

**DİREKT ENERJİ GİRDİLİ KATMANLI İMALATIN  
PROSES VE MALZEME KARAKTERİZASYONU**

**Taner KARAGÖZ**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DİREKT ENERJİ GİRDİLİ KATMANLI İMALATIN  
PROSES VE MALZEME KARAKTERİZASYONU**

Taner KARAGÖZ  
0000-0002-4021-3460

Prof. Dr. Ali BAYRAM  
(Danışman)

DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023  
Her Hakkı Saklıdır

## TEZ ONAYI

Taner KARAGÖZ tarafından hazırlanan “DİREKT ENERJİ GİRDİLİ KATMANLI İMALATIN PROSES VE MALZEME KARAKTERİZASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Ali BAYRAM

**Başkan** : Prof. Dr. Ali Bayram  
000-000-000-000  
Uludağ Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
İmza

**Üye** : Prof. Dr. Yahya IŞIK  
000-000-000-000  
Uludağ Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
İmza

**Üye** : Prof. Dr. Abdil KUŞ  
000-000-000-000  
Uludağ Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi,  
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı  
İmza

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Selçuk KARAGÖZ  
000-000-000-000  
Bursa Teknik Üniversitesi,  
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
İmza

**Üye** : Dr. Öğr. Üyesi Emre DEMİRCİ  
000-000-000-000  
Bursa Teknik Üniversitesi,  
Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
İmza

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN**  
**Enstitü Müdürü**

.././.....

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

.../.../.....

**Taner KARAGÖZ**

## TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof. Dr. Ali Bayram  
01.06.2023

Taner Karagöz  
01.06.2023

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum  
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum  
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

## ÖZET

Doktora Tezi

### DİREKT ENERJİ GİRDİLİ KATMANLI İMALATIN PROSES VE MALZEME KARAKTERİZASYONU

**Taner KARAGÖZ**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Ali BAYRAM

Direkt enerji girdili ya da yönlendirilmiş enerji girdili olarak bilinen eklemeli imalat yöntemi (DED) havacılık, otomotiv, enerji gibi sektörlerde büyük parçaların üretimi ve onarımı amaçlı olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda DED içerisinde gelişen yöntemler ve kontrol sistemleri ile özellikle havacılık ve enerji sektöründe kullanılan titanyum ve nikel bazlı pahalı alaşımlı malzemeler ile parça üretimi için en uygun çözümlerden biri haline gelmiştir. Bu tez çalışmasında titanyum malzeme ve toz hammaddeli lazer metal depozisyonu (LMD) yöntemi kullanılarak parça üretilmesi için gerekli olan prosesin optimizasyonu, proses ve malzeme karakterizasyonu, ardıl işlemler ile mekanik özelliklerin değişimi incelenmiştir.

LMD yöntemi ile titanyum parça üretiminde yüksek sıcaklıklara çıkıldığından oksitlenmenin önlenmesi için robota özel argon kabini tasarlanarak, üretimi yapılmıştır. Uygun ortam şartları sağlanarak farklı lazer gücü, ilerleme hızı ve toz besleme hızı parametre seti ile tek kaynak dikişli çok katmanlı numuneler üretildikten sonra mikrosertlik, porozite oranı, porozitelerin büyüklüğü, verimlilik, nüfuziyet ve mikroyapıları incelenmiştir. Sonuçlar ve parametreler yanıt yüzey metodu (YYM) ile optimize edilerek optimum parametre belirlenmiştir. Bu parametre ile duvar geometri üretimi yapılarak çekme numuneleri çıkarılmıştır. Üretilmiş halde ısıl işlemsiz, sıcak preslemeli (HIP) ısıl işlem uygulanmış ve 24 - 36 saat sürelerinde kriyojenik işlem uygulanmış numuneler ayrı ayrı incelenerek mekanik özelliklere ve mikroyapı değişimine etkisi incelenmiştir. Sıcak presleme sonrası kriyojenik işlem uygulanmasının ısıl işlemde farklı olarak mukavemeti düşürmeden uzamayı bir miktar arttırdığı görülmüştür. Kriyojenik ısıl işlem uygulaması ile titanyum havacılık parçalarının daha sünek, yorulma, kırılmaya daha dayanıklı bir hale getirilebileceği ve mekanik özelliklerinin iyileştirilebileceği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Titanyum, lazer metal depozisyonu, parametre optimizasyonu, mikroyapı, yanıt yüzey metodu, kriyojenik işlem, sıcak presleme (HIP), Ti6Al4V

**2023, ix + 79 sayfa.**

## **ABSTRACT**

PhD Thesis

### **PROCESS AND MATERIAL CHARACTERIZATION OF DIRECTED ENERGY DEPOSITION METAL ADDITIVE MANUFACTURING**

**Taner KARAGÖZ**

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

**Supervisor:** Prof. Dr. Ali BAYRAM

The additive manufacturing method (DED), known as direct energy deposition or directed energy deposition, is used for the production and repair of large parts in sectors such as aviation, automotive and energy. With the methods and control systems developed in DED in recent years, it has become one of the most suitable solutions for the production of parts with titanium and nickel-based expensive alloy materials used in the aviation and energy sectors. In this thesis, the optimization of the process, process and material characterization, and the change of mechanical properties with the subsequent processes, which are necessary for the production of parts using the laser metal deposition (LMD) method with titanium material and powder raw material, were examined.

Since high temperatures are reached in the production of titanium parts with the LMD method, a robot-specific argon cabinet has been designed and produced to prevent oxidation. Microhardness, porosity ratio, porosity size, efficiency, dilution and microstructure were investigated after producing single welded multilayer samples with different laser power, laser scan speed and powder feed rate parameter set by providing suitable ambient conditions. The results and parameters were optimized by the response surface method (RSM) and the optimum parameter was determined. With this parameter, tensile samples were extracted by producing the wall geometry. Samples that were produced without heat treatment, hot isostatic pressed (HIP), heat-treated and cryogenically treated for 24-36 hours were examined separately, and their effects on mechanical properties and microstructural changes were investigated. It has been observed that the cryogenic treatment after hot isostatic pressed, slightly increases the elongation without reducing the strength, unlike the heat treatment.

**Key words:** Titanium, laser metal deposition, parameter optimization, microstructure, response surface method, cryogenic treatment, hot isostatic pressing (HIP), Ti6Al4V

**2023, ix + 79 pages.**

## ÖNSÖZ VE/VEYA TEŞEKKÜR

Yüksek lisans sürecimden doktora sürecimin sonuna kadar beni destekleyen, çalışmalarımda yönlendiren ve akademik hayatımda bana rehberlik eden değerli hocam Prof. Dr. Ali BAYRAM'a teşekkürlerimi sunarım.

119C059 nolu proje ile 2244 Sanayi Doktora Programı kapsamında çalışmaların gerçekleşmesi için gerekli altyapı ve imkanları sağlayan Coşkunöz Holding'e ve TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu zorlu süreçte beni destekleyen ve hep yanımda olan eşim Cansu Karagöz'e ve bugünlere gelmemi sağlayan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Taner KARAGÖZ  
.../.../.....



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ VE/VEYA TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	3
2.1. Eklemeli İmalata Genel Bakış.....	3
2.2. Eklemeli İmalat Yöntemleri.....	6
2.3. Yönlendirilmiş Enerji ile Yığıma Eklemeli İmalat Yöntemi.....	8
2.4. LMD Prosesi ve Parametreleri.....	13
2.5. Metal Eklemeli İmalat Malzemeleri ve Havacılıkta Uygulama Alanları.....	15
2.6. Eklemeli İmalatta Titanyum Malzemeler ve Özellikleri.....	18
2.7. Eklemeli İmalat sonrası Ardıl İşlemler.....	21
2.8. Literatür Özeti ve Çalışmanın Literatüre Katkısı.....	22
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	24
3.1. Proses Parametreleri, Optimizasyon Akış Şeması ve Deney Tasarımı.....	24
3.2. Toz Malzeme.....	24
3.3. Deney Düzenegi.....	25
3.4. LMD Parametreleri.....	28
3.5. Tek Kaynak Dikişli Çok Katmanlı Üretim.....	28
3.6. Yanıt Yüzey Metodu ile Optimizasyon.....	30
3.7. Duvar Geometri Üretimi.....	32
3.8. Test Numunelerinin Üretimi.....	33
3.9. Uygulanan Ardıl İşlemler.....	34
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	37
4.1. Deney Tasarımı Parametreleri Analizleri.....	37
4.1.1. Mikrosertlik ölçümleri.....	37
4.1.2. Porozite inceleme.....	41
4.1.3. Ergime havuzu ve verimlilik analizi.....	43
4.1.4. Mikroyapı analizleri.....	45
4.2. Parametre Optimizasyonu.....	51
4.3. Yanıt Yüzey Metodu ile Optimizasyon.....	51
4.4. Isıl İşlemsiz Çekme Testi.....	59
4.5. HIP ve Isıl İşlem Sonrası Çekme Testleri.....	61
4.6. Kriyojenik Isıl İşlem.....	63
4.7. Ardıl İşlemler Sonrası Çekme Testi Değerlerinin Kıyaslanması.....	66
4.8. Ardıl İşlemler Sonrası Mikroyapı İncelemesi.....	68
4.9. Ardıl İşlemler Sonrası Porozite Ölçümü.....	70
5. SONUÇ.....	73
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	79

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
a	Alfa fazı
$\beta$	Beta fazı
$\alpha'$	Birincil alfa fazı
o	Çıktıların sayısı
ED	Enerji Yoğunluğu
b	Ergime Havuzu Derinliği
e	Hata
Y	Hedef fonksiyon
$\alpha''$	İkincil alfa fazı
v	İlerleme Hızı
di	İstenebilirlik çıktıları
D	İstenebilirlik fonksiyonu
L min	İstenebilirlik fonksiyonu alt sınırı
L max	İstenebilirlik fonksiyonu üst sınırı
w	İz genişliği
P	Lazer Gücü
s	Lazer odak yarıçapı
am	Martenzit faz
a	Nüfuziyet Oranı
$\beta_0$	Regresyon denklem sabiti
$\beta_i$	Regresyon katsayıları
$\beta_j$	Regresyon katsayıları
xi	Regresyon modeli bağımlı girdi sayısı
x	Regresyon modeli bağımlı girdisi
°C	Santigrat Derece
SED	Spesifik Enerji Yoğunluğu
m	Toz Besleme Debisi
h	Yığma Yüksekliği

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
Eİ	Eklemeli imalat
DED	Direkt enerji depozisyonu
LMD	Lazer metal depozisyonu
YYM	Yanıt yüzey metodu
HIP	Sıcak presleme
SLA	Stereolitografi
PBF	Toz yataklı ergitme
BJ	Bağlayıcı eklemeli imalat
MJ	Malzeme eklemeli imalat
LOM	Katman bazlı eklemeli imalat
FDM	Direkt enerji depozisyonu

FGM	Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme
BCC	Hacim merkezli kübik kafes
HCP	Hekazgonal kafes
CMM	3 Boyutlu geometrik ölçüm
WAAM	Tel beslemeli metal depozisyonu
EDM	Elektro erozyon işleme
DIC	Diferansiyel interferans kontrast

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1.	Eklemeli imalat pazar hacmi ve yıllara göre tahminler..... 5
Şekil 2.2.	Sektörlerinin eklemeli üretimdeki ciroya göre dağılım yüzdeleri..... 5
Şekil 2.3.	Biçimlendirici, eksiltici ve eklemeli İmalat..... 6
Şekil 2.4.	Yedi ana başlık altında eklemeli imalat yöntemleri..... 7
Şekil 2.5.	Yönlendirilmiş enerji sistemlerinin sınıflandırılması..... 9
Şekil 2.6.	LMD prosesi ve proses kafası..... 11
Şekil 2.7.	DED prosesinde karşılaşılan hatalar..... 12
Şekil 2.8.	Proses parametreleri ve etkileyen özellikler..... 13
Şekil 2.9.	Tek dikiş tek katman üretimi kesit görüntüsü..... 14
Şekil 2.10.	Norsk Titanium tarafından üretilen Boeing 787 yapısal parçası..... 17
Şekil 2.11.	Ti6Al4V malzemenin a) faz diyagramı b) bazı soğutma hızlarına göre faz dönüşüm diyagramı..... 19
Şekil 2.12.	Ti6Al4V için faz diyagramı ve $\beta$ -transüsün üzerindeki bir sıcaklıktan yavaş soğutma sırasında ara sıcaklıklardaki şematik mikro yapılar..... 20
Şekil 2.13	LMD prosesinde malzemenin maruz kaldığı ısınma soğuma çevrimi.... 21
Şekil 3.1.	Deney düzeneği..... 26
Şekil 3.2.	LMD prosesi için tasarlanan koruyucu kabin..... 26
Şekil 3.3.	LMD kafası..... 27
Şekil 3.4.	Tek kaynak dikişli 10 katmanlı numune stratejisi..... 29
Şekil 3.5.	Tek Dikişli 10 katmanlı numunenin enine kesiti..... 29
Şekil 3.6.	Tek dikişli 10 katmanlı numuneler..... 30
Şekil 3.7.	Duvar geometri üretiminde kullanılan strateji..... 32
Şekil 3.8.	Üretilmiş duvar geometrileri..... 33
Şekil 3.9.	Çekme testi numuneleri (DIN 50125)..... 34
Şekil 3.10.	Üretilmiş duvarlardan çıkarılan numunelerin oryantasyonu..... 34
Şekil 3.11.	Numunelere uygulanan HIP ve ısıl işlem parametreleri..... 35
Şekil 3.12.	Kriyojenik ısıl işlem parametreleri..... 36
Şekil 4.1.	Mikrosertlik ölçüm stratejisi..... 38
Şekil 4.2.	12 numunenin mikrosertlik ölçümleri..... 39
Şekil 4.3.	Mikrosertliğin katman seviyelerine göre dağılımı..... 40
Şekil 4.4.	Yatay ekseninde mikrosertlik dağılımı..... 40
Şekil 4.5.	Lazer gücü ve mikrosertlik değişimi..... 41
Şekil 4.6.	Kesitsel porozite oranı..... 42
Şekil 4.7.	Ortalama porozite çapı..... 42
Şekil 4.8.	Maksimum porozite boyutları..... 43
Şekil 4.9.	Ergime havuzu derinlik dağılımı..... 44
Şekil 4.10.	Verimliliğin numunelere göre değişimi..... 44
Şekil 4.11.	1-6 arası numunelerin 100x büyütülmüş mikroyapı görüntüleri..... 46
Şekil 4.12.	7-12 arası numunelerin 100x büyütülmüş mikroyapı görüntüleri..... 47
Şekil 4.13.	1-6 arası numunelerin 500x büyütülmüş mikroyapı görüntüleri..... 48
Şekil 4.14.	7-12 arası numunelerin 100x büyütülmüş mikroyapı görüntüleri..... 49
Şekil 4.15.	DIC ile tane boyutu dağılımı..... 50
Şekil 4.16.	Ortalama $\beta$ fazı tane boyutu..... 50
Şekil 4.17.	İstenebilirlik değerleri, girdiler ve çıktılar arasındaki ilişki..... 52
Şekil 4.18.	Verimlilik faktörü için pareto analizi..... 53
Şekil 4.19.	Verimliliğin girdi parametrelerine göre değişimi..... 54

Şekil 4.20.	Porozite faktörü için pareto analizi.....	55
Şekil 4.21.	Porozitenin girdi parametrelerine göre değişimi.....	56
Şekil 4.22.	Nüfuziyet için pareto analizi.....	57
Şekil 4.23.	Nüfuziyetin girdi parametrelerine göre değişimi.....	58
Şekil 4.24.	Isıl işlemsiz çekme testi numuneleri.....	59
Şekil 4.25.	Isıl işlemsiz numunelerin akma ve çekme mukavemeti değerleri.....	60
Şekil 4.26.	Isıl işlemsiz numunelerin uzama değerleri.....	61
Şekil 4.27.	HIP ve ısıl işlem yapılmış çekme testi numuneleri.....	62
Şekil 4.28.	HIP sonrası farklı katmanların çekme testi değerleri.....	62
Şekil 4.29.	HIP sonrası farklı katmanların uzama değerleri.....	63
Şekil 4.30.	Kriyojenik işlem yapılmış çekme testi numuneleri.....	64
Şekil 4.31.	24 saat kriyojenik işlem sonrası farklı katmanların çekme testi.....	64
Şekil 4.32.	24 saat kriyojenik işlem sonrası farklı katmanların uzama değerleri.....	65
Şekil 4.33.	36 saat kriyojenik işlem sonrası farklı katmanların çekme testi.....	66
Şekil 4.34.	36 saat kriyojenik işlem sonrası farklı katmanların uzama değerleri.....	66
Şekil 4.35.	Farklı ardıl işlemlerin ardından ortalama çekme testi değerleri.....	67
Şekil 4.36.	Farklı ardıl işlemlerin ardından ortalama uzama değerleri.....	67
Şekil.4.37.	HIP ve ısıl işlem uygulanmamış çekme numunesinin 500x ve 100x mikroyapı görüntüleri.....	68
Şekil.4.38.	HIP ve ısıl işlem uygulanmış çekme numunesinin 500x ve 100x mikroyapı görüntüleri.....	69
Şekil.4.39.	HIP ve ısıl işlem sonrası kriyojenik işlem uygulanmış numunenin 500x ve 100x mikroyapı görüntüleri.....	69
Şekil.4.40.	HIP ve ısıl işlem uygulanmamış çekme numunesinin birleştirilmiş görüntüsü.....	70
Şekil.4.41.	HIP ve ısıl işlem uygulanmış çekme numunesinin birleştirilmiş görüntüsü.....	70
Şekil.4.42.	HIP ve ısıl işlem sonrası kriyojenik işlem uygulanmış numunenin birleştirilmiş görüntüsü.....	71
Şekil.4.43.	Ardıl işlemler uygulanmış çekme numunelerin tam kesit porozite ölçüm sonuçları.....	71

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Önemli proses parametreleri.....	14
Çizelge 2.2. Eklemeli imalatta havacılıkta kullanılan metal malzemeler.....	16
Çizelge 3.1. ASTM F2924-14 standardına göre, Ti6Al4V malzemesinin nominal kimyasal bileşimi.....	25
Çizelge 3.2. Ti6Al4V toz malzemesinin test ve analizlere göre fiziksel özellikleri..	25
Çizelge 3.3. Tek kaynak dikişli üretimde kullanılan parametreler.....	28
Çizelge 4.1. Deney tasarım parametreleri.....	37
Çizelge 4.2. Hedeflenen çıktılar.....	51
Çizelge 4.3. Çözüm sonucu elde edilen optimum parametreler.....	51

## 1. GİRİŞ

İnsanlık teknolojiyi geliştirir ama aynı zamanda teknoloji de insanlığı geliştirir. İçiçe geçmiş bu iki kavram, aslında sonsuz bir döngü sağlamaktadır. Bu döngü içinde teknolojinin gelişimi için kaynaklar sonsuz değildir. Bu nedenle özellikle son yıllarda sürdürülebilirlik kavramı Endüstri 4.0 ile birlikte çok daha önemli hale gelmiştir. Endüstri 4.0 ve sürdürülebilirlik kavramlarının en önemli maddelerinden biri de eklemeli imalattır. Eklemeli imalat (Eİ) prosesinin sürdürülebilirliğe direkt etkisi gereksiz malzeme kullanımının önlenmesi ve mevcut üretim sistemleriyle üretilmeyen ürünlerin üretilmesidir. Bunun yanısıra birçok dolaylı etkisi de mevcuttur.

Son yıllarda ortaya çıkmış olan eklemeli imalat (Additive Manufacturing) yada 3 boyutlu baskı (3D Printing) olarak bilinen üretim yöntemi, mevcut üretim yöntemlerinde hem tasarım hem üretim kavramlarını değiştirmeye ve yeni kavramlar oluşturmaya başlamıştır. Bu kapsamda eklemeli imalat için tasarım (Design for Additive Manufacturing) kavramı geliştirilmiştir. Tasarımcı artık geleneksel üretim kısıtlarından kurtularak, daha özgür ve yenilikçi yaklaşımlar geliştirebilmektedir. Üretim tarafında ise başlangıçta sadece prototip amaçlı kullanılmakta iken günümüzde bir çok farklı teknoloji geliştirilerek hem metal hem polimer malzemelerde çok geniş bir üretim özgürlüğüne kavuşmuştur.

Metal eklemeli imalat yöntemleri havacılık, medikal ve otomotiv gibi sektörlerde kullanılmaktadır. Özellikle ağırlık hafifletme, hızlı üretim, maliyet avantajı ve karmaşık geometrilerin üretilmesine imkan sağlaması nedeniyle kullanımı hızlı bir ivme ile artmaktadır. Pazara bakıldığında en fazla paya sahip iki yöntem toz yataklı sistemler (PBF) ve direkt enerji girdili sistemlerdir. Direkt enerji girdili (DED) sistemler toz ve tel beslemeli olarak çalışabilmektedir. Enerji kaynağı olarak ise lazer, elektrik arkı, plazma ve elektron demeti kullanılmaktadır. Lazer metal depozisyonu (LMD) olarak bilinen lazer gücü ile toz ergitme yöntemi özellikle son yıllarda farklı malzemelerin bütünleşik üretimi ve alıştılandırılarak üretim gibi yenilikçi yönleri sayesinde daha da yaygınlaşmaktadır.

LMD sistemi havacılıkta özellikle büyük parçaların üretiminde sağladığı maliyet ve süre avantajı nedeniyle oldukça kullanılmaktadır. Yaygınlaşmasını zorlaştıran en önemli

etkenler tekrar edilebilirlik, ölçüsel doğruluk ve güvenilirliğin yeterli düzeye ulaşmamasıdır. Bu belirsizlikler nedeniyle proses, ardıl işlemler ve kalifikasyon süreçleri henüz tamamlanamamıştır.

Tez çalışmasının temel amacı; titanyum alaşımlı malzemelerde yüksek güvenilirliğe ve iyi mekanik özelliklere sahip büyük boyutlu havacılık parçalarının LMD sistemi ile üretimi için gerekli çalışmaların yapılması ve üretilen parçalarda mekanik performansın ardıl işlemler ile iyileştirilmesidir. Bu çalışmada, bitmiş ürün kalitesini, geometrik doğruluğunu, tekrarlanabilirliğini ve mekanik performansını etkileyen proses parametrelerinin optimizasyonu ve ardıl işlemler ile mekanik özelliklerin iyileştirilmesi çalışılmıştır. Proses parametrelerinin optimizasyonu için prosesi etkileyen farklı parametre setleri ile üretimler yapılmıştır. Bu üretim deney setlerinden elde edilen çıktılar ile yanıt yüzey metodu (YYM) kullanılarak hedeflenen özellikleri sağlayan optimum proses parametresi bulunmuştur. Optimum parametre ile deney numunelerinin üretimi gerçekleştirilerek ardıl işlemlerde sıcak presleme (HIP), ısıl işlem ve kriyojenik ısıl işlemin etkileri incelenmiştir.



## **2. KAYNAK ÖZETLERİ**

### **2.1. Eklemeli İmalata Genel Bakış**

Eklemeli imalat, bilgisayar ortamında oluşturulan tasarımın veya 3 boyutlu bir nesnenin metal, polimer yada seramik gibi malzemelerden kimyasal ve ısıl işlemler aracılığıyla genellikle katman katman üretilmesine dayanan bir üretim yöntemidir.

Eklemeli imalat yönteminin son yıllarda hızla büyümesinin arkasında yatan neden sağladığı faydalardır (Poyraz ve ark. 2018). Bu faydaları şöyle özetleyebiliriz.

**Tasarım Esnekliği:** Diğer imalat yöntemleriyle yapılamayan geometriye sahip parçalar tasarlayabilmektir. Bu tasarım özgürlüğü, topoloji optimizasyonu ile daha hafif ağırlığa sahip yapılar veya bal peteği tarzı doğal benzetim yöntemleri kullanılarak artırılmış ısı verimlilik veya optimize edilmiş akış yollarına sahip parçaların üretilmesine olanak sağlamaktadır.

**Malzeme Esnekliği:** Eklemeli imalat yönteminde çoklu malzemeli yapılar ve karmaşık tozlar kullanılarak performansı ve verimliliği yüksek parçalar üretilebilmektedir.

**Montajlı Yapılarda Parça Sayısını Azaltmak:** Özellikle havacılık ve otomotiv alanlarında genellikle yapılar montajlı çok sayıda parçadan oluşmaktadır. Her bir parçanın ayrı ayrı üretilmesi ve montajlanması hem üretim maliyeti hem de süre açısından dezavantaj oluşturmaktadır. Eklemeli imalatın karmaşık geometri üretebilme yeteneği sayesinde bu montajlar yekpare olarak üretilebilmektedir.

**Özelleştirilmiş İmalat:** Bir ürünü geleneksel yöntemlerle üretmek için talaşlı işleme, kalıplama yada şekillendirme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde kişiye veya duruma özel farklı parçaların üretilmesi yeni yatırım maliyetlerini beraberinde getirmektedir. Bu nedenle eklemeli imalatta özelleştirilmiş her ürün aynı proses ile farklı şekillerde, renklerde ve özelliklerde üretilebilmektedir.

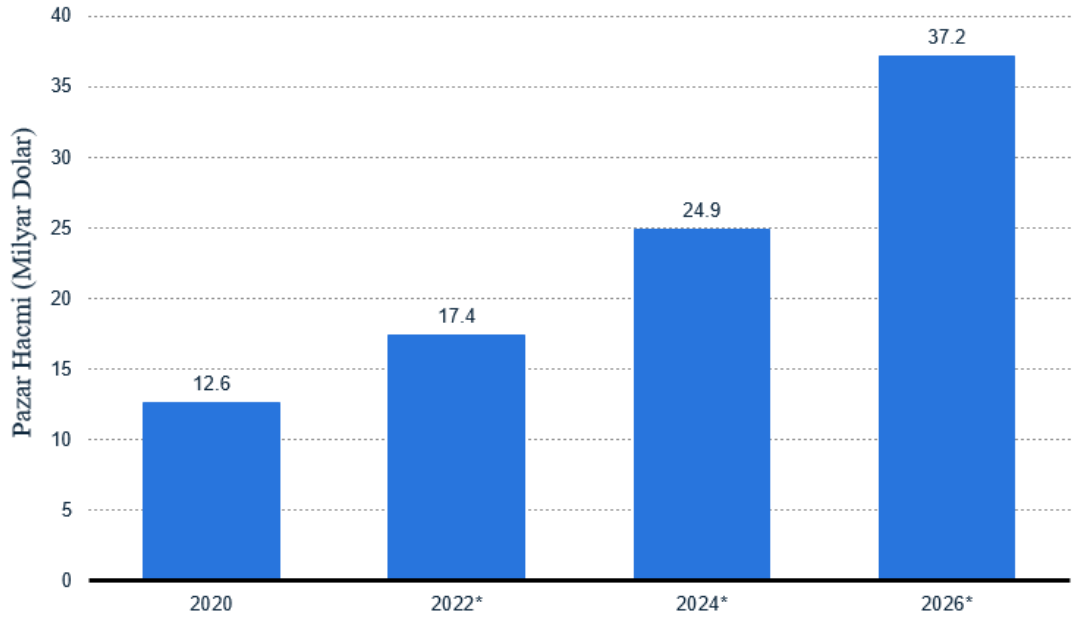
**Hızlı Üretim:** Prototipleme alanında 30 yıldan beri kullanılan eklemeli imalat diğer prototipleme yöntemlerine göre kalıp gereksinimi, soğuma ve döküm gibi prosesler olmadığından çok hızlı prototip ürünler üretilebilmektedir.

Atık Maddelerin Azaltılması: Karmaşık parçaların talaşlı imalat gibi geleneksel yöntemlerle üretilmesi sırasında çok miktarda atık talaş ortaya çıkmaktadır. Özellikle havacılık sektöründe alış ve uçuş (buy to fly) oranı çok önemlidir (Berto 2021). Yani alınan hammaddenin ne kadarlık kısmının faydalı ürün haline geldiğini gösteren bu orana göre eklemeli imalat yöntemlerinde oldukça yüksek verimlilik sağlanabilmektedir. Döküm yöntemlerine kıyasla kalıp gereksinimi olmadığından hurda bir kalıp da ortaya çıkmamaktadır. Böylece tüm geleneksel yöntemlere göre atık malzeme miktarı çok daha azdır.

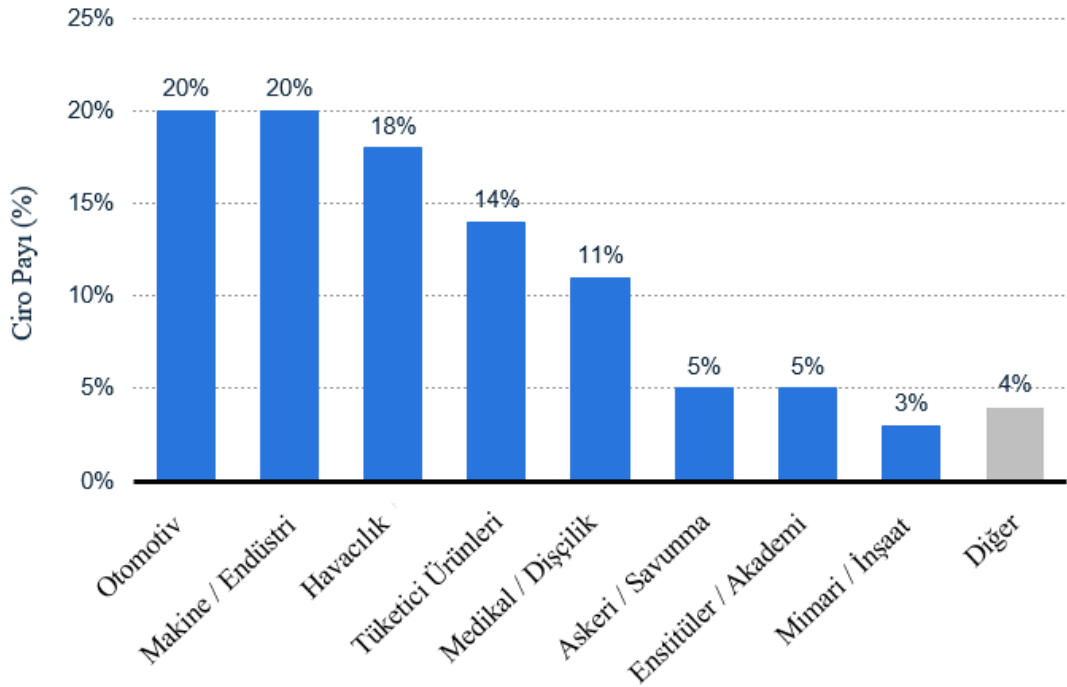
Maliyetin Azaltılması: Parça ağırlığının hafifletilmesi, üretim hızının yüksek olması ve atık miktarının az olması gibi yukarıda sayılan bütün faydaların ortak çıktısı maliyet azaltılmasıdır. Maliyet azaltılma oranı parçanın karmaşık geometrisine ve üretim adetlerine göre değişebilmektedir.

Bu kadar faydanın yanında eklemeli imalat sektöründe de bazı dezavantajlar ve zorluklar mevcuttur. Öncelikle bazı yöntemlerdeki tasarım kısıtlamaları kullanıcılar için bir sorun olmaktadır. Bu nedenle eklemeli imalata uygun tasarım konusu oldukça önemlidir. Üretim süreçlerinde her yöntemin standardizasyonu tamamlanmış değildir ve bu konu beraberinde bir takım üretim ve kalite hatası risklerini getirmektedir. Eklemeli imalat her ne kadar son ürün için yapılsa da bazı yöntemlerde parça teknik isterlerine göre çok fazla ardıl işlem ihtiyacı doğabilmektedir. Yeni geliştirilmekte olan malzemeler yöntemlere göre ayrı ayrı proses parametreleri geliştirme ihtiyacı doğurmaktadır. Bu nedenle özellikle yeni malzemelerde kalifikasyon ve test süreçleri endüstriyellemenin önünde süreci yavaşlatan bir engel olmaktadır.

Eklemeli imalatın havacılık, otomotiv, medikal, enerji, uzay ve nükleer gibi birçok alanda kullanımını gün geçtikçe artmaktadır. Eklemeli imalatın pazar büyüklüğü (3D Hubs 2021) ve sektörlerdeki dağılım yüzdeleri (Statista 2023) Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de görülmektedir.



**Şekil 2.1.** Eklemeli imalat pazar hacmi ve yıllara göre tahminler



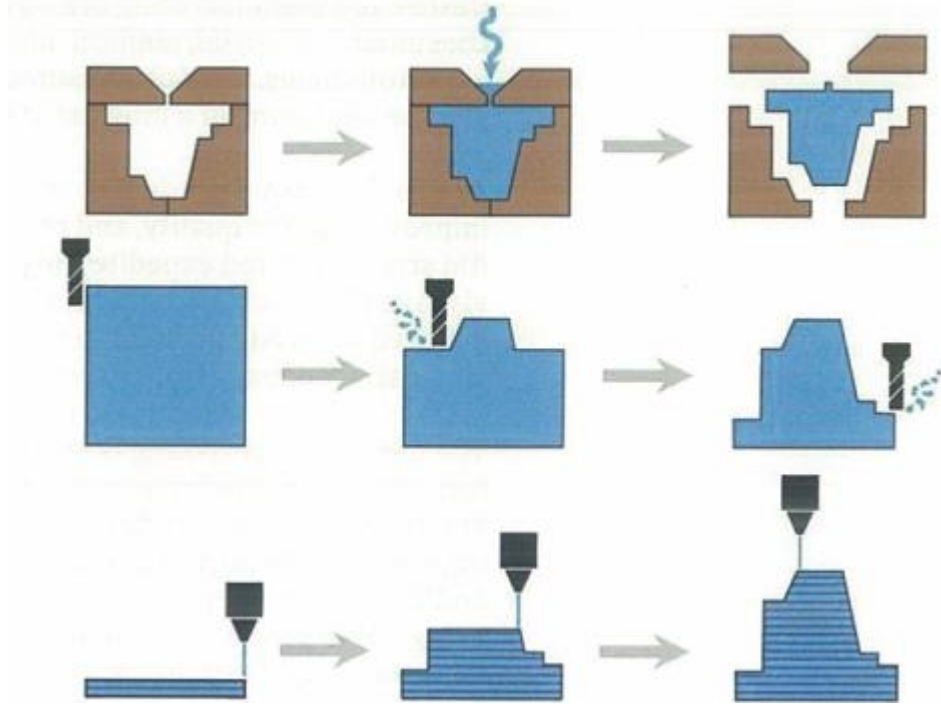
**Şekil 2.2.** Sektörlerinin eklemeli üretimdeki ciroya göre dağılım yüzdeleri

Eklemeli imalat malzemeleri de kullanım alanlarına göre farklılık göstermektedir. Polimer, metal, seramik ve biyomalzeme gibi malzemeler eklemeli imalatta kullanılan malzeme çeşitleridir. Özellikle otomotivde prototipleme ve benzeri uygulamalar için

polimer malzeme sıklıkla kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra fonksiyonel ürünler için genellikle metal malzemeler kullanılmaktadır. Seramik ve biyomalzemelerin kullanımı ise diğerlerine kıyasla oldukça azdır.

## 2.2. Eklemeli İmalat Yöntemleri

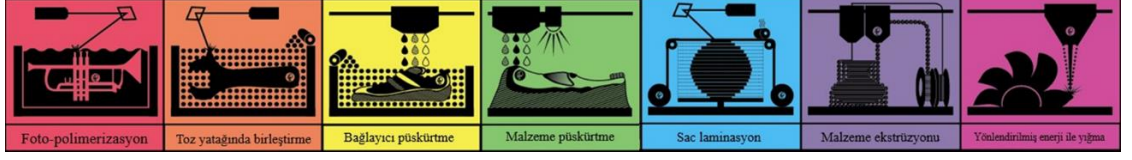
İmalat süreçleri Şekil 2.3'te gösterildiği gibi biçimlendirici, eksiltmeli ve eklemeli imalat olarak kategorize edilebilir. Her yöntemin kendine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Biçimlendirici imalat yöntemi kalıplama, dövme gibi yöntemlerle son ürün elde etmeyi amaçlamaktadır. Eksiltmeli imalat yöntemi ise talaşlı imalat olarak bilinen malzeme çıkararak son ürünün elde edildiği yöntemdir. Eklemeli imalat ise, ASTM standardına göre; “eksiltmeli imalat ve biçimlendirici imalat metodolojilerinin aksine, genellikle katman katman 3B model verilerinden parçalar üretmek için malzemeleri birleştirme sürecidir” olarak tanımlanmaktadır (ISO/ASTM 52900 2021).



Şekil 2.3. Biçimlendirici, eksiltici ve eklemeli imalat

1980'lerin başında yavaş yavaş ortaya çıkmaya başlayan yöntem, ilk defa 1987 yılında 3D Systems tarafından üretilen bir SLA (Stereolithography) makinesi ile ticarileştirilmiştir. Günümüze kadar bir çok farklı teknoloji gelişmiş olsa da ASTM/ISO

52900 standardına göre temel olarak 7 ana başlık altında toplanmaktadır. Bu başlıklar Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



**Şekil 2.4.** Yedi ana başlık altında eklemeli imalat yöntemleri

1. Fotopolimerizasyon (SLA),
2. Toz yatağında birleştirme (PBF),
3. Bağlayıcı püskürtme (BJ),
4. Malzeme püskürtme (MJ),
5. Sac laminasyon (LOM),
6. Malzeme ekstrüzyonu (FDM),
7. Yönlendirilmiş enerji yığma (DED),

Fotopolimerizasyon yönteminde tank içindeki polimer reçine UV ışını, lazer yada projektör ile kürlenerek katmanlar halinde katılaşmaya başlamaktadır. Bu yöntemin avantajı iyi seviyede yüzey kalitesi ve ölçüsel doğruluk sağlamasıdır.

Toz yatağında birleştirme yöntemi ise metal yada polimer tozları bir hazne içinde saklanmakta olup, altlık adı verilen tablanın üzerine belirli kalınlığa sahip tozların serilip lazer yada elektron ışını ile katılaştırılması işlemidir. Üretim sonrası parça tamamen tozun içerisinden çıkarılmaktadır. Bu yöntemin avantajı karmaşık parçaların yapılabilmesi ve iyi ölçüsel doğruluk sağlamasıdır.

Bağlayıcı püskürtme yönteminde bağlayıcı sıvı toz katmanlarının üzerine püskürtülerek tozları bir arada tutma görevi görmektedir. Daha sonra bağlayıcı sıvı parça üzerinden uzaklaştırılarak sıcaklık ile kürlenmektedir. Bu yöntem maliyet avantajı açısından tercih edilmektedir.

Malzeme püskürtme, reçine bazlı yöntemlerden biridir. İki boyutlu yazıcı mantığında çalışır ve ilgili bölgelere malzeme püskürterek katman oluşturur. Bu katmanlar UV ışını

ile kürlenmektedir. Bu yöntem fotopolimerizasyona göre daha hızlı olması ve maliyet avantajı sağlaması nedeniyle tercih edilmektedir.

Saç laminasyon, plastik, metal, kağıt gibi maddelerin üst üste konarak kaynak, yapıştırıcı, ısı veya basınç kullanarak birleştirilmesi ile nesnelere oluşturur. Bu yöntem hız avantajı sağlamaktadır fakat ardıl işlemlere daha çok ihtiyaç duyulmaktadır.

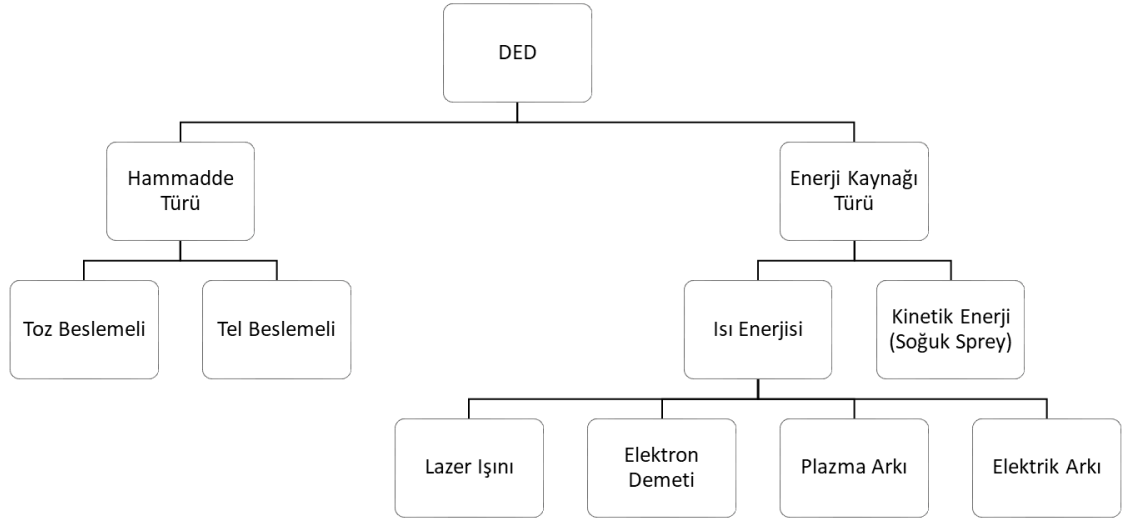
Malzeme ekstrüzyon, genellikle polimer malzemeler için kullanılıyor olsa da günümüzde gelişen teknoloji ile metallerde de kullanılmaya başlamıştır. Bu yöntemde bir şerit tel veya filament ergitilerek damlacıklar halinde tablanın üzerine yığılmaktadır. Böylece katman katman parça oluşmaktadır. Tercih nedenlerinden birisi termoplastik kullanımına uygun olmasıdır.

Yönlendirilmiş enerji yığılma yönteminde toz veya tel malzemelere elektron ışını, lazer ışını veya elektrik arkı gibi enerji kaynakları verilerek ergitilmesi esasına dayanmaktadır. En düşük maliyetli yöntemlerden biridir. Özellikle büyük boyutlu parçaların üretiminde tercih edilmektedir.

Yukarıda bahsedilen 7 yöntem de günümüzde farklı alanlarda kullanılmaktadır. Bu yöntemler arasında metal malzemelere bakıldığında en sık kullanılanlar toz yatağında birleştirme (PBF) ve yönlendirilmiş enerji yığılma (DED) yöntemleridir. Tezin konusu gereği sonraki adımlarda DED yöntemi üzerine odaklanılacaktır.

### **2.3. Yönlendirilmiş Enerji ile Yığılma Eklemeli İmalat Yöntemi**

Yönlendirilmiş enerji yığılma metodu Türk literatüründe doğrudan metal biriktirme ve yönlendirilmiş enerji biriktirme gibi isimlerle yer almaktadır. Yöntem enerji kaynağı türü, hammadde türü olarak şekil 2.5'te gösterildiği gibi iki gruba ayrılmaktadır.



**Şekil 2.5.** Yönlendirilmiş enerji sistemlerinin sınıflandırılması

ASTM F3187-16 standardına göre DED, “odaklanmış termal enerjinin malzemeleri biriktirilirken eriterek kaynaştırmak için kullanıldığı bir eklemeli üretim sürecidir.” Bu tanımlama ısı enerjisi yerine kinetik enerji kullanılan DED sistemlerinin ortaya çıkmasıyla birlikte geçerliliğini yitirmiştir.

DED, eş zamanlı olarak ısı ya da kinetik enerji girişi ile ergimiş malzeme ekleyen bir AM süreçleri grubudur. Isı enerjisi bir lazer, elektron ışını, plazma veya elektrik arkı ile sağlanabilir.

Lazer enerjisi kullanan DED sistemlerine lazer metal deposisyonu (LMD) adı verilmektedir. Bu yöntemde malzeme besleme stoku ise ya metal tozu ya da teldir (Dass 2019).

LMD aynı zamanda tamir ve dolgu amaçlı da kullanılabilirdiğinden daha eski çalışmalarda da LMD yöntemine özellikle lazer dolgu alanında rastlanmıştır. 1974 yılında ilk çalışma Gnanamuthu tarafından yapılmıştır ve patenti 1976 yılında alınmıştır (Song ve ark. 2010). İlk lazer dolgu endüstriyel uygulaması ise Rolls Royce tarafından 1981 yılında patenti alınan proses türbin kanatlarında tamir amacı ile yapılmıştır. Lazer dolgu alanında ulaşılabilen ilk çalışmalardan biri 1986 yılında gaz türbinlerinde yapılmıştır (Eboo ve ark. 1986). 1990’ların ortasına doğru ise ilk parça üretimi Aeromet firması tarafından

yapılmıştır (Dutta ve ark. 2019). Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte hem tel hem toz malzeme ile üretim yapabilen hibrit sistemlerde geliştirilmiştir. (Meltio 2022)

Elektron enerjisi kullanan EBM gibi sistemler diğer yöntemlerin aksine vakum ortamında yapılmaktadır. Bu sistemlerde genellikle yüksek oksitlenme özelliği olan titanyum gibi malzemeler sorunsuz üretilebilmektedir.

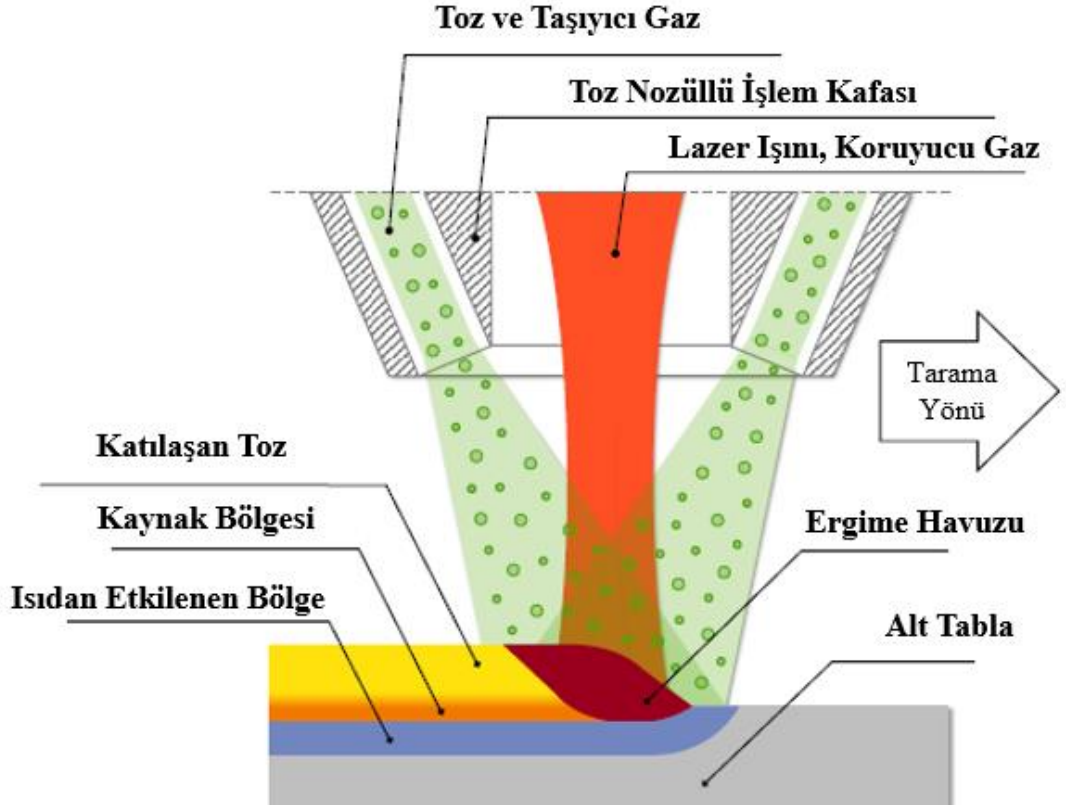
Oksitlenmeyi önlemek için LMD sistemlerinde genellikle nozullardan gelen tozla birlikte üflenen inert gaz bulunur, böylece ergimiş bölgeyi kaplayarak oksitlenme oranını azaltır (Gokuldoss ve ark. 2017).

Elektrik arkı veya plazma arkı kullanan sistemlerde tel besleme ile üretim yapılmaktadır. Bu sistemler yüksek verime sahip ama daha kaba üretimler yapabilmektedir.

Toz DED sistemleri, metal tozları püskürtmek için tekli veya çoklu nozul kullanabilir (Mazzucato ve ark. 2019). Birden fazla nozul kullanmak, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler (FGM) elde etmek için farklı malzemeleri karıştırma olasılığını sağlar (Liu ve ark. 2003, Chen ve ark. 2018).

LMD prosesi sırasında lazer ışını, Şekil 2.6'da gösterildiği gibi metalik bir yüzey üzerinde bir eriyik havuzu oluşturur. Genellikle lazer ışını ile eş eksenli olarak eriyik havuzuna doğru püskürtülen bir koruyucu gaz, proses alanını oksidasyondan koruması amaçlanır. Aynı zamanda toz nozulları, tozu bir taşıyıcı gaz vasıtasıyla eriyik havuzuna iletir. Lazer ışını ve toz nozulu aynı noktaya odaklıdır. Bu nedenle, alt tabaka ile lazer ışını arasındaki hareket, bir kaynak dikişinin birikmesine yol açar. Birden fazla yanal olarak üst üste binen kaynak dikişleri, katmanlar halinde üretilmiş bir parçanın bir katmanını oluşturmaktadır.





**Şekil 2.6.** LMD prosesi ve proses kafası

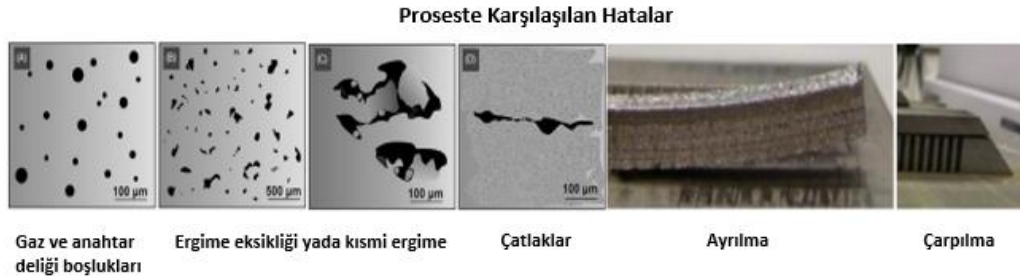
LMD Ekipmanları genel olarak toz besleme sistemi, lazer rezeneratörü, robot ve içinden lazerin geçtiği optikler bulunan bir toz besleyici kafadan oluşmaktadır. Toz besleyici kafa nozuller vasıtası ile tozu farklı şekillerde püskürtebilmektedir. Temel olarak iki ana tip toz nozulu vardır. Eksen dışı toz nozulu (off-axis), tozu yalnızca bir taraftan eriyik havuzuna sevk ederken, çok eksenli bir toz nozulu, çevresel olarak eşit dağılmış yönlerden eriyik havuzunu hedefleyen üç veya daha fazla toz jeti sağlar. En yüksek verimliliğe sahip nozullar eş eksenli (co-axial) nozullardır (Ahn 2021).

Proseste meydana gelen kusurlar şekil 2.7’de gösterilmiştir. Numune üretimi sonrasında üretilen numunelerde bu şekilde hataların görülmesi farklı proses parametrelerinin etkisine bağlı olarak değişebilmektedir.

DED prosesinde hataların açıklamaları ile ilgili çalışmalar incelendiğinde gaz ve anahtar deliği adı verilen boşlukların ve ergime eksikliğinin, lazer gücü ve ilerleme hızı arasındaki dengesizlik nedeniyle oluştuğuna dair çalışmalar yapılmıştır (Debroy ve ark. 2018).

Yüksek lazer gücü ve ısıl gerilmeler etkisi ile üretimde çatlaklar gözlemlenmiştir (Sun ve ark. 2019).

Tabla uyumsuzluğu ve ısıl girdinin yetersizliği nedeniyle ayrılmalar gözlemlenmiştir (Gradl ve ark. 2018). Isıl girdinin çok yüksek olduğu durumlarda ise çarpılma hatası ile karşılaşmıştır (Kovchik ve ark. 2020).

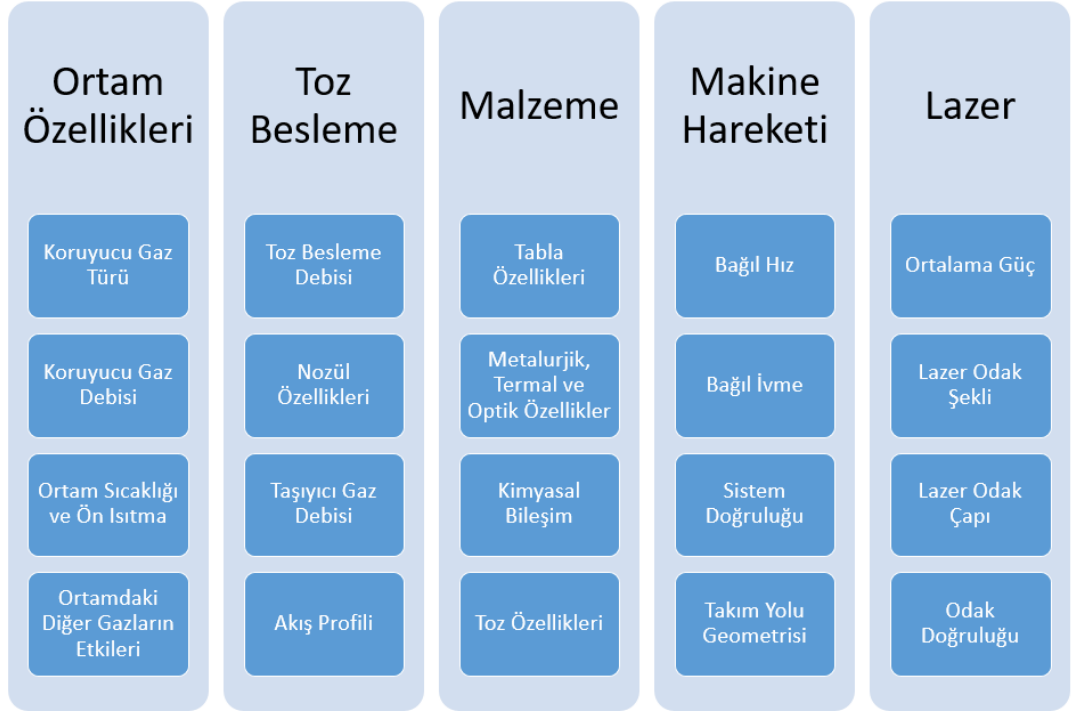


**Şekil 2.7.** DED prosesinde karşılaşılan hatalar

Proses izleme ve kontrol sistemleri DED yöntemlerinin kalifikasyonu için oldukça önemlidir. Endüstri ve akademideki sistemleri en basitten gelişmişe doğru sistemleri incelersek. Mevcut durumda en temel olarak 1.nesil diyebileceğimiz sıcaklığı kontrol eden sistemler ve algoritmalar kullanılmaktadır. Bu sistemler pirometreler ile sıcaklık ölçümü yaparak maksimum sıcaklığı sabit tutma prensibi ile çalışmaktadır. 2.nesil sistemlerde ise sıcaklık kontrolünün yanı sıra orta dalga boyutlu kızılötesi sistemler ile ergiyik havuzu boyutsal olarak ölçülmektedir. Bu ölçüm sonuçları bir algoritma ile değerlendirilerek hata analizi yapılmaktadır. 3. Nesil sistemlerde hem termal sensör hem de kameralar ile sıcaklık ve ergiyik havuzu izlenir ve olası değişimlerde hataların devamını önlemek amacıyla parametreler anlık olarak değiştirilmektedir. 4.Nesil sistemlerde ise 3.Nesil sistemlere ek olarak geometri ölçüsel uygunluk kontrolü de dahil edilmektedir. Bu sistemlerde geometri uygun değilse sonraki takım yolu veya parametre değiştirilerek uygun geometriye getirilmesi sağlanmaktadır. 5. Nesil sistemler yapay zeka destekli ve hataları önceden tespit etmeye çalışan sistemlerdir. Bu sistemler şu anda geliştirme aşamasında olup hataları henüz önceden tespit edebilen bir sistem geliştirilememiştir.

## 2.4. LMD Prosesi ve Parametreleri

LMD prosesinde Şekil 2.8’de gösterildiği şekilde 5 ana başlık altında toplanabilecek prosesi etkileyen bir çok parametre vardır. Bu parametrelerin hepsini kontrol edip optimize etmek ayrı ayrı ele alınması gereken bir konudur. Parametrelerin etkileri analizler ile modellenenbilmektedir (Bıyıklı ve ark. 2022). Örneğin lazer sisteminin kalibrasyonu en iyi verimliliğe göre yapılmalıdır. Bunun yanı sıra ortam özellikleri, malzeme özellikleri, toz besleme ve makine hareketi gibi başka etkenler de vardır. Proses parametrelerinin en önemlileri lazer gücü, ilerleme hızı, toz besleme debisi, argon besleme debisi ve takım yolu geometrileridir. Proses öncesinde mutlaka numune çalışmaları yapılarak proses optimize edilmeli ve en iyi parametreler seçilerek üretime başlanmalıdır. Titanyum gibi oksitlenme özelliği yüksek malzemeler için ortam koşulları çok önemlidir bu tür malzemelerde oksijensiz ortam ve kontrollü atmosfer sağlanmalıdır. Kontrollü atmosfer kabin ve argon ya da azot gazı ile sağlanabilmektedir.



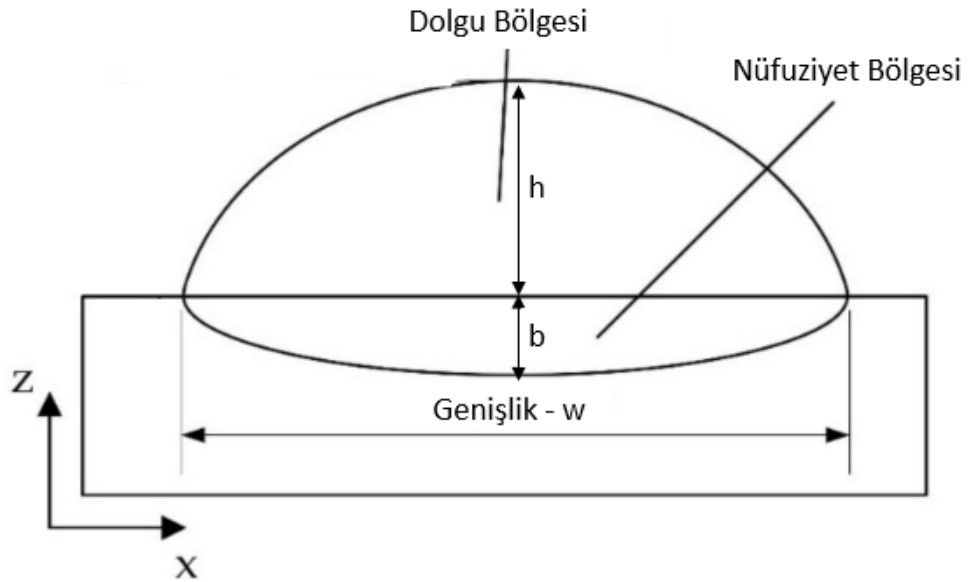
Şekil 2.8. Proses parametreleri ve etkileyen özellikler

**Çizelge 2.1.** Önemli proses parametreleri

P	Lazer Gücü
v	İlerleme Hızı
m	Toz Besleme Debisi
a	Nüfuziyet Oranı
b	Ergime Havuzu Derinliği
h	Yığılma Yüksekliği
SED	Enerji Yoğunluğu
s	Lazer odak yarıçapı
w	İz genişliği

Nüfuziyet bölgesi üretim sırasında tabla veya alt katman üzerinde ergime havuzunun oluşturduğu derinliği göstermektedir. Nüfuziyet oranı ergime havuzu derinliği ve toplam yüksekliğin oranı olarak şöyle ifade edilmektedir.

$$a = \frac{b}{b+h} \quad (2.1)$$



**Şekil 2.9.** Tek dikiş tek katman üretimi kesit görüntüsü

Verimlilik hesaplanırken geçen sürede tüketilen toz miktarının kütlesi ve üretilen geometrinin kütlesi eşitlenmektedir. Verimlilik, her üretim sonrasında tartılarak harcanan tozun ne kadarlık kısmı katılarak katman oluşturduğu hesaplanarak bulunabilmektedir.

LMD işleminin en önemli parametreleri Çizelge 2.1'de özetlenmiştir. Bir süreç optimizasyonu sırasında esas olarak lazer gücü P, tarama hızı v, lazer odak boyutu s, toz kütle akışı parametreleri değişir.

Ayrıca, örneğin düşük lazer gücüne sahip bir parametre setinden yüksek lazer gücüne ve buna bağlı olarak daha yüksek üretkenliğe sahip bir parametre setine kadar süreci ölçeklendirmeye yardımcı olabilecek bazı birleşik işlem parametreleri de vardır. Bunlardan biri enerji yoğunluğudur. Ayrıca, bu birleştirilmiş işlem parametreleri, ısı girdisini veya işlem sonucunu etkileyen diğer önemli faktörleri ölçmek için karakteristik değerler olarak kabul edilebilir.

Enerji Yoğunluğu;

$$SED = \frac{P}{\pi s^2} \quad (2.2)$$

olarak W/mm<sup>2</sup> cinsinden ifade edilmektedir.

Literatürde sıklıkla kullanılan lazer gücü, ilerleme hızı ve odak çapına bağlı olarak değişen birim enerji yoğunluğu ise şöyle ifade edilmektedir:

$$ED = \frac{P}{v \cdot 2 \cdot s} \quad (2.3)$$

Birim enerji yoğunluğunda P, lazer gücünü, v ilerleme hızını ve s ise lazer odak yarıçapını ifade etmektedir. Birim enerji yoğunluğu J/mm<sup>2</sup> olarak ifade edilmektedir.

## **2.5. Metal Eklemeli İmalat Malzemeleri ve Havacılıkta Uygulama Alanları**

Bu bölümde DED yöntemi ile genel havacılık uygulamalarında kullanılan malzemeler hakkında bilgiler verilecektir. Çizelge 2.2 havacılık endüstrisinde eklemeli imalat alanında kullanılan malzemeleri göstermektedir. Bu malzemeler içinde en sık kullanılan malzemeler titanyum, alüminyum, inconel ve paslanmaz çeliklerdir.

**Çizelge 2.2.** Eklemeli imalatta havacılıkta kullanılan metal malzemeler

Ni-base	Fe-base	Cu-base	Al-base	Refractory	Ti-base	Co-base	Bimetallic
Inconel 625	SS 17-4PH	GRCop-84	AlSi10Mg	W	Ti6Al4V	CoCr	GRCop-84/IN625
Inconel 718	SS 15-5 GP1	GRCop-42	A205	W-25Re	$\gamma$ -TiAl	Stellite 6	C18150/IN625
Hastelloy-X	SS 304L	C18150	F357	Mo	Ti-6-2-4-2	Stellite 21	
Haynes 230	SS 316L	C18200	2024	Mo-41Re	Haynes 188		
Haynes 214	SS 420	Glidcop	4047	Mo-47.5Re			
Haynes 282	Tool Steel (4140/4340)	CU110	6061	C-103			
Monel K-500	Invar 36	7050	Ta				
C-276	SS347						
Rene 80	JBK-75						
Waspalloy	NASA HR-1						

Titanyum, Ti6AL4V en sık kullanılan malzemedir (Blakey-Milner ve ark. 2021). Hafiftir, mükemmel korozyon direncine sahiptir ve çok güçlüdür. Havacılık ve uzay üreticileri, türbin kanatları, motor parçaları ve yapısal bileşenler gibi çeşitli bileşenleri üretmek için titanyum kullanır. Pahalı bir malzeme olduğundan geleneksel yöntemle üretilmesi zor olan büyük parçalarda DED prosesi ile beraber tercih edilmektedir. Grade 5 ve Grade 23 olarak farklı türleri bulunmaktadır. Oksijen miktarı düşük olduğundan dolayı genellikle Ti6Al4V Grade 23 tercih edilmektedir.



**Şekil 2.10.** Norsk Titanium tarafından üretilen Boeing 787 yapısal parçası

Alüminyum, AlSi10Mg en sık kullanılan malzemedir. Hafiftir, iyi korozyon direncine sahiptir ve işlenmesi kolaydır. Havacılık ve uzay üreticileri, yakıt sistemi bileşenleri, iniş takımı ve motor bileşenleri gibi çeşitli bileşenleri üretmek için alüminyum kullanılır. SLM yöntemiyle üretim tercih edilmektedir. Alüminyum kolay işlendiğinden dolayı döküm ve talaşlı imalat ile üretim eklemeli imalata göre birçok parça için daha uygundur o nedenle DED ile kullanımı yaygın değildir. Fakat havacılıkta dişli kutusu gibi uygulamalar bulunmaktadır.

Inconel malzemeler içinde IN718 en sık kullanılan malzemedir. Soğutma performansı açısından kompleks geometriler oluşturabilen SLM yöntemi tercih edilmektedir. Eklemeli imalat yoluyla üretilen nikel bazlı süper alaşımli parçaların bazı örnekleri arasında türbin kanatları, yanma odaları ve ısı eşanjörleri bulunur.

Paslanmaz çelik, en sık kullanılan malzemeleri 316L ve PH17-4 olarak görülmektedir. PH17-4 özellikle yüksek mukavemet ve performans gerektiren iniş takımında bulunan yapısal parçalarda sıklıkla bulunmaktadır.

## 2.6. Eklemeli İmalatta Titanyum Malzemeler ve Özellikleri

Bu bölüm tezde kullanılan Ti6Al4V alaşımının genel özelliklerini ve mikro yapısını açıklamaktadır. Ti6Al4V alaşımı en yaygın olarak yıllık titanyum tüketiminin yaklaşık yarısından fazlasını oluşturmaktadır (Majumdar 2013). Havacılık ve medikal sektörü ana müşterileridir.

Titanyum malzemelerde metal eklemeli imalat kullanımı konvansiyonel yöntemlerde kullanılan miktarlara göre daha azdır. Fakat eklemeli imalat titanyum gibi değerli bir metal üzerinde sağladığı maliyet ve süre kazancı nedeniyle tercih edilirligi gittikçe artmaktadır. Geleneksel yöntemlerle üretilen Ti6Al4V alaşımı ve toz alaşım aynı kimyasal bileşimi sağladığı halde üretim sonrasında farklı özellikler göstermektedir. Hem yorulma davranışında hem de statik özelliklerinde oluşan bu farklılık eklemeli imalattan kaynaklanan dengesiz ısı girdiler ve pürüzlü yüzey kaynaklı olduğu düşünülmektedir. (Kasperovich ve ark. 2015, Greitemeier ve ark. 2017).

LMD'de titanyum malzemelerin üretilmesi oldukça zor ve karmaşıktır. Proses hem ısıtmayı hem de soğutmayı içeren hızlı bir ısı döngüsüne sahiptir ve bu nedenle tane oluşumu çok hızlıdır, ancak hızlı soğuma nedeniyle tanelerin daha fazla büyümesi için zamanları yoktur. Her ısı döngüsü sırasında, lazer ışını aynı anda hem yeni bir erimiş toz tabakasını hem de halihazırda katılmış olan birkaç tabakayı eritir. Bu, katmanlar boyunca sürekli bir mikro yapı sağlar ve dikey yapı yönünde sütunlu tane yapısının büyümesi desteklenir (Frazier 2014).

Sıcaklığa bağlı olarak titanyum iki ana kristal yapı sunabilir: beta fazı ( $\beta$ ), yüksek sıcaklıklarda kararlı bir hacim merkezli kübik (BCC) yapı ve alfa fazı ( $\alpha$ ), bir hegzogonal sıkı paket (HCP) ) yapı düşük sıcaklıklarda kararlıdır ve normalde oda sıcaklığında bulunur (Leyens ve Peters, 2003). Sıvı titanyum alaşımlarının soğutulması sırasında  $\beta$  taneleri çekirdeklenmeye ve büyümeye başlar. Tam katılaşmadan sonra,  $\beta$ 'den  $\alpha$ 'ya katı hal dönüşümü gerçekleşir. Ti6Al4V alaşımlarında, Vanadyum  $\beta$  stabilizatör elemanı olarak görev yapar ve oda sıcaklığında biraz kararlı  $\beta$  fazının varlığına izin verir. Bu nedenle, oda sıcaklığında, Ti6Al4V alaşımı, yaşanan termal döngülere bağlı olarak çok

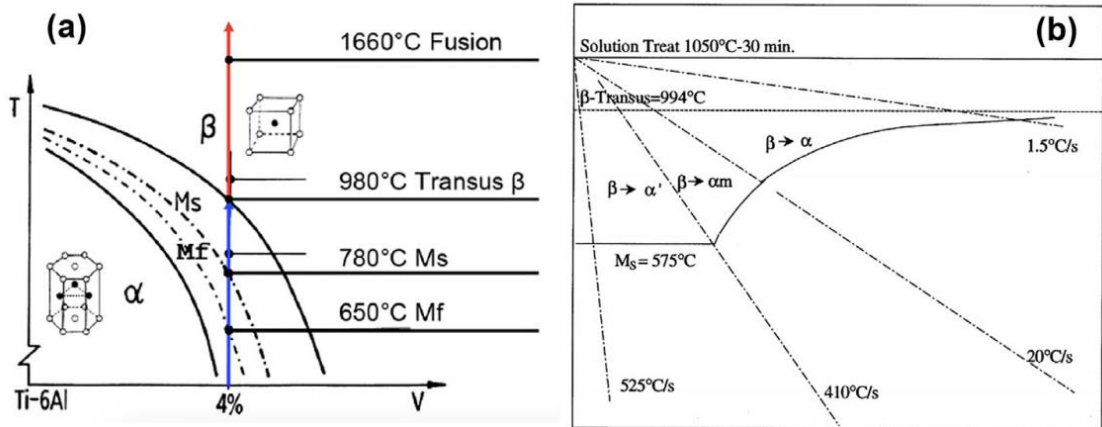


çeşitli mikro yapılar ve özellikler gösterebilen  $\alpha + \beta$  fazlarının bir karışımı ile karakterize edilir.

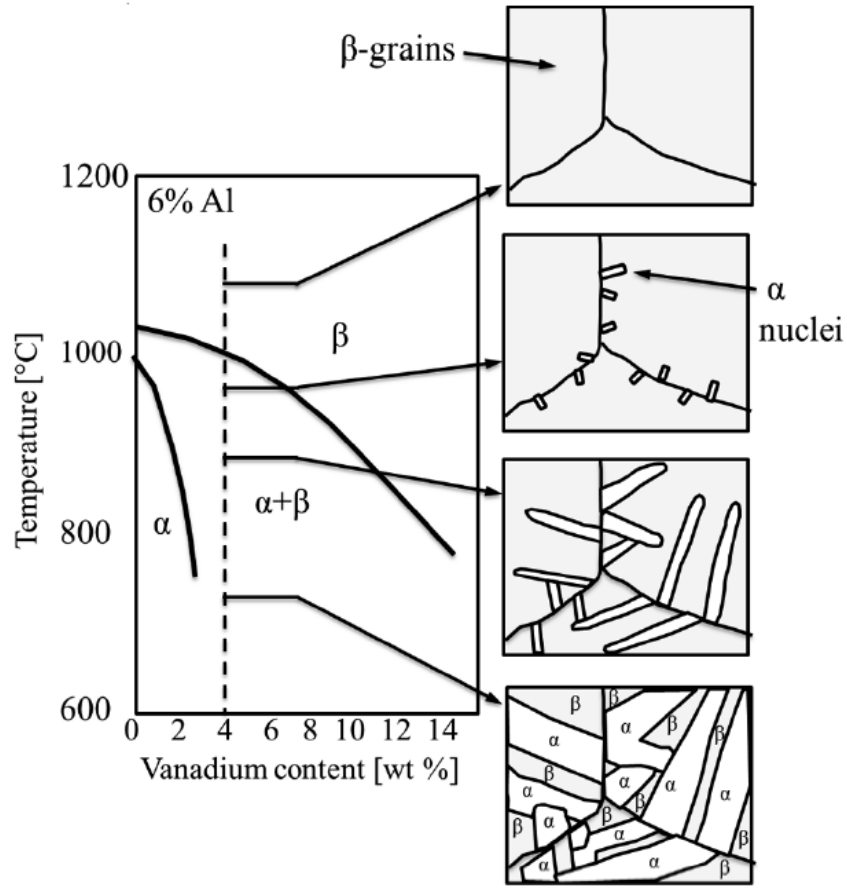
Ti6Al4V'nin soğutulması sırasında üç farklı ana dönüşüm gerçekleşir:  $\beta$  fazının sıvıdan katılaşması,  $\beta \rightarrow \alpha + \beta$  katı hal dönüşümü ve  $\alpha_m$  (alfa martenzit) oluşumu. Likidüs sıcaklığının altında  $\beta$  fazı oluşmaya başlar. Soğutma koşullarına bağlı olarak,  $\beta$  taneleri eş eksenli veya kolonsal morfolojiler gösterebilir. Soğutmanın ardından,  $\beta$ -transus sıcaklığı (980–1000°C civarında) ulaşıldığında, önceki  $\beta$  fazından  $\alpha$  fazı oluşmaya başlar. Genel olarak, yavaş soğutma hızları Widmanstätten yapılarına yol açar.

Daha hızlı soğutma hızları durumunda, martenzit başlangıç sıcaklığı  $T_m$ 'ye (yaklaşık 650 °C) ulaşıldığında hala mevcut olan artık  $\beta$ 'den martenzit  $\alpha_m$  oluşabilir.

$\beta$ 'nin Widmanstaetten tipe dönüşümü tamamlandıysa, martenzitik dönüşüm için hiçbir  $\beta$  fraksiyonu kalmamıştır. Yeniden ısıtma durumunda, üç farklı dönüşüm meydana gelebilir: martenzitin  $\alpha + \beta$ 'ya çözünmesi,  $\alpha$ 'nın  $\beta$ 'ya dönüşümü ve  $\beta$ 'nin yeniden ergimesi.  $\beta$ -transusun (980°C) üzerindeki sıcaklıklardan hızlı bir şekilde soğutulduğunda,  $\beta$ -fazı martenzitik  $\alpha'$  veya  $\alpha''$  yapısına ayrışabilir ve yalnızca az miktarda  $\beta$  kalır. Şekil 2.11'de Ti6Al4V alaşımı için faz diyagramı (Shunyu 2019) ve Şekil 2.12'de ise mikroyapılar (Donachie ve ark. 2000) gösterilmiştir

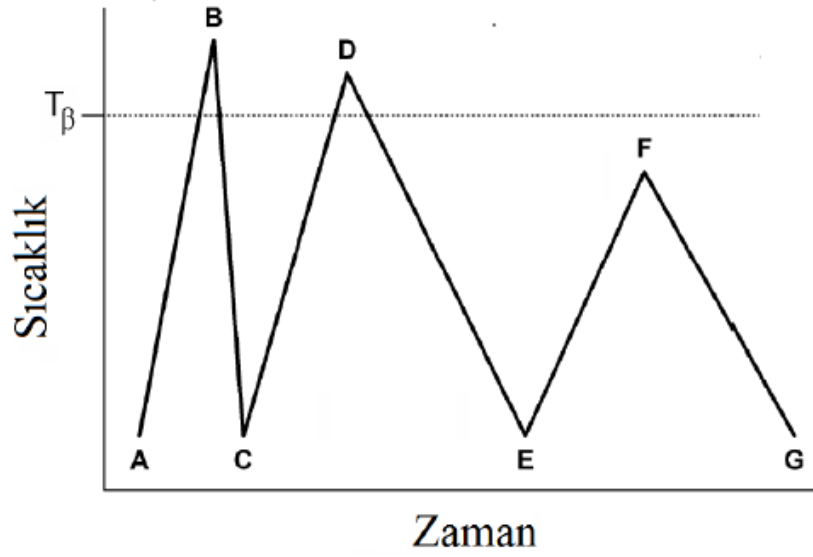


**Şekil 2.11.** Ti6Al4V malzemenin a) faz diyagramı b) bazı soğutma hızlarına göre faz dönüşüm diyagramı



**Şekil 2.12.** Ti6Al4V için faz diyagramı ve  $\beta$ -transüsün üzerindeki bir sıcaklıktan yavaş soğutma sırasında ara sıcaklıklardaki şematik mikro yapılar

Ti6Al4V, genelde alfa ( $\alpha$ ) ve beta ( $\beta$ ) olarak bilinen iki ana kararlı fazdan oluşur. Bununla birlikte, LMD sürecinin doğasına bağlı olarak yüksek ısıtma ve soğutma oranları nedeniyle, LMD tarafından üretilen Ti6Al4V parçalarının mikro yapısı, acicular (iğnesel) martenzitik  $\alpha'$  fazı ile karakterize edilir. Şekil 2.13'te LMD prosesinde malzemenin maruz kaldığı dönüşüm çevrimleri gösterilmiştir (Tozlu 2022, Kelly 2004).



**AB:**  $\alpha + \beta \rightarrow \beta$

**CD:**  $\alpha' \rightarrow \beta$   
 $\alpha_m \rightarrow \beta$

**EF:**  $(\alpha_{\text{birincil}} \rightarrow \beta) \rightarrow \alpha_{\text{birincil}} + \beta$

**BC:**  $\beta \rightarrow \alpha'$   
 $\beta \rightarrow \alpha_m$

**DE:**  $\beta \rightarrow \alpha_{\text{birincil}} + \beta$

**FG:**  $(\beta \rightarrow \alpha_{\text{ikincil}}) + \beta + \alpha_{\text{birincil}} \rightarrow \alpha_S + \alpha_{\text{birincil}} + \beta$

**Şekil 2.13** LMD prosesinde malzemenin maruz kaldığı ısınma soğuma çevrimi

Martenzit  $\alpha$  fazı, mikroyapısal homojensizlik, yüksek sertlik, düşük çekme uzaması ve yüksek artık gerilmeler ile ilişkili olduğundan, havacılık da dahil olmak üzere birçok uygulama için istenmeyen bir durumdur. Martensitik dönüşümün sonunda tüm  $\beta$  fazı  $\alpha'$  veya  $\alpha''$ ya dönüşmediğinden, hızlı soğuma olmasına rağmen yapıda bir miktar  $\beta$ -fazı kalabilir. Daha sünek bir malzeme elde etmek mutlaka ısıl işlem uygulanması gerekmektedir.

## 2.7. Eklemeli İmalat sonrası Ardıl İşlemler

Eklemeli imalat ile üretilmiş parçaların son ürün haline gelmesi ve istenen ölçüsel, mekanik ve kalite isterlerinin sağlanabilmesi için üretim sonrası bazı işlemlere tabi tutulmaları gerekmektedir. Parçanın tamamına ya da bir kısmına uygulanabilen bu işlemler mekanik, kimyasal ve ısıl işlemler olarak sınıflandırılmaktadır.

Talaşlı imalat, parçanın istenen boyutsal toleransta ve istenen şekilde elde edilmesi için üretim sonrasında parça üzerinden malzeme çıkarılması işlemidir. Hassas toleranslar

istenen parçalarda ve DED yöntemi ile son şekline yakın olarak üretilen parçalarda sıklıkla kullanılmaktadır.

Parlatma, yüzey kalitesini arttırmayı amaçlayan ve yüzeye aşındırıcı malzemelerin kimyasal yada fiziksel olarak uygulandığı yöntemdir. Bu yöntemde yüzey pürüzlülüğü düşürülür ve parça görüntüsü daha pürüzsüz hale gelmektedir.

Isıl işlem, üretilen parçaların mekanik özelliklerini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Parçaların belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılması, bekletilmesi ve soğutulması gibi adımlara sahip birçok parametreyi barındıran bir işlemdir. Özellikle titanyum malzemelerde ısıl işlem oluşan mikroyapıyı düzenlemek ve mekanik isterleri sağlamak için kullanılmaktadır. Eİ ile üretilen parçalarda porozitelerin küçültülmesi ve yok edilmesini sağlamak için HIP adı verilen sıcak izostatik presleme işlemi ile birlikte uygulanması çok daha etkili olmaktadır.

Yüzey işlemleri, elektrokaplama, anotlama, kimyasal işlemler, bilyalı dövme ve lazer ile yüzey modifikasyonu gibi bir çok prosesi içermektedir. Her teknik belli bir özellikte iyileşme sağlamakta ve malzemeye göre değişmektedir. Bu nedenle genel olarak yüzey işlemleri istenen teknik isterleri sağlayacak şekilde parçada aşınma ve korozyon direncini, estetik görünümünü, yorulma performansını, iletkenliği ve sürtünme katsayısını değiştirmektedir.

Parçada yapılan ardıl işlemlerden sonra değişimi incelemek için çeşitli araçlar kullanılmaktadır. Parça muayeneleri tahribatlı ve tahribatsız muayeneler olarak ikiye ayrılmaktadır. Eklemeli imalatta parça üretildiğinde, parçanın üzerinden alınan tahribatlı muayene numunesi ile yada X-Ray bilgisayarlı tomografi gibi tahribatsız yöntemlerle incelenmektedir. Boyutsal kontrolü için ise CMM adı verilen 3 boyutlu ölçüm sistemi yada 3 boyutlu tarama kullanılmaktadır. Parçanın fonksiyonuna göre ve teknik isterlere göre muayene yöntemleri değişmektedir.

## **2.8. Literatür Özeti ve Çalışmanın Literatüre Katkısı**

Gerçekleştirilen literatür araştırmasında havacılık sektöründe kullanılan metal eklemeli imalat yöntemlerinden SLM yöntemi ile ilgili çalışmaların DED yöntemlerine göre

oldukça fazla olduğu gözlemlenmiştir. DED yöntemlerinde ise özellikle LMD ve WAAM ile parça üretimi konusundaki çalışmalar son yıllarda artış göstermiştir.

LMD konusundaki çalışmalar parametrelerin prosese etkisi üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu kapsamda parametre optimizasyonu çalışmalarında genellikle deney tasarımları yapılarak proses izlenmiştir. Prosesin analizi ve sanal ortamda simülasyonu en sık karşılaşılan ikinci çalışma türüdür. Malzemelere bakıldığında ise ağırlıklı olarak inconel ve paslanmaz çelik alaşımlarının çalışıldığı görülmüştür.

Tez çalışması kapsamında havacılıkta yüksek mukavemeti, düşük ağırlığı ve yüksek korozyon direnci nedeniyle tercih edilen ama kontrollü ortam gereksinimi nedeniyle özellikle LMD ile üretilmesi oldukça zor olan titanyum malzeme çalışılmıştır. Proses parametrelerinin optimizasyonunda yanıt yüzey metodu (YYM) kullanılarak deney tasarımı sayısı azaltılmış olup, en etkili parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler ile üretim yapılarak mikroyapıları incelenmiştir. En iyi parametre optimum parametre olarak seçilmiştir. Bu parametre ile fiziksel test numuneleri üretilmiştir. Numunelere HIP ve ısıtıl işlem uygulanarak etkisi incelenmiştir. Mekanik performansın artırılması amacıyla literatürde uygulaması bulunmayan LMD yöntemi ile üretilmiş ve HIP işlemi uygulanmış titanyum numunelere kriyojenik ısıtıl işlem uygulanmıştır. Böylece LMD yöntemi ile havacılık parçası üretiminde HIP ve ısıtıl işlem sonrası kriyojenik ısıtıl işlem uygulamasının mekanik özelliklere ve mikroyapıya etkisi incelenmiştir.

### **3. MATERYAL ve YÖNTEM**

#### **3.1. Proses Parametreleri, Optimizasyon Akış Şeması ve Deney Tasarımı**

Geleneksel olarak parametre optimizasyonunda lazer gücü (P), ilerleme hızı (v) ile çalışılmaktadır. Toz besleme debisi, taramalar arası bindirme mesafeleri, katman kalınlığı gibi birçok farklı parametrede göz önünde tutulması gereken parametrelerdir.

Parametre optimizasyonu yapılırken öncelikle tek katmanlı ve tek dikiş geometrileri çalışılmaktadır. Burada istenen makinenin alt ve üst optimum parametre aralığının belirlenmesidir. Bu çalışma yapıldıktan sonra ergime havuzu ve katmanlar incelenerek ısıdan etkilenen bölgenin şekli ve ölçüleri çıkarılmakta ve değerlendirilmektedir. Bu aşamada istenildiğinde porozite ve sertlik ölçümü de bakılabilmektedir.

Tek dikiş ve tek katmanlı geometrilerden sonra prosesin çoklu katmanlardaki davranışını incelemek için tek duvar, çoklu katman geometrileri çalışılmaktadır. Duvar geometrisinden numuneler kesilerek katmanlar arası ayrılma olup olmadığı, porozite, mikrosertlik dağılımı ve verimlilik gibi çıktılar incelenmektedir. Bu aşamada da istenildiğinde mikroyapıdaki alfa ve beta fazların dağılımı incelenebilmektedir. Titanyum malzeme HIP ve ısıt işleme göreceği ve değışeceğı için bu fazda bu çalışmalar gerçekleştirilmemiştir. Isıt işleme görmeyen malzemelerde ise mutlaka bu özelliklere bakılmalıdır. Bu adımda yukarıda bahsedilen çıktılar için optimum değerleri veren lazer gücü, tarama hızı ve toz besleme hızı gibi parametreler çeşitli optimizasyon yöntemleri ile optimize edilerek en iyi parametre elde edilir.

Bu çalışmada optimizasyon için yanıt yüzey metodu (YYM) kullanılarak en iyi parametre elde edilmiştir. Ayrıca parametrelerin çıktılara olan etkileri de ayrı ayrı incelenmiştir.

#### **3.2. Toz Malzeme**

Ti6Al4V toz malzemenin çalışma öncesi kimyasal analizi ve fiziksel analizleri yapılarak nominal değerler iye kıyaslanmıştır. Bu analizler sonucunda belirlenen standartlara uygun olduğı görülmüştür.

**Çizelge 3.1.** ASTM F2924-14 standardına göre, Ti6Al4V malzemesinin nominal kimyasal bileşimi

	Al	V	Fe	O	C	N	H	Y	Diğer	Ti
Min %	5.50	3.50	-	-	-	-	-	-	-	Denge
Maks %	6.75	4.50	0.3	0.2	0.08	0.05	0.015	0.005	0.4	
Analiz Sonuçları	6.47	4.06	0.13	0.14	0.01	0.01	0.003	0.001	0.1	

**Çizelge 3.2.** Ti6Al4V toz malzemesinin test ve analizlere göre fiziksel özellikleri

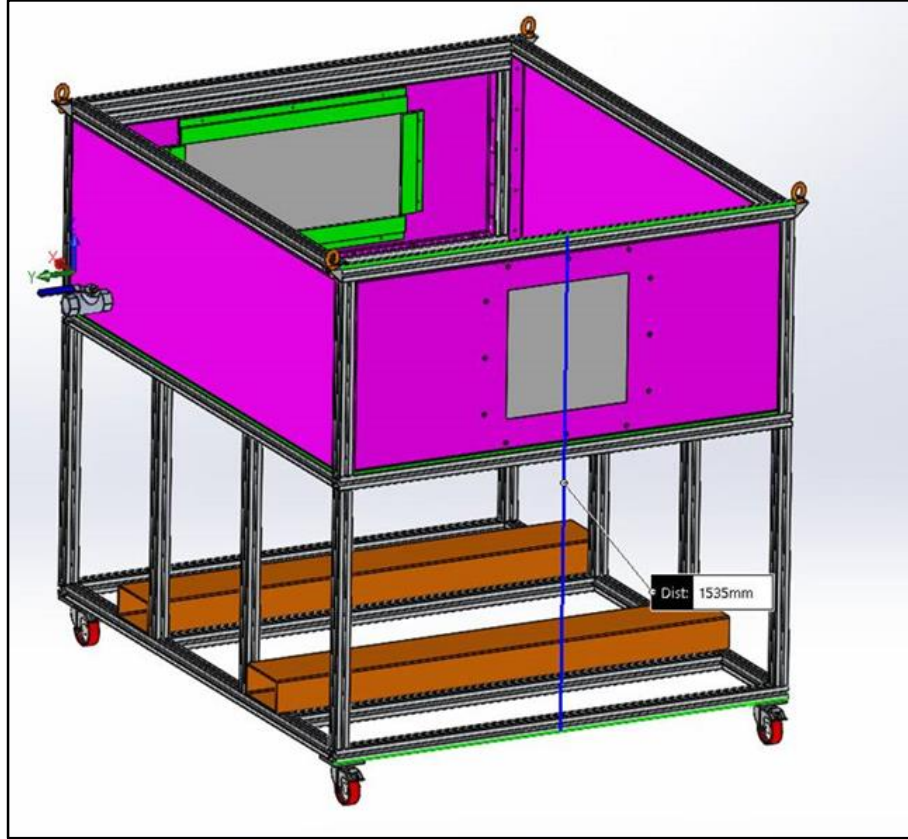
Analiz	Spesifikasyon		Sonuç	Uygunluk	
Akışkanlık Analizi ASTM-B213 Air, 23°C	sec/50g (Hall)	≤30	24	Uygun	
Sıkıştırılmış ASTM-B527	g/cm <sup>3</sup>	>2.8	3	Uygun	
Serbest – Görünür Yoğunluk ASTM-B417	g/cm <sup>3</sup>	>2.45	2.48	Uygun	
Eleme ile parçacık boyut dağılımı analizi ASTM B214	Size µm	Min wt%	Maks wt%	Sonuç	Uygunluk
	+105	-	5	2.9	Uygun
	-105+45	90	-	90	Uygun
	-45	-	5	1.2	Uygun

### 3.3. Deney Düzenegi

Tez çalışmalarında numunelerin üretimi Coşkunöz’de bulunan Erlas Lazer Dolgu sistemi ile yapılmıştır. Şekil 3.1’te belirtilen sistemin ana bileşenleri lazer, toz besleme ünitesi, robot, LMD kafası ve işlemin koruyucu gaz ortamında yapılabilmesi için özel tasarlanan kabinden oluşmaktadır. Koruyucu ortam sağlayan kabin tasarımı Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Robot sistem bilgisayarda oluşturulan takım yollarını takip ederek hareketi sağlamaktadır. Robot sisteme bağlı olan LMD kafası şekil 3.3’te gösterilmiştir. LMD kafasının görevi ise imalat işlemini gerçekleştirebilmek için ortama lazer ışını, toz ve koruyucu gazın verilmesini sağlamaktır. Toz besleme ünitesinde toz depolanarak sisteme istenen debiye göre beslenmektedir.



Şekil 3.1. Deney düzeneği

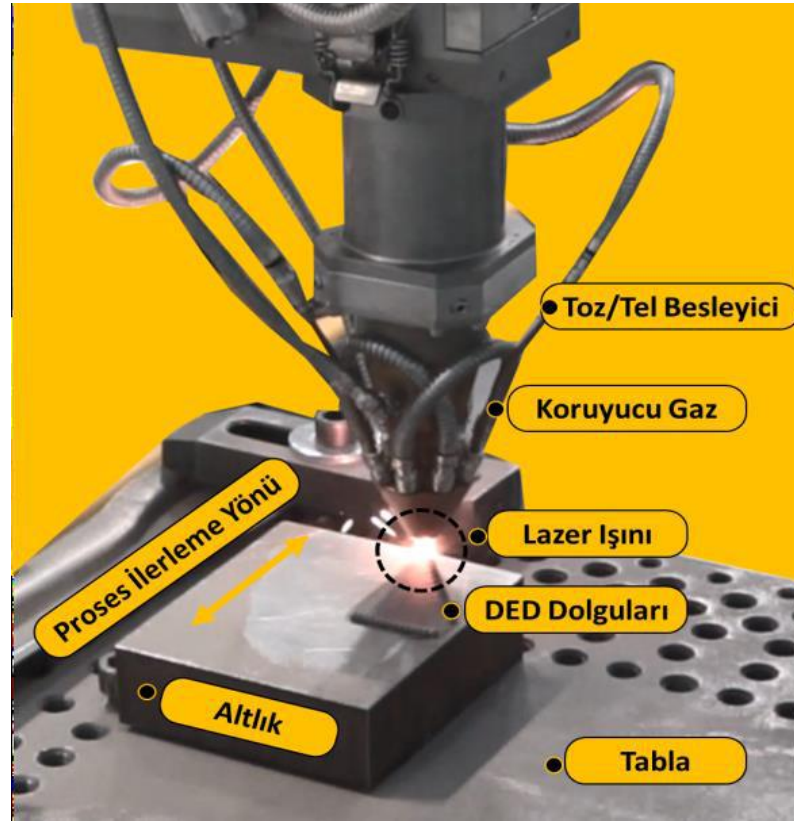


Şekil 3.2. LMD prosesi için tasarlanan koruyucu kabin



Titanyum malzemeler, düzgün ısı dağılımı ve oksitlenmeyi önlemek için eklemeli imalat sistemlerinde koruyucu atmosfer altında üretilmek zorundadır. Koruyucu atmosfer ortamına argon gazı beslenerek oksijen seviyesi düşürülmektedir. LMD sisteminde titanyum üretimi literatüre göre de 100 ppm - 3000 ppm oksijen seviyeleri arasında yapılmaktadır. 1000 ppm seviyesi %0,1 oksijen oranına denk gelmektedir.

LMD kafasının işlevi ise ortama lazer ışınının uygulanması, toz besleme ünitesinden gelen tozun nozüller vasıtası ile üflenmesi ve koruyucu gaz desteğinin sağlanmasıdır. Bu şekilde altlık olarak belirtilen tabla üzerinde belirli bir odak noktasına gelen toz tanecikleri lazer ile ergitilerek dolgu oluşturulmaktadır. Bu dolgu ise koruyucu gazlar ile korunmakta ve düzgün soğuması sağlanmaktadır. Proses robotun hareketine göre ilerledikçe sistem değişken hızlarda ve değişken parametrelerde çalışmaya devam etmektedir.



Şekil 3.3. LMD kafası

### 3.4. LMD Parametreleri

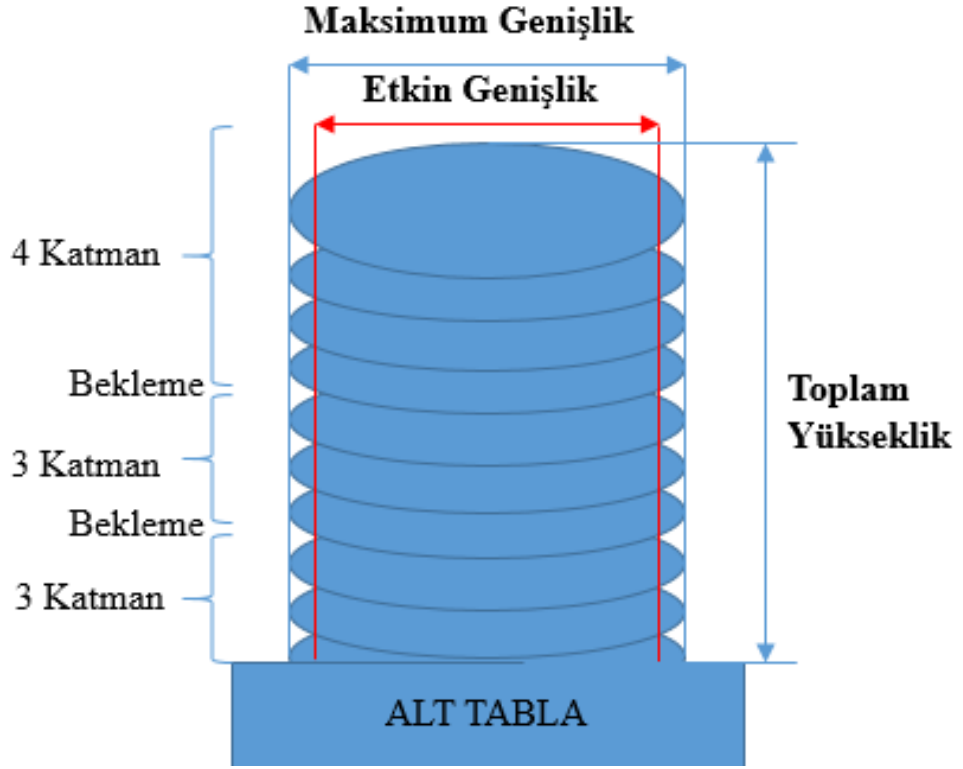
LMD prosesinde öncelikle lazer gücü, ve ilerleme hızının optimum aralık değerleri bulunmuştur. 1200W altındaki değerlerde makro seviyede ergime eksikliği, tablaya tutunamama, 1500W üzeri değerlerde ise aşırı ısınma kaynaklı atıklık ve çatlama problemleri gözlemlenmiştir. Bu nedenle çalışma aralığı literatürdeki verilerden de faydalanılarak 1200 W – 1500 W olarak belirlenmiştir. LMD prosesinde kullanılan parametreler Çizelge 3.3’de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.3** Tek kaynak dikişli üretimde kullanılan parametreler

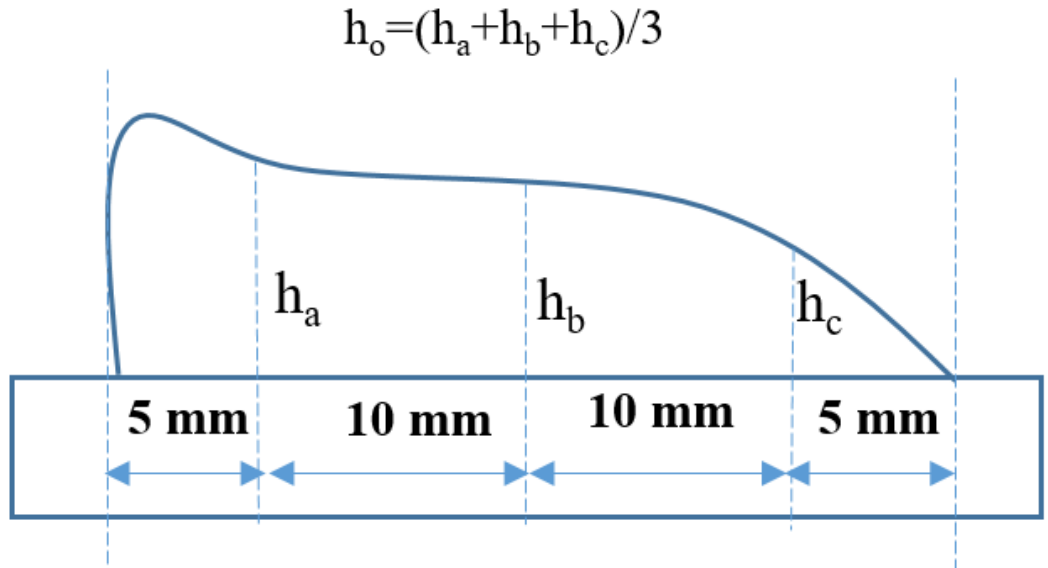
Numune Numarası	Lazer Gücü (W)	İlerleme Hızı (mm/s)	Toz Akış Debisi (dev/dk)	Koruyucu Gaz Debisi (L/dk)	Oksijen Seviyesi (%)	Lazer Enerji Yoğunluğu J/mm <sup>2</sup>
1	1200	6	3,5	8	0.1	57,14
2	1200	8	4	8	0.1	42,86
3	1200	10	4,5	8	0.1-0.3	34,29
4	1300	6	3,5	8	0.2-0.3	61,90
5	1300	8	4	8	0.1-0.2	46,43
6	1300	10	4,5	8	0.1	37,14
7	1400	6	3,5	8	0.1	66,67
8	1400	8	4	8	0.1	50,00
9	1400	10	4,5	8	0.1-0.2	40,00
10	1500	6	3,5	8	0.1-0.2	71,43
11	1500	8	4	8	0.1	53,57
12	1500	10	4,5	8	0.1	42,86

### 3.5. Tek Kaynak Dikişli Çok Katmanlı Üretim

12 farklı üretim parametresi kullanılarak tek dikişli numune üretimleri yapılmıştır. Numune üretimlerinde 10 katman ve 30 mm uzunluğunda bir takım yolu kullanılmıştır. 30 mm uzunluğundaki takım yolu hep aynı kalmıştır. Katman sayısında her 3 katman sonrası sıcaklığın 170 C° altına inmesi beklenmiş ve tekrar katman atılmıştır. Böylece Şekil 3.4’te belirtilen 3 katman + bekleme + 3 katman + bekleme + 4 katman stratejisi ile numuneler üretilmiştir. Her parametre için aynı üretim stratejisi kullanılmıştır. Genişlik parametresi (w) maksimum genişlik ve etkin genişliğin ortalaması olarak alınmıştır. Yükseklik ise toplam yükseklik olarak ele alınmıştır. Toplam yükseklik her bölgede aynı olmadığı için ho değeri Şekil 3.5’te gösterildiği gibi hesaplanmıştır.



Şekil 3.4. Tek kaynak dikişli 10 katmanlı numune stratejisi



Şekil 3.5. Tek Dikişli 10 katmanlı numunenin enine kesiti



**Şekil 3.6.** Tek dikişli 10 katmanlı numuneler

### **3.6. Yanıt Yüzey Metodu ile Optimizasyon**

Yanıt yüzey metodu (YYM), deney tasarımı, regresyon modelleri ve istenebilirlik fonksiyonlarını kullanan bir optimizasyon yöntemidir (Harrington 1965). Yanıt yüzey metodunun amacı girdi değişkenleri ile yanıt değişkenleri arasındaki ilişkiyi açıklamak ve minimum deneme ile optimum parametreleri istenen fonksiyonlara göre bulmaktır. Yanıt yüzey metodunda deney tasarımını belirlerken tam faktoriyel, kompozit merkez ve box-Behnken gibi teknikler çok amaçlı optimizasyonları gerçekleştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Corral Bobadilla 2019).

Yanıt yüzey metodu ile optimizasyon üç aşamada genellikle gerçekleştirilmektedir. Bir deney tasarımı yapılarak belirli sayıda üretimler gerçekleştirilir. Bu üretimlerin bağımlı

değişkenlerle ilgili çıktıları belirlenir ve ara değerlerin belirlenmesi için bir matematik model oluşturulur. Son aşamada ise tanımlanan fonksiyonların, yüzey grafikleri ve anova analizi ile optimum noktalarının tespiti gerçekleştirilir.

Numune üretiminden sonra elde edilen çıktılar Y ile tanımlanır. Y bağımlı yanıt değişkeni, f bir polinom fonksiyonu, x ise regresyon modelinin bağımlı girdilerini göstermektedir.

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.1)$$

İkinci dereceden regresyon modeli doğrusal olmayan yanıtları da dikkate aldığından YYM'de oldukça sık kullanılmaktadır. Bu modeli genel olarak şöyle ifade edebiliriz;

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \beta_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + e \quad (3.2)$$

Burada  $\beta_0$  regresyon denklem sabitidir,  $\beta_i$  ve  $\beta_j$  ise regresyon katsayılarıdır. Birinci ve ikinci toplamlar doğrusal ve polinom terimlerini, üçüncü toplam tüm girdi faktörlerini, e ise hatayı ifade etmektedir. Regresyon modellerinin deneysel veriler ile uyumu anova analizi ile değerlendirilmektedir.

Çok amaçlı optimizasyonda yanıtlar birbiriyle çatışabilir yani bazı yanıtlar için iyi olan çözümler diğer yanıtlar için kötü olabilir. Bu gibi durumlarda pareto analizine bağlı çözümler kullanarak tüm yanıtlar için en uygun sonucu bulmak mümkün değildir (M.Çallı ve ark, 2020). Çünkü bir bağımlı değişken için hedef fonksiyon iyileşirken diğeri için kötüleşebilmektedir. Bu noktada istenebilirlik fonksiyonu devreye girmektedir. İstenebilirlik fonksiyonu hedefin ağırlık ve önemini ayarlayarak birkaç yanıt ve faktör için hedefi tek fonksiyona düşürmektedir. D toplam istenebilirliği, i çıktı sayısını ve di ise i çıktısı için istenebilirliği ifade etmektedir.

$$D = (d_1, d_2, \dots, d_i)^{1/i} \quad (3.3)$$

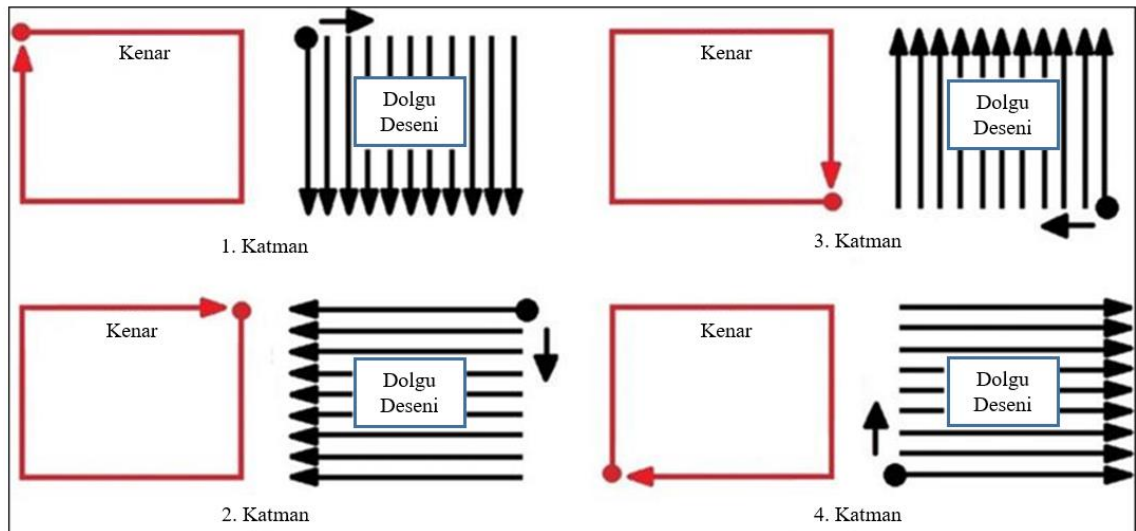
Örneğin; bir çıktı için istenebilirlik aşağıdaki formülde ifade edilmektedir.  $L_{max}$  ve  $L_{min}$  sınırları ifade etmektedir.  $s$  istenebilirliğe göre belirlenen üstür. Eğer eşit istenebilirliğe sahip iki çıktı varsa  $s$  değeri bire eşit olarak alınmaktadır.

$$d = \begin{cases} 1 & \text{if } Y \leq L_{min} \\ \frac{L_{max}-Y}{L_{max}-L_{min}} & \text{if } L_{min} < Y < L_{max} \\ 0 & \text{if } Y \geq L_{max} \end{cases}^s \quad (3.4)$$

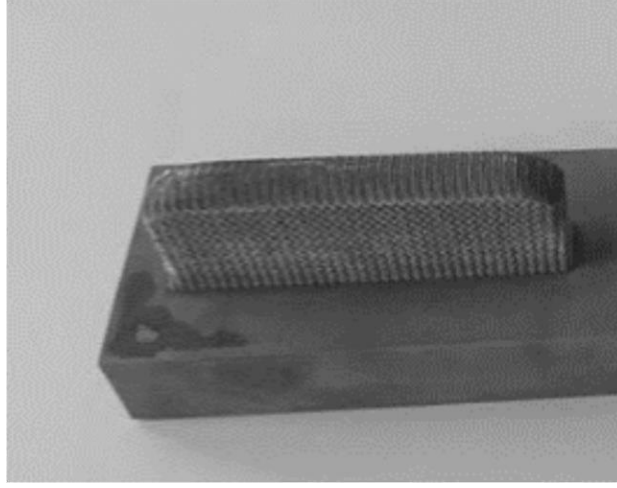
Bu çalışmada porozite, verimlilik ve nüfuziyet çıktılarının, lazer gücü ve ilerleme hızı girdileri ile ilişkisi incelenerek optimim parametre belirlenmiştir.

### 3.7. Duvar Geometri Üretimi

Tek dikiş çok katmanlı üretimlerden sonra verimlilik ve porozite gibi hedef fonksiyonların optimizasyonu sonucu elde edilen optimum parametre ile duvar geometrisi oluşturulmuştur. Duvar geometrilerinde takım yolu ve tarama yönü oldukça önem arz etmektedir. Bu nedenle en iyi soğumayı sağlayan aynı yönlü takım yolu seçilmiştir. Bu takım yolu Şekil 3.7'de görüldüğü gibi her katmanda 90 derece döndürülerek uygulanmıştır ve böylece geometri farkları minimuma indirilmiştir. Hem yatayda hem dikeyde çekme numunesi elde edilmesini sağlayan duvar geometrileri Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



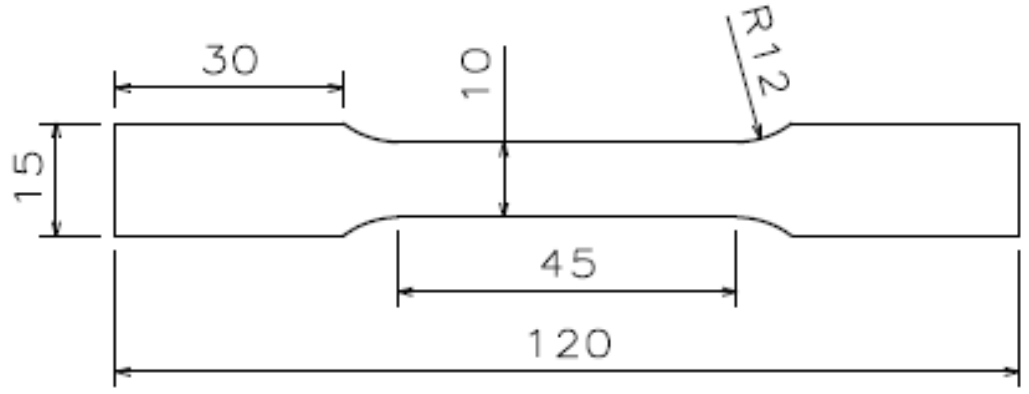
Şekil 3.7. Duvar geometri üretiminde kullanılan strateji



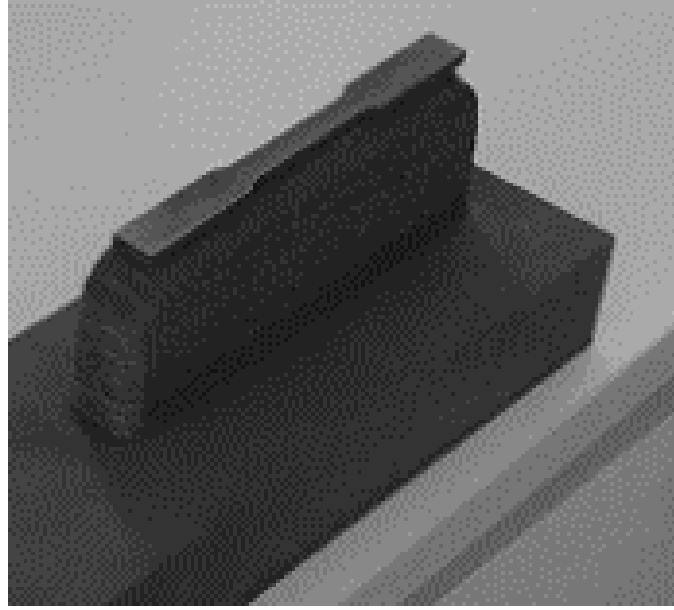
**Şekil 3.8.** Üretilmiş duvar geometrileri

### **3.8. Test Numunelerinin Üretimi**

Çekme testi numuneleri Şekil 3.9’da belirtilen DIN-50125 numune standartlarına göre hazırlanmıştır (DIN-50125.) Literatürde farklı ölçülere sahip titanyum numuneler arasında yapılan çalışmada mekanik test değerlerinde anlamlı farklar görülmemektedir (Masete ve ark. 2018). Mikro numuneler ile yapılan çalışmalarda SLM yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır (Falkowska ve ark. 2020). Fakat LMD gibi büyük parçalar için uygun olan yöntemlerde çekme numunelerindeki porozite ve mikroyapı etkisini azaltmak için numune ölçüleri ve kalınlıkları daha fazla seçilmiştir (Gallaraga 2016). Literatürde sıklıkla gördüğümüz silindirik numuneler yerine takım yolu etkisini yansıtmamak amacıyla şerit numuneler kullanılmamıştır. (Calderon ve ark. 2021). Böylece çekme testi sonuçlarında takım yolunun etkisini göz ardı edilmiştir. Yatay ve dikey numunelerdeki farklar nedeniyle hem yatay hem dikey çekme numuneleri hazırlanmıştır (Karolewska ve ark. 2020). LMD yöntemi hakkında yapılan derleme çalışmasına göre yatay ve dikey numuneler arasında ne üretim sonrasında ne de ardıl işlemler sonrasında çok büyük farklara rastlanmamıştır. Mikroyapı açısından da değişim gözlemlenmemiştir. (Zhong ve ark. 2019). Bu nedenle bu çalışma sadece yatay yönlü numuneler üzerinden yapılmıştır.



**Şekil 3.9.** Çekme testi numuneleri (DIN 50125)



**Şekil 3.10.** Üretilmiş duvarlardan çıkarılan numunelerin oryantasyonu

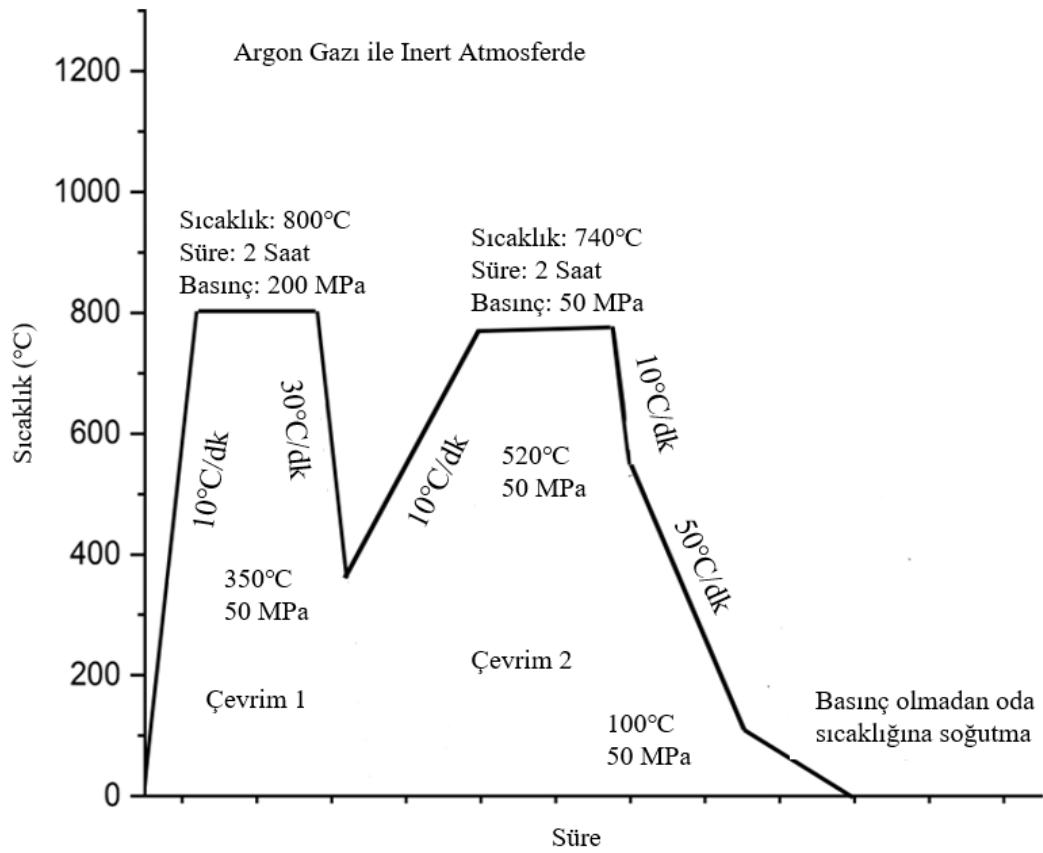
### 3.9. Uygulanan Ardıl İşlemler

Bu çalışmada üretilen duvar geometriden çekme testi numunelerini çıkarmak için tel erozyon ile kesme işlemi uygulanmıştır. Numunelere porozite ve takım yolu etkisinin giderilmesi, mikroyapının düzenlenmesi amacıyla sıcak presleme (HIP) ve ısıl işlem uygulanmıştır. Ayrıca kriyojenik ısıl işlem yapılarak mekanik özelliklere ve mikroyapıya etkisi gözlemlenmiştir.

LMD prosesi için HIP ve ısıl işlem parametrelerinde optimum bir değer yada standart yoktur. Her farklı proses sonrası farklı parametrelerin uygulanması gerekmektedir. SLM prosesinde 895 °C – 955 °C arasındaki sıcaklıklarda ve 100 MPa basınç altında minimum



2 saat tutulması önerilmektedir (ASTM F2924-14). Literatüre bakıldığında çoğu çalışmada yaygın olarak kullanılan parametreler 920 °C, 100 MPa ve 2 saat uygulama süresidir. Fakat yapılan çalışmalarda görülmüştür ki 200 MPa basınç ve 800 °C porozitelerin giderilmesi için yeterli olmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklarda HIP yapıldığında ince mikro yapı kabalaşarak mukavemeti düşürmektedir (Magnus ve ark. 2018). Bu nedenle yüksek mukavemet elde etmek için bu çalışmada 800 °C, 200 MPa ve 2 saat parametreleri kullanılmıştır. Şekil 3.11’de HIP ve ısıl işlem için parametreler paylaşılmıştır.



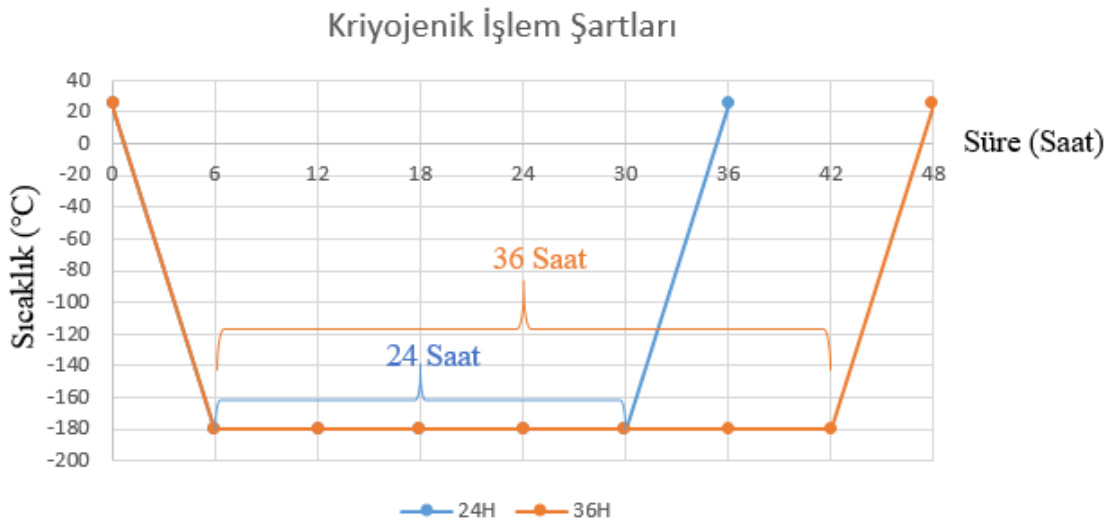
**Şekil 3.11.** Numunelere uygulanan HIP ve ısıl işlem parametreleri

Kriyojenik işlem son yıllarda gelişen ve metallerin mikroyapısını, mekanik özelliklerini iyileştirmeyi amaçlayan tipik olarak -150 °C altında soğutularak bekletilmesine dayanan bir ardıl işlemdir. Günümüzde havacılık ve otomotiv gibi bazı endüstriler bu işlemi malzemelerin özelliklerini geliştirmek için kullanmaktadır. Son yıllarda özellikle takım çelikleri için bir çok araştırma yapılmıştır (Sokrani 2016, Gong 2019). Titanyum malzemelerde ise işleme özelliklerini geliştirmek üzerine çalışmalar yapılmıştır. Elektro

erozyon ile (EDM) işleme prosesinde titanyum malzemelerin özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür (Singh ve ark. 2011).

Sonuç olarak, kriyojenik işlemin, CNC frezeleme ve EDM dahil olmak üzere çeşitli işleme operasyonlarında titanyum alaşımlarının özelliklerini iyileştirdiği gösterilmiştir. Kriyojenik soğutmanın titanyum alaşımlarının yüzey bütünlüğünü ve talaş morfolojisini iyileştirdiği, kriyojenik işlemin ise titanyum alaşımlarının takım ömrünü ve malzeme kaldırma oranını artırdığı bulunmuştur. 2022 yılında yayınlanan bir araştırmada, kriyojenik işlemin titanyum üzerindeki etkileri incelenerek akma mukavemetinde %2 azalma ve plastik deformasyonda %5.3 artışa neden olduğu tespit edilmiştir (Vijayakumar ve ark. 2022). Titanyum alaşımı üzerinde kriyojenik işlem hakkında birkaç çalışma olmasına rağmen, doğrudan titanyum alaşımının mikro yapısı ve özellikleri hakkında çok az araştırma vardır. Bu nedenle, mevcut çalışma, Ti-6Al-4V'nin mikro yapısı ve gerilme özellikleri üzerindeki kriyojenik işlemin etkisini araştırmayı amaçlamaktadır.

Bu çalışmada titanyum numuneler Şekil 3.12'de belirtilen iki farklı kriyojenik işleme tabi tutulmuştur. Öncelikle oda sıcaklığındaki numuneler sıvı nitrojen destekli soğutma fırınında soğutulurken 24 ve 36 saat bekletilmiştir.



**Şekil 3.12.** Kriyojenik ısıtım işlem parametreleri

## 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

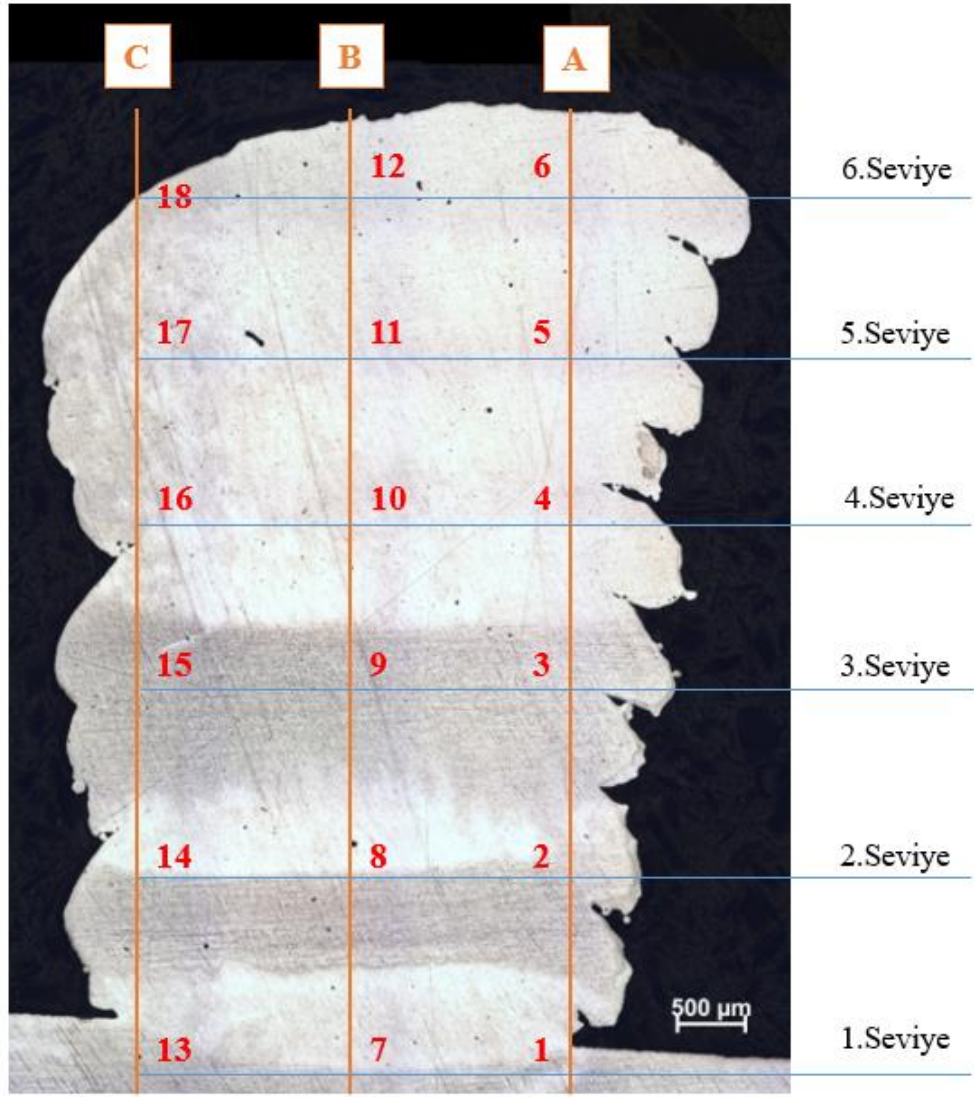
### 4.1. Deney Tasarımı Parametreleri Analizleri

Çizelge 4.1 Deney tasarım parametreleri

Numuneler	Parametreler		
	Lazer Gücü (W)	İlerleme Hızı (mm/s)	Toz Besleme (gr/dk)
1	1200	6	7.5
2	1200	8	8.5
3	1200	10	9.5
4	1300	6	7.5
5	1300	8	8.5
6	1300	10	9.5
7	1400	6	7.5
8	1400	8	8.5
9	1400	10	9.5
10	1500	6	7.5
11	1500	8	8.5
12	1500	10	9.5

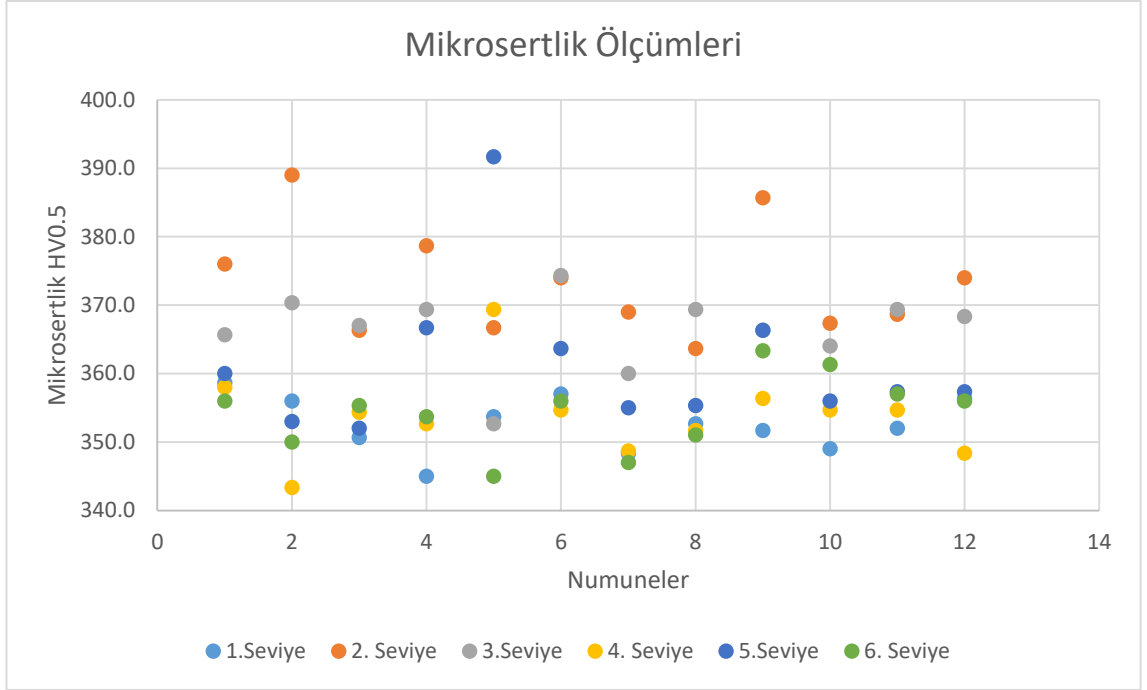
#### 4.1.1. Mikrosertlik ölçümleri

Mikrosertlik ölçümleri 12 numune için toplamda 18 noktadan HV 0.5'e göre yapılmıştır. Sertlik değerleri katman seviyelerine göre sınıflandırılarak katman yüksekliğinin mikrosertliğe etkisi incelenmiştir. Katmanlar arasında yatay olarak sertlik farklılıkları incelenerek raporlanmıştır. Şekil 4.1'de mikrosertlik ölçümünde kullanılan strateji görsellenmiştir. A, B ve C kesitlerindeki ortalama değerler yatay yöndeki değişimi gözlemlemek için kullanılmıştır. Katman kalınlığı yönündeki değişimi gözlemlemek için 6 seviyenin ayrı ayrı ortalamaları hesaplanmıştır.



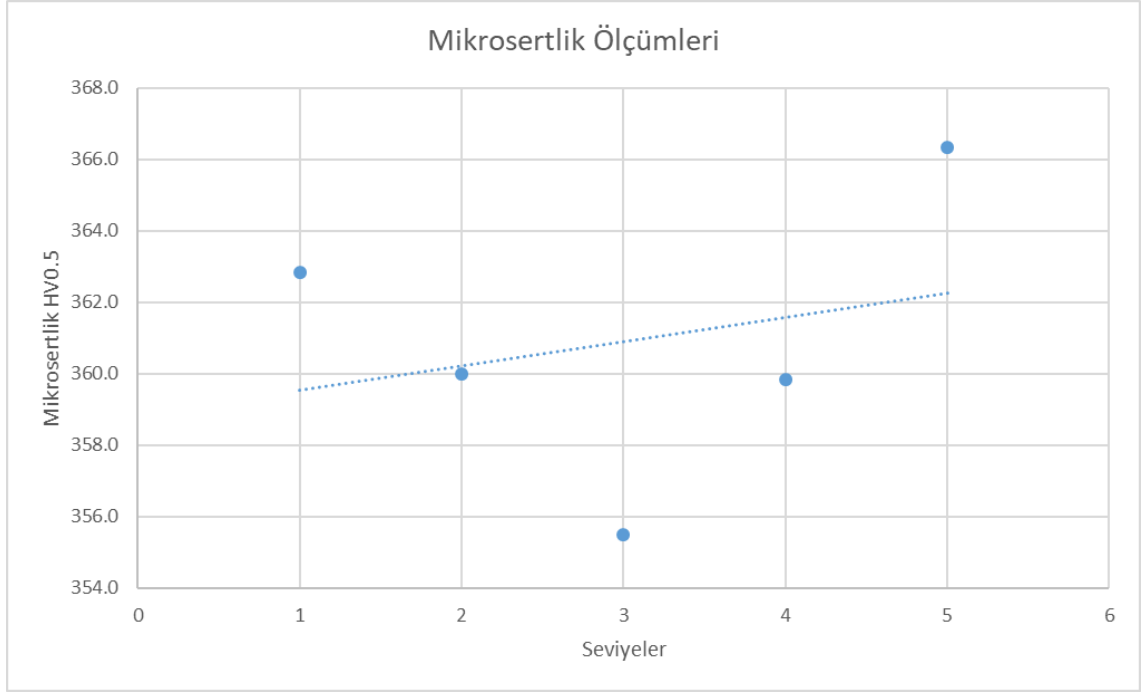
**Şekil 4.1.** Mikrosertlik ölçüm stratejisi

Mikrosertlik LMD gibi çevrimli ısı girdi sağlanan proseslerde katman katman değişmektedir. Bu nedenle katmanlar arasındaki sertlikleri belirlemek için numune 6 seviyeye bölünmüştür. Bu 6 seviyenin 12 numune için ortalama sertlik değerleri Şekil 4.2'de verilmiştir.



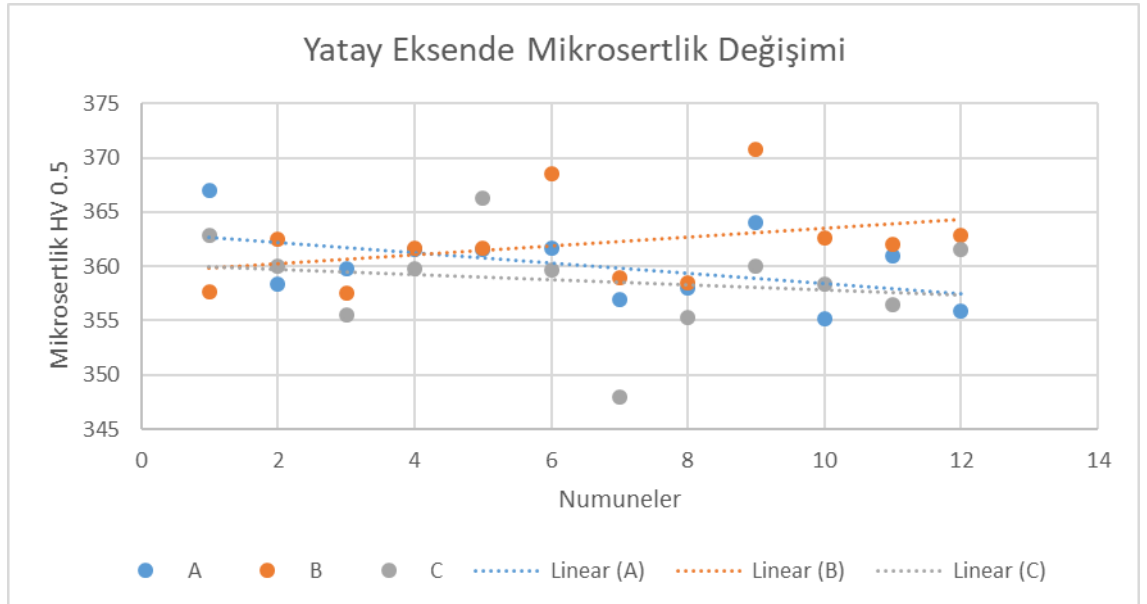
**Şekil 4.2.** 12 numunenin mikrosertlik ölçümleri

Seviyelere göre mikrosertliğin 12 numune için ortalama değerleri Şekil 4.3'te verilmiştir. Mikrosertliğin soğuma hızına ve beta fazı yoğunluğuna göre artması beklenmektedir. Çevrimli soğumalarda malzeme içinde mutlaka beta fazı kalmaktadır. Üst katmanlarda beta fazı miktarının fazla olması beklenmektedir. Grafik incelendiğinde mikrosertliğin katman seviyesine göre artış gösterdiği görülmektedir. Orta seviyelerde düşük mikrosertlik elde edilmiştir. Bunun nedeni parçanın orta seviyelerde ısınması ve yeterince soğumasının sağlanmadan ısıl birikime neden olduğu düşünülmektedir.



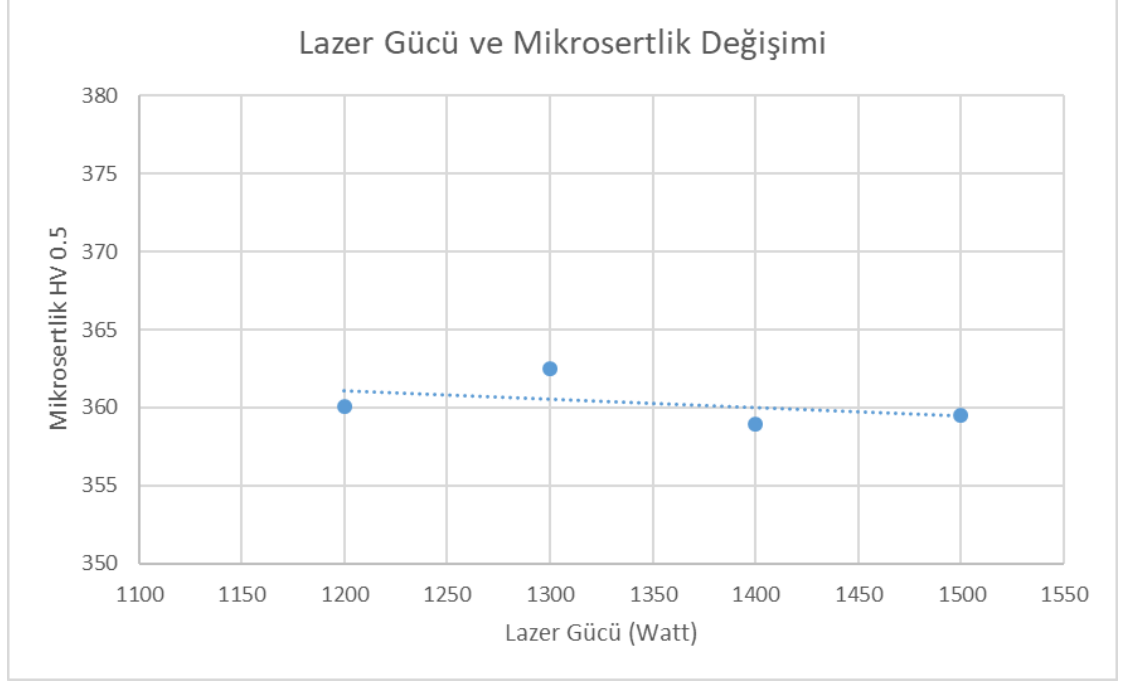
**Şekil 4.3.** Mikrosertliğin katman seviyelerine göre dağılımı

Yatay eksende mikrosertlik değişimi Şekil 4.4’te incelenmiştir. Yatay eksende anlamlı bir değişim görülmektedir. Tek dikiş olarak yapılan üretimlerde yatay eksende farklılık olmaması beklenen bir sonuçtur.



**Şekil 4.4.** Yatay eksende mikrosertlik dağılımı

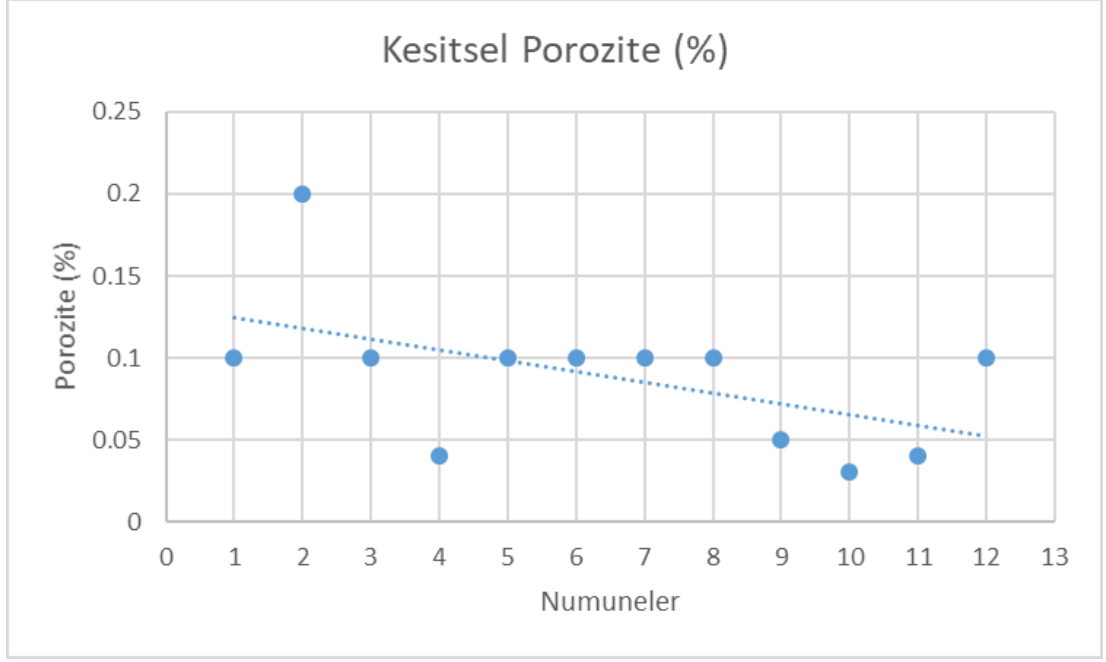
Lazer gücünün mikrosertliğe etkisi Şekil 4.5'te incelenmiştir. Lazer gücündeki artışın mikrosertliğe etkisi görülmektedir. Lazer gücünün farklı ilerleme hızlarındaki mikrosertlik değerlerinin ortalaması alınarak incelenmesine rağmen anlamlı bir değişim görülmektedir.



Şekil 4.5. Lazer gücü ve mikrosertlik değişimi

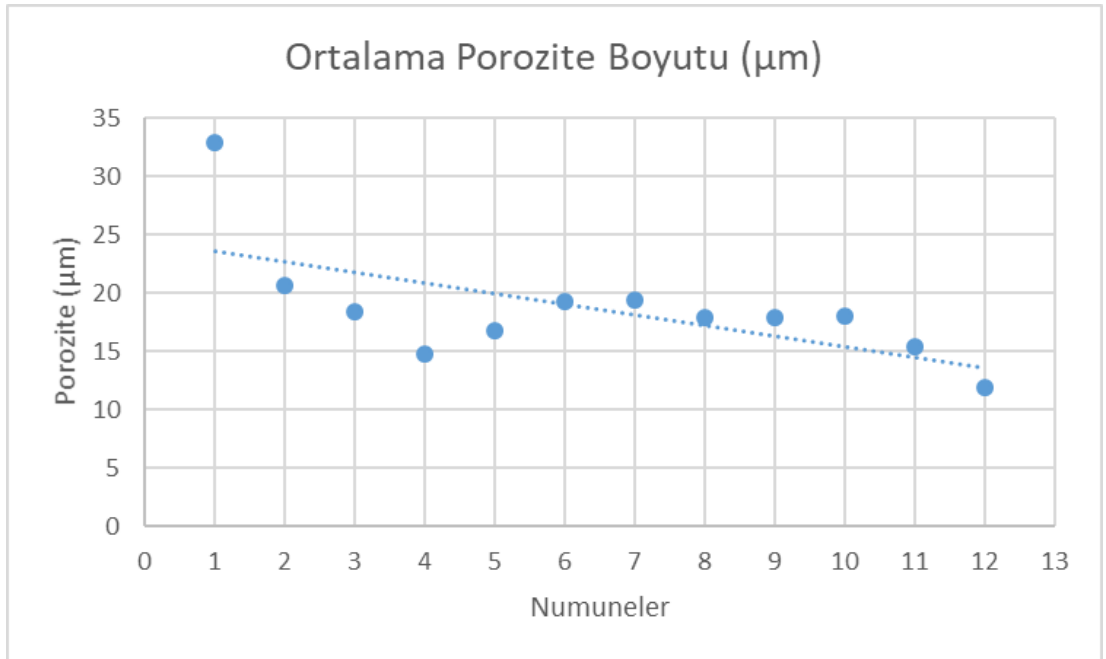
#### 4.1.2. Porozite inceleme

Porozite incelemesi için 12 numunenin orta kısmından bir bölge çıkarılarak mikroyapı incelemesi, porozite ve mikrosertlik ölçümleri için kullanılmıştır. Her numunenin aynı bölgesinden elde edilen numuneler dağlanarak mikroskop altında porozite ölçümleri yapılmıştır. Kesitsel porozite oranı, maksimum ve ortalama porozite değerleri bulunarak grafiklere aktarılmıştır. Şekil 4.6 kesit üzerindeki porozite oranını göstermektedir. İlk numuneden son numuneye doğru gidildikçe porozite oranının azaldığı görülmektedir. Özellikle 9-10-11 numaralı numunelerin oldukça düşük porozite oranına sahip olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.6.** Kesitsel porozite oranı

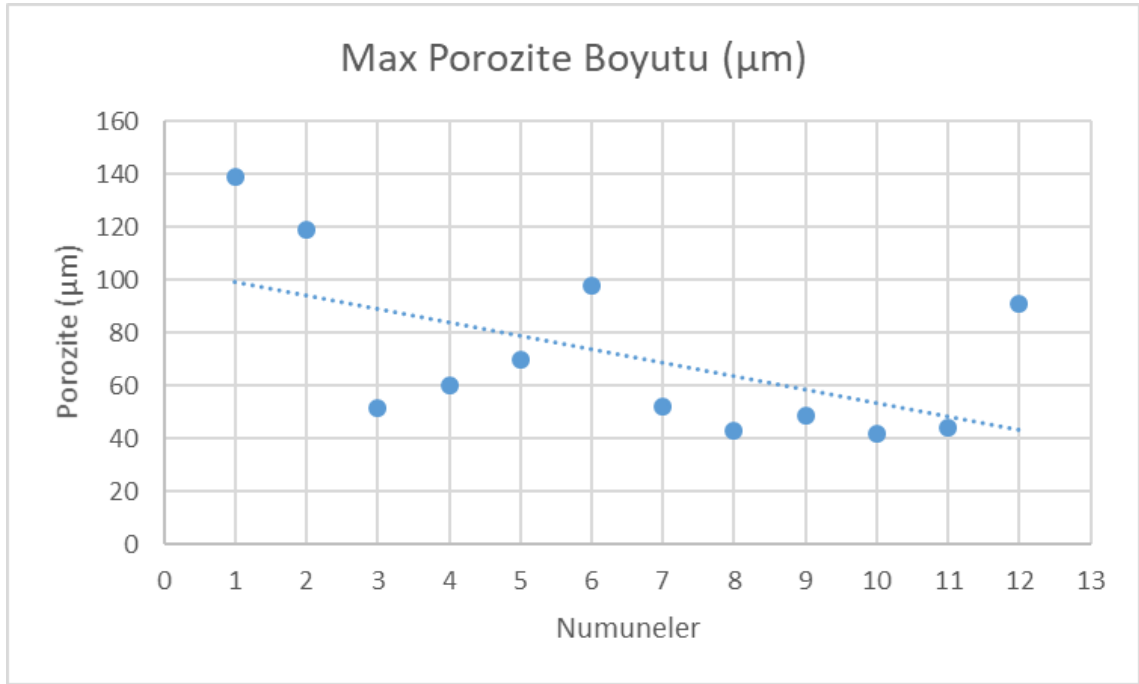
Kesitsel porozitede bulunan eğilim aynı zamanda Şekil 4.7 ortalama porozite grafiğinde de görülmektedir. Kesitsel porozite de 1 numaralı numune eğrinin altında olduğu halde ortalama porozite boyutuna bakıldığında en yüksek değere sahiptir.



**Şekil 4.7.** Ortalama porozite çapı



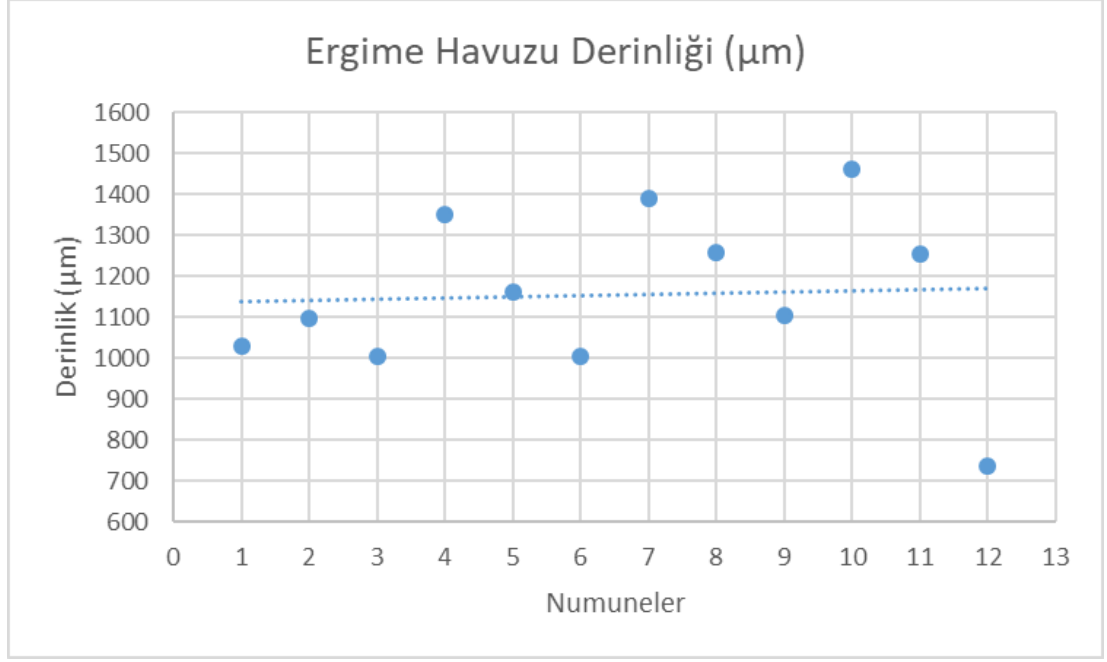
Porozitenin sadece kesit alanındaki % olarak incelenmesinin büyük boyutlu poroziteleri gözden kaçırmaya neden olacağı göz önüne alınmalıdır. Bu nedenle ortalama porozite ve Şekil 4.8’de yer alan maksimum porozite değerleri de incelenmiştir. Kesitsel porozite yoğunluğu eğimi benzer şekilde, ortalama porozite ve maksimum porozite değerlerinde de son numunelerde azalmaktadır.



Şekil 4.8. Maksimum porozite boyutları

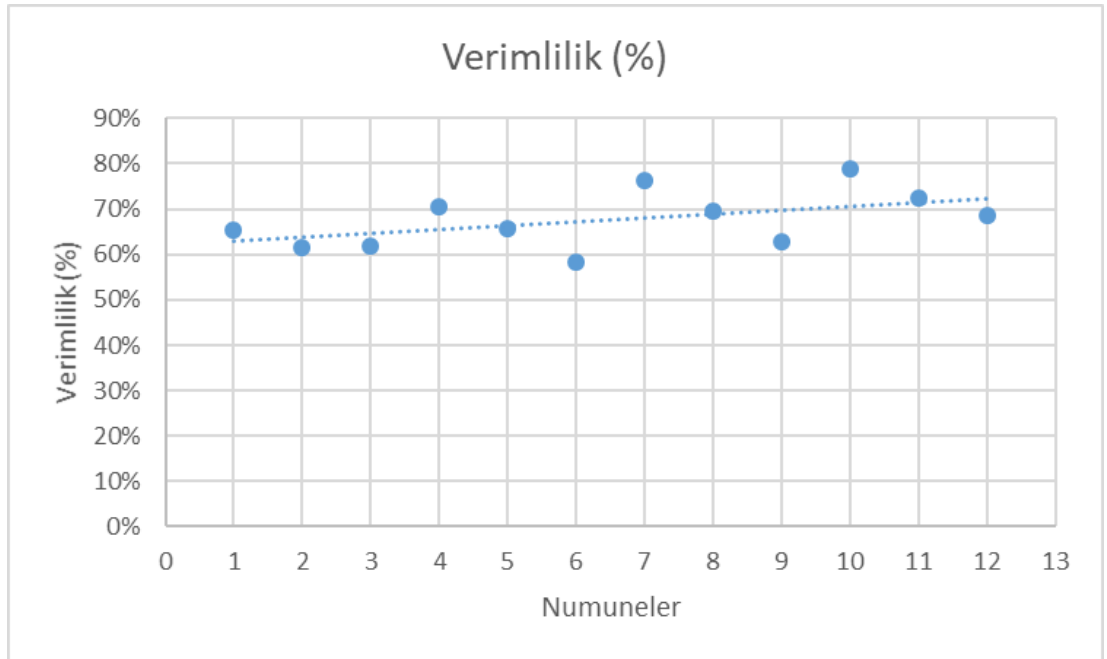
#### 4.1.3. Ergime havuzu ve verimlilik analizi

Ergime havuzu derinliği, imalat sürecinde kullanılan malzemenin akışını kontrol etmek için önemlidir. Derinlik, malzeme akış hızı ve sıcaklığı ile doğrudan ilişkilidir ve doğru bir ergime havuzu derinliği, malzemenin düzgün bir şekilde biriktirilmesini sağlar. Yetersiz bir derinlik, malzemenin doğru bir şekilde biriktirilememesine ve katmanların düzensiz bir şekilde oluşmasına neden olabilir. Şekil 4.9’da ergime havuzu derinliğinin numunelere göre dağılımı görülmektedir. Bu derinlik ve parametreler arasında anlamlı bir artış bulunmamaktadır. Çünkü parametreler belirlenirken belirli bir enerji yoğunluğunun dışına çıkılmamıştır.



**Şekil 4.9.** Ergime havuzu derinlik dağılımı

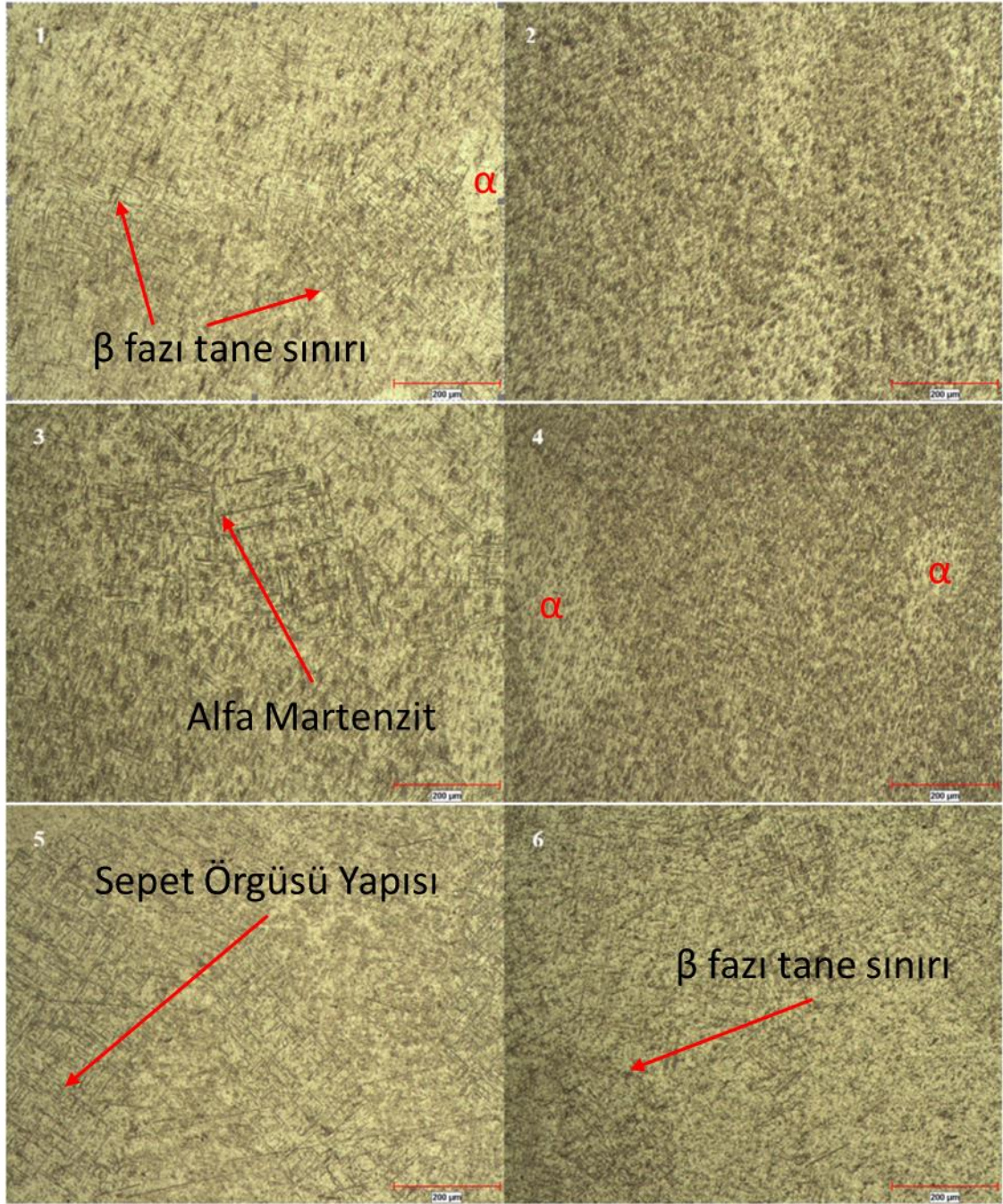
Porozitelerde sona doğru azalan eğim, verimlilikte ise sona doğru artmaktadır. Bu nedenle son parametrelerin daha optimum çözüme yakın olduğu söylenebilmektedir. Eğim farkının fazla olmaması parametrelerin tutarlılığını göstermektedir.



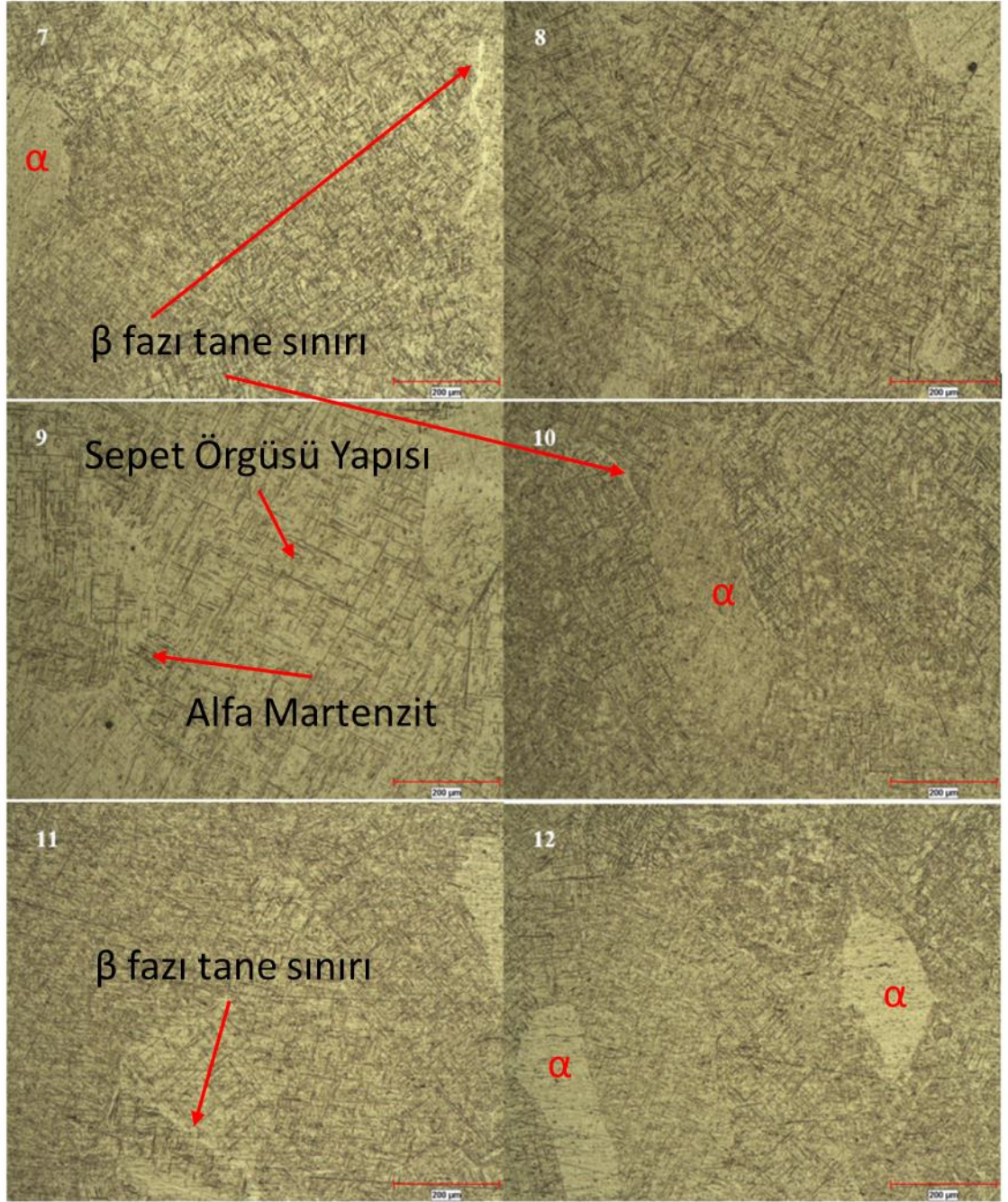
**Şekil 4.10.** Verimliliğin numunelere göre değişimi

#### 4.1.4. Mikroyapı analizleri

Tek kaynak dikişli çok katmanlı olarak üretilen 8 numunenin 100x ve 500x mikroyapı görüntüleri Şekil 4.11 ve Şekil 4.14 arasında gösterilmiştir. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de 100x ile büyütme yapılan görüntülerde  $\alpha+\beta$  fazı karışımları şeklinde olduğu görülmektedir.  $\beta$  fazı oranı değişmektedir bu nedenle Şekil 4.15’te diferansiyel interferans kontrast (DIC) ile tane boyutu analizi yapılmıştır. Şekil 4.16’da ise ortalama  $\beta$  fazı tane boyutları gösterilmiştir. Tüm numunelerde alt tabakada görülen kolonsal taneler daha üst tabakalarda kaybolmaktadır. Yerine daha küçük boyutta eş-eksenli taneler almaktadır. Dağlanmış mikroyapı görsellerinde tespit edilebilen  $\beta$  fazı tane büyüklükleri ile hem lazer gücü hem de tarama ile besleme hızları arasında ise belirli bir eğilim gözlenmemiştir. Bu tane büyüklükleri sıvıdan ilk katılan primer tane büyüklükleri olup çok katmanlı lazer eklemeli imalat işlemleri sırasında bölgedeki tanelerin sonraki pasolar sırasında yüksek anlık ısı girdisine maruz kalması neticesinde yapıdaki olası farklılıkların ortadan kalkabileceği değerlendirilmiştir.

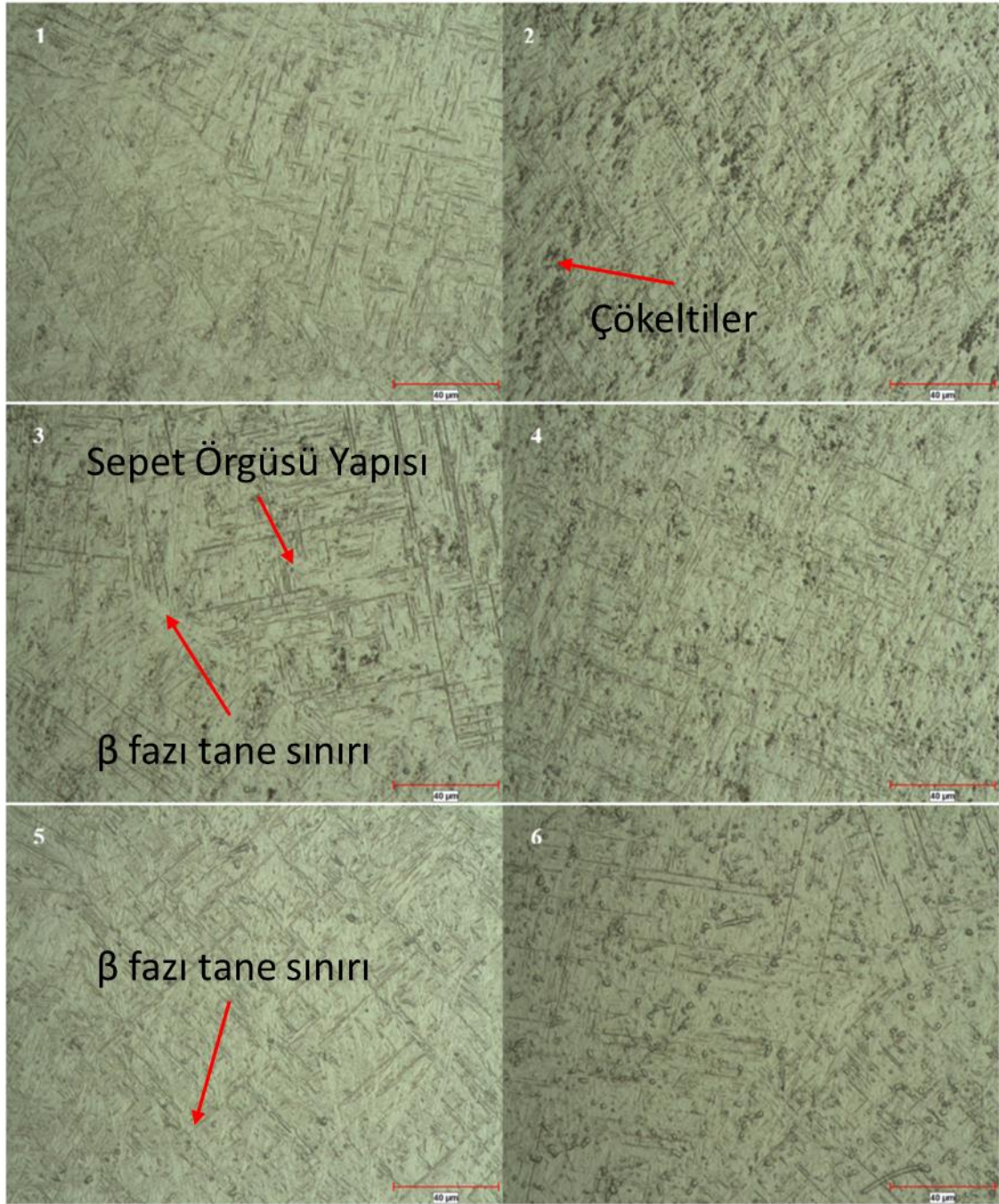


Şekil 4.11. 1-6 arası numunelerin 100x büyütülmüş mikroyapı görüntüleri

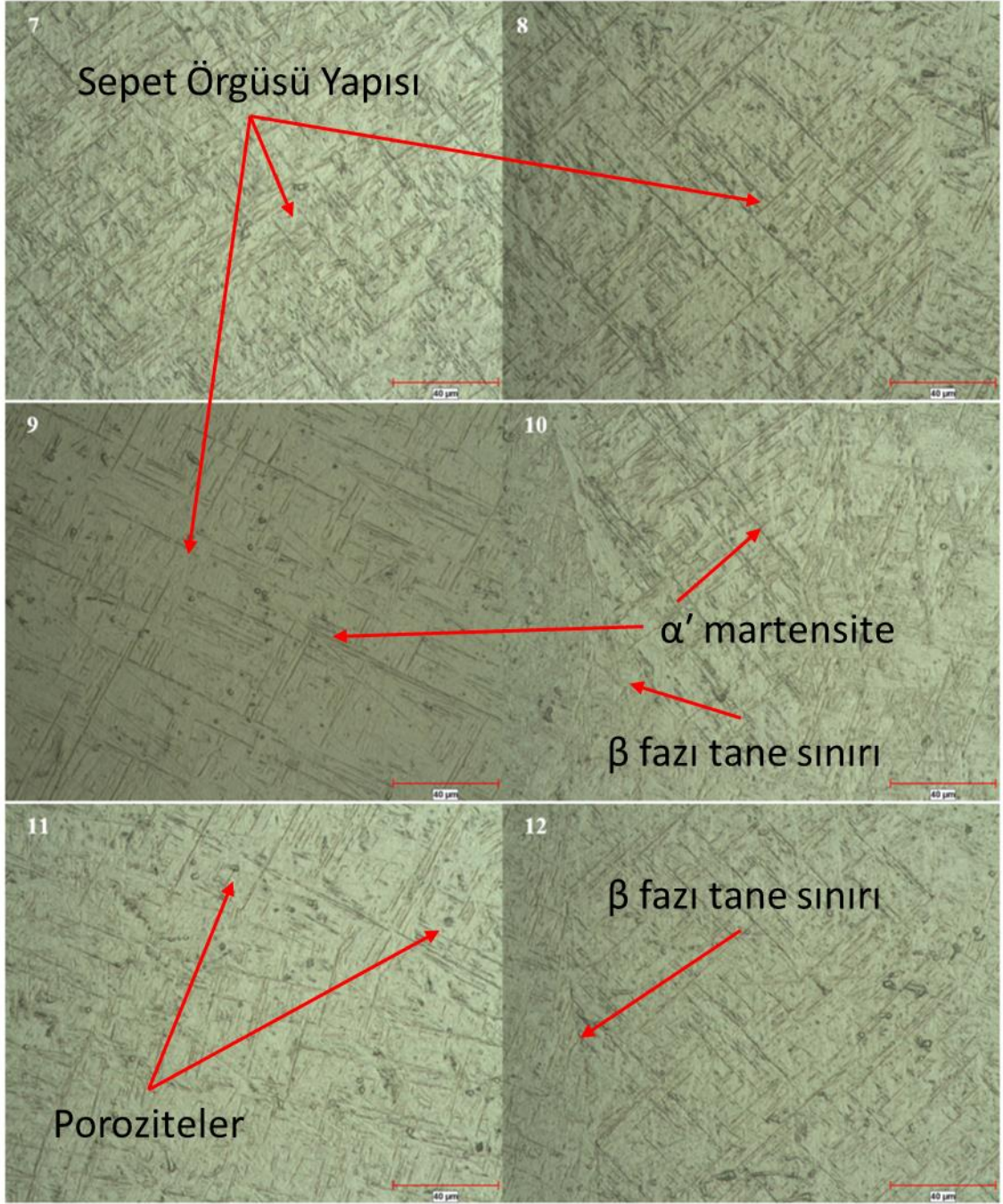


**Şekil 4.12.** 7-12 arası numunelerin 100x büyütülmüş mikroyapı görüntüleri

Genel olarak bakıldığında numune mikroyapıları büyük oranda benzerlik göstermektedir.  $\alpha$ + $\beta$  fazlı bir alaşım olan Ti6Al4V lazer biriktirme sonrası soğuma koşullarında önce primer beta tanelerinin katılaşmasıyla ve akabinde beta tanelerinin  $\alpha$  veya martenzite dönüşümüyle oda sıcaklığına kadar içyapısının oluşumunu tamamlamıştır. Tüm numunelerde  $\beta$  fazı ile birlikte iğnesel morfolojiye sahip martenzitik yapı görülmektedir.



Şekil 4.13. 1-6 arası numunelerin 500x büyütülmüş mikroyapı görüntüleri



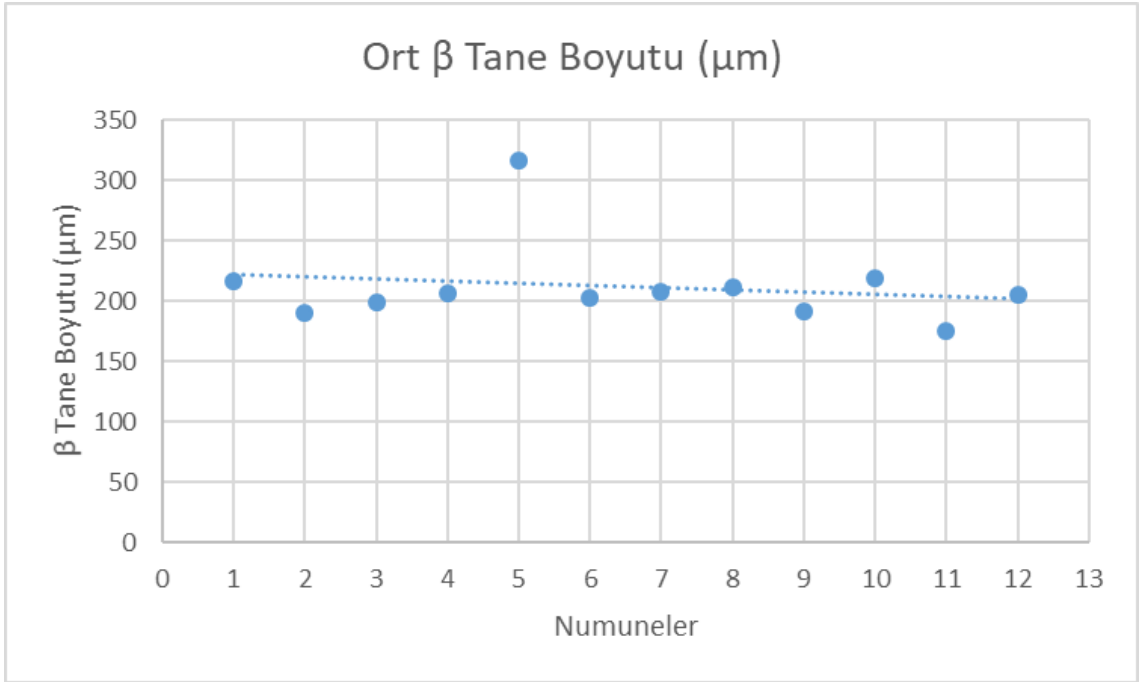
**Şekil 4.14.** 7-12 arası numunelerin 100x büyütülmüş mikroyapı görüntüleri

Beta tane boyut dağılımı için DIC kullanılmıştır. Her numune için Şekil 4.15'te gösterilen DIC ile tane boyutu analizi yapılarak ortalama tane boyutları belirlenmiştir. Kırmızı renklendirilen beta tanelerinin ortalama boyutları Şekil 4.16'da verilmiştir.



**Şekil 4.15.** DIC ile tane boyutu dağılımı

Ortalama  $\beta$  fazı tane boyutlarına bakıldığında anlamlı bir fark görünmemektedir. Bu nedenle tüm parametrelerin birbirine çok yakın olduğu söylenebilir. Sadece 5 nolu parametrede  $\beta$  fazı oldukça büyük tane boyutlarına sahiptir



**Şekil 4.16.** Ortalama  $\beta$  fazı tane boyutu



## 4.2. Parametre Optimizasyonu

Çizelge 4.1’de verilen deney tasarım parametreleri ve analizlerden elde edilen porozite, verimlilik, nüfuziyet gibi çıktılar ile yanıt yüzey metodu kullanılarak parametre optimizasyonu çalışması yapılmıştır.

## 4.3. Yanıt Yüzey Metodu ile Optimizasyon

Lazer gücü, ilerleme hızı ve toz besleme hızı parametreleri girdi değerlerini oluşturmaktadır. İstenebilirlik fonksiyonunda her hedef çıktı eşit değerde görülmüştür. Hedeflenen çıktılar Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.2** Hedeflenen çıktılar

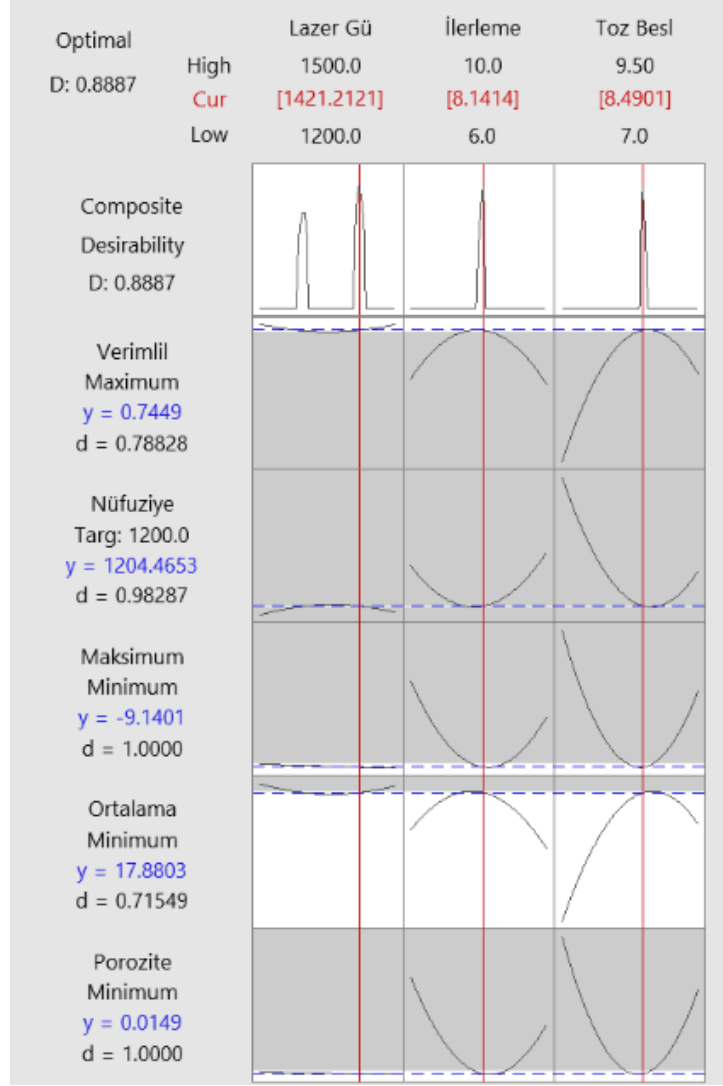
Çıktı	Hedef	Alt Limit	Hedef	Üst Limit	Ağırlık	Önem
Verimlilik %	Maksimum	0.583	0.79		1	1
Nüfuziyet ( $\mu\text{m}$ )	Belirli Hedef	736.600	1200.00	1460.60	1	1
Maksimum Porozite Boyutu ( $\mu\text{m}$ )	Minimum		41.79	139.04	1	1
Ortalama Porozite Boyutu ( $\mu\text{m}$ )	Minimum		11.88	32.97	1	1
Porozite %	Minimum		0.03	0.20	1	1

Elde edilen çözüm Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Belirtilen optimum parametrelere en yakın 8 nolu numune parametresi optimum parametre olarak belirlenmiştir.

**Çizelge 4.3** Çözüm sonucu elde edilen optimum parametreler

Parametre	Optimum Hesaplanan	Optimum Parametre
Lazer Gücü (W)	1421.21	1400
İlerleme Hızı (mm/s)	8.14141	8
Toz Besleme (gr/dk)	8.49006	8.5

İstenebilirlik kriterleri şekil 4.17’de verilmiştir. Bu optimizasyon çalışmasında D olarak tanımlanan istenebilirlik 0.88 çıkmıştır. Alt fonksiyonlar her hedef çıktıya göre ayrı olarak değerlendirilmiştir.



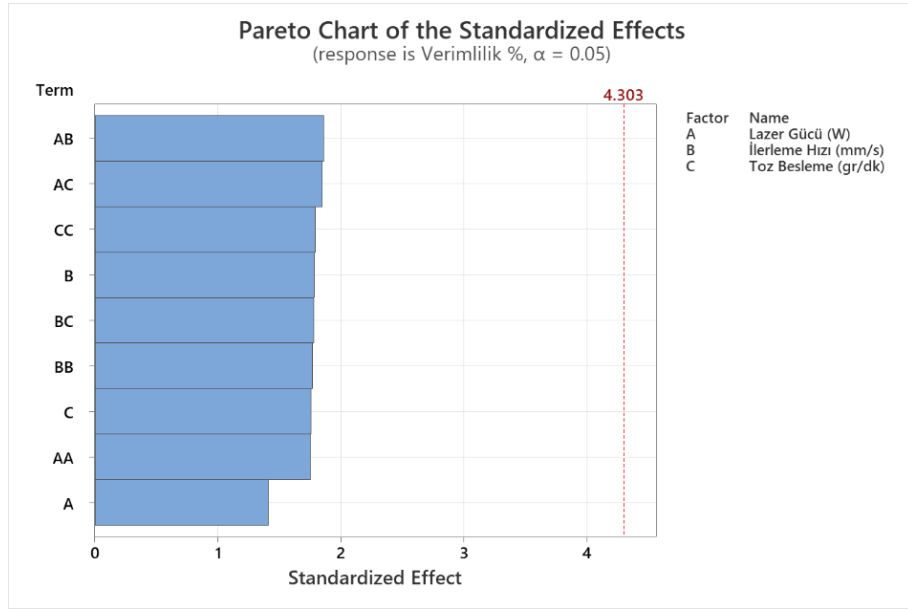
**Şekil 4.17.** İstenebilirlik değerleri, girdiler ve çıktılar arasındaki ilişki

Her bir hedef çıktı için pareto analizi yapılarak ayrı ayrı regresyon denklemleri elde edilmiştir.

Verimlilik için regresyon denklemi aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\begin{aligned} \text{Verimlilik \%} = & -4.29 - 0.1496 \text{ Lazer Gücü (W)} - 23.4 \text{ İlerleme Hızı (mm/s)} + 47.1 \text{ Toz Besleme (gr/dk)} \\ & + 0.000041 \text{ Lazer Gücü (W)} * \text{Lazer Gücü (W)} - 1.615 \text{ İlerleme Hızı (mm/s)} * \text{İlerleme Hızı (mm/s)} \\ & - 6.54 \text{ Toz Besleme (gr/dk)} * \text{Toz Besleme (gr/dk)} - 0.00435 \text{ Lazer Gücü (W)} * \text{İlerleme Hızı (mm/s)} \\ & + 0.00864 \text{ Lazer Gücü (W)} * \text{Toz Besleme (gr/dk)} \\ & + 6.51 \text{ İlerleme Hızı (mm/s)} * \text{Toz Besleme (gr/dk)} \end{aligned}$$

Verimlilik faktörü için şekil 4.18’de yer alan pareto analizine bakıldığında parametreler arasında çok fazla etki farkı gözlemlenmemektedir. Buna göre lazer gücü, ilerleme hızı ve toz besleme yaklaşık olarak aynı etki değerine sahiptir.

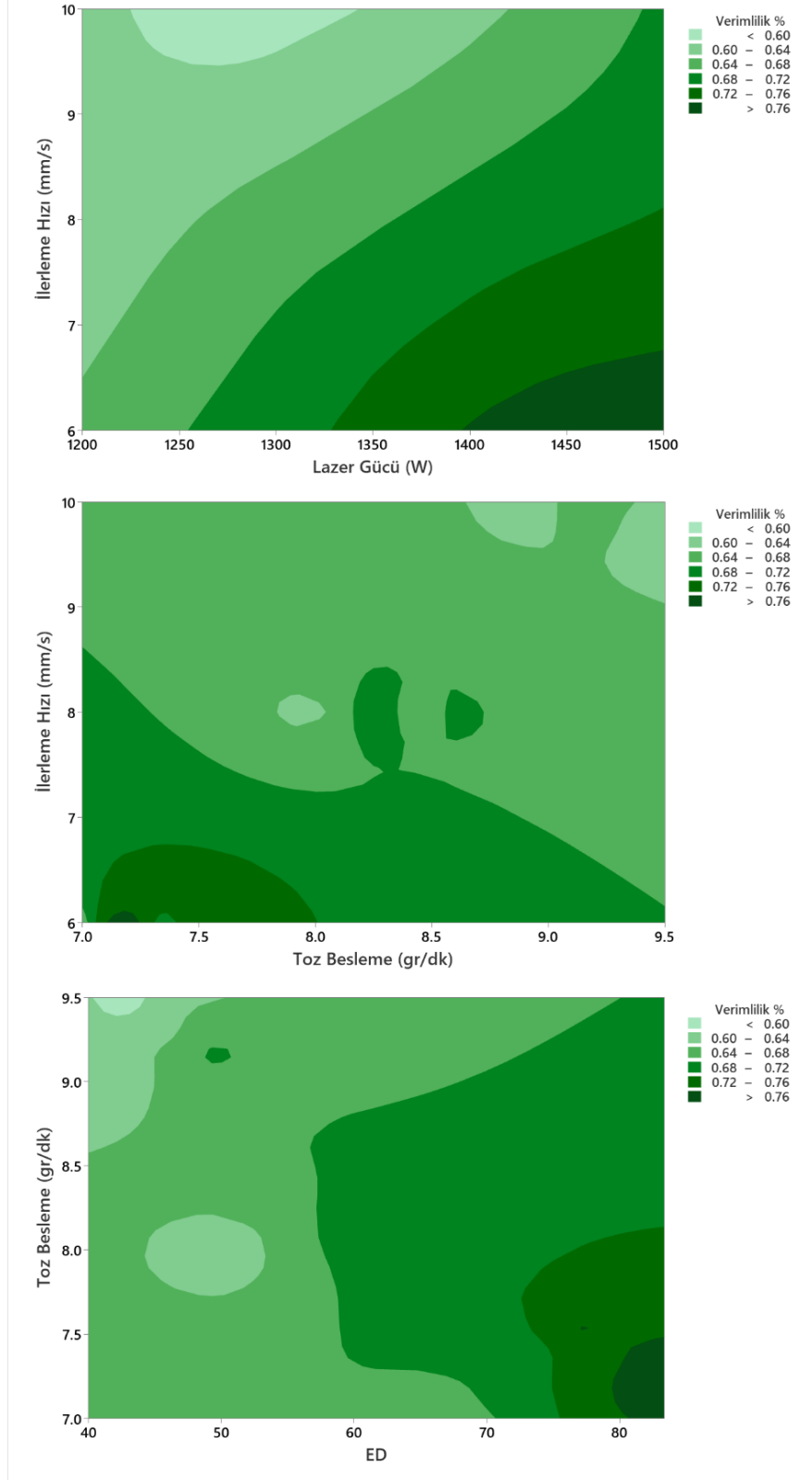


**Şekil 4.18.** Verimlilik faktörü için pareto analizi

Şekil 4.19’da verimliliğin parametrelerden nasıl etkilendiği grafikler ile gösterilmiştir. Lazer gücü ve ilerleme hızına bakıldığında düşük güç ve düşük ilerleme hızlarında verimliliğin arttığı görülmektedir.

Düşük ilerleme hızlarında, düşük toz besleme ile verimli bir proses gerçekleştirilebileceği görülmektedir. Yüksek ilerleme hızında ise verimlilik azalmaktadır yapılan çalışmalarda da bu gözlemlenmiştir. Yüksek ilerleme hızlarında toz daha fazla sıçrıntı yaparak verimliliği düşürmektedir ayrıca yüksek toz besleme de gereğinden fazla toz beslediğinde doğal olarak verimlilik azalmaktadır.

Toz besleme ve enerji yoğunluğu grafiğine bakıldığında düşük toz besleme hızlarında yüksek enerji yoğunluğunda maksimum verim elde edilmektedir. Fakat bu aşırı ısınmaya neden olduğundan parça üzerinde çatlamaya yada tabladan ayrılmaya neden olabilmektedir.

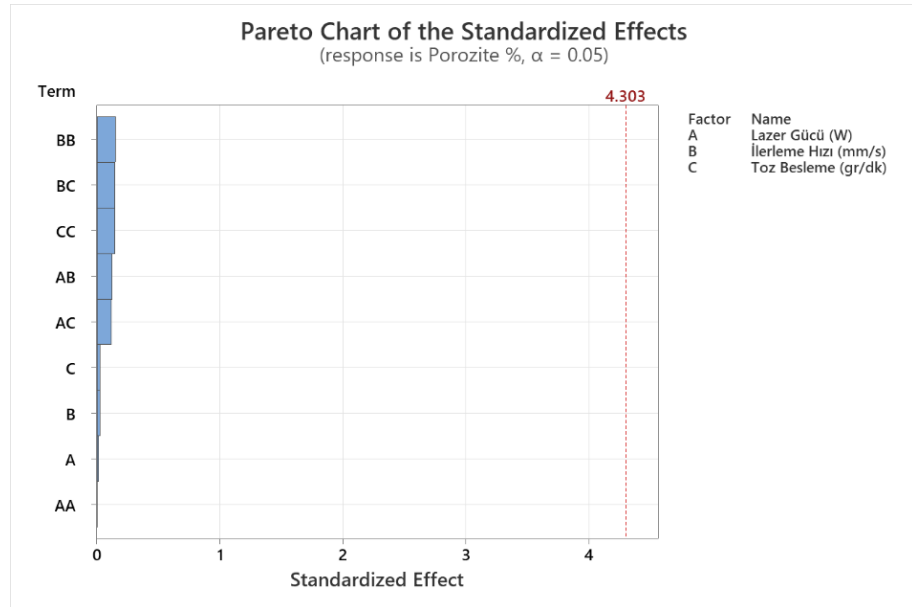


Şekil 4.19. Verimliliğin girdi parametrelerine göre değişimi

Porozite için bu denklem aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

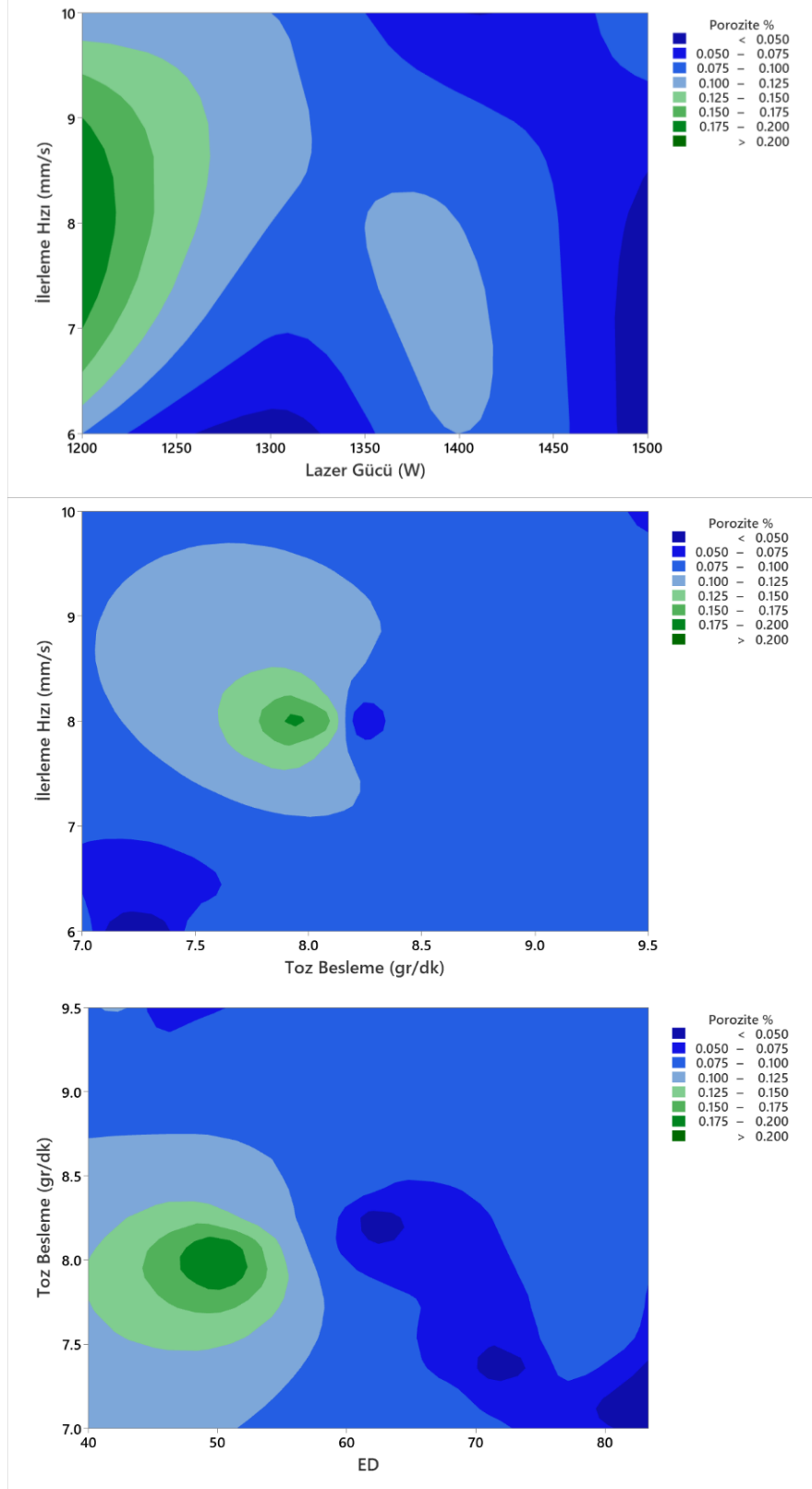
$$\text{Porozite \%} = 43.6 + 0.012 \text{ Lazer Gücü (W)} + 12.6 \text{ İlerleme Hızı (mm/s)} - 25 \text{ Toz Besleme (gr/dk)} + 0.000001 \text{ Lazer Gücü (W)} * \text{Lazer Gücü (W)} + 0.90 \text{ İlerleme Hızı (mm/s)} * \text{İlerleme Hızı (mm/s)} + 3.5 \text{ Toz Besleme (gr/dk)} * \text{Toz Besleme (gr/dk)} + 0.0019 \text{ Lazer Gücü (W)} * \text{İlerleme Hızı (mm/s)} - 0.0036 \text{ Lazer Gücü (W)} * \text{Toz Besleme (gr/dk)} - 3.6 \text{ İlerleme Hızı (mm/s)} * \text{Toz Besleme (gr/dk)}$$

Şekil 4.20’de Pareto analizine bakıldığında en etkin parametrenin ilerleme hızı olduğu görülmektedir. Toz besleme hızı da etkili parametrelerden biridir. Lazer gücü ise oldukça düşük etkiye sahiptir.



#### 4.20. Porozite faktörü için pareto analizi

Şekil 4.21’de porozite için parametrelerin etkisi incelendiğinde çok spesifik bölgeler olduğu gözlemlenmektedir. Lazer gücü ve ilerleme hızı arasında düşük lazer gücü ve orta ilerleme hızlarında en az porozite görülmektedir. Özellikle ilerleme hızı ve toz besleme grafiğinde oldukça dar bir alan belirlenmiştir. Enerji yoğunluğu grafiğine bakıldığında bu alanın genişlediği ama 8 mm/s ilerleme hızı değerlerinde en iyi durumun yakalandığı gözlemlenmiştir.

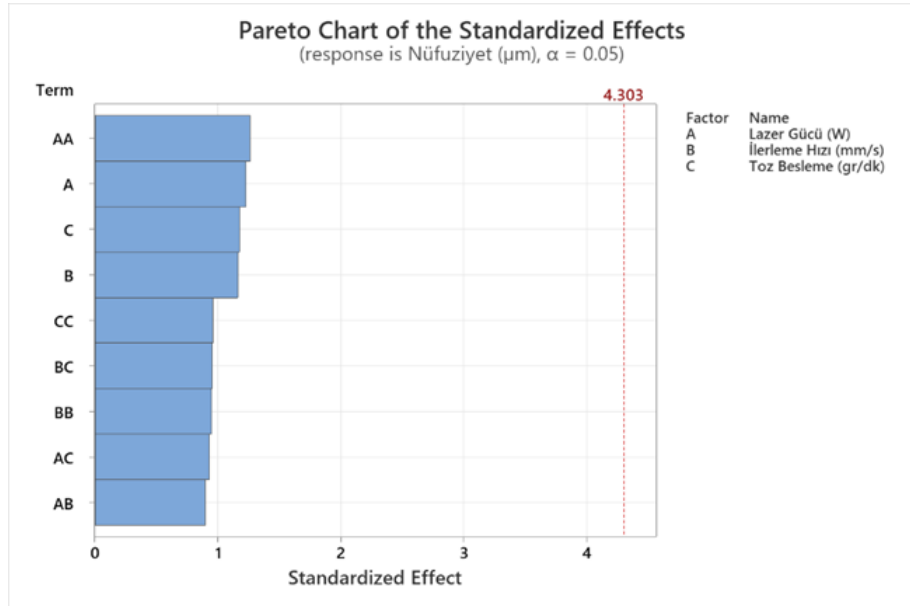


Şekil 4.21. Porozitenin girdi parametrelerine göre değişimi

Nüfuziyet için regresyon denklemi aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

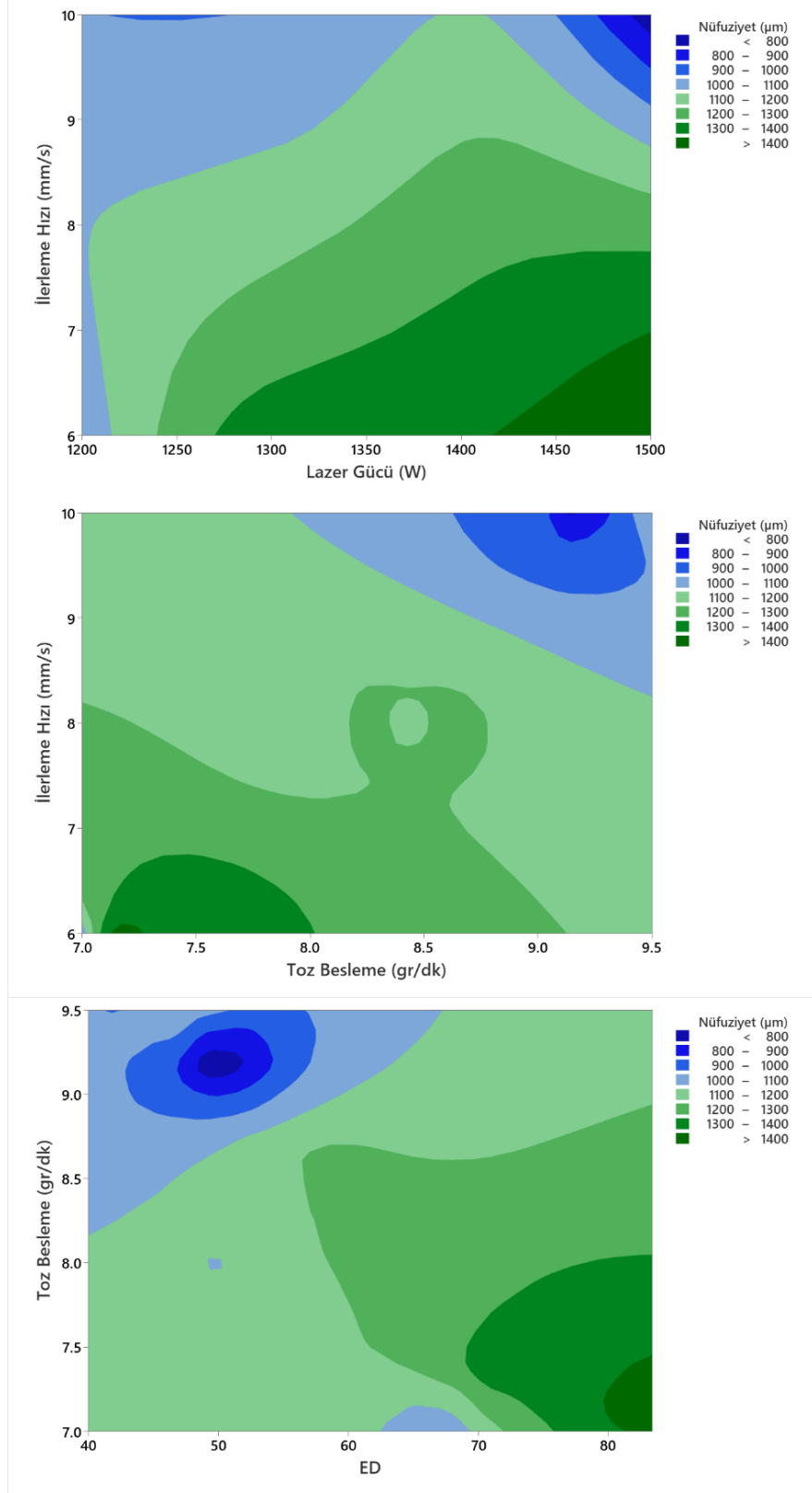
$$\begin{aligned} \text{Nüfuziyet } (\mu\text{m}) = & -75390 + 788 \text{ Lazer Gücü (W)} + 101758 \text{ İlerleme Hızı (mm/s)} - 202379 \\ & \text{Toz Besleme (gr/dk)} - 0.232 \text{ Lazer Gücü (W)} * \text{Lazer Gücü (W)} + 6742 \text{ İlerleme Hızı} \\ & (\text{mm/s}) * \text{İlerleme Hızı (mm/s)} + 27335 \text{ Toz Besleme (gr/dk)} * \text{Toz Besleme (gr/dk)} + 16.3 \\ & \text{Lazer Gücü (W)} * \text{İlerleme Hızı (mm/s)} - 34.0 \text{ Lazer Gücü (W)} * \text{Toz Besleme (gr/dk)} - \\ & 27194 \text{ İlerleme Hızı (mm/s)} * \text{Toz Besleme (gr/dk)} \end{aligned}$$

Nüfuziyet özellikle ilk katmanlarda tablaya tutunma açısından önem arz etmektedir. Sonraki katmanlarda aşırı nüfuziyet fazla ısı girdisine neden olmaktadır bu nedenle yüksek olması istenmemektedir. Çalışmada nüfuziyet için sabit bir değer belirlenerek bu değere yakınsanması sağlanmıştır. Şekil 4.22’de pareto analizine bakıldığında nüfuziyeti etkileyen en önemli parametrenin lazer gücü olduğu görülmektedir.



Şekil 4.22. Nüfuziyet için pareto analizi

Nüfuziyet ve parametreler arasındaki ilişkiler Şekil 4.23’de açıklanmıştır. Lazer gücü ve ilerleme hızı grafiğinde düşük ilerleme hızlarında ve yüksek lazer gücünde maksimum nüfuziyet olduğu gözlemlenmiştir. Nüfuziyet için diğer hedef fonksiyonlardaki gibi koyu yeşil bölgeye değil daha açık yeşil olan bölgelere odaklanılması gerekmektedir.



Şekil 4.23. Nüfuziyetin girdi parametrelerine göre değişimi



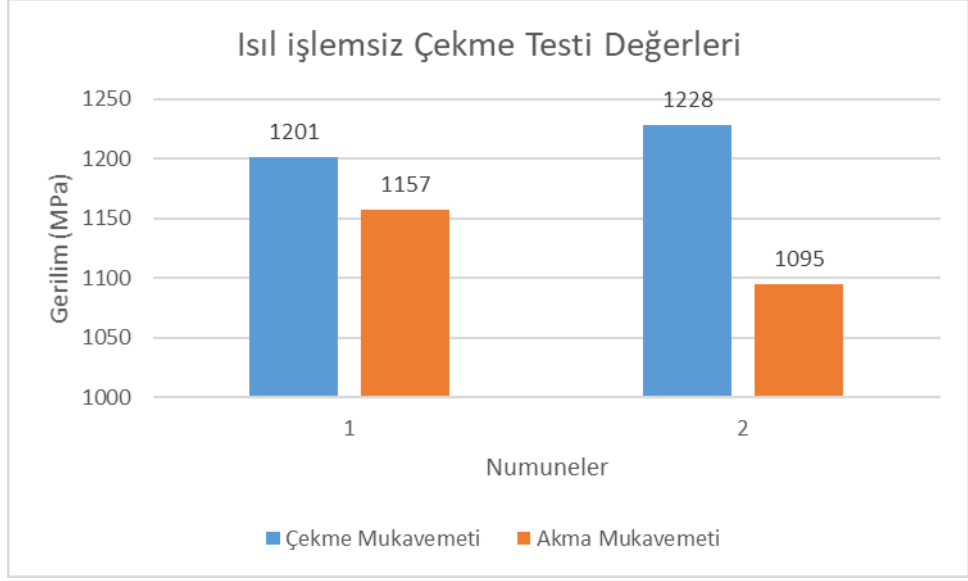
#### 4.4. Isıl İşlemsiz Çekme Testi

LMD ile üretilen ve tel erozyon ile kesilen titanyum malzemelere HIP ve ısıl işlem uygulanmadan önce 5mm/dk hız ile DIN 50125 standardına göre çekme testleri yapılmıştır. 3 numuneden 2 numunenin testi başarılı olmuştur. Çekme testi uygulanan numuneler Şekil 4.24’de görülmektedir.



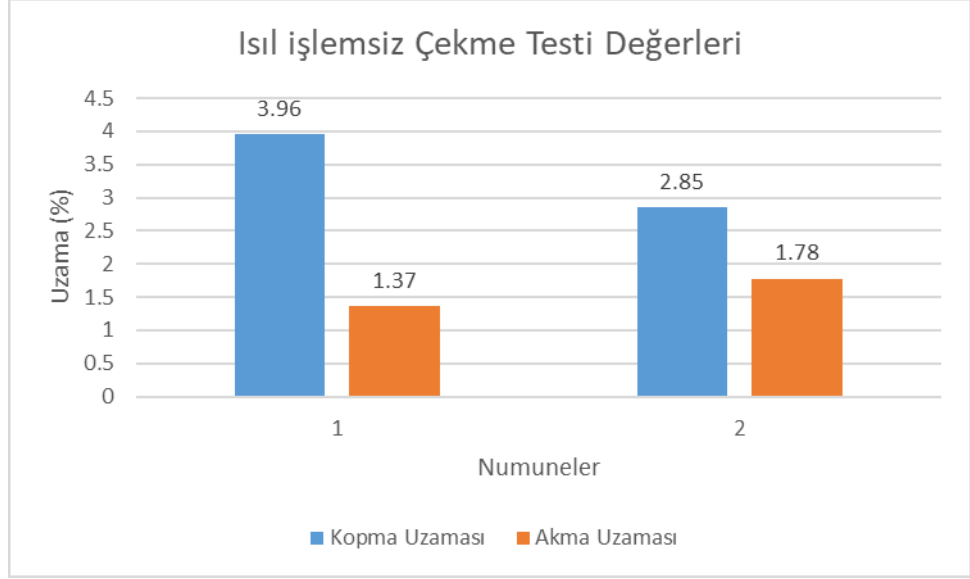
**Şekil 4.24.** Isıl işlemsiz çekme testi numuneleri

Geleneksel titanyum malzeme döküm ile üretilmesinden (ASTM F1108) sonra tavlandığında (ASTM F1472) 930 MPa çekme mukavemetine ve yaklaşık %10 uzama özelliklerine sahiptir, LMD ile üretilen malzeme ise, içinde  $\alpha$  martenzit bulunan sütunlu taneciklere sahiptir. Bu nedenle LMD ile üretilen Ti6Al4V daha yüksek mukavemet, ancak daha düşük süneklik görülmektedir. Şekil 4.25’te ısıl işlemsiz malzemenin çekme mukavemeti değeri döküme göre oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



**Şekil 4.25.** Isıl işlemsiz numunelerin akma ve çekme mukavemeti değerleri

Şekil 4.26’da uzama değerlerine bakıldığında ise LMD ile üretilen titanyum malzemenin döküme göre çok daha düşük uzama değerine sahip olduğu görülür. Titanyum alaşımları farklı sıcaklık ve soğuma hızlarına maruz kaldığında farklı mikroyapılara sahip olmaktadır. Martenzit veya  $\beta$  fazları sert fazlardır malzemenin uzama değerini düşürmektedir. LMD ile üretilen titanyum sonrası uzama miktarının az olması gözönüne alınırsa ilk yapıda  $\beta$  ve martensit fazlarının çok olduğundan bahsedilebilir. LMD ile üretimde çevrimli sıcaklık ve soğuma gerçekleştiğinden mikroyapı birçok kez değişmektedir. Yeterince hızlı soğutulmadığında alfa ve martenzit dönüşümü gerçekleşemez ve beta halinde sert fazlar kalmaktadır. Titanyum malzemeler yüksek uzama değeri elde etmek için döküm sonrası olduğu gibi LMD ile üretiminden sonra da ısıl işleme yada dövme işlemine tabi tutulmak zorundadır.

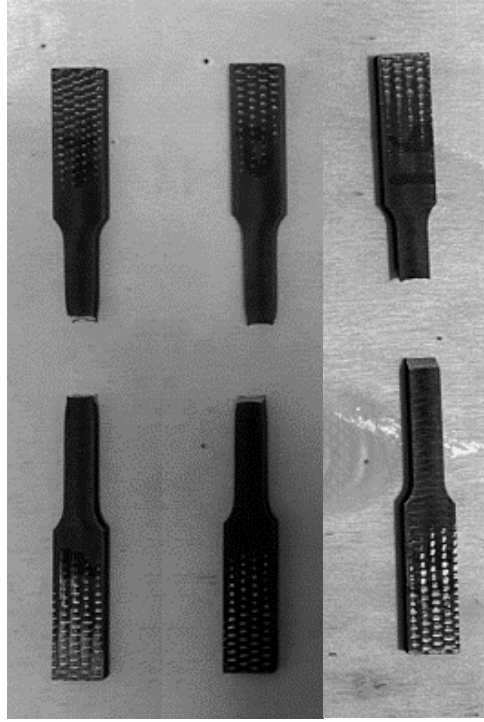


**Şekil 4.26.** Isıl işlemsiz numunelerin uzama değerleri

#### 4.5. HIP ve Isıl İşlem Sonrası Çekme Testleri

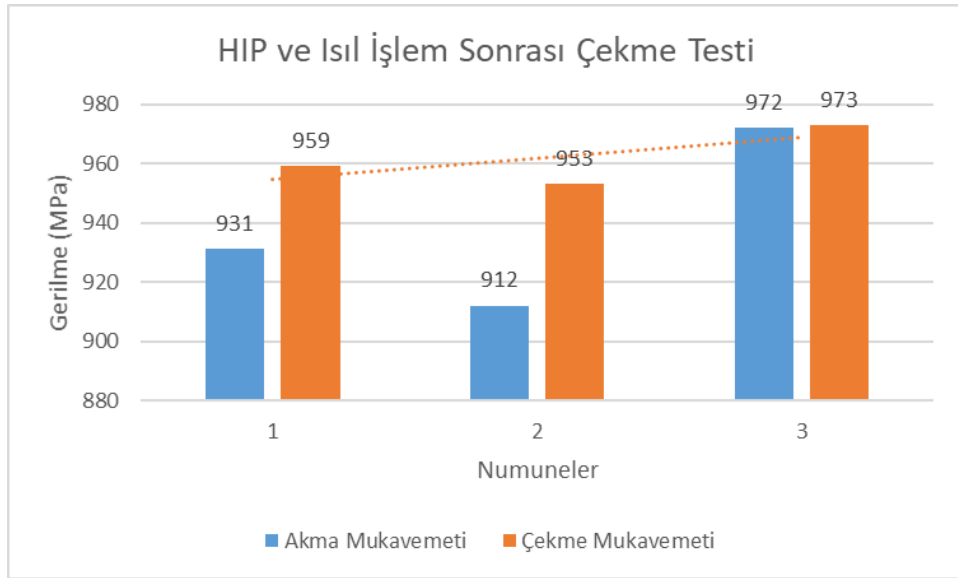
Titanyum numunelerde mikroyapıyı düzenlemek ve poroziteleri gidermek amacıyla HIP ve ısıl işlem uygulanmıştır. HIP ve ısıl işlem parametreleri Şekil 3.11’de gösterilmiştir. Yüksek sıcaklık ve yüksek basınç altında yapılan HIP işlemi sonrası porozite ölçümü, mikroyapı incelemesi ve çekme testleri yapılmıştır.

HIP işleminin ve ısıl işlemin etkisini görmek için 3 farklı katmandan numuneler alınarak çekme testi yapılmıştır. Şekil 4.27’de 3 farklı yükseklikten alınmış numuneler bulunmaktadır. 3 nolu numunenin uzamasının düşük olduğu gevrek kırılma davranışından anlaşılabilir.



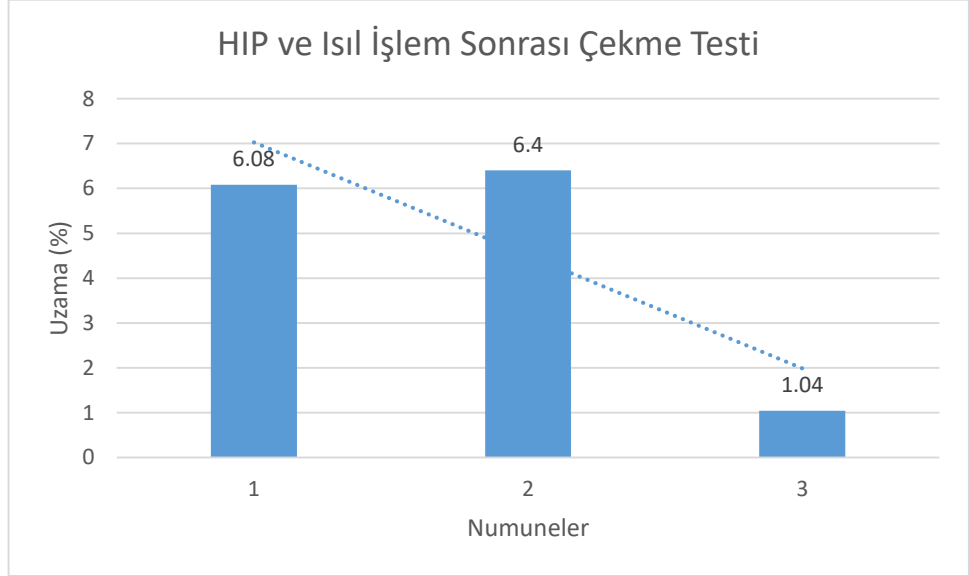
**Şekil 4.27.** HIP ve ısıl işlem yapılmış çekme testi numuneleri

Çekme ve akma mukavemeti değerleri Şekil 4.28’de gösterilmektedir. Test sonuçlarına göre 2 nolu numunenin akma değeri diğerlerine göre biraz düşük çıkmıştır fakat anlamlı bir fark bulunmamaktadır. 3 nolu numunede hesaplanan akma ve çekme değerleri birbirine çok yakındır bu da uzamanın düşük olduğunu göstermektedir.



**Şekil 4.28.** HIP sonrası farklı katmanların çekme testi değerleri

Şekil 4.28’de 3 nolu numunede görülen gevrek kırılma Şekil 4.29’da çekme testi uzama sonucunda da gösterilmiştir. Test sonuçlarına göre 3 nolu numune de yani yüksek katmanlarda çekme mukavemeti aynı yada benzer olduğu halde uzama değerleri farklı çıkmıştır. Bunun nedeni olarak 3 nolu numune yüzeyinde porozite nedeniyle erken kırılma başlaması olduğu düşünülmektedir.



**Şekil 4.29.** HIP sonrası farklı katmanların uzama değerleri

#### 4.6. Kriyojenik Isıl İşlem

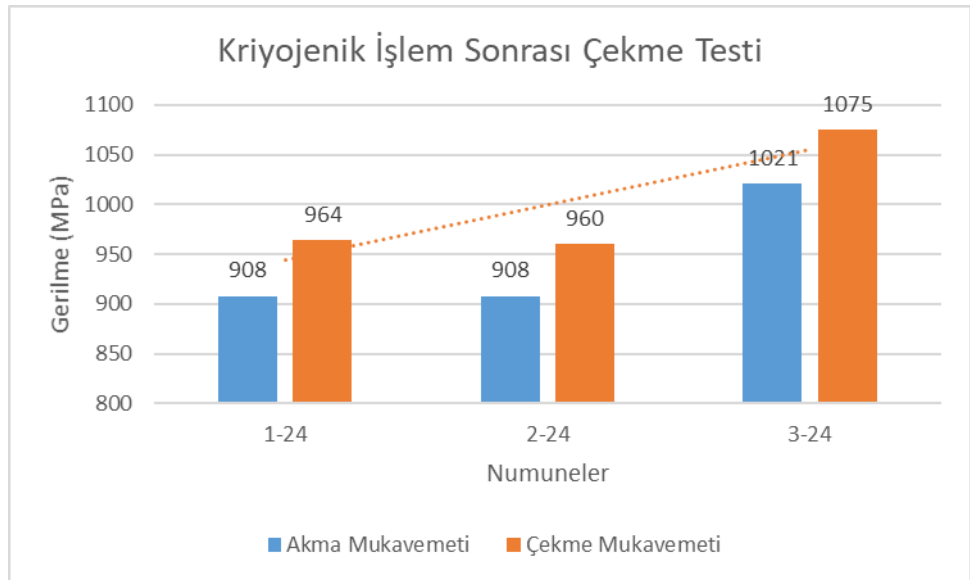
Kriyojenik işlem, malzemelerin sıvı nitrojen veya sıvı helyum gibi düşük sıcaklıklarda bekletilmesi işlemidir. Bu işlem, malzemelerin kristal yapılarının daha düzenli hale gelmesine, içerisindeki gerilimlerin azaltılmasına ve malzemenin daha homojen hale getirilmesine yardımcı olur. Bu çalışmada şerit numuneler kullanıldığı için sıvı nitrojen içinde değil sıvı nitrojen desteğiyle soğutma sağlanmıştır. -180 °C sıcaklıkta 24 saat ve 36 saat bekletilen numunelerin porozite ölçümleri, mikroyapı incelemeleri ve çekme testleri yapılmıştır. Numuneler farklı yükseklikteki katmanlardan alınmıştır.

Kriyojenik işlem uygulanan numuneler Şekil 4.30’da gösterilmektedir. 24 saatlik ve 36 saatlik kriyojenik işlem sonrasında çekme testi uygulanmıştır.



**Şekil 4.30.** Kriyojenik işlem yapılmış çekme testi numuneleri

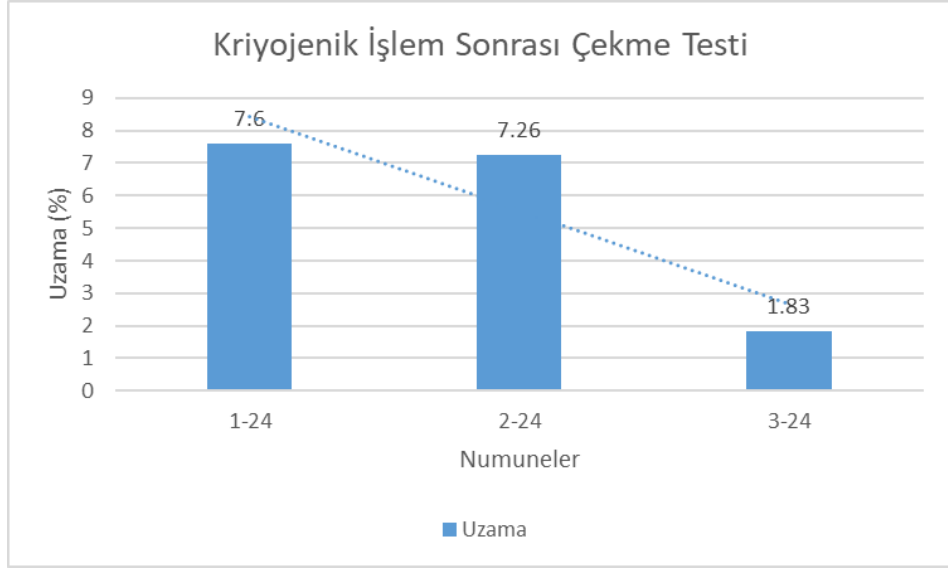
Kriyojenik işlem sonrası 24 saatlik numunelerin çekme testi sonuçları Şekil 4.31’de gösterilmektedir. Yükseklik arttıkça malzemenin mukavemeti artmıştır. Özellikle 3 nolu numune ile diğer numuneler arasında bariz bir fark görülmektedir.



**Şekil 4.31.** 24 saat kriyojenik işlem sonrası farklı katmanların çekme testi

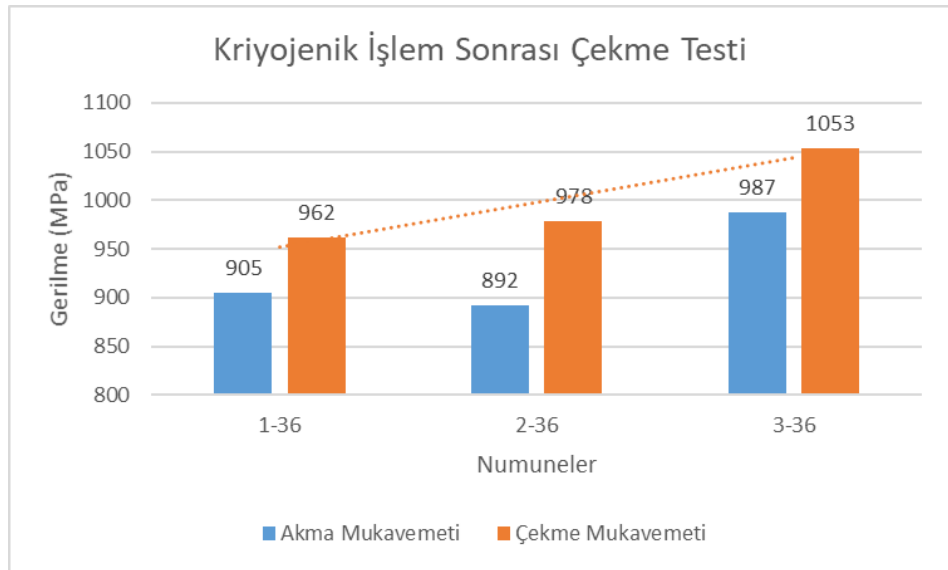
24 saatlik numuneler arasında uzama değerleri Şekil 4.32’de görülebilmektedir.

Buna göre mukavemeti yüksek olan 3 nolu numunede çok düşük uzama bulunmaktadır. Bunun nedeni olarak mikroyapının değişimi ve porozitenin artması düşünülmektedir.



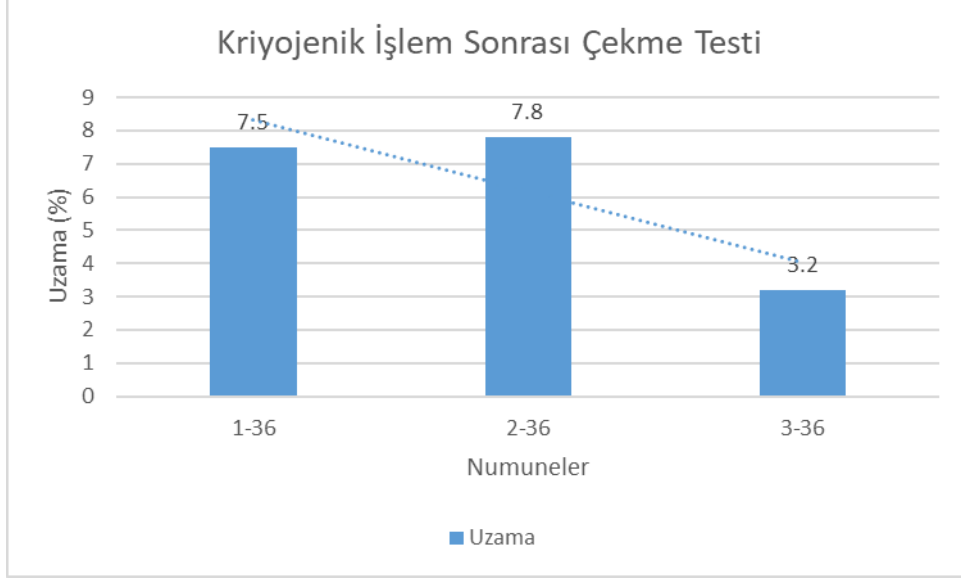
**Şekil 4.32.** 24 saat kriyojenik işlem sonrası farklı katmanların uzama değerleri

Kriyojenik işlem sonrası 36 saatlik numunelerin çekme testi sonuçları Şekil 4.33’te gösterilmektedir. Yükseklik arttıķa malzemenin mukavemeti artmıştır. Özellikle 3 nolu numune ile diğer numuneler arasında bariz bir fark görülmektedir.



**Şekil 4.33.** 36 saat kriyojenik işlem sonrası farklı katmanların çekme testi

36 saatlik numuneler arasında uzama değerleri Şekil 4.34'te görülebilmektedir. Buna göre mukavemeti yüksek olan 3 nolu numunede çok düşük uzama bulunmaktadır. Bunun nedeni olarak mikroyapının değişimi ve porozitenin artması düşünülmektedir.

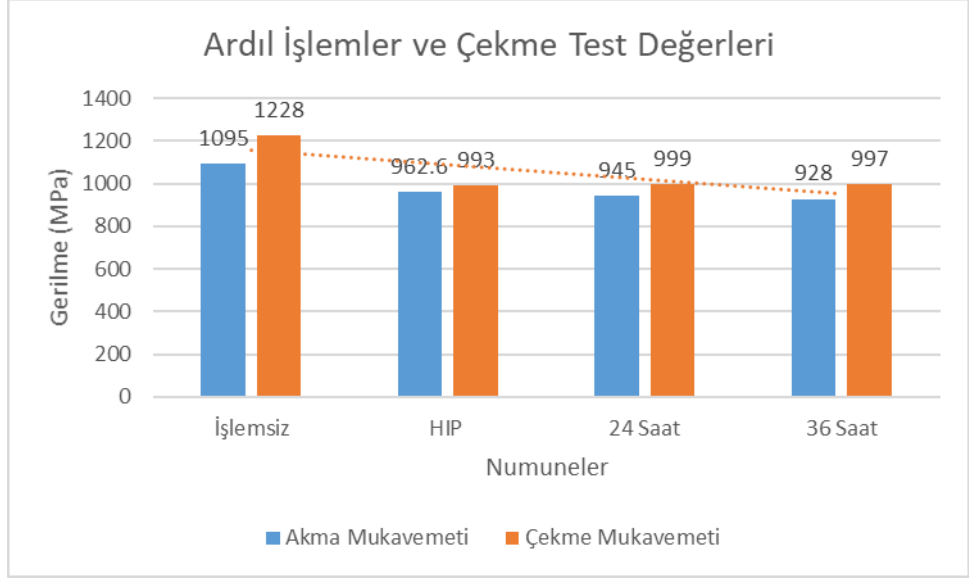


**Şekil 4.34.** 36 saat kriyojenik işlem sonrası farklı katmanların uzama değerleri

#### **4.7. Ardıl İşlemler Sonrası Çekme Testi Değerlerinin Kıyaslanması**

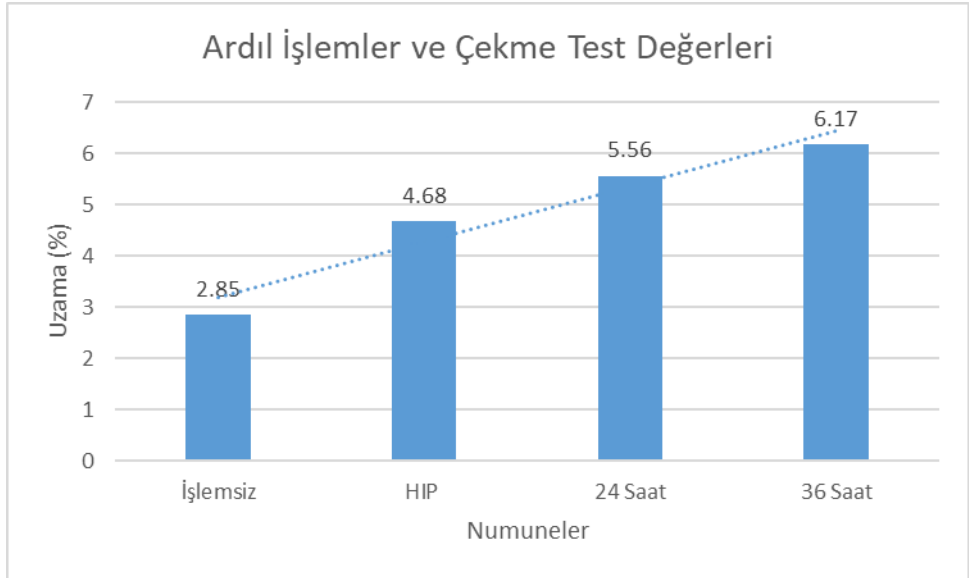
Şekil 4.35'te LMD ile üretilen ısılsız işlemsiz numuneler test edilerek ortalama akma ve çekme mukavemeti değerleri hesaplanmıştır. Diğer numunelere sırasıyla HIP ve 24-36 saatlik kriyojenik işlemler uygulanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde işlemsiz numunelerde mukavemetin daha yüksek olduğu söylenebilir. HIP işlemi sonrasında numunelerin mukavemeti düşüş göstermiştir. HIP işlemi sonrası kriyojenik işlem uygulanan 24 saatlik ve 36 saatlik numunelerde büyük farklar gözlemlenmemektedir.





**Şekil 4.35.** Farklı ardıl işlemlerin ardından ortalama çekme testi değerleri

Şekil 4.36’da LMD ile üretilen ısılsız işlemsiz numuneler test edilerek ortalama uzama değerleri hesaplanmıştır. Diğer numunelere sırasıyla HIP ve 24-36 saatlik kriyojenik işlemler uygulanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde işlemsiz numunelerde uzamanın daha düşük olduğu söylenebilir. HIP işlemi sonrasında numunelerin uzaması artış göstermiştir. HIP işlemi sonrası kriyojenik işlem uygulanan 24 saatlik ve 36 saatlik numunelerde ise uzama değerlerinde 36 saatlik numuneler daha iyi uzama özelliğine sahiptir.

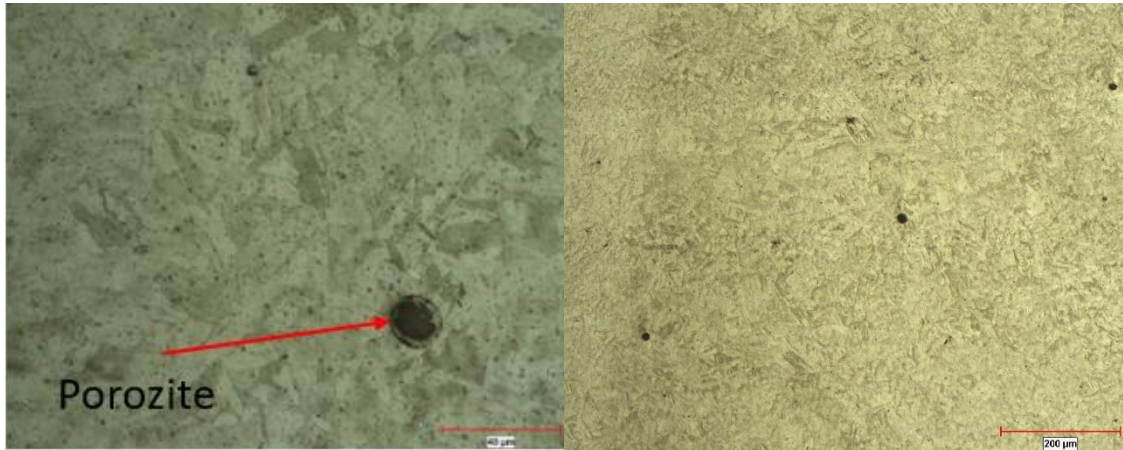


**Şekil 4.36.** Farklı ardıl işlemlerin ardından ortalama uzama değerleri

Kriyojenik işlemden tutulma süresi arttıkça uzamanın arttığı, mukavemetin ise değişmediği görülmektedir.

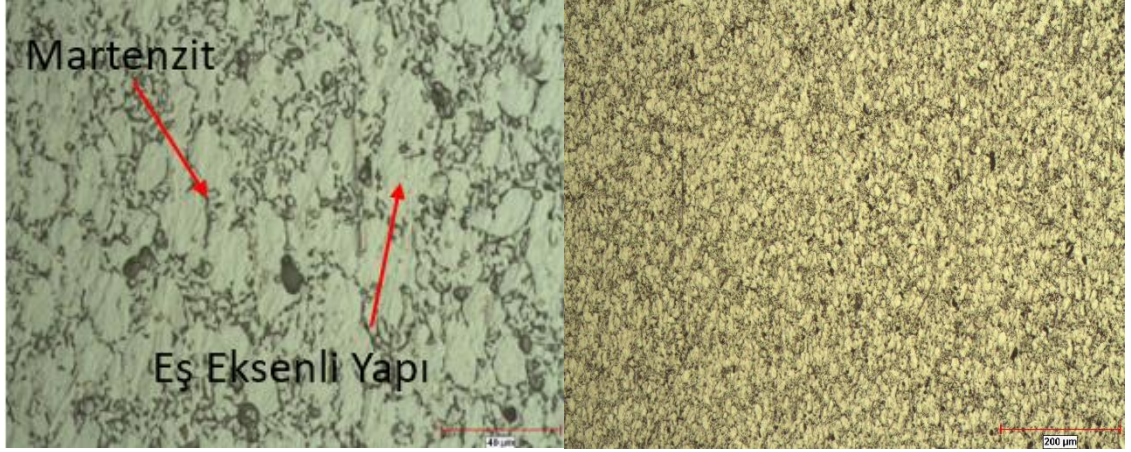
#### 4.8. Ardıl İşlemler Sonrası Mikroyapı İncelemesi

LMD ile üretilen ve ardıl işlem uygulanmayan Şekil 4.37’de gösterilen numunede mikroyapı incelemesinde büyük boyutlu poroziteler göze çarpmaktadır. Mikroyapıda açık renkli  $\alpha$  fazının yanı sıra koyu renkli beta fazları dikkat çekmektedir. Tane sınırları belirgin ve tane boyutları büyüktür. LMD prosesinde ikincil alfa fazları oluşmuş olup, beta bölgesinden havada soğutma neticesinde farklı yönlerde dağılım gösteren faz yapıları oluşmuştur.



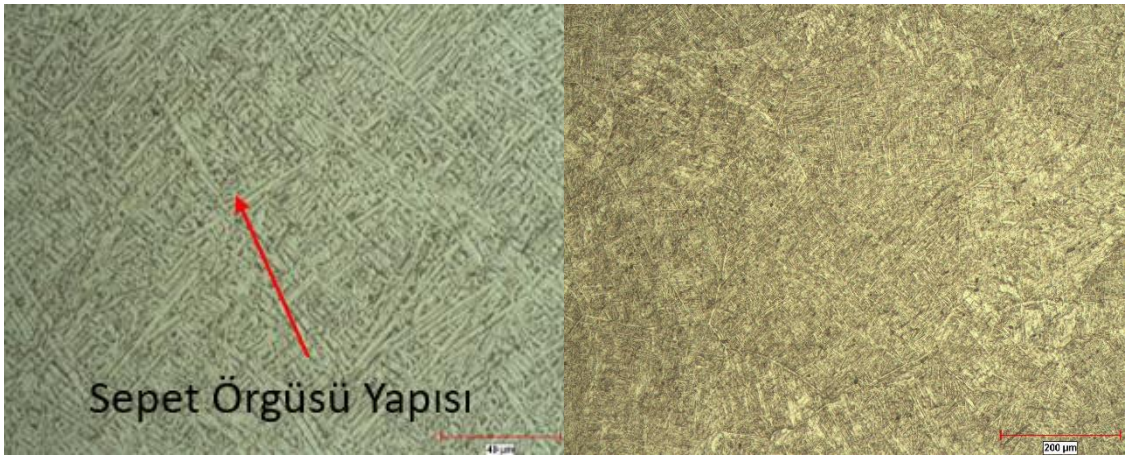
**Şekil.4.37** HIP ve ısı işlem uygulanmamış çekme numunesinin 500x ve 100x mikroyapı görüntüleri

HIP ve ısı işlem sırasında  $\beta$  sıcaklığının üzerinde kontrollü soğutma ile soğutulduğunda Şekil 4.38’de görülen alfa fazlarının yanında beta ve martenzitik alfa iğnesel yapıları görülmektedir. Beta sıcaklığının çok üzerine çıkılmadığından  $\alpha + \beta$  faz bölgesinde yapılan soğutma nedeniyle beta fazının bir kısmı lamelli iğnesel  $\alpha$  fazlarına dönüşmüştür. Bu nedenle mukavemetinde düşüş meydana gelmesi olağan görülmektedir.



**Şekil.4.38** HIP ve ısı işlem uygulanmış çekme numunesinin 500x ve 100x mikroyapı görüntüleri

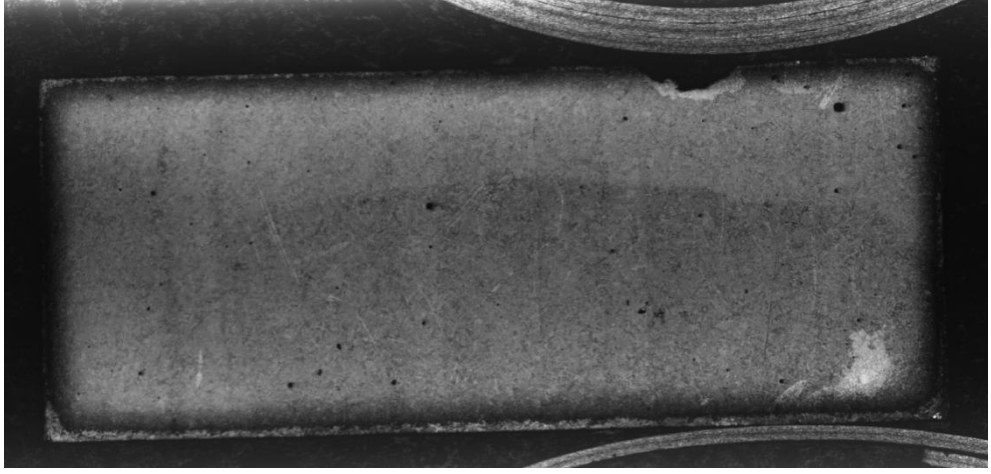
Kriyojenik işlem sonrası Şekil 4.39’da görülen birincil  $\beta$  tane sınırları yok edilerek  $\alpha$  tane sınırları çoklu yönlerde kısalır ve sepet örgüsü denilen yapıyı oluşturmuştur. Sepet örgüsü yapısı sünek yapıya sahiptir bu nedenle kırılma ve yorulma direnci yüksektir. Çalışma birincil alfa martenzitin tüm mikro yapılar arasında en yüksek dayanım değerine sahip olduğunu göstermektedir. Sütunlu  $\alpha + \beta$  mikro yapısının gücü, eş eksenli  $\alpha + \beta$ 'ninkinden daha yüksektir. Bununla birlikte, mukavemet ve süneklik zıt eğilimler sergiler. İnce iğne şeklindeki  $\alpha'$  martensit, plastisitede ciddi bir azalmaya sahiptir. Kriyojenik işlem sonrası martensit yapı tane sınırlarını küçültürken sepet örgüsü yapısına dönüşmesi nedeniyle mukavamette değişime neden olmadan plastisiteyi arttırdığı görülmüştür.



**Şekil.4.39** HIP ve ısı işlem sonrası kriyojenik işlem uygulanmış numunenin 500x ve 100x mikroyapı görüntüleri

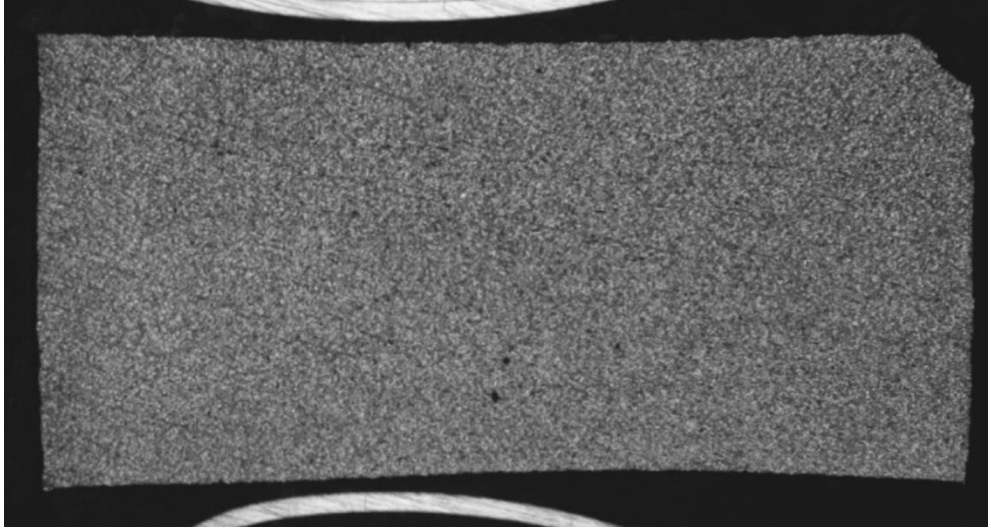
#### 4.9. Ardıl İşlemler Sonrası Porozite Ölçümü

Ardıl işlemlerden sonra çekme testi uygulanan numunelerin kesitleri parlatılarak mikroskop altında incelenmiştir. Numuneler 25x optik ile taranarak görüntüler birleştirilmiştir. Böylece tam kesit görüntüsü üzerinden porozite ölçümleri yapılmıştır. HIP uygulanmayan numune Şekil 4.40'ta gösterilmiştir. Bu numunede gözle görülür seviyede porozite bulunmaktadır.



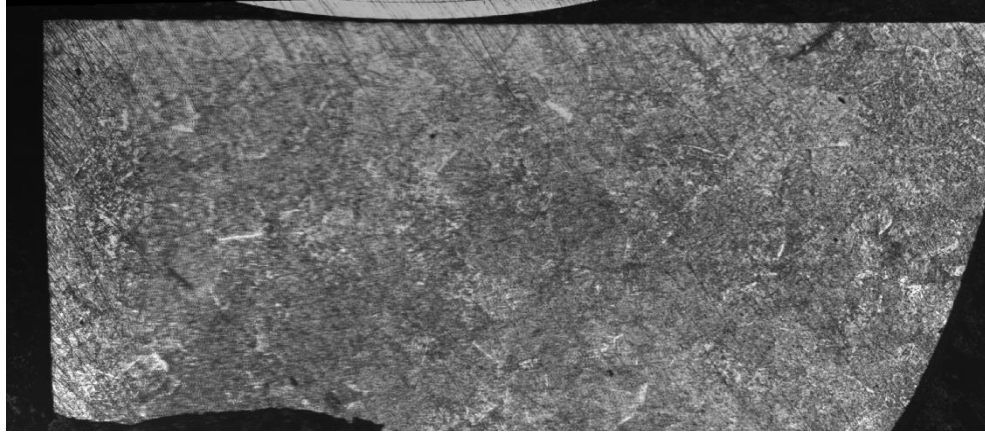
Şekil.4.40. HIP ve ısıl işlem uygulanmamış çekme numunesinin birleştirilmiş görüntüsü

Şekil 4.41'de ise HIP işlemi sonrası porozite seviyelerinde anlamlı bir düşüş gözlenmiştir. HIP yüksek basınç altında ve sıcaklık ile yapılan bir işlem olduğundan ardıl işlemlerde porozite miktarını ciddi oranda düşürdüğü görülmüştür.



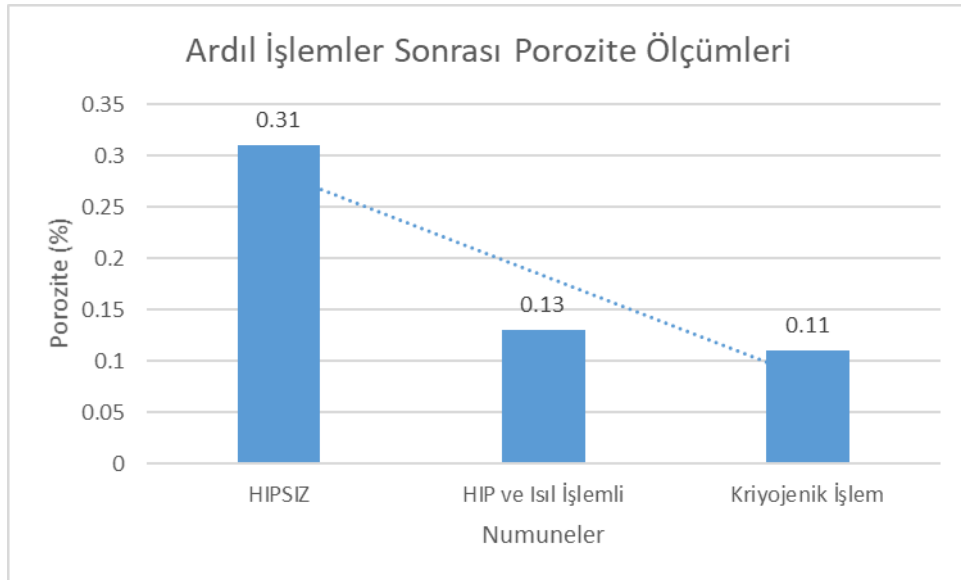
Şekil.4.41. HIP ve ısıl işlem uygulanmış çekme numunesinin birleştirilmiş görüntüsü

Şekil 4.42 kriyojenik işlemin porozitede anlamlı bir değişime neden olmadığını göstermektedir fakat çekme bölgesinde porozite miktarında bir miktar azalma olduğu söylenebilir.



**Şekil.4.42.** HIP ve ısıtım işlem sonrası kriyojenik işlem uygulanmış numunenin birleştirilmiş görüntüsü

Şekil 4.43’de her üç numunenin de porozite değerleri gösterilmiştir. HIP uygulanmış ve uygulanmamış numune arasında yaklaşık 3 kat fark bulunmaktadır. LMD üretimi sonrası HIP uygulamasının önemi bu değerler ile görülmektedir.



**Şekil.4.43.** Ardıl işlemler uygulanmış çekme numunelerin tam kesit porozite ölçüm sonuçları

Yapılan alışmalarda HIP işleminin poroziteleri büyük oranda yok ettiği görülmüştür. Kriyojenik işlemin mikroyapının düzenlenmesine, malzemenin daha sünek hale getirilmesine katkıda bulunduğu görülmüştür. Bu nedenle HIP sonrası kriyojenik işlem daha iyi yorulma direnci ve mekanik performans sağlamaktadır.

## 5. SONUÇ

LMD prosesi özellikle büyük parçaların üretiminde sıklıkla kullanılmaya başlanan bir eklemeli imalat yöntemidir. Prosesin titanyum gibi oksitlenmeye çok müsait bir toz ile gerçekleştirilmesi oldukça zordur. Ortamdaki nem, oksijen seviyesi gibi faktörlerin istenen düzeye getirilmesi için kontrollü atmosfere sahip kabin içerisinde yapılması zorunludur. Fakat AR-GE çalışmalarında kontrollü kabin yerine çadır tarzı modüler sistemler de kullanılmaktadır. Bu doktora tez çalışması kapsamında kabin ve kapalı bir tenteden oluşan bir hibrit kabin tasarımı yapılarak üretilmiştir. Bu hibrit kabin argon besleme ve sensörler yardımı ile kontrollü atmosfer sağlamaktadır. Hibrit kabin modüler ve düşük maliyetli bir sistem olmasına rağmen bazı dezavantajları da vardır. Robotu tamamıyla içine almadığı için robotun hareketi sırasında vakum yada şişirme gibi etkilere neden olmaktadır. Bu nedenle valfler ile hava kontrolü sağlanmaya çalışılmıştır. Oksijen seviyesinin toz yataklı sistemlerdeki gibi 10-100 ppm seviyelerinde sabit tutulması mümkün olmamıştır.

Prosesin optimizasyonunda cihazın efektif çalışma aralıkları tek katmanlı üretimlerle belirlenmiştir. Prosesin parametre optimizasyon çalışmalarında ise tek kaynak dikişli ve çok katmanlı üretimler yapılmıştır. Farklı lazer gücü, ilerleme hızı ve toz besleme hızına göre 12 seviye parametre seti oluşturulmuştur. Bu parametreler ile üretilen numuneler mikrosertlik, porozite, verimlilik, nüfuziyet ve mikroyapı özelliklerine göre incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ve girdi parametreleri ile yanıt yüzey metodu kullanılarak optimum parametre elde edilmiştir. Yanıt yüzey metodu yaklaşımı çok sayıda deneme yapmanın önüne geçerek, 12 numune ile istenen çıktıları sağlayan parametrenin bulunmasını sağlamıştır. Bu nedenle parametre optimizasyonunda oldukça faydalı bir araçtır.

Parametrelerin etkisi incelendiğinde mikrosertlik değerinin lazer gücü ve ilerleme hızına göre anlamlı olarak değişmediği gözlemlenmiştir. Farklı katman yüksekliklerinde de anlamlı değişim görülmemiştir. Lazer gücünün artışı ile nüfuziyette artış olduğu görülmüştür. Yüksek lazer güçlerinde de porozitenin azaldığı ve verimliliğin arttığı gözlemlenmiştir. Literatürde görülen LMD prosesi ile üretim sonrası oluşan çok fazlı yapılar mikroyapı incelemesinde ortaya çıkmıştır. Özellikle beta fazı yoğun olarak

bulunmaktadır ve gevrekliğe yol açmaktadır. Beta fazının yanısıra tüm numunelerde martenzitik iğnesel morfolojiye sahip yapılar görülmektedir. Porozitelerin HIP ile tamamıyla yok olmadığı da gözlemlenmiştir. Özellikle büyük boyutlu poroziteler için HIP parametrelerinin geliştirilmesi açık konulardan biridir.

Optimum parametre belirlendikten sonra duvar üretimi yapılarak çekme numuneleri üretilmiştir. Literatürde LMD prosesinde özellikle ısı işlemler sonrasında numune oryantasyonu açısından sonuçların değişmediği görülmüş olup bu nedenle sadece yatay numuneler ile testlere devam edilmiştir. Çekme testi numunelerine öncelikle 800 °C'de 200 MPa basınçta HIP ve sonrasında ısı işlem yapılmıştır. Bu işlem sonrasında parçanın mukavemetinde azalma fakat uzamasında artış gerçekleşmiştir. LMD'de üretildiği halinden çok daha yüksek uzamaya sahip malzeme elde edilmiştir. Son katmanlara doğru bazı çekme numunelerinde uzamanın düşmesi porozitelerin HIP sonrasında tam anlamıyla giderilemediğini göstermektedir. Bu nedenle çekme numunelerine mikroyapı incelemesi ve porozite ölçümü yapılmıştır. HIP numuneleri sonrasında mekanik özellikleri ve mikroyapıyı iyileştirmek için kriyojenik işlem uygulanmıştır. 24 saatlik kriyojenik işlem sonrasında uzama miktarında %4,68'dan % 5,56'ya, 36 saatlik kriyojenik işlem sonrasında %6,17'ye artış gözlenmiştir. Özellikle kriyojenik işlem sonrasında uzama miktarında artış, mukavemeti düşürmeden gerçekleşmiştir.

Bu çalışma göstermektedir ki özellikle havacılık sektöründe kriyojenik işlem mukavemeti düşürmeden uzamayı arttırabilecek bir yöntemdir. Kullanımı yaygın olmasa da sonraki süreçte yaygınlaşarak HIP sonrası yorulma ve kırılma performansını artırma prosesi olarak kullanılacağı öngörülmektedir.



## KAYNAKLAR

Ahn, D.G. (2021). Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art. *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.* 8, 703–742 <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7>

Anonim. (2021). 3D Hubs, *3D Printing Trends Report*

ASTM F1108 Standard Specification for Titanium-6Aluminum-4Vanadium Alloy Castings for Surgical Implants

ASTM F1472 Standard Specification for Wrought Titanium-6Aluminum-4Vanadium Alloy for Surgical Implant Applications

ASTM F2924-14 Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion

ASTM F3187-16 Standard Guide for Directed Energy Deposition of Metals

Berto F., Plessis A. (2021). Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*, Volume 209. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>

Bıyıklı, M., Karagöz, T., Çallı, M., Muslim, T., Özalp, A. A., Bayram, A. (2022). Single track geometry prediction of Laser Metal Deposited 316L-Si via Multi-physics modelling and Regression analysis with experimental validation. *Metals and Materials International*. doi:10.1007/s12540-022-01243-3

Blakey-Milner B., Gradl P., Snedden G., Brooks M., Pitot J., Lopez E., Leary M., Calderón, L.A., Graf, B., Rehmer, B., Petrat, T., Skrotzki, B. and Rethmeier, M. (2022). Characterization of Ti–6Al–4V Fabricated by Multilayer Laser Powder-Based Directed Energy Deposition. *Adv. Eng. Mater.*, 24: 2101333. <https://doi.org/10.1002/adem.202101333>

Chen, Y. and Liou, F. W. (2018). Additive Manufacturing of Metal Functionally Graded Materials: A Review. *Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium* pp. 1215-1231, University of Texas at Austin, Aug 2018.

Çallı, M., Onaylı, A., Karagöz, T., Bıyıklı, M. (2020). An Application Of Directed Energy Deposition Manufacturing Method On An Automotive Component. *5. International Conference on Material Science and Technology (IMSTEC 2020)*, (s. 175-177).

Corral Bobadilla, M., Lorza, R.L., Escribano García, R., Somovilla Gomez, F., & Vergara González, E. 2019. Coagulation: Determination of Key Operating Parameters by Multi-Response Surface Methodology Using Desirability Functions. *Water*.

Dass A., Moridi A. (2019). State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design. *Coatings*. 2019; 9(7):418. <https://doi.org/10.3390/coatings9070418>

Debroy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science* Volume 92, Pages 112-224. doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001,

DIN 50125 Testing of Metallic Materials - Standard Test for Tensile Test Parts

Donachie Jr., M. (2000). Titanium: A Technical Guide. 2nd Edition, *ASM International, Materials Park*, 369 p.

Eboo, M., Lindemanis, A.E. (1983). Advances In Laser cladding Technology. *Proc. ICALEO '83, SPIE*, vol. 527, pp. 86-94

Falkowska A., Seweryn A., Skrodzki M. (2020). Strength Properties of a Porous Titanium Alloy Ti6Al4V with Diamond Structure Obtained by Laser Power Bed Fusion (LPBF). *Materials*. 2020; 13(22):5138. <https://doi.org/10.3390/ma13225138>

Frazier WR. (2014). Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance* DOI:10.1007/s11665-014-0958-z

Gokuldoss P.K., Kolla S., Eckert J. (2017). Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines. *Materials*; 10(6):672. <https://doi.org/10.3390/ma10060672>

Gong, L., Zhao, W., Ren, F. (2019). Experimental study on surface integrity in cryogenic milling of 35CrMnSiA high-strength steel. *Int J Adv Manuf Technol* 103, 605–615. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03577-6>

Gradl, P., Mireles, O. and Andrews, N. (2019). Introduction to Additive Manufacturing for Propulsion Systems. *AIAA Propulsion and Energy Forum 2019*. Indianapolis, IN.

Greitemeier D., Palm F., Syassen F., Melz T. (2017). Fatigue performance of additive manufactured TiAl6V4 using electron and laser beam melting. *International Journal of Fatigue* Volume 94, Part 2, Pages 211-2 <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.05.001>

Gallaraga, H., Lados D., Zhai Y. (2016). Microstructure, static properties, and fatigue crack growth mechanisms in Ti-6Al-4V fabricated by additive manufacturing: LENS and EBM. *Engineering Failure Analysis* Volume 69, November 2016, Pages 3-14 <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.05.036>

ISO/ASTM 52900:2021(E)). Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary

Karolewska, K. Ligaj, B. Boroński, D. (2020). Strain Analysis of Ti6Al4V Titanium Alloy Samples Using Digital Image Correlation. *Materials*, 13, 3398. <https://doi.org/10.3390/ma13153398>

Kasperovich G., Hausmann J., (2015). Improvement of fatigue resistance and ductility of TiAl6V4 processed by selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology* Volume 220, Pages 202-214 <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.01.025>

Kelly, S. (2004). Thermal and Microstructure Modeling of Metal Deposition Processes with Application to Ti6Al4V. Ph.D. Thesis, Faculty of Virginia, Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, USA.

Kovchik, Y., Babkin, K.D., Rakhmatulina, Z. A. (2020) Distortion compensation in LMD process. *Materials Today: Proceedings*, Volume 30, Part 3, 2020, Pages 568-571, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.136>

Liu W., DuPont J. (2003). FGM Fabrication of functionally graded TiC/Ti composites by Laser Engineered Net Shaping. *Materials Science, Engineering Scripta Materialia*

Masete M. S., Muchavi N. S., Chikosha S. (2018). The effect of specimen geometry on tensile properties of titanium alloy metal sheet. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering* 430(1):012015 DOI:10.1088/1757-899X/430/1/012015

Magnus A., Eklund A. (2018). Heat treatment of PM parts by Hot Isostatic Pressing Metal Powder Report Volume 73, Issue 3, May–June 2018, Pages 163-169 <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2018.01.001>

Majumdar J.D. (2013). Mechanical and Electro-Chemical Properties of Laser Surface Alloyed AISI 304 Stainless Steel with WC+Ni+NiCr. *Physics Procedia* Volume 41, 2013, Pages 335-345

Mazzucato, F.; Aversa, A.; Doglione, R.; Biamino, S.; Valente, A.; Lombardi, M. (2019). Influence of Process Parameters and Deposition Strategy on Laser Metal Deposition of 316L Powder. *Metals*, 9, 1160. <https://doi.org/10.3390/met9111160>

Meltio. (2023). <https://meltio3d.com/technology/> (Son Erişim: 30.04.2023)

Poyraz, Ö., Kuşhan, M. (2018). Investigation of the effect of different process parameters for laser additive manufacturing of metals. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 729-742. doi:10.17341/gazimmfd.416479

Shunyu L. (2019). Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review *Materials & Design* Volume 164, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107552>

Singh, R. and Singh, B. (2011). Comparison of Cryo treatment effect on Machining characteristics of Titanium in Electric Discharge machining. *Int. J. Automotive and Mechanical Eng.*, 3, 239–248

Sokrani A., Al-Samarrai I., Newton S. (2016). Hybrid cryogenic MQL for improving tool life in machining of Ti-6Al-4V titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes* 43:229-243 DOI:10.1016/j.jmapro.2019.05.006

Song J., (2010). Research Progress of Laser Cladding Forming Technology. *Journal of Mechanical Engineering* 46(14) doi:10.3901/jme.2010.14.029

Statista, (2023). Share of sales revenue of the global additive manufacturing market by industry 2019 report.

Sun, Z. (2019). Additive manufacturing of austenitic alloys with high strength and high ductility by selective laser melting. Doctoral thesis, Nanyang Technological University, Singapore. DOI: 10.32657/10356/143022

Tozlu M. (2022). Tİ-6AL-4V Alaşımının Toz Beslemeli Lazer Yönlendirilmiş Enerji Yığılma Eklemeli İmalat Sürecinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Benzetimi. Doktora Tezi. Hitit Üniversitesi.

Vijayakumar M., Vairavan M., Joshua N., Pandiyan V., Arunprasath K. (2022). Investigation on fusion of Boron Nitride reinforced aluminium composite by cryogenic milling. *Materials Today: Proceedings* 66(4) DOI:10.1016/j.matpr.2022.03.542

Zhong C., Liu J., Zhao T., Schopphoven T., Fu J., Gasser A., Schleifenbaum J.H. (2019). Laser Metal Deposition of Ti6Al4V—A Brief Review. *Appl. Sci.* 2020, 10(3), 764 <https://doi.org/10.3390/app10030764>

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Taner KARAGÖZ  
Doğum Yeri ve Tarihi : Burgaz / 26.05.1987  
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu  
Lise : Gazi Anadolu Lisesi  
Lisans : Dokuz Eylül Üniversitesi  
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Coşkunöz Holding

İletişim (e-posta) : tkaragoz@coskunoza.com.tr

Yayınları :

Bıyıklı, M., Karagöz, T., Çallı, M., Muslim, T., Özalp, A. A., Bayram, A. (2022). Single track geometry prediction of Laser Metal Deposited 316L-Si via Multi-physics modelling and Regression analysis with experimental validation. *Metals and Materials International*. doi:10.1007/s12540-022-01243-3

Sezer, P., Kurama, S., Karagöz, T. ., & Gasan, H. (2021). An effective parameter in the deposition of 17-4PH powder with LMD technique: scanning speed. *Journal of Additive Manufacturing Technologies*, 1(2), 551. <https://doi.org/10.18416/JAMTECH.2111551>

Muslim, T., Karagoz, T. ., Ozkok, R., Yilmaz, O. ., & Kas, M. (2021). Influence of laser energy density on geometrical forms produced by laser metal deposition of PH 13-8 Mo stainless steel. *Journal of Additive Manufacturing Technologies*, 1(3), 591. <https://doi.org/10.18416/JAMTECH.2111591>

Karagoz, T. (2021) Future And Potential Uses Of Additive Manufacturing Using Laser Metal Deposition In Automotive. *Additive Manufacturing User Group 2021 konferans sunumu*, Amerika.