



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN PARÇALARIN KAYNAKLA BİRLEŞTİRİLMESİ VE ANALİZİ

MURAT ŞEN

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Mustafa KURT

İSTANBUL, 2023



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN PARÇALARIN KAYNAKLA BİRLEŞTİRİLMESİ VE ANALİZİ

MURAT ŞEN

723217001

DOKTORA TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Mustafa KURT

İSTANBUL, 2023

ÖNSÖZ

Tez çalışmamda bana öncülük eden ve her türlü desteğini esirgemeyen danışmanım Sayın Prof.Dr. Mustafa KURT' a teşekkür ederim.

Çalışmalarım ve tüm hayatım boyunca, her zaman yanımda olan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli eşim ve aileme şükranlarımı sunarım.

Ocak, 2023

Murat ŞEN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
YENİLİK BEYANI.....	vii
SEMBOLLER	viii
KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER.....	x
TABLO LİSTESİ	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ	3
2.1. Titanyum ve Uygulamaları.....	3
2.1.1. Titanyumun fiziksel metalürjisi.....	5
2.1.2. Titanyum alaşımlarının sınıflandırılması	6
2.1.3. Ti6Al4V alaşımı	7
2.2. Eklemeli İmalat	12
2.2.1. Eklemeli imalat tarihçesi	16
2.2.2. Eklemeli imalat yöntemleri	24
2.2.3. Metal eklemeli imalat.....	30
2.2.3.1. Yönlendirilmiş lazer ışını ile yığma	31
2.2.3.2. Toz yatağında lazer ile birleştirme	32
2.2.3.3. Toz yatağında elektron ışını ile birleştirme.....	33
2.2.4. Ti6Al4V alaşımının eklemeli imalatı	37
2.3. Kaynak Prosesi	43
2.3.1. Titanyum ve alaşımlarının kaynağı	44
2.3.2. Lazer ışın kaynağı (LBW).....	44
2.3.3. Tungsten inert gaz kaynağı (TIG)	46
2.3.4. Geleneksel Ti6Al4V parçaların kaynağı	48
2.3.5. Eklemeli Ti6Al4V parçaların kaynağı	54
3. MATERYAL VE METOT.....	79
3.1. Malzeme	79
3.2. Eklemeli Parçaların İmalatı	79
3.3. Eklemeli Parçaların Kaynakla Birleştirilmesi	83

3.3.1. Kaynak öncesi işlemler	83
3.3.2. Kaynak işlemi.....	87
3.3.2.1. EBM Ti6Al4V numunelerin lazer kaynağı	89
3.3.2.2. EBM Ti6Al4V numunelerin TIG kaynağı	91
3.3.3. Kaynak sonrası işlemler	92
3.4. Kaynak Bağlantılarının Tahribatsız Muayenesi	92
3.4.1. Görsel muayene.....	92
3.4.2. Radyografik muayene.....	93
3.5. Kaynak Bağlantılarının Tahribatlı Muayenesi	95
3.5.1. Kaynak bağlantılarının yapısal analizi	95
3.5.2. Metalografik incelemeler	96
3.5.3. Mekanik karakterizasyon	97
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	99
4.1. Kaynak Bağlantılarının Değerlendirilmesi.....	99
4.1.1. Kaynak yüzey durumu.....	99
4.1.2. Kaynak radyografik muayene sonuçları.....	107
4.2. Mikro yapısal Değerlendirme.....	112
4.3. Mekanik Özellikler.....	112
5. DEĞERLENDİRMELER VE ÖNERİLER	120
KAYNAKLAR.....	122

ÖZET

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN PARÇALARIN KAYNAKLA BİRLEŞTİRİLMESİ VE ANALİZİ

Eklemeli imalat günümüz havacılık sanayiinde yoğun olarak çalışılan alanların başında gelmektedir. Klasik talaş kaldırma yöntemlerinin yüksek maliyetli çözümler sunması, eklemeli imalat çalışmalarının sektörde hız kazanmasını sağlamıştır. Ancak, eklemeli imalat makine hacimlerinin küçük olması, istenilen boyutlarda parça üretimine imkân tanımamaktadır. Bu sınırlamanın üstesinden gelmenin bir yolu, küçük boyutlu eklemeli parçaların kaynak işlemi ile birleştirilmesidir. Tez çalışmasının ana konusu, eklemeli imalatla üretilen sınırlı boyutlara sahip parçaların kaynakla birleştirilmesi ve istenilen boyutlarda eklemeli parçaların elde edilmesini sağlamaktır. Bu birleştirmeler sonucunda parçanın üzerinde belirli değişkenleri incelemek, kaynak kalitesinin düzgün olması açısından önem arz etmektedir. Hem eklemeli imalat ile parça üretimi esnasında, hem de kaynaklama işlemleri yapılırken, parçada artık gerilmeler meydana gelecektir. Bu doğrultuda, meydana gelen artık gerilmelerin tayini ve karşı koyma yöntemleri de dikkate alınarak, en ideal kaynak yöntemleri belirlenecek ve üretimleri yapılacaktır. Çalışmada kullanılan parçalar dairesel çubuk ve yassı çekme numuneleri şeklindedir. Çekme numuneleri toz yataklı eklemeli imalat yöntemlerinden elektron ışını ile ergitme (EBM) tekniği ile iki parça olarak üretilmiştir. Daha sonra mikro yapıları incelenmiştir. Titanyum alaşımlı malzemelerin kaynak kabiliyetleri araştırılmış olup, uygulanacak kaynak yöntemleri olarak lazer ışın kaynağı (LBW) ve tungsten inert gaz kaynağı (TIG) belirlenmiştir. Belirlenen bu kaynak yöntemlerinin her birinin sağladığı avantajlar ve dezavantajlar bulunmaktadır. Bu koşullar göz önünde bulundurularak her kaynak işlemi için minimum üç adet çekme numunesi hazırlanmıştır. Her kaynaklı numunenin kaynak bağlantısı, mikro yapı karakteristiği ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Kaynak bağlantıları uygun kalite standartlarına göre değerlendirilmiştir.

ABSTRACT

WELDED JOINTING AND ANALYSIS OF PARTS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Additive manufacturing is one of the most studied areas in today's aviation industry. The fact that traditional machining methods offer high-cost solutions has accelerated additive manufacturing studies in the sector. However, the small additive manufacturing machine volumes do not allow the production of parts in the desired dimensions. One way to overcome this limitation is to join small sized parts by welding. The main subject of the thesis is to join parts with limited dimensions produced by additive manufacturing by welding and to obtain additive parts in desired dimensions. As a result of these joints, it is important to examine certain variables on the part for proper welding quality. Residual stresses will occur in the part both during the production of parts with additive manufacturing and during welding operations. In this direction, the most ideal welding methods will be determined and produced by taking into account the determination of the residual stresses and the resistance methods. The parts used in the study are in the form of circular bar and flat drawing specimens. Tensile specimens were produced in two parts by electron beam melting (EBM) technique, which is one of the powder bed additive manufacturing methods. Then their microstructures were examined. Welding capabilities of titanium alloy materials were investigated and laser beam welding (LBW) and tungsten inert gas welding (TIG) were determined as welding methods to be applied. Each of these determined welding methods has advantages and disadvantages. Considering these conditions, at least three tensile specimens were prepared for each welding process. The weld joint, microstructural characteristics and mechanical properties of each welded specimen were investigated. Welding joints have been evaluated according to appropriate quality standards.

YENİLİK BEYANI

Bu çalışmada eklemeli imalat ile üretilen parçaların kaynaklı birleştirmeleri üzerinde durulacaktır. Literatür çalışmaları incelendiğinde yapılacak olan bu çalışmaya benzer bir çalışma ile karşılaşılmamıştır. Bu nedenle yoğun bir çaba ve literatür taraması gerekecektir.

Eklemeli imalat dünya genelinde tüm sektörlerde yaygın olarak çalışılan ve popüler olan konuların başında gelmektedir. Havacılık sektöründe kullanımı büyük öneme sahiptir. Bu nedenle konunun kapsamı, geniş bir alan teşkil etmektedir. Eklemeli imalat teknolojisinin yeni bir alan olması bazı sorunları beraberinde getirmektedir. Yapılacak olan tezin araştırma sorusu, eklemeli imalat ile üretilen farklı boyutlardaki iki parçanın kaynak ile birleştirilmesinde karşımıza çıkabilecek sorunların neler olacağıdır. Bu çerçevede çok sayıda deney yapılacaktır. Farklı şekil ve boyutlarda çok sayıda çekme numunesi üretilerek belirlenen kaynak yöntemleri numunelere uygulanacaktır. Ardından teste tabi tutulacak numuneler ile en uygun kaynak yöntemi belirlenecek, dahası havacılık uygulamalarında kullanılacak bir yöntem tespiti yapılacaktır. Eklemeli üretimde karşılaşılan sorunların birçoğu üretim parametreleri ile ilgili sorunlardır. Teknolojinin yeni olması, parça üretiminde birtakım sorunları beraberinde getirmektedir. Bunların başında mikro yapıda oluşan değişiklikler gelmektedir. Bu değişikliklerin ve kaynak sonrası eklenen artık gerilmelerin parçaların kırılmasına neden olduğu bir kaç araştırma ile anlaşılmaktadır. Bu nedenle parçalarda oluşacak artık gerilmelerin değerlendirilmesi önem arz etmektedir.

Kaynak ile birleştirilmiş eklemeli parçaların şu ana kadar herhangi bir sertifikasyon süreci bulunmamaktadır. Bu sebeple üretilen parçalar şimdilik hava araçları üzerine takılamamaktadır. Çalışma neticesinde üretilen parçaların literatüre kazandırılması ile patent süreçleri tez süreciyle eş zamanlı bir şekilde ilerletilebilir. Eğer tez başarılı bir şekilde tamamlanır ise, havacılık sektöründe kullanılan ve hava aracı üzerinde bulunan parçaların üretimleri ülkemizde kendi imkânlarımızla üretilen ve sanayide yeni boyutlar kazanmasını sağlayacaktır.

SEMBOLLER

A	: Amper
°C	: Santigrat Derece
E	: Isı girişı (kJ/mm)
HB	: Brinell Sertlik Değeri
HRC	: Rockwell Sertlik Değeri
HV	: Vickers Sertlik Değeri
Hz	: Frekans (Hertz)
J	: Joule
MPa	: Mega Pascal
N	: Newton
R	: Minimum ve Maksimum Gerilmelerin Oranı
Ra	: Yüzey Pürüzlülük Değeri (μm)
rpm	: dev/dak
V	: Volt
W	: Güç
μm	: Mikrometre
$\Delta\sigma_w$	: Yorulma Dayanımı
ΔK_{th}	: Kırılma Tokluk Değeri

KISALTMALAR

3D/3B	: Three Dimensional (Üç Boyutlu)
Al	: Alüminyum
AM	: Additive Manufacturing (Eklemeli İmalat)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Materyalleri Birliği)
AWS	: American Welding Society (Amerikan Kaynak Birliği)
C	: Karbon
EBM	: Electron Beam Melting (Elektron Işın Ergitme)
EL	: Elongation (Uzama)
EN	: European Norm (Avrupa Standartları)
Fe	: Demir
H	: Hidrojen
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Kuruluşu)
LBW	: Laser Beam Welding (Lazer Işın Kaynağı)
LMD	: Laser Metal Deposition (Lazer Metal Biriktirme)
N	: Azot
Nd-YAG	: Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet
O	: Oksijen
OM	: Optical Microscope (Optik Mikroskop)
PBF	: Powder Bed Fusion (Toz Yataklı Ergitme)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskopu)
SLM	: Selective Laser Melting (Seçici Lazer Ergitme)
SPH	: Sıkı Paket Hegzagonal
Ti	: Titanyum
TIG	: Tungsten Inert Gas (Tungsten İnert Gaz)
TS	: Türk Standartları
UTS	: Ultimate Tensile Strength (Nihai Gerilme Mukavemeti)
V	: Vanadyum
W	: Tungsten

ŞEKİLLER

Şekil 2.1. Mühendislik malzemeleri için Ashby diyagramları.....	4
Şekil 2.2. Titanyum kafes yapısı.....	5
Şekil 2.3. Alaşım elementlerinin α - β geçiş sıcaklığına etkisi.....	6
Şekil 2.4. Titanyum alaşım gruplarının temel karakteristikleri.....	6
Şekil 2.5. Ti6Al4V alaşımının soğuma diyagramları ve mikro yapı görüntüleri.....	8
Şekil 2.6. Gaz atomizasyon işlemi.....	12
Şekil 2.7. Eklemeli imalat standart yapısı.....	13
Şekil 2.8. Eklemeli imalat temel işlem adımları.....	13
Şekil 2.9. Eklemeli imalatın kullanım amaçları ve sektörel dağılımları.....	15
Şekil 2.10. Eklemeli imalat makinelerinin ülkeler bazında dağılımı.....	16
Şekil 2.11. Hızlı prototipleme teknolojisinin gelişimi.....	17
Şekil 2.12. Eklemeli imalat sistemlerine ait pazar büyüklükleri.....	22
Şekil 2.13. Metal eklemeli imalat sistem satışlarının yıllara göre yükselişi.....	22
Şekil 2.14. Eklemeli imalat teknolojisinin tarihsel gelişimi.....	23
Şekil 2.15. Eklemeli imalat yönteminin sınıflandırılması (ASTM F2792).....	24
Şekil 2.16. Eklemeli imalat yönteminin başlangıç malzemesine göre sınıflandırılması	25
Şekil 2.17. Fotopolimerizasyon işlemi.....	26
Şekil 2.18. Bağlayıcı püskürtme işlemi.....	27
Şekil 2.19. Malzeme püskürtme işlemi.....	27
Şekil 2.20. Tabakalı obje üretim yöntemi.....	28
Şekil 2.21. Malzeme ekstrüzyonu yöntemi.....	29
Şekil 2.22. Hibrit eklemeli imalat teknolojisi.....	30
Şekil 2.23. Metal eklemeli imalat teknolojilerinin sınıflandırılması.....	30
Şekil 2.24. Yönlendirilmiş lazer ışını ile yığma işlemi.....	32
Şekil 2.25. Toz yatağında lazer ile birleştirme işlemi.....	32
Şekil 2.26. EBM şematik resmi ve inşa kabini.....	34
Şekil 2.27. EBM ve SLM yöntemlerinin karşılaştırılması.....	36
Şekil 2.28. Farklı imalat yöntemleri ile üretilen Ti6Al4V' nin mekanik özellikleri.....	39
Şekil 2.29. Metal kaynak yöntemlerinin sınıflandırılması.....	43
Şekil 2.30. Kaynak yöntemlerinin güç yoğunluğu açısından karşılaştırılması.....	45
Şekil 2.31. Katı hal lazerine ait şematik yapı.....	46
Şekil 2.32. TIG kaynak donanımı şeması.....	47

Şekil 2.33. Ti6Al4V parçaların farklı kaynak bağlantılarının makroskopik görüntüleri (Balasubramanian vd.)	49
Şekil 2.34. Ti6Al4V parçaların farklı kaynak bağlantılarının mikroskop görüntüleri (Balasubramanian vd.).....	50
Şekil 2.35. Ti6Al4V parçaların LBW ve TIG sonrası kesit profilleri (Gao vd.).....	51
Şekil 2.36. Ti6Al4V parçaların LBW ve TIG sonrası FZ mikro yapıları (Gao vd.).....	51
Şekil 2.37. Ti6Al4V parçaların LBW sonrası HAZ mikro yapısı (Gao vd.).....	51
Şekil 2.38. Ti6Al4V parçaların TIG sonrası HAZ mikro yapısı (Gao vd.).....	52
Şekil 2.39. Ti6Al4V parçaların LBW sonrası mikro görüntüleri (Sarre vd. - Denney ve Metzbower).....	52
Şekil 2.40. EBM Ti6Al4V parçaların FSW sonrası kaynak yüzeyinin makro görüntüleri (Rubino vd.).....	59
Şekil 2.41. EBM Ti6Al4V parçaların FSW sonrası yüzey pürüzlülük değerleri (Rubino vd.).....	59
Şekil 2.42. SLM Ti6Al4V parçaların LBW sonrası enine kesit mikro görüntüleri (Yu vd.).....	61
Şekil 2.43. SLM Ti6Al4V parçaların LBW sonrası kaynak bölgelerinin genişlikleri (Yu vd.).....	61
Şekil 2.44. SLM-dövme numunenin punta kaynaklı birleştirilmesi (Tavlovich vd.)...	62
Şekil 2.45. SLM-dövme Ti6Al4V parçaların LBW-EBW sonrası görsel incelemesi (Tavlovich vd.).....	62
Şekil 2.46. SLM-dövme Ti6Al4V parçaların LBW-EBW sonrası kaynak kesitleri (Tavlovich vd.).....	63
Şekil 2.47. SLM Ti6Al4V parçaların lazer kaynağı ile birleştirilmesi (Wits ve Becker).....	63
Şekil 2.48. SLM Ti6Al4V parçaların LBW işleminde birim kaynak uzunluğu başına gerekli enerjiye karşılık kaynak geometrisi boyutları (Wits ve Becker).....	64
Şekil 2.49. SLM Ti6Al4V parçaların LBW sonrası kesit mikro görüntüleri (Rautio vd.).....	65
Şekil 2.50. SLM Ti6Al4V parçaların LBW sonrası kesit mikrografları (Yu vd.).....	66
Şekil 2.51. SLM Ti6Al4V parçaların FS sonrası SEM mikrografları (Prashanth vd.)..	66
Şekil 2.52. EBM Ti6Al4V parçaların FSW sonrası makro yapısı (Singh vd.).....	67
Şekil 2.53. EBM Ti6Al4V parçaların FSW sonrası OM görüntüleri (Singh vd.).....	67

Şekil 2.54. FSW- EBM Ti6Al4V parçalarına ait SZ' nin optik mikrografı (Singh vd.).....	68
Şekil 2.55. FSP şematiği (Rubino vd.).....	68
Şekil 2.56. EBM Ti6Al4V plakaların FSP sonrası SEM görüntüleri (Rubino vd.)....	69
Şekil 2.57. EBM Ti6Al4V parçaların FW sonrası SEM görüntüleri (Qin vd.).....	69
Şekil 2.58. EBM Ti6Al4V parçaların LFW sonrası oluşan farklı metalürjik bölümler (Scherillo vd.).....	70
Şekil 2.59. EBM-dövme Ti6Al4V plakaların lazer kaynağı işlemi (Sun vd.).....	70
Şekil 2.60. EBM-dövme Ti6Al4V plakaların LBW sonrası mikro yapı görüntüleri (Sun vd.).....	71
Şekil 2.61. Farklı imalat ve kaynak yöntemleri sonrası numunelere ait mühendislik gerilim-gerinim eğrileri (Rautio vd.–Sun vd.).....	74
Şekil 2.62. Farklı imalat ve kaynak yöntemleri sonrası numunelere ait oda sıcaklığı çekme eğrileri (Prashanth vd.–Singh vd.–Qin vd.).....	74
Şekil 2.63. Farklı imalat ve kaynak yöntemleri sonrası numunelere ait Vickers sertlik profilleri (Prashanth vd.–Singh vd.–Qin vd.–Sun vd.–Yu vd.).....	76
Şekil 3.1. ASTM E8/E8M-13a standardına göre üretilen numune boyutları (mm)	80
Şekil 3.2. EBM ile parça üretimine ait şematik görüntüler.....	80
Şekil 3.3. EBM Ti6Al4V numunelere kaynak ağzı açma işlemi.....	84
Şekil 3.4. Johnford VMC – 550 Model CNC freze tezgâhı.....	85
Şekil 3.5. Johnford TC 35 CNC torna tezgâhı.....	85
Şekil 3.6. Kaynak ağzı açılmış numunelerin perspektif ve üstten görünüşü.....	86
Şekil 3.7. Kaynak bağlantılarının şematik gösterimi.....	88
Şekil 3.8. Yassı numunelerin TIG kaynağı ile birbirine puntalanması.....	88
Şekil 3.9. Dairesel numunelerin kaynağında kullanılan yatak elemanı.....	89
Şekil 3.10. ALM 200 mobil lazer kaynak makinesi.....	90
Şekil 3.11. Dynasty® 280 DX (CPS) International kaynak makinesi.....	91
Şekil 3.12. Leica DM2700 M optik mikroskobu.....	93
Şekil 3.13. Radyograf poz tertibi.....	94
Şekil 3.14. YXLON Y.Multiplex CT 225 kV X-Ray cihazı.....	94
Şekil 3.15. ZEISS Sigma 300 taramalı elektron mikroskobu	96
Şekil 3.16. Mahr MarSurfM300 model ölçüm cihazı	96
Şekil 3.17. Metkon Ecopress 50 Mounting Press cihazı	97

Şekil 3.18. Buehler Beta Grinder-Polisher cihazı	97
Şekil 3.19. Mühendislik gerilim-gerinim eğrisinin prensibi.....	98
Şekil 3.20. Kaynaklı çekme numunesinin boyutları (mm) (ASTM E8/E8M-13a).....	98
Şekil 4.1. Lazer kaynaklı numune görüntüleri.....	99
Şekil 4.2. TIG kaynaklı numune görüntüleri.....	100
Şekil 4.3. LBW yassı numunelerin optik mikroskop görüntüleri.....	101
Şekil 4.4. LBW dairesel numunelerin optik mikroskop görüntüleri.....	101
Şekil 4.5. TIG yassı numunelerin optik mikroskop görüntüleri.....	102
Şekil 4.6. TIG dairesel numunelerin optik mikroskop görüntüleri.....	102
Şekil 4.7. Kaynaklı numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri.....	106
Şekil 4.8. Lazer kaynaklı numunelerin X-ray tahribatsız test sonuçları	107
Şekil 4.9. TIG kaynaklı numunelerin X-ray tahribatsız test sonuçları.....	108
Şekil 4.10. Kaynaklı numunelerin en yüksek ve en düşük çekme dayanımları.....	114
Şekil 4.11. LBW yassı numunelere ait yük-uzama eğrileri.....	115
Şekil 4.12. TIG yassı numunelere ait yük-uzama eğrileri.....	115
Şekil 4.13. LBW dairesel numunelere ait yük-uzama eğrileri.....	115
Şekil 4.14. TIG dairesel numunelere ait yük-uzama eğrileri.....	116
Şekil 4.15. Kaynaklı numunelerin kırılma yerleri.....	116
Şekil 4.16. Kaynaklı numunelerin kırılma yüzey görüntüleri (SEM).....	117

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Alfa fazı tane büyüklüğünün Ti6Al4V' nin mekanik özelliklerine etkisi.....	9
Tablo 2.2. Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi (%).....	10
Tablo 2.3. Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri.....	10
Tablo 2.4. Metal eklemeli imalat yöntemlerinin karşılaştırılması.....	36
Tablo 2.5. SLM, EBM, LMD ile üretilen Ti6Al4V' nin mikro yapı görüntüleri.....	38
Tablo 2.6. LMD, SLM ve EBM Ti6Al4V numunelerin mekanik özellikleri.....	40
Tablo 2.7. LMD, SLM ve EBM Ti6Al4V parçalarına ait yorulma özellikleri.....	41
Tablo 2.8. LMD, SLM ve EBM Ti6Al4V parçalarına ait porozite, yüzey pürüzlülük ve artık gerilme değerleri.....	42
Tablo 2.9. Geleneksel Ti6Al4V parçaların farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar.....	48
Tablo 2.10. Farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilen Ti6Al4V parçaların mekanik özellikleri	50
Tablo 2.11. Eklemeli parçaların kaynakla birleştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar..	55
Tablo 2.12. Parametre optimizasyonunda kullanılan kaynak parametreleri (Yu vd.)..	60
Tablo 2.13. Kaynaklı ve SLM Ti6Al4V numunelerin sınıflandırılması (Yu vd.).....	60
Tablo 2.14. Farklı lazer kaynak parametreleri ile birleştirilen SLM Ti6Al4V parçalara ait kaynak geometrileri (Yu vd.).....	64
Tablo 2.15. Kaynaklı eklemeli Ti6Al4V parçaların mekanik özellikleri.....	73
Tablo 2.16. Kaynaklı eklemeli imalat numunelerin çekme testi sonrası kırılma yerleri ve yüzey görüntüleri.....	78
Tablo 3.1. Arcam EBM Ti6Al4V tozunun kimyasal bileşimi.....	79
Tablo 3.2. Arcam EBM Ti6Al4V tozunun boyut dağılımı.....	79
Tablo 3.3. Arcam EBM Ti6Al4V tozunun mekanik özellikleri.....	79
Tablo 3.4. Parça imalatında kullanılan proses parametreleri.....	81
Tablo 3.5. Arcam EBM Q20plus makinesi teknik özellikleri.....	82
Tablo 3.6. Titanyumun malzeme özellikleri ve kesici takıma etkisi.....	86
Tablo 3.7. Johnford VMC – 550 Model CNC freze tezgâhı özellikleri.....	87
Tablo 3.8. Johnford TC 35 CNC torna tezgâhı özellikleri.....	87
Tablo 3.9. Kaynak ağzı açma işleminde kullanılan makine ve parametreler.....	87
Tablo 3.10. DT-ER Ti 5 kaynak teline ait özellikler.....	89
Tablo 3.11. ALM 200 mobil lazer kaynak makinesi özellikleri.....	90

Tablo 3.12. Lazer kaynak parametreleri.....	90
Tablo 3.13. Dynasty® 280 DX (CPS) International kaynak makinesi özellikleri.....	91
Tablo 3.14. TIG kaynak parametreleri.....	92
Tablo 3.15. Radyografik test teknikleri ve kabul seviyeleri.....	95
Tablo 4.1. LBW yassı numunelerin TS EN ISO 13919-1 standardına göre yüzey kusurları açısından incelenmesi	104
Tablo 4.2. TIG yassı numunelerin TS EN ISO 5817 standardına göre yüzey kusurları açısından incelenmesi.....	105
Tablo 4.3. LBW numunelerin TS EN ISO 10675-1 standardına göre iç kusurlar açısından incelenmesi	110
Tablo 4.4. TIG numunelerin TS EN ISO 10675-1 standardına göre iç kusurlar açısından incelenmesi	111
Tablo 4.5. Kaynaklı EBM Ti6Al4V numunelerin enine çekme testi sonuçları.....	113

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat, talaş kaldırma ya da montaj gereksinimi gibi ikincil bir işlem olmaksızın yenilikçi ve karmaşık bileşenler üretme kabiliyetine sahip olan bir imalat teknolojisidir. Hammaddelerin verimli kullanımı, önemli ölçüde atık azalımı ve yüksek geometrik doğrulukta parçaların üretilebilirliği eklemeli imalat teknolojisinin sürekli gelişimi ve iyileştirilmesine olanak sağlamaktadır. Havacılık başta olmak üzere katma değeri yüksek birçok küresel imalat sanayii eklemeli imalat teknolojisini yoğun olarak kullanmaktadır. Eklemeli imalat teknolojileri arasında, toz yataklı ergitme prosesleri ve özellikle elektron ışın ergitme tekniği (EBM) paslanmaz çelik, Inconel ve titanyum gibi farklı malzeme tozlarından metalik parçaların üretilmesi noktasında bir adım öne çıkmaktadır. Güç kaynağı olarak elektromanyetik lensler tarafından kontrol edilen bir elektron ışınının kullanıldığı EBM yöntemi ile düşük artık gerilimi ve iyi mekanik özelliklere sahip, net şekle yakın metalik parçalar hızlı ve verimli bir şekilde imal edilebilmektedir. EBM yönteminde ergitme işleminin iletim yoluyla gerçekleşmesi nedeniyle CP-Ti, Ti6Al4V, Inconel ve CoCrMo alaşımları gibi sınırlı metalik malzeme grupları ile işlem yapılabilmektedir. Ti6Al4V alaşımı sahip olduğu yüksek sürünme direnci, mükemmel korozyon dayanımı, yüksek mukavemet ve kırılma tokluğu gibi üstün özellikleri nedeniyle havacılık sanayiinde kabul gören bir metalik malzeme olarak dikkat çekmektedir. Geleneksel talaşlı üretim sürecinden kaynaklı atık malzeme miktarının fazla olması ve kesici takım malzemeleri ile yüksek kimyasal reaktiviteleri nedeniyle işlenebilirliklerinin zayıf olması nihai maliyeti arttırarak Ti6Al4V alaşımının kullanımını sınırlandırmaktadır. Eklemeli imalat teknolojisinin sahip olduğu avantajlar bu zorlukların üstesinden gelerek Ti6Al4V gibi zor ve maliyeti yüksek malzemelerin kullanımlarını yaygınlaştırmaktadır. Ti6Al4V alaşımının eklemeli imalatına yönelik gerçekleştirilen çok sayıda çalışma neticesinde, EBM' nin Ti6Al4V bileşenlerini imal etmek için başarılı bir üretim teknolojisi olduğu kanıtlanmıştır. Yapılan çalışmalarda, EBM ile üretilmiş Ti6Al4V parçalara ait termal davranışlar, porozite, yüzey pürüzlülüğü, artık gerilmeler, yorulma ömrü, mikro yapı ve mekanik özellikler incelenmiştir. EBM' nin endüstriyel alanda uygulanmasının temel sınırlarından biri, inşa odasının büyüklüğüne bağlı olarak üretilen parça boyutlarının sınırlı olmasıdır. Şu anda, tüm toz yataklı EBM sistemleri arasında en büyük inşa hacmini sunan Arcam EBM Spectra L dahi maksimum 350 x 430 mm (D x H) boyutlarında parça üretimine imkân tanımaktadır [1]. İnşa odası boyutlarının arttırılması ise birtakım problemleri beraberinde getirmektedir. Artan oda

boyutları, mevcut donanıma ek soğutma, gaz ve besleme ünitesi gereksinimlerini arttırarak, parça üretim maliyetlerini yukarı taşımaktadır. Yöntemde kullanılan tozların içerik, şekil ve boyut açısından kontrolü kullanım miktarının artmasına bağlı olarak büyük parçalarda daha zor hale gelmektedir. Ayrıca, üretim sonrası meydana gelen içyapı hataları, gözenekler ve anizotropik özellikler büyük parçalarda daha da belirginleşerek, parça mekanik özelliklerine olumsuz yönde etki etmektedir [2]. Bunlara ek olarak, büyük boyutlu parçalar için elektron ışını kaynağının daha geniş bir alanı taraması lazer odak çapında farklılıklara yol açarak parçanın köşe ve merkezi arasında farklı mikro yapı ve mekanik özelliklerin oluşmasına yol açabilecektir [3]. Sonuç olarak, tezgâh inşa boyutlarının sınırlı olması ve inşa hacminin artmasına bağlı karşılaşılabilecek sorunlardan dolayı istenilen boyutlarda parça elde edilebilmesi için küçük boyutlu eklemeli parçaların kaynak işlemi ile birleştirilmesi en etkili seçenek olarak gözükmektedir. Belirtilen bu nedenlerden dolayı EBM ile üretilen Ti6Al4V alaşımı parçaların kaynakla birleştirilmesi tezin ana amacını oluşturmaktadır. Kullanılacak olan kaynak yönteminin belirlenmesi için yapılan incelemeler neticesinde piyasada var olan çok sayıda kaynak yöntemi arasından TIG ve lazer ışın kaynağının titanyum alaşımı parçaların kaynağı için en uygun birleştirme yöntemleri olduğu görülmüştür. Kaynak sonrası mikroyapı ve mekanik testler gerçekleştirilerek numuneler değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

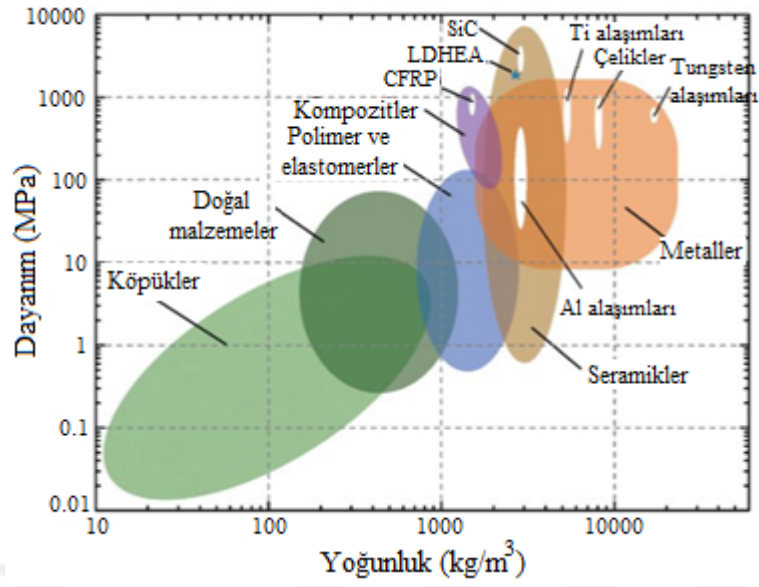
2.1. Titanyum ve Uygulamaları

Titanyum ve alaşımları, yüksek özgül dayanım, mükemmel korozyon direnci ve yüksek biyouyumluluk gibi üstün özellikleri nedeniyle havacılık, denizcilik, otomotiv, enerji ve biyomedikal gibi çeşitli alanlarda yoğun olarak kullanılan mühendislik malzemeleridir. Ayrıca yüksek süneklik gösteren bu alaşımlar dövme işlemi ile kolayca şekillendirilerek talaşlı imalatta istenilen son forma getirilebilmektedir.

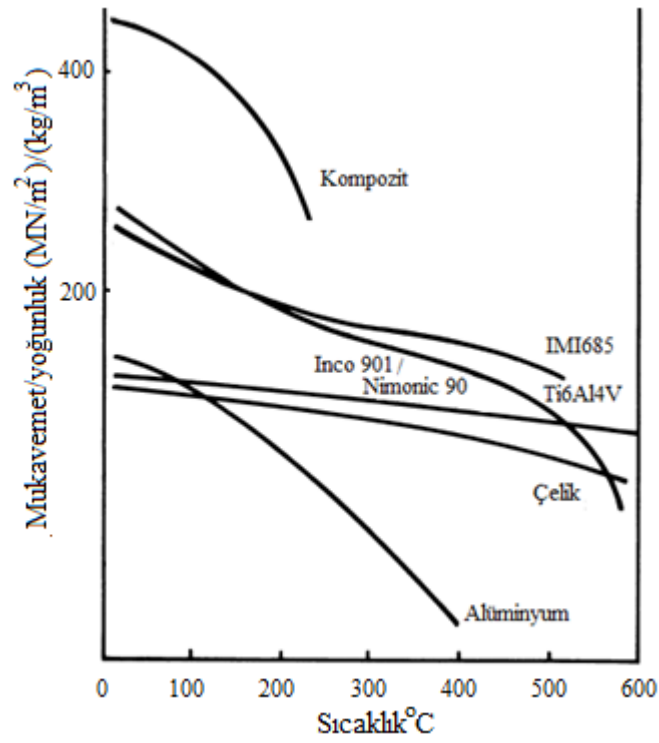
Titanyum ve alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda göstermiş oldukları yüksek dayanım değerleri, kendilerini vazgeçilmez bir havacılık malzemesi yapmaktadır. Ti6Al4V alaşımına ait özgül dayanım değerinin 400-550 °C' ye kadar diğer metalik malzemelerin çoğundan daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 2.1). Ayrıca alüminyum için maksimum çalışma sıcaklığı olan 130 °C üzerindeki çalışma koşullarında alüminyumun yerine kullanılabilmektedir. Bu çalışma koşullarına örnek olarak, uçak gövdesi yapıları için kanat buzlanma önleme sistemleri, motor ve yardımcı güç üniteleri verilebilir. Her ne kadar düşük sıcaklık değerleri için kompozit malzemelerin daha uygun olduğu gözüküyor olsa da, bu malzemelerin kullanım alanları sınırlı ve artan çalışma sıcaklıkları ile azalmaktadır. Yüksek dayanım özellikleri ile bilinen çelik ve nikel esaslı alaşımlar titanyuma açık alternatif olmalarına rağmen titanyumun (4,5 g/cm³) yaklaşık 1.7 katı yoğunluğa sahip olmaları titanyumu bir adım öne çıkarmaktadır.

Havacılık endüstrisinde bir başka önemli konu ise korozyondur. Titanyumun koruyucu kaplamalar veya boya gerekli olmayacak şekilde olan yüksek korozyon direnci kendisini bu alanda sıkça kullanılır konuma getirmiştir.

Titanyum ve alaşımlarının kullanımlarındaki ana zorluklardan birisi, yüksek sıcaklıklarda göstermiş oldukları kimyasal reaktiflik özellikleridir. Titanyumun oksijene karşı olan ilgisi nedeniyle yaklaşık 600°C üzeri sıcaklıklarda kullanımları sınırlanmaktadır. Bu durum, titanyum alaşımlarının elde edilmesi ve işlenmesinde ek önlemlerin alınmasını zorunlu kılarak maliyeti arttırmaktadır [4-6].



(a)

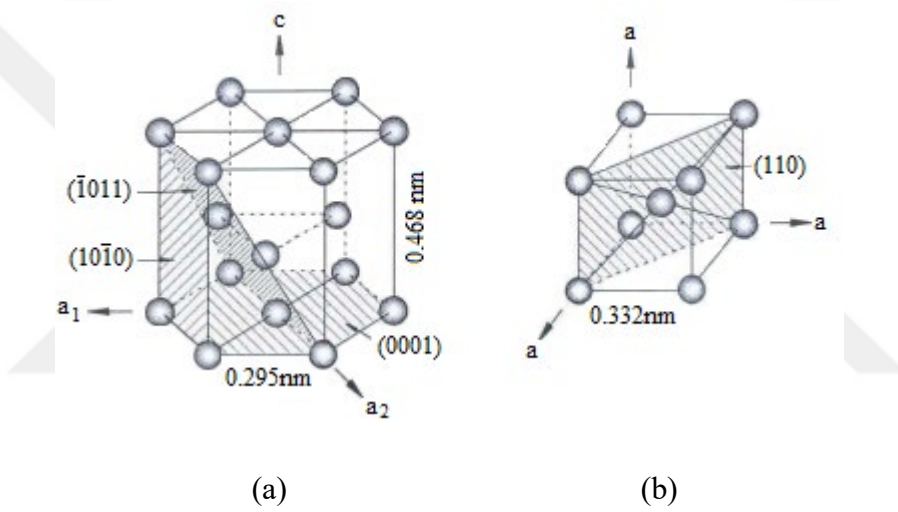


(b)

Şekil 2.1. (a) Mühendislik malzemeleri için Ashby mukavemet-yoğunluk grafiği [7], (b) Farklı mühendislik malzemelerinin sıcaklığa bağlı özgül dayanım değerlerinin karşılaştırılması [8].

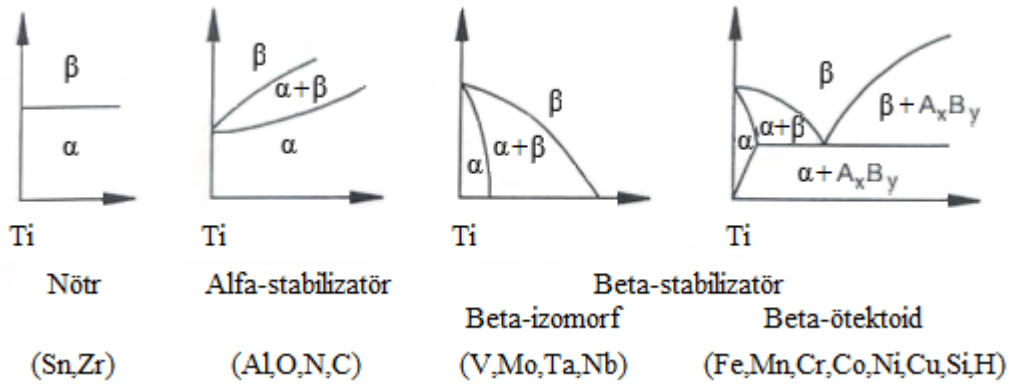
2.1.1. Titanyumun fiziksel metalürjisi

Alaşımlandırılmamış, ticari saflıktaki titanyum alaşımları oda sıcaklığında kararlı halde olan sıkı paket hegzagonal (SPH) α fazından oluşmaktadır. Saf titanyumun SPH kristal yapısı 882 °C' nin üzerinde β fazı olarak da adlandırılan, hacim merkezli kübik (HMK) kafes yapısına dönüşmektedir. Şekil 2.2' de α ve β fazlarına ait kafes yapılarının şematik resimleri gösterilmiştir. HMK kafes yapılı β fazında altı adet kayma düzlemi, her düzlemde iki adet kayma yönü olmak üzere toplam on iki adet kayma sistemi vardır. SPH kafes yapılı α fazında ise bir adet kayma düzlemi ile üç adet kayma yönü neticesinde toplam üç adet kayma sistemi bulunmaktadır. Bu nedenle, kayma sistemi sayısı fazla olan β fazı α fazına kıyasla daha sünek özellik göstermektedir [4, 9].



Şekil 2.2. Titanyum kafes yapısı: (a) SPH, (b) HMK [9].

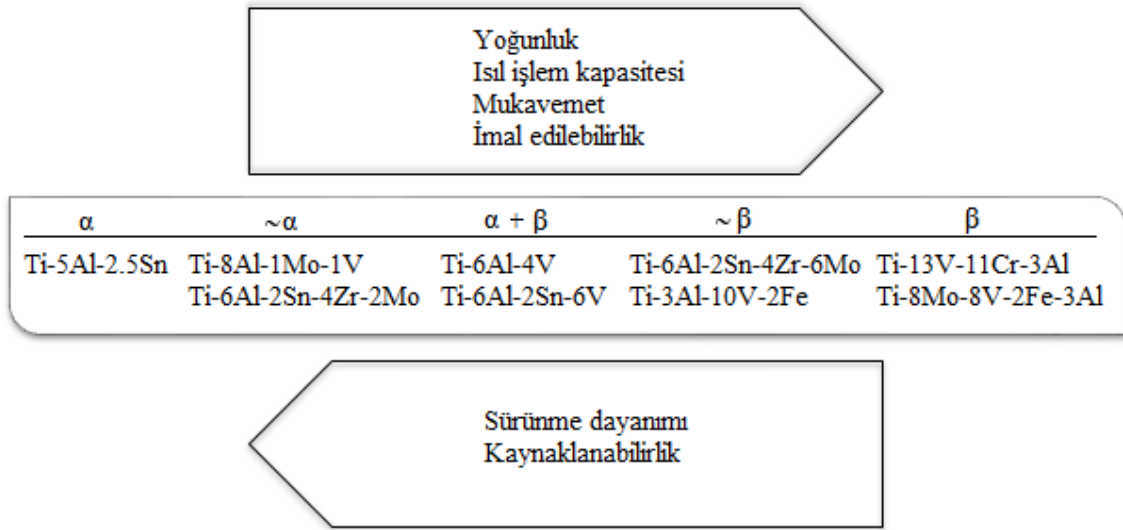
Allotropik dönüşüm sıcaklığı, kimyasal bileşimde yer alan alaşım elementlerin miktarına bağlı olarak değişmektedir. Dengeleyici olarak da nitelendirilen bu alaşım elementlerinin α - β geçiş sıcaklığına etkisi Şekil 2.3' te gösterilmiştir. Alüminyum α ve β fazlarında ki yüksek çözünürlükleri nedeniyle oldukça sık kullanılan ve β geçiş sıcaklığını yükselten alaşım elementidir. Diğer α faz stabilizatörleri ise oksijen, nitrojen ve karbon elementleridir. Alaşım içerisinde yer alan oksijen miktarının artması ile gevrekleşme riski önemli oranda yükselir. Vanadyum, niyobyum, molibden, demir, krom ve silisyum elementleri ise α - β geçiş sıcaklığını düşürerek β fazının oluşumuna katkıda bulunurlar. Bu elementlerin uygun oranda alaşımları ile β fazının oda sıcaklıklarında kararlı hale gelmesi sağlanır. α - β geçiş sıcaklığı üzerinde etkisi olmayan alaşım elementleri ise zirkonyum, hafniyum ve kalaydır. Kalayın dengeleyici etkisi olmamasına rağmen, çok sayıda ticari uygulamada α faz stabilizatörü olarak kabul edilmektedir [10, 11].



Şekil 2.3. Alaşım elementlerinin α - β geçiş sıcaklığına etkisi [9].

2.1.2. Titanyum alaşımlarının sınıflandırılması

Titanyum alaşımları içyapılarında yer alan fazlara göre alfa, alfaya yakın fazda, alfa+beta, beta, betaya yakın fazda olmak üzere beş sınıfa ayrılmaktadır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Titanyum alaşım gruplarının temel karakteristikleri [9].

➤ α ve α' 'ya yakın titanyum alaşımı

Genellikle alüminyum ve kalay ile alaşımlandırılan alfa titanyum alaşımları, sahip oldukları yüksek sürünme özellikleri nedeniyle, yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilmektedir. Alfa fazı alaşımları, kararlı α fazına sahip olduklarından $\alpha+\beta$ ve β alaşımlarının aksine ısıtılma işlemi kullanılarak sertleştirilememektedir. Dayanım ve tokluk değerleri açısından iyi sayılabilecek seviyede olan bu alaşımların dövülebilme kabiliyetleri ise diğer titanyum alaşımlarına göre oldukça düşüktür. Alfa titanyum alaşımlarına az miktarda beta fazını destekleyen elementlerin katılması ile süper α veya α' ya yakın alaşımlar olarak da bilinen

alaşım türü elde edilmektedir. Mekanik ve imalat özellikleri açısından alfa fazlı titanyum alaşımlarına benzer özelliklere sahip olan α' ya yakın alaşımlar, farklı içyapı oluşturabilme özellikleri açısından alfa alaşımlarından ayrılırlar [4, 9].

➤ $\alpha + \beta$ titanyum alaşımı

Alfa+beta titanyum alaşımları hem alfa hem de beta stabilizatör elementlerini birlikte içerir. Bu tür alaşımlarda, alfa ve beta faz oluşumlarını bir arada desteklemek için alfa stabilizatörü olarak alüminyum ile beta stabilizatörü olarak vanadyum veya molibden gibi elementlerden biri veya her ikisi kullanılır. Alfa+beta titanyum alaşımları ile alfa fazının yüksek sürünme özellikleri ve beta fazının yüksek dayanım değerleri aynı anda elde edilebilmektedir. Isıl işleme tabi tutulabilirler ve ısıl işlem kapasiteleri beta stabilizatör elementlerinin miktarının artmasına bağlı olarak yükselmektedir [5, 12].

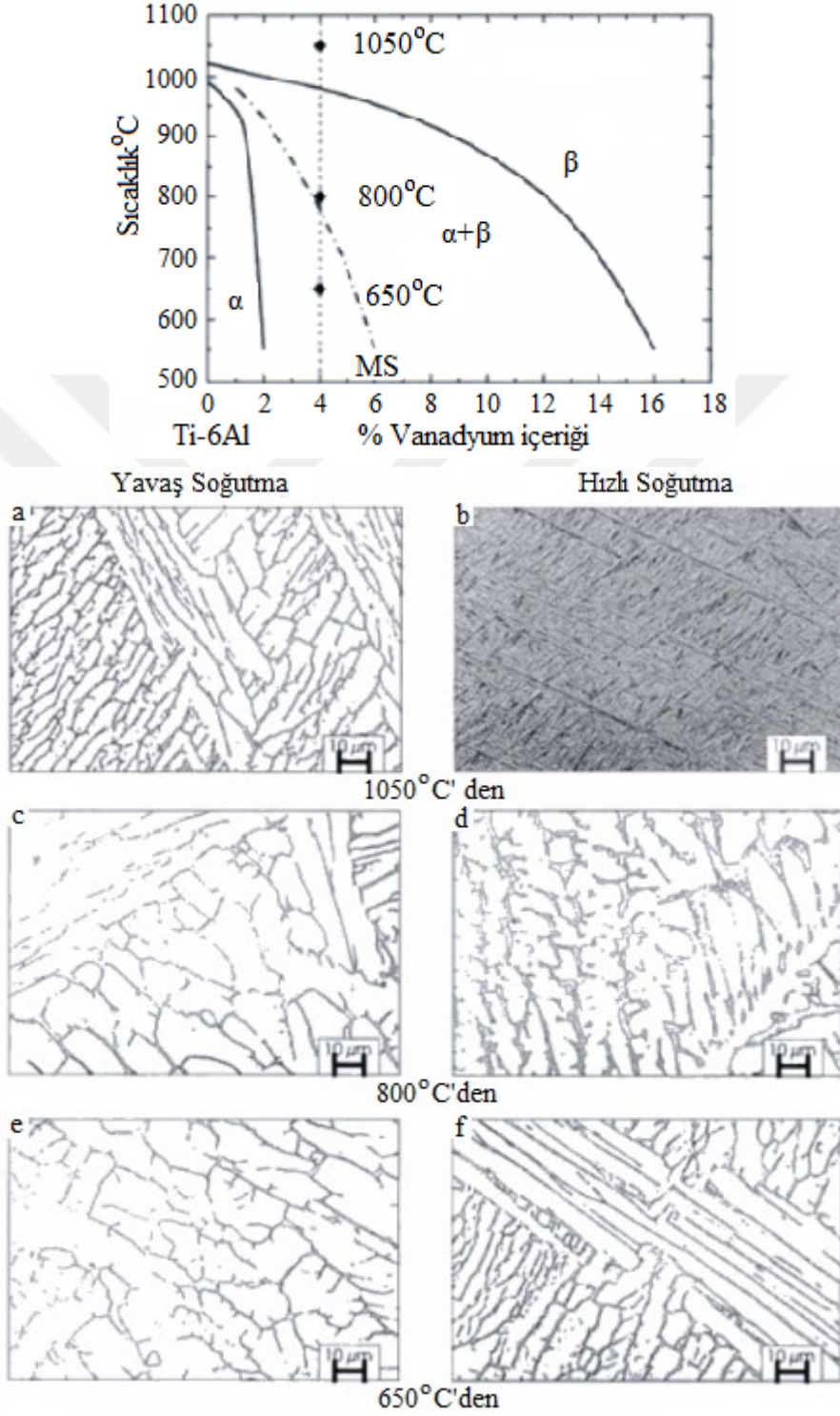
➤ β ve β' yakın titanyum alaşımı

Alfa-beta geçiş sıcaklığı üzerinde martenzit dönüşümü olmaksızın ki bölgede yer alan %100 beta fazı içeren alaşımlara beta titanyum alaşımı adı verilir. Oda sıcaklığında diğer titanyum alaşımlarına kıyasla çok daha yüksek dayanıma sahip bu alaşımlar, yüksek kırılma tokluğu ve çok iyi dövülebilme özellikleri ile bilinmektedir. Kimyasal bileşimde yer alan beta stabilizatör elementlerinin miktarına bağlı olarak hızlı soğutulmaları neticesinde yarı kararlı beta fazı meydana gelmektedir [4, 12].

2.1.3. Ti6Al4V alaşımı

Ti64 olarak da bilinen Ti6Al4V alaşımı, yüksek sürünme direnci, mükemmel korozyon dayanımı, yüksek mukavemet ve kırılma tokluğu özelliklerine sahip, sıkı paket hegzagonal α ile kübik hacim merkezli β fazlarının birlikte bulunduğu alfa+beta titanyum alaşımıdır [5]. Havacılık başta olmak üzere otomotiv, gemi yapımı, petrokimya ve biyomedikal gibi pek çok alanda kullanılan bu alaşım, günümüzde kullanılan titanyum ürünlerinin pazar payının neredeyse yarısına hâkimdir. Alaşımın kimyasal bileşiminde, alfa stabilizatörü olarak %6 alüminyum ve beta stabilizatörü olarak %4 vanadyum bulunmaktadır. Kimyasal bileşimdeki dengeleyici elementlerin miktarlarına bağlı olarak yaklaşık 995 ± 20 °C' de alfa-beta faz dönüşümü gerçekleşmektedir [10]. Oda sıcaklığında yaklaşık %90 oranında kararlı alfa fazı ile %10 oranında yarı kararlı beta fazı bulunmaktadır. Isıl işlem tipine ve soğutma hızına bağlı olarak değişen faz oranları sonucunda farklı mikro yapılar meydana

gelmektedir [13]. Şekil 2.5' te Ti6Al4V alaşımının farklı sıcaklık değerlerinden yavaş soğutma ve su verme işlemi ile hızlı soğutma sonrası meydana gelen mikro yapıları gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Ti6Al4V alaşımının soğuma diyagramları ve mikro yapı görüntüleri (α fazı açık, β fazı koyu) [9], yavaş soğutma (50°C/h).

Alaşımın beta geçiş sıcaklığı üzerindeki bir sıcaklıktan yavaş bir şekilde soğutulması ile tamamen sütunlu bir mikro yapı meydana gelmektedir (şekil 2.5a) ve soğuma oranının azalması neticesinde sütunlu mikro yapı daha kaba bir mikro yapıya dönüşmektedir. Daha hızlı soğutma durumlarında ise, β fazı ince iğnems α martenzitik yapısına dönüşmektedir (şekil 2.5b). Yavaş soğutulan tüm numuneler, ince β tane sınırlarında kaba α lamellerinden oluşan bir mikro yapıya sahiptir (şekil 2.5a, c, e). İki fazlı bölgede ve martenzit dönüşüm sıcaklığı üzerinde gerçekleştirilen hızlı soğutma neticesinde β yapısı martenzite dönüşür (şekil 2.5d). Düşük sıcaklıklarda β hacim oranı daha da azalır ve martenzit dönüşüm sıcaklığı altındaki hızlı soğutma durumunda β martenzit dönüşümü gerçekleşmez (şekil 2.5f) [14]. Ayrıca beta bölgesinde gerçekleştirilen su verme işlemi neticesinde alaşımdaki beta faz stabilizatör elementlerinin miktarına bağlı olarak beta fazı, α' -hegzagonal martenzit ve α'' -ortorombik martenzit fazlarına dönüşmektedir [9].

Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri ile mikro yapı karakteristiği arasında önemli bir ilişki bulunmaktadır. Alfa fazına ait tane büyüklükleri mekanik özellikleri belirleyen en önemli parametredir [13]. Tablo 2.1' de α fazı tane büyüklüklerinin Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri üzerine etkisi gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Alfa fazı tane büyüklüğünün Ti6Al4V' nin mekanik özelliklerine etkisi [9].

Özellik	İnce taneli yapı	Kaba taneli yapı
Elastisite modülü	O	O
Mukavemet	+	-
Süneklik	+	-
Kırılma tokluğu	-	+
Yorulma kırılması başlangıcı	+	-
Yorulma kırılması ilerlemesi	-	+
Sürünme dayanımı	-	+
şekillendirilebilirlik	+	-
Oksidasyon davranışı	+	-

Ti6Al4V alaşımına ait ASTM standartlarınca belirlenen kimyasal bileşim ve mekanik özellikler Tablo 2.2 ve 2.3’ te verilmiştir. Tablolar incelendiğinde imalat yöntemine bağlı olarak Ti6Al4V alaşımına ait kimyasal bileşim ve mekanik özellik değerlerinin değiştiği görülmektedir.

Tablo 2.2. Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi (%).

Elementler	ASTM F1108 (Döküm)	ASTM F1472 (Dövme)	ASTM F2924 (PBF)
Alüminyum, Al	5,5-6,75	5,5-6,75	5,5-6,75
Vanadyum, V	3,5-4,5	3,5-4,5	3,5-4,5
Karbon, C	< 0,1	< 0,08	< 0,08
Demir, Fe	< 0,3	< 0,3	< 0,3
Hidrojen, H	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Oksijen, O	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Nitrojen, N	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Titanyum, Ti	Kalan	Kalan	Kalan

Tablo 2.3. Ti6Al4V alaşımının mekanik  zellikleri.

Mekanik �zellikler	ASTM F1108 (Döküm)	ASTM F1472 (Dövme)	ASTM F2924 (PBF)
Akma Dayanımı	758 MPa	860 MPa	825 MPa
Çekme Dayanımı	860 MPa	930 MPa	895 MPa
Uzama	> 8%	>10%	>10%
Daralma	>14%	>25%	>15%
Sertlik	33 HRC		
Elastisite Modülü	120 GPa		

Toz yataklı ergitme teknolojisinde Ti6Al4V alaşımının toz formu kullanılmaktadır. Bu nedenle metal tozu eklemeli imalat prosesleri için önemli bir rol oynamaktadır. Kullanılan metal tozunun kalitesi parçaların mekanik özellikleri, yapılarındaki üretim hataları ve yapımdan yapıma gözlenen tutarlılıkları üzerine büyük ölçüde etki etmektedir. Kısacası, istenilen özelliklere sahip hatasız bileşenlerin üretilmesi toz malzemesinin kaliteli olmasına bağlıdır. Metal tozlarının  retilabilirliği sayesinde, eklemeli imalat makinelerinde Ti6Al4V alaşımının yanı sıra 316L, Inconel 625/718, CPTi ve AlSi10Mg gibi çeşitli metal alaşımları kullanılabilmektedir [15].

Metal tozlarının elde edilmesinde kimyasal, elektroliz, mekanik ve atomizasyon olmak üzere birçok yöntem kullanılmaktadır. Toz üretim yöntemleri, tozun geometrik şekli ve yüzey durumu başta olmak üzere fiziksel ve mekanik birçok özelliğini belirlemektedir [16].

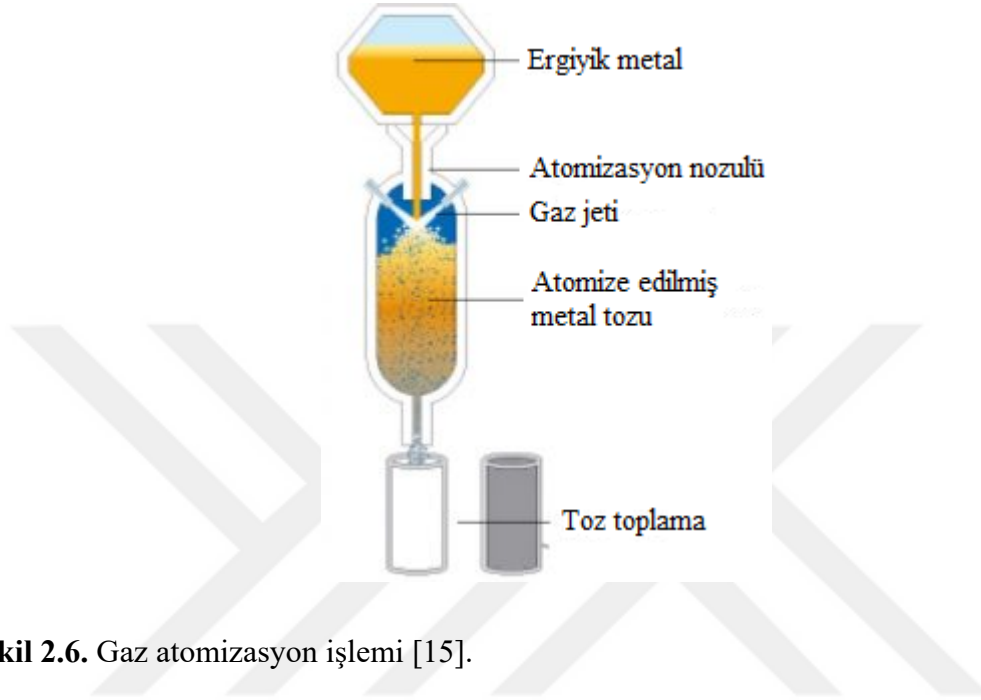
Kimyasal indirgeme tekniği daha çok demir tozlarının üretilmesinde kullanılmaktadır. Yöntemde öğütülmüş halde bulunan cevher ve kok karışımı indirgemenin olduğu fırından geçirilerek kek şeklindeki sünger demir elde edilir. Ardından, sünger demir öğütülerek metal tozları ayrıştırılır. Ancak, çözeltideki tüm refakat maddeleri de dibe çökeceğinden, saf ve yüksek kalitede tozların üretimi bu yöntem ile mümkün olmamaktadır [17, 18].

Elektroliz yönteminde, elektrolite ait kimyasal bileşim ve mukavemet değerleri ile sıcaklık ve akım yoğunluğu gibi sistem parametrelerinin uygun bir şekilde seçilmesi neticesinde metal tozlarının katot üzerinde biriktirilmesi gerçekleşmektedir. Daha sonra yıkama, kurutma, indirgeme, tavlama ve öğütme işlemleri uygulanabilmektedir. Bu teknik ile bakır, krom ve magnezyum tozları elde edilmektedir. Yöntem oldukça pahalı olup, kütleli imalat için ekonomik olmaktadır [17, 19].

Mekanik toz üretme tekniği ile sünek özellik göstermeyen, kırılabilir demir alaşımları elde edilmektedir. Sünek metallerin kullanılması durumunda, bu tanecikler kırılmadan birbirleri ile soğuk olarak kaynaklanarak daha büyük boyutlara ulaşırlar. Basit ve düşük maliyetli bir yöntem olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır [20].

Eklemeli imalata yönelik metal tozları genellikle atomizasyon yöntemleri kullanılarak elde edilmektedir. Atomizasyon işleminde ergimiş metal malzeme yüksek enerjili gaz veya sıvı ile temas ettirilerek küçük parçacıklara ayrılmaktadır. Küçük boyutlara ulaşan damlacıklar hızlı bir şekilde soğutulurak katı toz parçacıklar oluşturulmaktadır. Atomizasyon için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar arasında, su ve gaz atomizasyonu en çok tercih edilen yöntemlerdir. Gaz atomizasyonunda hava, azot ve argon en sık kullanılan gazlardır. Nozul tasarımı ve geometrisi, kullanılan gazın basıncı ve hacmi, sıvı metalin akış çapı gibi birçok parametre toz parçacıkların boyutlarını belirlemektedir. Proseste ergiyik halde bulunan metal damlacıkların katılma hızı ise elde edilen tozların şeklini tayin etmektedir. Gaz atomizasyon tekniği ile elde edilen tozlar küre şekline sahip iken, su atomizasyonu ile düzensiz ve karmaşık şekilli tozlar elde edilmektedir. Küre biçimine sahip tozların akıcılık özelliklerinin yüksek olması, eklemeli imalata yönelik metal tozlarının üretiminde gaz atomizasyonu tekniğini su atomizasyonuna göre daha tercih edilir konuma getirmektedir [15, 21]. Gaz atomizasyon işlemi şematik olarak Şekil 2.6' da gösterilmektedir. Yöntemde,

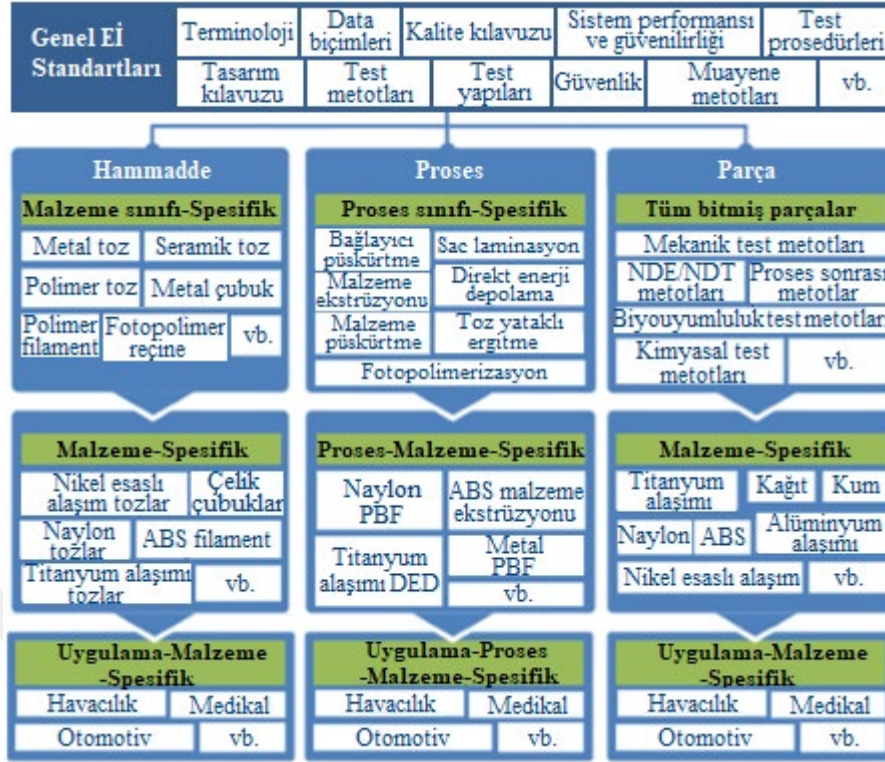
ergiyik metal malzeme atomizasyon nozulünden geçerek hava, azot ve argon gibi gaz jetlerine tabi tutulmaktadır. Gaz atomizasyonu ile çok küçük damlacıklar halini alan metal malzeme atomizasyon kulesinin içerisinde düşerken soğuyup sertleşmektedir. Ardından, elde edilen tozlar bir hazne yardımıyla toplanmaktadır.



Şekil 2.6. Gaz atomizasyon işlemi [15].

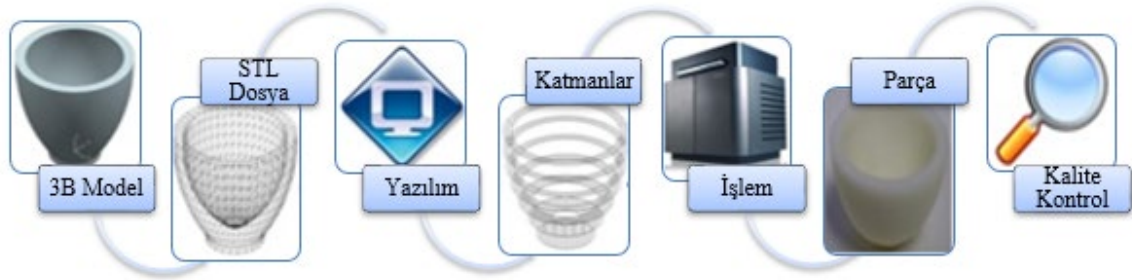
2.2. Eklemeli İmalat

Üç boyutlu baskı, serbest formlu katı imalat, hızlı prototipleme gibi farklı isimlerle de bilinen eklemeli imalat, geleneksel üretim yöntemlerinin aksine üç boyutlu parça verisinden, malzemelerin katmanlar halinde üst üste birleştirilerek son ürünün oluşturulduğu bir imalat yöntemi olarak tanımlanmaktadır [22]. Eklemeli imalat ile istenilen parçanın nihai şekli, daha sonra herhangi bir talaş kaldırma ya da plastik deformasyon olmadan tek bir işlemde elde edilebilmektedir [23]. Tüm dünyada gerekli standartları sınıflandırma konusunda lider grup olan Amerikan Test ve Malzemeler Birliği (ASTM) tarafından eklemeli imalat farklı açılardan sınıflandırılmıştır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Eklemeli imalat standart yapısı [22].

Eklemeli imalat yöntemi, eklemeli imalat makinesinin tipinden bağımsız olarak çeşitli işlem adımlarından oluşmaktadır. Küçük hacimli üç boyutlu yazıcılardan büyük boyutlarda parça üretilen endüstriyel makineler kadar, tüm üretim bilgisayar ortamında hazırlanan üç boyutlu model ile başlayan birkaç aşamaya dayanmaktadır (Şekil 2.8) [24].



Şekil 2.8. Eklemeli imalat temel işlem adımları [25].

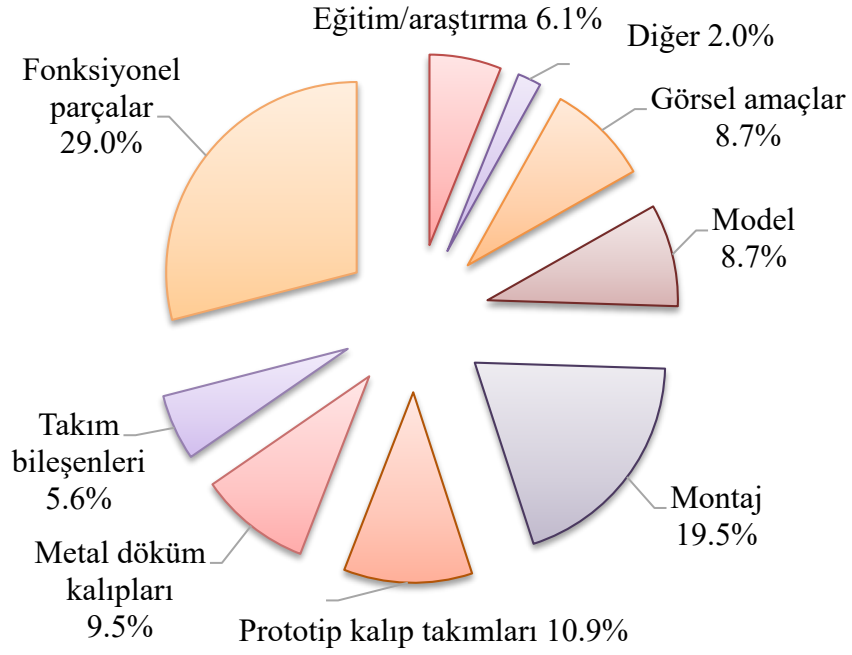
İlk olarak üretilen parçanın üç boyutlu tasarımı STL dosya formatına dönüştürülür. STL dosya formatı, parça yüzeylerini yazılıma tanıtmak için bir adet normal ve üç adet noktadan meydana gelen çok sayıda üçgenden oluşmaktadır. Eklemeli imalat işleminin gerçekleştirilmesi için özel bir yazılım kullanılarak STL data katmanlara ayrılır ve takım yolları belirlenir. Katmanların ve takım yollarının belirlenmesinin ardından bu veriler eklemeli imalat makinesine gönderilir. Makine parametrelerinin (lazer gücü, yapım yönü,

tarama yönü ve hızı, sıcaklık vb.) seçilmesi ile parça katmanlar halinde üretilir. Üretimi tamamlanan parça inşa platformundan ayrılır. Parçadan istenilen özelliklere göre ısıtma işlemi, talaş kaldırma, kumlama, parlatma ve taşlama gibi ikincil işlemler gerçekleştirilir. Eklemeli imalatın her aşaması üretim sonrası parça kalitesini doğrudan etkilemektedir. Özellikle üretim için gerekli doğru parametrelerin seçimi oldukça önemlidir. Ayrıca üretim öncesi veri hazırlama aşamalarından bilgisayar destekli parça tasarımı ve STL dosya format dönüşümü parça kalitesi açısından önemli bir yere sahiptir [26].

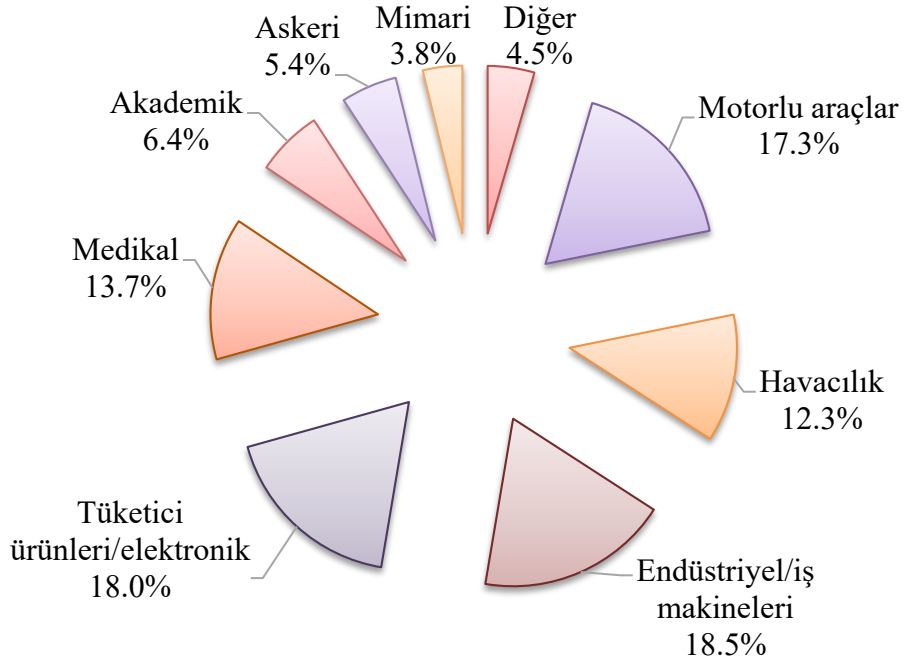
Birçok alanda geleneksel üretim yöntemlerini geride bırakarak, hızlı bir şekilde yükselen eklemeli imalat teknolojisi, üretim ve ürün geliştirme endüstrileri için çok sayıda insan tarafından bir devrim olarak görülmektedir [27]. Geleneksel üretim yönteminde çok sayıda işlem uygulanarak üretilen herhangi bir karmaşık parça, eklemeli imalat kullanıldığında tek aşamada üretilmektedir [28]. Örneğin, çok sayıda parçanın monte edilerek bir araya geldiği kabin havalandırma distribütörü [29], uydu anteni dirseği [30] ve türbin bileşenleri [31] gibi parçalar eklemeli imalat yöntemi ile tek bir adımda elde edilebilmiştir. Bu şekilde tasarım sadeleştirilmiş, alt parça sayısı azaltılmıştır. Elde edilen basit tasarım ve yekpare parça üretimi aynı zamanda daha hafif parça imalatını da beraberinde getirmiştir. Eklemeli imalatın sunmuş olduğu bir diğer avantaj, işlem sonrası neredeyse yok denecek kadar az malzeme oluşmasıdır. Geleneksel yöntemlerde ortalama 10-20 olan ham malzeme/parça ağırlığı, eklemeli imalat ile 1'e kadar azalabilmektedir ve kullanılmayan tozlar bir sonraki işlemede de kullanılabilmektedir. Ayrıca eklemeli imalat ile beraber maliyet artışına neden olan kalıplama gibi gereksinimler ortadan kalkmıştır. Bunun yanı sıra üretimi yapılacak parçanın farklı bölgelerinde malzeme bileşimini değiştirme imkânı sunması eklemeli imalatın diğer bir avantajı olarak sıralanabilir [32].

Günümüzde, eklemeli imalat teknolojisi çok sayıda alanda ve farklı amaçlar doğrultusunda yoğun olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.9' da eklemeli imalatın kullanım amaçları ve sektörel dağılımları gösterilmiştir. Şekil 2.9 incelendiğinde, eklemeli imalatın %29.0' luk oranla en çok fonksiyonel parça üretimi için kullanıldığı görülmektedir. Bunu sırasıyla %19.5 ile montaj ve diğer alanlar takip etmektedir. Eklemeli imalatın sektörel bazda dağılımında ise endüstriyel/iş makineleri, tüketici ürünleri/elektronik ve motorlu araçlar önde gelmektedir. %12.3' lük orana ulaşan havacılık sektörü de bu anlamda önemli bir paya sahiptir. Şekil 2.10' da 1988-2013 yılları arası kurulan eklemeli imalat makinelerinin ülkeler bazında dağılımı verilmiştir. ABD bu dağılımda %38.0 ile ilk sırada yer almaktadır. ABD' yi sırasıyla Japonya, Almanya ve Çin takip etmektedir. Türkiye' nin bu dağılımda %1.4' lük

orana sahip olduğu görülmektedir.

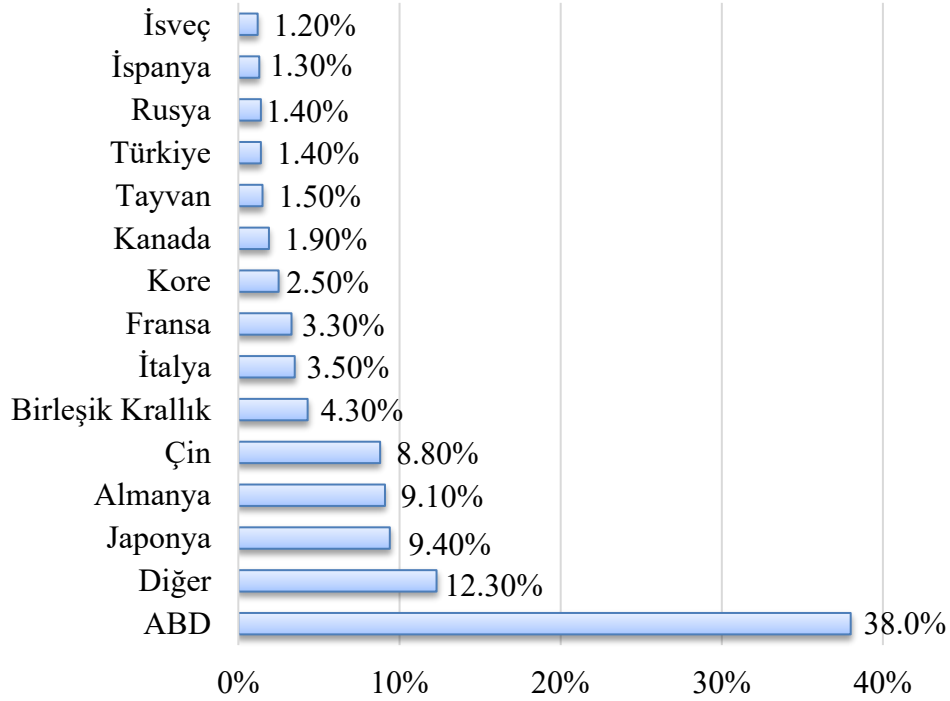


(a)



(b)

Şekil 2.9. Eklemeli imalatın (a) kullanım amaçları ve (b) sektörel dağılımları [33].



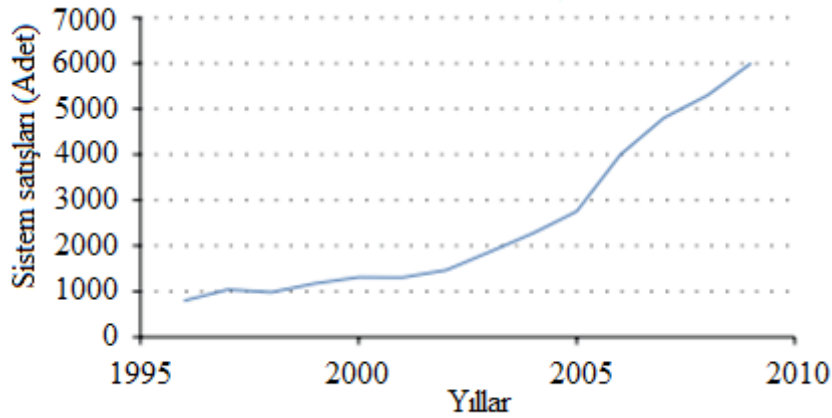
Şekil 2.10. 1988-2013 arası kurulan eklemeli imalat makinelerinin ülkeler bazında dağılımı [33].

2.2.1. Eklemeli imalat tarihçesi

Günümüz modern eklemeli imalat teknolojisinin temelini oluşturan ilk çalışmalar 1960' lı yılların sonlarına dayanmaktadır. Swainson tarafından 1968' de önerilen polimerizasyon yöntemi eklemeli imalat teknolojisinin ilk örneklerinden biri olarak görülebilir [34]. 1971 yılına gelindiğinde, Ciraud şu anki eklemeli imalat teknolojisine benzer bir toz birleştirme tekniği geliştirerek bu sürece katkı sunmuştur [35]. 1979' da ise R.F. Housholder, lazer ile toz sinterlemeyi ilk kez tanımlayarak, katmanların sırayla biriktirilmesini ve katılaşmasını incelemiştir [36].

1980 sonrası, bugünkü eklemeli imalat süreçleri araştırılmaya başlanmış ve bazıları ticari olarak geliştirilmiştir. Bunlar arasında, Stereolitografi (SLA, Stereolithography), Eriyik Yığılma Modelleme (FDM, Fused Deposition Modeling), Lazer Metal Biriktirme (LMD, Laser Metal Deposition), Tabakalı Obje Üretimi (LOM, Laminated Object Manufacturing), 3 Boyutlu Baskı (3DP, Three Dimensional Printing) ve Seçici Lazer Sinterleme (SLS, Selective Laser Sintering) gibi eklemeli imalat yöntemleri bulunmaktadır. Bu işlemlerde kullanılan malzemeler arasında foto-kürlenebilir reçine, poliamid, balmumu, ABS, polikarbonat, metal-seramik-polimer tozları, yapışkan kaplı tabakalar yer almaktadır [37].

Bilgisayar destekli tasarım ile üç boyutlu bir nesneyi katmanlar halinde oluşturma'nın ilk şekli 1980' lerde Japonya' da geliştirilen ve ardından ABD' de yoğun ilgi gören hızlı prototipleme teknolojisidir [38, 39]. 1890'lı yıllarda topoğrafya alanında kullanılan bu teknoloji [40], 1951 yılında Munz'un önerdiği stereolitografi teknolojisiyle endüstriyel alanda kullanılmaya başlamaktadır [41]. Hızlı prototipleme ile mühendislerin aklında var olan tasarım ve düşünceler hızlı bir şekilde gerçeğe yansıtılabilmektedir. Ürün geliştirme sürecinde zaman ve maliyet açısından tasarruf sağlamanın yanısıra işlenmesi çok zor olabilecek hemen hemen her şeklin oluşturulmasına imkân tanıyan bu teknoloji eklemeli imalat süreçlerinin ilki olarak gösterilmektedir [39]. Günümüzde plastik malzemelerin kullanılarak bitmiş ürün elde etmemizi sağlayan ve 3 boyutlu baskı olarak da bilinen teknolojinin temeli hızlı prototiplemeye dayanmaktadır [42, 43]. Hızlı prototipleme teknolojisinin gelişimi Şekil 2.11' de verilmiştir [44].



Şekil 2.11. Hızlı prototipleme teknolojisinin gelişimi [45].

Hızlı prototiplemenin ardından, polimer ve seramik tozlar kullanılarak parça üretilen seçici lazer sinterleme yöntemi üzerine ilk deneylere 1984 yılında Deckard ve Beaman tarafından 100W' lık YAG ısı kaynağı kullanılarak başlanmıştır. 1986 yılına gelindiğinde aynı araştırmacılar tarafından ilk prototip SLS makinesi (Betsy) yapımına başlanarak, SLS, Deckard ve Beaman tarafından Teksas Üniversitesi' nde patent altına alınmıştır [46, 47].

Eklemeli imalatın ilk ticari kullanımı, 1987 yılında oda sıcaklığında sıvı halde ki fotopolimer reçine tabakaların bir lazer ışını kullanılarak kürleştirilmesine dayanan, 3D Systems (ABD) tarafından geliştirilen stereolitografi sistemiyle ortaya çıkmıştır. Stereolitografi sistemine ait ilk patent 1986' da Chuck Hull tarafından alınmıştır [38]. 3D Systems firmasının stereolitografi sistemini ilk ticari polimer yazıcı olan SLA-1 ile ticarileştirmesinin ardından, 1988 ve 1989 yıllarında sırasıyla CMET ve D-MEC (Japonya),

1990' da EOS (Almanya) stereolitografi sistemini ticarileştirmiştir [48].

Üç boyutlu yazıcılarda yaşanan gelişmeler yeni patentlerin alınmasını da beraberinde getirmiştir. 1989 yılında Sachs, Haggerty, Cima ve Williams tarafından geliştirilen orijinal üç boyutlu yazıcı MIT' de patent altına alınmıştır [49]. Üç boyutlu baskı teknolojisindeki büyük yenilik 1990 yılında gerçekleşmiştir. İlk üç boyutlu baskı ile metal parça üretimi, Manriquez Frayre ve Bourell tarafından metal alaşımlı tozlar (Pb-Sn) kullanılarak bu yılda yapılmıştır [50].

1991 yılı yeni sistemlerin geliştirildiği ve bu sistemlerin büyük ölçüde ticari hayata kazandırıldığı bir yıl olarak dikkat çekmektedir. Stratasys firması tarafından FDM ve ardından Helisys firması tarafından LOM sistemleri ticarileştirilerek, piyasaya sunulmuştur [48]. FDM sisteminin teknoloji patentinin düşmesi ile RepRap isimli topluluk bu teknolojiyi açık kaynaklı olacak şekilde endüstriyel seviyeden masaüstü seviyesine indirgeyerek, düşük bütçelerle herkes tarafından ulaşılabilir hale gelmiştir. Kelime açılımı replicating (kopyalama) ve rapid (hızlı) olarak geçen, 2006 yılında Amerika da ortaya çıkan RepRap projesi, açık kaynaklı 3 boyutlu yazıcı devrimini başlatmıştır. Açık kaynaklı olması yazıcıda eklemeler ve geliştirmeler yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. RepRap kapsamında, Darwin (2007), Mendel (2009), Prusa Mendel (2010) ve Huxley (2010) gibi 3 boyutlu yazıcılar geliştirilmiştir [51, 52].

90' lı yılların başlarından itibaren hızlı prototipleme için kullanılan polimer esaslı 3B yazıcılardan, doğrudan parça oluşturulabilen karmaşık ve hızlı üretime yönelik eklemeli imalat çalışmalarına olan ilginin arttığı görülmektedir [53, 54]. Bu çalışmalardan biri olan ve günümüzde lazer ışınları vasıtasıyla metal parçalar üretmek için kullanılan Seçici Lazer Ergitme (SLM, Selective Laser Melting) sistemi, seçici lazer sinterleme teknolojisinin devamı niteliğindedir. SLM' ye ait ilk çalışmalar 1995 yılında Aachen, Almanya' daki Fraunhofer Lazer Teknoloji Enstitüsü ILT' de bir alman araştırma projesi ile başlamıştır ve ILT tarafından SLM' nin temel patenti 'DE 19649865' alınmıştır [55, 56]. Aynı yıl EOS GmbH firması SLM sistemini lisans altına alarak [57], ilk ticari SLM makinesi olan EOSINT M 250' yi piyasaya sürmüştür [58]. 1995' in sonlarına yaklaşırken, Sandia Ulusal Laboratuvarlarında, Direkt Enerji Depolama (DED, Direct Energy Deposition) olarak bilinen metal eklemeli imalat sistemi üzerine de ilk çalışmalar yapılmıştır. Bu teknoloji bir alt kümesi olan Lazerle İşlenmiş Net Şekillendirme (LENS, Laser Engineering Net Shaping) olarak Optomec firması tarafından ticarileştirilmiş ve markalanmıştır [48, 57]. 1996 yılında

ise, Alman menşeli Elextrolux Hızlı Geliştirme (ERD) ve EOS firmaları tarafından kalıp üretimine gerek kalmadan, farklı malzemeler kullanılarak hızlı bir biçimde metal prototiplerin ve metal parçaların üretilmesini sağlayan Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS, Direct Metal Laser Sintering) teknolojisi geliştirilmiştir [59].

Eklemeli imalat teknolojisinin gelişimine yönelik tarihsel süreçte 90' ların sonlarına geldiğimizde, 1997 yılında EOS firması 3D Systems firmasından SLS' nin tüm haklarını lisans altına alarak, eklemeli imalata yönelik çalışmalarını toz yatağı teknolojisine kaydırmıştır [58]. 1999' da ise, ultrasonik kaynak ve CNC frezeleme işlemleri kullanılarak gerçekleştirilen sac laminasyon işlemi [57], Dawn White tarafından geliştirilmiş ve patent altına alınmıştır [60].

2000 sonrası, artan eklemeli imalat çalışmaları neticesinde yeni sistemlerin ortaya çıktığı ve bu sistemlere ait ticari faaliyetlerin devam ettiği görülmektedir. Ayrıca gelişen teknoloji ile beraber firmalar arasında yeni anlaşmaların, yeni ortaklıkların ve de el değiştirmelerin sıkça yaşandığı bir dönem olma özelliğine sahiptir.

2000 yılında, İsveç' teki araştırmalar başka bir toz yatak tekniği olan Elektron Işın Ergitme (EBM, Electron Beam Melting) teknolojisinin gelişimi ile sonuçlanmıştır. EBM yöntemi, Lars-Erik Andersson ve Morgan Larsson tarafından patentlenmiş ve Arcam AB tarafından lisans altına alınmıştır [61]. Arcam AB firması, EBM yöntemini geliştirerek S12 adındaki ilk ticari makineyi 2002 yılında pazara sunmuştur [62].

Artan ticari faaliyetlerin devamında, Stratasys firması FDM teknolojisini kullanarak ABS plastikte parça üreten bir makine olan Prodigy' yi, İsrail menşeli Objet Geometries firması ise UV ışık kaynağı kullanarak fotopolimeri biriktiren ve sertleştiren bir 3 boyutlu inkjet yazıcı olan Quadra' yı 2000 yılında piyasaya sunmuştur [48]. 2001' de ise, 3D Systems firması SLS teknolojisini ticarileştirmek amacıyla DTM' yi (Desk Top Manufacturing Corporation) satın alarak, çalışmalarına başlamıştır [46].

EuroMold 2003' te EOS, EOSINT M 270 direkt metal lazer sinterleme makinesini tanıtmıştır. Sistem, 1995 yılında piyasaya sürülen EOSINT M 250 makinesinde kullanılan CO2 lazer yerine bir fiber lazer kullanmaktadır. 2004 yılında ise Stratasys firması, hem ABS hem de polikarbonat malzemeleri işleme kapasitesine sahip FDM Vantage makinesinin üç varyasyonundan oluşan Triplets' i duyurmuştur. 2006' ya gelindiğinde EOS, EOSINT M 270 sistemi için kobalt-krom toz malzemesini piyasaya sürerek, 17-4 paslanmaz çelik malzemesinin EOSINT M 270 için ticari olarak kullanılabilir olduğunu açıklamıştır [48].

Arcam firması, 2007 yılında, havacılık endüstrisine yönelik daha büyük yapısal parçaların üretimi için bir sonraki üretim modeli olan daha büyük hacimli Arcam A2' yi tanıtmıştır [62]. Ayrıca EuroMold 2007' de, Objet Geometries firması, aynı anda iki farklı malzeme ile işlem yapabilen çok materyalli Connex500 üç boyutlu baskı sistemini piyasaya sunmuştur.

2008 yılına baktığımızda, Optomec, fiber lazer uygulamalı, çift toz besleme ünitesi ve proses takibi için entegre termal görüntüleme cihazına sahip LENS MR-7 makinesini piyasaya sürmüştür. Ayrıca eklemeli imalat teknolojisinin gelişimine yönelik olarak 3D Systems, Boeing (ABD), EOS, Evonik (Almanya) ve MTT tarafından Padernborn Üniversitesi (Almanya) ile 2008' in sonlarına doğru Doğrudan Üretim Araştırma Merkezi kurulmuştur [48].

Arcam tarafından 2009 yılında ortopedik implantların hacimli üretimi için özel olarak geliştirilen Arcam A1 piyasaya sunulmuştur. Aynı yıl, yüksek sıcaklıktaki malzemelerin işlenmesi için daha uygun bir yapım odası ve daha büyük bir yapım alanı sunan Arcam A2X tanıtılmıştır. 2012 yılına gelindiğinde, Arcam A2X' in ardından EBM platformunda şimdiye kadarki en büyük yapım alanını sunan Arcam A2XX piyasaya sürülmüştür. 2013' te ise, endüstriyel implant üretimi için özel olarak tasarlanmış Arcam Q10 ve havacılıkla ilgili bileşenlerin endüstriyel üretimi için Arcam Q20 piyasada yerini almıştır [62].

Eklemeli imalatın tarihsel gelişiminde 2012' yi izleyen yıllar görülmemiş bir heyecan, yatırımlar, yeni araştırmalar, ticarileştirme faaliyetleri ve hedefler ile doludur. 2011' in sonlarında Matsuura tarafından, hibrit üretim teknolojisinin bir örneği olan toz yataklı metal ergitme işlemi ile CNC frezelemenin bir arada olduğu hibrit bir makine kullanılarak metal parçalar üretilmiştir. Ardından 2013' te hibrit imalat teknolojileri daha da gelişerek, ön plana çıkmaya başlamıştır. EuroMold 2013' te, Almanya' nın en büyük kesme tezgâhı, CNC kontrollü Torna ve Freze tezgâhları üreticilerinden biri olan DMG Mori Seiki, freze ve katmanlı imalatın tek makinede olduğu Lasertech 65 hibrit sistemini tanıtmıştır [63]. Hibrit metal sistemleri konusunda gerçekleştirilen bu girişimler, 2014 yılında devasa boyutlara ulaşmıştır. Endüstriyel makine üreticilerinden Mazak, Fonon Technologies, Sodick, Hurco ve Hermle hibrit metal eklemeli imalat sistemleri konusunda ileriye dönük planlarının olduğunu açıklamışlardır [48].

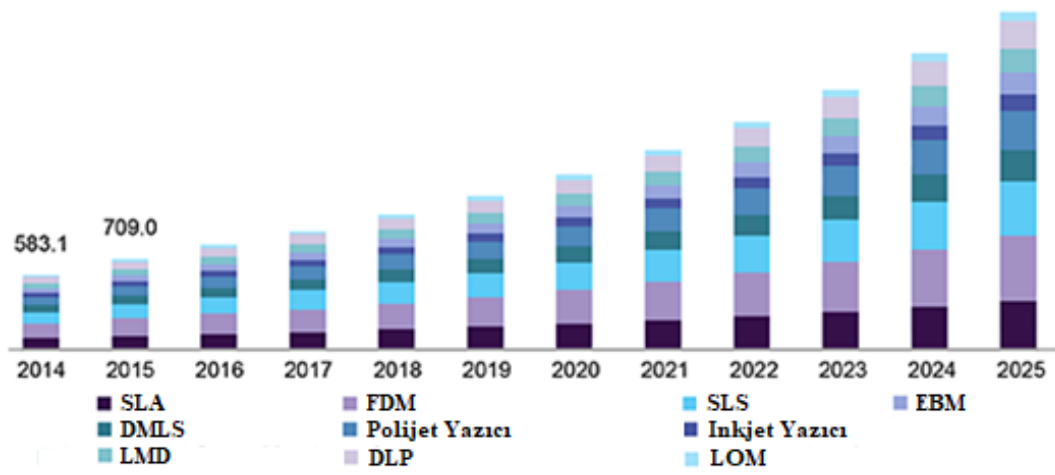
HP, 2014' te, lazer sinterlemeye benzeyen, ancak lazer kullanmadan termoplastik tozdan parçalar üreten Multijet Ergitme (MJF, Multi Jet Fusion) olarak isimlendirilen yeni bir

teknolojiyi tanıtmıştır. İşlem, yapı platformu üzerinde biriken ince bir toz malzeme katmanı ile başlar. Parça geometrisi ve özelliklerini tanımlamak için kaynaştırma, detaylandırma ve dönüştürme ajanlarının damlacıkları, toz halindeki malzemenin üzerine termal enerji ile birlikte uygulanır. Bu döngü model ortaya çıkana dek tekrarlanmaktadır. MJF işlemi hız, üretilen parçaların kalitesi ve çok renkli kabiliyeti açısından son derece etkileyici bir yöntemdir ve HP tarafından 2016 yılında HP Jet Fusion 3D yazıcılarla dünyaya duyurulmuştur [48].

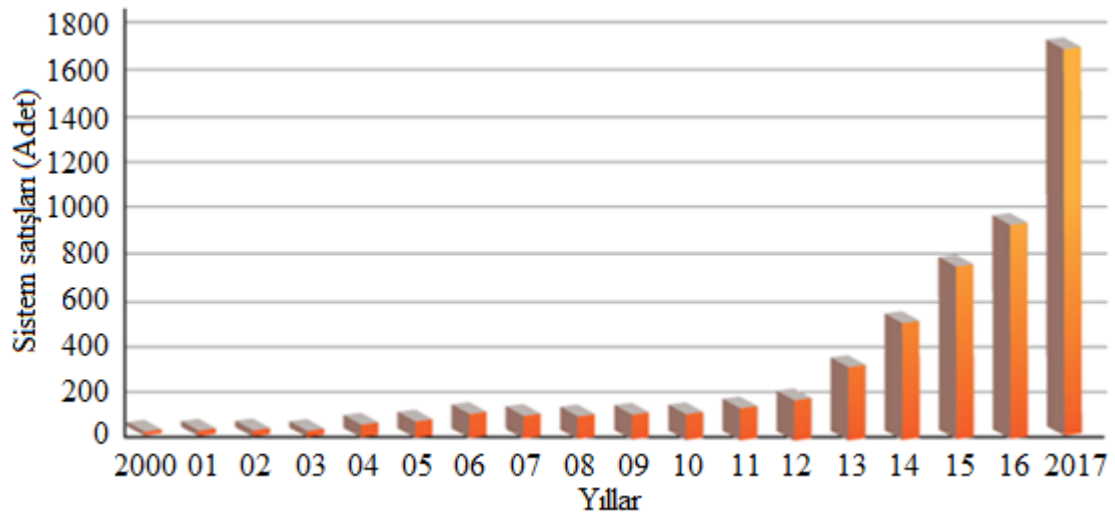
Eklemeli imalat konuları günümüzde havacılık ve uzay sanayiinde de yoğun olarak çalışılan alanların başında gelmektedir. Uzay sanayiinde gerçekleştirilen bir çalışmada, NASA ile ortak çalışmalar neticesinde sıfır yerçekimi altında malzeme ekstrüzyonu yapabilecek bir üç boyutlu yazıcı Eylül 2014 yılında fırlatılarak, Uluslararası Uzay İstasyonu' na (ISS) kurulmuştur. Takip eden aylar boyunca 25 test parçası üretilerek, NASA tarafından incelemeler yapılmıştır [48]. Havacılık alanında ise, Boeing F/A 18 Super Hornet muharebe uçaklarının gövdesinde yer alan yaklaşık 150 parça DMLS ile yapılmaktadır [64].

Üç boyutlu baskı teknolojisinin gelişmesi ile kullanım alanlarının da arttığı görülmektedir. Bunlardan en ilgi çekici olanı Ocak 2015' te gerçekleşmiştir. Kuzey Amerika Uluslararası Otomobil Fuarı' nda, Arizona' nın yerel Local Motors firması canlı olarak 3 boyutlu bir araba basmıştır. İşlem, katmanlar halinde karbon fiber aşılansmış plastik tabakalar eklenerek gerçekleştirilmiştir. Strati denilen ve saatte 25 mil hıza çıkabilen aracın basılması 44 saat sürmüştür [65]. Bir başka ilgi çekici gelişme, Daimler' in, depolarında yedek parça bulundurmaktan kaçınmak amacıyla 'talep üzerine baskı' kavramına uyan eklemeli imalat teknolojisini, üretmiş olduğu kamyonlara parça üretmek için kullanmaya başlamış olmasıdır [66].

Eklemeli imalatın gelişimi rakamsal olarak değerlendirildiğinde; küresel eklemeli imalat sektörünün, 2013-2017 yılları arasında yıllık ortalama %24,9 oranında büyüyerek, 2017 yılında 7,01 milyar dolarlık pazar hacmine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca 2018 tarihli Wohlers Raporu' na göre, 2017 yılında eklemeli imalat polimerleri için pazar %22,5 oranında artarken, metal malzeme talebinde %44,6' lık artış kaydedilmiştir. 2016' da tahmini 983 adet metal yazıcı satılırken, 2017 yılında neredeyse %80' e yakın bir artışla 1768 adet metal yazıcı satışı gerçekleştirilmiştir. Sektörün, 2018' den 2025' e kadar %16,5' i aşan bir yıllık birleşik büyüme oranında genişlemesi beklenmektedir [66-68] (Şekil 2.12 ve 2.13).

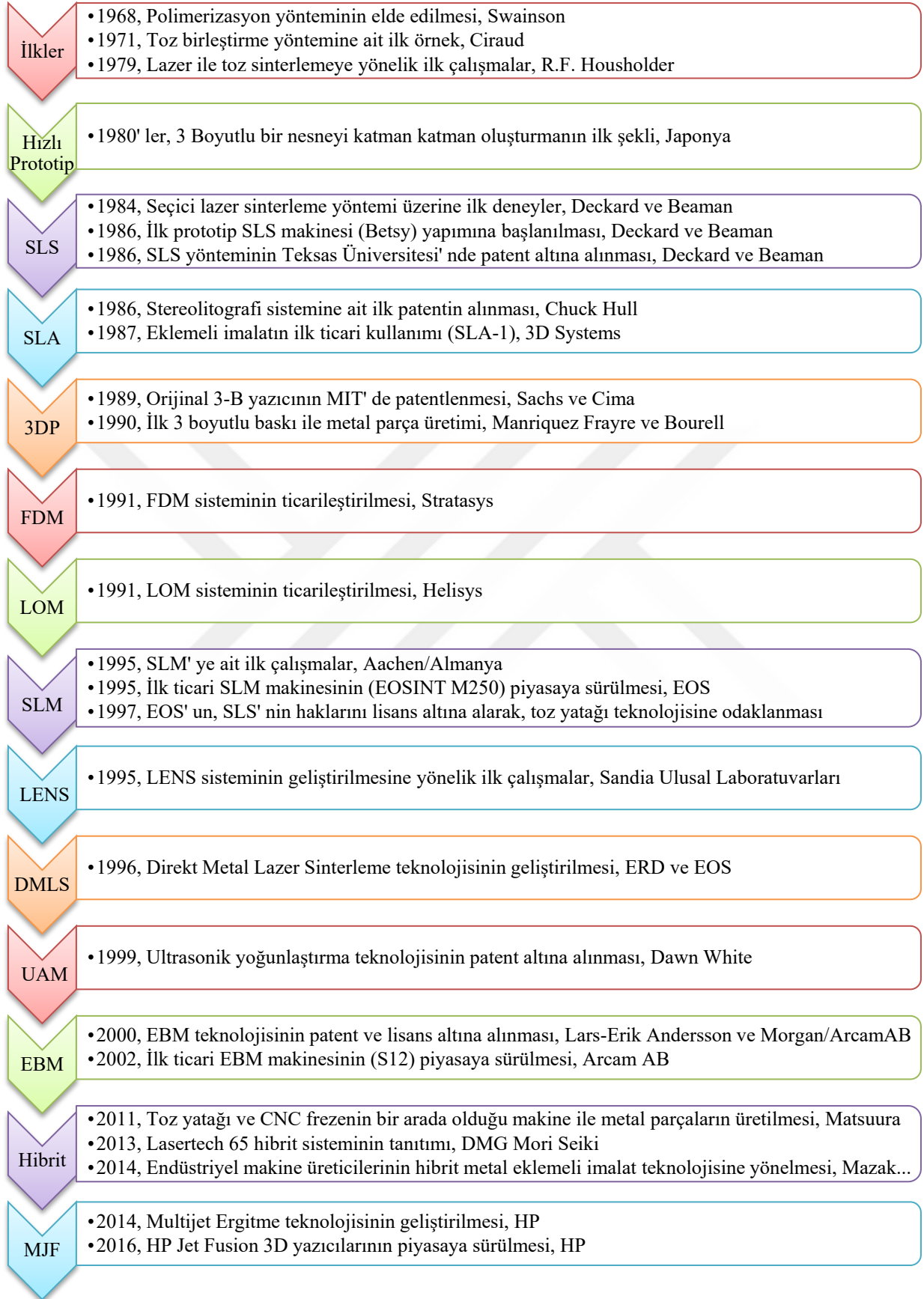


Şekil 2.12. 2014-2025 yılları arası eklemeli imalat sistemlerine ait pazar büyüklükleri (Milyon dolar) [68].



Şekil 2.13. Metal eklemeli imalat sistem satışlarının yıllara göre yükselişi [69].

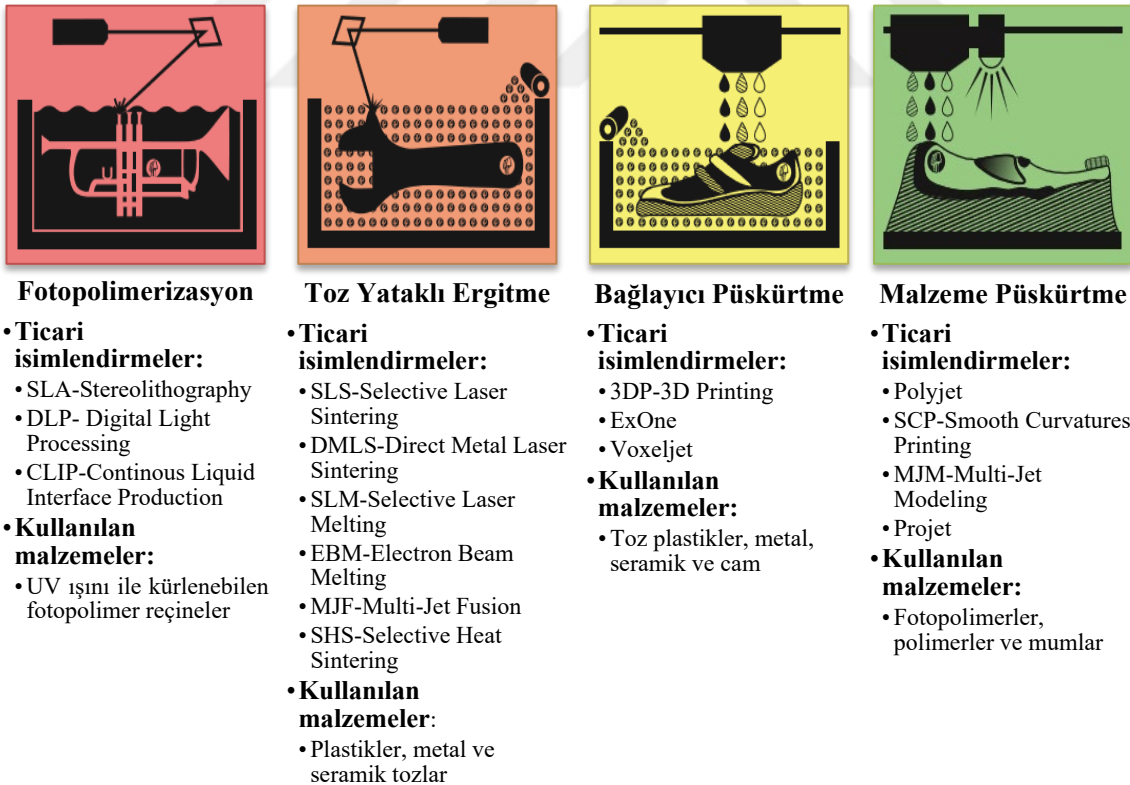
Şekil 2.14' te 1968 yılında polimerizasyon yönteminin elde edilmesi ile başlayan eklemeli imalatın tarihsel gelişimi özetlenmiştir.



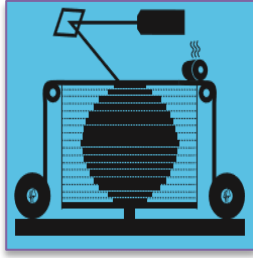
Şekil 2.14. Eklemeli imalat teknolojisinin tarihsel gelişimi.

2.2.2. Eklemeli imalat yöntemleri

Eklemeli imalat yöntemleri ASTM tarafından yedi ana kategoride sınıflandırılmıştır. Bu kategoriler, fotopolimerizasyon (photopolimerization), toz yatağında ergitme (powder bed fusion), bağlayıcı püskürtme (binder jetting), malzeme püskürtme (material jetting), sac laminasyon (sheet lamination), malzeme ekstrüzyonu (material extrusion) ve direkt enerji depolama (directed energy deposition) şeklinde ifade edilmektedir [22]. Şekil 2.15'te kategorilere ait şematik görüntüler, ticari uygulama isimleri ve kullanılan malzemeler gösterilmiştir. Literatürde, eklemeli imalat yöntemleri için farklı ölçütlere dayalı sınıflandırmalar da mevcuttur. Bu sınıflandırmalardan birinde, kullanılan başlangıç malzemesinin durumu dikkate alınarak eklemeli imalat yöntemleri sıvı bazlı, katı bazlı ve toz bazlı olmak üzere üç ana kategoride değerlendirilmiştir (Şekil 2.16). Bu tez çalışmasında sınıflandırılan yöntemler hakkında genel bilgiler verilecektir. Daha sonra metal eklemeli imalat teknolojilerinin detaylandırılması yapılacaktır.

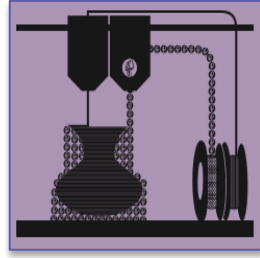


Şekil 2.15. Eklemeli imalat yönteminin ASTM F2792 standardına göre sınıflandırılması [70].



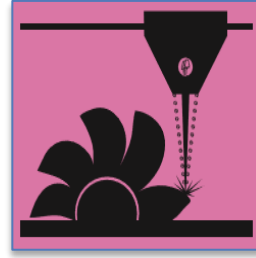
Sac Laminasyon

- **Ticari isimlendirmeler:**
 - LOM-Laminated Object Manufacture
 - SDL-Selective Deposition Lamination
 - UAM-Ultrasonic Additive Manufacturing
- **Kullanılan malzemeler:**
 - Kağıt, plastik levhalar ve metal folyolar



Malzeme Ekstrüzyonu

- **Ticari isimlendirmeler:**
 - FDM-Fused Deposition Modeling
 - FFF-Fused Filament Fabrication
- **Kullanılan malzemeler:**
 - Termoplastik filamentler



Direkt Enerji Depolama

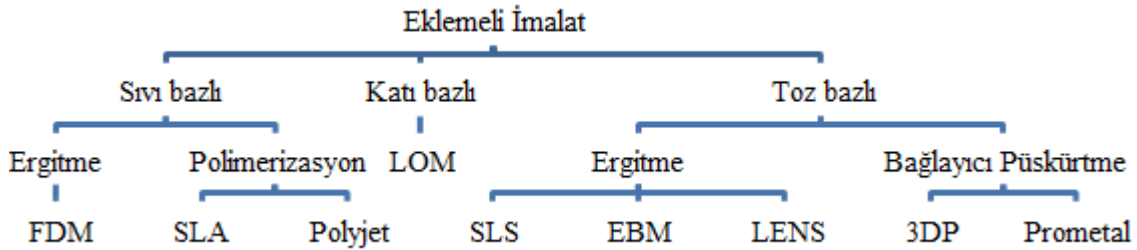
- **Ticari isimlendirmeler:**
 - LENS-Laser Engineered Net Shaping
 - DMD-Direct Metal Deposition
 - LMD-Laser Metal Deposition
- **Kullanılan malzemeler:**
 - Metal toz ve teller



Hibrit

- **Ticari isimlendirmeler:**
 - AMBIT-Created by Hybrid Manufacturing Technologies
- **Kullanılan malzemeler:**
 - Metal/seramik toz ve teller

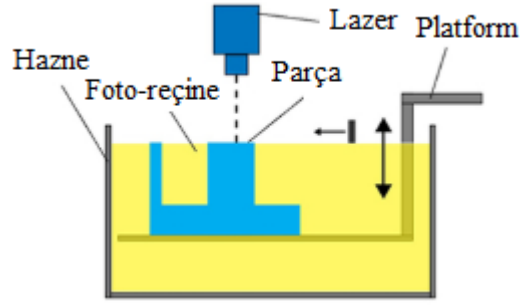
Şekil 2.15 devam. Eklemeli imalat yönteminin ASTM F2792 standardına göre sınıflandırılması [70].



Şekil 2.16. Eklemeli imalat yönteminin başlangıç malzemesinin durumuna göre sınıflandırılması [71].

➤ Fotopolimerizasyon

Fotopolimerizasyon, hazne içerisinde sıvı halde bulunan fotopolimer reçine tabakalarının üzerine seçici olarak gönderilen bir ışın vasıtasıyla kürleştirilmesi prensibine dayanan sıvı bazlı bir işlemdir (Şekil 2.17). İşlemde, ışının ulaştığı bölgelerde polimerizasyon işlemi başlayarak bu alanlar katılaşır. Ardından platform aşağıya doğru hareket ederek ek katmanlar inşa edilir. Bu döngü ürün ortaya çıkana dek tekrarlanır ve son olarak reçine dolu hazne boşaltılarak ürün çıkartılır [42, 71]. Yöntem, hızlı imalat süreci, iyi yüzey kalitesi ve yüksek boyut hassasiyeti gibi avantajlara sahip iken diğer yöntemlere nazaran pahalı ve kullanılan fotoreçine malzemelerinin kullanımı sınırlıdır [72].



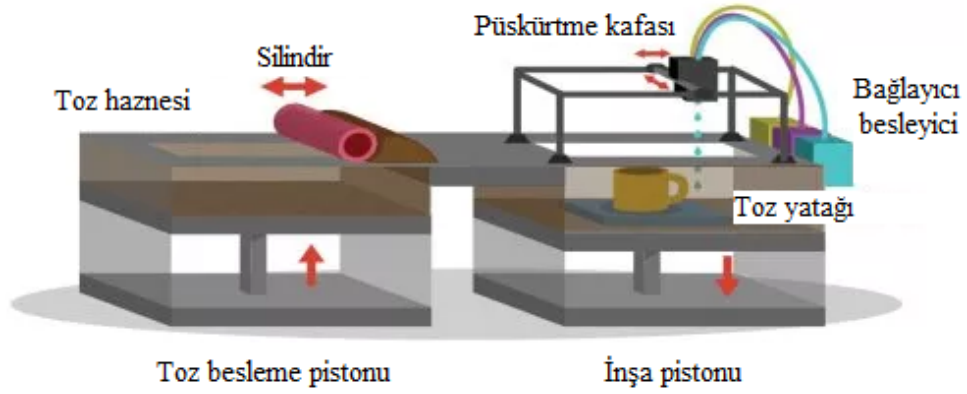
Şekil 2.17. Fotopolimerizasyon işlemi [73].

➤ Toz yataklı ergitme

Toz yataklı ergitme yönteminde, toz haline getirilmiş malzemeler lazer veya elektron ışını gibi bir ısı kaynağı vasıtasıyla eritilerek seçici olarak birleştirilir. Tüm toz yataklı ergitme işlemlerinde toz malzemesini katmanlara uygulamak için benzer prensipler kullanılır. Bu işlem bir rulo veya bıçakla olmak üzere iki farklı teknikle yapılmaktadır. İşlem sonunda parçayı tamamen çevreleyen kaynaşmamış toz malzemesi bulunmaktadır. Bitmiş iş parçasını çevreleyen bu toz, istenmeyen özellikler için bir destek malzemesi görevi görmektedir. Geniş malzeme yelpazesi sunan bu teknoloji ile karmaşık geometriye sahip plastik ve metal parçaların üretimi yapılabilmektedir. Kaynak edilebilir herhangi bir metal malzeme toz yataklı ergitme işlemi için iyi bir aday olarak kabul edilir. Paslanmaz ve takım çelikleri, titanyum ve alaşımları, nikel esaslı alaşımlar, bazı alüminyum alaşımları ve kobalt-krom gibi çeşitli malzemeler toz yataklı ergitme işleminde kullanılmaktadır. İşlem için gerekli enerji miktarının yüksek ve üretim boyutlarının sınırlı olması ise yöntemin dezavantajları olarak sıralanabilir [70, 74, 75].

➤ Bağlayıcı püskürtme

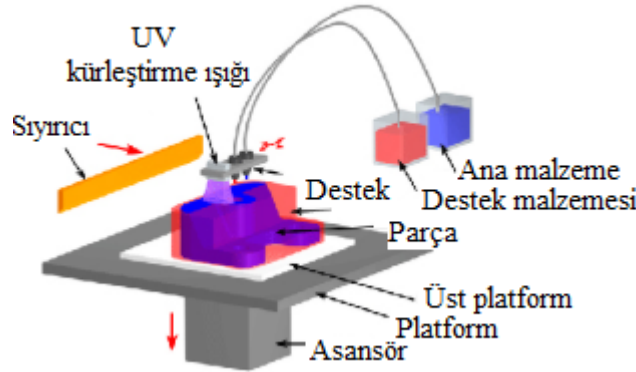
Üç boyutlu baskı teknolojisi olarak da bilinen bağlayıcı püskürtme yönteminde, granül veya toz formu ana malzeme ile toz tabakaları arasında yapışkan görevi gören ve genellikle sıvı halde bulunan organik veya inorganik içerikli bağlayıcılar kullanılmaktadır. Sıvı bağlayıcılar ince toz katmanlarına seçici olarak uygulanarak ürün elde edilir (Şekil 2.18). Toz malzeme parçanın ana gövdesini oluşturur ve baskı hızını artırmak için ek bir ısıtıcı kullanılır [76]. Diğer toz esaslı eklemeli imalat teknolojilerine benzer şekilde, parça toz yatağı ile desteklenir ve kaynaşmamış tozdan temizlenir. Diğer eklemeli imalat işlemlerine göre hızlı ve yüksek verimliliğe sahip bir yöntem olan bağlayıcı püskürtme işlemi ile renkli baskı yapılabilmektedir [70, 77].



Şekil 2.18. Bağlayıcı püskürtme işlemi [78].

➤ Malzeme püskürtme

Malzeme püskürtme yönteminde, damlacıklar halinde platform üzerine akıtılan malzeme katmanlar halinde sertleştirilerek parçalar inşa edilmektedir (Şekil 2.19). Yaygın teknikler arasında ultraviyole ışını ile kürlenebilen fotopolimer bir reçinenin püskürtülmesinin yanı sıra ortam sıcaklığında katılaşan termal olarak ergimiş malzemelerin püskürtülmesi de yer almaktadır. Yöntem ile polimer, mum ve metal malzemeler kullanılarak, yüksek boyut hassasiyetine sahip, bir veya daha fazla malzemeden oluşan parçaların renkli imalatı yapılabilmektedir [70].

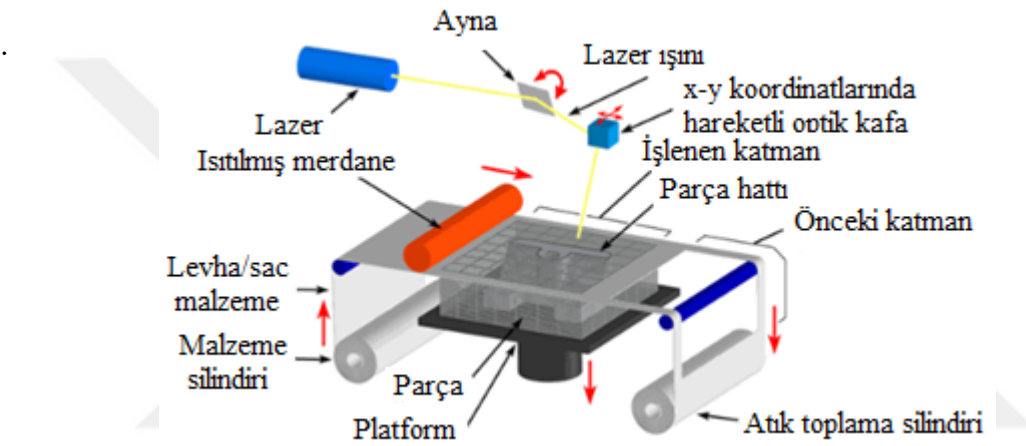


Şekil 2.19. Malzeme püskürtme işlemi [79].

➤ Sac laminasyon

Sac laminasyon yöntemi ile parça üretimi, sac veya levha formundaki malzemelerin üst üste istiflenmesi, birleştirilmesi ve kesilmesi şeklinde gerçekleşmektedir (Şekil 2.20). Kullanılan laminasyon teknikleri kimyasal bağlama, yapıştırma, ultrasonik kaynak ve sert lehimleme olarak sıralanabilir. İşlem gören tabakalara ait istenmeyen bölgelerin kesim

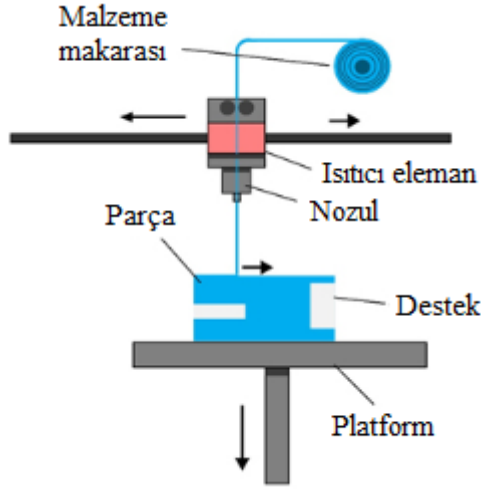
işlemi bir karbondioksit lazer vasıtasıyla yapılmaktadır. Kesme işleminin ardından platform katman kalınlığı kadar aşağı indirilerek inşa edilmiş tabakanın üzerine yeni bir tabaka eklenir ve kesilen malzemeler atık toplama silindiri ile toplanır. Yöntemde kâğıt, plastik ve metal gibi çok sayıda farklı malzeme kullanılmaktadır. Bu yöntemin avantajları yüksek inşa hızları, düşük maliyet, destekleyici yapılara ihtiyaç duyulmaması, işlem sırasında deformasyon veya faz değişikliği olmaması ve büyük parçaların üretilebilmesidir. Dezavantajları ise, artık malzemenin oluşması, düşük yüzey kalitesi sunması ve karmaşık iç boşlukların imalatının zor olmasıdır [42, 80].



Şekil 2.20. Tabakalı obje üretim yöntemi [80].

➤ Malzeme ekstrüzyonu

Malzeme ekstrüzyonu yönteminde, besleme makarası vasıtasıyla hareketi sağlanan filament formundaki malzemeler ısıtılmış bir boşluktan geçerek sıvı hale getirilir ve ergimiş malzeme üst üste biriktirilerek parçalar inşa edilir (Şekil 2.21). Eriyik yığma modelleme (FDM) olarak ta adlandırılan bu yöntemde, akrilonitril bütadiyen stiren (ABS), poliaktik asit (PLA) ve polikarbonat (PC) gibi termoplastiklerin yanı sıra kompozit malzemelerden oluşan filamentler de kullanılmaktadır. Yöntemin en temel avantajı makine yatırım ve kullanım maliyetleri açısından uygun olması ve ofis şartlarında kullanıma imkân tanınmasıdır. Ancak yöntem ile büyük karmaşık parçaların oluşturulması günlerce süren yavaş bir işlem olup pürüzsüz bir yüzey elde etmek için ek bir bitirme işlemi gerekmektedir [81, 82].



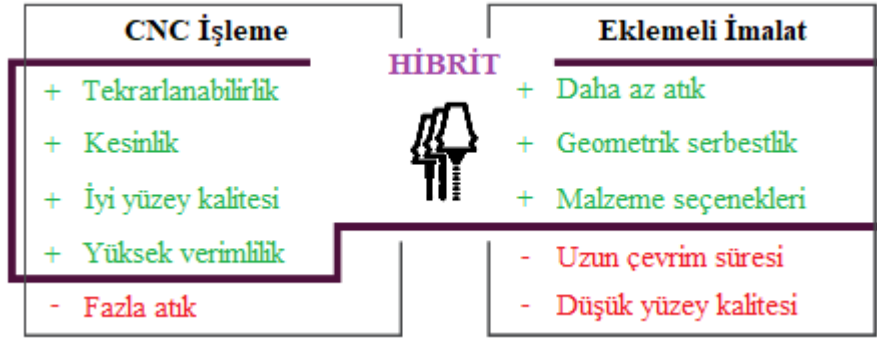
Şekil 2.21. Malzeme ekstrüzyonu yöntemi [81].

➤ Direkt enerji depolama

Direkt enerji depolama yöntemi ile toz ya da tel şeklindeki metal malzemeler elektron veya lazer ışını gibi ısı kaynakları vasıtasıyla ergitilerek katılaştırılmaktadır. Katmanlar halinde devam eden bu işlem aslında otomatik bir kaynak oluşturma şeklidir. Bu teknoloji alt kümeleri olan lazerle işlenmiş net şekillendirme (LENS, Laser Engineering Net Shaping) ve elektron ışını ile eklemeli imalat (EBAM, Electron Beam Additive Manufacturing) olarak ticarileştirilmiş ve markalanmıştır. Yöntem, yön ve eksenden bağımsız olarak, büyük hacimli parçaların üretiminin yanı sıra tamir işlemleri için de kullanılmaktadır [70].

➤ Hibrit teknolojisi

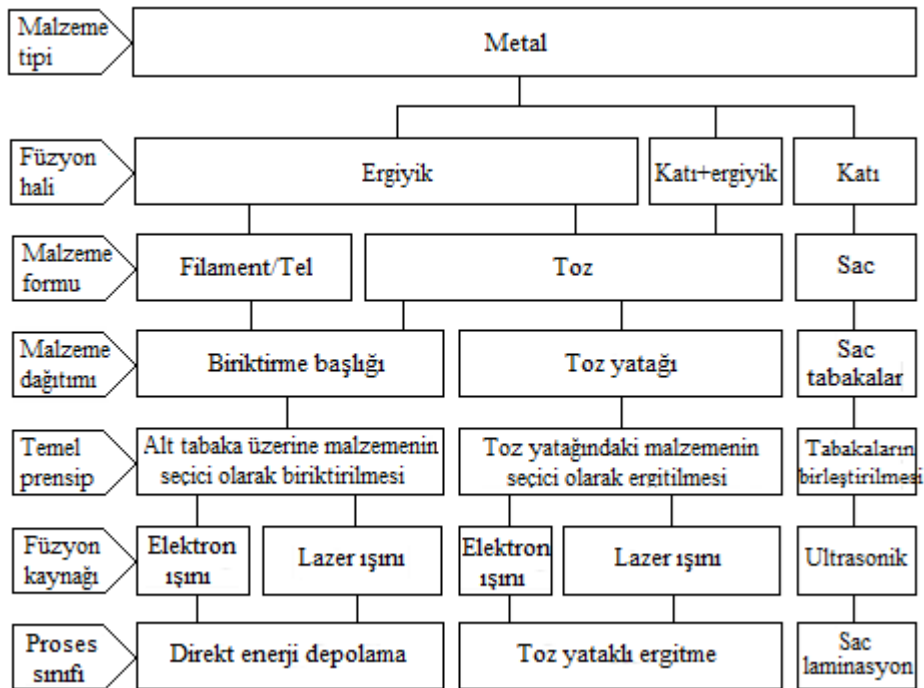
Hibrit teknolojisi, parçaları oluşturmak için uygun fikstür ve oryantasyon kontrolü de dahil olmak üzere entegre bir şekilde uygulanan eklemeli imalat ve talaş kaldırma işlemlerinin birleşimini ifade etmektedir [83]. Bu teknoloji ile beraber eklemeli imalat sistemleri tamamen otomatikleştirilerek proses sonrası talaş kaldırma gibi ikincil bir işleme gerek kalmaksızın yüksek verimlilikte ve iyi yüzey kalitesine sahip parçalar üretilebilmektedir. Ayrıca tek bir üretim işleminin yeterli olmadığı karmaşık alanların üretilmesi problemi, hibrit teknikler kullanılarak giderilebilmektedir (Şekil 2.22) [84].



Şekil 2.22. Hibrit eklemeli imalat teknolojisi [85].

2.2.3. Metal eklemeli imalat

Metalik malzemeler olumlu mekanik özelliklerinden dolayı mühendislikte yaygın olarak kullanılan malzemelerin başında gelmektedir. Bu nedenle, geleneksel imalat yöntemleri kullanılarak üretilen metal parçaların eklemeli olarak imal edilmesine yönelik çok sayıda sistem geliştirilmiştir. Bu sistemler kullanılabilir malzeme türü, mekanik özellikler, yüzey pürüzlülük değerleri ve tolerans aralıkları gibi farklı ilkeler doğrultusunda özelleşmektedir. Bu kapsamda metal eklemeli imalat teknolojileri genel olarak hammadde malzemesinin kullanım şekli, kullanılan enerji kaynağı ve malzemenin birleştirilme tekniğine göre farklı kategorilerde sınıflandırılabilir (Şekil 2.23).



Şekil 2.23. Metal eklemeli imalat teknolojilerinin sınıflandırılması.

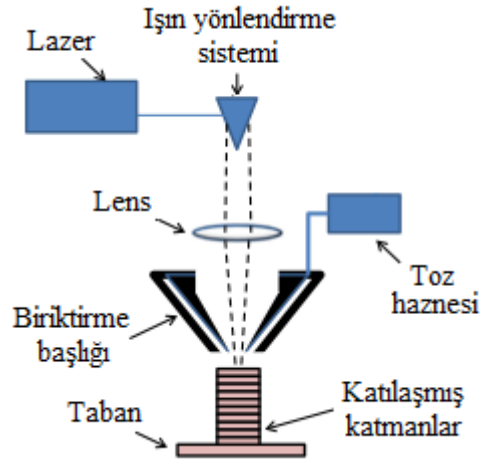
Metallerin eklemeli imalatında kullanılan malzeme formları toz, tel ve sac olmak üzere üç ana grupta toplanmaktadır. Söz konusu malzeme formları arasından tel ve sac malzemeler ile toz malzemelere kıyasla daha hızlı imalat yapılabilir [86]. Ancak tel ve sac malzemelerin kullanımı üretim sonrası ortaya çıkan geometrik ve metalürjik problemler nedeniyle toz malzemeler kadar yaygınlaşmamıştır. Ayrıca toz malzemeler, tel ve sac formundaki malzemelere kıyasla daha ince yapıya sahip oldukları için tasarım serbestliği açısından daha fazla imkân sunmaktadır.

Bu malzemeler farklı enerji kaynakları vasıtasıyla işleme dâhil edilerek son ürün elde edilmektedir. Toz ve tel esaslı malzemelerin kullanıldığı imalat yöntemlerinde ergitme işlemi lazer veya elektron ışını ile gerçekleştirilirken, sac formu malzemelerin eklemeli imalatında ultrasonik yoğunlaştırma kaynağı kullanılmaktadır.

Toz esaslı malzeme kullanılarak gerçekleştirilen eklemeli imalat teknolojileri kendi içerisinde malzeme ekleme tekniği açısından farklılık göstermektedir. Söz konusu teknolojiler, toz yataklı ergitme ve direkt enerji depolama olarak sınıflandırılmaktadır. Tezin bir sonraki bölümünde bu teknolojiler ile ilgili genel bilgiler verilecek olup, tez çalışmamızda kullanılan toz yatağında elektron ışını ile ergitme yöntemi detaylı olarak irdelenecektir.

2.2.3.1. Yönlendirilmiş lazer ışını ile yığma

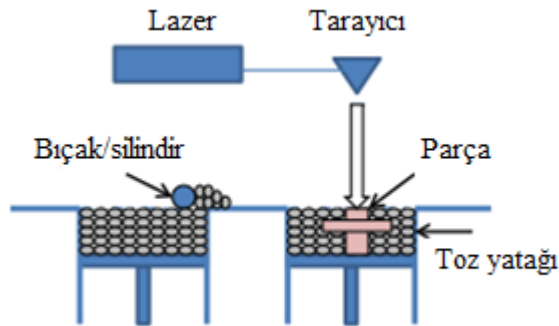
Direkt enerji depolama (DED, Direct energy deposition) yöntemlerinden biri olan ve lazer metal biriktirme veya direk metal biriktirme olarak ta bilinen LENS teknolojisi, mevcut parçaları onarmak veya yeni parçalar oluşturmak için yaygın şekilde kullanılan karmaşık bir baskı işlemidir. Yöntemde seçici olarak püskürtülen toz esaslı metal malzemeler yüksek güçlü bir lazer ışını vasıtasıyla ertitilir ve soğuyarak katılaşır. Bu işlem bütün parça geometrisi oluşuncaya dek katmanlar halinde tekrarlanarak devam eder. Proseste koruyucu atmosfer olarak argon gazı kullanılır. Yöntem paslanmaz çelik, takım çelikleri, Ti6Al4V, alümina, bakır ve nikel esaslı alaşımlar gibi çok çeşitli metal ve kombinasyonlarının kullanımına izin vermektedir [87, 88]. Şekil 2.24' te LENS yönteminin genel sistematığı gösterilmiştir.



Şekil 2.24. Yönlendirilmiş lazer ışını ile yığma işlemi [89].

2.2.3.2. Toz yatağında lazer ile birleştirme

Toz yatağında lazer ile birleştirme prosesi lazer ışınıyla ısıtma, direkt metal lazer sinterleme veya seçici lazer ısıtma olarak da bilinen toz yataklı eklemeli imalat (PBF, Powder bed fusion) teknolojilerinden biridir. Koruyucu gaz atmosferinde gerçekleştirilen bu işlemde, bir bıçak veya silindir yardımıyla inşa platformu üzerine serilen toz katmanını tarayıcıdaki galvanometrik aynalar tarafından seçici olarak gönderilen bir lazer ışını vasıtasıyla ısıtılarak katılaştırılır. Ardından inşa platformu katman kalınlığı kadar alçalarak yeni bir toz katmanını uygulanır. Bu işlem, parça tamamen üretilene kadar tekrarlanır ve üretilen parça toz yataktan alınır. Yöntem ile farklı ölçütlere bağlı olarak 100 µm kalınlık değerlerinin altında parçalar imal edilebilmektedir [90]. Şekil 2.25’ te toz yatağında lazer ile birleştirme işleminin şematiği gösterilmiştir.



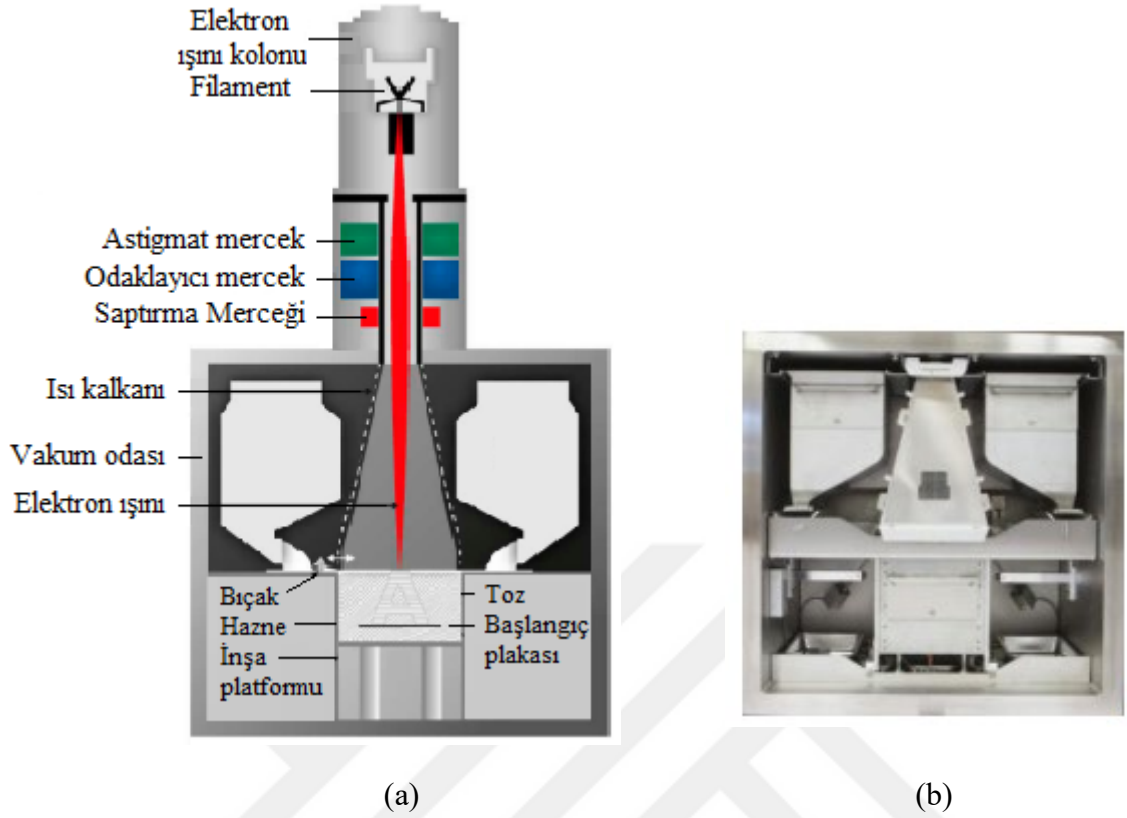
Şekil 2.25. Toz yatağında lazer ile birleştirme işlemi (SLM) [89].

SLM prosesi sinterleme işlemlerine büyük benzerlik göstermektedir. Her iki işlem de toz malzemeyi katmanlar halinde birleştirmek için lazer enerjisinin gücünü kullanmaktadır. Ancak sinterlemede kullanılan lazer gücü SLM işleminden daha düşüktür. Ayrıca SLM işleminde herhangi bir bağlayıcı kullanmaya gerek yoktur ve elde edilen ürün başlangıçta kullanılan toz malzeme ile hemen hemen aynı içeriğe sahiptir [91].

Metal tozları yüksek ısı iletkenliği, yüksek oksidasyon eğilimi ve yüksek lazer yansıtıcılığı gibi olumsuz özelliklere sahiptir. Bu nedenle polimer tozlarına kıyasla daha zor işlenirler [92]. Bu sorunları bertaraf edebilmek ve lazer ışını emilimini artırmak amacıyla CO₂ lazer yerine Nd-YAG (Neodymium-doped yttrium aluminum garnet) lazeri geliştirilerek SLM sistemlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Yöntemde lazer tipine, katman kalınlığına ve malzemeye bağlı olan lazerin tarama hızı genel olarak 400 ila 1000 mm/s aralığındadır [93, 94].

2.2.3.3. Toz yatağında elektron ışını ile birleştirme

Elektron ışını ile ergitme (EBM, Electron beam melting) olarak bilinen bu yöntemde, toz haline getirilmiş malzemeler yüksek voltajlı bir elektron ışını vasıtasıyla ergitilerek seçici olarak birleştirilir. Toz yatağı içerisinde gerçekleştirilen EBM işleminde enerji kaynağı olarak 30 ila 60 kV değerlerine sahip bir elektron ışını kullanılmaktadır. İşlem, elektronların kinetik enerji teoremine göre çalışmaktadır. Filamentten gönderilen elektronlar, bir ışın oluşturarak yüksek hızlarda inşa platformuna doğru hareket ederler. Elektronların metal tozları ile çarpışması sonucu hızları azalarak kinetik enerjileri termal enerjiye dönüşür. Bu dönüşüm sonrası ısı oluşumu meydana gelir ve toz parçacıkları ergir. Elektron ışını anot, katot, elektromanyetik odaklama ve saptırma birimlerinden meydana gelen elektron ışın tabancası içerisinde oluşturulur. Katot üzerinden elektrik akımı geçtiğinde katot ısınarak elektron yayar. Daha sonra filament altındaki anoda gerilim akımı uygulanarak, çok yüksek gerilim farkı oluşturulur ve bu şekilde filament bölgesinden elektronların hızlanması sağlanır. Ortaya çıkan ışın sırasıyla, ışını odakta tutmaya yarayan astigmat ve odaklama merceklerinden geçerek 8000 m/s gibi yüksek bir tarama hızına ulaşır. Ardından saptırma bobinine geçen ışın inşa platformu üzerindeki istenilen alanlara seçici olarak gönderilir [95]. Şekil 2.26' da EBM işleminin başlıca elemanları gösterilmiştir.



Şekil 2.26. EBM' ye ait (a) şematik resmi, (b) inşa kabini [96].

Metal parçaların eklemeli imalatında yaygın olarak kullanılan LENS, SLM ve EBM yöntemleri, kullandıkları enerji kaynakları, parça inşa hızları, üretim hassasiyetleri, yüzey pürüzlülük değerleri ve hitap ettikleri malzeme grupları gibi çeşitli ölçütler doğrultusunda birtakım farklılıklara sahiptir (Tablo 2.4 ve Şekil 2.27). Bu farklılıklar yöntemleri kendi aralarında belirli konularda avantajlı ya da dezavantajlı konuma getirmektedir. EBM' nin diğer metal eklemeli imalat tekniklerine göre avantaj ve dezavantajları şu şekildedir [75];

Avantajları

- EBM yönteminde kullanılan yüksek güçteki elektron ışını neticesinde, lazer tabanlı sistemlere kıyasla daha yüksek sıcaklıklar elde edilerek malzemeler çok daha kısa sürede ergitilmektedir. Bu nedenle EBM yöntemi ile yüksek inşa hızlarında büyük boyutlardaki parçaların yapımı mümkün olmaktadır.
- EBM' de yatak sıcaklığı ve yüksek ısı girdisi nedeniyle SLM yönteminden daha az gözenekli, döküme benzer bir mikro yapı elde edilmektedir.
- Yapımdaki her bir katman için toz yatağının tamamının ısıtıldığı EBM yöntemi ile üretilen parçalarda daha az artık gerilme ve distorsiyon oluşmaktadır.
- EBM işleminde tüm süreç vakum altında gerçekleşmektedir. Bu nedenle, metal

tozların oksidasyona eğiliminden kaynaklı oluşabilecek sorunlar en aza indirgenmiş olur.

- Elektron ışın üretimi lazer ışını oluşumundan çok daha verimli bir işlemdir. EBM işleminde kullanılan elektrik enerjisinin çoğu elektron ışınına dönüşmektedir. Buna karşın, lazer tabanlı sistemlerde bu oran sadece %10-20 arasındadır ve kalan enerji ısı şeklinde kaybedilir. Ayrıca lazer tabanlı sistemlerde lazer ışınının parlak toz yüzeylere çarpması sonucu oluşabilecek yansıma problemleri proses verimliliğini düşürmektedir.
- Ön-ısıtmanın uygulandığı EBM işleminde parçalar tavllanmış olarak üretimden çıkar ve normalizasyon gibi bir ısıtma işlemi gerekmemektedir.
- EBM işleminde, toz yatağından taban plakasına elektrik iletimini sağlamak için destek yapılarına ihtiyaç vardır. Ancak bu desteklerin kullanımı SLM yöntemine kıyasla daha azdır.

Dezavantajları

- Lazer esaslı sistemlerde toz parçacıkları lazer ışınlarının emilimi ile ısıtılırken, EBM işleminde bu elektronların kinetik enerji dönüşümü ile gerçekleşmektedir. Bu nedenle toz parçacıkları elektronları emdikçe giderek negatif bir yük kazanırlar. Sonuç olarak, birbirine komşu negatif yüklü parçacıkların itici kuvveti, kendilerini sabit tutan yerçekimi ve sürtünme kuvvetinden büyük olursa, toz parçacıkları hızlı bir şekilde toz yatağından dışarı atılarak, bir toz bulutu meydana getirir.
- Toz parçacıklarında artan negatif yükler, elektron ışınından gelen negatif yüklü elektronları itme eğilimi göstererek, dağınık bir ışın oluşumuna neden olur. Bu da, üretim sonrası boyutsal doğruluğu olumsuz yönde etkilemektedir.
- Toz parçacıklarının negatif yüklenmeleri ve yol açtığı olumsuz sonuçlar nedeniyle, toz parçacıklarının herhangi bir bölgesinde negatif yük yoğunlaşmasını önlemek için elektron ışın enerjisi daha yaygın olarak uygulanır. Bunun sonucunda, ergiyik havuz büyüklüğü artarak, daha büyük bir ısı tesiri altında kalan bölge oluşur.
- EBM’ de diğer metal eklemeli imalat tekniklerine kıyasla daha büyük toz taneleri kullanılmaktadır. Bu nedenle üretim sonrası parça yüzey pürüzlülük değerleri daha yüksek olmaktadır.
- EBM’ de ön hazırlık ve son işlem süreleri oldukça uzundur. Lazer esaslı işlemler ile hızlı soğuma neticesinde EBM’ ye göre daha ince boyutlarda tane yapıları elde

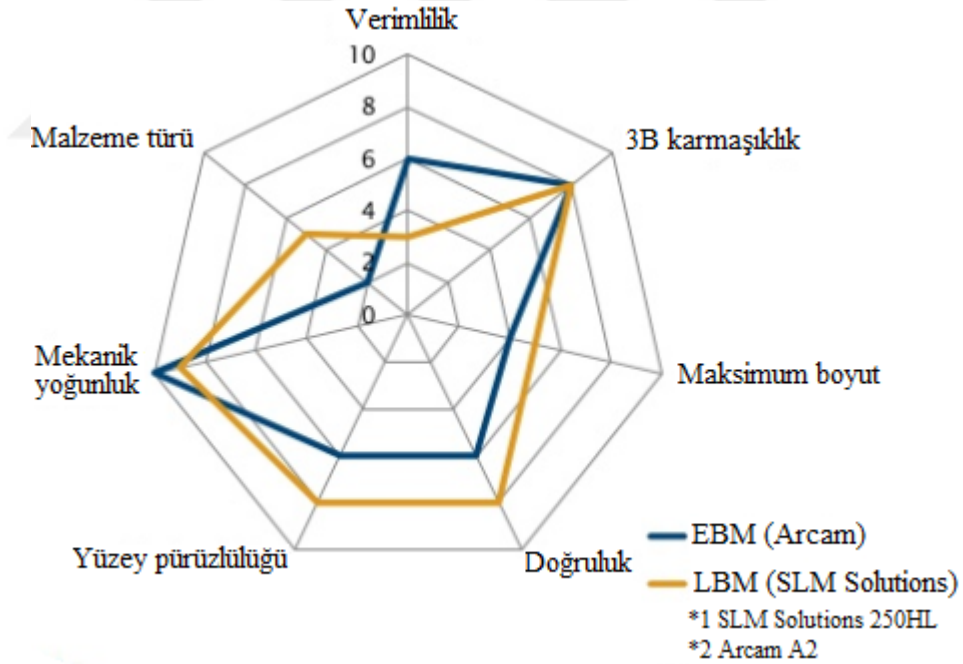
edilmektedir.

- EBM’ de enerji iletim yolu ile parçacıklara aktarılmaktadır. Bu nedenle EBM ile sadece iletkenlik özelliği gösteren malzeme türlerinin üretimi yapılabilmektedir.

Tablo 2.4. Metal eklemeli imalat yöntemlerinin karşılaştırılması [53, 97, 98].

Özellikler	LMD ^{*1}	SLM ^{*2}	EBM ^{*3}
Enerji kaynağı	Lazer ışını	Lazer ışını	Elektron ışını
Malzeme ekleme	Yığma	Toz yatağı	Toz yatağı
Atmosfer	İnert gaz	İnert gaz	Vakum 10^{-4} - 10^{-5} (mbar)
Ön ısıtma (°C)	-	200	700
Maksimum ışın gücü, W	500	120	3500
Işın odak çapı (µm)	660-900	30-250	200-1000
Tabaka kalınlığı (µm)	200-1000	20-100	50-200
Tarama hızı, m/s	0.001–0.04	0.3–1.0	>1000
Uygun malzemeler	Al, Fe, Co, Ti, Ni	Al, Co, Fe, Ti, Ni	Fe, Ni, Ti

*1 Optomec 750 *2 Realizer SLM50 *3 Arcam EBM S12



Şekil 2.27. EBM ve SLM yöntemlerinin farklı açılardan karşılaştırılması [99].

2.2.4. Ti6Al4V alaşımının eklemeli imalatı

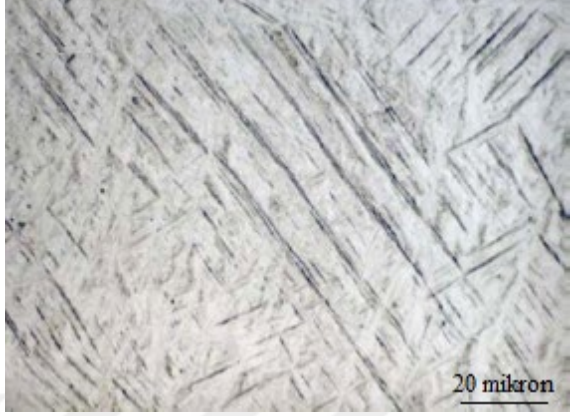
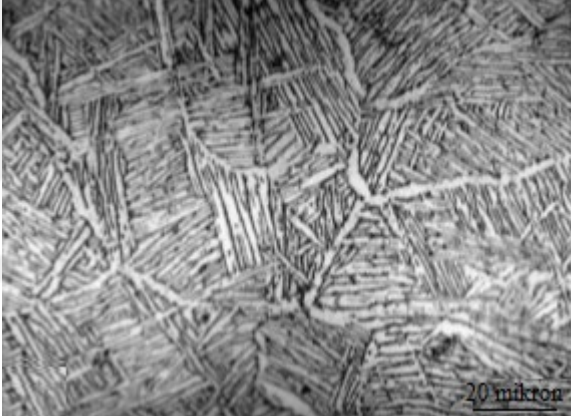
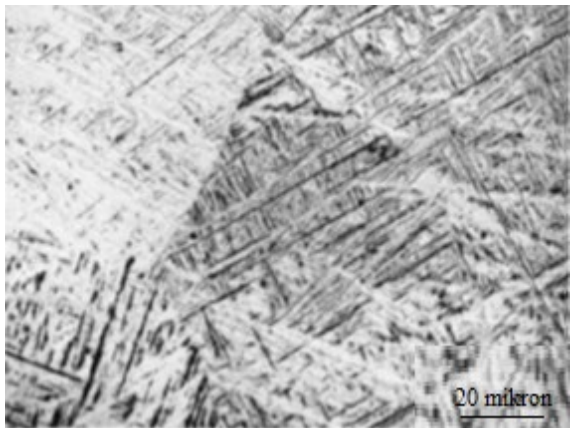
Ti6Al4V alaşımı, sahip olduğu yüksek sürünme direnci, mkemmekorozyon dayanımı, yüksek mukavemet ve kırılma tokluğu gibi üstün özellikleri nedeniyle havacılık, savunma ve uzay sanayiinde oldukça sık kullanılan bir malzeme türüdür. Ancak talaşlı üretim sonrası artık malzeme miktarının fazla olması yüksek maliyetli titanyum alaşımlarının bu alanlarda kullanımlarını kısıtlamaktadır. Bu noktada, geleneksel imalat yöntemlerine alternatif olarak ortaya çıkan eklemeli imalat teknolojisi ile beraber titanyum alaşımlarının kullanımı yaygınlaşmıştır.

Ti6Al4V malzemesinin eklemeli imalatına yönelik olarak gerçekleştirilen çok sayıda çalışma neticesinde metal eklemeli imalat yöntemlerinin Ti6Al4V bileşenlerini imal etmek için son derece başarılı bir üretim teknolojisi olduğu kanıtlanmıştır. Yapılan alışmalarda, LMD, SLM ve EBM ile üretilmiş Ti6Al4V parçalara ait porozite, yüzey pürüzlülüğü, artık gerilmeler, yorulma ömrü, mikroyapı ve mekanik özellikler sırasıyla incelenmiştir.

➤ Mikroyapı

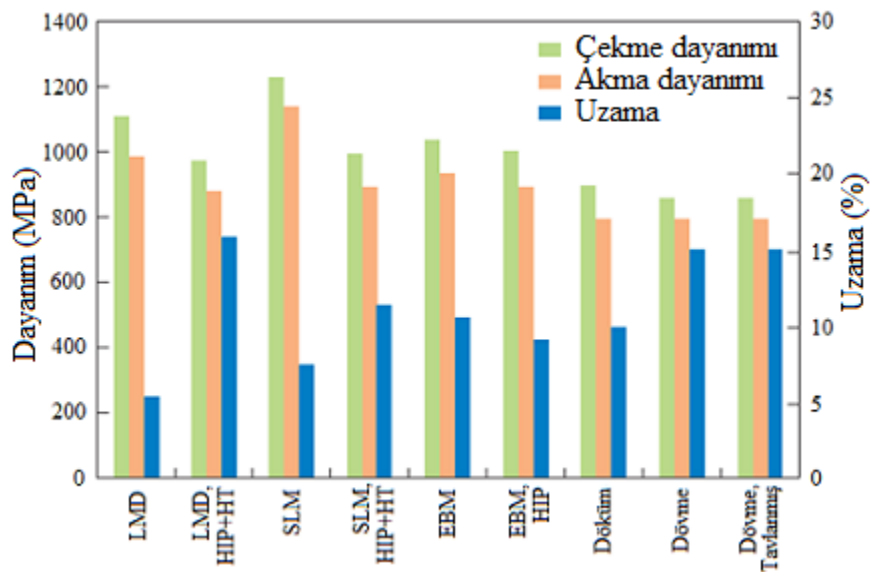
Mikroyapı, metalik bir bileşende bulunan faz ve tane yapılarını ifade etmektedir. Kullanılan imalat yöntemine bağlı olarak farklı mikroyapı özellikleri meydana gelmektedir. Tablo 2.5’te SLM, EBM ve LMD gibi metal eklemeli imalat yöntemleri ile imal edilen Ti6Al4V alaşımına ait mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. SLM ve LMD Ti6Al4V numunelerine ait mikro yapılar incelendiğinde, 0,2-1,0 μm genişliğine sahip ince ve iğnemsiz α' -martenzit yapıların yoğunlukta olduğu görülmektedir. EBM Ti6Al4V’ a ait mikro yapıda ise, $\alpha+\beta$ fazları meydana gelmektedir. α yapılarının uzunluk ve genişlikleri sırasıyla 1,0-3,0 μm ve 0,5-1,0 μm iken β taneleri ortalama 0,1 μm kalınlığındadır [98].

Tablo 2.5. SLM [100], EBM [101], LMD [102] ile üretilen Ti6Al4V’ nin mikro yapı görüntüleri (α fazı açık, β fazı koyu).

Yöntem	Mikroyapı	Optik mikroskop görüntüsü
SLM	İğnems α^1 martenzit fazı.	
EBM	β tane sınırlarında iğnems α tanelerinin dizilmesi şeklindeki Widmanstatten yapısı.	
LMD	$\alpha+\beta$ Widmanstatten yapısı ve iğnems α^1 fazından oluşan heterojen yapı.	

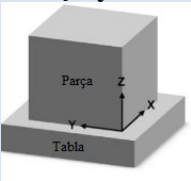
➤ Mekanik özellikler

Şekil 2.28’ de farklı imalat yöntemleri kullanılarak üretilen Ti6Al4V numunelerin mekanik özellikleri verilmiştir. Eklemeli imalat sonrası parçalara uygulanan sıcak izostatik presleme (HIP, Hot isostatic pressing) ve ısıl işlemin mekanik özelliklere etkisi yer almaktadır. Kullanılan imalat yönteminin yanı sıra inşa yönleri de üretilen metal eklemeli parçaların mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Tablo 2.6’ da LMD, SLM ve EBM ile üretilen Ti6Al4V numunelerine ait mekanik özellikler gösterilmiştir. Tablo 2.6’ ya göre, inşa yönüne bağlı olarak farklı mekanik değerler meydana gelmektedir. Ayrıca mekanik değerler üzerine yüzey işleme, ısıl işlem ve HIP gibi ikincil işlemlerin etkili olduğu görülmektedir. Eklemeli parçaların yüzeylerinin işlenmesi neticesinde daha yüksek mekanik değerler elde edilmiştir. Çünkü eklemeli imalat sonrası oluşan yüzeyler mekanik özellikleri ciddi oranda düşürmektedir [103]. Eklemeli imalat sonrası parçalara uygulanan HIP ve ısıl işlemin akma ve çekme dayanım değerlerini düşürdüğü, buna karşın uzama özellikleri açısından bir iyileşme sağladığı gözlenmiştir. HIP işlemi ile yapıdaki gözenekler kapanarak daha yoğun bir mikroyapı meydana gelmektedir. Ayrıca HIP sonucunda mikroyapı bir miktar kabalaşmaktadır [104]. Tablo 2.6 ve Şekil 2.28’ de görüldüğü gibi eklemeli olarak üretilen parçaların akma ve çekme dayanımı değerleri geleneksel yöntemlere kıyasla daha yüksektir. Uzama değerleri açısından ise bir düşüş görülmektedir. Metal eklemeli imalat yöntemleri arasında SLM Ti6Al4V parçaların çekme ve akma dayanımlarının en yüksek olduğu, buna karşın EBM ile üretilen numunelerin uzama değerlerinin daha iyi olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 2.28. Farklı imalat yöntemleri ile üretilen Ti6Al4V’ nin mekanik özellikleri [105].

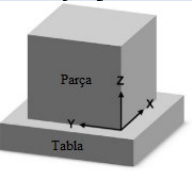
Tablo 2.6. LMD, SLM ve EBM ile üretilen Ti6Al4V numunelerin mekanik özellikleri.

İmalat yöntemi	İnşa yönü	Yüzey işleme	Isıl işlem	HIP	Çekme dayanımı, [MPa]	Akma dayanımı, [MPa]	Uzama, [%]	Kaynakça
								
LMD	Z	-	-	-	761-821	522-523	-	[103]
	Z	✓	-	-	984-1050	930-987	-	
	Z	-	✓	-	700-726	621-653	~4,8	
	Z	✓	✓	-	930-968	812-848	~11,9	
	XY	-	-	-	902-923	881-906	~6,4	
	XY	✓	-	-	1033-1109	941-1029	~6,8	
	XY	-	✓	-	751-766	620-708	~4,8	
	XY	✓	✓	-	907-967	843-889	~11,9	
	Z	✓	-	-	1094	1008±2	10,8±0,2	[97]
	XY	✓	-	-	1063±20	960±26	10,9±1,4	[106]
	XY	✓	-	-	1163±22	1105±19	4±1	[107]
SLM	XY	✓	-	-	1211±31	1100±12	6,5±0,6	[108]
	XY	✓	✓	-	1042±20	960±19	13,0±0,6	
	Z	✓	-	-	1246±134	1150±67	1,4±0,5	[98]
	XY	✓	-	-	1421±120	1273±53	3,2±0,5	
	Z	✓	-	-	1219±20	1143±30	4,89±0,6	[101]
	XY	✓	-	-	1269±9	1195±19	5±0,5	
	Z	-	-	-	1040-1062	664-802	11,3-12,7	[109]
	Z	✓	-	-	1151-1157	984-988	10,2-11,3	
	Z	✓	-	✓	973-974	883-888	18,5-19,4	
	Z	✓	-	-	1117±3	967±10	8,9±0,4	[110]
	XY	✓	-	-	1137-1248	973-1100	7,1-12,3	
EBM	Z	✓	-	-	972±14	845±9	14,2±1,5	[98]
	XY	✓	-	-	976±11	846±7	15±2	
	Z	✓	-	-	1045	970	10,9	[111]
	Z	✓	-	-	928±9,8	869±7,2	9,9±1,7	[101]
	XY	✓	-	-	978±3,2	899±4,7	9,5±1,2	
	Z	-	-	-	851±19	812±12	3,6±0,9	[112]
	XY	-	-	-	833±22	783±15	2,7±0,4	
	-	-	✓	✓	837-918	741-842	3-9	[113]
	-	-	✓	-	817-918	723-817	3-9	

Sertlik konusunda yapılan çalışmalar neticesinde EBM Ti6Al4V numuneleri için 360-380 HV [114] ve SLM Ti6Al4V numuneleri için 360 HV [109] sertlik değerleri elde edilmiştir. Buna ek olarak, SLM Ti6Al4V parçalarına uygulanan HIP ve ısıl işlemin sertlik değerlerini düşürdüğü gözlenmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü, içyapıdaki gözenekler ve artık gerilmeler eklemeli imalat parçalarının yorulma davranışları üzerinde oldukça etkili olmaktadır. Bu gibi kusurlar parçalara ait mikro yapısal etkileri gizleyerek güçlü yorgunluk başlatma yerlerinin oluşmasına neden olurlar ve yorulma çevrim performanslarını ciddi oranda düşürürler. Bu nedenle yorulma, eklemeli parçalar için oldukça önemli bir konudur. Farklı eklemeli imalat yöntemlerinin yorulma özelliklerine etkisini görmek amacıyla yapılan çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Tablo 2.7’ de LMD, SLM ve EBM Ti6Al4V parçalarına ait yorulma özellikleri verilmiştir. LMD ve SLM parçaların EBM’ ye kıyasla daha yüksek yorulma dayanımına ($\Delta\sigma_w$) sahip olduğu, ancak kırılma tokluk değerlerinin (ΔK_{th}) daha düşük olduğu görülmektedir. Bu özellik yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahip olan ince taneli α' - martenzit fazından kaynaklanmaktadır [101, 115].

Tablo 2.7. LMD, SLM ve EBM Ti6Al4V parçalarına ait yorulma özellikleri.

Proses	İnşa yönü 	R	$\Delta\sigma_w$, [MPa]	ΔK_{th} , [MPa $\sqrt{m}$]	Kaynakça
LMD	XY	0,1	-	2,8	[115]
	Z	0,1	587,5-600	-	[116]
SLM	XY	0,1	-	1,4	[117]
	-	0,1	550	-	[101]
EBM	XY	0,1	-	3,8	[118]
	-	0,1	200-250	-	[119]

➤ Porozite, yüzey pürüzlülüğü ve artık gerilmeler

Tablo 2.8’ de LMD, SLM ve EBM ile üretilen Ti6Al4V parçalarına ait porozite, yüzey pürüzlülük ve artık gerilme değerleri gösterilmiştir. Eklemeli olarak üretilen parçalar teorikte tam yoğunlukta üretilebilmesine rağmen pratikte bu mümkün olmayarak içyapıda gözenekler meydana gelmektedir. Parça içerisinde kalan bu gözenekler parçanın mekanik özelliklerini ciddi oranda düşürmektedir. Bu nedenle imalat sonrası ikincil işlemler uygulanarak porozitenin neden olduğu olumsuzlukların giderilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla gerçekleştirilen HIP işlemi neticesinde, parça içyapısındaki gözenek boyut ve hacimlerinde büyük oranda düşüş elde edilmektedir [109, 117]. Ayrıca tarama hızını yavaşlatarak ve lazer gücünü artırarak gözeneklerin oluşması bir miktar azaltılabilmektedir [120, 121]. Ti6Al4V parçaların farklı metal eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmeleri sonucu içyapılarında kalan porozite miktarlarının incelenmesi üzerine yapılan çalışmalarda

en yüksek porozite miktarı SLM’ de meydana gelirken, en az porozite LMD tekniğinde görülmüştür [122-125].

Ekllemeli parçalarda karşılaşılan problemlerden biri de yüzey pürüzlülük değerlerinin yüksek olmasıdır. Katmanlar halinde gerçekleşen üretim neticesinde parça yüzeyleri sıklıkla merdiven profili sergilemektedir. Bu durum katman kalınlığı en aza indirgenerek kontrol edilebilirken [126], daha düşük katman kalınlığının kullanılabilmesi için tarama hızının artırılması gerekmektedir. Yüksek tarama hızı ise parça içyapısında istenmeyen gözenek oluşumuna zemin hazırlamaktadır. Yorulma ömrünü olumsuz yönde etkileyen yüzey pürüzlülüğü imalat yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Konu üzerine yapılan çalışmalarda ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri küçükten büyüğe doğru sırasıyla LMD, SLM ve EBM şeklinde bulunmuştur [127-130]. Yüzey pürüzlülük değerlerine etki eden en önemli faktörler olarak oksidasyon ve kısmen ergimiş toz parçacıkların parça yüzeyine yapışması görülmektedir. LMD’ de kullanılmayan tozlar uçurularak parça yüzeyine yapışması önlenmektedir ve bu nedenle yüzey pürüzlülük değerleri en iyi olmaktadır. EBM ve SLM’ de ise kullanılmayan tozlar toz yatağında biriktirildiğinden dolayı tozların yüzeye yapışma olasılığı artmaktadır [131].

Ekllemeli imalat sonrası parça içerisinde kalan artık gerilmeler çatlak oluşumu ve çarpılma gibi istenmeyen sonuçlara yol açabilmektedir. Proseste kullanılan enerji kaynağı ve imalat esnasında çıkan sıcaklığa bağlı olarak farklı ekllemeli imalat yöntemleri ile farklı sonuçlar meydana gelmektedir. Ayrıca katman sayısı ve tarama uzunluğunun artması artık gerilme miktarının fazla olmasına neden olabilmektedir [132]. Metal ekllemeli imalat yöntemleri arasından her bir katman için toz yatağının tamamının ısıtıldığı EBM yöntemi ile üretilen parçalarda lazer esaslı imalat yöntemlerine kıyasla daha az artık gerilme ve distorsiyon olduğu yapılan çalışmalar neticesinde görülmüştür [133].

Tablo 2.8. LMD, SLM ve EBM Ti6Al4V parçalarına ait porozite, yüzey pürüzlülük ve artık gerilme değerleri.

Özellik	LMD	SLM	EBM
Porozite [%hacim]	0,01-0,27 [125]	0,1-0,5 [122, 123]	0,1-0,3 [123, 124]
Yüzey pürüzlülüğü [μm]	0,24-13,3 [127, 129]	5-40 [128, 130]	25-131 [130]
Artık gerilme [MPa]	-	100-500 [133]	Çok az [133]

2.3. Kaynak Prosesi

Kaynak, metalik veya plastik malzemelerin ısı, basınç veya her ikisinin birlikte tesiri altında bir ilave malzeme kullanarak veya kullanmaksızın gerçekleştirilen bir birleştirme işlemidir. Kullanılan ilave malzeme birleştirilen parçalarla aynı cins veya benzer ergime sıcaklığına sahiptir. Kaynak işleminin başarılı olabilmesi için birleştirilecek olan parçaların atomları arasında uyumluluk ve metalürjik açıdan ilgilerinin olması son derece önemlidir. Bununla birlikte, ideal metalürjik bağın oluşabilmesi için uygun proses koşullarının sağlanması gerekmektedir. Bu koşulları sağlayarak ihtiyaç duyulan birleştirme işlemlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla çok sayıda kaynak yöntemi geliştirilmiş ve kullanılmaktadır [134]. Bu kapsamda metal malzemelerin birleştirilmesine yönelik kaynak teknolojileri ergitme ve basınç kaynağı olmak üzere iki kategoride sınıflandırılmaktadır (Şekil 2.29).

a) Ergitme Kaynağı

- 1) Elektrik direnç kaynağı
- 2) Döküm ergitme kaynağı
- 3) Gaz ergitme kaynağı
- 4) Elektrik ark kaynağı
 - 4.1) Karbon arkı ile kaynak
 - 4.2) Metal arkı ile kaynak
 - 4.3) Koruyucu gazla kaynak (Gaz altı kaynağı)
 - 4.3.1) TIG kaynağı
 - 4.3.1.1) Normal TIG kaynağı
 - 4.3.1.2) Plazma TIG kaynağı
 - 4.3.1.3) Ark atom kaynağı
 - 4.3.2) MIG kaynağı
 - 4.3.2.1) Normal MIG kaynağı
 - 4.3.2.2) Aktif gazla MIG kaynağı
 - 4.4) Metal koruyucu altında kaynak
 - 4.5) Toz altı kaynağı
- 5) Lazer ışını ile kaynak
- 6) Elektron bombardımanı ile kaynak

b) Basınç Kaynağı

- 1) Sürtünme kaynağı
- 2) Ultrasonik kaynak
- 3) Soğuk basınç kaynağı
- 4) Döküm basınç kaynağı
- 5) Ocak kaynağı
- 6) Gaz basınç kaynağı
- 7) Difüzyon kaynağı
- 8) Elektrik ark basınç kaynağı
- 9) Elektrik direnç kaynağı

Şekil 2.29. Metal kaynak yöntemlerinin sınıflandırılması [135].

2.3.1. Titanyum ve alaşımlarının kaynağı

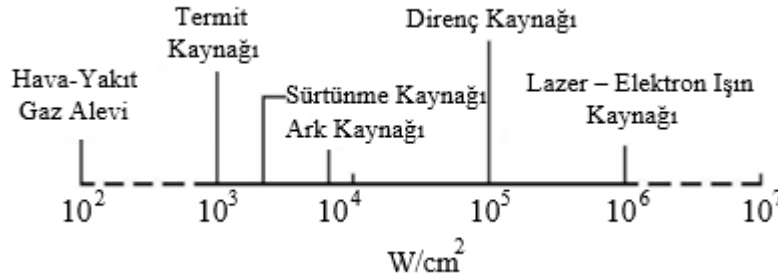
Titanyum ve çoğu titanyum alaşımları uygun kaynak tekniği ve parametrelerin kullanılması neticesinde kolayca kaynaklanabilir. Titanyum ve alaşımlarının kaynağında füzyon, direnç, sürtünme, elektron ve lazer ışın teknikleri başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Titanyum ve alaşımlarının yüksek gaz duyarlılığı nedeniyle iş parçasının gevrekleşmesini önlemek için temiz bir ortam sağlanmalıdır. Bu nedenle, kaynak işlemi inert gaz koruması altında veya vakum ortamında gerçekleştirilir. $\alpha+\beta$ titanyum alaşımı olan Ti6Al4V' nin kaynak edilebilirliği iyi denilebilecek bir seviyede olmasına rağmen, kuvvetli β stabilleştirilmiş $\alpha+\beta$ alaşımları kaynak işlemi sonrasında gevrekleşebilmektedir. $\alpha+\beta$ alaşımlarının düşük kaynak sünekliği, kaynak bölgesindeki faz dönüşümlerinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle $\alpha + \beta$ alaşımları, ergime bölgesinin β içeriğini düşürerek kaynağın sünekliğini artıran alaşımsız titanyum ve α titanyum alaşımı ilave metal teller kullanılarak kaynak edilmektedir [136]. Yüksek kaliteli kaynaklar gerektiren havacılık veya biyomedikal gibi alanlarda LBW ve EBW yöntemleri tercih edilirken, nispeten uygulama kolaylığı sağlayan ve ekonomik olan TIG yöntemi titanyum gibi reaktif malzemelerin kaynağında en çok kullanılan kaynak tekniğidir [9]. Bu bilgiler ışığında bir sonraki bölümde çalışmamızda kullanılan LBW ve TIG kaynağı hakkında genel bilgiler verilecek olup, ardından Ti6Al4V alaşımına ait lazer ve TIG kaynaklı birleştirme çalışmaları irdelenecektir.

2.3.2. Lazer ışın kaynağı (LBW)

Lazer kaynak yönteminde ısı kaynağı olarak santimetrekare alan başına 10 kW üzerinde güç yoğunluğu sağlayan odaklanmış lazer ışınları kullanılmaktadır (Şekil 2.30). Lazer sistemi genel olarak lazer kafası ve enerji membandan meydana gelmektedir. Lazer kafasına ulaşan enerjinin bir miktarı katı, sıvı ve gaz şeklinde bulunan aktif madde vasıtasıyla hacim ve zamana bağlı olarak elektromanyetik ışına dönüştürülmektedir. Yüksek yoğunluklu ışın derinlik/genişlik oranı 4:1' den yüksek kaynak dikişlerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Kaynak işlemi ilave metal kullanılmadan yapılabileceği gibi gerekli hal ve durumlarda ilave malzeme kullanılarak da yapılabilmektedir. Lazer ışın kaynağının sahip olduğu avantajlar şu şekilde özetlenebilir;

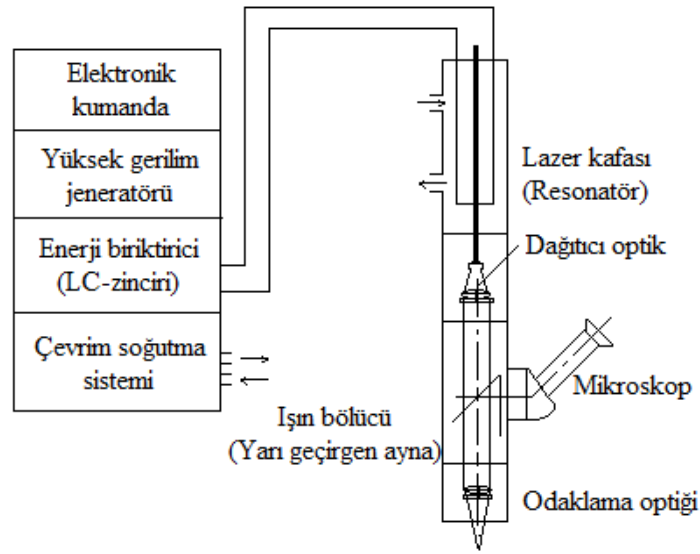
- Lazer ışını oldukça yoğun bir enerji kaynağı olduğu için, 0,025 mm' den küçük genişlikte kaynak dikişleri elde edilmektedir.

- Birkaç mikron mertebesindeki bölgelere odaklanabilme kabiliyeti ve yüksek güç yoğunluğu nedeniyle kaynak sonrası ısı tesiri altında kalan bölge oldukça dardır.
- Kaynak süresi oldukça kısa olup toplam ısı girişi 0,1-10 joule arasındadır. Buna bağlı olarak, tekrar kristalleşme, iri taneli olma ve segregasyon gibi istenmeyen mikro yapı değişimleri meydana gelmemektedir.
- Lazer ışınının temassız çalışması neticesinde takım ile iş parçası arasında herhangi bir kontakt oluşmamaktadır. Bu nedenle iş parçasında istenmeyen alaşımlanma ve distorsiyon durumu da ortadan kalkmaktadır.
- Elektron ışın kaynağında olduğu gibi bir vakum ortamına ihtiyaç duyulmamaktadır.



Şekil 2.30. Kaynak yöntemlerinin güç yoğunluğu açısından karşılaştırılması [137].

Lazerler çalışma prensibine göre sürekli ve darbeli olacak şekilde sınıflandırılabilir. Genel olarak sıvı, katı ve gaz olacak şekilde farklı lazer tipleri bulunmaktadır ve her lazer türü farklı dalga boylarında ışın oluşturmaktadır. Sıvı hal lazerinin kaynak işlemine ait herhangi bir çalışmaya şimdiye kadar rastlanmamıştır. Gaz lazerlerinin kaynak işlemlerinde yaygın olarak CO₂ lazeri kullanılmaktadır. Sürekli şekilde çalışan CO₂ lazeri ile % 10-20 arasında yüksek verim değerleri elde edilmektedir. Katı hal lazerleri, optik olarak tahrik edilirler ve darbeli şekilde çalışırlar. Katı hal lazeri olarak Nd: YAG ve rubin (yakut) bulunmaktadır. Rubin lazerinin verimi % 0,1 iken, YAG lazeri ile % 0,2-3 arasında verim elde edilmektedir [134, 135]. Nd: YAG lazer kaynağında, kaynak banyosunun aralıklı olarak ısıtılması ve ergitme ile katılaşmanın art arda gerçekleşmesine olanak sağlayan, düşük ortalama güç ve yüksek tepe gücüne sahip darbeli bir lazer gücü kullanılır [138]. Darbeli şekilde çalışan katı hal lazerine ait şematik yapı Şekil 2.31’ de verilmiştir.



Şekil 2.31. Katı hal lazerine ait şematik yapı [135].

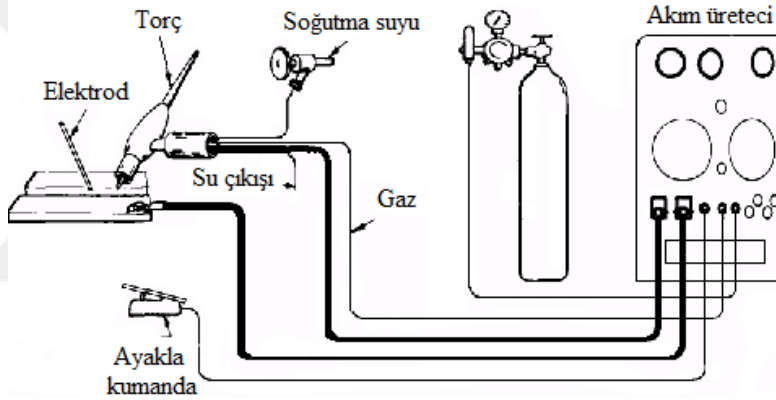
Lazer kafasında oluşturulan beyaz ışık darbeleri YAG kristaline gönderilir. YAG kristali tarafından absorbe edilen enerji birkaç mm çapındaki ışın demetine dönüştürülür. Dağıtıcı ve odaklama optikleri aracılığıyla yüksek güç yoğunluğuna sahip lazer ışınların istenilen bölgeye tatbik edilir. Katı hal lazer dikeş kaynaklarının oluşumu ve kalitesi, kaynak hızı, ortalama lazer gücü, darbe enerjisi, tepe güç yoğunluğu ve atış süresi gibi çeşitli lazer işleme parametrelerinin birleşiminin sonucudur [139]. Çok sayıda parametre içeren lazer kaynağı ile ısı girdisinin kontrolü daha hassas hale gelir ve çok çeşitli deneysel koşulların uygulanması mümkündür [140]. Ancak bu kadar çok parametrenin kontrol edilmesi lazer işleminin karmaşıklığını arttırır. Düşük darbe enerjisi, pürüzsüz ve sık bir ergiyik havuzu oluştururken, darbe enerjisindeki artış daha derin ve daha geniş bir havuz oluşturur. Değişen havuz ve dikeş morfolojisi, yüzey biçimini ve sertliğini de etkiler [141].

2.3.3. Tungsten inert gaz kaynağı (TIG)

TIG yöntemi, ergimeyen bir tungsten elektrot ile iş parçası arasında arkın oluşturulduğu, ark, elektrot ve kaynak banyosunun inert bir gaz ile atmosferden tamamen izole edildiği bir gaz altı kaynak yöntemidir (Şekil 2.32). İşlem sıcaklığı 2500 °C' ye kadar çıkabilmektedir [142]. Koruyucu gaz olarak argon, helyum ve bu gazların karışımı kullanılmaktadır. Periyodik tablonun en son grubunda yer alan, tek atomlu ve soy olan bu gazlar diğere elementlerle birleşmeyerek, oksidasyon gibi istenmeyen durumlar engellenmektedir. Helyum gazının yoğunluğu havadan düşük, argon gazının ki ise daha yüksektir. Bu nedenle argon gazının kaynak banyosunu koruma kabiliyeti helyuma göre

daha iyidir. Ancak helyum gazı argona kıyasla daha yüksek ark gerilimi oluşturmakta ve yüksek akım şiddetinin kullanılması gereken işlemlerde tercih edilmektedir. Kalınlığı 3 mm ve daha az olan, özellikle ince sac parçaların kaynağında TIG yöntemi oldukça başarılıdır [143]. Kalın parçaların kaynağında çoklu paso ve kaynak malzemesinin bileşimine uygun ilave tel kullanımı gerekebilir [135]. TIG kaynağının üstünlükleri şu şekilde sıralanabilir;

- Yüksek kaynak hızı
- Isıl distorsiyonların az olması
- Kaynak ısısının belirli bir bölgeye yoğunlaştırılabilmesi
- Temiz kaynak dikişlerinin elde edilmesi
- Kolay mekanize edilebilir olması



Şekil 2.32. TIG kaynak donanımı şeması [135].

TIG kaynağında ergitme işlemi, elektrot (katot) tarafından oluşturulan yüksek hıza sahip eksi yüklü elektronların iş parçasına (anot) bombardmanı sonrası ortaya çıkan elektrik arkı ile gerçekleştirilir. Elektronların iş parçasına temas etmesi ile oluşan kısa devre ile elektrot ısınır ve elektron yayını başlar. Elektron yayınının ardından iş parçasının nötr haldeki molekülleri iyonlaşır ve sıcaklık artarak plazma oluşumu meydana gelir. Plazma oluşumu elde edildikten sonra kaynak işleminin düzgün yapılabilmesi için akım ve gerilimin sabit tutulması önemlidir. Ark kararlılığı olarak nitelendirilen bu husus kaynak kalitesi üzerinde son derece etkilidir [135, 142].

TIG kaynak işlemi üç farklı modda yapılmaktadır. Bunlar temel olarak doğru akım pozitif elektrot (DCEP), doğru akım negatif elektrot (DCEN) ve alternatif akım (AC) şeklinde sınıflandırılmaktadır. Akım ve kutuplama tipi seçimi, kaynak yapılacak malzemenin türüne ve kalınlığına bağlıdır. Her akım ve kutuplama tipinin kendine ait avantaj ve dezavantajları

bulunmaktadır. Titanyum alaşımların kaynağında ise doğru akım negatif elektrot seçimi önerilmektedir. Bu tip bir kaynak işlemi ile dikiş genişliği dar ve nüfuziyeti derin kaynaklar elde edilmektedir [142].

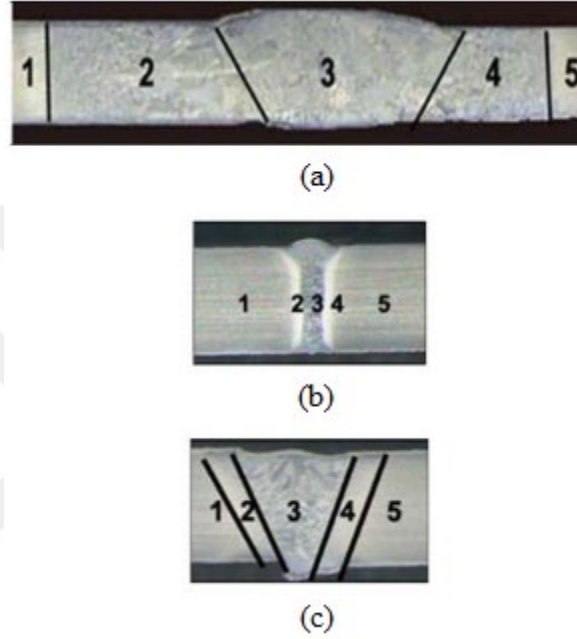
2.3.4. Geleneksel Ti6Al4V parçaların kaynağı

Dövme, döküm ve haddeleme gibi geleneksel üretim yöntemleri kullanılarak imal edilen Ti6Al4V parçaların kaynakla birleştirilmesi üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda lazer ışın kaynağı (LBW), argon kaynağı (TIG), gaz altı kaynağı (MIG), sürtünme kaynağı (FW) ve elektron ışın kaynağı (EBW) gibi farklı kaynak yöntemleri kullanılarak, kaynaklı Ti6Al4V parçaların kaynak edilebilirliklerinin yanı sıra mikro yapı ve mekanik özellikleri analiz edilmiştir (Tablo 2.9).

Tablo 2.9. Geleneksel Ti6Al4V parçaların farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar.

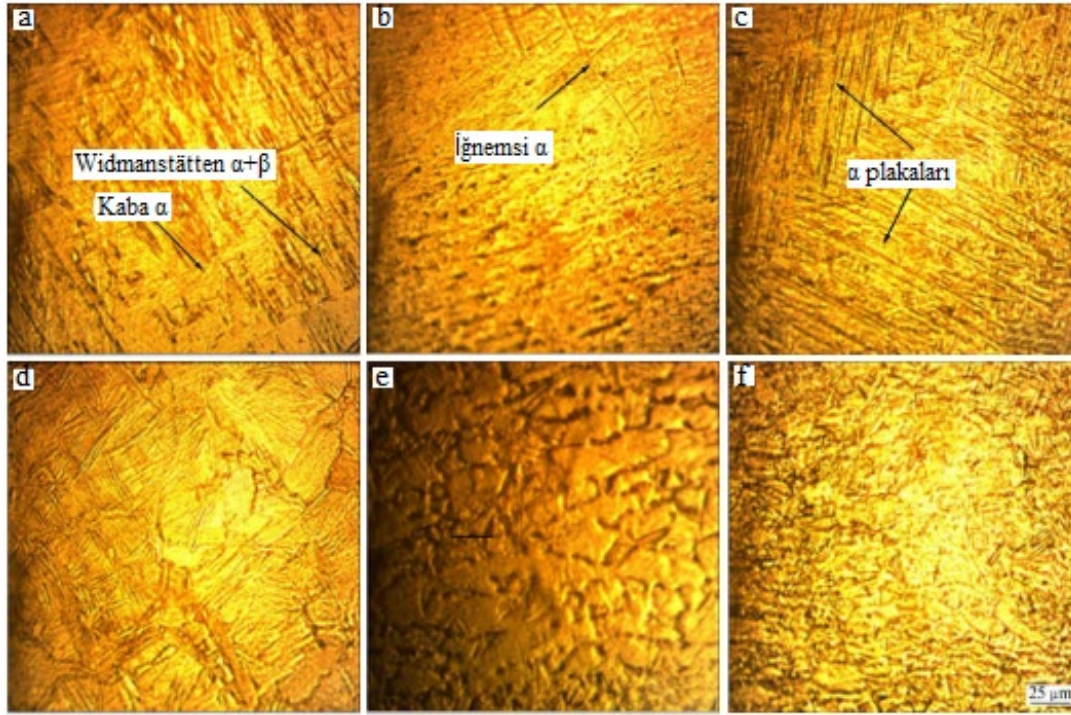
Araştırmacı	Yıl	Uygulanan kaynak yöntemi					Kaynakça
		MIG	TIG	FRW	LBW	EBW	
Chowdhury ve diğ.	2021				●	●	[144]
Kumar ve diğ.	2018				●		[145]
Gürsel	2017				●		[146]
Sarre ve diğ.	2016				●		[147]
Yang ve diğ.	2014					●	[148]
Gao ve diğ.	2013		●		●		[149]
Squillace ve diğ.	2012				●		[150]
Wang ve Wu	2012					●	[151]
Patnaik ve diğ.	2011	●					[152]
Balasubramanian ve diğ.	2011		●		●	●	[153]
Liu ve diğ.	2010			●			[154]
Akman ve diğ.	2009				●		[155]
Zhang ve diğ.	2008			●			[156]
Wanjara ve Jahazi	2005			●			[157]
Oh ve diğ.	2003		●			●	[158]
Denney ve Metzbower	1989				●		[159]

Balasubramanian ve diğeri [153], Ti6Al4V parçaların TIG, LBW ve EBW kaynakları ile birleştirilmesi ve bu kaynak yöntemlerinin farklı açılardan karşılaştırılmasına yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kaynak sonrası yapılan makro yapı incelemeleri neticesinde en geniş kaynak bölgesi (FZ, Fusion zone) TIG yönteminde oluşurken, en dar FZ ve ısı tesiri altında kalan bölge (HAZ, Heat affected zone) ise LBW yönteminde meydana gelmiştir (Şekil 2.33).



Şekil 2.33. Farklı kaynak bağlantılarının makroskopik görüntüleri: (a) TIG, (b) LBW, (c) EBW (1,5-BM; 2,4-HAZ; 3-FZ).

Kaynaklı parçaların FZ ve HAZ bölgelerine ait optik mikroskop (OM, Optical microscope) görüntüleri Şekil 2.34' te gösterilmiştir. TIG kaynağı sonrası FZ' de kaba ve iğnems α ile Widmanstätten $\alpha+\beta$ yapısı oluşurken, HAZ' da deforme olmuş kaba ve iğnems α ile kaba $\alpha+\beta$ yapısı görülmüştür. LBW işlemi sonrası FZ' de ince ve iğnems α' yapısı oluşurken, HAZ' da orta boyutlarda $\alpha+\beta$ yapısı meydana gelmiştir. EBW sonrası FZ' de düzenli plaka şekilli α yapısı görülür iken, HAZ' da ince $\alpha+\beta$ yapısı oluşmuştur. Çalışmada elde edilen mekanik sonuçlar Tablo 2.10' da verilmiştir. Buna göre en yüksek çekme ve akma dayanımı EBW ile elde edilirken en iyi uzama değerleri LBW sonrası oluşmaktadır. TIG kaynaklı numuneler ise en yüksek darbe dayanımına sahiptir. Çalışmada son olarak en yüksek sertlik değeri FZ' de ölçülürken, en düşük sertlik değeri ana metalde (BM, Base metal) görülmüştür.

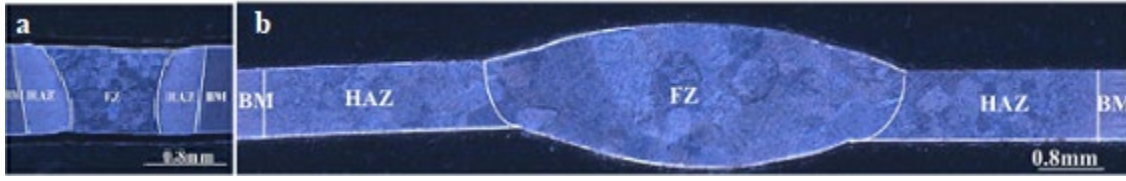


Şekil 2.34. FZ ve HAZ bölgelerine ait mikroskop görüntüleri: (a) FZ, TIG; (b) FZ, LBW; (c) FZ, EBW; (d) HAZ, TIG; (e) HAZ, LBW; (f) HAZ, EBW.

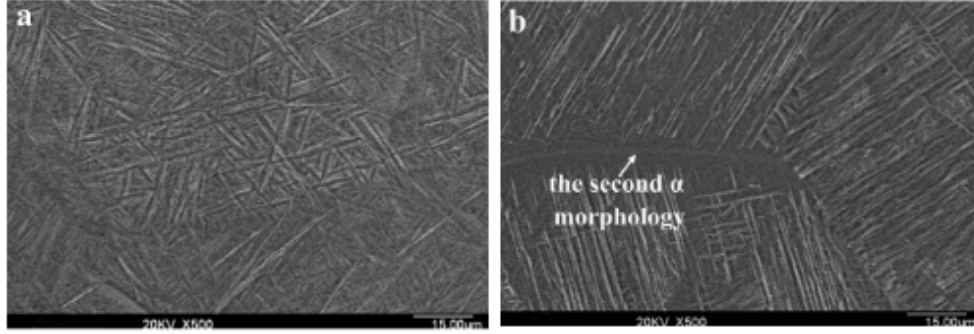
Tablo 2.10. Farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilen Ti6Al4V parçaların mekanik özellikleri.

Proses	Çekme dayanımı [MPa]	Akma dayanımı [MPa]	Uzama [%]	Darbe dayanımı [J]
TIG	939	893	10,15	15,5
LBW	982	959	15,00	10
EBW	1000	960	7,70	10

Gao vd. [149] yapmış oldukları çalışmada LBW ve TIG kaynaklı Ti6Al4V alaşımı levhaları kaynak geometrisi, artık gerilmeler, mikro yapı ve mekanik özellikler açısından değerlendirmişlerdir. TIG ile karşılaştırıldığında, LBW yönteminin daha az artık gerilme, ince mikro yapı, dar ısı tesiri altında kalan bölge ve daha yüksek sertlik gibi özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca LBW ile daha yüksek dayanım ve süneklik değerlerine sahip numuneler elde edilmiştir. TIG kaynaklı numuneler ise yüksek ısı girişi nedeniyle daha büyük çarpılmalara maruz kalmıştır. Şekil 2.35’ te LBW ve TIG sonrası meydana gelen farklı metalürjik bölgelere ait görüntüler yer almaktadır. Şekil 2.36-38’ de ise LBW ve TIG yöntemlerine ait mikro yapı görüntüleri verilmiştir.

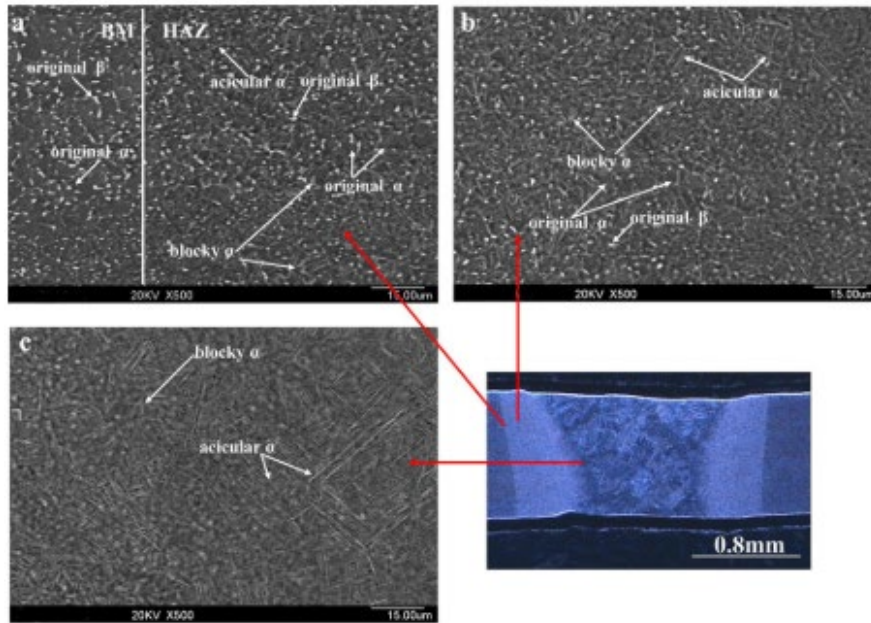


Şekil 2.35. LBW ve TIG kaynaklı bağlantıların kesit profili: (a) LBW ve (b) TIG.



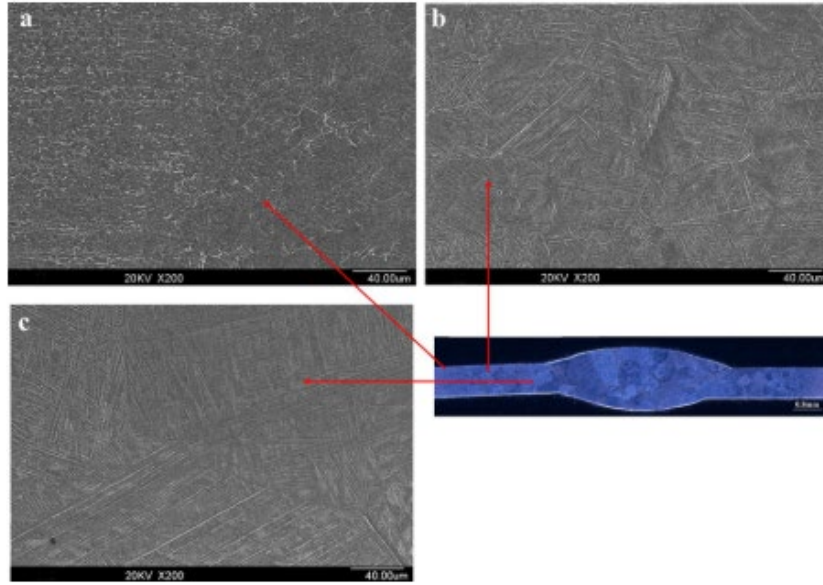
Şekil 2.36. LBW ve TIG kaynaklı bağlantıların FZ mikro yapıları: (a) LBW ve (b) TIG.

Şekil 2.36' da LBW' ye ait kaynak bölgesi tamamen iğnems α' yapısından oluşurken, TIG kaynağı sonrası kaynak bölgesinde, nispeten düşük soğutma oranı nedeniyle, iğnems α' ve β tane sınırlarında ikincil α yapısından oluşan bir mikro yapı örneği görülmüştür.



Şekil 2.37. LBW kaynaklı bağlantının HAZ mikro yapısı.

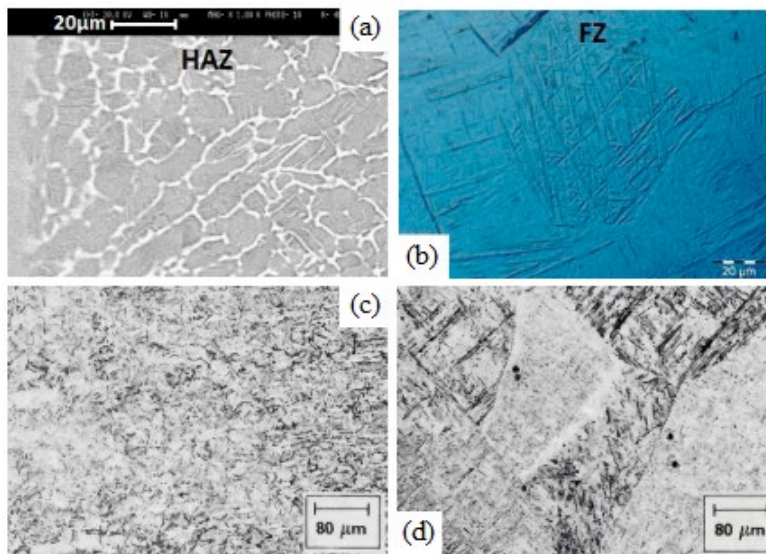
Şekil 2.37' de LBW yöntemi sonrası oluşan HAZ' nin kaynak bölgesine yakın kısımlarında iğnems α' ve deforme olmuş α yapısı görülürken, ana metale doğru yaklaşıldıkça iğnems α' ve deforme olmuş α ' nın yanısıra öncül α ve β yapıları da meydana gelmiştir.



Şekil 2.38. TIG kaynaklı bağlantının HAZ mikro yapısı.

Şekil 2.38’ de TIG yöntemi sonrası oluşan HAZ’ nin mikro yapısı martenzitik α^1 ve öncül β taneleri içindeki α fazından meydana gelmektedir. Kaynak merkezinden uzaklaştıkça HAZ’ daki küçük β taneleri eş eksenli ve daha küçük boyutta bir yapıya dönüşmektedir.

Sarre vd. [147], Akman vd. [155] ile Denney ve Metzbower [159] tarafından Ti6Al4V alaşımının lazer kaynağı üzerine yapılan çalışmalar neticesinde FZ ve HAZ için benzer mikro yapı değişimlerinin meydana geldiği görülmüştür (Şekil 2.39). Ayrıca en yüksek sertlik değeri kaynak bölgesinde ölçülürken, en düşük sertliğin ana metalde olduğu analiz edilmiştir.



Şekil 2.39. LBW bağlantılarının mikro yapıları: (a) HAZ ($\alpha + \alpha^1 + \beta$), (b) FZ (iğnemsisi α^1) [147]; (c) HAZ ($\alpha + \alpha^1 + \beta$), (d) FZ (iğnemsisi α^1 içeren β tane yapısı) [159].

Yunlian vd. [160] TIG, LBW ve EBW yöntemlerini farklı açılardan karşılaştırmak amacıyla malzeme olarak ticari saflıktaki titanyumun kullanıldığı bir çalışma yapmışlardır. Çalışma neticesinde, en dar kaynak dikişi ve en az deformasyon LBW ile elde edilmiştir. TIG yöntemi ile tam nüfuziyetli kaynak işlemi gerçekleştirilmesine rağmen, yöntem geniş kaynak dikişi ve büyük deformasyon oluşumu gibi birçok dezavantaja sahiptir. Mikro yapı analizleri sonucunda TIG ile en büyük ve LBW ile en küçük tane boyutlarının meydana geldiği görülmüştür. Soğuma hızına bağlı olarak gerçekleşen tanelerin oluşumu EBW' de ise orta büyüklüktedir. Sertlik değerlerinin karşılaştırılması sonucunda en yüksek sertlik değeri büyükten küçüğe doğru sırasıyla LBW, TIG ve EBW' de meydana gelirken, bölgeler açısından FZ, HAZ ve BM' de görülmüştür. LBW ile en küçük tanelerin oluşması ve sertlik değerlerinin yüksek olmasının nedeni olarak yüksek soğuma oranı gösterilmiştir.

Geleneksel Ti6Al4V parçaların kaynağına yönelik literatürde yer alan çalışmalar kısaca şu şekilde özetlenebilir. LBW ve EBW yöntemleri kullanılarak yapılan birleştirmelerde mikro yapı ve mekanik özellikler açısından en iyi sonuçlar elde edilmiştir. LBW yöntemi vakum ortamına ihtiyaç duyulan EBW yöntemine kıyasla daha az maliyetli bir yöntemdir ve bu nedenle daha tercih edilebilirdir. Ayrıca farklı kaynak yöntemleri arasından en dar kaynak dikişi LBW ile meydana gelmektedir. Ti6Al4V parçaların kaynağında oldukça sık tercih edilen bir diğer yöntem ise TIG kaynağı olmuştur. TIG yönteminin uygulama kolaylığı, yüksek kaynak hızı ve ekonomik bir yöntem olması bu sonucu açıklamaktadır. Ancak TIG ile birleştirilen bağlantıların, ısı tesiri altında kalan bölgedeki mikro yapının kabalaşması nedeniyle ana malzemeye kıyasla süneklilik değerlerinin düştüğü gözlenmiştir. Titanyum alaşımlarının geleneksel füzyon kaynak teknikleriyle birleştirilmesi esnasında kaynağın kirlenmesini en aza indirmek amacıyla koruyucu gaz kullanımı gerekmektedir. Sürtünme kaynağında ise kaynak işlemi esnasında oluşan bir flaş formu yüzey düzensizliklerini veya kirlетici maddeleri gidererek koruyucu gaz kullanımı ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Bu nedenle Ti6Al4V parçaların sürtünme kaynağı kullanılarak birleştirilmesi üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda sürtünme kaynaklı Ti6Al4V alaşımı parçaların mekanik olarak yeterli sonuçlar verdiği, ancak yöntemin karmaşık parçaların kaynağına uygun olmadığı görülmüştür [157]. Bunlara ek olarak MIG kaynak yönteminin Ti6Al4V alaşımı parçaların kaynağında tercih edilmediği ve konuyla ilgili çok az sayıda çalışmanın olduğu görülmektedir.

2.3.5. Eklemeli Ti6Al4V parçaların kaynağı

Eklemeli imalat teknolojisinin üstün özellikleri ve günümüz imalat sanayiine getirmiş olduğu avantajlar önceki bölümlerde detaylıca irdelenmiştir. Eklemeli imalatın endüstriyel alanda uygulanmasının temel sınırlarından biri, inşa odasının büyüklüğüne bağlı olarak üretilen parça boyutlarının sınırlı olmasıdır. Bu nedenle istenilen boyutlarda parça elde edilebilmesi için küçük boyutlu eklemeli parçaların kaynak işlemi ile birleştirilmesi en etkili seçenektir. Ancak iki veya daha fazla eklemeli parçanın birbirine kaynak edilebilirliği ve sonrasında karşımıza çıkabilecek sorunlar hakkında yeterli bilgi ve deneyim mevcut değildir. Önceki çalışmaların genelini dövme, döküm ve haddeleme ürünü parçaların kaynakla birleştirilmesi oluşturmaktadır. Ancak eklemeli ve geleneksel üretim yöntemleri kullanılarak elde edilen parçalar mikro yapı özellikleri açısından birbirine benzememektedir [161]. Bu nedenle geleneksel yöntemler ile üretilen parçaların kaynağında kullanılan yöntem ve parametreler eklemeli parçalar için doğrudan kullanılamayacaktır [162]. Kaynak işleminde, kaynak bölgesinin tamamen ergiyerek yeniden katılaşması sonrası mikroyapı özelliklerinin değiştiği bilinmektedir. Katılaşma süresine bağlı olarak değişkenlik gösteren tane ve faz yapıları, parçaların mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle eklemeli olarak elde edilen benzersiz mikro yapıların korunması için uygun parametre seçimi son derece önemlidir. Ayrıca uygun olmayan parametre seçimi sonrası, kaynak çatlaklarının meydana gelmesi kaçınılmazdır [146]. Eklemeli imalat ile üretilen parçalara ait mikro yapının çatlak eğilimini artırıcı yönde özellik gösterip göstermediği ve çatlak oluşumunu engellemek için gerekli parametre seçimlerinin ne olduğu konusunda yeterli bilgi bulunmamaktadır. Eklemeli imalat ile üretim esnasında meydana gelebilecek yüksek iç gerilmelerin üzerine kaynak ile oluşacak gerilmelerin eklenmesi neticesinde parçanın göstereceği mekanik davranışlar da bir diğer araştırma konusudur [112, 163]. Bunlara ek olarak, titanyum alaşımları yaklaşık 550°C üzerindeki sıcaklıklara ısıtıldıklarında, atmosferik gazlara karşı güçlü bir reaksiyon eğilimi gösterirler. Bu eğilim, malzemenin gevrekleşmesine neden olarak süneklik ve tokluğun azalmasına, mukavemet ve sertliğin artmasına yol açmaktadır. Eklemeli Ti6Al4V parçaların kaynak işleminde çıkılacak yüksek sıcaklıklarda nasıl bir davranış göstereceği de merak konusudur [151, 153].

Sonuç olarak, sınırlı boyutlarda üretilen eklemeli parçaların kaynakla birleştirilmesi ihtiyacı araştırmacıların ilgisini çekerek, çalışmalarını yukarıda bahsi geçen problemler ve literatürdeki eksiklikler üzerine yoğunlaştırmalarına sebep olmuştur. Konu ile ilgili farklı malzeme, imalat ve kaynak yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen çeşitli çalışmalar

bulunmaktadır. Literatürdeki bu çalışmalar Tablo 2.11’ de verilmiştir.

Tablo 2.11. Eklemeli parçaların kaynakla birleştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar.

Araştırmacı	Yıl	Malzeme	İmalat yöntemi	Kaynak yöntemi	Kaynakça
Omoniyi ve diğ.	2022	Ti6Al4V	LMD	LBW	[164]
Caiazzo ve Alfieri	2021	AISI630	SLM	LBW	[165]
Iakhin ve Martynov	2020	Ti6Al4V	SLM	EBW	[166]
Madeja ve diğ.	2020	Ti55511	EBM	TIG	[167]
Rautio ve diğ.	2020	Ti6Al4V	SLM	LBW	[168]
Rautio ve diğ.	2020	316L	SLM	LBW	[169]
Singh ve diğ.	2020	Ti6Al4V	EBM	FRW	[170]
Voropaev ve diğ.	2020	Inconel718	SLM	LBW	[171]
Chalawadi ve diğ.	2020	Inconel718	DMLS	TIG	[172]
Sun ve diğ.	2019	Ti6Al4V	EBM	LBW	[173]
Rubino ve diğ.	2019	Ti6Al4V	EBM	FRW	[174]
Qin ve diğ.	2019	Ti6Al4V	EBM	FRW	[175]
Pasang ve diğ.	2019	316L	EBM	TIG	[176]
Yang ve diğ.	2019	304	SLM	LBW	[177]
Zhang ve diğ.	2019	AlSi10Mg	SLM	LBW-TIG	[178]
Biffi ve diğ.	2019	AlSi10Mg	SLM	LBW	[179]
Nahmany ve diğ.	2019	AlSi10Mg	SLM	EBW	[180]
Hu ve diğ.	2019	Inconel625	SLM	LBW	[181]
Scherillo ve diğ.	2018	Ti6Al4V	EBM	FRW	[182]
Scherillo ve diğ.	2018	AlSi10Mg	SLM	FRW	[183]
Yu ve diğ.	2018	Ti6Al4V	SLM	LBW	[184]
Tavlovich ve diğ.	2018	Ti6Al4V	SLM	LBW-EBW	[185]
Prashant ve diğ.	2017	Ti6Al4V	SLM	FRW	[3]
Matilainen ve diğ.	2016	316L	SLM	LBW	[186]
Wits ve Becker	2015	Ti6Al4V	SLM	LBW	[162]
Nahmany ve diğ.	2015	AlSi10Mg	SLM	EBW	[187]
Prashanth ve diğ.	2014	Al-12Si	SLM	FRW	[188]
JP Järvinen	2014	316L	SLM	TIG	[189]
Casalino ve diğ.	2013	316L	SLM	Hibrit LBW/TIG	[190]

Eklemeli imal edilen parçaların kaynağına yönelik gerçekleştirilen çalışmalar Tablo 2.11’ de görülmektedir. Bu çalışmalarda eklemeli parçaların kaynak kabiliyetleri, kaynak sonrası mikro yapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Kullanılan malzemeler arasında Ti6Al4V, AlSi10Mg, 316L ve Inconel 625/718 gibi mühendislik malzemeleri öne çıkmaktadır. Bu bölümde tezimizde kullanılan EBM Ti6Al4V parçaların kaynağına yönelik gerçekleştirilen çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir. Diğer malzeme ve imalat yöntemlerinin kullanıldığı literatür çalışmaları ise kısaca şu şekilde özetlenmiştir.

Zhang vd. [178] SLM yöntemi ile üretilen AlSi10Mg plakaların kendi aralarında ve döküm AlSi10Mg plakalar ile LBW ve TIG yöntemleri kullanılarak birleştirilmeleri üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, kaynak morfolojisi, kusurları, mikro yapıları ve mekanik özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Kaynak işlemleri sonrası, SLM AlSi10Mg plakaların gözenek duyarlılıklarının döküm AlSi10Mg plakalara kıyasla çok daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu gözenekler SLM AlSi10Mg’ nin kaynağında ana kusur olarak görülmektedir. Ayrıca lazer kaynağı ile TIG’e nazaran daha düşük gözenekli bir içyapı elde edilmiştir. Mikro yapı özellikleri açısından lazer kaynağının kaynak merkezi ince dentritler şeklinde iken TIG kaynak merkezi kaba eş eksenli tanelerden oluşmaktadır. TIG kaynağına ait ısı tesiri altındaki bölgenin LBW yöntemine kıyasla daha geniş olduğu anlaşılmıştır. Sertlik değerleri incelendiğinde, kaynak bölgesinde ölçülen en yüksek sertlik değeri TIG ile birleştirilen SLM plakalarda görülmüştür. Lazer kaynaklı SLM plakaların sertlik değerleri ise büyükten küçüğe doğru sırasıyla BM, HAZ ve FZ’ de ölçülmüştür. Yapılan çekme testleri neticesinde, lazer kaynaklı SLM plakaların çekme dayanımı değerlerinin TIG kaynaklı SLM numunelerden daha yüksek olduğu görülmüştür.

Casalino vd. [191] çalışmalarında, seçici lazer ergitme yöntemi ile imal edilen paslanmaz çeliğin hibrit lazer kaynağını araştırmışlardır. Elektrik arkına bağlı yüksek güçlü bir fiber lazer sisteminden oluşan hibrit lazer kaynağına ait farklı işlem parametreleri kullanılarak dövme ve eklemeli paslanmaz parçalar birbirine kaynak edilmiştir. Kaynak bölgeleri geometri, mikro yapı, sertlik ve çekme değerleri açısından incelenmiştir. Ayrıca ergimiş malzeme alanının kullanılan enerji miktarına oranı şeklinde tanımlanan kaynak verimlilik değeri de değerlendirilmiştir. Çalışma sonrası, kaynak bölgesinin SLM tarafında dentritler şeklinde bir mikro yapının meydana geldiği görülmüştür. Kaynaklı parçanın SLM tarafına ait sertlik değerinin dövme kısma nazaran daha yüksek olduğu ve yaklaşık 260 HV değerine ulaştığı analiz edilmiştir. Kaynak bölgesinin üst kısmı için geçerli olan bu sertlik dağılımı kaynağın tabanı için de aynı dağılıma sahiptir. Çekme testi sonucunda SLM-

dövme parçalarının mekanik dayanım değerlerinin dövme-dövme parçalarınınkinden yüksek olduğu, ancak uzama değerlerinin düştüğü gözlenmiştir. Kaynağın tavlınması ile uzama değerinin artabileceği ön görülmüştür. Çekme testi sonucunda kırılmanın SLM tarafında meydana geldiği belirlenmiştir.

Matilainen vd. [186] 316L paslanmaz çelik malzemesinden imal edilen soğuk haddelenmiş test plakaları ile eklemeli olarak üretilen 316L paslanmaz çelik sac plakaların kaynak edilebilirliklerini karşılaştırmışlardır. Kaynak yöntemi olarak lazer ışın kaynağı ve eklemeli imalat yöntemi olarak seçici lazer ergitme tekniğini kullanmışlardır. Kaynak işlemlerini farklı lazer gücü, kaynak hızı ve optik fiber çaplarında gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarını kaynak geometrileri, çatlama, nüfuziyet derinlikleri ve birim kaynak boyu için gerekli enerji miktarları açısından incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, eklemeli parçaların uygun kaynak parametrelerinin seçimiyle yüksek kalitede kaynak edilebileceği görülmüştür. Ayrıca düşük enerji girişli birleştirme işlemlerinde eklemeli parçaların soğuk hadde ürünü malzemeye kıyasla daha iyi nüfuziyet özelliği gösterdiği anlaşılmıştır. Ancak yetersiz nüfuziyet durumunda büyük gözeneklerin meydana geldiği görülmüştür. Gözenek oluşunu engellemek amacıyla enerji girişinin artırılmasına bağlı olarak eklemeli parçalar için kaynak kırılma eğiliminin arttığı gözlenmiştir.

Hu vd. [181], SLM yöntemi ile üretilen yüksek sürünme dayanımına sahip Inconel 625 malzemesinin lazer kaynağı sonrası mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma neticesinde kaynak bölgesinde sütunlu bir yapı gözlenmiştir. Kaynak bölgesine ait sertlik değerlerinin ana metale kıyasla daha düşük olduğu analiz edilmiştir. Çekme testleri sonrası kırılmanın ana metal bölgesinde olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, lazer ışın kaynağının SLM Inconel625 malzemesi için başarılı bir şekilde uygulandığı literatüre kazandırılmıştır.

Pasang vd. [176] EBM SS316L plakaların TIG kaynağı ile birleştirilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, kaynaklı bağlantıların mikro yapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Çekme testi esnasında, kaynakların her iki tarafındaki ısı tesirinde kalan bölgede boyunlanma oluşumunun meydana geldiği görülmüştür ve kırılmalar da bu bölgede gerçekleşmiştir. Kırılma yüzeylerinden kırılmanın sünek tipte gerçekleştiği analiz edilmiştir. Çekme testi ile kaynak bağlantılarına ait süneklik ve dayanım değerlerinin hadde ürünü gibi geleneksel olarak üretilen numunelere eşit olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Sertlik test sonuçları ise ana metal, ısı tesiri altındaki bölge ve kaynak bölgesi için eşit dağılım göstermiştir. Metalografik incelemeler neticesinde, tane sınırlarında Cr ve Mo bakımından

zengin çökeltilerin varlığı tespit edilmiştir.

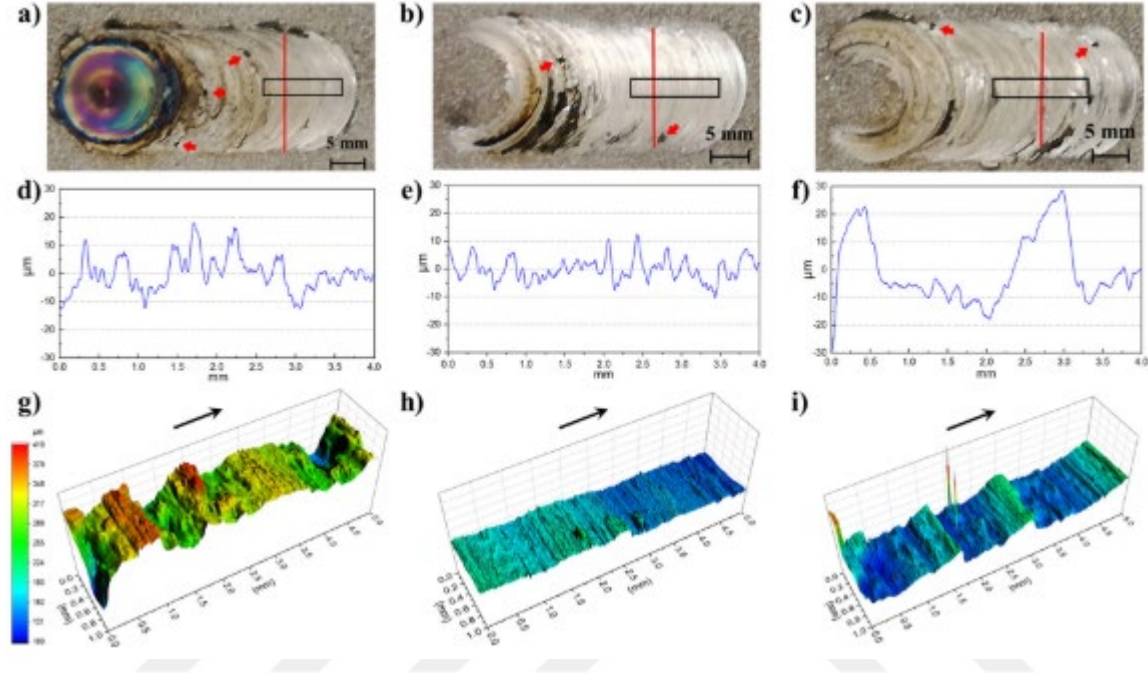
Eklemeli imalat yöntemlerinden EBM tekniği ile üretilen Ti6Al4V parçaların kaynakla birleştirilmesi sonrası meydana gelen mikroyapı ve mekanik özelliklerin incelenmesine yönelik literatürde az sayıda çalışma bulunmaktadır. AM Ti6Al4V parçaların kaynağına yönelik yapılan çalışmalar kaynaklanabilirlik, mikroyapı ve mekanik özellikler açısından ana başlıklar altında derlenmiştir.

➤ **Kaynak edilebilirlik**

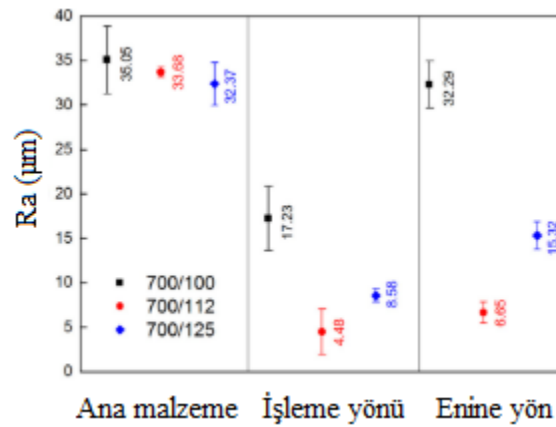
Atmosferik gazlara karşı hassasiyeti yüksek olan Ti6Al4V alaşımının kaynak işleminde bazı ek önlemlerin alınması zorunludur. İyi kaynak kalitesini sahip AM titanyum parçalar elde edilebilmesi için uygun kaynak parametrelerinin seçimi son derece önemlidir. Bir $\alpha+\beta$ titanyum alaşımı olan Ti6Al4V' nin kaynaklanabilirliği iyi kabul edilebilir bir seviyede olmasına rağmen güçlü β stabilize $\alpha+\beta$ alaşımları kaynak sonrasında kırılğan hale gelebilir. $\alpha+\beta$ alaşımlarının düşük kaynak sünekliği, kaynak bölgesindeki faz dönüşümlerinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, $\alpha + \beta$ alaşımları, ergime bölgesinin β içeriğini düşürerek kaynağın sünekliğini artıran alaşımsız titanyum ve α titanyum alaşımı ilave metal teller kullanılarak kaynaklanır. Ancak hassas titanyum alaşımlarının kaynağında bu tür ilave metallerin kullanılması yine de kaynak bölgesinin gevrekleşmesine engel olamamaktadır [136]. AM Ti6Al4V parçaların kaynağı ile ilgili çalışmalar incelendiğinde LBW, EBW ve FW tekniklerinin başarıyla uygulandığı görülmektedir. Literatürde yer alan bu çalışmalar yüzey ve kesit analizleri dikkate alınarak incelenmiştir.

Singh vd. [170] EBM Ti6Al4V parçaların FSW ile birleştirilmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Kaynaklar 45 mm/dak sabit kaynak hızında 400, 500 ve 700 rpm olarak üç farklı takım dönüş hızında yapılmıştır. Çalışma neticesinde 400, 500 ve 700 rpm takım dönüş hızlarına karşılık sırasıyla 47.98%, 90.23% ve 93.48% kaynak verimliliği elde edilmiştir. Buna göre yüksek dönme hızına sahip FSW işleminin EBM Ti6Al4V parçaların kaynağı için uygun olduğu görülmüştür. Ayrıca FSW' de kullanılan takımın kaynak kırılma özellikleri üzerinde etkili olduğu anlaşılmıştır. Daha yüksek aşınma ömrüne sahip takım malzemelerinin seçilmesi ile daha iyi kaynak bağlantıları elde edilecektir. Rubino vd. [174] EBM Ti6Al4V malzemesinin sürtünme karıştırma işlemine yönelik bir çalışma yapmışlardır. Proses 700 rpm sabit dönme hızında 100, 112 ve 125 mm/dak ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. 400 rpm dönme hızı ile yapılan ön testler sonucunda yetersiz karıştırma ve ısıtma etkisi nedeniyle etkisiz bir işlem meydana gelmiştir. Takım dönme

hızının 700 rpm' ye çıkarılmasıyla iyi yüzey görünümüne sahip numuneler elde edilmiştir (Şekil 2.40a-c). Üç farklı ilerleme hızı arasından 112 mm/dak ile en iyi yüzey kalitesine ulaşılmıştır. Bu durumda en üst ile en alt değer arasındaki fark 20 μm ' den küçüktür (Şekil 2.40e). Ayrıca yüzey pürüzlülüğü her iki yönde yaklaşık 80% azalmıştır (Şekil 2.41).



Şekil 2.40. Numunelerin üst yüzeyinin makrografları: (a) 700 rpm-100 mm/dak, (b) 700 rpm-112 mm/dak, (c) 700 rpm-125 mm/dak; enine ortalama yüzey profilleri: d) 700 rpm-100 mm/dak; e) 700 rpm-112 mm/dak; f) 700 rpm-125 mm/dak; numunelerin yüzey topografyası: g) 700/100; h) 700/112; i) 700/125.



Şekil 2.41. Ana malzeme, paralel (işleme yönü) ve dikey (enine yön) boyunca yüzey pürüzlülük değerleri.

Yu vd. [184] SLM Ti6Al4V parçaların birbirine ve dövme Ti6Al4V parçalara farklı lazer kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilmesini incelemiştir (Tablo 2.12 ve 13).

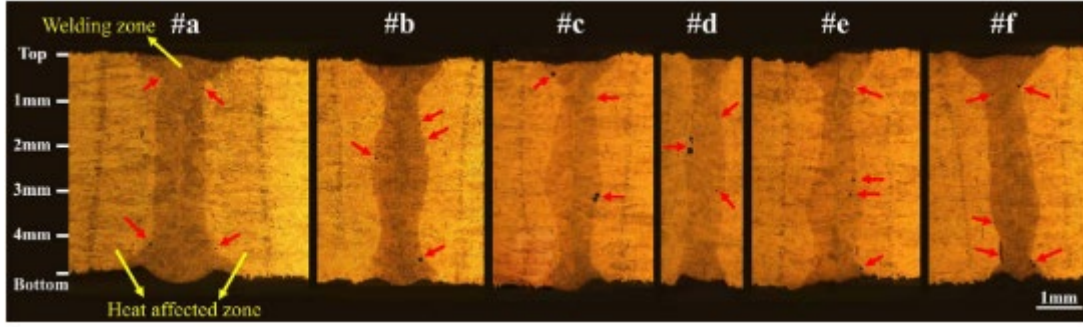
Tablo 2.12. Parametre optimizasyonunda kullanılan kaynak parametreleri.

No.	#a	#b	#c	#d	#e	#f
Laser power, kW	4	4	4	4	4	4
Welding speed, m/min	1	1.5	2	2.5	2	2
Beam defocused distance, mm	0	0	0	0	+2	-2

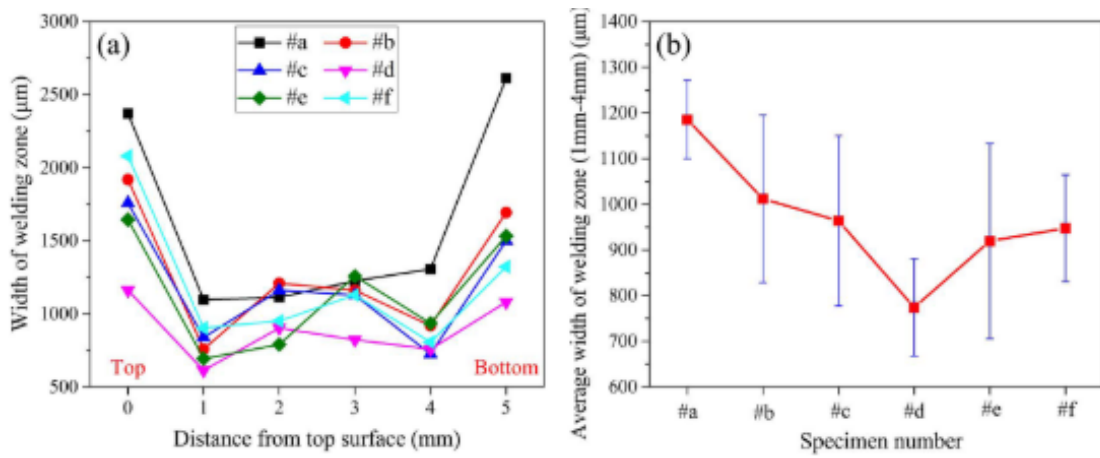
Tablo 2.13. Kaynaklı ve SLM Ti6Al4V numunelerinin sınıflandırılması.

No.	Classification of the Ti-6Al-4V specimens
#1	SLMed to SLMed laser welded specimens followed by stress relieving
#2	SLMed to wrought laser welded specimens followed by stress relieving
#3	SLMed to SLMed laser welded specimens followed by heat treatment at 850 °C for 2 h, furnace cooling
#4	Stress-relieved SLMed specimens

Şekil 2.42’ de kaynaklı SLM Ti6Al4V parçaların enine kesit görüntüleri yer almaktadır. En yüksek kaynak hızı nedeniyle en düşük lazer enerjisi yoğunluğuna sahip olan #d hariç diğer tüm parametreler ile tam nüfuziyetli kaynak yapılmıştır. Altı grup numunenin hiç birinde kaynak çatlağı mevcut değildir. Çalışma sonucunda SLM Ti6Al4V parçaların geniş parametre aralığında iyi bir lazer kaynak edilebilirliğe sahip olduğu anlaşılmıştır. Şekil 2.42’ de yer alan kırmızı oklar, kaynak bölgesindeki boşlukları ifade etmektedir. Boşluklar kaynak bölgesi (FZ) ile ısı tesiri altında kalan bölge (HAZ) arasındaki arayüzlerde yer almaktadır. Bu boşlukların çoğu 200 µm’ den küçük çapta küresel bir geometriye sahiptir. Bu da, boşlukların hidrojen gözenekleri olduğunu göstermektedir [192]. #a parametreleri kullanılarak kaynaklanan numunenin en az miktarda ve en küçük ortalama gözenek boyutuna sahip olduğu tespit edilmiştir. Kaynak sonrası elde edilen kaynak dikiş genişlikleri Şekil 2.43’ te gösterilmiştir. Buna göre kaynak hızının artmasına bağlı olarak ortalama kaynak dikiş genişlikleri azalmaktadır. Çalışma neticesinde optimum kaynak parametresi olarak #a grubu seçilmiştir. Ardından SLM Ti6Al4V ve dövme Ti6Al4V numunelerin kaynak işleminde #a grubu kaynak parametreleri kullanılarak başarılı kaynaklar elde edilmiştir.

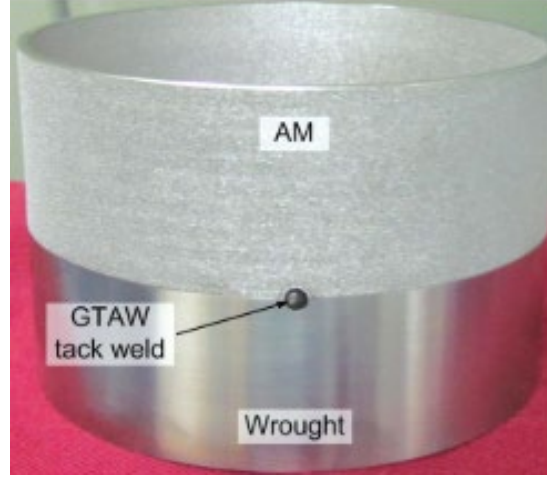


Şekil 2.42. #a-#f lazer kaynak parametreleri altında SLM-SLM Ti6Al4V kaynaklarının enine kesit mikrografları.

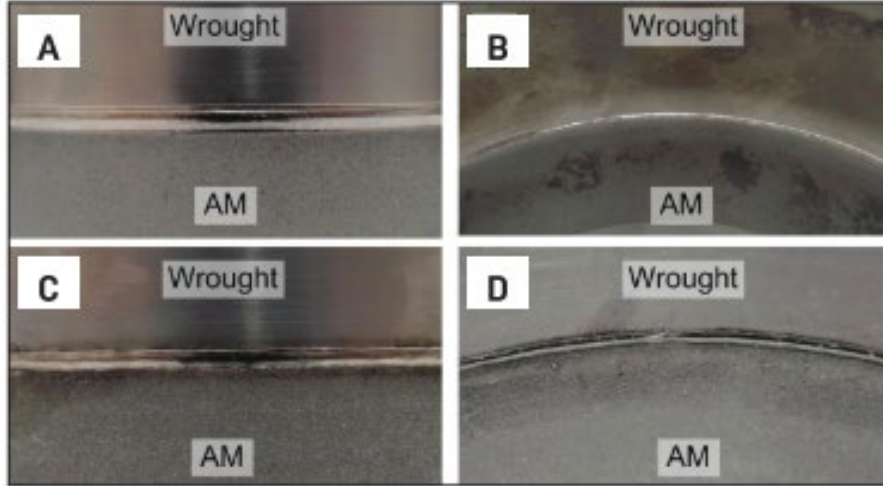


Şekil 2.43. (a) #a-#f lazer kaynak parametreleri altındaki numunelerin kaynak bölgelerinin genişlikleri (0-5 mm), (b) 1-4 mm aralığındaki kaynak bölgelerinin ortalama genişlikleri.

Tavlovich vd. [185], SLM Ti6Al4V parçaların birbirine ve dövme Ti6Al4V parçalara kaynaklanabilirliğini incelemişlerdir (Şekil 2.44). Çalışmada kaynak yöntemi olarak sırasıyla LBW ve EBW teknikleri kullanılmıştır. Kaynak sonrası elde edilen yüzey görüntüleri Şekil 2.45'te gösterilmiştir. Kaynakların görsel muayenesi, parça dış yüzeyinde herhangi bir sıçramanın olmadığını göstermektedir. Parça iç yüzeyinde ise az miktarda bir sıçrama mevcuttur. LBW, EBW' den bir miktar fazla sıçrama göstermiştir. LBW parçalarda kaynak bölgesi yakınında küçük bir renk değişimi gözlenirken, EBW parçalarda renk değişikliği bulunmamaktadır. X-ışını incelemesinde EBW' de neredeyse hiç gözeneklilik gözlenmemiştir. Ancak LBW parçalar çok az miktarda gözenek içermektedir.

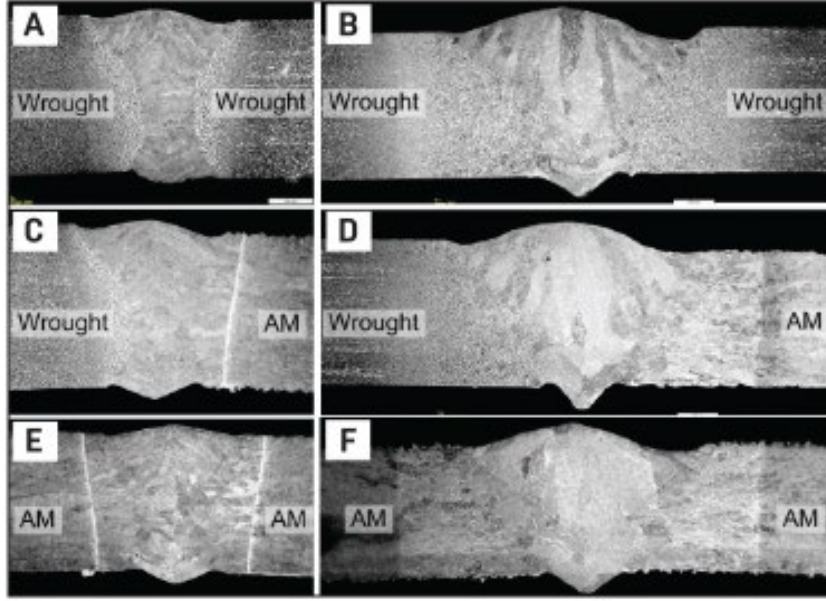


Şekil 2.44. Punta kaynaklı numune.



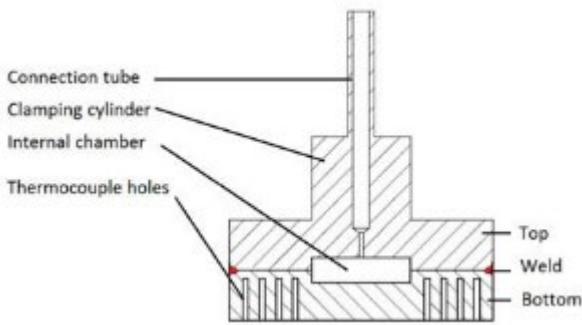
Şekil 2.45. AM-dövme Ti6Al4V kaynaklarının görsel incelemesi; (a) EBW dış yüzey, (b) EBW iç yüzey, (c) LBW dış yüzey, (d) LBW iç yüzey.

Şekil 2.46' da kaynak bağlantısına ait enine kesit görüntüleri yer almaktadır. Dövme Ti6Al4V parçalara ait ısı tesiri altındaki bölge (HAZ) eklemeli (AM) tarafta görülmeyen ince taneli bir yapıdan oluşmaktadır. Lazer kaynaklı AM ve dövme parçanın AM tarafındaki FZ sınırının daha geniş ve düz bir şekle sahip olduğu görülmektedir (Şekil 2.46 c). Aynı şekilde, AM tarafına ait HAZ' ın daha geniş olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 2.46. Kaynak kesitleri: (a) LBW dövme, (b) EBW dövme, (c) LBW AM-dövme, (d) EBW AM-dövme, (e) LBW AM, (f) EBW AM.

Wits ve Becker [162] SLM Ti6Al4V parçaların lazer kaynağına yönelik incelemelerde bulunmuştur. Çalışmada, eklemeli ve geleneksel olarak imal edilmiş titanyum parçalar kaynak edilebilirlikleri açısından karşılaştırılmıştır. Test parçası, çevre boyunca birleştirilmiş iki silindirik diskten oluşmaktadır (Şekil 2.47). Kaynak bağlantısının sızdırmazlığını ve basınç direncini test etmek amacıyla bağlantı borusuna bağlı bir iç boşluk yerleştirilmiştir. Ayrıca, kaynak işlemi sırasında parçaya iletilen ısı miktarını ölçmek için alt parça boyunca termokupllar ilave edilmiştir. Kaynak işlemi sırasındaki iç parça sıcaklık dağılımı ile ilgili olarak, her iki parça tipi için de birbirine yakın sonuçlara ulaşılmıştır. Ayrıca, optimize edilmiş kaynak parametreleri kullanılarak havacılık uygulamaları için basınç direnci ve sızdırmazlık açısından iyi kalitede kaynaklar elde edilmiştir.



(a)

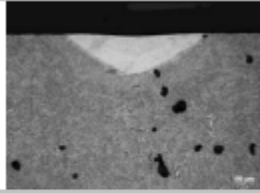
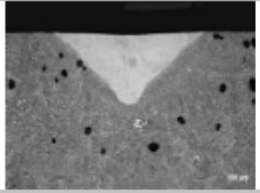
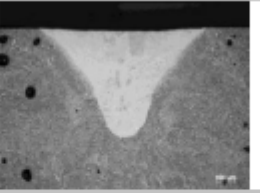
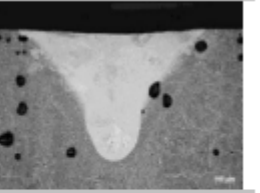
(b)

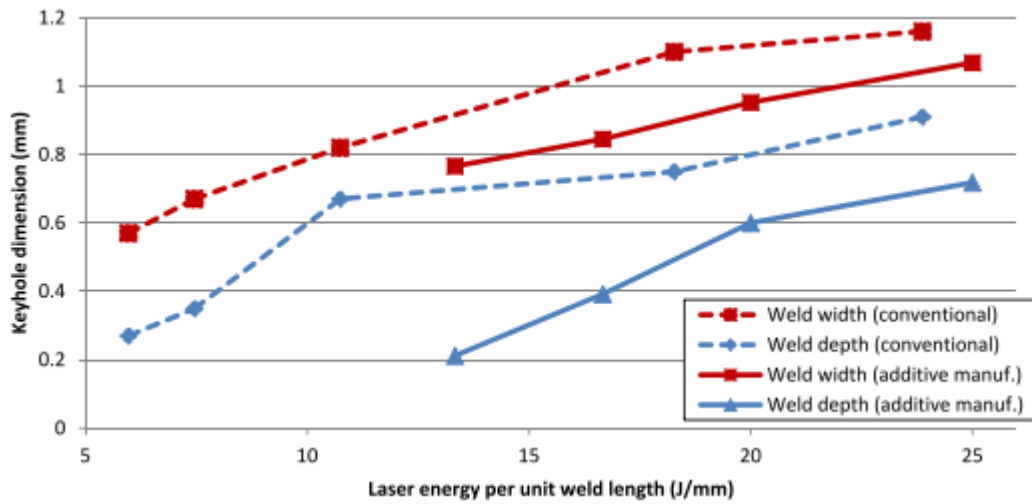
(c)

Şekil 2.47. (a) Üst ve alt yarıdan oluşan test parçası, (b) geleneksel parça, (c) AM parça.

Tablo 2.14’ te AM numunelerine ait kaynak geometrileri görülmektedir. AM parçalar siyah noktalar şeklinde ifade edilen yüksek gözenekli bir yapıya sahiptir. Bu çalışma neticesinde geleneksel yöntemler ile imal edilmiş parçaların kaynağında kullanılan işlem parametrelerinin doğrudan AM parçalara aktarılamayacağı anlaşılmıştır. Buna ek olarak aynı kaynak geometrisini elde edebilmek için geleneksel parçalara kıyasla AM parçalarda birim uzunluk başına daha fazla enerjinin gerekli olduğu görülmüştür (Şekil 2.48).

Tablo 2.14. Farklı lazer kaynak parametreleri ile birleştirilen SLM Ti6Al4V parçalara ait kaynak geometrileri.

AM. I	AM. II	AM. III	AM. IV
			
Laser power: 800W Pulse length: 2ms	Laser power: 1000W Pulse length: 2ms	Laser power: 800W Pulse length: 3ms	Laser power: 1000W Pulse length: 3ms
Energy / mm: 13.3J	Energy / mm: 16.7J	Energy / mm: 20.0J	Energy / mm: 25.0J
Depth: 0.212mm Width: 0.766mm	Depth: 0.392mm Width: 0.845mm	Depth: 0.600mm Width: 0.952mm	Depth: 0.718mm Width: 1.068mm



Şekil 2.48. Birim kaynak uzunluğu başına gerekli enerjiye karşılık kaynak geometrisi boyutları.

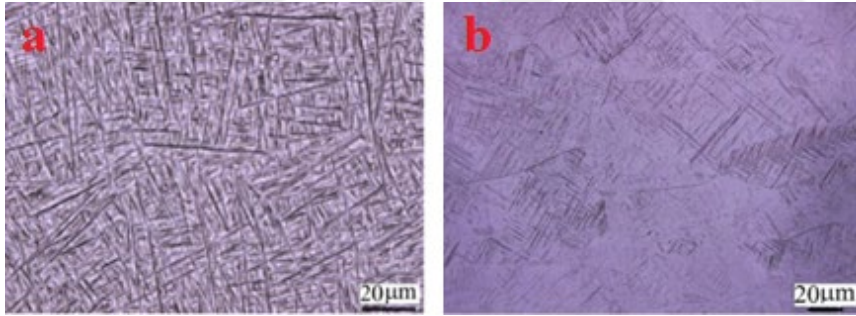
➤ Mikro yapı karakteristiği

Mikroyapı metalik bir bileşende bulunan faz ve tane yapılarını ifade etmektedir. Kullanılan imalat yöntemine bağlı olarak farklı mikroyapı özellikleri meydana gelmektedir. Bu

bölümde, kaynaklı AM Ti6Al4V parçaların mikroyapısal özellikleri ile ilgili yapılan tüm çalışmalar, imalat ve kaynak yöntemleri açısından değerlendirilmiştir.

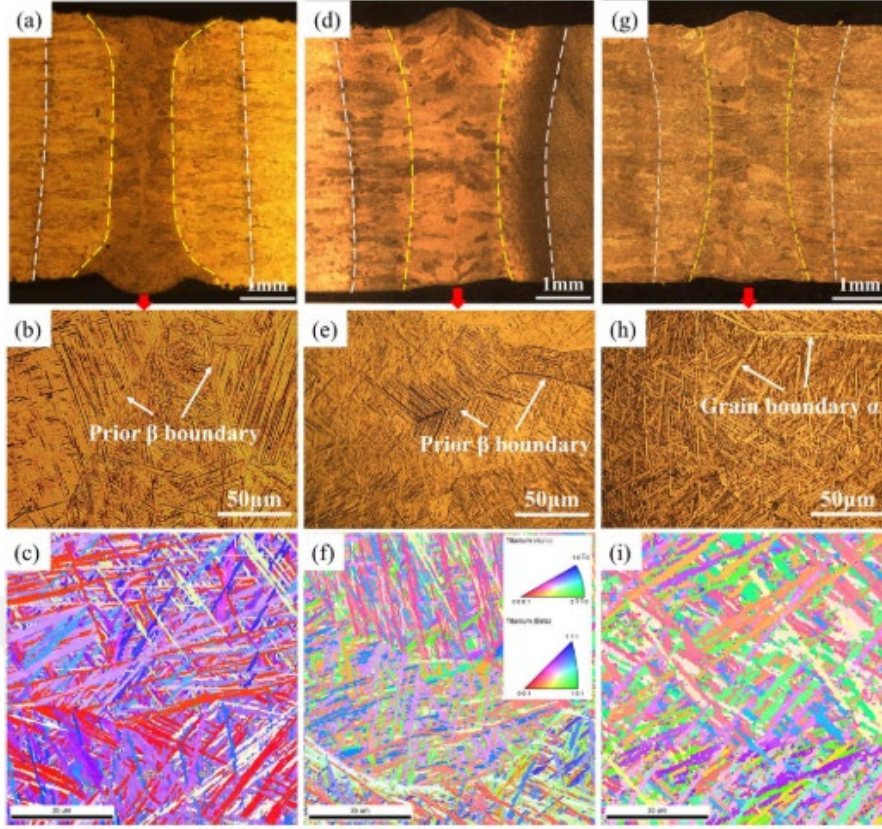
Iakhin ve Martynov [166], SLM Ti6Al4V parçaların EBW yöntemi ile birleştirilmesine yönelik bir çalışma yapmışlardır. Çalışma neticesinde FZ ve HAZ’ da önceki β taneleri içerisinde ince bir martenzit yapı meydana gelmiştir. Bu sonuç, Tavlovich vd.’ nin çalışmasını desteklemektedir [185]. Tavlovich vd., FZ’ de α^1 martenzitik fazı ile HAZ’ da α^1 martenzitik ve öncül α fazı karışımından oluşan mikroyapı elde etmişlerdir.

Rautio ve arkadaşları [168] tarafından iki farklı katman kalınlığında (30 ve 50 μm) üretilen SLM Ti6Al4V numuneler LBW tekniği kullanılarak birleştirilmiştir. Tabaka kalınlığının numunelerin mikroyapısı üzerinde büyük ölçüde etkili olduğu görülmüştür. SLM numuneler yoğun olarak iğnemsiz α^1 -martenzit fazından oluşmaktadır. Tavlama sonrası (940 $^{\circ}\text{C}$ ’ de) mikro yapı lameller arası β içeren kaba α fazından meydana gelmiştir. Hem inşa edildiği hali hem de tavlama sonrası kaynak bölgesi mikro yapıları ince ve iğnemsiz α^1 martenzitik fazdan oluşmaktadır (Şekil 2.49).



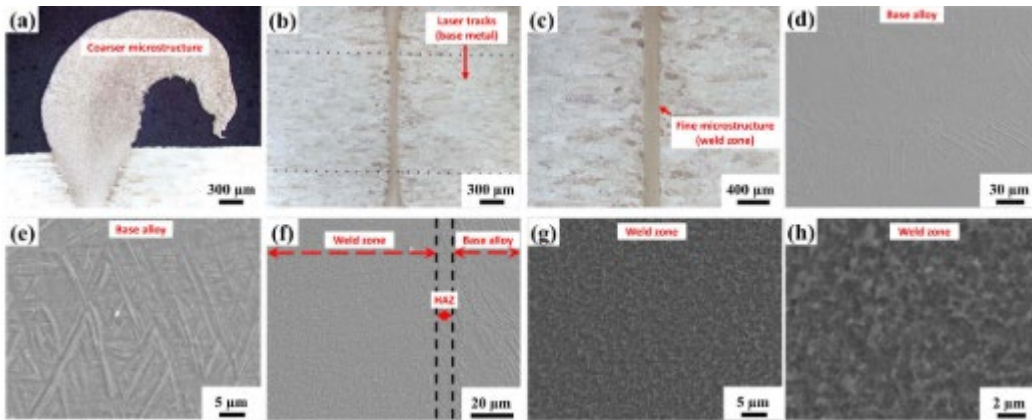
Şekil 2.49. Kaynak bölgesi: (a) lazer kaynağı sonrası Ti6Al4V mikro yapısı, (b) ısıtılma işlemi tabi lazer kaynaklı SLM Ti6Al4V’ nin mikro yapısı.

Yu vd. [184] lazer kaynaklı SLM Ti6Al4V numunelerin kaynak bölgelerine ait mikro yapıları incelemişlerdir (Tablo 2.13). SLM-SLM ve SLM-dövme Ti6Al4V bağlantılarının kaynak bölgeleri mikro yapı özellikleri açısından birbirine benzemektedir. Her iki kaynak bölgesi de iğnemsiz α^1 martenzit ve yönlü-gelişmiş β tane sınırlarından oluşmaktadır. Ayrıca bu mikro yapı karakteristiği SLM Ti6Al4V numunelerine benzemektedir. Isıl işlem sonrası, öncül β sınırlarını takip eden α tane sınırları ve daha kaba iğnemsiz yapılar meydana gelmiştir (Şekil 2.50).



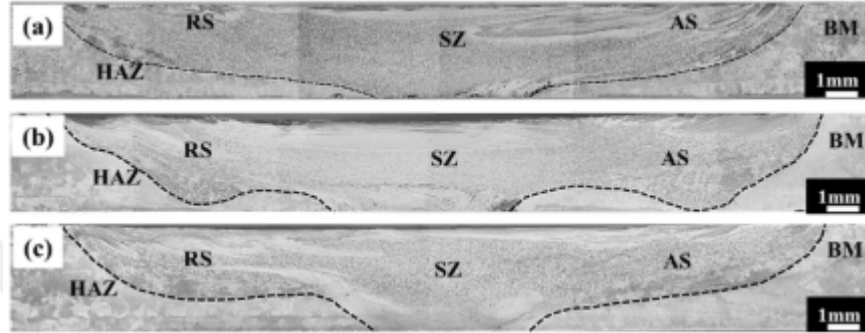
Şekil 2.50. (a), (d) ve (g) sırasıyla #1, #2 ve #3 numunelerinin kesit mikrografları; (b), (e) ve (h) sırasıyla #1, #2 ve #3 numunelerinin FZ' lerinin OM metalografları; (c), (f) ve (i) sırasıyla #1, #2 ve #3 numunelerinin FZ' lerinin EBSD yönelim haritaları.

Prashanth vd. [3], SLM Ti6Al4V numunelerin sürtünme kaynağı ile birleştirilmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Mikro yapı incelemeleri sonrası, SLM parçalarda sadece α^1 martenitik faz gözlenmiştir. Kaynaklı Ti6Al4V parçalarda ise α^1 martenitik ve β fazları bir arada yer almıştır. Şekil 2.51' de kaynaklı numuneye ait optik ve taramalı elektron mikroskop görüntüsü verilmiştir.



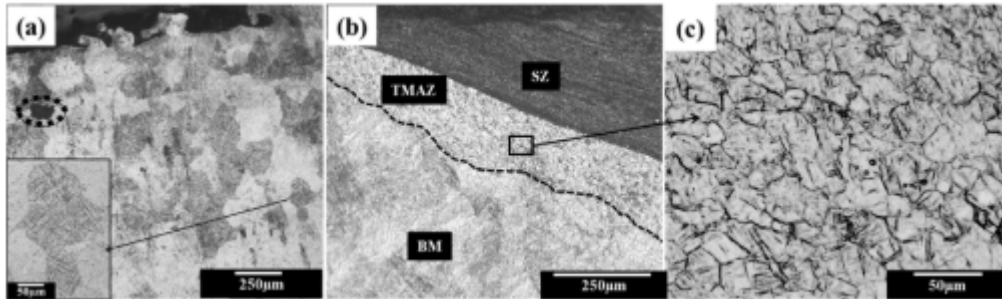
Şekil 2.51. Kroll çözeltisi ile aşındırma sonrası (5-10s) sürtünme kaynaklı SLM Ti6Al4V' nin optik mikrografları: (a) flaş, (b, c) kaynak bağlantısı-ana metal; SEM mikrografları: (d, e) ana malzeme, (f) ana malzeme-kaynak metal-ısı tesirindeki alan, (g, h) kaynak metal.

Singh vd. [170], sürtünme-karıştırma kaynaklı EBM Ti6Al4V numunelerin makro ve mikro yapılarını analiz etmişlerdir. Şekil 2.52’ de farklı takım dönme hızlarıyla elde edilen kaynak numunelerinin optik makrografları verilmiştir. Malzeme akışı, takım omzunun altındaki ilerleyen (AS) ve geri çekilen (RS) tarafı dahil olmak üzere havza şeklindedir. Havzanın geometrisi alt tabakadan üst tabakaya doğru genişlemektedir. Ayrıca takım dönme hızından bağımsız olarak merkez çizgisine göre simetriktir.

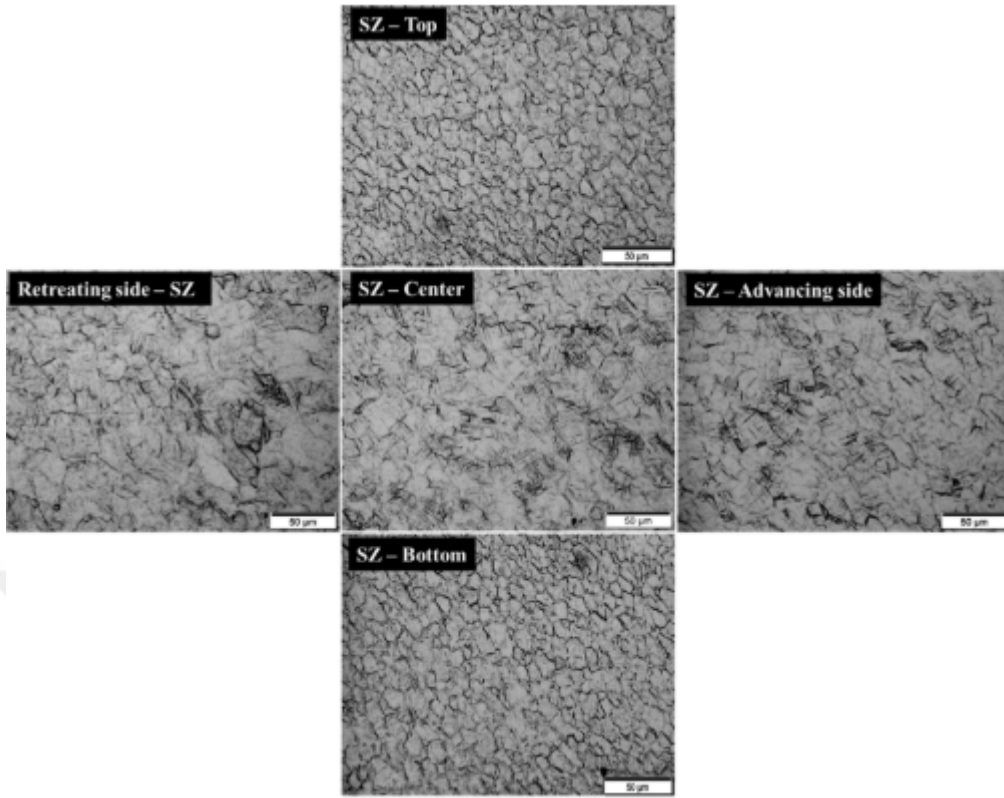


Şekil 2.52. 45 mm/dak sabit kaynak hızında (a) 400, (b) 500 ve (c) 700 rpm’ lik takım dönüş hızında yapılan kaynakların makro yapısı.

Şekil 2.53 ve 54’ te ana metal ve farklı kaynak bölgelerine ait optik mikroskop görüntüleri yer almaktadır. Ana metal görüntüsündeki açık renk α fazını, koyu renk ise β fazını ifade etmektedir. Ayrıca ana metalde gözenek bulunmaktadır (Şekil 2.53a). Termo mekanik olarak etkilenen bölge (TMAZ) yeniden kristalize edilmiş çok ince eş eksenli bir yapıya sahiptir (Şekil 2.53c). Bu yapının oluşmasında yüksek soğuma hızı etkilidir. SZ, $\alpha + \beta$ fazı ile tane sınırları boyunca β -dönüştürülmüş yapı olan çok ince eş eksenli α tanelerinden oluşmaktadır (Şekil 2.54). Buda kaynak işlemi esnasındaki sıcaklığın β dönüşüm değerinin üzerinde olduğunu ifade etmektedir. Ti6Al4V malzemesine ait β dönüşüm sıcaklığı kimyasal bileşimdeki dengeleyici elementlerin miktarlarına bağlı olarak yaklaşık 995 ± 20 °C’ de gerçekleşmektedir [10].

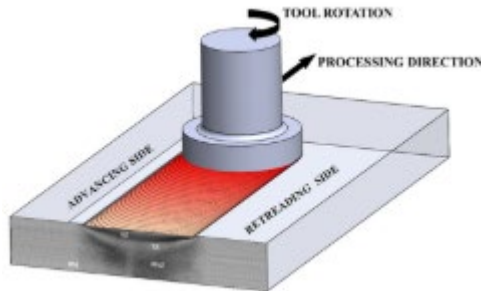


Şekil 2.53. Optik mikroskop görüntüleri: (a) AM Ti6Al4V’ nin kaynak kesiti, (b) 500 rpm kaynak bölgesi, (c) ince eş eksenli TMAZ.

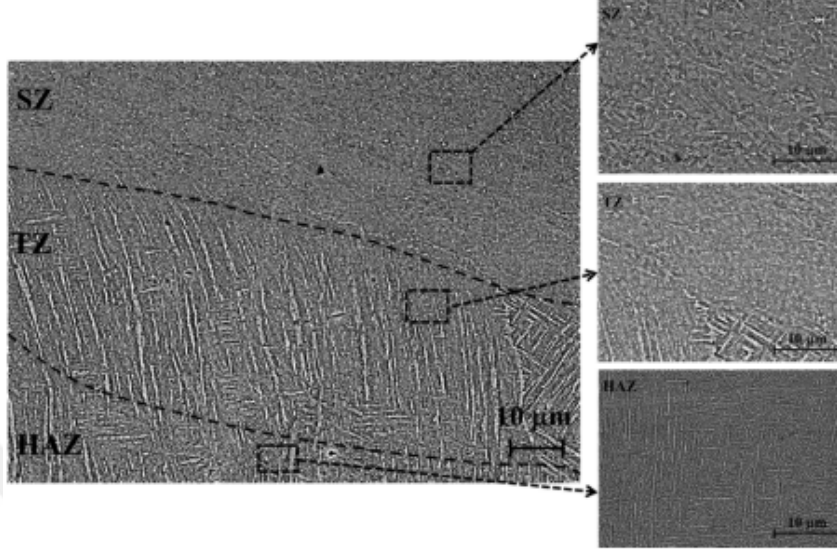


Şekil 2.54. SZ' nin 500 rpm ve 45 mm/dak parametreleri için farklı konumlardaki optik mikrografi.

Rubino vd.' nin [174] EBM Ti6Al4V plakaların sürtünme karıştırma işlemi üzerine yaptıkları çalışma neticesinde ısıtma ve karıştırma etkilerinin SZ, geçiş bölgesi (TZ) ve HAZ gibi farklı metalürjik bölgelerin oluşumunu desteklediği görülmüştür (Şekil 2.55 ve 56). SZ, küresel α ve çok ince iğnemsli α tanelerinden oluşmaktadır. HAZ mikroyapısı, iğnemsli α lamellerden oluşurken, TZ deforme olmuş ince lamelli bir mikro yapı içermektedir. Bu mikro yapı, kaynak işlemi esnasında bu bölgenin beta dönüşüm sıcaklığı üzerine çıkmasının ardından, hızlı soğutma neticesinde β fazından $\alpha + \beta$ fazına dönüştüğünü göstermektedir.

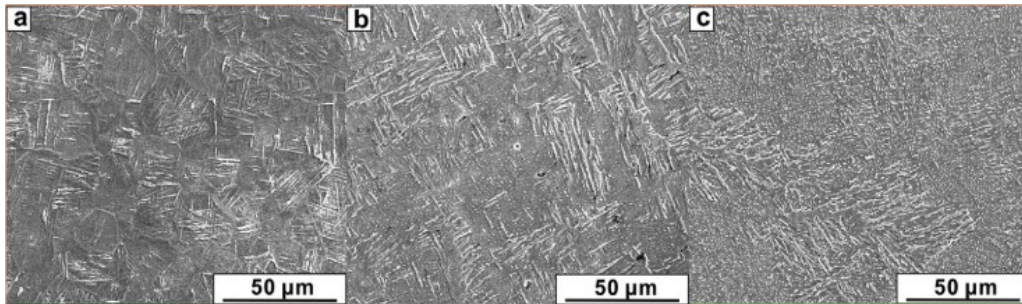


Şekil 2.55. FSP şematigi.



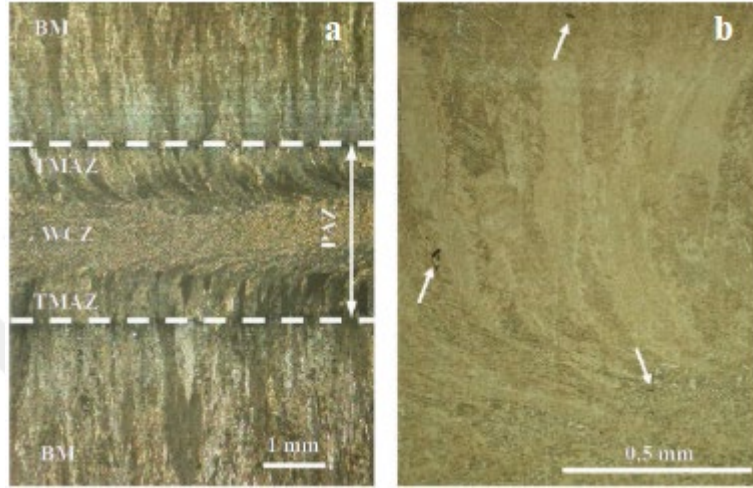
Şekil 2.56. Sürtünme kaynaklı (700/100) Ti6Al4V alaşımına ait farklı metalürjik bölgelerin SEM görüntüleri.

Qin vd. [175] sürtünme kaynağı kullanılarak birleştirilen EBM Ti6Al4V parçaların mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. SEM ile elde edilen mikro yapı görüntülerinde ana metal, ısı tesiri altında kalan bölge ve kaynak bölgesi olmak üzere üç farklı bölge oluşumu gözlenmiştir (Şekil 2.57). Ana metal bölgesi $\alpha + \beta$ fazları ile genişliği $100 \pm 15 \mu\text{m}$ olan sütunlu öncül β tanelerinden oluşmaktadır (Şekil 2.57c). Kaynak bölgesine ait mikro yapıda ana metalde yer alan sütunlar halindeki öncül β taneleri α fazı ile dağılmış veya sınırlarında mevcut olan düzensiz β fazlı daha eş eksenli tanelere dönüşmüştür (Şekil 2.57a). Isı tesiri altında kalan bölgenin mikro yapısı ise ana metal ve kaynak bölgesine kıyasla daha kaba ve genişliği $140 \pm 19 \mu\text{m}$ değerinde olan sütunlu öncül β tanelerinden meydana gelmiştir (Şekil 2.57b).



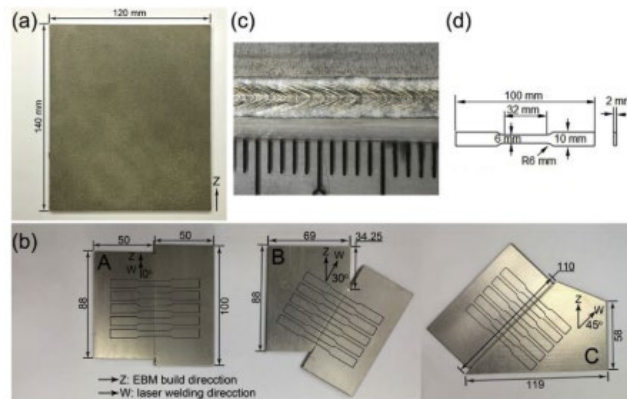
Şekil 2.57. Sürtünme kaynaklı EBM Ti6Al4V alaşımına ait SEM görüntüleri: (a) WZ, (b) HAZ, (c) BM.

Scherillo vd. [182] tarafından EBM yöntemi ile imal edilen Ti6Al4V parçalar doğrusal sürtünme kaynağı kullanılarak birleştirilmiştir. Çalışmada farklı frekans (40-50 Hz) ve basınç (55-75 MPa) değerleri kullanılmıştır. Çalışma neticesinde, ana malzemeye benzer sertlik ve mikro yapıya sahip, iyi kalitede kaynakların elde edilmesi sağlanmıştır. Kaynak işlemleri sonrası, ana metalin orijinal mikro yapı özellikleri değişmeden kalarak, kaynak dikişinde HAZ gözlenmemiştir (Şekil 2.58).



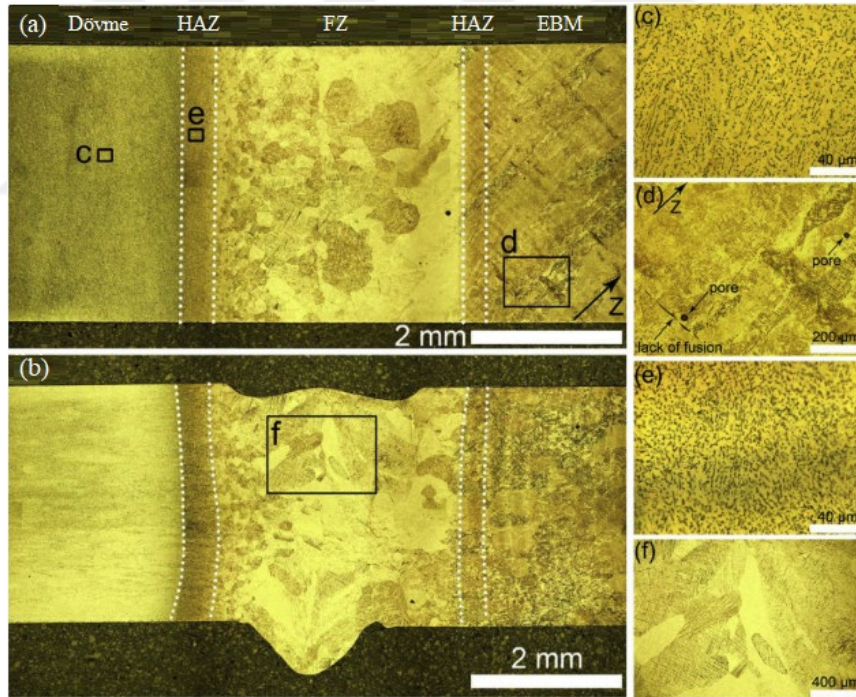
Şekil 2.58. (a) Doğrusal sürtünme kaynağı sonrası oluşan metalürjik bölümler, (b) WC/TMAZ ara yüzünün yakınlaştırılması (boşluklar beyaz oklarla gösterilmektedir).

Sun vd. [173] EBM Ti6Al4V parçaların dövme Ti6Al4V parçalara birleştirilmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, parça inşa yönü ve kaynak dikiş yönü arasındaki açılar 0° , 30° ve 45° olarak seçilerek, kaynak açılarının mikro yapı, mikro sertlik ve dayanım değerleri üzerine etkisi karakterize edilmiştir (Şekil 2.59). Her bir bölgenin mikro sertliğinin o bölgenin mikro yapısı tarafından belirlendiği görülmüştür. Ayrıca kaynaklı parçaların gerilme özelliklerinin EBM işlemi esnasında ortaya çıkan iç kusurlardan dolayı büyük ölçüde EBM ana metaline bağlı olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 2.59. (a) EBM Ti6Al4V plaka boyutları, (b) EBM ve dövme plakaların konumu, (c) kaynak dikiş görüntüsü, (d) b' deki çekme testi numunelerinin boyutları.

Şekil 2.60' da EBM Ti6Al4V plakaların dövme Ti6Al4V plakalara lazer kaynağı kullanılarak birleştirilmesi sonrası meydana gelen mikro yapı görüntüleri yer almaktadır. Şekil 2.60 incelendiğinde ana metal, ısı tesiri altında kalan bölge ve kaynak bölgesi birbirinden kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. Dövme ana metal bölgesi ortalama genişliği $\sim 3,7 \mu\text{m}$ olan ince uzun α ve siyah nokta veya çizgi şeklindeki β fazından oluşmaktadır (Şekil 2.60c). EBM ana metal bölgesi ise genişliği 50-100 μm olan sütunlar halindeki öncül β ve β taneleri içerisinde ince lamelli α/β ' lardan meydana gelmektedir. α tanelerinin genişliği yaklaşık 0,7 μm değerindedir ve mikro yapıda kısmen ergimiş bölge ve gözenekler bulunmaktadır (Şekil 2.60d). Şekil 2.60e' de dövme ana metalinde yer alan ince uzun α fazı küresel hale gelmiş, ancak bu değişim EBM' ye ait ısı tesiri altındaki bölgede görülmemiştir. Kaynak bölgesinin mikro yapısı kaynak dikişinin ortasına doğru büyüyen sütunlu β tanelerinden oluşmaktadır. Ayrıca β tane yapısında kaynağın hızlı şekilde katılaşması nedeniyle oluşan iğnemi α^1 martenzit fazı görülmüştür (Şekil 2.60f).



Şekil 2.60. Uzunlamasına kesite (a) ve enine kesite (b) ait OM görüntüleri (kaynak açısı 45° olan numune), a ve b de seçilen farklı bölgelere ait mikro yapı görüntüleri (c-f). Sarı arka plan α , siyah nokta veya çizgi β fazı.

➤ Mekanik özellikler

Kaynaklı AM Ti6Al4V parçalarının mekanik özellikleri ile ilgili çalışmalar Tablo 2.15' te özetlenmiştir. Birleştirme yöntemi olarak LBW ve FW işlemlerinin yoğunlukta kullanıldığı bu çalışmalarda EBW tekniğine ait az sayıda çalışma yer almaktadır. Tablo 2.15

incelendiğinde, kaynaklı SLM Ti6Al4V parçaların çekme ve akma dayanımı değerlerinin kaynaklı EBM Ti6Al4V parçalara kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. AM Ti6Al4V numunelerin LBW işlemi sonrası mekanik özelliklerinde herhangi bir kayıp gözükmemektedir. EBW numunelerinde ise hafif bir düşüş söz konusudur. Ancak her iki kaynak yönteminden sonra uzama değerleri bir miktar azalmaktadır [166, 168, 173, 185] (Şekil 2.61). Ayrıca LBW yöntemi ile birleştirilen parçaların sertlik ve çekme dayanım değerlerinin EBW kullanılarak elde edilen birleştirmelere kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür [185]. FW ve FSW numunelerinin hem çekme hem de akma dayanımlarında bir düşüş gözlenmiştir. Bununla birlikte, FW numuneleri, mikro yapısal dönüşümler nedeniyle daha sünek bir forma dönüşürken [3, 175], FSW numunelerinin uzama değerleri önemli ölçüde azalmıştır [170] (Şekil 2.62).

AM Ti6Al4V numunelerin üretiminde kullanılan katman kalınlığı, hem hazırlanan hem de kaynaklı parçanın mekanik özelliklerinde oldukça etkilidir. SLM katman kalınlığının 50 μm ' den 30 μm ' ye düşürülmesi sonucunda hem akma hem de çekme dayanımı değerleri azalmıştır. Ancak 30 μm katman kalınlığı ile daha yüksek uzama değerleri elde edilmiştir [168].

Kaynak işleminde kullanılan teknik ve parametreler mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir. Uygun teknik ve parametreler ile yüksek kalitede kaynaklı AM parçalar elde etmek mümkündür. Takım dönüş hızı, FSW işleminde mekanik özellikleri belirleyen önemli bir parametredir. Singh vd. tarafından EBM Ti6Al4V numuneler farklı takım dönüş hızları kullanılarak birleştirilmiştir. Takım dönüş hızındaki artışla birlikte çekme mukavemeti ve uzama değerlerinin arttığı görülmüştür [170]. Sun vd. EBM-dövme Ti6Al4V parçaları Şekil 2.59b' ye göre birleştirmiştir. Parça inşa yönü ile kaynak dikiş yönü arasındaki açının 0° olduğu birleştirme tekniği ile en yüksek mekanik özellikler elde edilmiştir [173].

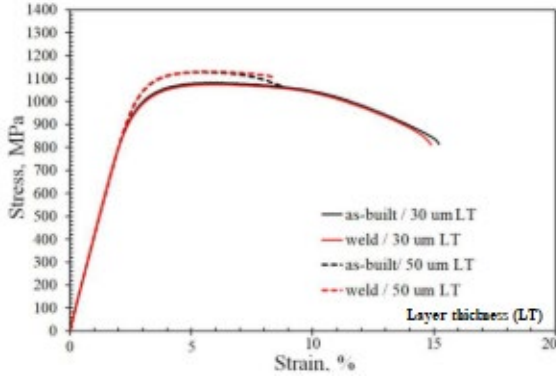
Kaynak sonrası ısıtıl işlemin parçanın mekanik özellikleri üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Lazer kaynaklı SLM numunelere uygulanan ısıtıl işlem, kaynak bölgesinin sertlik, çekme ve akma dayanımı değerlerini bir miktar düşürmüştür [184]. ısıtıl işlemin kaynaklı AM parçalar üzerindeki etkisine ilişkin benzer bir çalışma Tavlovich ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Çalışmada, tüm SLM numuneleri, yapı platformundan çıkarılmadan önce ısıtıl işleme tabi tutulmuştur. Bu nedenle, kaynak sonrası ısıtıl işlemin nihai gerilme dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır. Ancak kaynaklı AM-dövme

parçalara uygulanan ısıtıl işlem neticesinde kaynak bağlantılarının gerilme dayanımı değerleri artmıştır. Aynı çalışmada, yüzeyleri işlenen AM numunelerinin kaynak sonrası en yüksek gerilme dayanımına sahip olduğu görülmüştür [185].

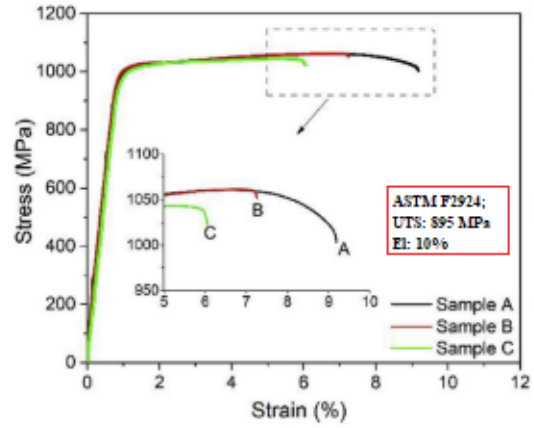
Tablo 2.15. Kaynaklı eklemeli Ti6Al4V parçaların mekanik özellikleri.

İmalat yöntemi	Kaynak işlemi	Çekme dayanımı, [MPa]	Akma dayanımı, [MPa]	Uzama, [%]	Sertlik değeri, [HV]			Kaynak
					BM	HAZ	FZ/SZ	
SLM	- ¹	1080	912	15,2	-	-	-	[168]
	LBW ¹	1075	887	14,9	-	-	-	
	- ²	1129	937	8,8	-	-	-	
	LBW ²	1129	939	8,3	-	-	-	
SLM	-	~1200	~1080	-	410-440	-	-	[184]
	LBW ³	~1200	~1080	-	410-430	370-400	410-430	
	LBW ^{3,4}	~1200	~1100	-	~430 ⁶	390-430 ⁶	430-450	
					360-380 ⁷	390-430 ⁷		
LBW ^{3,5}	1106	1008	-	380-400	370-390	390-410		
SLM	-	~1040	~965	~11,5	375±9	-	-	[185]
	LBW	~1090	~1015	~7,1	375±9	369±5	393±6	
	EBW	~1035	~950	~8	375±9	352±2	346±15	
	LBW ⁴	~950	~890	~8,7	-	-	393±7	
	EBW ⁴	~940	~865	~8,2	-	-	347±3	
	LBW ³	~1110	~1010	~7	-	-	-	
SLM	-	~1355±20	~1250±15	~7,5±0,5	~420	-	-	[3]
	FW ³	~1300±15	~1145±10	~12±1	395±20	-	449±5	
EBM	-	975,7	-	17,14	340-360	-	-	[170]
	FSW ⁸	468,05	-	~2,5	354-370			
	FSW ⁹	822,94	-	~5				
	FSW ¹⁰	912,04	-	~6,5				
EBM	- ¹¹	895	825	10	-	-	-	[173]
	LBW ^{3,4,12}	1067±5	1017±5	9,4±0,6	-	-	-	
	LBW ^{3,4,13}	1061±2	1013±6	7,2±1,2	-	-	-	
	LBW ^{3,4,14}	1051±8	1006±6	5,8±1,0	~360 ⁶		375-394	
~320 ⁷ ~340 ⁷								
EBM	-	1046±13	970±15	10±1	~328	-	-	[175]
	FW	1034±9	859±10	13±1	350±14	< 328	383±28	

¹: 30 µm, ²: 50 µm, ³: Kaynak öncesi yüzey işleme, ⁴: Eklemeli-dövme kaynak işlemi, ⁵: Kaynak sonrası ısıtıl işlem, ⁶: AM tarafı, ⁷: Dövme tarafı, ⁸: 400 rpm, ⁹: 500 rpm, ¹⁰: 700 rpm, ¹¹: ASTM F2924-Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion., ¹²: 0°, ¹³: 30°, ¹⁴: 45°

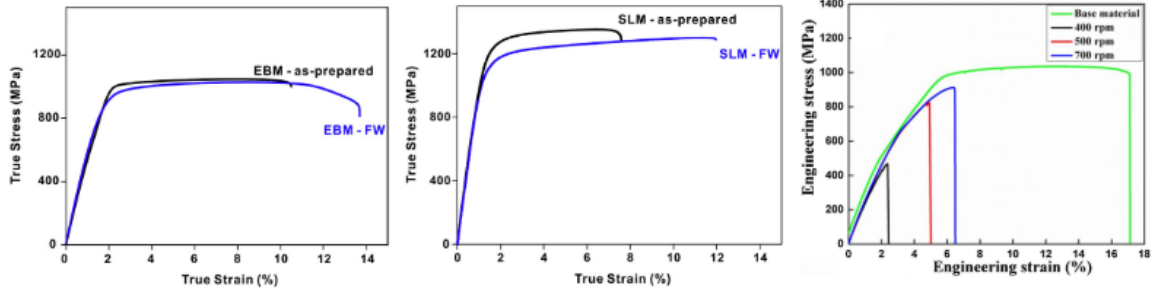


(a)



(b)

Şekil 2.61. Mühendislik gerilim-gerinim eğrileri: (a) lazer kaynaklı SLM Ti6Al4V (30 ve 50 μm) numuneler [168], (b) lazer kaynaklı EBM-dövm Ti6Al4V numuneler [173].



Şekil 2.62. Oda sıcaklığı çekme eğrileri: (a) EBM-FW [175], (b) SLM-FW [3], (c) EBM-FW specimens [170].

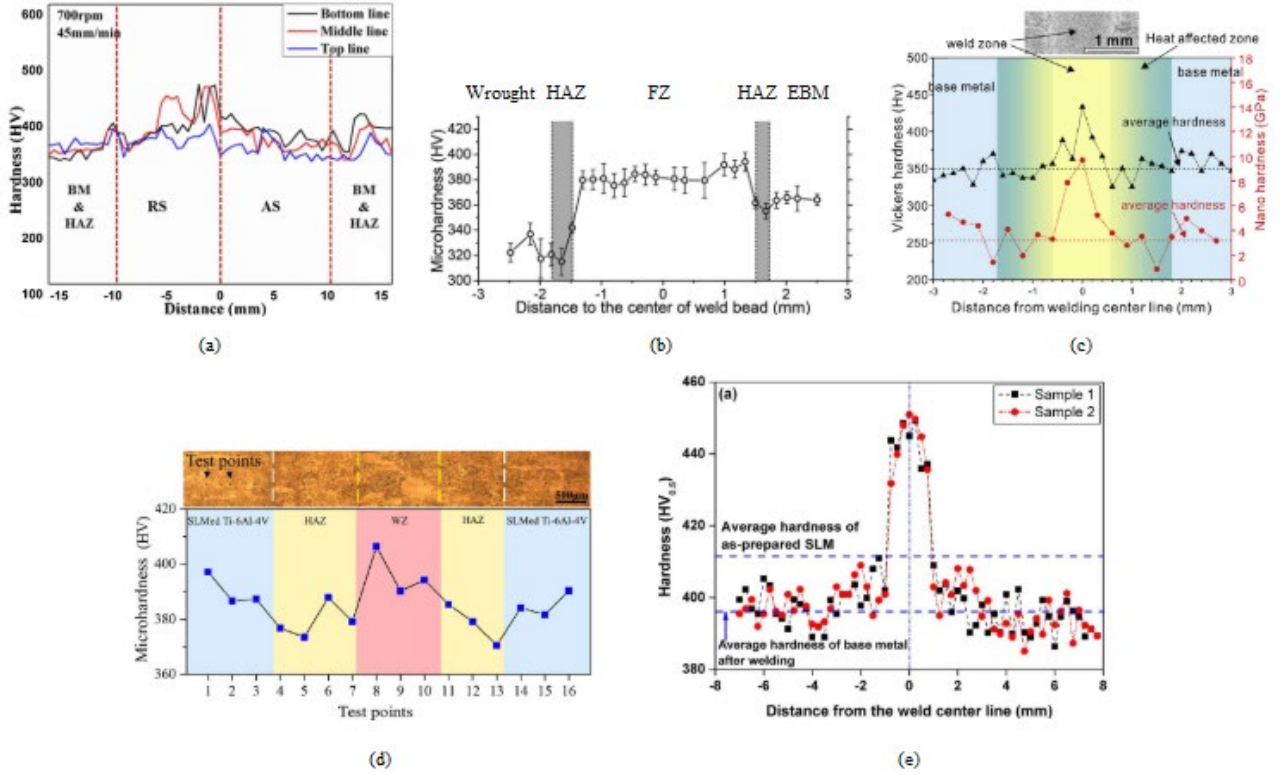
AM Ti6Al4V numunelerinin kaynağı sonrası genellikle FZ, HAZ ve BM olmak üzere üç farklı metalürjik bölge oluşmaktadır. Bu bölgeler arasında en yüksek sertlik değeri FZ’ de ölçülür. HAZ ve BM sertlik değerleri açısından yakın değerlere sahiptir (Şekil 2.63).

EBM-FRW numunelerinin üç farklı yükseklikte (üst-orta-alt) ölçülen sertlik değerleri, yerel kusurlara ve gözeneklere bağlı olarak farklılık göstermektedir (Şekil 2.63a). Kaynak bölgesi boyunca artan sertlik, başlangıçta hazırlanan EBM Ti-6Al-4V malzemesine kıyasla yeniden kristalize edilmiş α fazı mikro yapısının oluşumuna ve morfolojisine bağlanabilir. Kaba iğnems α fazının sertliği 308 HV iken, daha ince bir α fazından oluşan FZ’ nin sertlik değeri 400 HV’ dir. FSW numuneleri için, yerel sertlik değeri farkının nedenlerinden biri, kullanılan takımdan gelen tungsten açısından zengin kalıntılardır. Yoğun tungsten parçacıkları olan bir bölgede yapılan ölçümler daha yüksek sertlik değeri verecektir. Bunun nedeni, tungsten parçacıklarının titanyum alaşımından daha sert olmasıdır [170].

Bir bölgeye ait mikro yapı özellikleri, o bölgenin mikro sertliği üzerinde oldukça etkilidir. Şekil 2.63b' de gösterildiği gibi, lazer kaynaklı EBM-dövme Ti6Al4V bağlantısının en yüksek mikro sertlik değeri FZ' de ölçülmüştür. Bu sonuçta, iğnemsisi α^1 martenzit fazından oluşan FZ' nin mikro yapısı etkilidir (Şekil 2.60f) [193]. Ayrıca, EBM tarafındaki α yapılarının, dövme tarafındaki benzer yapılardan daha ince olması nedeniyle ($\sim 0.7 \mu\text{m}$ vs. $\sim 3.7 \mu\text{m}$), EBM tarafına ait mikro sertlik değeri daha yüksektir ($\sim 360 \text{ HV}$ vs. $\sim 320 \text{ HV}$) [173].

Sürtünme kaynaklı SLM ve EBM numunelerinin sertlik değerleri arasında belirgin farklar bulunmaktadır. FW-SLM' nin BM ve FZ sertliği FW-EBM' den daha yüksektir. FW-SLM numunelerindeki yüksek sertliğin nedeni, üretimdeki soğutma hızları ile ilişkilidir. SLM işlemindeki yüksek soğutma hızları, martenzitik α^1 fazından oluşan çok ince bir mikro yapı oluşumunu destekler. EBM' de görülen dengeye yakın katılaşma nedeniyle α^1 fazından nispeten daha yumuşak olan $\alpha+\beta$ mikro yapısı oluşur. Ayrıca, EBM işleminde önceden ısıtılmış toz yatağı sayesinde soğutma hızının neden olduğu mekanik ve mikro yapı farklılıkları büyük ölçüde azaltılır (Şekil 2.63c ve e) [3, 175]. İmalatta soğutma hızlarının sertlik üzerindeki etkisine benzer şekilde, kaynak yöntemleri arasındaki sertlik farkının temel nedeni de soğutma hızlarıdır. EBW yöntemine nazaran LBW' de soğutma oranı daha yüksektir ve bunun sonucunda yüksek sertlik değerleri meydana gelmektedir. Ayrıca yüksek vakum altında yapılan EBW işleminde oksijen emilimi LBW' ye kıyasla yok denecek kadar azdır [185].

Lazer kaynaklı SLM-SLM ve SLM-dövme Ti6Al4V parçaları benzer mikro sertlik değerlerine sahiptir. Mikro yapıdaki iğnemsisi α ve α^1 tanelerinin genişlikleri mikro sertliği belirlemektedir. Daha küçük α ve α^1 taneleri plastik deformasyonun başlamasını geciktirerek daha yüksek akma ve mikro sertliğe yol açar [110]. Bu nedenle, kaynak bölgelerinde benzer iğnemsisi α ve α^1 tane genişliklerine sahip olan SLM-SLM ($1.38 \pm 0.33 \mu\text{m}$) ve SLM-dövme ($1.37 \pm 0.45 \mu\text{m}$) Ti6Al4V parçaları benzer akma dayanımı ve mikro sertlik değerlerine sahiptir. Bununla birlikte, ısıtılmış SLM-SLM ($2.46 \pm 0.46 \mu\text{m}$) numunesinin FZ' sindeki daha kaba iğnemsisi mikro yapılar, daha düşük akma dayanımı ve mikro sertliğe neden olur [184].



Şekil 2.63. Vickers sertlik profili: (a) FSW-EBM/700rpm [170], (b) LBW-EBM/numune C [173], (c) FW-EBM [175], (d) LBW- SLM/numune 3 [184], (e) FW-SLM [3].

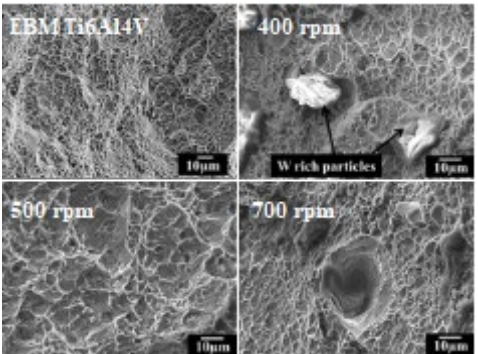
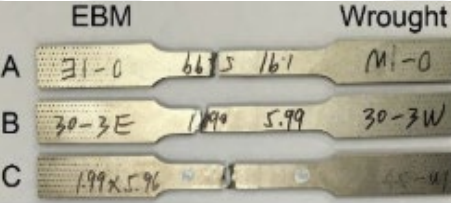
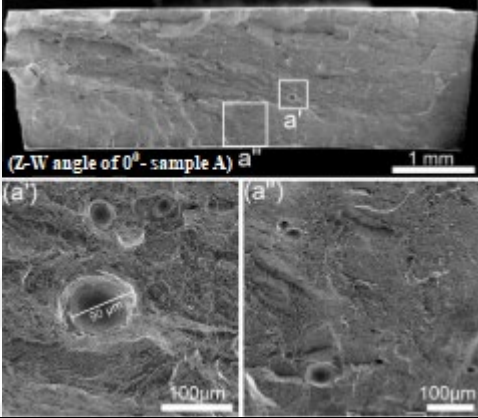
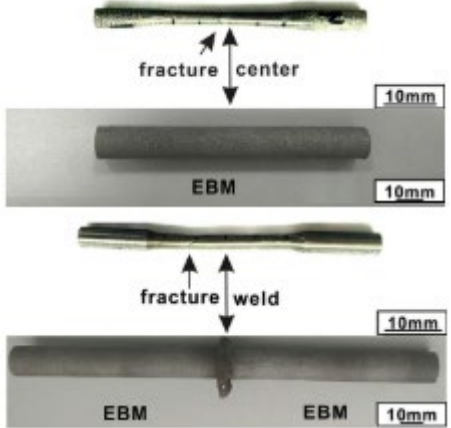
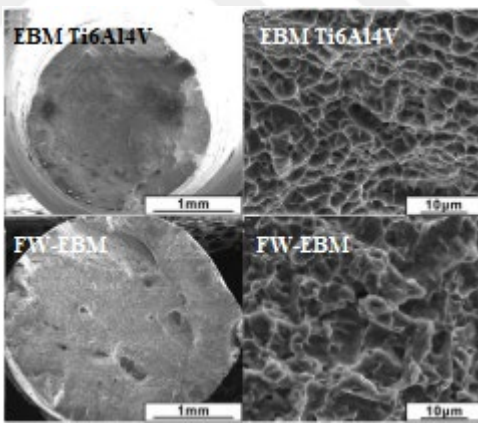
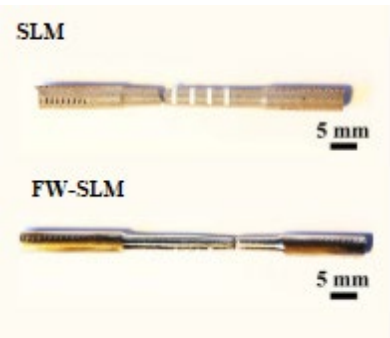
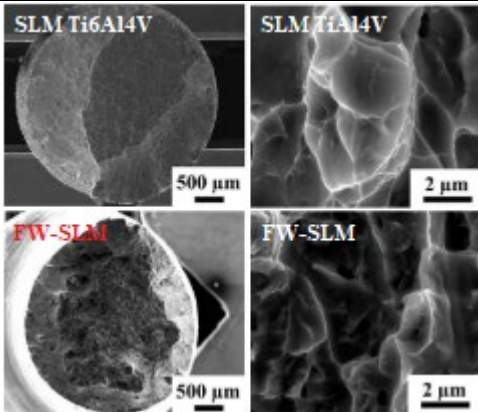
Kaynaklı AM numunelerinin çekme testi sonrası kırılma konumları ve yüzey görüntüleri Tablo 2.16’ da gösterilmiştir. Tablo 2.16’ ya göre, farklı takım dönme hızları kullanılarak birleştirilen FSW EBM Ti6Al4V numunelerinin, kaynak merkez hattından 5 mm uzaklıktaki AS ve RS bölgelerinden kırıldığı görülmüştür. 500 ve 700 rpm kaynaklı numuneler AS’ den kırılır iken, 400 rpm kaynaklı numuneler RS’ den kırılmıştır. Kırılma yüzeylerinden kırılmanın sünek tipte olduğu ve yüzeyde çukur oluşumlarının meydana geldiği görülmektedir. Kırık yüzeyin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopi (EDS, Energy dispersive X-ray spectroscopy) analizi, kırılma düzlemlerinde tungsten bakımından zengin parçacıkların varlığını doğrulamıştır [170].

Tablo 2.16c ve d’ de gösterilen AM FW numunelerinin sertlik değerleri kaynak bölgesi boyunca artmasına rağmen, kırılma geleneksel FW numunelerinin aksine ana metalde gerçekleşmiştir [194, 195]. Aynı şekilde, kaynaklı SLM ve EBM numunelerinin de ana metalden kırıldığı görülmektedir. Bu sonuç, AM numuneleri için FZ ve HAZ’ ın, ana metale kıyasla kırılmaya karşı daha iyi dayanıma sahip olduğunu göstermektedir. HAZ’ daki kaba mikro yapı, daha yüksek süneklik ve daha iyi gerinim sertleşmesi sağlayarak bu

bölgede kırılmayı önlemiştir. Kırılma yüzey analizinden, tüm numunelerin sünek kırılma tipine karşılık gelen çukur morfolojisine sahip olduğu gözlenmiştir [3, 175]. Tablo 2.16b’ de, tüm lazer kaynaklı EBM-dövme numunelerinin EBM ana metalinden kırıldığı görülmektedir. Kırılma, 90 μm ’ lik büyük bir gözenekten başlamıştır. Daha sonra, içyapıdaki küçük ve büyük gözenekler yükleme altında birleşerek doğrudan kırılmaya neden olmuştur [173].

AM-dövme numunelerin kaynağına yönelik benzer bir çalışma Tavlovich ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. LBW ve EBW ile birleştirilen SLM-SLM ve SLM-dövme numunelerinin tümü ana metalde kırılmıştır. SLM-dövme numunelerinde kırılma dövme malzeme tarafında gerçekleşmiştir [185]. Kaynaklanmış çekme numunesinin kaynak bölgesindeki çentik, kırılmanın konumunu etkilemektedir. Bu konuda yapılan bir çalışmada, lazer kaynaklı SLM-SLM ve SLM-dövme numunelerin tümü kaynak bölgesinde bulunan yay çentikli alandan kırılmıştır [184].

Tablo 2.16. Kaynaklı AM numunelerin çekme testi sonrası kırılma yerleri ve yüzey görüntüleri.

Num.	Kırılma Konumu	Kırılma Yüzeyi	Ref.
a) FSW - EBM			[170]
b) LBW - EBM/ dövme			[173]
c) FW - EBM			[175]
d) FW - SLM			[3]

3. MATERİYAL VE METOT

Tezin bu bölümü, LBW ve TIG kaynak yöntemleri kullanılarak birleştirilen EBM Ti6Al4V parçaların mekanik ve mikro yapı özelliklerini analiz etmek amacıyla gerçekleştirilen ilgili testleri içermektedir.

3.1. Malzeme

Bu çalışmada, EBM yönteminde yoğun olarak tercih edilen $\alpha+\beta$ titanyum alaşımı olan Ti6Al4V (Seviye 5) malzemesi kullanılmıştır. Malzeme Arcam EBM firmasından tedarik edilmiştir. Kullanılan Ti6Al4V metal tozları gaz atomizasyon yöntemi ile üretilmiş olup, tane boyutları 45-100 μm arasında değişmektedir. Arcam EBM Ti6Al4V toz malzemesine ait kimyasal bileşim, boyut dağılımı ve mekanik değerler Tablo 3.1 - 3.3' te verilmiştir.

Tablo 3.1. Arcam EBM Ti6Al4V tozunun kimyasal bileşimi.

Alaşım Elementleri [%]	Al	V	O	Fe	C	N	H	Ti
Ti6Al4V	6,0	4,0	0,15	0,1	0,03	0,01	0,003	Kalan

Tablo 3.2. Arcam EBM Ti6Al4V tozunun boyut dağılımı.

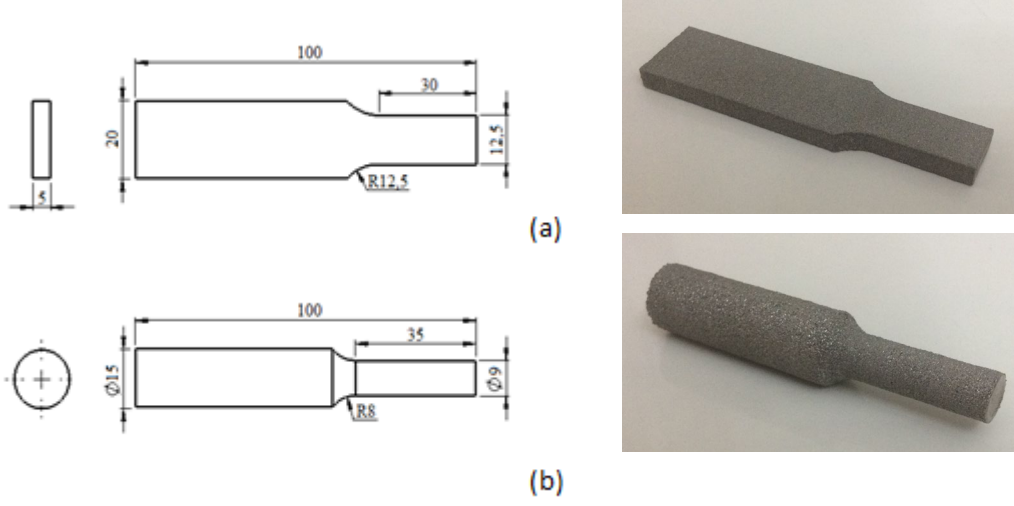
SD	Boyut Dağılımı (ASTM B822)			Yoğunluk (ASTM B212)
45-106 μm	D10	D50	D90	2.47 g/cm ³
	52 μm	71 μm	102 μm	

Tablo 3.3. Arcam EBM Ti6Al4V tozunun mekanik özellikleri.

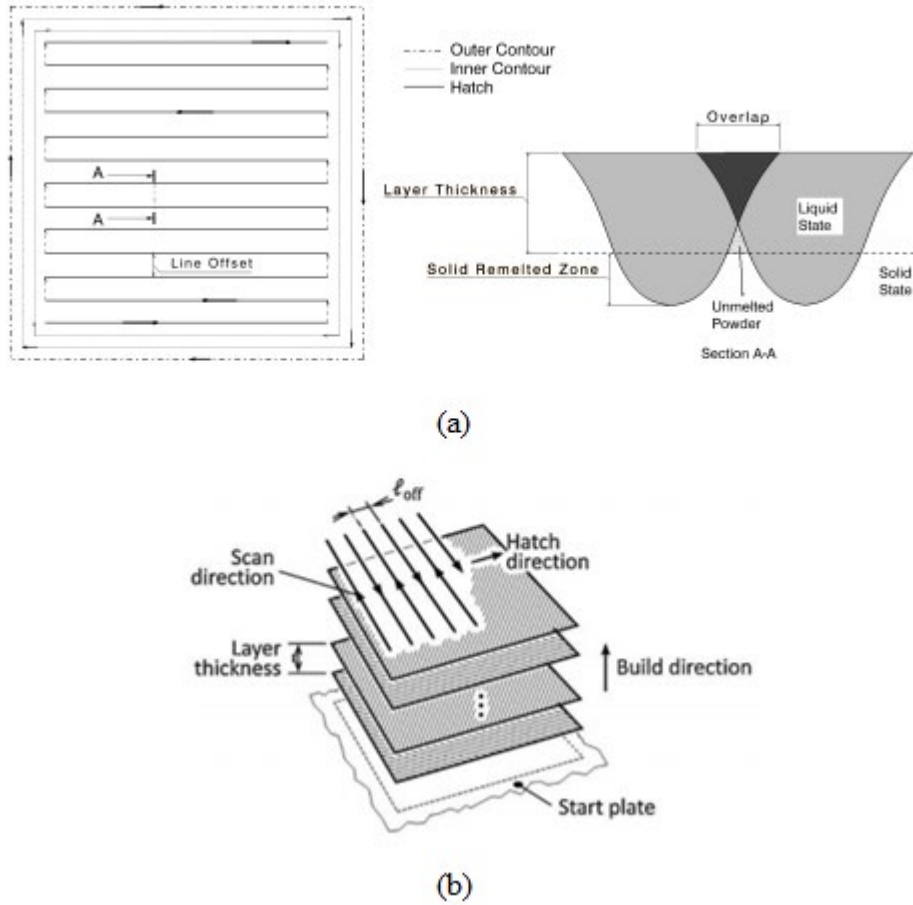
Mekanik özellikler	Akma dayanımı [MPa]	Çekme dayanımı [MPa]	Uzama [%]	Daralma [%]
Ti6Al4V	950	1020	14	40

3.2. Eklemeli Parçaların İmalatı

Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan numuneler, Arcam EBM Q20 makinesi ile ASTM E8/E8M-13a standartlarına uygun olarak Şekil 3.1' de gösterilen ölçülere göre dairesel ve yassı şekilde üretilmiştir. Parça imalatı, Z eksenı doğrultusunda ve Arcam EBM tarafından önerilen standart üretim parametrelerine uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Tarama deseni olarak yaygın bir örüntü olan, bir eksenin tarama genişliğini kademeli olarak hareket ettirdiği ve diğer eksenin oluşturulan parça boyunca sürekli olarak ileri geri süpürüldüğü tarama tekniği kullanılmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.1. ASTM E8/E8M-13a standardına göre üretilen numune boyutları (mm): (a) yassı numuneler, (b) dairesel numuneler.



Şekil 3.2. İmalata ait şematik görüntüler; (a) kullanılan tarama deseni, (b) Z eksenı doğrultusunda parça üretimi [196].

EBM tekniği kullanılarak istenilen özelliklere sahip parçalar üretmek için optimum proses parametrelerinin kullanılması son derece önemlidir. Proses parametrelerinin seçimi imalat sonrası parça özelliklerine doğrudan etki etmektedir. Örneğin; lazer gücü/yatak sıcaklığı parametrelerine bağlı olarak farklı parça özellikleri meydana gelmektedir. Genel olarak, yüksek lazer gücü/yüksek yatak sıcaklığı ile yüksek yoğunlukta parçalar üretilmektedir. Ancak bu parçalar boyutsal doğruluk ve üretim sonrası temizlikleri açısından düşük özellik sergilemektedir. Düşük lazer gücü/düşük yatak sıcaklığı ile yüksek boyutsal doğrulukta, ancak düşük yoğunluğa ve yüksek delaminasyon eğilimine sahip parçalar üretilir. Yüksek lazer gücü/düşük yatak sıcaklığı parametrelerinin kullanılması neticesinde ise artık gerilme ve çarpılma problemleri yüksek olan parçalar üretilmektedir. Bu parametrelere ek olarak, tarama deseni ve tarama stratejisinin parçadaki gerilme birikimi üzerinde önemli bir etkisinin olduğu bilinmektedir. Ayrıca bitişik malzeme hatları arasında yeterli derecede ergiyik havuzunun örtüşmesini sağlamak amacıyla uygun tarama aralığının seçimi önem arz etmektedir [75]. Bahsi geçen teorik ve deneysel bilgiler doğrultusunda, Arcam EBM tarafından Ti6Al4V malzemesi için optimize edilen proses parametreleri kullanılarak parça imalatı gerçekleştirilmiştir. İmalatta kullanılan proses parametreleri ve Arcam EBM Q20 makinesine ait teknik özellikler Tablo 3.4 ve 3.5’ te sırasıyla verilmiştir.

Tablo 3.4. Parça imalatında kullanılan proses parametreleri; (a) Ön ısıtma işlemi, (b) Ergitme işlemi.

(a)	Preheat	Focus Offset	44 mA
		Heating Focus Offset	100 mA
		Maximum Heat Time	60 s
		Square Size	144 mm
		Offset to Part	4 mm
		Max. Current	48 mA
		Preheat I	Max. Beam Current
			36 mA
			Min. Beam Current
			36 mA
			Beam Speed
			40500 mm/s
		Preheat II	Number of Repetitions
			3
			Line Offset
			0.4 mm
			Hatch Depth
			0.09 mm
		Preheat II	Max. Beam Current
			45 mA
			Min. Beam Current
			45 mA
			Beam Speed
			40500 mm/s
		Preheat II	Number of Repetitions
			3
			Line Offset
			0.4 mm
			Hatch Depth
			0.09 mm

Tablo 3.4 devam. Parça imalatında kullanılan proses parametreleri; (a) ön ısıtma işlemi, (b) ergitme işlemi.

(b)	Melt	Surface Temperature	925 °C		
		Max. Depth for Curr. Add	65 mm		
		Contours	Number of Contours	3	
			Outer Contours	Beam Speed	500 mm/s
				Max. Beam Current	9 mA
				Beam Offset	0.27 mm
				Multispot Speed	80000 mm/s
			Inner Contours	Beam Speed	550 mm/s
				Max. Beam Current	9 mA
				Beam Offset	0.18 mm
				Multispot Speed	80000 mm/s
		Hatch	Max. Beam Current	28 mA	
			Line Offset	0.22 mm	
			Hatch Depth	0.09 mm	
			Min. Current	3.5 mA	
			Scan Length Ref	45 mm	

Tablo 3.5. Arcam EBM Q20plus makinesi teknik özellikleri [197].

Teknik veri	
Boyut	2300 x 1300 x 2600 mm (WxDxH)
Ağırlık	2900 kg
Güç membaı	7 kW, 32 A, 3 x 400 V
Maksimum inşa boyutu	350 x 380 mm (Çap/Boy)
Maksimum ışın gücü	3 kW
Katot tipi	Tek kristal
Minimum ışın çapı	180 µm
Yeniden konumlandırma zamanı	10 ms
Minimum vakum basıncı	1 x 10 ⁻⁴ mbar
Standart inşa basıncı	4 x 10 ⁻³ mbar
Tüketim, inşa süreci	4 l/h

EBM ile parça üretimi, yüksek tarama hızı ve düşük ışın akımı ile gerçekleştirilen ön ısıtmayla başlamaktadır. İki aşamadan oluşan ön ısıtma işleminde, ön ısıtma-1 olarak adlandırdığımız ilk aşamada tüm yatak taranırken, ikinci aşamada (ön ısıtma-2) üretilecek parçanın konumuna, şekline ve büyüklüğüne bağlı olarak algoritma tarafından belirlenen ergitilecek olan bölgeler taranmaktadır. Ön ısıtma işleminin ardından, ergitme (tarama)

aşamasına geçilmektedir. Ergitme işlemi kontur ve dolum modu olmak üzere iki modda gerçekleştirilmektedir. Kontur modunda, belirli bir katman için parça kesitinin ana hattı taranır. Parça dış hattının tamamlanmasının ardından dolum modunda ise kesitin geri kalanı belirlenen tarama deseni kullanılarak taranır. Parçanın inşası son bulana dek katmanlar halinde bu işlem adımları tekrarlanır. Parça inşası tamamlandığında, soğutma işlemi vakum altında gerçekleşmiştir [75, 124]. Parçalar Z eksenini doğrultusunda inşa edildiğinden dolayı herhangi bir destek elemanına ihtiyaç duyulmamıştır. Ayrıca üretilen parçalar yüzey işleme gibi ikincil bir işleme tabi tutulmamıştır.

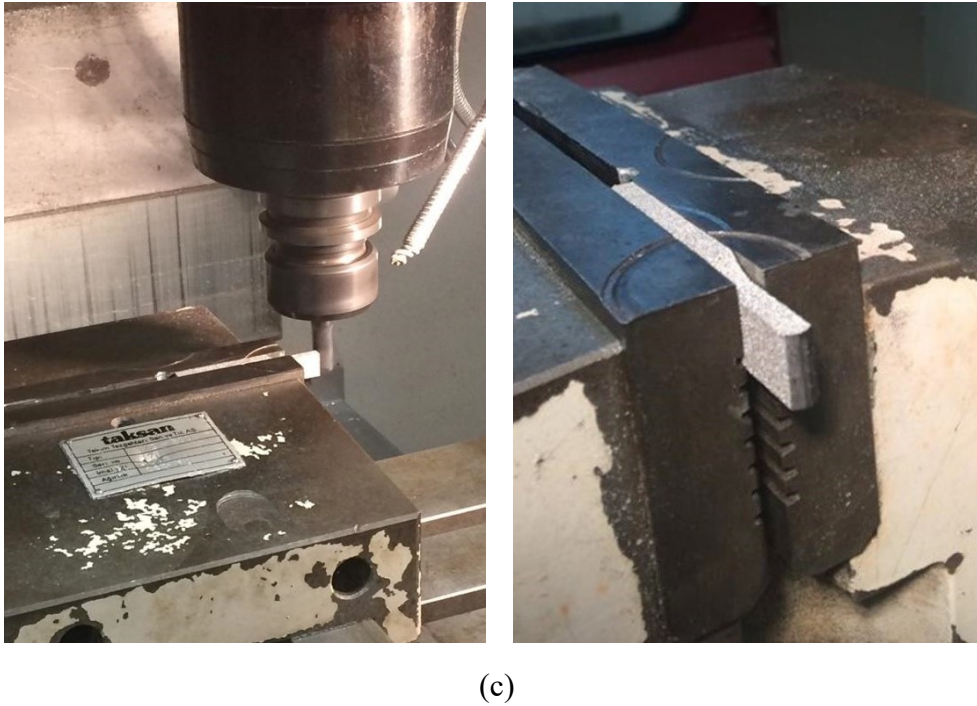
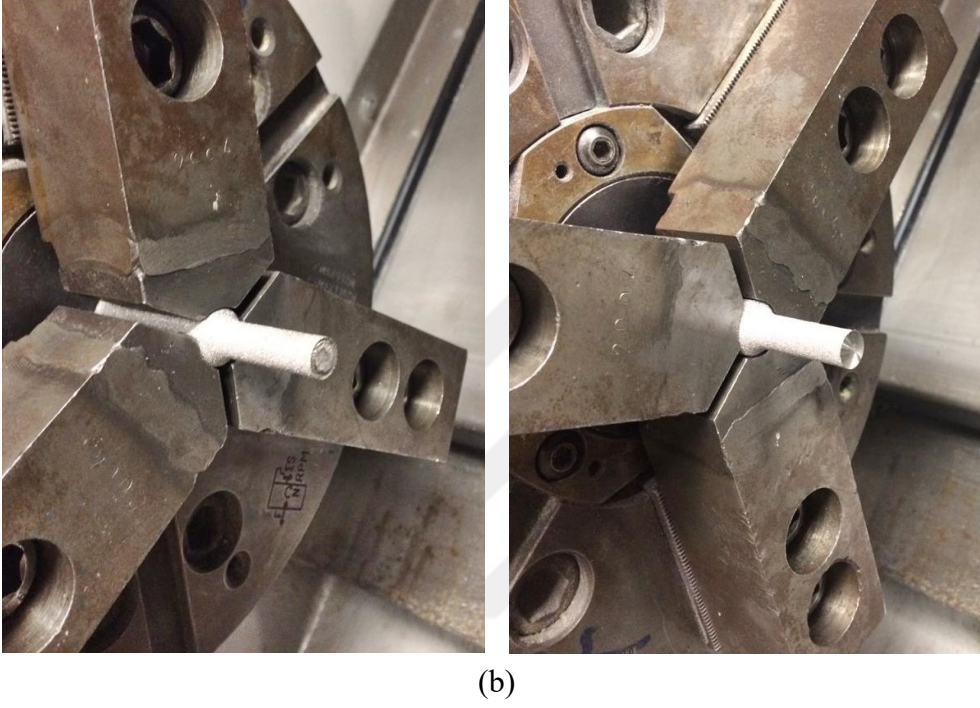
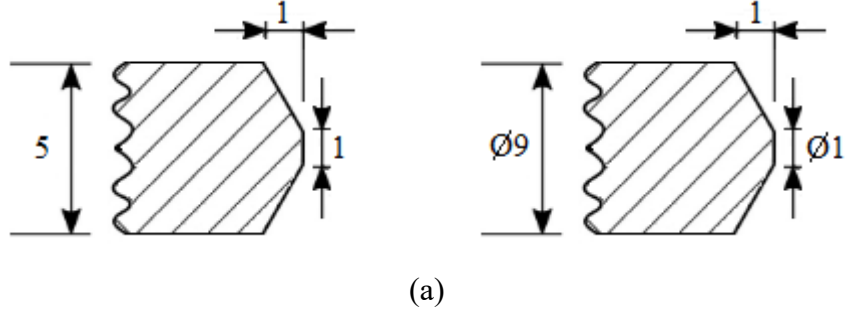
EBM’ de çıkılan yüksek sıcaklık değerleri nedeniyle artık gerilmeler oldukça azdır ve üretim sonrası gerilim giderme işlemine gerek kalmamaktadır. Üretim sonrası ısıtma işlemin parça çekme özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahip olmadığı bilinmektedir [198]. Bu nedenle, üretilen EBM Ti6Al4V numunelere herhangi bir ısıtma işlemi uygulanmamıştır.

3.3. Eklemeli Parçaların Kaynakla Birleştirilmesi

EBM tekniği ile üretimi gerçekleştirilen numuneler herhangi bir talaş kaldırma operasyonu uygulanmaksızın inşa edildiği şekliyle kaynakla birleştirilmiştir. Kaynak yöntemi olarak, literatür çalışmaları neticesinde Ti6Al4V alaşımının kaynağı için uygun olduğu belirlenen ve en çok tercih edilen TIG ve lazer ışın kaynakları kullanılmıştır.

3.3.1. Kaynak öncesi işlemler

İki iş parçasının kenarları arasındaki boşluk gözenek oluşumunu önlemek için son derece önemlidir. Bu nedenle, kaynak işleminin daha etkili ve kaliteli bir şekilde gerçekleştirilmesi amacıyla üretilen EBM Ti6Al4V numuneler Şekil 3.3’ te gösterildiği gibi çift Y kaynak ağzı formunda CNC freze ve torna tezgâhları kullanılarak işlenmiştir. Kullanılan CNC freze ve torna tezgâhları Şekil 3.4 ve 3.5’ te gösterilmiştir. Kaynak ağzı olarak iki taraftan kaynak yapılmasına uygun olan çift Y formunun seçilmesi ile kaynak eksenini parçanın tam ortasından geçmektedir. Böylece şekil değiştirmeleri asgariye indirgenerek, mukavemeti daha yüksek kaynaklar elde edilmektedir. Ayrıca numunelerin orta kısmında bırakılan öpüşme yüzeyleri ile kaynak esnasında ergiyik metalin alt kısma geçmesi önlenmekte ve kaynak parçaları bu bölgelerden birbirine ek bir dayanım sağlamaktadır (Şekil 3.6).



Şekil 3.3. EBM Ti6Al4V numunelere kaynak ağzı açma işlemi; (a) kaynak ağzı boyutları (mm), (b) CNC torna tezgâhı kullanımı, (c) CNC freze tezgâhı kullanımı.



Şekil 3.4. Johnford VMC – 550 Model CNC freze tezgâhı.



Şekil 3.5. Johnford TC 35 CNC torna tezgâhı.



(a)



(b)

Şekil 3.6. (a) Kaynak ağzı açılmış numunelerin perspektif görünüşü ve (b) kaynak ağzı açılmış numunelerin üst görünüşü.

Kaynak ağzı açma işlemi esnasında kesici takım, titanyumun bazı karakteristik özellikleri nedeniyle olumsuz yönde etkilenmekte ve takım ömrü ciddi oranda düşmektedir. Titanyum malzemesinin karakteristik özellikleri ve bu özelliklerin kesici takıma etkisinin özetlendiği Tablo 3.6' ya göre titanyumun işlenmesi için gerekli özellikleri taşıyan TiCN kaplamalı bir takım bu işlem için uygun görülmüştür [199]. Kaynak ağzı açma işleminde kullanılan makine ve parametreler Tablo 3.7-3.9' da gösterilmiştir.

Tablo 3.6. Titanyumun malzeme özellikleri ve kesici takıma etkisi [200, 201].

Titanyum malzeme özellikleri	Kesici takıma etkisi	Kesici takımdan beklenen özellik
Yüksek sürünme dayanımı	Yüksek kuvvet ve ısıların oluşması	Kızıl sertlik değerinin yüksek olması
Dar talaş/takım temas alanı	Kesme kuvveti ve ısının yoğunlaşması	Uç keskinliğinin yüksek olması
Düşük ısı iletkenlik (6,7 W/m.K)	Isının dağılmayarak yükselmesi	Isıl iletkenlik değerinin yüksek olması
Periyodik talaş oluşumu ve düşük elastisiteden kaynaklı değişken kuvvetler	Titreşim ve tırlama	Tokluk değerinin yüksek olması
Yüksek kimyasal reaktivite	Krater ve kimyasal tabanlı aşınmalar	Kimyasal kararlılığının yüksek olması

Tablo 3.7. Johnford VMC – 550 Model CNC freze tezgâhı özellikleri.

Parametreler	Değerler
Tabla çalışma alanı	1000 x 500 mm
Motor gücü	10 HP
Tabla yükleme kapasitesi	900 kg
Makine alanı	2,35 x 2,5 m
Makine ağırlığı	5500 kg
X, Y, Z hareket kapasitesi	800 mm, 500 mm, 450 mm

Tablo 3.8. Johnford TC 35 CNC torna tezgâhı özellikleri.

Parametreler	Değerler
Maksimum çevirme çapı	500 mm
Maksimum işleme çapı	350 mm
İş mili devri	30-3500 mm/dev
Motor gücü	20 HP
Ayna çapı	250 mm
Ayna delik çapı	75 mm
Yataklar arası mesafe	810 mm

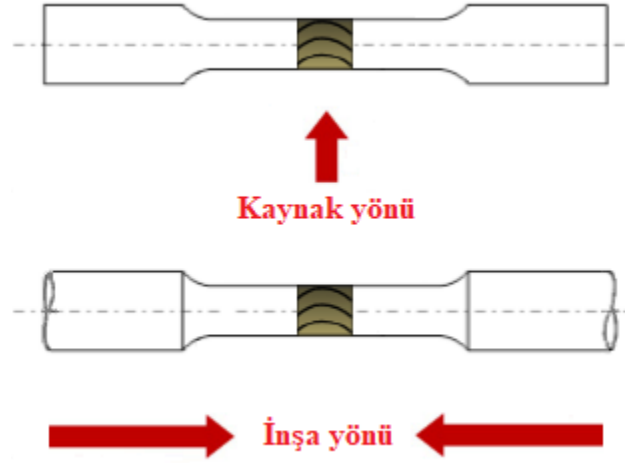
Tablo 3.9. Kaynak ağzı açma işleminde kullanılan parametreler.

Proses	Devir	İlerleme
Tornalama	500 dev/dak	0,1 mm/dev
Frezeleme	1500 dev/dak	40 mm/dak

Kaynak ağzı açılan tüm numune yüzeyleri aseton ve tel bir fırça yardımıyla kir, yağ ve oksitlerden arındırılarak, yabancı maddelerden kaynaklı gözenek ve çatlak oluşma ihtimali minimuma indirgenmiştir. Kaynak ve temizlik işlemleri arası geçen süre minimum tutularak oksidasyonun önlenmesi amaçlanmıştır. Kaynak işlemi öncesi, numunelerin asetonla ıslatılmış bir bezle temizlenmesi yaygın bir uygulama olmasına rağmen, EBM numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin yüksek olması nedeniyle çalışmamızda bundan kaçınılmıştır. Çünkü beze ait lifler numune yüzeylerinde kolayca kalarak, kaynak sonrası gözenekli bir yapı oluşmasına neden olabilecektir.

3.3.2. Kaynak işlemi

Bu adımda, kaynak ağzı açılan ve yüzeyleri yabancı maddelerden temizlenen numuneler sırasıyla lazer ışınlı ve TIG kaynak yöntemleri kullanılarak birleştirilmiştir. Parça inşa yönü ve kaynak işlem yönüne ait şematik diyagram Şekil 3.7’ de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Kaynak bağlantılarının şematik gösterimi.

Lazer kaynak işleminde kullanılan ışın çapının dar olması nedeniyle kaynak edilecek parçaların hassas bir şekilde konumlandırılması gerekmektedir. Yanlış hizalama neticesinde kaynak sonrası istenmeyen gözenek oluşumları ve yorulma ömrünü düşüren çentik meydana gelecektir [202, 203]. Bu nedenle, kaynak işlemi esnasında parçaların sabit durmasını sağlamak ve aynı doğrultuda kaynaklı birleştirmeler elde etmek amacıyla yassı şekilli numuneler köşe noktalarından lazer ve TIG kaynağı kullanılarak birbirine puntalanmıştır (Şekil 3.8). Ayrıca dairesel numunelerin kaynağı için Şekil 3.9’ da gösterilen özel bir yatak elemanı kullanılmıştır. Her iki kaynak işleminde kaynak ağzını doldurmak amacıyla ilave metal (kaynak teli) kullanılmıştır. Kullanılan ilave telin kimyasal açıdan ana malzemeye uygun olmasına dikkat edilerek DT-ER Ti 5 malzemesi ilave tel olarak tercih edilmiştir (Tablo 3.10) [204].



Şekil 3.8. Yassı numunelerin TIG kaynağı ile birbirine puntalanması.



Şekil 3.9. Dairesel numunelerin kaynağında kullanılan yatak elemanı.

Tablo 3.10. DT-ER Ti 5 kaynak teline ait özellikler.

DT-ER Ti 5		
Norm tanımlamaları	EN ISO 24034	Ti 6402
	AWS-Standardı	ER Ti 5 (Titanium Al6 V4)
	AMS-2003	4954
Kimyasal bileşimi [%]	C: 0,05 N: 0,03 Fe: 0,20 O ₂ : 0,18 H: 0,015 Al: 5,9 V: 4,0 Ti: Kalan	
Mekanik özellikler	Akma dayanımı	825 MPa
	Çekme dayanımı	890 MPa
	Uzama	%10
	Sertlik	90 HB

3.3.2.1. EBM Ti6Al4V numunelerin lazer kaynağı

EBM Ti6Al4V numunelerin lazer kaynağı ALM Serisi ALM 200 modeli mobil lazer kaynak makinesi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.10). ALM 200 kaynak makinesine ait özellikler Tablo 3.11’ de gösterilmiştir. Kaynak işlemi 0.4 mm çapında DT ER Ti5 kaynak teli kullanılarak yapılmıştır. Lazer kaynak işlemi boyunca yeterli soğutma sağlanana kadar kaynak bölgesinin alt ve üst yüzeylerinin oksidasyona uğramasını önlemek amacıyla koruyucu gaz olarak 12 l/dak’lık gaz akışına sahip argon gazı kullanılmıştır. Bu noktada koruyucu gaz kullanımı ve nozul kurulumu son derece önemlidir. Numune yüzeylerinde türbülans oluşumundan kaçınılmalıdır. Kaynak işleminde kullanılan proses parametreleri daha önceki çalışmalardan derlenerek elde edilen optimum işlem parametreleridir. Tablo 3.12’ de lazer kaynak işlemine ait proses parametreleri verilmiştir.



Şekil 3.10. ALM 200 mobil lazer kaynak makinesi [205].

Tablo 3.11. ALM 200 mobil lazer kaynak makinesi özellikleri [205].

Parametreler	Değerler
Lazer tipi/dalga boyu	Nd: YAG, 1064 nm
Ortalama güç	200 W
Tepe darbe gücü	9 kW
Darbe enerjisi	90 J
Atış süresi	0,5-20 ms

Tablo 3.12. Lazer kaynak parametreleri.

Parametreler	Değerler
Kaynak gücü	2300 W
Kaynak hızı	600 mm/dak
Darbe frekansı	16 Hz
Darbe enerjisi	9,5 J
Darbe süresi	4,9 ms
Odak pozisyonu	+ 1 mm
Gaz basıncı	1,5 bar
Gaz akışı	12 l/dak
Isı girişi ^(3.1)	0,018 kJ/mm

Lazer kaynağı için ısı girişi Eşitlik 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır;

$$E = (P \times 60)/(v \times 1000) \quad (3.1)$$

E: ısı girişi (kJ/mm), P: ortalama güç (W), v: kaynak hızı (mm/dak)

P (W) = Maksimum güç (kW) x Darbe süresi (ms) x Frekans (Hz)

3.3.2.2. EBM Ti6Al4V numunelerin TIG kaynağı

EBM Ti6Al4V numunelerin TIG kaynağı Dynasty® 280 DX (CPS) International kaynak makinesi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.11). Dynasty® 280 DX (CPS) International kaynak makinesine ait özellikler Tablo 3.13’ te gösterilmiştir. Kaynak işlemi doğru akım negatif elektrot modunda ve 1.0 mm çapında DT ER Ti5 kaynak teli kullanılarak iki taraftan yapılmıştır. TIG kaynak işlemi boyunca kaynak bölgesinin alt ve üst yüzeylerinin oksidasyona uğramasını önlemek amacıyla koruyucu gaz olarak 10 l/dak’ lık gaz akışına sahip argon gazı kullanılmıştır. Koruyucu gaz akışını iyileştirmek için kaynak torcuna gaz merceği takılmıştır. Kaynak işleminde kullanılan proses parametreleri daha önceki çalışmalardan derlenerek elde edilen optimum işlem parametreleridir. Tablo 3.14’ te TIG kaynak işlemine ait proses parametreleri verilmiştir.



Şekil 3.11. Dynasty® 280 DX (CPS) International kaynak makinesi.

Tablo 3.13. Dynasty® 280 DX (CPS) International kaynak makinesi özellikleri [206].

Parametreler	Değerler
Giriş gerilimi	208-575 V
Anma karbon çapı	3/16 in (4.8 mm)
Giriş fazı	1 ve 3
Giriş frekansı	50/60 Hz
Akım tipi	AC/DC
Min-max amper gücü	1-280 A

Tablo 3.14. TIG kaynak parametreleri.

Parametreler	Değerler
Kaynak akımı	125 A
Ark gerilimi	10 V
Kaynak hızı	60 mm/dak
Gaz akışı	10 l/dak
Isı girişi ^(3.2)	1,25 kJ/mm

TIG kaynağı için ısı girişi Eşitlik 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır;

$$E = (U \times I \times 60)/(v \times 1000) \quad (3.2)$$

E: ısı girişi (kJ/mm), U: ark gerilimi (V), I: kaynak akımı (A), v: kaynak hızı (mm/dak).

3.3.3. Kaynak sonrası işlemler

Kaynak işlemi sonrası oluşan ve cüruf olarak adlandırılan kaynak artıklarının temizlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla parçaların kaynak bölgeleri çelik tel bir fırça yardımıyla temizlenmiştir.

3.4. Kaynak Bağlantılarının Tahratsız Muayenesi

Tahratsız muayene, malzemenin fiziki yapısını ve kullanılabilirliğini bozmadan içyapısı ve yüzeyinde bulunan hata ve süreksizliklerin tespit edilmesi işlemidir. Muayene işlemi, malzemenin herhangi bir numune alma ihtiyacı olmaksızın, doğrudan iş parçası üzerinden yapılmaktadır. Tahratsız muayene işlemi kaynak bağlantılarının yüzey ve içyapılarında bulunabilecek çatlak, porozite ve diğer süreksizliklerin tespitinde önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle çalışmada elde edilen kaynaklı bağlantıların yüzey ve içyapıları mekanik testler öncesi görsel ve radyografik muayene yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Eklemeli imal edilen numune yüzeylerinin pürüzlü olması nedeniyle yüzey hatalarının tespitinde oldukça sık kullanılan sıvı penetrant muayene yöntemi ise çalışmada uygulanamamıştır. Pürüzlü numune yüzeyleri fazla sıvı penetrantın yüzeyden uzaklaştırılmasına engel olmaktadır.

3.4.1. Görsel muayene

Görsel muayene, bir kaynak yüzeyindeki süreksizliklerin ve yapısal bozuklukların çıplak gözle veya optik yardımcı görüntüleyiciler kullanılarak tespit edilmesidir. Diğer tahratsız muayene işlemleri öncesi uygulanarak, muayene güvenilirliğini artırmaktadır.

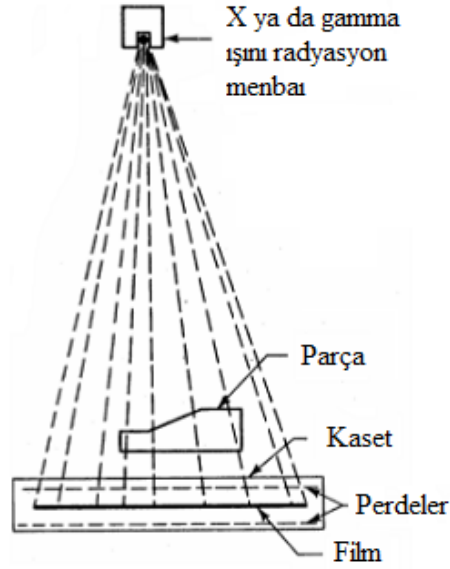
Çalışmada, kaynaklı bağlantı yüzeyleri Leica DM2700 M optik mikroskopi (Şekil 3.12) kullanılarak kaynak dikiş genişliği, korozyon, kirlilik, renk değişimleri ve imalat kusurları açısından analiz edilmiştir. Muayene işlemi TS EN ISO 17637 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Standarda göre muayene edilecek yüzey ile gözlem noktası arasındaki açı 30° den az olmamalıdır. Muayene yüzeyinde aydınlanma şiddeti en az 350 lx olmalıdır. Optimum ışık yönü, açısı ve seviyesinin kullanılması gerekmektedir. Tespit edilen kusurlar TS EN ISO 13919-1 ve TS EN ISO 5817 standartları dikkate alınarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.12. Leica DM2700 M optik mikroskopi.

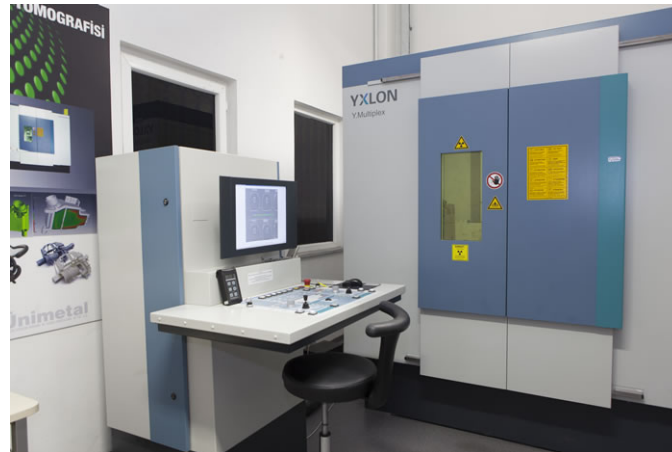
3.4.2. Radyografik muayene

Endüstriyel radyografi, X ya da gamma ışınları gibi nüfuz edici radyasyonun kullanılarak malzeme içyapılarının analiz edildiği bir tahribatsız muayene yöntemidir. İşlemin şematik görüntüsü Şekil 3.13’ te gösterilmiştir. Malzeme içerisinden geçen radyasyonun bir bölümü malzeme kalınlığı, yoğunluğu ve içyapı tabiatına bağlı olarak emilir veya değişir. Bu değişimler film üzerinde kaydedilerek muayene işlemi sonlanır. Bir fotoğrafın negatifinin benzeri olan radyograf üzerinde daha koyu bölgeler, parçanın kolaylıkla nüfuz edilen bölgelerini, daha açık bölgeler ise parçanın daha kalın veya daha yoğun kısımlarını ifade etmektedir [136].



Şekil 3.13. Radyograf poz tertibi [136].

Çalışmada, numunelerin kaynak bölgeleri YXLON Y.Multiplex CT 225 kV X-Ray cihazı (Şekil 3.14) kullanılarak porozite, yetersiz nüfuziyet, eksik ergime, tungsten veya metalik olmayan kalıntılar açısından analiz edilmiştir. Testlerde kullanılan parametreler sırasıyla; 0.4 mm odak çapı, 160 kV tüp gerilimi, 5 mA tüp akımı, 400 ms bütünleşik zaman ve 900 mm odak uzaklığı şeklindedir. Radyografik muayene işlemi TS EN ISO 17636-1 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Standarda göre hataların tespitinin doğru bir şekilde yapılabilmesi için yüzeyin temiz olması gerekmektedir. Bu nedenle kaynak yüzeyleri yabancı maddelerden temizlenmiştir. Muayene sonrası numunelerin ayırt edilmesini sağlayan semboller sonuçlarda görünecek şekilde yapıştırılmıştır. Tespit edilen kusurlar TS EN ISO 10675-1 standardı dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Kaynak kalitesi seviyesine bağlı olarak, TS EN ISO 17636-1'e göre teknik A veya B kullanılmıştır (Tablo 3.15).



Şekil 3.14. YXLON Y.Multiplex CT 225 kV X-Ray cihazı.

Tablo 3.15. Radyografik test teknikleri ve kabul seviyeleri.

Kalite seviyeleri (ISO 5817)	Test teknikleri (ISO 17636-1)	Kabul seviyeleri (ISO 10675-1)
B	B (gelişmiş teknik)	1
C	B ^a	2
D	A (temel teknik)	3

a: çevresel kaynak testi için minimum maruz kalma sayısı, A sınıfı gereksinimleri

3.5. Kaynak Bağlantılarının Tahribatlı Muayenesi

Tahribatsız muayenenin aksine, muayene edilen malzemenin tekrar kullanılmasını kısmen veya tamamen yok eden muayene yöntemine tahribatlı muayene adı verilir. Malzemeye hasar verilerek gerçekleştirilen bu muayene yöntemi genel olarak çekme, basma, burulma, eğme, yorulma ve mikro yapı analiz tekniklerinden oluşmaktadır. Tahribatsız muayene ile elde edilemeyen malzeme mukavemeti, hasarlanma yükü ve geri kalan işletme ömrü gibi önemli veriler tahribatlı muayene yöntemleri kullanılarak elde edilmektedir. Bu nedenle çalışmada yer alan kaynak bağlantılarının yapısal analizi, mikro yapı ve mekanik özellikleri çeşitli tahribatlı muayene yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Bu yöntemler sırasıyla kaynak kesit analizi, mikro yapı incelemesi, çekme testi şeklindedir.

3.5.1. Kaynak bağlantılarının yapısal analizi

Kaynak bağlantılarının kesitleri alınmıştır. Makro bölümler en az 10 mm etkilennememiş ana metal içermektedir. Amaç, kaynaklı birleştirmelerin nüfuziyet yeterliliğinin ve kaynak dikiş geometrisinin belirlenmesidir. Ayrıca süreksizlikler de (çatlak, porozite, ergime noksanlığı) incelenmiştir. Muayene örnekleri kaynak metali, füzyon hattı ve ısıdan etkilenen bölgeyi açıkça ortaya çıkarmak için bir tarafa doğru dağlanmıştır. Muayene işlemi TS EN ISO 17639 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. İncelemelerde, Leica DM2700 M optik mikroskopi ve ZEISS Sigma 300 taramalı elektron mikroskopi (Şekil 3.15) kullanılmıştır.



Şekil 3.15. ZEISS Sigma 300 taramalı elektron mikroskobu.

Yüzey pürüzlülüğü parçaların yorulma davranışları üzerinde oldukça etkili olmaktadır. Yüksek yüzey pürüzlülüğü parçalara ait mikro yapısal etkileri gizleyerek güçlü yorgunluk başlatma yerlerinin oluşmasına neden olmaktadır ve mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle çalışmada kullanılan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri TS EN ISO 16610-21 standardına göre incelenmiştir. Ölçümler Mahr MarSurfM300 model ölçüm cihazıyla yapılmıştır (Şekil 3.16). Yüzeyin aritmetik ortalama pürüzlülük değeri olan R_a kullanılmıştır.



Şekil 3.16. Mahr MarSurfM300 model ölçüm cihazı.

3.5.2. Metalografik incelemeler

Kaynaklı numunelerin mikro yapı özelliklerini elde etmek amacıyla yassı ve dairesel formlu parçalardan ASTM E3 standardına göre üçer adet kesit örneği hazırlanmıştır. Kesit örnekleri siyah fenolik kullanılarak Metkon Ecopress 50 Mounting Press (Şekil 3.17) cihazında bakalite alınmıştır. Bakalit işleminin ardından Buehler Beta Grinder-Polisher

(Şekil 3.18) cihazıyla 1 mikrona kadar cilalanarak, 97 mL H₂O, 3 mL HNO₃ ve 1 mL HF içeren Kroll çözeltisi ile dağlanmış. Dağlanan numuneler, kaynak sonrası meydana gelen mikro yapı ve faz değişikliklerini ortaya çıkarmak için Leica DM2700 M optik mikroskopu altında incelenmiştir.



Şekil 3.17. Metkon Ecopress 50 Mounting Press cihazı.

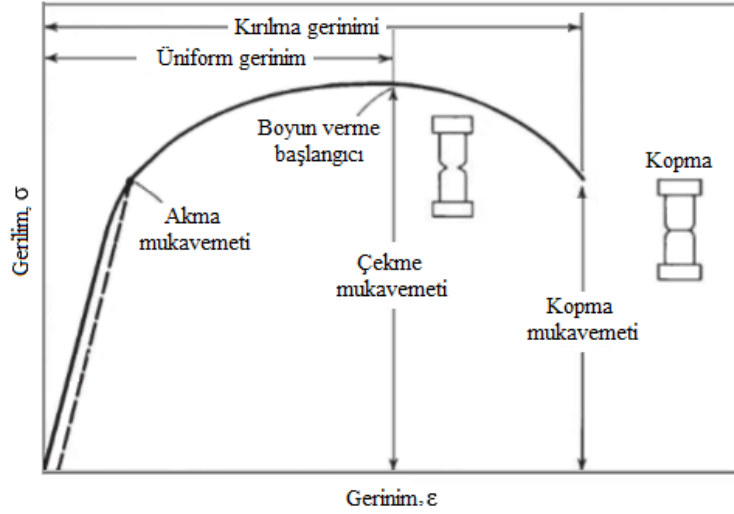


Şekil 3.18. Buehler Beta Grinder-Polisher cihazı.

3.5.3. Mekanik karakterizasyon

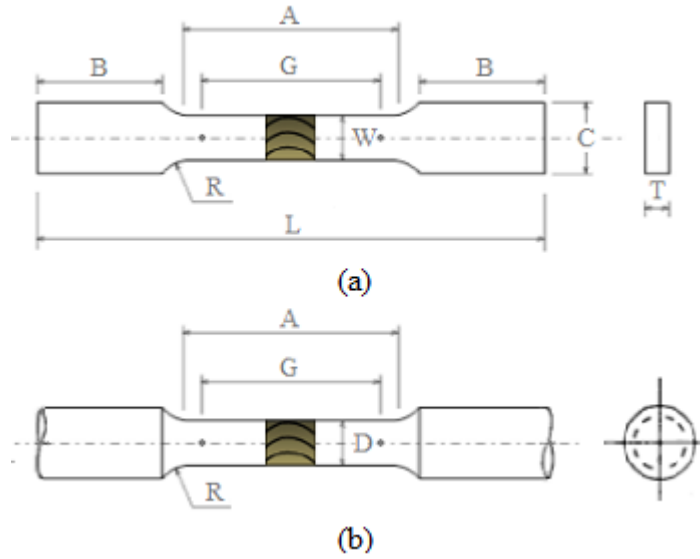
Çekme testi, malzemenin mukavemeti hakkında temel bilgi elde etmek için yaygın olarak kullanılan bir tahribatlı muayene yöntemidir. Bir test numunesi artan bir yüke maruz kalır ve bu esnada uzaması gözlenir. Bu, test numunesi kopana dek devam eder. Yük uzama ölçümlerine dayanarak mühendislik gerilim-gerinin eğrisi oluşturulur ve bu eğriden akma

mukavemeti, çekme mukavemeti ve süneklik özellikleri değerlendirilir [207]. Şekil 3.19’da, mühendislik gerilim-gerinim eğrisinin prensibi gösterilmektedir.



Şekil 3.19. Mühendislik gerilim-gerinim eğrisinin prensibi [207].

Çekme testleri, ASTM E8/E8M-13a standardına göre oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.20). Ölçümler, ekstensometre ile donatılmış Instron 8802 hidrolik test makinesi kullanılarak 0.5 mm/dak yükleme oranı ile yapılmıştır. Çekme testinin ardından, kırılma mekanizmasını incelemek amacıyla numunelerin kırılma yüzeyleri bir ultrasonik temizleyici kullanılarak temizlenmiştir. Hazırlanan yüzeyler ZEISS Sigma 300 taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir.



Şekil 3.20. ASTM E8/E8M-13a standardına göre çekme testi numunesinin boyutları (mm): (a) Yassı numuneler için $G = 50$, $A = 57$ (min), $W = 12.5$, $B = 50$ (min), $C = 20$, $L = 200$ (min), $R = 12.5$ (min), $T = 5$, (b) Dairesel numuneler için $G = 45$, $A = 54$ (min), $D = 9$, $R = 8$ (min).

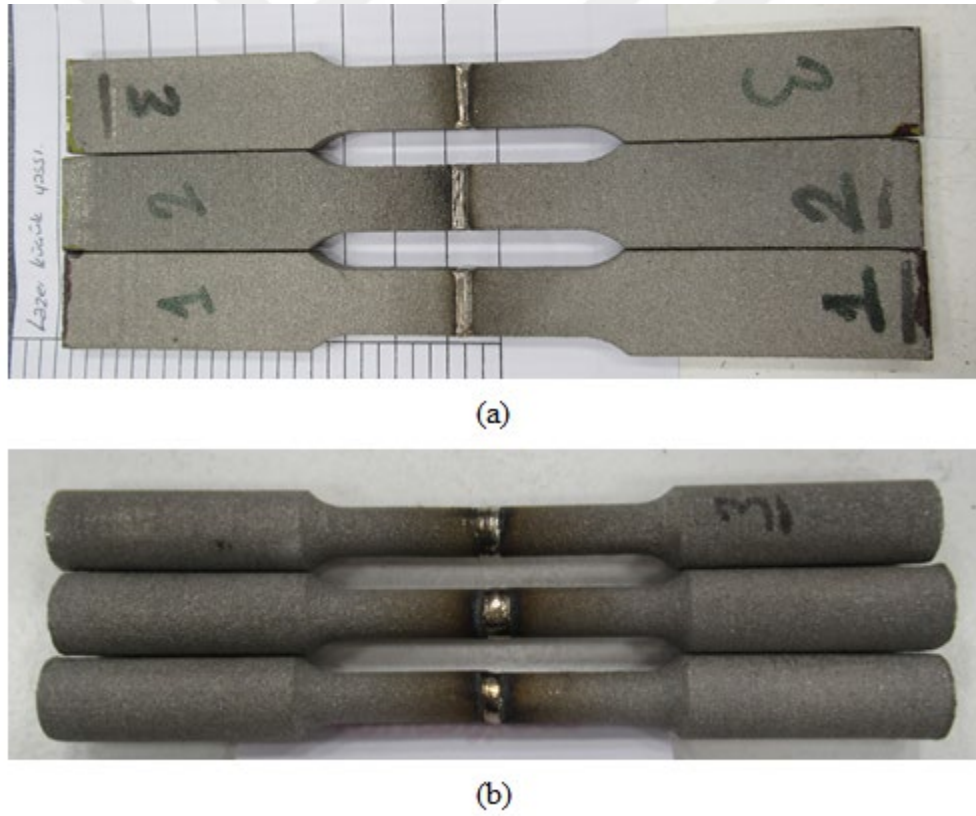
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tezin bu bölümü, lazer ve TIG kaynaklı EBM Ti6Al4V parçalara uygulanan tahribatlı ve tahribatsız muayene sonuçlarını içermektedir. Elde edilen test ve muayene sonuçları üç ayrı bölümde incelenmiştir. Bu alt bölümler sırasıyla; kaynak bağlantılarının değerlendirilmesi, mikro yapısal değerlendirme ve mekanik özelliklerin analizi şeklindedir.

4.1. Kaynak Bağlantılarının Değerlendirilmesi

4.1.1. Kaynak yüzey durumu

Şekil 4.1 ve 4.2’ de lazer ve TIG kaynaklı numune görüntüleri yer almaktadır. Kaynaklı numune yüzeyleri optik mikroskop altında incelenmiştir (Şekil 4.3-4.6).



Şekil 4.1. Lazer kaynaklı numune görüntüleri: (a) yassı, (b) dairesel.



(a)



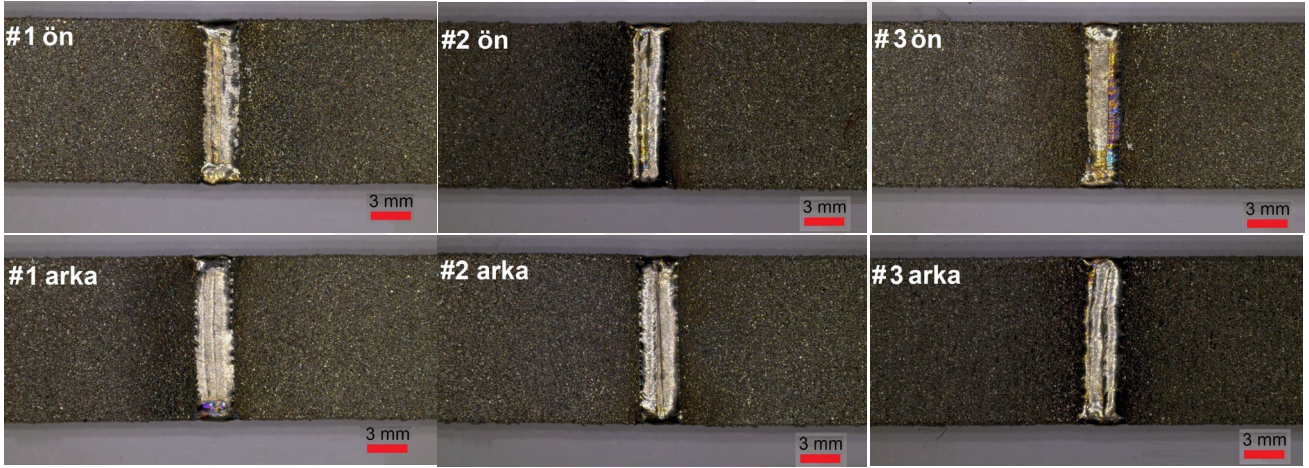
(b)

Şekil 4.2. TIG kaynaklı numune görüntüleri: (a) yassı, (b) dairesel.

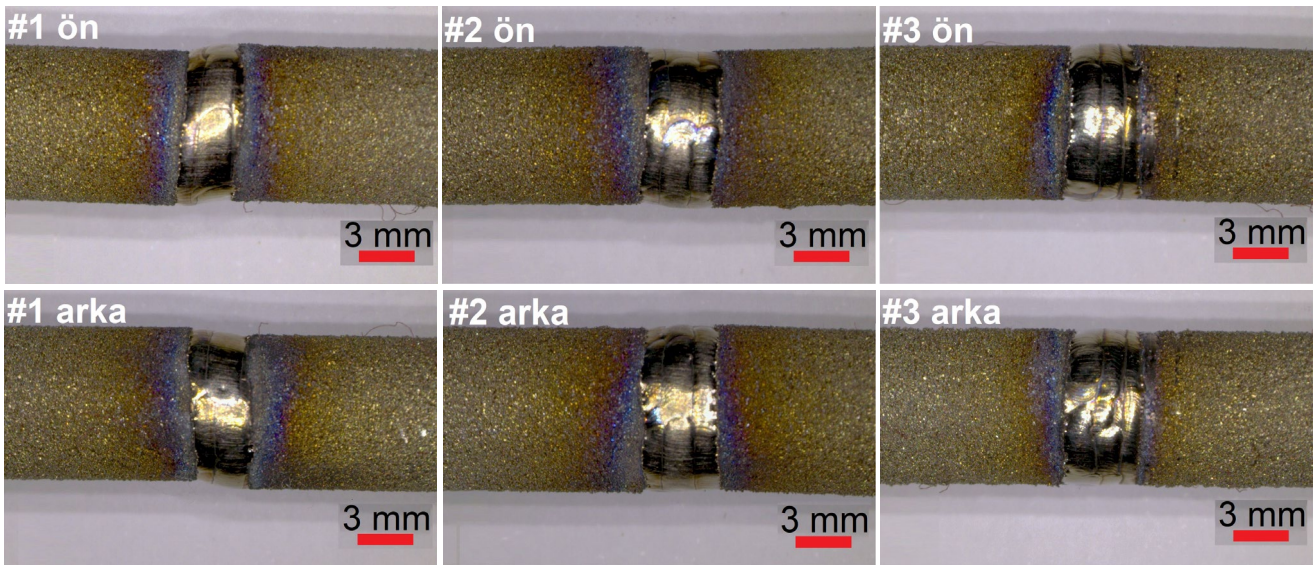
Kaynakların görsel muayenesi, her iki kaynak yöntemi sonrası parça ön ve arka yüzeylerine herhangi bir kaynak malzemesinin sıçramadığını göstermektedir. Lazer kaynak yüzeyinin hem ön hem de arka yüzeylerinde çatlak benzeri merkez çizgilerine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca lazer kaynaklı numunelerin kaynak bölgesi etrafında küçük bir renk değişimi meydana gelirken, TIG kaynaklı numunelerin kaynak bölgesi etrafındaki renk değişimi daha belirgindir. Bu durum, lazer kaynağının TIG yöntemine kıyasla belirli bir bölgeye odaklanabilme kabiliyetinin yüksek ve ısı girişinin daha düşük olması ile açıklanabilir.

Kaynaklı numunelerde görülen renk değişimi parça yüzeyinde akımın fazla olduğunu ve bu bölgelerden yoğun ısı geçişini göstermektedir. Ayrıca, kaynak yüzeyinde ve kaynağa bitişik metalde görülen renk değişimleri, oksijen varlığının bir göstergesidir ve kaynak işleminde

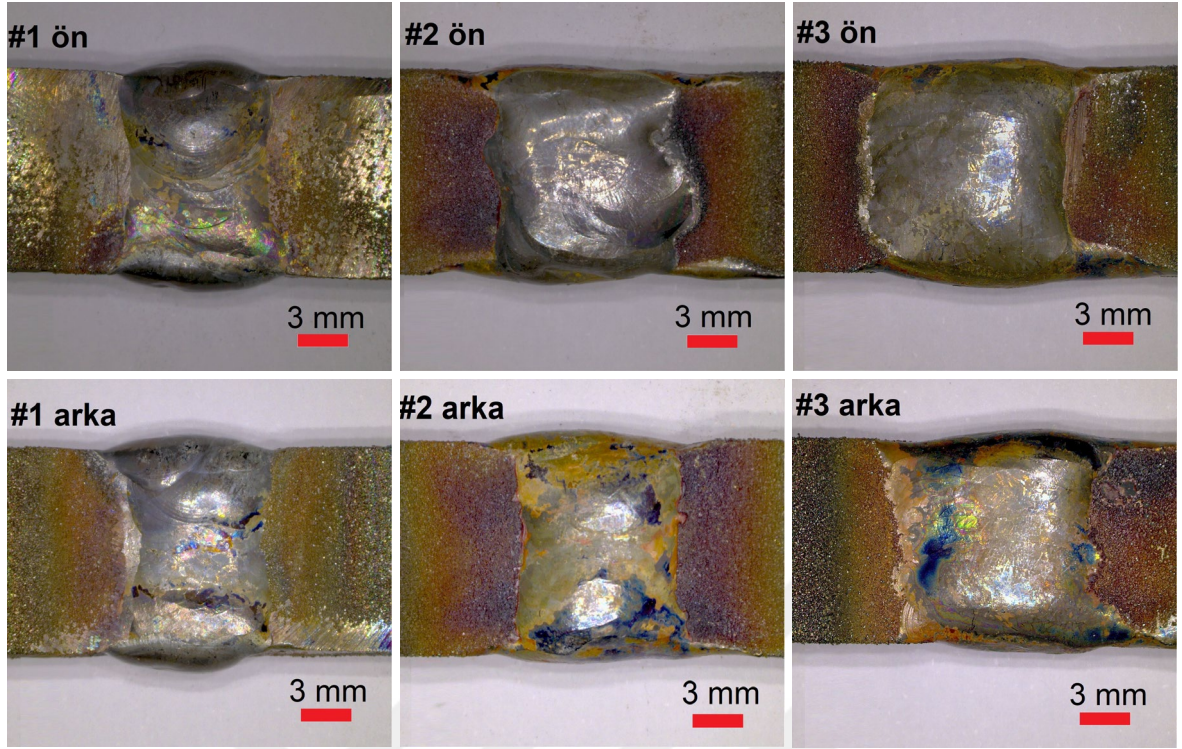
kullanılan koruyucu gazın yeterliliği hakkında bilgi vermektedir [208, 209] . Bu nedenle, çalışmadaki lazer ve TIG kaynaklı numune yüzeylerinde görülen altın sarısı ve parlak mavi bölgeler, numunelerin atmosferik gazlara karşı yetersiz korunduğunu açıklamaktadır. Titanyum ve alaşımlarının kaynak sonrası renk değişimlerine yönelik belirli bir standart bulunmamaktadır. Parçalarda görülen küçük renk değişimlerinin kaynak metalürjik özelliklerine etkisini anlayabilmek amacıyla Sefer tarafından bir çalışma gerçekleştirilmiştir [210]. Çalışmada kaynak kesiti, titanyum alaşımlarının mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyen, sert ve kırılgan bir katman olan α durumu açısından incelenmiştir. Çalışma neticesinde bu değişimlerin metalürjik özellikler üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı görülmüştür.



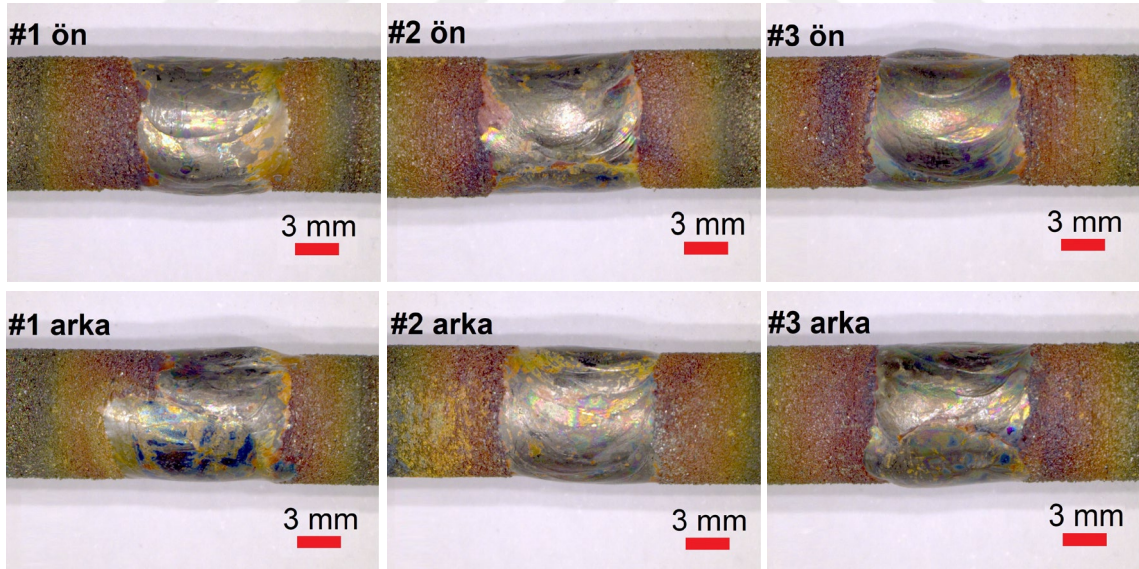
Şekil 4.3. LBW yassı numunelerin optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 4.4. LBW dairesel numunelerin optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 4.5. TIG yassı numunelerin optik mikroskop görüntüleri.



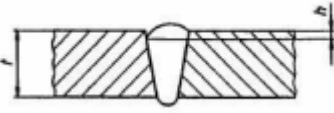
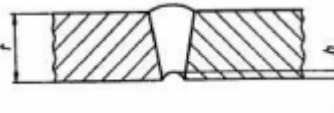
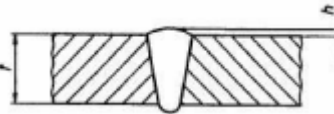
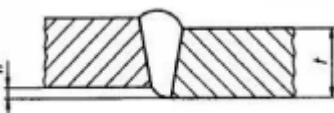
Şekil 4.6. TIG dairesel numunelerin optik mikroskop görüntüleri.

LBW ve TIG kaynaklı numunelerin kaynak dikişleri incelendiğinde, LBW numunelerin kaynak dikişinin TIG numunelere göre çok daha dar olduğu görülmektedir. Lazer kaynaklı yassı ve dairesel numuneler için ortalama kaynak dikiş genişlikleri sırasıyla 2,4 mm ve 3,4 mm iken, TIG kaynaklı yassı ve dairesel numuneler için ortalama kaynak dikiş genişlikleri

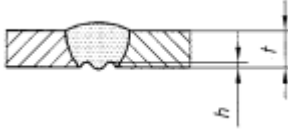
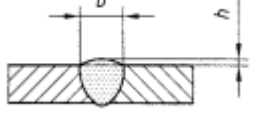
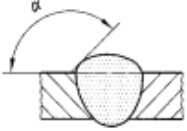
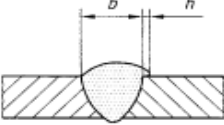
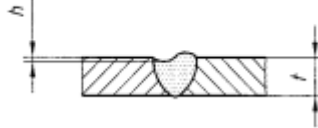
9,4 mm ve 9,1 mm' dir. Bu sonuç, lazer ışın kaynağında ısı kaynağı olarak birim alan başına oldukça yüksek güç yoğunluğu sağlayan odaklanmış lazer ışınlarının kullanımından ve ısı girişinin daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Farklı ısı girişleri ile gerçekleştirilen eklemeli parçaların lazer kaynağı sonrası meydana gelen kaynak dikiş genişlikleri bu sonucu destekler niteliktedir. En düşük ısı girişi ile yapılan lazer kaynağı sonrası en dar kaynak dikişi elde edilmiştir [184]. Ayrıca geleneksel Ti6Al4V numunelerin TIG ve lazer kaynakları sonrası oluşan kaynak dikiş genişlikleri de çalışmamıza benzer sonuçlar içermektedir [149, 153]. Dar kaynak dikişinin ise geleneksel tekniklere kıyasla daha hızlı katılaşmaya neden olduğu bildirilmiştir [140].

TIG kaynaklı numunenin yüzeyinde dalgalı oluklar ve fazla kaynak metali görülmektedir. Bununla birlikte, lazer kaynaklı numune düzgün ve homojen bir yüzeye sahiptir. Tablo 4.1 ve 4.2' de lazer ve TIG kaynaklı yassı numuneler TS EN ISO 5817 ve TS EN ISO 13919-1 standartlarına göre yüzey durumları açısından incelenmiştir. Lazer kaynaklı yassı numunelerin hiçbiri çatlak, alt kesme, ergime noksanlığı, çekme oluğu, aşırı kaynak metali, yanlış hizalama ve sıçrıntı gibi kaynak kusurlarını içermemektedir. Bu nedenle TS EN ISO 13919-1 seviye B standart gereksinimlerini yüzey kalitesi açısından karşılamaktadır. TIG kaynaklı yassı numunelerde uç krater oluğu, aşırı kaynak metali, binme/taşma ve yanlış kaynak kenarı gibi yüzey kusurları meydana gelmiştir. Bu nedenle TS EN ISO 5817 seviye B ve C standart gereksinimlerini karşılayamamaktadır. TIG yassı numuneler en düşük kabul seviyesi olan D seviyesi için uygundur. Lazer kaynaklı dairesel numunelerde görülen eksenel kaçıklık ve alt kesme neticesinde TS EN ISO 13919-1 seviye B standardı sağlanamamıştır. TIG kaynaklı dairesel numunelerde lazer kaynaklı dairesel numunelere benzer şekilde en üst kabul seviyesi olan TS EN ISO 5814 seviye B' yi karşılayamamaktadır. TIG kaynaklı dairesel numunelerde meydana gelen eksenel kaçıklık, aşırı kaynak metali ve alt kesme gibi yüzey kusurları bunu açıklamaktadır. Lazer ve TIG kaynaklı dairesel numunelerin her ikisi de seviye D için gerekli şartları sağlamaktadır.

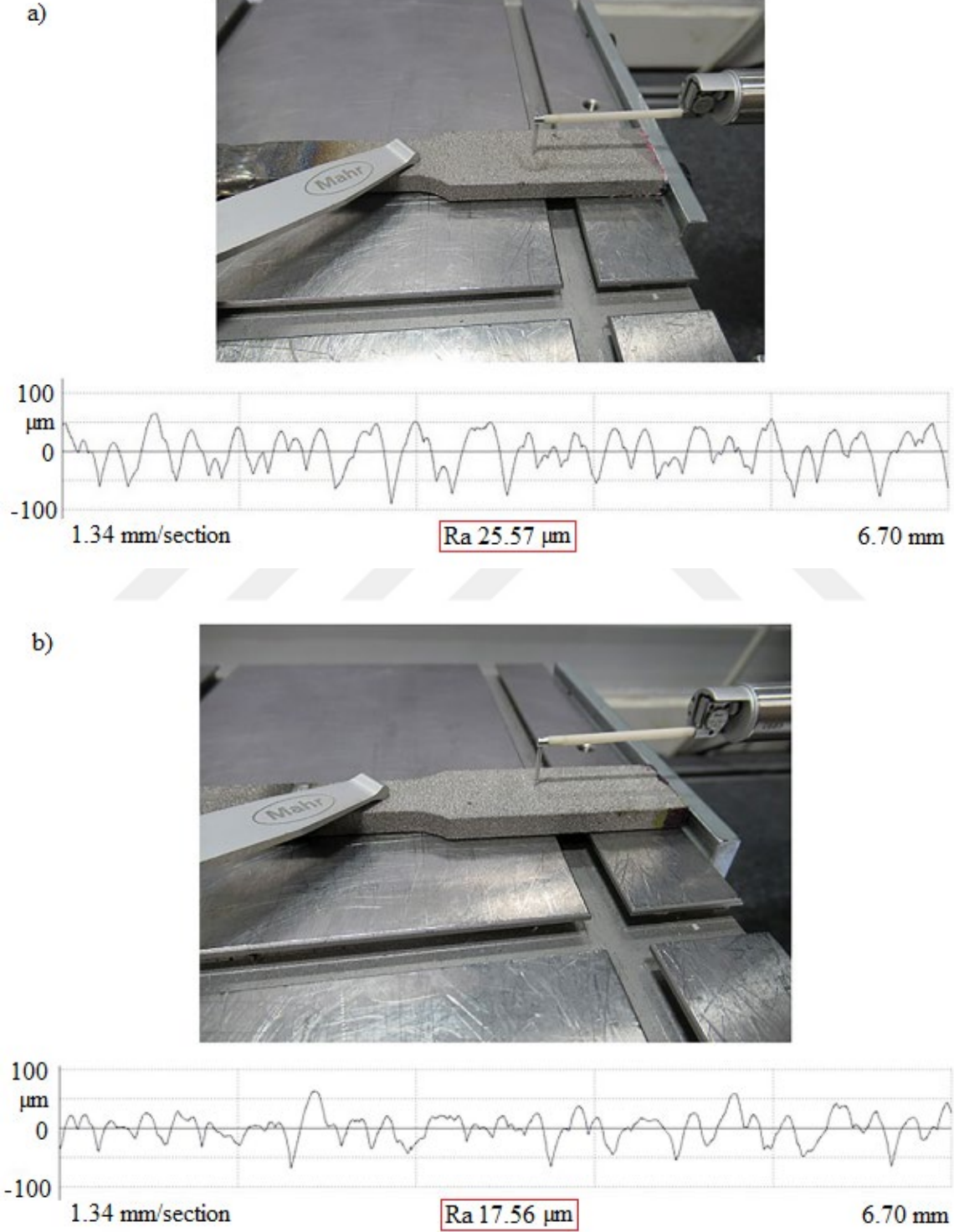
Tablo 4.1. LBW yassı numunelerin TS EN ISO 13919-1 standardına göre yüzey kusurları açısından incelenmesi.

Kusur tanıtımı (ISO 6520-1)	Kaynak durumu	Kusur sınırları	Kalite seviyeleri		
			D	C	B
Çatlak	Yok	D, C, B: müsaade edilmez	✓	✓	✓
Krater çatlağı	Yok	D: bölgesel müsaade edilir C, B: müsaade edilmez	✓	✓	✓
Alt kesme	 $t = 5 \text{ mm}, h_{\max} = 0.2 \text{ mm}$	D: $h \leq 0,15t$, max. 1 mm C: $h \leq 0,1t$, max. 0,5 mm B: $h \leq 0,05t$, max. 0,5 mm	✓	✓	✓
Ergime noksanlığı	Yok	D: $h \leq 0,25t$, max. 1 mm C, B: müsaade edilmez	✓	✓	✓
Çekme oluğu	 Yok	D: $h \leq 0,3t$, max. 1 mm C: $h \leq 0,2t$, max. 0,5 mm B: $h \leq 0,1t$, max. 0,5 mm	✓	✓	✓
Aşırı kaynak metali	 $t = 5 \text{ mm}, h_{\max} = 0.7 \text{ mm}$	D: $h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,3t$, max. 5 mm C: $h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,2t$, max. 5 mm B: $h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,15t$, max. 5 mm	✓	✓	✓
Lineer yanlış hizalama	 Yok	D: $h \leq 0,25t$, max. 3 mm C: $h \leq 0,15t$, max. 2 mm B: $h \leq 0,1t$, max. 2 mm	✓	✓	✓
Yetersiz doldurulmuş kaynak ağzı	 Yok	D: $h \leq 0,3t$ max. 1 mm C: $h \leq 0,2t$ max. 0,5 mm B: $h \leq 0,1t$ max. 0,5 mm	✓	✓	✓
Sıçrıntı	Yok	Uygulamaya bağlı kabul	✓	✓	✓

Tablo 4.2. TIG yassı numunelerin TS EN ISO 5817 standardına göre yüzey kusurları açısından incelenmesi.

Kusur tanıtımı (ISO 6520-1)	Kaynak durumu	Kusur sınırları	Kalite seviyeleri		
			D	C	B
Çatlak	Yok	D, C, B: müsaade edilmez	✓	✓	✓
Krater çatlağı	Yok	D, C, B: müsaade edilmez	✓	✓	✓
Uç krater oluğu	 $t = 5 \text{ mm}, h_{\max} = 1 \text{ mm}$	D: $h \leq 0,2t$, max. 2 mm C: $h \leq 0,1t$, max. 1 mm B: Müsaade edilmez	✓	X	X
Ergime noksanlığı	Yok	D, C, B: müsaade edilmez	✓	✓	✓
Çekme oluğu	 $t = 5 \text{ mm}, h_{\max} = 0,1 \text{ mm}$	D: $h \leq 0,2t$, max. 2 mm C: $h \leq 0,1t$, max. 1 mm B: $h \leq 0,05t$, max. 0,5 mm	✓	✓	✓
Aşırı kaynak metali	 $b = 9-12 \text{ mm}, h_{\max} = 2 \text{ mm}$	D: $h \leq 1 \text{ mm} + 0,25b$, max. 10mm C: $h \leq 1 \text{ mm} + 0,15b$, max. 7 mm B: $h \leq 1 \text{ mm} + 0,1b$, max. 5 mm	✓	✓	X
Yanlış kaynak kenarı	 $\alpha_{\max} = 45^\circ$	D: $\alpha \geq 90^\circ$ C: $\alpha \geq 110^\circ$ B: $\alpha \geq 150^\circ$	✓	✓	X
Binme/taşma	 $b = 9-12 \text{ mm}, h_{\max} = 2 \text{ mm}$	D: $h \leq 0,2b$ C: Müsaade edilmez B: Müsaade edilmez	✓	X	X
Çökme-Yetersiz doldurulmuş kaynak ağzı	Düzgün geçiş gerekir.  $t = 5 \text{ mm}, h_{\max} = 0,1 \text{ mm}$	D: $h \leq 0,25t$, max. 2 mm C: $h \leq 0,1t$, max. 1 mm B: $h \leq 0,05t$, max. 0,5 mm	✓	✓	✓
Sıçrantı	Yok	Malzeme, korozyon koruması gibi uygulamaya bağlı kabul	✓	✓	✓

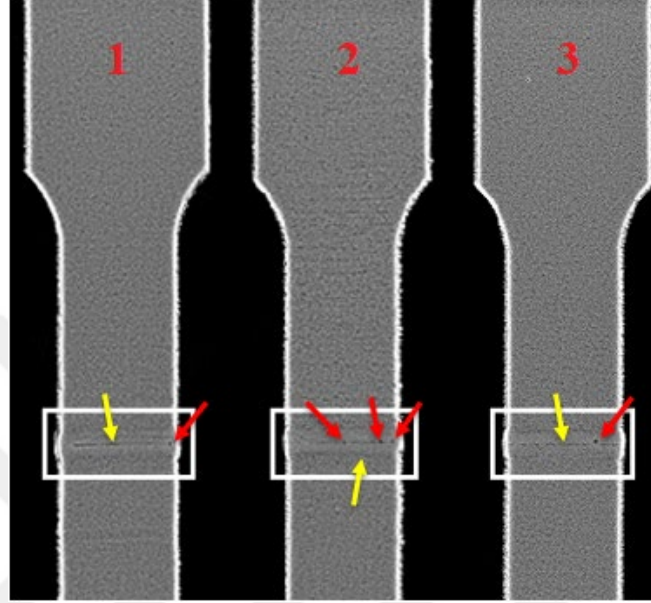
Lazer ve TIG kaynaklı numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri TS EN ISO 16610-21 standardına göre incelenmiştir. Lazer kaynaklı numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin TIG kaynaklı numunelere kıyasla daha az olduğu görülmüştür (Şekil 4.7).



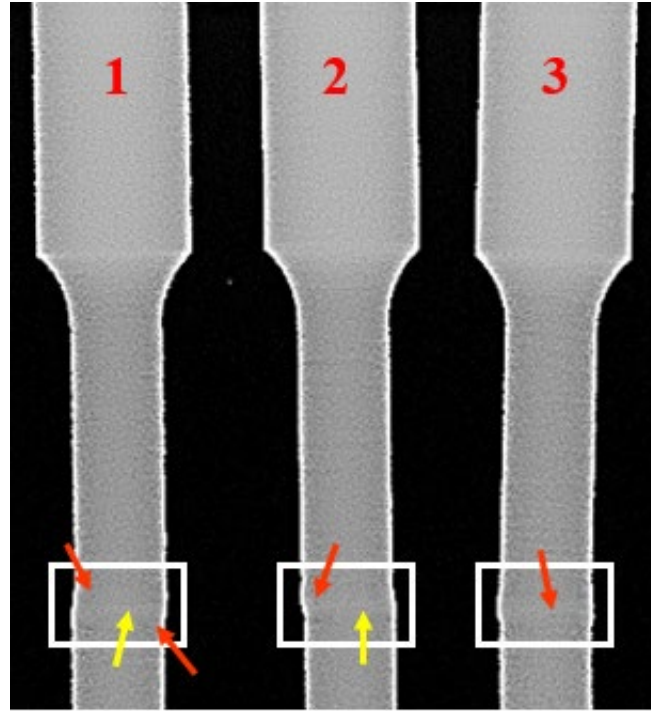
Şekil 4.7. Yüzey pürüzlülük değerleri: (a) TIG ve (b) LBW numuneler.

4.1.2. Kaynak radyografik muayene sonuçları

Radyografik muayene işlemi TS EN ISO 17636-1 standardına göre gerçekleştirilmiştir ve tespit edilen kusurlar TS EN ISO 10675-1' ye göre değerlendirilmiştir. Şekil 4.8 ve 4.9' da kaynak numunelerinin radyografik görüntüleri yer almaktadır.

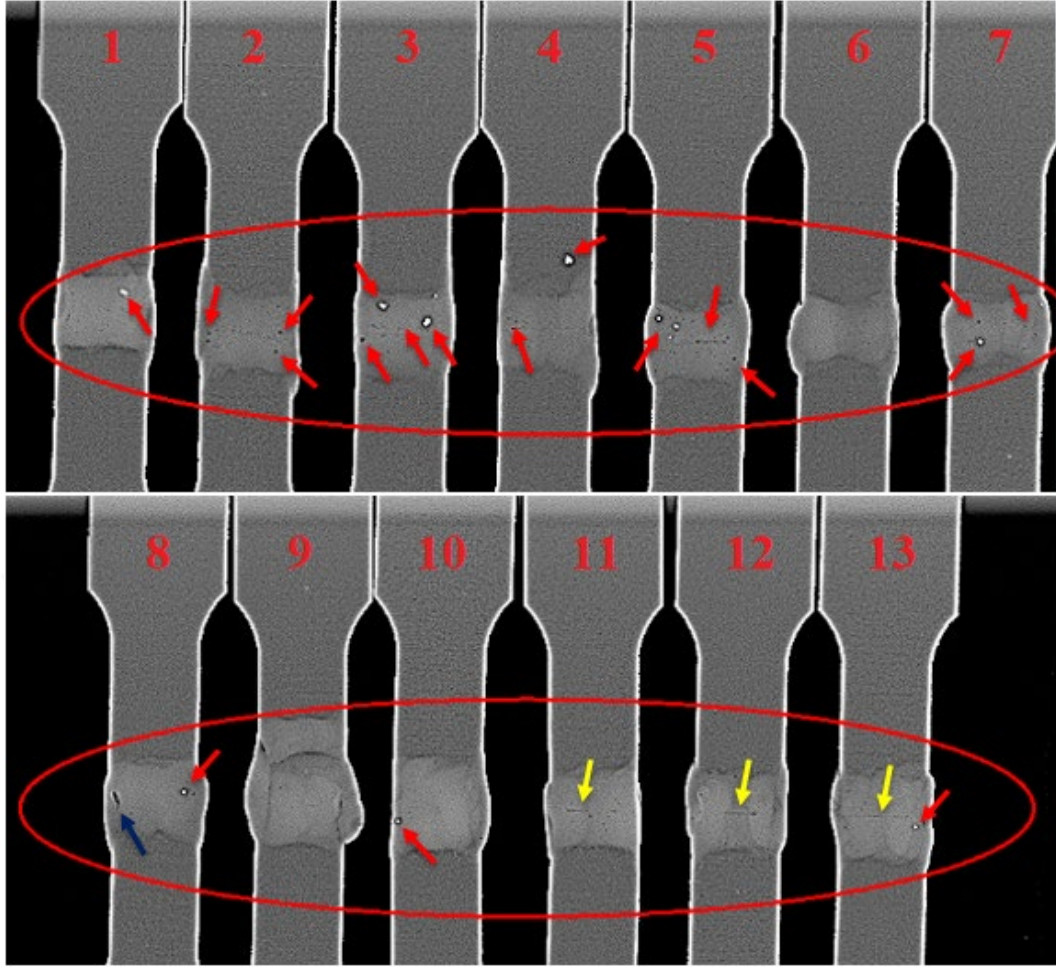


(a)

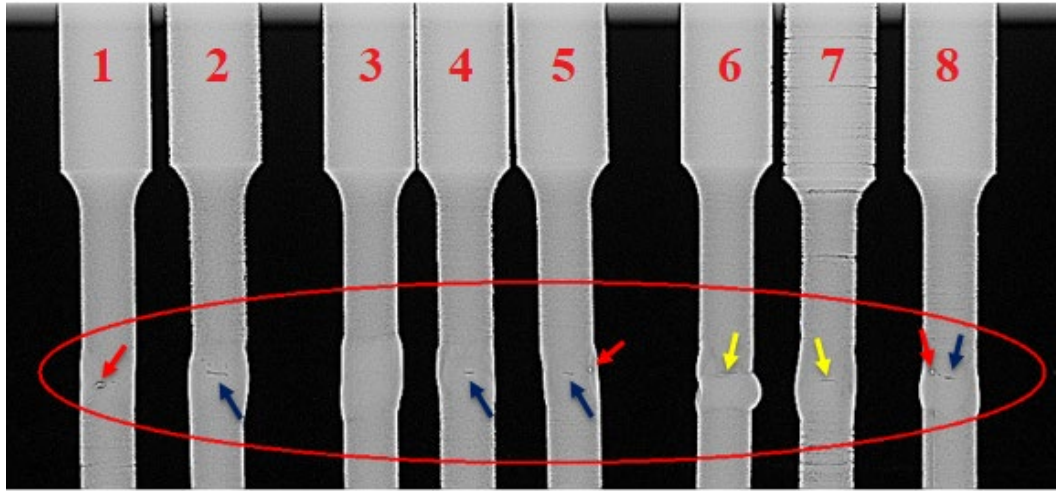


(b)

Şekil 4.8. Lazer kaynaklı numunelerin X-ray tahribatsız test sonuçları: (a) yassı numuneler, (b) dairesel numuneler.



(a)



(b)

Şekil 4.9. TIG kaynaklı numunelerin X-ray tahribatsız test sonuçları; (a) yassı numuneler, (b) dairesel numuneler.

X-ışını incelemesi sonrası lazer kaynaklı numunelerin kaynak bölgelerinde az miktarda porozite oluşumu gözlenmiştir. Bu sonuç numunelerin kaynak bölgelerinin homojen yoğunlukta olduğunu göstermektedir. Kaynaklı numunelerin genelinde önemli bir kusur bulunmamaktadır. Bu da, Ti6Al4V alaşımında uygulanan EBM işleminin yüksek kalitede olduğunu açıklamaktadır. TIG kaynaklı numunelerin kaynak bölgeleri lazer kaynaklı numunelere kıyasla daha fazla miktarda porozite içermektedir ve kaynağın tüm bölgesine dağılmış vaziyettedir. Özellikle büyük gözenekler kaynağın üst kısmında yoğunlaşmıştır. TIG’ de ergiyik havuzun hidrojen emilim süresi lazer kaynağına göre daha uzundur ve bu da TIG kaynaklı numunelerin daha fazla gözenek içermesine neden olmuştur. Hidrojen emilim süresinin azaltılması, hidrojen kaynağının azaltılması kadar önemlidir. TIG kaynak bölgesinde porozitelerin yanısıra tungsten ve cüruf kalıntıları da yer almaktadır (Şekil 4.9). X-ray görüntülerinde kırmızı oklar ile gösterilen siyah noktalar kaynak içerisindeki gözenekleri belirtirken beyaz noktalar tungsten kalıntılarını ifade etmektedir. Gözeneklerin çoğu, 200 μm ’ den küçük çaplara sahip küreseldir ve kaynak bölgeleri ile ısı tesiri altında kalan bölgeler arasındaki ara yüzlerde dağılmaktadır. Gözeneklerin küresel şekli, genellikle ergiyik havuzda emilen hidrojenin neden olduğu gaz tipi gözenekler olduğunu göstermektedir [211]. Gözenekler, kaynaklı yapının mekanik dayanımını düşürmektedir. X-ray görüntülerinde yer alan sarı oklar yetersiz nüfuziyeti belirtmektedir. Her iki kaynak türünde de kaynak yüzeylerinde birleşmemiş bölgeler yer almaktadır. Bu birleşmeme oranının lazer kaynağında daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 4.9’ daki mavi oklar ise kaynak dikişinde yer alan cürufları göstermektedir. TIG kaynağında görülen cüruf kalıntıları kaynak dikişinde kalan yabancı bir malzemeye işaretir. Çok defa cüruf kalıntısı ile nüfuziyet azlığı birbirine bağlıdır. Bu da kaynak işleminin doğru bir şekilde yapılmamasından kaynaklanmaktadır. Kaynak dikişinin içerisinde yer alan büyük, dağınık veya sıralar halindeki cüruf artıkları, kaynağın homojenliğini bozarak mukavemetini olumsuz yönde etkilemektedir. X-ray sonuçlarında belirlenen cüruf artıkları ufak, seyrek ve dağılmış formda olduğundan bağlantının statik mukavemetine etkisi ihmal edilebilir [136]. Tablo 4.3 ve 4.4’ te lazer ve TIG kaynaklı numuneler TS EN ISO 10675-1’ standardına göre iç kusurlar açısından değerlendirilmiştir. Lazer kaynaklı numunelerde boşluklar ve metalik kalıntılar bulunmamaktadır. Ancak numunelerde mikro çatlaklar, poroziteler ve nüfuziyet noksanlığı meydana gelmiştir. Bu nedenle TS EN ISO 10675-1 seviye 1 ve 2 standart gereksinimlerini karşılayamamaktadır. Lazer numuneler en düşük kabul seviyesi olan 3 seviyesi için uygundur. TIG numunelerde görülen mikro ve krater

çatlakları, metalik kalıntılar, lineer ve dağılmış porozite oluşumları ve nüfuziyet noksanlığı gibi iç kusurlar nedeniyle TS EN ISO 10675-1 seviye 1 ve 2 standartları sağlanamamıştır. TIG kaynaklı numunelerin en düşük kabul seviyesi 3 için uygun olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 4.3. LBW numunelerin TS EN ISO 10675-1 standardına göre iç kusurlar açısından incelenmesi.

Kusur tanıtımı (ISO 6520-1)	Kaynak durumu	Kusur sınırları	Kalite seviyeleri		
			3	2	1
Çatlak	Mikro çatlaklar mevcut	3, 2, 1: müsaade edilmez (Mikro çatlaklar ve krater çatlakları haricindeki)	✓	X	X
Porozite	$d \leq 200\mu\text{m}$ $s = 5,1-5,7 \text{ mm}$ $A \leq 1,5$	3: $d \leq 0,4s$, max. 5 mm $A \leq 2,5 \%$ 2: $d \leq 0,3s$, max. 4 mm $A \leq 1,5 \%$ 1: $d \leq 0,2s$, max. 3 mm $A \leq 1,0 \%$ $L = 100 \text{ mm}$	✓	✓	X
Kümelenmiş porozite	Yok	3: $d_A \leq w_p$, max. 25 mm 2: $d_A \leq w_p$, max. 20 mm 1: $d_A \leq w_p / 2$, max. 15 mm $L = 100 \text{ mm}$	✓	✓	✓
Lineer porozite	Yok	3: $d \leq 0,4s$, max. 4 mm $l \leq s$, max. 75 mm 2: $d \leq 0,3s$, max. 3 mm $l \leq s$, max. 50 mm 1: $d \leq 0,2s$, max. 2 mm $l \leq s$, max. 25 mm $L = 100 \text{ mm}$	✓	✓	✓
Uzunlamasına boşluklar	Yok	3: $h < 0,4s$, max. 4 mm $\Sigma l \leq s$, max. 75 mm 2: $h < 0,3s$, max. 3 mm $\Sigma l \leq s$, max. 50 mm 1: $h < 0,2s$, max. 2 mm $\Sigma l \leq s$, max. 25 mm $L = 100 \text{ mm}$	✓	✓	✓
Büzülme boşlukları	Yok	3: $h < 0,4s$, max. 4 mm $l \leq 25 \text{ mm}$ 2: müsaade edilmez 1: müsaade edilmez	✓	✓	✓
Metalik kalıntılar	Yok	3: $l \leq 0,4s$, max. 4 mm 2: $l \leq 0,3s$, max. 3 mm 1: $l \leq 0,2s$, max. 2 mm	✓	✓	✓
Nüfuziyet noksanlığı	$\Sigma l \leq 25 \text{ mm}$	3: $\Sigma l \leq 25 \text{ mm}$, $L = 100 \text{ mm}$ 2: müsaade edilmez 1: müsaade edilmez	✓	X	X

A: $L \times w_p$ ile öngörülen gösterge alanlarının toplamı, L: 100 mm test uzunluğu, w_p : kaynak genişliği, d: gözenek çapı, d_A : gözenek zarf alanının çapı, l: gösterge uzunluğu, s: kaynak kalınlığı, h: gösterge genişliği, Σl : Toplam hata uzunluğu, ölçüler mm.

Tablo 4.4. TIG numunelerin TS EN ISO 10675-1 standardına göre iç kusurlar açısından incelenmesi.

Kusur tanıtımı (ISO 6520-1)	Kaynak durumu	Kusur sınırları	Kalite seviyeleri		
			3	2	1
Çatlak	Mikro ve krater çatlakları mevcut	3, 2, 1: müsaade edilmez (Mikro çatlaklar ve krater çatlakları haricindeki)	✓	X	X
Porozite	$d \leq 200\mu\text{m}$ $s = 6-8 \text{ mm}$ $A \leq 2,5$	3: $d \leq 0,4s$, max. 5 mm $A \leq 2,5 \%$ 2: $d \leq 0,3s$, max. 4 mm $A \leq 1,5 \%$ 1: $d \leq 0,2s$, max. 3 mm $A \leq 1,0 \%$ $L = 100 \text{ mm}$	✓	X	X
Kümelenmiş porozite	Yok	3: $d_A \leq w_p$, max. 25 mm 2: $d_A \leq w_p$, max. 20 mm 1: $d_A \leq w_p/2$, max. 15 mm $L = 100 \text{ mm}$	✓	✓	✓
Lineer porozite	$l \cong 3,5 \text{ mm}$ $d \leq 200\mu\text{m}$ $s = 6-8 \text{ mm}$	3: $d \leq 0,4s$, max. 4 mm $l \leq s$, max. 75 mm 2: $d \leq 0,3s$, max. 3 mm $l \leq s$, max. 50 mm 1: $d \leq 0,2s$, max. 2 mm $l \leq s$, max. 25 mm $L = 100 \text{ mm}$	✓	✓	X
Uzunlamasına boşluklar	Yok	3: $h < 0,4s$, max. 4 mm $\Sigma l \leq s$, max. 75 mm 2: $h < 0,3s$, max. 3 mm $\Sigma l \leq s$, max. 50 mm 1: $h < 0,2s$, max. 2 mm $\Sigma l \leq s$, max. 25 mm $L = 100 \text{ mm}$	✓	✓	✓
Büzülme boşlukları	Yok	3: $h < 0,4s$, max. 4 mm $l \leq 25 \text{ mm}$ 2: müsaade edilmez 1: müsaade edilmez	✓	✓	✓
Metalik kalıntılar	$l = 2-3 \text{ mm}$ $s = 6-8 \text{ mm}$	3: $l \leq 0,4s$, max. 4 mm 2: $l \leq 0,3s$, max. 3 mm 1: $l \leq 0,2s$, max. 2 mm	✓	X	X
Nüfuziyet noksanlığı	$\Sigma l \leq 25 \text{ mm}$	3: $\Sigma l \leq 25 \text{ mm}$, $L = 100 \text{ mm}$ 2: müsaade edilmez 1: müsaade edilmez	✓	X	X

A: $L \times w_p$ ile öngörülen gösterge alanlarının toplamı, L: 100 mm test uzunluğu, w_p : kaynak genişliği, d: gözenek çapı, d_A : gözenek zarf alanının çapı, l: gösterge uzunluğu, s: kaynak kalınlığı, h: gösterge genişliği, Σl : Toplam hata uzunluğu, ölçüler mm.

4.2. Mikro yapısal Değerlendirme

Lazer ve TIG kaynaklı EBM Ti6Al4V numunelerin farklı metalürjik bölgelerine ait mikro yapıları OM ve SEM kullanılarak incelenmiştir. İnceleme sonucunda elde edilen bulgular şu şekildedir. EBM Ti6Al4V malzemede kaynak ısısından etkilenmeyen ana metalin oldukça küçük boyutlu eş eksenli tanelerden oluştuğu görülmektedir. Ti6Al4V alaşımı başlangıçta orijinal alfa (α) ve beta (β) fazlarından oluşmaktadır. Optik mikroskop görüntülerine göre TIG kaynaklı numunelerin her birinde ısı tesiri altındaki bölge ve kaynak metali birlikte görülmektedir. Ana metalin hemen yanında yeniden kristalleşme sonucu oluşan ısı tesiri altında kalan bölge bulunmaktadır. Bu bölgenin tane boyutu ana metal tane boyutundan biraz daha büyüktür. Isı tesiri altındaki bölgenin yanında yüksek ısı nedeniyle tane irileşmesinin olduğu büyük tane yapısına sahip kaynak bölgesi mevcuttur. Yüksek ısı girdisi neticesinde kaynak bölgesine ait mikro yapıda birincil α yapısının hacim oranının arttığı görülmüştür. Bu bölgedeki büyük boyutlu taneler β fazı olup ortalama 400 μm tane boyutundadır. Isı tesiri altındaki bölgenin mikro yapı özelliği kaynak metaline benzer şekildedir ve deforme olmuş kaba ve iğnemsiz α ile $\alpha + \beta$ (Widmanstätten yapısı) dan oluşmaktadır. Lazer kaynak yönteminde ana metal, ısı tesiri altında kalan bölge ve kaynak bölgesi birbirinden kolaylıkla ayırt edilebilmektedir. Düşük ısı girişi ve hızlı soğuma neticesinde β fazı martenzitik yapı içerisinde difüzyonsuz bir şekilde dönüşmüştür. Kaynak bölgesine ait mikroyapı az miktarda kabalaşmış sütunlar halinde β yapılarından meydana gelmiştir. Genel olarak, kaynak metali ince ve iğnemsiz α^1 yapısından oluşmaktadır. Isı tesiri altında kalan bölgenin mikro yapısı ise ana metal ve kaynak bölgesine kıyasla daha kabadır. Kaynak bölgesine yakın kısımlar deforme olmuş α^1 yapısından oluşurken, ana metale yakın kısımlar $\alpha + \beta$ dan meydana gelmiştir [149, 153, 173].

Farklı metalürjik bölgelere ait mikro yapılar mekanik özellikler üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Daha ince bir mikro yapı, daha yüksek bir akma dayanımına karşılık gelir. Tane sınırının fazla olması bariyer görevi görerek dislokasyonu engeller ve mukavemeti artırır.

4.3. Mekanik Özellikler

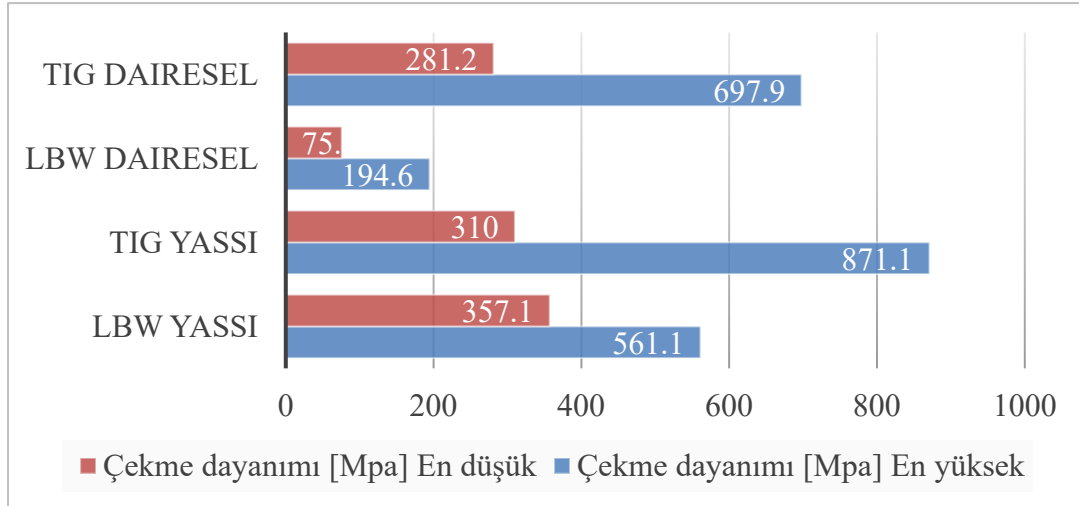
▪ Çekme Testi Sonuçları

Kaynak bağlantılarının mekanik özelliklerini incelemek amacıyla numunelere uygulanan enine çekme testi sonuçları Tablo 4.5’ te gösterilmiştir. Belirlenen en yüksek ve en düşük

çekme dayanımı sonuçları Şekil 4.10’ da verilmiştir. Deneyler sonrası elde edilen en yüksek çekme dayanımı değerleri, lazer kaynaklı yassı ve dairesel numuneler için sırasıyla 561,1 MPa ve 194,6 MPa iken, TIG kaynaklı yassı ve dairesel numuneler için sırasıyla 871,1 MPa ve 697,9 MPa olarak ölçülmüştür.

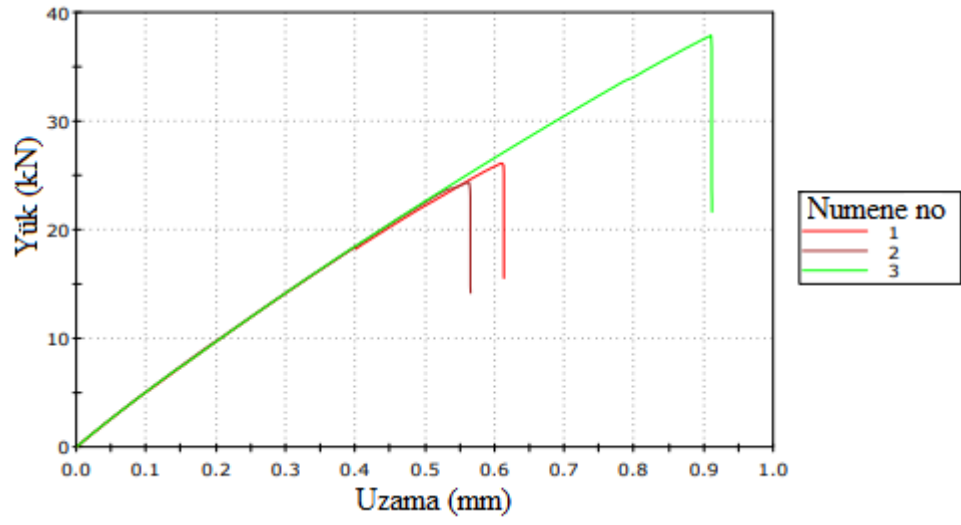
Tablo 4.5. Kaynaklı EBM Ti6Al4V numunelerin enine çekme testi sonuçları.

Kaynak tipi	Geometri	Numune no	Maksimum yükleme, [kN]	Çekme dayanımı, [MPa]
LBW	Yassı	1	26,15	390,2
		2	24,38	357,1
		3	37,87	561,1
LBW	Dairesel	-	-	-
		2	12,46	194,6
		3	5,00	75,7
TIG	Yassı	1	20,37	310,0
		2	31,83	468,6
		3	36,40	547,1
		4	36,34	539,4
		5	37,78	567,7
		6	35,47	520,9
		7	58,31	871,1
		8	38,50	579,6
		9	42,16	634,4
		10	32,72	476,3
		11	30,63	453,7
		12	37,08	548,4
		13	41,33	610,9
TIG	Dairesel	1	45,85	697,9
		2	18,57	285,5
		3	18,05	281,2
		4	29,31	447,8
		5	30,87	489,6
		6	24,39	379,2
		7	24,94	385,2
		8	29,55	455,4

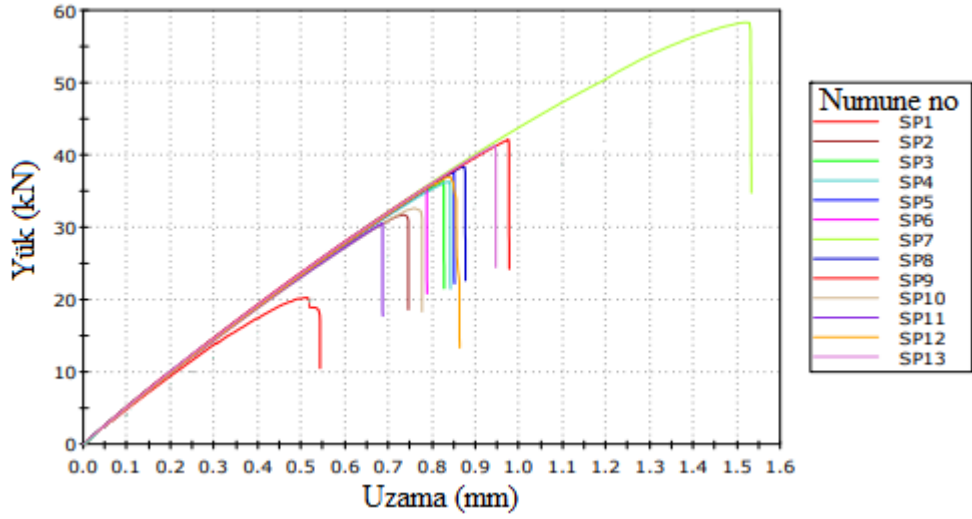


Şekil 4.10. Kaynaklı numunelere ait en yüksek ve en düşük çekme dayanımı değerleri.

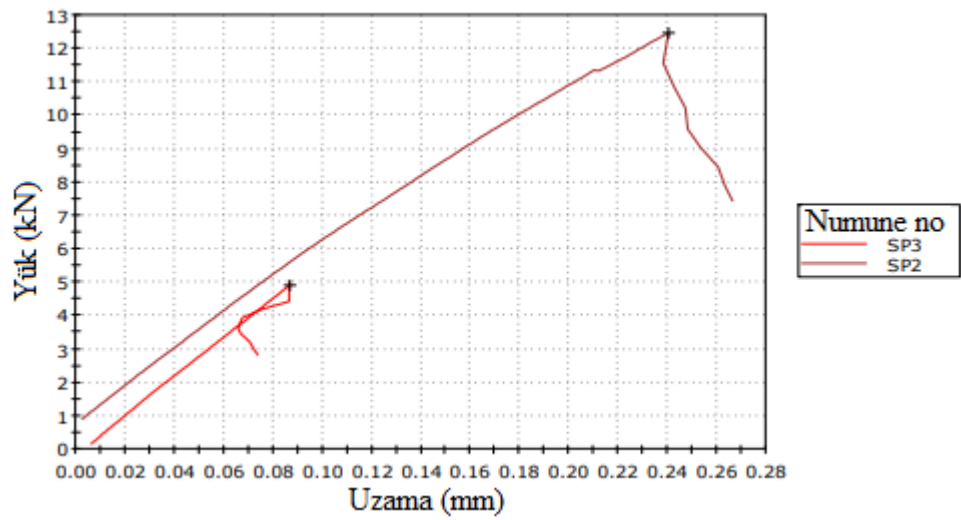
Yük-uzama eğrileri, çekme testleri sırasında ekstensometre ile ölçülen verilere dayanılarak oluşturulmuştur (Şekil 4.11-4.14). Çekme testi sonucunda, ana malzemeye ait çekme dayanımı ve yüzde uzama değerlerinin TIG ve lazer kaynaklı numunelerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Kaynak dikişinde meydana gelen poroziteler, mikro çatlaklar, yetersiz nüfuziyet ve mikro yapısal dönüşümler bu sonucu açıklamaktadır. Poroziteler, kaynağın enine kesitinin taşıma alanını azaltmaktadır. Ayrıca, lokal gerilim yoğunlaşmasına neden olarak çatlakların ilerlemesini hızlandırmıştır [212]. Çalışmamıza benzer olarak, geleneksel ve eklemeli olarak üretilen Ti6Al4V parçaların lazer ve TIG kaynağı üzerine gerçekleştirilen literatür çalışmalarında kaynak sonrası sünekliğin azaldığı sonucuna ulaşılmıştır [147, 149, 168, 173, 185]. TIG kaynaklı EBM Ti6Al4V numunelerin çekme ve yüzde uzama değerlerinin lazer kaynaklı numunelerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca, her iki kaynak yöntemi sonrası yassı numuneler dairesel numunelere kıyasla daha yüksek mekanik dayanım sergilemektedir. Eklemeli parçaların yüzeylerinin işlenmesi neticesinde daha yüksek mekanik özellikler gösterdiği bilinmektedir [103, 109, 213]. Aynı şekilde, kaynakta kullanılacak numune yüzeylerinin işlenmesi de kaynağın mekanik dayanımını arttıracaktır. Eklemeli parçaların kaynakla birleştirilmesine yönelik yapılan çalışmalar bu sonucu destekler niteliktedir [185]. Bu nedenle, eklemeli imalat sonrası herhangi bir talaş kaldırma işlemi uygulamadığımız parçaların yüzeylerinde kalan artık gerilme ve yüzey kusurları lazer ve TIG kaynak işleminin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir.



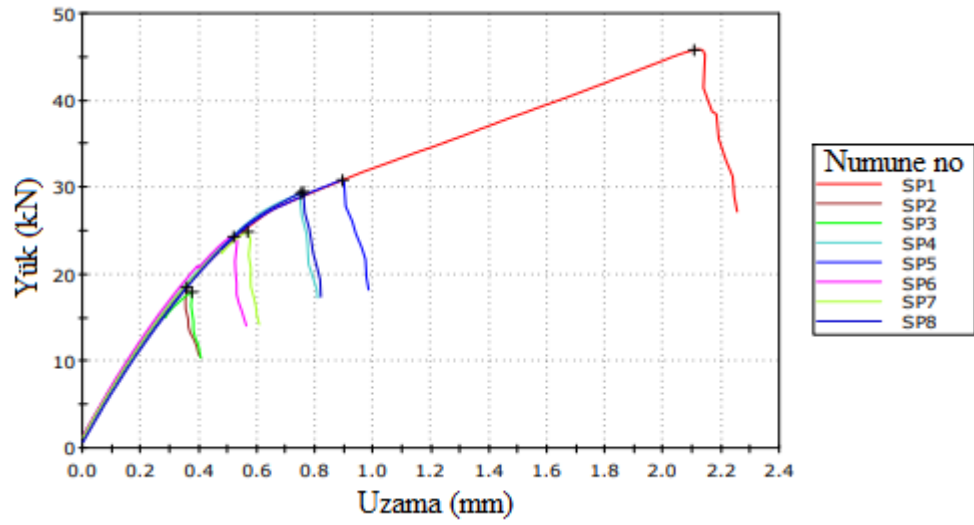
Şekil 4.11. LBW yassı numunelere ait yük-uzama eğrileri.



Şekil 4.12. TIG yassı numunelere ait yük-uzama eğrileri.

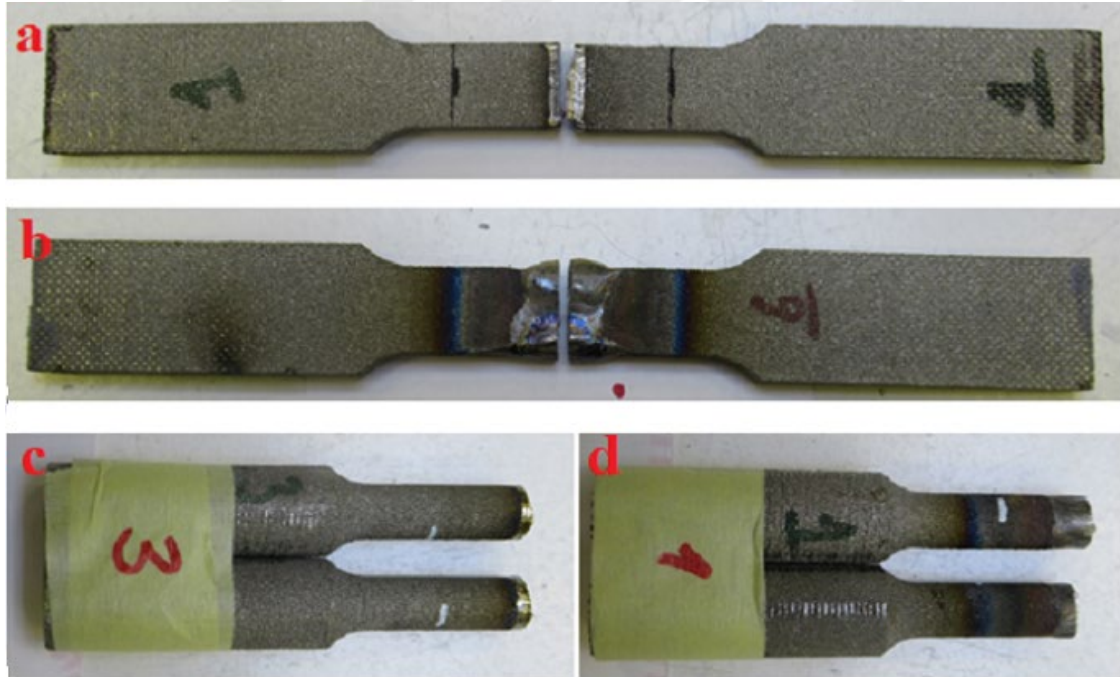


Şekil 4.13. LBW dairesel numunelere ait yük-uzama eğrileri.

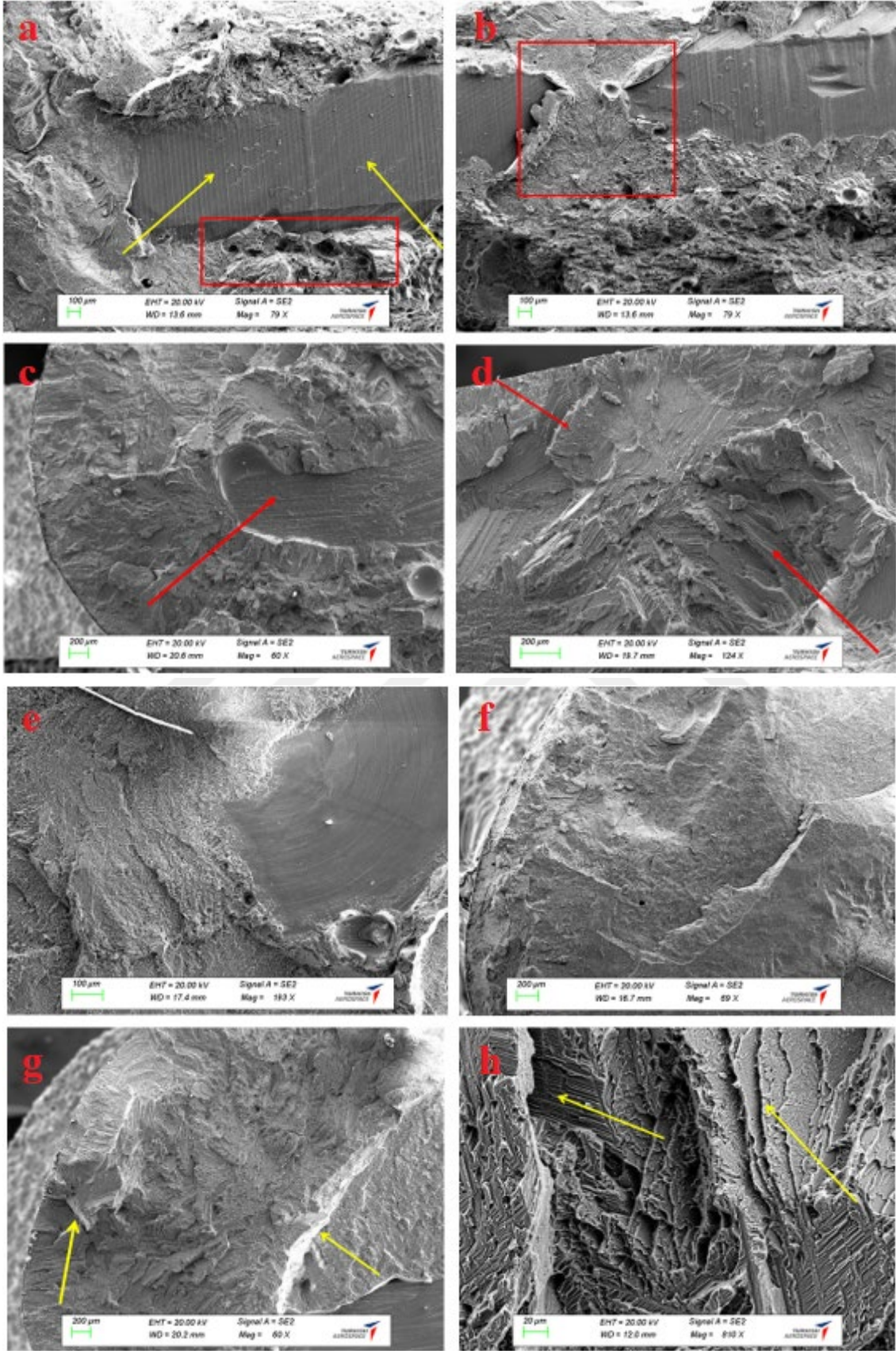


Şekil 4.14. TIG dairesel numunelere ait yük-uzama eğrileri.

Şekil 4.15' te lazer ve TIG kaynaklı numunelerin kırılma yerleri gösterilmiştir. Numunelerin tamamı kaynak bölgesinden kırılmıştır. Kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri Şekil 4.16' da yer almaktadır.



Şekil 4.15. Kaynaklı EBM Ti6Al4V numunelerin kırılma yerleri: (a) LBW yassı, (b) TIG yassı, (c) LBW dairesel, (d) TIG dairesel.



Şekil 4.16. Kırılma yüzey görüntüleri (SEM): (a-b) LBW yassı, (c-d) TIG yassı, (e-f) LBW dairesel, (g-h) TIG dairesel.

Şekil 4.16’ da ki kırılma yüzey görüntüleri incelendiğinde, kırılmaların klivaj mekanizmalı gevrek tipte olduğu görülmektedir. Kırılma yüzeyleri parlak ve kristalin görünümündedir. Lazer ve TIG kaynaklı numunelerde ana kusurun porozite ve yetersiz nüfuziyet olduğu anlaşılmıştır. Yetersiz gaz koruması sonucunda havada yer alan gazların kaynak banyosuna girmesi porozite oluşumuna neden olmuştur. Ayrıca elektrot, iş parçası ve koruyucu gazın kirlenmesi de porozite oluşumunu arttırmıştır. Metal yüzey kirlendikten sonra, kirli metal hacminin uzaklaştırılamaması yeniden kaynaklama işleminin verimini düşürecektir. Kaynak banyosuna giren olası elemanlar alaşımın şiddetli gevrekleşmesine neden olarak, süneklik ve tokluğu azaltmıştır [151, 153]. Şekil 4.16a’ da sarı oklar ile gösterilen bölgede kaynağın yüzeye kadar ilerlemediği görülmektedir. Nüfuziyet eksikliğinin ortaya çıkması, ısı girdisinin yetersiz olduğunun bir göstergesidir. Başka bir ifadeyle, kullanılan kaynak gücü için kaynak hızının yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Bu durum parçanın çekme mukavemet değerini düşüren etkilerdendir. Aynı şekilde kırmızı kutu ile görülen bölgede kaynak boşlukları mevcuttur. LBW sonrası çok hızlı soğuma neticesinde kaynak bölgesinde meydana gelen martenzitik yapı ve kaynak çatlakları kaynak kırılma eğilimini arttırmıştır. Eklemeli parçalar için yüksek ısı girişinin kaynak kırılma eğilimini arttırdığı bilinmektedir [186]. Buna ek olarak, geleneksel Ti6Al4V alaşımının lazer kaynağında kullanılan kaynak gücünün çok yüksek ya da çok düşük olması durumunda kaynak kırılma potansiyelinin arttığı bildirilmiştir [146]. Şekil 4.16b ve e’ de kaynağın bazı noktalarda iki yüzey arasına dolduğu, ancak yetersiz nüfuziyet oluşturduğu görülmektedir. Şekil 4.16c’ de ok ile gösterilen bölgeye kaynağın yeterince ulaşamadığı analiz edilmiştir. Şekil 4.16d’ de ise kaynak bölgesinin kırılma yönleri ve kırılmaya başladığı bölge görülmektedir. Kırılma çizgilerinin yönüne bakıldığında kırılmanın dışarıdan içeriye doğru ilerlediği söylenebilir. Şekil 4.16g’ de kaynak numunesi ok ile gösterilen bölgelerden kırılmıştır. Aynı bölgelerde diğer numunelerde görülen çukurcuklar tespit edilmiştir. Şekil 4.16h’ de yorulma kırılmasına benzer izler ile karşılaşmıştır. Ancak bunun nedeni yorulma kaynaklı bir kırılma değildir. Yüksek kaynak akımı sonucunda kaynak içyapısında oluşan krater çatlakları, yorulma benzeri bir kırılma şekli meydana getirmiştir.

Elde edilen çekme testi ve kırılma yüzey görüntülerinden mikroyapı ve porozitenin kaynaklı malzemelerin mekanik özelliklerini yakından etkilediğini söylemek mümkündür. Kaynak işleminde kullanılan parametre değerlerinin kaynak mekanik özellikleri üzerinde son derece önemli olduğu görülmüştür. Uygun olmayan parametre seçimi ve kaynak tekniği nedeniyle kaynak dikişlerinde ve geçiş bölgelerinde porozite, mikro çatlak ve eksik

ergimenin oluşması kaçınılmazdır. Ayrıca, geleneksel Ti6Al4V alaşımında kullanılan kaynak parametrelerinin eklemeli parçaların kaynağında doğrudan kullanılamayacağı anlaşılmıştır. Wits ve Becker tarafından eklemeli Ti6Al4V alaşımının lazer kaynağı üzerine yapılan çalışma bu sonucu destekler niteliktedir [162] .



5. DEĞERLENDİRMELER VE ÖNERİLER

EBM Ti6Al4V çekme numunelerinin Lazer ve TIG kaynak yöntemleri kullanılarak birleştirilmesi sonucunda, kaynak morfolojisi, mikro yapı ve mekanik özellikleri incelenerek aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1. EBM sonucunda parçada gözenekler meydana gelmiştir. Ancak bu kusurların küçük olduğu analiz edilmiştir. Ayrıca parça ana metalden kırılmadığı için bu gözenekler dikkate alınmamıştır.
2. Lazer ve TIG kaynaklı numunelerde ana kusurun porozite ve yetersiz nüfuziyet olduğu anlaşılmıştır. Kaynak bölgeleri birbirine tam tutunamamış ve plastik kırılmalar meydana gelmiştir.
3. Alüminyum alaşımlı toz yüzeyinin oksitlenebilirliği fazladır. Kaynak işlemi korumasız bir ortamda yapıldığı için oksitlenme meydana gelmiştir. Oksitlenme sonucunda kırılma bölgelerinde hidrojen kabarcık oluşumu izlenmiştir.
4. Her iki kaynak türünde plakaların hava ile temasını önlemek için koruma cihazı geliştirmek gözenek oluşumunu azaltacaktır ve daha yüksek mekanik özellikler elde edilebilecektir. Ayrıca TIG’ de ergiyik havuzun hidrojen emilim süresi lazer kaynağına göre daha uzundur ve bu da TIG kaynaklı numunelerin daha fazla gözenek içermesine neden olmuştur. Hidrojen emilim süresinin azaltılması, hidrojen kaynağının azaltılması kadar önemlidir.
5. Lazer kaynağının görünümü daha iyidir ve TIG kaynağına kıyasla gözeneklilik daha düşüktür. TIG kaynaklı çekme numunelerinde gözenekler kaynağın tüm bölgesine dağılmıştır. Özellikle büyük gözenekler kaynağın üst kısmında yoğunlaşmıştır.
6. Her iki kaynak türünde de kaynak yüzeylerinde birleşmemiş bölgeler görülmektedir. Bu birleşmeme oranı lazer kaynağında daha fazladır.
7. Lazer kaynağı ile kaynatılan numunelerin kaynak kesitleri küçük olmasına rağmen çekme sonuçları TIG kaynaklı numunelerinkine oldukça yakın çıkmıştır. En yüksek çekme sonuçlarını barındıran numune 3 kopma mukavemeti sonuçları arasında 50 MPa’ lık bir fark bulunmaktadır. Bunun en etkili sebebi kaynak soğuma hızının yüksek olmasıdır.
8. TIG kaynaklı numunelerin gerilme-uzama grafiği lazer kaynağına göre daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca ergimeyen bölgeler lazere oranla daha düşüktür. Buna rağmen gerilme özellikleri birbirine oldukça yakındır. Lazer kaynağının iyileştirilmesi ve ortamın uygun koşullara getirilmesi ile lazer kaynağının gerilme üzerindeki etkisinin

artacağı görülmüştür.

9. Eklemeli parçaların yüzeylerinin işlenmesi neticesinde daha yüksek mekanik özellikler gösterdiği bilinmektedir [103, 108, 214]. Kaynak numune yüzeylerinin işlenmesi de kaynağın mekanik dayanımını arttıracaktır. Eklemeli parçaların kaynakla birleştirilmesine yönelik yapılan çalışmalar bu sonucu destekler niteliktedir [186].

Eklemeli imalat sonrası herhangi bir talaş kaldırma işlemi uygulamadığımız parçaların yüzeylerinde kalan artık gerilme ve yüzey kusurları lazer ve TIG kaynak işleminin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir. Bu nedenle, EBM sonrası parça yüzeylerinin işlenmesi ile kaynaklı parçaların mekanik özelliklerinin artacağını söylemek mümkündür.

10. Eklemeli ve geleneksel üretim yöntemleri kullanılarak elde edilen parçalar mikro yapı özellikleri açısından birbirine benzememektedir. Bu nedenle geleneksel yöntemler ile üretilen parçaların kaynağında kullanılan yöntem ve parametreler eklemeli parçalar için doğrudan kullanılamayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Arcam Additive Manufacturing Machines, <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines>, (24 Şubat 2020).
- [2] DebRoy, T.; Wei, H. L.; Zuback, J. S.; Mukherjee, T.; Elmer, J. W.; Milewski, J. O.; Beese, A. M.; Wilson-Heid, A.; De, A.; Zhang, W.: "Additive Manufacturing of Metallic Components – Process, Structure and Properties", *Progress in Materials Science*, 92, 112-224, (2018).
- [3] Prashanth, K. G.; Damodaram, R.; Maity, T.; Wang, P.; Eckert, J.: "Friction Welding of Selective Laser Melted Ti6Al4V Parts", *Materials Science and Engineering: A*, 704, 66-71, (2017).
- [4] Callister, W. D.; Rethwisch, D. D.: "*Malzeme Bilimi Ve Mühendisliği*", Nobel, (2013).
- [5] Donachie, M. J.: "*Titanium: A Technical Guide*", ASM international, (2000).
- [6] Boyer, R. R.: "An Overview on the Use of Titanium in the Aerospace Industry", *Materials Science and Engineering: A*, 213, 103-114, (1996).
- [7] Ashby, M. F.: "Materials Selection in Mechanical Design", *Metallurgia Italiana*, 86, 475-475, (1994).
- [8] Meetham, G.: "*The Development of Gas Turbines*", Springer, (1981).
- [9] Leyens, C.; Peters, M.: "*Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications*", John Wiley & Sons, (2003).
- [10] Rodney, B.; Gerhard, W.; Collings, E.: "Materials Properties Handbook: Titanium Alloys", *ASM International, Materials Park, OH*, (1994).
- [11] Rosenberg, H.: "The Science, Technology & Application of Titanium, 1970": pub Pergamon Press Oxford UK, (1970).
- [12] Walter, J.; Jackson, M.; Sims, C.: "Titanium and Its Alloys: Principles of Alloying Titanium", *ASM International, Materials Park, OH*, 1, (1988).
- [13] Lütjering, G.: "Influence of Processing on Microstructure and Mechanical Properties of (A+B) Titanium Alloys", *Materials Science and Engineering: A*, 243, 32-45, (1998).
- [14] Damkroger, B.; Edwards, G.: "Continuous Cooling Transformation Kinetics in Alpha-Beta Titanium Alloys", *Simulation and Theory of Evolving Microstructures*, 129-150, (1989).
- [15] Epma, Eklemeli İmalata Yönelik Metal Tozları, <http://eklemeliimalat.info.tr/3-eklemeli-imalat-icin-metal-tozlari/>, (1 Mart 2020).
- [16] Akpınar, İ. Ş.: "Atomizasyon Yöntemiyle Toz Metal Üretimi ve Tozların Karakterizasyonu ", Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye (Şubat, 2011).
- [17] Sorahi, M.: "Toz Metalurjisi", Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye (Aralık, 1988).
- [18] German, R. M.: "Powder Metallurgy Science", *Metal Powder Industries Federation, 105 College Rd. E, Princeton, N. J. 08540, U. S. A*, 1984. 279, (1984).
- [19] Ersümer, A.: "*Toz Metallurjisi: Sert Metal, Sinterleme*", İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi, (1970).
- [20] Dogan, C.; Saritas, S.: "Metal-Powder Production by Centrifugal Atomization", *International Journal of Powder Metallurgy*, 30, 419-427, (1994).
- [21] Toz Üretim Teknikleri Ders Notları, Afyon Kocatepe Üniversitesi, <http://www.kim.muh.com/evcin/toz/toz10.pdf>, (10 Mart 2020).
- [22] Committee, F.: "Terminology for Additive Manufacturing Technologies", *ASTM International*, (2012).

- [23] Wohlers, T.: "Worldwide Progress Report on the Rapid Prototyping, Tooling, and Manufacturing State of the Industry", *Wohlers report*, (2009).
- [24] Kai, C. C.; Fai, L. K.; Chu-Sing, L.: "*Rapid Prototyping: Principles and Applications in Manufacturing*", World Scientific Publishing Co., Inc., (2003).
- [25] Sturm, L. D.; Williams, C. B.; Camelio, J. A.; White, J.; Parker, R.: "Cyber-Physical Vulnerabilities in Additive Manufacturing Systems: A Case Study Attack on The .Stl File with Human Subjects", *Journal of Manufacturing Systems*, 44, 154-164, (2017).
- [26] Dwivedi, S.; Rai, S.: "Rapid Prototyping Technology and Its Applications", *International Research Journal of Engineering and Technology*, 3, 332-339, (2016).
- [27] Hopkinson, N.; Hague, R.; Dickens, P.: "*Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*", John Wiley & Sons, (2006).
- [28] Burns, M.: "*Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing*", Prentice-Hall, Inc., (1993).
- [29] Prodways, 3D Printing for Aerospace and Defense Industry, https://www.prodways.com/en/industrial_segment/aerospace-defense/, (20 Augustos 2022).
- [30] Mouriaux, F. Motivations, Opportunities and Challenges of Additive Manufacturing for Space Application, <http://morf3d.com/wp-content/uploads/2015/05/RUAG-AATC-2015.pdf>, (20 Augustos 2019).
- [31] Navrotsky, V., Graichen, A., Brodin, H.: "Industrialisation of 3D printing (Additive Manufacturing) for gas turbine components repair and manufacturing, VGB PowerTech Autorenexemplar, 12, 48-52, (2015).
- [32] Edgar, J.; Tint, S.: "Additive Manufacturing Technologies: 3d Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing", *Johnson Matthey Technology Review*, 59, 193-198, (2015).
- [33] Wohlers, T. T.; Caffrey, T.: "*Wohlers Report 2014: 3d Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*", Wohlers Associates Fort Collins, CO, (2014).
- [34] Swainson, W. K.: "Method, Medium and Apparatus for Producing Three-Dimensional Figure Product": Google Patents, (1977).
- [35] Ciraud, P. A.: "Process and Device for the Manufacture of Any Objects Desired from Any Meltable Material", FRG Disclosure Publication, (1972).
- [36] Housholder, R.: "Molding Process. Us Patent 4 247 508.", (1981).
- [37] Guo, N.; Leu, M. C.: "Additive Manufacturing: Technology, Applications and Research Needs", *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8, 215-243, (2013).
- [38] Machine Design. Metal Am: Metal Additive Manufacturing Hits Critical Mass, <https://www.machinedesign.com/3d-printing-cad/document/21836864/metal-am-metal-additive-manufacturing-hits-critical-mass-pdf-download>, (20 Augustos 2019).
- [39] Hernandez, K. W.: "A Review of Additive Manufacturing", (2012).
- [40] Blather, J. E.: "Manufacture of Contour Relief Maps. Us Patent 473 901", (1892).
- [41] Munz, O. J.: "Photo-Glyph Recording. Us Patent 2 775 758", (1956).
- [42] Noorani, R.: "*Rapid Prototyping: Principles and Applications*", John Wiley & Sons Incorporated, (2006).
- [43] Kochan, A.: "Features Rapid Growth for Rapid Prototyping", *Assembly Automation*, (1997).
- [44] Grimm, T.: "*User's Guide to Rapid Prototyping*", Society of Manufacturing Engineers, (2004).
- [45] Wohlers, T.: "Wohlers Report 2010: Additive Manufacturing State of the Industry", *Wohlers Associates Inc., United States of America*, (2010).
- [46] Selective Laser Sintering, Birth of an Industry, <http://www.me.utexas.edu/news/>

- [news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry](#), (20 Ağustos 2019).
- [47] Deckard, C.: "Method and Apparatus for Producing Parts by Selective Sintering. Us Patent 4863538", (1986).
 - [48] Wohlers, T.: "Wohlers Report 2016. Wohlers Associates", *Inc.: Fort Collins, CO, USA*, (2016).
 - [49] Sachs, E. M.; Haggerty, J. S.; Cima, M. J.; Williams, P. A.: "Three-Dimensional Printing Techniques": Google Patents, (1993).
 - [50] Manriquez-Frayre, J.; Bourell, D.: "Selective Laser Sintering of Binary Metallic Powder", *1990 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, (1990).
 - [51] Reprap Technologies, <https://reprap.org/wiki/RepRap>, (20 Ağustos 2019).
 - [52] The Official History of the RepRap Project, <https://all3dp.com/history-of-the-reprap-project/>, (20 Ağustos 2022).
 - [53] Herderick, E.: "Additive Manufacturing of Metals: A Review ", *Materials Science and Technology*, (2011).
 - [54] Sachs, E.; Cima, M.; Williams, P.; Brancazio, D.; Cornie, J.: "Three Dimensional Printing: Rapid Tooling and Prototypes Directly from a Cad Model", (1992).
 - [55] Schleifenbaum, H.; Diatlov, A.; Hinke, C.; Bültmann, J.; Voswinckel, H.: "Direct Photonic Production: Towards High Speed Additive Manufacturing of Individualized Goods", *Production Engineering*, 5, 359-371, (2011).
 - [56] Schleifenbaum, H.; Meiners, W.; Wissenbach, K.; Hinke, C.: "Individualized Production by Means of High Power Selective Laser Melting", *CIRP Journal of manufacturing science and technology*, 2, 161-169, (2010).
 - [57] Sames, W. J.; List, F. A.; Pannala, S.; Dehoff, R. R.; Babu, S. S.: "The Metallurgy and Processing Science of Metal Additive Manufacturing", *International Materials Reviews*, 61, 315-360, (2016).
 - [58] Eos-Gmbh : 'History', <https://30years.eos.info/en>, (20 Ağustos 2019).
 - [59] Shellabear, M.; Nyrrhila, O.: "Dmls-Development History and State of the Art", *Laser Assisted Netshape engineering 4, proceedings of the 4th LANE*, 21-24, (2004).
 - [60] White, D.: "Ultrasonic Object Consolidation": Google Patents, (2003).
 - [61] Larson, R.: "Method and Device for Producing Three-Dimensional Bodies": Google Patents, (1998).
 - [62] Arcam-Ab : 'History', <https://www.ge.com/additive/who-we-are/about-arcam>, (20 Ağustos 2019).
 - [63] Dmg Mori Company Additive Manufacturing, <https://tr.dmgmori.com/ueruenler/makineler/additive-manufacturing>, (20 Ağustos 2019).
 - [64] Yılmaz, D.: "Katmanlı İmalat Teknolojileri Ve Havacılık Uygulamaları. Sektör Değerlendirme Raporu, Stm Mühendislik Teknoloji Danışmanlık, 1-22, Ankara", (2015).
 - [65] Crain' s Detroit Business, <https://www.crainsdetroit.com/manufacturing/3-d-printing-g-transitioning-hype-widespread-use>, (20 Ağustos 2019).
 - [66] Engineering News, Worldwide, 3d Printing Is Now Accelerating Rapidly, https://www.engineeringnews.co.za/article/worldwide-3d-printing-is-now-accelerating-rapidly-2018-11-08/rep_id:4136, (20 Ağustos 2019).
 - [67] Digital Engineering, Metal Additive Manufacturing Gains Significant Ground, <https://www.digitalengineering247.com/article/metal-additive-manufacturing-gains-significant-ground/>, (20 Ağustos 2019).
 - [68] Grand View Research, 3d Printing Market Size, Share & Analysis, Industry Report, 2020-2027, <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-printing-industry-analysis>, (23 Ağustos 2019).
 - [69] Campbell, I.; Diegel, O.; Kowen, J.; Wohlers, T.: "*Wohlers Report 2018: 3d Printing*

- and Additive Manufacturing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report", Wohlers Associates, (2018).
- [70] Hybridmanutech, 7 Families of Additive Manufacturing, https://www.additivemanufacturing.media/cdn/cms/7_families_print_version.pdf, (27 Şubat 2020).
- [71] Kruth, J. P.: "Material Incess Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques", *CIRP Annals*, 40, 603-614, (1991).
- [72] Poyraz, Ö.: "Metallerin Lazer Katmanlı İmalatında Kullanılan Proses Parametrelerinin Etkisinin, Modelleme Ve Simülasyon Yöntemleri Kullanılarak İncelenmesi", *Doktora*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye, (2018).
- [73] Additive Manufacturing Research Group, Vat Photopolymerisation <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/vatphotopolymerisation/>, (27 Şubat 2020).
- [74] Additive Manufacturing Research Group, Powder Bed Fusion <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>, (27 Şubat 2020).
- [75] Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B.: "Additive Manufacturing Technologies", vol. 17, Springer, (2014).
- [76] Chua, C. K.; Leong, K. F.; Lim, C. S.: "Rapid Prototyping: Principles and Applications (with Companion Cd-Rom)", World Scientific Publishing Company, (2010).
- [77] Görür, H.: "Lightweight Design for an Engine Structural Part by Using Topology Optimization for Additive Manufacturing", İstanbul Technical University Faculty of Aeronautics and Astronautics, (2018).
- [78] Threading 3d Printing Marketplace, Binder Jetting 3d Printing Technology, <https://www.threading.com/blog/%E2%80%8Bbinder-jetting-3d-printing-technology>, (27 Şubat 2020).
- [79] Additive Manufacturing Research Group, Material Jetting, <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/>, (27 Şubat 2020).
- [80] Custompartnet.Com, Laminated Object Manufacturing (Lom), <https://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing>, (27 Şubat 2020).
- [81] Additive Manufacturing Research Group, Material Extrusion, <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialextrusion/>, (27 Şubat 2020).
- [82] Morvan, S.; Hochsmann, R.; Sakamoto, M.: "Prometal Rct (Tm) Process for Fabrication of Complex Sand Molds and Sand Cores", *Rapid Prototyping*, 11, 1, (2005).
- [83] Manogharan, G.; Wysk, R.; Harrysson, O.; Aman, R.: "Aims—a Metal Additive-Hybrid Manufacturing System: System Architecture and Attributes", *Procedia Manufacturing*, 1, 273-286, (2015).
- [84] Kerbrat, O.; Mognol, P.; Hascoët, J.-Y.: "A New Dfm Approach to Combine Machining and Additive Manufacturing", *Computers in Industry*, 62, 684-692, (2011).
- [85] Hybrid Manufacturing Technologies, <http://www.hybridmanutech.com/>, (27 Şubat 2020).
- [86] Gao, W.; Zhang, Y.; Ramanujan, D.; Ramani, K.; Chen, Y.; Williams, C. B.; Wang, C. C. L.; Shin, Y. C.; Zhang, S.; Zavattieri, P. D.: "The Status, Challenges, and Future of Additive Manufacturing in Engineering", *Computer-Aided Design*, 69, 65-

- 89, (2015).
- [87] Xiong, Y.: "Investigation of the Laser Engineered Net Shaping Process for Nanostructured Cermets", University of California, Davis, (2009).
 - [88] Balla, V. K.; Bose, S.; Bandyopadhyay, A.: "Processing of Bulk Alumina Ceramics Using Laser Engineered Net Shaping", *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 5, 234-242, (2008).
 - [89] Frazier, W. E.: "Metal Additive Manufacturing: A Review", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, 1917-1928, (2014).
 - [90] Gu, D.; Meiners, W.; Wissenbach, K.; Poprawe, R.: "Laser Additive Manufacturing of Metallic Components: Materials, Processes and Mechanisms", *International Materials Reviews*, 57, 133-164, (2012).
 - [91] Orhangül, A.: "Validation of Dynamic Models of Additive Manufacturing Parts", Istanbul Technical University, (2018).
 - [92] Venuvinod, P. K.; Ma, W.: "Rapid Prototyping: Laser-Based and Other Technologies", Springer Science & Business Media, (2013).
 - [93] Wu, X.: "A Review of Laser Fabrication of Metallic Engineering Components and of Materials", *Materials Science and Technology*, 23, 631-640, (2007).
 - [94] Kruth, J.-P.; Levy, G.; Klocke, F.; Childs, T.: "Consolidation Phenomena in Laser and Powder-Bed Based Layered Manufacturing", *CIRP Annals*, 56, 730-759, (2007).
 - [95] Cansizoglu, O.; Harrysson, O.; Cormier, D.; West, H.; Mahale, T.: "Properties of Ti-6Al-4V Non-Stochastic Lattice Structures Fabricated Via Electron Beam Melting", *Materials Science and Engineering: A*, 492, 468-474, (2008).
 - [96] Arcam EBM a GE Additive Company, EBM Hardware, <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/hardware/>, (19 Eylül 2019).
 - [97] Liu, S.; Shin, Y. C.: "Additive Manufacturing of Ti6Al4V Alloy: A Review", *Materials & Design*, 164, 107552, (2019).
 - [98] Wysocki, B.; Maj, P.; Sitek, R.; Buhagiar, J.; Kurzydłowski, K. J.; Świążkowski, W.: "Laser and Electron Beam Additive Manufacturing Methods of Fabricating Titanium Bone Implants", *Applied Sciences*, 7, 657, (2017).
 - [99] Selective Laser Melting Versus Electron Beam Melting, <https://www.slideshare.net/carstenengel/selective-laser-melting-versus-electron-beam-melting>, (27 Şubat 2020).
 - [100] Facchini, L.; Magalini, E.; Robotti, P.; Molinari, A.; Höges, S.; Wissenbach, K.: "Ductility of a Ti-6Al-4V Alloy Produced by Selective Laser Melting of Prealloyed Powders", *Rapid Prototyping Journal*, (2010).
 - [101] Rafi, H.; Karthik, N.; 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*, 22, 3872-3883, (2013).
 - [102] Brandl, E.; Michailov, V.; Viehweger, B.; Leyens, C.: "Deposition of Ti-6Al-4V Using Laser and Wire, Part II: Hardness and Dimensions of Single Beads", *Surface and Coatings Technology*, 206, 1130-1141, (2011).
 - [103] Alcisto, J.; Enriquez, A.; Garcia, H.; Hinkson, S.; Steelman, T.; Silverman, E.; Valdovino, P.; Gigerenzer, H.; Foyos, J.; Ogren, J.: "Tensile Properties and Microstructures of Laser-Formed Ti-6Al-4V", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 20, 203-212, (2011).
 - [104] Mohammadhosseini, A.; Fraser, D.; Masood, S. H.; Jahedi, M.: "Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Manufactured by Electron Beam Melting Process", *Materials Research Innovations*, 17, 106-112, (2013).
 - [105] Dutta, B.; Froes, F. H.: "Additive Manufacturing of Titanium Alloys", *Advanced*

- Materials & Processes*, 172, 18-23, (2014).
- [106] Seifi, M.; Salem, A.; Beuth, J.; Harrysson, O.; Lewandowski, J. J.: "Overview of Materials Qualification Needs for Metal Additive Manufacturing", *JOM*, 68, 747-764, (2016).
 - [107] Dinda, G.; Song, L.; Mazumder, J.: "Fabrication of Ti-6al-4v Scaffolds by Direct Metal Deposition", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 39, 2914-2922, (2008).
 - [108] Hollander, D. A.; Von Walter, M.; Wirtz, T.; Sellei, R.; Schmidt-Rohlfing, B.; Paar, O.; Erli, H.-J.: "Structural, Mechanical and in Vitro Characterization of Individually Structured Ti-6al-4v Produced by Direct Laser Forming", *Biomaterials*, 27, 955-963, (2006).
 - [109] Kasperovich, G.; Hausmann, J.: "Improvement of Fatigue Resistance and Ductility of Tial6v4 Processed by Selective Laser Melting", *Journal of Materials Processing Technology*, 220, 202-214, (2015).
 - [110] 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 and Engineering: A*, 616, 1-11, (2014).
 - [111] Chastand, V.; Quaegebeur, P.; Maia, W.; Charkaluk, E.: "Comparative Study of Fatigue Properties of Ti-6al-4v Specimens Built by Electron Beam Melting (Ebm) and Selective Laser Melting (Slm)", *Materials Characterization*, 143, 76-81, (2018).
 - [112] Edwards, P.; O'Conner, A.; Ramulu, M.: "Electron Beam Additive Manufacturing of Titanium Components: Properties and Performance", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135, (2013).
 - [113] Hayes, B. J.; Martin, B. W.; Welk, B.; Kuhr, S. J.; Ales, T. K.; Brice, D. A.; Ghamarian, I.; Baker, A. H.; Haden, C. V.; Harlow, D. G.; Fraser, H. L.; Collins, P. C.: "Predicting Tensile Properties of Ti-6al-4v Produced Via Directed Energy Deposition", *Acta Materialia*, 133, 120-133, (2017).
 - [114] Hrabe, N.; Quinn, T.: "Effects of Processing on Microstructure and Mechanical Properties of a Titanium Alloy (Ti-6al-4v) Fabricated Using Electron Beam Melting (Ebm), Part 2: Energy Input, Orientation, and Location", *Materials Science and Engineering: A*, 573, 271-277, (2013).
 - [115] Zhai, Y.; Galarraga, H.; Lados, D. A.: "Microstructure, Static Properties, and Fatigue Crack Growth Mechanisms in Ti-6al-4v Fabricated by Additive Manufacturing: Lens and Ebm", *Engineering Failure Analysis*, 69, 3-14, (2016).
 - [116] Grylls, R.: "Lens Process White Paper: Fatigue Testing of Lens Ti-6-4.", *Optomec*, 1-5, (2005).
 - [117] Leuders, S.; Thöne, M.; Riemer, A.; Niendorf, T.; Tröster, T.; Richard, H. a.; Maier, H.: "On the Mechanical Behaviour of Titanium Alloy Tial6v4 Manufactured by Selective Laser Melting: Fatigue Resistance and Crack Growth Performance", *International Journal of Fatigue*, 48, 300-307, (2013).
 - [118] Seifi, M.; Salem, A.; Satko, D.; Shaffer, J.; Lewandowski, J. J.: "Defect Distribution and Microstructure Heterogeneity Effects on Fracture Resistance and Fatigue Behavior of Ebm Ti-6al-4v", *International Journal of Fatigue*, 94, 263-287, (2017).
 - [119] Hrabe, N.; Gnäupel-Herold, T.; Quinn, T.: "Fatigue Properties of a Titanium Alloy (Ti-6al-4v) Fabricated Via Electron Beam Melting (Ebm): Effects of Internal Defects and Residual Stress", *International Journal of Fatigue*, 94, 202-210, (2017).
 - [120] Choi, J.; Chang, Y.: "Characteristics of Laser Aided Direct Metal/Material Deposition Process for Tool Steel", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45, 597-607, (2005).
 - [121] Yang, Y.; Man, H.: "Microstructure Evolution of Laser Clad Layers of W-C-Co

- Alloy Powders", *Surface and Coatings Technology*, 132, 130-136, (2000).
- [122] Zhao, X.; Li, S.; Zhang, M.; Liu, Y.; Sercombe, T. B.; Wang, S.; Hao, Y.; Yang, R.; Murr, L. E.: "Comparison of the Microstructures and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting", *Materials & Design*, 95, 21-31, (2016).
 - [123] Gong, H.; Rafi, K.; Gu, H.; Ram, G. J.; Starr, T.; Stucker, B.: "Influence of Defects on Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Components Produced by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting", *Materials & Design*, 86, 545-554, (2015).
 - [124] Tammas-Williams, S.; Zhao, H.; Léonard, F.; Derguti, F.; Todd, I.; Prangnell, P.: "Xct Analysis of the Influence of Melt Strategies on Defect Population in Ti-6Al-4V Components Manufactured by Selective Electron Beam Melting", *Materials Characterization*, 102, 47-61, (2015).
 - [125] Kobryn, P.; Moore, E.; Semiatin, S.: "The Effect of Laser Power and Traverse Speed on Microstructure, Porosity, and Build Height in Laser-Deposited Ti-6Al-4V", *Scripta Materialia*, 43, 299-305, (2000).
 - [126] 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*, 45, 6260-6270, (2014).
 - [127] Hinderdael, M.; Strantza, M.; De Baere, D.; Devesse, W.; De Graeve, I.; Terryn, H.; Guillaume, P.: "Fatigue Performance of Ti-6Al-4V Additively Manufactured Specimens with Integrated Capillaries of an Embedded Structural Health Monitoring System", *Materials*, 10, 993, (2017).
 - [128] Edwards, P.; Ramulu, M.: "Fatigue Performance Evaluation of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V", *Materials Science and Engineering: A*, 598, 327-337, (2014).
 - [129] Mahamood, R. M.; Akinlabi, E. T.: "Effect of Laser Power on Surface Finish During Laser Metal Deposition Process", *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, (2014).
 - [130] Chan, K. S.; Koike, M.; Mason, R. L.; Okabe, T.: "Fatigue Life of Titanium Alloys Fabricated by Additive Layer Manufacturing Techniques for Dental Implants", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44, 1010-1022, (2013).
 - [131] Li, Y.; Yang, H.; Lin, X.; Huang, W.; Li, J.; Zhou, Y.: "The Influences of Processing Parameters on Forming Characterizations During Laser Rapid Forming", *Materials Science and Engineering: A*, 360, 18-25, (2003).
 - [132] Mercelis, P.; Kruth, J. P.: "Residual Stresses in Selective Laser Sintering and Selective Laser Melting", *Rapid Prototyping Journal*, (2006).
 - [133] Vayssette, B.; Saintier, N.; Brugger, C.; Elmay, M.; Pessard, E.: "Surface Roughness of Ti-6Al-4V Parts Obtained by SLM and EBM: Effect on the High Cycle Fatigue Life", *Procedia Engineering*, 213, 89-97, (2018).
 - [134] Çiğdem, M.: "*İmal Usulleri*", Çağlayan Kitabevi, (2006).
 - [135] Anık, S.: "Kaynak Tekniği El Kitabı", *Gedik Eğitim Vakfı Yayını*, (1991).
 - [136] Oğuz, B.: "*Demirdışı Metaller Kaynağı: Metalurji-Uygulama*", Oerlikon, (1990).
 - [137] Koleva, E.; Academy, B.; Mihaylov, G.; Bulgarian, M.; Mladenov, G. M.: "Experience on Electron Beam Welding", *Practical Aspects and Application and Electron Beam Irradiation*, (2015).
 - [138] Ventrella, V. A.; Berretta, J. R.; de Rossi, W.: "Pulsed Nd:Yag Laser Seam Welding of Aisi 316L Stainless Steel Thin Foils", *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 1838-1843, (2010).
 - [139] Tzeng, Y. F.: "Process Characterisation of Pulsed Nd:Yag Laser Seam Welding", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16, 10-18,

- (2000).
- [140] Gursel, A.: "The Wear Treatment by Nd:Yag Laser on Ti-6al-4v Alloy: Effect of the Spot Size on Laser Beam and Seam Morphology", *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 37, 1037-1048, (2015).
 - [141] Gursel, A.: "Effects of Nd:Yag Laser Pulse Frequency on the Surface Treatment of Ti 6al 4v Alloys", *Materials Testing*, 58, 395-400, (2016).
 - [142] Handbook, A.: "Welding, Brazing and Soldering", *ASM international*, 6, 1187, (1993).
 - [143] "DIN 1732: Alüminyum Kaynak Dolgu Metalleri".
 - [144] Chowdhury, S.; Yadaiah, N.; Murlidhar, M.; Kumar, D. A.; Paul, C.; Patra, S.; Singh, S.; Królczyk, G.; Prakash, C.: "Comparison of Microstructure and Mechanical Performance of Laser and Electron Beam Welded Ti6al4v Alloy", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43, 1-12, (2021).
 - [145] Kumar, C.; Das, M.; Paul, C. P.; Bindra, K. S.: "Characteristics of Fiber Laser Weldments of Two Phases (A+B) Titanium Alloy", *Journal of Manufacturing Processes*, 35, 351-359, (2018).
 - [146] Gursel, A.: "Crack Risk in Nd: Yag Laser Welding of Ti-6al-4v Alloy", *Materials Letters*, 197, 233-235, (2017).
 - [147] Sarre, B.; Flouriot, S.; Geandier, G.; Panicaud, B.; Rancourt, V. d.: "Mechanical Behavior and Fracture Mechanisms of Titanium Alloy Welded Joints Made by Pulsed Laser Beam Welding", *Procedia Structural Integrity*, 2, 3569-3576, (2016).
 - [148] Yang, X.; Li, S.; Qi, H.: "Ti-6al-4v Welded Joints Via Electron Beam Welding: Microstructure, Fatigue Properties, and Fracture Behavior", *Materials Science and Engineering: A*, 597, 225-231, (2014).
 - [149] Gao, X.-L.; Zhang, L.-J.; Liu, J.; Zhang, J.-X.: "A Comparative Study of Pulsed Nd:Yag Laser Welding and Tig Welding of Thin Ti6al4v Titanium Alloy Plate", *Materials Science and Engineering: A*, 559, 14-21, (2013).
 - [150] Squillace, A.; Prisco, U.; Ciliberto, S.; Astarita, A.: "Effect of Welding Parameters on Morphology and Mechanical Properties of Ti-6al-4v Laser Beam Welded Butt Joints", *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 427-436, (2012).
 - [151] Wang, S.; Wu, X.: "Investigation on the Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6al-4v Alloy Joints with Electron Beam Welding", *Materials & Design (1980-2015)*, 36, 663-670, (2012).
 - [152] Patnaik, A.; Poondla, N.; Bathini, U.; Srivatsan, T. S.: "On the Use of Gas Metal Arc Welding for Manufacturing Beams of Commercially Pure Titanium and a Titanium Alloy", *Materials and Manufacturing Processes*, 26, 311-318, (2011).
 - [153] Balasubramanian, T. S.; Balakrishnan, M.; Balasubramanian, V.; Manickam, M. A. M.: "Influence of Welding Processes on Microstructure, Tensile and Impact Properties of Ti-6al-4v Alloy Joints", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21, 1253-1262, (2011).
 - [154] Liu, H. J.; Zhou, L.; Liu, Q. W.: "Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Joints of Ti-6al-4v Titanium Alloy", *Materials & Design*, 31, 1650-1655, (2010).
 - [155] Akman, E.; Demir, A.; Canel, T.; Sınmazçelik, T.: "Laser Welding of Ti6al4v Titanium Alloys", *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 3705-3713, (2009).
 - [156] Zhang, Y.; Sato, Y. S.; Kokawa, H.; Park, S. H. C.; Hirano, S.: "Microstructural Characteristics and Mechanical Properties of Ti-6al-4v Friction Stir Welds", *Materials Science and Engineering: A*, 485, 448-455, (2008).

- [157] Wanjara, P.; Jahazi, M.: "Linear Friction Welding of Ti-6al-4v: Processing, Microstructure, and Mechanical-Property Inter-Relationships", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 36, 2149-2164, (2005).
- [158] Oh, J.; Kim, N. J.; Lee, S.; Lee, E. W.: "Correlation of Fatigue Properties and Microstructure in Investment Cast Ti-6al-4v Welds", *Materials Science and Engineering: A*, 340, 232-242, (2003).
- [159] Denney, BY P. E. and Metzbowe E. A., "Laser Beam Welding of Titanium", (1989).
- [160] Yunlian, Q.; Ju, D.; Quan, H.; Liying, Z.: "Electron Beam Welding, Laser Beam Welding and Gas Tungsten Arc Welding of Titanium Sheet", *Materials Science and Engineering: A*, 280, 177-181, (2000).
- [161] Murr, L. E.; Esquivel, E. V.; Quinones, S. A.; Gaytan, S. M.; Lopez, M. I.; Martinez, E. Y.; Medina, F.; Hernandez, D. H.; Martinez, E.; Martinez, J. L.; Stafford, S. W.; Brown, D. K.; Hoppe, T.; Meyers, W.; Lindhe, U.; Wicker, R. B.: "Microstructures and Mechanical Properties of Electron Beam-Rapid Manufactured Ti-6al-4v Biomedical Prototypes Compared to Wrought Ti-6al-4v", *Materials Characterization*, 60, 96-105, (2009).
- [162] Wits, W. W.; Becker, J. M. J.: "Laser Beam Welding of Titanium Additive Manufactured Parts", *3rd Cirp Global Web Conference - Production Engineering Research Advancement Beyond State of the Art (Cirpe2014)*, 28, 70-75, (2015).
- [163] Bajpei, T.; Chelladurai, H.; Ansari, M. Z.: "Experimental Investigation and Numerical Analyses of Residual Stresses and Distortions in Gma Welding of Thin Dissimilar Aa5052-Aa6061 Plates", *Journal of Manufacturing Processes*, 25, 340-350, (2017).
- [164] Omoniyi, P. O.; Mahamood, R. M.; Arthur, N.; Pityana, S.; Skhosane, S.; Okamoto, Y.; Shinonaga, T.; Maina, M. R.; Jen, T. C.; Akinlabi, E. T.: "Joint Integrity Evaluation of Laser Beam Welded Additive Manufactured Ti6al4v Sheets", *Scientific Reports*, 12, 4062, (2022).
- [165] Caiazzo, F.; Alfieri, V.: "Optimization of Laser Beam Welding of Steel Parts Made by Additive Manufacturing", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114, 3123-3136, (2021).
- [166] Iakhin, A.; Martynov, S.: "Effect of Electron Beam Welding on the Microstructure and Mechanical Characteristics of Wrought and Slm Titanium Alloy Ti-6al-4v Parts", *AIP Conference Proceedings*, 020124, (2020).
- [167] Madeja, M.; Karoluk, M.; Smolina, I.: "Welding of Ti-5al-5mo-5 v-1cr-1fe Parts Manufactured in the Electron Beam Melting", *Materials & Design*, 195, 108969, (2020).
- [168] Rautio, T.; Hamada, A.; Mäkikangas, J.; Jaskari, M.; Järvenpää, A.: "Laser Welding of Selective Laser Melted Ti6al4v: Microstructure and Mechanical Properties", *Materials Today: Proceedings*, (2020).
- [169] Rautio, T.; Mäkikangas, J.; Jaskari, M.; Keskitalo, M.; Järvenpää, A.: "Microstructure and Mechanical Properties of Laser Welded 316l Slm Parts", *Key Engineering Materials*, 306-311, (2020).
- [170] Singh, A. K.; Kumar, B.; Jha, K.; Astarita, A.; Squillace, A.; Franchitti, S.; Arora, A.: "Friction Stir Welding of Additively Manufactured Ti-6al-4v: Microstructure and Mechanical Properties", *Journal of Materials Processing Technology*, 277, 116433, (2020).
- [171] Voropaev, A.; Stramko, M.; Sorokin, A.; Logachev, I.; Kuznetsov, M.; Gook, S.: "Laser Welding of Inconel 718 Nickel-Based Alloy Layer-by-Layer Products", *Materials Today: Proceedings*, (2020).
- [172] Chalawadi, D.; Babu, S. P. K.; Dhinakaran, V.: "Experimental Investigation of Tig

- Welded Additive Manufactured Inco-718 Sheets", *Materials Research*, 23, (2020).
- [173] Sun, Y. Y.; Wang, P.; Lu, S. L.; Li, L. Q.; Nai, M. L. S.; Wei, J.: "Laser Welding of Electron Beam Melted Ti-6Al-4V to Wrought Ti-6Al-4V: Effect of Welding Angle on Microstructure and Mechanical Properties", *Journal of Alloys and Compounds*, 782, 967-972, (2019).
 - [174] Rubino, F.; Scherillo, F.; Franchitti, S.; Squillace, A.; Astarita, A.; Carlone, P.: "Microstructure and Surface Analysis of Friction Stir Processed Ti-6Al-4V Plates Manufactured by Electron Beam Melting", *Journal of Manufacturing Processes*, 37, 392-401, (2019).
 - [175] Qin, P. T.; Damodaram, R.; Maity, T.; Zhang, W. W.; Yang, C.; Wang, Z.; Prashanth, K. G.: "Friction Welding of Electron Beam Melted Ti-6Al-4V", *Materials Science and Engineering: A*, 761, 138045, (2019).
 - [176] Pasang, T.; Kirchner, A.; Jehring, U.; Aziziderouei, M.; Tao, Y.; Jiang, C.-P.; Wang, J.; Aisyah, I.: "Microstructure and Mechanical Properties of Welded Additively Manufactured Stainless Steels Ss316L", *Metals and Materials International*, 25, 1278-1286, (2019).
 - [177] Yang, J.; Wang, Y.; Li, F.; Huang, W.; Jing, G.; Wang, Z.; Zeng, X.: "Weldability, Microstructure and Mechanical Properties of Laser-Welded Selective Laser Melted 304 Stainless Steel Joints", *Journal of Materials Science & Technology*, 35, 1817-1824, (2019).
 - [178] Zhang, C.; Bao, Y.; Zhu, H.; Nie, X.; Zhang, W.; Zhang, S.; Zeng, X.: "A Comparison between Laser and Tig Welding of Selective Laser Melted AlSi10Mg", *Optics & Laser Technology*, 120, 105696, (2019).
 - [179] Biffi, C. A.; Fiocchi, J.; Tuissi, A.: "Laser Weldability of AlSi 10 Mg Alloy Produced by Selective Laser Melting: Microstructure and Mechanical Behavior", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28, 6714-6719, (2019).
 - [180] Nahmany, M.; Hadad, Y.; Aghion, E.; Stern, A.; Frage, N.: "Microstructural Assessment and Mechanical Properties of Electron Beam Welding of AlSi10Mg Specimens Fabricated by Selective Laser Melting", *Journal of Materials Processing Technology*, 270, 228-240, (2019).
 - [181] Hu, X.; Xue, Z.; Zhao, G.; Yun, J.; Shi, D.; Yang, X.: "Laser Welding of a Selective Laser Melted Ni-Base Superalloy: Microstructure and High Temperature Mechanical Property", *Materials Science and Engineering: A*, 745, 335-345, (2019).
 - [182] Fabio Scherillo, A. A., Luigi Carrino, Carmine Pirozzi, Umberto Prisco & Antonino Squillace: "Linear Friction Welding of Ti-6Al-4V Parts Produced by Electron Beam Melting", *Materials and Manufacturing Processes*, 34, (2018).
 - [183] Scherillo, F.; Astarita, A.; Prisco, U.; Contaldi, V.; di Petta, P.; Langella, A.; Squillace, A.: "Friction Stir Welding of AlSi10Mg Plates Produced by Selective Laser Melting", *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 7, 457-463, (2018).
 - [184] Yu, H.; Li, F.; Yang, J.; Shao, J.; Wang, Z.; Zeng, X.: "Investigation on Laser Welding of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V Parts: Weldability, Microstructure and Mechanical Properties", *Materials Science and Engineering: A*, 712, 20-27, (2018).
 - [185] Tavlovich, BY B. and KATZ R., "Ebw and Lbw of Additive Manufactured Ti6Al4V Products", *Welding Journal*, (2018).
 - [186] Matilainen, V. P.; Pekkarinen, J.; Salminen, A.: "Weldability of Additive Manufactured Stainless Steel", *Physics Procedia*, 83, 808-817, (2016).
 - [187] Nahmany, M.; Rosenthal, I.; Benishti, I.; Frage, N.; Stern, A.: "Electron Beam Welding of AlSi10Mg Workpieces Produced by Selected Laser Melting Additive Manufacturing Technology", *Additive Manufacturing*, 8, 63-70, (2015).
 - [188] Prashanth, K. G.; Damodaram, R.; Scudino, S.; Wang, Z.; Prasad Rao, K.; Eckert,

- J.: "Friction Welding of Al–12si Parts Produced by Selective Laser Melting", *Materials & Design*, 57, 632-637, (2014).
- [189] Järvinen, J.-P.: "Welding of Additively Manufactured Stainless Steel Parts: Comparative Study between Sheet Metal and Selective Laser Melted Parts", (2014).
- [190] Casalino, G.; Campanelli, S. L.; Ludovico, A. D.: "Laser-Arc Hybrid Welding of Wrought to Selective Laser Molten Stainless Steel", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68, 209-216, (2013).
- [191] Casalino, G.; Campanelli, S. L.; Contuzzi, N.; Ludovico, A. D.: "Experimental Investigation and Statistical Optimisation of the Selective Laser Melting Process of a Maraging Steel", *Optics & Laser Technology*, 65, 151-158, (2015).
- [192] Kumar, C.; Das, M.; Paul, C.; Singh, B.: "Experimental Investigation and Metallographic Characterization of Fiber Laser Beam Welding of Ti-6al-4v Alloy Using Response Surface Method", *Optics and Lasers in Engineering*, 95, 52-68, (2017).
- [193] Babu, N. K.; Raman, S. G. S.; Murthy, C. S.; Reddy, G. M.: "Effect of Beam Oscillation on Fatigue Life of Ti–6al–4v Electron Beam Weldments", *Materials Science and Engineering: A*, 471, 113-119, (2007).
- [194] Kimura, M.; Fuji, A.; Konno, Y.; Itoh, S.: "Thermal Stress and Fracture of Friction-Welded Joint between Pure Ni and Pure Al with Post-Weld Heat Treatment", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 15, 300-310, (2015).
- [195] Kimura, M.; Nakamura, S.; Kusaka, M.; Seo, K.; Fuji, A.: "Mechanical Properties of Friction Welded Joint between Ti–6al–4v Alloy and Al–Mg Alloy (Aa5052)", *Science and Technology of Welding and Joining*, 10, 666-672, (2005).
- [196] Klassen, A.; Forster, V. E.; Juechter, V.; Körner, C.: "Numerical Simulation of Multi-Component Evaporation During Selective Electron Beam Melting of TiAl", *Journal of Materials Processing Technology*, 247, 280-288, (2017).
- [197] Arcam Ebm Q20, <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/ebm-machines>, (18 Nisan 2020).
- [198] de Formanoir, C.; Michotte, S.; Rigo, O.; Germain, L.; Godet, S.: "Electron Beam Melted Ti–6al–4v: Microstructure, Texture and Mechanical Behavior of the as-Built and Heat-Treated Material", *Materials Science and Engineering: A*, 652, 105-119, (2016).
- [199] Motorcu, A. R.: "Nikel Esaslı Süperalaşımların ve Titanyum Alaşımlarının İşlenebilirliği 1. Bölüm: Sinterlenmiş Karbür Takımların Performanslarının Değerlendirilmesi", *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 25, 302-330, (2009).
- [200] Ensarioğlu, C. ve Çakır, M. C.: "Titanyum Ve Alaşımlarının İşlenebilirlik Etüdü", *Mühendis ve Makina*, 546, 36-46, (2005).
- [201] Ezugwu, E.; Wang, Z.: "Titanium Alloys and Their Machinability—a Review", *Journal of Materials Processing Technology*, 68, 262-274, (1997).
- [202] Xue, X.; Pereira, A. B.; Amorim, J.; Liao, J.: "Effects of Pulsed Nd: Yag Laser Welding Parameters on Penetration and Microstructure Characterization of a Dp1000 Steel Butt Joint", *Metals*, 7, 292, (2017).
- [203] Nayak, S.; Biro, E.; Zhou, Y.: "Laser Welding of Advanced High-Strength Steels (Ahss)", in *Welding and Joining of Advanced High Strength Steels (Ahss)*, Elsevier, 71-92, (2015).
- [204] Dt-Er Ti 5 Kaynak Teli, <https://weldingmaterialsales.com/catalog/erti-5/>, (24 Mart 2022).
- [205] Alm 200 Mobil Lazer Kaynak Makinesi, <https://www.atlascnc.com/portfolio/alm-serisi-lazer-kaynak-makinalari/#1565003432637-27191fe9-9944>, (24 Mart 2020).

- [206] Dynasty® 280 Dx (Cps) International Kaynak Makinesi, (2021).
- [207] Kuhn, H.; Medlin, D.: "Asm Handbook. Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation", *ASM International, Member/Customer Service Center, Materials Park, OH 44073-0002, USA, 2000.* 998, (2000).
- [208] Blackburn, J.: "3 - Laser Welding of Metals for Aerospace and Other Applications", in *Welding and Joining of Aerospace Materials*, Chaturvedi, M. C., Ed., Woodhead Publishing, 75-108, (2012).
- [209] Beriş, B.: "Effects of Gas Shielding Flow Rate on Weld Quality of Tig Welding in Ti6al4v Alloy", Istanbul Technical University, (2012).
- [210] Sefer, B.: "Oxidation and Alpha-Case Phenomena in Titanium Alloys Used in Aerospace Industry: Ti-6al-2sn-4zr-2mo and Ti-6al-4v", Luleå tekniska universitet, (2014).
- [211] Wu, S.; Yu, X.; Zuo, R.; Zhang, W.; Xie, H.; Jiang, J.: "Porosity, Element Loss, and Strength Model on Softening Behavior of Hybrid Laser Arc Welded Al-Zn-Mg-Cu Alloy with Synchrotron Radiation Analysis", (2013).
- [212] Gerard, D. A.; Koss, D. A.: "The Influence of Porosity on Short Fatigue Crack Growth at Large Strain Amplitudes", *International Journal of Fatigue*, 13, 345-352, (1991).
- [213] Yigitbasi, S. T.: "Mechanical Properties of Ti6al4v Parts Produced by Electron Beam Melting and Topology Optimization in Different Building Directions", (2018).