyapı özellikleri gibi pek çok özellik üzerinde etkisi bulunduğu gibi üretim sonrası ikincil işlemlerin de ürün özellikleri üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Tavlama, talaş kaldırma, bilyalı dövme (SP), lazer şok işleme (LSP), sıcak izostatik presleme (HIP) gibi ikincil işlemler SLM prosesi ile üretilen Ti6Al4V ürünlerin istenmeyen

özelliklerinin uzaklaştırılması için üretim sonrası sıklıkla uygulanmaktadır [6, 7, 15, 16].

Gerçekleştirilen bu çalışma iki ana bölümden oluşmakta olup birinci bölümde proses parametreleri ile ilgili çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sabit enerji yoğunluğunda (SEY) proses parametrelerinden lazer gücü ve tarama hızında yaşanan azalmanın çekme dayanımı, % uzama, mikro sertlik, kalıntı gerilme ve bağıl yoğunluk değerlerinin azalması veya artması üzerinde doğrusal bir etki gösterip göstermediği araştırılmıştır. Literatürde bu konuda yapılmış birkaç dar kapsamlı çalışma bulunmakta olup çalışmaların sonuçları birbirlerinden farklılık arz etmektedir. Bu konuda gerçekleştirilen bu geniş kapsamlı çalışmayla konu hem pek çok açıdan analiz edilmiş, hem de geçmiş çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılarak konuyla ilgili toparlayıcı veriler sunulmuştur. Çalışmanın bu yönüyle literatüre önemli bir katkı sunduğu düşünülmektedir.

Çalışmanın ikinci bölümünde aynı proses parametrelerinde üretilen numunelere talaş kaldırma, SP (geleneksel ve çoklu) ve tavlama ikincil işlemleri farklı kombinasyonlarda uygulanarak yapılan ikincil işlemlerin yüzey pürüzlülüğü, kalıntı gerilme, mikro sertlik, yorulma, içyapı, eğilme özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışma SLM prosesiyle üretilen Ti6Al4V numunelerde; geleneksel ve çoklu SP'nin derinliğe bağlı sertlik ölçümleri ve kalıntı gerilme sonuçlarının karşılaştırılması, kalıntı gerilme numunesinde bir yüzeyde talaş kaldırılmayarak talaş kaldırmanın kalıntı gerilme üzerindeki etkisinin irdelenmesi, yorulma analizi gerçekleştirilen numune gruplarından birinde çoklu SP uygulanmış olması, SP (geleneksel ve çoklu), tavlama ve talaş kaldırmanın eğilme dayanımı üzerindeki etkilerinin araştırılması yönleriyle literatüre yenilikler sunmaktadır.

Çalışmada üretimlerin tamamı ülkemizde üretilen ilk ticarileşmiş SLM makinesi olan ENA 250'de gerçekleştirilmiş olup ayrıca yapılan tüm çalışmalar makinede üretilen Ti6Al4V ürünlerin özelliklerinin tanınması ve makinenin geliştirilmesi açısından da önemli katkılar sunmuştur.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Titanyum ve Alaşımları

2.1.1. Titanyumun Tarihçesi ve Titanyum Hakkında Genel Bilgiler

Titanyum 1791 yılında William Gregor tarafından bulunmuştur [17, 18]. Gregor bulmuş olduğu maddeyi manyetik etkiyle demirden ayırtmış, HCl ile dağlamış ve böylece mekanit ismini verdiği yeni bir elementin oksidini elde etmiştir [19]. Martin Heinrich Klaproth, bulunan bu maddeye "Titanyum" ismini vermiştir. 1938–1940 yılları arasında Dr. Kroll, titanyum tetra klorürü ($TiCl_4$) koruyucu atmosfer ortamında magnezyum ile indirgeyerek, sünger gibi gözenekli "titanyum süngeri" diye de adlandırılan titanyumu elde etmiştir [18, 19]. Uygulamaya yönelik ilk üretim, 1952 yılında DC-7 tipi uçakların motor bağlantı elamanları için gerçekleştirilmiştir [19].

Doğadaki titanyumun yaklaşık %98'i TiO_2 (Titanyum dioksit) formundadır. TiO_2 madenlerden rutil cevheri olarak çıkartılır ve işlenir. İşleme süreci diğer pek çok metalle kıyaslandığında oldukça zordur. İşleme sürecinin zorluğunun başlıca sebepleri, madenden çıkarma ve cevherden ayırıştırma aşamalarının çokça karmaşık ve maliyetli olmasıdır. Bu durum, diğer metallerle karşılaştırıldığında titanyumun yüksek mekanik özellikler göstermesine karşın uygulamalarda en çok tercih edilen malzemeler arasında yer almamasına neden olmaktadır [20].

Diğer pek çok metalle karşılaştırıldığında titanyum, hafifliğine karşın oldukça yüksek mekanik özellikler sergileyen bir metaldir. Yoğunluğu yaklaşık olarak çeliğin yarısı kadarken özgül dayanımı çelikten çok daha yüksektir [21]. Yorulma dayanımı bakımından da diğer pek çok metalden daha iyi özellikler sergilemektedir [22]. Isıl genleşme katsayısının diğer pek çok metale kıyasla düşük olması yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesine olanak tanımaktadır. Titanyum reaktif bir malzeme olup oksijenle hızlıca tepkimeye girerek yüzeyinde bir oksit tabakası oluşturmaktadır. Titanyumun yüksek korozyon direncini sağlayan başlıca neden de oluşan bu oksit tabakasıdır [23]. Titanyumun bazı fiziksel özelliklerinin diğer bazı metallerle karşılaştırmalı gösterimi Tablo 2.1'de görülebilmektedir.

Tablo 2.1. Titanyumun bazı fiziksel özelliklerinin diğer bazı metallerle karşılaştırmalı gösterimi [23]

	Ti	Al	Fe	Ni
Yoğunluk [g/cm ³]	4,5	2,7	7,9	8,9
Ergime Sıcaklığı [°C]	1670	660	1538	1455
Termal İletkenlik [W/mK]	15-22	221-247	68-70	72-92
Elastik Modül [GPa]	115	72	215	200
Oksijen ile Reaktiflik	Çok yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük
Korozyon Direnci	Çok yüksek	Yüksek	Düşük	Orta
Maliyet	Çok yüksek	Orta	Düşük	Yüksek

2.1.2. Titanyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları

Titanyum ve alaşımları sahip oldukları pek çok üstün özellik nedeniyle havacılık, uzay, biyomedikal, otomotiv, denizcilik ve kimya endüstrileri başta olmak üzere çok sayıda endüstri kolunda kullanılagelen malzemeler olmuşlardır. Özellikle son dönemde SLM, seçici lazer sinterleme (SLS) gibi yeni üretim metodlarının yaygınlaşması başta havacılık ve biyomedikal olmak üzere pek çok sanayi kolunda kullanımlarını artırmıştır [1, 2].

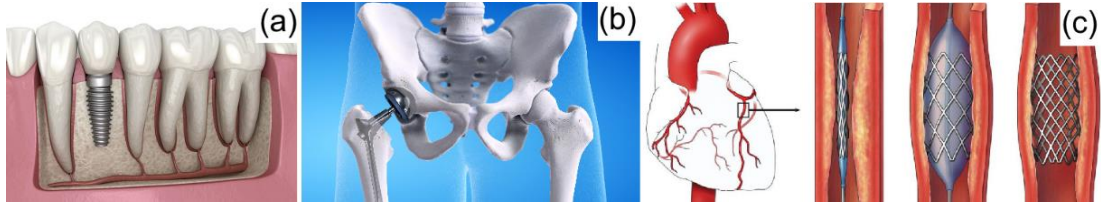
2.1.2.1. Biyomedikalde Titanyum ve Alaşımlarının Kullanımı

İmplant ve doku arasındaki mekanik bağlanma kalitesi üzerinde yüzey pürüzlülüğü ve yüzey bileşiminin büyük etkisi bulunmaktadır. Yüzey pürüzlülüğünün artması hücre tutunması ve doku gelişimi bakımından olumlu etki göstermektedir. Metalik implantlarda kumlama, SP gibi yüzey işlemleri biyouyumluluğu, korozyon dayanımını ve aşınma direncini artırmak amacıyla sıklıkla uygulanmaktadır [24, 25]. Titanyum ve alaşımlarının biyomalzeme olarak tercih edilmesinin başlıca nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir [19, 26–28]:

- Düşük yoğunluğa bağlı olarak hafif oluşları
- Spesifik dayanımlarının yüksek oluşu
- Titanyum alaşımlarının elastik modülünün diğer metalik implantlara kıyasla kemiğe daha yakın oluşu
- Yüksek biyouyumluluğa sahip oluşları
- Alerjik özelliklerinin az olması
- Vücut kimyasalları ile reaksiyon riskinin az olması
- Antimanyetik özellikleri (MR için uygun)

- Yüksek korozyon direnci
- Kemikle bağlanmayı hızlandıran yüksek osseointegrasyon özellikleri

Diş hekimliğinde titanyum alaşımları; implant yapımı, hareketli ve sabit protezler, ortodontik teller ve endodontik kanal aletlerinde sıklıkla tercih edilmektedir [26]. Titanyumun bazı biyomedikal uygulamaları Şekil 2.1’de görülebilmektedir.



Şekil 2.1. Titanyumun bazı medikal uygulamaları a) dental implant b) kalça eklemi protezi c) koroner stent [29–31]

2.1.2.2. Titanyum ve Alaşımlarının Havacılık Uygulamaları

Titanyum ve alaşımlarının ilk kullanıldığı alanlar havacılık ve uzay endüstrileri olurken sahip oldukları üstün özellikler ilerleyen dönemlerde farklı endüstrilerde de kullanılmalarının önünü açmıştır. Titanyum ve alaşımlarının havacılık endüstrisinde kullanılmasının başlıca nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir [32]:

- Düşük yoğunluğa bağlı olarak hafif oluşları
- Yüksek sıcaklıklarda çalışabilme özelliği
- Yüksek korozyon direnci
- Polimer matrisli kompozitlerle galvanik uyuma sahip oluşları

Sadece sahip olduğu düşük yoğunluk ve iyi dayanım değerleri bile havacılık ve uzay endüstrilerinde yer bulması için yeterli nedenlerdir. Zira bu endüstri kollarında bir kilogramlık bir hafiflemenin dahi yüksek önemi bulunmaktadır [32].

Uçaklarda yüksek korozyon direnci ve kısmi mukavemet gerektiren alanlarında genellikle ticari saflıktaki titanyum tercih edilmektedir. Uçaklarda yüksek mukavemet çeliklerinden üretilen ana iniş takımlarının gerilmeli korozyon şüphesi ile sıkça değiştirilmesi bunun yerine çok daha maliyetli olmasına rağmen titanyum alaşımlarının kullanımını yaygınlaştırmıştır. Bu tercih aynı zamanda yolcu uçaklarında 300 kg’a ulaşan bir hafiflemeyi de beraberinde getirmiştir. Askeri uçaklarda kullanımı çok daha fazla olan titanyum alaşımlarının gövde imalatında kullanım oranı yaklaşık

% 50 civarındadır. Kullanıldığı en stratejik nokta ise yüksek yorulma dayanımına sahip olması gereken kanat kutusudur [32].

2.1.2.3. Titanyum ve Alaşımlarının Otomotiv Uygulamaları

Ağırlığın azalmasıyla yakıt tasarrufunun artması, çevreye zararın azalması ve performansın artmasına karşın; titanyum alaşımları yüksek maliyetleri nedeniyle otomotivde sınırlı bir uygulama alanı bulmuşlardır. Formula 1 araçları gibi yüksek performans ve dayanıklılık gerektiren yarış araçlarında kullanım alanları çok daha geniştir [19].

Otomotivde kullanım alanı bulduğu parçalardan biri süspansiyon yayıdır. Bu parçada çeliğe tercih sebebi daha düşük elastik modül ve daha düşük kayma modülüdür. Dünyada ilk seri üretim araçlarda titanyum yay kullanan grup Volkswagen olmuştur [32].

2.1.2.4. Titanyum ve Alaşımlarının Diğer Kullanım Alanları

Deniz ile temas eden yapılarda ve kimyasal ortamlarda titanyum ve alaşımlarının tercih edilmesinin başlıca nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir [33]:

- Düşük yoğunluğa bağlı hafiflik
- Yüksek yorulma ömrü
- Yüksek tokluk verileri
- Yüksek korozyon direnci
- Kaynak yapılabilme özelliği

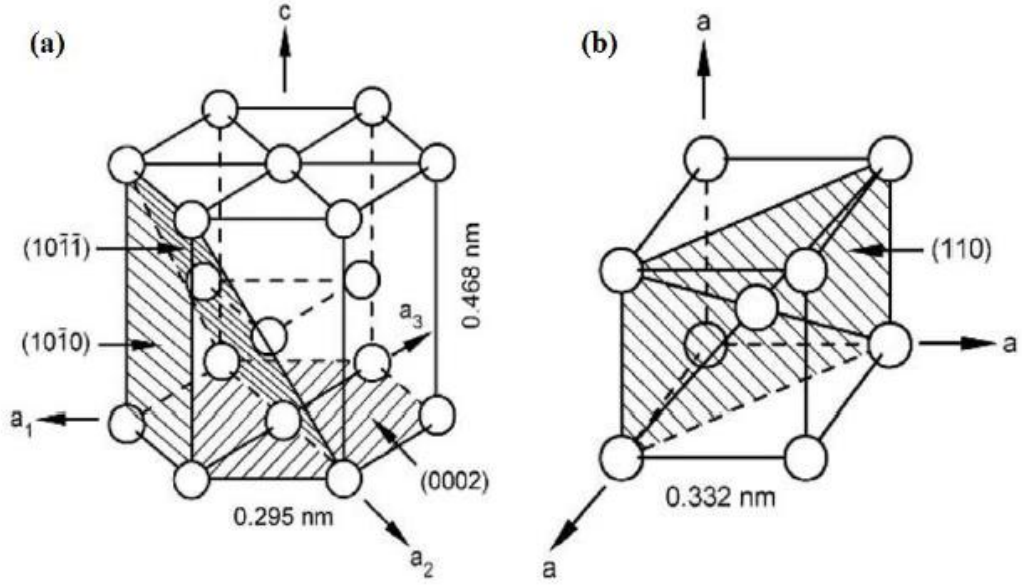
Titanyumun ısıl genleşme katsayısı çeliğin yaklaşık yarısı, alüminyumun ise yaklaşık üçte biri kadardır. Bu durum gece gündüz ısı farkının yüksek olduğu ortamlarda gerilimi en aza indirerek kullanımını avantajlı kılmaktadır [32].

Titanyum ve alaşımları hafiflik ve dayanımları sayesinde; golf, su altı sporları, tenis, bisiklet, dağcılık, kış sporları gibi pek çok spor branşında kullanım yeri bulmuşlardır [32].

2.1.3. Titanyum ve Alaşımlarının İyapı Özellikleri

Saf titanyum oda sıcaklığında sıkı paket hekzagonal (SPH) kafes yapısındaki α fazına sahipken 882 °C sıcaklıkta faz dönüşümüne uğramakta ve hacim merkezli kübik

(HMK) kafes yapısındaki β fazına dönüşmektedir. SPH- α ve HMK- β fazlarının şematik birim kafes yapıları Şekil 2.2’de görülebilmektedir [34].



Şekil 2.2. Titanyumun birim kafes yapıları a) α fazı b) β fazı [34]

α fazı 3 kayma sistemine sahiptir ve bu nedenle 12 kayma sistemine sahip β fazından daha az sünektir. β fazı dislokasyonların kayma sistemleri üzerinden daha rahat kayabilmesi nedeniyle daha sünek karakterlidir ve sertliği de daha düşüktür [34].

Saf titanyumdaki allotropik dönüşüm sıcaklığı olan 882 °C sıcaklık üzerinde alaşım elementlerinin doğrudan etkisi bulunmaktadır. Al, O, N, C elementleri başlıca α stabilizatörleridir ve dönüşüm sıcaklığını yükseltirler. Alüminyumun hem α fazı hem de β fazında çözünürlüğü oldukça iyidir. Oksijenin oldukça yüksek bir α stabilize edici etkisi bulunmaktadır. İçerikteki miktarca yüksekliği gevrekliği belirgin şekilde artırmaktadır [35]. β stabilizatör elementleri ise iki gruba ayrılmakta olup bunlar β ötektik ve β izomorf elementleri olarak adlandırılmaktadır. β izomorf grubu β fazı içinde tamamen çözünebilir Mo, Ta, V ve Nb elementlerinden oluşur. β ötektik grubu ise Mn, Fe, Cr, Si, Ni, Cu ve Co elementlerinden oluşur. β stabilizatör elementleri dönüşüm sıcaklığını düşürmektedirler [36].

2.1.4. Titanyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması

Titanyum alaşımları oda sıcaklığında yapılarında bulundurdıkları fazlara göre α , α -yakın, α + β ve β alaşımları olarak dört gruba ayrılmaktadır. Yapısında β fazından

daha fazla α fazı içeren alaşımlara α -yakın alaşımları denirken, içeriğinde önemli oranda β fazı içerenlere ise β fazlı alaşımlar denmektedir [37].

2.1.4.1. Ticari Saf Titanyum (CP-Ti)

Ticari saf titanyum ağırlıkça % 98,65 - % 99,5 oranında titanyum içerir. Oda sıcaklığında yapısında tamamen α fazı bulundurmaktadır. Genellikle korozyon direncinin iyi olduğu ancak yüksek dayanım gerektirmeyen uygulamalarda tercih edilmektedir [18].

2.1.4.2. Alfa (α) Fazlı Titanyum Alaşımları

Bu gruptaki titanyum alaşımları gaz türbini bileşenleri gibi yüksek sürünme direnci gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. İçyapı özelliklerinin geliştirilebilmesi amacıyla ısıtılma işlemi tabi tutulamazlar. En çok kullanıldıkları alanlar ise kimya sanayi ve proses mühendisliğidir. Bu uygulamalarda gerekli olan yüksek korozyon direnci ve yeterli dayanıma sahiptirler. Saf titanyumun dayanımının yeterli olmadığı durumlarda genellikle en eski titanyum alaşımı olan ve bir α fazlı titanyum alaşımı olan Ti5Al2.5Sn alaşımı tercih edilmektedir [18, 32, 38].

2.1.4.3. Alfa (α) -Yakın Fazlı Titanyum Alaşımları

Bu alaşımların içeriğine ağırlıkça % 1-2 oranında β stabilizatörü elementler eklenerek işlenebilirlik ve mukavemet artırılmaktadır. Süper α alaşımlar olarak da adlandırılırlar. Aynı zamanda bir α -yakın alaşımı olan Ti8Al1Mo1V, yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilen ilk titanyum alaşımıdır. Yüksek Al içeriğinin zayıf korozyon direncine sahip olması nedeniyle günümüzde titanyum alaşımlarında Al içeriği % 6'yı geçirilmemektedir [32, 38].

2.1.4.4. Alfa-Beta ($\alpha+\beta$) Titanyum Alaşımları

Bu kategorideki alaşımlar yapısında hem bir α hem de bir β stabilizatör elementi beraber içermektedir. α alaşımından daha yüksek mukavemet ve β alaşımından daha yüksek sürünme direnci istenen durumlarda iyi bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadırlar. $\alpha+\beta$ titanyum alaşımları ısıtılma işlemi tabi tutulabilmektedir ve ısıtılma işlem kabiliyetleri β fazı miktarı ile artar. İçerikteki alaşım elementlerinin miktar ve türü sertleşebilirlik, dayanım, plastik şekil değiştirme kabiliyeti gibi pek çok özellik üzerinde etkilidir. 1950'lerde geliştirilen ve toplam titanyum üretiminin yaklaşık % 60'ını oluşturan Ti6Al4V alaşımı da bu grupta yer alır. Bu alaşım gerek endüstri

gerekse de akademik çalışmalarda en çok kullanılan titanyum alaşımı dırurumdadır. Bu grupta yer alan başlıca diğer alaşımlara Ti-6Al-7Nb, Ti-6Al-6V-2Sn, Ti-8Mn, Ti-7Al-4Mo, Ti-3Al-2.5V örnek verilebilir [1, 37].

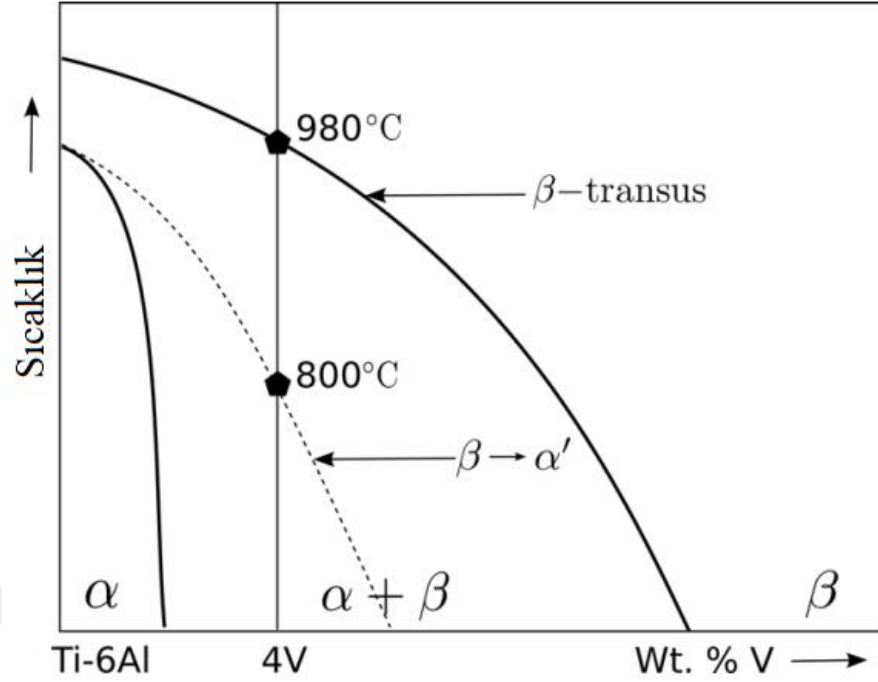
2.1.4.5. Beta (β) Fazlı Titanyum Alaşımları

İçeriğinde önemli miktarda β fazı içeren titanyum alaşımlarıdır. İçeriklerindeki β fazı yüksekliğinden dolayı ısıtıl işleme çok yatkındırlar ve ısıtıl işleme mekanik özellikleri büyük bir aralıkta değıştirilebilir. Oda sıcaklığı mukavemetleri diğer titanyum alaşımlarından önemli ölçüde yüksektir. Yine içeriğindeki β fazı miktarıyla ilişkili olarak şekillendirilebilme kabiliyetleri de iyidir. Ancak α fazı azlığından dolayı sürünme dirençleri düşüktür ve kaynaklanabilme kabiliyetleri yoktur. β fazı oda sıcaklığında yarı kararlı bir faz olduğu için yüksek bir sıcaklığa ısıtma durumunda α fazına dönüşüm gözlenebilir. Başlıca β fazlı titanyum alaşımlarına örnek olarak Ti-10V-2Fe-3Al, Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn, Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al, Ti-15Mo-2.7Nb 3Al0.2Si, Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr verilebilir [1, 37].

2.1.5. Ti6Al4V Alaşımı

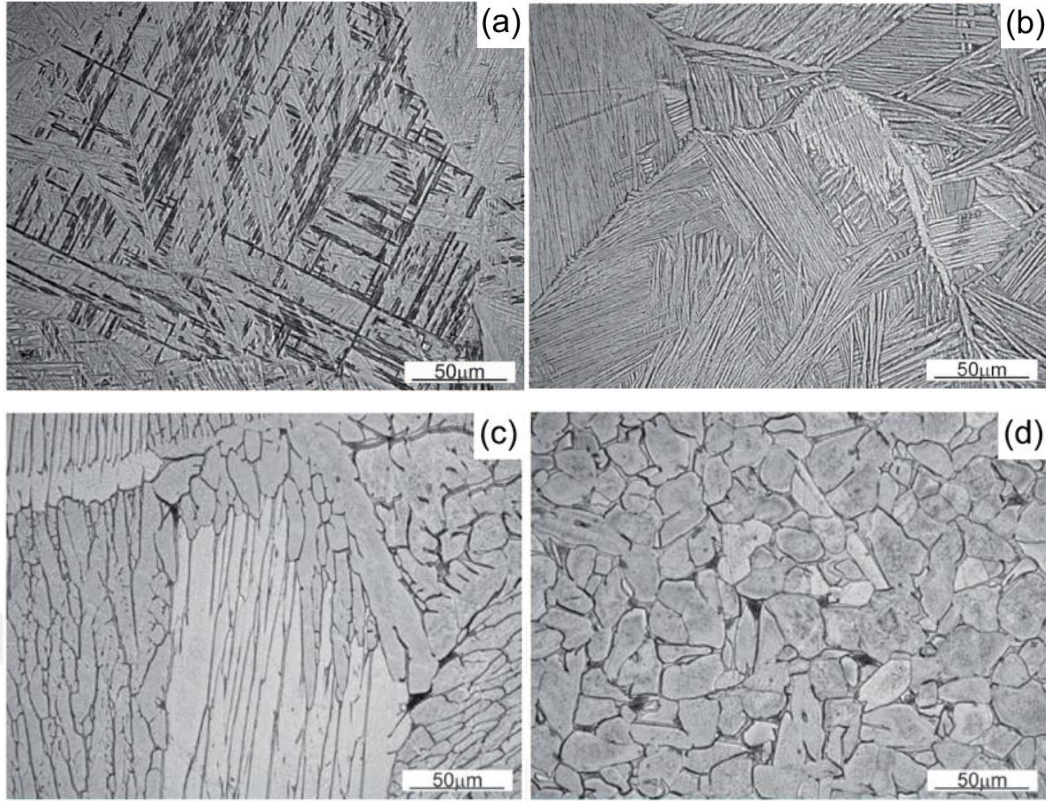
Ti6Al4V alaşımı α stabilizatörü olarak ağırlıkça % 6 Al ve β stabilizatörü olarak % 4 V içeren bir $\alpha+\beta$ alaşımıdır. β fazı bölgesinden yavaş soğuma koşullarında oda sıcaklığında yaklaşık % 90'ı α fazı olurken % 10'u ise yarı kararlı β fazı olmaktadır. Ancak soğuma hızına göre faz oranları ve şekilleri farklılık göstermektedir [39].

Ti6Al4V alaşımının β geçiş sıcaklığı, ara yer elementlerinin değıştirilmesiyle değıştirilebilmekle birlikte α ve β fazlarının % 100 β fazına geçiş sıcaklığı 980 ± 20 °C'dir. Ti6Al4V alaşımına ait faz diyagramı Şekil 2.3'de görülebilmektedir. β fazı bölgesinden yavaş soğuma, küresel α fazı ile sonuçlanırken soğuma hızının bir miktar artışı lamelsi α oluşumuna neden olabilmektedir. Su verme gibi çok hızlı soğuma koşullarında ise içyapıda asiküler martenzit fazı (α') oluşumu gözlenebilmektedir [40].



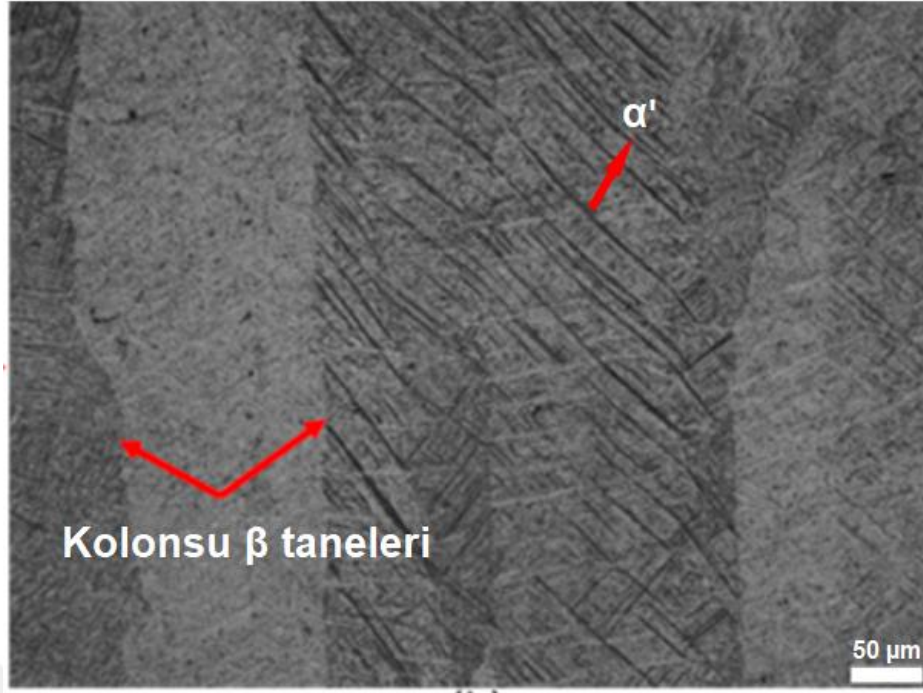
Şekil 2.3. Ti6Al4V alaşımının faz diyagramı [41]

Bir $\alpha + \beta$ alaşımı olan Ti6Al4V alaşımının β dönüşüm sıcaklığının biraz üzerinde bir sıcaklık olan 1020 °C'ye ısıtılması ve bu sıcaklıkta 20 dk. tutulması ardından buzlu su verilerek 23,1 °C/s soğuma hızı ile soğutulması sonucunda oluşan içyapı Şekil 2.4a'da görülebilmektedir. Hızlı soğuma koşulları altında $\beta \rightarrow \alpha'$ (asiküler martenzit) dönüşümü gerçekleşmiştir. Şekil 2.4a'da görünmekte olan koyu renkli çizgiler α' martenzit fazını işaret etmektedir. Yine aynı sıcaklıktan 0,94 °C/s soğuma hızı ile soğutulan Ti6Al4V alaşımında oluşan içyapı ise Şekil 2.4b'de görülmektedir. Oluşan içyapı havada soğuma şartlarında oluşan karakteristik Widmanstatten α fazıdır. Şekil 2.4b'de açık renli kısımlar α fazı iken α fazı arasında kalan koyu renkli kısımlar ise β fazıdır. Soğuma hızının biraz daha düşürülerek 0,015 °C/s soğuma hızında gerçekleştirildiği durumda, içyapıda α fazı Şekil 2.4c'deki gibi hem lamelsi hem de küresel bir formda gözlenmiştir. Soğuma hızının biraz daha düşürüldüğü ve 0,012 °C/s soğuma hızında gerçekleştiği şartta ise yavaş soğuma koşullarında α fazının daha da küreselleşerek Şekil 2.4d'deki formunu aldığı gözlenmiştir [42].



Şekil 2.4. β dönüşüm sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıktan farklı soğuma hızlarıyla soğutma koşullarında Ti6Al4V alaşımında oluşan fazlar a) 23,1 °C/s soğuma hızında b) 0,94 °C/s soğuma hızında c) 0,015 °C/s soğuma hızında d) 0,012 °C/s soğuma hızında [42]

SLM prosesiyle üretilen Ti6Al4V alaşımının içyapısı konvansiyonel yöntemlerle üretilenlere kıyasla bir miktar farklılık göstermektedir. Bu farklılık SLM prosesinde gerçekleşen termomekanik süreçlerle açıklanabilmektedir. Ergitmenin noktasal olarak lazer vasıtasıyla ve çok kısa zaman aralıkları içerisinde gerçekleşmesi çok yüksek termal gradyanlar (10^6 K/m) oluşturmaktadır. Oluşan yüksek termal gradyanlar da 10^8 K/s soğuma hızına varan oldukça yüksek soğuma hızlarını beraberinde getirmektedir [43]. Isıtma aşamasında α fazı β dönüşüm sıcaklığını aşarak β fazına dönüşmekte, soğuma aşamasında ise 410 °C/s hızını aşan soğuma hızlarıyla neredeyse tamamen yarı kararlı SPH α' fazına dönüşmektedir [9, 10, 44]. SLM prosesinin oluşturduğu bu karakteristik içyapının bir örneği Şekil 2.5’de görülebilmektedir. β taneleri içyapıda Şekil 2.5’de görüldüğü gibi kolonsu yapıda olabilmekle birlikte eşksenli taneler şeklinde de görülebilmektedir.



Şekil 2.5. SLM prosesi neticesinde Ti6Al4V alaşımında oluşan içyapı örneği [45]

Konvansiyonel yöntemlerle üretilen Ti6Al4V alaşımı malzemelerle karşılaştırıldığında SLM prosesi neticesinde oluşan ince taneli yapı, yarı kararlı α' fazı ve yoğun dislokasyon; görece yüksek dayanım ve sertlik verilerini beraberinde getirirken aynı zamanda görece düşük süneklik ve düşük yorulma dayanımı değerlerini de beraberinde getirmektedir [11–13].

Ti6Al4V alaşımının üretim yöntemine göre sahip olması gereken minimum çekme testi verileri Tablo 2.2’de, üretim yöntemine göre içeriğindeki elementlerin izin verilen ağırlıkça kimyasal oranları Tablo 2.3’de görülebilmektedir.

Tablo 2.2. Ti6Al4V alaşımının üretim yöntemine göre sahip olması gereken minimum çekme testi verileri [46–48]

Standart	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Yüzde Uzama (%)
ASTM F1108-14 (Döküm)	758	860	8
ASTM F136-13 (Dövme)	795	860	10
ASTM F2924-14 (Eklemeli İml.)	825	895	10

Tablo 2.3. Üretim yöntemine göre Ti6Al4V alaşımının içeriğindeki elementlerin izin verilen ağırlıkça oranları [46–48]

Element	ASTM F1108-14 (Döküm)	ASTM F136-13 (Dövme)	ASTM F2924-14 (Eklemeli İmalat)
Al	5.50 - 6.75	5.50 - 6.50	5.50 - 6.75
V	3.50 - 4.50	3.50 - 4.50	3.50 - 4.50
Fe	0.30 maks.	0.25 maks.	0.30 maks.
O	0.20 maks.	0.13 maks.	0.20 maks.
C	0.10 maks.	0.08 maks.	0.08 maks.
N	0.05 maks.	0.05 maks.	0.05 maks.
Ti	Denge	Denge	Denge

2.1.6. Titanyum ve Alaşımlarının Isıl İşlemleri

Titanyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler amaçları bakımından üç grupta incelenebilmektedir:

- Kalıntı gerilmeleri gidermek (Gerilme giderme)
- Talaş kaldırmaya uygunluk, süneklik vb. parametrelerin optimize edilmesi (Tavlama)
- Mukavemeti artırmak (Çözeltiye alma ve yaşlandırma)

Bu yöntemlerden tavlama ile çözeltiye alma ve yaşlandırma malzemenin mekanik özelliklerini değiştirmek amacıyla yapılırken tavlama ve gerilme giderme korozif ortamlara direnci artırmak, çarpılmaları önlemek gibi gayelerle de yapılabilmektedir [49].

2.1.6.1. Gerilme Giderme Tavlaması

Titanyum alaşımlarında gerçekleştirilen gerilme giderme tavlamasının amacı asimetrik şekillendirme sonucu oluşan veyahut üretim sonrası soğuma esnasında oluşan kalıntı gerilmelerin ortadan kaldırılmasıdır. Uygulanan gerilme giderme tavlamasının, ürünün dayanım veya süneklik özellikleri üzerinde olumsuz etkisi bulunmamaktadır. Bu gerilmelerin giderilmesiyle hem boyutsal kararlılık sağlanmakta hem de Bauschinger etkisi gibi istenmeyen etkiler de ortadan kaldırılmaktadır [50, 51].

Tavlama parametreleri seçilen malzemeye göre farklılık arz etmektedir. Tavlama sıcaklıkları β ve $\alpha+\beta$ alaşımlarında istenmeyen miktarda çökelme ve yaşlanmaya; süper α alaşımlarında ise soğuk plastik şekil vermenin etkisini ortadan kaldıracak istenmeyen miktarda yeniden kristalleşmeye izin verilmeyen sıcaklıklarda

yapılmalıdır. Etkili bir tavlama işlemi seçilen ürün ve istenen sonuca göre yüksek sıcaklık-düşük süre ya da düşük sıcaklık-uzun süre gibi farklı kombinasyonları gerektirebilmektedir [50]. Titanyum ve alaşımlarının gerilme giderme tavlaması için zaman-sıcaklık önerileri Tablo 2.4’de görülebilmektedir. İşlemin ilk saatinde saf titanyum, Ti5Al2.5Sn ve Ti6Al4V alaşımlarının kalıntı gerilmelerin % 70 den fazlasının giderilebildiği bilinmektedir [52].

Gerilme giderme sonrasında uygulanacak soğutma tipi kritik öneme sahiptir. Suda veya yağda yapılan soğutma homojen yapıda olmayabileceğinden kalıntı gerilmeleri yeniden artırabilmektedir. Bu nedenle havada veya fırın içinde soğutma tercih edilmektedir [52].

Tablo 2.4. Bazı titanyum alaşımları için gerilme giderme parametre önerileri [52]

Alaşımların İçyapısı	Alaşımların Türü	Sıcaklık (°C)	Zaman (Saat)
α	Saf titanyum	500-600	0,25-4
	Ti-5Al-2.5Sn	550-660	0,25-4
	Ti-5Al-5Sn-5Zr	600-720	0,25-1
	Ti-7Al-12Zr	600-720	0,25-1
$\alpha+\beta$	Ti-2Fe-2Cr-2Mo	500-550	0,5-1
	Ti-4Al-4Mn	500-720	0,25-1
	Ti-4Al-4V	500-660	1-5
	Ti-4Al-3Mo-1V	500-580	0,5-8
	Ti-6Al-4V	500-660	1-5
	Ti-7Al-4Mo	500-720	1-8
β	Ti-13V-11Cr-3Al	720-750	1-8

2.1.6.2. Tavlama

Titanyum alaşımlarına; işlenebilirlik, yeterli kırılma tokluğu, oda sıcaklığında yüksek süneklik, yüksek sıcaklıklarda ise boyutsal ve yapısal kararlılık kazandırma gibi amaçlarla tavlama işlemleri yapılmaktadır [53].

β fazı dönüşümü $\alpha+\beta$ alaşımlarının ısı kararlılığını etkileyebilmektedir. Bazı $\alpha+\beta$ alaşımlarında tavlama sıcaklıklarından itibaren soğuma aşamasında β fazı dönüşerek kırılma ve istenmeyen bir ara faz olan omega (ω) fazını oluşturabilmektedir. Ti-8Mn, Ti-4Al-4Mn gibi $\alpha+\beta$ alaşımlarında 550 °C sıcaklıkta yavaş soğutma yapmak (3 °C/ dk.) ardından havada soğutmak bu durumun önüne

geçmektedir. Ancak süper α alaşımları ve Ti6Al4V gibi $\alpha+\beta$ alaşımlarında doğrudan havada soğutma da yapılırsa bu risk oluşmamaktadır [34].

Titanyum alaşımlarına uygulanan başlıca tavlama türleri; normalizasyon tavlaması, dubleks tavlama, yeniden kristalleşme tavlaması ve β tavlaması olarak sıralanabilmektedir. Normalizasyon tavlaması (mill annealing) genellikle haddeleme sırasında termomekanik olarak uygulanan bir işlem olup çoğunlukla saclara uygulanmaktadır. β tavlaması uygulanan alaşımın β dönüşüm sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda yapılan bir tavlama türüdür [34]. Dubleks tavlamanın amacı çalışma koşullarında yüksek sıcaklıklara çıkılması durumunda $\beta \rightarrow \omega$ dönüşümünün engellenmesi için kararlı bir β fazı oluşturulmasıdır.

Ti6Al4V alaşımı için normalizasyon tavlaması şu şekilde gerçekleştirilmektedir: 925-955 °C sıcaklıkta en az 4 saat bekletme, maksimum 56 °C/saat hızla fırında 760 °C 'ye soğutma, daha sonra oda sıcaklığına kadar havada soğutma. Bu işlemle kırılma tokluğunda artış ve çatlak oluşum hızında düşüş elde edilmektedir [34, 53, 54].

Ti6Al4V alaşımı için β tavlaması şu şekilde gerçekleştirilmektedir: 5-60 dk. boyunca 1010 -1040 °C sıcaklıkta bekletme, 85 °C/dk. veya daha yüksek bir hızla 650 °C'ye havada soğutma, 730-790 °C sıcaklıkta 2 saat ısıtma ve daha sonra havada soğutma. İşlem sonrası alaşımın yorulma ve sürünme direnci, kırılma tokluğu ve gerilmeli korozyon dayanımı artmaktadır [34, 53, 54].

$\alpha+\beta$ alaşımları için dubleks tavlama önerisi şu şekildedir: β dönüşüm sıcaklığının 50-70 °C altında çözeltiye alma ardından havada soğutma, 540-675 °C sıcaklık aralığında 2-8 saat yaşlandırma ardından havada soğutma [55].

$\alpha+\beta$ alaşımları için yeniden kristalleştirme tavlaması önerisi şu şekildedir: $\alpha+\beta$ fazında yapılan sıcak işlem sonrası 705 °C de en az 30 dk. tavlama ardından havada soğutma [55].

2.1.6.3. Çözeltiye Alma ve Yaşlandırma

β ve $\alpha+\beta$ alaşımlarında çözeltiye alma ve yaşlandırma ile mukavemet değerlerinde belirgin iyileşmeler sağlanabilmektedir. Çözeltiye alma sıcaklığının belirlenmesinde yaşlandırma esnasında tutulduğu zaman ve yaşlandırma sonrası elde

edilecek süneklik gibi veriler önem kazanmaktadır [49]. Çözeltiye alma sıcaklığı β dönüşüm sıcaklığının biraz altında seçildiğinden sıcaklık kontrolünün iyi olması oldukça önem taşımaktadır. β dönüşüm sıcaklığı geçildiğinde diğer ısı işlemlerle dönüşü de mümkün olmayan mekanik özellikler elde edilebilmektedir. Ancak ideal sıcaklıkta gerçekleştirilen bir çözeltiye alma işlemiyle malzemede optimum süneklik, sürünme dayanımı ve tokluk elde edilebilmektedir [56].

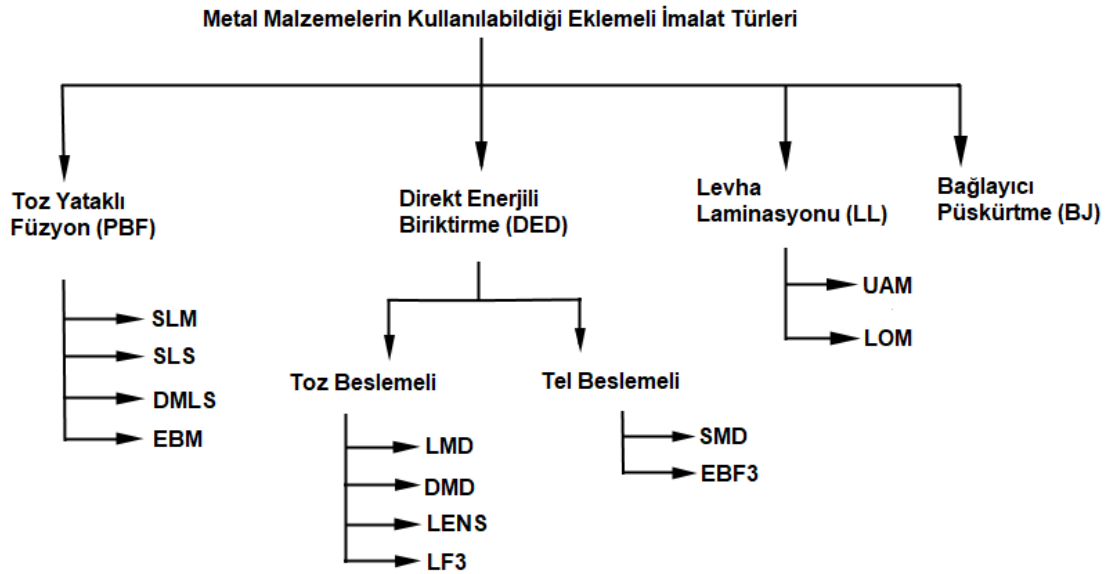
Çözeltiye alma sıcaklığından itibaren gerçekleştirilecek soğuma hızının alınacak sonuçlar üzerinde büyük önemi bulunmaktadır. Bu aşamadaki soğumanın yavaş olmaması istendiğinden genellikle suda soğutma gerçekleştirilmektedir. Karşılaşılan en büyük problem ise fırından çıkarılan malzemenin soğuma ortamına götürülmesi esnasında geç kalınmasıdır. Örneğin Ti6Al4V malzemede en yüksek dayanımın eldesi için 935 °C sıcaklıktaki fırından çıkarılan malzemenin maksimum 2 saniye içinde soğuma ortamına bırakılması, 1,5 saniye içinde de sıcaklığının 550 °C'ye düşmesi gerektiği belirtilmektedir. Son aşama olan yaşlandırmanın da yapılmasıyla titanyum alaşımlarında yeterli süneklikte ve yüksek dayanıma sahip malzemeler elde edilebilmektedir [54].

Ti6Al4V alaşımının aşırı yaşlandırılmasıyla ilgili bir öneri ise şu şekildedir: 955 °C' de 1 saat boyunca bekletme ardından suda su verme, 2 saat boyunca 705 °C 'de bekletme ve daha sonra havada soğutma. Bu işlemler sonucunda alaşımın kırılganlık tokluğu ve sürünme direnci artmaktadır [34, 53].

2.2. Metalik Malzemelerin Eklemeli İmalatı

3 boyutlu baskı veya hızlı prototipleme olarak da adlandırılan eklemeli imalat; herhangi bir geometrik şekil kısıtı olmadan, doğrudan bilgisayar destekli tasarım (CAD) modelinden, katman katman 3 boyutlu parçaların üretilmesini sağlayan en yeni yöntemdir [12, 57]. Geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında eklemeli imalat; tasarımda esneklik, karmaşık geometrileri monolitik olarak üretme yeteneği, talep üzerine parçaların prototipini oluşturma, maliyet verimliliği, minimum malzeme israfı, kısa üretim süresi ve hiç veya az miktarda talaşlı işleme gereksinimi gibi avantajlar sunmaktadır [12, 58]. Eklemeli, imalatın benzersiz özellikleri, zaman içinde akademik ve endüstriyel araştırma faaliyetlerinin yoğun ilgisini tetiklemiş, yaşanan gelişmeler yeni yöntemlerin ortaya çıkmasına ve dahil edilmesine olanak sağlamıştır [59].

Kullanılan hammadde türüne göre metallerin kullanıldığı eklemeli imalat yöntemlerinin başında toz yataklı sistemler (PBF), levha laminasyon sistemleri (LL) ve direkt enerjili biriktirme sistemleri (DED) gelmektedir [60]. Metal eklemeli imalat yöntemleri şematik olarak Şekil 2.6’da görülebilmektedir. Metal PBF sistemlerinde lazer ışını veya elektron ışını enerji kaynağı olarak kullanılmakta ve yatak içerisindeki metal tozlarının seçici olarak ergitilmesi veya sinterlenmesi sağlanmaktadır [61]. Metal PBF sistemleri kendi içerisinde Seçici Lazer Ergitme (SLM), Seçici Lazer Sinterleme (SLS), Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS) ve Elektron Işını Ergitme (EBM) alt türlerine ayrılmaktadır [62]. DED yöntemleri ise kendi içinde Lazer Metal Biriktirme (LMD), Lazer Tasarımli Net Şekillendirme (LENS), Direkt Metal Biriktirme (DMD), Lazerli Serbest Form İmalat (LF3), Şekillendirilmiş Metal Biriktirme (SMD) gibi alt gruplara ayrılmaktadır [63, 64]. Levha laminasyon yöntemlerinde ise Lamine Obje Üretimi (LOM) ve Ultrasonik Eklemeli İmalat (UAM) yöntemleri öne çıkmaktadır [65, 66].



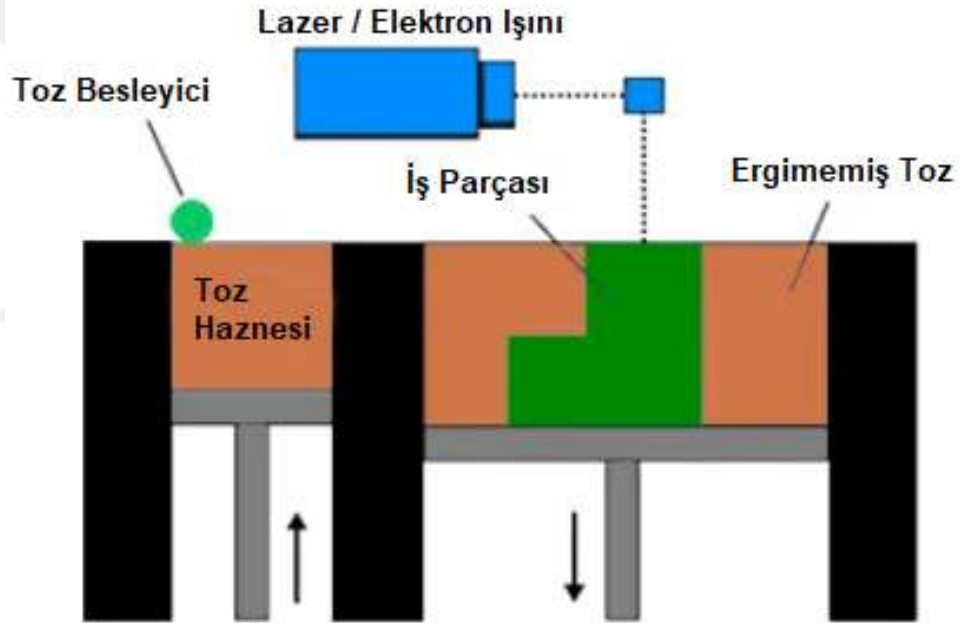
Şekil 2.6. Metal malzemelerin kullanılabildiği eklemeli imalat türleri [60, 63, 66]

2.2.1. Toz Yatak Füzyonu

Toz yatak füzyonu prosesleriyle yüksek kalitedeki ürünlerin görece düşük maliyetlerle elde edilebilmesi, günümüzde en çok kullanılan eklemeli imalat prosesleri arasında yerlerini almalarını sağlamıştır. Kullanılan hammaddelerin geri dönüştürülebilir olması ve çok geniş aralıktaki malzemelerin işlenebilmesi gibi üstünlüklere sahip bu proseslerde bir yatak içinde bulunan toz formdaki

hammaddelerin füzyonu sağlanarak üretim gerçekleştirilmektedir [67]. Teksas Üniversitesinde 1980'li yılların ortalarında geliştirilen seçici lazer sinterleme (SLS) ilk ticari PBF teknolojisidir. Daha sonra geliştirilen PBF teknolojileri bu yöntemin geliştirilmesiyle elde edilmiş yöntemlerdir [68].

Tüm PBF yöntemlerinde ortak olan 3 temel faktör bulunmaktadır. Bunlar, toz partiküllerinde füzyonun gerçekleşmesini sağlayan termal kaynaklar, her katmanda toz füzyonunu kontrol eden bir düzenek ve tozu üretim tablasına seren bir mekanizmadır. Toz yatak füzyonu prosesinin şematik gösterimi Şekil 2.7'de görülebilmektedir. Toz yatak füzyonu prosesleri ergime bölgesini atmosferik gazların kötü etkilerinden korumak amacıyla bir inert gaz veya vakum ortamında gerçekleştirilmektedir [58].



Şekil 2.7. Toz yatak füzyonu prosesinin şematik gösterimi [69]

2.2.1.1. Seçici Lazer Sinterleme (SLS)

SLS proseslerinde enerji kaynağı olarak lazer kullanılmaktadır. Üç boyutlu modelin bilgisayar ortamında oluşturulmasından sonra iş parçasının katmanlarının olduğu bölgelere tercihi olarak lazer ışınlarının gönderilmesiyle toz partikülleri sinterlenmekte ve üretim katman katman tamamlanarak nihai ürün elde edilmektedir. Proseste her katman üretimi öncesi belirlenen katman kalınlığındaki toz, bir merdane veya bıçak vasıtasla serilmektedir. Mevcut teknolojilerde 20-100 µm aralığında

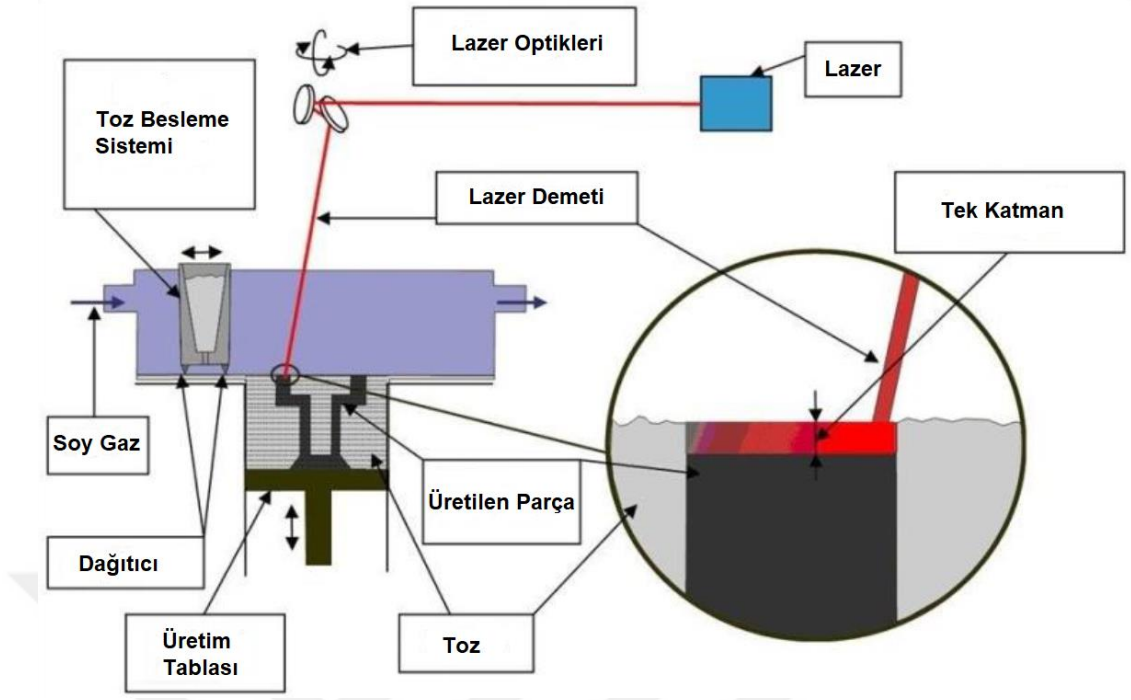
katman kalınlıkları oluşturulabilmektedir [70]. SLS proseslerinde sürekli yerine atımlı lazerler kullanılmaktadır. Lazer türü olarak CO₂ lazerleri kullanıldığında Nd: YAG lazerlerine göre daha düşük katman yoğunlukları elde edilmekle birlikte CO₂ lazerlerinin tarama hızı daha yüksek olabilmektedir [71].

Tüm SLS prosesleri aynı prensiple çalışmakla birlikte farklılaşan kısımları kullanılan lazer türü ve imalat düzeneğidir. Kullanılan makinenin türüne göre katman biriktirme, toz serme ve sıcaklık kontrolü mekanizmalarında farklılıklar oluşabilmektedir. SLS sistemlerinin avantajları arasında; seramik ve metal ürünlerin üretilebilirliği, kompleks geometrili parçaların üretilebilirliği, mekanik dayanımı yüksek parçaların elde edilebilirliği gibi özellikler sıralanabilirken dezavantajları arasında; seri imalat için uygun olmama, makinelerin pahalılığı, ikincil işlem gereksinimi, kısa zaman aralıklarında çok yüksek ısılara çıkıp düşülmesinden kaynaklı olarak çarpılma ve kalıntı gerilme oluşması eğilimi sıralanabilmektedir [72, 73].

Literatürde direkt metal lazer sinterleme (DMLS) olarak adlandırılan SLS yönteminde yalnızca metal tozlarından üretim yapılabilmekte olup çalışma prensibi olarak SLS ile aynı yapıya sahiptir. Metal tozlarının sinterlenmesi vasıtasıyla ürünler elde edilmektedir [74].

2.2.1.2. Seçici Lazer Ergitme (SLM)

Gerçekleştirilen bu çalışmanın da üretim prosesi olan SLM prosesi, termal ısı kaynağı olarak lazerin kullanıldığı bir diğer toz yatağı prosesi olup SLS prosesinden temel farklı tozun tam ergitilmesi vasıtasıyla üretimin gerçekleştirilmesidir. Proseste yüksek yoğunluklu lazerler kullanılarak hem bir katmanda yer alan tüm tozların ergimesi ve birleşmesi sağlanmakta hem de katmanlar arasında bağlanma gerçekleştirilmektedir [62]. SLM prosesinin şematik gösterimi Şekil 2.8'de görülebilmektedir.



Şekil 2.8. SLM prosesinin şematik gösterimi [75]

Daha poröz yapıların elde edilmesine bağlı olarak SLS prosesinde genellikle polimer esaslı malzemeler tercih edilmekteyken SLM prosesinde genellikle metal malzemeler tercih edilmektedir. SLM prosesinde üretim şu sırayla gerçekleşmektedir: Toz besleme sistemi tarafından bir katman kalınlığı kadar toz üretim tablasının üzerine serilir. Parça geometrisine göre seçilmiş alanda lazer ile ergitme yapılır. Üretim tablası bir katman kalınlığı kadar aşağıya indirilir. Yeni katman için toz serilir. Lazer yardımıyla ikinci katman oluşturulur aynı zamanda ergimeyle birlikte birinci ve ikinci katman arasında bağlanma gerçekleşir. Üretim son katmana kadar bu sırayla devam eder. Bu üretim sürecinin tamamı genellikle Ar gazı atmosferinde gerçekleştirilir [76, 77].

SLM prosesinde, SLS ve DMLS proseslerinde olduğu gibi üretimi zor geometrilere sahip parçalar kolaylıkla üretilebilmektedir [78]. Proseste kullanılan hammaddenin mutlaka toz formunda olması gerekmekte olup tozlar genellikle gaz atomizasyon yöntemiyle elde edilmektedir. Tozların akışkanlık özelliği, paketlenme yoğunluğu gibi faktörler nedeniyle küresel şekle sahip olması istenmektedir. Ayrıca homojenlik ve benzer boyuta sahip olma tozlardan beklenen diğer özellikler arasındadır [79, 80].

SLS prosesiyle bazı ortak avantaj ve dezavantajlara sahip SLM prosesinin başlıca avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir [81, 82]:

- Kompleks geometrilere sahip parçaların üretilebilmesi
- Düşük hammadde kaybı
- Hiç ya da az ikincil işlem gereksinimiyle nihai ürünün eldesi

Konvansiyonel yöntemlerle üretilen parçalarla kıyaslandığında SLM prosesinin başlıca dezavantajları şu şekilde sıralanabilmektedir [6–8, 83]:

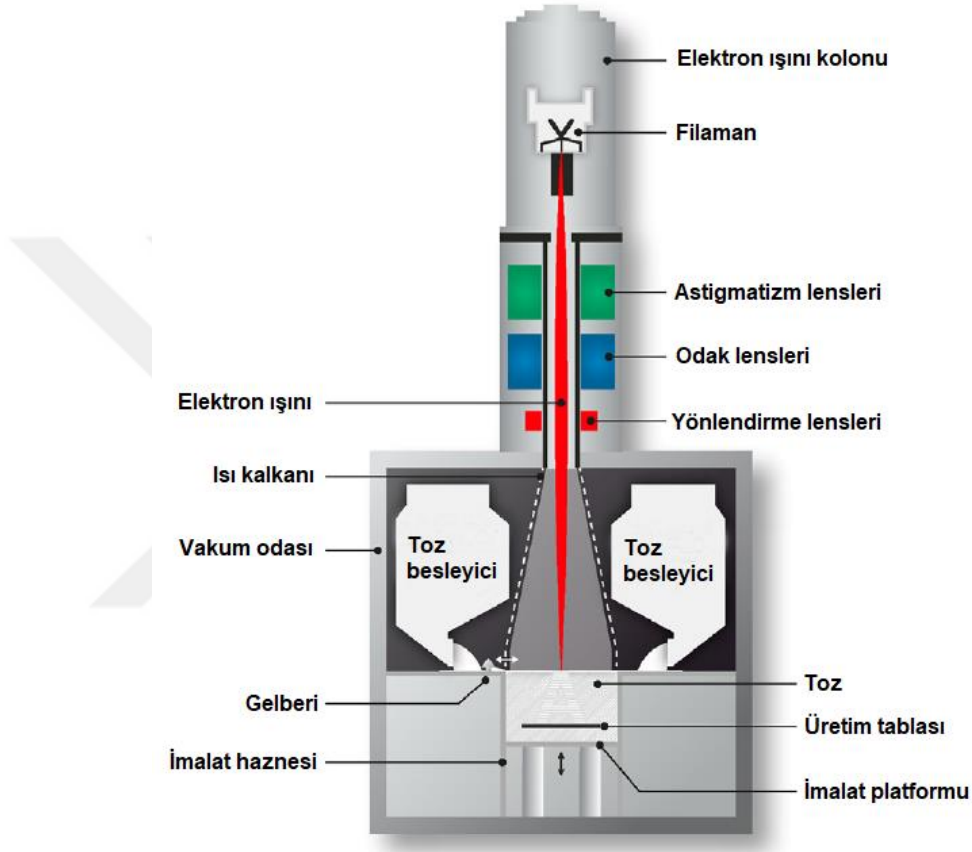
- Daha düşük süneklik
- Daha yüksek kalıntı gerilme
- Daha yüksek yüzey pürüzlülüğü
- Daha yüksek porozite

2.2.1.3. Elektron Işını Ergitme (EBM)

Elektron ışını ergitme (EBM) sistemleri; yüksek enerjili elektron demetleri vasıtasıyla metalik tozlardan tam ergitme ile üç boyutlu ürünlerin oluşturulduğu bir toz yatak füzyon prosesidir [84]. Atmosferik gazların, hazne içindeki yüksek sıcaklık tarafından tetiklenen tozlar veya erimiş bölgeler ile reaksiyonunu önlemek için yapı haznesi 5×10^{-4} mbar bir vakumda basınçlandırıldığından EBM “temiz süreç” olarak adlandırılmaktadır [85]. Bu vakum ortamı özellikle atmosferik gazlara yoğun afinitesi bulunan Ti alaşımları için oldukça güvenlidir ve günümüzde EBM proseslerinde pek çok farklı metalik malzemenin hammadde olarak kullanılabilmesine karşın daha çok Ti alaşımlarına yoğunlaşmıştır [86, 87].

Şekil 2.9’da EBM prosesi şematik olarak görülebilmektedir. Üretim süreci 3 boyutlu CAD modelinin EBM sistemine uygun dosya formatında tanıtılmasından sonra başlar. Üretim tablasına bir katman kalınlığı kadar toz dağıtılır. Bunu takiben, toz tabakasının ön ısıtması, düşük akımlı elektron ışını ve nispeten yüksek tarama hızı ile gerçekleştirilir. Elektron ışını, taban plakasını ısıtmak için yapı alanını birkaç kez tatar. Ön ısıtmanın tamamlanmasından sonra, katman eritme işlemi başlar. Bu işlem, yüksek hızlı elektronların ve dağıtılan tozların kinetik çarpışmalarından üretilen ısı enerjisini kullanarak tozların ergitilmesine dayanır. Elektronlar, enerjilerini kinetik çarpışmalar sırasında ışığın hızının yaklaşık %70’i oranında dağıtılan tozlara

aktarabilirler. Tüm katmanın ergitme işlemini tamamladığında, bir sonraki katmana yer açmak için taban plakası bir katman kalınlığı kadar indirilir. Ardından, toz dağıtma, ön ısıtma ve ergitme işlemi, tüm katmanlar tamamen birleşene ve tasarlanan parça geometrisi oluşturulana kadar tekrarlı olarak gerçekleştirilir. Ergitme işlemi tamamlandıktan sonra yapı platformu oda sıcaklığına soğumaya bırakılır. Soğutma hızı, yapı odasına helyum pompalanarak hızlandırılabilir. [85, 88, 89].



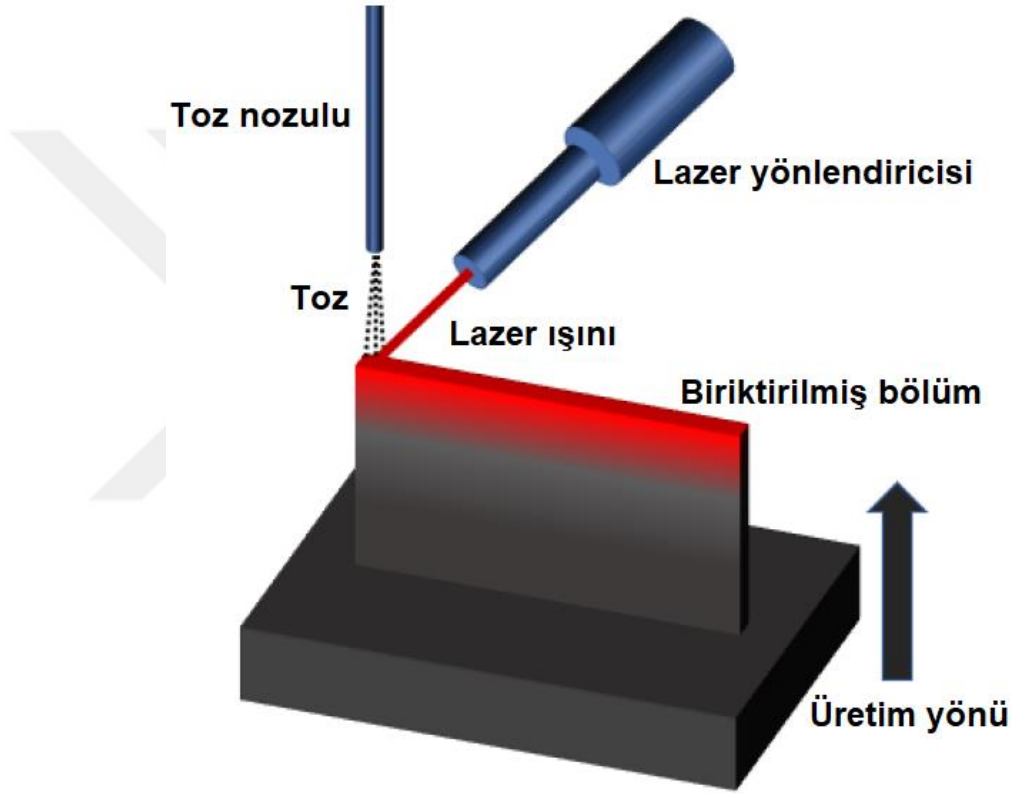
Şekil 2.9. EBM prosesinin şematik gösterimi [90]

2.2.2. Direkt Enerjili Biriktirme (DED)

DED prosesi eklemeli imalatın çekirdeği olarak bilinmektedir. Çünkü lazer destekli üretim 1990'ların sonlarından bu yana kullanılmaktadır [91]. DED yöntemleri lazer tabanlı, elektron ışını tabanlı, plazma tabanlı ve elektrik ark tabanlı DED olarak sınıflandırılabilir. Lazer tabanlı DED yöntemleri, endüstriyel uygulamalarda olduğu kadar akademik çalışmalarda da en yüksek oranda kullanılan yöntemdir [92].

DED'in çalışma prensibi, lazer veya elektron ışını gibi yüksek enerjili ısı kaynakları kullanarak sürekli beslenen metal tozu veya teli alt tabaka yüzeyine

ergiterek metal parçaları üretmektir. İnert gaz akışı, toz besleme stoğu kullanıldığında, ergitme işlemi sırasında ham tozları eriyik bölgesine taşır. Ayrıca, inert gaz akışı, ergime bölgesini atmosferik gazların ve yanma gazlarının zararlı etkilerinden korur. İşleme rotası, 3 boyutlu parça modelinin tasarlanmasıyla başlar, ardından ana parça geometrisini birkaç mikron kalınlığında birçok 2 boyutlu katmana dilimler. Son ürün, tüm katmanların sırayla başarılı bir şekilde ergitip katılaştırılmasıyla oluşturulur [93] Şekil 2.10'da lazer tabanlı, toz beslemeli bir DED prosesinin şematik gösterimi görülebilmektedir.

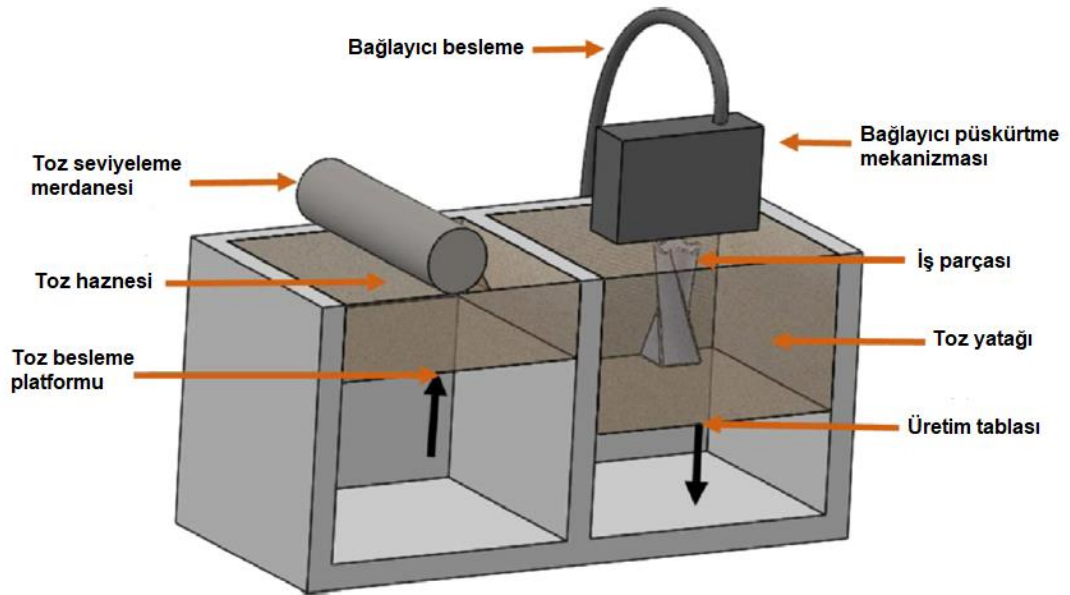


Şekil 2.10. Lazer tabanlı, toz beslemeli bir DED prosesinin şematik gösterimi [93]

DED prosesi yüksek oranda malzeme biriktirebilme, toz yatağı füzyonu ile karşılaştırıldığında daha kaba tozla çalışabilme imkanı, birkaç metreye kadar büyük boyutlu ürün üretebilme imkanı, malzemelerde onarım yapabilme imkanı gibi üstün özellikler sunmaktadır [91, 94]. DED yöntemlerinin belirtilen avantajlarının yanı sıra kullanımını sınırlayan birçok caydırıcı husus da bulunmaktadır. Bu sorunların başlıcaları; stok malzeme sorunları, süreç ve takım tezgahı sorunları, kusurlar, üretkenlik sorunları, güvenlik sorunları, onarıma özgü sorunlar, bileşim sorunları ve parça kalitesi sorunları olarak sıralanabilmektedir [95].

2.2.3. Bağlayıcı Püskürtme (BJ)

BJ prosesinde, bir yatak içerisinde bulunan toz hammadde üzerine bağlayıcı malzeme eklenerek katmanlar elde edilmektedir. İlk katman eldesinden sonra üretim tablası bir katman kalınlığına aşağıya indirilir ve yeni toz katmanı, daha önce oluşturulan katmanın üzerine serilir. İşlemler döngü halinde üretim sonlanana kadar devam eder. BJ prosesinde ısıtma işlemi olmadığından termal etkiden kaynaklanan distorsiyonlar gerçekleşmez. Metal BJ prosesi ile üretilen ürünler yüksek poroziteye sahiptir ayrıca yüksek mekanik özellikler sunamazlar. Genellikle üretim sonrasında ikincil işlem gerekmekte ve mekanik özelliklerinin artırılması amacıyla infiltran uygulanmaktadır. Metal parçalarda infiltran olarak genellikle bronz tercih edilir [96]. Şekil 2.11’de BJ prosesi şematik olarak görülebilmektedir.



Şekil 2.11. BJ prosesinin şematik gösterimi [97]

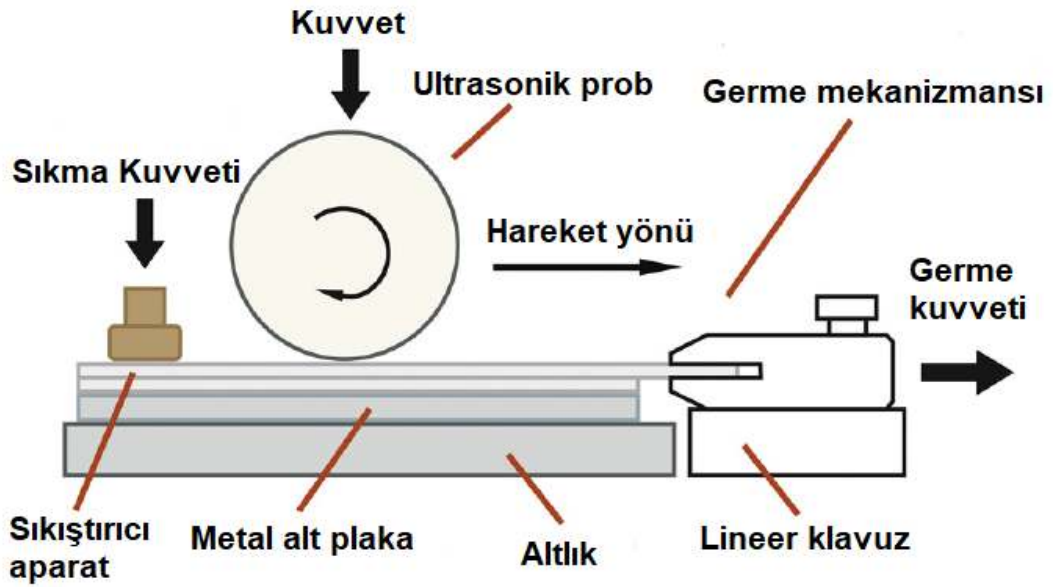
2.2.4. Levha Laminasyonu (LL)

LL eklemeli imalat sistemleri, önceden üretilmiş levha, plaka veya sac formundaki malzemelerin bıçak, lazer veya diğer türden kesicilerle kesildiği ve kesilen tabakaların birleştirildiği eklemeli imalat yöntemleridir [98]. Bazı proseslerde önce birleştirme sonra şekillendirme yapılırken bazılarında ise önce şekillendirme sonra birleştirme gerçekleştirilmektedir [99, 100].

Tipik bir LOM prosesi önce birleştirme ardından şekillendirme esasına göre çalışır. Her katmanın serilmesinden sonra ısıtılmış bir silindir vasıtasıyla yapıştırıcı

ergitilir ve katmanlar arası bağ oluşumu sağlanır. Bir lazer vasıtasıyla da fazla kısmın kesilmesi işlemi gerçekleştirilir [101].

UAM prosesinde; ince metal folyoların ultrasonik kaynak prensibi kullanılarak katman katman birbiri üzerine eklenmesi, ardalyan CNC işleme süreçleriyle de istenen şekillerde 3 boyutlu parçaların üretimi gerçekleştirilmektedir [102]. Katmanların birleştirilmesinde silindirik ultrasonik bir prob, bir gergi sistemi ile hareketsiz bırakılmış folyo üzerine sabit dik bir kuvvet uygulamaktadır. Folyo üzerinde gezen probun göndermiş olduğu 20 kHz'lik salınım sonucu folyo ile metal substrat arayüzlerinde katı hal bağı oluşmakta ve istenen parça yüksekliği elde edilene kadar işlemler tekrarlanmaktadır [103]. UAM prosesinin şematik gösterimi Şekil 2.12'de görülebilmektedir.



Şekil 2.12. UAM prosesinin şematik gösterimi [103]

2.2.5. Metal Eklemeli İmalat Türlerinin Karşılaştırılması

Metal malzemelerin kullanılabildiği eklemeli imalat türlerinin pek çok özelliğinin karşılaştırması Tablo 2.5'de görülebilmektedir.

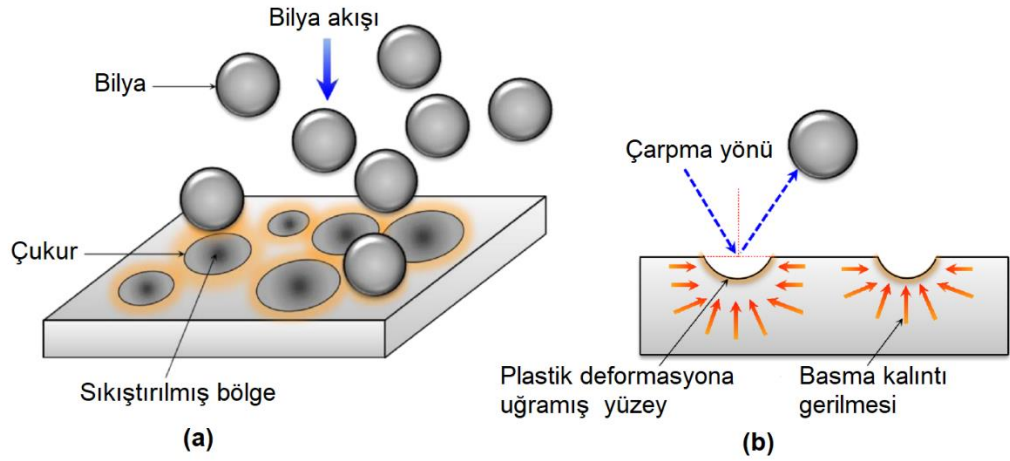
Tablo 2.5. Metal eklemeli imalat türlerinin karşılaştırması [104]

Kusur veya Özellik	SLM	EBM	DED-Toz Beslemeli	DED-Tel Beslemeli	Bağlayıcı Püskürtme (BJ)	Levha Laminasyonu (LL)
Hammadde	Toz	Toz	Toz	Tel	Toz	Levha/Sac
Isı kaynağı	Lazer	Elektr. Işını	Lazer	Lazer/Elektron Işını	Uygulanmaz	Uygulanmaz
Atmosfer	Soygaz	Vakum	Soygaz	Soygaz/Vakum	Açık hava	Açık hava
Parça tamir özelliği	Yok	Yok	Var	Var	Yok	Yok
Porozite	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük	Yüksek	Levhada
Kalıntı gerilme	Var	Düşük	Var	Var	Bilinmiyor	Bilinmiyor
Katman ayrılması	Var	Var	Var	Var	Yok	Var
Hızlı Soğuma	Var	Var	Var	Var	Yok	Yok
Yüzey pürüzlülüğü	Orta düzey	Pürüzlü	Orta düzey	Düşük	Orta düzey	Bilinmiyor

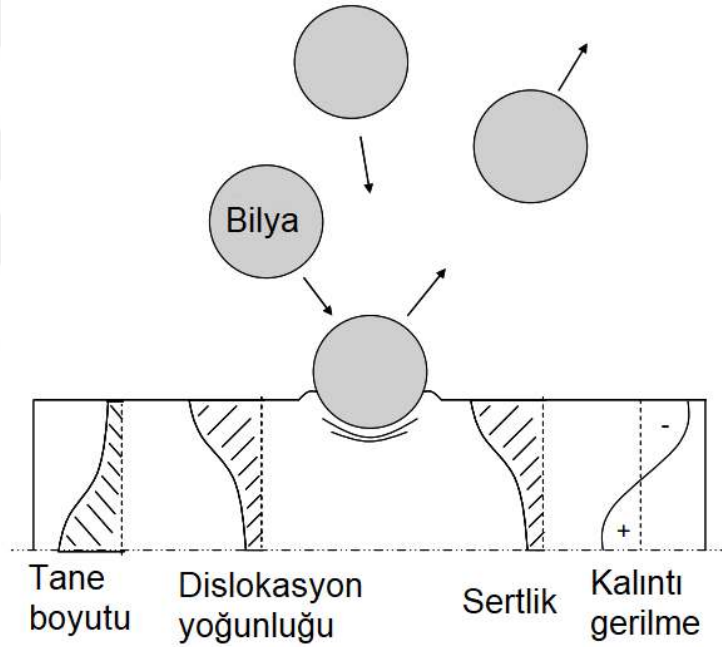
2.3. Bilyalı Dövme (SP) İşlemi

SP, yüzeyde ve malzemenin yüzeyine yakın derinliklerinde bir plastik deformasyon tabakası oluşturmak için yüzeye yüksek hızlı bilya atışlarıyla tekrar tekrar vurulan, mekanik ve soğuk bir yüzey işlemidir [105]. Şekil 2.13a’da SP işlemi şematik olarak görülürken Şekil 2.13b’de ise SP işlemi neticesinde oluşan plastik şekil değişimi şematik olarak görülebilmektedir. SP işlemi özellikle enerji, havacılık, otomotiv gibi endüstrilerde metalik malzemelerin yüzeyinde ve yüzeye yakın derinliklerinde tane incelmesi, çatlak önlenmesi, basma tipi kalıntı gerilme oluşturulması, sertliğin artırılması, yorulma dayanımının artırılması, gözenek kapanması gibi gereksinimlerle uygulanan bir prosestir [28, 106–108]. Şekil 2.14’de SP işlemiyle oluşan başlıca değişimler şematik olarak görülebilmektedir.

SP işlemi neticesinde oluşan plastik şekil değişimiyle birlikte yüzey ve yüzeye yakın derinliklerde basma tipi kalıntı gerilmeler oluşmaktadır. Oluşan basma tipi kalıntı gerilmeler çatlak başlaması ve yayılmasını azaltıcı bir etki göstererek yorulma dayanımına olumlu katkı sunar [109].



Şekil 2.13. Şematik gösterim a) SP işlemi b) SP sonucu oluşan plastik şekil değişimi [107]



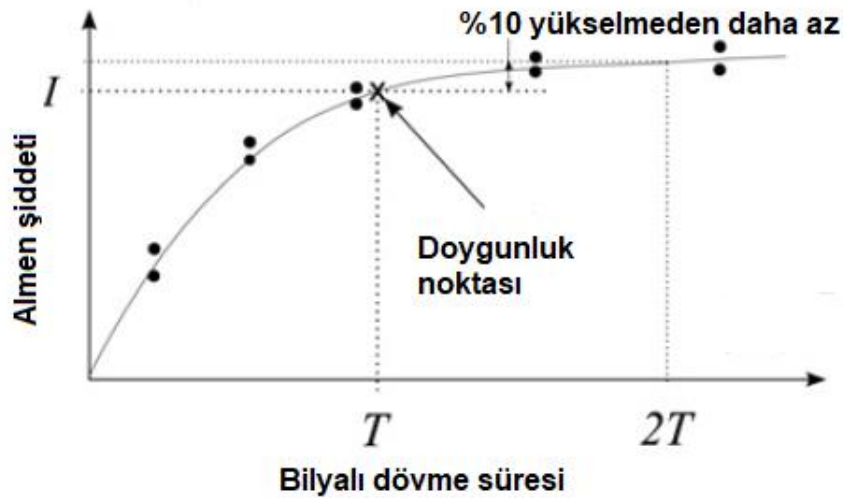
Şekil 2.14. SP işlemi neticesinde oluşan başlıca değişimlerin şematik gösterimi [110]

SP işleminin ucuz olma, geniş yüzeylere uygulanabilme, sağlam ekipmanlara sahip olma gibi avantajlı özellikleri bulunmakla birlikte lazer şok işleme (LSP) ile karşılaştırıldığında basma tipi kalıntı gerilme oluşma derinliğinin daha dar olması, çok küçük alanlara uygulamada güçlük, yüksek yüzey pürüzlülüğü, ince malzemelerde distorsiyon yaratma gibi dezavantajlı yönleri bulunmaktadır [111–113].

2.3.1. SP Proses Kontrol Metodları

2.3.1.1. Almen Şiddeti ve Doygunluk Süresi

J.O. Almen tarafından 1940'lı yıllarda SP şiddetinin standardize edilebilmesi amacıyla bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntemin esası standart bir malzemenin dövülmesi ve almen ölçüm cihazında deformasyon miktarının ölçülmesine dayanmaktadır. Yöntemin uygulanmasında üç temel öge kullanılmaktadır. Bunlar; 3 farklı tipte SAE 1070 yay çeliğinden üretilen almen plakaları, özel tasarlanmış bir almen tutucu ve almen ölçüm cihazıdır. Ölçüm almen şeritinin almen tutucuya bağlanması ile başlar. Ardından belirli proses parametrelerinde şerit üzerinde SP gerçekleştirilir. Bu noktada temel amaç istenen almen şiddeti için uygun doygunluk süresinin tespit edilmesidir. Doygunluk süresi (T), SP süresi iki katına çıktığında yay yüksekliğinde meydana gelen artışın % 10'dan daha az olduğu ilk noktadır (Şekil 2.15). Belirlenen almen şiddeti için doygunluk süresi (T) bulunana kadar proses parametrelerinde değişiklikler yapılarak denemelere devam edilir [109].



Şekil 2.15. Doyum noktası eğrisi [114]

Üç farklı türde almen test plakası bulunmaktadır. C, A ve N harfleri ile adlandırılan bu plakaların uzunlukları 76,6 mm genişlikleri ise 19,05 mm'dir. Kalınlıkları ise farklıdır. SAE AMS-S-13165 standartlarına göre almen plakalarının kalınlıkları Tablo 2.6'da görülebilmektedir [115]. SAE J2441 standardına göre metal bilyalar her üç tip plaka ile kullanılabilir, seramik bilyalar A veya N, cam kürecikler ise sadece N tipi plaka ile kullanılabilir [116]

Tablo 2.6. Almen test plakalarının kalınlık değerleri [115]

Almen Plakası	Kalınlık (mm)
C	2,3825
A	1,2954
N	0,7874

2.3.1.2. Yüzey Örtme Oranı

Yüzey örtme oranı bilyalı dövülmüş alanın tüm alana oranı olarak tanımlanabilmektedir. SP prosesinde çok önemli bir diğer parametre olup SP işleminin homojenliğinde kullanılmaktadır. Yüzey örtme oranının tespiti standart bir yöntem bulunmamakta olup daha çok gözlem ile tespiti gerçekleştirilmektedir [109, 117]. Doygunluk süresine ulaşıldığında belirlenen almen şiddetine ulaşılmakta olup bu süreden sonra da belirlenen yüzey örtme oranı yakalanana dek SP işlemi sürdürülmektedir. Uygulamalarda genellikle % 100, % 200 gibi yüzey örtme oranları kullanılmaktadır.

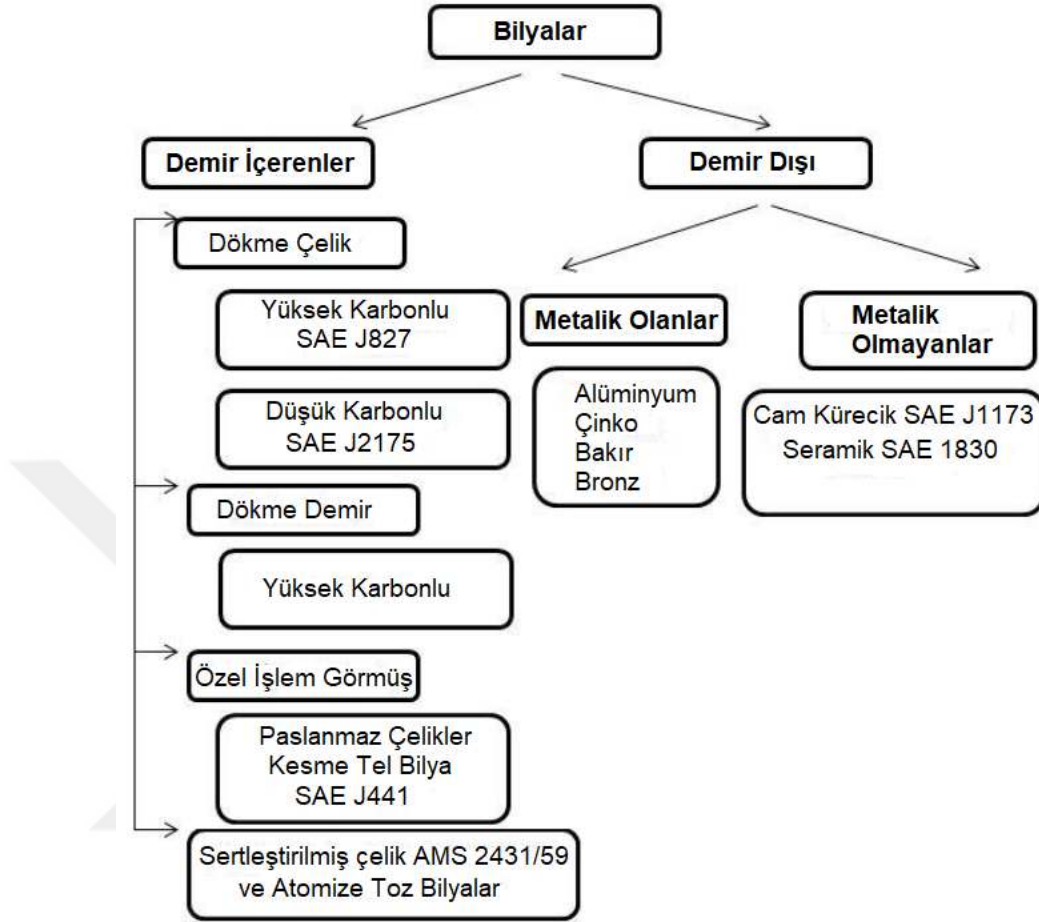
2.3.2. SP Proses Parametreleri

SP işlemine etki eden çok sayıda parametre olmakla birlikte başlıca parametreler bilya tür ve boyutu, püskürtme basıncı, püskürtme debisi, nozul açısı ve nozul mesafesi olarak sıralanabilmektedir [117–119].

SP prosesinde beklenen özelliklerin sağlanabilmesi için bilya seçimi oldukça önemlidir. Her seçilen farklı tür ve boyuttaki bilyada farklı bir sonuç alınacağı göz önünde tutulmalıdır [118]. SP işleminde kullanılmakta olan bilya türleri Şekil 2.16’da görülebilmektedir.

SP enerjisi üzerindeki en etkin parametreden birisi SP basıncıdır. Dövülecek iş parçasının türü, bilya tür ve çapına uygun, standartların uygun gördüğü bir aralıktaki püskürtme basınç seçimi proses açısından önem taşımaktadır. Püskürtülen bilyaların sektikten sonra tekrar havuza düşmesi istenmektedir. Bu nedenle bilya debi ve çapına uygun, aynı zamanda iş parçası üzerinde yeterli enerji birikimini sağlayacak bir nozul mesafesi belirlenmesi de proses açısından önemlidir. Bir diğer önemli parametre olan nozul püskürtme açısının dik olması enerjinin en yüksek verimle aktarımı açısından ideal gibi görünmekle beraber bilyaların birbirine en az teması ve sağlıklı sekmesi gibi

gereksinimlerle uygulamalarda genellikle püskürtme açısı olarak 80° ila 85° açılar tercih edilmektedir [120].



Şekil 2.16. SP işleminde kullanılan bilya türleri [121]

2.4. SLM Proses Parametrelerinin Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkilerini İnceleyen Geçmiş Çalışmalar

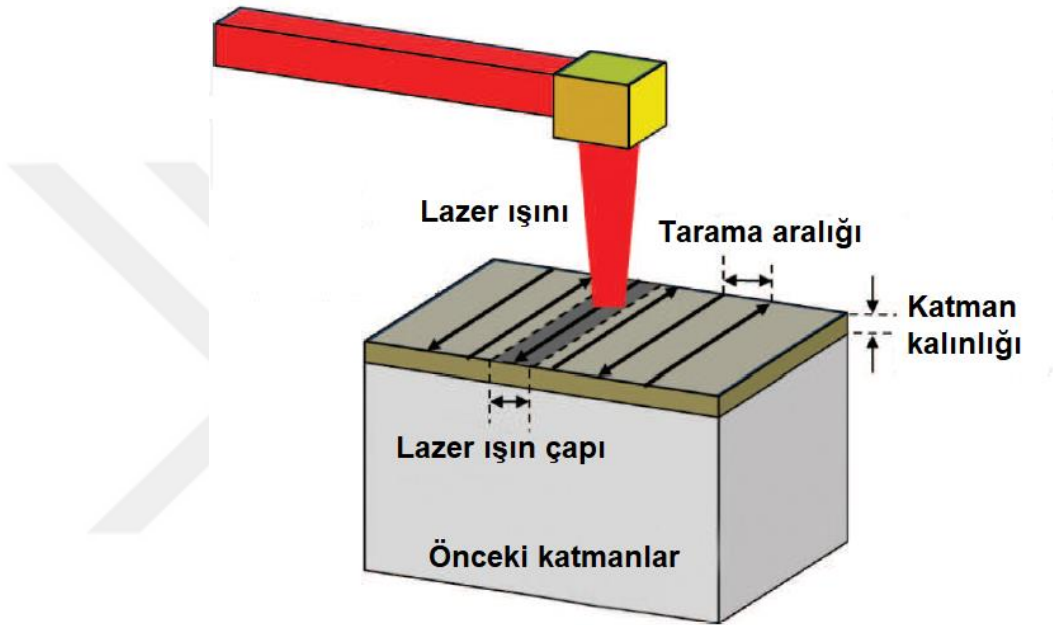
Bu bölümde öncelikle SLM proses parametreleri anlatılmış ardından bu parametrelerin malzemelerin mekanik, kalıntı gerilme ve/veya içyapı özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen geçmiş çalışmalar ele alınmıştır. Literatürde SLM proses parametrelerinin malzemeler üzerindeki etkilerini inceleyen çok sayıda çalışma bulunmakla birlikte bu bölümde, bu çalışmaya inceleme alanı bakımından en yakın geçmiş çalışmalar aktarılmaktadır.

SLM proses parametrelerinin üretilen malzeme özellikleri üzerinde oldukça büyük etkisi bulunmaktadır. Başlıca proses parametreleri; lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı, katman kalınlığı ve tarama stratejisi olarak sıralanabilmektedir. Enerji

yoğunluğu (E_v) birim hacme düşen lazer enerjisi olarak tanımlanmakta olup denklem 2.1'deki gibi formulize edilmektedir [122]:

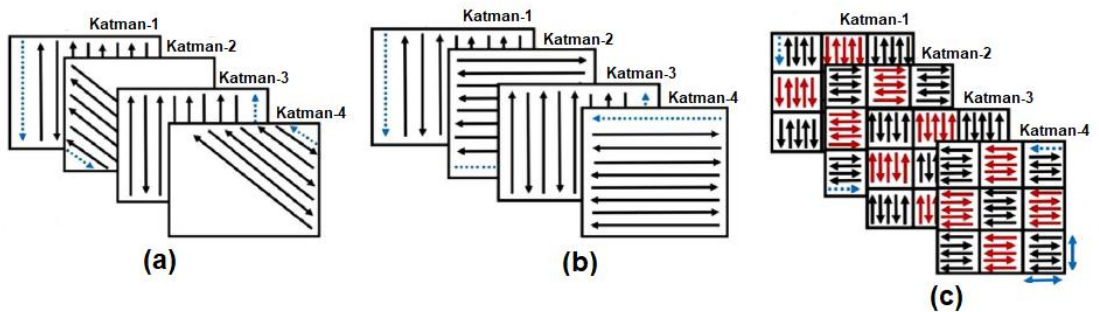
$$E_v = P/STV \quad (2.1)$$

Burada; E_v (J/mm^3), P : lazer gücü (W), S : tarama aralığı (mm), T : katman kalınlığı (mm), V : tarama hızıdır (mm/s). SLM prosesinin bazı parametreleri Şekil 2.17'de şematik olarak görülebilmektedir.



Şekil 2.17. SLM proses parametrelerinden bazılarının şematik gösterimi [123]

SLM prosesinde pek çok farklı tarama stratejisi kullanılabilmekte olup bunlardan bazıları Şekil 2.18'de görülebilmektedir.



Şekil 2.18. SLM prosesinde kullanılan tarama stratejilerinden bazılarının şematik gösterimi (a) 45° dönüşümlü çizgi tarama stratejisi (b) 90° dönüşümlü çizgi tarama stratejisi (c) stranç tahtası modeli tarama stratejisi [124]

Literatürde farklı tarama stratejilerinin malzemelerin özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar bulunmaktadır. Ali ve ark. [124] gerçekleştirdikleri çalışmada SLM prosesinde beş farklı tarama stratejisi (45° dönüşümlü çizgi, 90° dönüşümlü çizgi, stranç tahtası modeli, 45° dönüşümlü satranç tahtası modeli, 90° dönüşümlü satranç tahtası modeli) kullanarak ürettikleri Ti6Al4V numunelerde tarama stratejilerinin, numunelerde oluşan kalıntı gerilme seviyesi ve numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda en düşük kalıntı gerilme değeri 90° dönüşümlü çizgi tarama stratejisinde elde edilirken farklı tarama stratejilerinin numunelerin akma dayanımı ve sertlik değerleri üzerinde belirgin bir fark yaratmadığı görülmüştür.

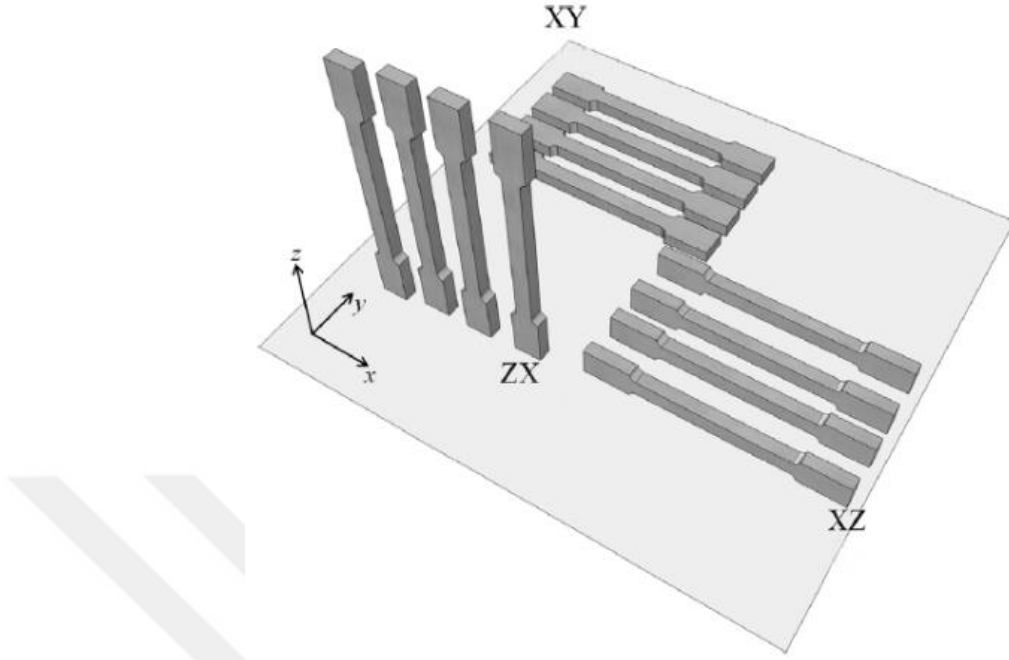
Valente ve ark. [125] gerçekleştirdikleri çalışmada; basit paralel olmayan çizgi tarama stratejisi, optimize edilmiş stranç tahtası tipi tarama stratejisi ve basit satranç tahtası tipi tarama stratejilerini kullanarak SLM prosesinde Ti6Al4V numuneler üretmişler, tarama stratejilerinin numunelerin porozite miktarı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda hem en düşük porozite miktarı hem de en düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri çizgi tarama stratejisinde elde edilmiştir.

SLM prosesinde üretim açısı ve oryantasyonunun üretilen ürünlerin mekanik ve içyapı özellikleri üzerinde farklı etkileri bulunmaktadır. Parça geometrisi izin verdiği sürece pek çok farklı açıda veya üretim oryantasyonunda üretimler gerçekleştirilebilmektedir. Literatürde üretim açısının veya oryantasyonunun malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalara örnek olarak aşağıda yer alan çalışmalar verilebilir:

Sun ve ark. [126] gerçekleştirdikleri çalışmada SLM prosesinde 0° , 45° ve 90° üretim açılarında Ti6Al4V çekme ve yorulma numuneleri üreterek test sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Hem çekme testi hem de yorulma analizi sonuçlarına göre en iyi değerler 45° üretim açısında üretilen numunelerde elde edilmiştir.

Simonelli ve ark. [10] gerçekleştirmiş oldukları çalışmada Şekil 2.19'da görülmekte olan üç farklı oryantasyonda SLM prosesiyle Ti6Al4V çekme numuneleri üretmişler ve test sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Yapılan çekme analizlerinin

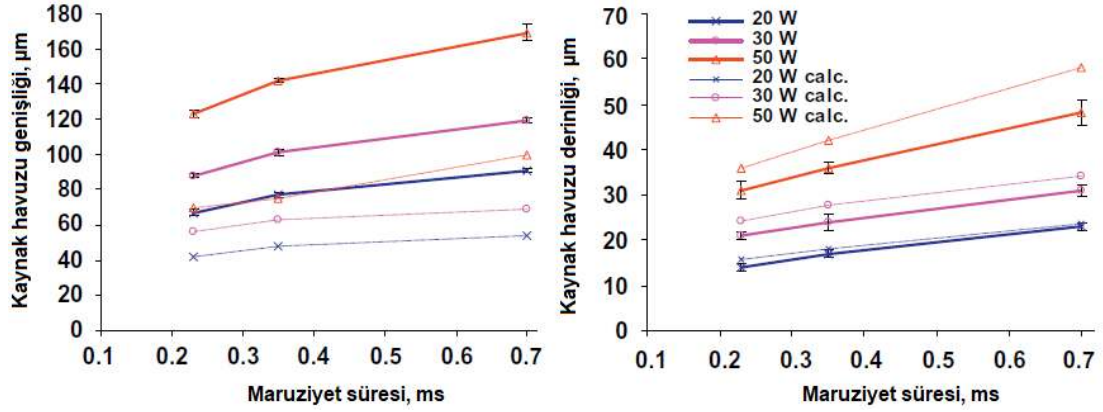
sonucunda çekme dayanımları açısından belirgin bir fark görülmezken en yüksek yüzde uzama verisi xz doğrultusunda üretilen numunelerde elde edilmiştir.



Şekil 2.19. Simonelli ve ark. çalışmasında farklı üretim oryantasyonlarında üretilen numuneler [10]

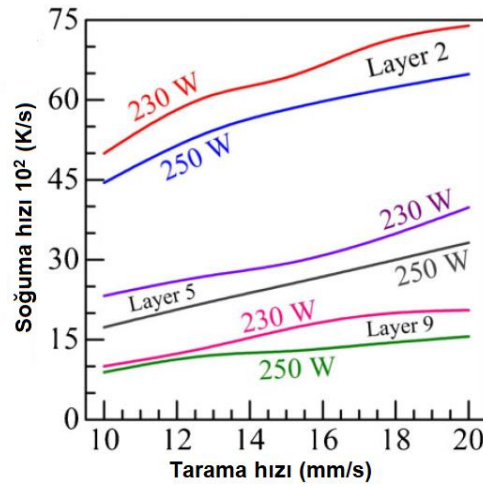
Literatürde SLM proses parametrelerinden lazer gücü ve tarama hızının kaynak havuzu hacmi, termal gradyanlar, soğuma hızı, kalıntı gerilme üzerindeki etkilerini; üretimde oluşan termal gradyanların değişiminin soğuma hızı üzerindeki, soğuma hızı değişiminin ise kalıntı gerilme üzerindeki etkilerini inceleyen çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmaların bazı örnekleri aşağıda sıralanmaktadır:

Yadroitsev ve ark. [127] gerçekleştirdikleri çalışmada SLM prosesiyle üç farklı lazer gücünde (20, 30 ve 50 W) ve üç farklı tarama hızında (0.1, 0.2 ve 0.3 m/s) Ti6Al4V numuneler üretmişler, lazer gücü ve lazer maruziyet sürelerinin kaynak havuzunda ulaşılan maksimum sıcaklık ve kaynak havuzu boyutları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışma, diğer parametrelerin sabit olduğu şartlarda, lazer gücünü artırmanın veya tarama hızını düşürmenin kaynak bölgesinde ulaşılan maksimum sıcaklık ve kaynak bölgesi boyut artışlarında etkili olduğunu ancak lazer gücünün etkisinin her iki başlıkta da tarama hızına kıyasla daha yüksek olduğunu göstermiştir. Lazer gücü ve maruziyet sürelerinin kaynak havuzu genişliği ve derinliği üzerindeki etkileri Şekil 2.20’de görülebilmektedir.



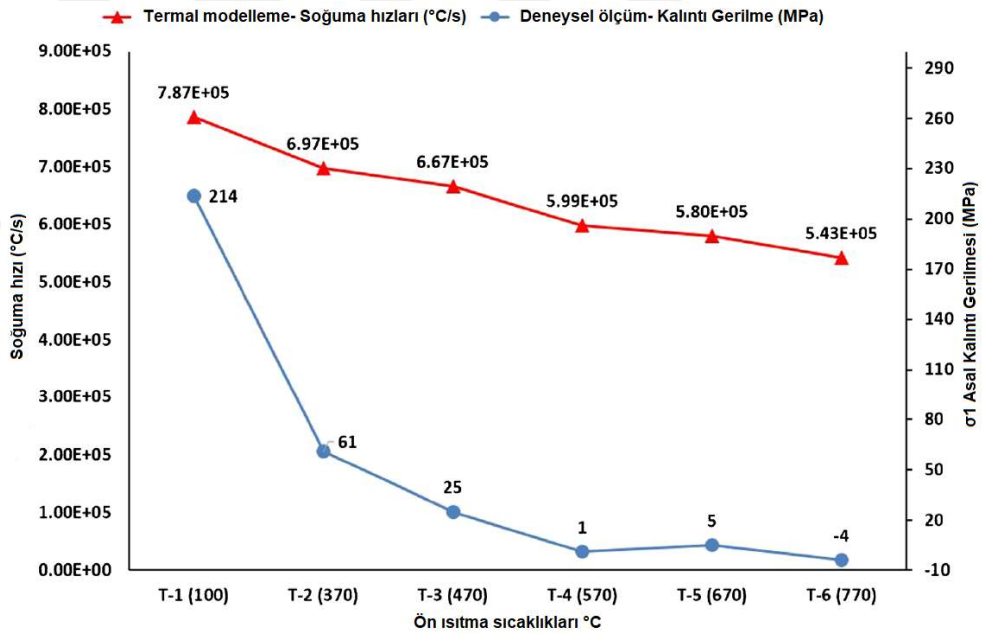
Şekil 2.20. Yadroitsev ve ark. çalışmasında lazer gücü ve maruziyet süresinin kaynak havuzu boyutları üzerindeki etkisi [127]

Manvatkar ve ark. [128] 316L çeliğinin lazer eklemeli imalatla üretimi üzerine gerçekleştirdikleri numerik çalışmada lazer gücü ve tarama hızının soğuma hızı üzerindeki etkisini incelemiştir. Diğer tüm parametrelerin sabit olduğu şartlarda ve seçilen aralıkta tarama hızının artırılmasının veya lazer gücünün düşürülmesinin soğuma hızını artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Lazer gücü ve tarama hızında yaşanan değişimin soğuma hızı üzerindeki etkisi Şekil 2.21’de görülebilmektedir. Her iki durumda da daha düşük ısı girdisine bağlı olarak daha küçük hacimli kaynak havuzları oluşmaktadır. Bu durum da daha yüksek sıcaklık gradyanları ve buna bağlı olarak gelişen daha yüksek soğuma hızları ile sonuçlanmaktadır. Lazer gücünün ve tarama hızının kaynak havuzu üzerindeki etkileri bakımından Manvatkar ve ark. [128] çalışma sonuçları Yadroitsev ve ark. [127] çalışma sonuçlarıyla korelasyon göstermektedir.



Şekil 2.21. Manvatkar ve ark. çalışmasında lazer gücü ve tarama hızında yaşanan değişimin soğuma hızı üzerindeki etkisi [128]

Ali ve ark. [129] gerçekleştirdikleri çalışmada 7 farklı ön ısıtma sıcaklığında (100, 370, 470, 570, 670, 770 °C) SLM prosesiyle Ti6Al4V malzeme üretimi gerçekleştirmişler ve üretim esnasında oluşan termal gradyanların soğuma hızı ve kalıntı gerilme üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Soğuma hızı hesaplanmasında termal bir modelleme kullanırken kalıntı gerilme ölçümlerini delik delme-gerinim ölçer (Hole drilling-strain gage) metoduyla numunelerde 2 mm derinlikte gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda; tozdaki ön ısıtma sıcaklığı artışının son katman ve daha önce üretilen katmanlar arasındaki sıcaklık gradyanlarını düşürdüğü, buna bağlı olarak soğuma hızında düşüş gerçekleştiği ve soğuma hızında yaşanan düşüşe bağlı olarak da kalıntı gerilmelerde azalma yaşandığı görülmüştür. Soğuma hızı ve kalıntı gerilme arasındaki korelasyon Şekil 2.22’de görülebilmektedir. Literatürde SLM prosesinde termal gradyanlarda yaşanan azalmanın soğuma hızında azalmayla sonuçlandığını gösteren başka çalışmalar da mevcuttur [130, 131].

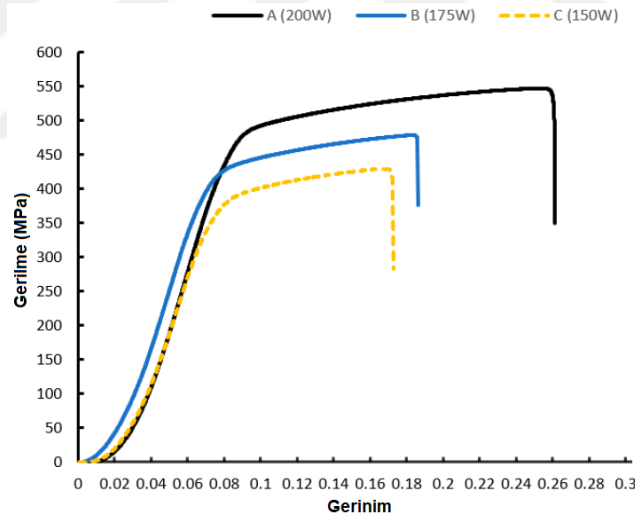


Şekil 2.22. Ali ve ark. çalışmasında ön ısıtmanın soğuma hızı ve kalıntı gerilme üzerindeki etkisi [129]

Mishurova ve ark. [132] gerçekleştirdikleri çalışmada; sabit lazer gücünde (175 W), dört farklı tarama hızında (200, 400, 500, 1100 mm/s) SLM prosesiyle Ti6Al4V numuneler üretmişler ve tarama hızında yaşanan değişimin kalıntı gerilme üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda tarama hızındaki artışın daha yüksek kalıntı gerilme değerleriyle sonuçlandığı görülmüştür.

Literatürde SLM prosesinde sabit enerji yoğunluğunda değişen lazer gücü ve tarama hızının malzemelerin mekanik özellikleri veya kalıntı gerilme özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu alandaki çalışmaların örnekleri aşağıda sıralanmaktadır:

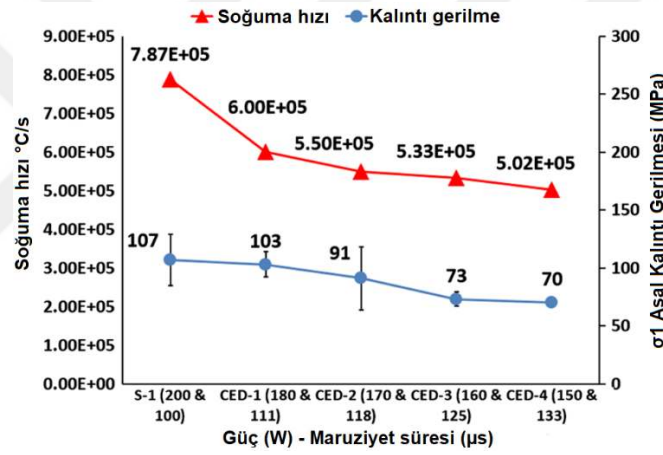
Ilie ve ark. [133] gerçekleştirdikleri çalışmada sabit enerji yoğunluğunda (62 J/mm^3) azalan lazer gücü-artan maruziyet süresi (azalan tarama hızı) koşullarında (A: 200 W-70 μs , B: 175 W-80 μs , C: 150 W-93 μs) SLM prosesiyle 316 L çeliği numuneler üretmişler ve azalan güç-artan maruziyet süresi kombinasyonunun numunelerin çekme dayanımı, akma dayanımı, yoğunluk ve sertlik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmanın sonucunda sırasıyla bağıl yoğunluklar; A: % 99.8, B: % 99.1, C: % 96.8 olarak elde edilmiştir. Elde edilen akma dayanımı, çekme dayanımı ve sertlik değerleri de A'dan C'ye azalma eğilimi göstermiştir. Çalışma sonunda elde edilen gerilme-gerinim eğrileri Şekil 2.23'de görülebilmektedir.



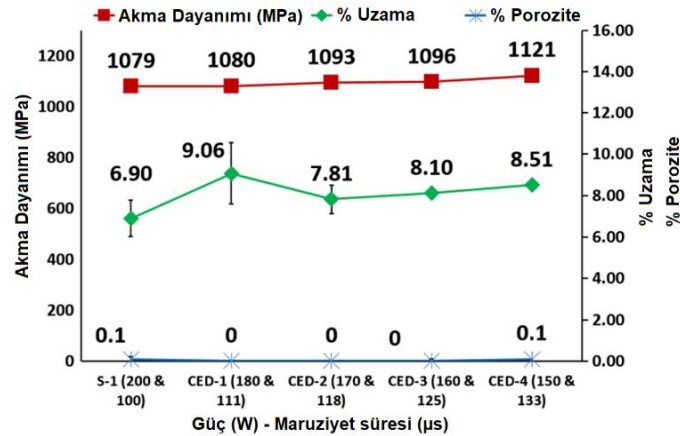
Şekil 2.23. Ilie ve ark. çalışmasında azalan lazer gücü-artan maruziyet süresi kombinasyonunun çekme eğrileri üzerindeki etkisi [133]

Akma dayanımı ve çekme dayanımında yaşanan düşüş numunelerin porozite içeriğiyle ilişkilendirilirken, sertlikte yaşanan azalma ise daha yavaş tarama hızlarına bağlı daha yavaş soğuma hızları ile ilişkilendirilmiştir. Ancak çalışmada soğuma hızı ölçümüne dair bir veri bulunmamaktadır. Çalışmada azalan güç ve artan maruziyet süresi kombinasyonu, seçilen parametrelerde lazer gücü düştükçe malzemeyi negatif yönde etkileyen doğrusal bir etki göstermiştir [133].

Ali ve ark. [130] gerçekleştirdikleri çalışmada sabit enerji yoğunluğunda ($76,92 \text{ J/mm}^3$) azalan lazer gücü-artan maruziyet süresi (azalan tarama hızı) koşullarında (200 W-100 μs , 180 W-111 μs , 170 W-118 μs , 160 W-125 μs , 150 W-133 μs) SLM prosesiyle Ti6Al4V numuneler üretmişler ve azalan güç-artan maruziyet süresi kombinasyonunun numunelerin akma dayanımı, yüzde uzama, yoğunluk, sertlik, soğuma hızı ve kalıntı gerilme özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Soğuma hızı ölçümünü termal modelleme ile gerçekleştirirken diğer ölçümleri deneysel metodlarla yapmışlardır. Kalıntı gerilme ölçümlerini her numunede 2 mm derinlikte tek noktada delik delme-gerinim ölçer (Hole drilling-strain gage) metoduyla gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonunda numunelerde elde edilen soğuma hızı ve kalıntı gerilme verileri Şekil 2.24’de, akma dayanımı, yüzde uzama ve yüzde porozite verileri ise Şekil 2.25’de görülebilmektedir.



Şekil 2.24. Ali ve ark. çalışmasında azalan lazer gücü-artan maruziyet süresi kombinasyonunun soğuma hızı ve kalıntı gerilme üzerindeki etkisi [130]



Şekil 2.25. Ali ve ark. çalışmasında azalan lazer gücü-artan maruziyet süresi kombinasyonunun akma dayanımı, % uzama ve % porozite üzerindeki etkisi [130]

Şekil 2.24 ve Şekil 2.25’den de görüldüğü üzere azalan güç-artan maruziyet süresi kombinasyonu çalışılan parametrelerde; akma dayanımı ve yüzde porozite üzerinde belirgin bir değişiklik yaratmamıştır. Lazer gücü ve tarama hızı düştükçe soğuma hızında azalma buna bağlı olarak kalıntı gerilmede azalma ve yüzde uzamada ise artma olduğu belirtilmiştir [130]. Ali ve ark. çalışmasında [130], Ilie ve ark. çalışmasının [133] aksine; azalan güç-artan maruziyet süresi kombinasyonunun seçilen parametrelerde lazer gücü düştükçe malzemede akma dayanımı, yüzde porozite ve sertlik verileri bakımından belirgin bir fark yaratmadığı, yüzde uzama verileri bakımından da pozitif etkilediği görülmüştür. İki çalışmanın ortak yanı ise azalan güç-artan maruziyet süresi koşullarında numunelerde lazer gücü artıp azalmasının (veya maruziyet süresi artıp azalması) yüzde uzama üzerinde doğrusal bir artma-azalma etkisi göstermesidir.

Xiao ve ark. [134] gerçekleştirdikleri çalışmada sabit enerji yoğunluğunda (75 J/mm^3) azalan lazer gücü-azalan tarama hızı koşullarında (A: 360 W-1200 mm/s, B: 300 W-1000 mm/s, C: 240 W-800 mm/s) SLM prosesiyle Ti6Al4V numuneler üretmişler ve azalan lazer gücü-artan maruziyet süresi kombinasyonunun numunelerin kalıntı gerilme özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kalıntı gerilme ölçümlerini, 2 mm derinlikte tek noktada delik delme-gerinim ölçer (Hole drilling-strain gage) metoduyla gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda kalıntı gerilme seviyeleri A: 470 MPa, B: 450 MPa ve C: 570 MPa olarak tespit edilmiştir. Çalışmanın sonucu iki farklı açıdan Ali ve ark. [130] çalışma sonuçlarıyla örtüşmemektedir. Birincisi lazer gücü ve tarama hızının artıp azalmasının kalıntı gerilmenin artıp azalması üzerinde doğrusal bir etki göstermediği görülmüştür. İkincisi Ali ve ark. [130] çalışmasında en düşük kalıntı gerilme seviyesi lazer gücünün en düşük uygulandığı numunede görülürken Xiao ve ark. [134] çalışmasında lazer gücünün en düşük uygulandığı numune en yüksek kalıntı gerilme değeriyle sonuçlanmıştır.

2.5. Ti6Al4V Malzemelerde Yapılan İkincil İşlemlerin Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkilerini İnceleyen Geçmiş Çalışmalar

Bu bölümde Ti6Al4V numunelerde uygulanan ikincil işlemlerin malzemelerin yorulma, kalıntı gerilme, içyapı, sertlik ve/veya yüzey pürüzlülüğü özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen geçmiş çalışmalar ele alınmıştır. Literatürde bu alanda

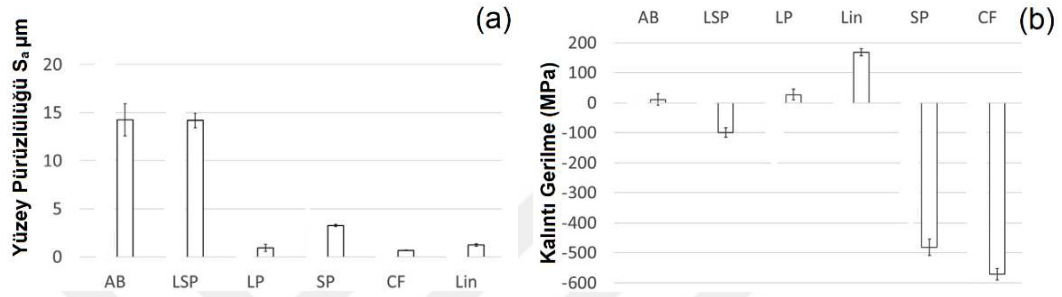
gerçekleştirilmiş çok sayıda çalışma bulunmakla birlikte bu bölümde, bu çalışmaya inceleme alanı bakımından en yakın geçmiş çalışmalar aktarılmaktadır.

Benedetti ve ark. [135] gerçekleştirdikleri çalışmada 3D Systems ProX 300 SLM makinesinde Ti6Al4V ELI (Grade 23) alaşımından numuneler üretmişler ardından numunelerin tamamını 670 °C sıcaklıkta 5 saat gerilme giderme tavlamasına tabi tutmuşlardır. Bu işlemin ardından bir grubu ayırarak geri kalan numunelerin tamamına tribofinish uygulamışlardır. Bu işlemin de ardından 3 grup numunede ilave farklı ikincil işlemler (SP, HIP, elektro parlatma) uygulanmış ve 5 farklı grupta numune elde etmişlerdir. Ardından bu 5 gruptaki numunede yüzey pürüzlülüğü, kalıntı gerilme, derinliğe bağlı sertlik ölçümleri ve yorulma analizleri gerçekleştirmişlerdir. Yalnızca tavllanmış numunede yüzey pürüzlülüğü R_a : 6,83 μm , bilyalı dövülmüşte R_a : 3,36 μm , elektro parlatılmışta R_a : 0,54 μm elde edilmiştir. En yüksek basma tipi kalıntı gerilme değerleri bilyalı dövülmüş numunede görülmüş olup SP işleminin basma tipi kalıntı gerilme oluşturma bakımından 150 μm derinliğe kadar etkili olduğu görülmüştür. Elektro parlatılmış numuneler yorulma sınırına 250 MPa'da, bilyalı dövülmüşler 325 MPa'da, HIP uygulanmışlar ise 375 MPa'da ulaşmışlardır.

Denti ve ark. [136] gerçekleştirdikleri çalışmada EOS M270 DMLS makinesinde Ti6Al4V numuneler üretmişler ve 3 grupta ikincil işlemler yaparak toplam 4 grup (işlemsiz, tamburlanmış, talaş kaldırılmış, tamburlanmış sonra bilyalı dövülmüş) numune elde etmişlerdir. Talaş kaldırma işlemi CNC torna ile, tamburlama işlemi seramik partiküllerle, SP işlemi alümina partikülleri ile gerçekleştirilmiştir. Ardından elde edilen 4 grup numune üzerinde $R=0$ gerilme oranıyla yorulma analizleri gerçekleştirilmiş olup yorulma sınırı 6×10^6 çevrim olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen analizler neticesinde işlemsiz numuneler yorulma sınırına 200 MPa'da ulaşırken talaş kaldırılmış ve tamburlama sonrası bilyalı dövülmüş numuneler yorulma sınırına 500 MPa'da ulaşmıştır.

Kahlin ve ark. [137] gerçekleştirdikleri çalışmada EOS M280 DMLS makinesinde Ti6Al4V numuneler üretmişlerdir. Numuneler, 730 °C sıcaklıkta 2 saat gerilme giderme tavlamasına tabi tutulmuştur. Ardından 5 grup numunede ikincil işlemler uygulanarak toplam 6 grup (işlemsiz: AB, santrifüj makinesinde işlenmiş: CF,

bilyalı dövülmüş: SP, lazerle parlatılmış: LP, lazer şok işlenmiş: LSP, zımparalanmış: Lin) numune elde edilmiş ve numuneler üzerinde kalıntı gerilme, yüzey pürüzlülüğü, yorulma, analizleri gerçekleştirilmiştir. Yorulma analizleri 20 Hz frekansta $R=0,1$ gerilme oranıyla gerçekleştirilirken yorulma sınırı 5×10^6 çevrim olarak belirlenmiştir. Kalıntı gerilme ölçümleri XRD metoduyla yalnızca malzeme yüzeyinden alınmıştır. Numunelerin yüzey pürüzlülüğü sonuçları Şekil 2.26a'da, kalıntı gerilme analiz sonuçları Şekil 2.26b'de görülebilmektedir.



Şekil 2.26. Kahlin ve ark. çalışmasında a) yüzey pürüzlülüğü sonuçları b) kalıntı gerilme sonuçları [137]

CF numuneleri yorulma sınırına 600 MPa'da, SP: 410 MPa'da, Lin: 325 MPa'da, LSP: 300 MPa'da, AB: 265 MPa'da ve LP: 135 MPa'da ulaşmıştır.

Leuders ve ark. [138] gerçekleştirdikleri çalışmada döküm yoluyla ve SLM prosesi ile üretilen Ti6Al4V numunelerin yorulma ömürlerini karşılaştırmışlardır. SLM ile üretilen numunelerde işlemsiz ve ikincil işlemliler hallerinin yüzey pürüzlülüğü ve kalıntı gerilme sonuçları karşılaştırılmıştır. SLM ile üretilen ürünlerin işlem basamakları şu şekilde olmuştur: 250 HL makinesinde üretim arından 920 °C sıcaklık 100 MPa basınçta HIP, ardından 60 HRC sertlikte bilya ile 0,31 mmA almen şiddetinde SP, ardından cam bilya ile dövme. Döküm numunelerdeki işlem basamakları şu şekilde olmuştur: Döküm prosesi ardından 920 °C sıcaklık 100 MPa basınçta HIP, ardından talaş kaldırma. İşlemsiz SLM Ti6Al4V numunelerde 115 μm derinlikteki kalıntı gerilme 800 ± 35 MPa ölçülürken ikincil işlemliler numunelerde yüzeyde -910 ± 125 MPa, 177 μm derinlikte ise -475 ± 35 MPa ölçülmüştür. İşlemsiz SLM Ti6Al4V numunelerde ortalama yüzey pürüzlülüğü R_a : 13,5 μm çıkarken ikincil işlemliler numunelerde R_a : 4,2 μm olarak bulunmuştur. Yorulma sınırı 2×10^6 çevrim olarak belirlenmiş olup SLM Ti6Al4V numuneler yorulma sınırına 220 MPa'da döküm numuneler ise 400 MPa'da ulaşmıştır.

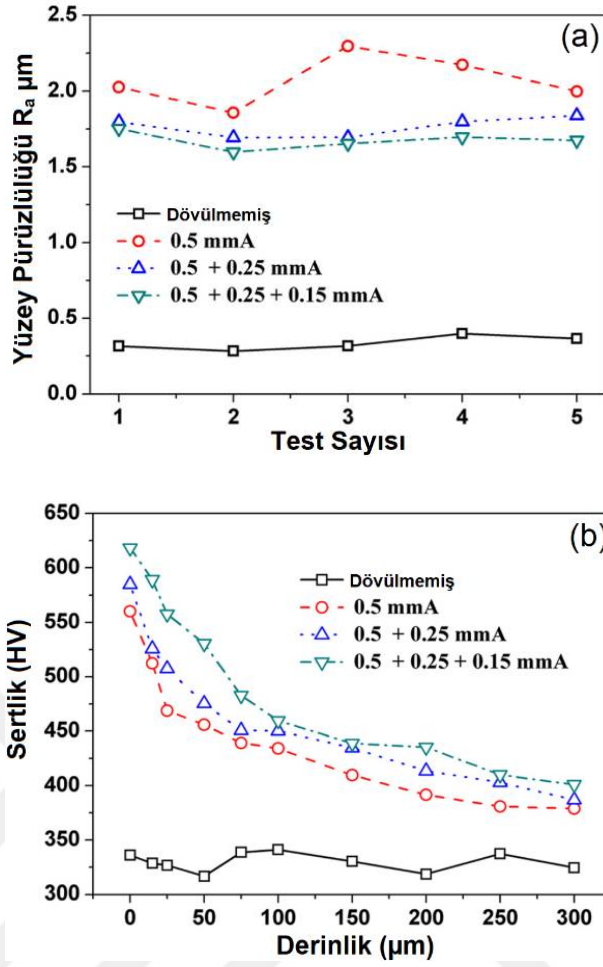
Wycisk ve ark. [13] gerçekleştirdikleri çalışmada EOS M270 DMLS makinesinde üretim tablasına 45° açıyla Ti6Al4V yorulma numuneleri üretmişler ardından tüm numuneleri 650 °C sıcaklıkta 3 saat gerilme giderme tavlmasına tabi tutmuşlardır. Tavlama sonrası bir grup numune işlemsiz bırakılırken bir grup numunenin yüzeyi parlatılmış ve $R_a \approx 0,5 \mu\text{m}$ yüzey elde edilmiş, bir diğer grup ise bilyalı dövülmüş ve işlem sonrası $R_a \approx 2,9 \mu\text{m}$ bir yüzey elde edilmiştir. İşlemsiz numunelerde ise $R_a \approx 13 \mu\text{m}$ ölçülmüştür. Yorulma analizleri 50 Hz frekansta $R=0,1$ gerilme oranıyla gerçekleştirilmiş olup yorulma sınırı 10^7 çevrim olarak belirlenmiştir. Analizler neticesinde işlemsiz numuneler 210 MPa’da, bilyalı dövülmüş numuneler 435 MPa’da, parlatılmış numuneler ise 510 MPa’da yorulma sınırına ulaşmıştır.

Xie ve ark. [139] gerçekleştirdikleri çalışmada yüksek sıcaklık sentez yöntemiyle üretilen Ti6Al4V alaşımı numunelerde çoklu SP’nin etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla 3 farklı şartta bilyalı dövülmüş numune oluşturmuşlardır. SP öncesi tüm numunelerin yüzeyleri 400, 600, 800 grit zımparalarla zımparalanmış ardından parlatılmıştır. Uygulanan SP parametreleri Tablo 2.7’de görülebilmektedir.

Tablo 2.7. Xie ve ark. çalışmasında SP parametreleri [139]

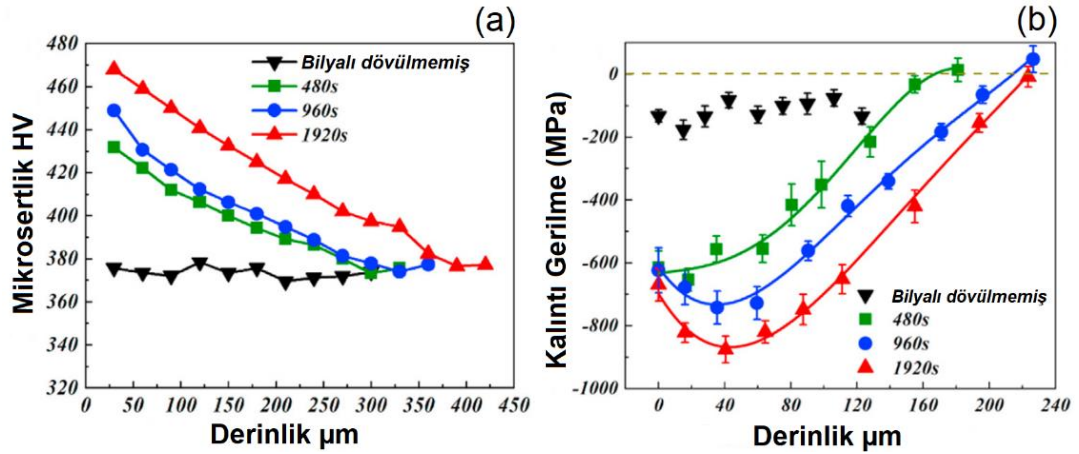
SP Metodu	Almen Şiddeti (mmA)	Bilya Türü	Bilya Çapı
Geleneksel SP	0,50	çelik	0,6
Dual SP	0,50+0,25	çelik+çelik	0,6+0,6
Triple SP	0,50+0,25+0,15	çelik+çelik+seramik	0,6+0,6+0,3

Hazırlanan numunelerde derinliğe bağlı sertlik ölçümleri, yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ve numune yüzeylerinde XRD metoduyla kalıntı gerilme ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kalıntı gerilme seviyeleri; genelsel SP, dual SP ve triple SP yapılan numunelerde sırasıyla -734 MPa, -752 MPa ve -831 MPa olarak ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü sonuçları Şekil 2.27a’da, derinliğe bağlı sertlik ölçümü sonuçları Şekil 2.27b’de görülebilmektedir.



Şekil 2.27. Xie ve ark. çalışmasında a) yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları b) sertlik ölçümü sonuçları [139]

Zhang ve ark. [140] gerçekleştirdikleri çalışmada BLT-S310 SLM makinesinde Ti6Al4V numuneler üretmişler ardından bu numuneler üzerinde sırasıyla 400, 800, 1200, 2000 grit numaralı zımparalarla zımparalama sonrasında da parlatma yapmışlardır. Numunelerden bir grubu bu şekilde bırakırken 3 grup numunede ise farklı sürelerde ultrasonik SP işlemi uygulamışlar ve bu 4 gruptaki numunenin kalıntı gerilme, yüzey pürüzlülüğü ve derinliğe bağlı sertlik ölçüm sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Kalıntı gerilme ölçümleri XRD metoduyla gerçekleştirilirken ultrasonik SP işlemleri 2,5 mm çapındaki zirkonyum bilyalarla sırasıyla 0.15, 0.20 ve 0.22 mm A almen siddetlerinde ve sırasıyla 480, 960 ve 1920 s dövme sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen işlemler sonucunda bilyalı dövülmemiş numunede R_a : 0,082 μm , 480 s - R_a : 0,301 μm , 960 s - R_a : 0,381 μm ve 1920 s - R_a : 0,392 μm olarak elde edilmiştir. Derinliğe bağlı sertlik ölçüm sonuçları Şekil 2.28a’da, kalıntı gerilme sonuçları ise Şekil 2.28b’de görülebilmektedir.



Şekil 2.28. Zhang ve ark. çalışmasında a) mikro sertlik ölçüm sonuçları b) kalıntı gerilme ölçüm sonuçları [140]

Yu ve ark. [141] gerçekleştirdikleri çalışmada LSNF-2 SLM makinesinde yorulma numuneleri üretmişler; bu numunelerden bir grubu işlemsiz bırakırken iki grupta farklı proseslerde tavlama, bir diğer grupta da HIP gerçekleştirmişler ve yorulma sonuçlarını, içyapıları, yorulma kırılma yüzeyi görüntülerini karşılaştırmışlardır. HIP uygulanan numune 920 °C sıcaklık 100 MPa basınçta 2 saat tutulmuş ardından fırında soğutulmuş, tavlanan numunelerden biri (HT-920) iki saat 920 °C sıcaklıkta tutulmuş ardından fırında soğutulmuş, tavlanan numunelerden diğeri (HT-850-550) 850 °C sıcaklıkta iki saat tutulmuş ardından su verilmiş 550 °C sıcaklıkta dört saat tutulmuş ardından havada soğutulmuştur. Yorulma analizleri 20 Hz frekansta $R = -1$ gerilme oranıyla gerçekleştirilmiş olup yorulma sınırı 10^7 çevrim olarak belirlenmiştir. İçyapılarda yapılan faz boyutu ölçümlerinde işlemsiz numunede gözlenen α' fazı genişliği: $0.86 \pm 0.17 \mu\text{m}$, HIP numunede α fazı genişliği: $2.51 \pm 0.67 \mu\text{m}$, HT-850-550 numunede α fazı genişliği: $1.78 \pm 0.35 \mu\text{m}$ ve HT-920 numunede α fazı genişliği: $2.29 \pm 0.58 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Yorulma analizleri neticesinde işlemsiz numune yorulma sınırına 300 MPa altında ulaşabilirken, HT-920 ve HT-850-550 numuneleri 350 MPa'da, HIP numune ise 450 MPa'da ulaşmıştır.

2.6. Tezin Amacı

SEY'de lazer gücü ve tarama hızı azalmasının malzemelerin mekanik ve/veya kalıntı gerilme özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen literatürdeki her üç çalışmanın da birbirinden farklı sonuçlara ulaşmış olması bu alanda kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmesinin itici gücü olmuştur. Çalışmanın ilk bölümünde her üç çalışmada uygulanan güç değerlerinin altında (140, 130, 125, 120 W) lazer güçleri

uygulanarak SEY’de 4 farklı azalan güç ve tarama hızı kombinasyonunun Ti6Al4V numunelerin mekanik, içyapı, kalıntı gerilme ve bağıl yoğunluk özellikleri üzerindeki etkilerini araştıran kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmanın ikinci bölümünde ilk bölümde en iyi sonuçların elde edildiği proses parametrelerinde üretilen Ti6Al4V numunelerde talaş kaldırma, tavlama ve SP ikincil işlemleri farklı kombinasyonlarda uygulanarak gerçekleştirilen bu ikincil işlemlerin malzemelerin yorulma, eğilme, kalıntı gerilme, içyapı, sertlik ve yüzey pürüzlülüğü özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. SLM prosesinde üretilen Ti6Al4V numunelerde oluşan çekme tipi kalıntı gerilme, yüksek yüzey pürüzlülüğü gibi istenmeyen özellikler azaltılmaya, yorulma dayanımı, eğilme dayanımı gibi özellikler artırılmaya çalışılmış ve elde edilen veriler hem kendi içinde hem de literatürle karşılaştırılmıştır. SLM prosesi ile üretilen Ti6Al4V numunelerde gerçekleştirilen ikincil işlem çalışmaları aşağıda sıralanan yönlerden literatüre yenilik getirmiştir:

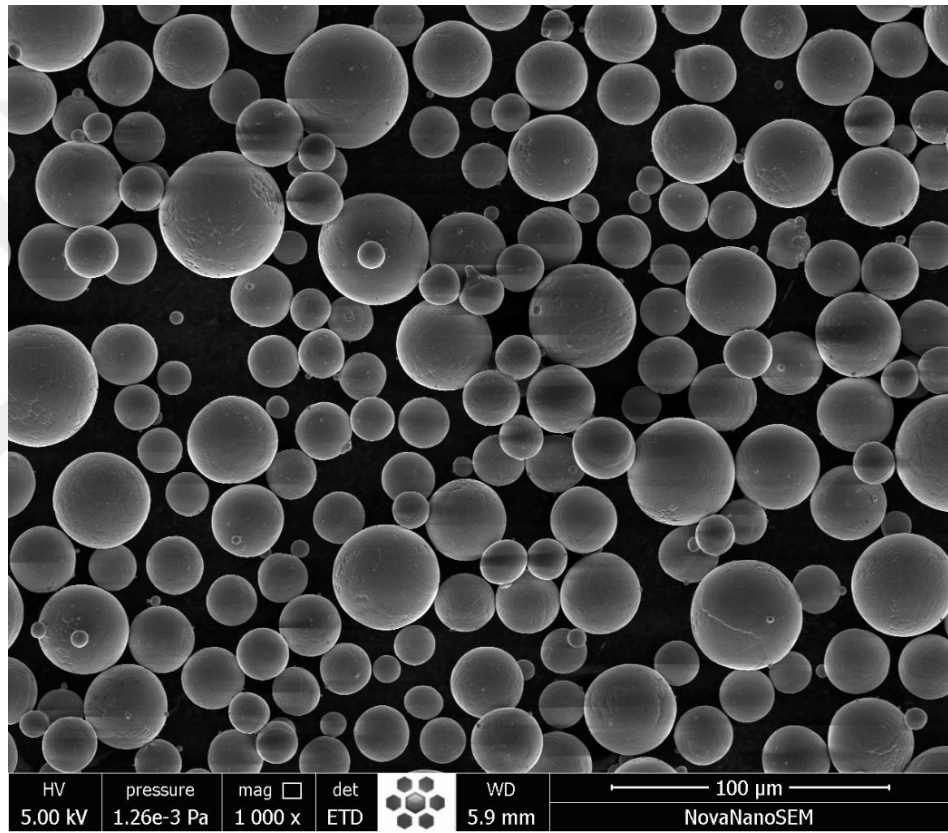
- Geleneksel ve çoklu bilyalı dövülmüş numunelerin derinliğe bağlı sertlik ölçümleri ve kalıntı gerilme sonuçlarının karşılaştırılması.
- Kalıntı gerilme numunesinde bir yüzeyde talaş kaldırılmayarak talaş kaldırmanın kalıntı gerilme üzerindeki etkisinin irdelenmesi
- Yorulma analizi gerçekleştirilen numune gruplarından birine çoklu SP uygulanması
- SP (geleneksel ve çoklu), tavlama ve talaş kaldırmanın eğilme dayanımı üzerindeki etkilerinin araştırılması

Çalışmada üretimlerin tamamı ülkemizde üretilen ilk ticarileşmiş SLM makinesi olan ENA 250’de gerçekleştirilmiş olup ayrıca yapılan tüm çalışmalarla makinede üretilen Ti6Al4V ürünlerin özelliklerinin tanınması ve elde edilen veriler ışığında makinenin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEMLER

3.1. Materyal

Gerçekleştirilen çalışmada gaz atomizasyon yöntemiyle üretilmiş, küresel şekilli Ti6Al4V (Grade 5) tozu kullanılmış olup kullanılan toza ait SEM görüntüsü Şekil 3.1’de görülebilmektedir. Tozun D10, D50 and D90 verileri sırasıyla 18 μm , 31 μm and 43 μm şeklindedir. Tablo 3.1’de ise çalışmalarda kullanılan Ti6Al4V tozunun ASTM B348/B348M-19 standardına [142] uygun özellikteki, elementlerin ağırlıkça oranlarının paylaşıldığı kimyasal kompozisyonu görülebilmektedir.



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan Ti6Al4V tozun SEM görüntüsü

Tablo 3.1. Çalışmada kullanılan Ti6Al4V tozun kimyasal kompozisyonu

C (%)	O (%)	N (%)	H (%)	Fe (%)	Al (%)	V (%)	Diğer Tekil	Diğer Toplam	Ti (%)
0,01	0,17	0,01	0,003	0,21	6,43	4,0	< 0,1	< 0,4	Balans

3.2. Yöntem

3.2.1 Numune Üretimleri

Tüm numune üretimleri Ermaksan Makina Sanayi ve Ticaret A.Ş. bünyesinde bulunan ENA 250 marka SLM tipi eklemeli imalat makinesinde gerçekleştirilmiş olup kullanılan makinenin görüntüsü Şekil 3.2’de görülebilmektedir.



Şekil 3.2. Tüm numune üretimlerinin gerçekleştirildiği ENA 250 marka SLM tipi eklemeli imalat makinesi

Üretime dair makine şartlandırması şu şekildedir: Üretimlerin başlaması için O₂ seviyesinin 50 ppm seviyesine düşmesi ve aynı anda nem seviyesinin % 1’in altına düşmesi gerekmektedir. Bu şartlar sağlanana dek sisteme Ar gazı verilmekte, üretim ancak bu şartlar sağlandığında başlatılmaktadır. Bu şartların sağlanmasının ardından sisteme Ar girişi durmakta, O₂ seviyesi 100 ppm’e ulaştığında veya nem seviyesi % 3’e ulaştığında sisteme tekrar Ar girişi gerçekleşmektedir.

Üretimler 4 parti halinde gerçekleştirilmiştir. Tüm üretimlerde 90° dönüşümlü çizgisel tarama stratejisi kullanılmış ve tüm numune üretimleri, üretim tablasına 45° açıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda kullanılan numune kodları ve kodların açıklamaları Tablo 3.2’de görülebilmektedir. Tabloda 1’den 11’e kadar sıralanmış numuneler parametre çalışmasında kullanılırken, 12’den 25’e kadar sıralanmış

numuneler ise ikincil işlem çalışmasında kullanılmıştır. İkincil işlem çalışmasında üç farklı geometriye sahip numuneler kullanılmış olup kare prizma numuneler K harfi, yorulma numuneleri Y harfi, eğilme numuneleri ise E harfi ile başlamaktadır.

Tablo 3.2. Çalışmalarda kullanılan numune kodları ve kodların açıklamaları

Sıra No	Numune Kodları	Numunelerin Kod Açıklamaları
1	A	Farklı proses parametrelerinde üretilen yoğunluk ölçüm numuneleri
2	B	
3	C	
4	D	
5	E	
6	F	
7	G	
8	Ap	Farklı proses parametrelerinde üretilen parametre çalışması numuneleri
9	Bp	
10	Cp	
11	Dp	
12	K-işlemsiz	İşlenmemiş
13	K	Frezelemiş
14	KI	Tavlanmış + frezelemiş
15	KS1	Frezelemiş + SP1
16	KS2	Frezelemiş + SP1 + SP2
17	Y-işlemsiz	İşlenmemiş
18	Y	Tornalanmış
19	YS2	Tornalanmış + SP1 + SP2
20	YI	Tavlanmış + tornalanmış
21	E-işlemsiz	İşlenmemiş
22	E	Frezelemiş
23	ES1	Frezelemiş + SP1
24	ES2	Frezelemiş + SP1 + SP2
25	EI	Tavlanmış + frezelemiş

İlk parti üretimde, 7 farklı üretim parametre setinde üretimlerinin gerçekleştirilmesi planlanan yoğunluk ölçüm numunelerinin üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin boyutları 17x17x7 şeklindedir. Yoğunluk ölçüm numunelerinin üretim parametreleri Tablo 3.3’de görülebilmektedir. Her numune kodu için ikişer numune üretimi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.3. Yoğunluk ölçüm numunelerinin üretim parametreleri

Numune Kodu	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Tarama Aralığı (μm)	Katman Kalınlığı (μm)	Enerji Yoğunluğu (J/mm ³)
A	120	1140	100	30	35,1
B	120	960	100	30	41,7
C	200	1100	140	30	43,3
D	120	606	100	30	66,0
E	125	490	100	30	85,0
F	120	400	100	30	100,0
G	100	300	80	30	138,9

İkinci parti üretimde dört farklı parametre setinde üretim yapılmıştır. Her bir parametre seti için üçer adet çekme numunesi üretimi gerçekleştirilmiş olup ayrıca Vickers mikro sertlik analizi, içyapı analizleri ve kalıntı gerilme analizlerinde kullanılmak üzere her parametre seti için dörder adet de 17x17x7 boyutlarında numune üretimleri gerçekleştirilmiştir. Parametre numunelerinin numune kodları Ap, Bp, Cp ve Dp olarak belirlenmiştir. Cp kodlu numunenin üretim parametreleri, yoğunluk ölçüm çalışmasında en yüksek yoğunluğun elde edildiği E numune kodlu numunenin üretim parametreleriyle aynıdır. Parametre çalışmasında kullanılan diğer numunelerde (Ap, Bp, Dp) güç ve tarama hızı değiştirilirken; tarama aralığı 100 μm’de, katman kalınlığı 30 μm’de ve enerji yoğunluğu ise 85,0 J/mm³’te sabit tutulmuş böylece azalan güç ve tarama hızının (artan maruziyet süresinin) numunelerin mekanik, kalıntı gerilme ve içyapı özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Şekil 3.3’de üretimleri tamamlanmış parametre numunelerinin, henüz üretim tablası makine içerisinden alınmadan ve üretim tozu tamamen paraçaların üzerinden temizlenmeden alınmış bir görüntüsü görülebilmektedir. Tablo 3.4’de ise parametre numunelerinin üretim parametreleri görülebilmektedir.

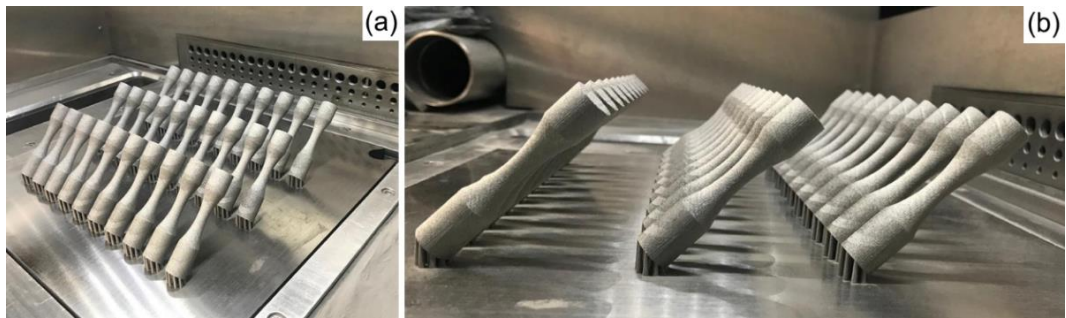


Şekil 3.3. Üretimleri tamamlanmış parametre numunelerinin görüntüsü

Tablo 3.4. Parametre numunelerinin üretim parametreleri

Parametreler	Ap	Bp	Cp	Dp
Güç (W) - Tarama hızı (mm/s)	140 - 549,0	130 - 510,0	125 - 490,0	120 - 470,5

Üçüncü parti üretimde ikincil işlem çalışmalarında kullanılan yorulma numunelerinin üretimleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.4a’da üretilen yorulma numunelerinin perspektif görüntüsü Şekil 3.4b’de ise yandan görüntüsü görülebilmektedir. Yorulma numunelerinin üretimlerinde kullanılan üretim parametreleri ise Tablo 3.5’de görülebilmektedir. Parametre çalışmasında en iyi sonuçların alındığı Cp numunesinin üretim parametreleri ikincil işlem çalışmalarının üretim parametreleri olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.4. Üretimleri tamamlanan yorulma numunelerinin görüntüleri (a) perspektif görüntü (b) yandan görüntü

Tablo 3.5. İkincil işlem çalışmalarında kullanılan numunelerin üretim parametreleri

Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Tarama Aralığı (μm)	Katman Kalınlığı (μm)	Enerji Yoğunluğu (J/mm³)
125	490	100	30	85,0

Dördüncü parti üretimde; ikincil işlem çalışmalarında kullanılan üç nokta eğme numuneleri ile 17x17x7 boyutlarındaki numunelerin üretimleri gerçekleştirilmiştir. Numunelerin üretim parametreleri Tablo 3.5'deki gibidir. Üretilen üç nokta eğme numunelerinin 5 farklı şartta analizlerinin gerçekleştirilmesi planlanmış olup bunlardan biri işlemsiz gruptur. İşlem görmeyecek üç nokta eğme numuneleri 60x10x6 ebatlarında üretilirken yüzeyinden talaş kaldırılacak üç nokta eğme numuneleri 60x12x8 ebatlarında üretilmiştir. İkincil işlem çalışmalarında kullanılan üç nokta eğme numuneleri ile 17x17x7 boyutlarındaki numunelerin üretim görüntüsü Şekil 3.5'de görülmektedir.



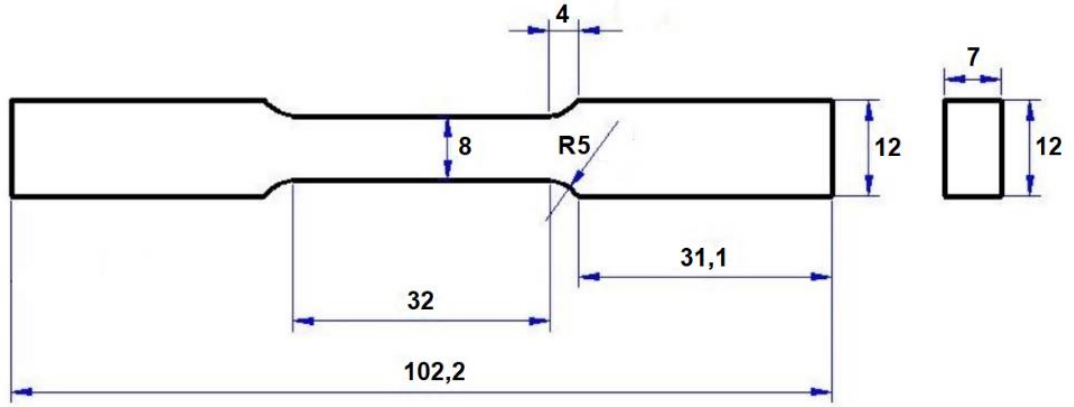
Şekil 3.5. Üç nokta eğme numuneleri ile farklı türden ikincil işlemlerde kullanılan numunelerin üretim sonrasında alınan görüntüsü

3.2.2. Talaş Kaldırma İşlemleri

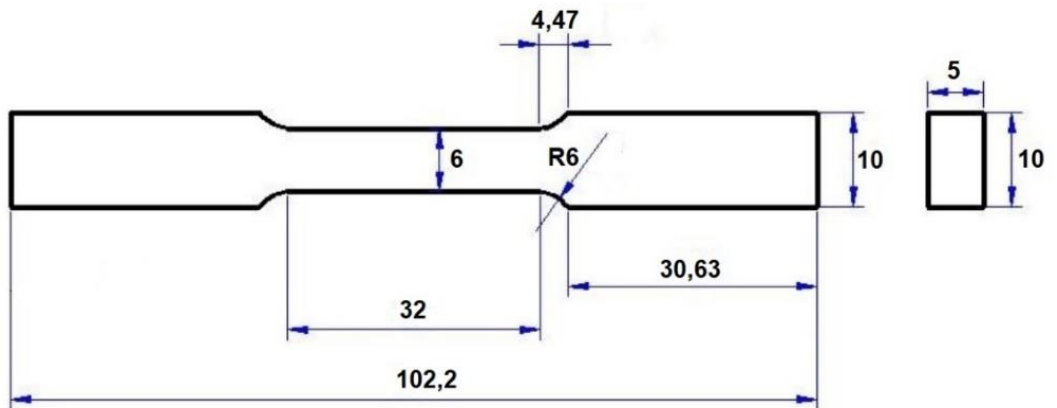
SLM prosesi ile üretilen ürünlerin neredeyse tamamının talaş kaldırma sonrasında kullanılabiliyor olması, ölçü hassasiyetinin istenen düzeye getirilmesi ve yüzey pürüzlülüğünün düşürülmesi gibi nedenlerle, E-işlemsiz üç nokta eğme

numuneleri dışında kalan tüm numunelerde talaş kaldırma işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Parametre çalışmasında kullanılan Ap, Bp, Cp, Dp kodlu çekme testi numunelerinin üretim ölçüleri Şekil 3.6’da, talaş kaldırma sonrasında elde edilen ve ASTM E8/E8M 16ae1 standardına [143] uygun nihai ölçüleri ise Şekil 3.7’de görülebilmektedir. Talaş kaldırma işlemleri çekme testi numunelerinde 4 yüzeyde gerçekleştirilmiş olup işlemlerin sağlıklı şekilde gerçekleştirilebilmesi amacıyla üretimler bu yüzeylerde 1’er mm paylı şekilde gerçekleştirilmiştir. Talaş kaldırma işlemleri DC Kalıp Makine Plastik İmalatı San. ve Tic. Ltd. Şti. bünyesinde bulunan ve Şekil 3.8’de görülebilmekte olan Haas marka VF3 model CNC freze tezgahında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6. Çekme numunelerinin üretim ölçüleri



Şekil 3.7. Çekme numunelerinin talaş kaldırma işlemi sonrası ASTM E8/E8M 16ae1 standardına uygun nihai ölçüleri

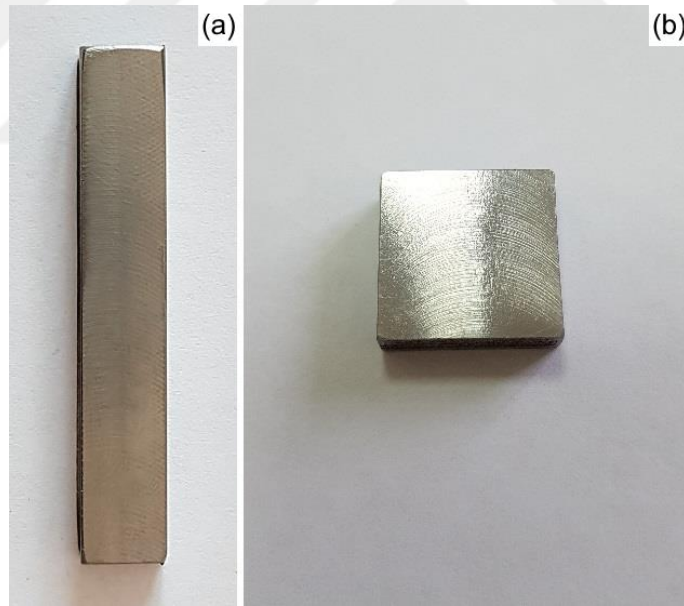


Şekil 3.8. Çekme numunelerinin talaş kaldırma işlemlerinin gerçekleştirildiği Haas marka VF3 model CNC freze tezgahı

Yoğunluk ölçüm çalışmasında kullanılan 17x17x7 boyutlarındaki A, B, C, D, E, F, G kodlu numunelerin, parametre çalışmasında kullanılan Ap, Bp, Cp, Dp kodlu 4'er adet 17x17x7 ölçüsündeki numunelerin ve ikincil işlem çalışmasında kullanılan 60x12x8 ölçüsündeki E, ES1, ES2, EI kodlu üç nokta eğme numunelerinin talaş kaldırma işlemleri, her bir grup kendi içinde aynı frezeleme parametrelerinde olmak üzere Ermaksan Makina Sanayi ve Ticaret A.Ş. bünyesinde bulunan ve Şekil 3.9'da görülebilmekte olan Tos Kurim marka manuel freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. 17x17x7 boyutlarındaki numunelerde talaş kaldırma işlemleri tüm yüzeylerde 1'er mm kesme derinliğinde gerçekleştirilmiş olup talaş kaldırma işlemi neticesinde her bir numunenin ölçüsü 15x15x5 olmuştur. Üç nokta eğme numunelerinde ise toplam 4 yüzeyde talaş kaldırılmış olup talaş kaldırma öncesi 60x12x8 olan boyutlar 60x10x6'ya düşürülmüştür. EI kodlu numunelerin talaş kaldırma işlemleri tavlama sonrasında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.10a'da talaş kaldırma işlemi tamamlanan bir adet üç nokta eğme numunesi görülmektedirken Şekil 3.10b'de de talaş kaldırma işlemi tamamlanan bir adet 15x15x5 ölçüsündeki numune görülebilmektedir.



Şekil 3.9. Tos Kurim marka manuel freze tezgahı



Şekil 3.10. Manuel frezeleme işlemleri tamamlanan numuneler (a) bir adet üç nokta eğme numunesi (b) 15x15x5 ölçüsündeki bir adet numune

Tüm yorulma numunelerinde talaş kaldırma işlemleri gerçekleştirilmiş olup YI kodlu tavlanan yorulma numunelerinde talaş kaldırma işlemleri ısıtım işlem sonrasında gerçekleştirilmiştir. Talaş kaldırma işlemleri iki aşmalıdır. İlk aşamada CNC tornalama gerçekleştirilirken ikinci aşamada ise tornalamada puntalamanın

yapılabilmesi için bırakılan 5 mm'lik pay CNC freze tezgahında alınmıştır. CNC tornalama işlemi Anç Ltd. Şti. firması bünyesinde bulunan ve Şekil 3.11'de görülmekte olan Goodway marka GLS-200 model CNC torna tezgahında gerçekleştirilirken CNC freze işlemi ise yine aynı firma bünyesinde bulunan ve Şekil 3.12'de görülebilmekte olan Haas marka VF4 model CNC freze tezgahında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.11. Goodway marka GLS-200 model CNC torna tezgahı



Şekil 3.12. Haas marka VF4 model CNC freze tezgahı

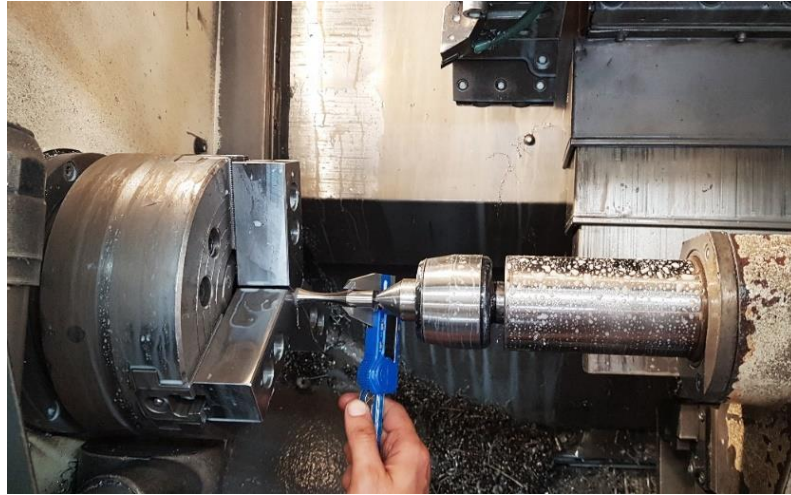
Yorulma numunelerinin CNC torna tezgahındaki işleme parametreleri Tablo 3.6’da, CNC freze tezgahındaki işleme parametreleri ise Tablo 3.7’de görülebilmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün olabildiğince düşük elde edilebilmesi amacıyla torna tezgahı ve kullanılan takımın izin verdiği ölçüde CNC torna parametrelerinden kesme hızı olabildiğinde yüksek, ilerleme hızı ise olabildiğinde düşük seçilmiştir. Kesme hızının bütün çap boyunca sabit kalabilmesi amacıyla tornalama işlemi değişken devirde gerçekleştirilmiştir. Tornalama esnasında alınan bir görüntü Şekil 3.13’de görülebilmektedir.

Tablo 3.6. Yorulma numunelerinin CNC torna tezgahındaki işleme parametreleri

Kesme Hızı (Vc)	İlerleme Hızı (f)	Talaş Derinliği (a)	Minimum Devir (n)	Maksimum Devir (n)
50 m/dk.	0,05 mm/dev.	0,1 mm	1326 dev./dk.	3183 dev./dk.

Tablo 3.7. Yorulma numunelerinin CNC freze tezgahındaki işleme parametreleri

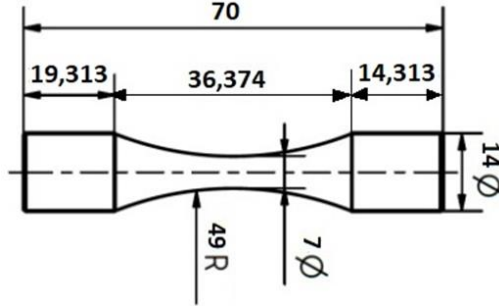
Takım Çapı (D)	Devir Sayısı (n)	Kesme Hızı (Vc)	Talaş Derinliği (a)	İlerleme Hızı (f)
10 mm	1910 dev./dk.	60 m/dk.	0,2 mm	150 mm/dk.



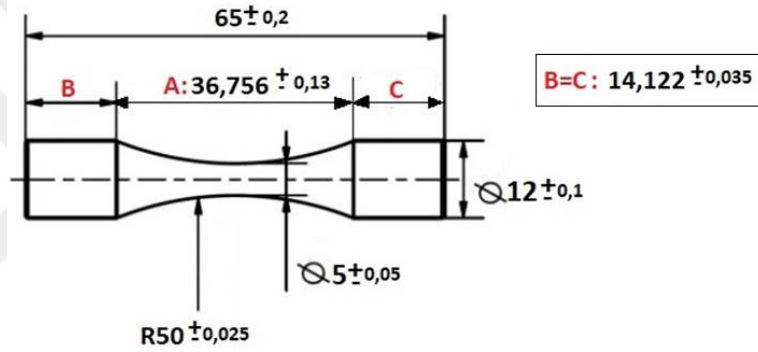
Şekil 3.13. Yorulma numunesinin tornalanması esnasında alınan bir görüntü

Şekil 3.14’de yorulma numunesinin üretim ölçüleri, Şekil 3.15’de tüm talaş kaldırma işlemleri tamamlanmış ve ASTM 466E-15 standardına uygun nihai ölçülerine ulaşmış

yorulma numunesinin ölçüleri, Şekil 3.16a’da işlemsiz yorulma numunesinin görüntüsü, Şekil 3.16b’de ise tüm talaş kaldırma işlemleri tamamlanmış yorulma numunesinin görüntüsü görülebilmektedir.



Şekil 3.14. İşlemsiz yorulma numunesi ölçüleri

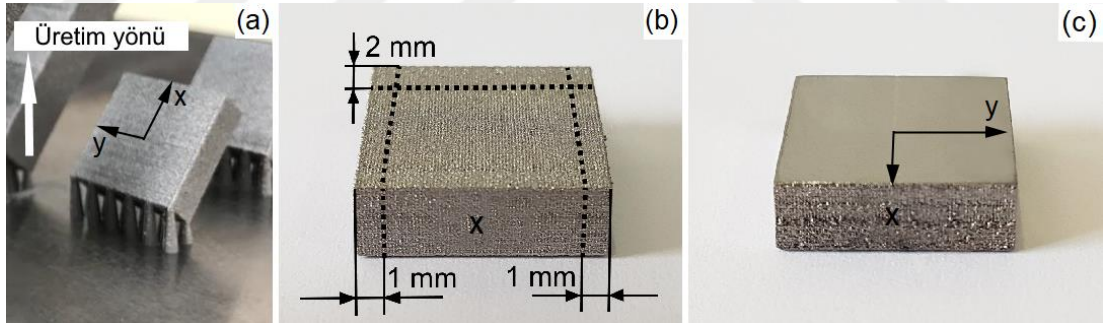


Şekil 3.15. Talaş kaldırma işlemleri tamamlanmış, ASTM 466E-15 standardına uygun nihai ölçülerine ulaşmış yorulma numunesinin ölçüleri



Şekil 3.16. Yorulma numunesi görüntüleri (a) işlenmemiş (b) tüm talaş kaldırma işlemleri tamamlanmış

2 adet K kodlu yalnızca talaş kaldırılmış, 1 adet KI kodlu tavlama sonrası talaş kaldırılmış, 3 adet KS1 kodlu talaş kaldırma sonrasında SP1 işlemi uygulanmış, 3 adet KS2 kodlu talaş kaldırma sonrasında SP1+SP2 işlemleri uygulanmış ve 1 adet de SP2 kaplama zamanı tespitinde kullanılmak üzere toplamda 10 adet 17x17x7 ölçüsündeki ikincil işlem numunesinde, 5 yüzeyde CNC frezeleme işlemi gerçekleştirilmiş ve bir yüzey frezelenmeden bırakılmıştır. Gerçekleştirilen frezeleme işlemi iki aşamalıdır. Birinci aşamada numunelerin 3 kenarından sırasıyla 1 mm, 2mm ve 1 mm ölçülerinde frezeleme yapılmış, 1 kenarı ise (x işaretli yüzey) frezelenmeyerek bırakılmış ve böylece ölçü 15x15x7'ye düşürülmüştür. İkinci aşamada ise üst ve alt yüzeyden 1'er mm kesme derinliğinde frezeleme yapılmış ve nihai ölçüler 15x15x5 olarak elde edilmiştir. Her iki aşamada kullanılan frezeleme parametreleri Tablo 3.8'de görülmektedir. Kalıntı gerilme ölçümleri açısından eksenlerin konumu önemli olduğundan üretim sonrasında eksenler işaretlenmiş ve tüm numunelerde x eksenine karşılık gelen yüzeyin işlenmemesi sağlanmıştır. Henüz üretim tablasından alınmamış numunede üretim yönü ile x ve y eksenlerinin birlikte gösterimi Şekil 3.17a'da, birinci aşamada frezelemenin yapıldığı yüzeylerin görüntüsü Şekil 3.17b'de ve talaş kaldırma işlemleri tamamlanmış numune görüntüsü ise Şekil 3.17c'de görülebilmektedir.



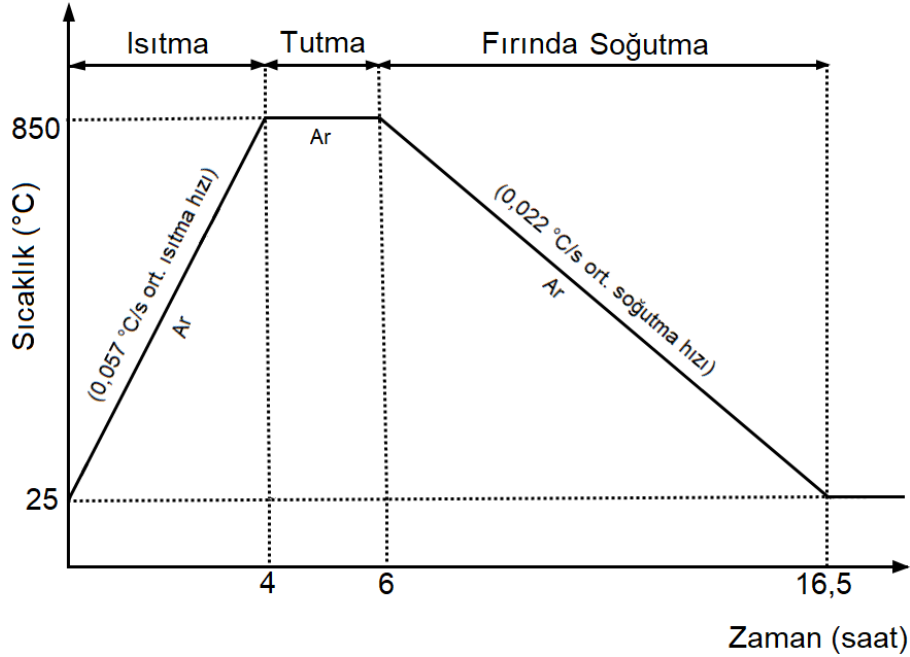
Şekil 3.17. (a) Henüz üretim tablasından alınmamış numunede üretim yönü ile x ve y eksenlerinin birlikte gösterimi (b) birinci aşamada frezelemenin yapıldığı yüzeylerin görüntüsü (c) talaş kaldırma işlemleri tamamlanmış numune görüntüsü

Tablo 3.8. İkincil işlem çalışmasında kullanılan 15x15x5 ölçüsündeki numunelerin frezeleme parametreleri

Frezeleme Aşaması	Takım Çapı (D)	Devir Sayısı (n)	Kesme Hızı (Vc)	Talaş Derinliği (a)	İlerleme Hızı (f)
Aşama I	6 mm	3000 dev./dk.	56,55 m/dk.	0,2 mm	200 mm/dk.
Aşama II	16 mm	1125 dev./dk.	56,55 m/dk.	0,1 mm	200 mm/dk.

3.2.3. Isıl İşlem

İkincil işlem çalışmalarında kullanılan YI kodlu 6 adet yorulma numunesi, EI kodlu 4 adet üç nokta eğme numunesi ve içyapı analizleriyle derinliğe bağlı sertlik ölçümlerinde kullanılan 2 adet KI kodlu numunenin ısıtma işlemi Ermaksan Makina Sanayi ve Ticaret A.Ş. bünyesinde bulunan Protherm marka HLF 140 model ısıtma işlem fırınında gerçekleştirilmiştir. Tüm ısıtma işlem süreci kontrollü Ar atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Isıtma işlem prosesi detayları ise Şekil 3.18’de, ısıtma işlem fırını görüntüsü Şekil 3.19a’da, numunelerin ısıtma işlem öncesi fırın içinde alınan görüntüsü Şekil 3.19b’de görülmektedir. Isıtma işlemde numuneleri tutma sıcaklığı olarak, Ti6Al4V alaşımının β dönüşüm sıcaklığı olan 980 °C’nin bir miktar altında bir sıcaklık değeri olan 850 °C tercih edilmiştir.



Şekil 3.18. Gerçekleştirilen tavlama prosesinin detayları



Şekil 3.19. (a) Protherm marka HLF 140 model ısıtım fırını (b) numunelerin ısıtım işlem öncesi fırın içinde alınan görüntüsü

3.2.4. SP İşlemleri

Tablo 3.9’da kullanıldığı analize göre sınıflandırılmış numunelerin SP işlemleri Sigma Shot Peening Sistemleri firması bünyesinde bulunan ve Şekil 3.20’de görülmekte olan Sigma marka SGM-1000P model SP makinesinde gerçekleştirilmiştir. Tüm SP işlemleri numunelerin talaş kaldırma işlemlerinin tamamlanması sonrasında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.20. Sigma marka SGM-1000P model SP makinesi

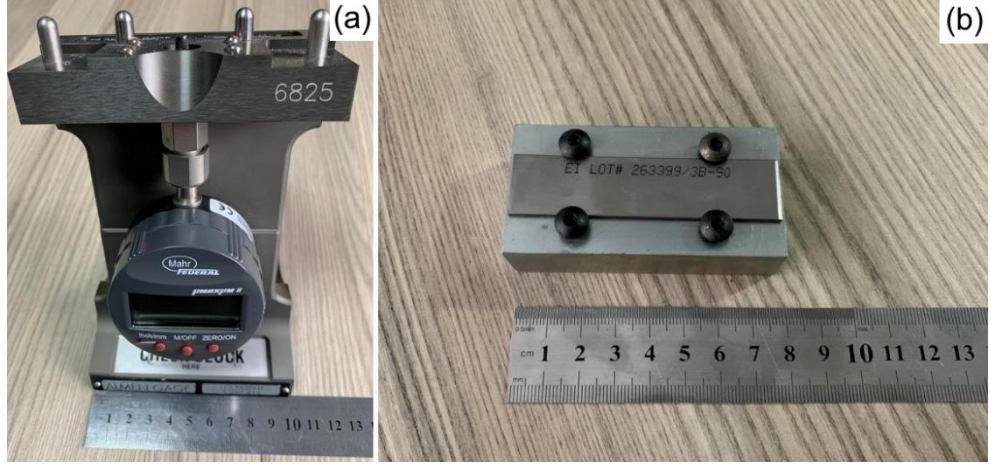
Tablo 3.9. SP işlemleri gerçekleştirilen numunelerin tür ve adetleri

SP İşlemi	Üç Nokta Eğme Numunesi Kodu ve (Adedi)	Kalıntı Gerilme Analizi Numunesi Kodu ve (Adedi)	İçyapı ve Sertlik Analizi Numune Kodu ve (Adedi)	Yorulma Numunesi Kodu ve (Adedi)
SP1	ES1 (3)	KS1 (1)	KS1 (1)	
SP1+SP2	ES2 (3)	KS2 (1)	KS2 (1)	YS2 (6)

SP işlemleri geleneksel (SP1) ve çoklu dövme (SP1+SP2) olmak üzere iki türde gerçekleştirilmiş olup SP işlemleri öncesinde ISO 26910-1:2009 standardına [144] uygun olarak SP1 ve SP2 işlemleri için ayrı ayrı doygunluk süresi tespitleri yapılmıştır. Bu sürenin tespitinde A tipi almen plakaları kullanılmış olup yapılan denemeler sonucunda Tablo 3.10'da belirtilen basınç ve nozul mesafelerinde SP1 işleminde 0,3 mm A almen şiddeti için doygunluk süresi 139 saniye olarak bulunurken aynı almen şiddeti için bu süre SP2 işleminde 122 saniye olarak tespit edilmiştir. SP işlemlerinde kullanılan nozul çapı 8 mm olup dövme açısı ise 85° olarak belirlenmiştir. Doygunluk süresi tespitinde kullanılan Electronics Marka TSP-M model almen ölçüm cihazı Şekil 3.21a'da almen tutucu ve 76x19x1,27 ölçülerindeki SAE 1070 çeliğinden A tipi almen plakası ise Şekil 3.21b'de görülebilmektedir.

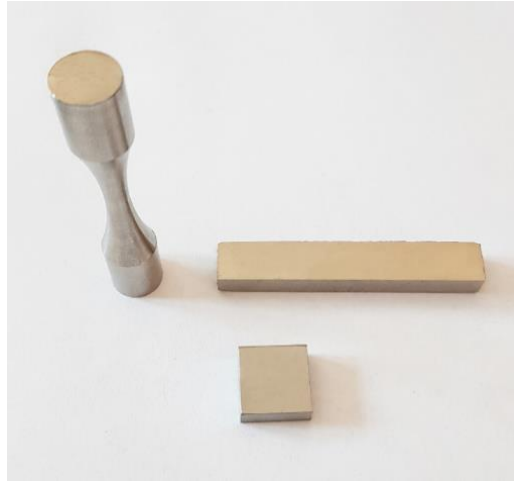
Tablo 3.10. SP1 ve SP2 işlemleri için doygunluk süresi tespiti

SP Türü	Doygunluk Süresi (s)	Basınç (bar)	Nozul Mesafesi
SP1: 0,6 mm çaplı 52-55 HRC sertlikte çelik bilya ile 0,30 mm A almen şiddetinde dövme	139	4,7-4,8	6-6,25"
SP2: 0,43 mm çaplı 52-55 HRC sertlikte çelik bilya ile 0,30 mm A almen şiddetinde dövme	122	4,1-4,2	5-5,25"



Şekil 3.21. (a) Electronics Marka TSP-M model almen ölçüm cihazı (b) almen tutucu ve A tipi almen plakası

0,3 mm A almen şiddetine ulaşılabilmesi için uygulanması gereken minimum SP süreleri olan doygunluk sürelerinin tespitinin ardından, belirlenen basınç ve nozul mesafelerinde tüm numunelerin SP1 işlemi için %100 kaplama süresi tespiti yapılmış ve bu sürelerde tüm numuneler SP1 işlemine tabi tutulmuştur. Tüm numunelerin SP1 işleminin tamamlanması sonrası SP2 % 100 kaplama süresi tespiti için her numune türünden SP'ye tabi tutulmamış birer adet numune SP2 işlemine tabi tutulmuş ve SP2 işlemi için % 100 kaplama süresi tespiti yapılmıştır. SP2 % 100 kaplama süresi tespitinde kullanılan numuneler Şekil 3.22'de görülebilmektedir.



Şekil 3.22. SP2 % 100 kaplama süresi tespitinde kullanılan numuneler

SP2 % 100 kaplama süresinin tespiti sonrasında ES2, KS2 ve YS2 kodlu numuneler SP2 işlemine tabi tutulmuştur. Tüm numunelerin SP işlem parametreleri Tablo 3.11'de, SP işlemleri tamamlanmış birer adet ES1 ve ES2 kodlu numune Şekil

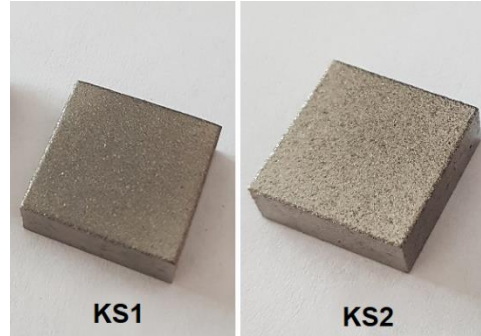
3.23’de, KS1 ve KS2 kodlu numune Şekil 3.24’de, bir adet YS2 kodlu numune ise Şekil 3.25’de görülebilmektedir.

Tablo 3.11. SP1 ve SP2 proses parametreleri

SP Türü ve Uygulanan Numuneler	% 100 Kaplama Süresi (s)	Basınç (bar)	Nozul Mesafesi
SP1 (ES1, KS1, YS2, ES2, KS2)	170	4,7-4,8	6-6,25"
SP2 (ES2, KS2, YS2)	145	4,1-4,2	5-5,25"



Şekil 3.23. SP işlemleri tamamlanmış ES1 ve ES2 kodlu numune görüntüleri



Şekil 3.24. SP işlemleri tamamlanmış KS1 ve KS2 kodlu numune görüntüleri



Şekil 3.25. SP işlemleri tamamlanmış YS2 kodlu numune görüntüsü

3.2.5. Bağıl Yoğunluk Ölçümleri

Yoğunluk ölçümü için üretilen A, B, C, D, E, F, G kodlu numuneler ile parametre çalışmasında kullanılan Ap, Bp, Cp, Dp kodlu numunelerin yoğunluk ölçümleri Ermaksan Makina Sanayi ve Ticaret A.Ş. bünyesinde bulunan ve hacimsel ölçüm doğruluğu $\pm 0,03$ % olan Micromeritics marka AccuPyc II 1340 model gaz piknometresinde gerçekleştirilmiştir. Cihazda ölçüm gazı olarak helyum gazı kullanılmıştır. Cihaz görüntüsü Şekil 3.26’da görülebilmektedir. Her numune kodunda ikişer adet numunede yoğunluk ölçümleri alınmış ardından sonuçların ortalamaları alınmıştır. Elde edilen yoğunluk verileri de aşağıda yer alan denklem 3.1’de kullanılarak her numune kodu için bağıl yoğunluk hesaplanmıştır. Tam yoğun Ti6Al4V Grade 5 malzeme için yoğunluk $4,43 \text{ g/cm}^3$ olarak alınmıştır.

$$\text{Bağıl yoğunluk (\%)} = \left(\frac{\text{Ölçülen yoğunluk}}{4,43} \right) * 100 \quad (3.1)$$



Şekil 3.26. Micromeritics marka AccuPyc II 1340 model gaz piknometresi

3.2.6. Çekme Analizleri

Parametre çalışmasında kullanılan Ap, Bp, Cp, Dp kodlu üçer adet çekme numunesinin testleri Manisa Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan Shimadzu marka AG-IS 100 kN model çekme cihazında, oda sıcaklığında 0,5 mm/dk. çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Cihaz görüntüsü Şekil 3.27’de görülmektedir. Her üç numuneden alınan verilerin ortalamaları alınarak her numune grubu için ortalama çekme dayanımı ve % uzama verileri elde edilmiştir.



Şekil 3.27. Shimadzu marka AG-IS 100 kN model çekme cihazı

3.2.7. Vickers Mikrosertlik Ölçümleri

Parametre çalışmasında kullanılan Ap, Bp, Cp, Dp kodlu 15x15x5 ölçüsündeki talaş kaldırılmış numunelerle ikincil işlem çalışmalarında derinliğe bağlı sertlik ölçümlerinde kullanılan K kodlu yalnızca talaş kaldırılmış, KS1 kodlu talaş kaldırma sonrası SP1 işlemi uygulanmış, KS2 kodlu talaş kaldırma sonrası SP1 + SP2 işlemi uygulanmış ve KI kodlu tavlama sonrası talaş kaldırılmış 15x15x5 boyutlarındaki numunelerin Vickers mikrosertlik ölçümleri Manisa Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan Future Tech marka FM-700 model

Vickers mikrosertlik ölçüm cihazında; 500 gf yük altında ve 20 saniyelik yük uygulanma süresinde gerçekleştirilmiştir. Cihaz görüntüsü Şekil 3.28’de görülmektedir.



Şekil 3.28. Future Tech marka FM-700 model Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı

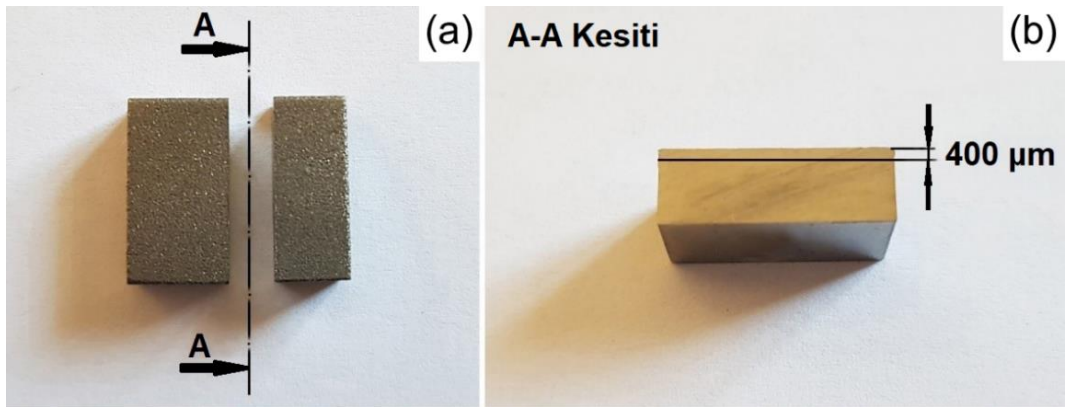
Ap, Bp, Cp, Dp numunelerinde her bir numune kodunda 5 adet üst yüzeyden ve 5 adet de alt yüzeyden olmak üzere toplam 10 adet ölçüm alınmış ardından bu ölçümlerin ortalamaları alınarak her numune kodu için ortalama Vickers mikro sertlik verisine ulaşılmıştır.

Derinliğe bağlı mikro sertlik ölçümü gerçekleştirilen K, KS1, KS2, KI kodlu numunelerde ölçümlerin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle her numune kodundan birer adet numune Manisa Celal Bayar Üniversitesi Malzeme ve Metalurji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan ve Şekil 3.29’da görülmekte olan Metkon marka Miracut 152 model hassas kesme cihazı kullanılarak kesilmiştir. Kesme işlemi ardından her bir numune Şekil 3.30a’da görüldüğü gibi ikiye parçaya ayrılmıştır. İlk ölçümler numunelerin yüzeylerinden alınmak üzere 50 µm’lik

adımlarla 400 μm derinliğe kadar Şekil 3.30b’de görülen yüzeyde her derinlik seviyesinde 3’er ölçüm alınmış ardından bu ölçümlerin ortalamaları alınmıştır. SP işlemi gerçekleştirilen KS1 ve KS2 numunelerinde ölçümler bilyalı dövülmüş yüzeyin altından başlayarak gerçekleştirilmiştir.



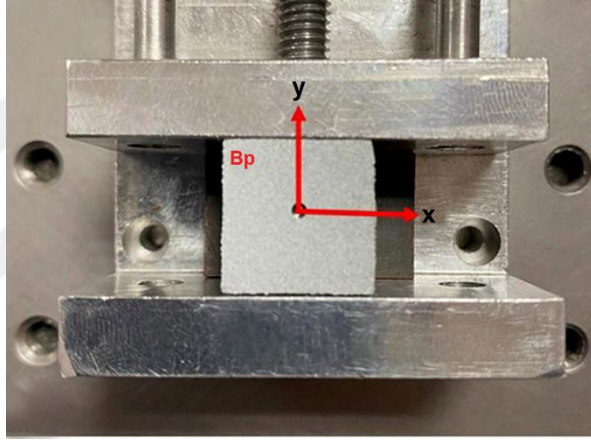
Şekil 3.29. Metkon Marka Miracut 152 Model Hasas Kesme Cihazı



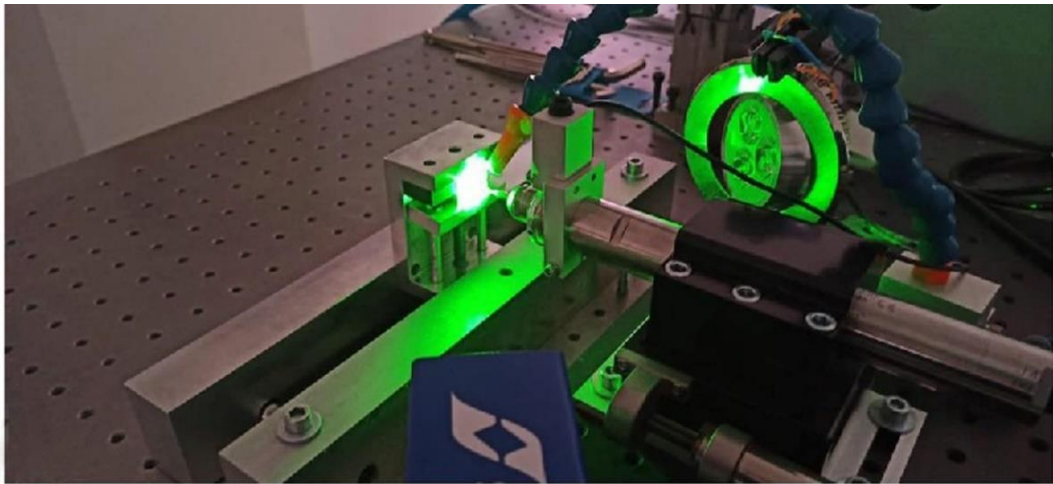
Şekil 3.30. (a) Vickers mikro sertlik ölçümleri için kesilmiş KS1 numunesi görüntüsü (b) ölçümlerin alındığı yüzey görüntüsü

3.2.8. Kalıntı Gerilme Analizleri

Parametre çalışmasında kullanılan Ap, Bp, Cp, Dp kodlu numunelerin kalıntı gerilme analizleri Simultura Malzeme Teknolojileri firması bünyesindeki Stresstech Prism ESPI cihazı kullanılarak ESPI/Hole Drilling metoduyla gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde her bir numune kodu için 15x15x5 boyutlarında birer adet numune kullanılmıştır. Numunelerde delik delme işlemi 50.000 rpm hızda gerçekleştirilmiş olup delikler 1,6 mm çapında ve numunelerin merkezinde açılmıştır. Ölçümler 50 μ m derinlikten başlamak üzere 0,35 mm derinliğe kadar 50 μ m'lik adımlarla gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.31'de ölçüm eksenlerinin de gösterildiği ölçüme hazır durumdaki Bp numunesi görüntüsü görülmekteyken Şekil 3.32'de ise ölçümler için hazırlanan Prism ESPI/Hole Drilling deney düzeneği görülmektedir.

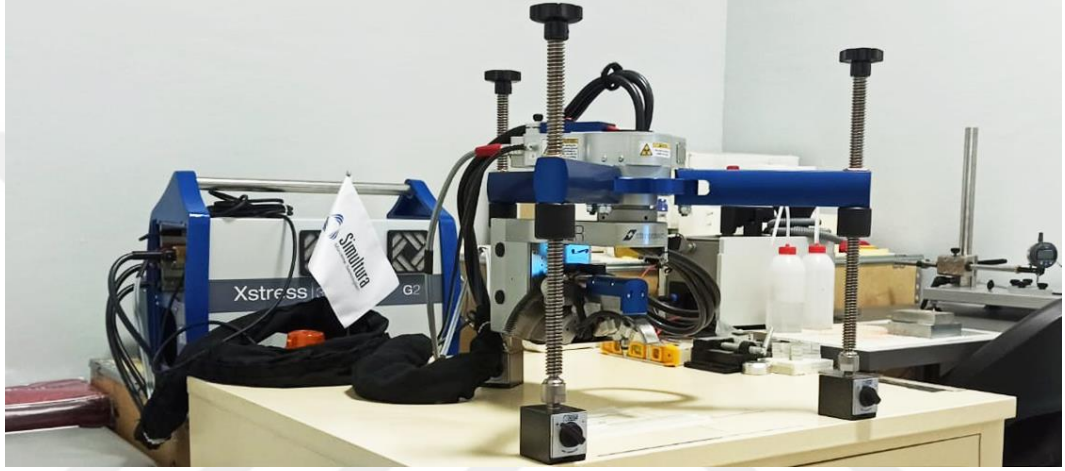


Şekil 3.31. Ölçüm eksenlerinin de gösterildiği kalıntı gerilme ölçümüne hazır durumdaki Bp numunesi görüntüsü



Şekil 3.32. Kalıntı gerilme ölçümler için hazırlanan Prism ESPI/Hole Drilling deney düzeneği

İkincil işlem çalışmasında kullanılan K, KS1 ve KS2 kodlu numunelerin kalıntı gerilme analizleri Simultura Malzeme Teknolojileri firması bünyesindeki Stresstech marka G2R XStress 3000 model XRD kalıntı gerilme ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihaz görüntüsü Şekil 3.33’de görülebilmektedir. Talaşlı Kaldırma İşlemleri başlığı altında yer alan Şekil 3.17’de gösterildiği gibi ölçümlerde bir yüzeyi işlenmemiş diğer beş yüzeyi ise işlenmiş durumdaki 15x15x5 ebatlarında birer adet numune kullanılmıştır. Ölçümler 0, 50, 100, 150, 250 ve 400 μm derinliklerde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.33. Stresstech marka G2R XStress 3000 model XRD kalıntı gerilme ölçüm cihazı

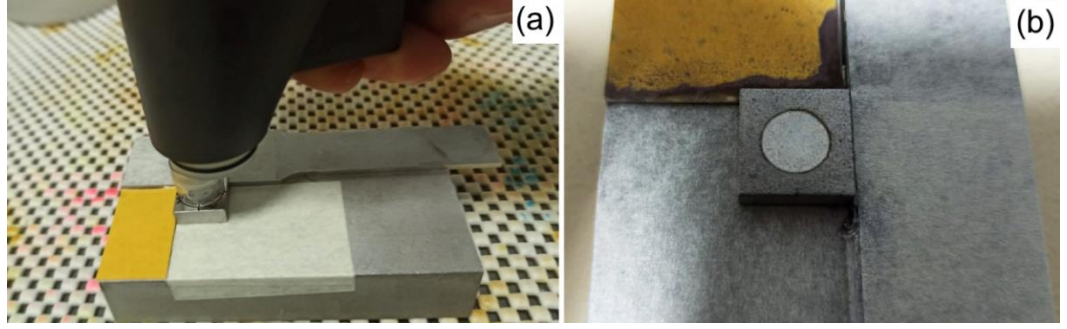
XRD ölçümleri için katman kaldırma işlemi Struers MovipOL 5 elektro-parlatma sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiş olup katman kaldırma parametreleri Tablo 3.12’de görülebilmektedir.

Tablo 3.12. Elektro-parlatma ile katman kaldırma parametreleri

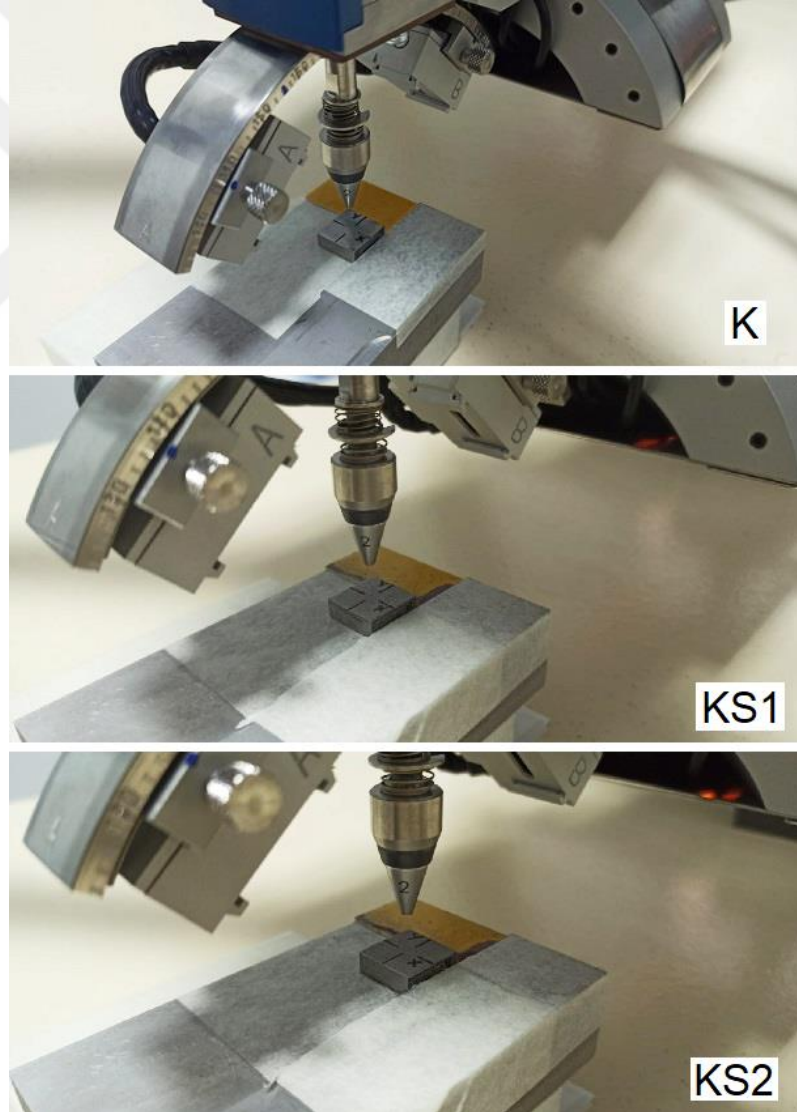
Elektrolit	Gerilim (V)	Akım (A)	Zaman (s)
A2	45	1,2	20

Elektro-parlatma işlemiyle her adımda 50 μm derinliğinde katman kaldırılmıştır. Şekil 34a’da KS1 numunesinde katman kaldırma işlemi sırasında alınan bir görüntü, Şekil 34b’de ise 50 μm kaldırma sonrası alınan görüntü görülebilmektedir. Katman kaldırma sonrası derinlik miktarları Mitutoyo Absolute marka derinlik ölçüm komparatörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. K, KS1 ve KS2 numunelerinde

yüzeyden kalıntı gerilme ölçümleri alınması esnasında alınan görüntüler ise Şekil 3.35’de görülebilmektedir.



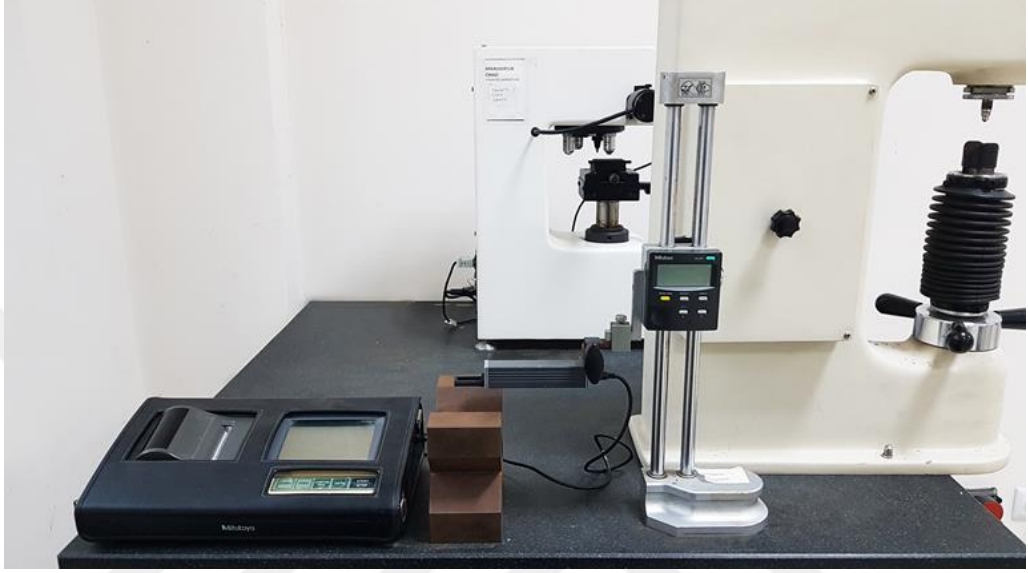
Şekil 3.34. (a) KS1 numunesinde katman kaldırma işlemi sırasında alınan görüntü (b) KS1 numunesinde 50 µm derinliğinde katman kaldırma sonrası alınan görüntü



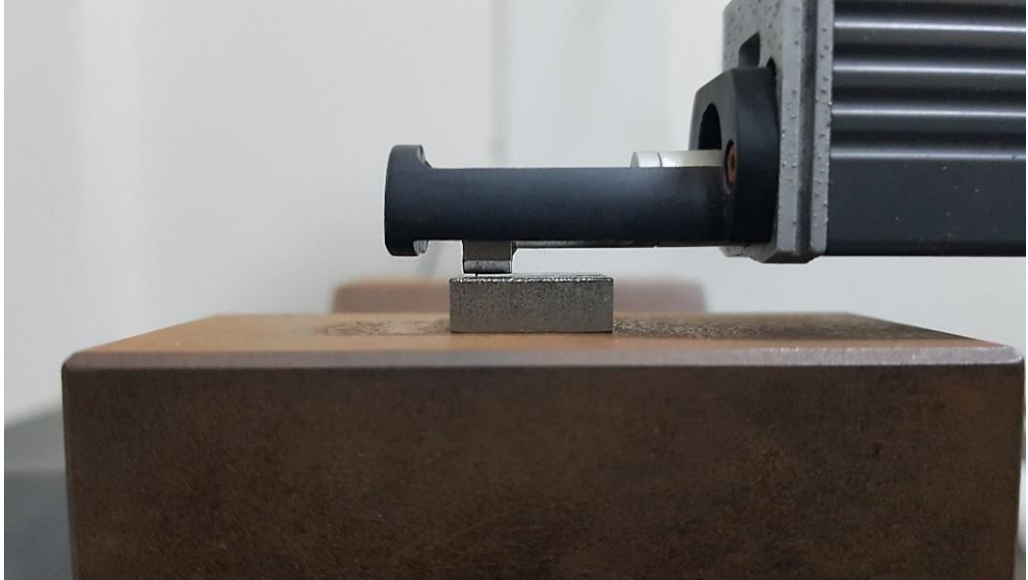
Şekil 3.35. K, KS1 ve KS2 numunelerinde yüzeyden kalıntı gerilme ölçümü alınması esnasında alınan görüntüler

3.2.9. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçümleri MCBÜ Makine Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarında bulunan Mitutoyo marka SJ 301 model yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde kullanılan cihaz Şekil 3.36’da, ölçümler esnasında alınan bir görüntü ise Şekil 3.37’de görülebilmektedir.



Şekil 3.36. Mitutoyo marka SJ 301 model yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı



Şekil 3.37. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri esnasında alınan bir görüntü

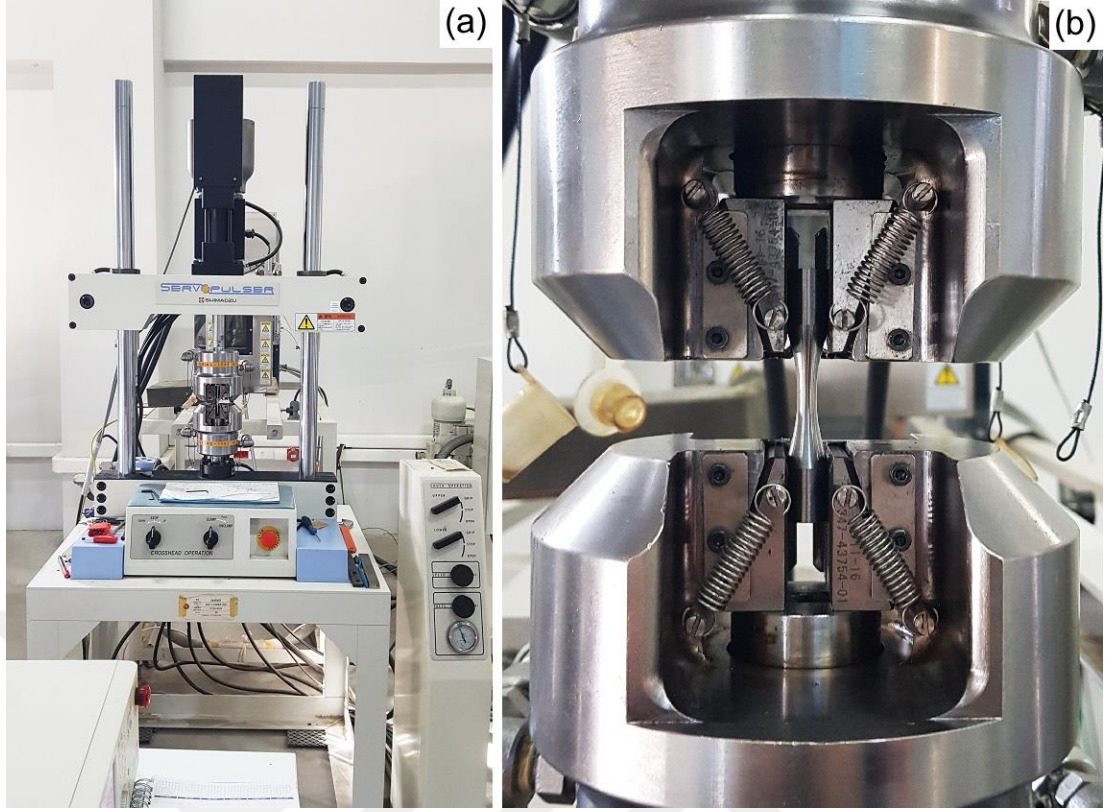
Ölçümler üç farklı grupta yer alan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bunlardan birinci grupta yüzeyi işlenmemiş K-işlemsiz numunesi, yüzeyinde

frezeleme yapılmış K kodlu numune, frezeleme sonrası SP1 uygulanmış KS1 kodlu numune, frezeleme sonrası SP1+SP2 uygulanmış KS2 kodlu numune ve tavlama sonrası frezeleme uygulanmış KI kodlu numune yer almaktadır. Birinci gruptaki tüm numuneler 15x15x5 ölçüsündedir. İkinci grupta işlem görmemiş Y-işlemsiz yorulma numunesi, yüzeyinde tornalama yapılmış Y kodlu yorulma numunesi, ısıtıl işlem sonrası yüzeyinde tornalama yapılmış YI kodlu yorulma numunesi ve tornalama sonrası SP1+SP2 işlemi uygulanmış YS2 kodlu yorulma numunesi yer almaktadır. Son grupta ise E-işlemsiz eğilme numunesi, yüzeyi frezelenmiş E kodlu eğilme numunesi, yüzeyinde frezeleme sonrası SP1 işlemi gerçekleştirilmiş ES1 numunesi, yüzeyinde frezeleme sonrası SP1+SP2 işlemi gerçekleştirilmiş ES2 numunesi ve tavlama sonrası yüzeyi frezelenmiş EI numunesi yer almaktadır. Ölçümlerde numunelerin kendi grupları içerisinde rastgele farklı numuneler kullanılarak toplamda 10'ar adet ölçüm alınmış ardından R_a ve R_z değerlerinin ortalamaları alınarak ortalama yüzey pürüzlülüğü verileri elde edilmiştir.

3.2.10. Yorulma Analizleri

Yorulma analizleri Y, YS2, YI olmak üzere üç numune grubunda 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. Cihaz görüntüsü Şekil 3.38a'da, cihaz çeneleri arasındaki teste hazır durumdaki Y kodlu yorulma numunesi görüntüsü ise Şekil 3.38b'de görülebilmektedir.

Yorulma analizleri; oda sıcaklığında, eksenel yük altında, sabit genlikte, $R = 0,1$ gerilme oranında ve 30 Hz frekansta ASTM E466-15 standardına [145] uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Yorulma sınırı için limit çevrim 10^7 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.38. (a) SHIMADZU marka EHF-LV020K2-020 model yorulma cihazı (b) cihaz çeneleri arasında teste hazır durumdaki Y kodlu yorulma numunesi görüntüsü

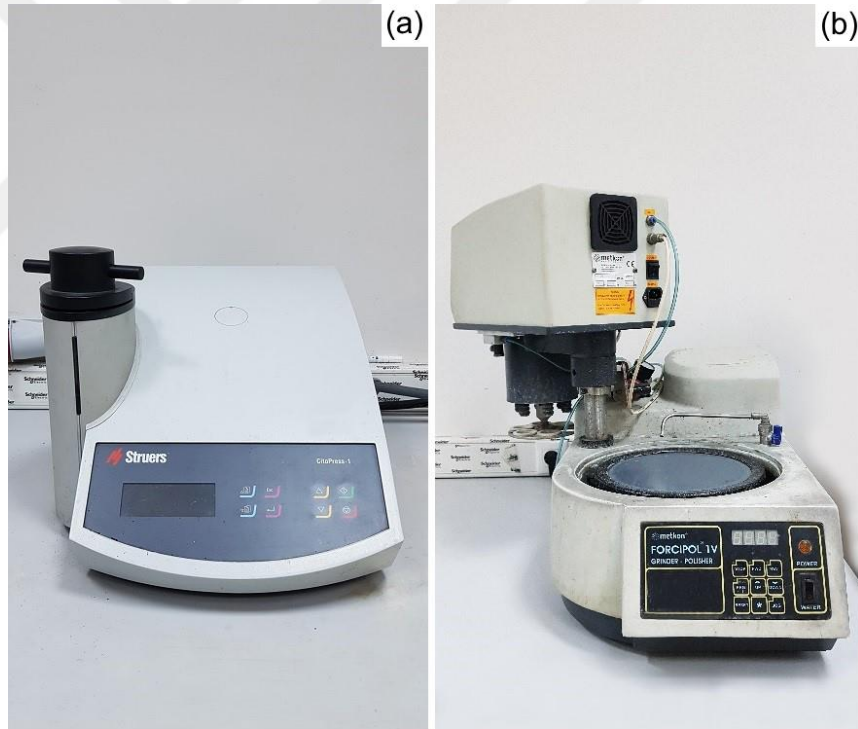
3.2.11. Optik Mikroskop, Stereo Mikroskop ve SEM Analizleri

Parametre çalışmasında kullanılan Ap, Bp, Cp ve Dp kodlu numunelerin, ikincil işlem çalışmasında kullanılan K, KS1 ve KI kodlu numunelerin optik mikroskop içyapı analizleri Şekil 3.17a'da görülebilmekte olan xy düzleminde, MCBÜ Makine Mühendisliği Bölümü Metalografi Laboratuvarında bulunan Nikon marka Eclipse LV150N model optik mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin boyutları 15x15x5 şeklindedir. Numunelerin yüzeyindeki TiO₂ tabakasının kaldırılması ve daha düzgün bir yüzey elde edilebilmesi amacıyla bakalite alma aşaması sonrasında numuneler zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. Zımparalama işleminde sırasıyla 600, 800, 1000 ve 1200 ölçülerindeki SiC kağıt zımparalar kullanılmıştır. Zımparalama ardından numuneler sırasıyla 3 µm ve 1 µm elmas partikülleri içeren parlatma solüsyonları kullanılarak parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Parlatmanın da gerçekleştirilmesi sonrasında numuneler dağlama işlemine tabi tutulmuş olup dağlamada Kroll çözeltisi kullanılmıştır. Kullanılan çözeltide bulunan kimyasallar hacimsel oranlarıyla birlikte Tablo 3.13'de görülebilmektedir. Dağlama işlemi 10-50 saniye aralığında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.13. Dağlanmada kullanılan çözeltide bulunan kimyasalların hacimsel oranı

Kimyasal	Hacim
Hidrojen Florür (HF)	10 ml
Nitrik Asit (HNO ₃)	5 ml
Saf Su	85 ml

Tüm bu işlemler için MCBÜ Makine Mühendisliği Bölümü Metalografi laboratuvarında bulunan cihazlar kullanılmıştır. Bakalite alma işleminde kullanılan Struers marka bakalit cihazı Şekil 3.39a’da, zımparalama ve parlatma işlemlerinde kullanılan Metkon marka Forcipol 1V model zımparalama ve parlatma cihazı Şekil 3.39b’de görülebilmektedir.



Şekil 3.39. (a) Struers marka bakalit cihazı (b) Metkon marka Forcipol 1V model zımparalama ve parlatma cihazı

Parametre çalışmasında kullanılan Ap, Bp, Cp ve Dp kodlu çekme numunelerinin kırılma yüzeyleri ile ikincil işlem çalışmasında kullanılan Y, YS2 ve YI kodlu yorulma numunelerinin kırılma yüzey görüntülerinin incelenmesinde MCBÜ Makine Mühendisliği Bölümü Metalografi laboratuvarında bulunan Nikon marka

SMZ 745T model stereo mikroskop kullanılmıştır. Kullanılan optik mikroskop görüntüsü Şekil 3.40a'da, stereo mikroskop görüntüsü ise Şekil 3.40b'de görülebilmektedir.



Şekil 3.40. (a) Nikon Marka Eclipse LV150N Model Optik Mikroskop (b) Nikon Marka SMZ 745T Model Stereo Mikroskop

Numune üretimlerinde kullanılan Ti6Al4V Grade 5 tozun boyut ve şekilleri Ermaksan Makina Sanayi ve Ticaret A.Ş. bünyesinde bulunan Nova Nano SEM cihazı kullanılarak incelenmiştir. Ap, Bp, Cp, Dp kodlu çekme numunelerinin kırılma yüzeylerinin detaylı incelemesi, ikincil işlem çalışmalarında kullanılan K, KS1, KS2 ve KI kodlu numunelerin detaylı içyapı analizleri ve dört farklı yorulma numunesinin kırılma yüzeylerinin detaylı incelemeleri İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı bünyesinde bulunan Zeiss marka Sigma 300 VP model SEM cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. K, KS1, KS2 ve KI kodlu numunelerin SEM içyapı incelemeleri öncesi numune hazırlıkları, optik mikroskop incelemeleri öncesinde olduğu gibi gerçekleştirilmiş olup içyapı incelemeleri Şekil 3.17a'da görülebilmekte olan xy düzleminde gerçekleştirilmiştir. SEM analizlerinde kullanılan İzmir Katip Çelebi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı bünyesinde bulunan Zeiss marka Sigma 300 VP model SEM cihazı görüntüsü Şekil 3.41'de görülebilmektedir.



Şekil 3.41. Zeiss marka Sigma 300 VP model SEM cihazı

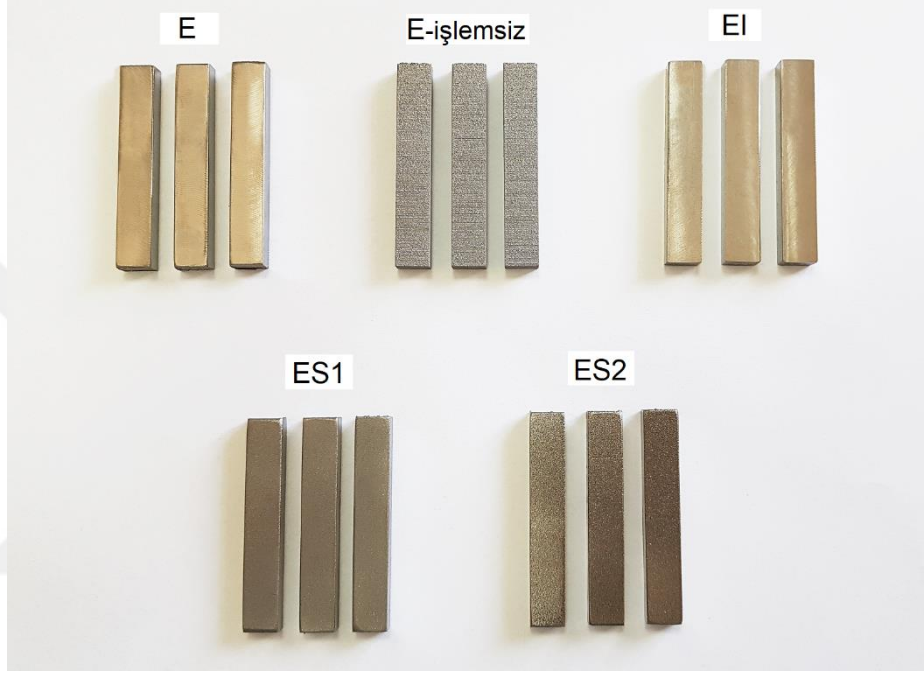
3.2.12. Üç Nokta Eğme Analizleri

Üç nokta eğme analizlerine tabi tutulmak üzere beş farklı grupta (E-işlemsiz, E: Yüzeyinden talaş kaldırılmış, EI: Tavlama sonrası yüzeyinden talaş kaldırılmış, ES1: Yüzeyinden talaş kaldırma sonrası SP1 uygulanmış, ES2: Yüzeyinden talaş kaldırma sonrası SP1+SP2 uygulanmış) hazırlanan numunelerin görüntüleri Şekil 3.42’de görülebilmektedir. Testlerde kullanılan alt mesnetlerin yarıçapı 15 mm olup eğme işinde kullanılan mandrelin yarıçapı ise 5 mm’dir. ASTM E290-14 standardına [146] uygun olarak alt mesnetler arası mesafe 58 mm olarak belirlenmiştir. Deneyler MCBÜ Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Shimadzu marka AG-IS 100 kN model cihazda 0,5 mm/dk. hızda gerçekleştirilmiştir. Test, eğilme hasarı nedeniyle kuvvette azalma yaşanıncaya dek devam etmiştir. Teste hazır durumdaki bir adet numunenin görüntüsü Şekil 3.43’de görülebilmektedir. Şekil 3.41’de görüldüğü gibi her bir numune grubundan 3’er adet numune teste tabi tutulmuş ardından alınan verilerin ortalamaları alınarak her numune grubu için $\sigma_{e,maks}$ hesaplanmış ve σ_e - ϵ_e grafiği oluşturulmuştur. Üç nokta eğme numunelerin dikdörtgen kesitli olması nedeniyle $\sigma_{e,maks}$ hesabında denklem 3.2’den, ϵ_e hesabında ise denklem 3.3’den yararlanılmıştır.

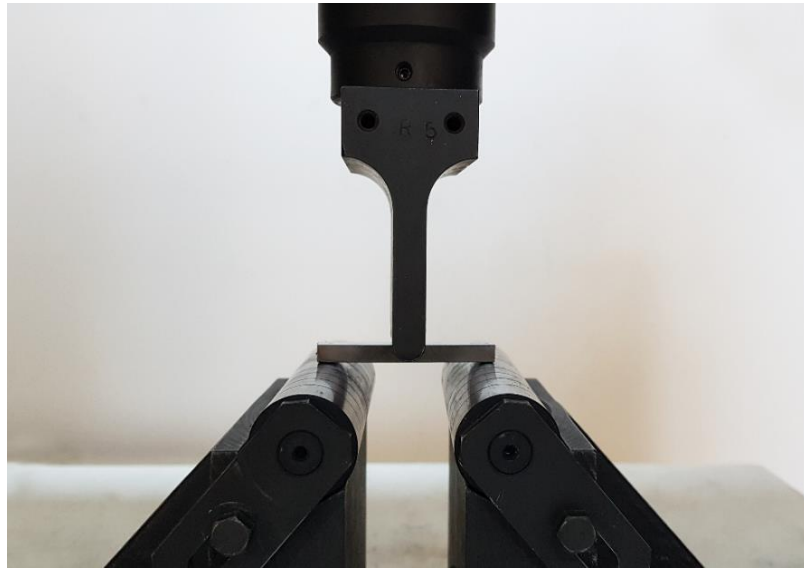
$$\sigma_{e,maks} = 3F_{maks}L/2wh^2 \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_e = 6Dh/L^2 \quad (3.3)$$

Burada; F_{maks} : test sırasında ölçülen maksimum kuvvet (N), L : mesnet merkezleri arası uzaklık (mm), w : numune genişliği (mm), h : numune kalınlığı (mm), D : eğilme miktarı (mm)'dir.



Şekil 3.42. Üç nokta eğme analizlerinde kullanılmak üzere 5 farklı grupta hazırlanmış numuneler



Şekil 3.43. Üç nokta eğme analizine hazır durumdaki bir adet numunenin görüntüsü

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Parametre Çalışması Bulguları ve Tartışma

Sabit enerji yoğunluğunda (SEY) azalan lazer gücü ve tarama hızı kombinasyonunun; numunelerin mekanik, içyapı, kalıntı gerilme ve bağıl yoğunluk özellikleri üzerindeki etkilerinin incelendiği çalışmanın sonuçları bu başlık altında aktarılacaktır.

4.1.1. Bağıl Yoğunluk Ölçümleri

Makine üreticisi firmanın önerebileceği parametre seti veya setleri olmaması nedeniyle SEY’de azalan lazer gücü ve tarama hızı kombinasyonunun malzeme özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi çalışmasının bir ön adımı olarak 35,1 J/mm³’ten 138,9 J/mm³’e uzanan aralıkta 7 farklı enerji yoğunluğu değeri ve farklı proses parametrelerinde üretimler yapılarak en yüksek bağıl yoğunluğun elde edileceği proses parametreleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.1’de görülebilmektedir.

Tablo 4.1. Yoğunluk analiz numunelerinin bağıl yoğunluk sonuçları

Numune Kodu	Enerji Yoğunluğu (J/mm ³)	Bağıl Yoğunluk %
A	35,1	95,9
B	41,7	93,9
C	43,3	96,4
D	66,0	96,2
E	85,0	99,5
F	100,0	97,5
G	138,9	91,4

Gong ve ark. [147] gerçekleştirdikleri çalışmada, üretim yaptıkları makinede bu çalışmada yer alan B numunesiyle aynı proses parametrelerinde neredeyse tam yoğun numune elde ederlerken bu çalışmada bağıl yoğunluk % 93,9 seviyesinde kalmıştır. Hernandez [148] gerçekleştirdiği çalışmada, üretim yapılan makinede bu çalışmada yer alan G numunesiyle aynı proses parametrelerinde % 99’ün üzerinde

bağıl yoğunluğa sahip numune elde ederken bu çalışmada bağıl yoğunluk % 91,4 seviyesinde kalmıştır. Ancak bu çalışmada E numunesinde % 99,5 bağıl yoğunluğa sahip numune elde edilebilmiştir. Bu nedenle bundan sonraki aşama olan sabit enerji yoğunluğunda değişen lazer gücü ve tarama hızının malzeme özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmada, Cp numunesinin proses parametreleri E numunesinin proses parametreleri ile aynı seçilmiş; diğer üç numune olan Ap, Bp ve Dp numunelerinin proses parametreleri de sabit enerji yoğunluğunda Ap'den Dp'ye azalan güç ve tarama hızı kombinasyonlarında oluşturulmuştur. Ap, Bp, Cp ve Dp numunelerinin bağıl yoğunluk sonuçları Tablo 4.2'de görüldüğü gibidir.

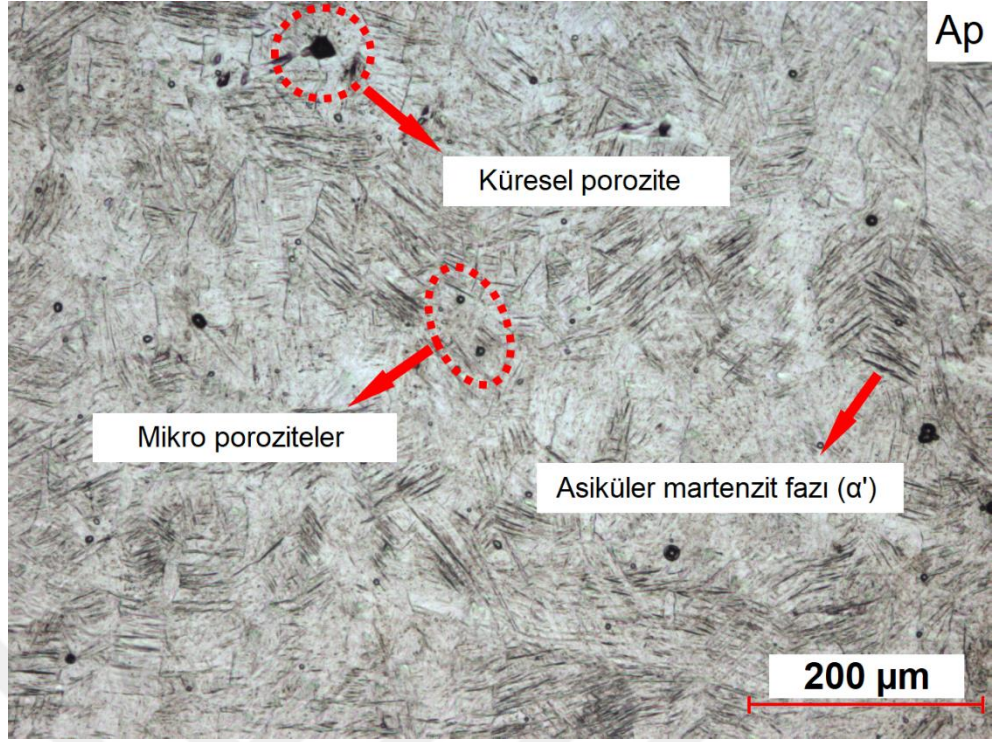
Tablo 4.2. Parametre çalışması numunelerinin bağıl yoğunluk sonuçları

Bağıl Yoğunluk (%)			
Ap	Bp	Cp	Dp
98,5	96,9	99,5	95,5

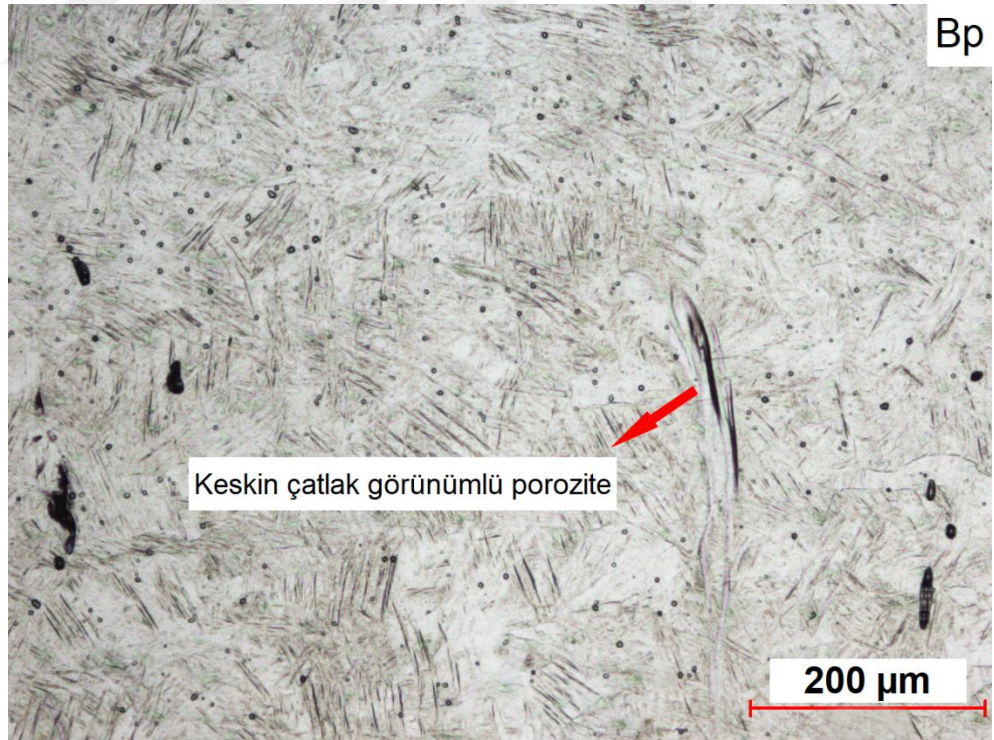
En yüksek bağıl yoğunluk verisi Cp numunesinde sonra Ap numunesinde elde edilmiş olup SEY'de lazer gücü ve tarama hızının azalması veya artmasının bağıl yoğunluğun azalması veya artması üzerinde doğrusal bir etki göstermediği görülmüştür. Ilie ve ark. [133] çalışmasında SEY'de, lazer gücü ve tarama hızı azaldıkça bağıl yoğunlukta da azalma kaydedilmiş olup bu çalışmada alınan sonuçlar bu yönüyle farklılık arz etmektedir.

4.1.2. İçyapı Analizleri

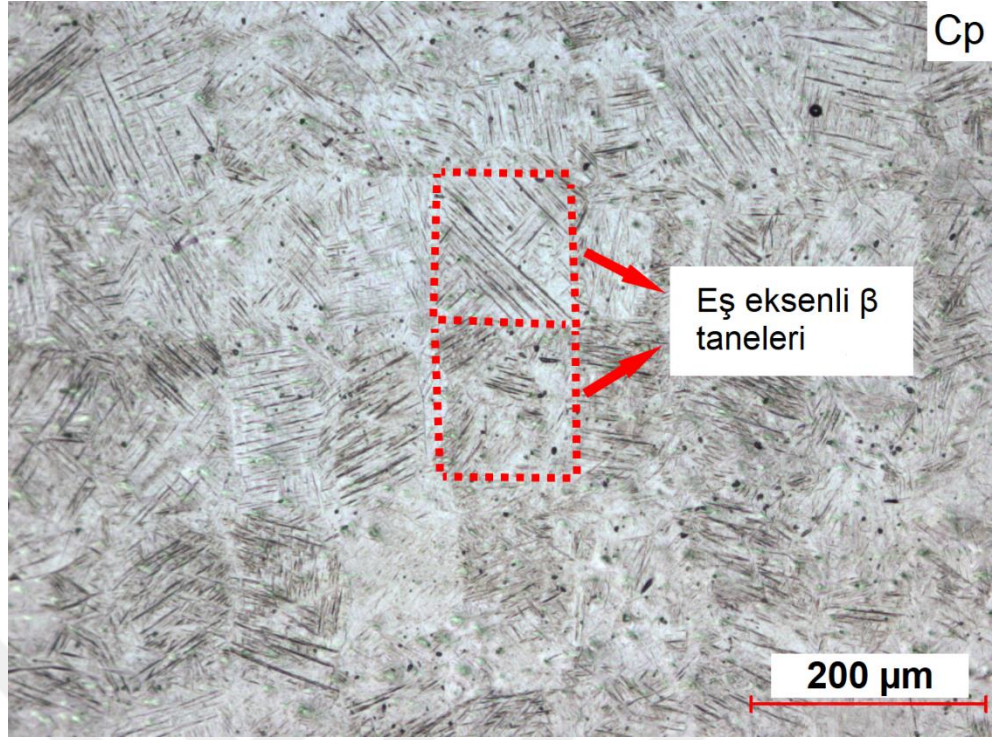
SLM prosesinde oluşan yüksek sıcaklık gradyanları (10^6 K/m), buna bağlı olarak 10^8 K/s'ye ulaşan yüksek soğuma hızları ve tekrarlanan ısınma-soğuma çevrimleri nedeniyle oluşan karakteristik içyapının β tanesi içinde yüzdece oldukça yüksek α' fazı olduğu bilinmektedir [10,43]. İçyapı görüntüleri incelendiğinde görülen fazlar bakımından 4 numuneden alınan içyapı görüntüsünün de literatürle uyumlu olduğu gözlenmiştir [127,149–152]. Şekil 4.1'de Ap numunesinin, Şekil 4.2'de Bp numunesinin, Şekil 4.3'de Cp numunesinin ve Şekil 4.4'de de Dp numunesinin içyapı görüntüsü örnekleri görülebilmektedir.



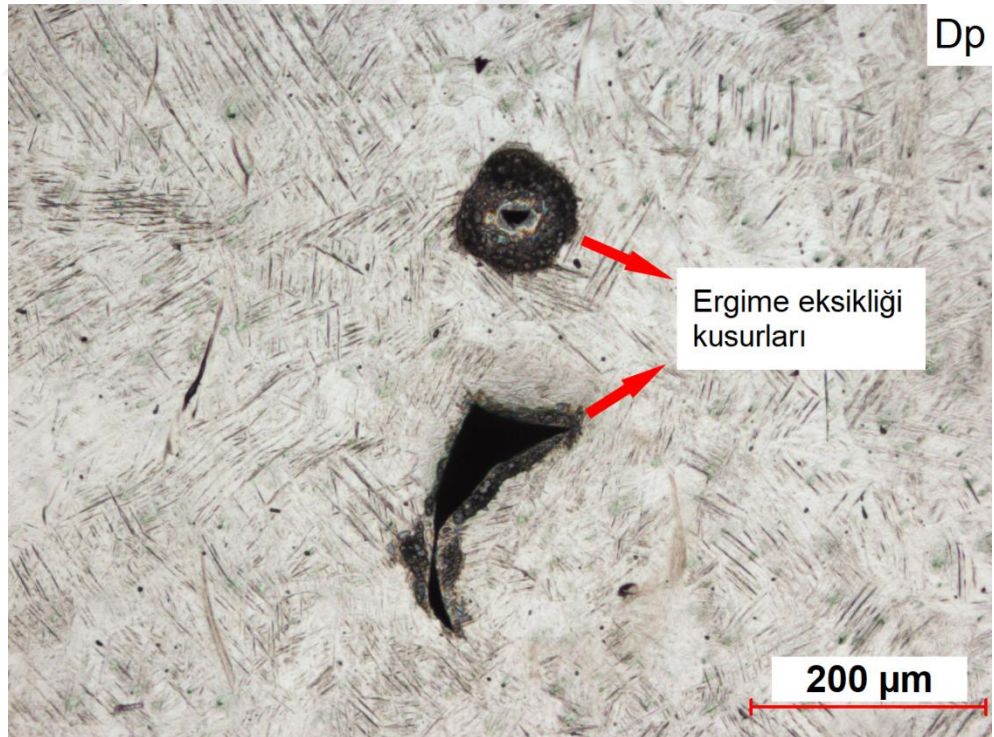
Şekil 4.1. Ap (140 W-549 mm/s) numunesinin x100 büyütme altında içyapı görüntüsü



Şekil 4.2. Bp (130 W-510 mm/s) numunesinin x100 büyütme altında içyapı görüntüsü



Şekil 4.3. Cp (125 W-490 mm/s) numunesinin x100 büyütme altında içyapı görüntüsü



Şekil 4.4. Dp (120 W-470,5 mm/s) numunesinin x100 büyütme altında içyapı görüntüsü

SLM prosesinde kötü seçilmiş proses parametrelerinin pek çok içyapı kusuruna neden olabildiği bilinmektedir [83, 153, 154]. SLM prosesi ile üretilen ürünlerde görülen başlıca içyapı kusurlarından birisi porozite olup içyapıda iki tür porozite gözlenebilmektedir. Bunlar küresel poroziteler ve keskin çatlak görünümlü porozitelerdir [155]. Küresel porozitelerin oluşumu: a) gaz atomizasyonu esnasında toz içinde kalan boşluk ve yüksek soğuma hızları nedeniyle çözünmüş gazın eriyik havuzunda hapsolması b) toz haznesinde toz partikülleri arasında kalan boşluklar c) yüksek enerji yoğunlukları neticesinde oluşan anahtar deliği etkisi ile ilişkilendirilmektedir. Keskin çatlak görünümlü porozitelerin oluşumu: a) lokal olarak yetersiz enerji girdisi b) topaklanma etkisi ile ilişkilendirilmektedir. Topaklanma oluşumu ise düşük enerji yoğunlukları ile ilişkilendirilmektedir. Ergime eksikliği kusuru oluşumu: a) toz haznesinde toz partikülleri arasında kalan boşluklar b) üretim parametrelerinde yaşanan sapmalar ile ilişkilendirilmektedir [150, 155, 156].

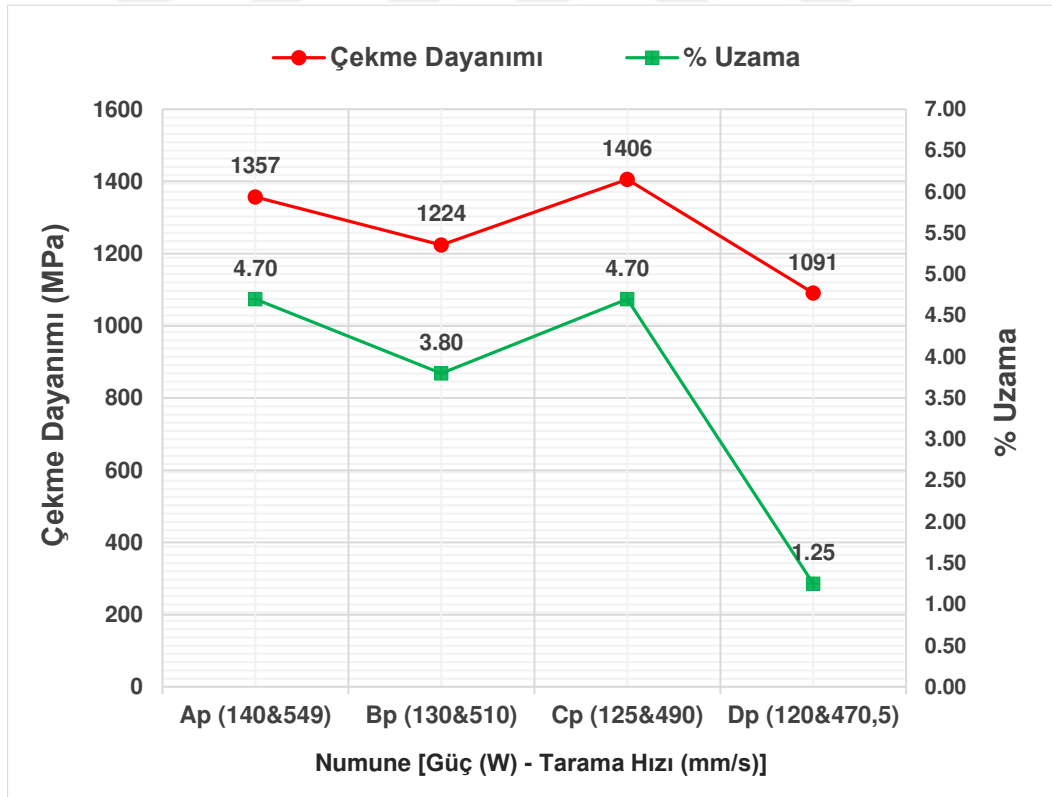
Tüm numunelerin içyapılarında mikro poroziteler, küresel poroziteler ve keskin çatlak görünümlü poroziteler gözlenmiştir. Ap ve Cp numunelerinin içeriğindeki mikro porozite miktarının birbirine oldukça yakın ve Bp ile Dp numunelerinde gözlenenden düşük seviyede olduğu görülmüştür. Cp numunesinin küresel poroziteler ve keskin çatlak görünümlü poroziteleri en düşük seviyede içerdiği gözlenmiştir. Ergime eksikliği kusuru ise yalnızca Dp numunesinde gözlenmiştir. Bu sonuçlar Cp numunesini içyapı kusurları bakımından en iyi durumdaki numune yapmaktadır. Dp numunesinde uygulanan lazer gücü, 120 W ile çalışmadaki en düşük seviyedeki lazer gücüdür. Dp numunesinde gözlenen ergime eksikliği kusurunun katman kalınlığında yaşanmış olabilecek pozitif yöndeki sapmaya, o katmanda uygulanan 120 W'lık lazer gücünün yetersiz gelmesinden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. 4 numunenin içyapısında da topaklanma kusuru gözlenmemiştir. İçyapı incelemeleri sonuçlarının bağıl yoğunluk sonuçları ile tam bir korelasyon içinde olduğu görülmüştür.

4.1.3. Çekme Analizleri

Literatürde SLM prosesi ile üretilen Ti6Al4V malzemelerde görülen porozitelerin malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkilerini inceleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Poroziteler mekanik testler sırasında gerilme başlangıç noktaları olarak zayıf bölgeleri oluşturmaktadırlar [15, 133, 157, 158]. Meng ve ark.

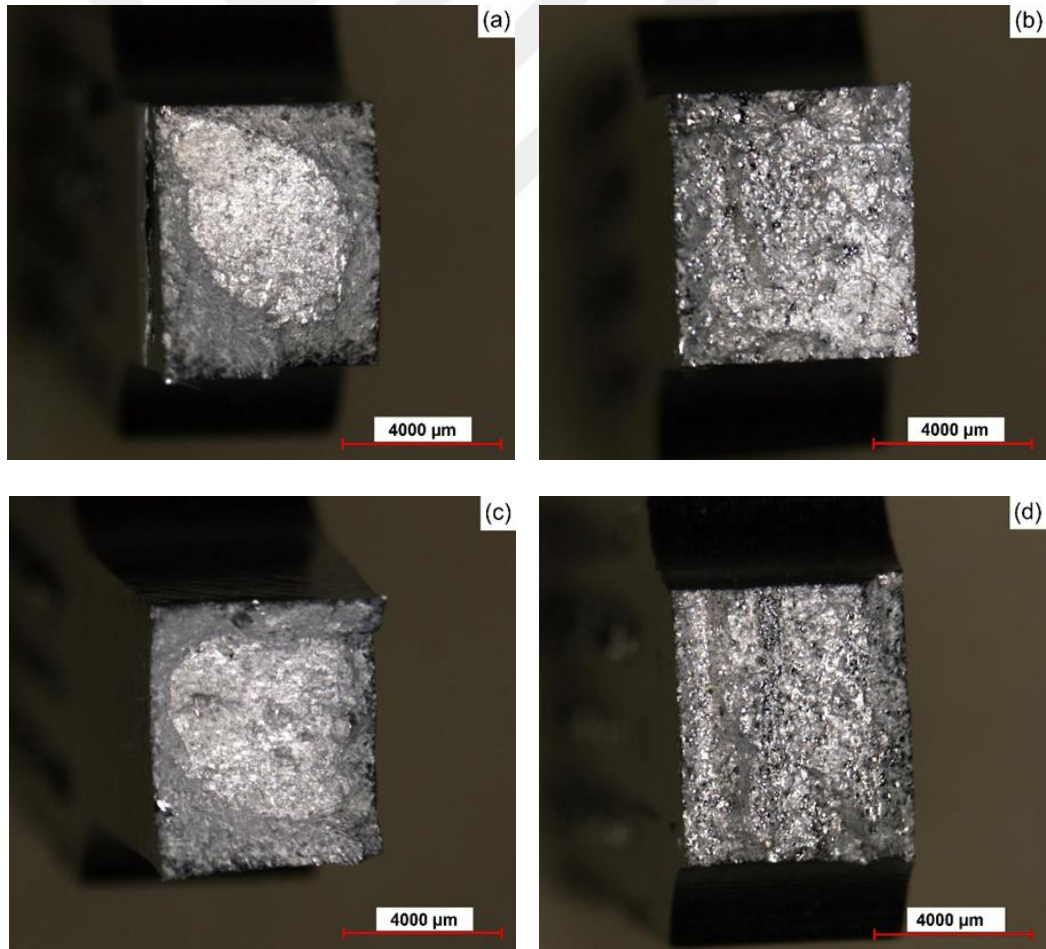
[157] gerçekleştirdikleri çalışmada, SLM prosesi ile üretilen ve 0,25% - 4% aralığında porozite içeren Ti6Al4V çekme numunelerinin çekme analizleri değişken dayanım değerleri ve düşük yüzde uzama verileri ile sonuçlanırken 0,25 % seviyesinden daha düşük porozite içeren numunelerin analizleri, belirgin şekilde daha yüksek dayanım değerleri ve değişken ancak daha yüksek yüzde uzama verileri ile sonuçlanmıştır.

Bu çalışmada elde edilen çekme analizi sonuçları Şekil 4.5’de görülebilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde içyapı analizi, bağıl yoğunluk analizi ve çekme analizi sonuçlarının birbirileri ile korelasyon içinde oldukları söylenebilmektedir. Numunelerin çekme dayanımlarının sırası yüksekten düşüğe doğru Cp, Ap, Bp ve Dp şeklindedir. Yüzde uzama sonuçlarına bakıldığında ise porozite oranlarının Ap ve Cp numunelerinin yüzde uzama verileri arasında bir fark yaratmadığı, daha sonra ise bağıl yoğunluk ve içyapı analizi sonuçlarıyla uyumlu olarak Bp ve ardından Dp numunesinin geldiği görülmüştür. Dp numunesinde görülen % 1,25 seviyesindeki oldukça düşük yüzde uzama değeri içeriğinde gözlenen ergime eksikliği kusurları ve porozite miktarı ile ilişkilendirilmektedir.

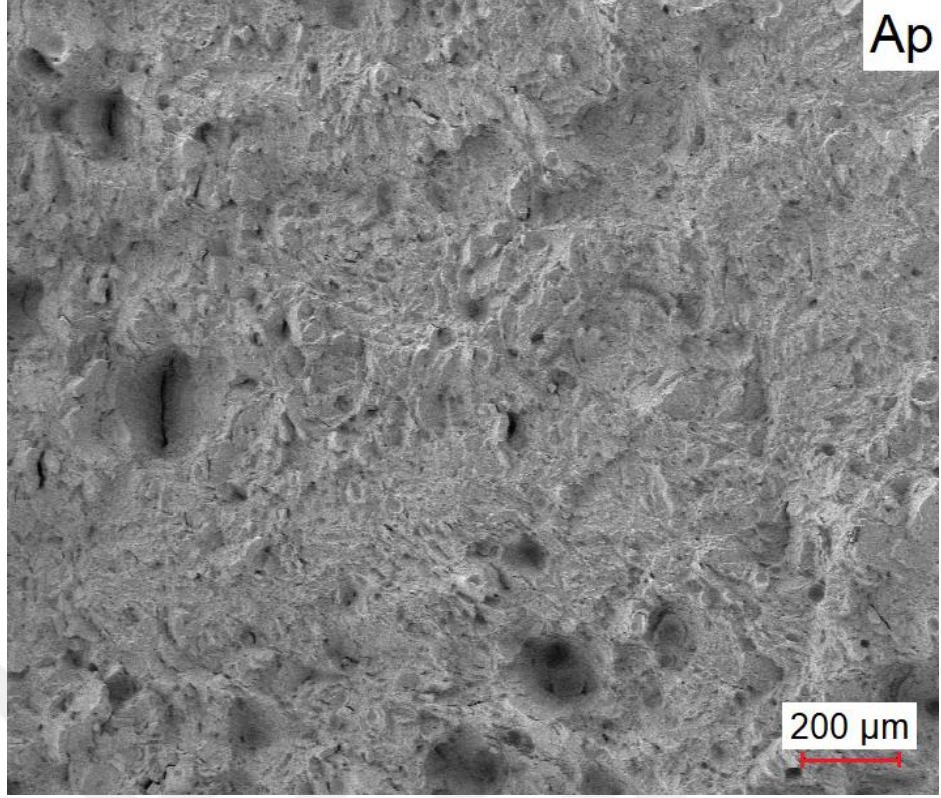


Şekil 4.5. Parametre numunelerinin çekme analizi sonuçları

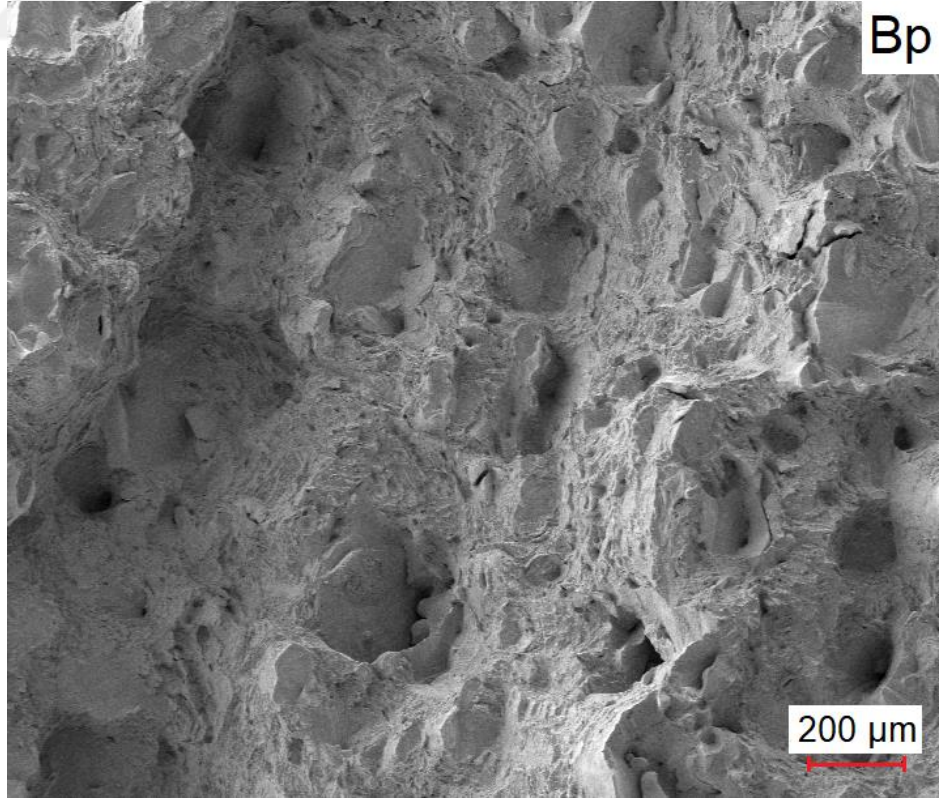
Her numune grubundan birer adet çekme numunesinin kırılma yüzeylerinin makro görüntüleri Şekil 4.6'da, Ap kodlu çekme numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü Şekil 4.7'de, Bp kodlu çekme numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü Şekil 4.8'de, Cp kodlu çekme numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü Şekil 4.9'da, Dp kodlu çekme numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü ise Şekil 4.10'da görülebilmektedir. Makro görüntüler ile SEM görüntüleri incelendiğinde ve Bp, Dp numunelerinin kırılma yüzeyleri Ap, Cp numunelerinin kırılma yüzeyleri ile kıyaslandığında Bp, Dp numunelerinin kırılma yüzeylerinde belirgin şekilde daha yüksek oranda porozite bulunduğu; SEM görüntüleri üzerinden Ap ve Cp numunelerinin kırılma yüzeyleri kıyaslandığında Ap numunesindeki porozite miktarının Cp numunesinden daha yüksek olduğu görülebilmektedir. Ayrıca Şekil 4.10'da Dp numunesinin kırılma yüzeyinde bulunan ergimemiş tozlar da belirgin şekilde görülebilmektedir.



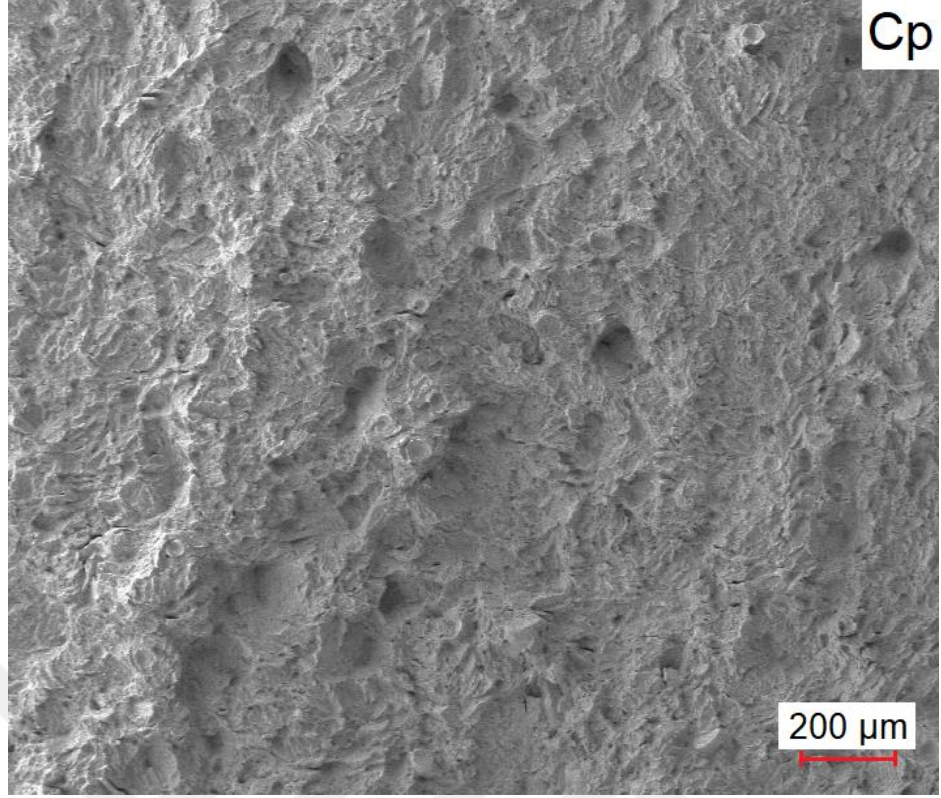
Şekil 4.6. Parametre çalışması çekme numunelerinin kırılma yüzeylerinin makro görüntüleri (a) Ap (140 W-549 mm/s) (b) Bp (130 W-510 mm/s) (c) Cp (125 W-490 mm/s) (d) Dp (120 W-470,5 mm/s)



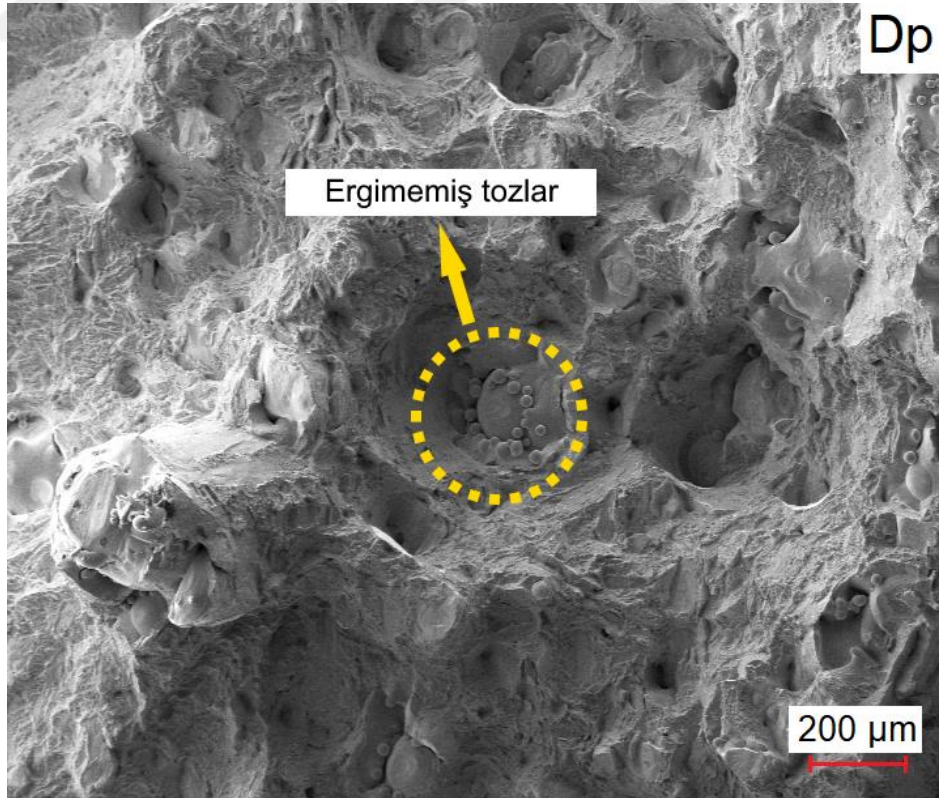
Şekil 4.7. Ap (140 W-549 mm/s) çekme numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü



Şekil 4.8. Bp (130 W-510 mm/s) çekme numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü



Şekil 4.9. Cp (125 W-490 mm/s) çekme numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü



Şekil 4.10. Dp (120 W-470,5 mm/s) çekme numunesinin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü

SLM prosesinde gerçekleşen yüksek termal gradyanlar ve buna bağlı gelişen yüksek soğuma hızları etkisi altında oluşan karakteristik α' fazını içeren Ti6Al4V malzemeler, içyapısında α' fazına kıyasla çok daha geniş yapılı α fazı barındıran dövme Ti6Al4V malzemeler ile karşılaştırıldığında genellikle çok daha yüksek dayanım değerleri ancak çok daha düşük yüzde uzama verileri sunmaktadırlar [159–161]. Dövme Ti6Al4V malzemelere ait ASTM standardı olan ASTM F 136 standardı gereklilikleri (çekme dayanımı min: 860 MPa - % uzama min: % 10) ile alınan sonuçlar karşılaştırıldığında numunelerde elde edilen çekme dayanımı değerlerinin standardın çok üzerinde, yüzde uzama verilerinin ise altında kalarak burada anlatılan durumla uyumlu şekilde sonuçlandığı söylenebilmektedir. Bu çalışmada Cp numunesinde elde edilen çekme analizi sonuçlarının, literatürde yer alan ve bu çalışmada olduğu gibi SLM prosesi sonrası talaş kaldırılmış şekilde teste tabi tutulan Ti6Al4V çekme numunelerinin analiz sonuçlarıyla karşılaştırması Tablo 4.3'de görülebilmektedir.

Tablo 4.3. Bu çalışmada alınan çekme analizi sonuçlarının literatürde yer alan benzer çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırması

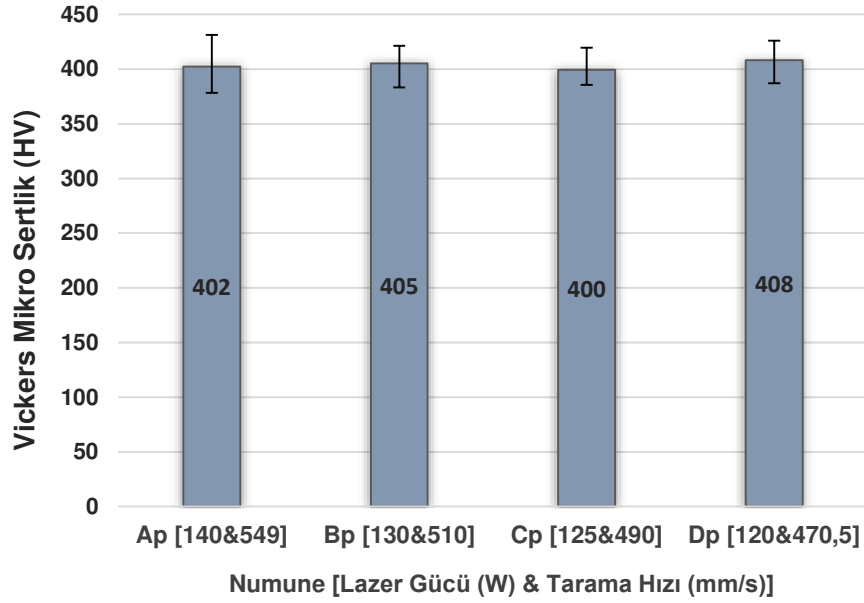
Çekme Dayanımı (MPa)	% Uzama	Çalışma
1406	4,7	Bu çalışma
1421	3,2	Wysocki ve ark.[162]
1268	4,2	Han ve ark. [159]
1267	7,28	Vrancken ve ark. [149]
1219	4,89	Rafi ve ark. [11]
1166	1,7	Vilaro ve ark. [163]

SEY'de Ilie ve ark. [133] tarafından gerçekleştirilen çalışmada; azalan lazer gücü ve tarama hızı, artan porozite ve buna bağlı olarak da azalan akma, çekme dayanımı ve yüzde uzama verileri ile sonuçlanmıştır. SEY'de Ali ve ark. [130] tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise azalan lazer gücü ve tarama hızı; numunelerin porozite içeriğinde belirgin bir değişiklik yaratmamış, numunelerin akma dayanımları arasında belirgin bir fark görülmemiş, yüzde uzama verilerinde ise artışla sonuçlanmıştır. Bu çalışmada, Ilie ve ark. [133] çalışmasında olduğu gibi numunelerde görülen porozite içeriğinin çekme analizi verileri üzerinde oldukça büyük etkiye sahip olduğu, porozite miktarı arttıkça çekme dayanımı ve yüzde uzama verilerinde azalma kaydedildiği gözlenmiştir. Ancak SEY'de lazer gücü ve tarama hızı artıp azalmasının

numunelerin çekme dayanımı ve yüzde uzama verilerinin değişimi üzerinde doğrusal bir etki göstermediği gözlenmiştir.

4.1.4. Mikro Sertlik Analizleri

Parametre numunelerinin Vickers mikro sertlik analizi sonuçları Şekil 4.11’de görülebilmektedir.



Şekil 4.11. Parametre numunelerinin Vickers mikro sertlik analizi sonuçları

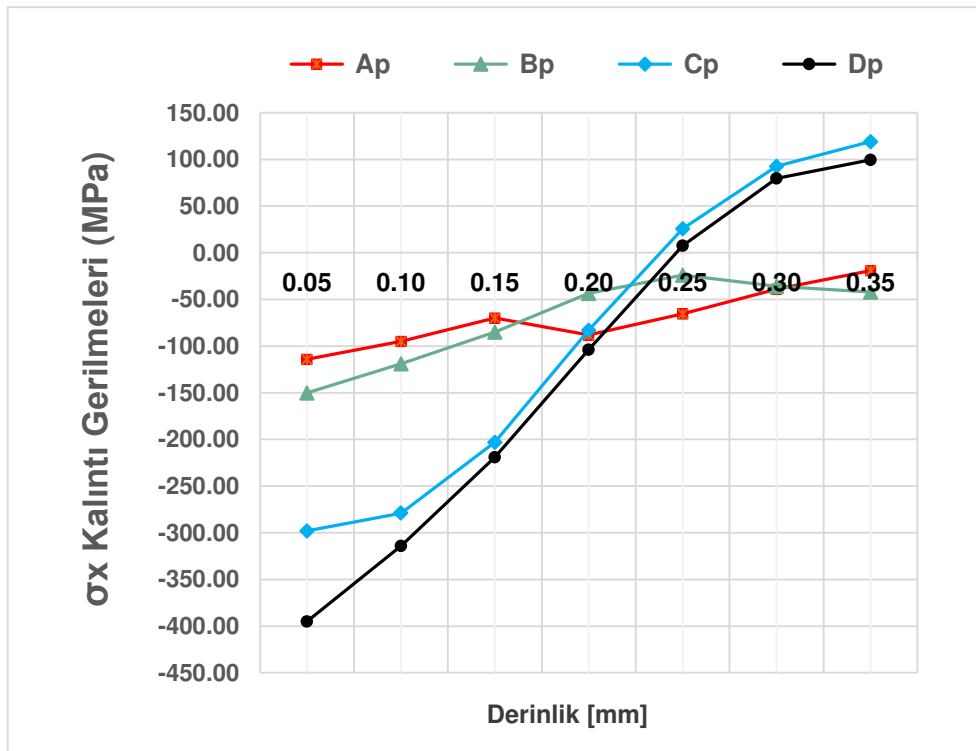
Numunelerin sahip olduğu Vickers mikro sertlik verileri arasında belirgin bir fark bulunmadığı gözlenmiş olup alınan sonuçlar bu yönüyle SEY’de Ali ve ark. [130] tarafından gerçekleştirilen çalışmanın sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte numunelerde elde edilen Vickers mikro sertlik seviyelerinin SLM prosesiyle Ti6Al4V alaşımının üretildiği pek çok geçmiş çalışmada elde edilenlerle benzerlik gösterdiği görülmüştür [131, 159, 160, 164, 165].

SLM prosesi sonucu oluşan β tanesi içerisindeki oldukça ince yapılı α' fazı α fazına kıyasla çok daha dar olduğu için dislokasyon hareketlerine α fazına kıyasla çok daha fazla engel teşkil etmekte, bu durum da içyapısında α fazı içeren döküm ya da dövme Ti6Al4V malzemelerle karşılaştırıldığında SLM ile üretilen ürünlerde daha yüksek dayanım ve sertlik verilerini beraberinde getirmektedir [159–161].

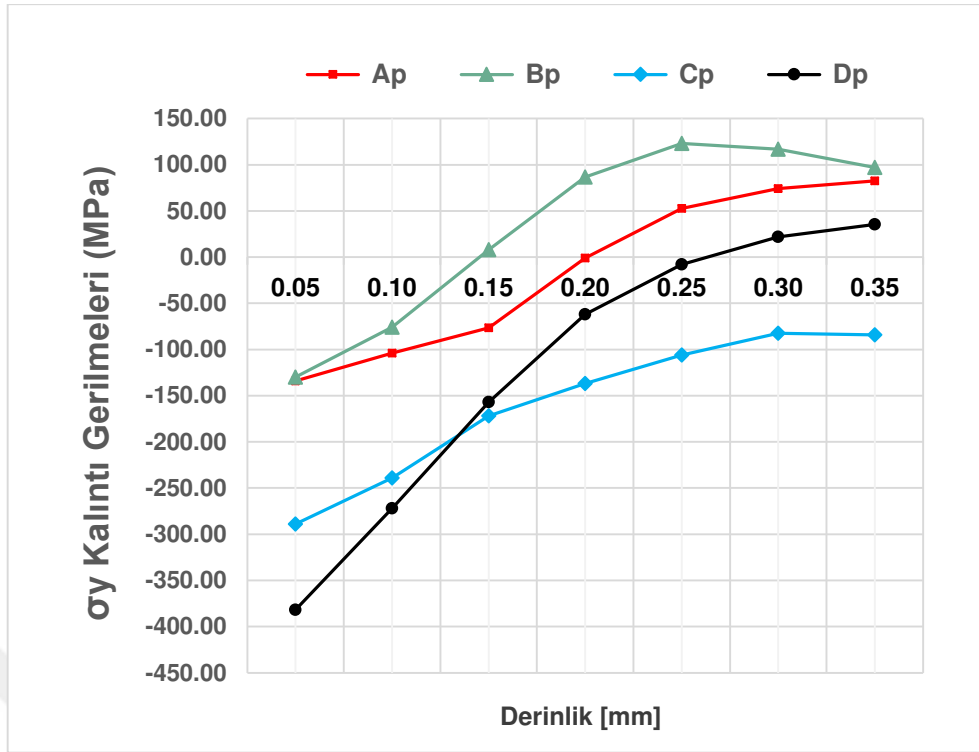
4.1.5. Kalıntı gerilme Analizleri

Mercelis ve Kruth [166] tarafından raporlanan soğuma faz modeli ve sıcaklık gradyan mekanizması (TGM) SLM prosesinde gelişen yüksek kalıntı gerilmelerin oluşum mekanizmasına açıklık getirmektedir. SLM prosesi tekrarlı ve hızlı gerçekleşen ısınma ve soğuma aşamalarına sahiptir. Isınma aşamasında yüksek sıcaklık etkisi altında malzemede genleşme eğilimi gerçekleşirken soğuma aşamasında ise büzülme eğilimi gerçekleşmektedir. Dar zamana aralıklarında gerçekleşen bu genleşme ve büzülme eğilimi malzemede yüksek kalıntı gerilmelere neden olmaktadır [166].

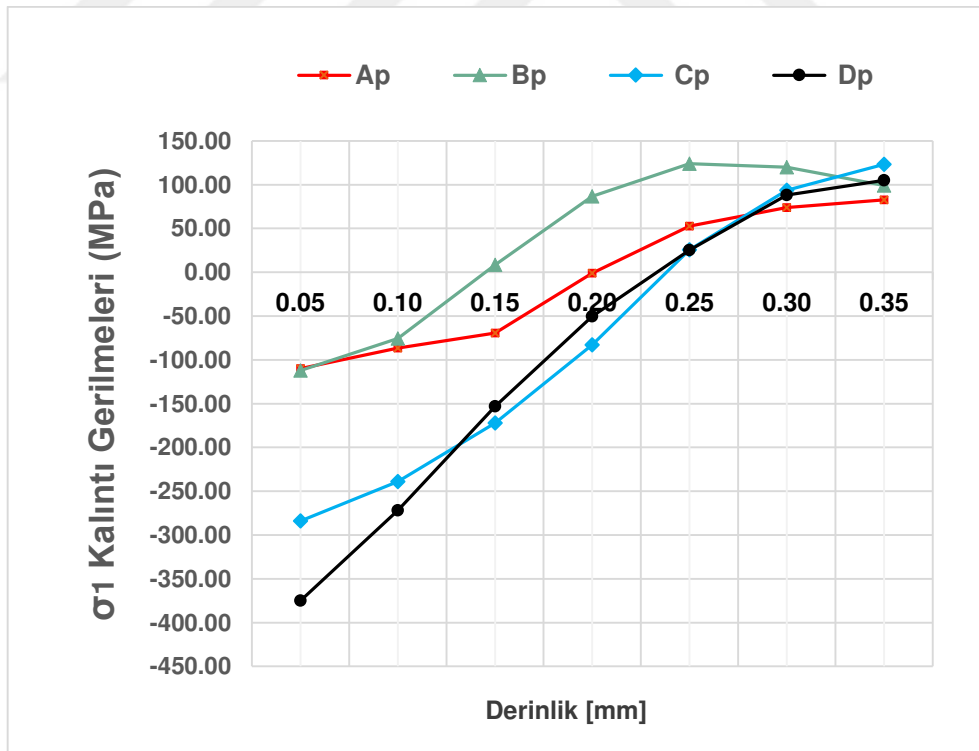
Yapılan kalıntı gerilme analizleri neticesinde parametre numunelerinde görülen σ_x gerilme değerleri Şekil 4.12’de, σ_y gerilme değerleri Şekil 4.13’de ve σ_1 asal gerilme değerleri ise Şekil 4.14’de görülebilmektedir. σ_x ve σ_y gerilmeleri paylaşılacakla birlikte; numunelerde σ_x , σ_y ve τ_{xy} gerilmeleri etkisi altında her derinlik seviyesinde ölçülen pozitif en yüksek veya negatif en düşük σ gerilmesini vermesi nedeniyle yorumlamalarda σ_1 asal gerilmeleri üzerinden değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.12. Parametre numunelerinin σ_x kalıntı gerilmeleri



Şekil 4.13. Parametre numunelerinin σ_y kalıntı gerilmeleri



Şekil 4.14. Parametre numunelerinin σ_1 kalıntı gerilmeleri

Literatürde SLM prosesi ile üretilen parçalarda yüzey ve yüzeye yakın derinliklerde kalıntı gerilmelerin çekme tipi olduğunu, malzeme merkezine

yaklaştıkça ise çekme tipi kalıntı gerilmelerinin basma tipi kalıntı gerilmelere dönüştüğünü gösteren çalışmalar bulunmaktadır [167, 168]. Ayrıca SLM prosesiyle üretilen parçalarda malzeme yüzeyine yakın derinliklerde ölçülen kalıntı gerilme tipinin çekme tipi olduğunu gösteren çok sayıda çalışma bulunmaktadır [130–132, 134, 169]. Bununla birlikte literatürde; gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemlerinin uygulandığı malzemenin türü ve talaş kaldırma parametrelerine göre seviyeleri değişken olmakla birlikte, uygulandığı yüzeyde ve yüzeye yakın derinliklerde basma tipi kalıntı gerilme oluşumunda etkili olduğunu gösteren çalışmalar da mevcuttur [170–175].

Şekil 4.14 incelendiğinde 0,10 mm'ye kadarki derinlik aralığında tüm numunelerde kalıntı gerilme türünün basma tipi olduğu görülebilmektedir. Bu durum üzerinde etkili olan faktörün gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemi olduğu düşünülmektedir. 0,25 - 0,35 mm derinlik aralığında ise tüm numunelerde kalıntı gerilme tipi çekme tipidir. Bu durum ise gerçekleştirilen talaş kaldırma işleminin kalıntı gerilme oluşturma bakımından, bu derinlik aralığında etkisini yitirmesiyle ilişkilidir. Tüm numuneler aynı makinede aynı anda işlenmiş ve aynı parametrelerle aynı makinede talaş kaldırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle kalıntı gerilme eğrilerinde gözlenen farklılıkların sebebi yalnızca proses parametreleridir.

Yorulma çatlaklarının başlaması ve ilerlemesi bakımından yüzey ve yüzeye yakın derinliklerdeki kalıntı gerilme seviyeleri önem arz etmektedir. Yorulma çatlakları genellikle yüzey veya yüzeye yakın derinliklerde başlamakta ve çekme tipi kalıntı gerilmeler, çatlak başlaması ve ilerlemesi bakımından olumsuz rol oynarken başka tipi kalıntı gerilmeler ise çatlaka başlaması ve ilerlemesini geciktirici etki göstermektedirler [176, 177]. Bu bilgi ışığında değerlendirilirse Cp ve Dp numunelerinin kalıntı gerilme eğrileri Ap ve Bp numunelerinin eğrileri ile karşılaştırıldığında, 0,20 mm'ye kadarki derinlik aralığında sahip oldukları basma tipi kalıntı gerilmeler bakımından Ap ve Bp numunelerine kıyasla üstün durumda oldukları söylenebilmektedir.

SEY'de azalan güç ve tarama hızının kalıntı gerilme üzerindeki etkilerini araştıran diğer iki çalışmadan biri olan Ali ve ark. [130] çalışmasında, çalışılan parametrelerde SEY'de lazer gücü ve tarama hızında yaşanan azalmanın soğuma hızında düşüşe yol açtığı, soğuma hızında gerçekleşen düşüşün de lazer gücü ve tarama

hızı düştükçe kalıntı gerilme seviyesinde düşüşe yol açtığı raporlanmıştır. Bu alanda gerçekleştirilen ikinci çalışma olan Xiao ve ark. [134] gerçekleştirdiği çalışmada ise SEY’de lazer gücü ve tarama hızında yaşanan azalmanın kalıntı gelirmenin artması veya azalması açısından herhangi bir doğrusal etki göstermediği raporlanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları irdelendiğinde SEY’de lazer gücü ve tarama hızında yaşanan azalma Cp ve Dp numuneleri ile Ap ve Bp numuneleri karşılaştırıldığında kalıntı gerilmede azalan yönde bir etki gösteriyor gibi görünse de tüm eğriler ayrı ayrı değerlendirildiğinde lazer gücü ve tarama hızında yaşanan azalmanın, kalıntı gerilmelerin azalıp artması açısından doğrusal bir etki göstermediği söylenebilmektedir. Alınan sonuçlar Xiao ve ark. [134] çalışmasında alınan sonuçlarla benzerlik göstermiştir.

4.2. İkincil İşlem Çalışması Bulguları ve Tartışma

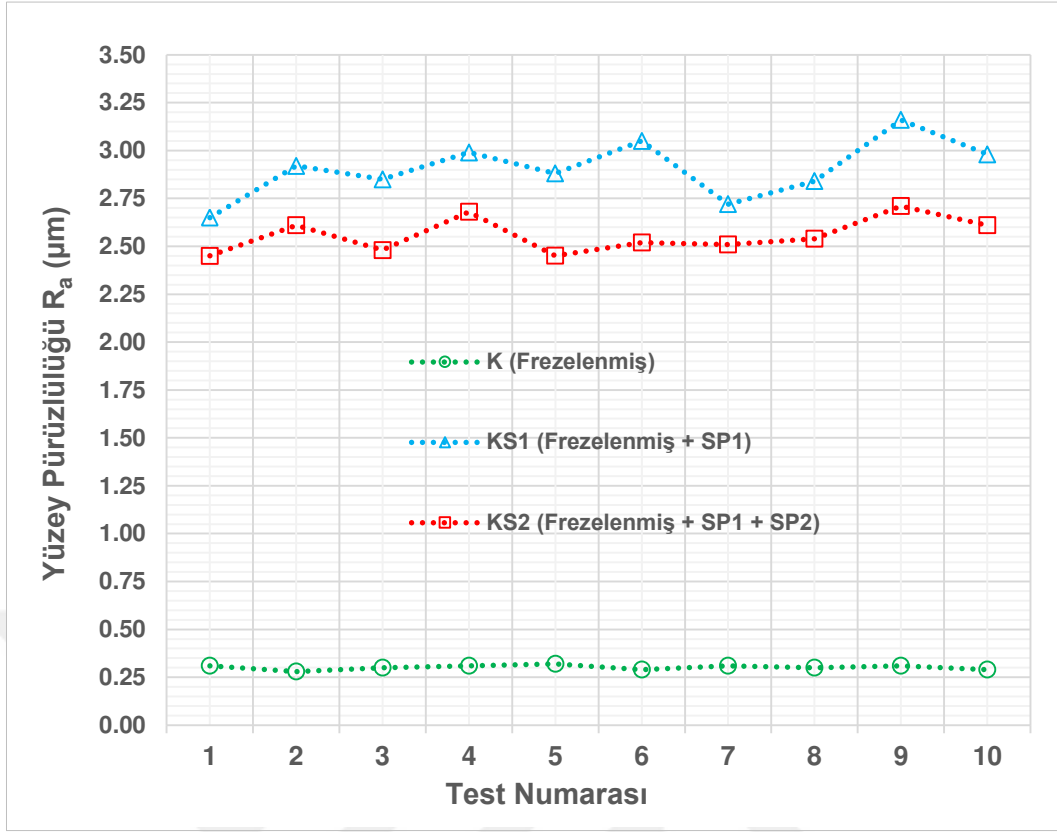
Aynı proses parametrelerinde üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilen farklı kombinasyonlardaki talaş kaldırma, tavlama, SP (geleneksel ve çoklu) ikincil işlemlerinin numunelerin yüzey pürüzlülüğü, içyapı, mikro sertlik, kalıntı gerilme, yorulma ve eğilme özellikleri üzerindeki etkileri bu başlık altında incelenecektir.

4.2.1. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Birinci grupta yer alan 15x15x5 ölçüsüne sahip K kodlu numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları Tablo 4.4’de; K, KS1 ve KS2 kodlu numunelerin ölçüm sonuçlarının grafikte gösterimi ise Şekil 4.15’de görülebilmektedir.

Tablo 4.4. K kodlu numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları

Numune Kodu	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü - R_a (μm)	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü - R_z (μm)
K-işlemsiz	17,63 $\pm$ 1,72	111,10 $\pm$ 15,80
K (Frezelenmiş)	0,30 $\pm$ 0,02	1,69 $\pm$ 0,07
KI (Tavlanmış + frezelenmiş)	0,31 $\pm$ 0,03	1,71 $\pm$ 0,04
KS1(Frezlenmiş + SP1)	2,90 $\pm$ 0,26	16,90 $\pm$ 4,00
KS2 (Frezlenmiş + SP1 + SP2)	2,56 $\pm$ 0,15	14,35 $\pm$ 2,47

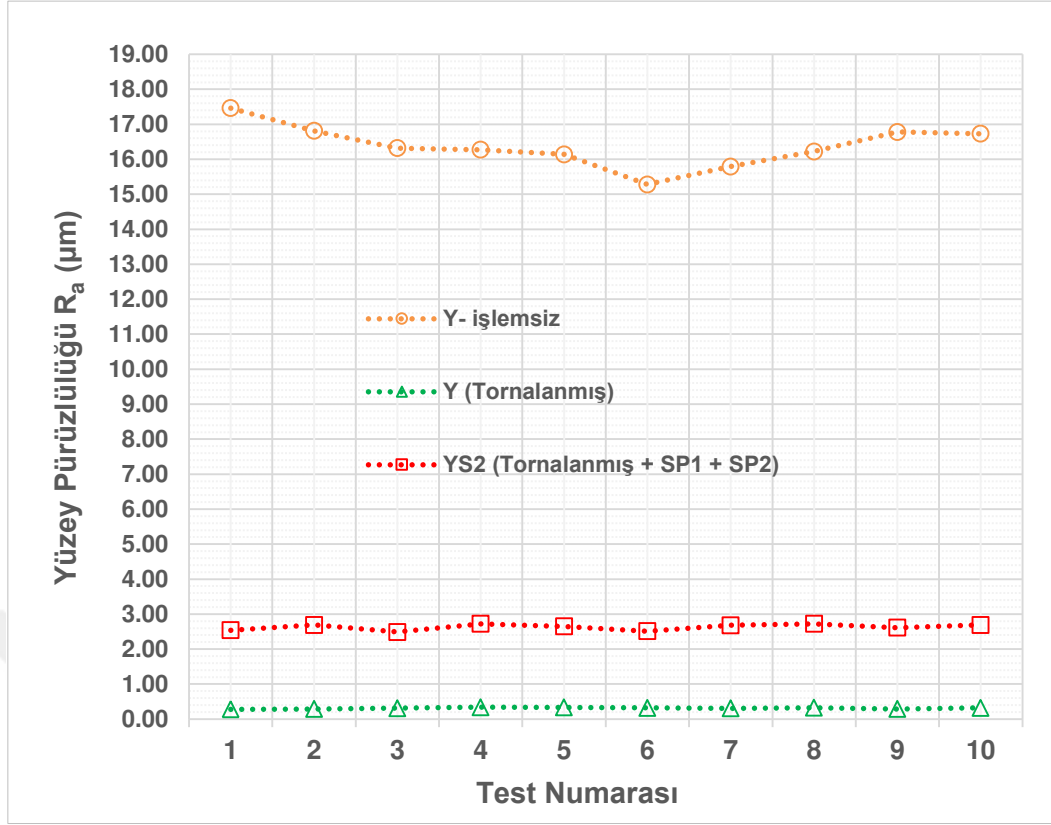


Şekil 4.15. K, KS1 ve KS2 kodlu numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçlarının grafikte gösterimi

İkinci grupta yer alan yorulma numunelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları Tablo 4.5’de; Y-işlemsiz, Y ve YS2 kodlu numunelerin ölçüm sonuçlarının grafikte gösterimi ise Şekil 4.16’da görülebilmektedir.

Tablo 4.5. Y kodlu yorulma numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları

Numune Kodu	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü - R_a (μm)	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü - R_z (μm)
Y-işlemsiz	$16,38 \pm 1,10$	$103,28 \pm 11,16$
Y (Tornalanmış)	$0,31 \pm 0,03$	$1,76 \pm 0,17$
YS2 (Tornalanmış + SP1 + SP2)	$2,63 \pm 0,14$	$16,25 \pm 1,92$
YI (Tavlanmış + tornalanmış)	$0,32 \pm 0,02$	$1,70 \pm 0,06$

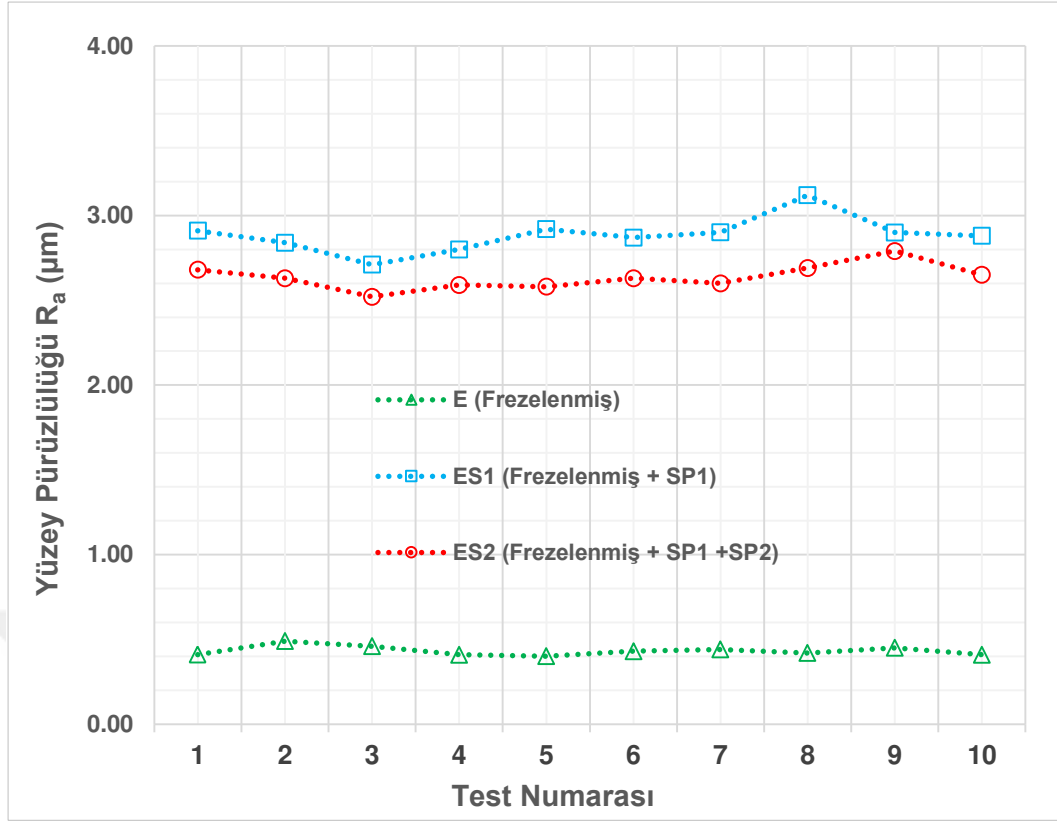


Şekil 4.16. Y-ışlemsiz, Y ve YS2 kodlu numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçlarının grafikte gösterimi

Üçüncü grupta yer alan E kodlu üç nokta eğme numunelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları Tablo 4.6’da, E, ES1 ve ES2 kodlu numunelerin ölçüm sonuçlarının grafikte gösterimi ise Şekil 4.17’de görülebilmektedir.

Tablo 4.6. E kodlu üç nokta eğme numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları

Numune Kodu	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Ra (µm)	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Rz (µm)
E-ışlemsiz	17,05 ± 1,48	99,29 ± 6,94
E (Frezelemiş)	0,43 ± 0,06	3,03 ± 0,88
EI (Tavlanmış + frezelemiş)	0,42 ± 0,03	2,99 ± 0,84
ES1 (Frezelemiş + SP1)	2,89 ± 0,23	16,90 ± 3,04
ES2 (Frezelemiş + SP1 + SP2)	2,64 ± 0,15	15,29 ± 1,12



Şekil 4.17. E, ES1 ve ES2 kodlu numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçlarının grafikte gösterimi

K, Y ve E kodlu 3 farklı numune grubundan alınan yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçlarını R_a verileri üzerinden yorumlamak gerekirse aşağıdaki hususlar sıralanabilmektedir:

SLM prosesi ile Ti6Al4V numunelerin üretimlerinde kullanılan makine ve proses parametrelerine göre değişken olmakla birlikte yaklaşık olarak R_a :3-30 μm aralığında yüzey pürüzlülüğü sonuçları alınabilmektedir [178–182]. Y-işlemsiz, K-işlemsiz ve E-işlemsiz numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçlarının, birbirlerine yakın ve belirtilen bu aralık içerisinde olduğu görülmüştür.

Gerçekleştirilen CNC tornalama ve CNC frezeleme işlemleri numunelerin yüzey pürüzlülüklerinin düşürülmesinde belirgin bir etki göstermiştir.

SP uygulanan numunelerde, bilyaların numunelerin yüzeylerinde yarattığı plastik şekil değişimi etkisi nedeniyle, yalnızca talaş kaldırılmış numunelerde elde edilenlere kıyasla daha yüksek yüzey pürüzlülüğü verileri elde edilmiştir. Literatürde daha küçük bilya çapına sahip bilyalarla gerçekleştirilen ikinci SP işlemlerinin yüzey

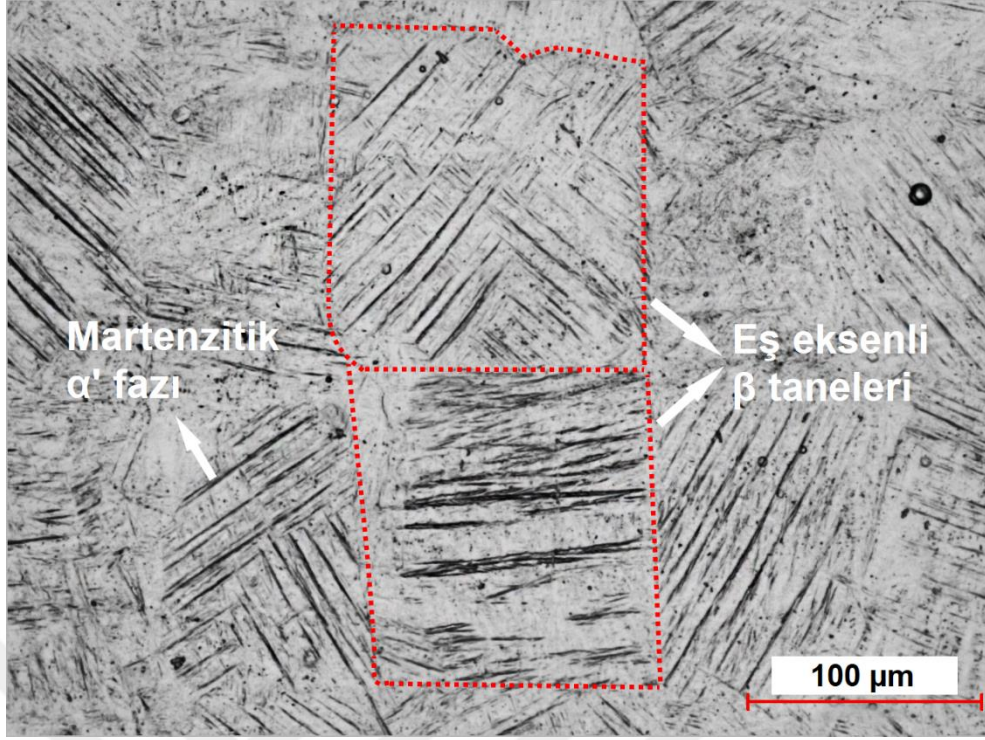
pürüzlülüğünde düşüş yarattığını gösteren çalışmalar mevcuttur [139, 183, 184]. Daha küçük çaplı bilyalar, daha büyük çaplı bilyaların oluşturduğu keskin tepelerin yüksekliklerinin düşürülmesinde ve buna bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünde bir miktar düşüş elde edilmesinde etkili olmaktadır [183]. Bu çalışmada da sonuç bu durumla uyumlu gerçekleşmiş, daha küçük çaplı bilya ile dövülen ES2 numunesinde elde edilen sonuç ES1 numunesinde; KS2 numunesinde elde edilen sonuç da KS1 numunesinde elde edilene kıyasla bir miktar daha düşük çıkmıştır.

E - EI, Y - YI, K - KI numunelerinden alınan yüzey pürüzlülüğü sonuçları her numune kodu kendi içinde kıyaslandığında, alınan sonuçlar arasında belirgin bir fark olmadığı, gerçekleştirilen tavlama işleminin yüzey pürüzlülüğü verileri üzerinde belirgin bir değişiklik yaratmadığı görülmüştür.

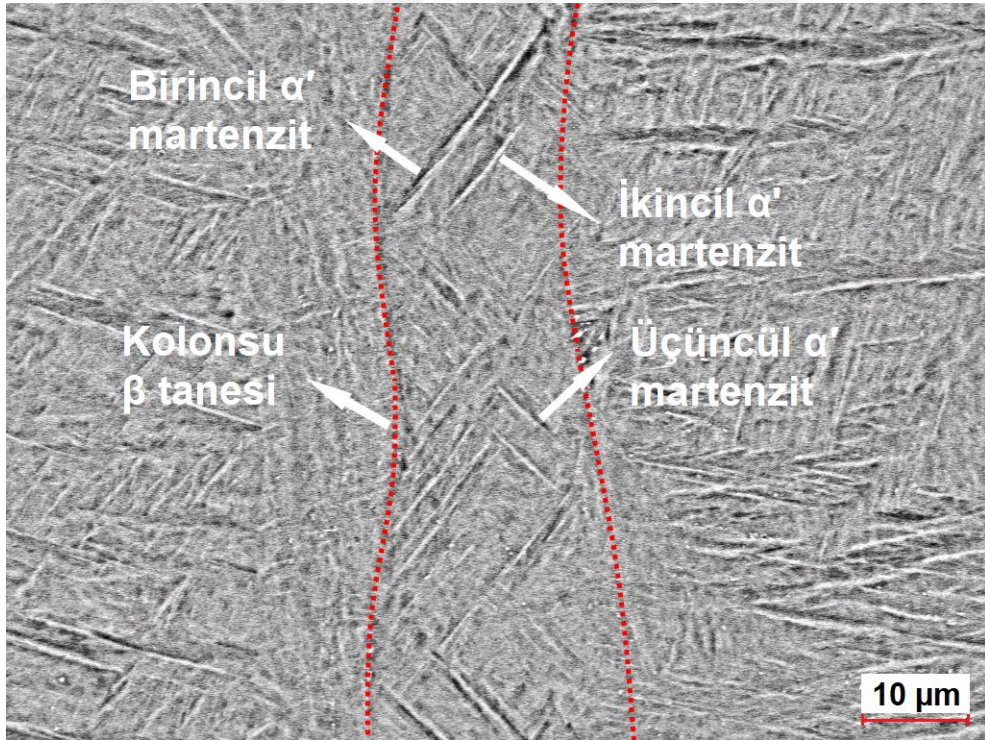
Beklenildiği gibi numunelerden alınan R_a yüzey pürüzlülüğü verilerinin her numuneden alınan R_z verileri ile orantılı olarak azalıp arttığı görülmüştür.

4.2.2. İçyapı Analizleri

Ek işlem çalışmalarında kullanılan K kodlu talaş kaldırılmış numunenin optik mikroskop içyapı görüntüsü Şekil 4.18'de, aynı numunenin başka bir bölgesinden alınmış SEM görüntüsü ise Şekil 4.19'da görülebilmektedir. β taneleri Şekil 4.18'de eş eksenli taneler olarak görülmekteyken Şekil 4.19'da ise kolonsu tane şeklinde görülmüştür. Her iki şekil de incelendiğinde α' fazı iğnelerinin birbirlerine dik, paralel veya 45° açılı gibi farklı pozisyonlarda konumlandıkları görülebilmektedir. Yang ve ark. [43] gerçekleştirdikleri çalışmada SLM prosesi ile üretilen Ti6Al4V malzemelerde görülen α' fazı iğnelerini boyutlarına göre birincil, ikincil, üçüncül ve dördüncül α' martenzit olarak 4 gruba ayırmışlardır. Birincil α' martenzit boy $> 20 \mu m$ genişlik: $1-3 \mu m$, ikincil α' martenzit boy: $10-20 \mu m$, genişlik: $100-900 nm$, üçüncül α' martenzit boy: $1-10 \mu m$, genişlik: $20-90 nm$ ve dördüncül α' martenzit boy $< 1 \mu m$ genişlik $< 20 nm$ olarak sınıflanmıştır. α' martenzit türlerinden birincil, ikincil ve üçüncül α' martenzit örnekleri Şekil 4.19'da görülebilmektedir.



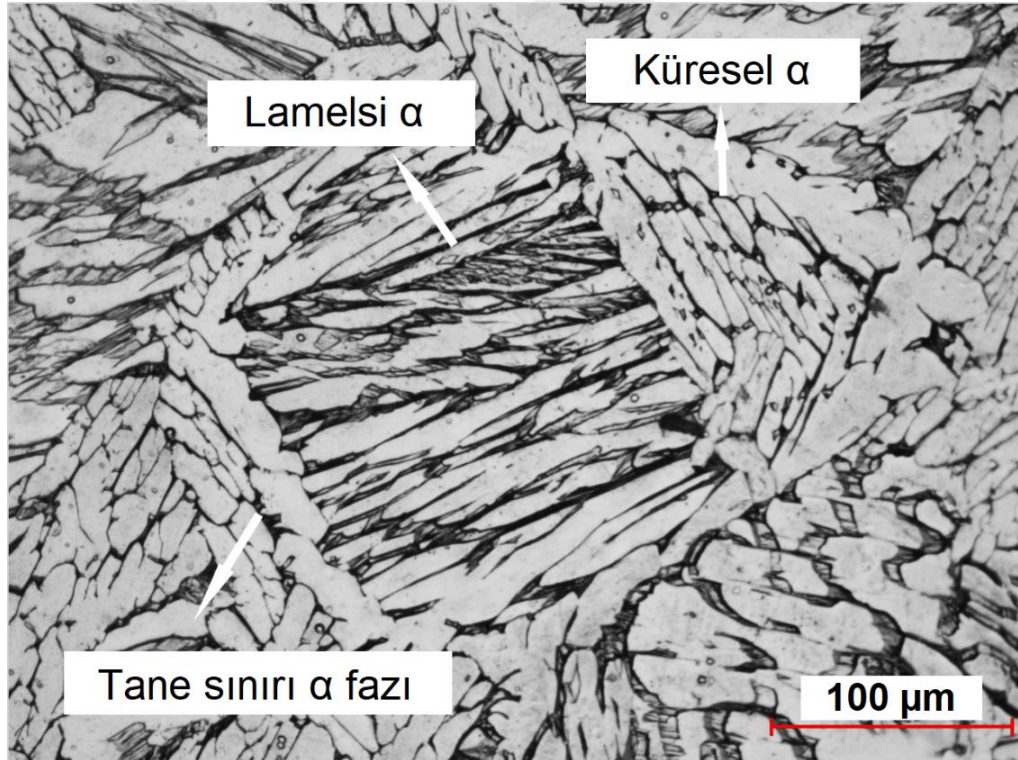
Şekil 4.18. K numunesine ait optik mikroskop içyapı görüntüsü



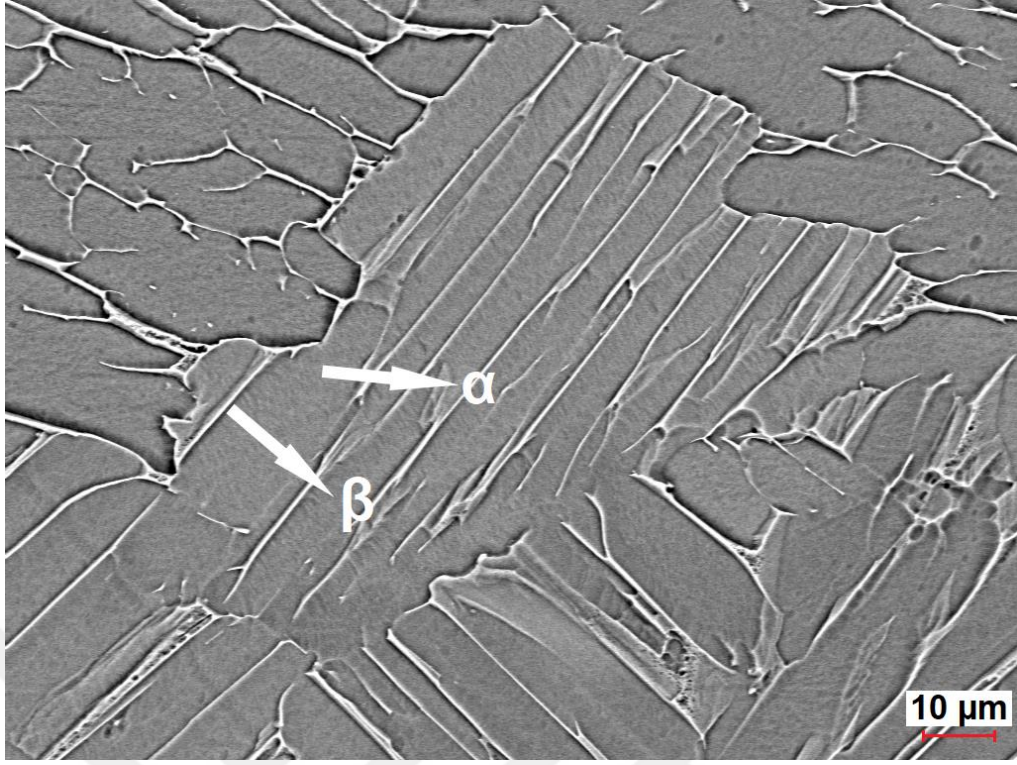
Şekil 4.19. K numunesine ait SEM içyapı görüntüsü

Ti6Al4V alaşımında bulunan α' martenzit fazının uygulanan ısıtma işlem sıcaklığı, bu sıcaklıkta tutma süresi ve soğuma hızına bağlı olarak $\alpha+\beta$ fazına

dönüşebildiği bilinmektedir [42, 149, 185, 186]. 850 °C sıcaklıkta 2 saat süresince tutma ardından fırında soğutma (ort. soğuma hızı: 0,022 °C/s) ile tamamlanan ısıtma işlemi etkisi altında içyapı tamamen $\alpha + \beta$ fazına dönüşmüştür. KI numunesine ait optik mikroskop içyapı görüntüsü Şekil 4.20’de, SEM içyapı görüntüsü ise Şekil 4.21’de görülebilmektedir. Şekil 4.20’de görüldüğü gibi α fazı içyapıda hem lamelsi hem de küresel biçimde görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.20’de tane sınırı α fazı da belirgin şekilde görülebilmektedir. Geçmiş çalışmalar içyapıdaki küresel α fazı oranı üzerinde uygulanan ısıtma işlem sıcaklığı, bu sıcaklıkta tutma süresi ve soğuma hızının üçünün birden etkisi olduğunu göstermektedir [42, 149, 187]. Dabrowski [42] tarafından gerçekleştirilen çalışmada Ti6Al4V alaşımı 1020 °C sıcaklıkta 20 dk. tutulduktan sonra 23,1 °C/s’den 0,012 °C/s soğuma hızına kadar farklı soğuma hızlarında soğutulmuştur. Bu çalışmada görülen içyapı, Dabrowski’nin çalışmasında 0,015 °C/s soğuma hızında elde edilen lamelsi ve küresel α fazının birarada görüldüğü içyapıya oldukça benzerdir. Dabrowski’nin çalışmasında [42] 0,012 °C/s soğuma hızında α fazının tamamen küresel forma dönüştüğü görülmüştür.



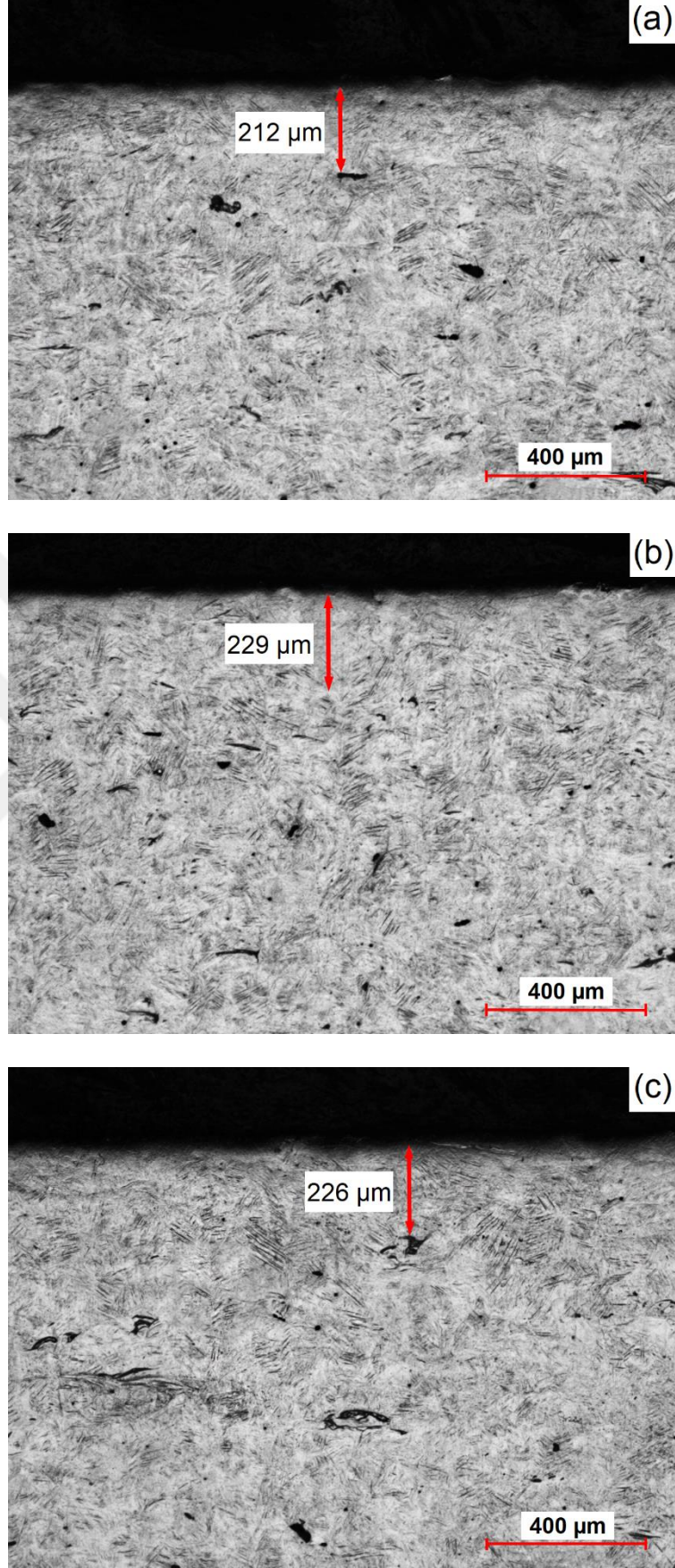
Şekil 4.20. KI numunesine ait optik mikroskop içyapı görüntüsü



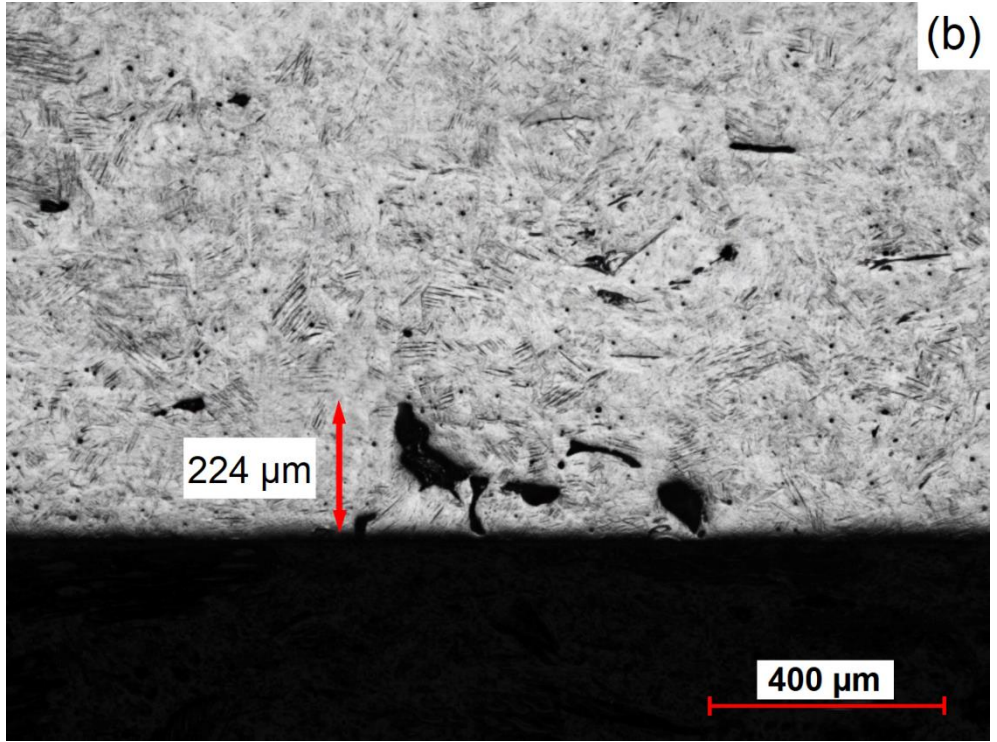
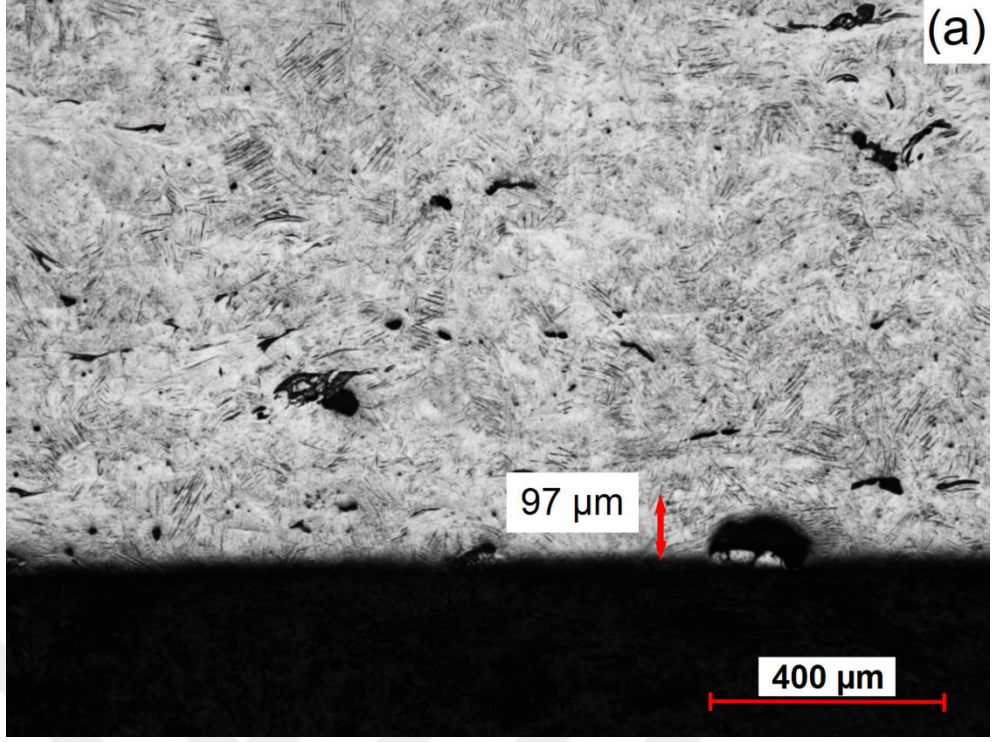
Şekil 4.21. KI numunesine ait SEM içyapı görüntüsü

Şekil 4.21'deki SEM içyapı görüntüsünde α fazı koyu renkle, β fazı ise açık renkle belirgin şekilde ayırt edilebilmektedir. Şekil 4.18'de yaklaşık olarak 170 μm olarak ölçülen tane içindeki köşegen uzunluğunun gerçekleşen ısıtıl işlem sonrasında yaklaşık 210 μm seviyesine yükseldiği yapılan tavlamanın faz dönüşümüne ilaveten tane irileşmesinde de etkili olduğu görülmüştür.

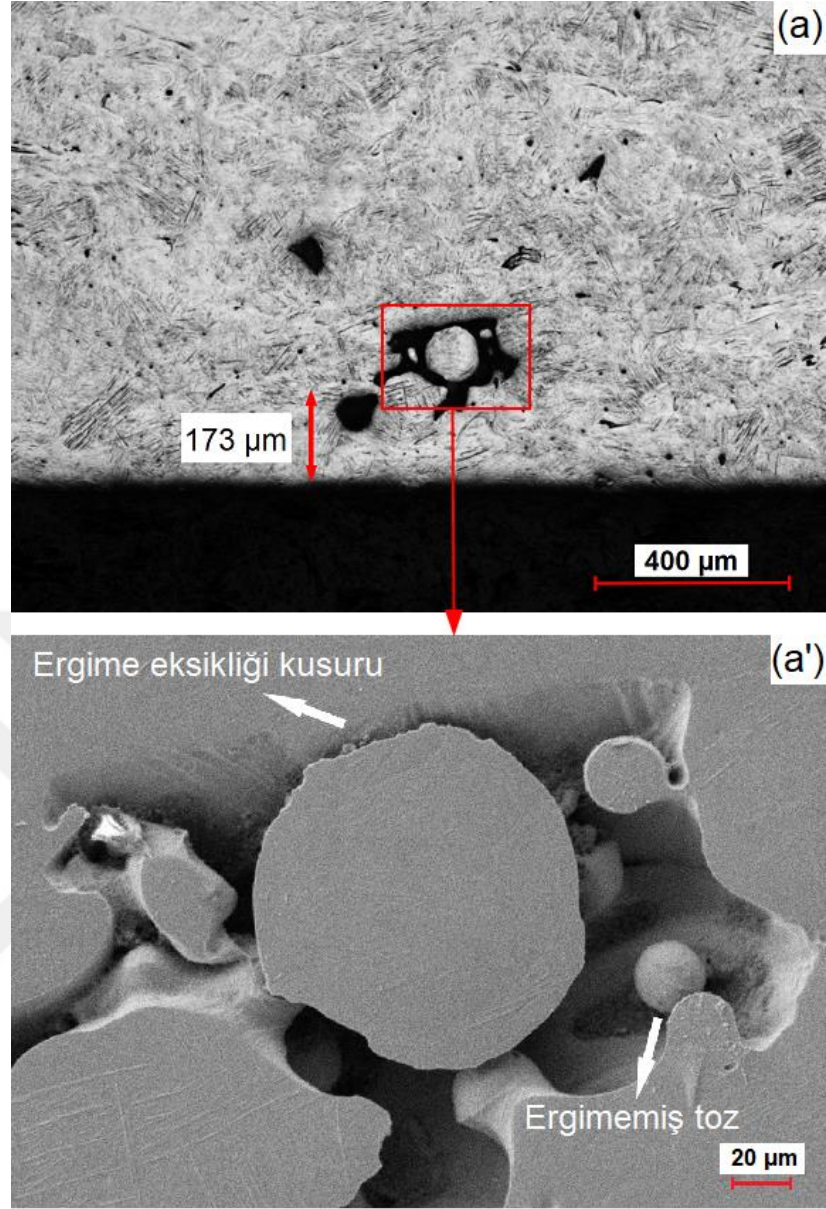
SLM prosesi ile üretimde numunelerin içerisinde farklı çap ve şekillerde poroziteler oluşabildiği ve bu porozitelerin mekanik testler sırasında gerilim başlatıcı olarak hareket ederek, mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkiler gösterdiği bilinmektedir. Literatürde SP, LSP gibi üretim sonrası ikincil işlemlerin malzemelerin yüzeyinde ve yüzeye yakın derinliklerinde porozite kapanması/iyileşmesine yardımcı olabildiğini gösteren çalışmalar mevcuttur [188–190]. Gerçekleştirilen SP işleminin KS1 numunesinde porozite kapanması/iyileşmesine etkisini incelemek amacıyla SP yapılan yüzeyin altındaki derinliklerde alınan içyapı görüntüleri Şekil 4.22'de, SP yapılmayan yüzeyin üzerindeki derinliklerde alınan içyapı görüntüleri ise Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'de görülebilmektedir.



Şekil 4.22. (a), (b) ve (c): KS1 numunesinde SP yapılan yüzeyin altındaki derinliklerden alınan içyapı görüntüleri



Şekil 4.23. (a) ve (b): KS1 numunesinde SP yapılmayan yüzeyin üzerindeki derinliklerden alınan içyapı görüntüleri

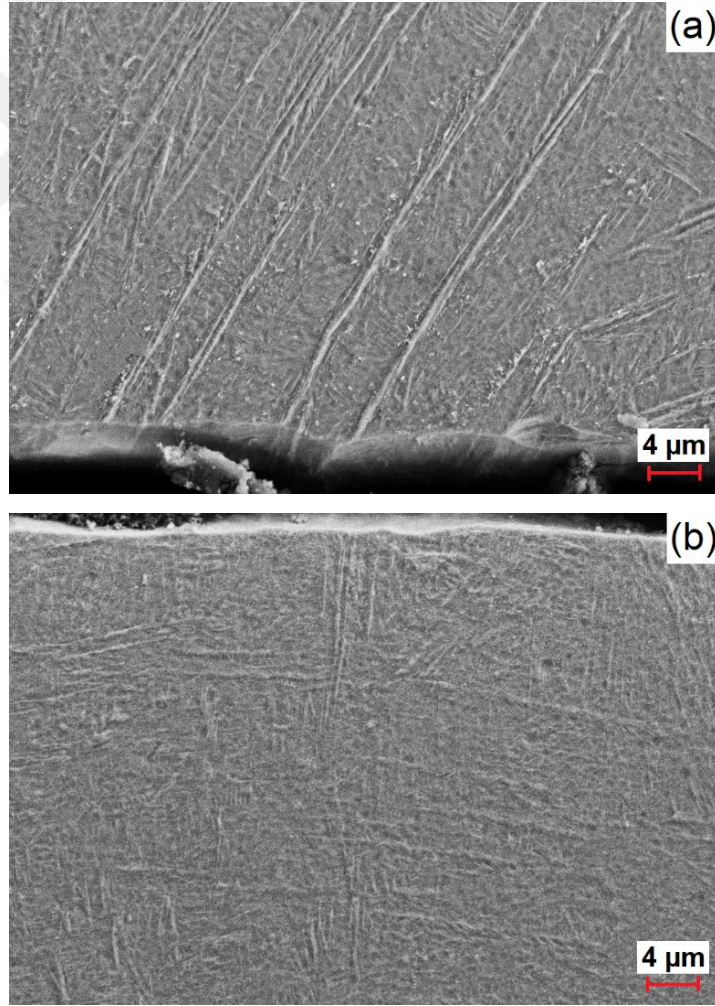


Şekil 4.24. (a) KS1 numunesinde SP yapılmayan yüzeyin üzerindeki derinliklerde alınan içyapı görüntüsü (a') içyapıda görülen ergime eksikliği kusurunun detaylı görünümü

Gerçekleştirilen SP prosesinin yarattığı plastik şekil değişimi etkisine bağlı olarak KS1 numunesinde SP yapılan yüzeyin altındaki 0-200 μm derinlik aralığında ergime eksikliği kusuru veya büyük boyutlu poroziteye rastlanmazken SP yapılmayan yüzeyin üzerindeki aynı derinlik aralığında her iki kusuru tipi de gözlenmiştir. Bu nedenle gerçekleştirilen SP işleminin porozite kapanması/iyileşmesi üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir.

Literatürde SP prosesinin malzeme yüzeyinde ve yüzeye yakın derinliklerde tane incelmeye yol açtığını gösteren çalışmalar bulunmaktadır [108, 191–194].

Wang ve ark. [191] yaptıkları çalışmada AISI 4340 çeliği üzerinde % 100 kaplama oranı ile SP işlemi gerçekleştirmiş; tane boyutu, SP yapılan numune yüzeyinde yaklaşık 2 μm , 200 μm derinlikte yaklaşık 7 μm , 300 μm derinlikte ise 10 μm 'nin üzerinde ölçülmüştür. Kumar ve ark. [193] tarafından gerçekleştirilen çalışmada Ti6Al4V alaşımı üzerinde SP prosesi gerçekleştirilmiş olup yapılan işlemin bilyalı dövülen yüzeyden 100 μm derinliğe kadarki bölümünde tane boyutunu 16 ± 3 nm seviyesine düşürdüğü raporlanmıştır. Bu çalışmada, SP prosesinin taneler üzerindeki etkisini saptamak amacıyla KS2 numunesinde bilyalı dövülmemiş yüzey üzerindeki derinliklerden alınan SEM görüntüsü Şekil 4.25a'da, bilyalı dövülmüş yüzeyin hemen altındaki derinliklerden alınan SEM görüntüsü ise Şekil 4.25b'de görülebilmektedir. Görüntülerde tane sınırları belirgin görünmemekle birlikte yapılan SP işleminin α' iğnelerinin boyutlarını belirgin şekilde düşürdüğü açık şekilde görülebilmektedir.



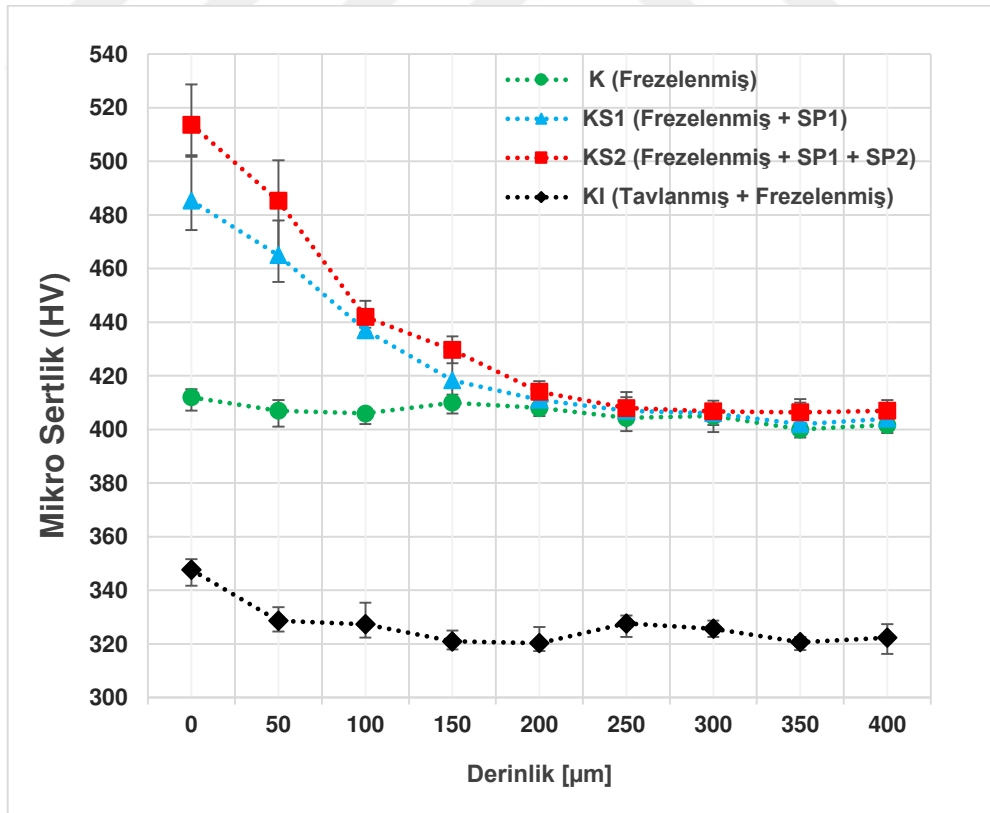
4.25. KS2 numunesinde gerçekleştirilen SP prosesinin α' iğnelerinin boyutları üzerindeki etkisi (a) Bilyalı dövülmemiş yüzey üzerindeki derinliklerden alınan görüntü (b) bilyalı dövülmüş yüzeyin hemen altındaki derinliklerden alınan görüntü

4.2.3. Mikro Sertlik Analizleri

SP işleminin malzeme yüzeyinde ve yüzeye yakın derinliklerde soğuk plastik şekil değişimi oluşturan bir süreçtir. SP prosesiyle gerçekleşen bu soğuk plastik şekil değişimi etkisi altında bilyalı dövülen yüzey ve yüzeye yakın derinliklerde tane incelmeye ilaveten dislokasyon yoğunluğunda artış oluşmaktadır [108, 192, 195, 196]. Denklem 4.1’de belirtilen Hall-Petch denklemine göre daha ince yapıları taneler daha yüksek dayanım ve sertlik ile sonuçlanmaktadır [197, 198]:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad (4.1)$$

Denklemde; σ_y : akma dayanımı, σ_0 : çözünen maddelerden kaynaklanan ancak dislokasyonlardan kaynaklanmayan sürtünme gerilmesi, k_y : dayanım sabiti ve d : tane çapıdır. Soğuk plastik şekil değişimi etkisi altında gerçekleşen dislokasyon yoğunluğundaki artış da yine dayanım ve sertlik değerlerinde artışa yol açmaktadır yani malzeme pekleşmektedir [199, 200]. Şekil 4.26’da numunelerde ölçülen Vickers mikro sertlik verileri görülebilmektedir.

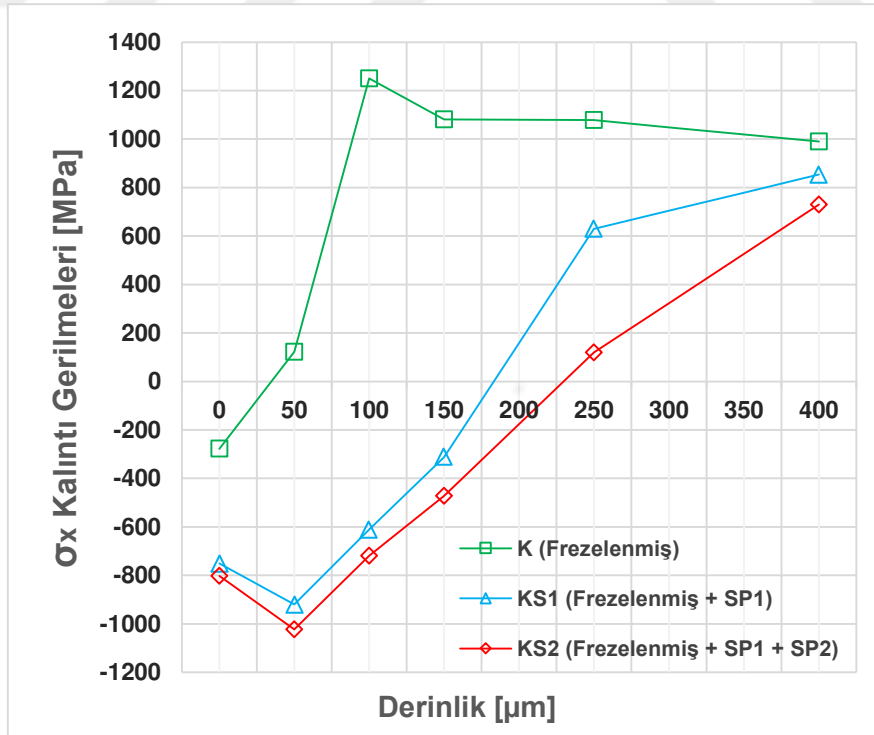


Şekil 4.26. K, KS1, KS2 ve KI numunelerinde farklı derinliklerde ölçülen Vickers mikro sertlik sonuçları

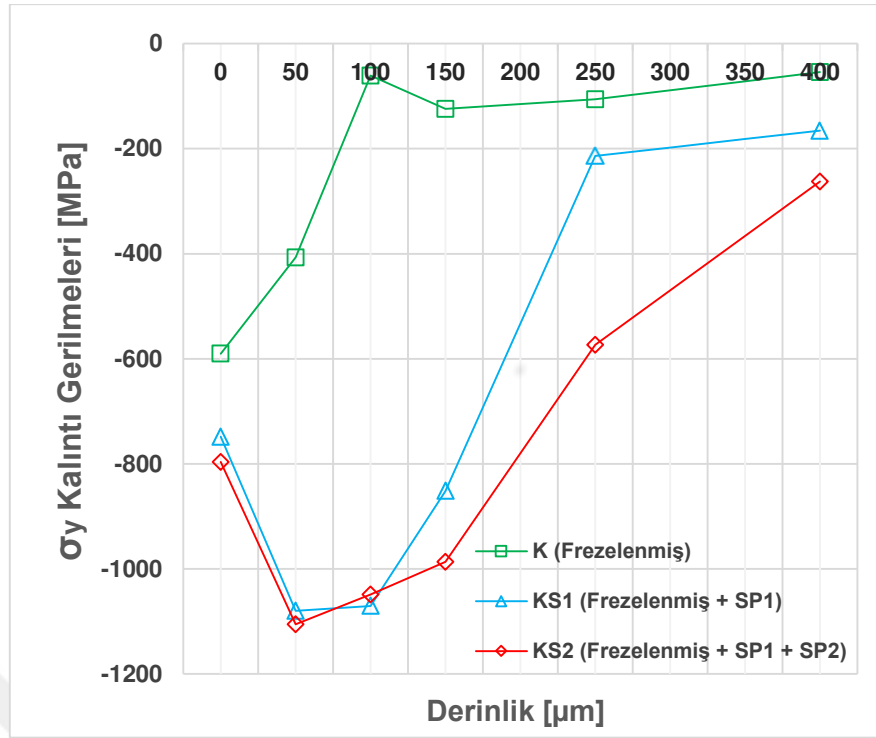
KS1 ve KS2 numunelerinde 0-250 μm derinlik aralığında ölçülen mikro sertlik verilerinin K numunesinde ölçülenlerden belirgin şekilde yüksek olması gerçekleşen SP etkisi altında bu aralıkta oluşan tane incelmeleri ve dislokasyon yoğunluğundaki artışla açıklanabilmektedir. Aynı aralıkta KS2 numunesinden alınan mikro sertlik verilerinin KS1 numunesinde ölçülenlerden daha yüksek oluşu ise KS2 numunesinde gerçekleştirilen çoklu SP işlemiyle (SP1 + SP2) açıklanabilmektedir. Literatürde SLM prosesiyle üretilen Ti6Al4V alaşımının mikro sertlik verilerine, gerçekleştirilen ısıtma işlemlerinin etkilerini inceleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır [33, 181, 193–195]. Tavlamanın etkisi altında dislokasyon yoğunluğunda bir miktar azalma kaydedilmesi ve içyapıda gerçekleşen $\alpha + \beta$ dönüşümüne, α fazının α' fazına kıyasla çok daha geniş bir faz olmasına bağlı olarak beklendiği gibi KI numunesinde mikro sertlik verilerinde belirgin bir düşüş kaydedilmiştir. Bu çalışmada görülen α ve α' fazlarının boyutsal farkı, Şekil 4.19 ve Şekil 4.21'in karşılaştırılmasıyla net şekilde görülebilmektedir.

4.2.4. Kalıntı Gerilme Analizleri

K, KS1 ve KS2 numunelerinde ölçülen σ_x kalıntı gerilme sonuçları Şekil 4.27'de, σ_y kalıntı gerilme sonuçları Şekil 4.28'de görülebilmektedir.



Şekil 4.27. K, KS1 ve KS2 numunelerinin σ_x kalıntı gerilme sonuçları

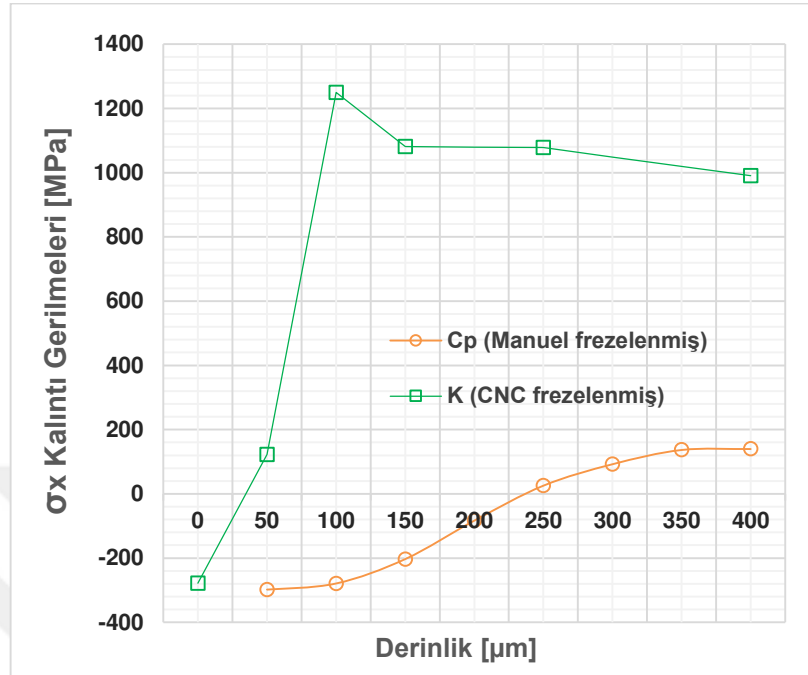


Şekil 4.28. K, KS1 ve KS2 numunelerinin σ_y kalıntı gerilme sonuçları

K numunesinde 5 yüzeyde gerçekleştirilen frezleme işleminin malzeme yüzeyinde hem x hem de y eksenlerinde basma tipi kalıntı gerilme oluşumunda etkili olduğu görülebilmektedir. Ancak x eksen yönünde frezeleme yapılmamış olması; bu ekseninde 50 μm derinlikte kalıntı gerilme tipinin çekmeden basmaya dönüşmesiyle, 100 μm derinlikte ise 1200 MPa seviyesine ulaşan yüksek çekme tipi kalıntı gerilme değeri ile sonuçlanmıştır. Geçmiş çalışmalardan malzeme yüzeyinde gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemlerinin özellikle 0-100 μm derinlik aralığında basma tipi kalıntı gerilme oluşumunda oldukça etkili olduğu bilinmektedir [173–175, 201]. y ekseninde ölçüm yapılan tüm derinlik aralığında kalıntı gerilme basma tipi olarak gözlenmiştir.

Gerçekleştirilen frezeleme tipi ve kalıntı gerilme ölçüm metodu farklı olsa da aynı parametrelerde üretimi gerçekleştirilen ve tüm yüzeylerinde manuel frezeleme yapılan Cp numunesinde x ekseninde alınan kalıntı gerilme sonuçları, K numunesinde aynı ekseninde alınan kalıntı gerilme sonuçlarıyla karşılaştırılması amacıyla Şekil 4.29’da gösterilmektedir. x yüzeyi dahil tüm yüzeylerde gerçekleştirilen manuel frezeleme etkisi altında Cp numunesinde 200 μm derinliğe kadar kalıntı gerilme tipinin basma tipi olarak kaldığı, 400 μm derinlikte ise çekme tipine dönüş olsa da büyüklüğünün 200 MPa’ın altında olduğu, K numunesinde x ekseninde frezeleme yapılmamasına bağlı olarak 200 μm derinlikte kalıntı gerilme tipinin çekme tipi olduğu

ve büyüklüğünün 1000 MPa'ın üzerinde olduğu, 400 μm derinlikte ise 1000 MPa seviyesinde olduğu görülebilmektedir.



Şekil 4.29. Cp ve K numunelerinde ölçülen σ_x kalıntı gerilmeleri

K numunesinde x ekseninde 100-400 μm derinlik aralığında kalıntı gerilme seviyesinde yaşanan düşüşün numune merkezine doğru gidildikçe düşen sıcaklık gradyanına bağlı olarak soğuma hızında yaşanan düşüşle ilişkili olabileceği düşünülmektedir.

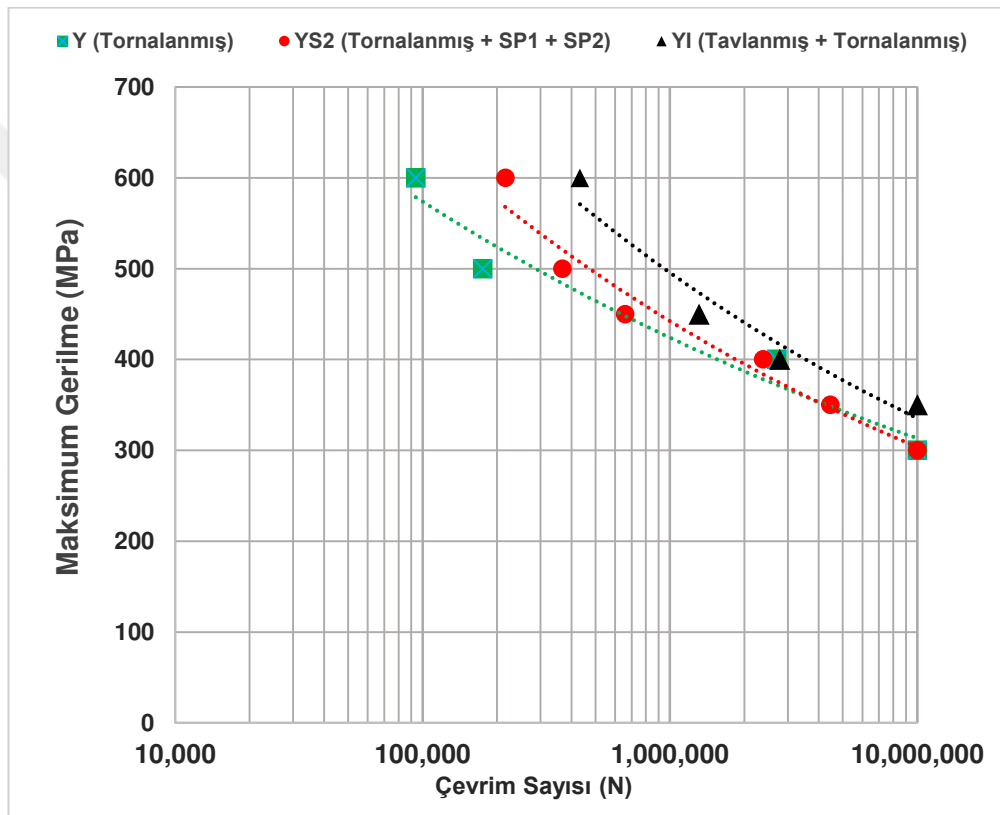
Şekil 4.27. incelendiğinde gerçekleştirilen SP işlemlerine bağlı olarak KS1 ve KS2 numunelerinde, yorulma çatlakları açısından oldukça kritik bir aralık olan 0-150 μm derinlik aralığında kalıntı gerilme tipinin basma tipi olduğu görülmüştür. 100 μm derinlikte K, KS1 ve KS2 numunelerinde gözlenen kalıntı gerilme tip ve seviyeleri karşılaştırıldığında ise SP etkisi altında yaşanan değişimin ne derece dramatik olduğu görülebilmektedir.

Şekil 4.27 ve Şekil 4.28 incelendiğinde beklendiği gibi gerçekleştirilen çoklu SP işlemi etkisi altında, hem x hem de y eksenlerinde KS2 numunesinde elde edilen basma tipi kalıntı gerilmelerin seviyesi KS1 numunesinde aynı derinliklerde elde edilenlerden daha yüksek olmuştur.

K, KS1 ve KS2 numunelerinin her iki ekseninde alınan kalıntı gerilme eğrileri incelendiğinde gerçekleştirilen SP işlemlerinin kalıntı gerilme oluşturma bakımından 0-400 μm aralığında etkili olduğu söylenebilmektedir.

4.2.5. Yorulma ve Fraktografi Analizleri

Y, YS2 ve YI numunelerinin yorulma analizlerinin sonuçları Şekil 4.30'da, Y numunesinde alınan sonuçlarının tablo ile gösterimi Tablo 4.7'de, YS2 numunesinde alınan sonuçların tablo ile gösterimi Tablo 4.8'de ve YI numunesinde alınan sonuçların tablo ile gösterimi ise Tablo 4.9'da görülebilmektedir.



Şekil 4.30. Y, YS2 ve YI numunelerinin yorulma analizi sonuçları

Tablo 4.7. Y numunelerine ait yorulma analizi sonuçları

Gerilme Aralığı (MPa)	Çevrim Sayısı
600 - 60	93.900
500 - 50	174.574
400 - 40	2.702.031
300 - 30	10.000.000 (Hasarsız)

Tablo 4.8. YS2 numunelerine ait yorulma analizi sonuçları

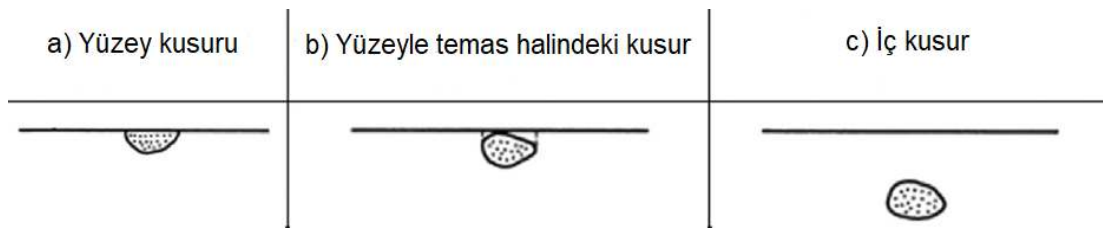
Gerilme Aralığı (MPa)	Çevrim Sayısı
600 - 60	215.901
500 - 50	366.998
450 - 45	658.456
400 - 40	2.375.459
350 - 35	4.450.426
300 - 30	10.000.000 (Hasarsız)

Tablo 4.9. YI numunelerine ait yorulma analizi sonuçları

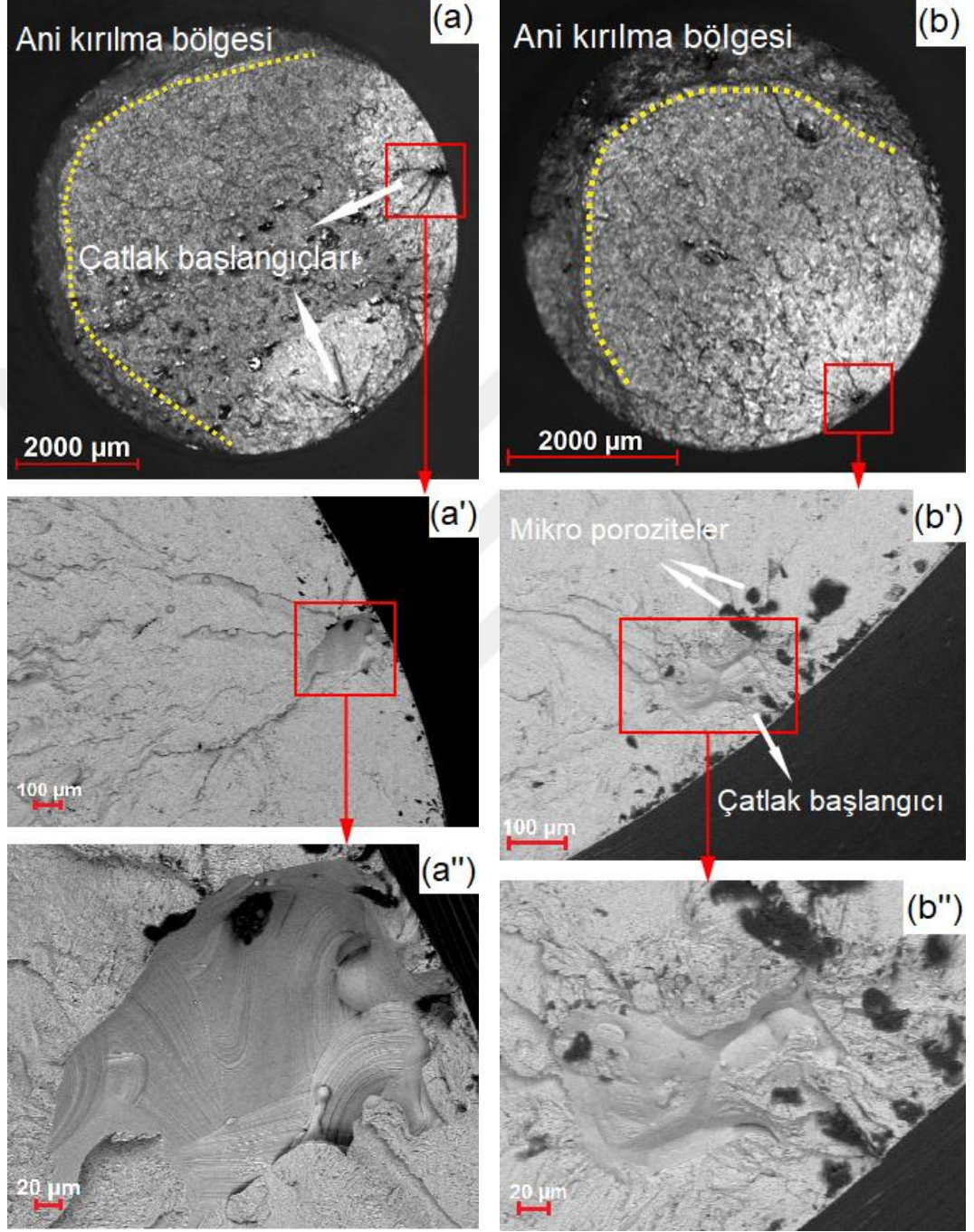
Gerilme Aralığı (MPa)	Çevrim Sayısı
600 - 60	433.835
450 - 45	1.312.468
400 - 40	2.776.328
350 - 35	10.000.000 (Hasarsız)

SP işlemi, malzemede yüzey ve yüzeye yakın derinliklerde basma tipi kalıntı gerilme oluşturmakla birlikte talaş kaldırılmış yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü değerlerini de artırmaktadır [139, 140]. Basma tipi kalıntı gerilmeler, yorulma çatlaklarının başlama ve ilerlemesinin geciktirilmesi veya engellenmesi bakımından olumlu etki gösterirken artan yüzey pürüzlülüğü, çentik etkisinden dolayı bu bakımdan olumsuz etki sergilemektedir [176, 177, 199, 200].

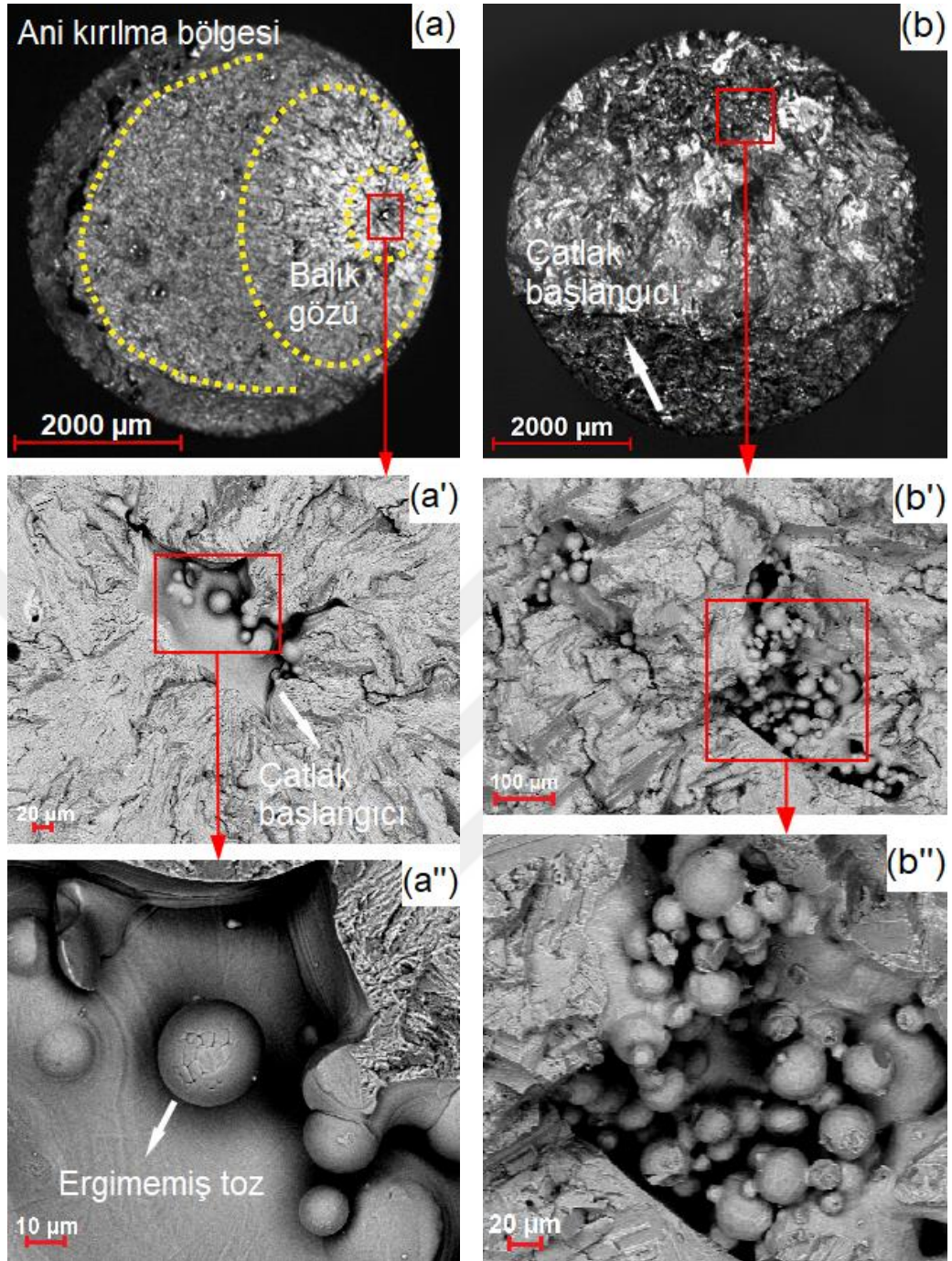
Murakami [202] yorulma kırılması yüzeylerinde gözlenen kusurları bulundukları konuma göre üç bölüme ayırmıştır: a) yüzey kusurları b) yüzeye temas halindeki kusurlar c) iç kusurlar. Söz konusu kusurlar Şekil 4.31’de şematik olarak görülebilmektedir.

**Şekil 4.31.** Bulunduğu konum bakımından yorulma kırılması yüzeylerinde görülen kusur tipleri a) yüzey kusuru b) yüzeye temas halindeki kusur c) iç kusur [202]

İki farklı Y numunesinden alınan yorulma kırılması yüzey görüntüleri Şekil 4.32’de, bir adet YS2 numunesi ve bir adet YI numunesinden alınan yorulma kırılması yüzey görüntüleri ise Şekil 4.33’de görülebilmektedir.



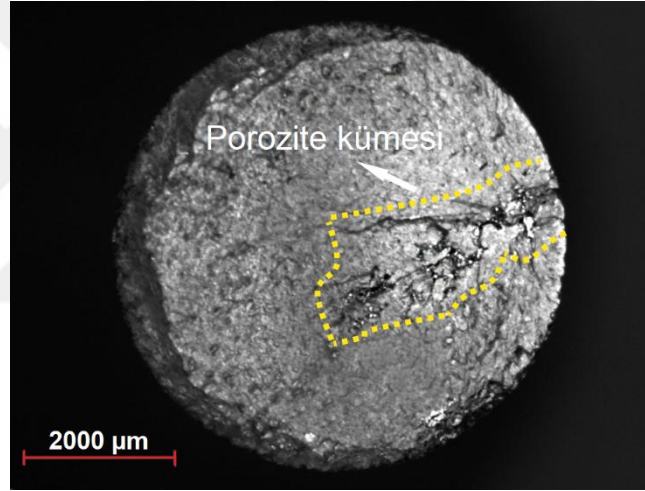
Şekil 4.32. Yorulma kırılması yüzey görüntüleri (a), (a') ve (a''): Y, $\sigma_{maks} = 600$ MPa, Nf: 93.900 çevrim; (b), (b') ve (b''): Y, $\sigma_{maks} = 400$ MPa, Nf: 2.702.031 çevrim



Şekil 4.33. Yorulma kırılması yüzey görüntüleri (a), (a') ve (a''): YS2, $\sigma_{maks} = 400$ MPa, Nf: 2.375.459 çevrim; (b), (b') ve (b''): YI, $\sigma_{maks} = 450$ MPa, Nf: 1.312.468 çevrim

Yorulma analizi gerçekleştirilen 6 adet YS2 numunelerinden $\sigma_{maks} = 600$ MPa'da testi gerçekleştirilen numune dışındakilerin tamamında yorulma kırılmasının bir iç kusurdan kaynaklandığı görülmüştür. Bu 5 adet numuneden biri olan $\sigma_{maks} = 400$ MPa'da testi gerçekleştirilen numunenin kırılma yüzeyi görüntüleri Şekil 4.33a-a" da

görülebilmektedir. Yorulma kırılmasının bir iç kusura bağlı olarak gerçekleştiği görülen 5 adet YS2 numunesinin tamamında söz konusu iç kusurların 250 μm derinlikten daha derinde yer alan bir iç kusur olduğu gözlemlenmiştir. Geçmiş çalışmalardan SLM prosesiyle üretilen Ti6Al4V alaşımında SP işleminin 0-250 μm derinlikte basma tipi kalıntı gerilme oluşturabilme bakımından oldukça etkili olabildiği bilinmektedir [140, 203]. $\sigma_{\text{maks}} = 600 \text{ MPa}$ 'da testi gerçekleştirilen numunede ise yorulma çatlak başlangıcının yüzeyle temas eden ancak aynı zamanda birbirleriyle de temas halinde olan ve numune merkezine doğru uzanan bir porozite kümesinden kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle gerçekleştirilen SP işleminin bu numunede çok etkili olamaması olağandır. Numuneye ait yorulma kırılması yüzey görüntüsü Şekil 4.34'de görülebilmektedir.



Şekil 4.34. $\sigma_{\text{maks}} = 600 \text{ MPa}$ 'da testi gerçekleştirilen YS2 numunesine ait yorulma kırılma yüzeyi görüntüsü

Bilyalı dövülmüş YS2 numunelerinde alınan sonuçların tamamı alınan kırılma yüzeyi görüntüleri de dikkate alınarak değerlendirildiğinde gerçekleştirilen SP işlemlerinin 0-250 μm derinlik aralığında yorulma çatlaklarının başlamasını engellemede oldukça etkili olduğu söylenebilmektedir. Bu durumun gelişmesinde tek etkili faktörün bu derinlikte oluşan basma tipi kalıntı gerilmeler olmadığı aynı zamanda gerçekleştirilen SP işleminin bu derinlik aralığında porozite kapanması/iyileşmesine de katkı sunduğu düşünülmektedir. Y, YS2 ve YI numunelerinden alınan yorulma kırılma yüzey görüntüleri incelendiğinde Y ve YI numunelerinde 0-250 μm derinlik aralığında çok sayıda yüzey kusuru, yüzeyle temas halindeki kusur veya iç kusur gözlenirken bu kusurların YS2 numunelerinde çok daha düşük miktarda olduğu

gözlenmiştir. Ayrıca gerçekleştirilen SP işleminin porozite kapanması/iyileşmesi üzerindeki olumlu etkisi Şekil 4.22’de de görülebilmektedir.

Y ve YI numuneleri incelendiğinde yorulma çatlak başlangıcının bir yüzey kusuru, yüzeyle temas halindeki kusur veya 0-250 µm derinlik aralığında bulunan bir iç kusurdan kaynaklandığı gözlenmiştir. $\sigma_{maks} = 600$ MPa’da testi gerçekleştirilen Y numunesinin yorulma kırılma yüzeyi görüntüleri Şekil 4.32a-a" da görülebilmektedir. Görüntüler incelendiğinde yorulma çatlaklarının iki ayrı ergime eksikliği kusurundan kaynaklandığı ve bunlardan en az birinin yüzeyle temas halindeki kusur olduğu görülebilmektedir. $\sigma_{maks} = 400$ MPa’da testi gerçekleştirilen Y numunesinin Şekil 4.32b-b" de yer alan görüntüleri incelendiğinde yorulma çatlaklarını başlatan kusurun 0-250 µm derinlik aralığında yer alan bir iç kusur olduğu, $\sigma_{maks} = 450$ MPa’da testi gerçekleştirilen YI numunesinin Şekil 4.33b’de yer alan görüntüsü incelendiğinde ise yorulma çatlaklarını başlatan kusurun 0-250 µm derinlik aralığında yer alan bir iç kusur olduğu görülmektedir.

Şekil 4.33a'-a" ve Şekil 4.33b'-b" incelendiğinde ergime eksikliği kusurunun özelliklerinden biri olan kusur içerisine sinterlenmiş durumdaki ergimemiş tozlar görülebilmektedir. Yorulma kırılma yüzeylerinde görülen bir başka kusur tipi de küresel poroziteler olup belirgin örnekleri Şekil 4.32a'-a" ve Şekil 4.32b'-b" incelendiğinde görülebilmektedir. Şekil 4.33a-a" incelendiğinde çatlak başlangıcının balık gözü yapısını sergilediği ve bunda etkili olan kusurun ergime eksikliği kusuru olduğu görülebilmektedir. Yorulma çatlakları bir iç kusurdan veya içerde yer alan bir inklüzyondan kaynaklandığında balık gözü adı verilen bu çembersel ve pürüzsüz kırılma yüzeyi oluşabilmektedir [201].

Y ve YS2 numunelerinden alınan sonuçlar karşılaştırıldığında YS2 numunesinde gerçekleştirilen SP işlemlerinin yorulma ömrünü artırmada olumlu etkiler gösterdiği ancak yorulma limiti olan 300 MPa’da bir değişiklik yapamadığı görülmüştür. Bu durumun gelişmesindeki en etkili nedenin YS2 numunelerinde 250 µm derinlikten daha derinde yer alan yani SP prosesinin etkili olamadığı derinlikte bulunan iç kusurlar olduğu düşünülmektedir. Wycisk ve ark. [13] gerçekleştirdikleri çalışmada SLM prosesiyle Ti6Al4V numuneler üretmişler tüm numunelere gerilme giderme tavlama uyguladıktan sonra bir gruba SP uygularken bir grupta ise

elektro-parlatma uygulamışlardır. Bilyalı dövülmüş numuneler yorulma limitine 435 MPa'da ulaşırken elektro-parlatılmış numuneler 510 MPa'da ulaşmıştır. Bilyalı dövülmüş numunelerde alınan daha düşük yorulma limiti, SP'nin etkili olamadığı derinlikte yer alan iç kusurlarla ilişkilendirilmiştir.

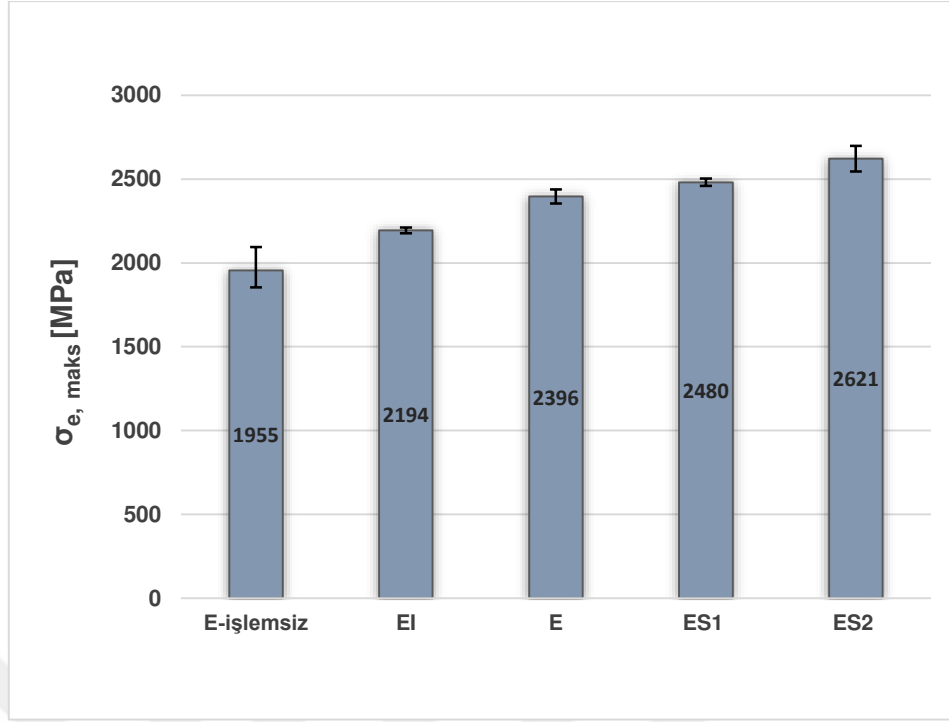
Yorulma ömürlerinde belirgin bir iyileşme ise YI numunelerinde kaydedilmiştir. Yorulma limitine 350 MPa'da ulaşılmış olmakla birlikte $\sigma_{maks} = 600$ MPa ve $\sigma_{maks} = 450$ MPa'da elde edilen yorulma ömürlerinin aynı gerilmelerde YS2 numunesinde kaydedilenlerin yaklaşık iki katı olduğu görülmüştür. Bu sonuçların alınmasında en etkili faktörün elbette YI numunelerinde tornalama öncesinde gerçekleştirilen tavlama olduğu düşünülmektedir. Tavlama ile kalıntı gerilmelerin tamamen veya tamamına yakın bir bölümünün ortadan kaldırılabilirdiği ayrıca dislokasyon yoğunluğunda azalma kaydedilebildiği bilinmektedir. Gerçekleştirilen tavlamanın SLM prosesi nedeniyle yüzey ve yüzeye yakın derinliklerde oluşan istenmeyen çekme tipi kalıntı gerilmeleri büyük ölçüde giderdiği buna ilaveten dislokasyon yoğunluğunda da düşüş sağladığı düşünülmektedir. Tavlamanın sonrasında uygulanan tornalama ise yüzey ve yüzeye yakın derinliklerde basma tipi kalıntı gerilmeler oluşturarak yorulma ömrüne katkı sağlamıştır. Gerçekleştirilen tavlama ile $\alpha+\beta$ içyapı dönüşümü gerçekleşmiştir. α fazı, α' fazı ile boyutsal olarak karşılaştırıldığında α fazının çok daha geniş bir faz olduğu buna bağlı olarak da süneklikte artış, sertlikte ise düşüş sağladığı bilinmektedir. Şekil 4.26 incelendiğinde tavlamanın mikro sertlikte ne derece düşüş sağladığı görülebilmektedir. Şekil 4.33b-b" incelendiğinde de YI numunesindeki kırılmanın YS2 ve Y numunelerinde görülenlerden çok daha sünek karakterde gerçekleşmiş olduğu belirgin şekilde görülebilmektedir. Tüm bu faktörlerin YI numunelerinde yorulma çatlağı başlamasını ve ilerlemesini geciktirerek yorulma ömrüne katkı sağladığı düşünülmektedir [141, 156, 167, 170, 204]. Tablo 4.10'da bu çalışmada yorulma analizleri neticesinde alınan sonuçların literatürde yer alan SLM prosesiyle Ti6Al4V numunelerin üretildiği benzer çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırmalı gösterimi görülebilmekte olup tablodaki sonuçlar incelendiğinde bu çalışmada alınan sonuçların benzer ikincil işlemlerin uygulandığı yorulma numunelerinde alınan sonuçlarla oldukça benzerlik gösterdiği görülebilmektedir.

Tablo 4.10. Bu çalışmada yorulma analizleri neticesinde alınan sonuçların literatürde yer alan benzer çalışmaların sonuçlarıyla karşılaştırılması

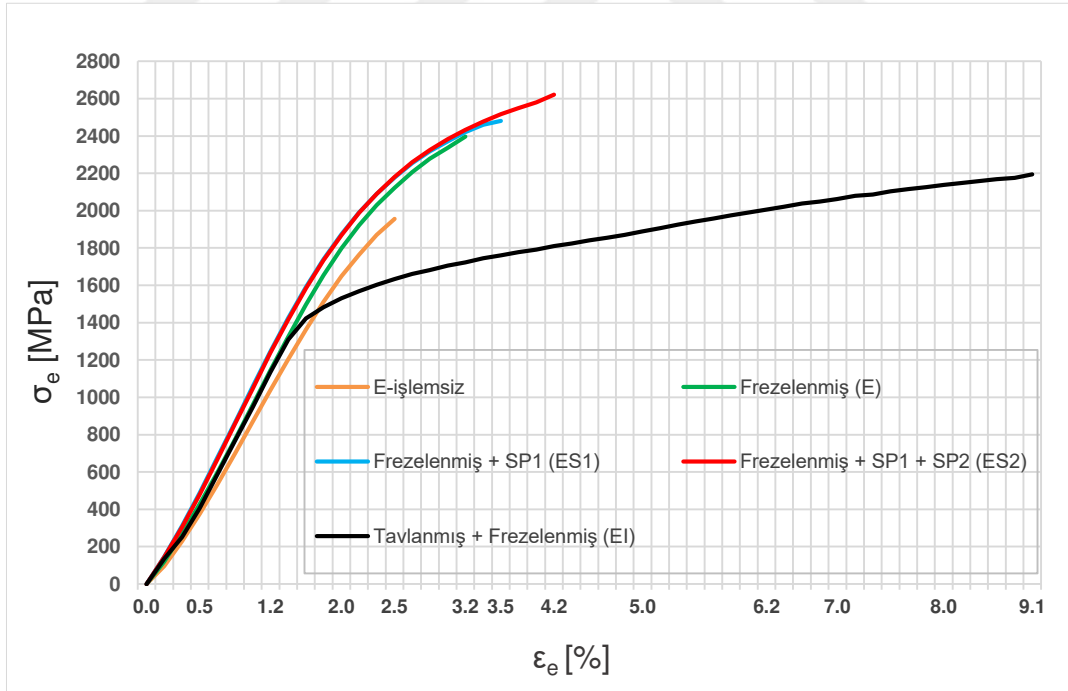
Kullanılan Makine	Ek İşlem Durumu	Yorulma Limiti İçin Çevrim Sayısı	Yorulma Sınırı (MPa)	Çalışma
SLM ENA 250	Tornalama	10^7	300	Bu çalışma
SLM 250 HL	Tornalama	2×10^6	300	[205]
SLM MTT 250	Frezeleme + parlatma	10^6	200	[206]
SLM ENA 250	850 °C 2 saat tavlama, fırında soğutma (FS) + tornalama	10^7	350	Bu çalışma
SLM 250 HL	800 °C 2 saat tavlama, FS + tornalama	2×10^6	400	[205]
SLM LSNF-2	920 °C 2 saat tavlama, FS + parlatma	10^7	350	[141]
SLM LSNF-2	500 °C 2 saat tavlama, FS + parlatma	10^7	< 300	[141]
SLM ENA 250	Tornalama + SP1 + SP2	10^7	300	Bu çalışma
SLM 3D ProX 300	670 °C 5 saat tavlama + tribofinish + SP	5×10^7	325	[135]

4.2.6. Üç Nokta Eğme Analizleri

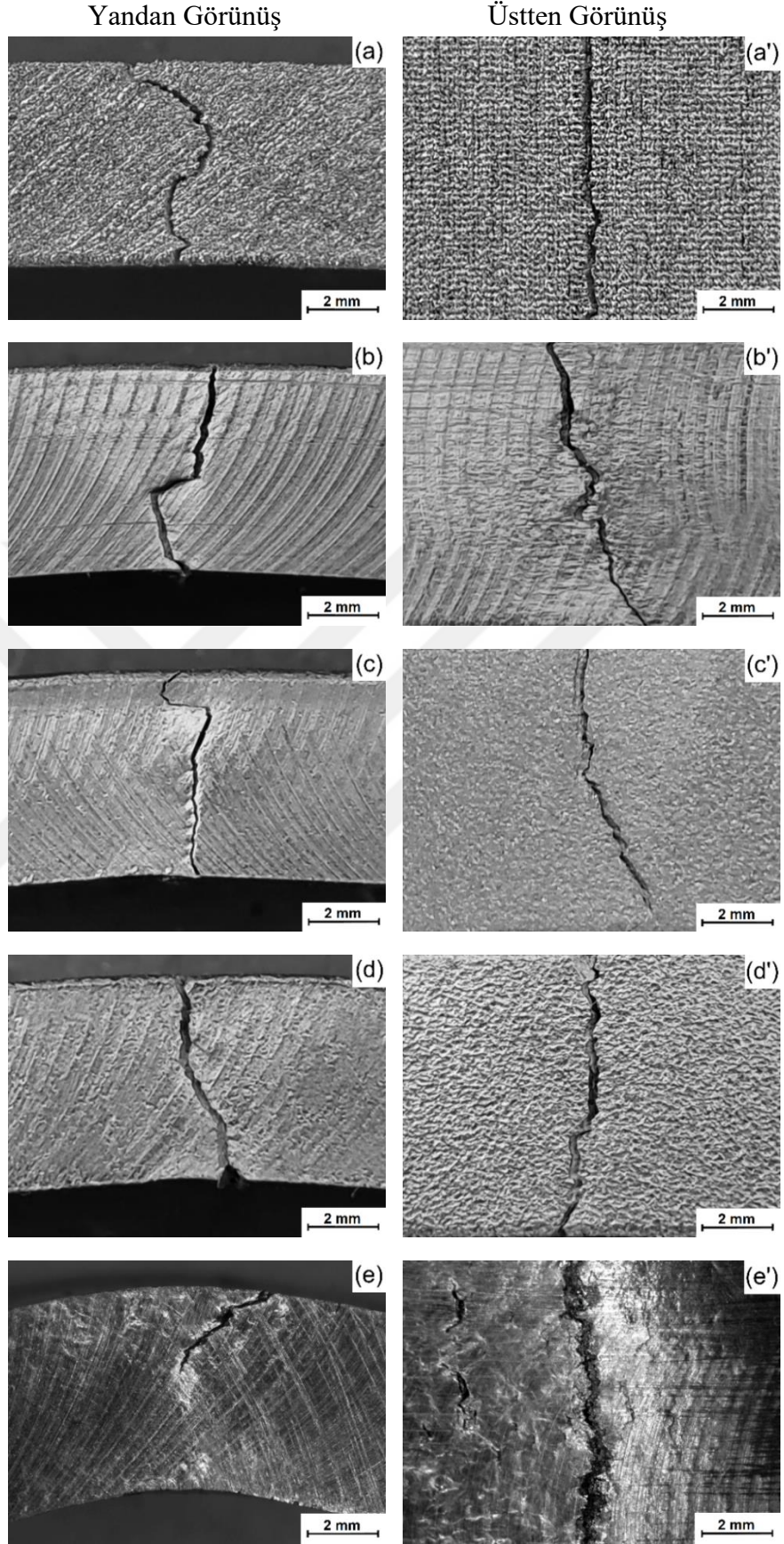
Gerçekleştirilen hesaplamalar neticesinde her numune grubu için (E-işlemsiz, EI: Tavlanmış + frezelenmiş, E: Frezelenmiş, ES1: Frezelenmiş + SP1, ES2: Frezelenmiş + SP1 + SP2) ayrı ayrı hesaplanmış $\sigma_{e, maks}$ verileri Şekil 4.35’de, oluşturulan σ_e - ϵ_e grafiği ise Şekil 4.36’da görülebilmektedir. Ayrıca her bir numune grubundan birer adet numunenin test sonundaki hasar bölgelerini yandan ve üstten gösteren görseller Şekil 4.37’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.35. Üç nokta eğme numunelerinin $\sigma_{e, maks}$ sonuçları



Şekil 4.36. Üç nokta eğme numunelerinin σ_e - ϵ_e grafiği

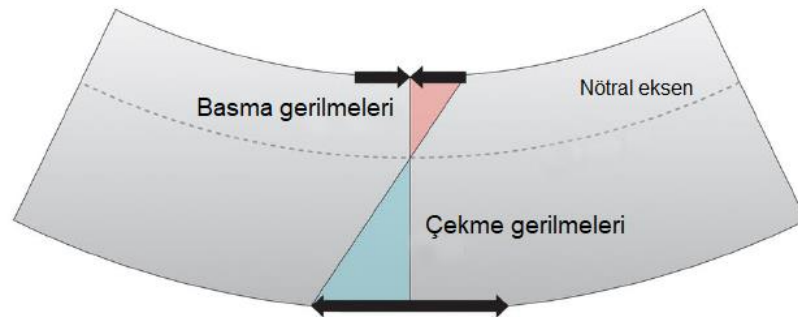


Şekil 4.37. Eğilme Numuneleri Hasar Görüntüleri (a), (a'): E-işlemsiz, (b), (b'): E, (c), (c'): ES1, (d), (d'): ES2, (e), (e'): EI

EI kodlu tavlama sonrası talaş kaldırılmış numuneler dışındaki tüm numuneler beklenildiği gibi test sırasında kırılmıştır. EI numunesinde ise çatlak başlamış ve ilerlemiş olmakla birlikte tüm yüzeye yayılmamıştır. Numunelere ait çatlak yayılma görüntüleri Şekil 4.37a-e'de görülebilmektedir.

Talaş kaldırılmış numunenin işlemsiz numuneye kıyasla ulaştığı $\sigma_{e,maks}$ verisinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum, talaş kaldırmaya bağlı olarak yüzeyde gerçekleşen dislokasyon yoğunluğu artışı ile açıklanabilmektedir. E numunesinin E-işlemsiz numunesine kıyasla ulaştığı daha yüksek ϵ_e verisi ise yine talaş kaldırma neticesinde yüzey pürüzlülüğünde elde edilen dramatik düşüş ile ilişkilidir. E-işlemsiz numunesinde ölçülen ortalama yüzey pürüzlülüğü R_a : 17,05 μm iken E numunesinde ölçülen değer R_a : 0,43 μm olmuştur. Yüzey pürüzlülüğünde yakalanan bu düşüş çentik etkisinin azalmasını sağladığından çatlak başlamasını ve ilerlemesini geciktirmiştir [199, 200, 207].

ES1 numunesinin ulaştığı $\sigma_{e,maks}$ verisinin E numunesine kıyasla yüksekliği; gerçekleştirilen SP1 işlemi neticesinde hasarın başladığı bölgede elde edilen daha yüksek basma tipi kalıntı gerilme, daha yüksek dislokasyon yoğunluğu ve bunlara ilaveten yüzeyde ve yüzeye yakın bölgelerde gerçekleşen tane incelmeleri ile ilişkilidir. Üç nokta eğme deneyinde numunede nötral eksenin üzerindeki bölümde basma gerilmeleri oluşmaktayken nötral eksenin altında kalan bölgede ise çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Çekme gerilmelerinin eğilme boyunca artması da çatlak başlamasını, ilerlemesini ve eğilme hasarını sırasıyla doğurmaktadır. Eğilme sırasında malzemede oluşan gerilmelerin şematik görüntüsü Şekil 4.38'de görülebilmektedir [197–200, 207, 208].



Şekil 4.38. Eğilme sırasında oluşan gerilmelerin dağılımları [208]

Bilyalı dövülmüş numunelerde bilyalı dövülmüş yüzey mesnetlere temas eden tarafa yerleştirilmiş olup bilyalı dövülmüş yüzeyde oluşan basma tipi kalıntı gerilmeler, eğilme sırasında bu bölgede oluşan çekme tipi kalıntı gerilmelerin olumsuz etkilerini azalttığından ve eğilmenin başlayabilmesi için öncelikle basma tipi kalıntı gerilmelerin aşılması gerektiğinden $\sigma_{e,maks}$ artışında etkili olmuşlardır [199, 200, 207].

ES1 numunesinin ulaştığı ϵ_e verisinin E numunesine kıyasla bir miktar daha yüksek olduğu görülmekte olup bu durum üzerinde etkili olan başlıca faktörün SP prosesi neticesinde oluşan tane incelmesi olduğu düşünülmektedir. Calcagnotto ve ark. [209] tarafından gerçekleştirilen çalışmada ferritik-martenzitik bir çelik malzeme üzerinde gerçekleştirilen 3 farklı ısıtma işlemle kaba taneli, ince taneli ve ultra ince taneli çekme ve çentik darbe numuneleri elde edilmiş, yapılan analizlerle tane incelmesinin çekme dayanımı, yüzde uzama ve tokluk üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Tane incelmesi arttıkça çekme dayanımında belirgin bir artış kaydedilirken yüzde uzamada belirgin bir değişiklik görülmemiş, toklukta ise yine belirgin bir artış kaydedilmiştir. Deney numunelerinde kırılma yüzeyleri de incelenmiş olup tane incelmesinin hem çekme testinde hem de çentik darbe testinde sünek kırılmayı desteklediği raporlanmıştır. Artan tokluk, tane incelmesine bağlı olarak sünek-gevrek geçiş sıcaklığında yaşanan düşüşle ilişkilendirilmiştir. İrizalp ve Saklakoğlu [210] tarafından gerçekleştirilen çalışmada 6061-T6 Al alaşımı üzerinde iki farklı şartta LSP prosesi gerçekleştirilmiş, işlemsiz ve iki farklı şartta LSP uygulanmış olmak üzere toplam 3 farklı grupta çekme numunesi elde edilmiştir. Çekme analizlerine ilaveten 3 grup numune üzerinde içyapı analizleri de gerçekleştirilmiştir. Yapılan LSP işlemleri numunelerde belirgin tane incelmesine neden olmuştur. Çekme analizleri incelendiğinde, yaşanan tane incelmesine bağlı olarak çekme dayanımında ve yüzde uzamada belirgin artış olduğu raporlanmıştır. LSP uygulanan numunelerin sünekliğinde görülen belirgin artış tane incelmesi ile ilişkilendirilmiştir. Uygulanan LSP prosesinin nano yapı malzeme oluşumunda etkili olduğu, yığın hata enerjisinde düşmeye yol açtığı, bunun etkisi altında içyapıda yığın hatalarının ve ikizlenmelerin arttığı, bu durumun da dislokasyon biriktirme kapasitesini artırarak süneklik artışına olumlu katkı sunduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada ES1 numunesinde görülen ϵ_e verisinin E numunesine kıyasla bir miktar yüksek oluşunda; SP etkisi altında oluşan tane incelmesine bağlı olarak İrizalp ve Saklakoğlu'nun çalışmasında [210] görülen

durumun etkili olmuş olabileceği, buna ilaveten gerçekleştirilen SP prosesinin yüzey ve yüzeyin hemen altında gözenek iyileşmesi/kapanması sağlayarak çatlak oluşumunu geciktirici, böylece çatlak başlamadan önceki şekil değişimini artırıcı bir etki sunduğu düşünülmektedir.

ES2 numunesinin ulaştığı $\sigma_{e,maks}$ verisinin ES1 numunesine kıyasla yüksekliği SP1'e ilaveten gerçekleştirilen SP2 işlemi neticesinde hasarın başladığı bölgede elde edilen daha yüksek basma tipi kalıntı gerilme, daha yüksek dislakasyon yoğunluğu ve daha yüksek tane incelmesi ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. ϵ_e verisinin ES1'de elde edilene kıyasla yüksekliği ise; çoklu SP sayesinde elde edilen daha yüksek tane incelmesi, daha fazla gözenek kapanması ve daha düşük yüzey pürüzlülüğü ile ilişkilendirilmektedir [197, 198, 200, 207, 208, 210].

Tavlama sonrası yüzeyinden talaş kaldırılan EI numunesinde ulaşılan $\sigma_{e,maks}$ seviyesi E-işlemsiz numunesinden bir miktar yüksek olmakla birlikte diğer numunelerden ise daha düşük olmuştur. EI numunesinde görülen $\sigma_{e,maks}$ seviyesinin E numunesine kıyasla düşüklüğü, E numunesindeki dislakasyon yoğunluğunun görece yüksekliği ve EI numunesinde tavlama neticesinde içyapıda gerçekleşen $\alpha+\beta$ dönüşümü ile açıklanabilmektedir. Boyutsal olarak çok daha dar olan α' martenzit iğnelerine kıyasla daha geniş yapıdaki α fazı dislokasyon hareketleri için daha uygun bir ortam sağlamaktadır. E-işlemsiz numunesine kıyasla daha yüksek $\sigma_{e,maks}$ verisinin ise EI numunesinde gerçekleştirilen talaş kaldırma ile elde edilen daha yüksek dislakasyon yoğunluğu ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir. EI numunesinde ϵ_e verisinde oldukça dramatik bir artış kaydedilmiştir. Bu durumun oluşumunda temel neden içyapıda gerçekleşen $\alpha+\beta$ dönüşümü olmakla birlikte düşük yüzey pürüzlülüğü seviyesi (R_a : 0,42 μm) de bunu destekleyen ikinci unsur olarak karşımıza çıkmaktadır [199, 200, 205, 211].

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Parametre çalışması neticesinde elde edilen sonuçları özetlemek gerekirse aşağıdaki hususlar sıralanabilmektedir:

- Kalıntı gerilme, çekme analizi ve bağl yoğunluk sonuçları analiz edildiğinde, SEY’de güç ve tarama hızı ikilisinin azalıp artmasının kalıntı gerilme, çekme dayanımı, yüzde uzama ve bağl yoğunluğun artıp azalması üzerinde doğrusal bir etki göstermediği görülmüştür.
- Çekme analizi, içyapı analizi ve bağl yoğunluk ölçüm sonuçlarının birbirleriyle tam bir korelasyon içinde oldukları, numunelerin içeriğindeki porozite miktarının çekme dayanımı ve yüzde uzama verileri üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.
- Tüm numunelerin içyapısının β tanesi içerisindeki α' martenzit fazından oluştuğu, tüm numunelerde farklı oranlarda mikro porozite, küresel porozite ve keskin çatlak benzeri porozite bulunduğu gözlenmiştir. En az porozite Cp numunesinde gözlenirken ergime eksikliği kusuru ise yalnızca Dp numunesinde gözlenmiştir.
- Cp numunesi bağl yoğunluk, çekme dayanımı ve yüzde uzama verileri bakımından en iyi sonuçları veren numune olmuştur.
- SEY’de azalan güç ve tarama hızının mikro sertlik verileri üzerinde belirgin bir değişiklik yaratmadığı gözlenmiştir.

İkincil işlem çalışması neticesinde elde edilen sonuçları özetlemek gerekirse aşağıdaki hususlar sıralanabilmektedir:

- Gerçekleştirilen tornalama ve frezeleme işlemleri numunelerin yüzey pürüzlülüğü verilerinde belirgin bir azalma sağlamıştır. Geleneksel SP işlemi, talaş kaldırılmış yüzeyin pürüzlülük değerlerinde bir miktar artışa neden olurken geleneksel SP işlemiyle aynı almen şiddetinde ancak daha küçük çaplı bilya ile gerçekleştirilen çoklu SP işlemi, geleneksel bilyalı dövülen yüzeyin yüzey pürüzlülüğünde bir miktar düşüş sağlamıştır.

- Gerçekleştirilen tavlama prosesi neticesinde içyapıda $\alpha+\beta$ dönüşümü gerçekleşmiştir. Tavlama sıcaklığı, tutma süresi ve soğuma hızına bağlı olarak α fazı içyapıda hem lamelar hem de küresel formda gözlenmiştir. Gerçekleştirilen tavlama tane büyümesine de neden olmuştur.
- Gerçekleştirilen SP işleminin numunelerin yüzeyinde ve yüzeye yakın derinliklerde gözenek kapanması/iyileşmesinde ve α' iğnelerinin boyutlarının düşmesinde etkili olduğu gözlenmiştir.
- Geleneksel ve çoklu SP işlemleri numunelerde 0-250 μm derinlik aralığında tane incilmesi ve pekleşmeye bağlı olarak belirgin bir sertlik artışına neden olmuştur. Beklendiği gibi bu aralıkta çoklu SP ile kaydedilen sertlik artışı geleneksel SP'de elde edilene kıyasla daha yüksek olmuştur. Isıl işlem neticesinde içyapıda gerçekleşen $\alpha+\beta$ dönüşümüne bağlı olarak ölçüm alınan tüm derinlik boyunca sertlikte belirgin bir azalma gözlenmiştir.
- Hem geleneksel hem de çoklu SP işlemleri yorulma çatlakları bakımından oldukça kritik bir derinlik olan 0-150 μm derinlik aralığında hem x hem de y eksenlerinde kalıntı gerilmelerin basma tipi olmasını sağlamıştır. Çoklu SP işlemiyle elde edilen basma tipi kalıntı gerilme seviyeleri, aynı derinliklerde geleneksel dövmeyle elde edilenlerden daha yüksek olmuştur. Diğer 5 yüzeyde frezeleme yapılırken x eksenine denk gelen yüzeyde frezeleme yapılmaması 50 μm derinlikte kalıntı gerilmenin basmadan çekme tipine dönüşmesiyle, 100 μm derinlikte ise oldukça yüksek seviyede çekme tipi kalıntı gerilmeyle sonuçlanmıştır.
- Y, YS2 ve YI numuneleri sırasıyla 300, 300 ve 350 MPa'da yorulma sınırına ulaşmıştır. YS2 numunesi ile Y numunesi karşılaştırıldığında gerçekleştirilen çoklu SP prosesinin pek çok gerilme değerinde yorulma ömrünü yükselttiği ancak yorulma limitini değiştiremediği görülmüştür. Bu durumun oluşmasındaki en etkili faktörün YS2 numunelerinde SP'nin etkili olamadığı 250 μm derinlikten daha derinde bulunan iç kusurlar olduğu düşünülmektedir. Y ve YI numunelerinde yorulma çatlakları

başlatan kusurun bir yüzey kusuru, yüzeyle temas halindeki kusur veya 0-250 µm derinlikte bulunan bir iç kusur olduğu gözlenmiştir. Yorulma dayanımı açısından en iyi sonuçlar YI numunelerinde elde edilmiştir. Bazı bilyalı dövülmüş numunelerin yorulma kırılması yüzeylerinde balık gözü yapısı gözlenmiştir.

- Gerçekleştirilen üç nokta eğme analizleri neticesinde en düşük eğilme dayanımı, E-işlemsiz numunesinde elde edilirken en yüksek eğilme dayanımına ulaşan numune ise frezeleme sonrası SP1+SP2 uygulanan ES2 numunesi olmuştur. Analiz neticesinde diğer dört numune tamamen kırılırken tavlama sonrası frezelenen EI numunesinde tam kırılma gerçekleşmemiştir. Tavlama ile içyapıda gerçekleşen $\alpha+\beta$ dönüşümü temel neden olmak üzere içyapı dönüşümüne ve düşük yüzey pürüzlülüğü seviyelerine bağlı olarak diğer dört numuneyle karşılaştırıldığında EI numunesinde $\% \epsilon_e$ verisinde belirgin bir artış kaydedilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışma sonuçları da dikkate alınarak aşağıda yer alan öneriler sunulmaktadır:

- Tavlama sonrası talaş kaldırılmış sonrasında da çoklu bilyalı dövülmüş yorulma numunelerinin yorulma analizlerinin gerçekleştirilmesinin,
- Gerçekleştirilen SP'nin 250 µm derinliğe kadar etkili olabildiğinin görülmesi nedeniyle daha yüksek derinliklerde basma tipi kalıntı gerilme oluşturabilmesi bakımından etkili bir yöntem olan LSP'nin yorulma ömründe nasıl bir etki yaratacağının araştırılmasının,
- SLM prosesi ile üretilen ürünlerde özellikle gözenek kapanması sağlaması bakımından etkili bir ısıtılma prosesi olan HIP'in yorulma ömrüne sağlayacağı katkının araştırılmasının,
- Ön ısıtılmalı üretimin kalıntı gerilme ve yorulma dayanımı üzerindeki etkilerinin araştırılmasının, gerçekleştirilen çalışmaya katkı sağlayabilecek ilave çalışmalar olabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Donachie, M.J. Titanium : A Technical Guide. ASM International, Ohio, USA, 2000, 381 s.
2. Cui, C., Hu, B. M., Zhao, L., Liu, S. Titanium alloy production technology, market prospects and industry development. *Materials & Design*. 2011, 32(3), 1684–1691.
3. Yang, X., Li, Y., Duan, M., Jiang, W., Chen, D., Li, B. An investigation of ductile fracture behavior of Ti6Al4V alloy fabricated by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022, 890, 161926.
4. Zheng, Z., Jin, X., Bai, Y., Yang, Y., Ni, C., Lu, W. F. Microstructure and anisotropic mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V alloy under different scanning strategies. *Material Science & Engineering A*. 2022, 831, 142236.
5. Huang, S., Sun, B., Guo, S. Microstructure and property evaluation of TA15 titanium alloy fabricated by selective laser melting after heat treatment. *Optics & Laser Technology*. 2021, 144, 107422.
6. Brandl, E., Baufeld, B., Leyens, C., Gault, R. Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: Comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications. *Physics Procedia*. 2010, 5, 595–606.
7. Baufeld, B., Brandl, E., Van Der Biest, O. Wire based additive layer manufacturing: Comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, 211(6), 1146–1158.
8. Shiomi, M., Osakada, K., Nakamura, K., Yamashita, T., Abe, F. Residual stress within metallic model made by selective laser melting. *CIRP Annals*. 2004, 53(1), 195-198.
9. Ahmed, T., Rack, H.J. Phase transformations during cooling in $\alpha+\beta$ titanium alloys. *Materials Science & Engineering A*. 1998, 243, 206–211.
10. Simonelli, M., Tse, Y.Y., Tuck, C. Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti-6Al-4V. *Materials Science & Engineering A*. 2014, 616, 1–11.
11. Rafi, H.K., Karthik, N.V., Gong, H., Starr, T.L., Stucker, B.E. Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2013, 22, 3872–3883.
12. Liu, S., Shin, Y.C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Materials Design*. 2019, 164, 107552.
13. Wycisk, E., Emmelmann, C., Siddique, S., Walther, F. High cycle fatigue (HCF) performance of Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting. *Advanced Materials Research*. 2013, 816–817, 134–139.
14. Mercelis, P., Kruth, J.P. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*. 2006, 12(5), 254-265.
15. Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H.A. On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance. *International Journal of Fatigue*. 2013, 48, 300-307.

16. Qiu, C., Adkins, N.J.E., Attallah, M.M. Microstructure and tensile properties of selectively laser-melted and of HIPed laser-melted Ti-6Al-4V. *Materials Science & Engineering A*. 2013, 578, 230–239.
17. Aslan, M.A. Titanyum Alaşım Yüzeyinin Farklı Kaplama Teknikleri ile Kaplanmasının Titanyum-Porselen Bağlantısına Etkisinin İncelenmesi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Protetik Diş Tedavisi Ana Bilim Dalı, Samsun, 2013, 120 s. (Doktora Tezi).
18. Durdu, S. Plazma Elektrolitik Oksidasyon Yöntemiyle Ti6Al4V Alaşımı Yüzeyine Hidroksiapatit Bazlı Biyoseramik Fazlarının Kaplanması ve Karakterizasyonu. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kocaeli, 2014, 201 s. (Doktora Tezi).
19. Avcu, E. Titanyum Alaşımlarının Partikül Erozyonu ile Pürüzlendirilmesi ve Aşındırılması İşlemlerinin Optimizasyonu. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kocaeli, 2013, 241 s. (Doktora Tezi).
20. Weissbach, W. Malzeme Bilgisi ve Muayenesi. Birsen Yayınevi, İstanbul, 1977, 336 s.
21. Henriques, V.A.R., Galvani, E.T., Petroni, S.L.G., Paula, M.S.M., Lemos, T.G. Production of Ti-13Nb-13Zr alloy for surgical implants by powder metallurgy. *Journal of Materials Science*. 2010, 45, 5844–5850.
22. Anselme, K., Bigerelle, M. Topography effects of pure titanium substrates on human osteoblast long-term adhesion. *Acta Biomaterialia*. 2005, 1(2), 211–222.
23. Veiga, C., Davim, J.P., Loureiro, A.J.R. Properties and applications of titanium alloys: A brief review. *Rev Advanced Materials Science*. 2012, 32, 133–148.
24. Citeau, A., Guicheux, J., Vinatier, C., Layrolle, P., Nguyen, T.P., Pilet, P. In vitro biological effects of titanium rough surface obtained by calcium phosphate grid blasting. *Biomaterials*. 2005, 26(2), 157–165.
25. Pattanaik, B., Pawar, S., Pattanaik, S. Biocompatible implant surface treatments. *Indian Journal of Dental Research*. 2012, 23(3), 398–406.
26. Çalışkan, N. Antibakteriyel Dental Titanyum İmplantların Hazırlanması ve Karakterizasyonu. Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nanoteknoloji ve Nanotıp Ana Bilim Dalı, Ankara, 2012, 90 s. (Yüksek Lisans Tezi).
27. Dikici, T. Biyomedikal Uygulamalar İçin Titanyum İmplantların Mikro ve Nano Yapılı Titanyum Oksit Filmler ile Kaplanması ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İzmir, 2016, 158 s. (Doktora Tezi).
28. Ahmed, A.A., Mhaede, M., Wollmann, M., Wagner, L. Effect of micro shot peening on the mechanical properties and corrosion behavior of two microstructure Ti-6Al-4V alloy. *Applied Surface Science*. 2016, 363, 50–58.
29. Dental implant. URL: <https://selfiesmiledentalclinic.com/blog/dental-implant/> (Erişim Tarihi: 05.10.2022).
30. What your hip replacement implants are made of? URL: <https://www.healthvantis.ca/2019/11/06/hip-replacement-implants/> (Erişim Tarihi: 05.10.2022).
31. 3D Printing industry. URL: <https://3dprintingindustry.com/news/tu-eindhoven-demonstrates-3d-printed-stents-paediatric-heart-surgery-113291/> (Erişim Tarihi: 05.10.2022).

32. Yücel, Z. Lazer ve Kumlama Yöntemleri ile Ti6Al4V Alaşımında Fonksiyonel Yüzeylerin Oluşturulması. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kocaeli, 2008, 129 s. (Yüksek Lisans Tezi).
33. Hacısalihoğlu, İ. Aşırı Plastik Deformasyon Uygulanmış Saf Titanyum Üzerinde Hidroksiapatit Oluşturulması ve Elektrokimyasal Davranışı. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Erzurum, 2011, 66 s. (Yüksek Lisans Tezi).
34. Leyens, C., Peters, M. Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications. Wiley; 2003, 513 s.
35. Froes, F.H., Allen, P.G., Niinomi, M., Non-Aerospace Applications of Titanium. TMS, Warrendale, 1998, 362 s.
36. Jaffee, R.I., Promisel, N.E. The Science, Technology and Application of Titanium. Pergamon, United Kingdom, 1970, 1202 s.
37. Froes, F.H. Titanium: Physical Metallurgy, Processing, and Applications. ASM International, 2015.
38. Joshi, V.A. Titanium Alloys: An Atlas of Structures and Fracture Features. Taylor&Francis Group, Boca Raton, 2006, 248 s.
39. Lütjering, G. Influence of processing on microstructure and mechanical properties of (α + β) titanium alloys. Materials Science & Engineering A. 1998, 243(1-2), 32-45.
40. Damkroger, B.K., Edwards, G.R. Continuous cooling transformation kinetics in alpha-beta titanium alloys. Simulation and Theory of Evolving Microstructures. 1990, 129–150.
41. Babu, B. Physically Based Model for Plasticity and Creep of Ti-6Al-4V. Luleå University of Technology, Sweden, 2008, 94 s. (Lisans Tezi).
42. Dąbrowski, R. The kinetics of phase transformations during continuous cooling of the Ti6Al4V alloy from the single-phase β range. Archives of Metallurgy and Materials. 2011, 56(3), 703-707.
43. Yang, J., Yu, H., Yin, J., Gao, M., Wang, Z., Zeng, X. Formation and control of martensite in Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting. Materials & Design. 2016, 108, 308–318.
44. Lütjering, G., Williams, J.C. Titanium. Springer, Berlin, 2003, 442 s.
45. Lekoadi, P., Tlotleng, M., Annan, K., Maledi, N., Masina, B. Evaluation of heat treatment parameters on microstructure and hardness properties of high-speed selective laser melted Ti6Al4V. Metals. 2021, 11(2), 11020255.
46. ASTM F1108-14. Standard Specification for Titanium-6Aluminum-4Vanadium Alloy Castings for Surgical Implants. ASTM International, 2014.
47. ASTM F136-13. Standard Specification for Wrought Titanium-6Aluminum-4Vanadium ELI. ASTM International, 2013.
48. ASTM F2924-14. Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion, ASTM International, 2014.
49. Ezugwu, E.O., Wang, Z.M. Titanium alloys and their machinability - a review. Journal of Materials Processing Technology. 1997, 68(3), 262-274.
50. Moiseyev, V.N. Titanium Alloys: Russian Aircraft and Aerospace Applications. CRC Pres, 2006, 216 s.
51. Ribeiro, M. V., Moreira, M.R.V., Ferreira, J.R. Optimization of titanium alloy (6Al-4V) machining. Journal of Materials Processing Technology. 2003, 143, 458-463.

52. Williams, J.C., Belov, A.F. Titanium and Titanium Alloys. Springer, New York, 1982, 1819 s.
53. Boyer, R., Welsch, G., Collings, E.W. Materials Properties Handbook: Titanium Alloys. ASM International, USA, 1994, 1169 s.
54. Brooks, R.C. Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys. ASM International, USA, 1982.
55. Donachie M.J., Matthew J. Titanium: A Technical Guide. ASM International, USA 1988, 386 s.
56. Ensarioğlu, C., Çakır, M.C. Titanyum ve alarının işlenebilirlik etüdü. Mühendis ve Makina. 2005, 46(546), 36-46.
57. Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., Emmelmann, C. Additive manufacturing of metals. Acta Materialia 2016, 117, 371-392.
58. Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E.P., Biamino, S., Lombardi, M., Atzeni, E. Overview on additive manufacturing technologies. Proceedings of the IEEE. 2017, 105(4), 593-612.
59. Dzugbawu, T.C., Preez, W.B. Additive manufacturing of ti-based intermetallic alloys: A review and conceptualization of a next-generation machine. Materials. 2021, 14(5), 14154317.
60. Kok, Y., Tan, X.P., Wang, P., Nai, M.L.S., Loh, N.H., Liu, E. Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review. Materials & Design 2018, 139, 565-586.
61. Bikas, H., Stavropoulos, P., Chrysosouris, G. Additive manufacturing methods and modeling approaches: A critical review. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2016, 83, 389-405.
62. Yap, C.Y., Chua, C.K., Dong, Z.L., Liu, Z.H., Zhang, D.Q., Loh, L.E. Review of selective laser melting: Materials and applications. Applied Physics Reviews. 2015, 2, 4935926.
63. Muller, P., Mognol, P., Hascoet, J.Y. Modeling and control of a direct laser powder deposition process for functionally graded materials (FGM) parts manufacturing. Journal of Materials Processing Technology. 2013, 213(5), 685-692.
64. Karunakaran, K.P., Suryakumar, S., Pushpa, V., Akula, S. Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2010, 26(5), 490-499.
65. Friel, R.J., Harris, R.A. Ultrasonic additive manufacturing A hybrid production process for novel functional products. Procedia CIRP. 2013, 6, 35-40.
66. Dehoff, R.R., Babu. S.S. Characterization of interfacial microstructures in 3003 aluminum alloy blocks fabricated by ultrasonic additive manufacturing. Acta Materialia. 2010, 58(13), 4305-4315.
67. King, W., Anderson, A.T., Ferencz, R.M., Hodge, N.E., Kamath, C., Khairallah, S.A. Overview of modelling and simulation of metal powder bed fusion process at Lawrence Livermore National Laboratory. Materials Science and Technology. 2015, 31(8), 957-968.
68. Deckard, C.R. Method and Apparatus for Producing Parts by Selective Sintering. US Patent No. 4,863,538. Washington DC, US Patent and Trademark Office, 1989.
69. 3D Printing Processes - Powder Bed Fusion (Part 5/8). URL: <https://www.engineersgarage.com/3d-printing-processes-powder-bed-fusion-part-5-8/> (Erişim Tarihi: 05.10.2022).

70. Bayram A. Seçici Lazer Sinterleme Yöntemi ile Katmanlı Olarak Üretilmiş Termoplastik ve Kompozit Malzemelerin Bilgisayar Destekli Analizi İçin Malzeme Modelinin Oluşturulması. Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı, Bursa, 2019, 63 s. (Yüksek Lisans Tezi).
71. Das, S., Wohler, M., Beaman, J.J., Bourell, D.L. Producing metal parts with selective laser sintering/hot isostatic pressing. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 1998, 50, 17-20.
72. Duda, T., Raghavan, L.V. 3D Metal Printing Technology. 17th IFAC Conference on International Stability, Technology and Culture TECIS, 26-28 October 2016, Durres, Albania (Bildiriler Kitabı, 103-110).
73. Martelli, N., Serrano, C., Van Den Brink, H., Pineau, J., Prognon, P., Borget, I. Advantages and disadvantages of 3-dimensional printing in surgery: A systematic review. *Surgery*. 2016, 159(6), 1485-1500.
74. Simchi, A., Petzoldt, F., Pohl, H. On the development of direct metal laser sintering for rapid tooling. *Journal of Materials Processing Technology* 2003, 141(3), 319-328.
75. Kurzynowski, T., Chlebus, E., Kuźnicka, B., Reiner, J. Parameters in selective laser melting for processing metallic powders. *SPIE LASE*, 6 February 2012, California (Bildiriler Kitabı, 823914).
76. Amato, K.N., Gaytan, S.M., Murr, L.E., Martinez, E., Shindo, P.W., Hernandez, J. Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting. *Acta Materialia*. 2012, 60(5), 2229-2239.
77. Na, T.W., Kim, W.R., Yang, S.M., Kwon, O., Park, J.M., Kim, G.H. Effect of laser power on oxygen and nitrogen concentration of commercially pure titanium manufactured by selective laser melting. *Materials Characterization*. 2018, 143, 110-117.
78. Manfredi, D., Calignano, F., Krishnan, M., Canali, R., Ambrosio, E.P., Atzeni, E. From powders to dense metal parts: Characterization of a commercial AlSiMg alloy processed through direct metal laser sintering. *Materials*. 2013, 6(3), 856-869.
79. Zhou, P.F., Xiao, D.H., Wu, Z., Ou, X.Q. Al_{0.5}FeCoCrNi high entropy alloy prepared by selective laser melting with gas-atomized pre-alloy powders. *Materials Science & Engineering A*. 2019, 739, 86-89.
80. Croteau, J.R., Griffiths, S., Rossell, M.D., Leinenbach, C., Kenel, C., Jansen, V. Microstructure and mechanical properties of Al-Mg-Zr alloys processed by selective laser melting. *Acta Materialia*. 2018, 153, 35-44.
81. Li, X.P., Ji, G., Chen, Z., Addad, A., Wu, Y., Wang, H.W. Selective laser melting of nano-TiB₂ decorated AlSi10Mg alloy with high fracture strength and ductility. *Acta Materialia*. 2017, 129, 183-193.
82. Sing, S.L., Yeong, W.Y., Wiria, F.E. Selective laser melting of titanium alloy with 50 wt% tantalum: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016, 660, 461-470.
83. Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H.A. On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance. *International Journal of Fatigue*. 2013, 48, 300-307.
84. Milberg, J., Sigl, M. Electron beam sintering of metal powder. *Production Engineering*. 2008, 2, 117-122.

85. Yusuf, S.M., Cutler, S., Gao, N. Review: The impact of metal additive manufacturing on the aerospace industry. *Metals*. 2019, 9(12), 9121286.
86. Murr, L.E., Gaytan, S.M., Ceylan, A., Martinez, E., Martinez, J.L., Hernandez, D.H. Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting. *Acta Materialia*. 2010, 58(5), 1887-1894.
87. Liu, Y.J., Li, S.J., Wang, H.L., Hou, W.T., Hao, Y.L., Yang, R. Microstructure, defects and mechanical behavior of beta-type titanium porous structures manufactured by electron beam melting and selective laser melting. *Acta Materialia*. 2016, 113, 56-67.
88. Cordero, Z.C., Meyer, H.M., Nandwana, P., Dehoff, R.R. Powder bed charging during electron-beam additive manufacturing. *Acta Materialia*. 2017, 124, 437-445.
89. Körner, C. Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting - a review. *International Materials Reviews*. 2016, 61(5), 361-377.
90. Galati, M., Iuliano, L. A literature review of powder-based electron beam melting focusing on numerical simulations. *Additive Manufacturing*. 2018, 19, 1-20.
91. Feenstra, D.R., Banerjee, R., Fraser, H.L., Huang, A., Molotnikov, A., Birbilis, N. Critical review of the state of the art in multi-material fabrication via directed energy deposition. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 2021, 25(4), 100924.
92. Dass, A., Moridi, A. State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design. *Coatings*. 2019, 9(7), 418.
93. Chen, Y., Zhang, X., Parvez, M.M., Liou, F. A review on metallic alloys fabrication using elemental powder blends by laser powder directed energy deposition process. *Materials*. 2020, 13(16), 3562.
94. Wilson, J.M., Piya, C., Shin, Y.C., Zhao, F., Ramani, K. Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2014, 80, 170-178.
95. Liu, M., Kumar, A., Bukkapatnam, S., Kuttolamadom, M. A review of the anomalies in directed energy deposition (DED) processes & potential solutions - Part quality & defects. 49th SME North American Manufacturing Research Conference, 2021, Cincinnati (Bildiriler Kitabı, 507-518).
96. Sürmen, H.K. Eklemeli İmalat (3B Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*. 2019, 24(2), 373-392.
97. Gonzalez, J.A., Mireles, J., Lin, Y., Wicker, R.B. Characterization of ceramic components fabricated using binder jetting additive manufacturing technology. *Ceramics International*. 2016, 42(9), 10559-10564.
98. Molitch-Hou M. Overview of additive manufacturing process. *Additive Manufacturing Materials, Processes, Quantifications and Applications*. 2018, 1-38.
99. Cawley, J.D., Heuer, A.H., Newman, W.S., Mathewson, B.B. Computer-aided manufacturing of laminated engineering materials. *American Ceramic Society Bulletin*. 1996.
100. Sriraman, M.R., Babu, S.S., Short, M. Bonding characteristics during very high power ultrasonic additive manufacturing of copper. *Scripta Materialia*. 2010, 62(8), 560-563.

101. Wimpenny, D.I., Bryden, B., Pashby, I.R. Rapid laminated tooling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, 138(1-3), 214-218.
102. White, D.R. Ultrasonic consolidation of aluminum tooling. *Advanced Materials & Processes*. 2003, 161(1), 1-15.
103. Bournias-Varotsis, A., Friel, R.J., Harris, R.A., Engstrøm, D.S. Ultrasonic additive manufacturing as a form-then-bond process for embedding electronic circuitry into a metal matrix. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018, 32, 664-675.
104. Kim, T. Effects of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Electron Beam Additively Manufactured Ti6Al4V with Powder Reuse. University of Washington, Materials Science and Engineering, Washington, 2020, 123 s. (Yüksek Lisans Tezi).
105. Unal, O., Varol, R. Surface severe plastic deformation of AISI 304 via conventional shot peening, severe shot peening and repeening. *Applied Surface Science*. 2015, 351, 289-295.
106. Liu, Y.G., Li, H.M., Li, M.Q. Characterization of surface layer in TC17 alloy treated by air blast shot peening. *Materials & Design*. 2015, 65, 120-126.
107. Maleki, E., Unal, O., Amanov, A. Novel experimental methods for the determination of the boundaries between conventional, severe and over shot peening processes. *Surfaces and Interfaces*. 2018, 13, 233-254.
108. Unal, O., Varol, R. Almen intensity effect on microstructure and mechanical properties of low carbon steel subjected to severe shot peening. *Applied Surface Science*. 2014, 290, 40-47.
109. Miao, H.Y. Numerical and Theoretical Study of Shot Peening and Stress Peen Forming Process. Montreal University, Mechanical Engineering, Montreal, 2010, 165 s. (Doktora Tezi).
110. Maawad, E.K.S. Residual Stress Analysis and Fatigue Behavior of Mechanically Surface Treated Titanium Alloys. Clausthal Technology University, Clausthal-Zellerfeld, 2013, 111 s. (Doktora Tezi).
111. Nalla, R.K., Altenberger, I., Noster, U., Liu, G.Y., Scholtes, B., Ritchie, R.O. On the influence of mechanical surface treatments-deep rolling and laser shock peening-on the fatigue behavior of Ti-6Al-4V at ambient and elevated temperatures. *Materials Science & Engineering A*. 2003, 355(1-2), 216-230.
112. Montross, C.S., Wei, T., Ye, L., Clark, G., Mai, Y.W. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review. *International Journal of Fatigue*. 2002, 24(10), 1021-1036.
113. Clauer, A.H., Lahrman, D.F. Laser Shock Peening for Fatigue Resistance. ASME 2000 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 5-10 November, 2000, Orlando, Florida (Bildiriler Kitabı, 75 s.).
114. Gariépy, A., Larose, S., Perron, C., Bocher, P., Lévesque, M. On the effect of the orientation of sheet rolling direction in shot peen forming. *Journal of Materials Processing Technology*. 2013, 213(6), 926-938.
115. SAE AMS-S-13165. Shot Peening of Metal Parts. SAE International, 2007.
116. SAE J2441. Shot Peening. SAE International, 2015.
117. Nguyen, V.B., Poh, H.J., Zhang, Y.W. Predicting shot peening coverage using multiphase computational fluid dynamics simulations. *Powder Technology*. 2014, 256, 100-112.
118. Trung, P.Q., Khun, N.W., Butler, D.L. 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*. 2016, 4, 045001.
119. Frija, M., Hassine, T., Fathallah, R., Bouraoui, C., Dogui A. Finite element modelling of shot peening process: Prediction of the compressive residual stresses, the plastic deformations and the surface integrity. *Materials Science & Engineering A*. 2006, 426(1-2), 173-180.
 120. Barış, F. 50CrV4 Çeliğin Yüzeyinde Oluşturulan Yapay Yüzey Kusurlarına Bilyalı Dövme İşleminin Etkilerinin İncelenmesi. Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Manisa, 2020, 90 s. (Yüksek Lisans Tezi).
 121. Ünal O. Bilyalı Dövme İşleminin Tane Boyutuna Etkisinin Deneysel İncelenmesi. Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bartın, 2011, 104 s. (Yüksek Lisans Tezi).
 122. Wei, K., Gao, M., Wang, Z., Zeng, X. Effect of energy input on formability, microstructure and mechanical properties of selective laser melted AZ91D magnesium alloy. *Materials Science & Engineering A*. 2014, 611, 212-222.
 123. Zhang, H., LeBlanc, S. Additive Manufacturing of High-performance Metals and Alloys - Modeling and Optimization. IntechOpen, London, 154 s.
 124. Ali, H., Ghadbeigi, H., Mumtaz, K. Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V. *Materials Science & Engineering A*. 2018, 712, 175-187.
 125. Valente, E.H., Gundlach, C., Christiansen, T.L., Somers, M.A.J. Effect of scanning strategy during selective laser melting on surface topography, porosity, and microstructure of additively manufactured Ti-6Al-4V. *Applied Science*. 2019, 9(24), 5554.
 126. Sun, W., Ma, Y., Huang, W., Zhang, W., Qian, X. Effects of build direction on tensile and fatigue performance of selective laser melting Ti6Al4V titanium alloy. *International Journal of Fatigue*. 2020, 130, 105260.
 127. Yadroitsev, I., Krakhmalev, P., Yadroitsava, I. Selective laser melting of Ti6Al4V alloy for biomedical applications: Temperature monitoring and microstructural evolution. *Journal of Alloys Compounds*. 2014, 583, 404-409.
 128. Manvatkar, V., De, A., DebRoy, T. Spatial variation of melt pool geometry, peak temperature and solidification parameters during laser assisted additive manufacturing process. *Materials Science and Technology*. 2015, 31(8), 924-930.
 129. Ali, H., Ghadbeigi, H., Mumtaz, K. Residual stress development in selective laser-melted Ti6Al4V: a parametric thermal modelling approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, 97, 2621-2633.
 130. Ali, H., Ghadbeigi, H., Mumtaz, K. Processing parameter effects on residual stress and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2018, 27, 4059-4068.
 131. Xiao, Z., Chen, C., Hu, Z., Zhu, H., Zeng, X. Effect of rescanning cycles on the characteristics of selective laser melting of Ti6Al4V. *Optics & Laser Technology*. 2020, 122, 105890.
 132. Mishurova, T., Cabeza, S., Artzt, K., Haubrich, J., Klaus, M., Genzel, C. An assessment of subsurface residual stress analysis in SLM Ti-6Al-4V. *Materials*. 2017, 10(4), 348.

133. Ilie, A., Ali, H., Mumtaz, K. In-built customised mechanical failure of 316L components fabricated using selective laser melting. *Technologies*. 2017, 5(1), 9.
134. Xiao, Z., Chen, C., Zhu, H., Hu, Z., Nagarajan, B., Guo, L. Study of residual stress in selective laser melting of Ti6Al4V. *Materials and Design*. 2020, 193, 108846.
135. Benedetti, M., Torresani, E., Leoni, M., Fontanari, V., Bandini, M., Pederzoli, C. The effect of post-sintering treatments on the fatigue and biological behavior of Ti-6Al-4V ELI parts made by selective laser melting. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2017, 71, 295-306.
136. Denti, L., Bassoli, E., Gatto, A., Santecchia, E., Mengucci, P. Fatigue life and microstructure of additive manufactured Ti6Al4V after different finishing processes. *Materials Science and Engineering A*. 2019, 755, 1-9.
137. Kahlin, M., Ansell, H., Basu, D., Kerwin, A., Newton, L., Smith, B. Improved fatigue strength of additively manufactured Ti6Al4V by surface post processing. *International Journal of Fatigue*. 2020, 134, 105497.
138. Leuders, S., Meiners, S., Wu, L., Taube, A., Tröster, T., Niendorf, T. Structural components manufactured by selective laser melting and investment casting-impact of the process route on the damage mechanism under cyclic loading. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017, 248, 130-142.
139. Xie, L., Wen, Y., Wang, L., Jiang, C., Ji, V. Characterization on surface properties of Ti-6Al-4V after multiple shot peening treatments. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 2016, 138(4), 041005.
140. Zhang, Q., Duan, B., Zhang, Z., Wang, J., Si, C. 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*. 2021, 11, 1090–1099.
141. Yu, H., Li, F., Wang, Z., Zeng, X. Fatigue performances of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy: Influence of surface finishing, hot isostatic pressing and heat treatments. *International Journal of Fatigue*. 2019, 120, 175–83.
142. ASTM B348. Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Bars and Billets. ASTM International, 2021.
143. ASTM E8/E8M-16ae1. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM International, 2021.
144. ISO 26910-1:2009. Springs-Shot Peening-Part 1: General Procedures. International Organization for Standardization, 2009.
145. ASTM E466-15. Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials. ASTM International, 2015.
146. ASTM E290-14. Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility. ASTM International, 2014.
147. Gong, H., Dilip, J.J.S., Yang, L., Teng, C., Stucker, B. Influence of small particles inclusion on selective laser melting of Ti-6Al-4V powder. 4th International Conference on Mechanical, Materials and Manufacturing. 25–27 October, 2017, Atlanta (Bildiriler Kitabı, 012024).
148. Hernández, D.G. Mechanical behaviour assessment of the Ti6Al4V alloy obtained by additive manufacturing towards aeronautical industry. Técnico Lisboa University, Aeronautical Engineering, Lisboa, 2014, 62 s. (Yüksek Lisans Tezi).

149. Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J.P., Van Humbeeck J. Heat treatment of Ti6Al4V produced by selective laser melting: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*. 2012, 541, 177–85.
150. Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Humbeeck, J.V. Kruth J.P. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Acta Materialia* 2010, 58(9), 3303-3312.
151. Wu, M.W., Chen, J.K., Tsai, M.K., Wang, P., Cheng, T.L., Lin, B.H. Uniaxial compression properties and compression fatigue performance of selective laser melted Ti-6Al-4V cellular structure. *Metals and Materials International*. 2022, 28, 132-144.
152. Sun, J., Zhu, X., Qiu, L., Wang, F., Yang, Y., Guo, L. The microstructure transformation of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy. *Materials Today Communication*. 2019, 19, 277-285.
153. Gu, D., Hagedorn, Y.C., Meiners, W., Meng, G., Batista, R.J.S., Wissenbach, K. Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium. *Acta Materialia* 2012, 60(9), 3849-3860.
154. Murr, L.E., Quinones, S.A., Gaytan, S.M., Lopez, M.I., Rodela, A., Martinez, E.Y. Microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2009, 2(1), 20-32.
155. Kasperovich, G., Haubrich, J., Gussone, J., Requena, G. Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting. *Materials and Design*. 2016, 105, 160-170.
156. Singla, A.K., Banerjee, M., Sharma, A., Singh, J., Bansal, A., Gupta, M.K. Selective laser melting of Ti6Al4V alloy: Process parameters, defects and post-treatments. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021, 64, 161-187.
157. Meng, L.X., Yang, H.J., Ben, D.D., Ji, H.B., Lian, D.L., Ren, D.C. Effects of defects and microstructures on tensile properties of selective laser melted Ti6Al4V alloys fabricated in the optimal process zone. *Materials Science and Engineering A*. 2022, 830, 142294.
158. Mathe, N.R., Tshabalala, L.C., Hoosain, S., Motibane, L., du Plessis, A. The effect of porosity on the mechanical properties of Ti-6Al-4V components manufactured by high-power selective laser melting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021, 115, 3589-3597.
159. Han, J., Yang, J., Yu, H., Yin, J., Gao, M., Wang, Z. Microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V dependence on laser energy density. *Rapid Prototyping Journal*. 2017, 23(2), 217-226.
160. Beyl, K., Mutombo, K., Kloppers, C.P. Tensile properties and microstructural characterization of additive manufactured, investment cast and wrought Ti6Al4V alloy. *Conference of the South African Advanced Materials Initiative*, 22–25 October, 2019, Vanderbijlpark, South Africa (Bildiriler Kitabı, 012023).
161. Attar, H., Calin, M., Zhang, L.C., Scudino, S., Eckert, J. Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium. *Materials Science and Engineering A*. 2014, 593, 170-177.
162. Wysocki, B., Maj, P., Sitek, R., Buhagiar, J., Kurzydłowski, K.J., Świeszkowski, W. Laser and electron beam additive manufacturing methods of fabricating titanium bone implants. *Applied Sciences*. 2017, 7(7), 657.

163. Vilaro, T., Colin, C., Bartout, J.D. As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2011, 42, 3190-3199.
164. Do, D.K., Li, P. 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*. 2016, 11(1), 41-47.
165. Yu, H., Yang, J., Yin, J., Wang, Z., Zeng, X. Comparison on mechanical anisotropies of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy and 304 stainless steel. *Materials Science and Engineering A*. 2017, 695, 92-100.
166. Mercelis, P., Kruth, J.P. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*. 2006, 12(5), 254–265.
167. Li, C., Liu, Z.Y., Fang, X.Y., Guo, Y.B. On the simulation scalability of predicting residual stress and distortion in selective laser melting. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2018, 140(4), 041013.
168. Wu, A.S., Brown, D.W., Kumar, M., Gallegos, G.F., King, W.E. An experimental investigation into additive manufacturing-induced residual stresses in 316L stainless steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2014, 45, 6260-6270.
169. Yakout, M., Elbestawi, M.A., Veldhuis, S.C. A study of the relationship between thermal expansion and residual stresses in selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020, 52, 181-92.
170. Sridhar, B.R., Devananda, G., Ramachandra, K., Bhat, R. Effect of machining parameters and heat treatment on the residual stress distribution in titanium alloy IMI-834. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, 139, 628–634.
171. Brinksmeier, E., Levy, G., Meyer, D., Spierings, A.B. Surface integrity of selective-laser-melted components. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2010, 59(1), 601-606.
172. Du, W., Bai, Q., Zhang, B. Machining characteristics of 18Ni-300 steel in additive/subtractive hybrid manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, 95, 2509-2519.
173. Wang, Z., Sun, J., Chen, W., Liu, L., Wang, R. Machining distortion of titanium alloys aero engine case based on the energy principles. *Metals*. 2018, 8(6), 464.
174. Javidi, A., Rieger, U., Eichlseder, W. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life. *International Journal of Fatigue*. 2008, 30(10-11), 2050-2055.
175. Masoudi, S., Amini, S., Saeidi, E., Eslami-Chalander H. Effect of machining-induced residual stress on the distortion of thin-walled parts. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, 76, 597-608.
176. Rossini, N.S., Dassisti, M., Benyounis, K.Y., Olabi, A.G. Methods of measuring residual stresses in components. *Materials & Design*. 2012, 35, 572-588.
177. Bagheri, S., Guagliano, M. Review of shot peening processes to obtain nanocrystalline surfaces in metal alloys. *Surface Engineering*. 2009, 25(1), 3-14.
178. Wang, Z., Xiao, Z., Tse, Y., Huang, C., Zhang, W. Optimization of processing parameters and establishment of a relationship between microstructure and mechanical properties of SLM titanium alloy. *Optics & Laser Technology*. 2019, 112, 159-167.

179. Król, M., Taski, T. Surface quality research for selective laser melting of Ti-6Al-4V alloy. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2016, 61(3), 1291-1296.
180. Elsayed, M., Ghazy, M., Youssef, Y., Essa, K. Optimization of SLM process parameters for Ti6Al4V medical implants. *Rapid Prototyping Journal*. 2019, 25(3), 433-447.
181. Khorasani, A.M., Gibson, I., Awan, U.S., Ghaderi, A. The effect of SLM process parameters on density, hardness, tensile strength and surface quality of Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*. 2019, 25, 176-186.
182. Yasa, E., Deckers, J., Kruth, J.P. The investigation of the influence of laser re-melting on density, surface quality and microstructure of selective laser melting parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2011, 17(5), 312-327.
183. Ghanbari, S., Bahr, D.F. Predictions of decreased surface roughness after shot peening using controlled media dimensions. *Journal of Materials Science and Technology*. 2020, 58, 120-129.
184. Bagherifard, S., Ghelichi, R., Guagliano, M. Numerical and experimental analysis of surface roughness generated by shot peening. *Applied Surface Science*. 2012, 258(18), 6831-6840.
185. Li, H., Jia, D., Yang, Z., Liao, X., Jin, H., Cai, D. 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*. 2021, 801, 140415.
186. Yan, X., Yin, S., Chen, C., Huang, C., Bolot, R., Lupoi, R. Effect of heat treatment on the phase transformation and mechanical properties of Ti6Al4V fabricated by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018, 764, 1056-1071.
187. Stefansson, N., Semiatin, S.L., Eylon, D. The kinetics of static globularization of Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2002, 33, 3527-3534.
188. Lesyk, D.A., Martinez, S., Mordiyuk, B.N., Dzhemelinskyi, V.V., Lamikiz A., Prokopenko, G.I. Post-processing of the Inconel 718 alloy parts fabricated by selective laser melting: Effects of mechanical surface treatments on surface topography, porosity, hardness and residual stress. *Surface Coatings Technology*. 2020, 381, 125136.
189. Dekhtyar, A.I., Mordiyuk, B.N., Savvakina, D.G., Bondarchuk, V.I., Moiseeva, I.V., Khripta, N.I. Enhanced fatigue behavior of powder metallurgy Ti-6Al-4V alloy by applying ultrasonic impact treatment. *Materials Science and Engineering A*. 2015, 641, 348-359.
190. Toda, H., Yamaguchi, T., Nakazawa, M., Aoki, Y., Uesugi, K., Suzuki, Y. Four-dimensional annihilation behaviors of micro pores during surface cold working. *Materials Transactions*. 2010, 51(7), 1288-1295.
191. Wang, C., Wang, L., Wang, X., Xu, Y. Numerical study of grain refinement induced by severe shot peening. *International Journal of Mechanical Science*. 2018, 146, 280-294.
192. Liu, G., Lu, J., Lu, K. Surface nanocrystallization of 316L stainless steel induced by ultrasonic shot peening. *Materials Science and Engineering A*. 2000, 286(1), 91-95.
193. Kumar, S., Chattopadhyay, K., Singh, S.R., Singh, V. Surface nanostructuring of Ti-6Al-4V alloy through ultrasonic shot peening. *International Journal of Surface Science and Engineering* 2017, 11(1), 23-35.

194. Zhao, B., Lv, Y., Ding, Y., Wang, L., Lu, W. The grain refinement mechanisms of various phases in shot-peened Nickel-Aluminum bronze (NAB) alloy. *Materials Characterization*. 2018, 144, 78-85.
195. Karaoglanli, A.C., Doleker, K.M., Demirel, B., Turk, A., Varol, R. Effect of shot peening on the oxidation behavior of thermal barrier coatings. *Applied Surface Science*. 2015, 354, 314-322.
196. Luo, K.Y., Lu, J.Z., Zhang, Y.K., Zhou, J.Z., Zhang, L.F., Dai, F.Z. Effects of laser shock processing on mechanical properties and micro-structure of ANSI 304 austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering A*. 2011, 528, 4783-4788.
197. Hall, E.O. The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results. *Proceedings of the Physical Society*. 1951, 64, 747.
198. Petch, N.J. The Cleavage strength of polycrystals. *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1953, 174, 25-28.
199. Gujba, A.K., Medraj, M. Laser peening process and its impact on materials properties in comparison with shot peening and ultrasonic impact peening. *Materials*. 2014, 7(12), 7925-7974.
200. Prakash N.A., Gnanamoorthy, R., Kamaraj, M. Fretting wear behavior of fine grain structured aluminium alloy formed by oil jet peening process under dry sliding condition. *Wear*. 2012, 294, 427-437.
201. Weber, D., Kirsch, B., Chighizola, C.R., D'elia, C.R., Linke, B.S., Hill, M.R. Analysis of machining-induced residual stresses of milled aluminum workpieces, their repeatability, and their resulting distortion. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021, 115, 1089-1110.
202. Murakami, Y. *Metal fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*. Academic Press, London, 2002, 758 s.
203. Slawik, S., Bernarding, S., Lasagni, F., Navarro, C., Periñán, A., Boby, F. Microstructural analysis of selective laser melted Ti6Al4V modified by laser peening and shot peening for enhanced fatigue characteristics. *Materials Characterization*. 2021, 173, 110935.
204. Kasperovich, G., Hausmann, J. Improvement of fatigue resistance and ductility of TiAl6V4 processed by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015, 220, 202-214.
205. Leuders, S., Lieneske, T., Lammers, S., Tröster, T., Niendorf, T. On the fatigue properties of metals manufactured by selective laser melting - The role of ductility. *Journal of Materials Research*. 2014, 29, 1911-1919.
206. Edwards, P., Ramulu, M. Fatigue performance evaluation of selective laser melted Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering A*. 2014, 598, 327-337.
207. Callister, W.D., Rethwisch, D.G. *Materials Science and Engineering*. Eighth Edi. Wiley, 2015, 971 s.
208. Üç Nokta Eğme Deney Föyü. Bursa Teknik Üniversitesi. Bursa, 2016, 7 s.
209. Calcagnotto, M., Ponge, D., Raabe, D. Effect of grain refinement to 1µm on strength and toughness of dual-phase steels. *Materials Science and Engineering A*. 2010, 527, 29-30, 7832-7840.
210. Gencalp Irizalp S., Saklakoglu, N. High strength and high ductility behavior of 6061-T6 alloy after laser shock processing. *Optics and Lasers in Engineering*. 2016, 77, 183-190.

211. Ter Haar, G.M., Becker, T.H. Selective laser melting produced Ti-6Al-4V: Post-process heat treatments to achieve superior tensile properties. *Materials*. 2018, 11(1), 146.

