

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI**

**Ti6Al4V ALAŞIMININ SEÇİCİ LAZER ERGİTME
YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİNDE BELİRLİ ÜRETİM
PARAMETRELERİNİN MALZEME ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİ**

**Hazırlayan
Dilara Selma AYDIN**

**Danışman
Doç. Dr. Çağrı Vakkas YILDIRIM**

Yüksek Lisans Tezi

**Haziran 2022
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI**

**Tİ6AL4V ALAŞIMININ SEÇİCİ LAZER ERGİTME
YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİNDE BELİRLİ ÜRETİM
PARAMETRELERİNİN MALZEME ÖZELLİKLERİNE
ETKİSİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Dilara Selma AYDIN**

**Danışman
Doç. Dr. Çağrı Vakkas YILDIRIM**

**Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından
FYL-2021-11339 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Haziran 2022
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Dilara Selma AYDIN

İmza



“Ti6Al4V Alaşımının Seçici Lazer Ergitme Yöntemi ile Üretilmesinde Belirli Üretim Parametrelerinin Malzeme Özelliklerine Etkisi” adlı Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Dilara Selma AYDIN

İmza

Danışman

Doç. Dr. Çağrı Vakkas YILDIRIM

İmza

Sivil Havacılık ABD Başkanı

Prof. Dr. İlke TÜRKMEN

İmza

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve çalışmalarım süresince öncelikle bir akademisyen ve bireysel olarak etik titizliği ile örnek aldığım, her türlü yardımı ve fedakârlığı sağlayan, bilgi ve tecrübesiyle her zaman yol gösteren değerli hocam Doç. Dr. Çağrı Vakkas YILDIRIM'a desteklerinden dolayı teşekkürü borç bilirim. Ayrıca, numunelerin analizi esnasında alt yapı imkanlarını kullanmama izin veren Düzce Üniversitesi öğretim elemanı Öğr. Gör. Dr. Şenol ŞİRİN'e teşekkürü borç bilirim.

Çalışmalarım sırasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen; annem Sibel AYDIN'a, babam Yusuf AYDIN'a ve değerli kardeşlerime, en az ailem kadar maddi ve manevi desteği olan abim Mahmut KAVUŞ'a, bana olan desteğini ve sabrını esirgemeyen Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Öğr. Gör. Dr. Kadir Münir ERCÜMEN'e ve çok değerli arkadaşlarım Betül KIRTILOĞLU, Hurican ÖZEN ve Kübra UÇAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Dilara Selma AYDIN

Haziran 2022, KAYSERİ

Ti6Al4V ALAŞIMININ SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİNDE BELİRLİ ÜRETİM PARAMETRELERİNİN MALZEME ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Dilara Selma AYDIN

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2022
Danışman: Doç. Dr. Çağrı Vakkas YILDIRIM**

ÖZET

Eklemeli imalat yöntemi, bilgisayar kontrolü yardımıyla üç boyutlu katı model verilerini kullanan modern bir imalat yöntemidir. Üretimde malzeme katman katman eklenerek nihai şeklin oluşturulması temel hedeftir. Eklemeli imalat kendi içerisinde birçok alt yöntemden oluşmaktadır. Bu yöntemleri malzeme tipi, parça boyutları, kullanım amacı, çalışma prensibi, hassasiyet, üretim sayısı ve hızı gibi birçok kritere bağlıdır. Eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan seçici lazer ergitme (SLM), sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Ancak, bu süreci doğrudan ve dolaylı parametreler dahil olmak üzere birçok faktör etkilemektedir. Bu nedenle, üretim kalitesinin artırılması için optimum üretim parametrelerinin elde edilmesi oldukça önem arz etmektedir. Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımının dört farklı üretim parametresi ve seviyelerinin mekanik özellikler ve yüzey kalitesi üzerindeki etkisinin incelenmiştir. Deney tasarımı, Taguchi L₁₆ dikey dizini kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Proses parametrelerinin sonuç üzerindeki etkisini göstermek için ANOVA analizi ve gelecekte yapılacak benzer araştırmaları desteklemek için regresyon analizi yapılmıştır. Deney sonuçlarının analiziyle birlikte optimum çekme dayanım değerine 75 µm lazer odak çapı, 60 µm tarama mesafesi, 300 mm/s tarama hızı ve 230 W lazer gücü; elastisite modülü değerine 80 µm lazer odak çapı, 60 µm tarama mesafesi, 450 mm/s tarama hızı ve 250 W lazer gücü; uzama miktarı değerine 90 µm lazer odak çapı, 150 µm tarama mesafesi, 450 mm/s tarama hızı ve 230 W lazer gücü; ortalama yüzey pürüzlülük değerine 75 µm lazer odak çapı, 60 µm tarama mesafesi, 150 mm/s tarama hızı ve 250 W lazer gücü kombinasyonları kullanılarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, Mikrosertlik, Seçici lazer ergitme, Ti6Al4V, Taguchi metodu, Yüzey kalitesi

**THE EFFECT OF SPECIFIC PRODUCTION PARAMETERS ON MATERIAL
PROPERTIES IN THE PRODUCTION OF Ti6Al4V ALLOY BY SELECTIVE
LASER MELTING METHOD**

Dilara Selma AYDIN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master Thesis, June 2022

Supervisor: Assoc. Prof. Çağrı Vakkas YILDIRIM

ABSTRACT

Additive manufacturing is a modern manufacturing method that uses three-dimensional solid model data with the help of computer control. The main goal is to create the final shape by adding material layer by layer in production. Additive manufacturing consists of many sub-methods in itself. These methods depend on many criteria such as material type, part dimensions, purpose of use, working principle, precision, number of production and speed. Selective laser melting (SLM), one of the additive manufacturing methods, is a frequently preferred method. However, many factors affect this process, including direct and indirect parameters. For this reason, it is very important to obtain optimum production parameters in order to increase the production quality. In this study, the effects of four different production parameters and levels of Ti6Al4V alloy on mechanical properties and surface quality were investigated. Experimental design was carried out using the Taguchi L16 vertical array. ANOVA analysis was performed to show the effect of process parameters on the outcome and regression analysis to support similar research in the future. With the analysis of the test results, the optimum tensile strength value is 75 μm laser focal diameter, 60 μm scanning distance, 300 mm/s scanning speed and 230 W laser power; to modulus of elasticity value of 80 μm laser focal diameter, 60 μm scanning distance, 450 mm/s scanning speed and 250 W laser power; 90 μm laser focal diameter, 150 μm scanning distance, 450 mm/s scanning speed and 230 W laser power; The average surface roughness value was obtained using a combination of 75 μm laser focal diameter, 60 μm scanning distance, 150 mm/s scanning speed and 250 W laser power.

Keywords: Additive manufacturing, Microhardness, Selective laser melting, Surface quality, Ti6Al4V, Taguchi method

İÇİNDEKİLER

Ti6Al4V ALAŞIMININ SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMESİNDE BELİRLİ ÜRETİM PARAMETRELERİNİN MALZEME ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	ii
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	xi
TABLOLAR LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

TİTANYUM ALAŞIMLARI VE HAVACILIKTA KULLANIMI

1.1. Titanyum Elementinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	5
1.2. Titanyum Alaşımları.....	7
1.2.1. Ti-6Al-4V Alaşımı	8
1.3. Titanyum ve Alaşımlarının Havacılık Uygulamaları	8

2. BÖLÜM

KURAMSAL TEMELLER

2.1. Eklemeli İmalat Yöntemi.....	10
2.2. Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Avantajları ve Dezavantajları.....	11
2.3. Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Sınıflandırılması.....	12
2.3.1. Eriyik Yığılma Yöntemi (FDM).....	13
2.3.2. Stereolitografi Yöntemi (SLA).....	14
2.3.3. Elektron Işınli Ergitme Yöntemi (EBM)	15
2.3.4. Seçici lazer Sinterleme Yöntemi (SLS)	15
2.3.5. Direk Metal Lazer Sinterleme Yöntemi (DMLS)	16
2.3.6. Seçici Lazer Ergitme Yöntemi (SLM).....	17

3. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1. Literatür Değerlendirmesi.....	19
-------------------------------------	----

4. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

4.2. Deney Numunelerinin Üretimi.....	28
4.3. Uygulanan Deneyler ve Kullanılan Cihazlar	30
4.3.1. Çekme Deneyi.....	30
4.3.2. Mikrosertlik Ölçümü	31
4.3.3. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü.....	32
4.4. Deney Tasarımı	34
4.4.1. Deney sonuçları için ANOVA analizi.....	36
4.4.2. Deney sonuçları için regresyon analizi.....	36

5. BÖLÜM

BULGULAR

5.1. SLM İşlem Parametrelerinin Optimize Edilmesi.....	38
5.1.1. Çekme Dayanımı.....	39
5.1.1.1. Çekme deneyleri için Sinyal/Gürültü Oranlarının Analizi.....	39
5.1.1.2. Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	41
5.1.1.3. Çekme Deneyi Sonuçları için ANOVA Analizi	44
5.1.1.4. Çekme Deneyi Sonuçları için Regresyon Analizi.....	45
5.1.2. Elastisite Modülü	46
5.1.2.1. Elastisite Modülü için Sinyal/Gürültü Oranlarının Analizi	46
5.1.2.2. Elastisite Modülü için Deney Sonuçlarının Analizi	48
5.1.2.3. Elastisite Modülü için ANOVA Analizi	52
5.1.2.4. Elastisite Modülü için Regresyon Analizi.....	52
5.1.3. % Uzama Miktarı	54
5.1.3.1. % Uzama değerleri için Sinyal/Gürültü Oranlarının Analiz Edilmesi.....	54
5.1.3.2. % Uzama Miktarı için Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	56
5.1.3.3. % Uzama Miktarı için ANOVA Analizi	59
5.1.3.4. % Uzama Miktarı için Regresyon Analizi.....	60

5.1.4. Mikrosertlik.....	62
5.1.4.1 Mikrosertlik değerleri için Sinyal/Gürültü Oranlarının Analizi	62
5.1.4.2. Mikrosertlik için Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	64
5.1.4.3. Mikrosertlik için ANOVA Analizi.....	67
5.1.4.4. Mikrosertlik Değeri için Regresyon Analizi.....	68
5.1.5. Yüzey Pürüzlülüğü	69
5.1.5.1. Yüzey Pürüzlülük değerleri için Sinyal/Gürültü Oranlarının Analizi	69
5.1.5.2. Yüzey Pürüzlülüğü için Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	71
5.1.5.3. Yüzey Pürüzlülüğü için ANOVA Analizi	75
5.1.5.4. Yüzey Pürüzlülük Değeri için Regresyon Analizi.....	75

6. BÖLÜM

TARTIŞMA- SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Tartışma	77
6.2. Sonuçlar	77
6.3. Öneriler	80
KAYNAKÇA	81
ÖZGEÇMİŞ.....	92

KISALTMALAR

ANOVA	: Varyans Analizi
Ar	: Argon
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri
BJ	: Bağlayıcı Püskürtme Yöntemi
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
DLP	: Dijital Işık Yöntemi
DMLS	: Direk Metal Lazer Sinterleme
EKTAM	: Eklemeli İmalat Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi
EBM	: Elektron Işın Ergitme
H	: Hidrojen
HIP	: Sıcak İzostatik Basınç
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
HSP	: Hegzagonal Sıkı Paket
FDM	: Eriyik Yığma Yöntemi
KO	: Kareler Ortalaması
KT	: Kareler Toplamı
LENS	: Lazerle Net Şekillendirme
LOM	: Lamine Nesne Üretimi
N	: Azot
PJ	: Çoklu Püskürtme (Polyjet)
Ra	: Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
SLA	: Stereolitografi Yöntemi
SLM	: Seçici Lazer Ergitme Yöntemi
SLS	: Seçici Lazer Sinterleme Yöntemi
S/N	: Sinyal/Gürültü Oranı
STL	: Stereolithography

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	Eklemeli imalat yöntemlerimin karşılaştırılması.....	12
Tablo 4.1.	Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi (%).....	28
Tablo 4.2.	Numune üretimi için SLM üretim parametreleri	28
Tablo 4.3.	Deneylerde kullanılan yüzey pürüzlülük ölçüm cihazının teknik özellikleri	33
Tablo 4.4.	Deneylere ait kontrol parametreleri ve seviye değerleri	35
Tablo 4.5.	Taguchi L ₁₆ Deney Tasarımı.....	35
Tablo 5.1.	Deney tasarımında kullanılan kontrol faktörleri ve bu faktörlerin seviye değerleri	39
Tablo 5.2.	Taguchi L ₁₆ Deney Tasarımı ve çekme dayanımına ait S/N oranları.....	40
Tablo 5.3.	Çekme Deneyi için S/N oranı yanıt tablosu.....	40
Tablo 5.4.	Çekme dayanımı için ANOVA sonuçları	44
Tablo 5.5.	Deney tasarımında kullanılan kontrol faktörleri ve bu faktörlerin seviye değerleri	47
Tablo 5.6.	Taguchi L ₁₆ Deney Tasarımı ve elastisite modülüne ait S/N oranları.....	47
Tablo 5.7.	Elastisite modülü için S/N yanıt tablosu.....	48
Tablo 5.8.	Elastisite modülü için ANOVA sonuçları	52
Tablo 5.9.	Deney tasarımında kullanılan kontrol faktörleri ve bu faktörlerin seviye değerleri	55
Tablo 5.10.	Taguchi L ₁₆ Deney Tasarımı ve deneysel sonuçlar	55
Tablo 5.11.	% Uzama miktarı için S/N yanıt tablosu	56
Tablo 5.12.	% Uzama miktarı için ANOVA sonuçları	60
Tablo 5.13.	Deney tasarımında kullanılan kontrol faktörleri ve bu faktörlerin seviye değerleri	62
Tablo 5.14.	Taguchi L ₁₆ Deney Tasarımı ve deneysel sonuçlar	63
Tablo 5.15.	Mikrosertlik için S/N yanıt tablosu.....	63
Tablo 5.16.	Mikrosertlik için ANOVA sonuçları	67
Tablo 5.17.	Deney tasarımında kullanılan kontrol faktörleri ve bu faktörlerin seviye değerleri	70
Tablo 5.18.	Taguchi L ₁₆ Deney Tasarımı ve deneysel sonuçlar	70
Tablo 5.19.	Yüzey pürüzlülüğü için S/N yanıt tablosu.....	71
Tablo 5.20.	Ortalama yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları.....	75

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Titanyum mikroyapısının sıcaklık ile değişimi	4
Şekil 1.2.	Titanyum faz diyagramı	5
Şekil 2.1.	Eklemeli imalat yönteminin işlem akışı	11
Şekil 2.2.	FDM yönteminin çalışma prensibi	14
Şekil 2.3.	SLA yönteminin çalışma prensibi	14
Şekil 2.4.	EBM yönteminin çalışma prensibi	15
Şekil 2.5.	SLS yönteminin çalışma prensibi	16
Şekil 2.6.	SLM yönteminin çalışma prensibi.....	18
Şekil 4.1.	Numunelere ait teknik çizim	27
Şekil 4.2.	Ermaksan Ena Vision 250 model 3 boyutlu yazıcı	29
Şekil 4.3.	SLM yöntemiyle üretilen iş parçaları	30
Şekil 4.4.	MCK 10 elektronik çekme testi Cihazı ve numunenin bağlanması	31
Şekil 4.5.	Metkom Duroline-M Vickers Mikro Sertlik Test Cihazı	32
Şekil 4.6.	Mahr Marsurf PS10 taşınabilir Yüzey Pürüzlülük Cihazı.....	33
Şekil 4.7.	DeneySEL prosedür	36
Şekil 5.1.	Çekme Dayanımı için kontrol faktörlerinin S/N oranına etkisi.....	41
Şekil 5.2.	SLM parametrelerinin çekme dayanımı üzerindeki etkisi: (a) tarama hızı ve lazer gücü, (b) tarama mesafesi ve lazer odak çapı	43
Şekil 5.3.	Gerçek ölçümler ile tahmin sonuçlarının karşılaştırılması	46
Şekil 5.4.	Elastisite modülü için kontrol faktörlerinin S/N oranına etkisi.....	49
Şekil 5.5.	SLM parametrelerinin elastisite modülü üzerindeki etkisi: (a) tarama hızı ve lazer gücü, (b) tarama mesafesi ve lazer odak çapı	50
Şekil 5.6.	Gerçek ölçümler ile tahmini sonuçların karşılaştırılması.....	54
Şekil 5.7.	%Uzama miktarı için kontrol faktörlerinin S/N oranına etkisi	57
Şekil 5.8.	SLM parametrelerinin % uzama miktarı üzerindeki etkisi: (a) tarama hızı ve lazer gücü, (b) tarama mesafesi ve lazer odak çapı	58
Şekil 5.9.	Gerçek ölçümler ile tahmini sonuçların karşılaştırılması	61
Şekil 5.10.	Mikrosertlik değerleri için kontrol faktörlerinin S/N oranına etkisi	64
Şekil 5.11.	SLM parametrelerinin mikrosertlik üzerindeki etkisi: (a) tarama hızı ve lazer gücü, (b) tarama mesafesi ve lazer odak çapı	66
Şekil 5.12.	Gerçek ölçümler ile tahmini sonuçların karşılaştırılması.....	69

Şekil 5.13.	Ortalama yüzey pürüzlülüğü için kontrol faktörlerinin S/N oranına etkisi	72
Şekil 5.14.	SLM parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi: (a) tarama hızı ve lazer gücü, (b) tarama mesafesi ve lazer odak çapı	73
Şekil 5.15.	Gerçek ölçümler ile tahmini sonuçların karşılaştırılması.....	76



GİRİŞ

Titanyum elementi yer kabuğunun yaklaşık %0.6'sını oluşturmaktadır. Titanyum, ilk olarak 1791 yılında William Gregor tarafından keşfedilmiştir. Doğada saf halde bulunmaz ve genellikle rutile (TiO_2) ve ilmenit (FeTiO_3) formunda bulunmaktadır. Titanyum elementi dünyada alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra en çok bulunan metaldir [1-3]. Titanyumu ve alaşımlarını cazip kılan üstün korozyon direnci, antimagnetik özelliği, iyi mekanik özelliklerine rağmen düşük yoğunluğu, uzun servis ömrü, kompozit yapılarla rekabet edici özelliklere sahip olması, yorulma ve yüksek sıcaklık performansdır [4]. Bu üstün özelliklere rağmen kullanım alanının belirli seviyede kalmasının öne çıkan sebeplerinden biri maliyetinin yüksek olması ve işlenmesinin mevcut teknoloji ile yapılmasıdır [5]. Buna rağmen havacılık ve sağlık sektörlerinde yaygın olarak kullanılan önemli bir metaldir. Titanyum ve alaşımları sağlık alanında, iyi yorulma dayanımı ve biyouyumluluk gibi özellikler nedeniyle tercih edilirken, havacılıkta yüksek korozyon direnci ve diğer hafif metal alaşımlarına göre yüksek dayanıma sahip olduğu için tercih edilmektedir. Bu sektörlerin yanı sıra mimari, kimya, denizcilik ve otomotiv gibi birçok alanda titanyum ve alaşımları tercih edilmektedir. Titanyum alaşımları arasında Ti-6Al-4V (%6 alüminyum, %4 vanadyum, %90 titanyum) alışımlı endüstriyel uygulamalarda kullanım açısından büyük bir paya sahiptir [6-8].

Titanyum alaşımları yoğun olarak geleneksel imalat yöntemleriyle üretilmekte ve şekillendirilmektedir. Öte yandan bu alaşımlar, işlenmesi zor malzemelerdir. İşlenmesi zor metal olmasının sebebi düşük kimyasal kararlılığı, düşük elastisite modülü, düşük ısı iletkenliği ve yüksek sıcaklıklarda bile sertliğini korumalarından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle titanyum alaşımlarının işlenmesi, maliyeti etkileyen faktörler arasındadır [8-10]. Ayrıca, karmaşık geometrili parçaların istendiği sektörlerde titanyum alaşımlarının geleneksel imalatla işlenmesi oldukça zor olmaktadır [9]. Son yıllarda, kullanımı yaygınlaşan yeni nesil üretim yöntemi olan eklemeli imalat yöntemi tercih edilmektedir.

Eklemi imalat yöntemi en anlaşılır tanımı ile malzemenin katmanlar halinde birleştirilmesiyle üç boyutlu parçanın üretilmesi prensibine dayalı bir üretim yöntemidir.

Eklemeli imalat, geleneksel imalat yöntemlerinin elverişsiz ya da sınırlı kaldığı parçaların üretimini kolaylaştırmayı sağlayan yöntem olarak kullanılmaktadır [11]. Bu yöntem, karmaşık geometrik şekilli parçaların üretimini kolaylaştırması, tasarım esnekliği sağlaması, parçaların hızlı üretilmesinden dolayı üretim süresini kısaltması, üretim sırasında atık malzeme miktarını minimuma indirmesi, takım ve kalıp gibi üretim maliyetini etkileyen unsurları azaltması sebebiyle son yıllarda endüstride önemli yer tutmaktadır [12,13]. Eklemeli imalat, temel olarak üç boyutlu bir model dosyası oluşturulmakta ve ardından modelin üretimi için gerekli araçlar uygun bilgisayar yazılımı ile oluşturulmaktadır. Yazılım, STL uzantılı bir kod oluşturmaktadır. Daha sonra tercih edilen üretim sürecine göre uygun cihaz seçilmekte ve parametreler belirlenerek üretim gerçekleştirilmektedir. Seçilen malzeme, istenen ürünün geometrik şekli, iletkenliği, sıcaklık dayanımı ve mukavemeti gibi fiziksel özellik gereksinimleri yöntemin seçiminde önem arz etmektedir [11]. Parçadan bütüne doğru imalatı prensip edinen eklemeli imalatın birçok alt yöntemi mevcuttur. Bu yöntemler arasında seçici lazer sinterleme (SLS), elektron ışın ergitme (EBM), seçici lazer ergitme (SLM), eriyik yığma yöntemi (FDM) vb. gibi yöntemler ilk akla gelenlerdir. Bu yöntemler, malzemenin cinsi, parça boyutları, kullanım amaçları, çalışma prensipleri, sundukları hassasiyet ve malzeme özellikleri, üretim adedi ve hızı gibi birçok kritere bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Eklemeli imalat yöntemleri arasında yer alan SLM sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Bunun en önemli nedenleri iyi seviyede ölçüsel doğruluk, mekanik özellikler açısından iyileştirmeler sunması ve karışık yüksek geometrik sınırlamasını ortadan kaldırması olarak sıralanmaktadır. Bunun yanın sıra, SLM mikro nesneler oluşturabilmek adına da uygun bir tekniktir. Bu nedenle SLM yöntemi havacılık endüstrisi başta olmak üzere birçok kritik sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem titanyum alaşımları, alüminyum alaşımları ve H13 takım çelikleri gibi çeşitli metal malzemelerin üretimi için aktif olarak kullanılmaktadır. SLM yönteminin temel olarak çalışma prensibi, lazer ışınının bir alt tabaka üzerine biriktirilmiş ince toz tabakasının yüzeyini taramasıdır. Lazer ışınının tarama yönü boyunca, şekillendirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Parçanın her bir kesiti (katmanı), ergimiş tozun uzatılmış çizgileri (izler) ile sırayla doldurulmaktadır. Başka bir deyişle, SLM kısmı, izlerin ve katmanların örtüşmesidir. SLM yöntemiyle üç

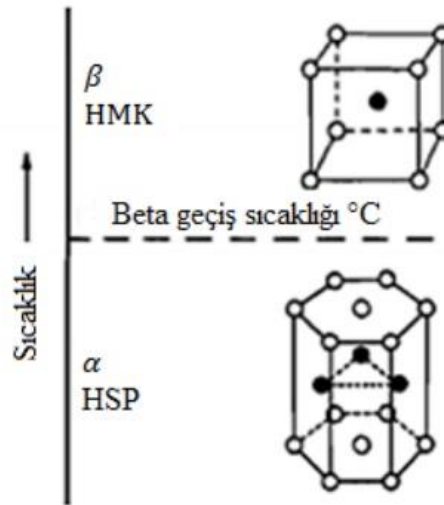
boyutlu nesneler katman katman oluşturulduğundan, katmanların morfolojisi nihai ürünün özelliklerini büyük ölçüde belirlemektedir. Doğrudan ve dolaylı parametreler dahil olmak üzere çeşitli faktörler SLM sürecini etkilemektedir [14-16]. SLM yöntemindeki temel üretim parametreleri lazer gücü (P), lazer odak çapı (d), katman kalınlığı (t), tarama hızı (V), tarama mesafesi (h), tarama stratejisi, toz partikül boyutu ve dağılımıdır [17].

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımının seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilmesinde farklı üretim parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmak için bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerde girdi parametresi olarak dört ana parametre ve bu parametrelere ait dört farklı seviye belirlenmiştir. Girdi parametreleri lazer odak çapı, tarama mesafesi, tarama hızı ve lazer gücü olarak belirlenmiştir. Deneyler, sabit katman kalınlığı ve tarama stratejisiyle gerçekleştirilmiştir. Deney tasarımı için Taguchi L_{16} ortogonal dizini tercih edilmiştir. Kontrol faktörlerinin optimum değerlerini belirlemek amacıyla deneysel sonuçlar S/N oranına dönüştürülerek değerlendirilmiş ve bu faktörlerin deney sonuçları üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, gelecek çalışmalarda benzer araştırmaların desteklenmesi için regresyon analizi yapılarak matematiksel tahmin modelleri oluşturulmuştur. Böylece, Ti6Al4V alaşımının seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmesinde en iyi mekanik özellikleri sağlayacak optimum parametre kombinasyonları belirlenmiştir. Çalışmaya ait genel literatür araştırması, deneysel prosedür, bulgular, bulguların tartışılması ve sonuçlar aşağıda bölümler halinde sunulmuştur.

1. BÖLÜM

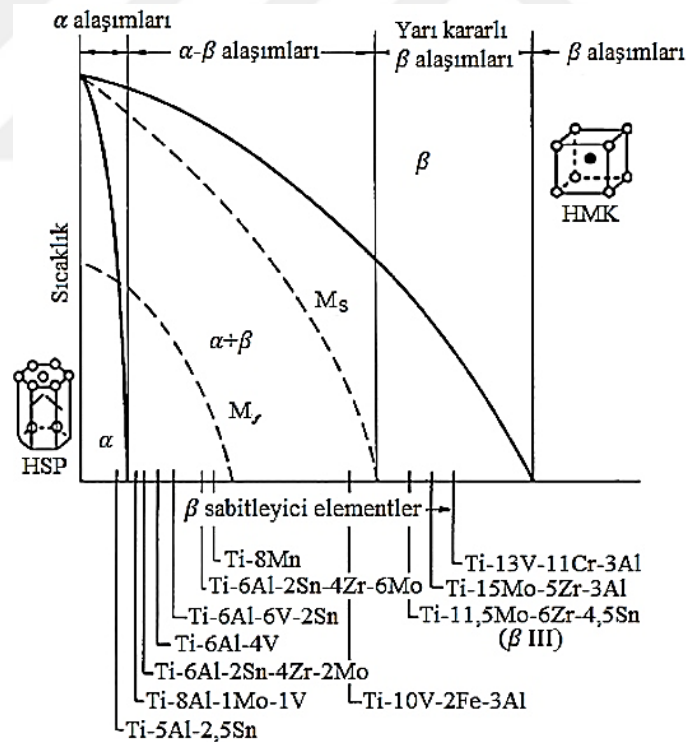
TİTANYUM ALAŞIMLARI VE HAVACILIKTA KULLANIMI

Titanyum, değişken sıcaklık değerlerinde farklı kristal yapılara ve fazlara sahiptir. Titanyum malzeme, oda sıcaklığı gibi düşük sıcaklıklarda altıgen sıkı paketlenmiş kristal yapının (α fazından yaklaşık 885 °C gibi yüksek sıcaklıkta hacim merkezli kübik (HMK) yapının β fazına değişen allotropik bir malzemedir. Alaşım elementlerinin ilavesi ile dönüşüm sıcaklığı ikiye ayrılmaktadır. Dönüşüm sıcaklığı " α dönüşüm sıcaklığı"nın altındaki sıcaklıklarda tüm alaşımın α fazındaki sıcaklığı; üstündeki sıcaklık değerlerinde alaşımın β fazında olduğu sıcaklığa " β dönüşüm sıcaklığı" olarak isimlendirilmektedir. Titanyumun mikroyapısında bu dönüşüm sıcaklıkları arasında α ve β bir arada bulunmaktadır. Dönüşüm sıcaklığı β , oksijen, alüminyum, nitrojen ve karbon gibi α fazını daha kararlı yapıya getiren ara maddelerin etkisiyle artarken, alaşım elementlerinin etkisiyle sıcaklık değeri azalmakta veya artmaktadır [18-21]. Titanyumun sıcaklık değişimi ile meydana gelen α ve β kristal yapısı Şekil 1.1.' de gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Titanyum mikroyapısının sıcaklık ile değişimi [18]

Alüminyum, oksijen, galyum, karbon ve nitrojen gibi elementler α fazının daha kararlı yapıya ulaşmasını sağlayarak dönüşüm sıcaklığını arttırdıkları gibi β fazını dengeli hale getirerek izomorf ve titanyumla ötektoid alaşımları oluşturan elementler olarak iki ayrı grup söz konusudur [19,20]. İzomorfik grubun elementleri, β fazında tamamen çözünür olan vanadyum, tantal, niyobyum ve molibden elementlerinden oluşmaktadır. Bu grup elementleri β fazını stabilize etmek ve yüksek sıcaklıklarda gözlenen bimetalik bileşiklerin oluşumunu önlemek için alaşıma eklenmektedir. Titanyum ile ötektoid alaşım yapan elementler arasında manganez, demir, krom, kobalt, nikel, bakır ve silikon elementleri bulunmaktadır [19,21]. Titanyum mikroyapısına göre, α alaşımları, β alaşımları ve $\alpha+\beta$ alaşımları olmak üzere üç temel kategoriye ayrılmaktadır. Titanyum alaşımları, $\alpha \rightarrow \beta$ dönüşüm sıcaklığını artıran veya azaltan elementlerin eklenmesiyle oluşturulmaktadır. Şekil 1.2, alaşım elementlerinin faz değişimi üzerindeki etkisini göstermektedir [18,22].



Şekil 1.2. Titanyum faz diyagramı [18]

1.1. Titanyum Elementinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

%99.5 ile %98.635 titanyum içeren metale ticari titanyum denilmektedir. Oksijen içeriklerine göre sınıflandırılan ve farklılık gösteren dört tip (grade) saf titanyum ve buna ek olarak tip 7 olarak adlandırılan saf titanyum bulunmaktadır. En fazla oksijen içeriği

%4 oran ile Tip 4 tür. Sınıflandırılan sayı ne kadar yüksek olursa, oksijen ve demir miktarı da o kadar yüksek olmaktadır. Saf titanyuma az miktarda demir, oksijen, karbon ve nitrojen eklenerek mekanik özellikler önemli ölçüde iyileştirilmektedir. Oksijen miktarındaki değişiklik metalin elastisite modülünü de değiştirmektedir. Oksijen miktarının artması metalin akma dayanımını ve sertliğini arttırmaktadır. Saf titanyuma az miktarda vanadyum, demir ya da oksijen eklemek sertliği ve dayanımı arttırmaktadır. Titanyum elementinin tercih edilmesini etkileyen üstün mekanik özellikleri söz konusudur. Bu özellikler; düşük yoğunluk, çatlak ilerlemesine karşı direnç, yüksek mukavemet, yorulma dayanımı, düşük sıcaklıkta yüksek tokluk ve yüksek korozyon direncidir [3,23]. Titanyum elementinin fiziksel özellikleri Tablo 1.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 1.1. Titanyum mikroyapısının sıcaklık ile değişimi [6]

Element Adı	Sembol	Atom Numarası	Atom ağırlığı (gr)	Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime Noktası (°C)	Kaynama Noktası (°C)
Titanyum	Ti	22	47,9	4,50	1812	3130

Tablo 1.2, ASTM standartlarına göre farklı kalitedeki ticari olarak saf titanyumun α ve β dönüşüm sıcaklıklarını göstermektedir. Tablodan da anlaşılabacağı gibi oksijen ve demir içeriğinin artması titanyumun dayanımını arttırmaktadır [23].

Tablo 1.2. Ticari saflıktaki titanyum malzemelerin genel özellikleri [23]

ASTM Standardı	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Dönüşüm Sıcaklıkları(°C)		Alaşım elementleri (max % ağırlıkça)				
			Alfa	Beta	N	C	H	Fe	O
Tip 1	170	240	888	880	0.03	0.10	0.015	0.20	0.18
Tip 2	280	340	913	890	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25
Tip 3	380	450	920	900	0.05	0.10	0.015	0.30	0.35
Tip 4	480	550	950	905	0.05	0.10	0.015	0.50	0.40
Tip 7	280	340	913	890	0.03	0.10	0.015	0.30	0.25

1.2. Titanyum Alaşımları

Titanyum ve alaşımlarının birçok mükemmel özelliği bir araya getirmesi, bu alaşımların sınıflandırılmasında önemli rol oynamaktadır. Titanyum alaşımları; alfa titanyum alaşımları, alfa-beta titanyum alaşımları ve beta titanyum alaşımları olmak üzere üç grupta sınıflandırılmaktadır. Bu alaşımlar, oda sıcaklığında α ve β fazlarının kararlılığını artıran alaşım elementleri içermektedirler. α -titanyum alaşımları, mükemmel kaynak özelliklerinin yanı sıra yüksek korozyon direnci sağlamaktadır. Bu alaşımların bileşiminde kalay, alüminyum ve zirkonyum elementleri mevcuttur. Sıcaklığın yüksek olduğu veya çok düşük olduğu ortamlarda tercih edilmektedir. Alfa-beta titanyum alaşımları bileşimlerinde fazların kararlılığını arttıran bir ya da daha fazla alaşım elementleri bulundurmaktadır. Bu tip alaşımlar, tavlama sonrası bile yüksek tokluk, homojenlik ve mukavemet özelliklerini koruyabilmektedir. En yaygın kullanılan $\alpha + \beta$ alaşımı Ti6Al4V'dir. Yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet, hafiflik ve mekanik mukavemete sahip Ti6Al4V alaşımı, havacılık ve nükleer endüstrilerde kullanılır; yüksek biyouyumluluğu ve yüksek korozyon direnci nedeniyle özellikle biyomedikal uygulamalar için tavsiye edilmektedir. β - titanyum alaşımları ise bileşimlerinde büyük oranda vanadyum ve molibden içerdiğinden dolayı yüksek mukavemet değerlerine sahiptirler. Titanyum üretiminin yaklaşık %30'u alaşımsızdır, %45'i bir $\alpha + \beta$ alaşımı olan Ti6Al4V'dir ve kalan %25'i diğer alaşımlardır [19,24,25]. Titanyum alaşımlarının genel özellikleri Tablo 1.3.'de verilmiştir.

Tablo 1.3. Titanyum alaşımlarının genel özellikleri [19]

	α	$\alpha + \beta$	β
Yoğunluk	Düşük	Düşük	Yüksek
Mukavemet	Düşük	Yüksek	Çok Yüksek
Süneklik	Düşük/Yüksek	Yüksek	Düşük/Yüksek
Kırılma Tokluğu	Yüksek	Düşük/Yüksek	Düşük/Yüksek
Sürünme Dayanımı	Yüksek	Düşük/Yüksek	Düşük
Korozyon Dayanımı	Çok Yüksek	Yüksek	Düşük/Yüksek
Oksidasyon Davranışı	Çok Yüksek	Düşük/Yüksek	Düşük
Soğuk Şekillendirilebilirlik	Çok Düşük	Düşük	Düşük/Yüksek
Kaynaklanabilirlik	Yüksek	Düşük/Yüksek	Düşük

1.2.1. Ti-6Al-4V Alaşımı

Ti64 olarak da bilinen Ti6Al4V alaşımı, yüksek korozyon direnci, yüksek mukavemet, yüksek kırılma tokluğu ve düşük yoğunluk özelliklerine sahip $\alpha + \beta$ titanyum alaşımıdır. Bu alaşım, mukavemet ve sünekliği bir arada sağladığı için önemli bir titanyum alaşımıdır. Bu hafif ve güçlü alaşım, havacılık ve uzay endüstrisi yapılarında ağırlıktan tasarruf sağlamaktadır. Bu sebeple jet motorları, gaz türbinleri ve birçok uçak gövdesi bileşeni için kullanılmaktadır. Ti6Al4V alaşımının üstün özelliklerine ve yüksek talebe rağmen zayıf termal iletkenliği ve gerilme sertleşmesi eğilimi nedeniyle üretimi zor olmaktadır [26,27]. Alaşımların kimyasal içeriği Tablo 1.4.' de verilmiştir.

Tablo 1.4. Ti-6Al-4V alaşımını oluşturan tozların kimyasal bileşimi [5]

Alaşım Elemanı	Ti	Al	V	Zn-S
Ağırlık (%)	90	6	4	0,6
Ergime Sıcaklığı (°C)	1668	660	1910	120-124
Ortalama Toz Boyutu (μm)	44	63	44	40
Toz Morfolojisi	%70 Köşeli + %30 küresel		Köşeli	Küresel
			Küresel	Köşeli

1.3. Titanyum ve Alaşımlarının Havacılık Uygulamaları

Titanyum kullanımı uçak ve uzay endüstrisiyle başlamış ve üstün özellikleri sebebiyle birçok alanda kullanılmıştır. Düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet değerleri sebebiyle havacılık endüstrisinde tercih edilmektedir. Ayrıca titanyum alaşımlarının çalışma sıcaklığı, polimer matrisli kompozit malzemeler ile galvanik uyumluluğu, yüksek korozyon direnci, mükemmel mekanik işlenebilirlik ve kaynak edilebilme özellikleri havacılık sanayisinde yaygın olarak kullanılmasının önemli sebepleri arasındadır. Ticari saflıktaki titanyum, yüksek korozyon direnci ve kısmi dayanım gerektiren uçak yaşam alanlarında tercih edilmektedir. Dövme titanyum alaşımları üretimin yüksek maliyetine rağmen, büyük uçakların iniş takımlarında kullanılmakta ve giderek yaygınlaşmaktadır. Askeri uçaklarda titanyum alaşımlarının kullanımı ticari uçaklara göre daha fazladır. Büyük ticari uçakların gövde yapısında ortalama %5-9 arasında titanyum kullanılırken askeri uçaklarda bu oran %50'lere varmaktadır. Ayrıca askeri uçaklarda titanyumun kullanıldığı yerler arasında en büyük ve kritik kısım, maruz kaldığı tekrarlayan ve yüksek yükleri kanatlardan taşıma görevine sahip olan kanat kutusudur. Havacılık ve uzay endüstrisinde, üretilen parçaların ömrü, mekanik özellikleri kadar önemlidir. Titanyum alaşımlarının kullanıldığı bileşenlerin uzun ömürlü olması, bu parçaları maliyet ve ömür

açısından öne çıkarmaktadır. Titanyumun gövdede yapısal eleman olarak kullanılmasının amacı yorulma çatlaklarının gelişimini durdurmaktır. Uçak sanayisinde yaygın olarak tercih edilen titanyum alaşımları ve kullanım yerleri şöyledir;

- Ticari saflıktaki titanyum: İyi işlenebilirlik ve orta düzeyde mukavemet özelliklerinden dolayı egzoz çıkış kaplamaları, kompresör kaplamaları, yanma duvarları ve gövde bölme duvarlarında geniş çapta kullanılmaktadır.
- Ti6Al4V: Ti64 alaşımı olarak da bilinen bu alaşım, yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemete sahip olduğundan uçak motorunun kompresör kısmının düşük basınç aralığında, gaz türbini kompresör valf ve disklerinde, dövme uçak bağlantılarında, uçak şasi uygulamalarında kullanılmaktadır.
- Ti7Al4Mo: Gaz türbin kompresör kanatçıklarında, disklerinde kullanılmaktadır.
- Ti5Al2,5Sn α Tipi Alaşım: Uçak egzoz bağlantılarında, roket yakıt tanklarında, uçak gaz türbini kompresör yataklarında, içi boş kompresör kanatlarında ve kaynaklı borularda yaygın olarak kullanılmaktadır.
- Ti4Al4Mn: Uçak gövde elemanlarında kullanılmaktadır.
- Ti-8Mn: 93-315 °C'de çalışan uçak kaplamaları ve temel bileşenler için kullanılmaktadır [28-30].

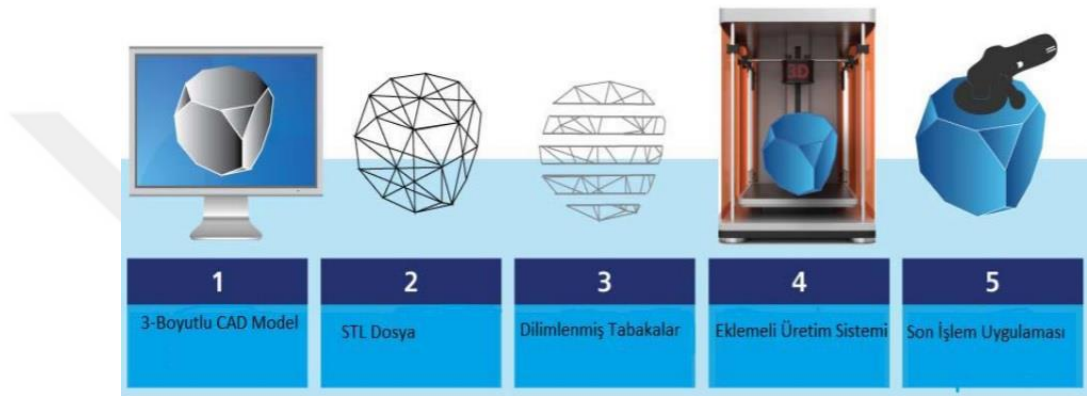
2. BÖLÜM

KURAMSAL TEMELLER

2.1. Eklemeli İmalat Yöntemi

Eklemeli imalat, blok ham malzeme üzerinden talaş kaldırma veya kütsel şekillendirme yöntemine dayanan geleneksel imalattan oldukça farklıdır. Geleneksel imalat yöntemlerinin aksine, toz veya tel ham malzemenin yonteme bağı olarak lazer kaynağı ile ergitilip, katman katman biriktirerek parçanın oluşmasını sağlar. Diğer bir deyişle, geleneksel imalat yukarıdan aşağıya süreç olarak tanımlanabilirken, eklemeli imalat yöntemi aşağıdan yukarıya işleme mekanizmasıdır [31,32]. Eklemeli imalat yöntemi 20.yy'ın sonlarına doğru başlamış ve zaman içinde yaygınlaşmıştır. Bu teknik, ilk olarak prototip üretimi için kullanıldığından “Hızlı Prototipleme” adıyla bilinmektedir. Eklemeli imalat prototip üretimi için öncelikle temel tasarım yapılmaktadır. Yapılan tasarım için modeller üç boyutlu olarak oluşturulmakta, ardından yapılan tasarımın bilgisayar destekli olarak üretilebilirlik analizi yapılmaktadır. Analiz sonucuna göre teorik olarak tasarımda iyileştirme çalışmaları yapılmakta ve iyileştirilmiş tasarım için prototip üretilmektedir. Üretilen prototipler teste tabi tutulmaktadır. Değerlendirmeler sonucunda tasarımın uygun olması halinde ürün seri üretime alınmaktadır. Bu durumda prototip imalatının önemi ortaya çıkmaktadır. Bu gereklilik, eklemeli imalat sürecinin ortaya çıkmasında büyük rol oynamaktadır. Eklemeli imalatla, ilk olarak imal edilecek parçanın üç boyutlu model dosyası bilgisayar destekli tasarım programıyla (CAD) tasarlanmaktadır. Modeli oluşturmak için gereken işlem adımları uygun bilgisayar yazılımı ile oluşturulmaktadır. Yazılım, üç boyutlu verilerin düzenini tanımlayan ve modelin yüzey geometrisini küçük üçgenlere bölerek yeniden yapılandıran STL (STereoLithography) adlı bir kod dosyası oluşturmaktadır. Üç boyutlu modelin üretilebilmesi için “Slicer” ya da dilimleyici adı verilen üç boyutlu yazıcı ara yüz programı kullanılmaktadır. Bu program üç boyutlu

modeli girilen makina parametrelerine (lazer gücü, inşa yönü tarama yönü ve hızı gibi) göre dilimlere ayırarak parçanın üretimi yapılmaktadır. Bu imalat yönteminde, nihai ürüne yakın ve minimum malzeme kullanılarak, takım çeliği, titanyum, alüminyum ve nikel alaşımları, polimer esaslı malzemeler, paslanmaz çelik, metal karbür tozları kullanılmaktadır. Bu da geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla modern imalat yöntemlerinin tercih edilmesini sağlamaktadır [33-36]. Eklemeli üretim yönteminin işlem akışı Şekil 2.1.'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Eklemeli imalat yönteminin işlem akışı [33]

2.2. Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Avantajları ve Dezavantajları

Eklemeli imalatın geleneksel yöntemlere göre birçok avantajları vardır. Bu avantajların bazıları sıralanacak olursa; talaş kaldırma veya kütsel şekillendirme esasına dayanan üretim yöntemlerinde, malzeme eksiltiyle yapı oluşturulduğundan fazla miktarda malzemeye ihtiyaç duyulmaktadır. Eklemeli imalat yönteminde ise modeli oluşturabilecek kadar malzeme kullanılmakta ve malzeme verimliliği artmaktadır. Eklemeli imalatta geleneksel üretimden farklı olarak kullanılan aparat, kesici takım, kalıp gibi yardımcı cihazlara gerek duyulmamaktadır. Geleneksel imalatta nihai parça üretmek için birden fazla işlem adımları gerekmektedir. Ancak eklemeli imalat tasarım ve üretim arasındaki kademeleri ortadan kaldırarak tek bir parça halinde imalat yapılmasını sağlamakta ve montaj aşamasını ortadan kaldırmaktadır. Bu avantajından dolayı iş gücünü ve zamanı azaltarak verimliliği arttırmaktadır. Geleneksel yöntemlerle üretimi mümkün olmayan çok karmaşık geometrilili parçalar eklemeli imalat ile kolayca üretilebilmektedir. Ayrıca, tasarım özgürlüğü sağlamaktadır. Eklemeli imalatta üretim parametreleri iyi belirlenirse ek bir işleme gerek duyulmamaktadır. [33,37-39].

Eklemeli imalatın birçok faydası olsa da diğer teknolojilerde de olduğu gibi yöntemin getirdiği sınırlamalar söz konusudur. Bu sınırlamalar, eklemeli imalatta üretimi yapılan parçanın büyüklüğü, makinenin üretim platformu ebatları ile sınırlanmaktadır. Bu nedenle istenilen parçaların üretiminde boyutsal olarak kısıtlama oluşturmaktadır. Üretilen parçalar genellikle pürüzlü bir yüzeye sahiptir ve ısıl işlem, parlatma gibi ikinci işlem prosesine ihtiyaç duyulabilmektedir. Üretim sonrası parçadan beklenen mekanik özellikler bazı durumlarda istenilen seviyede olmamaktadır. Üretim prosesleri bakımından standartlar yetersiz kalabilmektedir. Eklemeli imalat, diğer üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında işlenebilir malzeme çeşitliliğin kısıtlı olması da üretimde sorun olarak karşımıza çıkmaktadır [26].

2.3. Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Eklemeli imalat yöntemlerinde birçok uygulama mevcuttur. Bu uygulamalar malzemenin beslenme şekline ve ısı kaynağına bağlıdır. Metal eklemeli imalatta hammadde kullanımı tel veya toz olarak ikiye ayrılmaktadır. Isı kaynağı açısından lazer, elektron ışını ve elektrik arkı olarak sınıflandırılmaktadır [40-43]. En çok tercih edilen eklemeli imalat yöntemleri Tablo 2.1.'de verilmiş ve yöntemlere ait başlıca özellikler belirtilerek karşılaştırmalar yapılmıştır [44].

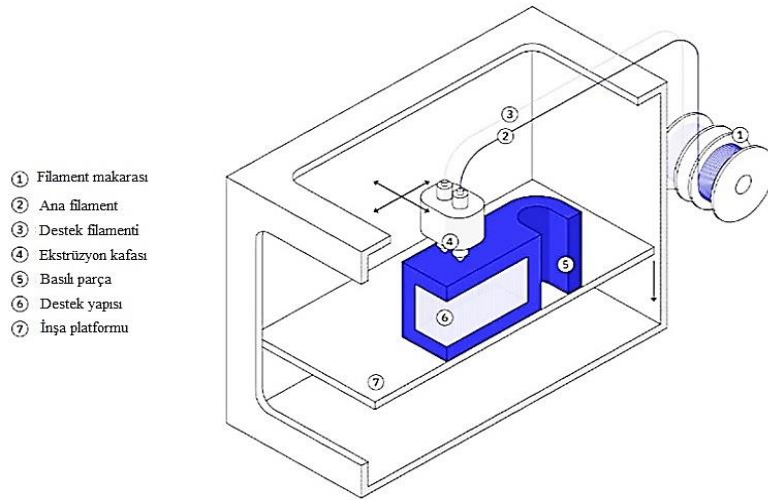
Tablo 2.1. Eklemeli imalat yöntemlerimin karşılaştırılması [44]

Eklemeli Üretim Yöntemleri						
Tip	Kategori	Yöntem	Teknoloji	Malzeme	Güç Kaynağı	Özellikleri
Sıvı	Eriyik	Malzeme ekstrüzyonu	FDM	Termoplastik	Termal Enerji	-Yazıcı maliyeti düşük -Çoklu malzemeye baskı -Yüksek mukavemet -Parça çözünürlüğü düşük -Zayıf yüzey iş-sonu - Baskı hızı düşük
	Polimerize edilebilirlik	Fotopolimerizasyon	SL (SLA)	Fotopolimer, Seramik	UV ışını	- Baskı hızı yüksek -Parça çözünürlüğü yüksek -Yüksek detay -Yüksek Malzeme maliyeti
			DLP		Projeksiyon	- Baskı hızı yüksek -Piksel boyutu çözünürlük projeksiyonuyulasınırlıdır
			Malzeme püskürtme	PJ	Fotopolimer, Wax	UV ışını

Katı	Yapışık objeler	Sac Laminasyonu	LOM	Kağıt, Plastik film, Metalik sac, Seramik bant	Lazer ışını	- İyi yüzey iş-sonu -Düşük yazıcı, proses ve malzeme maliyeti -Büyük ölçüde malzeme basabilme -Mukavemetin dikey yönde zayıf olması
Toz	Ergitme	Toz yataklı ergitme	SLS	Poliamid, Polimer	Yüksek güçlü lazer ışını	-Yüksek doğruluk ve yüksek detay -Parçaların tam dolu üretimi -Mukavemetin yüksek olması -Destek yapılarına ihtiyaç olmaması
			DMLS	Metal tozu, Seramik tozu	Elektron ışını	
			SLM			
			EMB			
	Direk enerji depolama	LENS	Erimiş metal tozu	Lazer ışını	-Aşınmış ve hasarlı parçaların tamir edebilebilmesi -Son-işlem gerekir	
		EBAM				
Yapıştırma	Yapıştırıcı püskürtme	BJ	Seramik tozu, Metal tozu, kum	Termal Enerji	-Renkli baskıyla objelerin üretimi -Destek yapılarına ihtiyaç olmaması - Oldukça fazla malzeme seçeneği -Baskı hızının yüksek olması -Son işlem için infiltran malzeme gerektirmesi - Dayanımı düşük -Gözeneklilik seviyesi yüksek	

2.3.1. Eriyik Yığma Yöntemi (FDM)

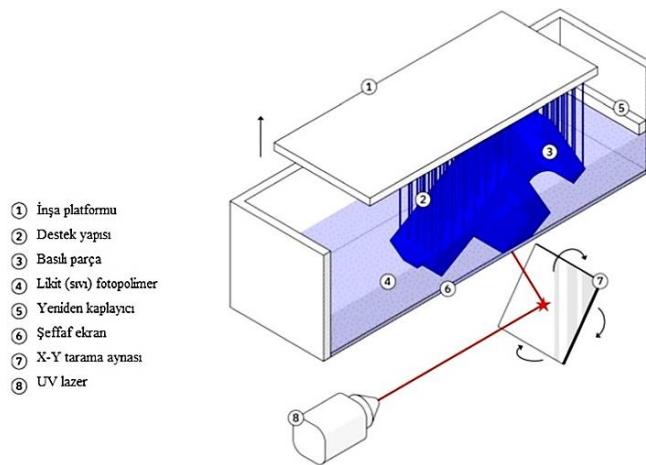
Eriyik yığma yöntemi uygulamada sıklıkla kullanılan eklemeli imalat yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde filament (tel) olarak termoplastik malzemeler kullanılmaktadır. FDM yöntemini kullanan yazıcılar, filamenti bir ekstruder yardımıyla baskı kafasına yönlendirerek, baskı kafasını eksenler üzerinde hareket ettirerek katman katman parçanın üretimini sağlamaktadır. Ayrıca, nozulun katman içerisinde ki tarama yolu ve nozulun sıcaklığı, tarama hızı, tabla sıcaklığı, doluluk oranı gibi önemli parametreler söz konusudur. Yöntemin avantajı, kullanılan malzemenin ekonomik bir şekilde elde edilebilmesi, seri üretime uygun olması, malzemelerin geri dönüştürülebilir ve çevre dostu olmasıdır [45-47]. FDM yönteminin çalışma prensibi Şekil 2.2.' de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. FDM yönteminin çalışma prensibi [47]

2.3.2. Stereolitografi Yöntemi (SLA)

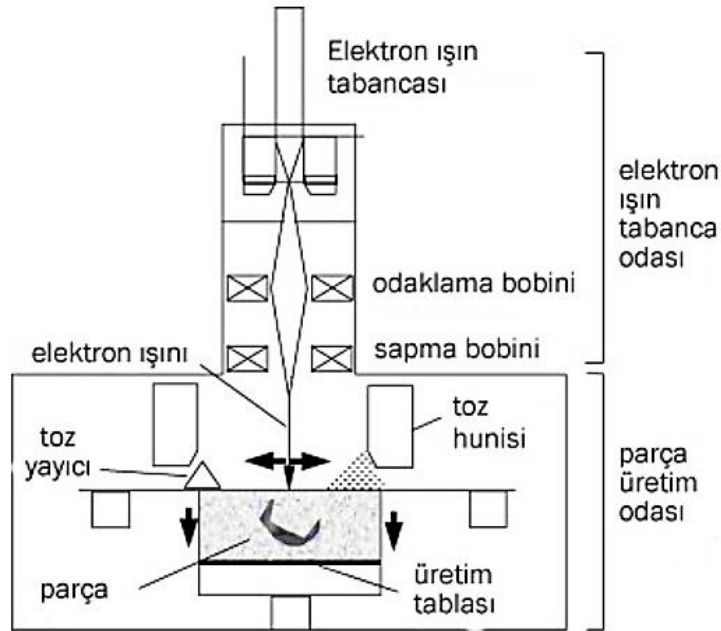
SLA yöntemi, oda sıcaklığında sıvı halde olan fotopolimer tabaka alanının bir ultraviyole lazer ışını yardımıyla kürlenmesi esasına dayanmaktadır. SLA yönteminde lazer ışını reçine tabakasını taramakta ve kürleme işlemini sağlamaktadır. İlk katman sertleştikten sonra, yapı plakası katmanın yüksekliğine taşınarak üstüne yeni reçine katmanı uygulanmaktadır. Birbiri ardına kürleştirme işlemi devam ederek parça üretilmektedir. SLA yöntemi diğer yöntemlere göre daha hızlı olmakla birlikte üretim maliyeti düşüktür. Pürüzsüz yüzeyler elde edilebilmekte ayrıca, yüksek doğruluk derecesine sahip ürünler üretilmektedir [44,46]. SLA yönteminin çalışma prensibi Şekil 2.3.' de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. SLA yönteminin çalışma prensibi [47]

2.3.3. Elektron Işınli Ergitme Yöntemi (EBM)

Elektron ışınli ergitme yöntemi metal tozların veya filamentlerin güçlü bir odaklanmış elektron ışını tarafından tamamen eritilerek katman katman sertleşmesi prensibine dayanmaktadır. Her katman, CAD modeli ile tanımlanan geometrik veri dikkate alınarak eritilmektedir. İlk katman tamamlandığında tabla dikey yönde seviye seviye aşağı indirilerek yeni metal tozu katmana serilmektedir. Ergitme işlemi tekrarlanarak üç boyutlu parçanın üretimi tamamlanmaktadır. Bu teknolojiye güçlü elektron demeti kullanılmasının nedeni, yüksek erime hızları ve yüksek verim için gereken enerjiyi elde etmektir. EBM yöntemi, döküm ve dövmeden daha yüksek malzeme özelliklerini ve parça üzerindeki gerilmelerin giderilmesi için vakum ve yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde metal ve seramik malzemeler kullanılmaktadır. Yöntemin dezavantajı ise baskının alınma süresi ve kullanılan malzemenin temin edilmesi sebebiyle yöntemin maliyeti artmaktadır [44,47,48]. EBM yönteminin çalışma prensibi Şekil 2.4.' de gösterilmiştir.

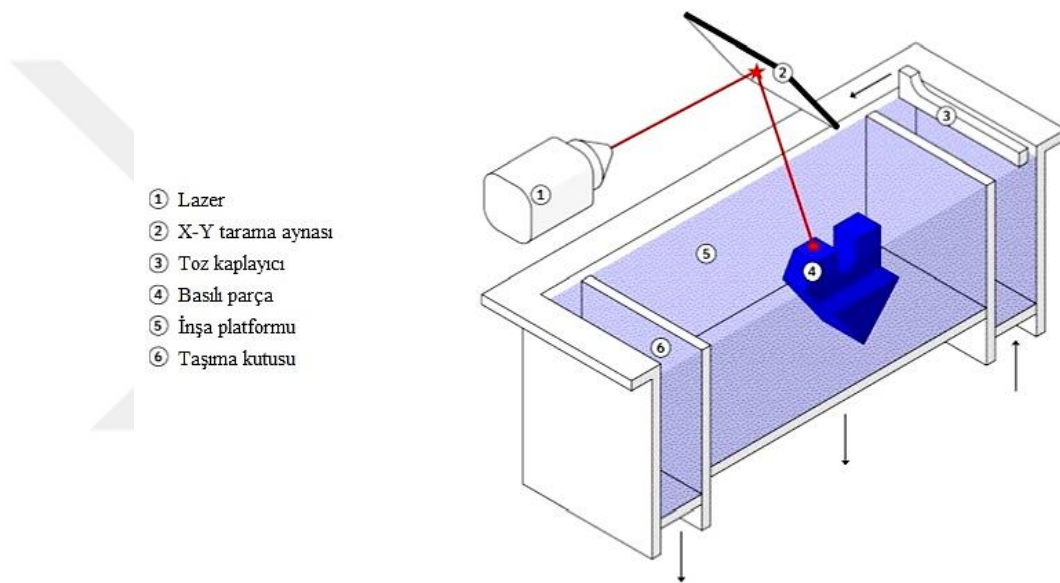


Şekil 2.4. EBM yönteminin çalışma prensibi [48]

2.3.4. Seçici lazer Sinterleme Yöntemi (SLS)

Seçici Lazer Sinterleme (SLS), üç boyutlu yazıcı yardımıyla toz halde bulunan malzemenin lazer ışını ile sinterlenerek birleştirildiği eklemeli imalat yöntemidir. Bu yöntemde tozlar tamamen eritilmeden birleştirilir. SLS yönteminde parça üretilirken

özel olarak destek yapılarına ihtiyaç duyulmaz. Bunun nedeni sinterlenmeyen tozlar, sinterlenmekte olan bölüme destek görevi görmesidir. SLS yönteminde mukavemetli parçalar elde edilmektedir. Bu nedenle fonksiyonel parça üretimi, konsept model üretimi, hızlı döküm ve hızlı kalıp üretiminde öne çıkmaktadır. İşlemin sonunda ürün tozlardan temizlenerek elde edilmektedir. SLS yönteminde plastik ve birçok metal tozu (Ti6Al4V, AlSi10Mg, 316L gibi) işlenebilmekte ve uygulama alanı oldukça geniştir. Ancak SLS yöntemi yüksek maliyeti nedeniyle FDM ve SLA kadar yaygın kullanılmamaktadır [44,46,47,48]. SLS yönteminin çalışma prensibi Şekil 2.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.5. SLS yönteminin çalışma prensibi [47]

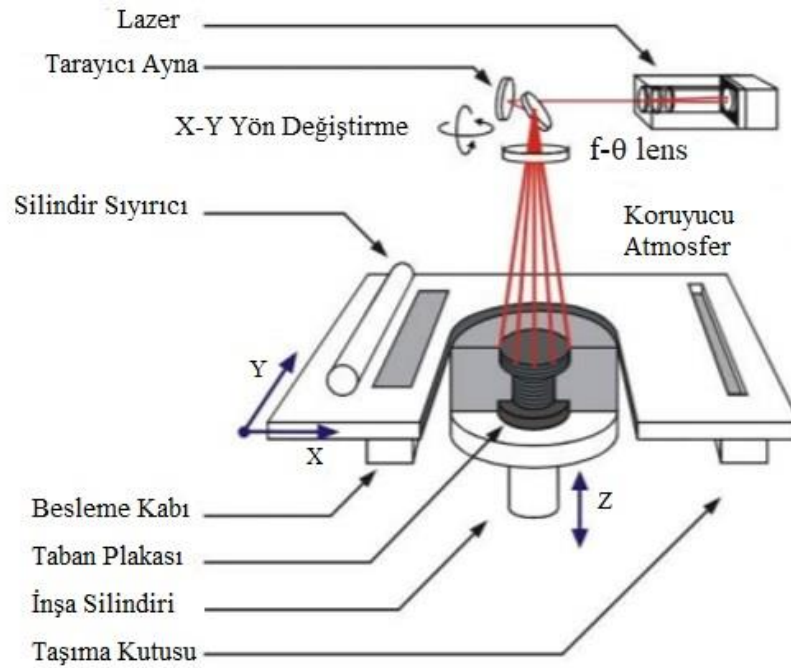
2.3.5. Direk Metal Lazer Sinterleme Yöntemi (DMLS)

Direk metal lazer sinterleme yöntemi, SLS yönteminde yapılan bazı değişiklikler sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu yöntemde, toz halindeki malzeme inşa platformu üzerine mekanik elemanlar yardımıyla serilmektedir. Toz malzemenin yüzeyi lazerin verdiği enerji ile taranarak birleştirilmektedir. İlk katman tamamlandıktan sonra inşa platformu 50 µm alçaltılmakta ve yeni toz malzeme bir önceki katın üzerine serilmektedir. İşlem adımları üç boyutlu parça tamamlanana kadar tekrarlanmaktadır. DMSL yöntemi mukavemeti yüksek parçalar, hızlı üretim, mikro boyutta birleştirme ve ince yapıların üretimi gibi avantajlar sağlamaktadır. Ayrıca birçok metal alaşımları bu yöntemle üretilmektedir. Bununla birlikte yüksek enerji gereksinimleri, yüksek ilk yatırım maliyetleri ve süreçte ikinci adıma ihtiyaç duyulması gibi dezavantajlar da vardır [44,49].

2.3.6. Seçici Lazer Ergitme Yöntemi (SLM)

Seçici lazer ergitme (SLM), SLS yöntemi çalışma prensibine oldukça benzemektedir. SLS yönteminden farklı olarak sinterleme yerine tam bir ergitme işlemi yapılmaktadır. SLM, metal veya seramik tozun ince katmanlarını (partikül boyutu genellikle 30-200 μm arasında değişiklik göstermektedir) tamamen ergitmek ve birleştirmek için yüksek güçlü lazer ışını kullanan bir eklemeli imalat yöntemi olarak tanımlanabilmektedir. SLM yöntemindeki lazer enerjisi katı toz malzemeyi tamamen eritilerek sıvıya dönüştürmektedir. Ardından erimiş metal hızla yeniden katılaşmaktadır. Bu durum toz parçacıkları arasında hemen hemen tam bir birleşmeye yol açmaktadır. Hızlı ergitme ve soğutma döngüsüne bağlı olarak, parçalarda artık gerilmeler meydana gelmektedir. Bitmiş parçanın yüzey kalitesi, termal tavlama ile mikro yapı ve artık gerilmeler azaltılarak iyileştirilebilmektedir [32,37,50]. SLM yöntemiyle üretilen bileşenlerin yoğunluğu teoriye çok yakındır [51]. Seçici lazer eritme yönteminin sunduğu bu avantajlar, onu eklemeli üretimin tercih edilen yöntemi haline getirmektedir [14].

İlk olarak süreç bir kaplayıcı ekipmanın, motor kontrollü pistonun üzerinde duran metal bir plaka üzerine ince toz tabakasını yaydığına başlamaktadır. Bu plaka genellikle inşa platformu olarak adlandırılmaktadır. İnşa platformu, tozla aynı malzemeden yapılmaktadır. Böylece baskılı parça platforma düzgün bir şekilde yapışabilmekte ve yapım süresi boyunca sabit kalmasını sağlamaktadır. İnşa platformu ince bir toz tabakasıyla kaplandıktan sonra, lazer ışını bir dizi ayna yardımıyla toz yatağını ergiteceği noktaya yönlendirilmektedir. Lazer ışını, tozu tamamen eriterek ve kısa bir süre içerisinde yeniden katılaştırarak ince kesitin şeklini belirlemektedir. Çok kısa sürede gerçekleşen ergime-soğumadan kaynaklı kusurların ilerlemesini önlemek için her katmandan sonra tarama yönü değiştirilmektedir. Bu nedenle, son bileşen birçok tek katmandan oluşmaktadır. Ergitme tamamlandıktan sonra inşa platformu katman kalınlığı kadar aşağıya indirilmektedir. Ardından katılaştırılmış tabaka üzerine ince bir toz tabakası serilerek işlem adımları tekrarlanmakta ve üç boyutlu parça elde edilmektedir [37,52,53]. Üretim sırasında oksidasyonu önlemek için ortam hidrojen (H), nitrojen (N), argon (Ar) gibi gazlarla vakumlanmaktadır. Üretimde dikkat edilmesi gereken noktalar arasında, lazer gücünün toz malzemeyi ergitecek miktarda yüksek, buharlaşma oluşturmamak miktarda ise düşük enerjili dalga boylarının kullanılması yer almaktadır [32]. SLM yönteminin çalışma prensibi Şekil 2.6.'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6. SLM yönteminin çalışma prensibi [52]

Bu yöntemde en yaygın olarak kullanılan malzemelerden biri, korozyon direncine sahip ve yüksek biyouyumluluk sağlayan titanyum ve titanyum alaşımlarıdır. Bu malzemeye ek olarak inconel, paslanmaz çelik, nikel bazlı süper alaşım ve krom-kobalt alaşımı gibi çeşitli metal tozlardan doğrudan üç boyutlu bileşenler üretme potansiyeline sahiptir. [44,54]. SLM yönteminde lazer gücü, dalga boyu, tarama hızı, katman kalınlığı, lazer odak çapı gibi başlıca üretim parametreleri mevcuttur. Ayrıca kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi, mekanik özelliği gibi birçok malzeme tabanlı üretim parametreleri de SLM yöntemini etkilemektedir. Seçici lazer ergitme yöntemi karmaşık geometrik parçaların üretimine imkân sağladığından dolayı sağlık ve havacılık sektörlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir [55].

3. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1. Literatür Değerlendirmesi

Eklemeli imalat teknolojisi yeni bir üretim yöntemi olduğu için malzeme üretiminde mekanik özelliklere etki edecek parametreler stabil değildir. Bu sebeple literatürde SLM yöntemi ile farklı parametre değerleri için birçok çalışma yapılmıştır. Ti6Al4V alaşımı için yapılan bazı çalışmalar incelenmiştir.

Roudnicka ve diğ. [56] SLM yöntemini kullanarak Ti6Al4V alaşımli numuneler üretmişlerdir. Üretim parametrelerini tarama hızı ve tarama mesafesi olarak belirlemişlerdir. Çıktı parametresi olarak farklı parametre değerlerinde gözeneklilik ve mekanik özelliklerin ne ölçüde değişebileceği incelenmiştir. Deneysel sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, tarama hızı ve tarama mesafesi parametre değerlerini değiştirerek minimum ve %20 gözeneklilik değerlerine sahip numuneler elde etmişlerdir. Aynı zamanda geniş bir malzeme mukavemeti aralığı da sağlanılmıştır. En yüksek mekanik özelliklere daha yüksek bir enerji yoğunluğunda ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, mekanik performansı etkileyen faktörler arasında farklı enerji yoğunluklarının da önemli mikroyapısal etkilere neden olabileceğini ileri sürmüşlerdir.

Kasperovich ve diğ. [57] SLM yöntemini kullanarak Ti6Al4V alaşımı üretmişlerdir. Girdi parametresi olarak lazer gücü, lazer odak mesafesi, katman kalınlığı, tarama hızı gibi üretim parametrelerini kullanmışlardır. Bu çalışmanın amacı, yapısal bileşenler için güvenilir bir süreç elde etmeyi amaçlayan TiAl6V4'te oluşan gözeneklilik türü ve miktarı üzerindeki SLM süreç parametrelerinin etkisinin araştırılmasıdır. Çıktı parametresi olarak iç kusurlar ve mekanik özellikleri incelemişlerdir. Deneysel sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, SLM yönteminde kullanılan üretim parametreleri içerisinde lazer gücü değerlerinin numune içinde ortaya çıkan kusurlar üzerinde, tarama hızı değerlerinin ise

gözeneklilik üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Buna bağlı olarak gözenekliliğinin proses parametrelerine bağlı olarak azaltılabileceğini iddia etmişlerdir.

Walker ve diğ. [58] SLM yöntemini kullanarak Ti6Al4V alaşımlı numuneler üretmişlerdir. Üretim parametresi olarak farklı katman kalınlığı ve inşa yönü parametrelerini kullanarak numunede oluşan yorulma çatlak büyümesini ve yayılmasını incelemişlerdir. Deneysel sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, SLM ile üretilen ve sabit genlik yüklemesi altında teste tabii tutulan Ti6Al4V numuneleri, toplam yorulma ömründe önemli bir saçılma / değişkenlik gösterdiğini belirlemişlerdir. Bu davranışın, literatürde bildirilen sonuçlarla tutarlı olduğunu öne sürmüşlerdir.

Yadroitsava ve diğ. [59] SLM yöntemini kullanarak Ti6Al4V alaşımlı numuneler üretmişlerdir. Üretilen numunelerde indüklenen kalıntı gerilimini incelemek için X-ışını kırınım yöntemini kullanmışlardır. Üretim parametrelerini lazer tarama yönü, radyasyon kaynak gücü ve ışınlanan alanın çapı olarak belirlemişlerdir. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, SLM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşım numuneleri %99,9 yoğunluğa ve martensitik yapıya sahip olduğunu ve yüzeye yakın yerlerde çift eksenli gerilimlerin görüldüğünü belirlemişlerdir. Numunelerin boyutu ve destek türleri SLM paçalarının artık gerilimi üzerinde etkilidir. İnce yapılı SLM numuneleri, önemli deformasyonları önlemek için alt tabakadan kesilmeden önce ısıtılmalı ve ısıtılmalı tutulması gerektiğini ileri sürmüşlerdir.

Appavuravther [60], SLM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V alaşımı için girdi parametresi olarak tarama hızı, lazer gücü, katman kalınlığı, çıktı parametresi olarak üretim yöntemi, üretim sonunda numunede meydana gelen artık gerilmeler ve ısıtılmalı gibi üretim parametreleri kullanarak alaşımın ısıtılmalı ve karakterizasyonunu incelemiştir. Deneysel sonuçlarını analiz eden araştırmacı, biyomedikal malzeme olarak kullanılan Ti6Al4V alaşımı numunelere ısıtılmalı ve elektrokimyasal anotlama işlemi uygulamıştır. SLM yöntemi ile üretilen Ti6Al4V numunelerinin mekanik özellikleri ve bu özelliklere etki eden faktörler detaylı olarak incelenmiştir. Elde edilen numunelerde meydana gelen hızlı ergime ve katılaşma sonucu olarak malzemenin iç yapısı α' (asiküler martenzit) ve α fazlarından oluşmaktadır. Isıtılmalı uygulanmış numunelerde ise faz dönüşümü meydana gelmekte ve daha iri taneli bir yapının oluştuğu ayrıca α' fazına ait iğne şeklindeki yapının

daha yumuşak bir form aldığı tespit edilmiştir. Bundan dolayı, ısıtma işlem sonucunda mikroyapıda kolon tanelerine sahip yönlendirilmiş α' fazı oluşmuştur. Martensitik fazın morfolojisi ve mikroyapı değişimi, kullanılan SLM üretim parametreleri ve bileşenlerin farklı ısıtma işlem süreçleri uygulanması ile ilgili olduğunu ileri sürmüştür.

Thijs ve diğ. [61] SLM ile üretilen Ti6Al4V alaşımlı numunelerde tarama stratejisinin ve tarama parametre değerlerinin mikroyapı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Girdi parametresi olarak tarama stratejisi, lazer gücü, lazer tarama hızı, tabaka kalınlığı, enerji yoğunluğu, bağıl yoğunluk gibi üretim parametrelerini kullanmışlardır. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, hızlı soğuma sebebiyle numune içinde martensitik bir faz elde etmişlerdir. Ayrıca bir önceki katmanın kısmen yeniden eritilmesi nedeniyle, uzun tanelerin büyüdüğünü gözlemlemişlerdir. Buna bağlı olarak hızlı soğumanın etkisiyle martensitik faz oluştuğunu ve epitaksiyel büyümenin oluşması sebebiyle uzamış tanelerin ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Uzun tanelerin yönü, parça geometrisi ve tarama stratejisine bağlı olduğunu ileri sürmüştür.

Vrancken ve diğ. [62] SLM yöntemini kullanarak Ti6Al4V alaşımını üretmişlerdir. Yaptıkları çalışmada ısıtma işlem yoluyla mekanik özelliklerin optimizasyonunun, geleneksel üretim yöntemiyle üretilmiş numunelerle karşılaştırmak ve farklılıkların belirlenmesini amaçlamışlardır. Bu amaç için SLM yöntemiyle üretilen numunelerin mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerinde ısıtma işleminin etkisini incelemişlerdir. Deney sonucunda araştırmacılar, ısıtma işlem sıcaklığının mekanik özellikler üzerinde etkili olduğunu ve tüm özellikler için dövme ve döküm numune değerlerinin ASTM standartlarının üzerinde olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca numunelere standart ısıtma işlemlerin uygulanması, yapılan üretimde beklenen sonuçları vermediğini ve SLM ile üretilen parçaların farklı şekilde işlenmesi gerektiğini ileri sürmüştür.

SLM yöntemi kullanılarak biriktirme yönünün Ti6Al4V'nin mekanik özelliklerine etkisi Wauthle ve diğ. [63] tarafından incelenmiştir. Deneyin sonunda araştırmacılar, 45°'lik bir açıyla işlenen parçaların akma mukavemeti ve maksimum çekme mukavemetinin, 90° ve 0°'lik bir açıyla işlenen parçalara göre %35 daha düşük olduğunu öne sürmüştür.

Qian ve diğ. [64] SLM yöntemini kullanarak Ti6Al4V alaşımlı numuneler üretmişlerdir. Bu çalışma için üretim parametreleri lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı, ön ısıtma sıcaklığı, toz boyutu, baskı yönü, lazer profili, lazer odak çapı olarak belirlemişlerdir. Bu

çalışmanın amacı malzemede oluşan yorulma çatlakları yayılma sürecini araştırmaktır. Deneysel sonuçları analiz eden araştırmacılar, dikey olarak üretilen numunelerin, yatay olarak üretilen numunelere göre daha fazla iç kusur ve erimemiş toz taneciklerine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Yatay olarak üretilmiş numunelerin yorulma özelliği, dikey olarak üretilmiş numunelere göre daha iyi olduğunu belirlemişlerdir. Yüksek sıcaklıkta çatlak yayılması sırasında çok sayıda ikincil çatlak meydana geldiğini, ikincil çatlakların dallanması ve çatlak ucundaki enerjiyi serbest bırakarak çatlak büyümesini yavaşlattığını gözlemlemişlerdir. SLM sürecinde oluşan iç kusurların çatlak büyüme davranışını etkilediğini ileri sürmüşlerdir.

Phutela ve diğ. [65] SLM yöntemini kullanarak Ti6Al4V alaşımlı test numuneleri üretmişlerdir. Üretim parametreleri lazer gücü, pozlama süresi, nokta mesafesi, tarama mesafesi ve katman kalınlığı olarak belirlemişlerdir. Çıktı parametresi olarak yoğunluk, sertlik, mikroyapısal gelişim ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, daha küçük numunelerdeki yetersiz füzyon eksikliği kusurları, düşük enerji girdileriyle daha da kötüleştiğini ve enerji yoğunluğunun artırılması durumunda numunelerdeki gözenekliliğin yüksek oranda azaldığını gözlemlemişlerdir. Tüm özellik boyutları için güvenilir yapısal bütünlüğe sahip parçaların imal edilebilmesini sağlamak ve bu olayın üstesinden gelebilmek için üretim parametrelerinde bir ince ayarın gerekli olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Leuders ve diğ. [50] SLM yöntemi ile Ti6Al4V alaşımlı test numuneleri üretmişlerdir. Deneyin amacı seçici lazer ergitme ile üretilen numunelerin döngüsel yük altında mikroyapı ve oluşan hatalar arasındaki ilişkiyi incelemektir. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, yapılan mekanik testler sonucunda çok küçük boyutlu gözenekli yapının yorulma mukavemet değerini etkilediğini, iç yapıdaki artık gerilmelerin yorulma çatlaklarının büyümesinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Facchini ve diğ. [66] SLM yöntemi ile farklı parametreler kullanılarak Ti6Al4V alaşımlı numuneler üretmişlerdir. Değişen parametrelerin numune üzerindeki mikroyapısı ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, numunelerin mikroyapısında hızlı soğuma nedeniyle martensitik faz ve artık gerilmeler oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Elde edilen numunelerin oluşan mikroyapı sebebiyle sıcak işlenmiş parçaların mukavemet değeri ile karşılaştırıldığında

çekme mukavemet değeri daha yüksek, süneklilik değeri ise azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Üretim tablasının önceden ısıtılması ergitme işlemine yardımcı olmakta ve oluşan artık gerilmelerin azalmasında etkili olmuştur. Ancak numunelerin mikroyapısı martensitik faz olarak kaldığından süneklilik değeri önemli ölçüde değişmemiştir. Buna bağlı olarak üretim sonrası uygulanan ısıl işlem faz dönüşümüne neden olduğundan süneklilik değeri artışı ve mukavemet değerlerinde ise azalmaya neden olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Ge ve diğ. [67] farklı yapısal tasarımlara sahip iki Ti6Al4V kafes yapısının üretimi için SLM yöntemini kullanmışlardır. Üretilen numunelerin sıkıştırma özellikleri ve mikroyapısal dağılımını incelemişlerdir. Deneysel sonuçları analiz eden araştırmacılar, üretilen numunelerde kafes yapılarının mikroyapı üzerinde önem arz edecek kadar bir etkisi olmadığını ileri sürmüşlerdir.

Karimi ve diğ. [68] SLM yöntemini kullanarak gaz atomize tozdan Ti6Al4V alaşımlı numuneler üretmişlerdir. Artan sayıda ergitme işleminin fonksiyonu olarak numunelerin mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerindeki etkisini belirlemek ayrıca, mikroyapısal homojensizliği en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, tekli ergitmeden üçlü ergitme işlemine kadar ergitme işleminin artırılması mikroyapıyı olumlu etkileyen soğutma hızında artmaya neden olmuştur. Tekli ergime işlemi uygulanmış numunede füzyon gözeneklilik gözlemlenirken, ergime sayısı arttıkça füzyon gözeneklilik kaybolmuş ve sadece küresel gözenekliliğin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Başka bir deyişle, ergime işlem sayısındaki artış hem gözenek sayısını hem de gözenek boyutunun azalmasını sağlamıştır. Ayrıca ergime sayısı arttıkça numune yüzeyinde azaltılmış gözeneklilik ve homojen bir sertlik dağılımı meydana gelmiştir. Yapılan analizler sonucunda, yeniden ergitme işlem sayısının SLM ile oluşturulmuş numunelerin mekanik özelliklerinin ve mikroyapının belirlenmesinde önemli bir etkiye sahip olduğunu savunmuşlardır.

Miranda ve diğ. [69] SLM yönteminde üretim parametresi olarak lazer gücü ve tarama hızı faktörlerini kullanarak Ti6Al4V alaşımlı numuneler üretmişlerdir. Üretim parametrelerinin numunelerdeki mikro boyutta sütunların ve plaka kalınlıklarının üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçları analiz eden araştırmacılar, bağımsız değişkenler kullanılarak üretilen numunelerin bağımlı değişkenler üzerindeki etkisini

incelemek için modeller geliştirmişlerdir. Elde edilen bu modeller SLM yöntemiyle numunelerin ince duvarlı mikro boyutta üretimin optimizasyonu için uygun olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Muratal ve diğ. [70] SLM yöntemini kullanarak Ti6Al4V alaşımlı numuneler üretmişlerdir. Yaptıkları çalışmada Ti6Al4V alaşımının aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Girdi parametrelerini 180 W lazer gücü, 100 µm lazer odak çapı, 6 m/s tarama hızı, 30 µm katman kalınlığı ve 35° C toz yatak sıcaklığı olacak şekilde belirlemişlerdir. Numunelere 20 N yük altında ve 150 rpm devir sayısında aşınma testleri uygulanmıştır. Elde edilen verilerin yorumlanabilmesi için mikroyapı ve sertlik değerleri incelenmiştir. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, SLM ile üretilen numunelerin diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha yüksek aşınma direnci sergilediğini gözlemlenmişlerdir. Ayrıca literatür ile uyumlu sonuçlar elde edildiğini ileri sürmüşlerdir.

Pal ve diğ. [71] SLM yöntemiyle farklı inşa yönleri kullanılarak ürettikleri Ti6Al4V alaşımlı numunelerin mikroyapı, yoğunluk ve gözenekliliğin çekme özelliklerine etkisi ve enerji yoğunluklarını incelemişlerdir. Enerji yoğunluğunu daha fazla etkileyen üretim parametresi olarak tarama hızı değerleri değiştirilerek seçilmiştir. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, inşa yönünün uzunlamasına yapıldığı numunelerde daha yüksek mukavemet ve yoğunluk değeri elde edilmesinin yanı sıra daha düşük yüzey pürüzlülüğüyle daha yüksek ürün kalitesi elde edildiğini ileri sürmüşlerdir.

Pal ve diğ. [72] SLM yönteminde farklı lazer üretim parametreleri kullanarak ürettikleri Ti6Al4V alaşımının yüzey morfolojilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar numunelerin yan, alt ve üst yüzeylerde denemeler gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirilen deneylerde farklı enerji yoğunlukları, tarama hızları, tarama mesafeleri ve lazer güçlerinin etkileri araştırılmıştır. Bunlara ek olarak yüzey özelliklerinin varyasyonlarını gözlemlemek amacıyla her katmana yeniden tarama işlemi uygulamışlardır. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, lazer gücüne ek olarak tarama hızının da azaltılması yapışan toz partiküllerinin sayısını azalttığını gözlemlemişlerdir. Numunelerde farklı lazer gücü parametrelerinin kullanılmasıyla oluşan fiziksel davranışları analiz etmiş ve yorumlamışlardır. Oluşan eriyik havuzunun soğutma zamanlaması ve viskozitesi, yüzey morfolojisini etkileyen en önemli faktörler olduğu anlaşılmıştır. Sonuçlar hiç

beklenmedik bir şekilde en pürüzsüz elde edilen üst yüzeyde kullanılan üretim parametreleriyle, yeniden tarama işlemi uygulanan en pürüzlü dikey yüzeyle aynı parametreler kullanılarak üretilmiştir. SLM yönteminde numunelerde oluşan kusurların ve gözenekliliğin hala bir sorun teşkil ettiğini ileri sürmüşlerdir.

Edwards ve diğ. [73] SLM yöntemi kullanılarak Ti6Al4V alaşımının yorulma özelliklerini incelemişlerdir. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, testte tabii tutulan numunelerin yorulma performansı, gözeneklilik, yüzey kalitesi ve oluşan artık gerilmeler sebebiyle dövme yöntemi ile üretilen malzemelere kıyasla %75 oranında daha düşük sonuçlar elde etmişlerdir. Ayrıca pürüzlü yüzey yapının yorulma performansı üzerindeki etkisi, meydana gelen artık gerilmeler ve gözeneklilik nedeniyle belirlenememiştir. Bu çalışmanın sonucunda yorulma özelliklerini daha iyi analiz etmek için minimum gözeneklilik ve işlem sonrası gerilim gidermeyle numuneler üzerinde çok daha fazla test yapılması gerektiğini ileri sürmüşlerdir.

Salem ve diğ. [74] SLM yöntemini kullanarak Ti6Al4V alaşımlı numunelerin kafes yapısı için iç gözeneklilik morfolojisi ve destek çapı üzerinde etkisini incelemek amacıyla farklı lazer gücü ve tarama hızlarında üretim parametreleri seçilerek deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, 100 W lazer gücü ve 1600 mm/s tarama hızından oluşan üretim koşulunun, tasarıma en yakın destek boyutuna sahip olacak şekilde ve minimum iç gözeneklilikle kafes yapısı üretiminde uygun bir seçim olduğunu sonucuna varmışlardır.

Zhou ve diğ. [75] Ti6Al4V alaşımlı numunelerinin mikroyapılarını ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için SLM yöntemini vakum altında gerçekleştirmişlerdir. Üretim sonrası numuneler sıcak izostatik basınca (HIP) tabii tutulmuştur. Numuneleri HIP'li ve HIP'siz olarak iki grupta değerlendirmişlerdir. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, vakum altında gerçekleştirilen SLM üretimi ile klasik SLM yöntemi kullanılarak üretilen Ti6Al4V alaşımlı numuneleri kıyasladıklarında gözeneklilik değerinin vakum altında azaltılabildiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca sıcak izostatik basınç işleminden sonra gözenekliliğin daha da azaltılabileceğini ve numunelerin daha çok uzama sağlayabileceğini ileri sürmüşlerdir.

Mevcut çalışma ile geleneksel imalat yöntemleri kullanılarak işlenmesi zor malzemelerden biri olan Ti6Al4V alaşımının üretiminde ortaya çıkan sorunları ortadan

kaldırılması amacıyla seçici lazer ergitme yöntemi kullanılarak en uygun sonuçların elde edilmesi amaçlanmıştır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, üretim parametrelerinin, malzemenin birçok özelliğini etkilediği görülmüştür. Isıl eğilimleri, mekanik özellikleri ve mikroyapıları bu etkilediği özelliklere örnek olarak verilebilirler. SLM üretim parametrelerinin doğru kombinasyonu, malzemedeki meydana gelebilecek kusurları durdurabilmektedir. Literatür incelendiğinde üretim parametrelerinin optimizasyonu ve malzemenin mekanik özellikleri konusunda eksiklikler olduğu görülmektedir. Bu konuda daha detaylı çalışmaların yapılması gerekmektedir. Bu amaçla, üretim parametrelerinin, mekanik özellikleri, sertliği ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri birlikte değerlendirilecektir.

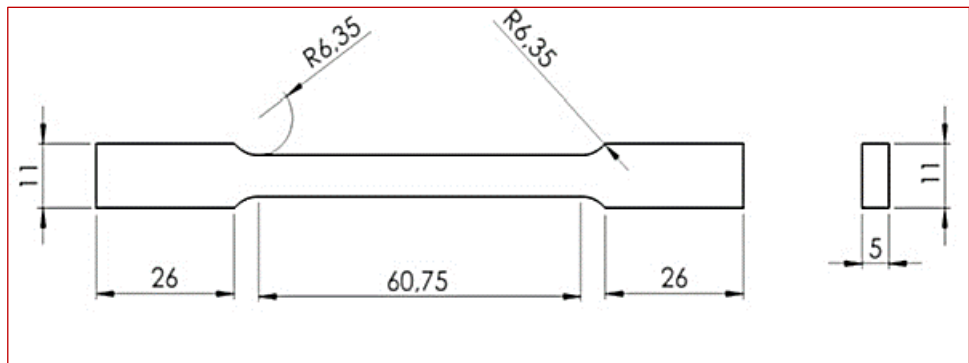
4. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

Mevcut çalışmada, Ti6Al4V titanyum alaşımının seçici lazer ergitme yöntemi ile birlikte üretim parametrelerinin mekanik özelliklere ve yüzey kalitesine etkisi incelenmiştir. Böylece, optimum parametre değerlerini elde edilmesi ve benzer çalışmalara yol göstermesi amaçlanmıştır. Çalışma sırasında zaman kaybı ve yüksek maliyet faktörlerinin önüne geçmek için Taguchi L₁₆ dikey dizini kullanılarak deney sayısı düşürülmüştür. Yapılan deneylerin sonucunda çıktı parametresi, çekme mukavemeti, elastisite modülü, uzama miktarı, sertlik değerleri ve yüzey pürüzlülüğü olacak şekilde belirlenmiştir. Bu bölümde deneysel çalışma boyunca kullanılan malzeme, yöntem, deneysel tasarım süreci ve cihazlar hakkında bilgiler verilmiştir.

4.1. Deney Numunesinin Hazırlanması

Deneylerde iş parçası malzemesi olarak farklı üretim parametreleri, şerit tarama stratejisi ve yatay yönlendirme (XZ-kenar yönü) ile Ti6Al4V titanyum alaşım malzemeli ASTM E 8M çekme standartları dikkate alınarak uygun bir CAD programıyla çizimler yapılmıştır. Çizimlere ait ölçüler ve detaylar Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Numunelere ait teknik çizim

Numunelerin üretiminde kullanılan gaz atomize Ti6Al4V metal tozları AP&C firması tarafından tedarik edilmiştir. Ti6Al4V toz malzemenin ortalama toz partikül boyut $D_{10}=19\ \mu\text{m}$, $D_{50}=30\ \mu\text{m}$, $D_{90}=46\ \mu\text{m}$ 'dir. Metal tozun kimyasal bileşimi Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi (%)

Element	Al	V	Fe	C	O	N	H	Ti
Oran (%)	5.5– 6.5	3.5- 4.5	0– 0.25	0– 0.08	0– 0.013	0– 0.05	0– 0.012	Denge

4.2. Deney Numunelerinin Üretimi

Deneysel çalışma kapsamında toz yatağında lazerle birleştirme prosesine dayanan seçici lazer ergitme yöntemi kullanılmıştır. İmalat, Gazi Üniversitesi'ne bağlı Eklemeli İmalat Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (EKTAM) gerçekleştirilmiştir. Ermaksan Ena Vision 250 model 3 boyutlu yazıcı ile toplam 16 adet çekme numunesi (ASTM E8 köpek kemiği) üretilmiştir. SLM üretim parametreleri lazer odak çapı (μm), tarama mesafesi (μm), tarama hızı (mm/s) ve lazer gücü (W) olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu üretim parametrelerinin kombinasyonları kullanılarak üretilmiştir. Tüm numuneler şerit tarama stratejisi, yatay yönlendirme (XZ-kenar yönü), 67° tarama açısı ve $30\ \mu\text{m}$ katman kalınlığında üretilmiştir. İnşa tablası 85° ye ısıtıldıktan sonra üretim başlamıştır. Üretimde kullanılan değişken üretim parametreleri Tablo 4.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Numune üretimi için SLM üretim parametreleri

Numune No	Lazer Odak Çapı (μm)	Tarama Mesafesi (μm)	Tarama Hızı (mm/s)	Lazer Gücü (W)
1	75	60	150	190
2		90	300	210
3		120	450	230
4		150	600	250
5	80	60	300	230
6		90	150	250
7		120	600	190

8		150	450	210
9	85	60	450	250
10		90	600	230
11		120	150	210
12		150	300	190
13	90	60	600	210
14		90	450	190
15		120	300	250
16		150	150	230

Üç boyutlu yazıcının üretim hacmi 250x250x300 (en x boy x yükseklik) mm olup maksimum lazer gücü 500 W yerli lazer rezonatör sistemine sahip ve sürekli dalga iterbiyum fiber lazer (1070 nm dalga uzunluğu) mevcuttur. Yapı odası, 1000 ppm'den az oksijen değeriyle argon atmosferi altında kontrol edilmektedir (bkz. Şekil 4.2.). SLM üretim makinesinin katman kalınlığı 20 µm – 100 µm aralığındadır. Üretim halinde inert gaz kapasitesi 3.5 lt/dk'dir. Oryantasyon ve parametre atama işlemi için Materialise Magics yazılımı kullanılmaktadır.



Şekil 4.2. Ermaksan Ena Vision 250 model 3 boyutlu yazıcı

Eklemeli imalat sonrası numuneler tel erozyon prosesi ile inşa tablasından çıkarılmıştır. İnşa tablasından çıkarılan numunelerin yüzeyine silis kumu ile kumlama yapılarak deneye

hazır hale getirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen deneysel numuneler Şekil 4.3.'de gösterilmiştir.



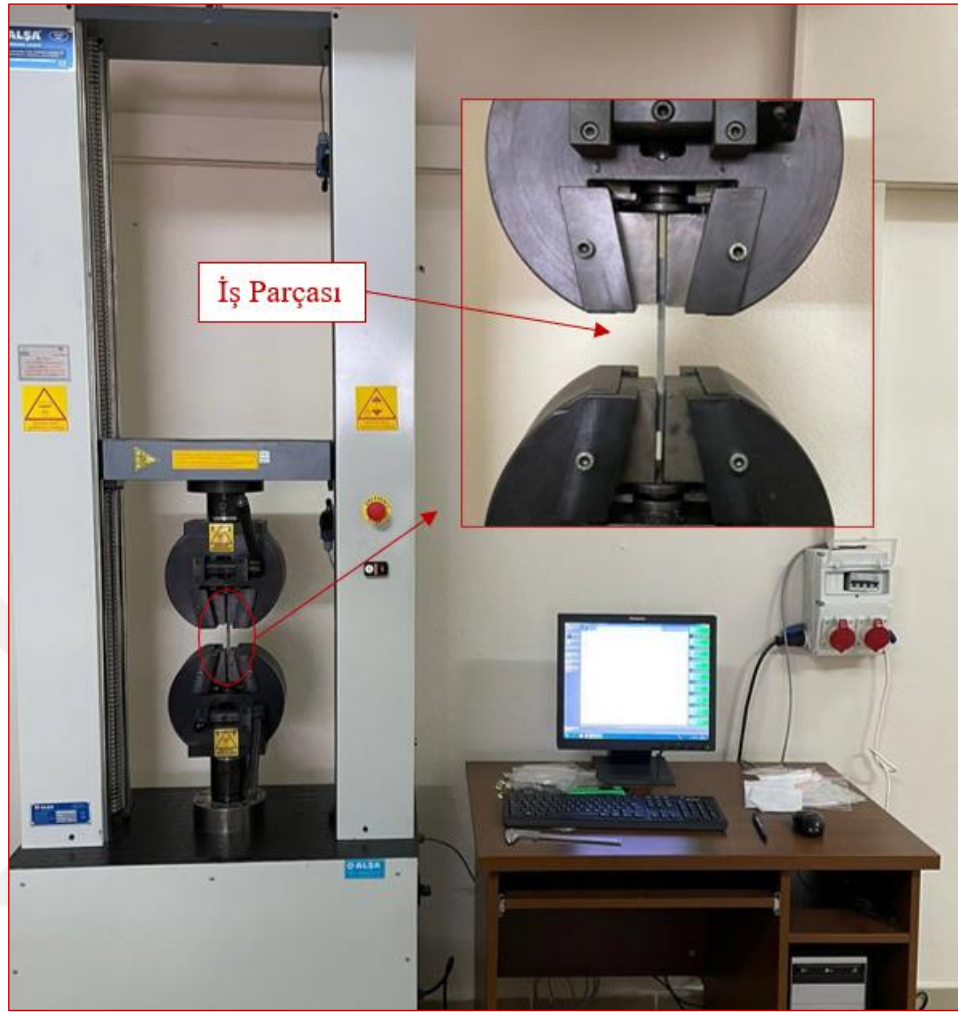
Şekil 4.3. SLM yöntemiyle üretilen iş parçaları

4.3. Uygulanan Deneyler ve Kullanılan Cihazlar

Bu çalışma kapsamında, yapılan deney sonuçlarının analizi için belirlenen üretim parametrelerin çekme mukavemeti, mikrosertlik ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir.

4.3.1. Çekme Deneyi

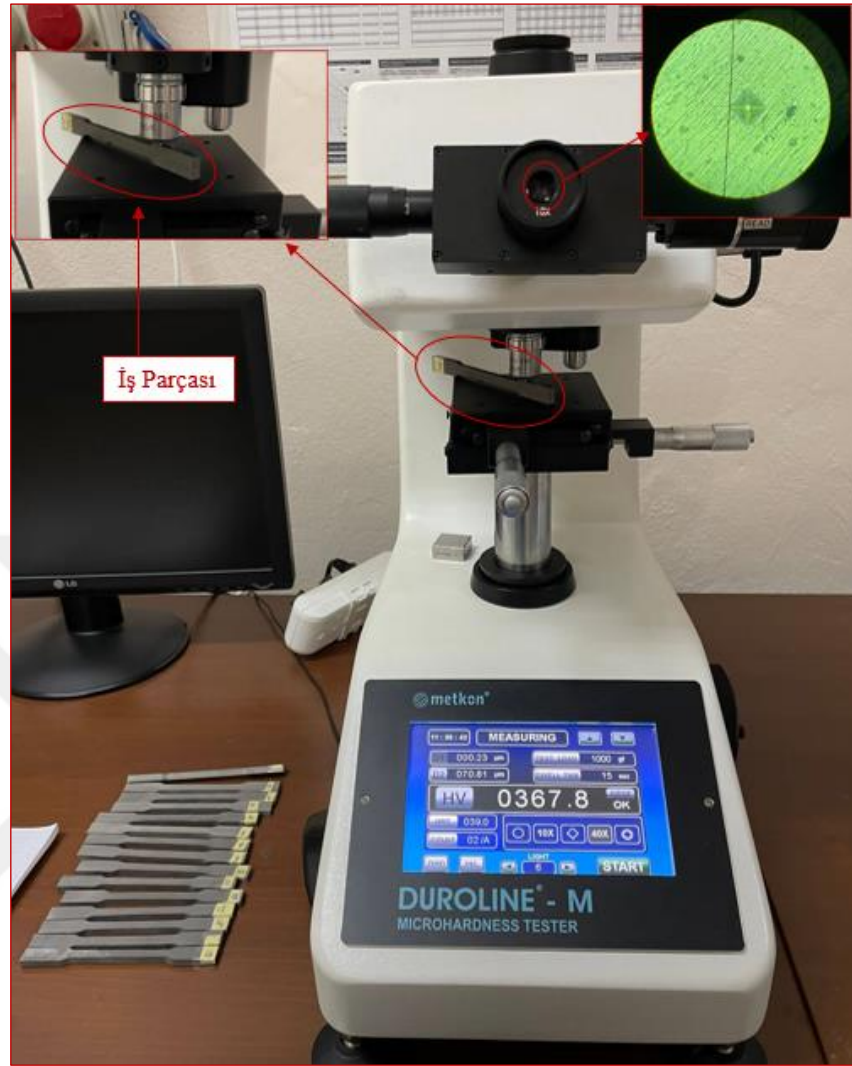
Çekme deneyleri, Düzce Üniversitesinde 10 kN kapasiteye sahip Alşa firmasının MCK 10 elektronik çekme test cihazı kullanılarak ve 2 mm/dk hız altında gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde ASTM E 8M çekme deneyi standartları dikkate alınmıştır. Çekme deneyinin amacı, numunelerin statik yükleme sırasında elastik ve plastik davranışlarını gözlemlemektir. Deney numunesi cihaza bağlanarak, değişken ve eksenel yükleme yapılmaktadır. Çekme cihazındaki çenelerden biri sabit kalacak şekilde diğer çene sabit hızda hareket sergileyerek numuneye çekme kuvveti uygulanmaktadır. Uygulanan kuvvete karşılık gelen uzama miktarları belirlenmektedir. Bu deney, numunelerin dayanımını ve mekanik özelliklerinin anlaşılması için büyük önem taşımaktadır. Deneylerde kullanılan çekme cihazı ve deney numunesinin çekme cihazına bağlanması Şekil 4.4.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. MCK 10 elektronik çekme testi Cihazı ve numunenin bağlanması

4.3.2. Mikrosertlik Ölçümü

Vickers sertlik ölçme yöntemi, numunelerin yüzeylerine tabanı kare piramit şeklindeki uç yardımıyla basınç uygulanmakta ve basınca karşı gösterdikleri direnç, numunelerin sertliklerini belirlemektedir. Sertlik ölçümü numunelerin dayanımları hakkında bilgi edinmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Numunelerin sertlik değerlerini belirlemek için Metkom Duroline-M vickers mikrosertlik test cihazı kullanılmıştır. Deneyler 15 sn yükleme süresi ve 1000 gf yük altında gerçekleştirilmiştir. Ölçümler numunelerin yüzeyindeki 2 farklı noktadan yapılmıştır. Sertlik ölçüm görüntüsü ve ölçüm sırasında kullanılan kare piramit şeklindeki ucun yüzey üzerindeki görüntüsü Şekil 4.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Metkom Duroline-M Vickers Mikro Sertlik Test Cihazı

4.3.3. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

SLM yöntemi ile üretilen numunelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde üretim parametrelerinin etkileri incelenecektir. Yüzey pürüzlülüğü, üretilen numunelerin kalitesini belirlemekte önemli bir rol oynamaktadır. Çalışmada, yüzey pürüzlülük değerini belirlemek için ana ölçüm parametresi olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) belirlenmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için markası MAHR ve modeli MarSurf PS 10 olan taşınabilir yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçümler sırasında numunelerin yüzeyinde rastgele dört farklı bölgeden ölçüm yapılmıştır. Elde edilen değerlerin ortalaması alınarak ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_{aort}) elde edilmiştir. Kullanılan ölçüm cihazı her deney öncesi kalibrasyon bloklarıyla kalibre edilerek ölçümler gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçümlerinde kullanılan ölçüm cihazı

Şekil 4.6.'da ve yüzey pürüzlülük ölçüm cihazına ait teknik özellikler Tablo 4.3.'de listelenmiştir.



Şekil 4.6. Mahr Marsurf PS10 taşınabilir Yüzey Pürüzlülük Cihazı

Tablo 4.3. Deneylerde kullanılan yüzey pürüzlülük ölçüm cihazının teknik özellikleri

Model	PS 10
Ölçme aralığı (μm)	350 μm , 180 μm , 90 μm (otomatik geçiş)
Kararlılık (μm)	0.01
Tarama metodu	Diferansiyel indüksiyon
Ölçme kuvveti (mg)	150-300
Dedektör ucu (μm)	Elmas, radyüs: 5
Örnekleme uzunluğu (mm)	0.25-0.8-2.5-8
Tarama uzunluğu (mm)	0.25-25 mm
Tarama hızı (mm/sn)	1
Görüntüleme birimi	$\mu\text{m}/\mu\text{in}$
Parametreler	Ra, Rz, Rt, Rp, Rmr, Rpc, Rsm, Rz1max, Rsk,
Çalışma sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	5-40
Ölçüler (mm)	190x140x75
Ağırlık (g)	450

4.4. Deney Tasarımı

Geleneksel deneysel yöntemlerinin kullanımı oldukça zor ve karmaşıktır. Deneylerde belirlenen proses parametrelerinin sayısının artması deney sayısını ve maliyeti de arttırmaktadır [76]. Tüm bu olumsuz etkileri en aza indirmek için mevcut çalışmada Taguchi yaklaşımı kullanılmıştır. Dolayısıyla, Taguchi yaklaşımı parametrelerin tasarım aşamasında uygulandığı için oldukça büyük avantaj sağlamaktadır. Taguchi yöntemi, üründe ve üretim parametrelerinde, değişkenliğe neden olan ve kontrol edilemeyen faktörlerin kombinasyonlarına karşı, kontrol edilebilen faktörlerin seviyelerinin optimum kombinasyonunu belirlemektir. Bu yöntem, ürünlerden istenen kaliteyi elde ederken, kontrol edilebilen ve edilemeyen faktörlerin değişkenliğini minimuma indirerek tamamlamaktadır [77,78]. Taguchi yönteminin esas amacı, kalite faktörünü tasarım ve proseste sağlamak ve deney sayısını azaltmaktır [77]. Dolayısıyla, Taguchi yöntemiyle elde edilen sonuçlar işleme doğruluğu açısından oldukça başarılıdır [78]. Taguchi yönteminde, seçimin kalite özelliği olarak deneysel sonuçlar sinyal-gürültü (S/N) oranına dönüştürülerek kullanılmaktadır. S/N oranı süreç değişkenliğinin ölçüsü olarak da tanımlanabilmektedir. Sinyal (S), tasarımda kararlılık için en uygun koşulların seçiminde kullanılırken, gürültü (N), kontrol edilemeyen faktörleri temsil etmektedir [79-82]. Elde edilmek istenilen performans karakteristiğinin türüne bağlı olarak “en büyük en iyi”, “en küçük en iyi” ve “nominal en iyi” şeklinde S/N oranları kullanılmaktadır [81,82]. Ayrıca, üretim parametrelerinin üretim süreci üzerindeki etkilerini incelemek için Taguchi yöntemine dayalı bir yaklaşım olan varyans analizi (ANOVA) kullanılmaktadır [82]. Performans özelliklerini incelemek için sinyal-gürültü (S/N) oranı ve varyans analizi (ANOVA) kullanılarak en uygun üretim parametreleri belirlenmektedir [83]. Deneyler sonucunda elde edilen seviye/faktör kombinasyonu beklenen seviyeye ulaştırması istenen durumun gerçekleşmesi anlamına gelmektedir. Bu durum deneyin amacına ulaştığını kanıtlar niteliktedir.

Mevcut çalışmada, dört seviyede dört farklı ana üretim parametresi seçilmiştir. Bu üretim parametrelerin kombinasyonu deney sayısını artmasıyla birlikte deney maliyetini de arttırmaktadır. Ayrıca deney sayısının fazla olması zaman kaybına yol açmaktadır. Deney sayısını azaltmak ve üretim parametrelerinin optimum değerlerini belirlemek amacıyla Taguchi L_{16} ortogonal dizisi kullanılmıştır. Mevcut çalışmaya ait deney tasarım şeması Şekil 4.7.’de gösterilmiştir. Kontrol parametreleri, lazer odak çapı, tarama mesafesi,

tarama hızı ve lazer gücü olarak belirlenmiş ve bu parametreler için seviye değerleri Tablo 4.4.'de listelenmiştir.

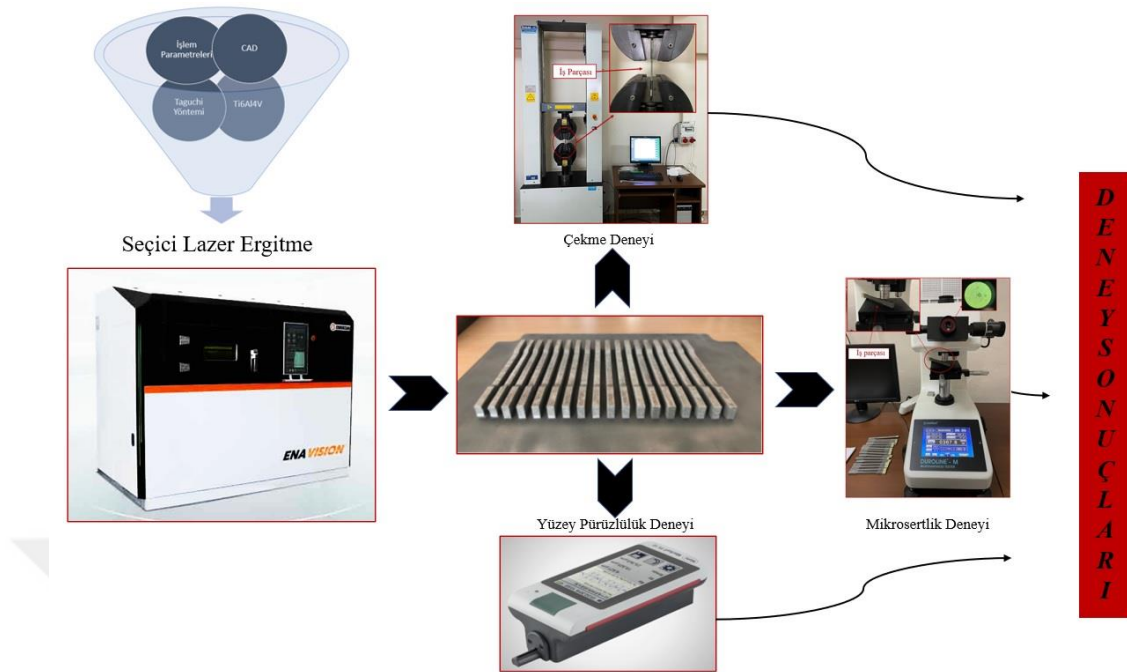
Tablo 4.4. Deneylere ait kontrol parametreleri ve seviye değerleri

Deney Parametreleri	Birim	Sembol	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Lazer Odak Çapı	μm	A	75	80	85	90
Tarama Mesafesi	μm	B	60	90	120	150
Tarama Hızı	mm/s	C	150	300	450	600
Lazer Gücü	W	D	190	210	230	250

Yapılan deneylerde Taguchi L₁₆ ortogonal dizini kullanılarak üretim parametrelerinin çıktı parametreleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. L₁₆ ortogonal dizinine ait deney tasarımı Tablo 4.5.'de listelenmiştir.

Tablo 4.5. Taguchi L₁₆ Deney Tasarımı

Deney Sayısı	Deney Parametreleri ve Seviye Değerleri			
	A	B	C	D
1	75	60	150	190
2	75	90	300	210
3	75	120	450	230
4	75	150	600	250
5	80	60	300	230
6	80	90	150	250
7	80	120	600	190
8	80	150	450	210
9	85	60	450	250
10	85	90	600	230
11	85	120	150	210
12	85	150	300	190
13	90	60	600	210
14	90	90	450	190
15	90	120	300	250
16	90	150	150	230



Şekil 4.7. Deneysel prosedür

4.4.1. Deney sonuçları için ANOVA analizi

Deney sonuçlarından elde edilen verilerin yorumlanabilmesi ve gerekli kararların alınabilmesi noktasında ANOVA (varyans) analizi kullanılmıştır. Varyans analizi kullanılması amacı, kalite faktörünü ölçebilmek amacıyla belirlenen faktörlerin hangi çıktı parametresi üzerinde ne kadar etkili olduklarını ve farklı seviye değerlerinin ne derece değişkenliğe neden olduklarını istatistiksel olarak belirlemektir. Bununla birlikte, varyans analizi kullanılarak elde edilen verilerin güvenilirliği istatistiksel olarak da belirlenmektedir [51,78].

Mevcut çalışmada, mekanik deneylerin sonuçları ve deneyler sonrasında SLM üretim parametrelerinin bir fonksiyonu olarak elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri için Minitab 17 programı kullanılarak ANOVA (varyans) analizleri yapılmıştır.

4.4.2. Deney sonuçları için regresyon analizi

Regresyon analizi, neden-sonuç ilişkisi olan bir bağımlı değişken ile bağımsız bir değişken arasındaki ilişkiyi karakterize eden ve matematiksel olarak modelleyen bir istatistiksel analiz yöntemidir [51,78,83]. Regresyon analizinde veri noktalarını temsil eden en iyi eğrinin belirlenmesi sürecinde genellikle en küçük kareler yöntemi

kullanılmaktadır. En küçük kareler yöntemi, hatanın karelerinin toplamı en aza indirilecek şekilde eğrinin denkleminin belirlenmesine dayanmaktadır [51]. Bu denklemler kullanılarak bağımlı değişkenler referans alınarak bağımsız değişkenlerin tahmini yapılabilmektedir [83]. Mevcut çalışmada regresyon analizleri Minitab 17 programı kullanılarak yapılmıştır.



5. BÖLÜM

BULGULAR

Mevcut çalışmada, Ti6Al4V titanyum alaşımının seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilerek üretim parametrelerinin mekanik özelliklere ve yüzey kalitesine etkisi incelenmiştir. Araştırma sırasında uygulanan deneylerde Taguchi L_{16} dikey dizini kullanılarak deney tasarımı yapılmıştır. Böylece 16 deney ile üretim parametrelerinin optimizasyonun sağlanması amaçlanmıştır. Deneyler sırasında girdi parametreleri lazer odak çapı, tarama mesafesi, tarama hızı, lazer gücü olarak belirlenirken çıktı parametreleri ise çekme mukavemeti, mikrosertlik, yüzde uzama miktarı, elastisite modülü ve ortalama yüzey pürüzlülük değerleridir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar, sonuçların analizi ve bunlara bağlı olarak analiz yorumları aşağıda bölümler halinde verilmiştir.

5.1. SLM İşlem Parametrelerinin Optimize Edilmesi

Seçici lazer ergitme işlemi sonucunda elde edilen parçaların mekanik özellikleri ve yüzey kaliteleri üretim sürecinin kalitesini belirleyen önemli parametreler arasındadır. Çalışmanın bu bölümünde, SLM üretim parametrelerinin (lazer odak çapı, tarama mesafesi, tarama hızı, lazer gücü), çekme mukavemeti, mikrosertlik, yüzde uzama miktarı, elastisite modülü ve ortalama yüzey pürüzlülük değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Dolayısıyla, optimum üretim parametrelerinin seviyelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Deneyler sırasında katman kalınlığı (30 μ m), tarama stratejisi (şerit) ve yatay yönlendirme (XZ- kenar yönü) gibi üretim parametreleri sabit tutularak üretim yapılmıştır. Sabit ve değişken parametrelerin belirlenmesinde literatür bilgisi, araştırmacıların önceki çalışmaları ve ön deneyler etkili olmuştur. Dört ana parametre ve dört seviyeli deney tasarımı için Taguchi L_{16} dikey dizini kullanılmıştır. Çıktı parametrelerinin istenilen performans karakteristiklerine bağlı olarak “en büyük en iyi”, “en küçük en iyi” ve “nominal en iyi” şeklinde S/N (sinyal/gürültü) oranına

dönüştürülerek değerlendirilmiştir. Ayrıca, kontrol faktörlerinin belirlenen çıktı parametresi üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için ANOVA analizi yapılmıştır.

5.1.1. Çekme Dayanımı

5.1.1.1. Çekme deneyleri için Sinyal/Gürültü Oranlarının Analizi

Çekme deneyleri, farklı üretim parametreleri ve seviyeleri kullanılarak üretilen numunelerin dayanımlarını ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Çekme mukavemeti dayanımın bir ölçüsüdür. Özellikle havacılık gibi, yüksek dayanımın istendiği kritik sektörlerde önemi daha iyi anlaşılmaktadır. Çalışmanın amacı en yüksek çekme mukavemeti değerini elde etmek olduğundan, S/N (sinyal/gürültü) oranlarının hesaplanmasında Eşitlik 6.1'deki "en büyük en iyi" değeri veren formül kullanılmıştır.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6.1)$$

Burada y, performans karakteristiğinin değerini (çekme mukavemeti) ifade etmekte ve n, y değerlerinin sayısını temsil etmektedir.

Mevcut çalışmada Taguchi L₁₆ dikey dizin deney tasarımı kullanılarak kontrol faktörleri ve bu faktörlere ait seviye değerleri Tablo 5.1.'de listelenmiştir.

Tablo 5.1. Deney tasarımı kullanılarak kontrol faktörleri ve bu faktörlerin seviye değerleri

Kontrol Faktörleri	Birim	Sembol	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Lazer Odak Çapı	µm	A	75	80	85	90
Tarama Mesafesi	µm	B	60	90	120	150
Tarama Hızı	mm/s	C	150	300	450	600
Lazer Gücü	W	D	190	210	230	250

Kontrol faktörlerinin seviyeleri, çekme testleri sonucunda elde edilen çekme dayanımları ve S/N oranları Tablo 5.2.'de verilmiştir. Çekme testleri sonucunda ortalama çekme dayanımı değeri 947.061 MPa olarak elde edilirken, ortalama S/N oranı 59.52529 dB olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.2. Taguchi L16 Deney Tasarımı ve çekme dayanımına ait S/N oranları

Deney Sayısı	Deney Parametreleri ve Seviye Değerleri				Deneysel Sonuçlar	
	A	B	C	D	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	S/N Oranı
1	75	60	150	190	982.71	59.84851
2	75	90	300	210	974.34	59.77421
3	75	120	450	230	968.57	59.72262
4	75	150	600	250	953.01	59.58195
5	80	60	300	230	951.53	59.56845
6	80	90	150	250	913.48	59.21298
7	80	120	600	190	900.8	59.09257
8	80	150	450	210	915.62	59.23431
9	85	60	450	250	944.26	59.50138
10	85	90	600	230	959	59.63637
11	85	120	150	210	963.01	59.67262
12	85	150	300	190	950.33	59.55749
13	90	60	600	210	951.63	59.56936
14	90	90	450	190	947.52	59.53177
15	90	120	300	250	933.81	59.40517
16	90	150	150	230	943.36	59.49355

Çekme deneyi için S/N oranı yanıt tablosu Tablo 5.3.'de listelenmiştir. S/N yanıt tablosunda kontrol faktörlerine ait optimum seviye değerleri görülmektedir.

Tablo 5.3. Çekme Deneyi için S/N oranı yanıt tablosu

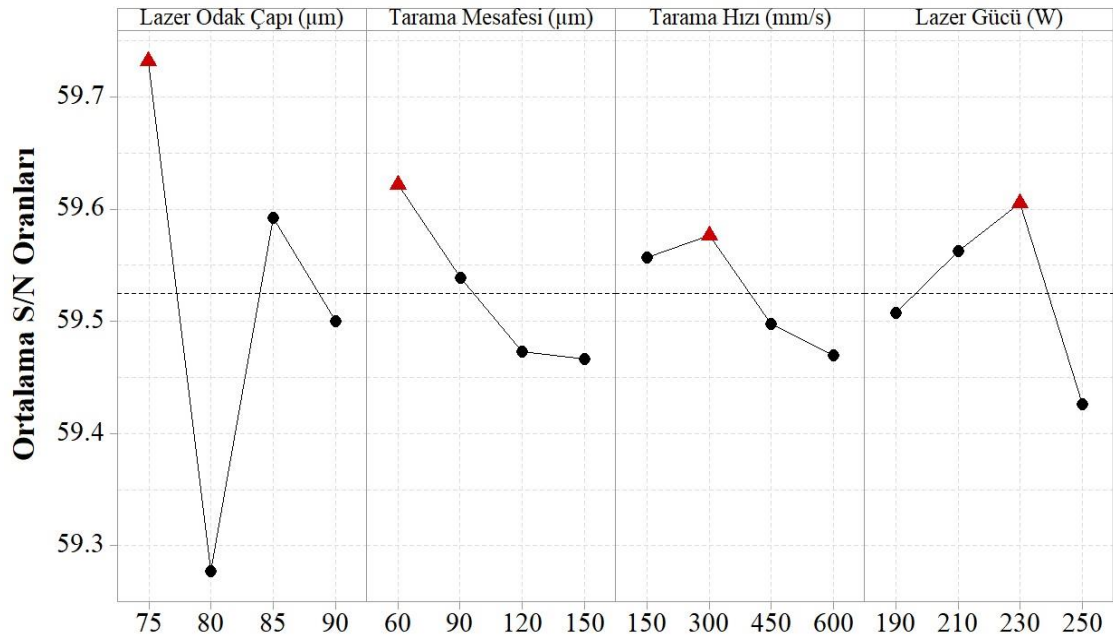
Seviyeler	Kontrol Faktörleri ve optimum seviye değerleri			
	A	B	C	D
1	59.73	59.62	59.56	59.51
2	59.28	59.54	59.58	59.56
3	59.59	59.47	59.50	59.61
4	59.50	59.47	59.47	59.43
Delta	0.45	0.16	0.11	0.18

Tablo 5.3.'e göre optimum çekme dayanımını veren parametre seviyeleri ve S/N oranları sıralanacak olursa; lazer odak çapı için seviye 1, S/N oranı 59.73 dB, tarama mesafesi

için seviye 1, S/N oranı 59.62 dB, tarama hızı için seviye 2, S/N oranı 59.58 dB ve lazer gücü için seviye 3, S/N oranı ise 59.61 dB olduğu görülmektedir.

5.1.1.2. Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

SLM yönteminde üretim parametrelerinin çekme dayanımları üzerindeki etkileri Şekil 5.1.'de verilen ana etki grafiği incelendiğinde daha net anlaşılmaktadır. SLM yöntemi kullanılarak üretilen Ti6Al4V alaşımının çekme dayanımları belirlenen kontrol faktörleri ve seviyelerinin etkisiyle değişiklik göstermektedir. Verilen grafikte kontrol faktörlerine ait en uygun seviye değeri, ilgili faktörün en üst noktasını (en büyük S/N oranı) ifade etmektedir. Buna bağlı olarak, lazer odak çapı için S/N oranı 59.73 dB ile optimum sonuç 75 μm seviyesinde elde edilmiştir. Tarama mesafesi için S/N oranı 59.62 dB ile optimum sonuca 60 μm seviyesinde ulaşılmaktadır. Tarama hızı için S/N oranı 59.58 dB ile optimum sonuç 300 mm/s seviyesinde elde edilmektedir. Aynı analiz lazer gücü için yapıldığında S/N oranı 59.61 dB ile optimum sonucu 230 W seviyesinin verdiğini göstermektedir.



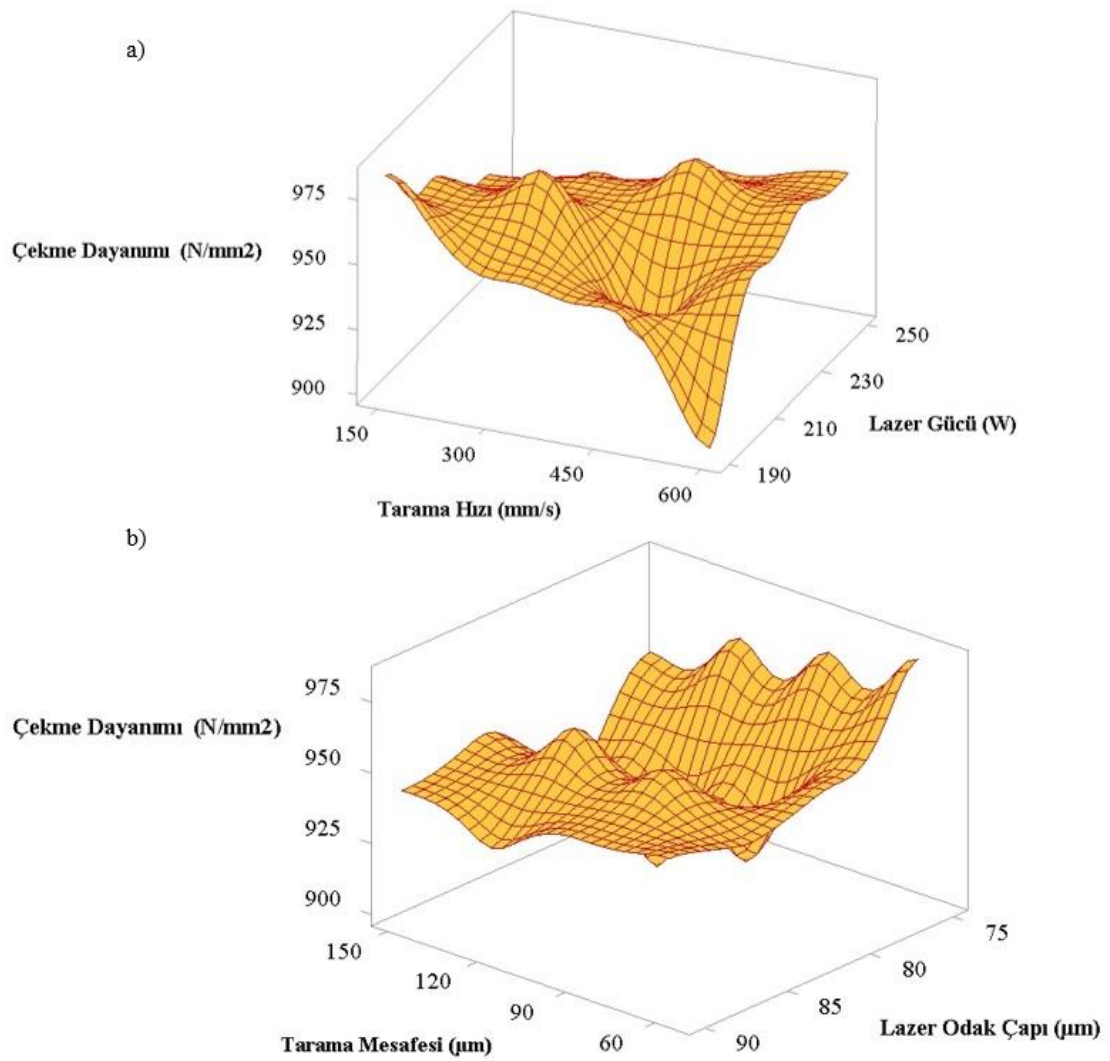
Signal-to-noise: Larger is better

Şekil 5.1. Çekme Dayanımı için kontrol faktörlerinin S/N oranına etkisi

Kontrol faktörleri arasında lazer odak çapının artmasıyla çekme dayanımının düştüğü görülmektedir. Lazer odak çapı için en yüksek dayanım değeri 75 μm seviyesinde elde edilirken en düşük dayanım değeri 80 μm seviyesinde elde edilmiştir. 80 μm seviyesinden

daha yüksek seviye kullanıldığında çekme dayanımında artış gözlemlenmiştir. Lazer odak çapına bağlı olarak çekme dayanımı incelendiğinde, 75 μm seviyesinde çekme dayanım değeri 982.71 MPa olurken 80 μm seviyesinde çekme dayanımı 913.48 MPa olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla, lazer odak çapının 75 μm seviyesinden 80 μm seviyesine yükselmesi çekme dayanımında %7.6 oranında azalmaya neden olmaktadır. Çekme dayanımının tarama mesafesinin artmasıyla olumsuz yönde etkilendiği ve dayanımın azaldığı görülmektedir. Tarama mesafesinin artması eriyik havuz boyutunu da arttırmaktadır. Bu nedenle ergime işleminin tam sağlanamaması iç yapıda kusurların oluşmasına neden olmakta ve dayanımı azalttığı düşünülmektedir. Tarama mesafesinde en yüksek dayanım değerine 60 μm seviyesinde (982.71 MPa) ulaşılmıştır. Artan tarama mesafesi ile çekme dayanımı azaldığından en düşük dayanım değeri 150 μm seviyesinde (915.62 MPa) elde edilmiştir. Tarama hızında ise 300 mm/s seviye kullanıldığında artan çekme dayanımı, daha yüksek seviyelerde azalmaktadır. Tarama hızının artması toz malzemenin ergimesi için sürenin yeterli olmayışı ve buna bağlı olarak meydana gelebilecek kusurların çekme dayanımını azalttığı düşünülmektedir. Tarama hızı için en yüksek dayanım değerine 300 mm/s seviyesinde (974.34 MPa) ulaşılırken en düşük dayanıma ise 600 mm/s seviyesinde (900.8 MPa) ulaşılmaktadır. Lazer gücünün çekme dayanımına etkisi incelendiğinde artan lazer gücü seviyesi çekme dayanımının iyileşmesine yol açmaktadır. 230 W seviyesinden daha yüksek bir lazer gücü kullanıldığında çekme dayanımı önemli derecede azalmaktadır. Lazer gücü için en yüksek dayanım değerine 230 W seviyesinde (968.57 MPa) ulaşılırken en düşük dayanıma 190 W seviyesinde (900.8 MPa) ulaşılmıştır. SLM işlem sürecinde orta seviyede tarama hızı ve lazer gücü kullanılarak kararlı bir yapı elde edildiği ve bu durumun çekme dayanımını önemli ölçüde etkilediği düşünülmektedir.

Bu durumda optimum çekme dayanım değerine 75 μm lazer odak çapı, 60 μm tarama mesafesi, 300 mm/s tarama hızı ve 230 W lazer gücü kombinasyonları kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 5.2. SLM parametrelerinin çekme dayanımı üzerindeki etkisi: (a) tarama hızı ve lazer gücü, (b) tarama mesafesi ve lazer odak çapı

Şekil 5.2.'de çekme dayanımına ait üç boyutlu grafik gösterilmektedir. SLM yöntemiyle üretilen Ti6Al4V alaşımının yüksek mukavemet değerinin hızlı soğumadan kaynaklanan ince bir mikroyapıya sebep olduğu ve oldukça ince sivri uçlu α' fazı oluşmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Han ve diğ. [84] yaptıkları çalışmada 194 W lazer gücü, 20 μm katman kalınlığı, 400 ile 1100 mm/s aralığında tarama hızı ve 70 ile 120 μm arasında değişen tarama mesafesi kullanılarak Ti6Al4V alaşımını üretmişlerdir. Araştırmacılar çalışmanın sonucunda, XOY ve XOZ kesitleri arasında artık çekme gerilmeleri ve mikrosertlikteki anizotropi, optimize edilmiş enerji yoğunlukları (120 ile 190 J/mm³) kullanılarak 1268 MPa çekme mukavemeti ve %4.2 seviyesinde uzama miktarına ulaşmışlardır. Enerji yoğunluğunun numunelerin mikroyapısının ve mekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynadığını ileri sürmüşlerdir. Yu ve diğ. [85]

lazer metal biriktirme yöntemi kullanarak üretilen Ti6Al4V numunelerinin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Üretilen numunelerin azami çekme dayanımları (1099 ± 2 MPa) tavllanmış veya döküm Ti6Al4V malzemelerinden yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Shi ve diğ. [86] yaptıkları çalışmada Ti6Al4V alaşımını üretmişlerdir. 400 W lazer gücü, tarama hızı 40 ile 80 mm/s aralığında ve yüksek katman kalınlığı kullanılarak yaptıkları çalışmada nispeten kaba bir yüzeye sahip numunelerin nihai gerilme mukavemeti ve uzama değerlerini sırasıyla 1050 MPa ve %7.03 seviyesinde elde etmişlerdir. Bu durumun metalürjik yapılaşma ve mikroyapıdan kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir. Sun ve diğ. [87] SLM yöntemiyle 0° , 45° ve 90° inşa yönü kullanarak Ti6Al4V alaşımlı numuneler üretmişlerdir. Girdi parametresi olarak 350 W lazer gücü, 0.08 mm lazer odak çapı, 1000 mm/s tarama hızı ve 0.06 mm katman kalınlığı kullanarak numunelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçların analizinde 45° kullanılarak üretilen numunelerin daha yüksek bir çekme mukavemet değerine (963.50 MPa) ve uzamaya sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak yapılan deneylerden elde edilen sonuçların yukarıda verilen durumlarla uyumlu olduğu ve literatürle paralellik gösterdiği görülmüştür.

5.1.1.3. Çekme Deneyi Sonuçları için ANOVA Analizi

Deney sırasında kullanılan kontrol faktörlerinin etki oranlarını ve bu faktörlerin seviye değerlerinin numunelerin çekme dayanımı üzerindeki etki oranlarını belirlemek için varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir. Varyans analizi %95 güven aralığı ile yapılmıştır. Tablo 5.4.'de Taguchi L_{16} dikey diziniyle gerçekleştirilen çekme dayanımı için ANOVA sonuçları listelenmiştir. Burada, KT değeri kareler toplamını, KO değeri kareler ortalamasını ve PCR ise kontrol faktörlerinin etki oranlarını ifade etmektedir.

Tablo 5.4. Çekme dayanımı için ANOVA sonuçları

Faktörler	SD	KT	KO	F	P	PCR (%)
Lazer Odak Çapı (μm)	3	5131.3	1710.4	14.71	0.027	69.20%
Tarama Mesafesi (μm)	3	737.5	245.8	2.11	0.277	9.95%
Tarama Hızı (mm/s)	3	349.0	116.3	1.00	0.500	4.71%
Lazer Gücü (W)	3	848.5	282.8	2.43	0.242	11.44%
Hata	3	348.8	116.3	-	-	4.70%
Toplam	15	7415.1	-	-	-	100.00%

Kontrol faktörlerinin çekme dayanımına etki oranları sırasıyla lazer odak çapı %69.20, lazer gücü %11.44, tarama mesafesi %9.95 ve tarama hızı %4.71 olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçların analizinde çekme dayanımını etkileyen en önemli faktörün lazer odak çapı olduğu görülmektedir. Ayrıca, yapılan analizin hata oranı %4.70 seviyesinde gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel analizlerin güvenilirlik oranı %20'den küçük olmalıdır [88]. Elde edilen sonuçlar yapılan analizin güvenilirliğini kanıtlar niteliktedir.

5.1.1.4. Çekme Deneyi Sonuçları için Regresyon Analizi

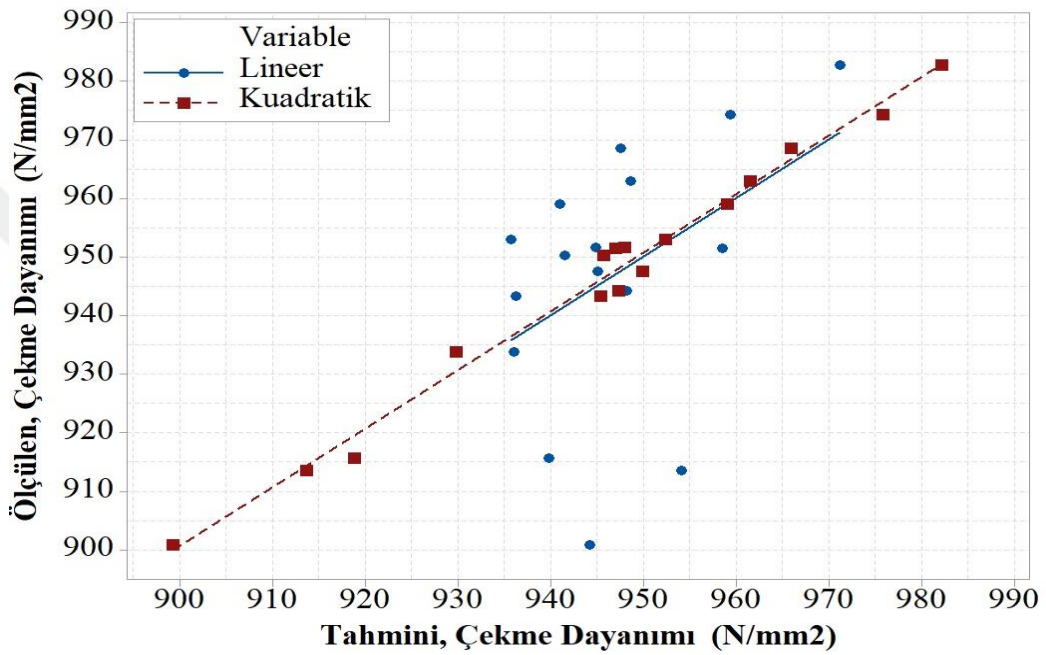
Çalışmanın bu bölümünde, deneysel yöntemlerle elde edilen 16 adet çekme dayanımı sonucu için regresyon analizi uygulanmıştır. Regresyon analizi, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi tanımlamak için matematiksel fonksiyonları kullanan bir analiz yöntemidir. Denklemler regresyon analizi kullanılarak oluşturulmaktadır. Bu denklemler bağımlı değişkenler dikkate alınarak tahmin edilebilmektedir. Mevcut çalışmada bağımlı değişken çekme dayanımıyken bağımsız değişkenler lazer odak çapı, tarama mesafesi, tarama hızı ve lazer gücüdür. Proses girdi faktörleri kullanılarak elde edilen birinci seviyede denklem Eşitlik 6.2'deki gibi elde edilmiş ve aşağıda sunulmuştur.

$$\begin{aligned} \text{Çekme Dayanımı (N/mm}^2\text{)} = & 1073 - 0.86 * \text{Lazer Odak Çapı} \\ & - 0.193 * \text{Tarama Mesafesi} - 0.0247 * \text{Tarama Hızı} - 0.116 * \text{Lazer Gücü} \end{aligned} \quad (6.2)$$

Elde edilen birinci seviye denklemin belirleme katsayısı (R^2) 0.1917 olarak elde edilmiştir. Böylelikle, gerçek değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki doğruluk derecesinin %19.17 olduğu anlamına gelmektedir. Ancak böyle bir belirleme katsayısı üzerinden yapılan tahminlerin sapma oranı çok yüksek olacaktır. Bu nedenle faktör etkileşimlerini içeren ikinci seviye bir denklem oluşturulmuştur. Elde edilen ikinci seviyeden denklem Eşitlik 6.3'deki gibi elde edilmiş ve aşağıda sunulmuştur.

$$\begin{aligned} \text{Çekme Dayanımı (N/mm}^2\text{)} = & 3529 - 84.1 * \text{Lazer Odak Çapı} \\ & + 1.27 * \text{Tarama Mesafesi} - 1.193 * \text{Tarama Hızı} + 9.61 * \text{Lazer Gücü} \\ & - 0.01580 * LG^2 - 0.00608 * TM^2 + 0.543 * LOC^2 + 0.000114 * TH^2 \\ & - 0.01250 * LG * TM - 0.0397 * LG * LOC + 0.004977 * LG * TH \\ & + 0.0308 * TM * LOC + 0.00006 * LOC * TH \end{aligned} \quad (6.3)$$

Elde edilen ikinci derece denklemin belirleme katsayısı (R^2) ise 0.9856 olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki doğruluk oranının %98.56 olduğu anlamına gelmektedir. Deneysel sonuçların ve her iki denklemden elde edilen gerçek sonuçların regresyon analizi ile elde edilen tahmini değerlerle karşılaştırılması Şekil 5.3.'de gösterilmiştir. Şekil 5.3. incelendiğinde deneysel sonuçlara en yakın tahmin değerlerinin ikinci dereceden denklem ile elde edildiği görülmektedir.



Şekil 5.3. Gerçek ölçümler ile tahmin sonuçlarının karşılaştırılması

5.1.2. Elastisite Modülü

5.1.2.1. Elastisite Modülü için Sinyal/Gürültü Oranlarının Analizi

Mevcut çalışmada farklı üretim parametreleri ve seviyeleri kullanılarak üretilen numunelere birtakım mekanik deneyler uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar arasında numunelerin elastisite modülleri incelenmiştir. Elastisite modülü değerinin elde edilmesi numunedeki gerilmelerin hesaplanmasında yardımcı olmaktadır. Dolayısıyla numuneye zarar vermeden mukavemet değeri ölçülmektedir. Daha yüksek gerilme altında meydana gelen küçük şekil değişimleri elastisite modül değerinin yüksek olduğunu göstermektedir. Çalışmanın amacı yüksek elastisite modül değerini elde etmek olduğundan S/N (sinyal/gürültü) oranlarının hesaplanmasında “en büyük en iyi” değerini veren Eşitlik 6.4’deki formül kullanılmıştır.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6.4)$$

Burada y, performans karakteristiğinin değerini (elastisite modülü) ifade etmekte ve n, y değerlerinin sayısını temsil etmektedir.

Mevcut çalışmada Taguchi L₁₆ dikey dizin deney tasarımı kullanılarak kontrol faktörleri ve bu faktörlere ait seviye değerleri Tablo 5.5.'de listelenmiştir.

Tablo 5.5. Deney tasarımı kullanılarak kontrol faktörleri ve bu faktörlerin seviye değerleri

Kontrol Faktörleri	Birim	Sembol	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Lazer Odak Çapı	µm	A	75	80	85	90
Tarama Mesafesi	µm	B	60	90	120	150
Tarama Hızı	mm/s	C	150	300	450	600
Lazer Gücü	W	D	190	210	230	250

Kontrol faktörlerinin seviyeleri, deneyler sonucunda elde edilen elastik modülü değerleri ve S/N oranları Tablo 5.6.'da listelenmiştir. Yapılan deneylerin sonucunda ortalama elastisite modülü değeri 56.6562 GPa olarak elde edilirken S/N oranlarının ortalama değeri 34.77454 olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.6. Taguchi L16 Deney Tasarımı ve elastisite modülüne ait S/N oranları

Deney Sayısı	Deney Parametreleri ve Seviye Değerleri				Deneysel Sonuçlar	
	A	B	C	D	Elastisite Modülü (GPa)	S/N Oranı
1	75	60	150	190	64.2	36.15070
2	75	90	300	210	64.9	36.24489
3	75	120	450	230	76.4	37.66186
4	75	150	600	250	60.3	35.60634
5	80	60	300	230	71.6	37.09826
6	80	90	150	250	66.2	36.41715
7	80	120	600	190	59.5	35.49033
8	80	150	450	210	81.7	38.24444
9	85	60	450	250	52.8	34.45267
10	85	90	600	230	62.2	35.87580
11	85	120	150	210	50.6	34.08301

12	85	150	300	190	40	32.04119
13	90	60	600	210	45.7	33.19832
14	90	90	450	190	32.2	30.15711
15	90	120	300	250	37.4	31.45743
16	90	150	150	230	40.8	32.21320

Elastisite modülü için S/N oranı yanıt tablosu Tablo 5.7.'de listelenmiştir. S/N yanıt tablosunda kontrol faktörlerine ait optimum seviye değerleri görülmektedir.

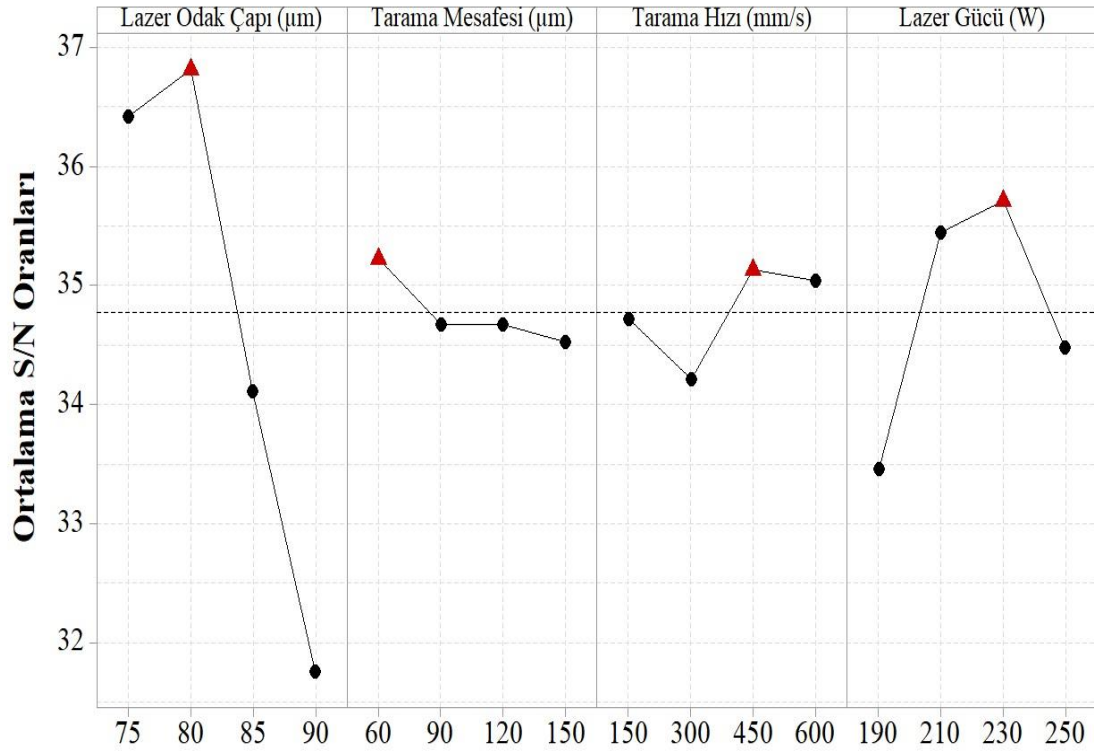
Tablo 5.7. Elastisite modülü için S/N yanıt tablosu

Seviyeler	Kontrol Faktörleri ve optimum seviye değerleri			
	A	B	C	D
1	36.42	35.22	34.72	33.46
2	36.81	34.67	34.21	35.44
3	34.11	34.67	35.13	35.71
4	31.76	34.53	35.04	34.48
Delta	5.06	0.70	0.92	2.25

Tablo 5.7.'ye göre optimum elastisite modülü değerini veren parametre seviyeleri ve S/N oranları sıralanacak olursa; lazer odak çapı için seviye 2, S/N oranı 36.81 dB, tarama mesafesi için seviye 1, S/N oranı 35.22 dB, tarama hızı için seviye 3, S/N oranı 35.13 dB ve lazer gücü için seviye 3, S/N oranı ise 35.71 dB olduğu görülmektedir.

5.1.2.2. Elastisite Modülü için Deney Sonuçlarının Analizi

Yapılan analizler sonucunda elastisite modülü değerlerine ait ana etki grafiği Şekil 5.4.'de verilmiştir. Verilen grafikte kontrol faktörlerine ait en uygun seviye değerleri, ilgili faktörün en üst noktasını ifade etmektedir. Buna bağlı olarak, lazer odak çapı için S/N oranı 36.81 ile optimum sonuç 80 μm seviyesinde elde edilmiştir. Aynı analizler diğer kontrol faktörleri için de yapılmıştır. Dolayısıyla tarama mesafesi için S/N oranı 35.22 ile optimum sonuca 60 μm 'de, tarama hızı için S/N oranı 35.13 ile optimum sonuca 450 mm/s'de ve lazer gücü için S/N oranı 35.71 ile optimum sonuca 230 W seviyesinde ulaşıldığı görülmektedir.

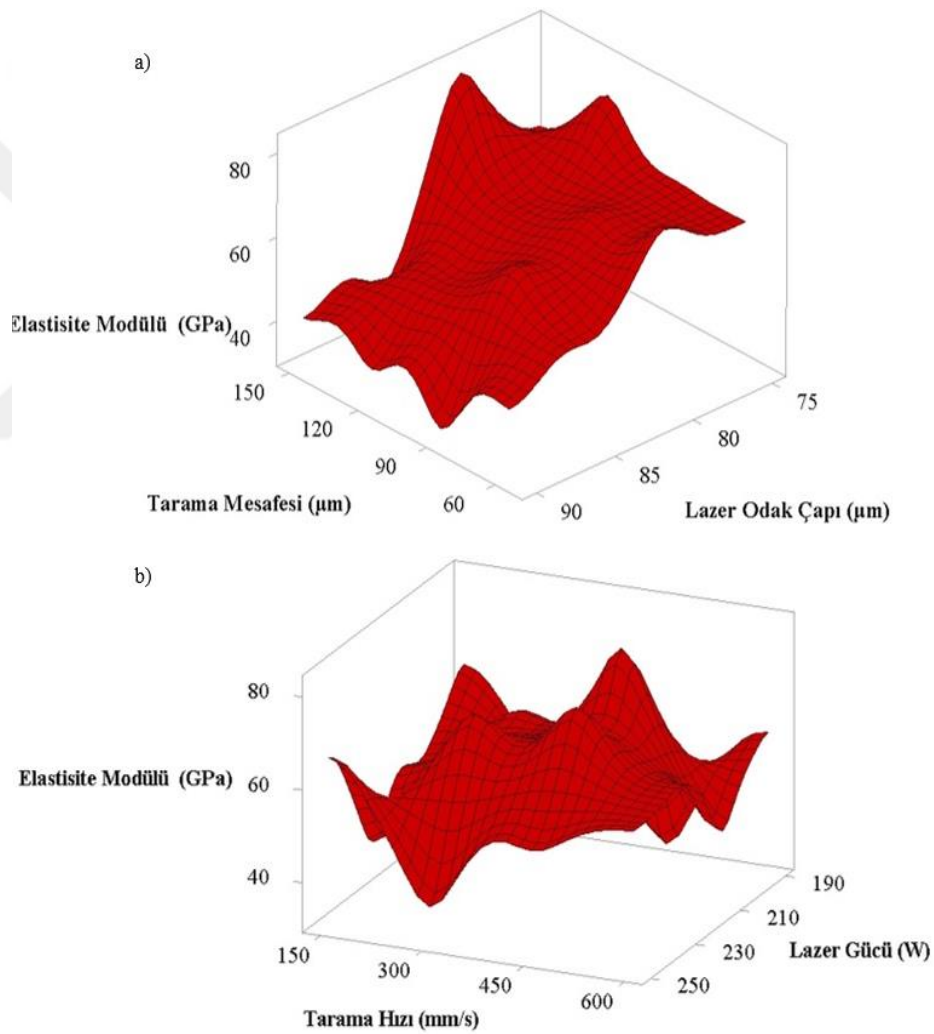


Signal-to-noise: Larger is better

Şekil 5.4. Elastisite modülü için kontrol faktörlerinin S/N oranına etkisi

Seçici lazer ergitme işlem sürecinde elastisite modülü için elde edilen sonuçların analizinde süreci etkileyen kontrol faktörlerinin etkileri incelenmiştir. Şekil 5.4.' de gösterildiği gibi, dört kontrol faktörü ve seviyeleri kullanılarak üretilmiş numunelerin elastisite modülü üzerindeki etkileri sunulmuştur. Elastisite modülünün, dört parametrenin lineer bir fonksiyonu olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.4.'de gösterildiği gibi, lazer gücü seviyesinin artırılmasıyla elastisite modülünün arttığı görülmektedir. Özellikler üzerinde aynı etki, lazer odak çapı ve/veya tarama mesafesi azaltılarak da elde edilebilmektedir. Lazer odak çapının farklı seviyeleri elastisite modülünde önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Seviye değerlerinin artmasıyla elastisite modülünde büyük ölçüde azalma görülmektedir. Mikroyapısal homojensizliğin elastisite modülü değerlerinde değişkenliğe neden olduğu düşünülmektedir. Tarama mesafesinin seviye değerleri arttıkça elastisite modülünün olumsuz yönde etkilendiği görülmektedir. Ancak bu durum çok önemli bir farka yol açmamaktadır. Lazer odak çapı ve tarama mesafesinin seviye değerlerinin artması eriyik havuz boyutunun artmasına yol açmaktadır. Bu durum eriyik havuzunun kararlı bir yapıya ulaşamamasına, böylelikle elastisite modülü değerinin azalmasına yol açtığı düşünülmektedir. Tarama hızının 150 mm/s den 300

mm/s'ye yükselmesi elastisite modülünü olumsuz yönde etkilemektedir. Ancak, 300 mm/s'den daha yüksek bir tarama hızı kullanıldığında elastisite modülünde iyileşmeler görülmektedir. 190 W lazer gücü kullanıldığında numunelerin ergimesi için yeterli enerjinin sağlanamaması numunenin mikroyapısında kusurlara neden olduğu ve bu nedenle elastisite modülünün olumsuz yönde etkilendiği düşünülmektedir. SLM yönteminde 230 W lazer gücü kullanılarak kararlı bir yapıya ulaşıldığı ve bu durumun elastisite modülünü önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Şekil 5.5.'de elastisite modülüne ait üç boyutlu grafik gösterilmektedir.



Şekil 5.5. SLM parametrelerinin elastisite modülü üzerindeki etkisi: (a) tarama hızı ve lazer gücü, (b) tarama mesafesi ve lazer odak çapı

Mevcut çalışmada elde edilen numunelerin tipik Ti6Al4V alaşımının elastisite modülü değerine göre daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Bunun sebebi, aşırı doymuş V atomları ve kafes üzerindeki artan kusurlar (çıkıklar, ikizler ve istifleme hataları gibi) nedeniyle

kafes genişlemesine bağlanabilir [89]. Elastisite modülü gözeneklilik seviyesinin artmasıyla ters orantılı olarak azalmaktadır [90]. Şekil 5.5.'de verilen üç boyutlu grafik incelendiğinde kontrol faktörlerinin seviye değerlerine göre elastisite modüllerinde değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Lazer gücünün azalması ve buna bağlı olarak lazer odak çapının artması çıktı parametresi için olumsuz sonuçlar meydana getirmiştir. Üretim sürecinde düşük seviyede lazer gücünün kullanılması toz partiküllerinin ergimesi için yeterli enerjinin sağlanamaması, bununla birlikte lazer odak çapının artması durumunda ergime alanı artışı elastisite modülünde olumsuz sonuçlar meydana getirilmesine neden olmuştur. Lazer gücü açısından en düşük elastisite modülü değeri 190 W lazer gücü ile elde edilirken en yüksek elastisite modülü değeri 230 W lazer gücü ile elde edilmiştir. Lazer gücüne bağlı olarak elastisite modülü incelendiğinde 190 W lazer gücünde ortalama elastisite modülü değeri 32.2 GPa çıkarken 230 W lazer gücünde ortalama elastisite modülü değeri 71.6 GPa çıkmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen bilgiler doğrultusunda 190 W lazer gücüne göre 230 W lazer gücü kullanıldığında elastisite modülü değeri %55 oranında bir iyileşme göstermiştir. Lazer odak çapı için en yüksek değer 80 μm kullanılarak 81.7 GPa elde edilirken, en düşük değer 90 μm ile 32.2 GPa elde edilmiştir. Lazer odak çapında ki artış, değer sonucunda %60.58 oranında azalma göstermiştir. Tarama mesafesi için elastisite modülü incelendiğinde en yüksek değer 60 μm ile 71.6 GPa seviyesine ulaşırken en düşük değer verilerine 150 μm ile 40.8 GPa seviyesine ulaşmıştır. Bu veriler ışığında tarama mesafesinin artması sonuçta %43'lük bir azalmaya neden olmuştur. Tarama hızı ele alındığında en düşük sonuç 300 mm/s seviyesinde 37.8 GPa iken en yüksek değer 450 mm/s ile 81.7 GPa olarak gözlemlenilmiştir. Tarama hızı arttıkça elastisite modülü değeri %53.73 oranında iyileşme göstermiştir. 300 mm/s tarama hızı ve tarama mesafesinin yüksek seviye kombinasyonları da elastisite modülün azalmasında etken rol oynamıştır. Bu çalışmada sonucunda veriler incelendiğinde, kontrol faktörlerinin farklı seviye değerleri kullanılarak elde edilen elastisite modülü değerlerinde ki farklılıklar üretim sırasında farklı seviye değerlerinden kaynaklanan mikroyapıda oluşan kusurlar, toz malzemeyi eritecek enerji yoğunluğu, numune içerisinde ki gözeneklilik değeri ve üretim sırasında ki bağımsız değişkenliklerden kaynaklı olarak çıkan sonuçlarda değişkenliğe neden olduğu düşünülmektedir.

Bu durumda optimum elastisite modülü değerine 80 μm lazer odak çapı, 60 μm tarama mesafesi, 450 mm/s tarama hızı ve 250 W lazer gücü kombinasyonları kullanılarak ulaşılmıştır.

5.1.2.3. Elastisite Modülü için ANOVA Analizi

Kontrol faktörlerinin ve bu faktörlere ait seviye değerlerinin elastisite modülü üzerindeki etki oranlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Bu analiz %95 güven aralığında yapılmıştır. Taguchi L_{16} dikey diziniyle gerçekleştirilen deneyin ANOVA sonuçları Tablo 5.8.'de listelenmiştir. Burada, KT değeri kareler toplamını, KO değeri kareler ortalamasını ve PCR ise kontrol faktörlerinin etki oranlarını ifade etmektedir.

Tablo 5.8. Elastisite modülü için ANOVA sonuçları

Faktörler	SD	KT	KO	F	P	PCR (%)
Lazer Odak Çapı (μm)	3	2423.41	807.804	16.84	0.022	76.26%
Tarama Mesafesi (μm)	3	20.56	6.852	0.14	0.928	0.65%
Tarama Hızı (mm/s)	3	114.45	38.149	0.80	0.572	3.60%
Lazer Gücü (W)	3	475.39	158.462	3.30	0.176	14.96%
Hata	3	143.92	47.972	-	-	4.53%
Toplam	15	3177.72	-	-	-	100.00%

Kontrol faktörlerinin elastisite modülüne etki oranları sırasıyla lazer odak çapı %76.26, lazer gücü %14.96, tarama hızı %3.60 ve tarama mesafesi %0.65 olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, elastisite modülü etkileyen en önemli faktörün lazer odak çapı olduğu görülmektedir. Güvenilebilir bir istatistiksel analizde hata oranı %20'den küçük olmalıdır [88]. Mevcut çalışmada hata oranı %4.53 seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar yapılan analizin güvenilirliğini kanıtlar niteliktedir.

5.1.2.4. Elastisite Modülü için Regresyon Analizi

Çalışmanın bu bölümünde, deneysel yöntemlerle elde edilen 16 adet elastisite modülü sonucu için regresyon analizi uygulanmıştır. Regresyon analizi, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi tanımlamak için matematiksel fonksiyonları kullanan bir

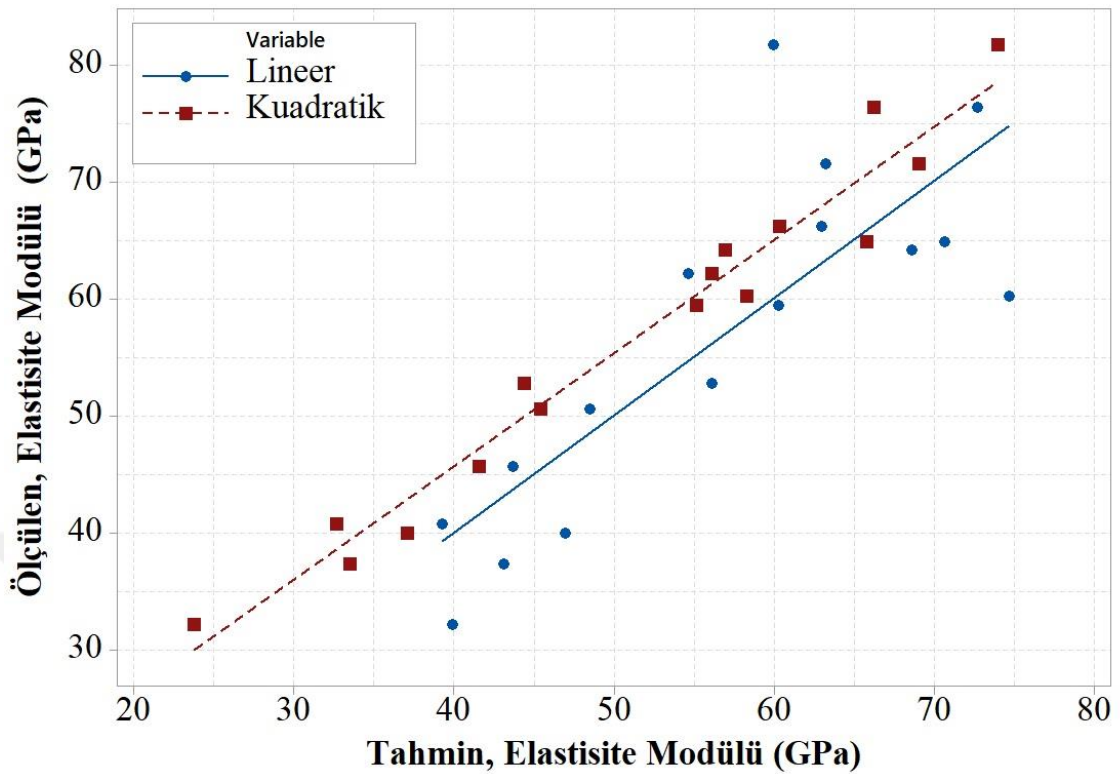
analiz yöntemidir. Oluşturulan bu denklemler bağımlı değişkeler dikkate alınarak bağımsız değişkenlerin tahmini yapılabilmektedir. Mevcut çalışmada bağımlı değişken elastisite modülü değeriye bağımsız değişkenler lazer odak çapı, tarama mesafesi, tarama hızı ve lazer gücüdür. Proses girdi faktörleri kullanılarak elde edilen birinci seviyede denklem Eşitlik 6.5'deki gibi elde edilmiş ve aşağıda sunulmuştur.

$$\begin{aligned} \text{Elastisite Modül (GPa)} = & 203.5 - 2.013 * \text{Lazer Odak Çapı} \\ & -0.0301 * \text{Tarama Mesafesi} + 0.0078 * \text{Tarama Hızı} + 0.088 * \text{Lazer Gücü} \end{aligned} \quad (6.5)$$

Elde edilen birinci seviye denklemin belirleme katsayısı (R^2) 0.6706 olarak elde edilmiştir. Böylelikle, gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki doğruluk oranının %67.06 olduğu anlamına gelmektedir. Ancak böyle bir belirleme katsayısı üzerinden yapılan değerlendirmeler için sapma çok yüksektir. Bu nedenle faktör etkileşimlerini içeren ikinci seviye bir denklem oluşturulmuştur. Elde edilen ikinci seviyeden denklem Eşitlik 6.6'deki gibi elde edilmiş ve aşağıda sunulmuştur.

$$\begin{aligned} \text{Elastisite Modül (GPa)} = & -2101 + 45.4 * \text{Lazer Odak Çapı} \\ & -1.88 * \text{Tarama Mesafesi} - 0.051 * \text{Tarama Hızı} + 4.29 * \text{Lazer Gücü} \\ & -0.01270 * LG^2 + 0.00213 * TM^2 - 0.313 * LOC^2 - 0.000123 * TH^2 \\ & +0.00769 * LG * TM - 0.0121 * LG * LOC - 0.000959 * LG * TH \\ & -0.0022 * TM * LOC + 0.00441 * LOC * TH \end{aligned} \quad (6.6)$$

Elde edilen ikinci derece denklemin belirleme katsayısı (R^2) ise 0.9612 olarak elde edilmiştir. Böylelikle, gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki doğruluk oranının %96.12 olduğu anlamına gelmektedir. Deneysel sonuçların ve her iki denklemden elde edilen gerçek sonuçların regresyon analizi ile elde edilen tahmini değerlerle karşılaştırılması Şekil 5.6.'da gösterilmiştir. Şekil 5.6. incelendiğinde, deney sonuçlarına en yakın tahmin değerlerinin ikinci dereceden denklem ile elde edildiği görülmektedir.



Şekil 5.6. Gerçek ölçümler ile tahmini sonuçların karşılaştırılması

5.1.3. % Uzama Miktarı

5.1.3.1. % Uzama değerleri için Sinyal/Gürültü Oranlarının Analiz Edilmesi

Optimum SLM parametrelerinin belirlenmesi, tarama stratejisi ve katman kalınlığı değerleri sabit tutularak SLM parametrelerinin en yüksek % uzama değerlerini veren kombinasyonlarının bulunması ve kontrol faktörlerinin etkileşimlerinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Yapılan deney için kontrol faktörleri lazer odak çapı (μm), tarama mesafesi (μm), tarama hızı (mm/s) ve lazer gücü (W) olarak belirlenmiştir. Çalışmanın amacı en büyük % uzama miktarını elde etmek olduğundan S/N oranının belirlenmesinde “en büyük en iyi” yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu yaklaşım sonuçları Eşitlik 6.7’deki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6.7)$$

Burada y , performans karakteristiğinin değerini (% uzama miktarı) ifade etmekte ve n , y değerlerinin sayısını temsil etmektedir.

Kontrol faktörlerinin seviyeleri Tablo 5.9. ve yapılan deneylerin sonucu elde edilen uzama miktarı ve S/N oranları Tablo 5.10’da listelenmiştir.

Deneyler sonucunda ortalama uzama değeri %16.53 olarak elde edilirken, S/N oranlarının ortalama değeri 24.20 dB olarak hesaplanmıştır.

Tablo 5.9. Deney tasarımında kullanılan kontrol faktörleri ve bu faktörlerin seviye değerleri

Kontrol Faktörleri	Birim	Sembol	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Lazer Odak Çapı	μm	A	75	80	85	90
Tarama Mesafesi	μm	B	60	90	120	150
Tarama Hızı	mm/s	C	150	300	450	600
Lazer Gücü	W	D	190	210	230	250

Tablo 5.10. Taguchi L16 Deney Tasarımı ve deneysel sonuçlar

Deney Sayısı	Kontrol Faktörleri ve Seviye Değerleri				Deneysel Sonuçlar	
	A	B	C	D	% Uzama	S/N Oranı
1	75	60	150	190	12.882	22.19967
2	75	90	300	210	13.358	22.51483
3	75	120	450	230	12.274	21.77972
4	75	150	600	250	18.408	25.30013
5	80	60	300	230	16.816	24.51445
6	80	90	150	250	14.232	23.06532
7	80	120	600	190	11.412	21.14724
8	80	150	450	210	16.198	24.18923
9	85	60	450	250	18.203	25.20286
10	85	90	600	230	20.182	26.09928
11	85	120	150	210	17.298	24.75992
12	85	150	300	190	17.258	24.73981
13	90	60	600	210	16.954	24.58544
14	90	90	450	190	21.828	26.78028
15	90	120	300	250	14.872	23.44739
16	90	150	150	230	22.328	26.977

Deneyden elde edilen sonuçların S/N oranları Taguchi metodu kullanılarak optimize edilmiştir. Deneysel sonuçlar, literatürde S/N oranı olarak bilinen istatistiksel bir performans ölçüsü kullanılarak değerlendirilmiştir. Burada S değeri sinyal oranını, N değeri ise gürültü oranını ifade etmektedir. Uzama miktarı için S/N oranı yanıt tablosu Tablo 5.11.'de listelenmiştir. S/N yanıt tablosunda kontrol faktörlerine ait optimum seviye değerleri görülmektedir.

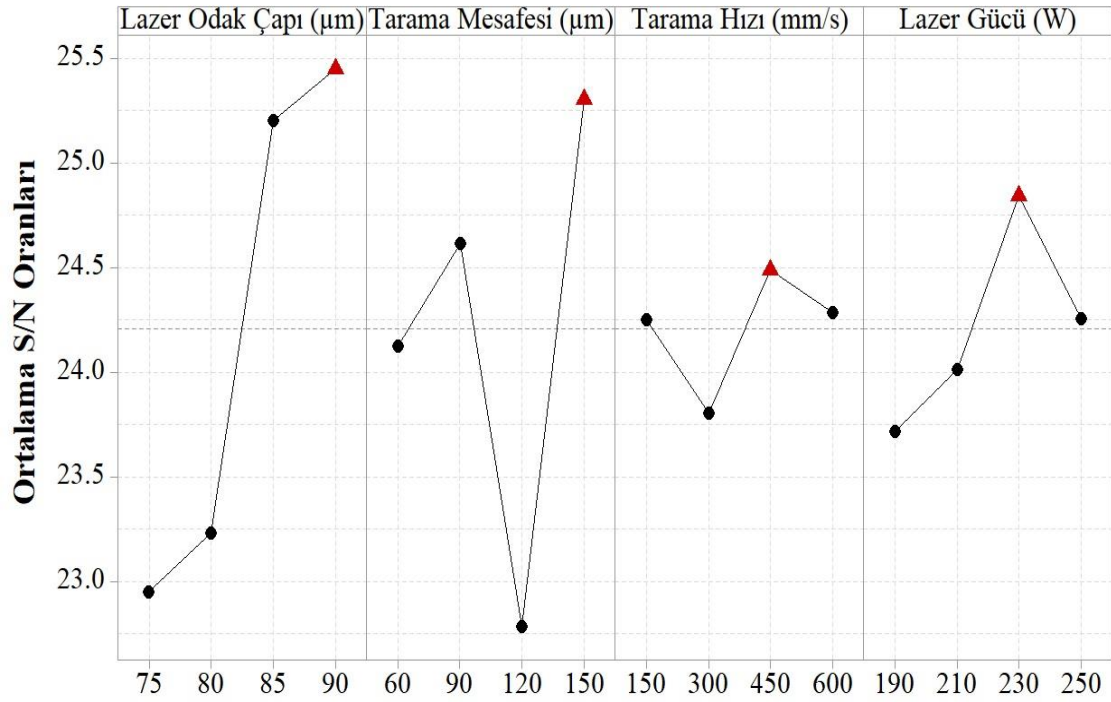
Tablo 5.11. % Uzama miktarı için S/N yanıt tablosu

Seviyeler	Kontrol Faktörleri ve optimum seviye değerleri			
	A	B	C	D
1	22.95	24.13	24.25	23.72
2	23.23	24.61	23.80	24.01
3	25.20	22.78	24.49	24.84
4	25.45	25.30	24.28	24.25
Delta	2.50	2.52	0.68	1.13

Tablo 5.11.'e göre optimum % uzama değerini veren parametre seviyeleri ve S/N oranları sıralanacak olursa; lazer odak çapı için seviye 4, S/N oranı 25.45 dB, tarama mesafesi için seviye 4, S/N oranı 25.30 dB, tarama hızı için seviye 3, S/N oranı 24.49 dB ve lazer gücü için seviye 3, S/N oranı ise 24.84 dB olduğu görülmektedir.

5.1.3.2. % Uzama Miktarı için Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

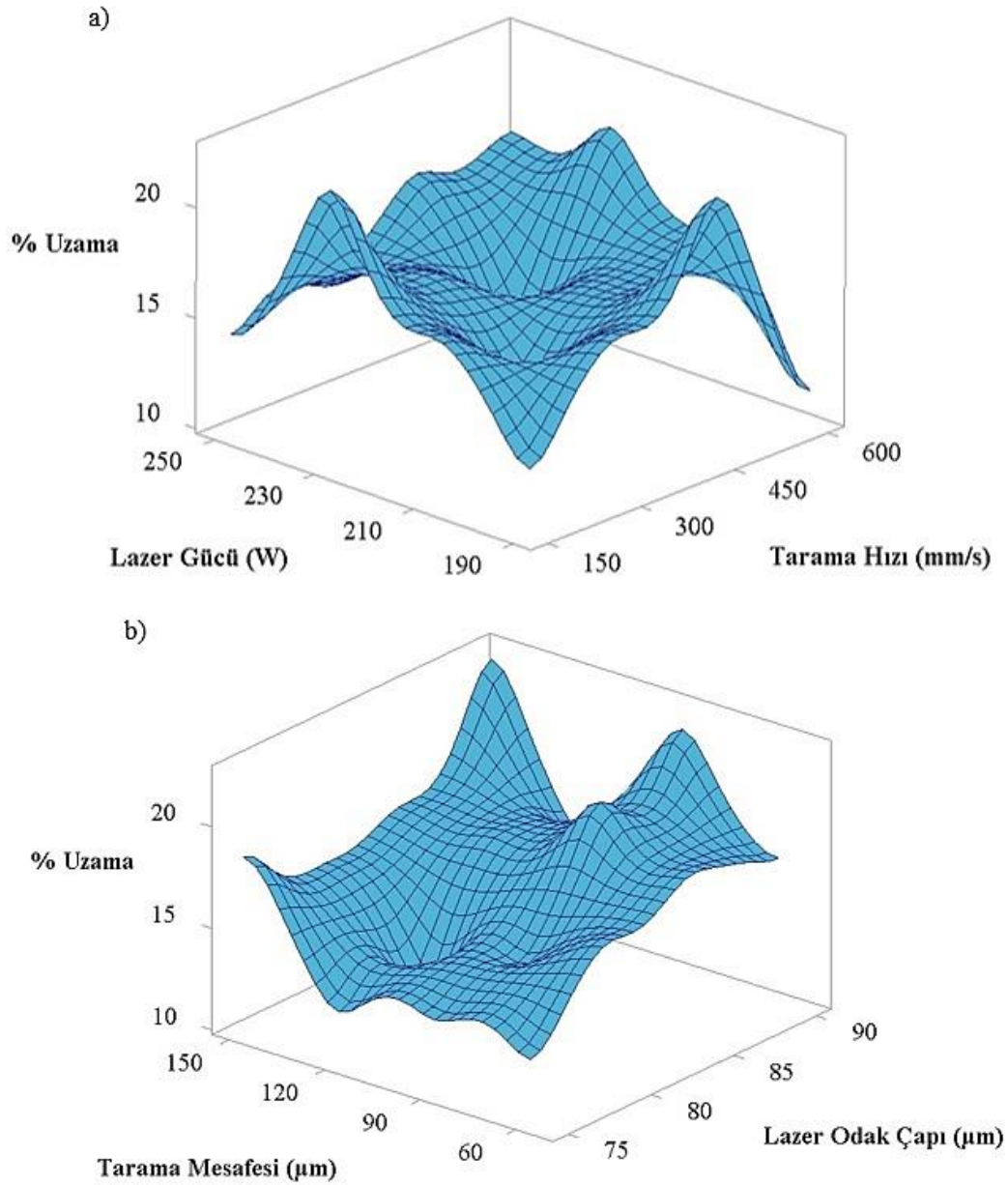
SLM yöntemiyle lazer odak çapı tarama mesafesi, tarama hızı, lazer odak çapı parametrelerine bağlı olarak Ti6Al4V alaşımının uzama miktarları belirgin bir şekilde değişiklik göstermektedir. Yapılan analizler sonucunda % uzama değerlerine ait ana etki grafiği Şekil 5.7.'de verilmiştir. Verilen grafikte kontrol faktörlerine ait en uygun seviye değerleri, ilgili faktörün en üst noktasını ifade etmektedir. Buna bağlı olarak, lazer odak çapı için S/N oranı 25.45 dB ile optimum sonuç 90 μ m seviyesinde elde edilmiştir. Aynı analizler diğer kontrol faktörleri için de yapılmıştır. Dolayısıyla tarama mesafesi için S/N oranı 25.30 dB ile optimum sonuca 150 μ m'de, tarama hızı için S/N oranı 24.49 dB ile optimum sonuca 450 mm/s'de ve lazer gücü için S/N oranı 24.84 dB ile optimum sonuca 230 W seviyesinde ulaşıldığı görülmektedir. Kontrol faktörlerinin uzama miktarında ki değişimini gösteren üç boyutlu yüzey grafiği Şekil 23'de gösterilmiştir.



Signal-to-noise: Larger is better

Şekil 5.7. %Uzaman miktarı için kontrol faktörlerinin S/N oranına etkisi

Şekil 5.7. incelendiğinde tarama hızındaki artışın uzama miktarını olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. 300 mm/s tarama hızı seviyesinden daha yüksek bir seviye uzama miktarında iyileşmeye neden olmuştur. Tarama hızı için optimum seviyenin 450 mm/s olduğu ve bu değerden daha yüksek bir seviyenin uzama miktarında olumsuz etkilere yol açtığı incelenmiştir. Bununla birlikte lazer gücünün ve lazer odak çapının artmasıyla doğru orantılı olarak uzama miktarında iyileşmeler söz konusudur. 230 W lazer gücü ve 90 µm lazer odak çapı uzama miktarı için optimum seviyeler olarak gözlemlenirken 230 W seviyeden daha yüksek bir lazer gücü kullanıldığında uzama miktarının azalmasına neden olmaktadır. Tarama mesafesi 60 µm seviyesinden 90 µm seviyesine yükseldiğinde uzama miktarında artış yaşandığı görülmektedir. Ancak, 120 µm seviyesinde uzama miktarında azalma olduğu görülmektedir. 120 µm seviyesinden daha yüksek bir seviyede üretim gerçekleştirildiğinde uzama miktarının da seviyedeki artışla doğru orantılı olarak arttığı ve uzama miktarı için optimum seviyeye 150 µm seviyesinde ulaşıldığı anlaşılmaktadır. Şekil 5.8.'de % uzama miktarına ait üç boyutlu grafik gösterilmektedir.



Şekil 5.8. SLM parametrelerinin % uzama miktarı üzerindeki etkisi: (a) tarama hızı ve lazer gücü, (b) tarama mesafesi ve lazer odak çapı

Şekil 5.8.a’da verilen üç boyutlu grafik incelendiğinde kontrol faktörlerinin seviye değerlerine göre numunede ki uzama miktarları incelenmiştir. Lazer gücü ve tarama hızının artması uzama miktarında olumlu sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Lazer gücü için en düşük değer 190 W seviyesi kullanıldığında %11.412’lik uzama elde edilirken, en yüksek değer 230 W seviyesinde %22.328’lik uzama elde edilerek %48.9 oranında iyileşme gözlemlenmiştir. Tarama hızı ele alındığında en düşük değer 300 mm/s’de %13.358 seviyelerinde iken en yüksek değer 450 mm/s’de %21.828 olarak gözlemlenirken uzama

miktarında %38.8'lik bir iyileşme söz konusudur. Şekil 5.8.b incelendiğinde uzama miktarına lazer odak çapı ve tarama mesafesinin etkisi görülmektedir. Lazer odak çapı için en düşük uzama miktarına 75 μm ile %12.274'lük bir değer elde edilirken, en yüksek uzama miktarı ise 90 μm seviyesinde %21.828'lik bir değere ulaşılmıştır. Tarama mesafesi açısından ise en düşük değer 120 μm seviyesinde (%11.412) elde edilirken, 150 μm seviyesinde (%22.328) en yüksek uzama miktarı elde edilmiştir. Tarama mesafesinde ki bu artış uzama miktarında %48.9 oranında iyileşme sağlamıştır. Chang ve diğ. [91] SLM yöntemiyle Ti6Al4V alaşımlı numuneler üretmişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada 350 W lazer gücü, 1250 mm/s tarama hızı, 0.06 mm katman kalınlığı ve zikzak tarama stratejisi ile üretimi gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmanın sonucunda dikey yönde üretilen numunelerin uzama miktarı (%17.7) yatay yönde üretilen numunelerin uzama miktarına göre daha yüksek sonuçlar elde etmişlerdir. Wang ve diğ. [92] SLM yöntemi ile Ti6Al4V alaşımını üretmişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada belirlenen parametre aralığında mikroyapı ve mekanik özellikleri incelemişlerdir. Girdi parametresi olarak 50-250 W aralığında lazer gücü, 250-1750 mm/s aralığında tarama hızı, 30 μm katman kalınlığı, 100 μm tarama mesafesi ve 60° tarama açısı kullanmışlardır. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, 200-250 W lazer gücü ve 850-1150 mm/s tarama hızıyla optimum sonuçlara ulaşmışlardır. Ayrıca, belirlenen parametre grubunda tarama hızının artmasıyla uzama miktarının arttığını ileri sürmüşler ve 1150 mm/s tarama hızında %7.8 seviyesinde uzama elde etmişlerdir.

Bu durumda optimum uzama miktarı değerine lazer odak çapı için 90 μm , tarama mesafesi için 150 μm , tarama hızı için 450 mm/s ve lazer gücü için 230 W seviye kombinasyonları kullanılarak ulaşılmıştır.

5.1.3.3. % Uzama Miktarı için ANOVA Analizi

Taguchi L_{16} dikey dizilimi ile yapılan deneylerde, kontrol faktörlerinin etki oranlarının ve sonucun seviyelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu, üretim için hangi faktörün önemli olduğunu anlamayı kolaylaştırmaktadır. Mevcut çalışmada, kontrol faktörlerinin çıktı parametresi üzerindeki etki oranlarını belirlemek için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Bu analiz %95 güven aralığı ile yapılmıştır. % uzama miktarı için gerçekleştirilen ANOVA sonuçları Tablo 5.12.'de listelenmiştir.

Tablo 5.12. % Uzama miktarı için ANOVA sonuçları

Faktörler	SD	KT	KO	F	P	PCR (%)
Lazer Odak Çapı (μm)	3	71.017	23.672	2.80	0.210	44.79%
Tarama Mesafesi (μm)	3	46.054	15.351	1.81	0.318	29.05%
Tarama Hızı (mm/s)	3	5.331	1.777	0.21	0.884	3.36%
Lazer Gücü (W)	3	10.762	3.587	0.42	0.750	6.79%
Hata	3	25.382	8.461	-	-	16.01%
Toplam	15	158.547	-	-	-	100.00%

Elde edilen ANOVA sonuçlarından yola çıkarak % uzama miktarı için en etkili kontrol faktörünün %44.79 etki oranıyla lazer odak çapı olduğu anlaşılmaktadır. Lazer odak çapını, tarama mesafesi %29.05, lazer gücü %6.79 ve tarama hızı %3.36 etki oranıyla takip etmiştir. P değeri 0.05'ten küçük olduğundan, kontrol faktörünün çıktı parametresi üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu kabul edildiğinden, lazerin odak çapının ve tarama mesafesinin uzama miktarı üzerinde bir miktar etkisi olduğu söylenebilmektedir. Kontrol faktörlerin etki oranlarının belirlenmesinde tabloda yer alan F değerleri dikkate alınmıştır. Yapılan analiz sonucunda hata oranı %16.01 seviyesinde çıkmıştır. İstatistiksel analizlerin güvenilebilirlik oranı %20'den küçük olmalıdır [88]. Elde edilen sonuçlar yapılan analizin güvenilirliğini kanıtlar niteliktedir.

5.1.3.4. % Uzama Miktarı için Regresyon Analizi

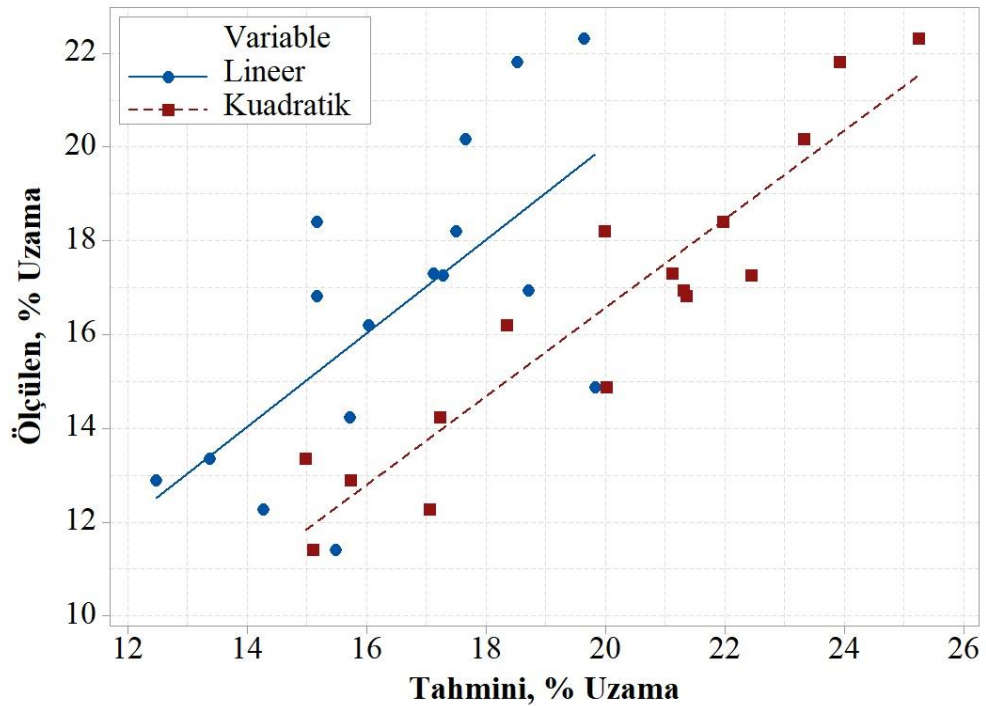
Çalışmanın bu bölümünde, deneysel yöntemlerle elde edilen 16 adet uzama miktarı için regresyon analizi uygulanmıştır. Regresyon analizi, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi tanımlamak için matematiksel fonksiyonları kullanan bir analiz yöntemidir. Oluşturulan bu denklemler bağımlı değişkenler dikkate alınarak bağımsız değişkenlerin tahmini yapılabilmektedir. Mevcut çalışmada bağımlı değişken % uzama miktarıyken bağımsız değişkenler lazer odak çapı, tarama mesafesi, tarama hızı ve lazer gücüdür. Proses girdi faktörleri kullanılarak elde edilen birinci seviyede denklem Eşitlik 6.8'deki gibi elde edilmiş ve aşağıda sunulmuştur.

$$\begin{aligned} \% \text{ Uzama} = & -18.7 + 0.357 * \text{Lazer Odaak Çapı} \\ & + 0.0119 * \text{Tarama Mesafesi} + 0.00114 * \text{Tarama Hızı} + 0.0185 * \text{Lazer Gücü} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Elde edilen birinci seviye denklemin belirleme katsayısı (R^2) 0.4396 olarak elde edilmiştir. Böylelikle, gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki doğruluk oranının %43.96 olduğu anlamına gelmektedir. Ancak böyle bir belirleme katsayısı üzerinden yapılan değerlendirmeler için sapma çok yüksektir. Bu nedenle faktör etkileşimlerini içeren ikinci seviye bir denklem oluşturulmuştur. Elde edilen ikinci seviyeden denklem Eşitlik 6.9'deki gibi elde edilmiş ve aşağıda sunulmuştur.

$$\begin{aligned} \% Uzama = & -478 + 8.8 * Lazer Odak Çapı - 1.42 * Tarama Mesafesi \\ & -0.034 * Tarama Hızı + 1.74 * Lazer Gücü - 0.00099 * LG^2 + 0.000481 * TM^2 \\ & -0.0340 * LOC^2 - 0,000008 * TH^2 + 0,00121 * LG * TM - 0.01815 * LG * LOC \\ & +0.000278 * LG * TH + 0.0128 * TM * LOC - 0,00016 * LOC * TH \end{aligned} \quad (6.9)$$

Elde edilen ikinci derece denklemin belirleme katsayısı (R^2) ise 0.8795 olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki doğruluk oranının %87.95 olduğu anlamına gelmektedir. Deneysel sonuçların ve her iki denklemden elde edilen gerçek sonuçların regresyon analizi ile elde edilen tahmini değerlerle karşılaştırılması Şekil 5.9.'da gösterilmiştir. Şekil 5.9. incelendiğinde, deney sonuçlarına en yakın tahmin değerlerinin ikinci dereceden denklem ile elde edildiği görülmektedir.



Şekil 5.9. Gerçek ölçümler ile tahmini sonuçların karşılaştırılması

5.1.4. Mikrosertlik

5.1.4.1 Mikrosertlik değerleri için Sinyal/Gürültü Oranlarının Analizi

Mikrosertlik testleri, üretilen numunelerin özelliklerinin incelenesinde oldukça güvenilir ve yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Numunelerin sertliği, numune yüzeyine batırılan daha sert bir malzemeye karşı sergilediği direnç olarak ifade edilebilmektedir [93]. Yapılan çalışmada, farklı üretim parametreleri ve bu parametrelere ait seviyeleriyle üretilen numunelerin sertlik ölçümleri Vickers sertlik deneyi kullanılarak ölçülmüştür. Üretilen numunelerin S/N oranının belirlenmesinde “ne kadar büyükse o kadar iyi” yaklaşımı, en yüksek mikrosertlik değerlerinin hesaplanmasında ve analizinde kullanılmıştır. Bu yaklaşım sonuçları Eşitlik 6.10’daki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6.10)$$

Burada y, performans karakteristiğinin değerini (mikrosertlik) ifade etmekte ve n, y değerlerinin sayısını temsil etmektedir.

Mevcut çalışmada Taguchi L₁₆ dikey dizin deney tasarımı kullanılarak kontrol faktörleri ve bu faktörlere ait seviye değerleri Tablo 5.13.’de listelenmiştir.

Tablo 5.13. Deney tasarımı kullanılarak kontrol faktörleri ve bu faktörlerin seviye değerleri

Kontrol Faktörleri	Birim	Sembol	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Lazer Odak Çapı	µm	A	75	80	85	90
Tarama Mesafesi	µm	B	60	90	120	150
Tarama Hızı	mm/s	C	150	300	450	600
Lazer Gücü	W	D	190	210	230	250

Kontrol faktörleri ve bu faktörlere ait seviye değerleri kullanılarak üretilen numunelerin mikrosertlik değerleri ve bu değerlere ait S/N oranları Tablo 5.14.’de listelenmiştir.

Tablo 5.14. Taguchi L16 Deney Tasarımı ve deneysel sonuçlar

Deney Sayısı	Kontrol Faktörleri ve Seviye Değerleri				Deneysel Sonuçlar	
	A	B	C	D	Sertlik (HV)	S/N Oranı
1	75	60	150	190	394.67	51.9246
2	75	90	300	210	403.83	52.1240
3	75	120	450	230	399.47	52.0296
4	75	150	600	250	393.23	51.8930
5	80	60	300	230	408.70	52.2281
6	80	90	150	250	419.67	52.4581
7	80	120	600	190	393.73	51.9040
8	80	150	450	210	400.37	52.0492
9	85	60	450	250	416.50	52.3923
10	85	90	600	230	396.40	51.9627
11	85	120	150	210	395.80	51.9495
12	85	150	300	190	396.33	51.9612
13	90	60	600	210	385.17	51.7130
14	90	90	450	190	416.53	52.3930
15	90	120	300	250	403.70	52.1212
16	90	150	150	230	396.87	51.9729

Mikrosertlik için S/N oranı yanıt tablosu Tablo 5.15.'de listelenmiştir. S/N yanıt tablosunda kontrol faktörlerine ait optimum seviye değerleri görülmektedir.

Tablo 5.15. Mikrosertlik için S/N yanıt tablosu

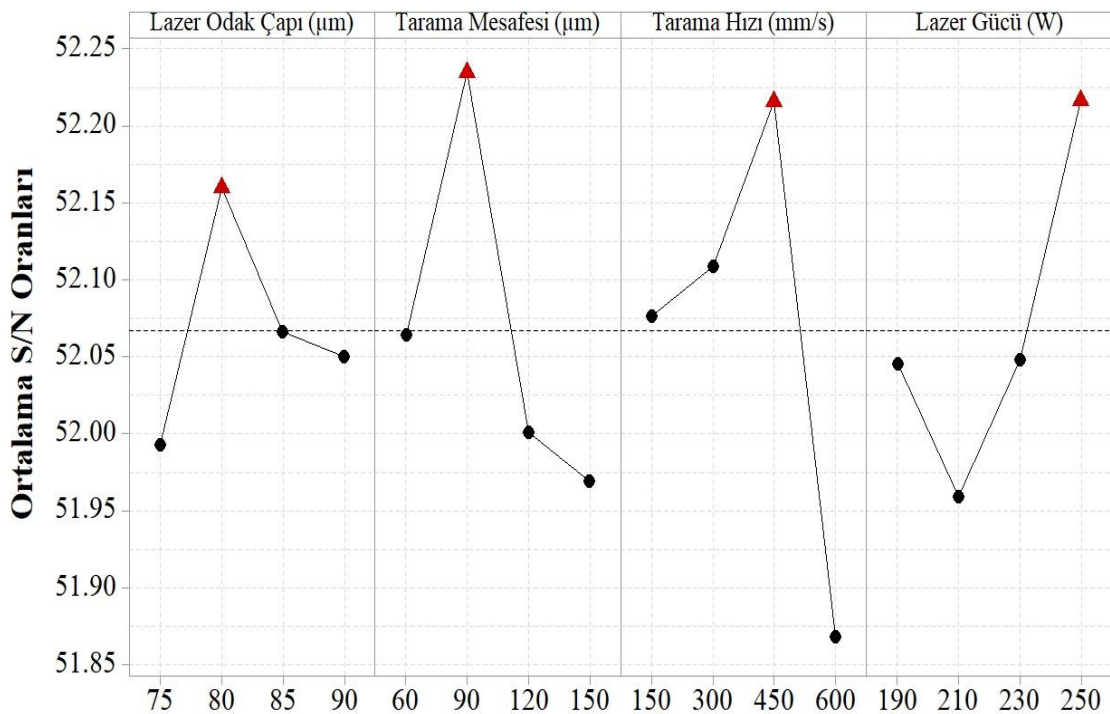
Seviyeler	Kontrol Faktörleri ve optimum seviye değerleri			
	A	B	C	D
1	51.99	52.06	52.08	52.05
2	52.16	52.23	52.11	51.96
3	52.07	52.00	52.22	52.05
4	52.05	51.97	51.87	52.22
Delta	0.17	0.27	0.35	0.26

Tablo 5.15.'e göre optimum mikrosertlik değerini veren parametre seviyeleri ve S/N oranları sıralanacak olursa; lazer odak çapı için seviye 2, S/N oranı 52.16 dB, tarama

mesafesi için seviye 2, S/N oranı 52.23 dB, tarama hızı için seviye 3, S/N oranı 52.22 dB ve lazer gücü için seviye 4, S/N oranı ise 52.22 dB olduğu görülmektedir.

5.1.4.2. Mikrosertlik için Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Ti6Al4V alaşımının SLM yöntemiyle lazer odak çapı tarama mesafesi, tarama hızı, lazer odak çapı parametrelerine bağlı olarak Ti6Al4V alaşımının mikrosertlik değerinde belirgin bir şekilde değişiklik göstermektedir. Yapılan analizler sonucunda mikrosertlik değerlerine ait ana etki grafiği Şekil 5.10.'da verilmiştir. Verilen grafikte kontrol faktörlerine ait en uygun seviye değerleri, ilgili faktörün en üst noktasını ifade etmektedir. Buna bağlı olarak, lazer odak çapı için S/N oranı 52.16 ile optimum sonuç 80 μm seviyesinde elde edilmiştir. Aynı analizler diğer kontrol faktörleri için de yapılmıştır. Dolayısıyla tarama mesafesi için S/N oranı 52.23 ile optimum sonuca 90 μm 'de, tarama hızı için S/N oranı 52.22 ile optimum sonuca 450 mm/s'de ve lazer gücü için S/N oranı 52.22 ile optimum sonuca 250 W seviyesinde ulaşıldığı görülmektedir.



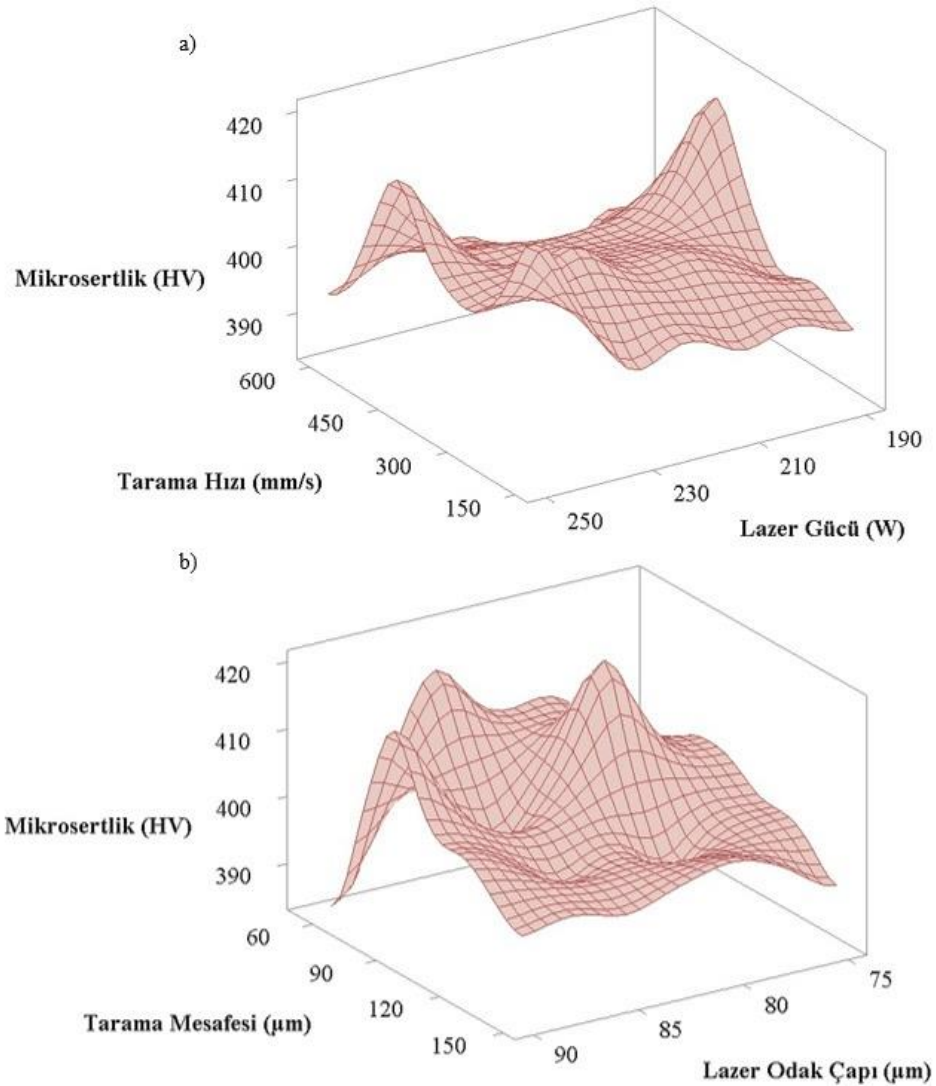
Signal-to-noise: Larger is better

Şekil 5.10. Mikrosertlik değerleri için kontrol faktörlerinin S/N oranına etkisi

Kontrol faktörlerinin ve bu faktörlere ait farklı seviye değerlerinin mikrosertlik değeri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Üretimi gerçekleştirilen numunelerde üretim parametreleri mikrosertlik değerlerini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Kontrol

faktörleri için dört farklı seviye değerleri belirlenmiştir. Belirlenen seviyeler için optimum sonuçlar analiz edilmiştir. Kontrol faktörleri arasında lazer odak çapı incelendiğinde 75 μm seviyesi kullanılarak üretilen numunenin mikrosertlik değerinin düşük çıktığı görülmüştür. Lazer odak çapı 80 μm seviyesinde üretim gerçekleştirildiğinde mikrosertlik değerinde iyileşme gözlemlenmiştir. Bu seviyelerdeki artış mikrosertliği artırırken 80 μm 'den daha yüksek seviyelerde mikrosertlik değerlerinin olumsuz yönde etkilendiği gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak, 80 μm lazer odak çapı seviyesi eriyik havuzda daha az aşırı ısınmaya neden olarak mikrosertlik değerinde iyileşme sağladığı düşünülmektedir. Mevcut çalışmada, lazer odak çapı için en yüksek mikrosertlik değerine 80 μm seviyesinde ulaşılmıştır. Tarama hızının artması ise numunenin mikrosertliğini olumlu yönde etkilediği anlaşılmaktadır. Şekil 5.10. incelendiğinde, düşük tarama hızı seviyelerinde mikrosertliğin azaldığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi düşük tarama hızlarında lazerin ergittiği noktada maruz kalma süresini arttırmakta ve dolayısıyla eriyik havuzun boyutu da artmaktadır. Eriyik havuz boyutundaki artış ise numunelerde kaba bir mikroyapı meydana getirmekte ve mikrosertliğin azalmasına neden olmaktadır. 600 mm/s tarama hızı kullanıldığında ise mikro sertliğin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Yüksek tarama hızları kullanıldığında eriyik havuzun düzensizleşmesine ve ergimiş malzemenin sıçrayarak kusur oluşumuna yol açtığından mikrosertliğin olumsuz yönde etkilendiği düşünülmektedir. S/N grafiği incelendiğinde lazer gücünün farklı seviyeleri numunelerin mikrosertlik değerlerinde değişkenliğe neden olduğu görülmüştür. Lazer gücünün seviyesinin artması mikrosertliğin iyileşmesine neden olmuştur. Ergitme sırasında yüksek seviyede lazer gücü kullanıldığında bir alt katmanı tekrar ergiterek eriyik havuzda homojen bir birleşme sağlamak ve bu durumun mikrosertlik değerini olumlu yönde etkilediği düşünülmektedir. Tarama mesafesinin artmasıyla mikrosertliğinde arttığı gözlemlenmiştir. 90 μm seviyesinin üzerindeki değerler için inceleme yapıldığında mikrosertliğin olumsuz yönde etkilendiğini görülmektedir. Gözlemlenen bu durum, tarama mesafesinin 90 μm 'den daha yüksek seviyeleri toz partikül ve lazer gücü arasındaki değişken termodinamik koşullardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca tarama mesafesinin yüksek seviyeleri eriyik havuz boyutunda artışa yol açmakta ve mikrosertliğin azalmasıyla sonuçlanmaktadır. Song ve diğ. [94] yaptıkları çalışmada yüksek mikrosertlik değerlerine 400 mm/s tarama hızıyla elde etmişlerdir. Sato ve diğ. [95] 200 W lazer gücü, 50 mm/s tarama hızı ve 100 μm tarama mesafesi ile Ti6Al4V

mikrosertliğini 391 HV'ye kadar arttırmışlardır. Do ve diğ. [96] lazer enerji girişiyle mikrosertliğin arttığını savunmuşlardır. Şekil 5.11'de mikrosertlik değerlerine ait üç boyutlu grafik gösterilmektedir.



Şekil 5.11. SLM parametrelerinin mikrosertlik üzerindeki etkisi: (a) tarama hızı ve lazer gücü, (b) tarama mesafesi ve lazer odak çapı

Şekil 5.11.a'da lazer gücünün ve tarama hızının mikrosertlik üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Mikrosertlik değeri 250W lazer gücü ve 450 mm/s tarama hızı kullanılarak üretilen numunelerde önemli ölçüde iyileştiği gözlemlenmiştir. Tarama hızının artırılmasıyla mikrosertlik önemli ölçüde azalmıştır. Lazer gücü için en düşük seviye 210 W kullanılarak 385.17 HV iken en yüksek seviye 250 W lazer gücü kullanılarak 419.67 HV sertlik değeri elde edilmiştir. Buna bağlı olarak lazer gücünde ki bu artış sertlik değerinde %8.2 oranında iyileşme sağlamıştır. Tarama hızı açısından en

yüksek değer 450 mm/s seviyesiyle 416.53 HV sertlik elde edilirken, tarama hızının artmasıyla en düşük değer 600 mm/s seviyesiyle 385.17 HV sertlik elde edilmiştir. Tarama hızının artması sertlik değerini %7.5 oranında azaltmıştır. Şekil 5.11.b’de lazer odak çapı ve tarama mesafesinin mikrosertlik üzerindeki üç boyutlu şekil grafiği gösterilmiştir. Lazer odak çapı için en düşük değer 75 µm seviyesinde mikrosertlik değeri 393.29 HV elde edilirken, en yüksek değer 80 µm seviyesinde mikrosertlik değeri 419.67 HV elde edilmektedir. Bu artış %6.34 oranında iyileştirme sağlamaktadır. Tarama mesafesi seviyeleri incelendiğinde en yüksek sonuç 90 µm seviyesinde mikrosertlik değeri 419.67 HV iken en düşük sonuç 150 µm seviyesinde mikrosertlik değeri 393.23 HV olarak elde edilmiştir. Tarama mesafesinin artmasıyla sertlik değerinin %6.34 oranında azaldığı görülmektedir. SLM işlem sürecinde orta seviyede lazer odak çapı ve tarama hızı kullanılarak kararlı bir yapıya ulaşıldığı ve bu durumun sertliği önemli ölçüde etkilediği düşünülmektedir.

Bu durumda en iyi mikrosertlik değerine 80 µm lazer odak çapı, 90 µm tarama mesafesi, 450 mm/s tarama hızı ve 250 W lazer gücü kombinasyonları kullanılarak ulaşılmıştır.

5.1.4.3. Mikrosertlik için ANOVA Analizi

Deney sırasında kullanılan kontrol faktörlerinin etki oranları ve bu faktörlerin numunelerin mikrosertliklerine olan seviye değerlerinin belirlenmesi için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Varyans analizi %95 güven aralığı ile gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.16.’da Taguchi L₁₆ dikey diziniyle gerçekleştirilen mikrosertlik deneylerin ANOVA sonuçları listelenmiştir.

Tablo 5.16. Mikrosertlik için ANOVA sonuçları

Faktörler	SD	KT	KO	F	P	PCR (%)
Lazer Odak Çapı (µm)	3	125.69	41.90	2.12	0.277	9 %
Tarama Mesafesi (µm)	3	367.59	122.53	6.20	0.084	26.32 %
Tarama Hızı (mm/s)	3	541.85	180.62	9.14	0.051	38.79 %
Lazer Gücü (W)	3	302.35	100.78	5.10	0.107	21.65 %
Hata	3	59.31	19.77	-	-	4.25 %
Toplam	15	1396.79	-	-	-	100.00 %

Kontrol faktörlerinin mikrosertliğe etki oranları sırasıyla tarama hızı %38.79, tarama mesafesi %26.32, lazer gücü %21.65 ve lazer odak çapı %9 olduğu görülmektedir. Elde

edilen sonuçların analizinde mikrosertliği etkileyen en önemli faktörün tarama hızı olduğu görülmektedir. Ayrıca, yapılan analizin hata oranı %4.25 seviyesinde gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel analizlerin güvenilebilirlik oranı %20'den küçük olmalıdır [88]. Elde edilen sonuçlar yapılan analizin güvenilirliğini kanıtlar niteliktedir.

5.1.4.4. Mikrosertlik Değeri için Regresyon Analizi

Çalışmanın bu bölümünde, deneysel yöntemlerle elde edilen 16 adet mikrosertlik için regresyon analizi uygulanmıştır. Regresyon analizi, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi tanımlamak için matematiksel fonksiyonları kullanan bir analiz yöntemidir. Oluşturulan bu denklemler bağımlı değişkenler dikkate alınarak bağımsız değişkenlerin tahmini yapılabilmektedir. Mevcut çalışmada bağımlı değişken mikrosertlik değeri iken bağımsız değişkenler lazer odak çapı, tarama mesafesi, tarama hızı ve lazer gücüdür. Proses girdi faktörleri kullanılarak elde edilen birinci seviyede denklem Eşitlik 6.11'deki gibi elde edilmiş ve aşağıda sunulmuştur.

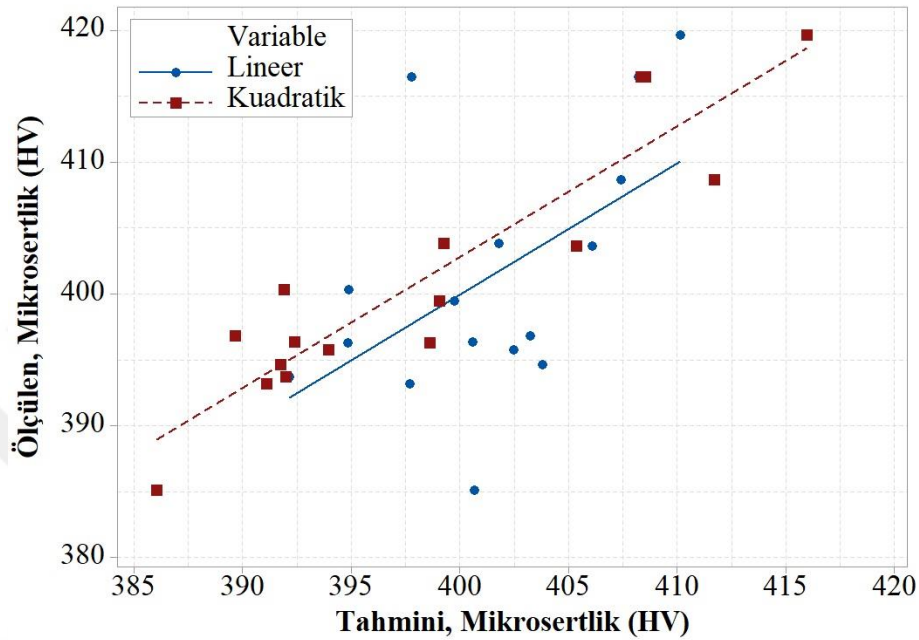
$$\begin{aligned} \text{Mikrosertlik (HV)} = & 378.6 + 0.079 * \text{Lazer Odak Çapı} \\ & - 0.0820 * \text{Tarama Mesafesi} - 0.0159 * \text{Tarama Hızı} + 0.140 * \text{Lazer Gücü} \end{aligned} \quad (6.11)$$

Elde edilen birinci seviye denklemin belirleme katsayısı (R^2) 0.2817 olarak elde edilmiştir. Böylelikle, gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki doğruluk oranının %28.17 olduğu anlamına gelmektedir. Ancak böyle bir belirleme katsayısı üzerinden yapılan değerlendirmeler için sapma çok yüksektir. Bu nedenle faktör etkileşimlerini içeren ikinci seviye bir denklem oluşturulmuştur. Elde edilen ikinci seviyeden denklem Eşitlik 6.12'deki gibi elde edilmiş ve aşağıda sunulmuştur.

$$\begin{aligned} \text{Mikrosertlik (HV)} = & -623 + 26.7 * \text{Lazer Odak Çapı} - 1.52 * \text{Tarama Mesafesi} \\ & + 0.298 * \text{Tarama Hızı} - 0.50 * \text{Lazer Gücü} + 0.00746 * LG^2 - 0.00160 * TM^2 \\ & - 0.128 * LOC^2 - 0.000228 * TH^2 + 0.00253 * LG * TM - 0.0232 * LG * LOC \\ & - 0.000597 * LG * TH + 0.0144 * TM * LOC - 0.00009 * LOC * TH \end{aligned} \quad (6.12)$$

Elde edilen ikinci derece denklemin belirleme katsayısı (R^2) ise 0.8484 olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki doğruluk oranının %84.84 olduğu anlamına gelmektedir. Deneysel sonuçların ve her iki denklemden elde edilen gerçek sonuçların regresyon analizi ile elde edilen tahmini değerlerle

karşılaştırılması Şekil 5.12.'de gösterilmiştir. Şekil 5.12. incelendiğinde, deney sonuçlarına en yakın tahmin değerlerinin ikinci dereceden denklem ile elde edildiği görülmektedir.



Şekil 5.12. Gerçek ölçümler ile tahmini sonuçların karşılaştırılması

5.1.5. Yüzey Pürüzlülüğü

5.1.5.1. Yüzey Pürüzlülük değerleri için Sinyal/Gürültü Oranlarının Analizi

SLM üretim sırasında yüksek sıcaklık değişimleri oluşmakta ve bu sıcaklık değişimleri parçada bozulma ya da yüksek miktarda iç gerilmelere neden olmaktadır. Dolayısıyla, bu durum yüzey pürüzlülüğünü olumsuz yönde etkilemektedir [97]. Yüzey pürüzlülüğü, üretilen numunenin mekanik özelliklerini etkileyen önemli bir kalite kriteridir [56]. Mevcut çalışmada, üretim parametrelerinin ve seviyelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri incelenmiştir. Bu deney tasarımında üretim parametrelerin optimize edilmesi amacıyla sinyal-gürültü (S/N) oranı kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar S/N oranına çevrilerek değerlendirilmiştir. S/N değerlerini tanımlamak için kullanılan kriterler arasında “en küçük en iyi” yaklaşımı, en küçük ortalama yüzey pürüzlülük değerlerini belirlemek için kullanılmıştır. Bu yaklaşımın sonuçları Eşitlik 6.13'deki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (6.13)$$

Taguchi L₁₆ dikey dizin deney tasarımında kullanılan kontrol faktörleri ve bu faktörlerin seviye değerleri Tablo 5.17.'de listelenmiştir.

Tablo 5.17. Deney tasarımında kullanılan kontrol faktörleri ve bu faktörlerin seviye değerleri

Kontrol Faktörleri	Birim	Sembol	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Lazer Odak Çapı	µm	A	75	80	85	90
Tarama Mesafesi	µm	B	60	90	120	150
Tarama Hızı	mm/s	C	150	300	450	600
Lazer Gücü	W	D	190	210	230	250

SLM yöntemi kullanılarak üretilen Ti6Al4V alaşımının ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri ve bu değerlere ait S/N oranları Tablo 5.18.'de listelenmiştir.

Tablo 5.18. Taguchi L16 Deney Tasarımı ve deneysel sonuçlar

Deney Sayısı	Kontrol Faktörleri ve Seviye Değerleri				Deneysel Sonuçlar	
	A	B	C	D	Ra (µm)	S/N Oranı
1	75	60	150	190	7.773	17.76471
2	75	90	300	210	10.020	20.01735
3	75	120	450	230	15.024	23.53571
4	75	150	600	250	11.894	21.50656
5	80	60	300	230	11.157	20.95095
6	80	90	150	250	10.719	20.60309
7	80	120	600	190	14.739	23.36936
8	80	150	450	210	12.496	21.93542
9	85	60	450	250	9.382	19.44591
10	85	90	600	230	11.512	21.22302
11	85	120	150	210	16.067	24.11870
12	85	150	300	190	14.620	23.29895
13	90	60	600	210	10.691	20.58037
14	90	90	450	190	13.471	22.58800
15	90	120	300	250	13.790	22.79129
16	90	150	150	230	13.288	22.46919

Yüzey pürüzlülüğü için Tablo 5.19.'da S/N yanıt tablosu listelenmiştir. Bu tabloda optimum proses parametre değerleri için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri görülmektedir.

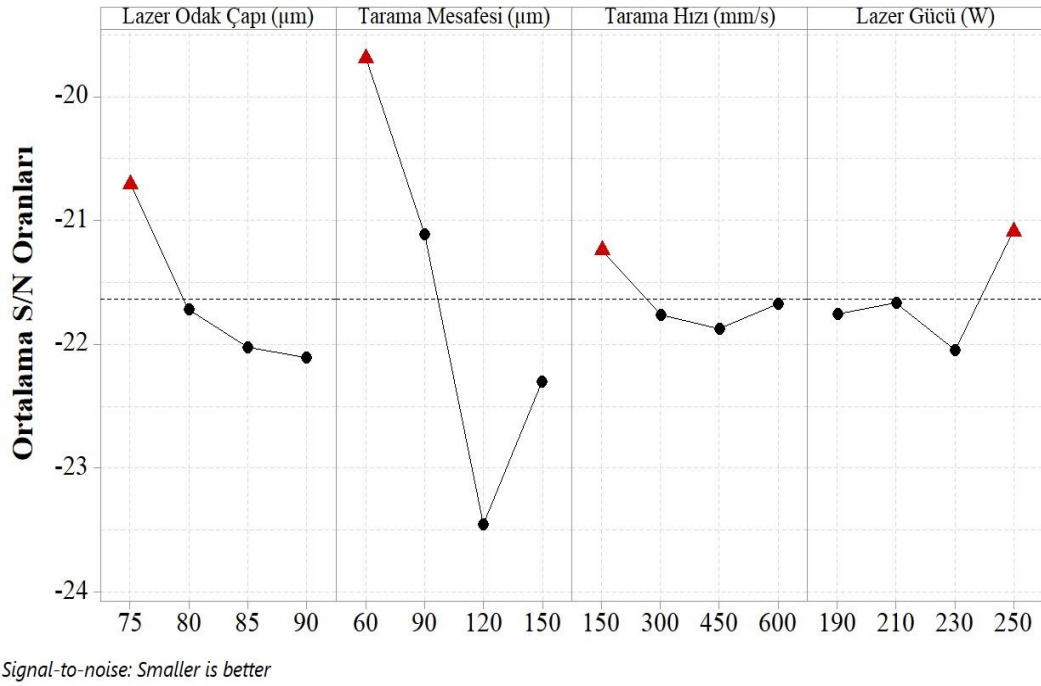
Tablo 5.19. Yüzey pürüzlülüğü için S/N yanıt tablosu

Seviyeler	Kontrol Faktörleri			
	A	B	C	D
1	20.71	19.69	21.24	21.76
2	21.71	21.11	21.76	21.66
3	22.02	23.45	21.88	22.04
4	22.11	22.30	21.67	21.09
Delta	1.40	3.77	0.64	0.96

Tablo 5.19.'a göre optimum ortalama yüzey pürüzlülük değerini veren parametre seviyeleri ve S/N oranları sıralanacak olursa; lazer odak çapı için seviye 1, S/N oranı 20.71 dB, tarama mesafesi için seviye 1, S/N oranı 19.69 dB, tarama hızı için seviye 1, S/N oranı 21.24 dB ve lazer gücü için seviye 4, S/N oranı ise 21.09 dB olduğu görülmektedir.

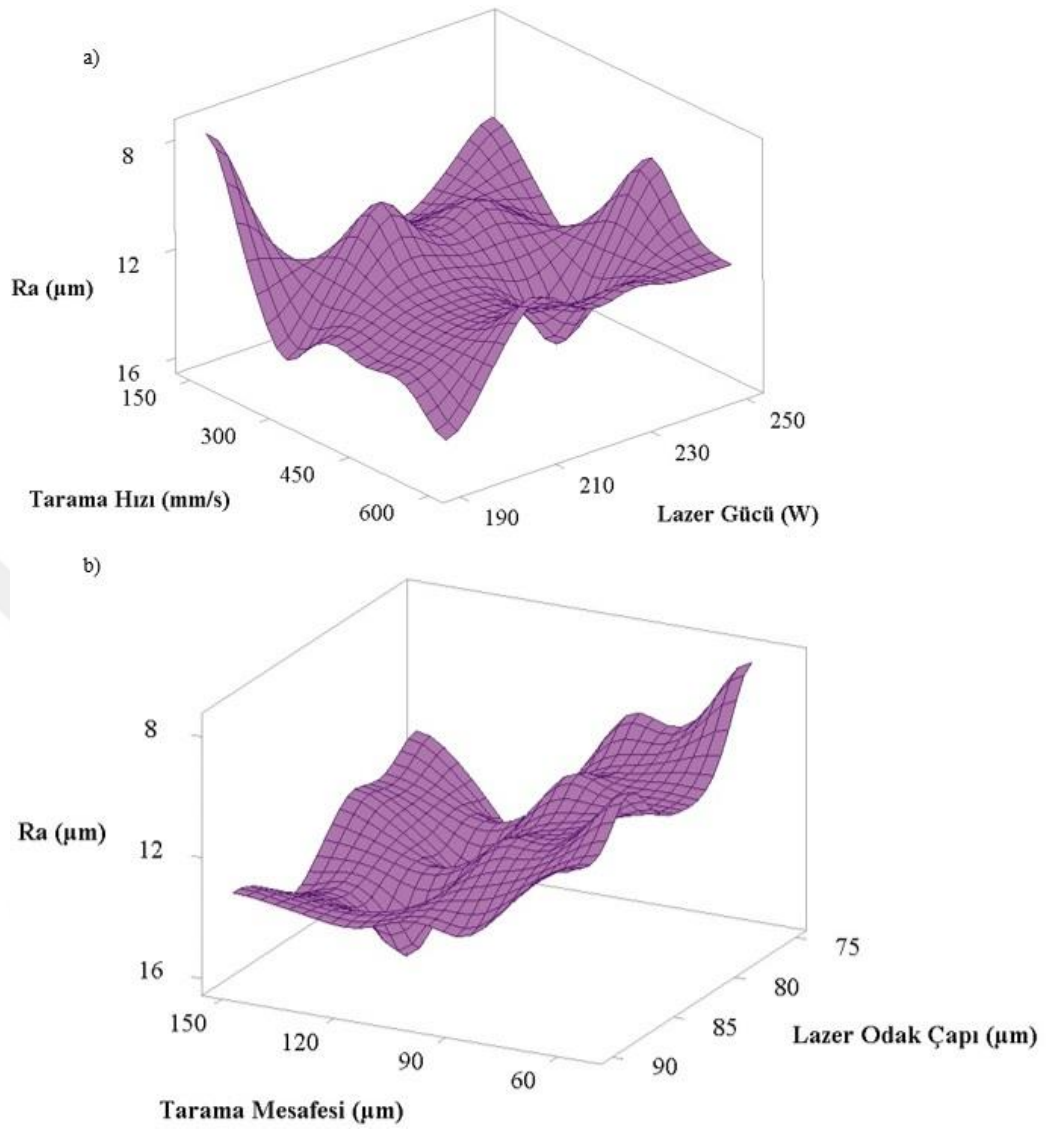
5.1.5.2. Yüzey Pürüzlülüğü için Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

SLM yöntemiyle lazer odak çapı tarama mesafesi, tarama hızı, lazer odak çapı parametrelerine bağlı olarak Ti6Al4V alaşımının ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinde belirgin bir şekilde değişiklik göstermektedir. Yapılan analizler sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğüne değerlerine ait ana etki grafiği Şekil 5.13.'de verilmiştir. Verilen grafikte kontrol faktörlerine ait en uygun seviye değerleri, ilgili faktörün en üst noktasını (en büyük S/N oranı) ifade etmektedir. Buna bağlı olarak, lazer odak çapı için S/N oranı 20.71 ile optimum sonuca 75 μ m seviyesinde ulaşıldığı görülmektedir. Tarama mesafesi için S/N oranı 19.69 ile optimum sonuca 60 μ m seviyesinde ulaşılmaktadır. Tarama hızı için S/N oranı 21.24 ile optimum sonuç 150 mm/s seviyesinde elde edilmektedir. Aynı analiz lazer gücü için yapıldığında S/N oranı 21.09 ile optimum sonucu 250 W seviyesinin verdiğini göstermektedir.



Şekil 5.13. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için kontrol faktörlerinin S/N oranına etkisi

SLM yönteminde üretim parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri S/N grafiğinde daha net anlaşılmaktadır. Kontrol faktörleri arasında lazer gücünün ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde oldukça önemli olduğu görülmektedir. Lazer gücünün artması ile ortalama yüzey pürüzlülüğü iyileşmektedir. Bu durum, bir önceki katmanın yeniden ergimesini sağlayarak eriyik havuzun daha homojen bir hal almasına imkân sağladığı düşünülmektedir. Tarama mesafesi seviyesinin artmasıyla eriyik havuzun boyutu artmakta ve bu durum pürüzlü bir yüzeyin oluşmasıyla sonuçlanmaktadır. Şekil 5.13. incelendiğinde tarama hızı seviyesinin artması ortalama yüzey pürüzlülüğün olumsuz yönde etkilenmesine neden olmuştur. Ayrıca, SLM işlem sırasında lazer gücünün azalması yüzey pürüzlülük değerinin artmasına yol açmaktadır. Üretim sırasında lazer tarafından toz malzemeyi ergitecek miktarda enerjinin sağlanamaması numunelerin yüzey pürüzlülüğünü olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir. Şekil 5.14.'de ortalama yüzey pürüzlülük değerlerine ait üç boyutlu grafik gösterilmektedir.



Şekil 5.14. SLM parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi: (a) tarama hızı ve lazer gücü, (b) tarama mesafesi ve lazer odak çapı

Şekil 5.14.a’da lazer gücünün ve tarama hızının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi gösterilmektedir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü 250W lazer gücü ve 150 mm/s tarama hızı kullanılarak üretilen numunelerde önemli ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Tarama hızının artırılmasıyla yüzeyin daha pürüzlü bir hal aldığı anlaşılmaktadır. Bunun sebebi artan tarama hızıyla toz malzemenin ergimesinde yeterli sürenin sağlanamaması ve buna bağlı olarak katılaşma hızının azalması yüzey kalitesini olumsuz etkilediği düşünülmektedir. Lazer gücüne bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü incelendiğinde en iyi sonuç 250 W seviyesinde ($9.382 \mu\text{m}$) elde edilirken, 230 W lazer gücü kullanıldığında ($15.024 \mu\text{m}$) yüzey pürüzlülük değeri en yüksek seviyede elde edilmiştir. Buna bağlı olarak lazer gücünün artması ortalama yüzey pürüzlülük değerinde %37.55

oranında iyileşme sağlamaktadır. Ortalama yüzey pürüzlülük değeri için tarama hızı incelendiğinde 150 mm/s seviyesinde en iyi sonuca (7.773 μm) ulaşılırken, 450 mm/s seviyesinde en yüksek pürüzlülük değeri (15.024 μm) elde edilmiştir. Tarama hızındaki bu artış ortalama yüzey pürüzlülük değerini %48.26'lık bir oranla olumsuz yönde etkilemiştir. Şekil 5.14.b incelendiğinde tarama mesafesi ve lazer odak çapının farklı seviyelerinin ortalama yüzey pürüzlülük değerine etkileri üç boyutlu grafik şeklinde gösterilmektedir. Verilen grafik incelendiğinde en düşük yüzey pürüzlülük değeri 60 μm seviyesinde (7.773 μm) elde edilmektedir. En pürüzlü yüzey ise 120 μm (16.067 μm) seviyesinde elde edilmektedir. Tarama mesafesi için ortalama yüzey pürüzlülüğü sırasıyla 150, 120, 90, 60 μm seviyelerinde azalma eğilimi göstermektedir. Dolayısıyla en iyi ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine 60 μm seviyesinde ulaşılmaktadır. Tarama mesafesinin artmasıyla yüzey pürüzlülük değeri %51.62 oranında artmaktadır. Lazer odak çapı açısından 75 μm seviyesiyle (7.773 μm) en iyi sonuç elde edilirken, 90 μm seviyesinde (13.790 μm) en pürüzlü yüzey elde edilmektedir. Lazer odak çapının azalması ortama yüzey pürüzlülüğünde % 43.63 oranında iyileşme sağlamaktadır. Dalga boyu ile birlikte odak çapı da metal tozunu eritecek lazer gücünü etkilemektedir. Odak çapını azaltarak lazer gücünü artırarak yüzey pürüzlülüğü açısından daha olumlu sonuçlar elde edilmektedir. Sadali M. Ve diğ. [98] tarama hızının artmasıyla numunelerin yüzeyinde bozulmalar meydana geldiğini, ancak tarama hızının daha da artmasıyla yüzey kalitesinde olumlu yönde düzeltilmeler elde edildiğini belirtmişlerdir. Shi X. ve diğ. [86] yaptıkları çalışmada tarama hızının azalması sürekli tarama hızlarını oluşturduğunu ve yüzey pürüzlülüğünün azaltılacağını ileri sürmüşlerdir. Wang Z. ve diğ. [92] yaptıkları çalışmada benzer sonuçlara ulaşarak artan tarama hızı ve düşük lazer gücü değerlerinde yüzey pürüzlülüğünün arttığını savunmuşlardır. Maamoun A. ve diğ. [99] tarama hızı ile yüzey pürüzlülüğü arasında önemli bir ilişki olduğunu savunmuşlardır. Sonuç olarak, ortalama yüzey pürüzlülüğü için gerçekleştirilen deney sonuçları literatürle de paralellik göstermiştir.

Bu durumda en iyi ortalama yüzey pürüzlülük değerine 75 μm lazer odak çapı, 60 μm tarama mesafesi, 150 mm/s tarama hızı ve 250 W lazer gücü kombinasyonları kullanılarak elde edilmiştir.

5.1.5.3. Yüzey Pürüzlülüğü için ANOVA Analizi

Kontrol faktörlerinin ve seviyelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etki oranlarının belirlenmesi için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Bu analiz %95 güven aralığı ile yapılmıştır. Tablo 5.20.'de Taguchi L_{16} dikey dizini kullanılarak gerçekleştirilen yüzey pürüzlülüğü deneylerinin ANOVA sonuçları listelenmiştir.

Tablo 5.20. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları

Faktörler	SD	KT	KO	F	P	PCR (%)
Lazer Odak Çapı (μm)	3	7.5897	2.5299	0.96	0.512	9.57 %
Tarama Mesafesi (μm)	3	58.7744	19.5915	7.46	0.067	74.10 %
Tarama Hızı (mm/s)	3	0.8986	0.2995	0.11	0.946	1.13 %
Lazer Gücü (W)	3	4.1705	1.3902	0.53	0.693	5.26 %
Hata	3	7.8814	2.6271	-	-	9.94 %
Toplam	15	79.3146	-	-	-	100.00 %

Tarama mesafesi, lazer odak çapı, lazer gücü ve tarama hızı kontrol faktörlerinin ortalama yüzey pürüzlülüğüne etki yüzdeleri sırasıyla %74.17, %9.57, %5.26 ve %1.13 olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan elde edilen bilgilere göre yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktör tarama mesafesidir. Yapılan analizde ortalama yüzey pürüzlülüğü için hata oranı %9.94 seviyesindedir. Güvenilir bir istatistiksel analiz için bu oranın %20'den küçük olması gerekmektedir [88]. Elde edilen sonuçlar analizin güvenilirliğini kanıtlar niteliktedir.

5.1.5.4. Yüzey Pürüzlülük Değeri için Regresyon Analizi

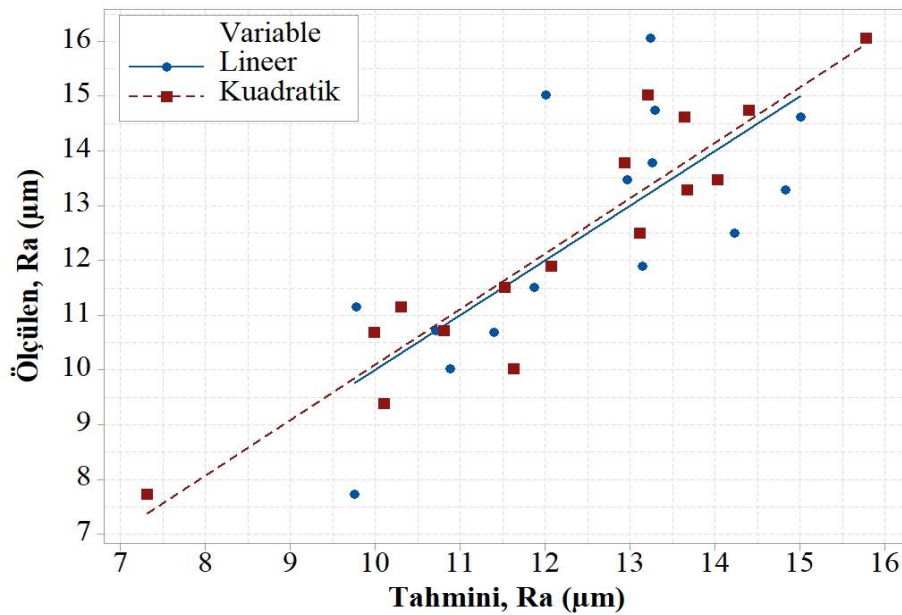
Çalışmanın bu bölümünde, deneysel yöntemlerle elde edilen 16 adet yüzey pürüzlülüğü için regresyon analizi uygulanmıştır. Regresyon analizi, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi tanımlamak için matematiksel fonksiyonları kullanan bir analiz yöntemidir. Oluşturulan bu denklemler bağımlı değişkenler dikkate alınarak bağımsız değişkenlerin tahmini yapılabilmektedir. Mevcut çalışmada bağımlı değişken yüzey pürüzlülük değeri iken bağımsız değişkenler lazer odak çapı, tarama mesafesi, tarama hızı ve lazer gücüdür. Proses girdi faktörleri kullanılarak elde edilen birinci seviyede denklem Eşitlik 6.14'deki gibi elde edilmiş ve aşağıda sunulmuştur.

$$Ra(\mu m) = 1.65 + 0.1109 * Lazer Odak \text{ Çapı} + 0.0449 * Tarama Mesafesi + 0.00065 * Tarama Hızı - 0.0158 * Lazer Gücü \quad (6.14)$$

Elde edilen birinci seviye denklemin belirleme katsayısı (R^2) 0.5630 olarak elde edilmiştir. Böylelikle gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki doğruluk oranının %56.30 olduğu anlamına gelmektedir. Ancak böyle bir belirleme katsayısı üzerinden yapılan değerlendirmeler için sapma çok yüksektir. Bu nedenle faktör etkileşimlerini içeren ikinci seviye bir denklem oluşturulmuştur. Elde edilen ikinci seviyeden denklem Eşitlik 6.15'deki gibi elde edilmiş ve aşağıda sunulmuştur.

$$Ra(\mu m) = -177 + 2.71 * Lazer Odak \text{ Çapı} + 0.635 * Tarama Mesafesi + 0.133 * Tarama Hızı + 0.200 * Lazer Gücü - 0.00061 * LG^2 - 0.000988 * TM^2 - 0.0096 * LOC^2 - 0.000008 * TH^2 - 0.00011 * LG * TM + 0.00038 * LG * LOC + 0.000006 * LG * TH - 0.00479 * TM * LOC - 0.00160 * LOC * TH \quad (6.15)$$

Elde edilen ikinci derece denklemin belirleme katsayısı (R^2) ise 0.8708 olarak elde edilmiştir. Böylelikle, gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki doğruluk oranının %87.08 olduğu anlamına gelmektedir. Deneysel sonuçların ve her iki denklemden elde edilen gerçek sonuçların regresyon analizi ile elde edilen tahmini değerlerle karşılaştırılması Şekil 5.15.'de gösterilmiştir. Şekil 5.15. incelendiğinde, deney sonuçlarına en yakın tahmin değerlerinin ikinci dereceden denklem ile elde edildiği görülmektedir.



Şekil 5.15. Gerçek ölçümler ile tahmini sonuçların karşılaştırılması

6. BÖLÜM

TARTIŞMA- SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Tartışma

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımı farklı proses parametreleri kullanılarak seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmiştir. Mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğünde tarama mesafesi, lazer odak çapı, tarama hızı ve lazer gücü seviyelerinin kombinasyon durumuna bağlı olarak değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Ti6Al4V alaşımına benzer malzemelerin seçici lazer ergitme sırasında hangi proses parametrelerinin ne derece etkili olduğu ve buna bağlı olarak değişken parametrelerin seviyelerinin belirlenmesiyle yüzey pürüzlülüğü ve mekanik özellikler açısından iyileştirmelerin sağlanması için çalışmalar yapılabilir. Örneğin, tarama stratejisi ve tarama açısının farklı değerleri kullanılarak hem yüzey pürüzlülüğü hem de mekanik özellikler iyileştirilebilir.

6.2. Sonuçlar

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımının farklı proses parametre ve bu parametrelere ait seviye değerlerinin mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla bir takım deney gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- Mekanik özellikleri ve yüzey pürüzlülüğünü belirlemek amacıyla gerçekleştirilen deneylere ait sonuçların analizi için elde edilen veriler S/N oranına dönüştürülerek değerlendirmeler yapılmıştır.
- Deney sonuçları analiz edildiğinde çekme dayanımı için optimum sonuç 75 μm lazer odak çapı, 230 W lazer gücü, 60 μm tarama mesafesi ve 300 mm/s tarama hızı kombinasyonları kullanılarak elde edilmiştir.

- Elastisite modülü değeri için optimum sonuç 60 μm tarama mesafesi, 450 mm/s tarama hızı, 80 μm lazer odak çapı ve 250 W lazer gücü kombinasyonları kullanılarak elde edilmiştir.
- % uzama miktarı için optimum sonuç lazer odak çapı için 90 μm , tarama mesafesi için 150 μm , tarama hızı için 450 mm/s ve lazer gücü için 230 W seviye kombinasyonları kullanılarak elde edilmiştir.
- Elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde çekme dayanımını %69.20 oranıyla, elastisite modülü %76.26 ve % uzama miktarını %44.79 oranıyla etkileyen en önemli parametrenin lazer odak çapı olduğu görülmüştür.
- Yapılan mikrosertlik deneyi sonucunda optimum sonuç 90 μm tarama mesafesi, 450 mm/s tarama hızı, 80 μm lazer odak çapı ve 250 W lazer gücü kombinasyonları kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde mikrosertlik değerini etkileyen en önemli parametrenin %38.79 oranla tarama hızı olduğu görülmüştür.
- Ortalama yüzey pürüzlülüğünü belirlemek amacıyla yapılan deneyde optimum sonuç 250 W lazer gücü, 75 μm lazer odak çapı, 60 μm tarama mesafesi ve 150 mm/s tarama hızı kombinasyonları kullanılarak elde edilmiştir. Gerçekleştirilen deney sonucunda elde edilen bilgilere göre ortalama yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametrenin %74.17 oranla tarama mesafesi olduğu görülmüştür.
- Kontrol faktörleri açısından elde edilen sonuçlar incelendiğinde ilk etapta lazer odak çapının artması çekme dayanımını düşürürken lazer odak çapındaki artışın devam etmesi çekme dayanımında iyileşme sağlamıştır. Lazer odak çapı elastisite modülü ve mikrosertlik için incelendiğinde ilk etapta seviyenin artmasıyla optimum değer elde edilirken lazer odak çapının artışıyla elastisite modülü ve mikrosertlik değerinde olumsuz sonuçlarla karşılaşmıştır. Lazer odak çapındaki artış ile % uzama miktarı doğru orantılı ancak ortalama yüzey pürüzlülüğü ile ters orantılı olduğu anlaşılmıştır. Dolayısıyla lazer odak çapındaki artış ortalama yüzey pürüzlülüğünü olumsuz yönde etkilerken uzama miktarında iyileştirme sağladığı görülmüştür.

- Tarama mesafesinde artışa bağlı olarak çekme dayanımında, elastisite modülü değerinde ve ortalama yüzey pürüzlülüğünde azalma görülmüştür. % uzama miktarı ve mikrosertlik açısından ilk etapta tarama mesafesinin artması uzama miktarı ve mikrosertlik artmış ancak tarama mesafesindeki artışın devam etmesiyle birlikte uzama miktarında ve sertlik değerinde azalma görülmüştür. Gözlemlenen bu farklı durumlar eriyik havuz boyutuyla ilişkilendirilmiştir.
- Tarama hızı ilk etapta dayanımı ve sertliği arttırmakta ancak tarama hızındaki artışın devam etmesi dayanımda ve sertlik değerinde azalmaya neden olmuştur. Bu durum toz malzemesin ergimesi için yeterli süresinin sağlanamaması ile ilişkilendirilmiştir. Elastisite modülü değeri ve numunede meydana gelen uzama miktarı için tarama hızının farklı seviyeleri incelendiğinde ilk etapta değerlerde azalma gözlenmiş ancak tarama hızındaki artışla birlikte iki parametre için de en iyi sonucun elde edildiği görülmüştür. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için tarama hızında ki artış ile pürüzlülük değerinde artış görülmüştür. Bu durum ergime işlemi için yeterli süre ile ilişkilendirilmiştir.
- Lazer gücünün artmasıyla numunenin dayanımında, elastisite modülünde ve uzama miktarında iyileşmeler görülmüştür. Ancak lazer gücündeki artış ile ilk etapta numunenin sertlik değerinde azalma ve pürüzlülük değerinde artış görülmüştür. Ancak lazer gücündeki artışın devam etmesiyle birlikte numunenin sertliği artarken pürüzlülük değerinde azalma görülmüştür. Bu durum ise uygulanan güç seviyesine bağlı olarak eriyik havuzun kararlı/kararsız bir hal almasıyla ilişkilendirilmiştir.
- L_{16} deneyleri için oluşturulan birinci dereceden denklemlerin belirlilik katsayısı çekme dayanımı, elastisite modülü, % uzama miktarı, mikrosertliği ve ortalama yüzey pürüzlülüğü için sırasıyla 0.1917, 0.6706, 0.4396, 0.2817 ve 0.5630 olarak elde edilmiştir. İkinci dereceden denklemler elde edilen belirlilik katsayısı ise çekme dayanımı, elastisite modülü, % uzama miktarı, mikrosertliği ve ortalama yüzey pürüzlülüğü için sırasıyla 0.9856, 0.9612, 0.8795, 0.8484 ve 0.8708 olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla ikinci dereceden denklemler ile yapılan tahmini değerler gerçek değerlere oldukça yakın çıkacaktır.

6.3. Öneriler

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımı farklı proses parametreleri kullanılarak seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmiştir. Proses parametrelerinin ve bu parametrelere ait farklı seviyelerin mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelenmiştir. Mevcut çalışmadan yola çıkarak yapılabilecek farklı çalışma önerilerinden birkaçı aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Mevcut çalışmada sabit tutulan katman kalınlığı, tarama stratejisi ve tarama açısı değerleri değişken parametre olarak kabul edilerek mekanik özellikler ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelenebilir.
- SLM yönteminde değişken parametreler tarama hızı, tarama mesafesi, lazer odak çapı ve lazer gücü olarak belirlenmiştir. Bu parametrelere ait seviyeler değiştirilerek yeni çalışmalar gerçekleştirilebilir.
- Farklı proses parametreleri ve seviye değerleri kullanılarak bu faktörlerin yüzey topografyası üzerindeki etkileri incelenebilir.
- Mevcut çalışmada iş parçası olarak Ti6Al4V alaşımı tercih edilmiştir. Farklı bir malzeme belirlenerek yeni çalışma yapılabilir.

KAYNAKÇA

1. Balaban, N. 2007. Titanyum ve alaşımlarının biyouyumluluklarının incelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. Yüksek lisans tezi, Metalurji ve malzeme mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
2. Cantürk, H. 2021. Ti ve Ti6Al4V alaşımının biyouyumluluk ve korozyonu üzerine yüzey modifikasyonunun etkisi. Yüksek lisans tezi, Biyomedikal mühendisliği Bölümü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
3. Oyar, P. 2015. Titanyum ve özellikleri. **Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi**, **11**(11), 1–22. doi:10.17567/dfd.73222
4. Leyens, C. ve Peters, M. 2018. Titanium and titanium alloys. Springer Handbooks içinde (ss. 199–210). doi:10.1007/978-3-319-69743-7_7
5. Yalcin, B. ve Varol, R. 2008. Ti-6Al-4V ve Ti-5-Al-2.5 Fe alaşımlarının toz metalürji yöntemiyle imalatı ve bazı mekanik özelliklerinin araştırılması. **Journal Of Polytechnic**, **11**(3), 235–241.
6. Özkan, O. 2019. Saf titanyum (CP-Ti) ve titanyum alaşımının (Ti-6Al-4V) yüzey özelliklerinin geliştirilmesi. Yüksek lisans tezi, Makine ve imalat mühendisliği Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik.
7. Subaşı, M. ve Karataş, Ç. 2012. Titanyum ve titanyum alaşımlarından yapılan implantlar üzerine inceleme. **Politeknik Dergisi Journal of Polytechnic Cilt Digital Object Identifier**, **15**(2), 87–103.
8. Ünal, E. ve Karaca, F. 2007. Ti – 6Al – 4V alaşımının dik işlem merkezli CNC tezgahında işlenebilirliğinin araştırılması. Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, (October 2007).
9. Çiftçi, İ. ve Gökçe, H. 2018. Ti6Al4V titanyum alaşımının delinmesinde delme yönteminin aşınmaya etkisinin incelenmesi. **Journal of Polytechnic**, **22**(3), 627–631. doi:10.2339/politeknik.450289
10. Tekdir, H. 2019. Seçici lazer ergitme (SLE) ile üretilen 316/Ti6Al4V tabakalı yapıların tribolojik özelliklerinin plazma oksidasyon ile iyileştirilmesi. Yüksek lisans tezi, Makine mühendisliği Bölümü, Erzurum Teknik Üniversitesi, Erzurum

11. Çelik, K. ve Özkan, A. 2017. Eklemeli imalat yöntemleri ile üretim ve onarım uygulamaları. **Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi**, 5(1), 107–121.
12. Memu, F. 2019. Katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V alaşımının mekanik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi, Makine mühendisliği Bölümü, TOBB Ekonomi Ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara.
13. Özsolak, O. 2019. Eklemeli imalat yöntemleri ve kullanılan malzemeler. **International Journal of Innovative Engineering Applications**, 3(1), 9–14.
14. Al-Rubaie, K. S., Melotti, S., Rabelo, A., Paiva, J. M., Elbestawi, M. A. ve Veldhuis, S. C. 2020. Machinability of SLM-produced Ti6Al4V titanium alloy parts. **Journal of Manufacturing Processes**, 57, 768–786. doi:10.1016/j.jmapro.-2020.07.035
15. Poyraz, Ö. 2018. Metallerin lazer katmanlı imalatında kullanılan proses parametrelerinin etkisinin, modelleme ve simülasyon yöntemleri kullanılarak incelenmesi. Doktora tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
16. Yadroitsev, I. ve Smurov, I. 2011. Surface morphology in selective laser melting of metal powders. **Physics Procedia**, 12(1), 264–270. doi:10.1016/j.phpro.2011.-03.034
17. Sun, S., Brandt, M. ve Easton, M. 2017. Powder bed fusion processes. Laser Additive Manufacturing içinde (ss. 55–77). Elsevier. doi:10.1016/B978-0-08-100433-3.00002-6
18. Demirel, M. Y. ve Karaağaç, İ. 2021. Titanyum alaşımlarının mikroyapı ve şekillendirilebilirliğine sıcaklığın etkileri. **Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi**, 9(1), 192–207. doi:10.29130/dubited.853833
19. Günyüz, M. 2007. Titanyum ve alaşımlarının mikro ark oksidasyon işlemi ile kaplanması. Yüksek lisans tezi, Metalurji ve malzeme mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
20. İşler, A. 1999. Titanyum alaşımlarının mekanik ve ısıtma işlem ve mekanik özellikleri. Yüksek lisans tezi, Makine mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

21. Sıcakyüz, Ö. 2007. Titanyum ve titanyum alaşımlarının anodik oksidasyon davranışı ve karakterizasyonu. Yüksek lisans tezi, Metalurji ve malzeme mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
22. Yılmaz, Y., Avcı, B. ve Demirören, H. 2019. Biyomalzeme sektöründe kullanılan titanyum ve alaşımları, **SETSCI Conference Proceedings 4** (6), 357-362, 2019.
23. Akyol, S. 2007. Ti-6Al-4V Titanyum alaşımının işlenebilirliğinin ısıtıl işlem yardımıyla artırılması. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. Yüksek lisans tezi, Makine mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
24. Çelik, Y. H. ve Kılıçkap, E. 2018. Titanyum ve alaşımlarının işlenmesinde karşılaşılan zorlukların araştırılması: Derleme. **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji**, 6(1), 163–175. doi:10.29109/http-gujsc-gazi-edu-tr.333494
25. Elibol, Ç. 2020. Eş kanallı açılmal pres (EKAP) yöntemi ile şekillendirilmiş Ti-6Al-4V alaşımının mekanik özellikleri ve makroskobik deformasyon davranışı arasındaki ilişki. **Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering**, 20(4), 672–682. doi:10.35414/akufemubid.715210
26. Dursun, A. M. 2019. Değişken gözenekli hücresel yapıların metal eklemeli imalat için tasarımı ve üretilen yapıların tasarım ile uyumluluğunun araştırılması. Yüksek lisans tezi, Makine mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara.
27. Liu, S. ve Shin, Y. C. 2019. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: **A review. Materials & Design**, 164, 107552. doi:10.1016/j.matdes.2018.107552
28. Baran, G. 2020. Uçak endüstrisinde kullanılan titanyum alaşımlarının tig kaynak yöntemiyle birleştirilmesinde kaynak akımının mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisi. Yüksek lisans tezi, Otomotiv mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
29. Erdem, M. S. ve Akmandor, İ. S. 2004. Uçak motoru ve elektrojen gruplarındaki gaz tribünü teknolojisindeki ilerlemeler, malzeme, yüzey teknolojileri ve imalat süreçlerindeki gelişmeler. **Mühendis ve Makina**, 1, 38–45
30. Saraçyakupoğlu, T. 2021. Bir gaz türbin motoru kompresör palesininTi6Al4V

alaşımından eklemeli üretim yöntemi ile imalatı ve boyutsal doğrulaması. **Mühendis ve Makina**, 62(702), 151–179. doi:10.46399/muhendis-makina.865357

31. Gülcan, O., Konukseven, E. İ. ve Temel, S. 2017. Katmanlı imalatla üretilen Ti6Al4V parçalarının mekanik özellikleri. **Makina Tasarım ve İmalat Dergisi**, 15(1), 27–37.
32. Taftalı, M. 2018. Seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi kullanılarak farklı yüzey geometrilerinde üretilmiş metal destekli dental seramik alt yapıların statik ve dinamik davranışlarının belirlenmesi. Yüksek lisans tezi, Makine mühendisliği Bölümü, Erzurum Teknik Üniversitesi, Erzurum
33. Aslan, B. 2019. Yenilikçi tasarım yöntemleri kullanarak eklemeli imalata yönelik optimum ürün geliştirilmesi. Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa.
34. Dedeakayoğulları, H. ve Kaçal, A. 2020. Eklemeli imalat teknolojileri ve kullanılan talaşlı imalat yöntemleri üzerine yapılan çalışmaların değerlendirilmesi. **Manufacturing Technologies and Applications**, 1(1), 1-12.
35. Ercan, N. 2019. 3B eklemeli üretim yöntemiyle üretilmiş hücresel kafes yapılı sandviç panellerin mekanik davranışlarının incelemesi. Yüksek lisans tezi, Makine mühendisliği Bölümü, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa.
36. Ergene, B. ve Yalçın, B. 2017. Endüstride yeni eğilimi olan 3-B eklemeli imalat yöntemi ve metalurjisi. **SDU International Journal of Technological Science**, 9(3).
37. Mezzetta, J. 2016. Process-property relationships of Ti6Al4V fabricated through selective laser melting department of mining and materials engineering. Master's thesis, Department of Mining and Materials Engineering, McGill University, Montreal.
38. Turalioğlu, K. 2018. Seçici lazer ergitme (Slm) yöntemi kullanılarak elde edilen kendinden yağlayıcı yüzeylerin tribolojik davranışlarının belirlenmesi. Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum Teknik Üniversitesi, Erzurum.

39. Weller, C., Kleer, R. ve Piller, F. T. 2015. Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited. **International Journal of Production Economics**, **164**, 43–56. doi:10.1016/j.ijpe.2015.02.020
40. Fang, X., Zhang, L., Li, H., Li, C., Huang, K. ve Lu, B. 2018. Microstructure evolution and mechanical behavior of 2219 aluminum alloys additively fabricated by the cold metal transfer process. **Materials**, **11**(5), 812. doi:10.3390/ma11050812
41. Ge, J., Lin, J., Lei, Y. ve Fu, H. 2018. Location-related thermal history, microstructure, and mechanical properties of arc additively manufactured 2Cr13 steel using cold metal transfer welding. **Materials Science and Engineering: A**, **715**, 144–153. doi:10.1016/j.msea.2017.12.076
42. Kruth, J., Wang, X., Laoui, T. ve Froyen, L. 2003. Lasers and materials in selective laser sintering, **Assembly Automation**, **23**(4), 357–371. doi.org/10.1108/-01445150310698652
43. Sun, R., Li, L., Zhu, Y., Guo, W., Peng, P., Cong, B., ... Liu, L. 2018. Microstructure, residual stress and tensile properties control of wire-arc additive manufactured 2319 aluminum alloy with laser shock peening. **Journal of Alloys and Compounds**, **747**, 255–265. doi:10.1016/j.jallcom.2018.02.353
44. Sürmen, H. K. 2019. Eklemeli imalat (3B baskı): teknolojiler ve uygulamalar. **Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering**, **24**(2), 373–392. doi:10.17482/uumfd.519147
45. Gebel, M. E. 2018. Polimer matrisli sürekli fiber takviyeli kompozit parça üretimi için bir eklemeli imalat yönteminin geliştirilmesi. Yüksek lisans tezi, Makine mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş.
46. Özer, G. 2020. Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. **Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, **9**(1), 606–621. doi:10.28948/-ngumuh.626011
47. Tatlı, O. 2020. Üç boyutlu yazıcı tasarımı,İmalatı ve dolgu geometrisinin mekanik özellikler etkisi. Yüksek lisans tezi, Otomotiv mühendisliği Bölümü, Bursa

Uludağ Üniversitesi, Bursa.

48. Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, C. M. ve Duysak, A. 2013. Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları. **Journal of Science and Technology of Dumlupınar University**, **31**, 53–70.
49. Duran, I. 2016. Direkt metal lazer sinterleme ve döküm yöntemleri ile hazırlanan Co-Cr altyapılı metal-seramik restorasyonların klinik değerlendirilmesi. Doktora tezi, Protetik Diş Tedavisi Bölümü, Çukurova Üniversitesi, Adana.
50. Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H. A. ve Maier, H. J. 2013. On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance. **International Journal of Fatigue**, **48**, 300–307. doi:10.1016/j.ijfatigue.2012.11.011
51. Kıran, K. 2011. Seçici lazer ergitme ile üretilmiş 316L paslanmaz çelik parçaların ince tornalama işlemleri. Yüksek lisans tezi, Makine mühendisliği Bölümü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
52. Kellens, K., Yasa, E., Dewulf, W. ve Duflou, J. R. 2010. Environmental assessment of selective laser melting and selective laser sintering. **Methodology**, **4**, 5. doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.05.001
53. Lott, P., Schleifenbaum, H., Meiners, W., Wissenbach, K., Hinke, C. ve Bültmann, J. 2011. Design of an optical system for the in situ process monitoring of selective laser melting (SLM). **Physics Procedia**, **12**, 683–690. doi:10.1016/j.phpro.2011.03.085
54. Wang, D., Yang, Y., Liu, R., Xiao, D. ve Sun, J. 2013. Study on the designing rules and processability of porous structure based on selective laser melting (SLM). **Journal of Materials Processing Technology**, **213**(10), 1734–1742. doi:10.1016/j.jmatprotec.2013.05.001
55. Yadroitsev, Igor, Yadroitsava, I., Bertrand, P. ve Smurov, I. 2012. Factor analysis of selective laser melting process parameters and geometrical characteristics of synthesized single tracks. **Rapid Prototyping Journal**, **18**(3), 201–208. doi:10.1108/13552541211218117

56. Roudnicka, M., Bigas, J. ve Vojtech, D. 2020. Tuning porosity and mechanical properties of Ti6Al4V alloy additively manufactured by SLM. **Key Engineering Materials**, **865**, 1–5. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.865.1
57. Kasperovich, G., Haubrich, J., Gussone, J. ve Requena, G. 2016. Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting. **Materials & Design**, **105**, 160–170. doi:10.1016/j.matdes.-2016.05.070
58. Walker, K. F., Liu, Q. ve Brandt, M. 2017. Evaluation of fatigue crack propagation behaviour in Ti-6Al-4V manufactured by selective laser melting. **International Journal of Fatigue**, **104**, 302–308. doi:10.1016/j.ijfatigue.2017.07.014
59. Yadroitsava, I., Grewar, S., Hattingh, D. ve Yadroitsev, I. 2015. Residual stress in SLM Ti6Al4V alloy specimens. **Materials Science Forum**, **828–829**, 305–310. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.828-829.305
60. Appavuravther, E. Z. 2020. SLE (seçici lazer ergitme) yöntemi ile üretilen Tİ -6Al-4V alaşımının ısıtıl işlemleri ve karakterizasyonu. Yüksek lisans tezi, Metalurji ve malzeme mühendisliği Bölümü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Manisa.
61. Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Humbeeck, J. Van ve Kruth, J.-P. 2010. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti–6Al–4V. **Acta Materialia**, **58**(9), 3303–3312. doi:10.1016/j.actamat.2010.02.004
62. Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J.-P. ve Van Humbeeck, J. 2012. Heat treatment of Ti6Al4V produced by selective laser melting: microstructure and mechanical properties. **Journal of Alloys and Compounds**, **541**, 177–185. doi:10.1016/j.jallcom.2012.07.022
63. Wauthle, R., Vrancken, B., Beynaerts, B., Jorissen, K., Schrooten, J., Kruth, J.-P. ve Van Humbeeck, J. 2015. Effects of build orientation and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V lattice structures. **Additive Manufacturing**, **5**, 77–84. doi:10.1016/j.addma.2014.12.008
64. Qian, G., Jian, Z., Pan, X. ve Berto, F. 2020. In-situ investigation on fatigue behaviors of Ti-6Al-4V manufactured by selective laser melting. **International Journal of Fatigue**, **133** (September 2019), 105424. doi:10.1016/j.ijfatigue.-2019.105424

65. Phutela, C., Aboulkhair, N. T., Tuck, C. J. ve Ashcroft, I. 2019. The effects of feature sizes in selectively laser melted Ti-6Al-4V parts on the validity of optimised process parameters. **Materials**, **13**(1), 117. doi:10.3390/ma13010117
66. Facchini, L., Magalini, E., Robotti, P., Molinari, A., Höges, S. ve Wissenbach, K. 2010. Ductility of a Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting of prealloyed powders. **Rapid Prototyping Journal**, **16**(6), 450–459. doi:10.1108/-13552541011083371
67. Ge, J., Huang, J., Lei, Y., O'Reilly, P., Ahmed, M., Zhang, C., ... Yin, S. 2020. Microstructural features and compressive properties of SLM Ti6Al4V lattice structures. **Surface and Coatings Technology**, **403**(August), 126419. doi:10.1016/j.surfcoat.2020.126419
68. Karimi, J., Suryanarayana, C., Okulov, I. ve Prashanth, K. G. 2021. Selective laser melting of Ti6Al4V: Effect of laser re-melting. **Materials Science and Engineering: A**, **805**, 140558. doi:10.1016/j.msea.2020.140558
69. Miranda, G., Faria, S., Bartolomeu, F., Pinto, E., Alves, N., Peixinho, N., ... Silva, F. S. 2019. A study on the production of thin-walled Ti6Al4V parts by selective laser melting. **Journal of Manufacturing Processes**, **39**(December 2018), 346–355. doi:10.1016/j.jmapro.2018.12.036
70. Muratal, O. ve Topcu, A. 2019. SLM tekniği ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımının aşınma özellikleri. Uluslararası bilim, teknoloji ve sosyal bilimlerde güncel gelişmeler sempozyumu, (December), 324–329.
71. Pal, S., Gubeljak, N., Hudak, R., Lojen, G., Rajtukova, V., Predan, J., ... Drstvensek, I. 2019. Tensile properties of selective laser melting products affected by building orientation and energy density. **Materials Science and Engineering: A**, **743**(August 2018), 637–647. doi:10.1016/j.msea.2018.11.130
72. Pal, S., Lojen, G., Hudak, R., Rajtukova, V., Brajliah, T., Kokol, V. ve Drstvenšek, I. 2020. As-fabricated surface morphologies of Ti-6Al-4V samples fabricated by different laser processing parameters in selective laser melting. **Additive Manufacturing**, **33**, 101147. doi:10.1016/j.addma.2020.101147
73. Edwards, P. ve Ramulu, M. 2014. Fatigue performance evaluation of selective laser melted Ti-6Al-4V. **Materials Science and Engineering: A**, **598**, 327–337.

doi:10.1016/j.msea.2014.01.041

74. Salem, H., Carter, L. N., Attallah, M. M. ve Salem, H. G. 2019. Influence of processing parameters on internal porosity and types of defects formed in Ti6Al4V lattice structure fabricated by selective laser melting. **Materials Science and Engineering: A**, **767**(September), 138387. doi:10.1016/j.msea.2019.138387
75. Zhou, B., Zhou, J., Li, H. ve Lin, F. 2018. A study of the microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V fabricated by SLM under vacuum. **Materials Science and Engineering: A**, **724**, 1–10. doi:10.1016/j.msea.2018.03.021
76. Yıldırım, Çağrı Vakkas, Kıvak, T. ve Erzincanlı, F. 2019. Influence of different cooling methods on tool life, wear mechanisms and surface roughness in the milling of nickel-based waspaloy with WC tools. **Arabian Journal for Science and Engineering**, **44**(9), 7979–7995. doi:10.1007/s13369-019-03963-y
77. Canıyılmaz, E. ve Kutay, F. 2003. Taguchi metodunda varyans analizine alternatif bir yaklaşım. **Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi**, **18**(3), 51–63.
78. Yıldırım, Çağrı Vakkas. 2017. Waspaloy süper alaşımının farklı soğutma teknikleri kullanarak frezeleme yöntemi ile işlenebilirliğinin incelenmesi. Doktora tezi, Makina mühendisliği Bölümü, Düzce Üniversitesi, Düzce.
79. Ghani, J. ., Choudhury, I. . ve Hassan, H. 2004. Application of taguchi method in the optimization of end milling parameters. **Journal of Materials Processing Technology**, **145**(1), 84–92. doi:10.1016/S0924-0136(03)00865-3
80. Günay, M. 2013. Aisi 316L çeliğinin işlenmesinde takım radyüsü ve kesme parametrelerinin taguchi yöntemiyle optimizasyonu. **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, **28**(3), 437–444.
81. Günay, M. ve Yücel, E. 2013. Application of taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron. **Measurement**, **46**(2), 913–919. doi:10.1016/j.measurement.2012.10.013
82. Karna, S. K. ve Sahai, R. 2012. An overview on Taguchi Method. **International Journal of Engineering and Mathematical Sciences**, **1**(2), 11–18.
83. Yücel, A. 2021. Al 2024 alaşımının tornalanmasında molibden disülfür katkılı nano

kesme sıvısının işleme performansı üzerindeki etkisi. Yüksek lisans tezi, Sivil Havacılık Bölölümü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.

84. Han, J., Yang, J., Yu, H., Yin, J., Gao, M., Wang, Z. ve Zeng, X. 2017. Microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V dependence on laser energy density. **Rapid Prototyping Journal**, **23**(2), 217–226. doi:10.1108/RPJ-12-2015-0193
85. Yu, J., Rombouts, M., Maes, G. ve Motmans, F. 2012. Material properties of Ti6Al4V parts produced by laser metal deposition. **Physics Procedia**, **39**, 416–424. doi:10.1016/j.phpro.2012.10.056
86. Shi, X., Ma, S., Liu, C., Chen, C., Wu, Q., Chen, X. ve Lu, J. 2016. Performance of high layer thickness in selective laser melting of Ti6Al4V. **Materials**, **9**(12), 975. doi:10.3390/ma9120975
87. Sun, W., Ma, Y., Huang, W., Zhang, W. ve Qian, X. 2020. Effects of build direction on tensile and fatigue performance of selective laser melting Ti6Al4V titanium alloy. **International Journal of Fatigue**, **130**(August 2019), 105260. doi:10.1016/j.ijfatigue.2019.105260
88. Kırak, T. 2014. Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. **Measurement**, **50**(1), 19–28. doi:10.1016/j.measurement.2013.12.017
89. Cho, J. Y., Xu, W., Brandt, M. ve Qian, M. 2019. Selective laser melting-fabricated Ti-6Al-4V alloy: Microstructural inhomogeneity, consequent variations in elastic modulus and implications. **Optics and Laser Technology**, **111**(July), 664–670. doi:10.1016/j.optlastec.2018.08.052
90. Chen, S. Y., Huang, J. C., Pan, C. T., Lin, C. H., Yang, T. L., Huang, Y. S., ... Yang, C. C. 2017. Microstructure and mechanical properties of open-cell porous Ti-6Al-4V fabricated by selective laser melting. **Journal of Alloys and Compounds**, **713**, 248–254. doi:10.1016/j.jallcom.2017.04.190
91. Chang, K., Liang, E., Huang, W., Zhang, X., Chen, Y., Dong, J. ve Zhang, R. 2020. Microstructural feature and mechanical property in different building directions of additive manufactured Ti6Al4V alloy. **Materials Letters**, **267**, 127516. doi:10.1016/j.matlet.2020.127516

92. Wang, Z., Xiao, Z., Tse, Y., Huang, C. ve Zhang, W. 2019. Optimization of processing parameters and establishment of a relationship between microstructure and mechanical properties of SLM titanium alloy. **Optics & Laser Technology**, **112**, 159–167. doi:10.1016/j.optlastec.2018.11.014
93. Baykal, M. ve Karaca, İ. 2012. Zn ilavesinin BiPbSrCaCuO süper iletkenlerinin mikrosertlik özellikleri üzerine etkileri. **e-Journal of New World Sciences Academy**, 7(1).
94. Song, B., Dong, S., Zhang, B., Liao, H. ve Coddet, C. 2012. Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V. **Materials & Design**, **35**, 120–125. doi:10.1016/j.matdes.2011.09.051
95. Sato, Y., Tsukamoto, M. ve Yamashita, Y. 2015. Surface morphology of Ti–6Al–4V plate fabricated by vacuum selective laser melting. **Applied Physics B**, **119**(3), 545–549. doi:10.1007/s00340-015-6059-3
96. Do, D. K. ve Li, P. 2016. The effect of laser energy input on the microstructure, physical and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloys by selective laser melting. **Virtual and Physical Prototyping**, **11**(1), 41–47. doi:10.1080/17452759.2016.1142215
97. Król, M. ve Tański, T. 2016. Surface quality research for selective Laser melting of Ti-6Al-4V alloy. **Archives of Metallurgy and Materials**, **61**(3), 1291–1296. doi:10.1515/amm-2016-0213
98. Sadali, M. F., Hassan, M. Z., Ahmad, F., Yahaya, H. ve Rasid, Z. A. 2020. Influence of selective laser melting scanning speed parameter on the surface morphology, surface roughness, and micropores for manufactured Ti6Al4V parts. **Journal of Materials Research**, **35**(15), 2025–2035. doi:10.1557/jmr.2020.84
99. Maamoun, A., Xue, Y., Elbestawi, M. ve Veldhuis, S. 2018. Effect of selective laser melting process parameters on the quality of al alloy parts: powder characterization, density, surface roughness, and dimensional accuracy. **Materials**, **11**(12), 2343. doi:10.3390/ma11122343

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Dilara Selma AYDIN
Uyruğu: Türkiye (T.C)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Sivil Havacılık	2022
Lisans	Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Makine Mühendisliği	2018
Lise	Erzincan Lisesi, Erzincan	2014

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2019-2020	İkizler Isıtma Soğutma Group	Makine Mühendisi

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR

- Aydın, D. S., Özsoy, A. L., Yıldırım, Ç. V., (2022) Ti6Al4V alaşımının seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmesinde proses parametrelerinin mikro sertlik üzerindeki etkisi, 7. Uluslararası mühendislik ve teknoloji yönetimi kongresi, 2022, İstanbul, 258-266 s.
- Özsoy, A. L., Aydın, D. S., Yıldırım, Ç. V., Sarıkaya, M., (2022), SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımının üretilmesinde tarama stratejisi ve

tarama açısının yüzey kalitesine etkisi, *7. Uluslararası mühendislik ve teknoloji yönetimi kongresi*, 2022, İstanbul, 250-257 s.

3. Aydın, D. S., (2022), Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Ti6Al4V Alaşımının Havacılıktaki Uygulamaları Üzerine Bir Derleme, *Journal of Aerospace Science and Management*, 1(1), 64-77 s.

