SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Ti6Al4V ALAŞIMININ MİKRO YAPI VE MEKANİK DAVRANIŞI ÜZERİNDE PROSES PARAMETRELERİNİN ETKİSİ

Niyazi BASKIN

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Ti6Al4V ALAŞIMININ MİKRO YAPI VE MEKANİK DAVRANIŞI ÜZERİNDE PROSES PARAMETRELERİNİN ETKİSİ

Niyazi BASKIN
0009-0006-4262-6214

Doç. Dr. Celalettin YÜCE
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2024
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Ti6Al4V ALAŞIMININ MİKRO YAPI VE MEKANİK DAVRANIŞI ÜZERİNDE PROSES PARAMETRELERİNİN ETKİSİ

Niyazi BASKIN

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Celalettin YÜCE

Eklemeli imalat yöntemi, bilgisayar destekli tasarım verilerini kullanılarak, katman üzeri katman birleştirme metodu ile istenen ürünün elde edilmesine olanak sunar. Geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla kompleks parçaların üretilebilmesi ile yüksek derecede tasarım özgürlüğü sağlar. Başta uzay ve havacılık olmak üzere, otomotiv, biyomedikal, savunma sanayi ve enerji sektörü gibi kritik endüstrilerde parça imalatı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Eklemeli imalat yöntemlerinden arasında yer alan seçici lazer ergitme (SLE) üretim süreçlerinde kullanılan parametreler, üretilen parçanın mekanik, metalurjik davranışının farklılaşmasında önemli bir etkiye sahiptir. Nihai ürünün özelliklerini ciddi derecede değiştirebilmektedir. Bu sebeple gerçekleştirilen deneysel çalışmada, lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve lazer tarama dönüş açısını kapsayan farklı değerlerde seçilen parametrelerin, SLE yöntemi ile Ti6Al4V alaşımı kullanılarak üretilmiş numunelerin nihai çekme dayanımı, sertlik değeri, darbe enerjisi, yüzey pürüzlülüğü, porozite oranı ve mikroyapıya olan etkisi incelenmiştir. Çekme dayanımının ve sertlik değerinin lazer gücünün belirli bir değere kadar artması ile arttığı, lazer gücü belirli sınır değeri geçtiğinde sonuçlarda aynı etkiyi göstermeyerek azalış trendine geçtiği tespit edilmiştir. Darbe enerjisinde, tarama dönüş açı değişimleri etkili olmuştur. En düşük darbe enerji değeri ise 8,7 J değeriyle 180° dönme açısında kaydedilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün lazer gücünün artmasıyla önemli ölçüde azaldığı, yüksek tarama hızlarında ise artış gösterdiği görülmüştür. 220 W lazer gücü seviyesinde, üretim yönüne paralel 8,9 µm ve üretim yönüne dik 8,35 µm yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Lazer gücü, porozite oranına etkisi nedeniyle malzeme yoğunluğunu belirlemede en etkili faktör olarak tespit edilip, 160 W lazer gücünde %0,48 ile nispeten yüksek bir porozite oranı kaydedilmiştir. Ayrıca, tarama hızındaki artış, porozite oranında da artışa sebep olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Seçici lazer ergitme, lazer toz yataklı füzyon, Ti6Al4V, mekanik özellikler, porozite, mikroyapı
2024, vii + 119 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

EFFECT OF PROCESS PARAMETERS ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL BEHAVIOR OF Ti6Al4V ALLOY FABRICATED BY SELECTIVE LASER MELTING

Niyazi BASKIN

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Dr. Celalettin YÜCE

Additive manufacturing is a method that enables the production of a desired product by using computer-aided design data and a layer-by-layer bonding method. Compared to traditional manufacturing methods, it offers a high degree of design freedom by enabling the production of complex parts. It is widely used for the production of parts in critical industries such as aerospace, automotive, biomedical, defense, and energy sectors. In selective laser melting (SLM), one of the additive manufacturing methods, the parameters used in the production process have a critical impact on the mechanical behavior and density of the product, thereby altering its properties. In this research, the influence of production parameters namely, laser power, scanning speed, hatch spacing, and laser scan rotation angle on the tensile strength, hardness, impact energy, surface roughness, porosity level, and microstructure of Ti6Al4V fabricated using the SLM technique was examined. It was found that the tensile strength and hardness increased with the increase in laser power up to a certain level, beyond which further increases in laser power did not yield the same effect. Changes in the scanning rotation angle were found to be effective on impact energy, with the lowest impact energy value recorded at 8.7 J with a 180° rotation angle. Elevating the laser power notably reduced the surface roughness, whereas increased scanning speeds led to a rise in it. At a laser power level of 220 W, surface roughness values of 8.9 μm parallel to the build direction and 8.35 μm perpendicular to the build direction were obtained. Laser power was identified as the most influential factor in determining the porosity rate, and consequently, the material density, with a high porosity rate of 0.48% recorded at 160 W laser power. Furthermore, a rise in scanning speed also resulted in a higher porosity rate.

Key words: Selective laser melting, laser powder bed fusion, Ti6Al4V, mechanical properties, porosity, microstructure
2024, vii + 119 pages.

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenim sürecim boyunca, tez konusunun belirlenmesinden deneylerin titizlikle gerçekleştirilmesine ve elde edilen sonuçların akademik bir değer haline dönüştürülmesine kadar geçen her aşamada bilgi ve tecrübesiyle yanımda olan, rehberliği, desteği ve sabrıyla yol gösteren danışman hocam Doç. Dr. Celalettin Yüce'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş.'ye, doktora tezimin deneysel çalışmaları sırasında sağladığı değerli destek ve imkanlar için teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte sundukları iş birliği, bilgi paylaşımı çalışmamın bilimsel katkısını artırmamda önemli bir rol oynamıştır.

Eğitim ve öğretim hayat yolculuğumda maddi, manevi yanımda olan, aldığım kararları destekleyen anne, babam ve kardeşime, fedakârlık, anlayış ve tüm destekleri için kıymetli eşime, yaptığım çalışmaların bir örnek teşkil ederek daha ileri seviyelere taşımasını, başarılar kaydederek toplum ve bilim adına katkı sağlayan, değer üreten çalışmalar yapmasını ümit ettiğim sevgili kızım Aylin'e teşekkürlerimi sunarım.

Niyazi BASKIN
…/…/…….

İÇİNDEKİLER

ÖZET viii
ABSTRACT ix
TEŞEKKÜR x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xii
ŞEKİLLER DİZİNİ xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ xvii
1.GİRİŞ…… 1
2.KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 5
2.1. Eklemeli İmalat Yöntemi 5
2.1.1. Eklemeli imalat uygulama alanları 7
2.1.2. Eklemeli imalat yönteminin avantajları 13
2.1.3. Eklemeli imalat teknolojisinin sınıflandırılması 15
2.2. Seçici Lazer Ergitme (SLE) Yöntemi 22
2.2.1. Seçici lazer ergitme temel proses parametreleri ve etkileri 24
2.2.2. Seçici lazer ergitme yöntemi avantajları 41
2.3. SLE Yönteminde Kullanılan Metal ve Alaşımları 42
2.4. Kaynak Araştırması 47
3. MATERYAL ve YÖNTEM 55
3.1. Deney Numunelerinin Üretiminde Kullanılan Toz Yapısı 55
3.2. Deney Numunelerinin Üretimi, Parametreler ve Boyutlar 56
3.3. Çekme Testi 60
3.4. Çentik Darbe Testi 61
3.5. Yüzey Pürüzlülük Testi 63
3.6. Porozite Ölçümleri 64
3.7 Metalografik İnceleme 66
3.8. Mikrosertlik Testi 67
4.BULGULAR ve TARTIŞMA 69
4.1. Proses Parametrelerinin Çekme Dayanımına Etkisi 69
4.2. Proses Parametrelerinin Darbe Dayanımına Etkisi 81
4.3 Proses Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi 87
4.4. Proses Parametrelerinin Porozite Üzerindeki Etkisi 92
4.5. Proses Parametrelerinin Mikrosertlik Üzerindeki Etkisi 98
5.SONUÇ 104
KAYNAKLAR 108
ÖZGEÇMİŞ 119

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
E_V	Hacimsel enerji yoğunluğu (J/mm^3)
H_V	Vickers sertlik
α	Alpha
β	Beta
P	Lazer gücü (W)
v	Tarama hızı (mm/s)
t	Katman kalınlığı
h	Tarama aralığı
µm	Mikrometre
Ti	Titanyum
Al	Alüminyum
V	Vanadyum

Kısaltmalar	**Açıklama**
SLE	Seçici lazer ergitme
SLS	Seçici lazer sinterleme
DMLS	Direkt metal lazer sinterleme
EBM	Elektron ışın ergitme
STL	Stereolithography
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Derneği
HIP	Sıcak izostatik presleme
LED	Doğrusal enerji yoğunluğu (J/mm3)
L-PBF	Lazer toz yatak füzyon birleştirme

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Eklemeli imalatın, üç boyutlu cisimlerin tasarım aşamasından nihai ürün elde ediliş sürecine kadar proses akışı (Kiran ve diğerleri, 2018)	7
Şekil 2.2.	Havacılık endüstrisinde kullanılan motor türbin kanadının a) model ve enine kesit görünümü b) SLE ile destekleri ile üretilen türbin kanadı (Magerramova ve diğerleri, 2016) …..	8
Şekil 2.3.	SLE metodu ile üretilmiş karter kapağı (https://www.slm solutions.com/industries/automotive/ (Erişim Tarihi: 16.03.2024) …….	9
Şekil 2.4.	Bugatti Chiron'un eklemeli imalat ile üretilen titanyum fren kaliperi (thefabricator.com, Erişim Tarihi: (16.03.2024)…….	9
Şekil 2.5.	Başa baş noktası analizi geleneksel ve eklemeli imalat karşılaştırması (Janssen ve diğerleri, 2014) …….....	10
Şekil 2.6.	Geleneksel üretim ve eklemeli imalat süreci için maliyetlerin karşılaştırılması (Gupta ve Taufik, 2022) ……...	11
Şekil 2.7.	Eklemeli imalat teknolojileri kullanılarak üretilen biyomedikal ürünler; (a) SLE kullanılarak üretilen diş protezi, (b) EBM kullanılarak üretilen kalça protezi ve (c) SLE kullanılarak üretilen diş köprü implantı (Kusuma, 2016)	12
Şekil 2.8.	Üniversal mafsal (a) CAD Model, (b) Eklemeli imalat yöntemi ile üretim sonrası görüntüsü (Su ve diğerleri, 2013)	13
Şekil 2.9.	Geleneksel ve katmanlı imalatta malzeme israfı (Erişim adresi:https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-vs-cnc-160320184/) ……	14
Şekil 2.10.	Havacılık endüstrisinde kullanılan parçanın eklemeli imalat yönteminde topoloji optimizasyonu yapılarak üretilmesi (https://blogs.sw.siemens.com/nx-manufacturing/additive-manufacturing-aerospace-industry-efficiency, (Erişim Tarihi: 12.03.2024) ……	15
Şekil 2.11.	Toz yataklı birleştirme metotları ……	17
Şekil 2.12.	EBM Yönteminin çalışma prensibi (Bansal ve diğerleri, 2022) ……...	19
Şekil 2.13.	SLS yönteminin çalışma prensibi (Kruth ve diğerleri, 2003)	20
Şekil 2.14.	DMSL yönteminin çalışma prensibi (Bineli ve diğerleri, 2011) ……...	21
Şekil 2.15.	Seçici lazer ergitme prosesinin üretim ve sonrası proses süreci (Wang ve diğerleri, 2016) …….	23
Şekil 2.16.	Seçici lazer ergitme yöntemi şematik gösterim (Mumtaz ve diğerleri, 2008)…….	24
Şekil 2.17.	SLE sürecinde parametrelerin kontrolü (Aboulkhair ve diğerleri, 2014)…….	25
Şekil 2.18.	Farklı işlem parametreleriyle üretilen numuneler üzerindeki tarama izlerinin üstten görünümleri (Kempen ve diğerleri, 2015) ……	27

Şekil 2.19.	Lazer gücü ve tarama hızı parametre seçenekleriyle işlem sonuçları (Calignano ve diğerleri, 2019) …….	28
Şekil 2.20.	Ti6Al4V alaşımı ile 80 W lazer gücü ve farklı tarama hızları ile üretilen çekme numunelerinin kırılma yüzey morfolojileri (a), (b) 400 mm/s; (c), (d) 600 mm/s; (e), (f) 1000 mm/s (Sun ve diğerleri, 2022) ……...	29
Şekil 2.21.	SLE metodunda başlıca üretim parametreleri: lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığı (Yap ve diğerleri, 2015) ……	30
Şekil 2.22.	Farklı tarama strateji tiplerinin şeması: (a) tek yönlü tarama; (b) çift yönlü/zikzak tarama; (c) ada taraması; (d) tek yönlü taramaya dayalı değişen diziler; (e) çift yönlü taramaya dayalı değişen diziler; (f) sarmal taraması; (g) kontur taraması; (h) çift yönlü, çift geçişli lazer ışını; (i) çift yönlü, çift geçişli lazer ışını ve katmanlar arasında 90° dönebilen tarama vektörü; (j) çapraz tarama; (k) çift yönlü, tek geçişli lazer ışını, (l) ardışık katmanlar arasında tek yönlü tarama vektörünün 90° dönüşü, (m) tarama vektörünün 45° dönüşü (Jia ve diğerleri, 2021) ……	34
Şekil 2.23.	Ti6Al4V alaşımı ile üretilen numunenin kırılma yüzeyinde mevcut olan ergimemiş parçacıkların koloni halindeki görüntüsü (Kasperovich ve Hausmann, 2015) ……	35
Şekil 2.24.	Füzyon eksikliği kusuru ve ergimemiş toz (Zhang ve diğerleri, 2017), (Xu ve diğerleri, 2020) …….	36
Şekil 2.25.	(a) ısıtma (b) SLE imalatında soğutma sırasında ısı girişinin stres durumu üzerindeki etkisini gösteren şematik görüntüler, (c) artık gerilme kaynaklı malzemede çatlak oluşumu (Mercelis ve diğerleri, 2006; 3dprintingindustry.com (Erişim Tarihi: 30.07.2024)……..	38
Şekil 2.26.	SLE ile üretilen saf titanyum malzemede (a), (b) toplaşma etkisi (Attar ve diğerleri, 2014) ……...	38
Şekil 2.27.	SLE tekniği ile üretilen parçada sıcak yırtılmaların varlığı (Pogson ve diğerleri, 2004) …….	39
Şekil 2.28.	Optik mikroskop ile balık pul görünümü (Hou ve diğerleri, 2020)……	40
Şekil 2.29.	Malzeme yapısı kalıntı porozitelerin morfolojisi (Kasperovich ve diğerleri, 2016)…….	41
Şekil 2.30.	Saf Titanyumun faz dönüşümü ve kristal hücre yapısı (Veiga ve diğerleri, 2012) ……...	44
Şekil 2.31.	Seçici lazer eritme (SLE) işleminden sonra Ti6Al4V titanyum alaşımının SEM mikro yapısı. İğnemsi α'-faz martenzitin β-fazının üzerindeki dağılımı (Zochowski ve diğerleri, 2021) ……	46
Şekil 3.1.	(a) Küresel şekil sergileyen homojen olarak dağılmış Ti6Al4V toz parçacıkları, (b) toz parçacıklarının boyut dağılımının SEM görüntüleri……...	55
Şekil 3.2.	ENAVISION 250P modeli seçici lazer ergitme (SLE) cihazı	56

Şekil 3.3.	SLE ile üretilen numunelerin platform üzerindeki görünüm ve üretim yönü ……	57
Şekil 3.4.	P2 (190 W) numunesinin SEM ile (a) üstten görünümü (b) zikzak desen ve tarama aralığı boyut görünümü ……	58
Şekil 3.5.	Tarama deseni olarak zikzak strateji benimsenen, bir sonraki komşu katmanda belirtilen açı değerlerinde dönüş gösteren desenlerin şematik görünümü (a) 45°, (b) 67°, (c) 90°, (d) 180°……..	59
Şekil 3.6.	(a) Çekme deneyi numunesinin, (b) V Çentikli Charpy deney numunesinin ve (c) Yüzey pürüzlülüğü ve mikro yapı analiz numunesinin boyutları (tüm birimler: mm)…….	60
Şekil 3.7.	ZwickRoell evrensel çekme cihazı …….	61
Şekil 3.8.	ZwickRoell RKP450 çentik darbe test cihazı……..	62
Şekil 3.9.	(a) Çentik darbe test numuneleri, (b) ölçüm sonuç örneği (R3 Numunesi) …….	62
Şekil 3.10.	Mitutoyo SJ-410 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı……	63
Şekil 3.11.	Numune üretim yönü baz alınarak yapılan yüzey pürüzlülüğünün ölçüm yönlerinin görünümü……..	63
Şekil 3.12.	(a) Üretim yönüne paralel ölçüm (b) ölçüm sonuç örneği…..	64
Şekil 3.13.	Nikon XT H 225 ST X-ışını bilgisayarlı tomografi cihazı ….	64
Şekil 3.14.	Mikroyapı numunesinin (a) X-Işını bilgisayarlı tomografi cihazında konumlandırılması (b) gözeneklerin morfolojik dağılımı……	65
Şekil 3.15.	Numune yapısındaki gözeneklerin hacimsel değerleri ve dağılım grafiği……..	65
Şekil 3.16.	(a) Bakalite alınma öncesi hazırlık, (b) bakalit cihazı (c) bakalite alınan numuneler……	66
Şekil 3.17.	(a) Taramalı elektron mikroskobunda numunelerin konumlandırılması, çentik darbe test numunesi kırılma yüzeyi, (b) makro, (c) mikro görüntüsü……...	67
Şekil 3.18.	(a) Mikrosertlik ölçüm cihazı (b) Numune yüzeyine elmas uç giriş görüntüsü…….	67
Şekil 3.19.	Mikrosertlik ölçüm noktaları ve numune üretim yönü gösterimi ……..	68
Şekil 4.1.	(a) SLE ile üretilmiş numunelerin platform üzerindeki görüntüsü (b) çekme testi numuneleri …….	69
Şekil 4.2.	Lazer gücüne bağlı olarak değişen çekme test sonuçları ……	70
Şekil 4.3.	Yönlenmiş a' martenzit oluşumu (P3 Numunesi)……	71
Şekil 4.4.	Numunelerin gerilim-gerinim eğrisi (a) P1, (b) P2, (c) P3…..	71
Şekil 4.5.	Tarama hızına bağlı olarak değişen çekme test sonuçları …..	72
Şekil 4.6.	Numunelerin gerilim-gerinim eğrisi (a) V1, (b) V2, (c) V3	73
Şekil 4.7.	Mikroyapı numunelerinden optik mikroskop ile elde edilen görüntüler; (a) P2, (b) P3, (c) V2, (d) V3……	74
Şekil 4.8.	Tarama aralığına bağlı olarak değişen çekme testi sonuçları ..	76
Şekil 4.9.	Numunelerin gerilim-gerinim eğrisi (a) H1, (b) H2, (c) H3	77
Şekil 4.10.	Dönüş açısına bağlı olarak değişen çekme testi sonuçları …..	78
Şekil 4.11.	Numunelerin gerilim-gerinim eğrisi (a) R1, (b) R2, (c) R3	79
Şekil 4.12.	Numunelerin enerji absorbsiyon değerleri ……..	80

Şekil 4.13.	Lazer gücüne bağlı çentik darbe test sonuçları……	82
Şekil 4.14.	SLE ile üretilen Ti6Al4V numunelerinin darbe testlerinden sonraki kırılma yüzeylerini gösteren SEM görüntüleri; (a, b) P2 Numunesi; (c, d) durum P3 Numunesi……....	83
Şekil 4.15.	Tarama hızına bağlı çentik darbe test sonuçları……...	84
Şekil 4.16.	Tarama aralığına bağlı çentik darbe test sonuçları……...…	84
Şekil 4.17.	Dönüş açısına bağlı çentik darbe test sonuçları……...	85
Şekil 4.18.	45° Dönüş açısı ile üretilen numunede gözlemlenen ince sütunlu β taneleri (Numune: R1) …….	86
Şekil 4.19.	SLE ile üretilen Ti6Al4V numunelerinin darbe testlerinden sonraki kırılma yüzeylerini gösteren SEM görüntüleri; Numune R3, 180°; (a) kırılma yüzeyinin görünümü (b) ayrıntılı kusurların görünümü……..	87
Şekil 4.20.	Lazer gücüne bağlı yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri……...	88
Şekil 4.21.	Tarama hızına bağlı olarak değişen yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri……...	89
Şekil 4.22.	Tarama aralığına bağlı olarak değişen yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri……...	91
Şekil 4.23.	Dönüş açısına bağlı olarak değişen yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri……...	92
Şekil 4.24.	Lazer gücüne bağlı olarak değişen porozite dağılım oranı (a) P1, (b) P2 ve (c) P3 numunesi…….	93
Şekil 4.25.	Lazer gücüne bağlı porozite (%) oranları……	94
Şekil 4.26.	Tarama hızına bağlı olarak değişen porozite dağılım oranı (a) V1, (b) V2 ve (c) V3 numunesi……	94
Şekil 4.27.	Tarama hızına bağlı porozite (%) oranları……...	95
Şekil 4.28.	Tarama aralığına bağlı olarak değişen porozite dağılım oranı (a) H1, (b) H2 ve (c) H3 numunesi……..	95
Şekil 4.29.	Tarama aralığına bağlı porozite (%) oranları……...	96
Şekil 4.30.	Dönüş açısına bağlı olarak değişen porozite dağılım oranı (a) R1, (b) R2 ve (c) R3 numunesi……	97
Şekil 4.31.	Dönüş açısına bağlı porozite (%) oranları……	98
Şekil 4.32.	Lazer gücüne bağlı olarak değişen mikrosertlik (H_V) değerleri……...	100
Şekil 4.33.	Tarama hızına bağlı olarak değişen mikrosertlik (H_V) değerleri……...	101
Şekil 4.34.	Tarama aralığına bağlı olarak değişen mikrosertlik (H_V) değerleri…….……..	102
Şekil 4.35.	Dönüş açısına bağlı olarak değişen mikrosertlik (H_V) değerleri……...	103

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Eklemeli imalat yöntemleri (ASTM, F42) ……..….... 16

Çizelge 2.2. SLE ile üretilen bir parçada oluşabilecek ana kusurlar ve proses parametre eşleşmesi (Calignano ve diğerleri, 2019) ……..... 35

Çizelge 2.3. Ti6Al4V eklemeli imalat sonucunda kimyasal bileşimi (ASTMF2924-14) ……..... 46

Çizelge 2.4. Ti6Al4V Alaşımına ait fiziksel özellikler (Yan ve Yu, 2015) 47

Çizelge 3.1. Ti6Al4V Alaşımının kimyasal bileşimi (Ermak A252-TI64-Grade 23) …….. 56

Çizelge 3.2. Farklı seviyedeki parametrelerin etkilerini deneysel olarak görüntülenmesi için belirlenen detaylı parametre değer tablosu... 59

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat, geleneksel imalat yöntemlerinin yetersiz veya sınırlı kaldığı parçaların üretimini kolaylaştıran, tasarımda esneklik sağlayarak kompleks ve çoklu parçaların üretimini mümkün kılan bir üretim yöntemidir. Bu yöntem, karmaşık geometrik şekillere sahip parçaların üretimini kolaylaştırması, tasarım esnekliği sunması, parçaların hızlı üretilmesiyle üretim süresini kısaltması, üretim sırasında atık malzemeyi en aza indirmesi ve takım, kalıp gibi üretim maliyetini artıran unsurları azaltması nedeniyle son yıllarda endüstride önemli bir yer edinmiş ve büyük ilgi görmüştür (Meboldt ve Klahn, 2017).

Eklemeli imalat, geleneksel üretime, bir diğer ifade ile eksiltmeli üretim tekniklerine kıyasla malzeme israfının da önüne geçer. Geleneksel üretim süreci hammaddeden istenmeyen veya fazla malzemeyi çıkararak istenilen şekil ve boyutta bir ürün oluşturma süreci olarak tanımlanabilir. Kesme, delme, raybalama, işleme, tornalama ve taşlama geleneksel üretim yöntemleri içerisinde örnekler olarak yer alır. Bu süreç önemli miktarda malzeme israfına neden olur ve bu israf çevre sorunlarına yol açabilir. Ek olarak, eksiltmeli üretim sürecinde yüksek yetkinlikte operatörlere ihtiyaç duyulur, bu da üretim maliyetlerinin artmasına neden olabilir (Singh, 2016).

Eklemeli imalatın endüstride kullanılan birçok farklı yöntemi mevcuttur. Malzemenin beslenme şekline, malzemenin bir önceki katmana bağlanmasını sağlayarak ergimeyi gerçekleştirecek ısı kaynağına göre çeşitlilik göstermektedir. Isı kaynağı, lazer, elektron ışını, elektron arkı olarak kategorilere ayrılmaktadır. Metal eklemeli imalat metotlarından toz yatağı birleştirme yöntemi, seçici lazer sinterleme (SLS), direkt metal lazer sinterleme (DMLS), elektron ışın ergitme (EBM) ve seçici lazer ergitme (SLE) tekniklerini kapsamaktadır.

Seçici lazer ergitme, yüksek yoğunluklu bir lazer ile bilgisayar destekli tasarımda oluşturulan model verisi baz alınarak, serilen tozun belirli bölgelerini katman üzeri katman ergiterek birleştiren bir toz yatağı füzyon tekniğidir.

SLE, toz halindeki malzemenin lazer ışını ile ısıtılarak ergitilmesini ve ergiyen malzemenin hızla katılaşarak istenen parçayı oluşturulmasını sağlar. Toz malzemenin lazer ışınını absorbe etme kapasitesi, ergime oluşumunun devamlılığını bozan malzeme kusurları ve işlem sırasında parametrelerin neden olduğu mekanik özellik değişimleri gibi faktörler, bu süreçte optimum dengeyi sağlamak için çalışmalar yapılmasını gerektirmiştir.

SLE'de lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığı, süreci optimize etmek için dikkatlice seçilmesi gereken ortak süreç parametreleridir. Platform üzerine serilen tozun, lazer ışınını absorbe ederek ergime ve birleşimini etkileyen bu parametreler, hacimsel enerji yoğunluğu üzerinde önemli etkisi vardır. Fakat, hacimsel enerji yoğunluğu değeri, yapılan literatür araştırmalarında da görüldüğü üzere, optimum özelliklerde ürün elde etmek için kullanılması yanıltıcıdır. Farklı parametre kombinasyonları ile aynı enerji yoğunluğu değerine ulaşmak mümkündür ve üründe gözlemlenen mekanik ve metalurjik özelliklerde farklılıklar oluşturmaktadır.

Genellikle düşük lazer gücü, yüksek tarama hızı ve geniş katman kalınlığının bir kombinasyonu olan yetersiz enerji, ergimiş havuzun önceki katmanla ıslanmaması nedeniyle toplaşmaya neden olur. Ancak, yüksek lazer gücü ve/veya düşük tarama hızı kombinasyonu yoğun malzeme buharlaşmasına ve anahtar deliği oluşumuna yol açabilir. Ayrıca, geniş tarama aralığı, bitişik eriyik hatlarının tam olarak kaynaşmaması nedeniyle genellikle üretilen parçalarda düzenli gözeneklilik oluşumuna yol açar. Bunun yanı sıra, SLE'deki buharlaşma, genellikle lazer penceresi üzerinde uçucu maddelerin yoğunlaşmasına sebep olarak lazer gücünün iletimini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, lazer gücünün, tarama hızının, tarama aralığının ve katman kalınlığının uygun kombinasyonu, SLE işleminin neredeyse tam yoğunluklu parçaların başarılı bir şekilde oluşturulması için gereklidir (Yap ve diğerleri, 2015).

En yaygın metal alaşımları olan titanyum alaşımları, uzun süreli biyo uyumluluk ve yüksek kırılma tokluğuna sahip olması nedeniyle biyomedikal ve havacılık sektörleri uygulamalarında yerini almaktadır (Zhu ve diğerleri, 2018).

Titanyum alaşımlarından olan, yüksek mukavemet-ağırlık oranı ve mükemmel korozyon direnci nedeniyle çoğunlukla tercih edilen Ti6Al4V havacılık, biyomedikal gibi önemli endüstri alanların da uygulanmasından dolayı popülerliğini artırmaktadır.

Bu hafif alaşım, 1950'den bu yana, ağır yüklü uçak gövde yapıları, jet motorları, gaz türbinleri gibi parçaların tasarımına uygunluğu nedeniyle havacılık ve uzay endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer önemli uygulamalar arasında protez implantlar (örnek; omuz, dirsek), ortopedik (Niinomi, 2008) ve doku mühendisliği, stentler de dahil olmak üzere diş implant üniteleri yer almaktadır (Geetha ve diğerleri, 2009). Hastalıkların iyileştirilmesi, hasar görmüş vücut parçalarının onarılması, insan yaşam kalitesinin artırılması amacıyla ya ikame olarak ya da fizyolojik hareketleri desteklemek amacıyla kullanılmaktadır. Yine de alaşımın, yük taşıyan biyo implant (kalça ve diz protezi) olarak daha iyi uyum sağlaması için bazı tribolojik ve yorulma özelliklerinde iyileştirme ihtiyacı vardır.

Bununla birlikte, bu alaşımın düşük ısı iletkenliği, işlenmesi zor bir malzeme olarak tanımlanmasına neden olmuştur. Ayrıca, nihai ürünler çelik veya alüminyuma göre nispeten maliyeti daha yüksek olduğundan, birincil malzemenin rafine edilmesi, dökümü, dövülmesi ve haddelenmesi oldukça zorlu bir süreçtir. Bu geleneksel üretim teknikleri önemli miktarda malzeme israfına, uzun teslim süresine ve yüksek üretim maliyetine sebebiyet vermektedir. Bu zorlu sürece çözüm olarak hızlı prototipleme sistemi 1987 yılında dünyada ticari hale gelmiştir (Yang ve diğerleri, 2017).

Seçici lazer ergitme yöntemi ile Ti6Al4V malzemesinin kullanılarak üretilen numunelerde kullanılan parametreler kaynaklı mekanik özellikler de değişkenlik görülmektedir. Literatür çalışmalarında da belirtildiği üzere, ana parametrelerin oluşturduğu hacimsel enerji yoğunluk değeri optimum parametrelerin belirlenmesinde kesin sonuç vermemektedir. Her bir parametrenin mekanik ve metalurjik özellikler üzerindeki etkilerinin ayrı ayrı incelenmesi gereklidir.

Yapılan bu çalışmada metal eklemeli imalat tekniklerinden olan seçici lazer ergitme yöntemi ile Ti6Al4V alaşımı kullanılarak belirlenen parametreler ile üretilen numunelerin mekanik ve metalurjik davranışlarını incelemek, optimum parametre setini oluşturmak amaçlanmıştır.

Parametre setinde, farklı seviyelerde lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve her bir yeni katmanda tarama deseninin belirlenen derecelerde dönüş açısı yer almıştır. Deneyler sabit katman kalınlığı, sabit tarama deseni kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve tarama deseni dönüş açısının seçici lazer ergitme işlemi kullanılarak üretilen Ti6Al4V'un çekme dayanımı, çentik darbe enerjisi, yüzey pürüzlülüğü, sertlik, porozite seviyeleri ve mikroyapı üzerindeki bireysel etkileri araştırılmıştır.

Özetle, bu araştırmada, inovatif üretim yöntemi olan seçici lazer ergitme ile üstün biyouyumluluğa, gelişmiş korozyon direncine ve yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip olması nedeniyle biyomedikal, havacılık, uzay sanayiinde tercih edilen, yaygın olarak kullanılan Ti6Al4V alaşımı kullanılarak, farklı parametreler ile üretilmiş numunelerin mekanik davranışları incelenmiştir. Parametre seçiminin kritik olduğu bu proseste, üç farklı derecede, lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve dönüş açı parametreleri özgün olarak belirlenmiş, mekanik ve metalurjik özellikler incelenerek, dayanımı yüksek kaliteli parçaların üretimi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, malzeme ve imalat mühendisliği alanlarında ve literatüre katkı sağlayarak, özellikle otomotiv, havacılık ve medikal sektörlerinde yaygın kullanımı olan SLE yöntemi için bilimsel bilgi birikimini genişletmiştir.

Eklemeli imalat ile ilgili genel bilgiler, literatür araştırmaları, deneysel çalışmada kullanılan materyal, yöntem, bulgular, tartışmalar ve sonuçlar devam eden bölümlerde sunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

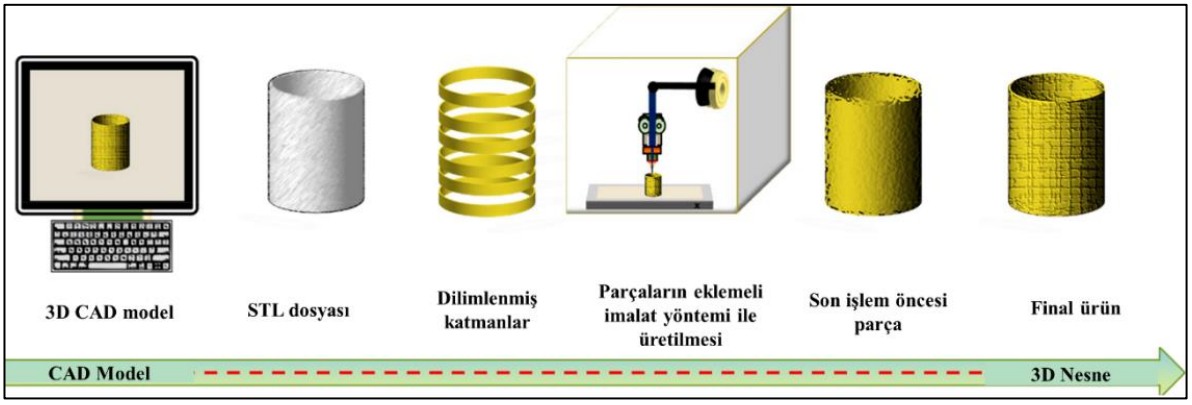
Bu bölümde, eklemeli imalat yöntemi, uygulama alanları, türleri hakkında bilgi verilmiştir. Kaynak araştırması kısmında, eklemeli imalat alanında çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

2.1. Eklemeli İmalat Yöntemi

Eklemeli imalat, CAD tabanlı, katman üzeri katman birleştirme esasına dayanan üretim sürecidir. Doğrudan son kullanım ürünleri oluşturmayı amaçlayan teknolojilerin genel adıdır. Bu nedenle, eklemeli imalat; dijital üretim, serbest biçimli imalat veya doğrudan üretim olarak da bilinir. Son dönemde 3D baskı olarak da anılmaktadır.

Katman üzerine katman oluşturulması stratejisine dayanan eklemeli imalat tekniği çalışmalarına hızlı prototipleme amacı ile 1980'li yıllarda başlanılmış, 1990'ların sonlarına doğru ticarileşerek üretim hacmini artırmıştır (Kruth ve diğerleri, 1998). Katı malzemenin kademeli olarak oluşturulması veya eklenmesi yoluyla şekillendirilmiş parçalar üreten teknikleri ifade eden hızlı prototipleme ile ilk aşamada görsel amaçlı, ticari nitelik taşımayan, seri imalat şartlarına uygulanabilirliği limitli olan parçaların üretimi yapılmakta iken, teknolojinin gelişimi ile ticarileşme süreçleri başlamıştır (Kruth ve diğerleri, 1998). Böylece hızlı prototip oluşturma, imalat ile birleştirilerek "hızlı üretim" terminolojisi ortaya çıkmıştır. Hızlı prototipleme ve hızlı imalat ifadeleriyle karşılaştırıldığında eklemeli imalat, bu ileri üretim teknolojisinin işleme stratejisini yansıtan genel bir isim olarak kabul edilmektedir (Gu, 2015). Geleneksel işleme süreçlerindeki malzemede talaş kaldırma yönteminin aksine, eklemeli imalat sıvı, toz ve tel malzemeleri kullanarak malzemede artım sağlayan imalat yöntemidir. Düşük ergime noktasına sahip Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) ve Polilaktik Asit (PLA) gibi polimerlerden, titanyum, çelik ve seramik gibi yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelere kadar çeşitli hammaddeler eklemeli imalat teknolojisiyle kullanılabilir. Eklemeli imalat üretim süreci Şekil 2.1.'de görüldüğü üzere bir parça veya modelin CAD yazılımında tasarlanması ile başlar.

İlk olarak, üretilecek parçanın modeli herhangi bir profesyonel CAD katı yazılımı kullanılarak modellenir. Tasarımcı, mevcut bir CAD dosyasını kullanabilir veya prototip oluşturmak amacıyla bunu yeniden tasarlayabilir. İkinci adım, CAD dosyasını STL (Stereolithography) formatına dönüştürmektir. STL dosyası, üç boyutlu yüzey geometrisinin üçgenlerle temsil edilmesidir. Yazılım, parçanın yüzeyini bir dizi yönlendirilmiş üçgene, yani normal vektörlere ayırır. STL formatı evrensel bir dosya türü olduğu için, bu süreç tüm eklemeli imalat tekniklerinde benzer şekilde uygulanır. Model, her nesne için yatay veya dikey kesitlerde dilimlenmiş veri şekline dönüştürülür. Bu bilgi, nesnenin üretim sürecinde sırasıyla üretilecek kesitleri ve her bir katmanın üretim bilgilerini içerir. Bu işlem, modelin yönlendirilmesi, boyutunun ve konumunun ayarlanmasını sağlayarak STL modelini, kullanılan yapım tekniğine bağlı olarak birkaç mikrometreden birkaç yüz mikrometreye kadar kalınlığa sahip katmanlara mantıksal olarak dilimler. Yazılım, ayrıca model oluşturma sürecinde modeli destekleyecek yardımcı yapılar da oluşturabilir. Destek yapıları, nesnenin çıkıntıları, ince duvarlı kısımları ve iç boşlukları gibi hassas alanlar için kritik öneme sahiptir (Kusuma, 2016). Kullanılan eklemeli imalat teknolojisine bağlı olarak malzeme üzerine çeşitli enerji kaynakları uygulanarak her katmanın belirli yerlerde katılaşması sağlanır ve parçanın somut olarak üretimi yapılır. Eklemeli imalat cihazı, genellikle metal, seramik, polimer, alaşım veya kompozit tozlardan oluşan bir katman oluşturarak çalışır. Ardından, üç boyutlu nesne, katman üzeri katman biriktirilen malzemelerin birleştirilmesiyle şekillendirilir. Her bir şekillendirilmiş katman, dilimlenmiş CAD modelinin bir kesitini temsil eder. Son adım olarak, bitmiş parçanın platformdan çıkartılması, desteklerinden arındırılması sağlanır. İhtiyaç halinde, parçanın mekanik özelliklerinin ve görünümünün iyileştirilmesi için yüzey işlemleri, zımparalama, ısıl işlem süreçleri uygulanarak final ürün haline getirilir (Kiran ve diğerleri, 2018).

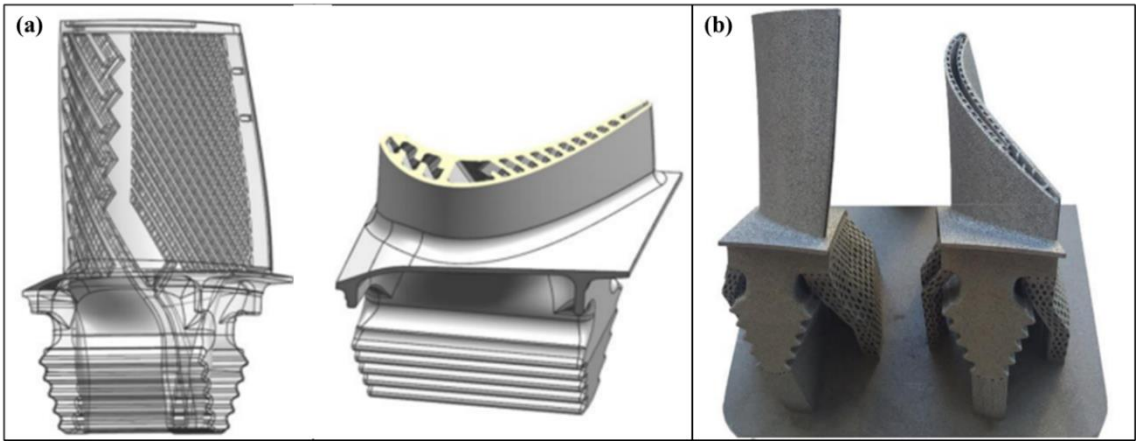


Şekil 2.1. Eklemeli imalatın, üç boyutlu cisimlerin tasarım aşamasından nihai ürün elde ediliş sürecine kadar proses akışı (Kiran ve diğerleri, 2018)

Üretimde artan bir paya sahip olmasında, geleneksel imalat tekniklerine kıyas ile kompleks parçaların üretimine olanak sağlaması, kalıp, fikstür gibi yardımcı ekipmanların yatırım maliyetlerinin olmaması önemli avantaj sağlamıştır. Ayrıca, kalan işlenmemiş malzemelerin yeniden kullanılabilmesi ile zaman, enerji ve diğer maliyetlerden tasarruf sağlanmakta, bu da parça başına maliyeti önemli ölçüde düşürmektedir (Brandt ve diğerleri, 2013).

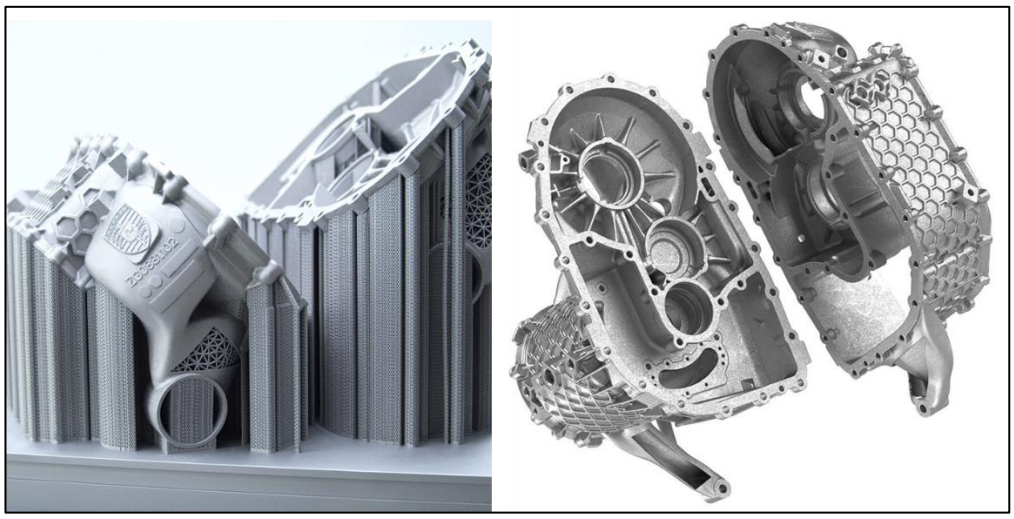
2.1.1. Eklemeli imalat uygulama alanları

Eklemeli imalat teknolojileri, başta uzay ve havacılık, otomotiv, biyomedikal, savunma sanayi ve enerji sektörü olmak üzere, çeşitli kritik endüstri alanlarında parça üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Havacılık ve Uzay endüstrisindeki bileşenler genellikle kompleks ve karmaşık geometrilere sahiptir. Titanyum alaşımları, özel çelikler, nikel süper alaşımları veya ultra yüksek sıcaklık seramikleri gibi maliyetli, üretimi zaman alıcı ve zor olan gelişmiş malzemelerden yapılır. Endüstriyel uygulamalara örnek olarak, jet motorlarının iskelet bileşenleri, türbin motoru gövdeleri, kanatları verilmektedir (Guo ve Leu, 2013). Şekil 2.2'de SLE metodu ile üretilen havacılık endüstrisinde kullanılan türbin kanadı görülmektedir.



Şekil 2.2 Havacılık endüstrisinde kullanılan motor türbin kanadının a) model ve enine kesit görünümü b) SLE ile destekleri ile üretilen türbin kanadı (Magerramova ve diğerleri, 2016)

Otomotiv endüstrisinde yeni ürün geliştirme kritik bir öneme sahip olmak ile birlikte maliyetli ve oldukça zaman alıcı bir süreçtir. Otomotivde, eklemeli imalat teknolojisi mevcut durumda, alüminyum alaşımlar ile SLE, SLS ve EBM gibi metotlar kullanılarak pompalar, valfler, tahrik milleri, dişli kutusu bileşenleri, motor egzozları, pistonlar, karter vb. parçalar üretilmiştir. Polimer malzeme ile SLS metodu vasıtasıyla tamponlar, rüzgâr kesiciler gibi yapısal parçaların tasarımında ve üretiminde kullanılmakta, performans ve fonksiyonel iyileştirmelerine önemli ölçüde fayda sağlamaktadır (Sarvankar ve Yewale, 2019). Şekil 2.3'te görülen SLE metodu ile üretilmiş Porsche marka araçta kullanılan karter kapağı 21 saatte üretilmiştir. Bu yöntem, parçanın üretiminde ağırlığı azaltmak için kafes yapılarla topoloji optimizasyonunu mümkün kılmış, soğutma kanallarının entegrasyonunu kolaylaştırırken, yüksek rijitlik sağlamış ve parça montaj süresini azaltmıştır.



Şekil 2.3. SLE metodu ile üretilmiş karter kapağı (https://www.slm solutions.com/industries/automotive/ (Erişim Tarihi: 16.03.2024)

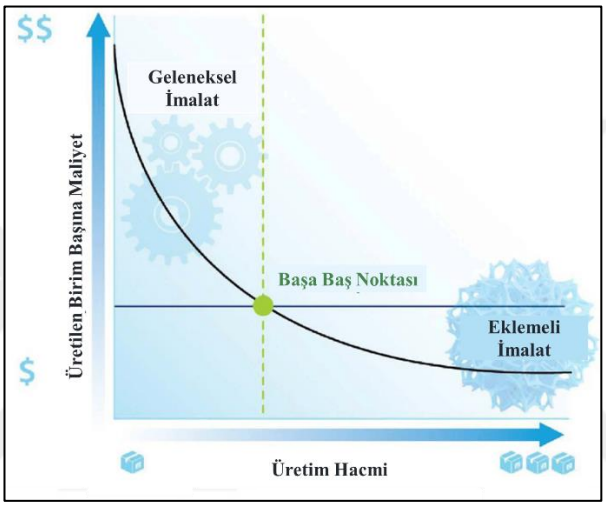
Şekil 2.4'te Bugatti tarafından eklemeli imalat yöntemi ve titanyum malzeme ile üretilen Dünya'nın ilk fren kaliperi görülmektedir. Mevcut alüminyum kaliperlere kıyas ile %40 daha hafif ve mukavemetli olarak belirtilen kaliperin üretimi 45 saat sürmüş ve 2200'den fazla katman ile tamamlanmıştır (https://www.3dnatives.com/en/bugatti-3d-printed-brake-caliper-230120184/, Erişim tarihi:16.03.2024).



Şekil 2.4. Bugatti Chiron'un eklemeli imalat ile üretilen titanyum fren kaliperi (thefabricator.com, Erişim Tarihi: 16.03.2024)

Otomotiv endüstrisinde kârlılık üretim hacmi ile belirlenir. Üretim hacmi göz önüne alındığında üretim hızı imalat metodunun belirlenmesinde önemli girdi teşkil etmektedir.

Geleneksel imalat ve eklemeli imalat üretim süreçleri karşılaştırıldığında, mevcut teknoloji seviyesinde eklemeli imalat dezavantajlı durumunda gözükmektedir (Sarvankar ve Yewale, 2019). Şekil 2.5'te görülen, üretilen parçanın birim maliyeti ve üretim hacmi endeksine göre geleneksel ve eklemeli imalatın karşılaştırması grafiğinde, üretim adetleri arttıkça geleneksel imalat tercihi artmaktadır. Eklemeli imalat ağırlıklı olarak üretim hacimlerinin çok yüksek olduğu endüstrilerde, son parça üretiminden ziyade prototip oluşturma çözümü olarak kullanılmaktadır.

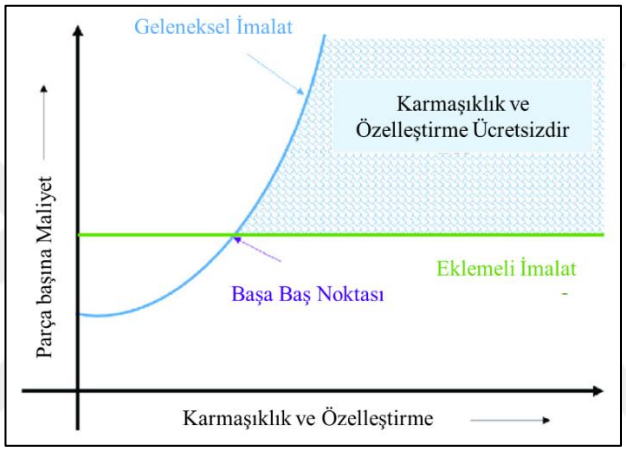


Şekil 2.5. Başa baş noktası analizi geleneksel ve eklemeli imalat karşılaştırması (Janssen diğerleri, 2014)

Geleneksel üretim teknikleri derinlere yerleşmiştir ve yakın gelecekte muhtemelen otomotiv endüstrisinde baskın konumunu sürdürecektir. Ancak eklemeli imalatın uygulama alanının geniş olması ve iş gücünü azaltarak, verimliliği yükseltmesi katmanlı üretimin küresel otomotiv endüstrisini şekillendirmede de önemli bir rol oynayacağını göstermektedir.

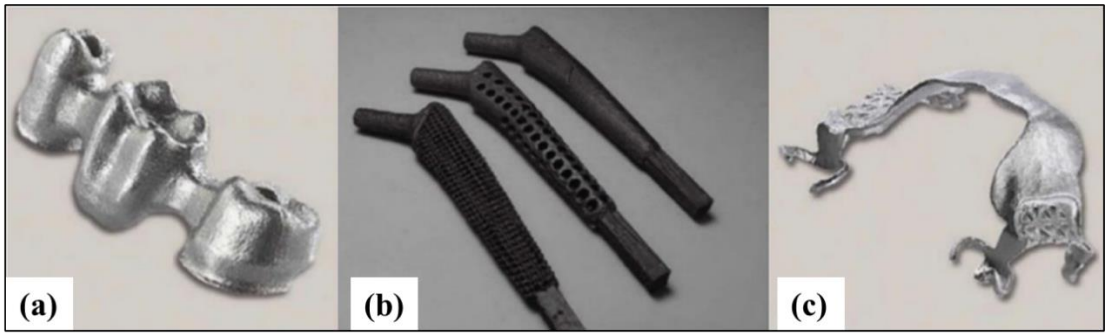
Parça başına maliyetin, geleneksel imalat ve eklemeli imalat için parçanın karmaşıklığıyla karşılaştırıldığı bir örnek Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Tasarım karmaşıklık düzeyi başa baş noktasının üzerindeyse, parçayı eklemeli imalat metodu ile oluşturmak uygun maliyetli olacaktır.

Dolayısıyla buna karmaşıklık ve kişiselleştirme ücretsizdir denilebilir çünkü bir parçadaki karmaşıklığın ve talebe özgü spesifikliğin artması, parçanın yapım maliyetini artırmayacaktır. Tipik olarak bir parçanın nihai tasarım üzerinde anlaşmaya varılmasından önce birkaç tasarım döngüsünden geçmesi gerekir. Eklemeli imalat metodu ile bu aşama önemli ölçüde hızlandırılabilir (Sarvankar ve Yewale, 2019). Özetle, eklemeli imalat teknolojisi, standart CAD yazılımını kullanarak tasarım özgürlüğü sağlar ve geleneksel imalat teknolojisinin sahip olduğu sınırlara sahip değildir, uygun maliyetli ürün özelleştirmesine de olanak tanır.



Şekil 2.6. Geleneksel üretim ve eklemeli imalat süreci için maliyetlerin karşılaştırılması (Gupta ve Taufik, 2022)

Eklemeli imalat yöntemi, medikal ve tıp alanında kişiye yönelik spesifik çözüm üreten, hayat kurtarıcı bir metot olarak öne çıkmaktadır. Biyomalzemeler, biyomedikal ve biyolojik bilimlerdeki son gelişmeler, eklemeli imalat tekniklerinin biyomedikal alanda uygulanmasını, ortopedik implantlar, diş implant uygulamaları, yapay organlar, tıbbi cihazlar, yapay mesaneler, biyo baskı, mikro damar ağları ve biyolojik çipler gibi ürünlerin imalatını önemli ölçüde genişletmiştir.



Şekil 2.7. Eklemeli imalat teknolojileri kullanılarak üretilen biyomedikal ürünler; (a) SLE kullanılarak üretilen diş protezi, (b) EBM kullanılarak üretilen kalça protezi ve (c) SLE kullanılarak üretilen diş köprü implantı (Kusuma, 2016)

Birçok farklı araştırmacı, medikal alanda, farklı malzemeler ile çalışmalar yapmışlardır. Kruth ve diğerleri (2005), 316L paslanmaz çelik malzeme ile diş protezleri için biyouyumlu metal çerçeve üretimi yapmışlardır. Wehmoller ve diğerleri (2005), SLE metodu ile 316L paslanmaz çelik malzemesi ile kortikal kemik, mandibular kanal segmenti ve destek yapıları, tübüler kemik gövde implant ürünlerini üretmişlerdir. Yang ve diğerleri (2012), SLE ile ortodontik ürünlerin yapım doğruluğunun ve yoğunluğunun optimizasyonu üzerine çalışmalar yapmış, istenen yüzey kalitesini ve mekanik özellikleri elde etmişlerdir. Li ve diğerleri (2010), 316L paslanmaz çelik ile biyouyumlu implantlarda doku büyümesini destek olmak adına gözenekli yapıya sahip, yüksek mukavemetli parçaların üretilebilirliği üzerine çalışmalar yapmıştır.

Titanyum ve alaşımları biyouyumlu malzemeler olması nedeni ile protez ve diş implant üzerine yapılan çalışmalarda öne çıktığı görülmektedir. İlave olarak, Titanyum alaşımları, Co-Cr alaşımları ve paslanmaz çeliğe kıyasla kemiğe daha yakın yüksek özgül mukavemete ve elastik modüllere sahiptirler (Abe ve diğerleri, 2017). Vücutta kullanılan implantların titanyum alaşımları ile imalat çalışmaları çeşitli araştırmacılar tarafından yapılmıştır. Dong ve diğerleri (2017), SLE ticari saflıkta Titanyum kullanarak kemik ve diş kronları üretmişlerdir. Mullen ve diğerleri (2009), ticari saflıkta Titanyum ile ortopedik uygulamalar için gözenekli biyouyumlu yapılar üretmek üzere çeşitli tarama stratejileri üzerine çalışmışlardır.

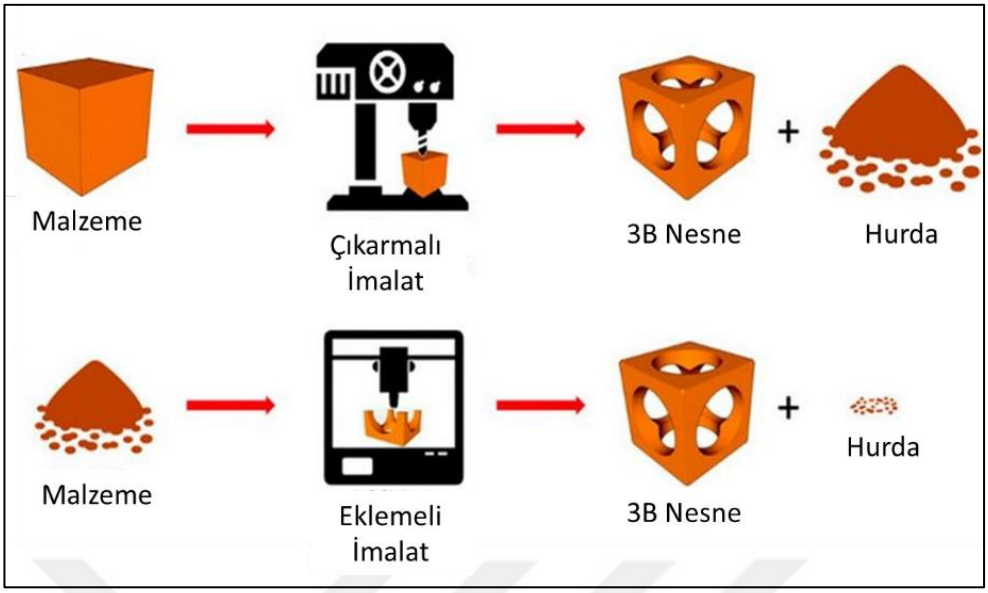
2.1.2. Eklemeli imalat yönteminin avantajları

Karmaşık ve çok eklemli mekanizmaların üretiminde, her bir parçanın imalatı, işlenmesi ve ardından gelen montaj süreci, genellikle çevrim süresinin uzun olmasına neden olmaktadır. Eklemeli imalat, işlevsel ve çok mafsallı parçaların tek bir operasyonda üretilebilmesi ve sonrasında montaja ihtiyaç duyulmadan geliştirilebilmesi sayesinde ilgi çekici bir yöntem haline gelmiştir. Eklemeli imalat, diğer imalat teknikleriyle karşılaştırıldığında montaj operasyon süreçlerini elemine etmekte birkaç adım geride olsa da ilerleyen süreçte daha fazla bağlantılı parçaların üretimine olanak sağlaması ile montaj işlemlerini azaltma potansiyeline sahiptir (Cuellar ve diğerleri, 2018). Şekil 2.8'de üniversal bir mafsalın doğrudan eklemeli imalat yöntemi ile üretilebildiği görülmektedir.



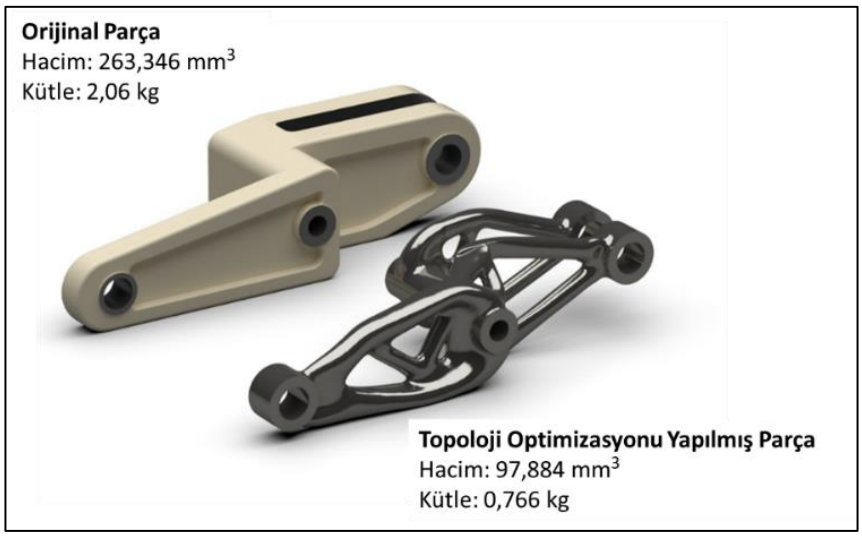
Şekil 2.8. Üniversal mafsal (a) CAD Model, (b) Eklemeli imalat yöntemi ile üretim sonrası görüntüsü (Su ve diğerleri, 2013)

Eklemeli imalatta üretim boyunca toz malzeme kalitesi maksimum seviyede korunur ve sonrasında yeniden kullanılabilinir. Şekil 2.9'da görüldüğü üzere, eksiltmeli imalata kıyasla oluşan hurda miktarı düşük olması kaynaklı malzeme israfı önlenmektedir. Üretim sırasında kullanılan malzemeden maksimum verim sağlayıp, israf edilen malzemenin minimum olması sebepli çevre dostu olarak nitelendirilmekte ve sonraki işlemlere duyulan ihtiyacın minimuma indirilmesi kaynaklı enerji tasarrufu açısından verimli bir süreç olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.9. Geleneksel ve katmanlı imalatta malzeme israfı (Erişim adresi:https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-vs-cnc-160320184/)

Geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla, üç boyutlu tasarım sürecinde geometrik serbestliğe sahiptir. Talep edildiği takdirde minimum veya hiçbir ek maliyet oluşturmadan tasarımın kolayca değiştirilmesine olanak sağlar. Geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor veya imkânsız olan, tasarımı karmaşık olan nesneler, eklemeli imalat teknikleri kullanılarak kolaylıkla inşa edilebilir. Parçaların mukavemet/hafiflik oranı için topoloji optimizasyonuna elverişlidir ve Şekil 2.10'da görüldüğü üzere optimum değerler elde edilebilinir.



Şekil 2.10. Havacılık endüstrisinde kullanılan parçanın eklemeli imalat yönteminde topoloji optimizasyonu yapılarak üretilmesi (https://blogs.sw.siemens.com/nx-manufacturing/additive-manufacturing-aerospace-industry-efficiency/ (Erişim Tarihi: 12.03.2024)

Endüstride kullanılan kritik ekipmanların stok halinde bulundurulmasının önüne geçerek talep halinde hızlıca üretiminin yapılmasını sağlar, kalıp ve yardımcı ekipman ihtiyacını ortadan kaldırarak maliyetleri önemli ölçüde düşürebilir.

2.1.3. Eklemeli imalat teknolojisinin sınıflandırılması

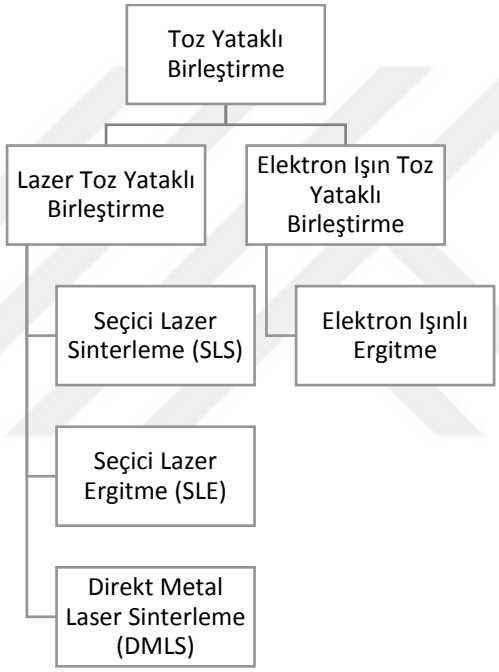
Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM)'ye göre, üç boyutlu geometrik model verilerinden nesneler oluşturmak için katman üzerine katman birleştirilmesi olarak tanımlanan eklemeli imalat ile polimerler, seramikler ve metal malzemeler birleştirilebilmektedir. Eklemeli imalat yöntemleri, Çizelge 2.1'de görüldüğü üzere, (ASTM), 52900:2015 F42' ye göre 7 alt başlıkta sınıflandırılmış ve standart altına alınmıştır.

Çizelge 2.1. Eklemeli imalat yöntemleri (ASTM, F42)

Toz Yataklı Ergitme	Termal enerji, bir toz yatağında belirlenen bölgeleri seçici olarak ergitme ve soğutma yöntemi ile birleştirir.	Metaller, polimerler
Doğrudan Enerji Biriktirme	Odaklanmış termal enerji, toz malzemeyi ergiterek ve biriktirerek birleştirir.	Metaller
Malzeme Ekstrüzyonu	Nozzle vasıtasıyla eriyik malzeme katman üzerine seçici olarak biriktirilir.	Polimerler, kompozitler
Havuz Fotopolimerizasyonu	Sıvı reçinenin, lazer veya UV ışık kaynağı ile her katman için seçici olarak kürlenmesi ile fiziksel parçanın oluşturulması.	Fotopolimerler
Bağlayıcı Püskürtme	Toz malzemeleri birleştirmek için sıvı bir bağlayıcının seçici olarak biriktirilmesi.	Polimerler, metaller, seramikler
Malzeme Püskürtme	Malzeme damlacıklar halinde püskürtülerek biriktirilir.	Polimerler, seramikler, kompozitler
Plaka Tabakalaştırma	Plaka şeklindeki malzemelerin birbirleri ile yapıştırılmasıdır.	Polimerler, seramikler, metaller.

Metal eklemeli imalat yöntemlerinden olan toz yataklı birleştirme (PBF) teknolojisi günümüzde medikal alanda ortopedik implantlar, uçak, uzay sanayii, otomotiv sektöründe çok çeşitli endüstriyel parçaların üretiminde kullanılan en yaygın teknoloji türüdür.

Toz yataklı birleştirme teknolojisi, istenen geometriye göre katman üzeri katman parçalar oluşturmak için toz parçacıklarını seçici olarak ergiterek bağlamak için bir enerji kaynağının kullanıldığı bir teknolojidir (Emmelmann ve diğerleri, 2017). Enerji kaynağı; lazer, elektron ışını ve hatta ultraviyole ışık olarak çeşitlilik gösterebilir. Lazer ve elektron ışınları toz yataklı birleştirme metodunda en yaygın olarak kullanılan enerji kaynağı türleridir (Ladani ve Sadeghilaridjani, 2021). Metaller çok yüksek ergime sıcaklıklarına sahip olduklarından parçacıkların ergitilerek birleştirilmesi aşamasında güçlü yapılar oluşturulması için yüksek enerji yoğunluğuna ihtiyaç duyulur.

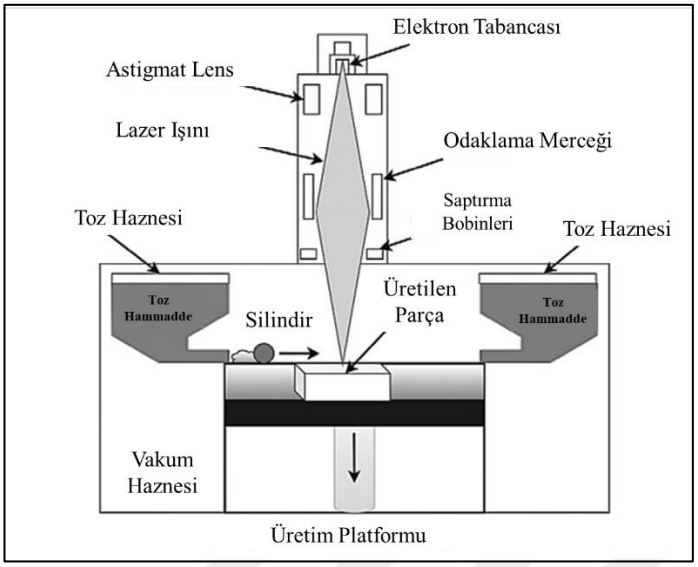


Şekil 2.11. Toz yataklı birleştirme metotları

Elektron ışınıyla ergitme yönteminde, tungsten filamentin ısıtılması ile yüksek hızlara ulaşan elektronlar ışın demeti oluşturmakta ve manyetik lensler ile odaklanarak kontrollü bir atmosfer ve vakum altında toz katman yüzeyine gönderilmektedir. Elektronlar, 2500°C'ye kadar ısıtılmış bir filamandan yayılır ve ışık hızının yarısı kadar bir hızla anoda doğru ivmelenir (Çelik ve diğerleri, 2013). Elektron demeti, elektromanyetik bobinler tarafından son derece hızlı ve hassas bir şekilde yönlendirilir.

Elektronlar tozla temas ettiğinde, kinetik enerjileri ısıya dönüşür, yüksek sıcaklık artışı meydana gelerek toz katman halindeki metalin ergimesine sebep olur. İlk katmanın tamamlanmasının ardından, bu işlem devam ettirilir. EBM yöntemi ile birleştirme tekniğinin şematik diyagramı Şekil 2.12 'de gösterilmektedir. Lazer ve elektron ışını çalışma prensibinde birtakım farklılıklar mevcuttur. Elektron ışını ile ergitme tekniğinde, kısmi basınçlı bir helyum ortamında operasyon gerçekleştirilirken, lazer ergitmede genellikle argon veya nitrojen gibi inert bir gaz ortamında çalışma gerçekleştirilir. Platform sıcaklığı elektron ışın ergitme yönteminde lazer ışını ergitme yöntemine göre daha yüksektir (Shen ve Chou, 2012). Bu da lazer ergitme yöntemine kıyas ile daha az termal gerilime sahip nesnelerin üretimi sağlanması anlamına gelir (Kiran ve diğerleri, 2018). Bunun yanı sıra imalattan sonra parçayı soğutmak için ek soğutma süresine ihtiyaç duyulur. Elektron ışını ile ergitme metodunda katman kalınlık değeri, genellikle lazer toz yataklı birleştirme tekniğinden daha yüksek olup inşa süresini kısaltır fakat daha pürüzlü yüzeylere ve daha az boyutsal doğruluğa sebep olur (Ladani ve Sadeghilaridjani, 2021).

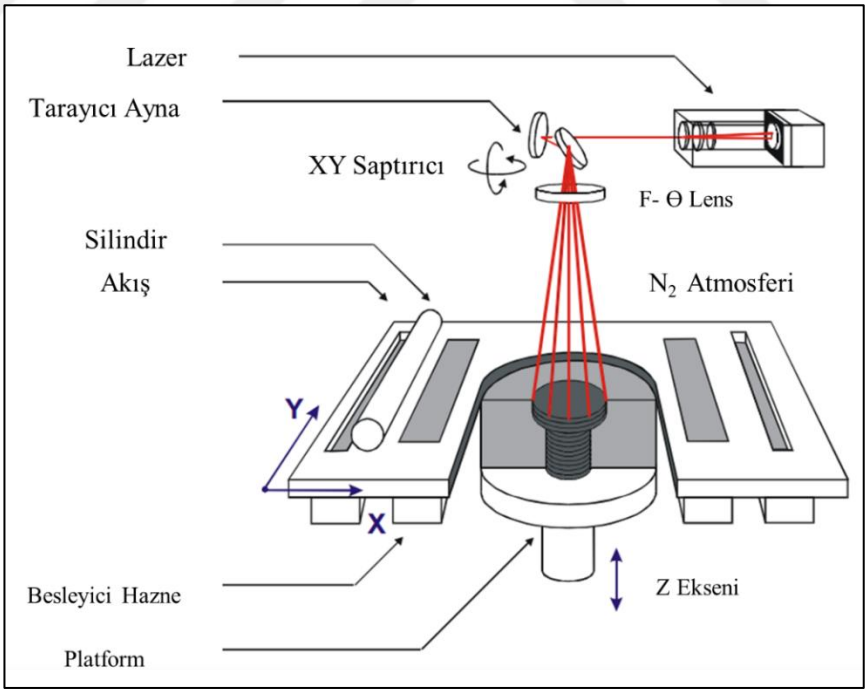
Elektron ışını ergitme yönteminin avantajları arasında, imal edilen parçaların oksidasyona uğramaması, gözeneksiz, yoğun ve çatlak içermeyen bir yapıya sahip olması ve kırılgan intermetalik malzemelerin işlenebilme yeteneği bulunmaktadır. Buna karşın, elektron ışını ile ergitme sürecinde, istenen özelliklere sahip ürünler elde etmek amacıyla parametrelerin optimize edilmesi oldukça güçtür. Bu yöntemde kullanılan malzemeler sınırlıdır. Üretilen parçayı işlemek için gereken süre nispeten fazladır ve bu da maliyetleri artırır. Parça üretiminde, boyut sınırlamaları vardır (Bansal ve diğerleri, 2023).



Şekil 2.12 EBM Yönteminin çalışma prensibi (Bansal ve diğerleri, 2022)

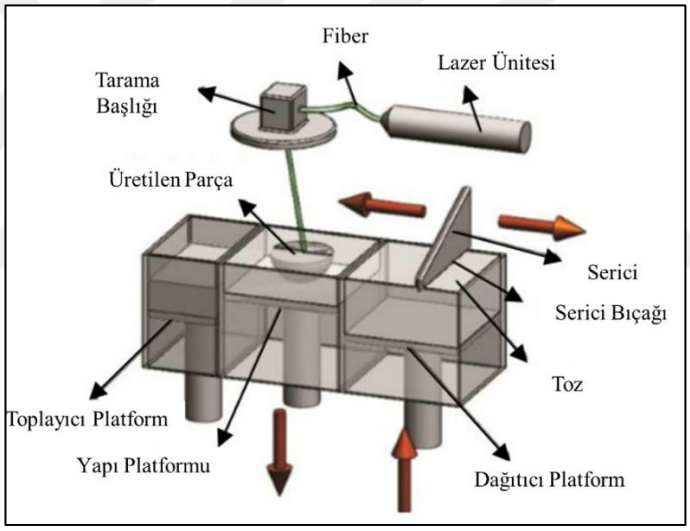
Seçici lazer sinterleme (SLS), toz yatak füzyon tekniklerinin yaygın olarak kullanılan örneklerinden biridir. SLS, üç boyutlu yazıcı kullanarak hem polimer hem de metal bazlı toz halindeki malzemeyi lazer ışını ile sinterleyerek birleştiren bir eklemeli üretim yöntemidir (Kruth ve diğerleri, 2005). Şekil 2.13'te SLS yönteminin şematik olarak çalışma prensibi gösterilmektedir. Bu teknik, polimerler, seramikler, metaller ve bu malzemelerin kombinasyonlarını çok yönlü ve özgün geometrik şekillerde oluşturmak için uygun endüstriyel prototipler geliştirmek amacıyla kullanılır (Turner ve Gold, 2015). Temelde tozun döküm çeşitliliği (silindir veya kazıyıcı), atmosfer (argon veya nitrojen) ve lazer tipi (CO_2 lazer, lamba veya diyot pompalı Nd: YAG lazer, disk ya da fiber lazer) açısından farklılık gösteren geniş ticari SLS cihaz tipleri mevcuttur (Kruth ve diğerleri, 2003). Bu teknikte tozlar tamamen ergimeden bağlanır. Bir ışın sapma sistemi (genellikle galvano aynaları), CAD modelinde tasarlanan kesitlere göre katmanları tarar. SLS'de katman kalınlığı, 10 ila 100 μm arasında set edilebilmektedir. SLS üretim yönteminde, metal, seramik veya termoplastik polimer gibi tozların üzerine lazer ışını kullanılarak sinterlenerek sertleştirilmesi sağlanır. Her tarama ve katı yapı oluşturulma sonrası, platform önceden tanımlanmış bir seviyeye kadar düşürülür ve üzerine ilave toz katmanı serilir. Her işlem sonrası serilen yeni katman üzerine yapı tamamlanıncaya kadar sinterleme işlemine devam edilir.

Yapıyı desteklemek için kullanılan sinterlenmemiş tozlardır ve sonraki baskı için yeniden kullanılabilir, dolayısıyla bu üretim sürecinde israf edilen malzeme yoktur. SLS yöntemiyle parça üretilirken özel destek yapılarına ihtiyaç duyulmaz, çünkü sinterlenmeyen tozlar sinterlenen kısma destek sağlar. SLS yöntemi ile dayanıklı parçalar elde edilir, bu da onu fonksiyonel parça üretimi, konsept modelleme, hızlı döküm ve hızlı kalıp yapımı için ideal kılar. İşlem sonunda ürün, destek yapıları ve kalan diğer tozlarından arındırılarak elde edilir. SLS yöntemiyle, poliamid (naylon), polistiren, karbon fiber ve alüminyum katkılı poliamid gibi plastik malzemeler, paslanmaz çelik, kobalt krom, nikel krom, titanyum gibi metal alaşımları işlenebilir. Ancak, SLS yöntemi yüksek maliyetli olduğu için ergiyik biriktirme modellemesi (FDM) ve SLA kadar yaygın kullanılmamaktadır (Çelik ve diğerleri, 2013). SLS ve SLE arasındaki fark incelendiğinde, SLS, yüksek güçte lazer enerjisi kullanarak toz halindeki endüstriyel malzemeleri atomik olarak birleştirir. SLE, toz halindeki malzemeleri erime noktasına ulaşana kadar ısıtarak birleştirir. Sinterleme sıcaklıkları genellikle bir malzemenin erime noktasının yaklaşık %85'inde çalışır.



Şekil 2.13 SLS yönteminin çalışma prensibi (Kruth ve diğerleri, 2003)

Çalışma prensibi SLS'ye benzer şekilde olan doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) prosesinde, metal tozuna doğrudan lazer ışınının teması ile karmaşık şekilli üç boyutlu parçaların hızlı bir şekilde üretilmesi sağlanır. Bu işlem, sıvı faz sinterlemede metal tozu doğrudan lazere maruz bırakılır ve lazer ışınının tarama işlemiyle gevşek tozun ince katmanlarını seçici bir şekilde birleştirerek parçalar oluşturur (Khaing ve diğerleri, 2001). Toz hammaddenin şekli, yapısı ve parametreler gözenekli metalik bileşenlerin üretilmesine yol açabilir (Gu ve Shen, 2008). DMLS, havacılık, tıp, biyomedikal ve diş implantları gibi alanlarda kullanılan metal alaşımlardan üretilen parçaların imalatında başarıyla kullanılan bir yöntem olarak bilinmektedir. İşlem boyunca sıvı bir faz oluştuğundan, toz bir destek görevi göremez, bu nedenle harici bir destek kullanılması gerekir.



Şekil 2.14. DMSL yönteminin çalışma prensibi (Bineli ve diğerleri, 2011)

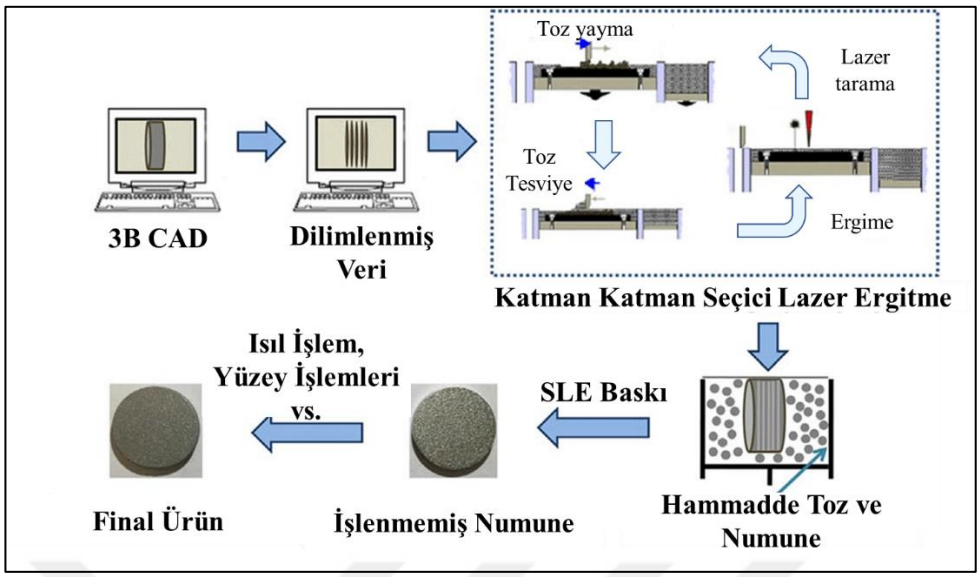
DMLS yönteminin şematik diyagramı Şekil 2.14'te gösterilmektedir. Yapı ve toz dağıtıcı platform, toz serici bıçağının çarpışmadan hareket edebilmesi için belirlenen mesafede katman kalınlığı kadar alçaltılır. Yeni toz serici doğru konumda durduğunda, dağıtıcı platformu bir sonraki katman için yeterli toz miktarını sağlamak üzere yükselir. Daha sonra toz serme bıçağı sağdan sola doğru hareket eder, bu şekilde metal tozu üretim platformuna yayılır ve fazla metal tozu toplayıcı platforma düşer. Lazer ışını programlanmış olarak iki boyutlu eksen doğrultusunda hareket ettirilir.

Metal tozu tarafından lazer enerjisinin emilmesi, bir alt katmanda bulunan halihazırda katılaşmış alanların tekrar kürlenmesini ve sinterlenmesini sağlar. Bu işlem nihai ürün elde edilinceye kadar devam ettirilir. Böylece makine birkaç saat içinde yüksek karmaşıklık ve doğrulukla üç boyutlu parçalar üretebilir. Ayrıca, inşa süreci sırasında sinterlenen parçalar kısmen nihai özelliklerine ulaşır, ancak parçanın uygulamasına bağlı olarak temperleme veya yüzey işlemi gibi son işleme ihtiyaç duyulur (Bineli ve diğerleri, 2011).

Toz yataklı birleştirme yöntemlerinden biri olan, yapılan deneysel çalışmada da kullanılan seçici lazer ergitme metodu, ilerleyen bölümde ayrıntılı bir şekilde anlatılmaktadır.

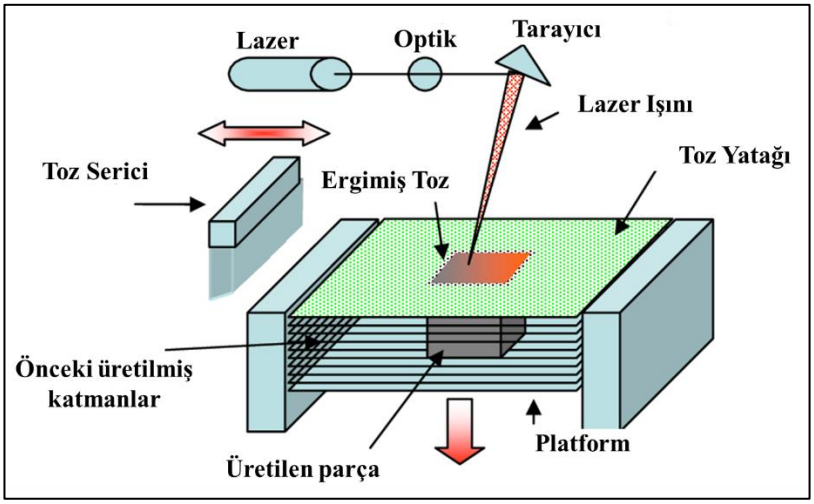
2.2. Seçici Lazer Ergitme (SLE) Yöntemi

Eklemeli imalat tekniklerinden olan seçici lazer ergitme (SLE), bir parçanın lazer ışını kullanılarak toz tabakada seçici olarak ergitmesi ile inşa edilmesi esasına dayanan, toz yataklı birleştirme üretim tekniğidir (Attar, 2014). Lazer toz yatağında füzyon prosesi, adından da anlaşılacağı gibi, serilmiş olan tozun birleşimini sağlamak adına ergitme yöntemini esas alan metal eklemeli üretim yöntemidir. Bu işlem, üç boyutlu CAD datanın katmanlara dilimlenmesi ve her katmanın iki boyutlu görüntüsünün STL formatında oluşturulmasıyla başlar. Bu dilimlenmiş veri dosyası daha sonra yazılım paketlerinde, parametreleri, değerleri ve fiziksel destekleri belirlenir ve dosyanın farklı türdeki eklemeli imalat cihazları tarafından oluşturulmasına olanak tanır (Santos ve diğerleri, 2006). Şekil 2.15'te görüldüğü üzere, üç boyutlu modelde tasarlanan model, dilimlenmiş veri şekline dönüştürülerek üretime hazır hale getirilir.



Şekil 2.15. Seçici lazer ergitme prosesinin üretim ve sonrası proses süreci (Wang ve diğerleri, 2016)

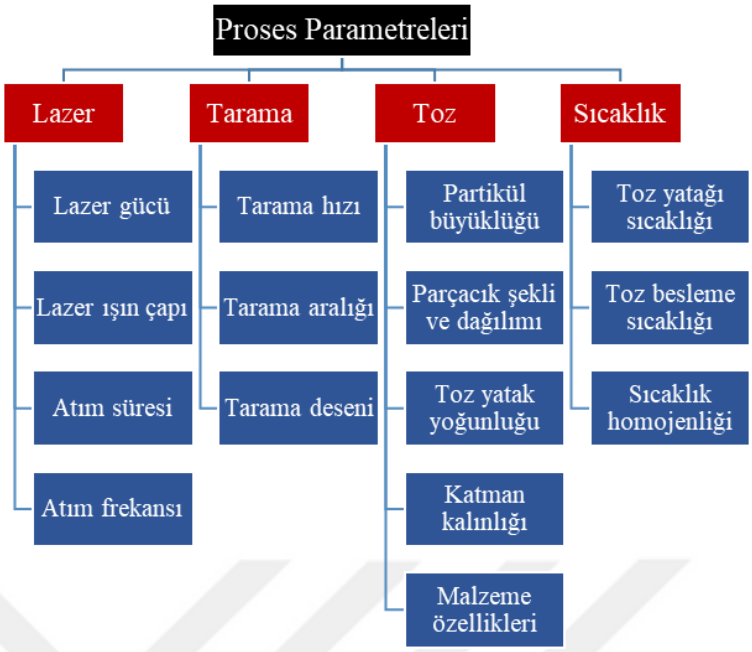
SLE'de parça, üretim platformu adı verilen bir taban plakasının üstünde üretilir. Platformun yanında toz besleme kabı ve silindir bulunur. Üretim platformunun belirlenen her katman kalınlığı kadar bir seviye alçalması ile, toz besleme kabı yeni toz tabakasını bir silindir yardımı ile yüzeye yayarak tesviye işlemini gerçekleştirir. Üretim fazında, Şekil 2.16'da görüldüğü üzere, lazer ışını optik ünite ve tarayıcı ayna vasıtasıyla toz yatak üzerinde odaklandırılır ve alan ısınır. Seçici olarak odaklanılan bölge ısıyı emerek, ergime sağlanır ve sıvı bir havuza dönüşür. Ergiyik havuz olarak adlandırılan alan oluşur ve sonrasında hızla katılaşır. Bu durum toz parçacıklarının birleştirilmesini sağlar. Katılaşma sonrasında platform belirlenen katman kalınlığı kadar aşağıya iner, toz serici silindir yeni toz tabakasını platform üzerine serer. Lazer ışını, belirlenmiş bölgelerin ergitme işlemine devam eder. Bu süreç, ürün tamamlanana kadar her katman için devam ettirilir. Üretim esnasında oksidasyonun önüne geçmek için, SLE cihazı içerisinde Argon (Ar), Nitrojen (N) gibi koruyucu soy gaz kullanılır ve atmosfer ile ortamın bağı kesilir. Bazı durumlarda platform yüzeyi istenen sıcaklıklara kadar ısıtılır.



Şekil 2.16. Seçici lazer ergitme yöntemi şematik gösterim (Mumtaz ve diğerleri, 2008)

2.2.1. Seçici lazer ergitme temel proses parametreleri ve etkileri

SLE ile üretilen parçaların kalitesi, üretim parametreleri, üretim yönü, kullanılan tozun boyutu ve morfolojisi, tarama stratejisi gibi birçok parametreye bağlıdır. Mikroyapı ve mekanik özellikler açısından hedeflenen kalitede parça üretmek, işleme parametrelerini optimize etmek ile mümkündür. SLE yönteminin toz hazırlama aşamasından başlayarak nihai ürüne ulaşana kadar olan yolculuğu, pek çok parametrenin etkisini içermektedir (Singla ve diğerleri, 2021). Bunların arasında gelen, başlıca parametreler Şekil 2.17'de görülmektedir.



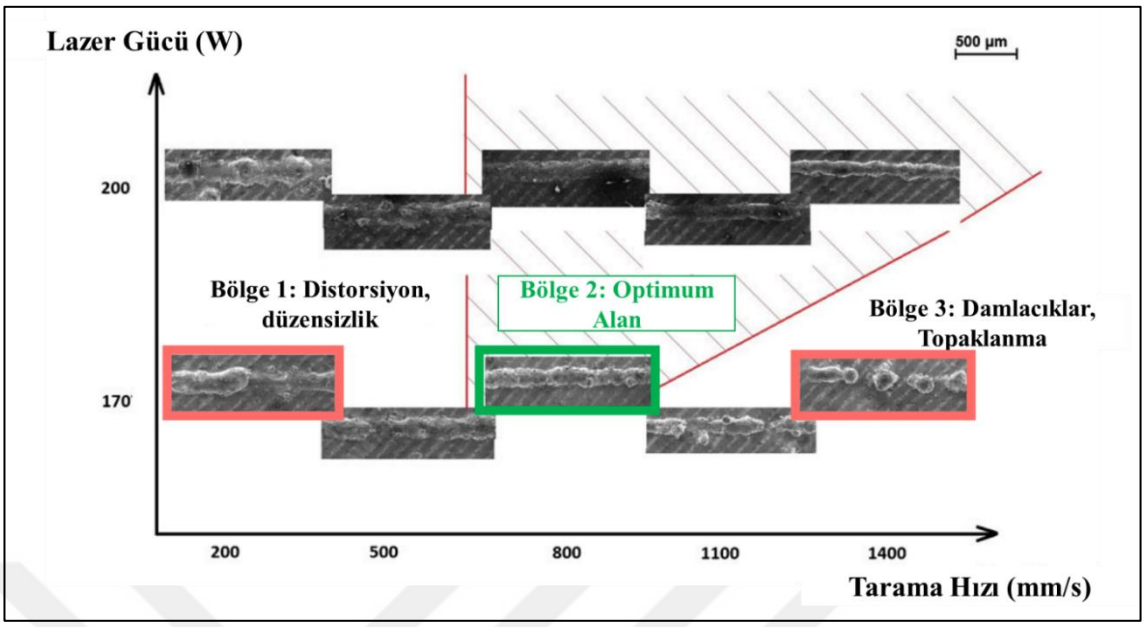
Şekil 2.17. SLE sürecinde parametrelerin kontrolü (Aboulkhair ve diğerleri, 2014)

Lazer gücünün seçimi odaklanılan lazer noktasının boyutuyla ilgilidir ve prosesin diğer parametrelerinin seçimini ve optimize edilmesini belirler. Lazer ışını kontrollü enerji transferi ile, odaklanılan bölgede ergiyik havuzu oluşturur. Lazer gücünü artırma, daha yüksek hızlarda ergimeye ve daha derin ısı nüfuzuna mümkün kılmaktadır. Lazer gücü ve tarama hızı arasında, süreci olumlu veya olumsuz etkileyebilecek önemli bir bağ bulunmaktadır. Tarama hızı, lazerin odaklandığı bölge ile etkileşime girebileceği mevcut süreyi belirler. Tarama hızı ne kadar yüksek olursa, ısıtma için o kadar az zaman kalır ve dolayısıyla belirli bir lazer gücü için, ısının yanlara doğru yayılması için yeterli zaman kalmaz, bu da ergime bölgesinin ve ısıdan etkilenen bölgenin daralmasına neden olur. Tarama hızı ne kadar düşük olursa, lazerin malzeme ile etkileşim süresi uzar ve birim alan başına düşen toplam enerji artar, bu da hacimsel enerji yoğunluğunun daha yüksek olmasına yol açar. Yüksek hacimsel enerji yoğunluğu sonucunda birim zamanda daha fazla malzeme ergitilir. Tarama hızı artırılırsa, lazerin malzeme ile etkileşimi için daha az zaman kalır ve dolayısıyla tarama hızı çok yüksek olduğunda ergimemiş toz partikülü oluşabilir, malzemenin mikro yapısını ve özelliklerini de etkiler (Akinlabi ve diğerleri, 2012). Lazer gücü (P) ve tarama hızı (V) arasındaki bağıntı, sürecin kararlılığı, dengesi ve bitmiş ürünün gözeneklilik oranı üzerinde önemli etki barındırır.

Lazer gücünün (P) tarama hızına (V) oranı literatürde doğrusal enerji yoğunluğu (LED) olarak tanımlanır (Mazur ve diğerleri, 2017). Doğrusal enerji yoğunluğu Denklem 2.1'de gösterilmektedir.

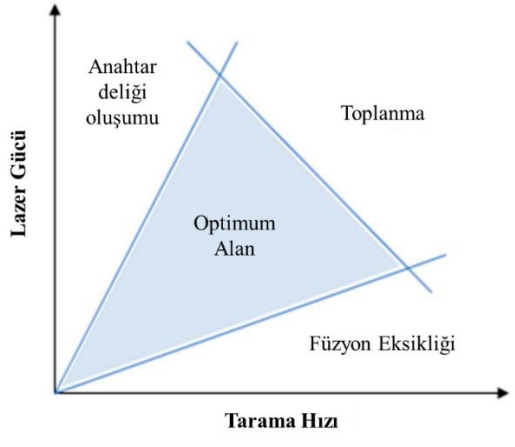
Odaklanılmış alandaki tozun bütünü ile ergitilmesi, yoğun parçalar üretmek ve sonraki katmanla metalurjik bir bağ oluşturmak için oldukça önemlidir (Kempen ve diğerleri, 2015). Şekil 2.18, 1. bölgede görüldüğü üzere, LED çok düşük olduğunda, toz parçacıkları kısmen ergir ve sonuç olarak sürekli olmayan ergime izleri ile gözenek miktarında artış görülür. LED'in artmasıyla ergime havuzunun genişliği ve derinliği artar, sürekli ergime izleri oluşur (Wischeropp, 2021). Gong ve diğerleri (2014), sabit tarama hızında lazer gücündeki artışla birlikte Ti6Al4V için ergime havuzu genişliğinde doğrusal bir artış olduğunu bildirmiştir. LED'deki artış kaynaklı ergime bölgesinde buharlaşma ve sıçramaların yoğunluğu artış gösterir, bu da gözenekliliğin artmasına sebep olur (Simonelli ve diğerleri, 2015). Buna ilaveten, LED'in artması ile sıcaklıkta artar, sıvı hale geçmiş metalin moleküller arası etkileşim azalır bu sebep ile viskozitesi azalış gösterir. Bu, marangoni akışı gibi hidrodinamik etkiler yaratarak, süreç kararsızlıklarında tetikleyici rol üstlenir (Gong ve diğerleri, 2014). Yüksek bir LED, özellikle tarama izlerinin sonunda anahtar deliği gözenekliliğini tetikleyebilir (Matthews ve diğerleri, 2018). Ayrıca, daha yüksek LED değeri daha kaba bir mikro yapıya ve daha düşük artık gerilime sebep olur.

$$LED\ (J/mm) = \frac{Lazer\ Gücü\ (P)(W)}{Tarama\ hızı\ (v)\left(\frac{mm}{s}\right)} \tag{2.1}$$



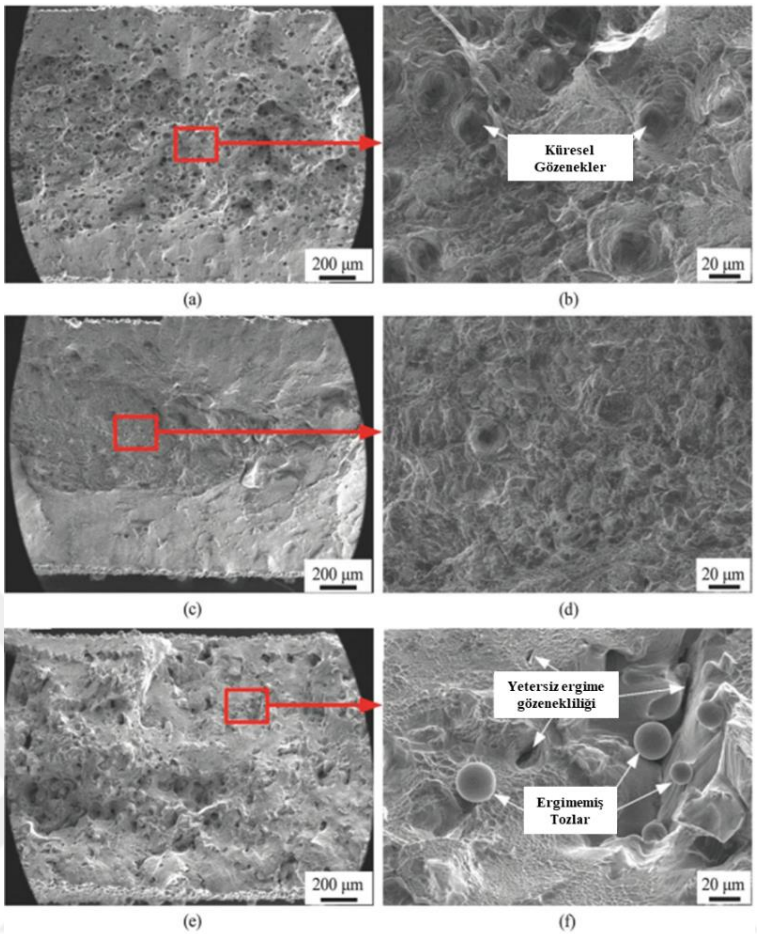
Şekil 2.18. Farklı işlem parametreleriyle üretilen numuneler üzerindeki tarama izlerinin üstten görünümleri (Kempen ve diğerleri, 2015)

Ergiyik havuzun şekli ve stabilitesi girdi parametrelerin seviye farklılıkları ile değişkenlik gösterir. Toz yapıya odaklanmış yüksek enerji değeri nedeni ile ergiyik havuz büyür ve katı toz taneleri ergiyik havuzun kenarlarına bağlanır. Ayrıca, lazer gücü arttıkça, bazı olumsuz sonuçlar meydana gelir, bunlar arasında çevredeki alana (toz yatağı ve bitişik ergimiş parçalar) tesir edebilecek sıçrama oluşumu örnek olarak teşkil edebilir. Buna karşılık, ergiyik havuzuna yönlendirilen enerji miktarı düşükse, lazer füzyon süresi yetersiz kalır ve bu durum "toplanma etkisi" olarak bilinen bir kusurun oluşmasına yol açar (Kurzynowski ve diğerleri, 2012). Bununla birlikte, her malzeme için, ergiyik havuzunun davranışının kararsız hale geldiği ve toplanma hatasına neden olan yüksek tarama hızı değer aralığı mevcuttur. Tarama hızı çok yüksek ve lazer gücü çok düşükse parçada tam olarak ergimeyen bölgeler oluşacak ve bu da füzyon eksikliğine ve gözenekliliğe yol açacaktır. Tersine, eğer seçilen hız için yüksek bir lazer gücü uygulanırsa, ergime havuzu aşırı ısınabilir ve bu daha derin bir enerji nüfuziyetine sebep olabilir, bu da anahtar deliği oluşumu etkisi olarak bilinen hataya neden olur. Bu alanları tanımlamak için Şekil 2.19'da gösterildiği üzere genellikle lazer gücü-tarama hızı diyagramı kullanılır.



Şekil 2.19. Lazer gücü ve tarama hızı parametre seçenekleriyle işlem sonuçları (Calignano ve diğerleri, 2019)

Şekil 2.20'de farklı tarama hızlarında üretilen Ti6Al4V numunelerinin kırılma yüzey morfolojileri gösterilmektedir. Tarama hızı düşük olduğunda Şekil 2.20 (a)'da görüldüğü üzere mikro boyutta küresel gözenek gözlenmiştir. Tarama hızı arttıkça küresel gözeneklerin miktarında önemli ölçüde azalma olduğu Şekil 2.20 (c)' de görülmektedir. Bununla birlikte, Şekil 2.20 (f)' de görüldüğü üzere yüksek tarama hızlarında, yetersiz LED kaynaklı, büyük miktarda ergimemiş toz, gözenek oluşumu, çatlaklar ve diğer kusurlar oluşmuştur, bu da numunenin dayanımını düşürmüştür (Sun ve diğerleri, 2022). Yüksek lazer gücü ve tarama hızı değerlerindeki LED değerinde aşırı ısınma ve artan buharlaşma meydana gelerek, süreç kararsız hale gelmiştir (Zhang ve diğerleri, 2012). Özetle, seçici lazer ergitme prosesinde optimum süreçlerin tasarlanmasında, lineer enerji yoğunluğunun tayini tek başına yeterli bir kriter olmadığını belirtmek gerekir.

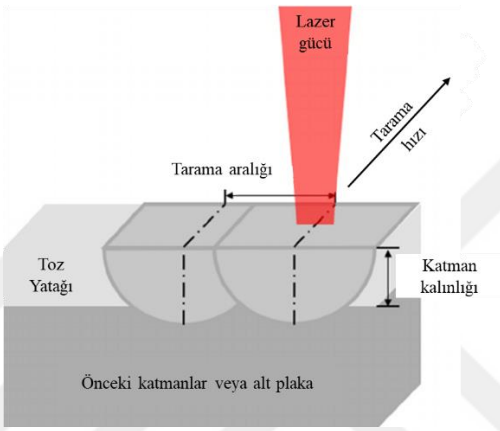


Şekil 2.20. Ti6Al4V alaşımı ile 80 W lazer gücü ve farklı tarama hızları ile üretilen çekme numunelerinin kırılma yüzey morfolojileri (a), (b) 400 mm/s; (c), (d) 600 mm/s; (e), (f) 1000 mm/s (Sun ve diğerleri, 2022)

Bileşendeki sıvı fazın miktarı ergime sıcaklığına bağlıdır ve bu da toza aktarılan enerjiden etkilenir. Toz partiküllerinin birleşme derecesini ve herhangi bir kusurun oluşumunu etkileyen, birim hacim başına lazer ısı girişini temsil eden hacimsel enerji yoğunluğu fonksiyonu E_V olarak belirtilir (Read ve diğerleri, 2015). Denklem 2.2'de görülen hacimsel enerji yoğunluğu fonksiyonunu (Ev) oluşturan parametreler, güçlü bir karşılıklı bağa sahiptirler. Kararlı bir süreç oluşturulması ve yoğun parçalar elde etmek için optimum düzeyde eşleştirilmesi gereklidir (Mazur ve diğerleri, 2017). Lazer toz yatak füzyon prosesinde, lazer gücü (P), tarama hızı (V), katman kalınlığı (t) ve tarama aralığı (h), üretim sürecinin optimizasyonunu büyük ölçüde etkileyen ortak işlem parametreleridir (Yap ve diğerleri, 2015).

Denklem 2.2'ye göre: E_V (J/mm3) hacimsel enerji yoğunluğunu, $P\ (W)$ lazer gücünü, $v\left(\frac{mm}{\text{s}}\right)$ tarama hızını, $h(\mu\text{m})$, lazer tarama aralığını ve $t\ (\mu\text{m})$ katman kalınlığını ifade etmektedir.

$$E_V\ (J/mm^3) = \frac{P(W)}{v\left(\frac{mm}{\text{sec}}\right) \times h(\mu\text{m}) \times t(\mu\text{m})} \tag{2.2}$$



Şekil 2.21. SLE metodunda başlıca üretim parametreleri: lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığı (Yap ve diğerleri, 2015)

SLE işlemi sırasında toz katman üzerinde odaklanılan alana hacimsel enerji girişi numunelerin mikroyapısal ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Toz yatağında odaklanılmış birim alana iletilen aşırı hacimsel enerji girdisi, potansiyel olarak anahtar deliği fenomenine ve porozite oluşumuna neden olur. Tersine, yetersiz enerji değerlerinde, füzyon eksikliği ve katmanlar arası zayıf bağ problemine yol açabilir (Eric ve diğerleri, 2013). Birçok araştırmacı kararlı işlem parametreleri ile bir süreç oluşturmak amacı ile hacimsel enerji yoğunluğu fonksiyonu üzerinde çalışmalar yapmıştır. Hacimsel enerji yoğunluğu, sıklıkla %99 oranına yakın yoğun bileşenlerin üretilmesi için temel parametrelerin sınır değerlerinin belirlenmesinin bir yolu olarak kullanılmaktadır (Kempen ve diğerleri, 2011). Bu doğrultuda E_V değerini oluşturan parametrelerin kombinasyonlarının iyice incelenmesi ve dengeli bir enerji değerine ulaşılması büyük önem arz etmektedir.

Han ve diğerleri, (2017) Ti6Al4V alaşımı ile 120 ila 190 J/mm³ enerji yoğunluğu aralığında üretilen numunelerde %99,95'lik bir bağıl yoğunluğa ulaşmıştır. Ayrıca, (α') martenzitin genişliğinde ve aralığında bir azalma olduğunu, uygulanan E_V arttıkça mikro sertlikte bir artışa yol açtığını gözlemlemişlerdir. Buna karşılık Kasperovich ve diğerleri, (2016), bağıl yoğunluğu %99,9 olan Ti6Al4V bileşenlerinin üretimi için farklı enerji yoğunluğu aralığı olarak, 83 ila 129 J/mm³ değer aralığını tanımlamışlardır. Aşırı veya yetersiz enerji yoğunluğu girişinin küresel gözenekliliği artırabildiğini gözlemlemişlerdir. Bu gözenekler sırasıyla anahtar deliği etkisinin ve füzyon eksikliğinin sonucudur. Kasperovich ve diğerleri (2016), tarafından önerilen optimum enerji yoğunluğu aralığının aksine, Vandenbroucke ve Kruth, (2007), 95 W lazer gücü, 0,03 mm katman kalınlığı, 125 mm/s tarama hızı ve 0,13 mm tarama aralığı ile 194 J/mm^3 enerji yoğunluğuyla %99,8'i aşan bir bağıl yoğunluk oranı elde etmişlerdir. Gong ve diğerleri (2015), lazer gücünü 120 W, tarama aralığı 0,1 mm ve katman kalınlığını 0,03 mm sabit tutarak, tarama hızlarında farklı kombinasyonlar oluşturmuşlardır. E_V 42 J/mm^3 (V=960 mm/s) enerji yoğunluğu değerinde iken gözeneklilik oranının %0,27 J/mm^3 (V=1500 mm/s) ve 100 J/mm3 (v=400 mm/s) enerji yoğunluğunda ise gözeneklilik oranının %5 olduğunu bildirmişlerdir. Thijs ve diğerleri, (2010), 93 J/mm³ enerji değerine farklı parametre kombinasyonları ile ulaşmış ve üç farklı bağıl yoğunluk değeri (%99,6, %99,35 ve %99,9) gözlemlemişlerdir. Yang ve diğerleri, (2016) aynı enerji yoğunluğu ile %99,5 bağıl yoğunluk değeri elde etmiştir. Literatürde görüldüğü üzere farklı hacimsel enerji yoğunluk değerlerine, lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığının farklı kombinasyonları ile ulaşıldığına ve farklı gözeneklilik, yoğunluk değerleri elde edildiği görülmektedir.

Seçici lazer ergitmede, direkt proses parametrelerin yanı sıra endirekt parametrelerin de malzeme yoğunluğunu etkilediği görülmüştür. Wang ve diğerleri, (2018), SLE tekniğini kullanarak Ti6Al4V' da yüksek yoğunluk elde etmek amacıyla yoğunluk optimizasyonu için 28 farklı proses parametresi belirlemişlerdir. Çalışmalarında, aynı enerji değeri kullanıldığında bile değişken proses parametrelere bağlı, numunelerin bağıl yoğunluğunu etkilediğini gözlemlemişlerdir.

Bununla birlikte hacimsel enerji yoğunluğu kavramı, SLE ile üretilmiş ürünlerde ortaya çıkabilecek spesifik kusur türlerine ilişkin net bir ayrım sağlayamamaktadır. Literatür incelemeleri, kusurları tahmin etmek için enerji yoğunluğunu kullanmanın sınırlamalarını göstermiştir. Bu nedenle, sadece hacimsel enerji yoğunluk değeri üzerinden kusurların oluşum tayini tavsiye edilmez (Harkin ve diğerleri, 2023). Çünkü, aynı enerji yoğunluklarına, farklı lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığının çeşitli kombinasyonları ile ulaşmak mümkündür. Çünkü, bu parametreler, eşdeğer hacimsel enerji yoğunluk değerini üretmek için farklı şekillerde ayarlanabilir. Farklı parametrelerin yalnızca enerji yoğunluğuna dayalı olarak karşılaştırılması yanıltıcı olabilir çünkü bu parametrelerin etkileri tam olarak doğrusal bir şekilde tepki vermemektedir. Bu nedenle, nihai ürün üzerindeki etkilerin tam olarak değerlendirilebilmesi için parametrelerin daha kapsamlı bir şekilde araştırılarak, karşılaştırılması gereklidir (Kasperovich ve diğerleri, 2016).

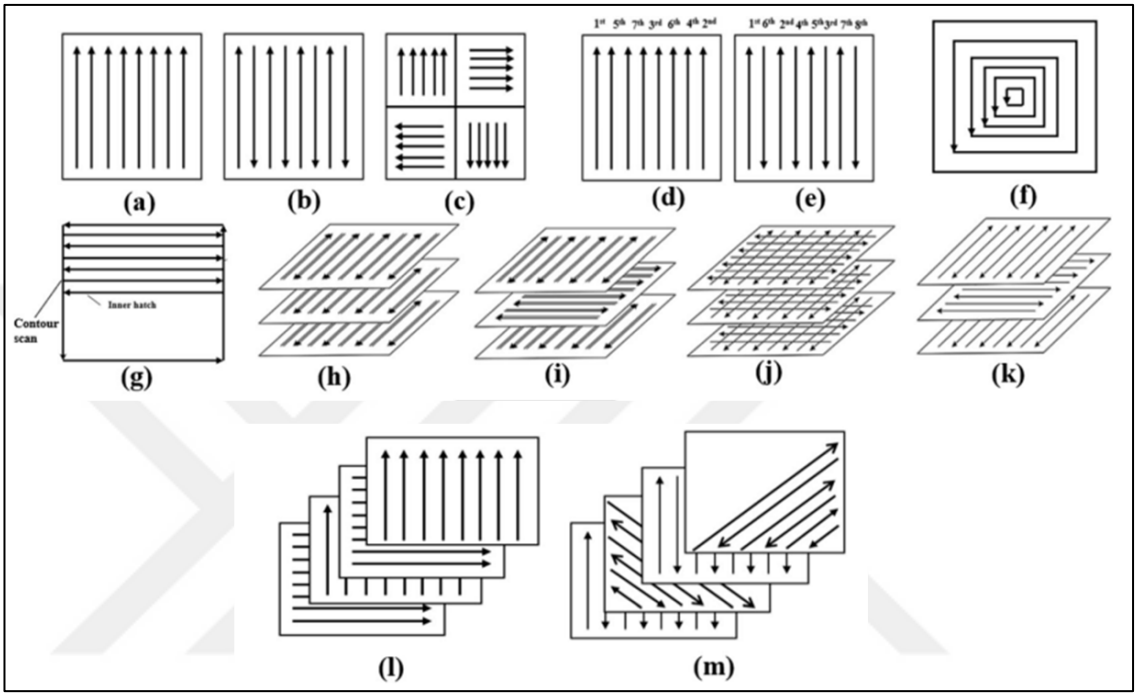
Eklemeli imalat yönteminde, oluşturulacak geometri eşit aralıklara bölünür. Her bir aralığın yükseklik değerine de katman kalınlığı adı verilir. Temel proses parametrelerinden olan katman kalınlığının ergiyik havuzun termodinamiği üzerinde önemli bir etkisi vardır. %99 üzerinde yoğun parçalar elde etmek için gerekli hacimsel enerji girdisi fonksiyonunu etkiler (Wang ve diğerleri, 2020). Tarama hızındaki azalma, her bir tarama izi için daha fazla malzeme ergimesine neden olur, bu da katman kalınlığının artması ve toplam katman sayısının azalmasıyla sonuçlanır, böylece sürecin genel verimliliği artar. Ancak, katman kalınlığının artmasıyla birlikte daha fazla malzeme sıvılaşması gerektiğinden, hacimsel enerji girişi artırılmalıdır. İlave olarak, mikro yapı ve mekanik özellikler etkilenir, artık gerilimler azalabilir ve katman kalınlığının artmasıyla parçanın doğruluğu merdiven etkisi nedeniyle artar (Wischeropp, 2021). Bir diğer yandan, yüksek katman kalınlığı nedeni ile parçanın yoğunluğunun düşmesi kaynaklı mekanik değerlerinde düşüş yaşandığı Kempen ve diğerleri, (2011) tarafından raporlanmıştır.

Tarama stratejisi, lazerin bir katman üzerinde tarama yaparak oluşturduğu desen, yön olarak tanımlanır.

Tarama stratejilerinin, üretilen parçaların mekanik özelliklerini etkileyecek fenomenlerden olan soğuma hızı üzerinde etkisi vardır ve kalitesel olarak önemli ölçüde nihai ürün özelliklerini değiştirebilir (Jia ve diğerleri, 2021). Tarama stratejisini ayarlanması ile yapı içerisinde oluşan artık gerilimler veya toplanma etkileri gibi birçok kusur, kontrol altına alınabilir (Jhabvala ve diğerleri, 2010). Her bir katmanın taranabileceği sayısız yol vardır.

Farklı tarama stratejileri Şekil 2.22' de gösterilmektedir. Şekil 2.22 (a) ve (b) görülen uzun tarama vektörüne sahip tarama stratejisi, yaygın olarak uygulanmaktadır. Her iki tarama stratejisi arasındaki fark, tarama yönünün değişiminde yatmaktadır. Tek yönlü tarama stratejisinde enerji ışınının hareket yönleri her zaman aynıdır. Çift yönlü geliş ve gidiş içeren taramaya zikzak tarama denir. Şekil 2.22 (c)' de görülen, alanı küçük kare hücrelere bölerek elde edilen satranç tahtası veya ada tarama adı verilen stratejide tarama vektör uzunluk değeri oldukça azdır. Bu yaklaşım, daha eşit bir ısı dağılımı üretmek amacıyla bileşeni ayrı ayrı ve rastgele taranan daha küçük alanlara böler (Qiu ve diğerleri, 2013). Kısa tarama vektörlerine sahip tarama stratejileri proses stabilitesini iyileştirir, gözenekliliği azaltır (Thijs ve diğerleri, 2010) ve artık gerilimleri azaltır (Gu ve diğerleri, 2013). Ayrıca ada taramasında her bir alt bölümün tarama stratejisi bağımsız olarak seçilebilinir, tarama vektörlerinin uzunluğu, tarama yönü ve dönüş açısı ayrı küçük birimlere göre ayarlanabilmektedir. Komşu adaların vektörleri düzenli olarak birbirine dik olarak taranır, böylece her katmanda birden fazla yönde taranan izler kalır ve tek yönde büyük bir gerilim oluşmaz. Uzun tarama hattı aşırı ve birikmiş gerilime neden olacak ve bu da parçaların kalitesini olumsuz etkileyecektir. Bu nedenle ada tarama stratejisi, büyük boyutlu parçaların daha kaliteli oluşturulması için alternatif bir yöntem olabilir (Jia ve diğerleri, 2021). Şekil 2.22. (a), (b), (d) ve (e) arasındaki fark, eklemeli imalat sürecinde sıcaklık dağılımını değiştirmek için kullanılan tarama dizilerinin varyasyonunda yer almaktadır. Şekil 2.22 (f) 'de görüldüğü üzere helis tarama stratejisi aynı zamanda tarama vektörünün uzunluğunu da azaltabilir (Shipley ve diğerleri, 2018). Kontur tarama stratejisi Şekil 2.22. (g), önceden tanımlanmış bir konturun sürekli lazer taramasına ve kontur içindeki alanın taranmasına dayanmaktadır (Stamp ve diğerleri, 2009).

Şekil 2.22. (h) ve (i)' de gösterilen, taranmış alanın yeniden taranması esasına dayanan stratejilerinden biri olan çift geçişli işlem, genellikle mikro yapıyı iyileştirmek için kullanılır. Şekil 2.22. (i), (j), (k), (l) ve (m) tarama vektörlerinin her yeni katmanda belirlenen açı değerinde dönüşünü göstermektedir.

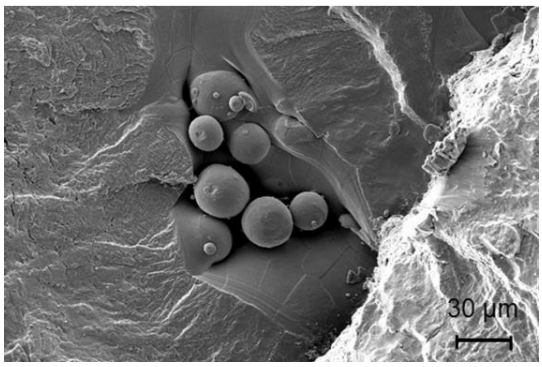


Şekil 2.22. Farklı tarama strateji tiplerinin şeması: (a) tek yönlü tarama; (b) çift yönlü/zikzak tarama; (c) ada taraması; (d) tek yönlü taramaya dayalı değişen diziler; (e) çift yönlü taramaya dayalı değişen diziler; (f) sarmal taraması; (g) kontur taraması; (h) çift yönlü, çift geçişli lazer ışını; (i) çift yönlü, çift geçişli lazer ışını ve katmanlar arasında 90° dönebilen tarama vektörü; (j) çapraz tarama; (k) çift yönlü, tek geçişli lazer ışını, (l) ardışık katmanlar arasında tek yönlü tarama vektörünün 90° dönüşü, (m) tarama vektörünün 45° dönüşü (Jia ve diğerleri, 2021)

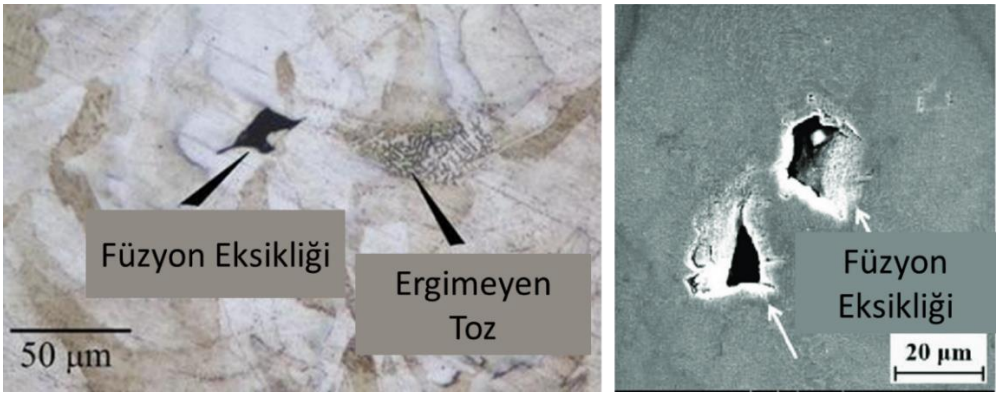
Çizelge 2.2. SLE ile üretilen bir parçada oluşabilecek ana kusurlar ve proses parametre eşleşmesi (Calignano ve diğerleri, 2019)

Kusurlar / **Proses Parametreleri**	Porozite	Pürüzlülük	Artık Gerilim	Füzyon Eksikliği	Toplanma	Anahtar Deliği	Aşırı Isınma/ Buharlaşma
Lazer Gücü	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Tarama Hızı	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Tarama Aralığı	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Katman Kalınlığı	✓	✓	✓		✓		
Tarama Stratejisi	✓	✓	✓		✓	✓	

Enerji değeri, odaklanılmış tozu ergitmek için yeterli olmadığı durumlarda, büyük miktarda toz üretim başlangıç durumundaki hali ile kalır, ergime gerçekleşmez ve Şekil 2.23'te ergimemiş parçacıklar halinde görülür. Şekil 2.24'te görüldüğü üzere füzyon eksikliği kusuruna sebep olur. Füzyon eksikliği, süreç parametrelerinin yetersiz bir şekilde optimize edilmesi sonucunda, yeni katmanın önceki katmanla uygun bir şekilde ergimemesi ve kaynaşmaması olarak tanımlanmaktadır. Yetersiz enerji yoğunluğu kaynaklı oluşan ergiyik tabakası sınırındaki parçacıklar arasındaki zayıf bağlar, malzeme süreksizliğine neden olur (Liu ve diğerleri, 2014). Düşük lazer gücü kaynaklı kaynaşmayan tozlar nedeni ile iç yapıda gözeneklilik artmakta, malzemenin mukavemetini düşürmektedir (Gong ve diğerleri, 2014).



Şekil 2.23. Ti6Al4V alaşımı ile üretilen numunenin kırılma yüzeyinde mevcut olan ergimemiş parçacıkların koloni halindeki görüntüsü (Kasperovich ve Hausmann, 2015)



Şekil 2.24. Füzyon eksikliği kusuru ve ergimemiş toz (Zhang ve diğerleri, 2017), (Xu ve diğerleri, 2020).

Yüksek lazer gücü girişinde, yüzey geriliminin artması sonucu erime izleri tarafından uzun, ince silindirik çizgiler oluşmakta ve daha sonra kalın toplanma kusurları oluşmaktadır. Artan bir lazer gücü alt tabakadaki emiciliği, ergime derinliğini arttırır, ısıdan etkilenen bölgeyi genişletir ve ergiyik havuzunun düzgün bir şekilde karışmasını sağlar, ancak aynı zamanda yüzey dalgalanması ve çatlak oluşumu eğilimini de arttırır. Lazer ışın çapı, yüzey kalitesi ve son parçanın ölçüsel doğruluğu üzerinde önemli etkisi vardır (Sentilkumara ve diğerleri, 2009).

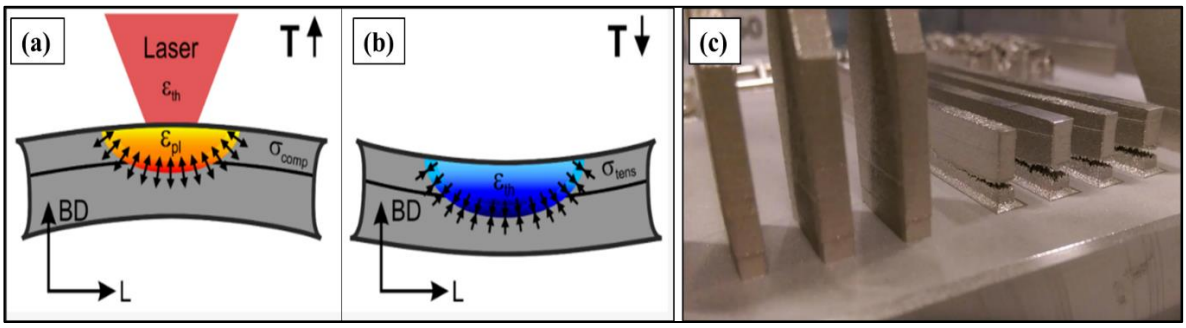
Küçük lazer ışın çapı sayesinde, serilen tozun odaklanılmış bölgesini ergitmek için mevcut olan lazer enerji yoğunluğu artar. Küçük nokta boyutu, mevcut enerjiyi daha geniş bir alana yayan, daha az konsantre hale getiren büyük nokta boyutuna kıyasla, mevcut tüm lazer enerjisini küçük bir alana yoğunlaştırabilir. Ergiyik havuzun boyutu lazer ışın çapı boyutu ile sınırlıdır. Lazer ışın çapının küçük olması, iz kalınlığının da küçük olmasını sağlayarak, üretilen parçanın yüzey kalitesi de iyileşir. Daha büyük ışın çapı, daha büyük iz kalınlığı üretecek ve dolayısıyla, katmanlı imalatın karakterize ettiği belirgin bir merdiven basamağı etkisine yol açacaktır (Mahamood ve diğerleri, 2020).

SLE proses kusurları ve etkilerinin özeti olarak; füzyon eksikliği sebepleri arasında, proses parametrelerinin uygunsuz optimizasyonu, homojen olmayan toz yatağı, ergiyik tabaka sınırında yetersiz enerji yoğunluğu veya parçacıklar arası zayıf bağlanma nedeniyle oluşan malzeme süreksizliği gelmektedir.

Toz yatağının kalınlığındaki bir miktar azalma ile bu problemlerin etkisi azalabilir. Bu hata tipi yorulma özellikleri ve katmanların ayrılması açısından kritiktir (Romero ve diğerleri, 2018; Fatemi ve diğerleri, 2019; Vilaro ve diğerleri, 2011).

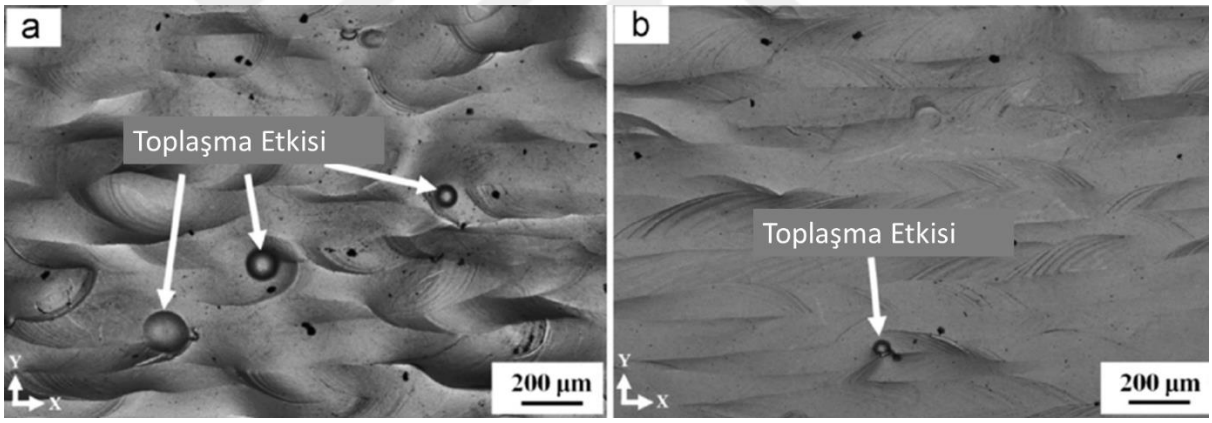
Gaz gözeneği hatasının sebepleri olarak toz atomizasyonu sırasında atmosferden gaz sıkışması, yüksek soğuma hızı nedeniyle ergiyik havuzda buharlaşan malzemenin katılaşma esnasında gaz halinde hapsolması veya ergiyik havuzda proses ortamını koruyan inert gazın hapsolması gelmektedir. Lazer gücü veya katman kalınlıklarının azaltılması yoluyla sıvı metalin hacminin azaltılması ile üretilen parçada gaz basıncının azaltılması bir çözüm olabilir. Sıcak izostatik presleme (HIP) ile toz yatağının bağıl yoğunluğunun artırılması, bilyalı püskürtme ile dövme işlemi dış katmanda bulunan gözenekler için de çözüm olabilir. Bu hata sebebi ile süngerimsi, düşük yoğunluklu yapı meydana gelir, çekme ve yorulma dayanımı düşer (Cao ve diğerleri, 2018, Romero ve diğerleri, 2018, Fatemi ve diğerleri, 2019, Vilaro ve diğerleri, 2011).

Malzeme iç yapısında meydana gelen artık gerilim oluşumu, sıcaklığın bir konumdan diğerine göre daha yüksek olma durumu olan yüksek termal gradyanlar, aşırı hacimsel enerji girdisi ve hızlı katılaşma sebebi ile meydana gelir. Artık iç gerilimlerin giderme yöntemleri arasında, imalat proses parametrelerin optimize edilmesi, katman yönelimlerinin ayarlanması veya üretim sonrası tavlama ve ısıl işlemler olarak sıralanır. Bu hata tipi gevrek kırılma ve gerilme yoğunlaşma bölgelerinden Şekil 2.25.(c)' de görüldüğü üzere çatlak oluşumuna sebep olur (Romero ve diğerleri, 2018; Fatemi ve diğerleri, 2019; Vilaro ve diğerleri, 2011).



Şekil 2.25. (a) ısıtma (b) SLE imalatında soğutma sırasında ısı girişinin stres durumu üzerindeki etkisini gösteren şematik görüntüler, (c) artık gerilme kaynaklı malzemede çatlak oluşumu (Mercelis ve Kruth, 2006; 3dprintingindustry.com (Erişim Tarihi: 30.07.2024)

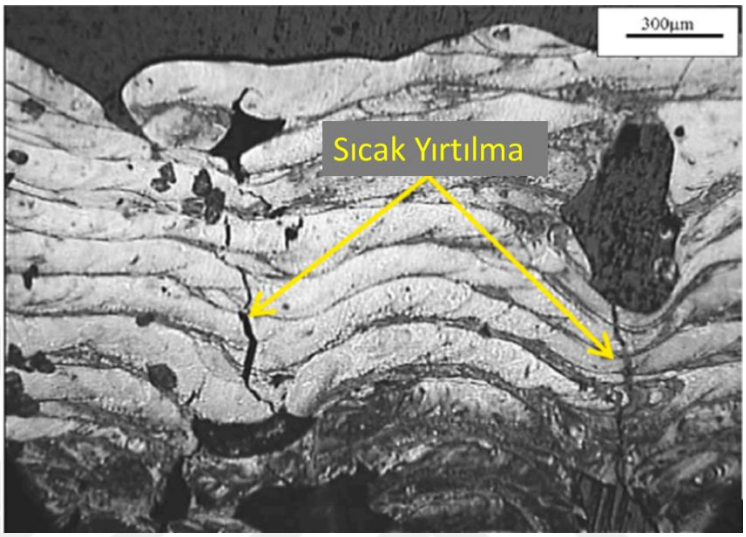
Toplaşma etkisi, eriyik havuzun kararsızlığı nedeni ile ortaya çıkar. Bu hata tipinde, gerilmelerin yoğunlaştığı noktalar görülür (Romero ve diğerleri, 2018; Fatemi ve diğerleri, 2019). Şekil 2.26'da malzeme mikroyapısında toplaşma etkisi görülmektedir.



Şekil 2.26. SLE ile üretilen saf titanyum malzemede (a), (b) toplaşma etkisi (Attar ve diğerleri, 2014)

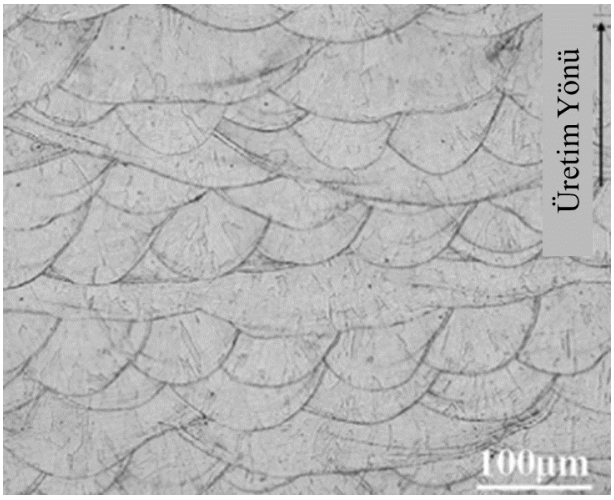
Yapım aşamasındaki yüzey pürüzlülüğü, proses parametreleri, toz özellikleri, tabaka kalınlığı ve yönelimi gibi önemli etkenler bulunmaktadır. Optimize edilmiş bir proses ile tasarım parametreleri ve toz özellikleri kullanılarak bu hata tipi en aza indirilebilir. (Fatemi ve diğerleri, 2019).

Şekil 2.27'de gösterildiği üzere sıcak yırtılma, malzemenin gerilme ve yüksek sıcaklığın varlığına verdiği tepkinin sonucudur. SLE prosesinde iç stres ve yüksek sıcaklığın önlenmesi ile giderilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda daha kritik hale gelir (Collins ve diğerleri, 2016).



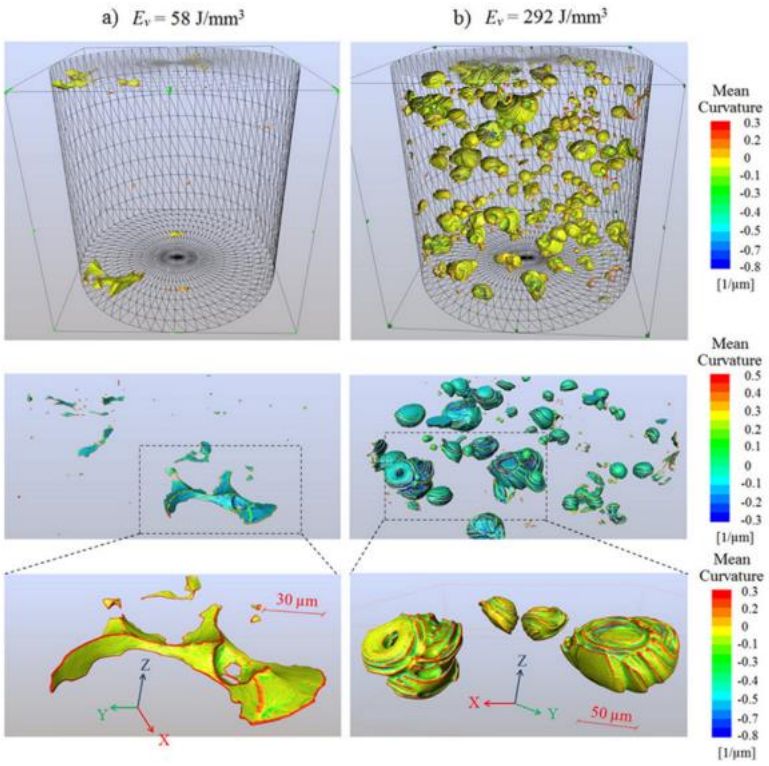
Şekil 2.27. SLE tekniği ile üretilen parçada sıcak yırtılmaların varlığı (Pogson ve diğerleri, 2004)

Balık pulları, tozların SLE prosesi ile katman üzeri katman katılaştırılması sırasında oluşan çözünen madde konsantrasyonlarından dolayı meydana gelmektedir. İşlem sırasında parametrelerin uygun şekilde seçilmesi gerekmektedir. Bu hata tipi kaynaklı, tabakalar birbirinden ayrılması ile hasar meydana gelebilir (Tang ve diğerleri, 2015).



Şekil 2.28. Optik mikroskop ile balık pul görünümü (Hou ve diğerleri, 2020)

Kasperovich ve diğerleri, (2016), farklı hacimsel yoğunluk değerlerinde üretilen malzemelerin iç yapısındaki gözeneklerin oluşum ve boyutlarını Şekil 2.29'da görüldüğü üzere analiz etmişlerdir. İç yapıdaki kalıntı gözeneklerin morfolojisini ayırt etmek için üç boyutlu tomografi görüntüleme tekniğini kullanmışlar ve numunelerinin gözeneklerini karakterize etmişlerdir. Düşük hacimsel enerji yoğunluklarında füzyon eksikliği kaynaklı meydana gelen 100 µm' den büyük gözenek boyutlarına sahip kusurların olduğunu öne sürmüşlerdir. Yüksek enerji yoğunluğunda, iç kusurların esas olarak toplaşma etkisi ve sıçrama davranışıyla ilgili olduğunu, 50 µm' den büyük boyutlara sahip küresele yakın gaz gözenekleri ile anahtar deliği uygunsuzluğunun oluştuğunu bildirmişlerdir.



Şekil 2.29. Malzeme yapısı kalıntı porozitelerin morfolojisi (Kasperovich ve diğerleri, 2016)

Liu ve diğerleri, (2020), kalıntı gözenek kusurlarına X-ışını bilgisayarlı tomografisi ile incelemelerinin ardından, kusurların oluşumu ile lazer tarama hızı, gücü arasında bağlantı olduğunu belirtmişlerdir.

2.2.2. Seçici lazer ergitme yöntemi avantajları

SLE, çok çeşitli malzemeler ile çalışabilme yeteneğine sahip olması sebebi ile işleve ve amaca yönelik çok çeşitli parçaların üretimi için elverişlidir. Son derece hassas, karmaşık, %99 üzerinde yoğunluk değeri ile yüksek dayanımlı parçaların imalatı sağlanır. Seçici lazer ergitme yöntemi, Ti6Al4V alaşımı kullanılarak, yüksek hassasiyet ve performanslı ürünler elde etmek için kullanılan katmanlı üretim teknolojisidir (Ming ve diğerleri, 2019).

Seçici lazer ergitme yöntemi ile yapılan literatür çalışma sonuçları incelendiğinde toz malzemenin tamamen ergitilerek, parçaların ve desteklerin alt tabaka plakasından çıkarılması dışında son işleme gerek kalmadan tamamen yoğun, final biçime yakın bileşenler üretilebildiği görülmüştür. Bu, SLE'yi, toz malzemeleri katı hal sinterlemesi veya bağlayıcı maddelerin ergitilmesi yoluyla bağlayan ve yüksek gözenekliliğe ve düşük dayanıklılığa sahip parçalar oluşturan seçici lazer sinterleme yöntemine kıyasla üstün bir eklemeli imalat işlemi haline getirir.

SLE'de, yüksek yoğunluklu lazer kullanımıyla tozun tamamen ergimesi sağlanır ve bağlayıcı malzemelere gerek duyulmaz, bu da genellikle SLS prosesinde gerekli olan ısıl işlem ve malzeme infiltrasyonu gibi zaman alıcı ve süreci uzatan son işlemlere olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Mevcut SLE teknolojisi, benzer olarak çalışan bağlayıcı bazlı lazer sinterleme eklemeli imalat teknolojisi ile karşılaştırıldığında ürün kalitesinde, işlem süresinde ve üretim güvenilirliğinde ön plana çıkar.

SLE imalat yönteminin avantajları arasında, doğrudan üretime ek olarak, hasarlı parçaların tamirine olanak sağlaması da bulunmaktadır. Hasarlı parçanın üzerine belirli kalınlıkta serilen toz malzemeyi eritmek ve hasarlı bileşendeki çatlakları ve delikleri kapatmak için kullanılır.

2.3. SLE Yönteminde Kullanılan Metal ve Alaşımları

SLE imalat yönteminde hammadde olarak başlıca titanyum alaşımları, çelikler, kobalt, krom ve alüminyum alaşımları kullanılmaktadır (Kumar ve Pityana, 2011). Bu metaller yaygın uygulamaları ve malzeme maliyetleri nedeniyle seçilmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda, ilerleyen süreçte alüminyum, bakır, magnezyum ve tungsten gibi birçok farklı metal tozu, hammadde olarak SLE yöntemi ile üretilmiştir.

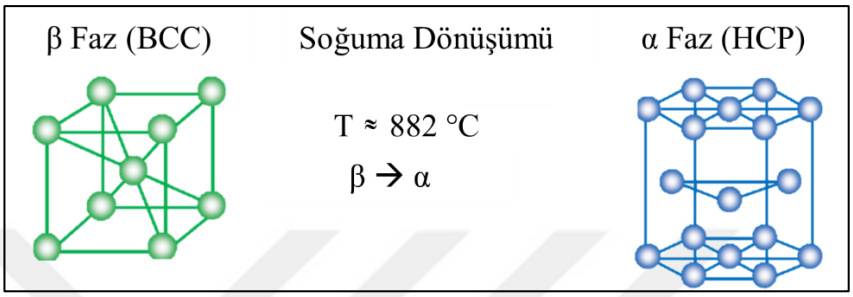
Metalleri SLE ile işlemenin temel avantajı, SLE'nin yapılandırılmış gözenekliliğe sahip bileşenler üretme esnekliği sağlamasıdır.

Bu, ürün geliştiricilerinin çeliğin tokluğundan yararlanmalarını ve çeliğin nispeten yüksek yoğunluğunu dengelemek için tasarımlarında ağırlık optimizasyonu yapmalarını sağlar. Literatür çalışmalarında yer alan SLE ile üretilen demir metallerin çoğu 316L paslanmaz çeliğe dayanmaktadır (Yap ve diğerleri, 2015). Jandin ve diğ. (2005) tarafından yapılan çalışmalarda, düşük lazer gücü ve yüksek tarama hızı kaynaklı toz malzemede eksik ergime gerçekleşmiş ve sonuç olarak yüksek gözenekli yapı gözlemlenmiştir. Lazer gücünü artırarak veya tarama hızını azaltarak yapının iyileştirilebilir olduğu bulguları elde edilmiştir. Tolosa ve diğ. (2010), tarafından yapılan çalışmalar ile SLE metodu ile 316L çeliği malzemesi ile üretilen numunelerde %99,9 bağıl yoğunluğa erişildiği kaydedilmiştir. Devamında, SLE prosesinde kullanılan hammadde esneklik avantajlarından yararlanarak, Jerrard ve diğ. (2009) 316L paslanmaz çelik ve 17-4 PH paslanmaz çelik toz karışımının üretilebilirliğini araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda, üretilen bileşenlerin sertlik ve manyetik yapısının, içeriklerin bileşim oranını değiştirerek ayarlanabileceğini görülmüştür. Dolayısıyla belirli işlevlere ve ihtiyaçlara göre SLE metodu ile yeni çelik sınıfları üretilebilir olduğu görülmüştür. Ayrıca, SLE imalat tekniğinde kullanılmak üzere farklı çelik çeşitleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu metallere örnek olarak Inox904L paslanmaz çelik, AISI Maraging 300 çeliği, 15-5 ve 17-4 çökelme sertleştirme çeliği, H20 takım çeliği ve X110CrMoVAl 8-2 takım çeliği verilebilinir. Fe-Ni, Fe-Ni-Cu-P, Fe-Ni-Cr, Fe-Al ve Fe-Cr-Al alaşımları gibi demir bazlı alaşımlar ve intermetalikler de SLE üretim yöntemi imalat yapılmış fakat bu tür malzemeler ile yapılan çalışmaların sayıları çok daha azdır (Yap ve diğerleri, 2015).

Titanyum, dünyada bol miktarda bulunan bir element olarak bilinir ve endüstride en yaygın kullanılan metallerden biri olan alüminyum, demir ve magnezyum gibi metallerle birlikte gelir.

Titanyum çekme mukavemeti/yoğunluk oranı yüksek olan, bir diğer ifade ile yüksek özgül dayanıma sahip, korozyona karşı dirençli, biyouyum özellikleri yüksek ve çelik malzemelerle karşılaştırıldığında %56 oranında daha hafif bir malzemedir. (Leyen ve Peters, 2003).

Oda sıcaklığında saf titanyum, α fazı olarak adlandırılan altıgen sıkı paket (HCP) bir yapı sergiler. β transus sıcaklığına çıkıldığında (yaklaşık 882 °C), bu yapı β fazı adı verilen hacim merkezli kübik (BCC) yapıya dönüşür (Murr ve diğerleri, 2009). Şekil 2.30'da β faz halinde bulunan saf titanyumun, yaklaşık 882 °C değerinde, soğuma dönüşümü ile α fazı haline dönüşümü görülmektedir.



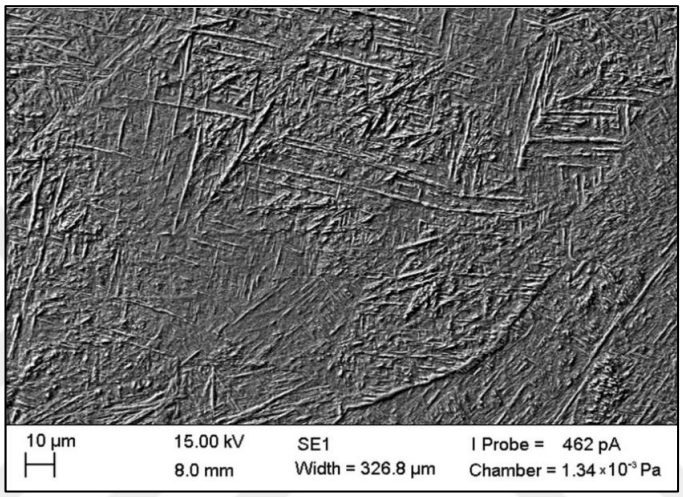
Şekil 2.30. Saf Titanyumun faz dönüşümü ve kristal hücre yapısı (Veiga ve diğerleri, 2012)

Titanyum, α alaşımları, β alaşımları ve α+β alaşımları olmak üzere 3 farklı kategoriye ayrılır. α alaşımının özelliği, yüksek sürünme dayanımı, gelişmiş kaynaklanabilirliktir. Sıcaklığın çok yüksek veya çok düşük olduğu ortamlarda tercih edilir. Bu alaşımda, Al, Zr ve Sn bulunur. β alaşımları yüksek yoğunluk, yüksek ısıl dayanım, yüksek mukavemet sağlar (Collings, 1988). α dengeleyicisi olarak, azot (N), karbon (C), Oksijen (O) arayer elementleridir. β dengeleyici olarak, Vanadyum (V), Molibden (Mb), Niyobyum (Nb), Demir (Fe), Silisyum (Si) ve Krom (Cr) elementleridir ve yüksek mukavemet özelliği sağlar. Titanyum alaşımları, α→β dönüşüm sıcaklık değerini artıran veya azaltan elementlerin eklenmesi ile farklılık gösterir. α+β alaşımlarında en yaygın olarak Ti6Al4V gelir. Seçici lazer ergitme metodunda endüstriyel uygulamalarda en yaygın olarak kullanılan metallerin başında titanyum gelmektedir. Yüksek sıcaklık değerlerinde yüksek mukavemet özelliği, hafiflik, yüksek kırılma tokluğu özellikleri ile havacılıkta, biyouyumluluk, yüksek korozyon direnci özellikleri ile biyomedikal alanlarda tercih edilir.

Dünya çapındaki tüm titanyum ve alaşımlarının kullanımı içerisinde Ti6Al4V alaşımının kullanım oranı, %50'den fazlasını oluşturmaktadır (Alcisto, 2011). Bunun nedeni, yüksek çalışma sıcaklıklarında iyi stabilitesi, yüksek özgül mukavemeti ve yüksek korozyon direnci özellikleridir. Ti6Al4V alaşımının olağanüstü bu özellikleri nedeniyle havacılık endüstrisinde ve tıbbi implantlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Leuders ve diğerleri, 2013). Bunların yanı sıra, Ti6Al4V geleneksel üretim yöntemleri kullanılarak üretildiğinde, işleme maliyetleri nedeni ile zor bir metal olarak sınıflandırılmıştır (Conradie, 2016). Yüksek kesme kuvveti gerektirmesi nedeni ile işleme maliyetlerini artırmaktadır. Düşük ısıl iletkenlik özelliği nedeni ile ısının parçadan uzaklaştırılması zorlu bir süreçtir. Bu sebepler ile günümüzde Ti6Al4V alaşımının katmanlı imalat yöntemleri kullanılarak işlenmesi yaygınlaşmaktadır.

Ti6Al4V alaşımı oda sıcaklığında çift fazlı α+ β mikroyapıya sahiptir. α dengeleyicisi olarak ağırlıkça %6 Alüminyum, β dengeleyicisi olarak ağırlıkça %4 Vanadyum içeren bir α–β alaşımı olarak kabul edilir (Kasperovich ve diğerleri, 2016). Ti6Al4V için β geçiş sıcaklığı denge koşulları altında yaklaşık 995 °C 'dir, dolayısıyla bu sıcaklığın üzerinde Ti6Al4V %100 β fazına dönüşür ve hacimsel merkezli kübik (HMK) yapıdadır (Murr ve diğerleri, 2009). Nihai mikro yapı, β geçiş sıcaklığının üzerinde meydana gelen soğuma hızıyla oldukça ilişkilidir (Raju ve diğerleri, 2015). α dengeleyici elementler olan, (Al, O, H) β geçiş sıcaklığını artırırlar. β dengeleyici elementler olan (V, Ta, Mo, Nb) β geçiş sıcaklığını azaltırlar. Eklenen elementlerin oranına göre, alaşımdaki faz kararlılığı, dönüşüm sıcaklığı belirlenir. Yavaş ila orta dereceli soğuma hızlarında (<410 °C/s), β matrisi içinde α lamelli fazların çekirdeklenmesi ve büyümesi ile difüzyon kontrollü α fazı oluşur. Bu tür mikro yapılar genellikle dövme ve döküm bileşenlerde gözlenir. Ti6Al4V alaşımları, sıvı→β→(α+ β) faz dönüşümleri gerçekleşir. Soğutma hızı arttıkça (>410 °C/s), α-lamellerinin uzunluğu ve kalınlığı azalır, difüzyonsuz martenzit α' fazı oluşur (Cho ve diğerleri, 2019). Bu da mukavemetin artmasına neden olur (Murr ve diğerleri, 2009). Yüksek soğuma hızı kaynaklı Şekil 2.31'de görüldüğü üzere iğnemsi bir yapı oluşur. Bu dönüşüm ile yapı dayanımı, mukavemeti ve sertliği artar, ancak sünekliliği ve tokluğu azalır.

Soğutma hızları titanyum alaşımlarının mikro yapısını büyük ölçüde etkiler. Düşük ve orta seviyedeki soğuma hızları, lamellerin β tanelerine doğru difüzyon kontrollü çekirdeklenmesini ve büyümesini sağlar. Yüksek soğuma hızlarında ise β fazı martensitik dönüşüme uğrar. Titanyum alaşımlarının SLE üretiminde, lazer ışınlarının etkisiyle hedeflenen bölgede bileşenler hızla ısıtılır ve ardından soğutulur. Yüksek soğuma hızı (yaklaşık 10-4 K/s4) nedeniyle titanyum alaşımlarında iğnemsi α' martensitik fazın oluşmasıyla sonuçlanır (Murr ve diğerleri, 2009).



Şekil 2.31. Seçici lazer ergitme (SLE) işleminden sonra Ti6Al4V titanyum alaşımının SEM mikro yapısı. İğnemsi α' faz martenzitin β fazının üzerindeki dağılımı (Zochowski ve diğerleri, 2021)

Amerikan Malzeme ve Test Kurumu (ASTM), Ti6Al4V alaşımının katmanlı imalat ile üretilmesi sonucunda elementlerin % ağırlıkça ihtiva etmesi gereken oranları belirtmiştir ve Çizelge 2.3'te görülmektedir.

Çizelge 2.3. Ti6Al4V eklemeli imalat sonucunda kimyasal bileşimi (ASTMF2924-14)

Element	Ti	N	C	H	Fe	O	Al	V
Ağırlık %	Denge	0,05	0,08	0.015	0,3	0,2	5,5-6,75	3,5-4,5

Çizelge 2.4'te katmanlı imalat sonrasında Ti6Al4V alaşımında beklenen fiziksel özellikler gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Ti6Al4V Alaşımına ait fiziksel özellikler (Yan ve Yu, 2015)

Fiziksel Özellikler	**Değer**
Katı Hal Yoğunluk (ρ)	4,43 g/cm^3
Sıvı Hal Yoğunluk (ρ)	3,89 g/cm^3
Katılaşma Sıcaklığı	1604 °C
Ergime Sıcaklığı	1660 °C
α → β Dönüşüm Sıcaklığı	750 °C
α + β → β Dönüşüm Sıcaklığı	980 ℃
Martenzit Faz Dönüşüm Sıcaklığı	750 ℃ veya 610 ℃

2.4. Kaynak Araştırması

Ti6Al4V malzemesi ile SLE işleminin sayısız avantajına rağmen, bu teknikle ilgili devam eden birtakım zorluklar mevcuttur. İlk olarak, parça yoğunluğunu maksimuma çıkarma gerekliliğinin bir sonucu olarak ortaya çıkan yüksek soğuma hızları nedeni ile SLE ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımında mikroyapısı α_0 martenzit oluşur (Thijs ve diğerleri, 2010; Vilaro ve diğerleri, 2011). Sonuç olarak, SLE ile işlenmiş Ti6Al4V bileşeni, yüksek dayanıma sahip olma eğilimindedir fakat düşük süneklilik gösterir (Vrancken ve diğerleri, 2012). İkinci olarak, SLE ile Ti6Al4V alaşımı ile üretilmiş parça, yorulma performansını büyük ölçüde etkileyebilecek toplaşma ve gözeneklilik gibi mikroyapısal kusurlara sahip olabilir (Leuders ve diğerleri, 2013). Son olarak, çatlak büyüme davranışı üzerinde önemli bir etkisi olduğu kanıtlanan artık gerilimler, işleme sürecinde ortaya çıkan yüksek soğuma hızları ve sıcaklık dalgalanmaları nedeniyle üretilen parçalarda oluşabilir.

Eklemeli imalat metodu ile üretilen ürünlerin otomobil, uzay sanayi, medikal alanlarında kullanım oranı artarken, meydana gelebilecek bu zorlukların, kalite ve güvenilirliğin önemli olduğu sektörlerde yüksek hacimli endüstriler için ürün tutarlılığını sağlama konusu kritiktir (Sarvankar ve Yewale, 2019).

Bu zorlukların her birini hem bireysel olarak hem de topluca yönetmenin birçok yolu bulunmaktadır. Bu yolların ortak noktası ise süreç parametrelerinin kontrolüdür (Shipley ve diğerleri, 2018). Girdi parametrelerinin, ürün çıktısı üzerinde son derece önemli ve hassas olduğu bu imalat sürecinde, araştırmacılar minimum kusur ile maksimum kalitede ürün elde etmek amacıyla birçok çalışma gerçekleştirmiş ve bu çalışmalara devam etmektedirler.

Literatürde yapılan çalışmalar araştırıldığında, SLE prosesinde farklı araştırmacıların farklı parametre kombinasyonları ile belirli mekanik ve metalurjik özelliklere ulaştığı görülmektedir. Farklı parametrelerin çeşitli malzemelerdeki mikro yapıyı, proses kusurlarını ve artık gerilimleri nasıl etkileyebileceğini araştırmak için çok sayıda çalışma yapılmıştır (Ali ve diğerleri, 2018; Sun ve diğerleri, 2022; Liu ve diğerleri, 2020; Pal ve diğerleri, 2020; Chlebus ve diğerleri, 2011; Tarakçı ve diğerleri, 2022; Kasperovich ve diğerleri, 2016). Sertlik, darbe direnci, akma dayanımı, süneklik ve gözeneklilik düzeyi gibi mikro yapıyla yüksek düzeyde ilişkili olan çeşitli malzeme özellikleri incelenmiştir (Yasa ve diğerleri, 2010). Bu nedenle mikroyapıyı etkileyen üretim parametrelerinin önemi yapılan çalışmaların sonuçlarından görülmektedir.

Pegues ve diğerleri (2017), çeşitli proses parametrelerinin, üretilen parçaların mekanik davranışları üzerindeki etkisini incelemek için eklemeli imalat yöntemi ile bir çalışma gerçekleştirmiştir. Farklı tarama hızlarında üretilen numuneler incelendiğinde, yüksek tarama hızına sahip numunelerde, önemli ölçüde gözenek oluşumu sergilendiği görülmüştür. Ek olarak, bu parçalar, geleneksel imalat yöntemleri ile üretilen muadilleri ile karşılaştırıldığında daha yüksek akma (σ_a) ve kopma dayanımı ($\sigma_ç$) gösterirken, süneklilik değerlerinde bir miktar azalma kaydedilmiştir.

Sun ve diğerleri (2022), SLE metodunda lazer gücü 50-140 W, tarama hızı 300-1100 mm/s, tarama aralığı 0,06-0,1 mm değer aralıklarında olacak şekilde Ti6Al4V alaşımlı çekme, çentik darbe numuneleri üretmişlerdir ve bağıl yoğunluğu, çekme özellikleri, çentik darbe dayanıklılığı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Lazer gücü ve tarama hızı parametresinin, aynı zamanda enerji yoğunluğunu da değiştirdiğinden, düşük veya yüksek enerji yoğunluğu girdisinin, bağıl yoğunluk üzerinde önemli etkilerinin olduğunu belirtmişlerdir. Bunun yanı sıra tarama aralığı parametresinin yoğunluk değerinde önemli bir değişikliğe neden olmadığını kaydetmişlerdir. SLE ile üretilmiş olan numunelerin, dövme yöntemi ile imal edilmiş muadilinden nihai çekme dayanım bakımından daha yüksek olduğunu fakat darbe dayanıklılık değerinin daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Bunu da SLE ile üretilen numunelerin iç kusurlarının darbe dayanıklılığının değerini etkilemesi kaynaklı olduğunu belirtmişlerdir. Maksimum çekme dayanımı, artan lazer gücü ile bir miktar artmış, sonrasında düşüşe geçmiştir. Yapılan optimizasyon çalışması ile 80 W lazer gücü, 500 mm/s tarama hızı, 0,08 mm tarama aralığı değerleri kullanılarak üretilmiş Ti6Al4V alaşımı için %99,45'lik bir bağıl yoğunluk, 1188 MPa'lık bir kopma mukavemeti ve %9,5'lik bir kopma uzaması elde edilmiştir. Darbe dayanıklılığı 24.13 J/cm^2 ve mikro sertlik değerleri 384 $Hv_{0,2}$ olarak kaydedilmiştir.

Elsayed ve diğerleri (2018), SLE proses parametrelerinin, Ti6Al4V numunelerinin gözeneklilik seviyesi, yüzey pürüzlülüğü, elastisite modülü ve basınç dayanımı (UCS) gibi değerlerin üzerindeki etkisini araştırmak için, lazer gücü 35-50 W, tarama hızı 100-400 mm/s ve tarama aralığı 35-120 mm aralıklarında olacak şekilde deney seti hazırlayarak insan kemiğine çok yakın özelliklere sahip yapılar elde etmek için yanıt yüzeyi metodu ile optimizasyon çalışması yapmışlardır. Optimizasyon çalışmasının sonucunda, işlem parametreleri (lazer gücü, lazer hızı ve tarama aralığı) arasındaki etkileşimin, üretilen numunelerin mekanik özellikleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu tespit edilmiştir. Lazer gücünün artması ile ergime havuzu düzleşmekte olduğunu ve toplaşma hatasının ortadan kaldırılmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığını tespit etmişlerdir.

Lazer gücünü artırmak ve/veya tarama hızını, tarama aralığını (belirli bir aralık içinde) azaltmak, metal tozlarının daha iyi bir şekilde birleşmesine neden olarak SLE parçasının gözeneklilik seviyesini düşürmüş ve bu durum parçanın elastisite modülü ile basınç dayanımını artırmıştır. SLE ile üretilen numunelerin mekanik özellikleri, gözeneklilik oranıyla iyi bir korelasyon sergilemiştir. Gözeneklilik seviyesinin kontrolünün önemi vurgulanmıştır. İşlem parametrelerinin 49 W lazer gücü, 400 mm/s tarama hızı, 0,99 mm tarama aralığı optimum değerler olarak bulunmuş ve %23,62 gözeneklilik oranı, 8,68 mm yüzey pürüzlülüğü, 30 GPa elastisite modülü ve 522 MPa basınç dayanımına sahip numuneler üretmişlerdir, insan kemiğine yakın sertlikte olan ortopedik yapılara uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Wang ve diğerleri (2019), işleme parametrelerinin optimizasyonu ve SLE yöntemi ile işlenen Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri arasında ilişkinin kurulması amacı ile katman kalınlığını 0,03 mm, tarama aralığını 0,1 mm değerlerinde sabit tutarak, farklı lazer gücü (50-100-150-200-250 W) ve tarama hızlarında (250-550-850-1150-1450-1750 mm/s) çalışmalar yapmışlardır. Lazer gücü ve tarama hızı, malzemenin pürüzlülüğü ve bağıl yoğunluğunda önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğünün tarama hızı arttıkça arttığını, lazer gücü arttıkça azaldığını kaydetmişlerdir. Gözeneklilik, düşük lazer gücü bölgesinde (50-150 W) tarama hızı arttıkça artmış, yüksek lazer gücü bölgesinde (200-275 W) tarama hızı arttıkça azalmıştır. Optimum SLE parametre aralığı olarak 200-250 W lazer gücü ve 850-1150 mm/s tarama hızı değerlerini sunmuşlardır. Mikro sertlik, lazer gücünün artışı ile artış kaydetmiş, tarama hızı arttıkça azalışa geçmiştir. Tarama hızı arttıkça uzama değeri sürekli olarak artmış ve 1150 mm/s tarama hızında maksimum %7,8 değerine ulaşmıştır.

Gong ve diğerleri (2015), seçici lazer ergitme yöntemi ile Ti6Al4V malzemesi ile değişen enerji yoğunluk seviyelerine sahip farklı proses parametre kombinasyonları ile üretilmiş numunelerin mekanik özelliklerini değerlendirme amacı ile sertlik ve çekme testleri uygulamışlardır.

Lazer gücü 120 W, tarama aralığı 0,1 mm, katman kalınlığı 0,03 mm sabit tutularak, farklı tarama hızlarında (400-540-960-1260-1500 mm/s) numuneler üretmişlerdir. Optimum enerji seviyesinin üzerindeki enerji yoğunluğunda, yapı içerisindeki gözenek ve boşlukların %5 seviyesine geldiğinde çekme, yorulma ve sertlik değerlerinin önemli ölçüde düştüğünü belirtmişlerdir. En yüksek çekme mukavemetine 1252 MPa değeri ile 540 mm/s tarama hızı ve 74 J/mm^3 enerji yoğunluğu parametresi ile ulaşmışlardır. En düşük çekme mukavemetine, 978 MPa değeri ile 1500 mm/s tarama hızı, 27 J/mm^3 enerji yoğunluk değerinde elde etmişlerdir. Deney sonuçlarında, mikroyapının soğuma hızları tarafından etkilendiğini vurgulamışlardır. Mekanik özellikler üzerinde, yetersiz enerji girişiyle oluşan kusurlara kıyasla, aşırı enerji girişiyle meydana gelen kusurlar daha az zararlı olduğunu bildirmişlerdir.

Bartolomeu ve diğerleri (2022), proses parametrelerinin mekanik özelliklere olan etkilerini inceleyen çalışmaların derlemesinde, literatürde mevcut olan sonuçlarda, SLE metodu ile Ti6Al4V alaşımı kullanılarak üretilmiş numunelerin akma mukavemeti >900 MPa ve kopma mukavemeti >1000 MPa değerlerinin, implantlar ve havacılık uygulamalarına yönelik standartların (ASTM F136–13; ASTM F1108-14; AMS4930; AMS6932 vb.) minimum değerleri dikkate alındığında yeterli olduğunu göstermektedir. SLE metodunda, Ti6Al4V alaşımının imalatı sonrası elde edilen tipik ürünün mikroyapısının iğnemsi α' yapıda olduğunu, yüksek çekme mukavemeti ve sertlik gösterdiğini, düşük sünekliliğe sahip olduğunu belirtmişlerdir. Sünekliliğin iyileştirilmesi açısından 850 °C ‘de 2 saat süresince fırında ısıl işlem uygulanması sonrası soğutma prosesini en etkili süreç olarak öne çıkartmışlardır. Gözenekler ve füzyon eksikliği gibi kusurlar yüksek miktarlarda mevcut olduğunda, yorulma performansı kötüleşmekte ve bu kusurlar nedeniyle hem yapı içerisinde hem de yüzeyde çatlakların başlayabileceğini belirtmişlerdir. Yorulma performansı için bir diğer önemli faktörü, yüzey pürüzlülüğü olarak tanımlamışlar ve SLE ile üretim sonrası yüzey işlemin, yorulma performansını artırdığını ifade etmişlerdir.

Kasperovich ve diğerleri (2016), SLE metodu ile üretilen bir Ti6Al4V alaşımında farklı parametre değerlerinde üretilen numunelerin porozite oluşumu arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Aşırı veya yetersiz enerji yoğunluklarında iki ana tip boşluk kusuru gözlemlediklerini belirterek, aşırı enerji (292 J/mm^3) değerinde, dairesel/küresel gözeneklerin muhtemel anahtar deliği etkisi ile oluştuğunu, yetersiz enerji (58 J/mm^3) girdisinde üretim yönüne dik yönlenmiş uzun, dar çatlak benzeri boşlukların oluştuğunu belirtmişlerdir. Yetersiz enerji girdisinde oluşan bu gözeneklerin, metalik tozların ergimemesi kaynaklı toplaşma etkisinden kaynaklanan füzyon eksikliği kusuru olduğunu ifade etmişlerdir. Minimum porozite oranına 117 J/mm^3 hacimsel enerji değeri ile ulaşmışlardır. Lazer gücünün, porozite yoğunlukları üzerinde önemli bir etkisi olduğunu, 100 W ile 120 W aralığında porozite oranında düşüş gösterdiğini belirterek, 120 W ile 180 W aralığında 0,1% değerlerinde sabit kaldığını ifade etmişlerdir. 180 W değerinden 220 W değerine doğru aşırı enerji girdisi kaynaklı porozite oranı da artmıştır. Kısa tarama mesafesi ile üretilen numunelerde yeniden ergimeye görülmüş, böylece gözeneklilik artmıştır. Özellikle sınır bölgelerde, lazerin geri dönüş hareketleri ile aşırı ısınma kaynaklı gözeneklilik meydana gelmiştir. Bu nedenle zikzak tarama deseninde, 60 μm değerinin altındaki tarama mesafesini önermemişlerdir. Tarama hızı analizlerinde, 200 mm/s ‘den 600 mm/s tarama hızı artışında, porozite oranı %3,2’den yaklaşık %0,12’te düşmüştür. Tarama hızı artırılmaya devam edilmiş, 1200 mm/s değerinde gözeneklilik oranı %0,62 oranına çıkmıştır. Sonuç olarak, benzer enerji yoğunluklarının çok farklı lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi ve katman kalınlığı kombinasyonları ile elde edilebileceğini belirtmişler ve parametrelerin etkilerinin kesinlikle doğrusal davranmadığından yalnızca enerji yoğunluğuna göre bir karşılaştırmanın yanıltıcı olacağını önemle vurgulamışlardır.

Shunmugavel ve diğerleri (2015), SLE ve dövme tekniği ile üretilmiş silindir çubukların mikroyapı, kimyasal bileşim, çekme test sonuçları ve sertlik değerlerini incelemişlerdir. Dövme metodu ile işlenmiş Ti6Al4V, haddeleme yönünde uzun tanelere sahip eş eksenli homojen bir mikro yapıya sahipken, SLE ile üretilen Ti6Al4V, katman üzerine katman birikmesi nedeniyle, kristal yapının büyümesinin bir sonucu olarak uzun tanelere sahiptir.

Eklemeli imalat ile üretilen çubuğun, geleneksel yöntem ile işlenmiş çubuğa göre daha yüksek akma dayanımına, nihai çekme dayanımına, sertliğe ve daha düşük % uzama oranına sahip olduğunu tespit etmişlerdir. İşlenmiş çubuk, sünek doğası gereği derin çukurlu kırılma sergilerken, SLE çubuğu, kırılgan doğasının bir sonucu olarak taneler arası kırılma sergilemiştir.

Xu ve diğerleri, (2015), istenmeyen martenzitik yapıyı ultra ince katmanlı (α +β) yapıya dönüştürmek için Ti6Al4V'nin SLE ile yerinde α' martensit ayrışmasının, enerji yoğunluğu, katman kalınlığı, odak uzaklığı mesafesi gibi parametrelerin düzenlemeleri ile gerçekleştirilebilir olduğunu belirtmişlerdir. SLE sonrası ısıl işlemin 350 ila 950 °C sıcaklık değerlerinde gerçekleştiğini, 400 °C sıcaklık değerinde α' martensitin, α +β yapıya ayrışması için, SLE esnasında termal döngü etkisi ile biriken ısıl işlemin yeterli olabileceğini açıklamışlardır.

Khorasani ve diğerleri (2020), Ti6Al4V alaşımı ile lazer toz yataklı füzyon prosesi olan seçici lazer ergitme tekniğinde, yüzey morfolojisi ve gerilimi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Daha yüksek lazer gücü ve daha düşük tarama hızı kaynaklı hacimsel enerji yoğunluğunun artış göstereceğini buna istinaden, odaklanılmış toz malzeme üzerinde yüksek sıcaklığın oluşacağını belirtmişlerdir. Yüzey geriliminin düşmesi ile düşük viskoziteli ergime havuzunun oluşacağını ve bu da yüzeyin ıslanabilirliğinin artmasına, Rayleigh kararsızlığının azalmasına ve tüm yönlerde yüzey pürüzlülüğünün iyileşeceğini ileri sürmüşlerdir.

Thijs ve diğerleri (2010), SLE ile işlenen Ti6Al4V alaşımında tarama parametrelerinin ve tarama stratejisinin mikro yapıya etkisini incelemiş. Lazer gücü 42 W, katman kalınlığı 0,03 mm sabit tutularak, tarama hızı (50-100-200 mm/s), tarama aralığı (0,05-0,075-0,1 mm) ve üç farklı tarama stratejisi ile numuneler üretmiştir. Bu tarama stratejileri sırasıyla, dönüş açısı olmayan zikzak desen, taramanın tek yönlü dönüş açısı olmayan ve her katmanda 90° dönen zikzak desendir. SLE işlemi sırasında oluşan yüksek sıcaklık değişimleri ve soğuma kaynaklı beklendiği gibi oluşan faz çok ince iğnemsi bir martensittir.

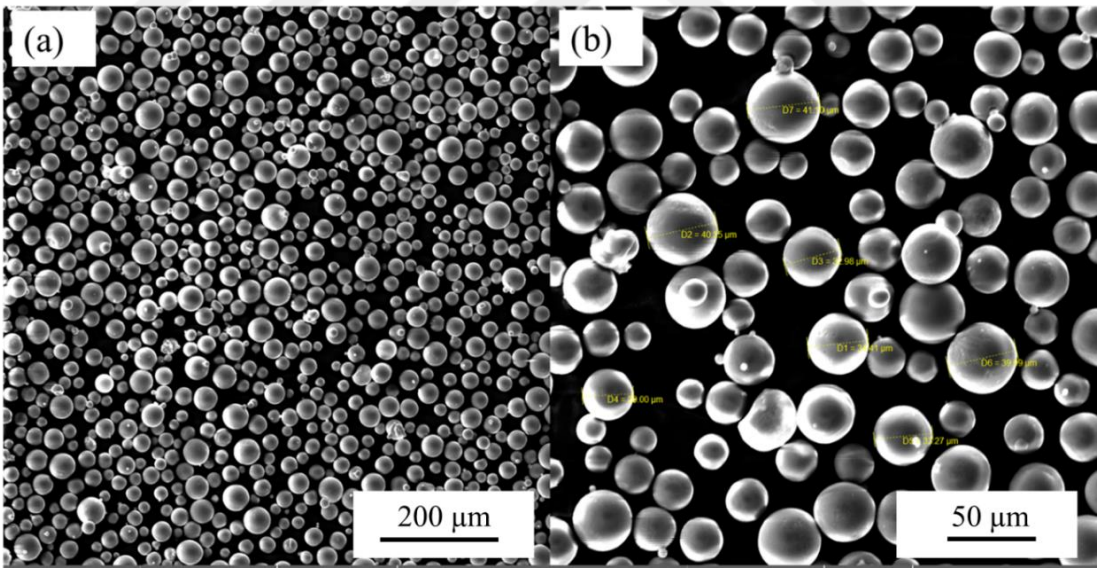
Farklı tarama yönlerinde numuneler üreterek, balıksırtı deseni gözlemlemişlerdir. Epitaksiyel büyüme nedeniyle uzun tanelerin oluştuğu ve bu tanelerin yönünün proses parametrelerine bağlı olduğu belirtilmiştir.

Özet ile, lazer toz yataklı ergitme işlemi sırasında büyük sıcaklık gradyanları oluşur. Bu da katmanlı olarak üretilen metalik yapı içinde yüksek düzeyde artık gerilime yol açabilir ve elastik deformasyonda negatif bir etki oluşturabilir. Ergiyik havuzunun hızlı katılaşması, SLE ile işlenmiş Ti6Al4V'un, genellikle geleneksel metotlar ile üretilen eşdeğerinden daha düşük bir sünekliğe sahip olmasına sebep olan martensitik bir mikro yapı oluşturmasına neden olur. Mevcutta iç artık gerilimi ortadan kaldırmak ve sünekliği artırmak için SLE ile üretilen parçalara proses sonrası ısıl işlemler uygulanabilmektedir. Sonraki işlemlere gerek kalmadan mevcut proses parametreler ile mekanik değerlerde optimum seviyelere ulaşmak önem arz etmektedir. Ancak yüksek kaliteli bir malzeme elde etmek için proses parametrelerinin doğrusal tepkileri analiz edilmelidir. Porozite oranının minimum seviyeye indirgenmesi, minimum yüzey pürüzlülüğü, yüksek mukavemet değerleri elde edebilmek için deneysel çalışmalara ihtiyaç vardır. İlave olarak, Titanyum ürünlerinin geleneksel imalat teknikleri ile üretimi zorlu ve zaman alıcıdır. Yüksek malzeme israfı kaynaklı üretim maliyetleri yüksektir. Bir eklemeli üretim teknolojisi olan SLE, daha az üretim süresiyle net şekle yakın bileşenler üretme kabiliyeti nedeniyle geniş çapta ilgi görmüştür. (Shunmugavel ve diğerleri, 2015).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deney Numunelerinin Üretiminde Kullanılan Toz Yapısı

Bu çalışmada, hammadde olarak, yüksek biyo uyumluluk, korozyon direnci, dayanım/ağırlık oranı ve SLE yöntemi ile uyumlu olması sebebiyle Ti6Al4V (Grade 23) alaşım tozu kullanılmıştır. Toz, Ermaksan Eklemeli Üretim Merkezi'nde EIGA (Elektrot İndüksiyonlu Eritme Gaz Atomizasyonu) yöntemiyle üretilmiştir. ASTM B214'e göre toz bileşimi, %1,6'sı 45 µm' den büyük partiküller ve %98,4'ü 45 µm veya daha küçük partiküllerden oluşmaktadır. Yapılan deneysel çalışmada kullanılan Ti6Al4V alaşım tozunun görünür yoğunluğu ASTM B212'ye göre 2,52 g/cm^3 olarak ölçülmüştür. Şekil 3.1'de sunulan SEM görüntüsünde, toz parçacıklarının önemli bir bölümünün küresel bir şekilde olduğu ve farklı boyutlardaki parçacıkların karışım içinde homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Ti6Al4V alaşımını oluşturan kimyasal bileşim Çizelge 3.1 'de sunulmaktadır.



Şekil 3.1. (a) Küresel şekil sergileyen homojen olarak dağılmış Ti6Al4V toz parçacıkları, (b) toz parçacıklarının boyut dağılımının SEM görüntüleri

Çizelge 3.1. Ti6Al4V Alaşımının kimyasal bileşimi (Ermak A252-TI64-Grade 23)

Element	Ti	N	C	H	Fe	O	Al	V	Diğer Element Toplam (max.)
Kütlece Oran, %	Bal.	0.02	0.01	0.003	0.19	0.11	6.46	4.0	<0.40

3.2. Deney Numunelerinin Üretimi, Parametreler ve Boyutlar

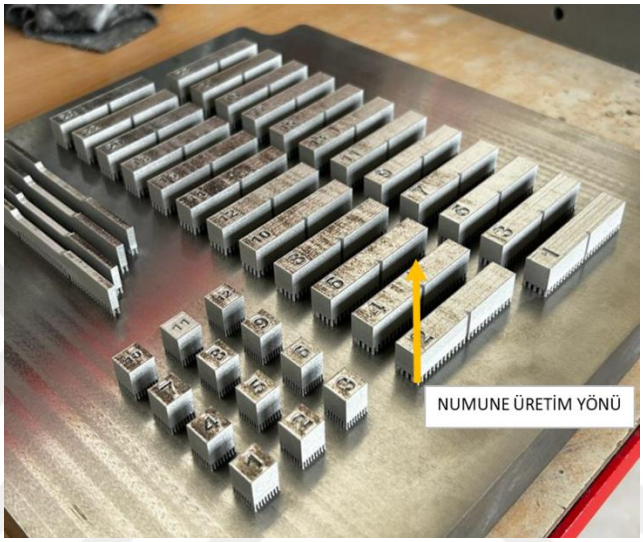
Test numuneleri, Gazi Üniversitesi Eklemeli İmalat Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (EKTAM) Ermaksan tarafından üretilen Şekil 3.2'de görülen ENAVISION 250P Seçici Lazer Ergitme cihazı kullanılarak üretilmiştir.



Şekil 3.2. ENAVISION 250P modeli seçici lazer ergitme (SLE) cihazı

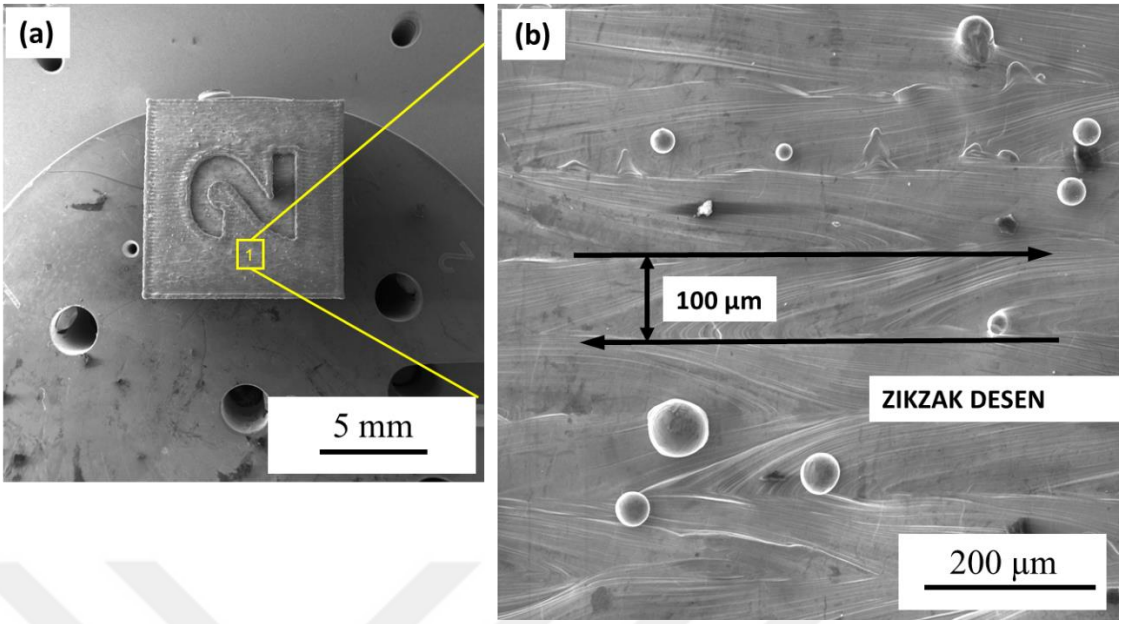
Enavision 250P SLE cihazı, 250 mm x 250 mm x 300 mm üretim hacmine sahiptir. 7 bar koruyucu Argon gazı ortamında, maksimum 500 Watt çıkış gücüne sahip fiber lazer kullanılmaktadır. 20 ila 100 µm arasında ayarlanabilir katman kalınlığı sunan platforma sahiptir. Yapılan bu çalışmada tüm numuneler 30 µm katman kalınlığında üretilmiştir. Fiber lazer dalga boyu 1070 nm ve lazer nokta büyüklüğü 0,085 mm'dir. Üretim esnasında platform sıcaklığı ön ısıtma değeri 180 °C'dir.

Lazer gücünün, tarama hızının, tarama aralığının ve tarama stratejisinin etkisini incelemek amacıyla her parametreden üç farklı seviye belirlenmiş ve diğer parametreler Şekil 3.3'te görülen numunelerin üretimi sırasında sabit tutulmuştur. Deneylerde üç farklı lazer gücü seviyesi (160 W, 190 W ve 220 W), üç farklı tarama hızı seviyesi (800 mm/s, 1000 mm/s ve 1200 mm/s) ve üç farklı tarama aralığı seviyesi (0,07, 0,09 ve 0,11 mm) kullanılmıştır.



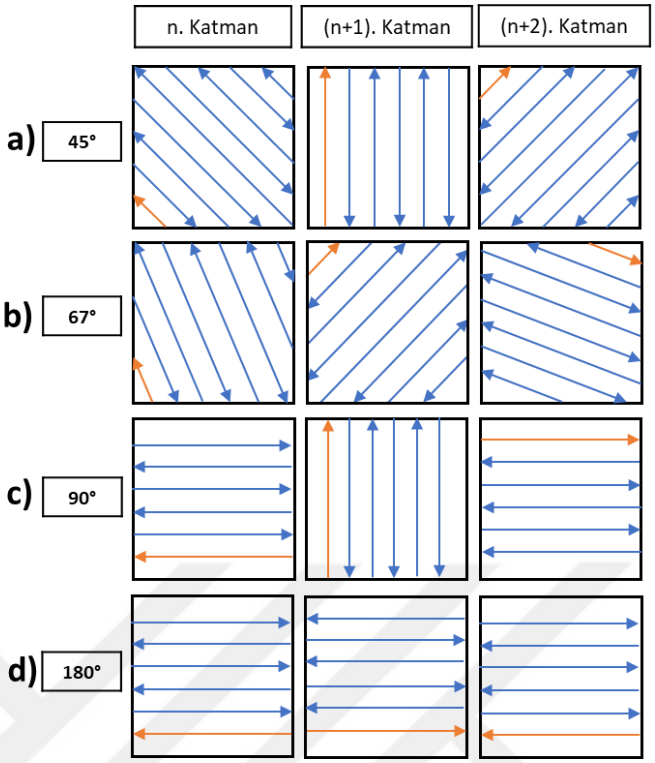
Şekil 3.3. SLE ile üretilen numunelerin platform üzerindeki görünüm ve üretim yönü

Tüm parametreler için Şekil 3.4'te görüldüğü üzere, zikzak lazer tarama desen stratejisi uygulanmıştır.



Şekil 3.4. P2 (190 W) numunesinin SEM ile (a) üstten görünümü (b) zikzak desen ve tarama aralığı boyut görünümü

Lazer gücünün, tarama hızının ve tarama aralığının etkisi incelenirken tarama stratejisi her katmanda 90°'de sabit tutulmuştur. Tarama stratejisinin veya dönme açısının etkisi incelenirken, her yeni katman için tarama deseninin 45°, 67° ve 180° açılarında rotasyon yaptığı senaryolarda üretilen numuneler ile dönme açılarının etkisi incelenmiştir. Deneylerde kullanılan parametre kombinasyonları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

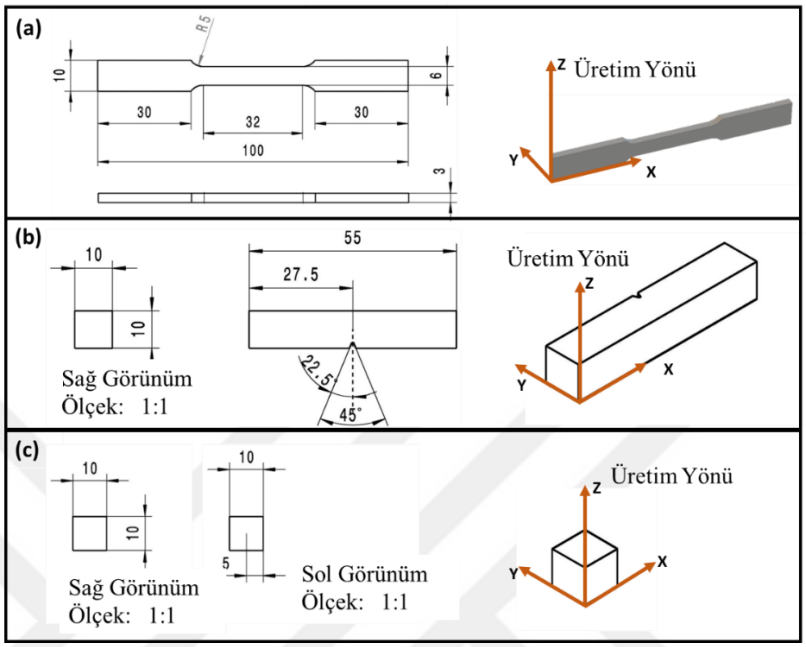


Şekil 3.5. Tarama deseni olarak zikzak strateji benimsenen, bir sonraki komşu katmanda belirtilen açı değerlerinde dönüş gösteren desenlerin şematik görünümü (a) 45°, (b) 67°, (c) 90°, (d) 180°

Çizelge 3.2. Farklı seviyedeki parametrelerin etkilerini deneysel olarak görüntülenmesi için belirlenen detaylı parametre değer tablosu

Numune No	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Tarama Aralığı (mm)	Dönüş Açısı (°)	Enerji Yoğunluğu (J/mm^3)
P1	**160**	900	0,1	90	59,26
P2	**190**	900	0,1	90	70,37
P3	**220**	900	0,1	90	81,48
V1	190	**800**	0,1	90	79,17
V2	190	**1000**	0,1	90	63,33
V3	190	**1200**	0,1	90	52,78
H1	190	900	**0,07**	90	100,53
H2	190	900	**0,09**	90	78,19
H3	190	900	**0,11**	90	63,97
R1	190	900	0,1	**45**	70,37
R2	190	900	0,1	**67**	70,37
R3	190	900	0,1	**180**	70,37

Şekil 3.6'da görülen çekme testi ve çentik darbe numuneleri sırasıyla ASTM-E8 ve ASTM E23 standartlarına göre üretilmiştir.



Şekil 3.6. (a) Çekme deneyi numunesinin, (b) V Çentikli Charpy deney numunesinin ve (c) Yüzey pürüzlülüğü ve mikro yapı analiz numunesinin boyutları (tüm birimler: mm)

3.3. Çekme Testi

Çekme testi numuneleri ASTM-E8 standardı izlenerek üretilmiştir. Deneyler, 0,008 mm/s çekme hızında, Şekil 3.7'de görülen evrensel çekme test cihazı (ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, Almanya) kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7. ZwickRoell evrensel çekme cihazı

Her parametre seti için üç numuneye çekme testi uygulanmış ve ortalama değerler kaydedilmiştir.

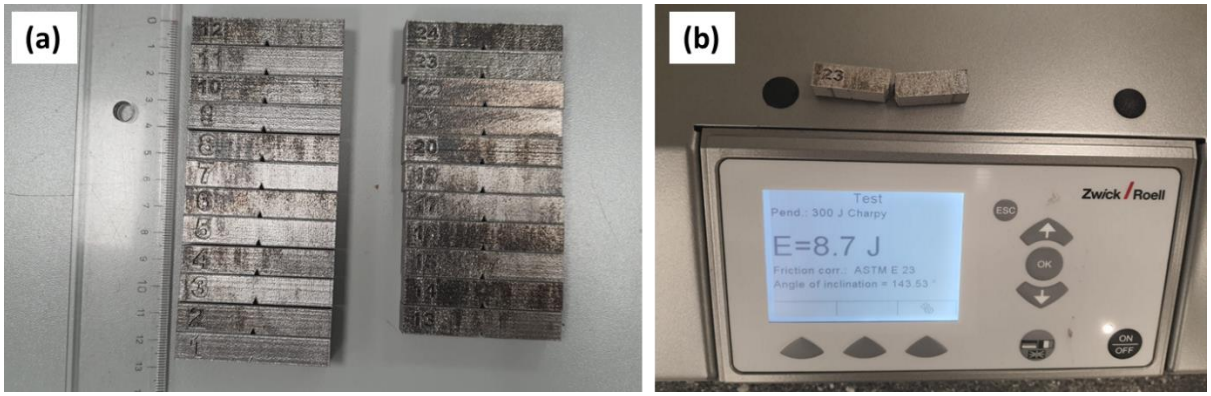
3.4. Çentik Darbe Testi

Çentikli darbe numuneleri ASTM E23-1'e göre çentikli yüzeyde ve karşı yüzde 2 µm, diğer iki yüzeyde 4 µm olacak şekilde işlenmiştir. Numunelerin darbe enerjilerini araştırmak amacıyla, Şekil 3.8'de görüldüğü üzere, oda sıcaklığında 300 J RKP450 sarkaç darbe test cihazı (ZwickRoell GmbH & Co. KG, Ulm, Almanya) kullanılarak ASTM E23'e uygun olarak Charpy testleri yapılmıştır.



Şekil 3.8. ZwickRoell RKP450 çentik darbe test cihazı

Şekil 3.9 (b)'de görüldüğü üzere Charby çentik darbe değerleri cihazdan okunmuştur.



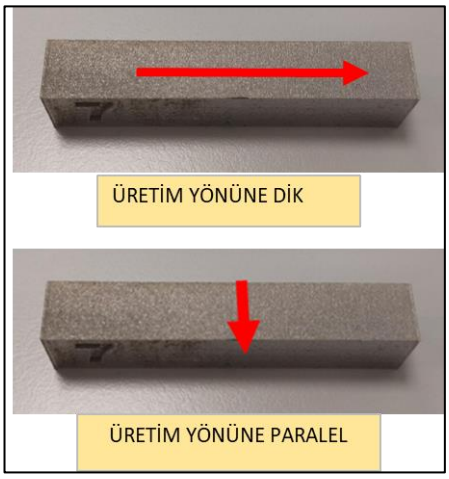
Şekil 3.9. (a) Çentik darbe test numuneleri, (b) ölçüm sonuç örneği (R3 Numunesi)

3.5. Yüzey Pürüzlülük Testi

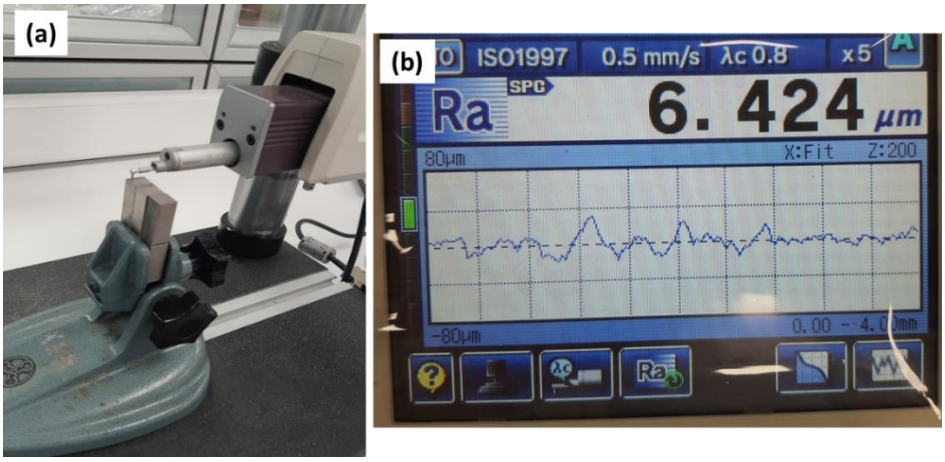
Yüzey pürüzlülük değeri, Şekil 3.10'da görülen yüzey pürüzlülük test cihazı (Mitutoyo SJ-410, Japonya) kullanılarak Şekil 3.11'de görüldüğü üzere üretim yönüne dik ve paralel yönlerde testler yapılarak ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülük değerleri Ra cinsinden her numune üzerinde 0,5 mm/s hızda ve 4,8 mm uzunlukta olmak üzere beş ölçüm yapılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar Şekil 3.12'de görüldüğü üzere ölçülerek kaydedilmiştir.



Şekil 3.10. Mitutoyo SJ-410 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı



Şekil 3.11. Numune üretim yönü baz alınarak yapılan yüzey pürüzlülüğünün ölçüm yönlerinin görünümü



Şekil 3.12. (a) Üretim yönüne paralel ölçüm (b) ölçüm sonuç örneği

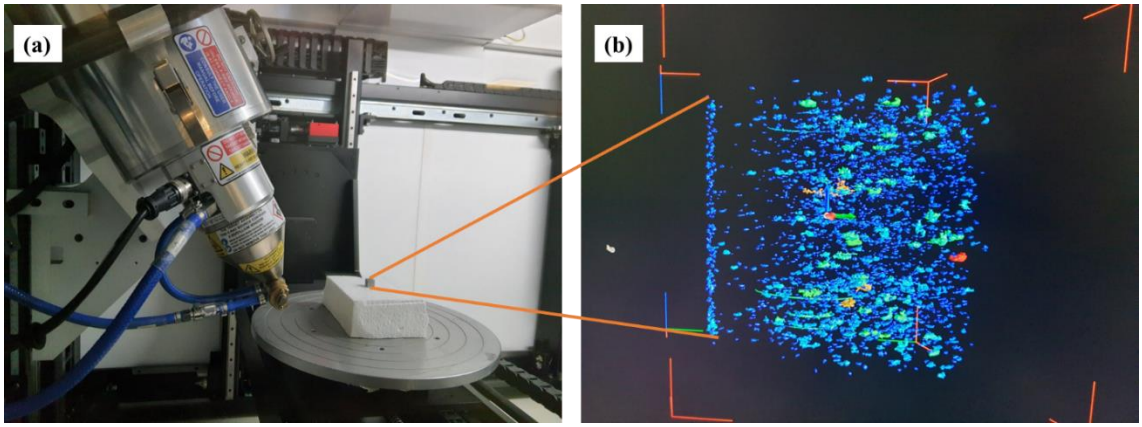
3.6. Porozite Ölçümleri

SLE metodu ile üretilen numunenin yoğunluğu, mekanik davranışlarını değerlendirmek için önemli bir kriterdir. Gözeneklilik yüzdesi, 225 kV kapasiteli X-ışını bilgisayarlı tomografi cihazıyla (Nikon XT H 225 ST, Japonya), gözenek boyutu analiz edilerek ölçülmüştür. Ölçümler, 28 µm piksel boyutu, 162 kV enerji, 105 uA akım ve 1000 ms pozlama ile, 10 mm kenarlı küp numune üzerinde gerçekleştirilmiştir.



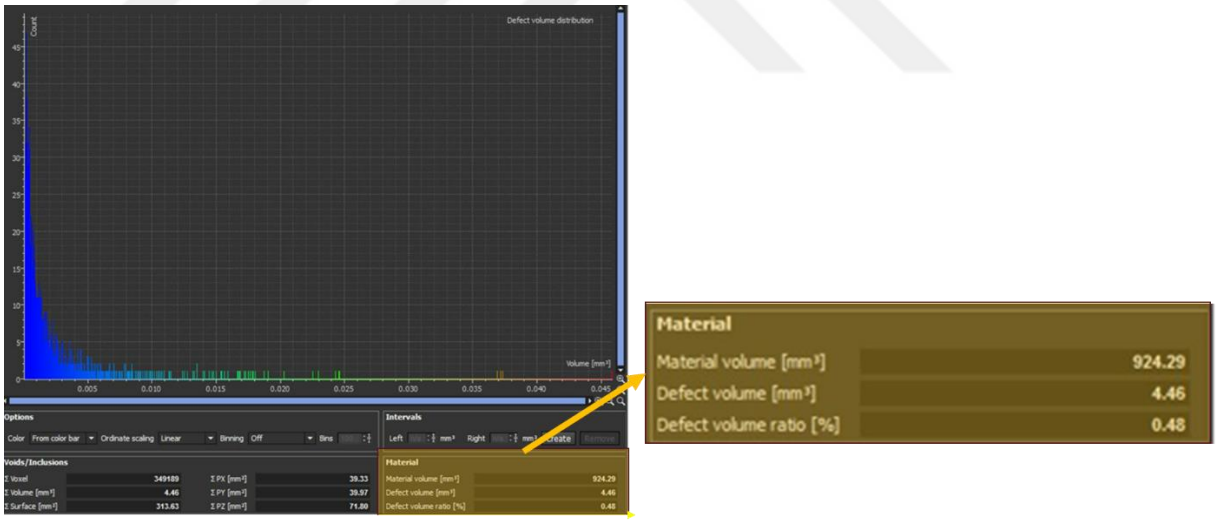
Şekil 3.13. Nikon XT H 225 ST X-ışını bilgisayarlı tomografi cihazı

Numune Şekil 3.14'te görüldüğü üzere konumlandırılmıştır.



Şekil 3.10. Mikroyapı numunesinin a) X-Işını bilgisayarlı tomografi cihazında konumlandırılması b) gözeneklerin morfolojik dağılımı

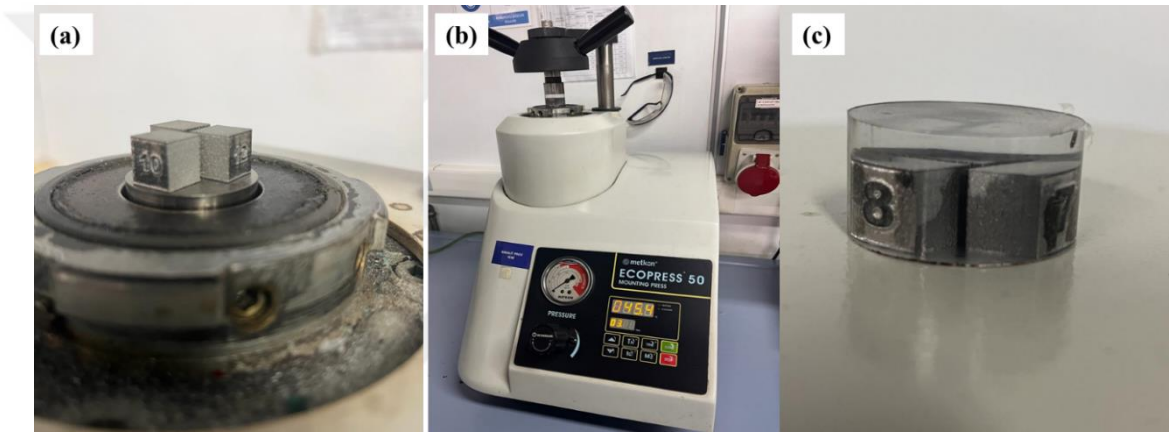
Şekil 3.15'te görüldüğü üzere, porozite oranı, toplam porozite hacminin, malzeme hacmine oranı olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.15. Numune yapısındaki gözeneklerin hacimsel değerleri ve dağılım grafiği

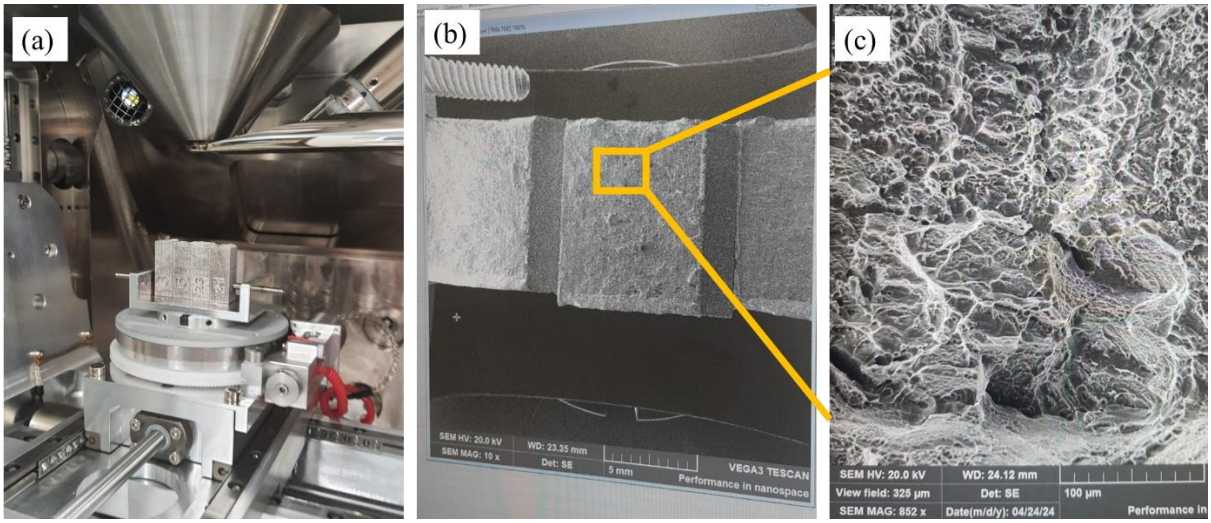
3.7 Metalografik İnceleme

Çalışmanın metalografik inceleme aşamasında numuneler Ecopres 50 cihazı ile bakalite alınmıştır. Bakalite alınma süreci ve numuneler Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Bakalit içerisindeki numuneler 0,25 µm'ye kadar zımparalanmıştır. Tüm numuneler Kroll reaktifi (hacim olarak %85 distile su, %5 nitrik asit ve %10 hidroflorik asit) kullanılarak 20-45 saniye aralığında dağlanmıştır. Daha sonra numuneler, Clemex görüntü analiz sistemi ile optik mikroskop (Nikon DIC, Tokyo, Japonya) kullanılarak mikroyapısal değişiklikler ve olası kusurlar açısından analiz edilmiştir.



Şekil 3.16. (a) Bakalite alınma öncesi hazırlık, (b) bakalit cihazı (c) bakalite alınan numuneler

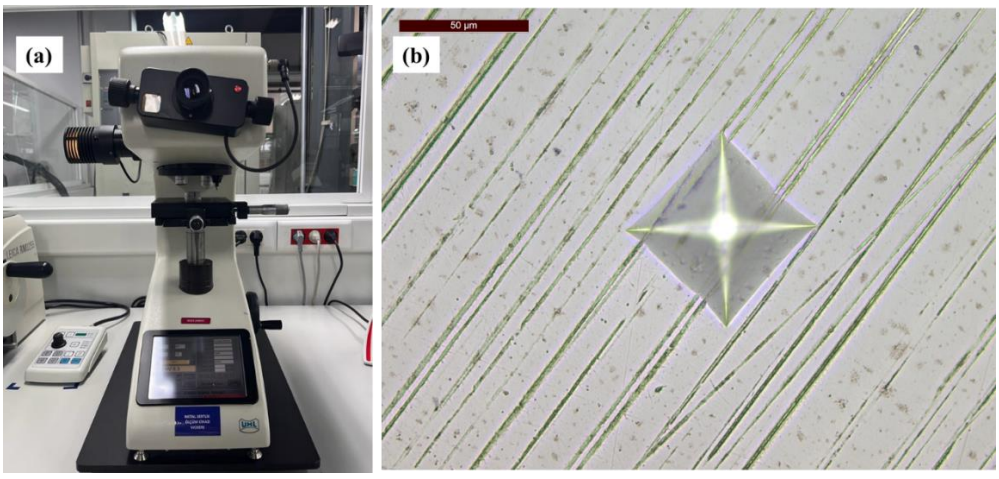
Şekil 3.17'de görüldüğü üzere, test numunelerinin kırılma yüzeylerini ve toz morfolojisini görüntülemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) (Tescan Vega3, Kohoutovice, Çek Cumhuriyeti) kullanılmıştır. Çalışma voltajı, numune görüntüleme için 20 kV, toz morfolojisi ve parçacık boyutu dağılımını görüntülemek için 30 kV olarak kullanılmıştır. Prob akımı 15 nA'ya ve SE dedektörüne ayarlanmıştır.



Şekil 3.17. (a) Taramalı elektron mikroskobunda numunelerin konumlandırılması, çentik darbe test numunesi kırılma yüzeyi, (b) makro, (c) mikro görüntüsü

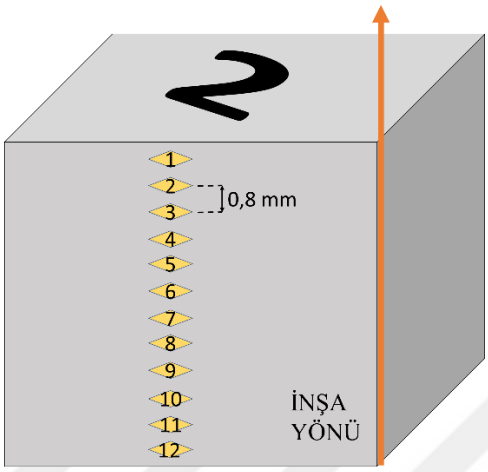
3.8. Mikrosertlik Testi

Numunelerin sertlik ölçümleri, Vickers yöntemi ile 300 gf yük ve 15 saniyelik batma süresine sahip bir Hv-1000A Walter Uhl marka mikrosertlik test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3.18'de ölçüm cihazı ve 136° elmas piramit ucun numune yüzeyine girişi gösterilmiştir.



Şekil 3.18. (a) Mikrosertlik ölçüm cihazı (b) numune yüzeyine elmas uç giriş görüntüsü

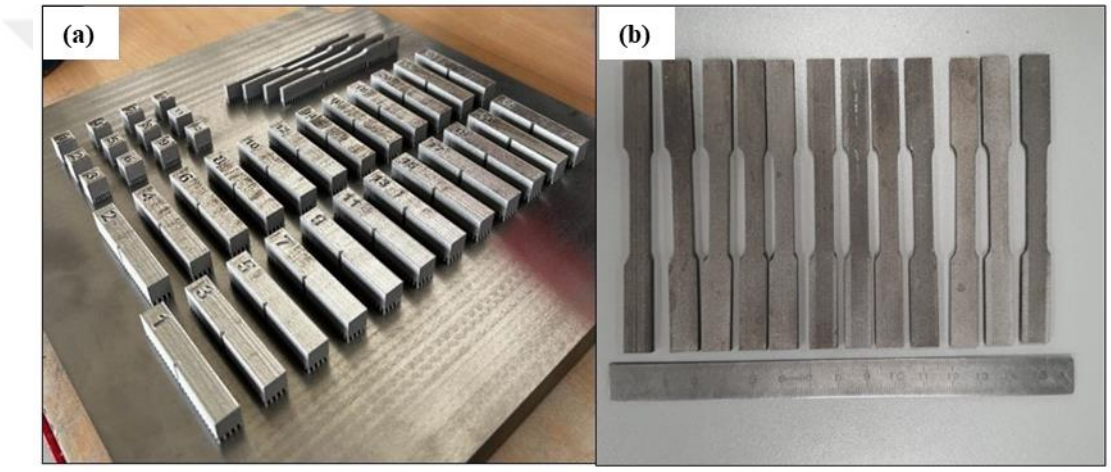
Şekil 3.19'de görüldüğü üzere, numunenin inşa yönüne paralel yüzeyinden, 0,8 mm aralıklarla 12 farklı noktadan sertlik ölçümleri alınmıştır.



Şekil 3.19. Mikrosertlik ölçüm noktaları ve numune üretim yönü gösterimi

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu deneysel çalışmada, seçici lazer ergitme metodunda, lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve dönüş açısının, nihai ürün üzerindeki mekanik ve metalurjik etkilerini incelemek için 12 farklı parametre kombinasyonunda numuneler üretilmiştir. Her parametre kombinasyonu için üç adet çekme test numunesi, iki adet çentik darbe test numunesi ve iki adet mikroyapı analiz numunesi üretilmiştir. Üretilen numuneler, Şekil 4.1 (a) platform üzerinde ve (b) platformdan ayrılmış çekme numuneleri olarak görülmektedir.

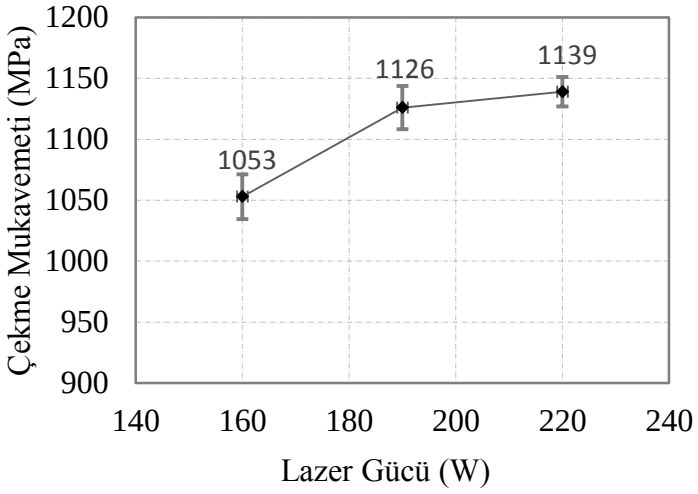


Şekil 4.1. (a) SLE ile üretilmiş numunelerin platform üzerindeki görüntüsü (b) çekme testi numuneleri

4.1. Proses Parametrelerinin Çekme Dayanımına Etkisi

Geleneksel yöntemlerden döküm ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımının, nihai çekme mukavemeti 880-920 MPa olarak literatürde belirtilmiştir (Reda ve diğerleri, 2013). Döküm yöntemi ile üretilen numunelere kıyasla yapılan bu çalışmada çoğunlukla daha yüksek değerler kaydedilmiştir. Çizelge 3.2'de belirtilen farklı proses parametreleri ile üretilen Ti6Al4V numuneleri üzerinde oda sıcaklığında gerçekleştirilen çekme testinin sonuçları paylaşılmıştır. Şekil 4.2'de artan lazer gücü ile çekme mukavemetinde elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

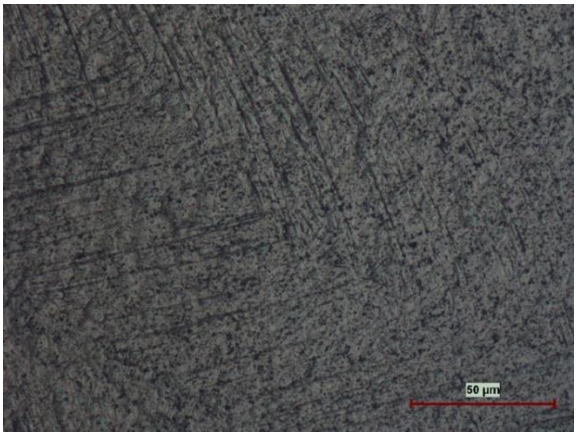
Tarama hızı 900 mm/s, tarama aralığı 0,1 mm ve komşu katmanlar arasındaki zikzak tarama stratejisinin dönme hareket açısı 90° iken, lazer gücünün, 160 W'tan, 180 ve 220 W'a artırılmasıyla numunelerin çekme dayanımları artış göstermiştir. En yüksek çekme mukavemet değerine, 220W lazer gücü ile 1139 MPa olarak ulaşılmıştır. 160 W lazer gücü ile elde edilen 1053 MPa dayanım, 220 W lazer gücü girişi ile elde edilen 1139 MPa dayanım sonucu karşılaştırıldığında %8,1 oranında artış gözlenmiştir.



Şekil 4.2. Lazer gücüne bağlı olarak değişen çekme test sonuçları

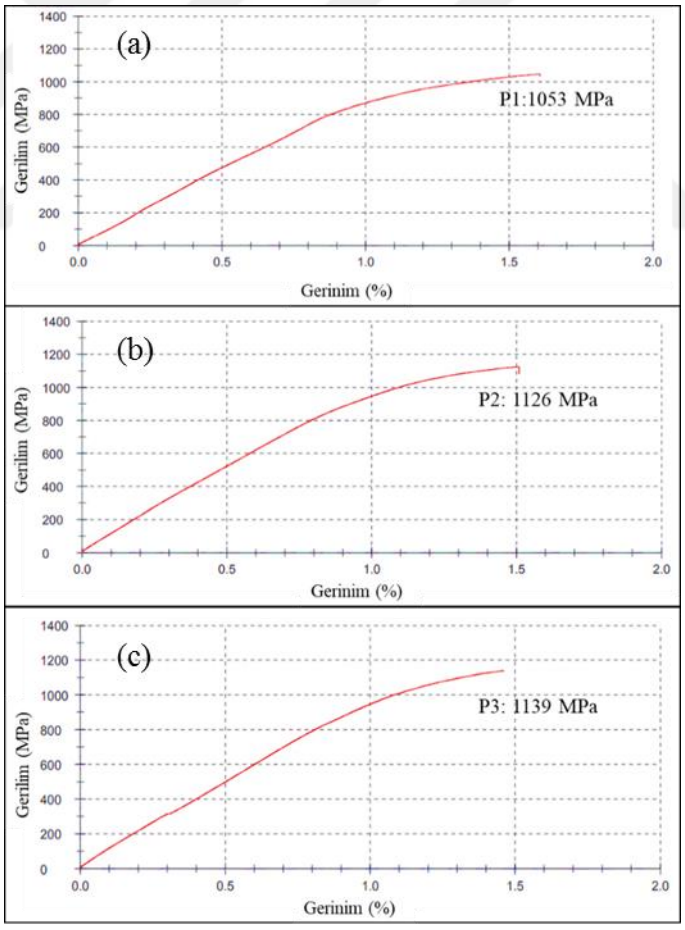
Çekme mukavemeti lazer gücündeki artışla pozitif bir ilişki göstermiştir. Daha yüksek lazer gücü seviyelerinin mukavemeti artırması, hacimsel enerji girişi ile malzeme özellikleri arasındaki ilişkiye atfedilmiştir. Burada yüksek hacimsel enerji girişi, gözenekliliğin azalmasına, daha büyük martensitik tane boyutlarının oluşumu ile sonuçta artan mukavemet özelliklerine yol açmıştır (Do ve Li, 2016).

Şekil 4.3'te 220 W lazer gücü parametresi kullanılarak üretilen numunenin mikroyapısı gösterilmiştir. Lazer gücünün artırılması ile aktarılan hacimsel enerji yoğunluğu değeri de artmıştır. Böylece yönlenmiş α' martenzit oluşumu yoğunluk göstererek, belirgin hale gelmiştir. α' fazı açık tonda ve β fazının karanlık tonda olduğu görülebilmektedir. α çıtalarının boyutu ve β tanecik sınırı miktarının sıcaklık arttıkça arttığı görülmüştür.



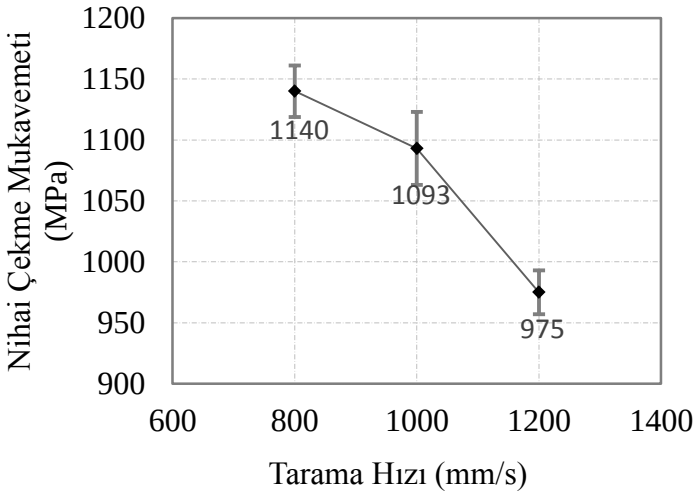
Şekil 4.3. Yönlenmiş α' martenzit oluşumu (P3 Numunesi)

Şekil 4.4'te 160, 190 ve 220 W lazer güçlerinde üretilmiş çekme testi numunelerinin, gerilim-gerinim eğrileri gösterilmiştir.



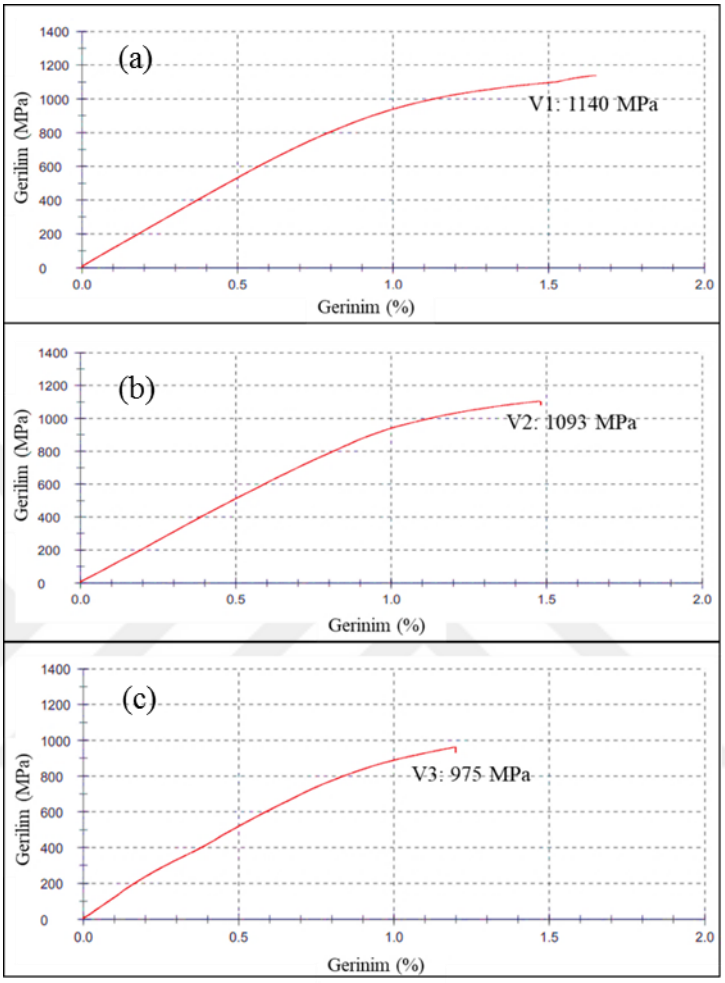
Şekil 4.4. Numunelerin gerilim-gerinim eğrisi (a) P1, (b) P2, (c) P3

Tarama hızına bağlı olarak değişen nihai çekme mukavemeti sonuçları Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Lazer gücü 190 W olarak sabit tutulduğunda, tarama hızının kademeli artmasıyla çekme mukavemeti 800 mm/s'de (V1 durumu) 1140 MPa'dan, 1000 mm/s'de 1093 MPa'a, 1200 mm/s'de (V3 durumu) 975 MPa'a düşmüştür. Tarama hızı arttıkça, nihai çekme mukavemetinde görülen bu düşüş, hacimsel enerji yoğunluğunda meydana gelen azalmanın bir sonucu olarak yorumlanmıştır. Artan tarama hızının çekme mukavemetindeki azalmaya neden olabileceği faktörler arasında, yüksek hızların ergime sırasında oluşan gazların çevreye salınması için yeterli süreyi sağlayamaması ve gazların hapsolmasıyla gözenek oluşumunun artması yer almaktadır (Liu ve diğerleri, 2019). Do ve Li (2016) azalan enerji girişinin gözenekliliğin artmasına neden olacağını belirtmiştir. Şekil 4.24'te lazer gücüne bağlı değişkenlik gösteren porozite boşluk (%) oranının, nispeten düşük olan 160 W lazer gücünde artış, 190 W ve 220 W'ta ise azalış göstermiştir. Bu bulgu, Luo ve diğerleri (2022) tarafından belirtilen gözeneklerin boyutunun ve düzensizliğinin artması, mukavemetteki azalma ile güçlü bir şekilde ilişkilidir ifadesi ile örtüşmektedir. Artan gözeneklilik seviyeleri tipik olarak çekme mukavemetinde bir azalmaya neden olmuştur. Çünkü iç boşluklarda gerilim yoğunlaşması meydana gelmekte ve yapısal kusurlar için potansiyel konumlar olarak hizmet etmektedirler.



Şekil 4.5. Tarama hızına bağlı olarak değişen çekme test sonuçları

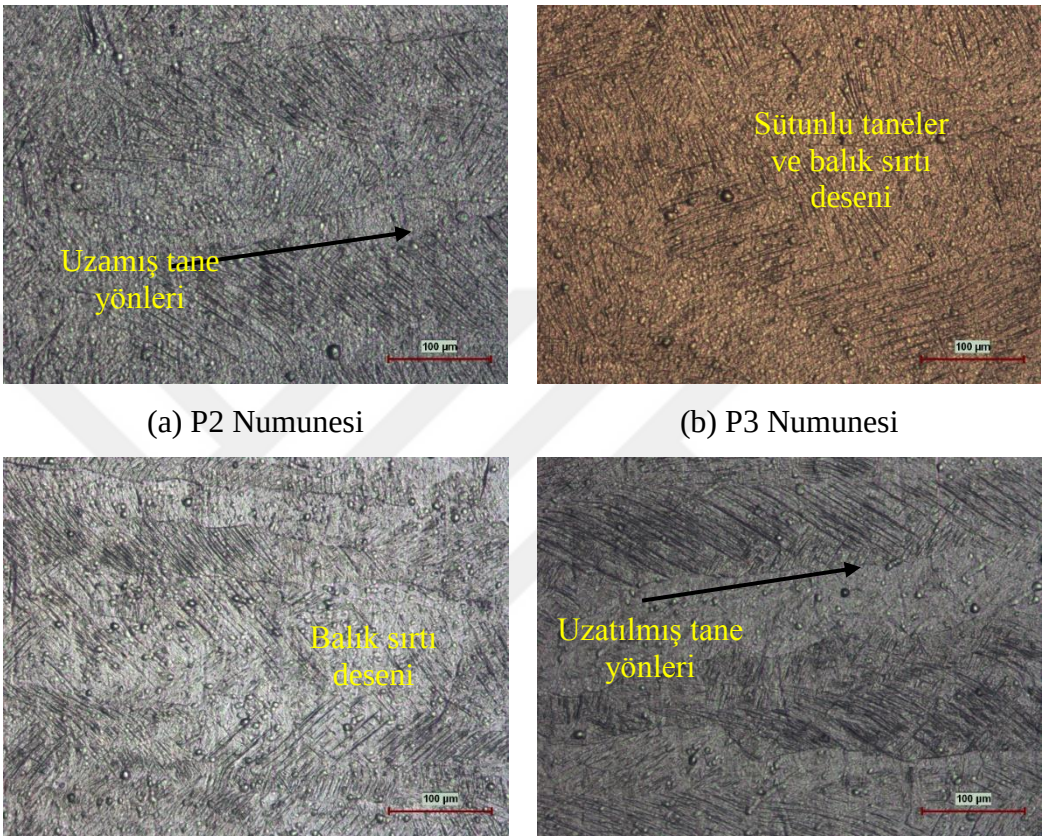
Şekil 4.6’da V1: 800 mm/s, V2: 1000 mm/s ve V3: 1200 mm/s tarama hızlarında üretilmiş numunelerin çekme testi sonucu olarak gerilim-gerinim eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.6. Numunelerin gerilim-gerinim eğrisi (a) V1, (b) V2, (c) V3

Mikroyapı numunelerinin üretim yönüne paralel yüzeylerinden alınan optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.7'de verilmiştir. Beklenildiği üzere, SLE işlemi sırasında oluşan yüksek sıcaklık gradyanları nedeniyle yapı içerisinde çok ince iğnemsi bir martenzit oluşmaktadır. Farklı güç, hız, aralık değerleri ve dönüş açısı değişimleri ile üretilen numunelerde, imalat yönü boyunca uzama eğilimi gösteren sütunlu tanelerin hâkim olduğu görülmüştür (Thijs ve diğerleri, 2010). Tanelerin içinde martensitik iğneler belirgindir (Qiu ve diğerleri, 2013).

Tarama yönünün değişmesinden kaynaklanan 90° balık sırtı desen açısı görülmüştür (Liang ve diğerleri, 2019). Numunelerin mikro yapısı esas olarak α' martenzitten oluşmuştur. Yapıda, α' fazının içeriği ve morfolojisi parametreler değiştikçe farklılık göstermiştir.



(a) P2 Numunesi (b) P3 Numunesi

(c) V2 Numunesi (d) V3 Numunesi

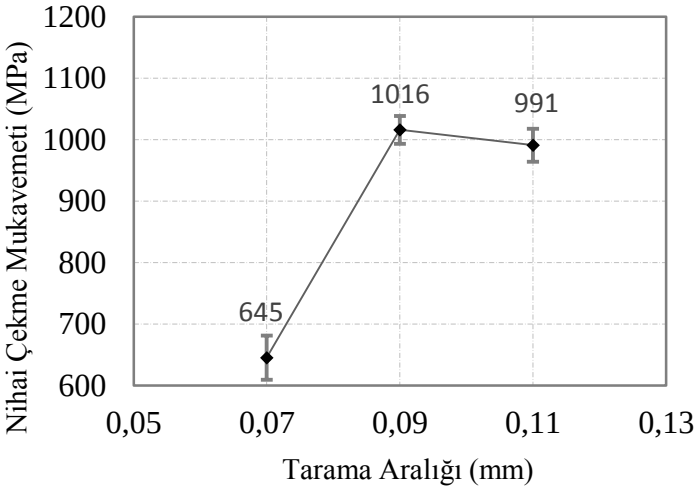
Şekil 4.7. Mikroyapı numunelerinden optik mikroskop ile elde edilen görüntüler; (a) P2, (b) P3, (c) V2, (d) V3

Şekil 4.8'de tarama aralığına bağlı olarak elde edilen çekme testi dayanım sonuçları gösterilmiştir. Üç farklı tarama aralığı etkisi (H1, H2 ve H3 durumu) araştırılırken, çalışma boyunca diğer parametreler sabit olarak tutulmuş, 0,07 mm'lik tarama aralığı parametresi (H1 durumu) ile üretilen çekme numunesinde, 645 MPa'lık oldukça düşük bir çekme mukavemeti elde edilmiştir.

Kısa tarama aralığı değerinde gözlemlenen dayanım düşüşü, komşu tarama vektörlerinin üst üste binmesi ve aşırı ısınmasından kaynaklanmıştır. Bu bulgular, SLE örneklerinin periferik bölgelerinde önemli gözenek oluşumuna yol açtığı için 0,06 mm'den daha düşük bir tarama aralığının önerilmediği Kasperovich ve diğerleri (2016) tarafından yapılan çalışma ile de doğrulanmıştır.

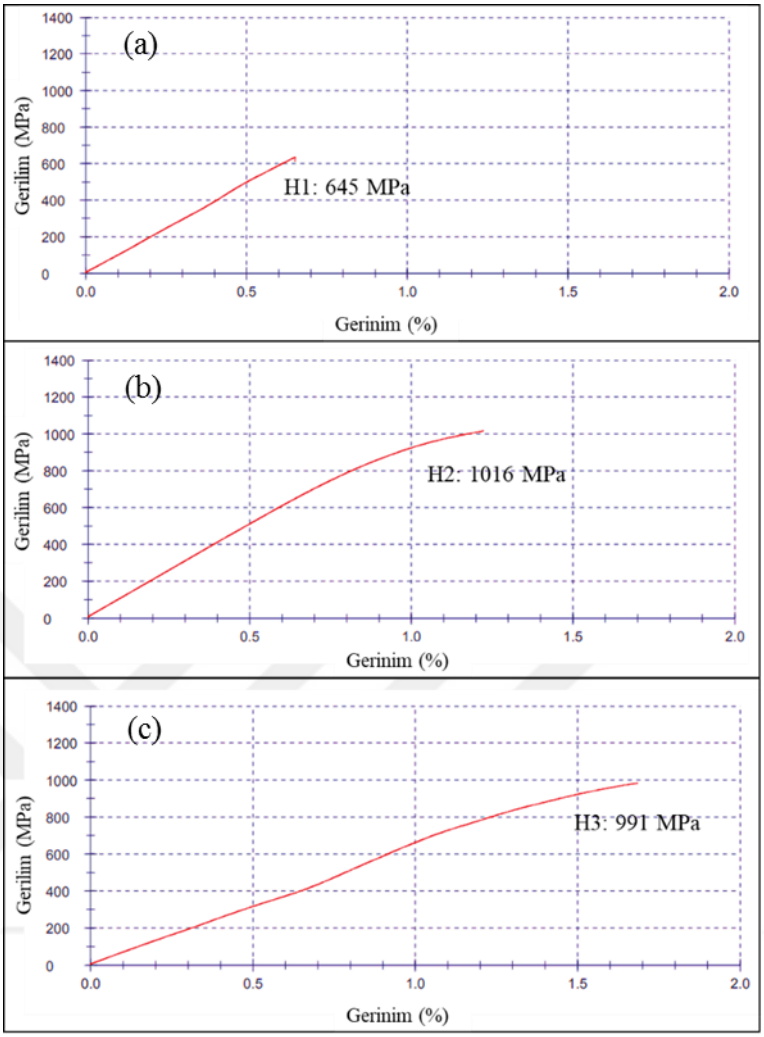
Ayrıca, Singla ve diğerleri (2021) tarafından, optimum mekanik özellikleri elde etmek için en uygun tarama aralığının 0,061 ila 0,1 mm aralığında seçilebileceği belirtilmiştir. 0,09 mm tarama mesafesi ile yapılan testlerde (H2 durumu) nihai çekme dayanımının 1016 MPa'a ulaştığı görülmüştür. Literatür araştırmalarında, SLE proses çıktısı olan ürünün mekanik özellikleri önemli derecede etkileyen parametreler olarak seçilen tarama hızı ve lazer gücü ifade edildiği görülmüştür. Kasperovich ve diğerleri (2016), prosesi etkileyen temel parametreler arasında etkisinin en az olanının tarama aralığı olduğu belirtilmiştir.

Bu ifadelerin aksine, yapılan bu deneysel çalışmada, tarama aralığının numunelerin nihai çekme mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, 0,07 mm tarama aralığından, 0,09 mm tarama aralığında üretilen numunelerin çekme test sonuçlarında %57 oranında artış kaydedildiği görülmüştür. Tarama aralığının 0,11 mm olması durumunda (H3) nihai çekme mukavemeti 991 MPa olarak elde edilmiş, azalış trendine geçtiği görülmüştür. Tarama aralığının arttırılması, ergiyik havuzunun boyutunda bir azalmaya neden olmakta ve bu da potansiyel olarak tozlar arasında yetersiz birleşmeye neden olmaktadır. Sonuç olarak bu, katılaşmış tarama çizgilerinin altındaki toz parçacıklarının aralardaki boşluklarda sıkışmasına ve dolayısıyla mukavemetin azalmasına neden olabilir. Sonuç olarak, optimum tarama aralığının 0,09 mm ile 0,11 mm arasında seçilebileceği görülmüştür.



Şekil 4.8. Tarama aralığına bağlı olarak değişen çekme testi sonuçları

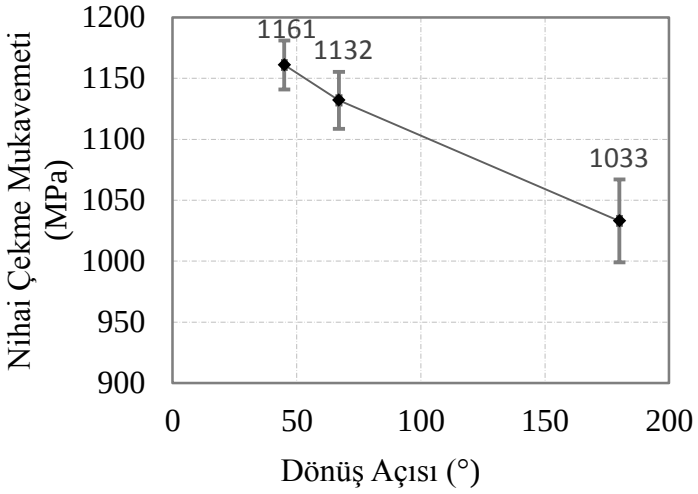
Şekil 4.9'da H1: 0,07 mm, H2: 0,09 mm ve H3: 0,11 mm tarama aralıklarında üretilmiş çekme testi numunelerinin gerilim-gerinim eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.9. Numunelerin gerilim-gerinim eğrisi (a) H1, (b) H2, (c) H3

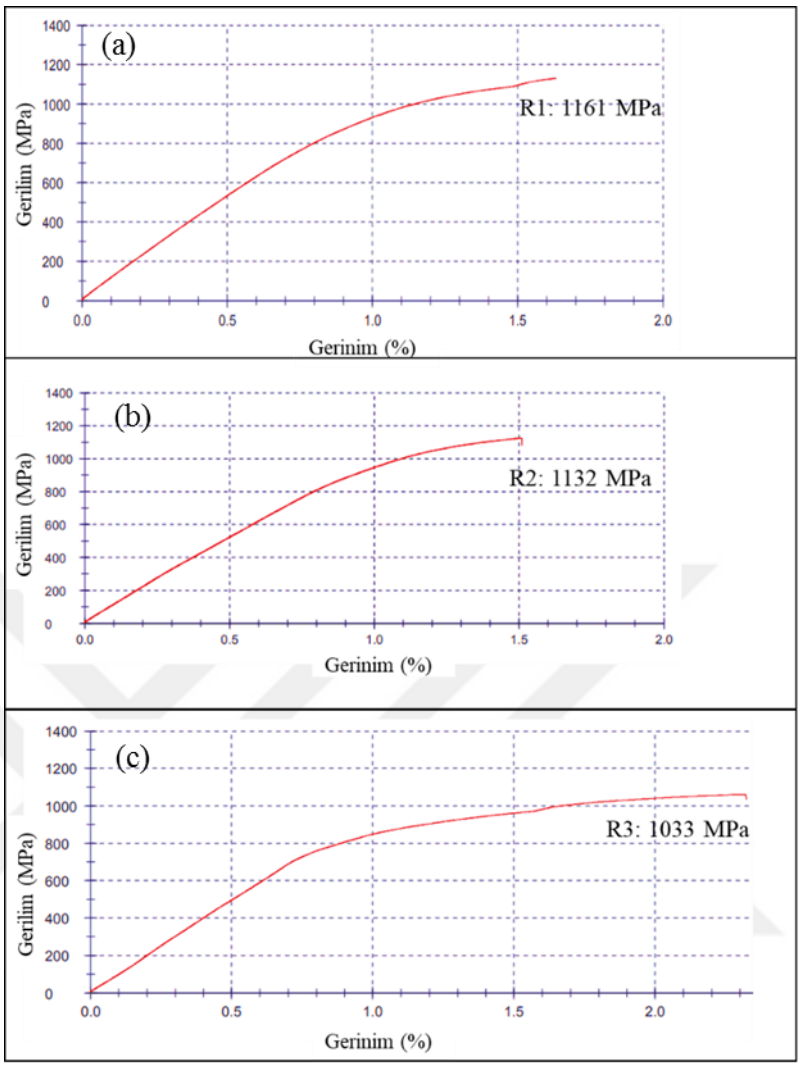
Her katmanda belirtilen açı değerlerinde dönüş yapan zikzak tarama deseni ile elde edilen numunelerin nihai çekme dayanım değerleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Çizelge 3.2 'de belirtildiği üzere dönüş açısı 45° (R1 durumu), 67° (R2 durumu) ve 180° (R3 durumu) senaryoları arasında en yüksek değere, 45° dönüş açısı ile 1161 MPa değeri ile ulaşılmıştır. Dönüş açısı 67° olarak üretilen numunelerin nihai çekme mukavemet değeri 1130 MPa'dır. Ferreira ve diğerleri (2022) yapmış olduğu çalışma sonucunda, ısı dağılımını homojen hale getirmek, artık gerilmeyi, çarpılmayı, kusurları azaltmak ayrıca yüzey pürüzlülüğünü ve mekanik değerleri iyileştirmek için her katmanda 67° dönme açısı senaryosunu önermişlerdir.

Literatürde, 67° dönüş açısı önerilse de yapılan bu çalışmada 45° dönüş açısında en yüksek değere ulaşılmıştır. Robinson ve diğerleri (2018) tarafından belirtilen, dönüş açısındaki değişikliklerin malzemenin mekanik dayanım özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahip olmadığını ifade etmişlerdir. Bu ifadenin aksine, yapılan bu çalışmada 180° dönüş açısı (R3) ile üretilen numunelerde, nihai çekme mukavemetinin 1033 MPa'a kadar düşüş kaydedilmesi, dönüş açısının çekme dayanımını etkilediğini göstermiştir.



Şekil 4.10. Dönüş açısına bağlı olarak değişen çekme testi sonuçları

Şekil 4.11'de R1: 45°, R2: 67° ve R3: 180° dönüş açılarında üretilmiş numunelerin, çekme testi sonucunda gerilim-gerinim grafikleri gösterilmiştir.

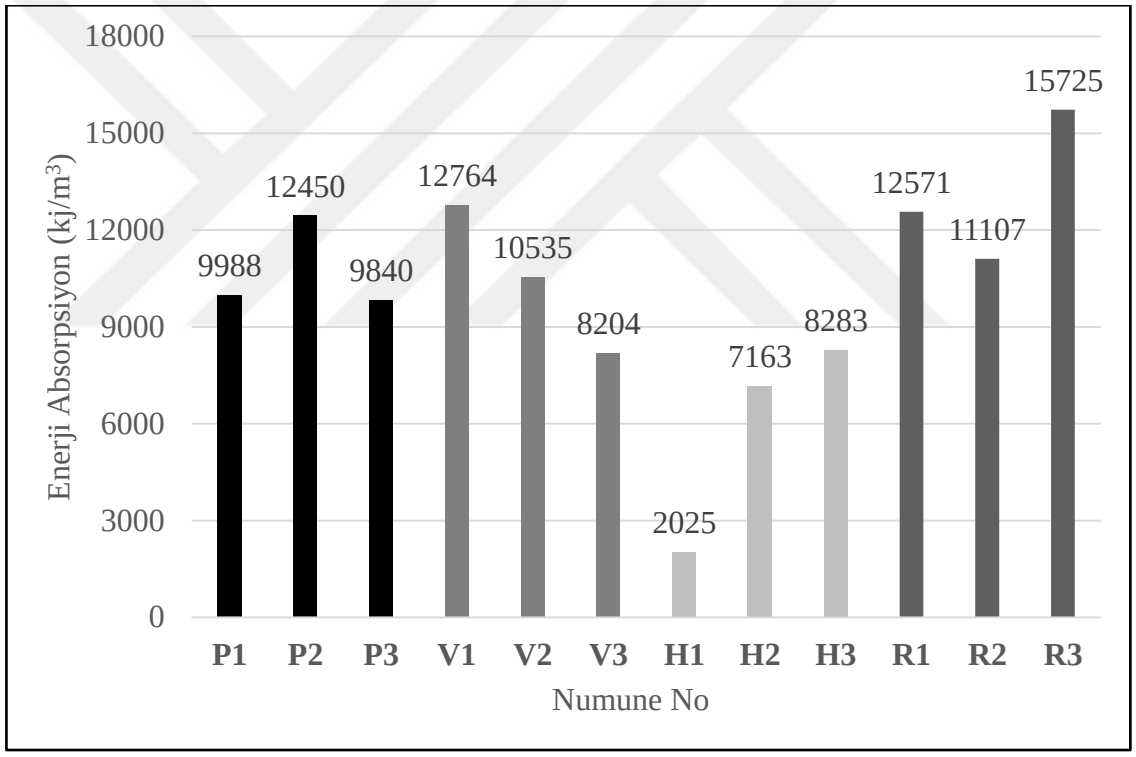


Şekil 4.11. Numunelerin gerilim-gerinim eğrisi (a) R1, (b) R2, (c) R3

Bu çalışmada malzemelerin tokluk değerleri çekme testleri sonucunda elde edilen gerilim-gerinim eğrilerinin altında kalan alanlar hesaplanarak numunelerin deformasyon sırasında absorbe edebildiği enerji kapasiteleri hesaplanmış, Şekil 4.12'de gösterilmiştir. SLE yöntemi ile üretilen numune parametrelerinin malzemenin tokluk değeri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Lazer gücü 160 W değerinden, 190 W' a artırıldığında, enerji absorbe etme miktarı da artış göstermiştir. Tarama hızının artmasıyla enerji absorpsiyon kapasitesinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Bu durum, Şener ve diğerleri (2023) tarafından da ifade edilen, tarama hızının artması nedeniyle ısı girdisinin düşük olması kaynaklı enerji emiliminin düşük kaydedilmesi ifadesi ile eşleşmektedir.

H1, H2 ve H3 numuneleri, sırasıyla, 0,07 mm, 0,09 mm ve 0,11 mm tarama aralık değerlerini temsil etmektedir. Tarama aralığı değeri arttıkça, enerji emilim miktarı da artmıştır. Gerilim-gerinim eğrisi altındaki maksimum alan R3 numunesinde kaydedilmiştir. Bu nedenle enerji emilim miktarına bağlı en uygun parametre seti olarak, lazer gücü 190 W, tarama hızı 900 mm/s, tarama aralığı 0,1 mm ve dönüş açısı 180° olarak görülmüştür.

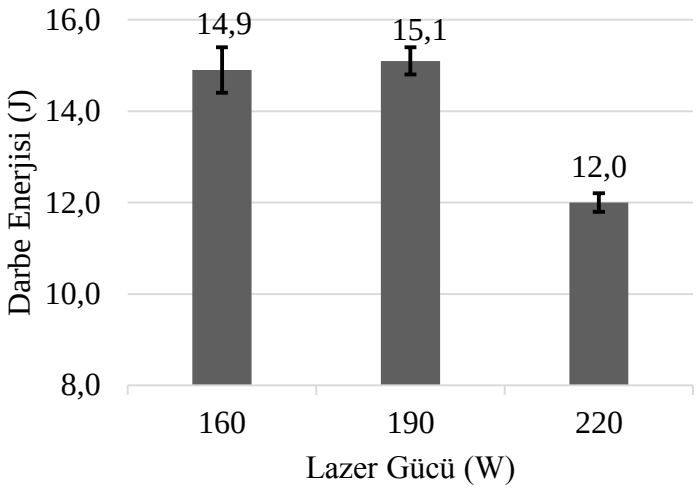


Şekil 4.12. Numunelerin enerji absorbsiyon değerleri

4.2. Proses Parametrelerinin Darbe Dayanımına Etkisi

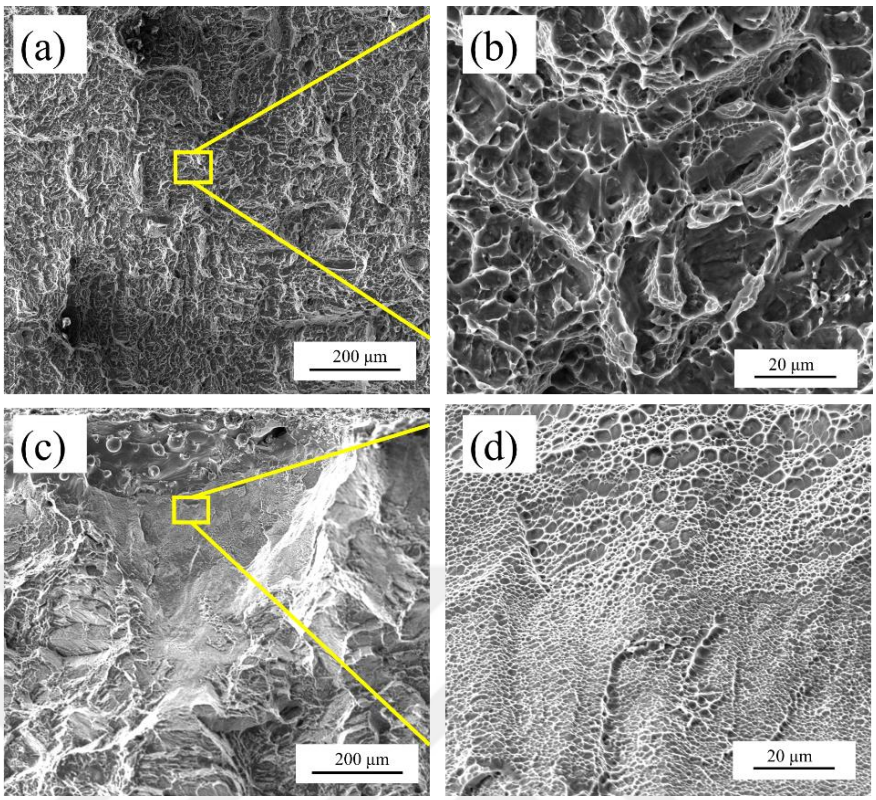
Darbe enerjisi yükün ani ve hızlı uygulanması ile oluşan dinamik zorlanma ile kırılmadan önce malzeme tarafından emilen enerji miktarını ifade etmektedir (Monaheng ve diğerleri, 2021). Döküm yöntemi ile üretilmiş numunelerin çentik darbe dayanım değeri, 11 J/cm^2 olarak literatürde belirtilmektedir. Yapılan deneylerde, üç farklı seviyede lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve dönüş açısı değerleri kullanılarak Charpy çentik darbe numuneleri üretilmiş ve sonuçlar incelenmiştir.

Şekil 4.13'te üç farklı lazer gücü ile üretilmiş numunelerin, Charby metoduna göre çentik darbe test sonuçları gösterilmiştir. 160 W lazer gücüyle (P1 durumu) üretilen numunenin çentik darbe enerjisi 14,9 J, 190 W lazer gücüyle (P2 durumu) üretilen numunenin darbe enerjisi 15,1 J, 220 W lazer gücüyle (P3 durumu) üretilen numunenin ise 12 J olarak ölçülmüştür. P3 numunesi, P2 numunesinde elde edilen sonuca kıyas ile ortalama %20 oranında azalış göstermiştir. Darbe enerjisindeki bu azalmanın nedeni, yüksek ısı girdisine bağlı olarak ince iğnemsi bir mikro yapının yoğunluk göstermesi, sütunlu β tanesi üzerinde sivri uçlu α' martenzitik yapının oluşması olarak açıklanmıştır (Monaheng ve diğerleri, 2021; Vrancken ve diğerleri, 2012). Ti6Al4V alaşımından SLE yöntemiyle üretilen numunelerde oluşan ince ve tamamen α'-martenzit yapısının varlığı, aşırı enerji girdisinin bir sonucu olup, bu durum yüksek çekme mukavemeti ve düşük süneklilik ile sonuçlanmaktadır (Gorsse ve diğerleri, 2017). Çalışmalar, yüksek α' faz oranı ile karakterize edilen eklemeli imalat ile işlenmiş Ti6Al4V alaşımlarının hem α hem de β fazlarına sahip geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmiş muadilleri ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha düşük süneklilik sergilediğini göstermiştir (Matsumoto ve diğerleri, 2011). Süneklikteki azalma, daha yüksek tarama hızının neden olduğu ışın yolu boyunca odaklanılmış toz üzerinde hızlandırılmış ısıtma ve soğutmaya bağlı olarak α' fazının artan oranının bir sonucu olduğu yönünde yorumlanmıştır. (Pegues ve diğerleri, 2017).



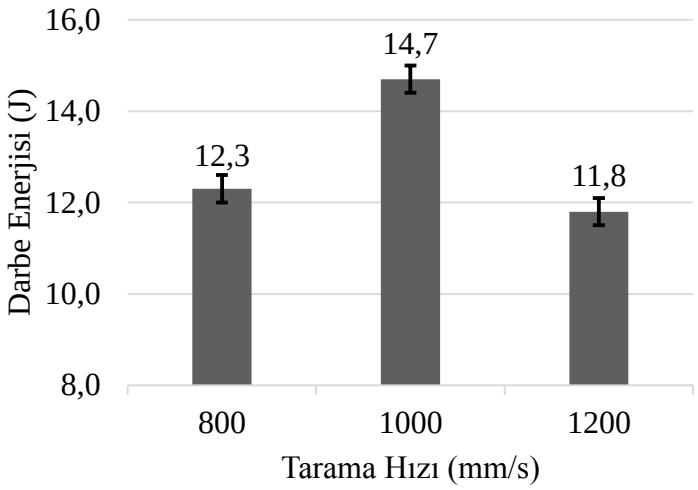
Şekil 4.13. Lazer gücüne bağlı çentik darbe test sonuçları

Ek olarak, P2 ve P3 numunelerinden alınan SEM görüntülerine göre, Şekil 4.14 (b)'de gösterilen kırılma yüzeyi, lokalize sünek çukurlara sahip alanlar sergilemiştir. Numunelerin kırılma yüzeyinin lifli bölgesinde derin eş eksenli çukurlar bulunmaktadır. Eş eksenli çukurlar sünek mod ile ilişkilidir (Gorsse ve diğerleri, 2017). Sünek kırılma sonucunda kırılma yüzeyinde büyük çukurlar oluşur (Yang ve diğerleri, 2022). Şekil 4.14 (d)'de görüldüğü üzere, yüksek lazer gücüne bağlı olarak aşırı ergime meydana gelmiş ve tane büyümesini başlatmıştır. Bu da sünekliliğin azalmasına katkıda bulunan bir faktördür. Ayrıca Şekil 4.14 (c) ve (d)'de çukur yapılar nadir görülse de ağırlıklı olarak düz ve parlak bir görünüm sergilenmiştir. Düşük sünekliliğin bir işareti olarak, birkaç eş eksenli çukura sahip düz ve parlak bir kırılma yüzeyi gözlemlenmiştir (Bilgin ve diğerleri, 2017). Şekil 4.13 'te, 190 W lazer enerji gücü ile üretilmiş P2 numunesinin darbe enerjisinin 15,1 J olarak kaydedilmesi, P3 durumunda ise lazer gücünün 220 W'a çıkmasıyla darbe enerjisinin 12 J'e düşmesi bu sebeplere bağlı olarak yorumlanmıştır.



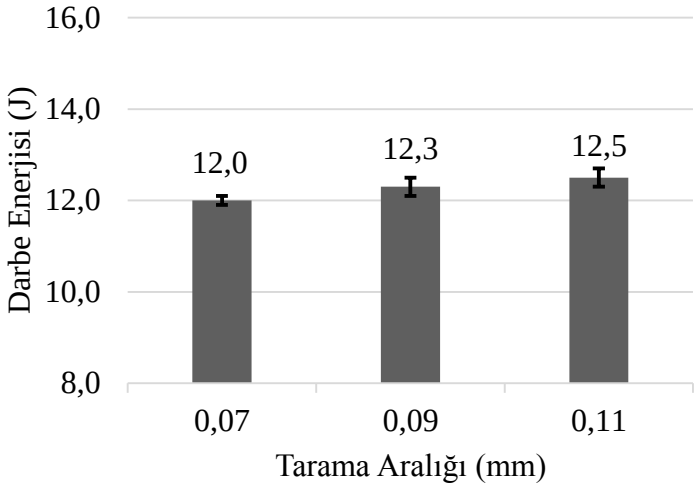
Şekil 4.14. SLE ile üretilen Ti6Al4V numunelerinin darbe testlerinden sonraki kırılma yüzeylerini gösteren SEM görüntüleri; (a, b) P2 Numunesi; (c, d) durum P3 Numunesi

Şekil 4.15'te görüldüğü üzere, 800 mm/s tarama hızıyla (V1 durumu) 12,3 J darbe enerjisi değerine ulaşılırken, 1000 mm/s hızında (V2 durumu) 14,7 J darbe enerjisine ulaşılarak %19'luk bir artış kaydedilmiştir. Tarama hızı 1200 mm/s'ye yükseltildiğinde (V3 durumu), darbe enerjisi 11,8 J değerine düşüş sergilemiştir. Benzer şekilde Sun ve diğerleri (2022), tarama hızı arttıkça darbe enerjisinin başlangıçta kademeli bir artış gösterdiğini ve ardından hızlı bir düşüş gösterdiğini gözlemlemiştir. Monaheng ve diğerleri (2021), lazer ve toz arasındaki hızlı etkileşimden kaynaklanan termal değişimin, konsantre lokal ısıtma ve ardından hızlı soğutma ile, istenmeyen artık gerilim durumuna neden olduğunu belirtmiştir.



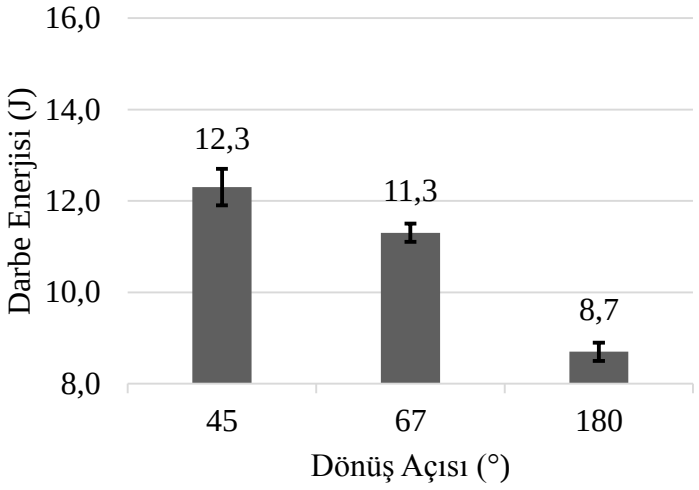
Şekil 4.15. Tarama hızına bağlı çentik darbe test sonuçları

Farklı tarama aralıklarında üretilen numunelerin çentik darbe testi enerji değerlerinin değişimi Şekil 4.16' da gösterilmiştir. Tarama aralığı arttıkça, artış miktarı nispeten küçük olmasına rağmen, çentik darbe enerjisinin de artış gösterdiği görülmüştür. Kısa tarama aralık değeri, termal stresin artmasına ve artık ısı birikmesine yol açarak malzeme konsolidasyonunun bozulmasına, mekanik dayanımın azalmasına ve iç yapıda çatlak oluşumuna sebep olması nedeniyle çentik darbe enerjisi de düşüş göstermiştir.



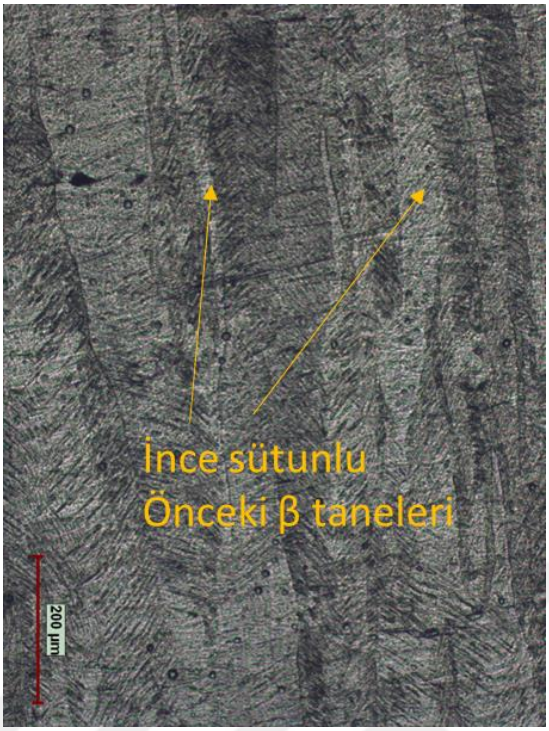
Şekil 4.16. Tarama aralığına bağlı çentik darbe test sonuçları

Şekil 4.17’de zikzak tarama stratejisinde sonraki katmanda belirtilen açılarda dönüş yaparak taranan numunelerin çentik darbe test sonuçları gösterilmiştir. 45°'lik dönme açısına sahip R1 numunesinde, 12,3 J darbe enerji değeri kaydedilmiştir. 67°'lik dönme açısı ile üretilmiş R2 numunesinde 11,3 J değeri elde edilmiş, R2, R1’e kıyasla, %8'lik bir düşüş sergilemiş, nispeten yakın darbe dayanıklılığı değeri ile sonuçlanmıştır.



Şekil 4.17. Dönüş açısına bağlı çentik darbe test sonuçları

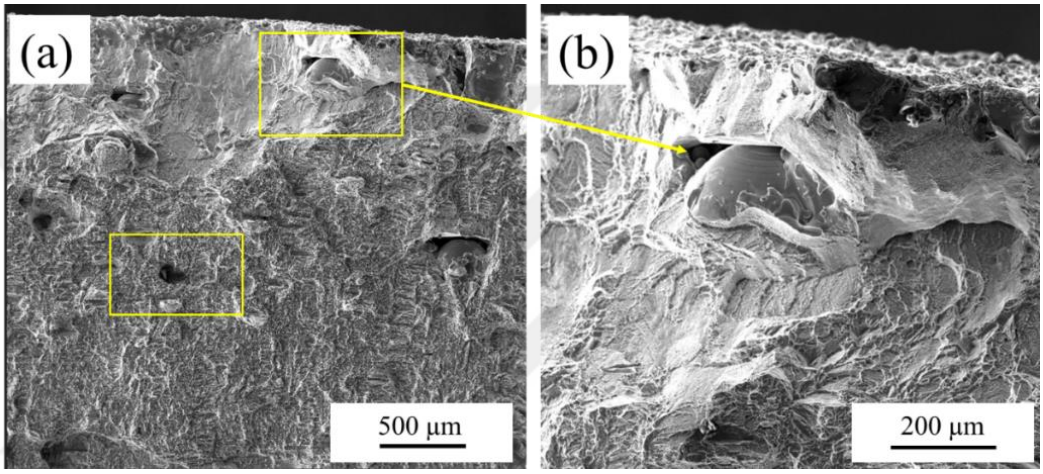
İç kısmı α' martensit ile doldurulmuş ısı akış yönüne göre yönlendirilmiş birincil β fazının sütunlu taneleri Şekil 4.18’de görülmektedir. Isı akış yönü lazer hareketinden etkilenmesi ile sütunlu taneler dalgalı olarak görülmektedir. Bu, lazer ışınının bir sonraki geçişi sırasında zaten katılaşmış olan bir tabakanın kristal yapısını bozmadan aynı kristal yapıyı devam ettirerek, erimiş tabakanın sütunsal taneciklerin epitaksiyel büyümesinin bir sonucudur. Her lazer geçişi, önceden katılaşmış katman yüzeyinin kısmi yüzey erimesine ve sürekli olarak alt tabakanın β-transusun üzerine kadar ısınmasına neden olur. Bu tek yönlü tane büyümesinin aynı zamanda alaşımın özelliklerinin anizotropisini de etkileyebileceği dikkate alınmalıdır. Lazerin her geçişinde, birikintide yerel olarak yeni bir ısıdan etkilenen bölge oluşmasına ve martenzitin gözlemlenen ayrışmasıyla sonuçlanır. 45° dönüş açısı ile üretilen numunede elde edilen 12,3 J darbe enerjisi değeri, bu sonuçlara bağlanmıştır.



Şekil 4.18. 45° Dönüş açısı ile üretilen numunede gözlemlenen ince sütunlu β taneleri (Numune: R1)

45° ve 67° dönüş açılarında sırasıyla elde edilen 12,3 J ve 11,3 J değerlerine kıyasla, 180° dönme açısında elde edilen 8,7 J değeri ile sırasıyla %30 ve %23 oranlarında azalma kaydedilmiştir. Üretilen numunelerde sıcaklık dağılımını önemli ölçüde etkileyen parametre olan ardışık katmanlar arasındaki lazer tarama yönünün dönüş açısı, SLE süreci boyunca önemli bir kontrol faktörü olarak kabul edilmiştir (Zhong ve diğerleri, 2023). Her bir katmanda 180° dönme stratejisinde toz üzerine odaklanılan lazerin, belirli bir iz içerisinde yoğunlaştırılmasından kaynaklanan katılaşmış malzeme üzerindeki ısınmanın tekrarı, lazerin önceki katmanda taranan izlerin üzerinden geçmesi ve işlemi bir sonraki katmanda aynı izler üzerinde tekrarlaması ile meydana gelmektedir. Tarama deseninin, bir sonraki katmandaki dönüş açısına bağlı olarak, katmanlar arası ısı dağılımı nedeniyle yetersiz katılaşma süresi sebebiyle kusurlar oluşabilir. Katılaşma süresi, gaz kabarcığının yüzeye çıkması için yetersiz kalırsa, katılaşmış malzeme içinde hapsolmuş gaz nedeni ile küresel bir gözenek oluşmasına neden olur (Bayat ve diğerleri, 2019).

Şekil 4.19 (a) ve (b)'de gösterilen 180° tarama deseni ile üretilmiş numunenin kırılma yüzeyinde, tek hat üzerinde odaklanılmış enerji yoğunluğu sebebiyle gözlenen anahtar deliği gözenekliliğinin varlığı, çentik darbe testinde elde edilen sonuçları olumsuz etkilemiş ve R3 numunesinde 8,7 J değeri elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 4.19 (a)'da füzyon eksikliği ve ergimemiş toz kusurları görülmüştür. Zhong ve diğerleri (2023) tarafından paylaşılan, 45° ve 67° dönme açıları füzyon kusurlarının ortadan kaldırılmasını sağlayabilir, daha düz yüzeyler elde edilmesini sağlayarak, yüzey pürüzlülük değerlerinde iyileştirme sağlayabilir ifadesi ile paralellik göstermektedir.



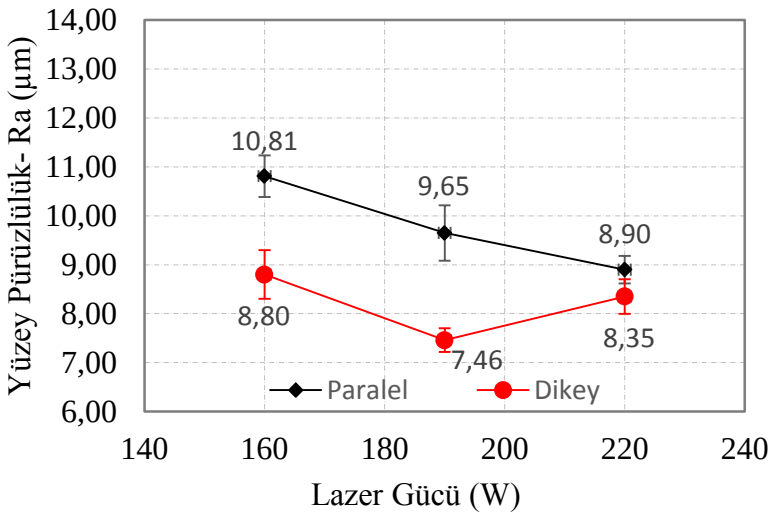
Şekil 4.19. SLE ile üretilen Ti6Al4V numunelerinin darbe testlerinden sonraki kırılma yüzeylerini gösteren SEM görüntüleri; Numune R3, 180°; (a) kırılma yüzeyinin görünümü (b) ayrıntılı kusurların görünümü

4.3 Proses Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Seçici lazer ergitme ile üretilen numunelerde yüksek kaliteli ve düzgün yüzeyler elde etmek için yüzey pürüzlülüğü kritik bir öneme sahiptir. Numunelerin performansını etkileyen yüzey pürüzlülük değerini etkileyen başlıca parametrelerin etkileri bu bölümde ele alınmıştır.

Şekil 4.20'de görüldüğü üzere 190 W ve 220 W lazer gücü değerlerine kıyasla düşük bir lazer gücü olan 160 W'ta paralel ölçüm yüzey pürüzlülük değeri 10,81 µm olurken, 220 W lazer gücüne ulaşıldığında 8,9 µm değeri kaydedilmiştir.

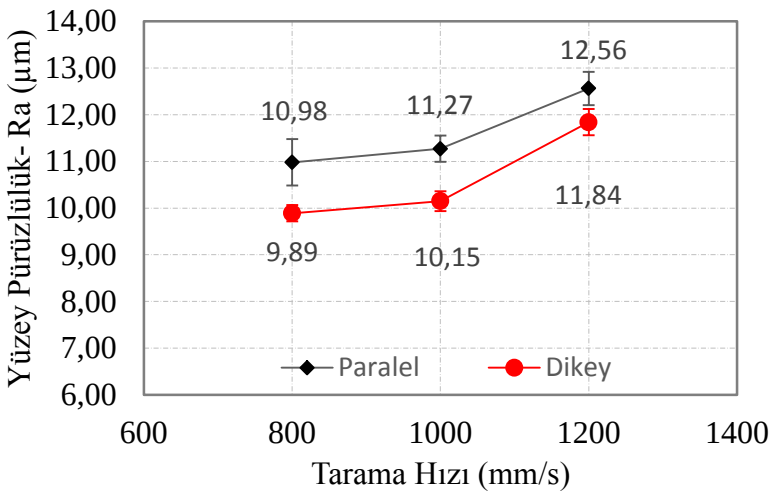
Yüzey pürüzlülük değerinde %18'lik iyileşme görülmüştür. Khorasani ve diğerleri (2020), düşük enerji yoğunluğu kaynaklı, sıvı faz ile yüzey geriliminin arttığını, paralel ve açılı yönlerde yaptıkları testlerde yüzeylerin daha az ıslanması nedeniyle daha pürüzlü bir yüzey elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Yüzeyin ıslanma miktarını etkileyen düşük hacimsel enerji faktörlerinden biri de düşük lazer gücüdür. Lazer gücünün yüzey pürüzlülüğü üzerinde oldukça etkili olduğu yapılan deneysel çalışmada görülmüştür. Üretim yönüne dik ölçüm sonuçları incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü ilk aşamada 160 W lazer gücü parametresi ile üretilen numunede 8,8 µm değeri elde edilirken, 190 W lazer gücü değerinde 7,46 µm değeri ölçülerek yüzey pürüzlülüğünde iyileşme kaydedilmiştir. Lazer gücü, 220 W değerine artırıldığında, yüzey pürüzlülüğü kötüleşerek, 8,35 µm Ra değerine yükselmiştir. Elsayed ve diğerleri, (2018) tarafından belirtilen lazer gücünün yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili faktörler arasında olduğu ifadesi, Şekil 4.20 'de gösterilen sonuçlar ile desteklenmektedir.



Şekil 4.20. Lazer gücüne bağlı yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri

Şekil 4.21'de dikey yönde yapılan ölçümlere göre tarama hızının artmasıyla yüzey pürüzlülük değerinin arttığı görülmektedir.

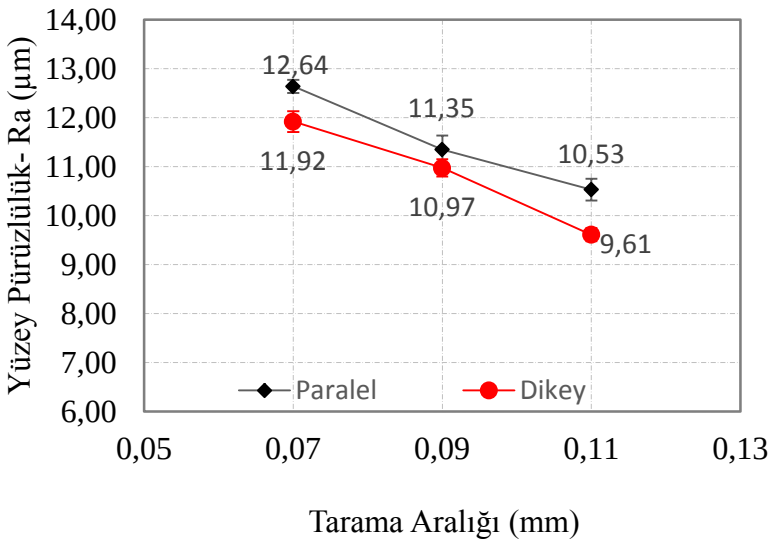
Paralel yönde yapılan ölçümlerde 800 mm/s ve 1000 mm/s hızlarında sırasıyla 10,98 µm ve 11,27 µm değerleri elde edilerek, birbirine yakın değerler kaydedilmiştir. 800 mm/s tarama hızında 10,98 µm yüzey pürüzlülük sonucu elde edilirken, 1200 mm/s tarama hızında üretilen numunede ölçülen 12,56 µm değeri ile karşılaştırıldığında %14'lük bir artış gözlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğündeki bu artış Gong ve diğerleri (2015) tarafından, katman kalınlığı sabit kalırken tarama hızının artması ergiyik havuz boyutunun azalmasına, havuz boyutunun küçülmesi örtüşen alanların azalmasına sebep olması olarak yorumlanmıştır. Ayrıca Khorasani ve diğerleri (2020) tarafından, yüksek lazer gücü ve düşük tarama hızı kombinasyonunda daha yüksek sıcaklıklar üretildiğini ve bunun sonucunda yüzey geriliminin azalması ile düşük viskoziteli bir ergiyik havuzunun oluşmasına, ıslanabilirliğin artmasına, Rayleigh kararsızlığının azalması ile tüm yönlerde yüzey pürüzlülüğünün iyileşmesini sağladığını belirtilmiştir. Ayrıca lazer gücünün arttırılmasının veya tarama hızının azaltılmasının yüzey kalitesini iyileştirdiği Do ve Li (2016) ve Matras, (2020) tarafından gözlenmiştir.



Şekil 4.21. Tarama hızına bağlı olarak değişen yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri

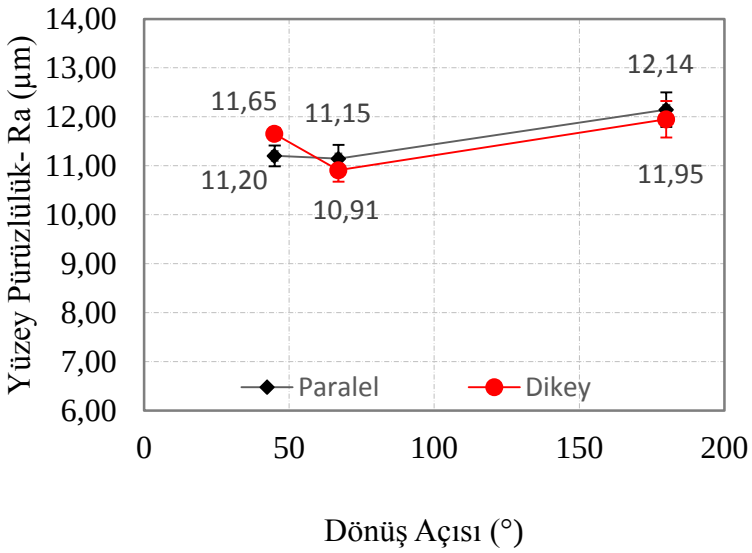
Değişen tarama aralıklarında paralel ve dikey yönde yapılan yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları Şekil 4.22'de gösterilmiştir.

Nispeten düşük olan 0,07 mm'lik tarama aralığı parametresi ile üretilen numunenin (H1 durumu), yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla paralel ölçüm 12,64 µm ve dikey ölçüm 11,92 µm olarak ölçülmüştür. 0,09 mm'lik tarama aralığı (H2 durumu) ile karşılaştırıldığında hem paralel hem de dikey ölçümler için yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla %10,2 ve %8 oranında iyileşme sağlanarak, 11,35 µm ve 10,97 µm değerleri elde edilmiştir. Tarama aralığının, 0,09 mm'den (H2 durumu) 0,11 mm'ye artırıldığı (H3 durumu) durumda, yüzey pürüzlülüğü değerlendirildiğinde hem paralel hem de dikey ölçümlerde sırasıyla %7,2 ve %12,3 oranında iyileşme sağlanmış, 10,81 µm ve 9,82 µm değerleri elde edilmiştir. Üretim yönüne paralel ve dikey yönlerde yapılan ölçümlerde tarama aralığı değerlerinin artması ile yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği görülmüştür. Lazer ışını geçiş stratejisiyle ilişkili olan tarama aralığı, ardışık iki lazer taramasının merkez çizgileri arasındaki mesafeyi belirler. Bu, bitişik izlerin üst üste binme oranını etkiler ve katmanlı imalatta temel bir parametre olarak işlev görür. Üst üste binme oranının yüksek olması nedeniyle ısı birikimi meydana gelir. Böylece havuzdaki eriyiğin etkileşimi güçlü, uzun süreli olur ve geniş örtüşme alanı nedeniyle eriyik, dışbükey yüzeyi meydana getirir (Ji ve diğerleri, 2022). Oluşan bu dışbükey yüzey, sonraki toz tabakasını serme sürecini olumsuz etkileyebilir. Tarama aralıklarının azalmasının yüzey kalitesinde gözle görülür bir düşüşe neden olduğu Ji ve diğerleri, (2022) tarafından yapılan çalışmada da gözlemlenmiştir.



Şekil 4.22. Tarama aralığına bağlı olarak değişen yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri

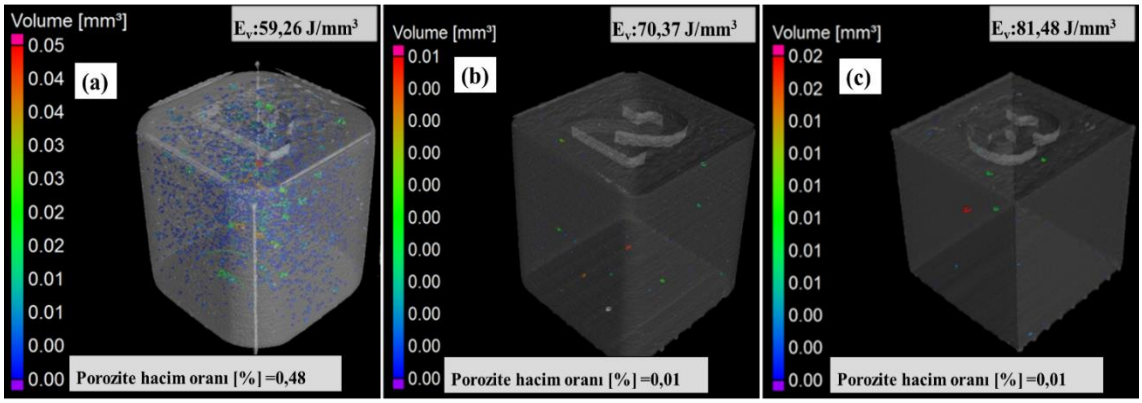
Şekil 4.23'te dönüş açısı 180° olan tarama stratejisinde, yüzey pürüzlülük değerlerinde gözle görülür bir artış kaydedilmiştir. Tarama açısı arttıkça malzeme yüzeyinde kenar etkisi daha belirgin olur. Kenar etkisi, SLE ürünlerinin üst yüzeyinde katılaşmış malzeme birikmesinden kaynaklanan yaygın kusur olduğu Zhong ve diğerleri (2023) tarafından belirtilmiştir. Yüzey pürüzlülüğündeki bu artışın sebebi, yüzeyde oluşan kenar etkisine bağlanmıştır.



Şekil 4.23. Dönüş açısına bağlı olarak değişen yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri

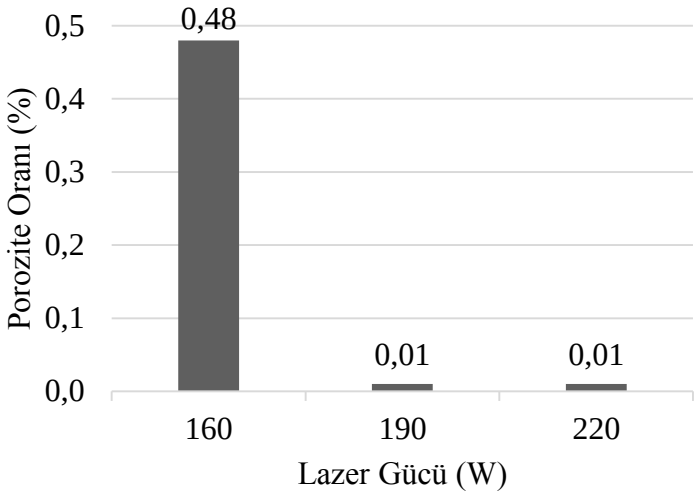
4.4. Proses Parametrelerinin Porozite Üzerindeki Etkisi

Malzemenin iç kusurlarını, boşluklarını tahribatsız yöntem ile görüntülemeye olanak sunan X-Ray CT ile numunelerin, porozite oranları hesaplanmış ve bu bölümde incelenmiştir. Numunelerin iç yapısındaki tarama sonuçları, yapı içerisindeki porozite hacminin malzeme hacmine oranı şeklinde hesaplanmıştır. Şekil 4.24'te, tarama hızının 900 mm/s, tarama aralığının 0,1 mm, dönüş açısının 90° ve katman kalınlığının 0,03 mm olarak sabit tutulduğu şartlarda, lazer gücünün kademeli olarak 160 W, 190 W ve 220 W olarak arttırılmasıyla üretilmiş olan numunelerin, X-Ray CT tarama sonuçları gösterilmiştir. Porozite ölçümlerinde gösterilen renkli skala değeri hacimsel oranı ifade etmektedir. Numune içerisinde bulunan farklı hacimsel boyutlardaki kusurları skalaya göre renklendirilmiş halde görülmektedir. Şekil 4.24'te P1: 160 W, P2: 190 W, P3: 220 W lazer gücü parametrelerinde üretilmiş numunelerin porozite dağılımları gösterilmiştir.



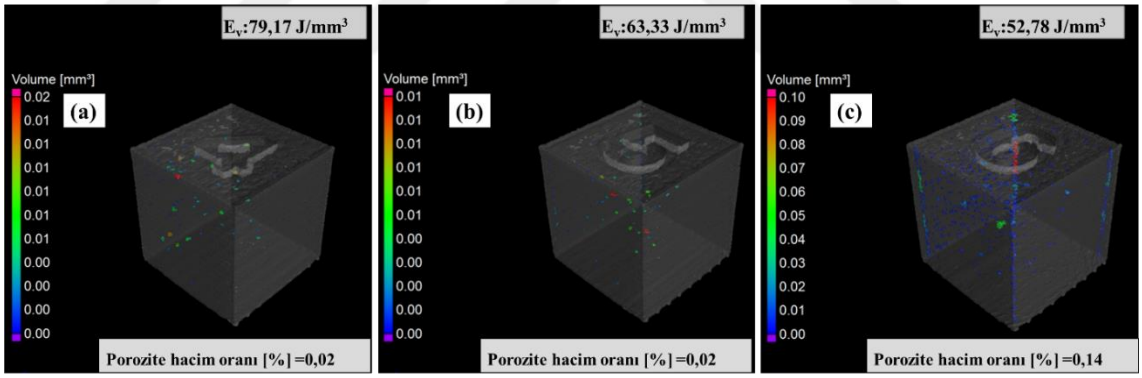
Şekil 4.24. Lazer gücüne bağlı olarak değişen porozite dağılım oranı (a) P1, (b) P2 ve (c) P3 numunesi

Şekil 4.25'te, 160 W lazer gücü ile 59,25 J hacimsel enerji girişinde porozite oranının nispeten artış gösterdiği açıktır. Sun ve diğerleri (2022), Kasperovich ve diğerleri (2016), Do ve Li (2016), yapmış olduğu çalışmalarda düşük lazer gücüne bağlı olarak düşük enerji girişi kaynaklı gözeneklilik oranının arttığını tespit etmişlerdir. Bu olgunun potansiyel nedenleri arasında, yetersiz enerji girişinin neden olduğu ergimemiş tozların yanı sıra çatlak benzeri boşlukların varlığı yer almaktadır (Liu ve diğerleri, 2019). Bu durum, Gong ve diğerleri, (2015) tarafından yapılan çalışmada, yüksek tarama hızı sebebiyle tozun yetersiz ergimesi ile önemli miktarda boşluk oluşması olarak bildirilmiştir. Ayrıca yetersiz lazer enerjisi girişi, tozun ergimemesine ve düzensiz şekilli boşlukların oluşmasına yol açan ergime veya toplaşma kusurlarının oluşmasına sebep olduğu belirtilmiştir. Bu durum lazer gücü parametresinin esas olarak dikkate alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.25. Lazer gücüne bağlı porozite (%) oranları

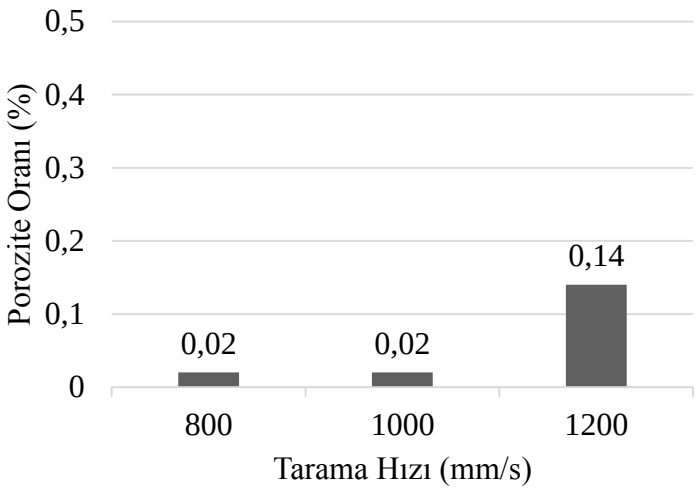
Şekil 4.26'da V1:800 mm/s, V2:1000 mm/s, V3:1200 mm/s tarama hızlarında üretilmiş numunelerin X-Ray CT cihazı ile iç yapı porozite dağılımları, hacimsel olarak skalaya göre renklendirilmiş şekilde gösterilmiştir.



Şekil 4.26. Tarama hızına bağlı olarak değişen porozite dağılım oranı (a) V1, (b) V2 ve (c) V3 numunesi

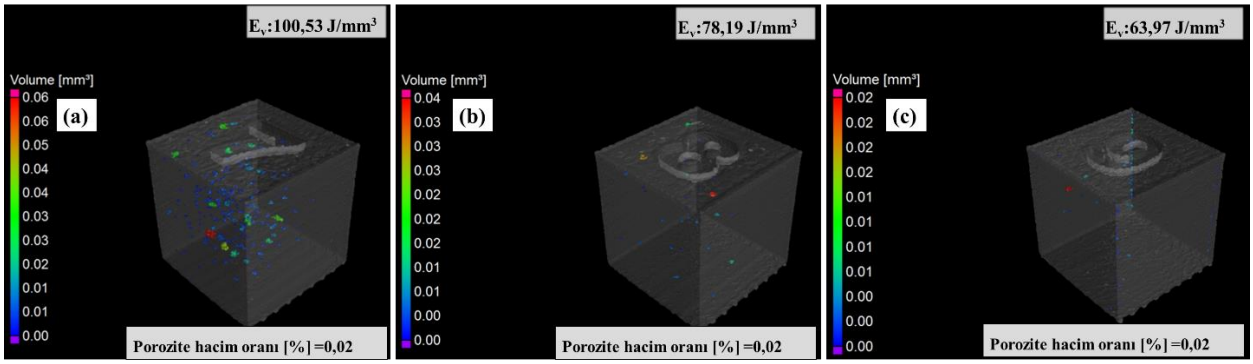
Şekil 4.27'de tarama hızı arttıkça porozite oranının da arttığı görülmektedir. Tozun sınırlı miktarda ıslanması, gaz tutulması ve ergiyik havuzu etrafındaki malzemenin uzaklaştırılması nedeniyle tarama hızının artmasıyla gözeneklilik oranının arttığı (Liu ve diğerleri, 2019); (Kasperovich ve diğ. 2016); (Shipley ve diğerleri, 2018) tarafından belirtilmektedir.

Literatürde de görüldüğü gibi tarama hızının artması, yetersiz füzyona sahip alanların oluşmasına ve gözenekliliğin artmasına neden olmuştur (Pegues ve diğerleri, 2017).



Şekil 4.27. Tarama hızına bağlı porozite (%) oranları

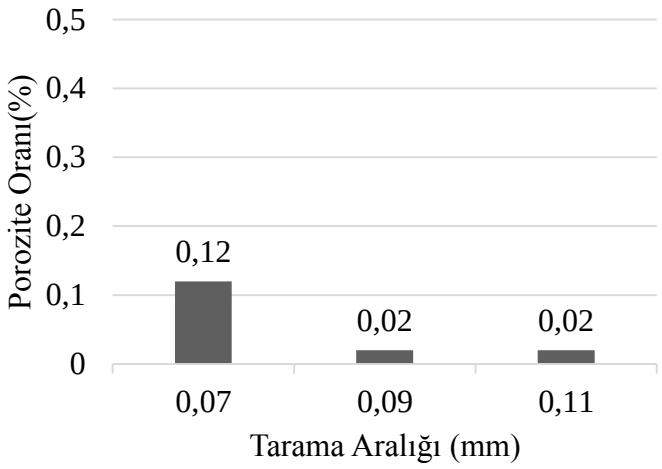
H1:0,07 mm H2:0,09 mm, H3:0,11 mm tarama aralığı parametreleri ile üretilmiş numunelerin X-Ray CT cihazı ile iç yapı porozite dağılımları, hacimsel olarak skalaya göre Şekil 4.28'de gösterilmiştir.



Şekil 4.28. Tarama aralığına bağlı olarak değişen porozite dağılım oranı (a) H1, (b) H2 ve (c) H3 numunesi

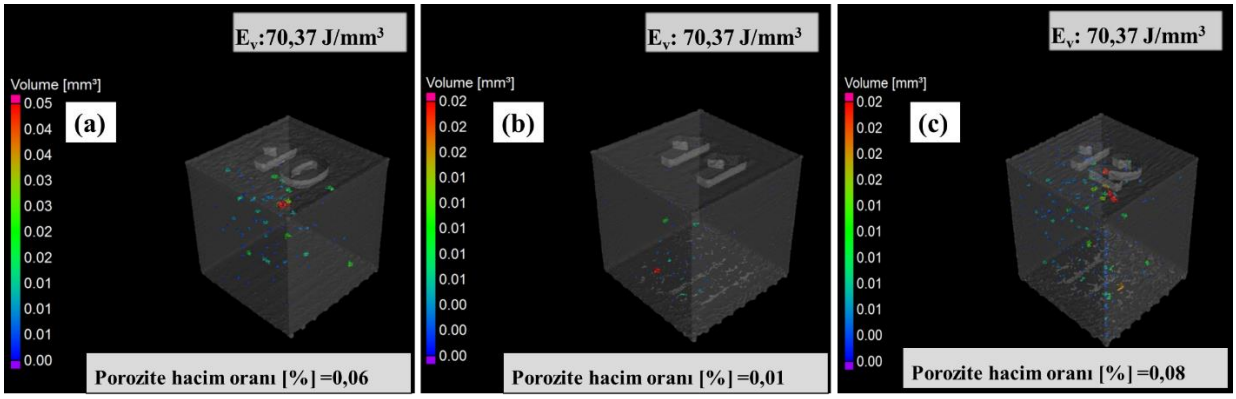
Şekil 4.29'da görüldüğü üzere tarama aralığının arttırılması malzeme porozite oranının azalmasına neden olmuştur.

Singla ve diğerleri (2021), tarama aralığındaki sürekli artışın her zaman porozite oranının azalması ile sonuçlanmayacağını belirtmişlerdir. Optimum mekanik değerlerin elde edilmesi, optimize edilmiş parametrelerin oluşturulmasını gerektirir. 0,07 mm tarama aralığı değerinde %0,12 olan porozite oranı; 0,09 mm ve 0,11 mm tarama aralığı değerlerinde %0,02'de sabit kalmıştır. Wycisk ve diğerleri (2013), tarama aralığının çok küçük olduğu durumlarda tarama hattı başına aşırı enerji girdisine ve anahtar deliklerinin oluşmasına neden olduğunu belirtmişlerdir.



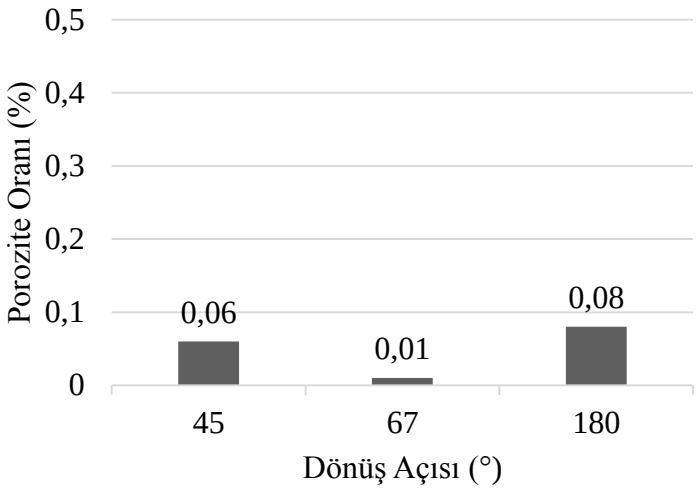
Şekil 4.29. Tarama aralığına bağlı porozite (%) oranları

R1: 45°, R2: 67°, R3: 180° dönüş açı parametreleri ile üretilmiş numunelerin X-Ray CT cihazı ile iç yapı porozite dağılımları, hacimsel olarak skalaya göre Şekil 4.30'da gösterilmiştir.



Şekil 4.30. Dönüş açısına bağlı olarak değişen porozite dağılım oranı (a) R1, (b) R2 ve (c) R3 numunesi

Şekil 4.31'de, dönüş açısının malzemenin gözeneklilik oranı üzerindeki etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Sonuçlar, her katmanda belirtilen derecelerde tarama deseninin dönüş açısının, diğer parametrelere kıyasla porozite oranı üzerinde en az etkiye sahip olduğunu göstermektedir. 45° dönme açısında %0,06 olarak görülen kusur oranı, 67° dönme açısında %0,01' e düşmüştür. Bunu takiben, dönüş açısı 180° olduğunda porozite oranı %0,08'e çıkmıştır. 180° dönüş açısı uygulanan stratejide, lazer tarama izi, bir önceki katmanda taranan izle kesişmiştir. Zhong ve diğerleri (2023), 180° olarak simüle edilen tüm katmanlarda aynı dönüş açısının kullanıldığı bir tarama stratejisi ile deneyler gerçekleştirmişlerdir. Kenar etkisi hatası ile ergimemiş tozların varlığını gözlemlemişlerdir. 180° tarama stratejisinde aynı hatta ilerleyen lazer ısı girdisi ile ısı yoğun bir şekilde birikmekte ve sıcaklığın artmasına neden olmaktadır. Sıcaklığın artması ile yüzey gerilimi azalmakta ve geri tepme basıncı artmaktadır. Xia ve diğerleri, (2016) düşük yüzey gerilimi sıvının kolaylıkla komşu yollara doğru akmasına neden olduğunu, bu da malzeme birikmesine ve yüzeyin şişmesine neden olduğunu bildirmişlerdir.



Şekil 4.31. Dönüş açısına bağlı porozite (%) oranları

Porozite analizleri sırasında ürün performansıyla ilgili olarak incelenen çeşitli kusurlar arasında, yetersiz enerji girdisinden kaynaklananların (kaynaşma eksikliği, toplaşma ve üretildiği hali ile yüzey pürüzlülüğü), aşırı enerjiden kaynaklananlara kıyasla daha büyük bir olumsuz etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. SLE işleminde kusurların oluşumunda önemli rol oynayan ana unsurlar tarama hızı ve lazer gücü parametreleridir. Düşük lazer gücü ve/veya yüksek tarama hızları kullanıldığında hacimsel enerji düşer ve yetersiz enerji girişi meydana gelir. Azalan tarama hızı, daha az kararlı, uzun bir eriyik havuzunun ve daha kaba bir mikro yapının oluşmasına yol açar ve malzemenin mekanik özelliklerini etkiler.

4.5. Proses Parametrelerinin Mikrosertlik Üzerindeki Etkisi

Literatürde belirtilen, Ti6Al4V dökme malzemelerin sertlik değerleri ısıl işleme bağlı olarak 340 ile 395 H_V arasında değişmektedir (Vandenbroucke ve Kruth, 2017). SLE ile üretilen numunelerinin sertliği buna kıyasla daha yüksektir, çünkü işlem sırasında lazer ışını ile ergiyen havuz çok hızlı bir şekilde soğur, martenzitik yapıyı meydana getirir. SLE ile üretilmiş, üretim sonrası başka bir işlem görmemiş Ti6Al4V parçası, dövme ile üretilmiş alaşımda bulunan α ve β fazlarıyla karşılaştırıldığında daha sert bir faz olan iğnemsi bir mikro yapı (α' fazı) sergiler.

SLE numunelerinde de parametreye bağlı değişkenlikler görülebilmektedir. Lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve tarama deseninin her bir katmandaki dönüş açısının numunenin sertlik değerleri üzerindeki etkisi bu başlıkta incelenmiştir.

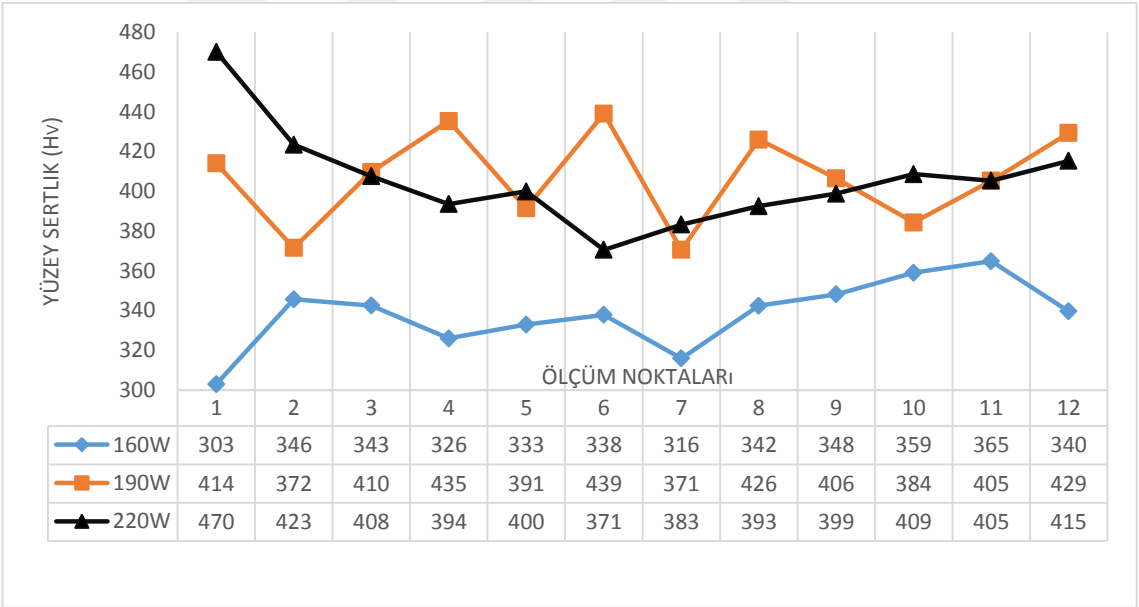
Farklı lazer güçlerinde üretilen numunelerde yapılan sertlik ölçüm sonuçları Şekil 4.32'de gösterilmiştir. 160 W lazer gücü değerinde, ortalama 338 H_V mikrosertlik değeri elde edilirken, 190 W lazer gücünde, 406 H_V, 220 W lazer gücünde 405 H_V değerleri kaydedilmiştir. 160 W lazer gücü değeri ile üretilen numunelerde, yüzey sertlik değeri, lazer gücü nispeten yüksek olan 190 W ve 220 W değerlerinde elde edilen değerlere göre düşük olarak görülmüştür.

Sun ve diğerleri (2021), yüksek lazer gücü girdisi ile enerji yoğunluğunun artması kaynaklı, katılaşma ve ergime arasındaki önemli sıcaklık farklarının malzemenin kalıntı gerilimini artırarak kafes yapısının bozulmasına ve sertleşme etkilerinin artmasına neden olduğunu bildirmişlerdir.

Mahamood ve diğerleri (2020), yapmış oldukları deneysel çalışmada, lazer gücünün artması ile sertlik değerinin de artış gösterdiğini ifade etmişlerdir. Bu sonucu mikroyapı incelemelerinde, özellikle lazer gücü arttıkça ince mikro yapıdan kaba mikro yapıya dönüşen martensit yapıyı gözlemleyerek desteklemişlerdir.

Bunların yanı sıra, sertlik değeri gözenek değeri ile de ilişkilidir. Gözenek oranının artması sertlik değerini düşürmektedir. Furumoto ve diğerleri (2015), yapmış oldukları çalışmada, enerji yoğunluğu artıkça, ergimenin homojen olarak artmasından dolayı gözenekliliğin azaldığını bunun da mikro sertlik ve çekme dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir. Şekil 4.24'te lazer gücüne bağlı olarak değişen porozite oranlarında, 160 W değeri ile üretilen numunede %0,48 oranında porozite tespit edilmesi, sertlik değerindeki düşüklüğün bir nedeni olarak da görülmüştür.

160 W lazer gücü değeri ile elde edilen 59,26 J/mm^3 enerji yoğunluğu ile üretilen numunelerin sertlik değeri, 190 W lazer gücü değeri ile elde edilen 70,37 J/mm^3 enerji yoğunluğu ile üretilen numunelerdeki sertlik ortalama değeri arasında %20 oranında artış kaydedilmiştir. Sertlik değeri, enerji yoğunluğunun artması ile artış göstermiştir. 220 W lazer gücü değerinde 81,48 J/mm^3 enerji yoğunluğu ile üretilen numunelerde bu değer 405 H_V olarak ölçülmüş olup, enerji yoğunluğunun artması ile sertlik değerinin azalış trendi başlamıştır. Enerji yoğunluk değerinin belirli bir değere yükselmesi ile sertlik değerinde artan bir eğilim göstermesi, eşik değerden sonra sertlik değerinde azalış sürecinin başlaması Cherry ve diğerleri, (2015); Wang ve diğerleri, (2016) tarafından yapılan çalışmalarda da bildirilmiştir. Kusuma (2014), lazer enerji yoğunluğu yüksek olduğunda, ergiyik havuzun ısındığını ve çok yüksek bir soğuma hızına maruz kaldığını belirtmiştir. Bu durum olası gaz kabarcıklarının yapı içerisinde hapsolmasına neden olmakta, böylece sertlik değeri düşmektedir.

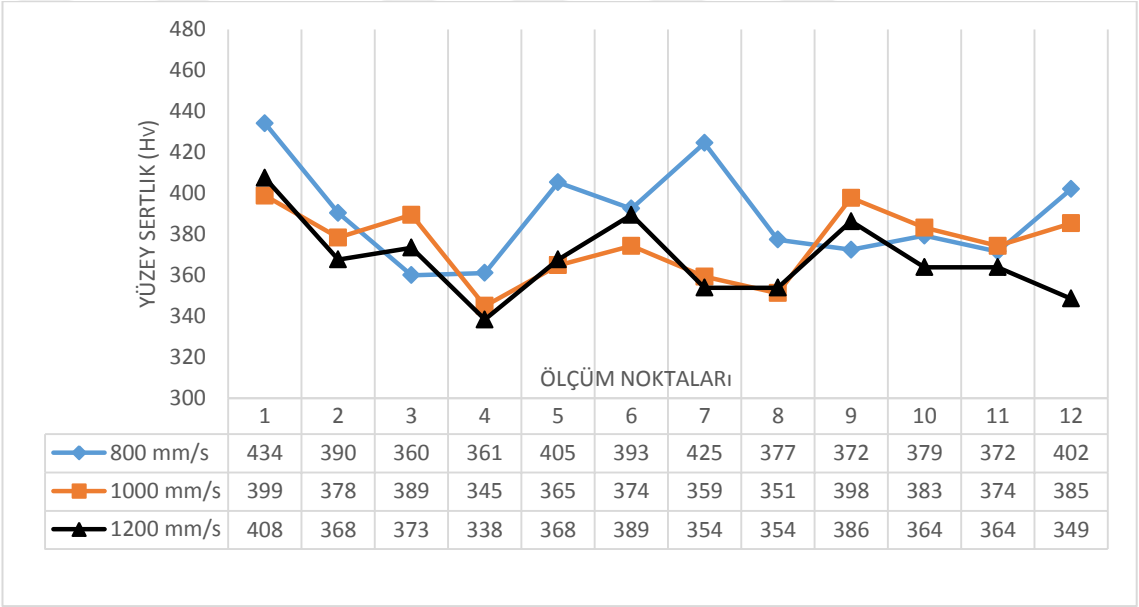


	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
160W	303	346	343	326	333	338	316	342	348	359	365	340
190W	414	372	410	435	391	439	371	426	406	384	405	429
220W	470	423	408	394	400	371	383	393	399	409	405	415

Şekil 4.32. Lazer gücüne bağlı olarak değişen mikrosertlik (H_V) değerleri

Şekil 4.33'te tarama hızına bağlı değişiklik gösteren mikrosertlik ölçümleri görülmektedir.

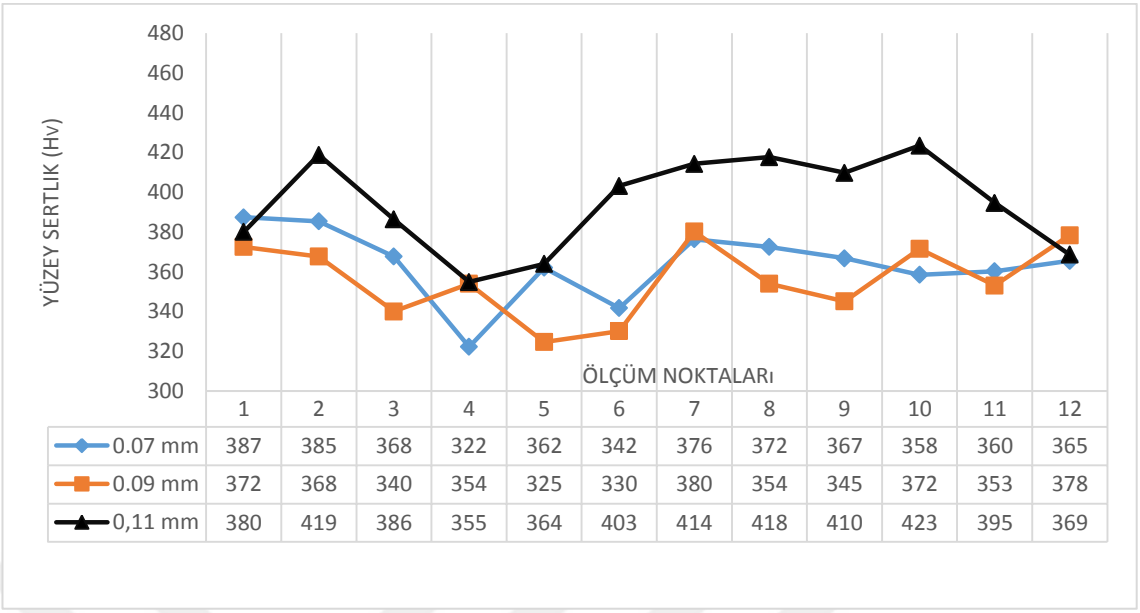
Ölçüm sonuçlarının ortalaması alındığında, V1=389,2 H_V, V2=375,1 H_V, V3= 367,8 H_V değerleri elde edilmiş, tarama hızının artması ile sertlik değerinde düşüş olduğu görülmüştür. Enerji yoğunluğunun mekanik özellikler üzerinde önemli etkisi olduğu Singla ve diğerleri, (2021) tarafından belirtilmiştir. Gong ve diğerleri (2015), farklı tarama hızlarına göre sertliğin (Rc) değişimini incelemişler, tarama hızının artması ile en düşük mikrosertlik değeri elde edildiğini tespit etmişlerdir. Füzyon eksikliği kaynaklı oluşan gözenekler malzemenin sertliğini etkilediğini bildirmişlerdir. Benzer etki, Thijs ve diğerleri (2010) tarafından da gözlemlemiştir. Casalino ve diğerleri (2014), yapmış olduğu çalışmada, tarama hızı ve lazer gücünün etkileşimlerinin, bağıl yoğunluk, sertlik ve nihai çekme mukavemeti için önemli olduğunu belirtmişlerdir.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
800 mm/s	434	390	360	361	405	393	425	377	372	379	372	402
1000 mm/s	399	378	389	345	365	374	359	351	398	383	374	385
1200 mm/s	408	368	373	338	368	389	354	354	386	364	364	349

Şekil 4.33. Tarama hızına bağlı olarak değişen mikrosertlik (H_V) değerleri

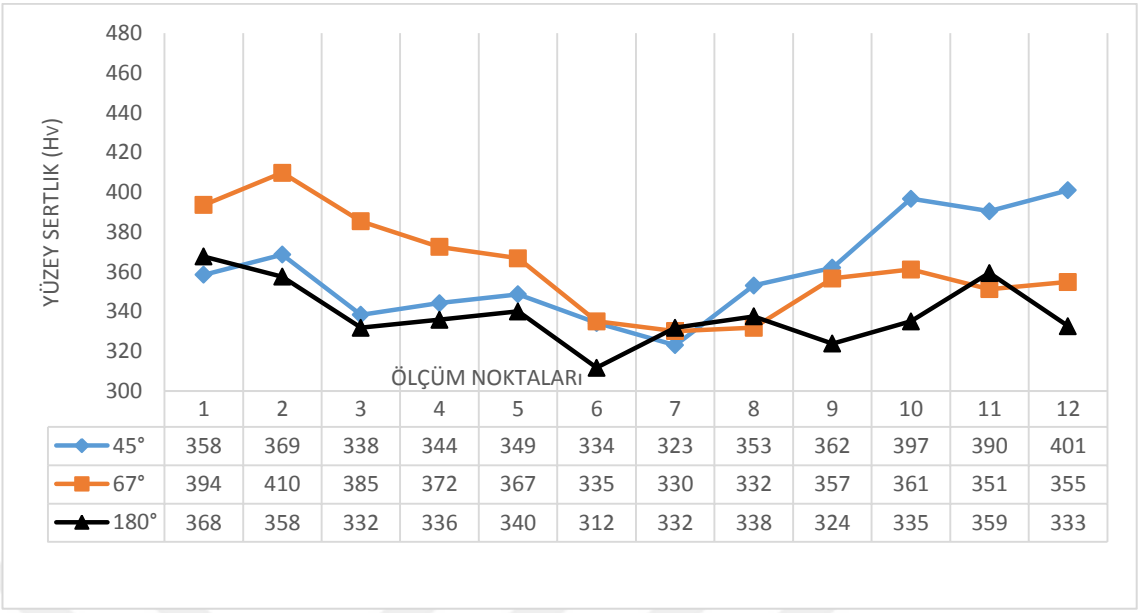
Tarama aralığına bağlı olarak numunelerden alınan mikrosertlik ölçüm değerleri Şekil 4.34'te görülmektedir. Tarama aralığı nispeten en düşük olan 0,07 mm parametresi ile üretilen numunelerde sertlik ölçümlerinin ortalaması 364 H_V, 0,09 mm ile üretilen numunede ortalama 356 H_V ve 0,11 mm ile üretilen numunede ortalama 395 H_V sertlik değeri kaydedilmiştir. 0,07 mm tarama aralığı ve 0,11 mm tarama aralığı değerinde üretilen numuneler karşılaştırıldığında, %8'lik bir sertlik artışı görülmüştür.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0.07 mm	387	385	368	322	362	342	376	372	367	358	360	365
0.09 mm	372	368	340	354	325	330	380	354	345	372	353	378
0,11 mm	380	419	386	355	364	403	414	418	410	423	395	369

Şekil 4.34. Tarama aralığına bağlı olarak değişen mikrosertlik (H_V) değerleri

Dönüş açısına bağlı olarak değişen mikrosertlik (H_V) değerleri Şekil 4.35'te gösterilmiştir. Belirtilen derecelerde dönüş açılarının sertlik değeri üzerindeki etkilerine bakıldığında, 45° dönüş açısı parametresi ile üretilen numunede ortalama sertlik değeri 360 H_V olarak kaydedilmiştir. Dönüş açısı 67° olduğunda, bu ortalama sertlik değeri 362° H_V olarak ölçülmüştür. 45° ve 67° dönüş açısı her katmanda ergitme yollarının farklı yönlerde oluşturulmasına ve önceki katmanlarla çapraz ve çaprazlamaya yakın bir yapı oluşmasına neden olur. Bu, termal birikimi dengeler ve malzeme içerisindeki iç gerilmeleri azaltır. Böylece daha homojen bir mikroyapı oluşur ve sertlik değerlerinde tutarlı bir artış görülür. Tekrarlanan tarama yollarına sahip, 180° dönüş açısında ise sertlik değeri düşüş kaydederek 338 H_V değerine düşmüştür. 180° dönüş açısı ile üretilen numunelerde sertlik değerinin düşmesi, porozite oranındaki artış ile ilişkilendirilebilir. Taneler arası zayıf bağlanmalara sebep olması nedeniyle sertlik değerinde düşüş görülmüştür. Literatürde yüksek sertlik değeri açısından önerilen, 67° ve 45° dönüş açısı parametresi yapılan bu çalışmalar ile tutarlılık sergilemiştir.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
45°	358	369	338	344	349	334	323	353	362	397	390	401
67°	394	410	385	372	367	335	330	332	357	361	351	355
180°	368	358	332	336	340	312	332	338	324	335	359	333

Şekil 4.35. Dönüş açısına bağlı olarak değişen mikrosertlik (H_V) değerleri

5. SONUÇ

Bu araştırmada, proses parametrelerinin Ti6Al4V alaşımının mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için kapsamlı test süreçlerini içeren deneysel çalışma gerçekleştirilmiş, sonuçlar şu şekilde özetlenmiştir;

Nihai çekme mukavemeti, lazer gücündeki artış ile pozitif bir ilişki göstermiştir. Lazer gücünün artması ile hacimsel enerji yoğunluk değerinin artış göstermesi, malzemenin homojen bir şekilde ergimesini sağlamış, gözenekliliğin düşmesi nihai çekme mukavemetinde artışa katkıda bulunmuştur. Lazer gücünün artırılması ile aktarılan hacimsel enerji yoğunluğu değeri de artmıştır. Böylece yönlenmiş α' martenzit oluşumu yoğunluk göstermiştir.

Tarama hızının artması ile nihai çekme mukavemetinde azalış görülmüştür. Buna sebep olan faktör olarak, artan tarama hızı ile ergime sırasında oluşan gazların çevreye salınması için yeterli sürenin olmaması kaynaklı, gazların hapsolarak gözenek oluşumu tespit edilmiştir. Gözeneklerde artan gerilim yoğunlaşması nedeniyle yapısal kusurlar oluşmuş ve bu da mukavemetin düşmesine yol açmıştır.

Maksimum nihai çekme mukavemet değerine, 1161 MPa ile 190 W lazer gücü, 900 mm/s tarama hızı, 0,1 mm tarama aralığı ve 45° dönüş açısı parametreleri ile üretilen R1 numunesinde ulaşılmıştır. Literatürde optimum dönüş açısı olarak belirtilen 67° dönüş parametresinin aksine, en yüksek nihai çekme dayanım değerine 45° dönüş açısı ile ulaşılmıştır. En düşük değer olan 645 MPa değeri, H1 numunesinde, 190 W lazer gücü, 900 mm/s tarama hızı, 90° tarama stratejisi ve 0,07 mm tarama aralığı parametreleri kullanılarak elde edilmiştir. Tarama aralığının, numunelerin nihai çekme mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, 0,07 mm tarama aralığından, 0,09 mm tarama aralığında üretilen numunelerin çekme test sonuçlarında %57 oranında artış kaydedildiği görülmüştür. 0,07 mm tarama aralığının altında bir parametre seçimi önerilmemektedir.

Çentik darbe testinde en iyi sonuca, 190 W lazer gücü, 900 mm/s tarama hızı, 0,1 mm tarama aralığı ve 90° dönüş stratejisi ile P2 durumunda ulaşılmıştır. Lazer tarama hızının artmasıyla çentik darbe enerji değerlerinin düştüğü tespit edilmiştir.

Kısa tarama aralıkları, termal stresin artmasına ve artık ısının birikmesine yol açarak malzemenin konsolidasyonunun bozulmasına, mekanik dayanımın azalmasına ve iç yapıda çatlakların oluşmasına neden olmuş, bu da çentik darbe enerjisinde bir düşüşe yol açmıştır.

R3 numunesi üretim parametreleri olarak, 190 W lazer gücü, 900 mm/s tarama hızı, 0,1 mm tarama aralığı ve 180° dönüş açısına sahip tarama deseni ile üretilen numunede 8,7 J ile en düşük çentik darbe dayanım değeri kaydedilmiştir. 180° dönme stratejisinde, lazerin toz üzerine odaklanması ve belirli bir iz üzerinde yoğunlaşması, katılaşmış malzeme üzerindeki ısınmanın tekrarına yol açmış ve ısı dağılımının yetersiz olmasına sebep olmuştur. Katılaşma süresi gaz kabarcıklarının yüzeye çıkması için yeterli olmamış ve malzeme içinde küresel gözenekler oluşarak malzemenin mekanik dayanımı olumsuz olarak etkilenmiştir. Ayrıca, R3 çentik darbe numunesinin kırılma yüzeyi incelendiğinde, füzyon eksikliği kaynaklı ergimemiş toz kusurları tespit edilmiştir. İlave olarak, 180° dönüş açısına sahip tarama yönü ile üretilen numunelerde, üretim yönüne paralel olarak ölçülen yüzey pürüzlülük değerinin yüksek olması kaynaklı gerilim birikmesi kaynaklıda çentik darbe dayanımda düşüş görülmüştür.

Yüzey pürüzlülüğünün proses parametreleriyle doğrudan ilişkisi olduğu yapılan çalışmalarda gözlemlenmiştir. Numunelerin yüzey pürüzlülük değeri (Ra) tarama hızı arttıkça artarken, lazer gücü arttıkça azalmıştır. En düşük yüzey pürüzlülük değerine P3 numunesi (220 W lazer gücü, 900 mm/s tarama hızı, 0,1 mm tarama aralığı ve 90° dönme stratejisi) ile imalat yönüne paralel ölçümde 8,9 μm, imalat yönüne dikey ölçümde 8,35 μm olarak ulaşılmıştır.

Düşük lazer gücünde, yüksek pürüzlülük değeri elde edilmesi, literatür çalışmalarında da görüldüğü üzere, düşük enerji yoğunluğunun sıvı faz ile yüzey gerilimini arttırdığını, paralel ve açılı yönlerde yaptıkları testlerde yüzeylerin daha az ıslanması nedeniyle daha pürüzlü bir yüzey elde edilmesine bağlanmıştır.

Tarama hızının artması, ergiyik havuz boyutunun azalmasına, havuz boyutunun küçülmesi örtüşen alanların azalmasına sebep olmuş ve yüzey pürüzlülüğünde artış meydana gelmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri 12,23 µm olarak, 0,07 mm tarama aralığında, kaydedilmiştir.

Tarama aralığı, lazerin taradığı bitişik izlerin üst üste binme oranını etkileyen temel bir parametredir. Kısa tarama aralığında, üst üste binme oranının yüksek olması nedeniyle ısı birikimi meydana gelmiş, böylece havuzdaki eriyiğin etkileşimi güçlü, uzun süreli olmuş ve geniş örtüşme alanı nedeniyle eriyik, dışbükey yüzeyi meydana getirmiştir. Oluşan bu dışbükey yüzey, sonraki toz tabakasını serme sürecini olumsuz etkileyerek, yüzey kalitesinde gözle görülür bir düşüşe neden olmuştur. Üretim yönüne paralel ve dikey yönlerde yapılan ölçümlerde tarama aralığı değerlerinin artması ile yüzey pürüzlülüğünün iyileştiği görülmüştür.

Farklı lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve dönüş açısı ile üretilen numunelerde analizi yapılan porozite oranı incelendiğinde en etkili parametrenin lazer gücü olduğu tespit edilmiştir. P2 ve P3 numunelerine kıyasla, nispeten düşük lazer gücü (160 W) ile üretilen P1 numunesinde en yüksek porozite oranı %0,48 olarak gözlenmiştir. Lazer gücünün 190 W ve 220 W değerlerine yükseltilmesi ile porozite oranı %0,1'e düşmüştür. Düşük lazer gücüne bağlı olarak düşük hacimsel enerji girişi ile porozite oranının arttığı tespit edilmiştir. Bu olgunun potansiyel nedenleri arasında, yetersiz hacimsel enerji girişinin neden olduğu ergimemiş tozların yanı sıra çatlak benzeri boşlukların varlığı yer almaktadır.

Tarama hızının artması sonucu gözeneklilik oranının da arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum, tarama hızının artması nedeniyle oluşan, tozun sınırlı miktarda ıslanması, gaz tutulması, eriyik havuzu etrafındaki malzemenin uzaklaştırılması ve yetersiz füzyondan kaynaklı gözeneklilik oranının artış göstermesi olarak yorumlanmıştır.
Tarama aralığının kısalması kaynaklı tarama hattı başına aşırı enerji girdisi görülmüş ve malzeme iç kusurların oluşmasına sebep olarak porozite oranı yükselmiştir. SLE prosesinde, iç kusurların oluşumunda önemli rol oynayan ana unsurlar tarama hızı ve lazer gücü parametreleri olarak görülmüştür.

Sertlik ölçüm sonuçlarına göre, 160 W düşük lazer gücünde yeterli ergimenin sağlanmaması kaynaklı sertlik değerinde düşüş kaydedilmiştir. Lazer gücü 190 W ve 220 W olarak çalışıldığında, yüzey mikrosertlik değerinde artış kaydedilmiştir. Enerji yoğunluğu artıkça, ergimenin artmasından dolayı porozite azalmış, mikro sertlik değeri artış göstermiştir.

Tarama hızının artması kaynaklı meydana gelen füzyon eksikliği hatası sebebiyle oluşan gözeneklerin malzemenin sertliğini etkilediği görülmüştür.

45° ve 67° dönüş açısı her katmanda ergitme yollarının farklı yönlerde oluşturulmasına ve önceki katmanlarla çapraz ve çaprazlamaya yakın bir yapı oluşmasına neden olmuştur. Bu, termal birikimi dengelemiş ve malzeme içerisindeki iç gerilmeleri azaltmıştır. Böylece daha homojen bir mikroyapı oluşmuş ve sertlik değerlerinde tutarlı bir artış görülür. Tarama stratejisi olarak 45° ve 67° dönüş açıları önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Abe, F., Shiomi, M., & Osakada, K. (2017). Solidifying behaviour of metallic powder in selective laser melting process. *Procedia engineering, 207*, 1188-1193.

Aboulkhair, N. T., Everitt, N. M., Ashcroft, I., & Tuck, C. (2014). Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting. *Additive manufacturing, 1*, 77-86.

Akinlabi, E. T., Mahamood, R. M., Shukla, M., & Pityana, S. (2012). Effect of scanning speed on material efficiency of laser metal deposited Ti6Al4V.

Alcisto, J., Enriquez, A., Garcia, H., Hinkson, S., Steelman, T., Silverman, E., & Es-Said, O. S. (2011). Tensile properties and microstructures of laser-formed Ti-6Al-4V. *Journal of materials engineering and performance, 20*, 203-212.

Ali, H., Ghadbeigi, H., & Mumtaz, K. (2018). Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V. *Materials Science and Engineering:A, 712*, 175–187. https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.103

ASTM International. (2012). Standard terminology for additive manufacturing technologies (ASTM F2792-12a).

Attar, H., Calin, M., Zhang, L. C., Scudino, S., & Eckert, J. (2014). Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium. *Materials Science and Engineering: A, 593*, 170-177.

Bansal, S. A., Khanna, V., & Gupta, P. (Eds.). (2022). Metal Matrix Composites: Fabrication, Production and 3D Printing. *CRC Press.*

Bartolomeu, F., Gasik, M., Silva, F. S., & Miranda, G. (2022). Mechanical properties of Ti6Al4V fabricated by laser powder bed fusion: a review focused on the processing and microstructural parameters influence on the final properties. *Metals, 12*(6), 986.

Bayat, M., Thanki, A., Mohanty, S., Witvrouw, A., Yang, S., Thorborg, J., & Hattel, J. H. (2019). Keyhole-induced porosities in Laser-based Powder Bed Fusion (L-PBF) of Ti6Al4V: High-fidelity modelling and experimental validation. *Additive Manufacturing, 30*, 100835.

Bilgin, G. M., Esen, Z., Akın, Ş. K., & Dericioglu, A. F. (2017). Optimization of the mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy fabricated by selective laser melting using thermohydrogen processes. *Materials Science and Engineering: A*, 700, 574-582.

Bineli, A. R. R., Peres, A. P. G., Jardini, A. L., & Maciel Filho, R. (2011). Direct metal laser sintering (DMLS): Technology for design and construction of microreactors. *In 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (Vol. 11).*

Brandt, M., Sun, S. J., Leary, M., Feih, S., Elambasseril, J., & Liu, Q. C. (2013). High-value SLM aerospace components: from design to manufacture. *Advanced Materials Research, 633*, 135-147.

Bugatti 3D printed brake caliper, (2024, March 16). *3D Natives.* https://www.3dnatives.com/en/bugatti-3d-printed-brake-caliper-230120184/

Calignano, F., Galati, M., & Iuliano, L. (2019). A metal powder bed fusion process in industry: qualification considerations. *Machines, 7*(4), 72.

Cao, F., Zhang, T., Ryder, M. A., & Lados, D. A. (2018). A review of the fatigue properties of additively manufactured Ti-6Al-4V. *JOM, 70*, 349-357.

Casalino, G., Campanelli, S. L., Contuzzi, N., & Ludovico, A. D. (2015). Experimental investigation and statistical optimisation of the selective laser melting process of a maraging steel. *Optics & Laser Technology, 65*, 151-158.

Cherry, J. A., Davies, H. M., Mehmood, S., Lavery, N. P., Brown, S. G. R., & Sienz, J. (2015). Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 76*, 869-879.

Chlebus, E., Kuźnicka, B., Kurzynowski, T., & Dybała, B. (2011). Microstructure and mechanical behaviour of Ti-6Al-7Nb alloy produced by selective laser melting. *Materials Characterization, 62*, 488–495. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.03.006

Cho, J. Y., Xu, W., Brandt, M., & Qian, M. (2019). Selective laser melting-fabricated Ti-6Al-4V alloy: Microstructural inhomogeneity, consequent variations in elastic modulus and implications. *Optics & Laser Technology, 111*, 664-670.

CNC vs. 3D printing. (2024, March 10). 3D Natives. https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-vs-cnc-160320184/

Collings, E. W. (1988). Introduction to titanium alloy design. *Alloying, Water, 257*-370.

Collins, P. C., Brice, D. A., Samimi, P., Ghamarian, I., & Fraser, H. L. (2016). Microstructural control of additively manufactured metallic materials. *Annual Review of Materials Research, 46*(1), 63-91.

Conradie, P., Dimitrov, D., & Oosthuizen, G. (2016). A cost modelling approach for milling titanium alloys. *Procedía Cirp, 46*, 412-415.

Cuellar, J. S., Smit, G., Plettenburg, D., & Zadpoor, A. (2018). Additive manufacturing of non-assembly mechanisms. *Additive Manufacturing, 21*, 150-158.

Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C., & Duysak, A. (2013). Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University, 31*, 53-70.

Dillon, C. (2024, March 16). AM good for making lightweight metal auto parts, less so for mass production. The Fabricator. https://www.thefabricator.com/additivereport/article/additive/am-good-for-making-lightweight-metal-auto-parts-less-so-for-mass-production

Do, D. K., & Li, P. (2016). The effect of laser energy input on the microstructure, physical and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloys by selective laser melting. *Virtual and Physical Prototyping, 11*(1), 41-47.

Dong, L., Correia, J. P. M., Barth, N., & Ahzi, S. (2017). Finite element simulations of temperature distribution and of densification of a titanium powder during metal laser sintering. *Additive Manufacturing, 13*, 37-48.

Elsayed, M., Ghazy, M., Youssef, Y., & Essa, K. (2018). Optimization of SLM process parameters for Ti6Al4V medical implants. *Rapid Prototyping Journal, 25*(3), 433-447.

Emmelmann, C., Herzog, D., & Kranz, J. (2017). Design for laser additive manufacturing. In M. Brandt (Ed.), Laser additive manufacturing: *Materials, design, technologies, and* applications (pp. 259-279). Woodhead Publishing.

Fatemi, A., Molaei, R., Simsiriwong, J., Sanaei, N., Pegues, J., Torries, B., & Shamsaei, N. (2019). Fatigue behaviour of additive manufactured materials: An overview of some recent experimental studies on Ti- 6Al- 4V considering various processing and loading direction effects. *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*, *42*(5), 991-1009.

Ferreira, D. F., Miranda, G., Oliveira, F. J., & Oliveira, J. M. (2022). Conventionally and SLM-manufactured 18Ni300 steel: mechanical and tribological behaviour in dry sliding against PP40 composite. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *122*(3), 1245-1258.

Furumoto, T., Koizumi, A., Alkahari, M. R., Anayama, R., Hosokawa, A., Tanaka, R., & Ueda, T. (2015). Permeability and strength of a porous metal structure fabricated by additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, *219*, 10-16.

Geetha, M., Singh, A. K., Asokamani, R., & Gogia, A. K. (2009). Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants–a review. *Progress in materials science*, *54*(3), 397-425.

Gong, H., Gu, H., Zeng, K., Dilip, J. J. S., Pal, D., & Stucker, B. (2014). Melt pool characterization for selective laser melting of Ti-6Al-4V pre-alloyed powder. *Journal of Materials Processing Technology*, *214*(12).

Gong, H., Rafi, K., Gu, H., Ram, G. J., Starr, T., & Stucker, B. (2015). Influence of defects on mechanical properties of Ti–6Al–4 V components produced by selective laser melting and electron beam melting. *Materials & Design*, *86*, 545-554.

Gorsse, S., Hutchinson, C., Gouné, M., & Banerjee, R. (2017). Additive manufacturing of metals: a brief review of the characteristic microstructures and properties of steels, Ti-6Al-4V and high-entropy alloys. *Science and Technology of advanced MaTerialS*, *18(*1), 584-610.

Gu, D. (2015). Laser additive manufacturing of high-performance materials. *Springer*.

Gu, D. D., Meiners, W., Wissenbach, K., & Poprawe, R. (2012). Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International materials reviews*, *57*(3), 133-164.

Gu, D., ve Shen, Y. (2008). Processing conditions and microstructural features of porous 316L stainless steel components by DMLS. *Applied Surface Science*, *255*(5), 1880-1887.

Guo, N., & Leu, M. C. (2013). Additive manufacturing: Technology, applications, and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*, *8*(3), 215-243. https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8

Gupta, A. K., & Taufik, M. (2022). The effect of process parameters in material extrusion processes on the part surface quality: A review. *Materials Today: Proceedings*, *50*, 1234-1242.

Han, J., Yang, J., Yu, H., Yin, J., Gao, M., Wang, Z., & Zeng, X. (2017). Microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V dependence on laser energy density. *Rapid Prototyping Journal*, *23*(2), 217-226.

Harkin, R., Wu, H., Nikam, S., Yin, S., Lupoi, R., Walls, P., & McFadden, S. (2023). Evaluation of the role of hatch-spacing variation in a lack-of-fusion defect prediction criterion for laser-based powder bed fusion processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *126*(1), 659-673.

Hou, J., Chen, W., Chen, Z., Zhang, K., & Huang, A. (2020). Microstructure, tensile properties and mechanical anisotropy of selective laser melted 304L stainless steel. *Journal of Materials Science & Technology*, *48*, 63-71.

Jandin, G., Bertin, J. M., Dembinski, L., & Coddet, C. (2005). Manufacture of stainless steel parts by selective laser melting process. In Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal (Vol. 28).

Janssen, G. R., Blankers, I. J., Moolenburgh, E. A., & Posthumus, A. L. (2014). The impact of 3-D printing on supply chain management. *TNO: Innovation for Life.*

Jerrard, P. G. E., Hao, L., & Evans, K. E. (2009). Experimental investigation into selective laser melting of austenitic and martensitic stainless steel powder mixtures. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, *223*(11), 1409-1416.

Jhabvala, J., Boillat, E., Antignac, T., & Glardon, R. (2010). On the effect of scanning strategies in the selective laser melting process. *Virtual and physical prototyping*, *5*(2), 99-109.

Ji L, Wang S, Wang C, Zhang Y (2022). Effect of hatch space on morphology and tensile property of laser powder bed fusion of Ti6Al4V. *Opt Laser Technol 150*:107929. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.107929

Jia, H., Sun, H., Wang, H., Wu, Y., & Wang, H. (2021). Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *113*, 2413-2435.

Kasperovich, G., & Hausmann, J. (2015). Improvement of fatigue resistance and ductility of TiAl6V4 processed by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, *220*, 202-214.

Kasperovich, G., Haubrich, J., Gussone, J., & Requena, G. (2016). Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting. *Materials Design*, *105*, 160–170. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.070

Kempen, K., Thijs, L., Van Humbeeck, J., & Kruth, J. P. (2015). Processing AlSi10Mg by selective laser melting: parameter optimisation and material characterisation. *Materials Science and Technology*, *31*(8), 917-923.

Kempen, K., Yasa, E., Thijs, L., & et al. (2011). Microstructure and mechanical properties of selective laser melted 18Ni-300 steel. *Physics Procedia*, *12*, 255–263. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.033

Khaing, M. W., Fuh, J. Y. H., & Lu, L. (2001). Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterisation of EOS parts. *Journal of Materials Processing Technology*, *113*(1-3), 269-272.

Khorasani, M., Ghasemi, A., Awan, U. S., Hadavi, E., Leary, M., Brandt, M., & Gibson, I. (2020). A study on surface morphology and tension in laser powder bed fusion of Ti-6Al-4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *111*, 2891-2909.

Kiran, A. S. K., Veluru, J. B., Merum, S., Radhamani, A. V., Doble, M., Kumar, T. S., & Ramakrishna, S. (2018). Additive manufacturing technologies: an overview of challenges and perspective of using electrospraying. *Nanocomposites, 4*(4), 190-214.

Kruth, J. P., Leu, M. C., & Nakagawa, T. (1998). Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *Cirp Annals, 47*(2), 525-540.

Kruth, J. P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L., & Rombouts, M. (2005). Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid prototyping journal, 11*(1), 26-36.

Kruth, J. P., Van Den Broucke, B., Van Vaerenbergh, J., Van Vaerenbergh, J., & Naert, I. (2005). Digital manufacturing of biocompatible metal frameworks for complex dental prostheses by means of SLS/SLM. *In VRAP 2005* (pp. 139-145).

Kumar, S., & Pityana, S. (2011). Laser-based additive manufacturing of metals. *Advanced Materials Research, 227*, 92-95.

Kurzynowski, T., Chlebus, E., Kuźnicka, B., & Reiner, J. (2012). Parameters in selective laser melting for processing metallic powders. In High power laser materials processing: *lasers, beam delivery, diagnostics, and applications* (Vol. 8239, pp. 317-322). SPIE.

Kusuma, C. (2016). The effect of laser power and scan speed on melt pool characteristics of pure titanium and Ti-6Al-4V alloy for selective laser melting.

Ladani, L., & Sadeghilaridjani, M. (2021). Review of powder bed fusion additive manufacturing for metals. *Metals, 11*(9), 1391.

Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H. A., & Maier, H. J. (2013). On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance. *International journal of fatigue, 48*, 300-307.

Leyen, C., & Peters, M. (2003). Titanium and alloys: *Fundamentals and applications* (Vol. 9). Wiley VCH.

Li, R., Liu, J., Shi, Y., Du, M., & Xie, Z. (2010). 316L stainless steel with gradient porosity fabricated by selective laser melting. *Journal of Materials Engineering and Performance, 19*, 666-671.

Lin, C. Y., Wirtz, T., LaMarca, F., & Hollister, S. J. (2007). Structural and mechanical evaluations of a topology optimized titanium interbody fusion cage fabricated by selective laser melting process. *Journal of Biomedical Materials Research Part A, 83*(2), 272-279.

Liu J, Sun Q, Zhou C., (2019) Achieving Ti6Al4V alloys with both high strength and ductility via selective laser melting. *Mater Sci Eng A 766*:. https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138319

Liu, J., Song, Y., Chen, C., & et al. (2020). Effect of scanning speed on the microstructure and mechanical behavior of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. *Materials Design, 186*, Article 108355. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108355

Liu, Q. C., Elambasseril, J., Sun, S. J., Leary, M., Brandt, M., & Sharp, P. K. (2014). The effect of manufacturing defects on the fatigue behaviour of Ti-6Al-4V specimens fabricated using selective laser melting. *Advanced Materials Research, 891*, 1519-1524.

Liu, W., Chen, C., Shuai, S., Zhao, R., Liu, L., Wang, X., & Ren, Z. (2020). Study of pore defect and mechanical properties in selective laser melted Ti6Al4V alloy based on X-ray computed tomography. *Materials Science and Engineering: A, 797*, 139981.

Luo, Q., Yin, L., Simpson, T. W., & Beese, A. M. (2022). Effect of processing parameters on pore structures, grain features, and mechanical properties in Ti-6Al-4V by laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing, 56*, 102915.

Magerramova, L., Vasilyev, B., & Kinzburskiy, V. (2016). Novel designs of turbine blades for additive manufacturing. *In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air (Vol*. 49804, p. V05CT18A001). American Society of Mechanical Engineers.

Mahamood, R. M., Akinlabi, E. T., Shukla, M., & Pityana, S. (2020). Improving surface integrity using laser metal deposition process. *In Additive Manufacturing: Breakthroughs in Research and Practice* (pp. 220-244). IGI Global.

Matsumoto, H., Yoneda, H., Sato, K., Kurosu, S., Maire, E., Fabregue, D., & Chiba, A. (2011). Room-temperature ductility of Ti–6Al–4V alloy with α′ martensite microstructure. *Materials Science and Engineering: A, 528*(3), 1512-1520.

Matthews, M. J., Roehling, T. T., Khairallah, S. A., Guss, G., Wu, S. Q., Crumb, M. F., & McKeown, J. T. (2018). Spatial modulation of laser sources for microstructural control of additively manufactured metals. *Procedia CIRP, 74*, 607-610.

Mazur, M., Leary, M., McMillan, M., Sun, S., Shidid, D., & Brandt, M. (2017). Mechanical properties of Ti6Al4V and AlSi12Mg lattice structures manufactured by Selective Laser Melting (SLM). *In Laser Additive Manufacturing* (pp. 119-161). Woodhead Publishing.

Meboldt, M., & Klahn, C. (Eds.). (2017). Industrializing additive manufacturing: *Proceedings of additive manufacturing in products and applications* (AMPA2017). Springer.

Mercelis, P., & Kruth, J. P. (2006). Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid prototyping journal, 12*(5), 254-265.

Ming, W., Chen, J., An, Q., & Chen, M. (2019). Dynamic mechanical properties and machinability characteristics of selective laser melted and forged Ti6Al4V. *Journal of Materials Processing Technology, 271*, 284-292.

Monaheng, L. F., du Preez, W. B., & Polese, C. (2021). Towards qualification in the aviation industry: impact toughness of Ti6Al4V (ELI) specimens produced through laser powder bed fusion followed by two-stage heat treatment. Metals, 11(11), 1736.

Mullen, L., Stamp, R. C., Brooks, W. K., Jones, E., & Sutcliffe, C. J. (2009). Selective Laser Melting: A regular unit cell approach for the manufacture of porous, titanium, bone in- growth constructs, suitable for orthopedic applications. Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and *The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials, 89*(2), 325-334.

Mumtaz, K. A., Erasenthiran, P., & Hopkinson, N. (2008). High density selective laser melting of Waspaloy®. *Journal of materials processing technology, 195*(1-3), 77-87.

Murr, L. E., Quinones, S. A., Gaytan, S. M., Lopez, M. I., Rodela, A., Martinez, E. Y., & Wicker, R. B. (2009). Microstructure and mechanical behavior of Ti–6Al–4V produced by rapid-layer manufacturing for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2*(1), 20–32.

Niinomi, M. (2008). Mechanical biocompatibilities of titanium alloys for biomedical applications. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 1*(1), 30-42.

Pal, S., Lojen, G., Hudak, R., & et al. (2020). As-fabricated surface morphologies of Ti-6Al-4V samples fabricated by different laser processing parameters in selective laser melting. *Additive Manufacturing, 33*, Article 101147. https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101147

Pegues, J., Leung, K., Keshtgar, A., Airoldi, L., Apetre, N., Iyyer, N., & Shamsaei, N. (2017). Effect of process parameter variation on microstructure and mechanical properties of additively manufactured Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Research and Technology, 6*(1), 156–165. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.09.005

Pogson, S., Fox, P., O'Neill, W., & Sutcliffe, C. J. (2004). The direct metal laser remelting of copper and tool steel powders. *Materials Science and Engineering: A, 386*(1-2), 453-459.

Pohl, H., Simchi, A., Issa, M., & Dias, H. C. (2001). Thermal stresses in direct metal laser sintering. *Journal of Materials Processing Technology, 109*(1-2), 78-83.

Qiu, C., Adkins, N. J., & Attallah, M. M. (2013). Microstructure and tensile properties of selectively laser-melted and of HIPed laser-melted Ti–6Al–4V. *Materials Science and Engineering: A, 578*, 230-239.

Raju, R., Duraiselvam, M., Petley, V., Verma, S., & Rajendran, R. (2015). Microstructural and mechanical characterization of Ti6Al4V refurbished parts obtained by laser metal deposition. *Materials Science and Engineering: A, 643*, 64-71.

Read, N., Wang, W., Essa, K., & Attallah, M. M. (2015). Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development. *Materials & Design* (1980-2015), *65*, 417-424.

Reda, R., Nofal, A., & Hussein, A. H. (2013). Effect of single and duplex stage heat treatment on the microstructure and mechanical properties of cast Ti–6Al–4V alloy. *Metallography, Microstructure, and Analysis, 2*, 388-393.

Robinson, J. H., Ashton, I. R. T., Jones, E., Fox, P., & Sutcliffe, C. (2018). The effect of hatch angle rotation on parts manufactured using selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal, 25*(2), 289-298.

Romero, C., Yang, F., & Bolzoni, L. (2018). Fatigue and fracture properties of Ti alloys from powder-based processes–a review. *International Journal of Fatigue, 117*, 407-419.

Santos, E. C., Shiomi, M., Osakada, K., & Laoui, T. (2006). Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46*(12-13), 1459-1468.

Sarvankar, S. G., & Yewale, S. N. (2019). Additive manufacturing in automobile industry. *Int. J. Res. Aeronaut. Mech. Eng, 7*(4), 1-10.

Shen, N., & Chou, K. (2012). Numerical thermal analysis in electron beam additive manufacturing with preheating effects. *In 2012 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. University of Texas at Austin.

Shipley, H., McDonnell, D., Culleton, M., Coull, R., Lupoi, R., O'Donnell, G., & Trimble, D. (2018). Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: *A review. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 128*, 1-20.

Shunmugavel, M., Polishetty, A., & Littlefair, G. (2015). Microstructure and mechanical properties of wrought and additive manufactured Ti-6Al-4V cylindrical bars. *Procedia Technology, 20*, 231-236.

Siemens. (2024, March 12). Additive manufacturing in the aerospace industry: Efficiency and innovation. Siemens NX Manufacturing Blog. https://blogs.sw.siemens.com/nx-manufacturing/additive-manufacturing-aerospace-industry-efficiency/

Simonelli, M., Tuck, C., Aboulkhair, N. T., Maskery, I., Ashcroft, I., Wildman, R. D., & Hague, R. (2015). A study on the laser spatter and the oxidation reactions during selective laser melting of 316L stainless steel, Al-Si10-Mg, and Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A, 46*, 3842-3851.

Singh, R. (2006). Introduction to basic manufacturing processes and workshop technology. *New Age International.*

Singla, A. K., Banerjee, M., Sharma, A., Singh, J., Bansal, A., Gupta, M. K., & Goyal, D. K. (2021). Selective laser melting of Ti6Al4V alloy: Process parameters, defects and post-treatments. *Journal of Manufacturing Processes, 64*, 161-187.

Stamp, R., Fox, P., O'neill, W., Jones, E., & Sutcliffe, C. (2009). The development of a scanning strategy for the manufacture of porous biomaterials by selective laser melting. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 20*, 1839-1848

Su, X., Yang, Y., Wang, D., & Chen, Y. (2013). Digital assembly and direct fabrication of mechanism based on selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal, 19*(3), 166-172.

Sun, Q. D., Sun, J., Guo, K., Waqar, S., Liu, J. W., & Wang, L. S. (2022). Influences of processing parameters and heat treatment on microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V fabricated using selective laser melting. *Advances in Manufacturing, 10*(4), 520-540.

Şener, B., Çavuşoğlu, O., & Yuce, C. (2023). Effects of process parameters on surface quality and mechanical performance of 316L stainless steel produced by selective laser melting. *Optik, 287*, 171050.

Tang, H. P., Yang, G. Y., Jia, W. P., He, W. W., Lu, S. L., & Qian, M. (2015). Additive manufacturing of a high niobium-containing titanium aluminide alloy by selective electron beam melting. *Materials Science and Engineering: A, 636*, 103-107.

Tarakçı, G., Khan, H. M., Yılmaz, M. S., & Özer, G. (2022). Effect of building orientations and heat treatments on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties, fracture mechanism and corrosion behavior. *Rapid Prototyping Journal, 28*, 1609–1621. https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2021-0325

Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Van Humbeeck, J., & Kruth, J. P. (2010). A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti–6Al–4V. *Acta Materialia*, *58*(9), 3303–3312. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.01.031

Tolosa, I., Garciandía, F., Zubiri, F., Zapirain, F., & Esnaola, A. (2010). Study of mechanical properties of AISI 316 stainless steel processed by "selective laser melting", following different manufacturing strategies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *51*, 639-647.

Turner, B. N., & Gold, S. A. (2015). A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. *Rapid Prototyping Journal*, *21*(3), 250-261.

Vandenbroucke, B., & Kruth, J. P. (2007). Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts. *Rapid Prototyping Journal*, *13*(4), 196-203.

Veiga, C., Davim, J. P., & Loureiro, A. J. R. (2012). Properties and applications of titanium alloys: a brief review. *Rev. Adv. Mater. Sci*, *32*(2), 133-148.

Vilaro, T., Colin, C., & Bartout, J. D. (2011). As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting. *Metallurgical and Materials Transactions A*, *42*(10), 3190–3199.

Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J. P., & Van Humbeeck, J. (2012). Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties. *Journal of alloys and Compounds*, *541*, 177-185.

W. Xu, M. Brandt, S. Sun, J. Elambasseril, Q. Liu, K. Latham, K. Xia, M. Qian, Additive manufacturing of strong and ductile Ti-6Al-4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition, *Acta Mater. 85* (2015) 74–84.

Wang, D., Song, C., Yang, Y., & Bai, Y. (2016). Investigation of crystal growth mechanism during selective laser melting and mechanical property characterization of 316L stainless steel parts. *Materials & Design*, *100*, 291-299.

Wang, M., Wu, Y., Lu, S., Chen, T., Zhao, Y., Chen, H., & Tang, Z. (2016). Fabrication and characterization of selective laser melting printed Ti–6Al–4V alloys subjected to heat treatment for customized implants design. *Progress in Natural Science: Materials International*, *26*(6), 671-677.

Wang, Y., Kamath, C., Voisin, T., & Li, Z. (2018). A processing diagram for high-density Ti-6Al-4V by selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, *24*(9), 1469-1478.

Wang, Z., Ummethala, R., Singh, N., Tang, S., Suryanarayana, C., Eckert, J., & Prashanth, K. G. (2020). Selective laser melting of aluminum and its alloys. *Materials*, *13*(20), 4564.

Wang, Z., Xiao, Z., Tse, Y., Huang, C., & Zhang, W. (2019). Optimization of processing parameters and establishment of a relationship between microstructure and mechanical properties of SLM titanium alloy. *Optics & Laser Technology*, *112*, 159-167.

Wehmoller, M., Warnke, P. H., Zilian, C., & Eufinger, H. (2005). CARS: Computer assisted radiology and surgery. *Springer*.

Wischeropp, T. M. (2021). Advancement of selective laser melting by laser beam shaping. *Springer Berlin Heidelberg*.

Wycisk, E., Emmelmann, C., Siddique, S., & Walther, F. (2013). High cycle fatigue (HCF) performance of Ti-6Al-4V alloy processed by selective laser melting. *Advanced materials research, 816*, 134-139.

Xia, M., Gu, D., Yu, G., Dai, D., Chen, H., & Shi, Q. (2016). Influence of hatch spacing on heat and mass transfer, thermodynamics and laser processability during additive manufacturing of Inconel 718 alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture, 109*, 147-157.

Xu, W., Brandt, M., Sun, S., Elambasseril, J., Liu, Q., Latham, K., & Qian, M. (2015). Additive manufacturing of strong and ductile Ti–6Al–4V by selective laser melting via in situ martensite decomposition. *Acta Materialia, 85*, 74-84.

Xu, Z. W., Wang, Q., Wang, X. S., Tan, C. H., Guo, M. H., & Gao, P. B. (2020). High cycle fatigue performance of AlSi10mg alloy produced by selective laser melting. *Mechanics of Materials, 148*, 103499.x

Yadroitsev, I. (2009). Selective laser melting: Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders. *LAP Lambert Academic Publishing*.

Yan, M., & Yu, P. (2015). An overview of densification, microstructure, and mechanical property of additively manufactured Ti-6Al-4V: Comparison among selective laser melting, electron beam melting, laser metal deposition, and selective laser sintering, and with conventional powder. *IntechOpen.*

Yang, J., Han, J., Yu, H., Yin, J., Gao, M., Wang, Z., & Zeng, X. (2016). Role of molten pool mode on formability, microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy. *Materials & Design, 110*, 558-570.

Yang, L., Hsu, K., Baughman, B., Godfrey, D., Medina, F., Menon, M., & Wiener, S. (2017). *Additive manufacturing of metals: the technology, materials, design and production.*

Yang, X., Li, Y., Duan, M. G., Jiang, W., Chen, D., & Li, B. (2022). An investigation of ductile fracture behavior of Ti6Al4V alloy fabricated by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds, 890*, 161926.

Yang, Y., Lu, J. B., Luo, Z. Y., & Wang, D. (2012). Accuracy and density optimization in directly fabricating customized orthodontic production by selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal, 18*(6), 482-489.

Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., & Sing, S. L. (2015). Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied physics reviews, 2*(4).

Yasa, E., Deckers, J., Kruth, J. P., Rombouts, M., & Luyten, J. (2010). Charpy impact testing of metallic selective laser melting parts. *Virtual and Physical Prototyping, 5(*2), 89–98. https://doi.org/10.1080/1745275100372523

Zhang, B., Liao, H., & Coddet, C. (2012). Effects of processing parameters on properties of selective laser melting Mg–9% Al powder mixture. *Materials & Design, 34*, 753-758.

Zhang, M., Sun, C. N., Zhang, X., Goh, P. C., Wei, J., Hardacre, D., & Li, H. (2017). Fatigue and fracture behaviour of laser powder bed fusion stainless steel 316L: Influence of processing parameters. *Materials Science and Engineering: A, 703*, 251-261.

Zhong, Q., Wei, K., Ouyang, T., Li, X., & Zeng, X. (2023). Effect of rotation angle on surface morphology, microstructure, and mechanical properties of Inconel 718 alloy fabricated by high power laser powder bed fusion. *Journal of Materials Science & Technology, 154*, 30-42.

Zhu, Y., Zou, J., & Yang, H. Y. (2018). Wear performance of metal parts fabricated by selective laser melting: a literature review. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 19*(2), 95-110.

Zochowski, P., Bajkowski, M., Grygoruk, R., Magier, M., Burian, W., Pyka, D., & Jamroziak, K. (2021). Ballistic impact resistance of bulletproof vest inserts containing printed titanium structures. *Metals, 11*(2), 225.

Zurich researchers simulate residual deformations in SLM 3D printed parts. (2020, July 21). *3D Printing Industry*. https://3dprintingindustry.com/news/zurich-researchers-simulate-residual-deformations-in-slm-3d-printed-parts-172408