



**EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLEN PARÇA YÜZEYLERİNİN
LAZERLE PARLATILMASININ ARAŞTIRILMASI**

Şafak NESLİ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Şafak NESLİ

04/01/2022

EKLEMELİ İMALATLA ÜRETİLEN PARÇA YÜZEYLERİNİN LAZERLE PARLATILMASININ ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Şafak NESLİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2022

ÖZET

Eklemeli imalat (Eİ) geleneksel üretim yöntemleriyle üretilmesi mümkün olmayan oldukça karmaşık parçaları, daha az malzeme gideri ile üretilmesini sağlayan ileri imalat yöntemlerinden bir tanesidir. Fakat özellikle toz yataklı Eİ yöntemleri ile üretilmiş numunelerin yüzeylerinin yüksek pürüzlülük değerlerine sahip olması, bu numunelerin üretimden sonra doğrudan kullanılmasının önündeki en büyük engellerden biridir. Lazer parlatma (LP), eklemeli imalat da dâhil olmak üzere farklı üretim yöntemleri ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için kullanılan potansiyel bir son işlem tekniğidir. Bu tez çalışmasında, Eİ yöntemlerinden seçici lazer eritme (SLE) ile üretilen Inconel 718 ve elektron ışını ergitme (EIE) ile üretilen Ti-6Al-4V numunelerinin yüzeylerine LP işlemi uygulanmış ve yüzey bütünlüğü özellikleri, yüzey morfolojisi, mikro yapı, mikro sertlik özelliklerini analiz edilerek ve sayısal modelleme çalışması yapılarak araştırılması amaçlanmıştır. Morfolojik analiz sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü sırasıyla Inconel 718 numunesi için %90 oranında ve Ti-6Al-4V numunesi için %94 oranında iyileşmiştir. SLE-Inconel 718 numunesinin dendritik ve sütunlu mikro yapısı LP işlemi ile ortadan kaldırılmış ve EIE-Ti-6Al-4V örneğinin ($\alpha+\beta$) mikro yapısı LP işlemi ile iğnemsî (α') yapıya dönüştürülmüştür. Buna ek olarak, LP işlemi, sırasıyla Inconel 718 ve Ti-6Al-4V numune yüzeylerinin mikro sertlik değerleri yaklaşık %18 ve %12,5 oranlarında arttırmıştır. LP işlemi sırasında lazer ışını ile malzeme yüzeyi arasında gerçekleşen ısı davranışı incelemek amacı ile bir sayısal modelleme yapılmıştır. Bu ısı modelle, LP işleminin etkisiyle oluşan yeniden ergimiş ve ısıdan etkilenmiş alan belirlenmiş ve bu alanlar optik analizler ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, deneysel çalışmalar yeniden ergimiş alan için %95 ve ısıdan etkilenmiş alan için %90 oranında doğrulanmıştır.

Bilim Kodu : 91438
Anahtar Kelimeler : Eklemeli imalat, lazer parlatma, yüzey bütünlüğü, mikro yapı, mikro sertlik, sayısal modelleme
Sayfa Adedi : 92
Danışman : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

AN INVESTIGATION OF LASER POLISHING
OF ADDITIVE MANUFACTURED PART SURFACES

(Ph. D. Thesis)

Şafak NESLİ

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2022

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) is one of the advanced manufacturing methods that enables the production of highly complex parts, which cannot be produced with traditional production methods, with less material expense. However, the high roughness values of the surfaces, especially of the samples produced by powder bed AM methods, is one of the biggest obstacles to the direct use of these samples after production. Laser polishing (LP) is a potential finishing technique used to reduce the surface roughness of parts produced using different manufacturing methods, including additive manufacturing. In this thesis, LP process was applied onto the surfaces of Inconel 718 samples produced by selective laser melting (SLM) and Ti-6Al-4V produced by electron beam melting (EBM), which are one of the AM methods, and it was aimed to investigate the concept of surface integrity by analyzing the surface morphology, microstructure, microhardness properties and performing numerical modeling. According to the morphological analysis results, the surface roughness improved by 90% for the Inconel 718 sample and 94% for the Ti-6Al-4V sample, respectively. The dendritic and columnar microstructures of the SLM-Inconel 718 sample were removed by the LP process, and the ($\alpha+\beta$) microstructure of the EBM-Ti-6Al-4V sample transformed into a needle-like (α) structure with the LP process. In addition, the LP process increased the microhardness values of Inconel 718 and Ti-6Al-4V sample surfaces by approximately 18% and 12.5%, respectively. Numerical modeling was carried out in order to examine the thermal behavior between the laser beam and the material surface during the LP process. With the thermal model, the remelted and heat-affected zone formed by the effect of the LP process was determined and these zones were compared with optical analyses. As a result, the experimental studies were confirmed 95% for the remelted zone and 90% for the heat-affected zone.

Science Code : 91438

Key Words : Additive manufacturing, laser polishing, surface integrity, microstructure, microhardness, numerical modeling

Page Number : 92

Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması ve diğer akademik çalışmalarında bilgi, beceri ve deneyimiyle bana yol gösteren ve desteğini hiç esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışması süresince, yapmış olduğumuz dönemlik toplantılarda geri bildirimleri ile katkı sağlayan tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Ömer KELEŞ ve Sayın Doç. Dr. Yiğit KARPAT'a da ayrı ayrı teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışması sırasında bana manevi destek olan sevgili annem Handan NESLİ'ye, babam Ali NESLİ'ye, kardeşim Hande NESLİ'ye sevgi ve teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte, beni yalnız bırakmayan ailemin bütün üyelerine tek tek teşekkür ederim. Desteklerini her zaman arkamda hissettiğim arkadaşlarım Doğa ŞAHİN'e, Mustafa KAŞ'a, Özge GENÇ'e, Mehmet MOLLAMAHMUTOĞLU'na, Ebubekir DOĞAN'a, Tunç APATAY'a, Bedrettin Mahmut KOCAGİL'e ve tüm AMTRG grubu üyelerine teşekkür ederim. Tez çalışmam sırasında, YÖK 100/2000 doktora projesi kapsamında bursiyer olarak çalışmama imkân tanıyan Yükseköğretim Kurulu'na teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, bursiyer olarak çalıştığım 118R039 proje kodlu, "Seçici Lazer Ergitme Yöntemiyle Inconel 718 Alaşımından Üretilen Parçaların Yüzey Bütünlüğü Karakteristiklerinin İncelenmesi ve İyileştirilmesi" isimli TÜBİTAK 1001 projesi için TÜBİTAK'a teşekkür ederim. Tez çalışma kapsamında yapılan deneyler için alt yapı desteği sağlayan IPG Photonics Eurasia firmasına ve firma çalışanları Sayın Kubilay YILDIRIM'a, Sayın Hakan DEMİR'e ve Sayın Cem POLAT'a, numune üretiminde katkısı olan ASELSAN A.Ş.'ye ve firma çalışanı Sayın Umut GÖVEZ'e, yüzey analizleri için alt yapı desteği sağlayan İncekara Endüstri A.Ş.'ye ve firma çalışanları Sayın Emrah TÜFEKÇİ'ye ve Sayın Uğurcan MANDACI'ya teşekkürlerimi sunarım. Optik ve mekanik analizler için alt yapısını kullanma imkânı bulduğum Gazi Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMA	5
2.1. LP İşlem Prensibi	5
2.2. LP İşlemi ve Yüzey Bütünlüğü	8
2.2.1. LP işlemi ile yüzey morfolojisi ilişkisi	12
2.2.2. LP işlemi ile yüzeyin mekanik ve mikro yapısal ilişkisi	16
2.3. LP İşlemi Isıl Davranış ve Modelleme.....	20
2.4. Literatür Özeti ve İlgili Literatür Açığı.....	25
3. MATERYAL VE YÖNTEM	27
3.1. Numune Üretimi ve Karakterizasyon.....	27
3.2. LP Deney Düzenegi	28
3.3. LP İşlemi Proses Parametreleri	29
3.4. Yüzey Morfolojisi Analizleri	30
3.4.1. Yüzey haritalandırılması ve pürüzlülük ölçümü	30
3.4.2. Mikroskobik analizler	31
3.5. Mikro Sertlik ve Mikro Yapı Analizi.....	31
3.6. Parametre Optimizasyon Çalışmaları.....	32

	Sayfa
3.7. Isıl Modelleme ve Doğrulama.....	32
3.7.1. Model tasarımı ve sınır koşulları	33
3.7.2. Isı kaynağı modeli	34
3.7.3. Isıl davranışın doğrulanması	35
4. LP İŞLEMLERİ, YÜZEY MORFOLOJİSİ, YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜ VE SAYISAL MODELLEME ANALİZLERİ	37
4.1. LP İşlemleri ile Oluşan Yüzey Kusurları	37
4.2. LP İşlemleri ve Deney Tasarımları	45
4.2.1. EIE ile üretilen Ti-6Al-4V alaşım numunesi	46
4.2.2. SLE ile üretilen Inconel 718 alaşım numunesi	52
4.2.3. Optimizasyonu yapılmış lazer parametreleri ile yapılan işlemler.....	56
4.3. LP İşlemi Sonucunda Yüzey Bütünlüğü Analizi	61
4.3.1. SLE ile üretilen Inconel 718 alaşım numunesi	62
4.3.2. EIE ile üretilen Ti-6Al-4V alaşım numunesi	66
4.4. Sayısal Modelleme ve Analiz Çalışmaları	73
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	79
5.1. Katkı ve Öneriler.....	83
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	91

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Yüzey pürüzlülüğünü matematiksel olarak tanımlayan ifadeler listesi	9
Çizelge 3.1. Ti-6Al-4V tozu için kimyasal kompozisyon analizi.....	27
Çizelge 3.2. Inconel 718 tozu için kimyasal kompozisyon analizi.....	27
Çizelge 3.3. Inconel 718 numunesinin SLE ile üretiminde kullanılan parametre seti....	28
Çizelge 3.4. LP işlemlerinde kullanılan sabit ve değişken lazer parametreleri	29
Çizelge 4.1. LP işlemleri için çalışılan deney parametre setleri	38
Çizelge 4.2. LP işlemi yapılan yüzeylerin pürüzlülük değerleri.....	39
Çizelge 4.3. Ti-6Al-4V için oluşturulan parametre setleri ve pürüzlülük değerleri	49
Çizelge 4.4. Inconel 718 için oluşturulan parametre setleri ve pürüzlülük değerleri	53
Çizelge 4.5. Ti-6Al-4V için optimize edilmiş lazer parametreleri ile yapılan LP işlemleri ve pürüzlülük değerleri.....	57
Çizelge 4.6. Inconel 718 için LP işlemi yapılmış yüzeylerin sırasıyla 15-25- 50-100-150 µm derinlikteki mikro sertlik değerleri	64
Çizelge 4.7. LP işleminde yüzeyden derinliğe göre mikro sertlik ilişkisi	70
Çizelge 4.8. Lazer ve geometri parametreleri	73

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Toz yataklı Eİ sisteminin şematik gösterimi	5
Şekil 2.2. LP işleminin şematik gösterimi	6
Şekil 2.3. Lazer parlatma sırasında oluşan ısı iletim organizasyonun şematik gösterimi	7
Şekil 2.4. Lazer parlatma işleminin süreç basamakları.....	8
Şekil 2.5. Yüzey pürüzünde maksimum yüksekliğin şematik gösterimi (a) Rz ve (b) Sz	10
Şekil 2.6. Yüzey pürüzünde aritmetik ortalama sapmanın şematik gösterimi (a) Ra ve (b) Sa	10
Şekil 2.7. Yüzey pürüzünde karekök ortalama sapmanın şematik gösterimi (a) Rq ve (b) Sq.....	11
Şekil 2.8. Yüzey pürüzünde çarpıklığın (Rsk ve Ssk) şematik gösterimi.....	11
Şekil 2.9. Yüzey pürüzünde basıklık/sivrilik (Rku ve Sku) şematik gösterimi	12
Şekil 2.10. Enine kesilmiş düzlemde örnek ergimiş havuz geometrisi	22
Şekil 2.11. Pürüzlü bir yüzeyin Fourier bileşenleri ile gösterimi	23
Şekil 2.12. LP işlemi ile ilişkili temel parametreler.....	26
Şekil 3.1. a) Tek yönlü ve b) Zik-Zak lazer tarama stratejileri	30
Şekil 3.2. Uygulanan ısı transferi modeli için sınır koşullarının şematik çizimi.....	33
Şekil 3.3. Model üzerine uygulanmış sonlu elemanlar ağı	34
Şekil 4.1. Ti-6Al-4V alaşımının 850 - 1100 °C aralığındaki oksidasyon kinetiği eğrileri	42
Şekil 4.2. Yüzey pürüzlülük değerleri üzerine lazer parametrelerinin ana etki grafikleri; a) Sa, b) Sq, c) Sz, d) Ssk ve e) Sku	50
Şekil 4.3. LP parametrelerinin yüzey pürüzlülük değerleri temel alınarak optimizasyon çalışması	51
Şekil 4.4. Inconel 718 için sabit tarama hızları (a) 255 mm/sn (b) 265 mm/sn (c) 275mm/sn ve (d) 285 mm/sn için lazer gücünün Sa ve Sz değerlerine etkisi.....	54

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. Inconel 718 için LP işlemi sonucunda, yüzey ve yüzey altının sertlik değişim grafiği	65
Şekil 4.6. Sıcaklık ile yüzey emisyon parametresi ilişkisi	74
Şekil 4.7. Sayısal modellemede lazer ısı girdisinin simülasyonu	75
Şekil 4.8. LP sırasında, parlatılan alanın orta noktasının sıcaklığının zamana göre değişim grafiği	76
Şekil 4.9. Sayısal modellemede likidüs sıcaklığı ve (β) geçiş sıcaklığı bölgelerinin ulaştığı derinliklerinin gösterimi	77
Şekil 4.10. Sayısal modelleme ile ortaya çıkan sonuçlar ile mikro sertlik analizi sonuçlarının karşılaştırılması.....	78

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Lazerle parlatılmış numunelerin fiziksel görünümü	13
Resim 2.2. LP işlemi yapılan yüzeyler (a) Ti-6Al-4V, (b) AlSi10Mg, (c) 316L ve (d) IN718	14
Resim 2.3. Paso sayısına göre yüzey pürüzündeki değişimin morfolojik analizleri	15
Resim 2.4. LP işleminin (a) Ti-6Al-4V ve (b) TC11 numune yüzeylerindeki pürüz azalımını gösteren SEM görüntüleri	15
Resim 2.5. İşlem görmemiş ve LP işlemi uygulanmış yüzeyler arasındaki değişimi gösteren a) SEM analizi görüntüsü ve b) morfolojik analizi görüntüsü	16
Resim 2.6. LP işlemi yapılan Inconel 718 numunesinin kesit alınmış katmanın optik mikroskop görüntüsü	17
Resim 2.7. Lazerle parlatılmış farklı numunelerdeki temsili mikro-sertlik girintileri ...	18
Resim 2.8. Optik mikroskop görüntüleri (a) LP işlemi yapılmamış numunenin ve (b) LP işlemi yapılan numune	19
Resim 2.9. Kesit alınmış Ti-6Al-4V numunesinin LP (üst) ve ısıtılmış (alt) görmüş bölgelerin mikro yapı analizi	20
Resim 3.1. Lazer parlatma işlemi için hazırlanan deney düzeneği.....	28
Resim 3.2. Mikro sertlik ve mikro yapı analizi yapılan numune yüzeyi kesiti	31
Resim 4.1. Yirmi farklı deney seti ile yapılan LP işlemleri.....	37
Resim 4.2. LP işlemi yapılan yüzeylerin beyaz ışık interferometresi ile incelenmesi, (a) 1'den 14'e kadar olan deneylerin iki ve üç boyutlu görünümü (b) 15'ten 20'ye kadar olan deneylerin iki ve üç boyutlu görünümü (Ölçek: [-300;300µm]).....	40
Resim 4.3. LP işlemi uygulanmış yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri	40
Resim 4.4. Tarama yönüne göre oluşan iki farklı mikro yüzey çatlaklarının SEM görüntüleri	41
Resim 4.5. SEM ve EDS analizi yapılmış a) İşlem yapılmamış, b) Atmosfer altında LP ve c) koruyucu gaz altında LP işlemi yapılmış yüzeyler ve element tabloları	43

Resim	Sayfa
Resim 4.6. Zik-zak ve tek yönlü tarama stratejileri ile yapılan LP bölgelerinin a) iki boyutlu, b) üç boyutlu ve c) 1 ve 6 numaralı deneylerin iki ve üç boyutlu yüzey morfolojisi (Ölçek: [-300;300µm])	45
Resim 4.7. Ti-6Al-4V için belirlenen parametre setleri ile yapılan LP işlemleri	46
Resim 4.8. Ti-6Al-4V için belirlenen parametre setleri ile yapılan LP işlemlerinin yüzey morfolojisi görüntüleri.....	48
Resim 4.9. Inconel 718 için belirlenen parametre setleri ile yapılan LP işlemleri	54
Resim 4.10. Inconel 718 için a) on ikinci ve b) dokuzuncu parametre setleri ile parlatılmış yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri	55
Resim 4.11. Çizelge 10'da verilen parametre setleri ile yapılan LP işlemleri; a) 1. parametre seti, b) 2. parametre seti, c) 3. ve 4. parametre seti, d) 5. parametre seti.....	57
Resim 4.12. Çizelge 10'da verilen parametre setleri ile yapılan LP işlemlerinin iki ve üç boyutlu yüzey morfoloji görüntüleri; a) 1. parametre seti, b) 2. parametre seti, c) 3. ve 4. parametre seti, d) 5. parametre seti	59
Resim 4.13. Çizelge 10'da verilen parametre setleri ile yapılan LP optik mikroskop analizleri; a) 1. parametre seti, b) 3. parametre seti, c) 4. parametre seti, d) 5. parametre seti.....	61
Resim 4.14. Inconel 718 için ısıdan etkilenmiş alan ve mikro yapı analizi; lazer parametreleri a) 340 W – 255 mm/sn – 0,03 mm – 0,0007 sn ve b) 340 W – 285 mm/sn – 0,03 mm – 0,0007 sn.....	63
Resim 4.15. LP işlemi ile yeniden ergitilen, ısıdan etkilenen ve lazerin etkisinin olmadığı alanların optik mikroskop görüntüsü	67
Resim 4.16. Ti-6Al-4V numunesi için lazer etkisinin ulaşmadığı, lamelli ($\alpha+\beta$) mikro yapı ve lazer etkisinin görüldüğü, iğnemsisi (α') mikro yapı.....	68
Resim 4.17. Ti-6Al-4V numunesi için LP etkilerinin incelendiği farklı büyütme değerlerinde optik mikroskop görüntüleri; lazer etkisinin ulaşmadığı, lamelli ($\alpha+\beta$) mikro yapı ve lazer etkisinin görüldüğü, iğnemsisi (α') mikro yapı	69
Resim 4.18. LP işlemi yapılan numunenin kesitindeki mikro sertlik dağılımları	71
Resim 4.19. LP işlemi yapılan numunenin yeniden ergitilmiş, ısıdan etkilenmiş ve EIE alandaki mikro sertlik değerlerindeki değişim grafiği.....	72

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

Ra	Çizgisel aritmetik ortalama sapma, μm
Rq	Çizgisel kök ortalama kare sapması, μm
Rku	Çizgisel basıklık
Rsk	Çizgisel çarpıklık
Rz	Çizgisel maksimum yükseklik, μm
Sa	Alansal aritmetik ortalama sapma, μm
Sq	Alansal kök ortalama kare sapması, μm
Sku	Alansal basıklık
Ssk	Alansal çarpıklık
Sz	Alansal maksimum yükseklik, μm

Kısaltmalar

Açıklamalar

ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
BDT	Bilgisayar destekli tasarım
CNC	Bilgisayar nümerik kontrol
EDS	Enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi
Eİ	Eklemeli imalat
EIE	Elektron ışını ergitme
Hz	Hertz
HV	Vickers sertliği
ISO	Uluslararası Standartlar Teşkilatı
LP	Lazer parlatma
μm	Mikrometre
PBF	Toz yataklı füzyon
sa	Saat
SE	Sonlu elemanlar

Kısaltmalar**Açıklamalar****SEM**

Taramalı elektron mikroskobu

SLE

Seçici lazer ergitme

Sn

Saniye

SOM

Yüzey aşırı ergime

SSM

Yüzey sıg ergime

Y EY

Yönlendirilmiş enerji yığma

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat (Eİ), endüstride direkt olarak kullanılabilecek bir yapısal parçanın üretiminde, imalat yöntemleri arasında önemi giderek artan bir teknolojidir. Bu imalat teknolojisinin en temel prensibi, parçanın bilgisayar destekli tasarım (BDT) ile oluşturulmuş dijital verilerinden, üst üste katmanlar şeklinde birleştirme metoduyla, geometrinin en yakın halinin imal edilmesidir [1,2]. Döküm, dövme ve doludan işleme gibi geleneksel imalat teknolojileri ile üretilen parçalar, üretim yöntemlerinin kısıtları sebebiyle, bir kalıba ve uzun işleme prosedürlerine tabi tutulmaktadır. Eİ ile daha karmaşık geometrilere sahip parçalar, daha az ham madde kaybı ve düşük maliyet ile üretilmektedir. Geleneksel yöntemlerle imal edilmesi zor veya imkânsız olan geometrilerin, bu teknoloji ile üretilmesi mümkün olduğundan, Eİ, tasarımcıya büyük bir esneklik sağlamaktadır [3].

ISO/ASTM (Uluslararası Standartlar Teşkilatı / Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu) 52900 numaralı standardında endüstride aktif olarak kullanılmakta olan eklemeli imalat yöntemlerinin tanımları yer almaktadır [2]. Bu eklemeli imalat yöntemlerinden bir tanesi, toz yataklı füzyon birleştirme sistemleridir. Genellikle metal malzemeler için kullanılan bu sistemler, seçici lazer ergitme (SLE) ve elektron ışını ergitme (EIE) adı altında endüstride yer almakta ve bu yöntemlerle, yüksek hassasiyette parça üretimleri gerçekleştirilmektedir. Fakat bu yöntemlerle üretilen parçalarda, tarama izlerinin ve katman yapısının etkisi istenilen yüzey kalitesine ulaşılmasına engel olmaktadır. Nihai parça yüzeyinin pürüzlü olması, görsel, işlevsellik ve tribolojik olarak sorunlara neden olmaktadır. Bu nedenle, SLE ve EIE ile üretilen parçalara, yüzey bitirme işlemlerinin uygulanması gerekmektedir [4].

Lazer parlatma (LP), eklemeli imalat da dâhil olmak üzere farklı üretim yöntemleri ile üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için kullanılan potansiyel bir ardıl işlem tekniğidir. Bu teknoloji temel olarak lazer ışınının malzeme yüzeyinde yeniden ergitme yapması üzerine kuruludur. LP, malzeme yüzeyindeki ince bir tabakanın ergimesini içerir. Ergimiş malzeme, yüzey geriliminin etkisi ile pürüz tepe noktalarından vadilere doğru akar ve bu mekanizma yüzey pürüzlülüğünü azaltır. Lazer parlatmada malzemede talaş kaldırma yoktur, malzeme ergimiş bir havuz olarak taşınır [5–9].

Özellikle son yıllarda toz yataklı Eİ yöntemlerinin hızlı gelişimi nedeniyle LP işlemi de giderek artan bir ilgi görmektedir. Eİ yaygın olarak bilinen avantajlarına rağmen, nihai parçaların düşük yüzey kalitesi yüzünden, endüstrideki geniş yayılımı şu anda sınırlıdır. Düşük yüzey kalitesi problemi, aşındırıcı ile parlatma ve/veya mekanik parlatma yöntemleri gibi geleneksel ardıl işlem teknikleri kullanılarak çözülebilmektedir. Fakat bu tekniklerin malzeme israfı, uzun işlem süreleri ve sık sık takım değiştirmeye yol açan mekanik takım aşınması gibi kendi dezavantajları vardır. Lazer ile parlatma işlemi, manuel parlatma, mekanik parlatma ve kimyasal parlatma işlemlerine kıyasla daha verimli, esnek ve tamamen otomasyonlaştırılmış olması nedeniyle endüstride tercih edilmektedir [10].

Bu tez çalışmasında, Eİ yöntemlerinden sırasıyla SLE ve EIE ile üretilen numune yüzeylerine uygulanan LP işlemi ile malzeme yüzeyinin yüzey bütünlüğünün, yüzey morfolojisi, mikro yapı, mikro sertlik özellikleri analiz edilerek ve sayısal modelleme çalışması yapılarak araştırılması amaçlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda tez çalışmasının hedefleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

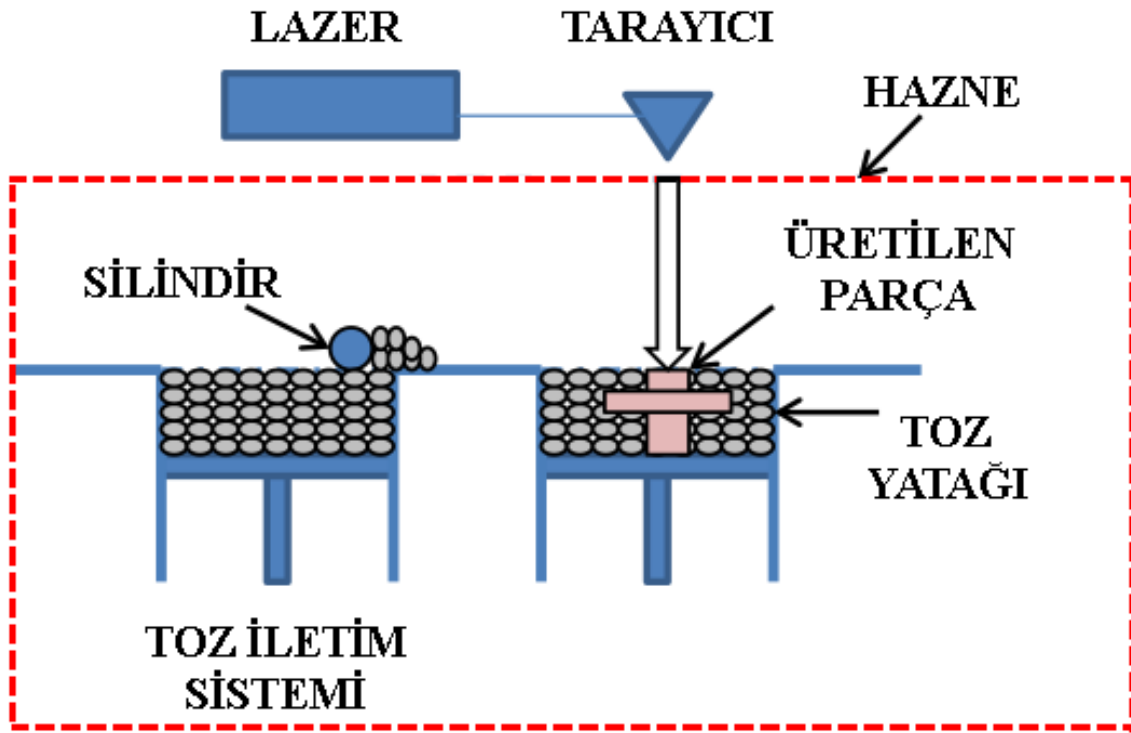
- LP işlemleri ile ortaya çıkabilecek yüzey kusurlarının tespiti ve kusurların giderilmesi için yapılan çalışmalar
- LP proses parametrelerinin yüzey morfolojisine etkisinin incelenmesi ve parametre optimizasyonu
- İşlem sonrası, numune yüzeyinde ve yüzey altındaki mikro yapı ve mikro sertlik değerlerindeki değişimlerin incelenmesi
- Sayısal modelleme yapılan LP işleminin bilgisayar ortamında simülasyonu ile ısı ve sıcaklık etkilerinin incelenmesi
- Sayısal modellemeden elde edilen sıcaklık değerleri ile deneysel çalışmalardan elde edilen optik ve mekanik analizlerin karşılaştırılması
- Deneysel çalışmalar sonucunda ortaya çıkan yeniden ergimiş ve ısıdan etkilenmiş alanların sayısal modelleme verileri ile doğrulanması

Bu tez çalışması giriş, literatür taraması, materyal ve yöntem, yüzey bütünlüğü, morfolojik analizler, mikro yapı ve mikro sertlik analizleri, ısı modelleme, doğrulama ve analiz çalışmaları ve son olarak sonuç ve öneriler olmak üzere beş ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, Eİ ve LP prosesi hakkında ön bilgi verilmiş, çalışmanın motivasyonu ve

amacı kısaca tartışılarak, tezin kapsamı anlatılmıştır. İkinci bölümde toz yataklı Eİ yöntemleri ve LP işleminin işlem prensibi hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Ayrıca bu bölümde, toz yataklı Eİ yöntemleri ile üretilen numune yüzeylerine uygulanmış LP işlemlerinin yüzey morfolojik, malzeme mekanik ve mikro yapısal özellikleri, ısı davranış ve modelleme ile ilgili geçmiş akademik çalışmalar incelenmiş ve literatüre katkı ihtiyacı belirlenmiştir. Üçüncü bölümde, numune üretimi, LP deney düzeneği, proses parametreleri, yüzeyin morfolojik analizleri, mikro yapı inceleme yöntemleri, mikro sertlik analizi, parametre optimizasyon çalışmaları, sayısal modelleme yöntemleri hakkında bilgiler verilmiştir. Sayısal modelleme ve doğrulama çalışmaları kapsamında, model tasarımı, sınır koşulları ve ısı kaynağı modeli açıklanmıştır. Dördüncü bölümde, LP işlemi ile oluşan yüzey kusurları, oluşturulan deney tasarımları, parametre optimizasyon çalışmaları, yüzeyin morfolojik özellikleri, mikro yapı ve mikro sertlik özellikleri incelenmiştir. Yine bu bölümde, sonlu elemanlar metodu ile oluşturulan sayısal modelleme ve analiz çalışmaları açıklanmış ve sonuçlar tartışılmıştır. Sonuç ve öneriler bölümünde tez çalışması kapsamında yapılan deneysel test ve ölçümlerden elde edilen sonuçlar maddeler halinde verilerek, gelecek çalışmalara ışık tutması amacıyla öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMA

Eklemeli imalat (Eİ) teknolojisi günümüzde sadece prototipleme amacıyla değil aynı zamanda havacılık, kalıpcılık ve medikal gibi birçok endüstride son ürün imalatında da kullanılmaktadır. Eİ, üretim maliyeti, üretim süresi, kullanılan kaynak malzeme ve enerji tüketimi, ürün karmaşıklığı, üretim sonrası ihtiyaçlar, malzeme kalitesi, malzeme israfı ve prototipleme ilkesi açısından büyük avantajlar sağlamaktadır [11,12]. Toz yataklı füzyon (PBF) teknolojisi Şekil 2.1’de şematik olarak gösterilmiştir. Bu sistemlerde katmanlar lazer veya elektron enerji kaynağı kullanılarak ergitilir. Tozların ergitilmesinden sonra yeni bir toz katmanı serme işlemi gerçekleştirilir ve istenilen parça geometrisi katmanlar halinde imal edilir.

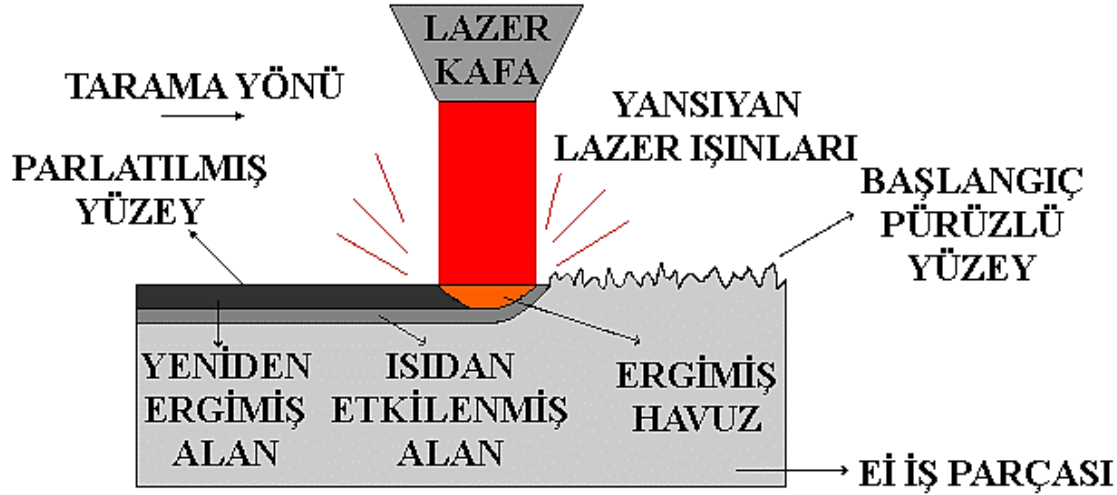


Şekil 2.1. Toz yataklı Eİ sisteminin şematik gösterimi [13]

2.1. LP İşlem Prensipleri

Lazer parlatma (LP) işlemi, parça yüzeyinin çok ince bir tabakasının hızlı bir şekilde ergitilip yeniden katılaştırılması işlemi olarak tanımlanır. Şekil 2.2’de şematize edildiği gibi, LP işleminde iş parçasının yüzeyine etki eden lazer ışını hassas bir şekilde kontrol edilir ve iş parçasının yüzeyi ısı enerjisinin etkisi altında ergitilir. Ergimiş metal, yüzey gerilimi ve yer

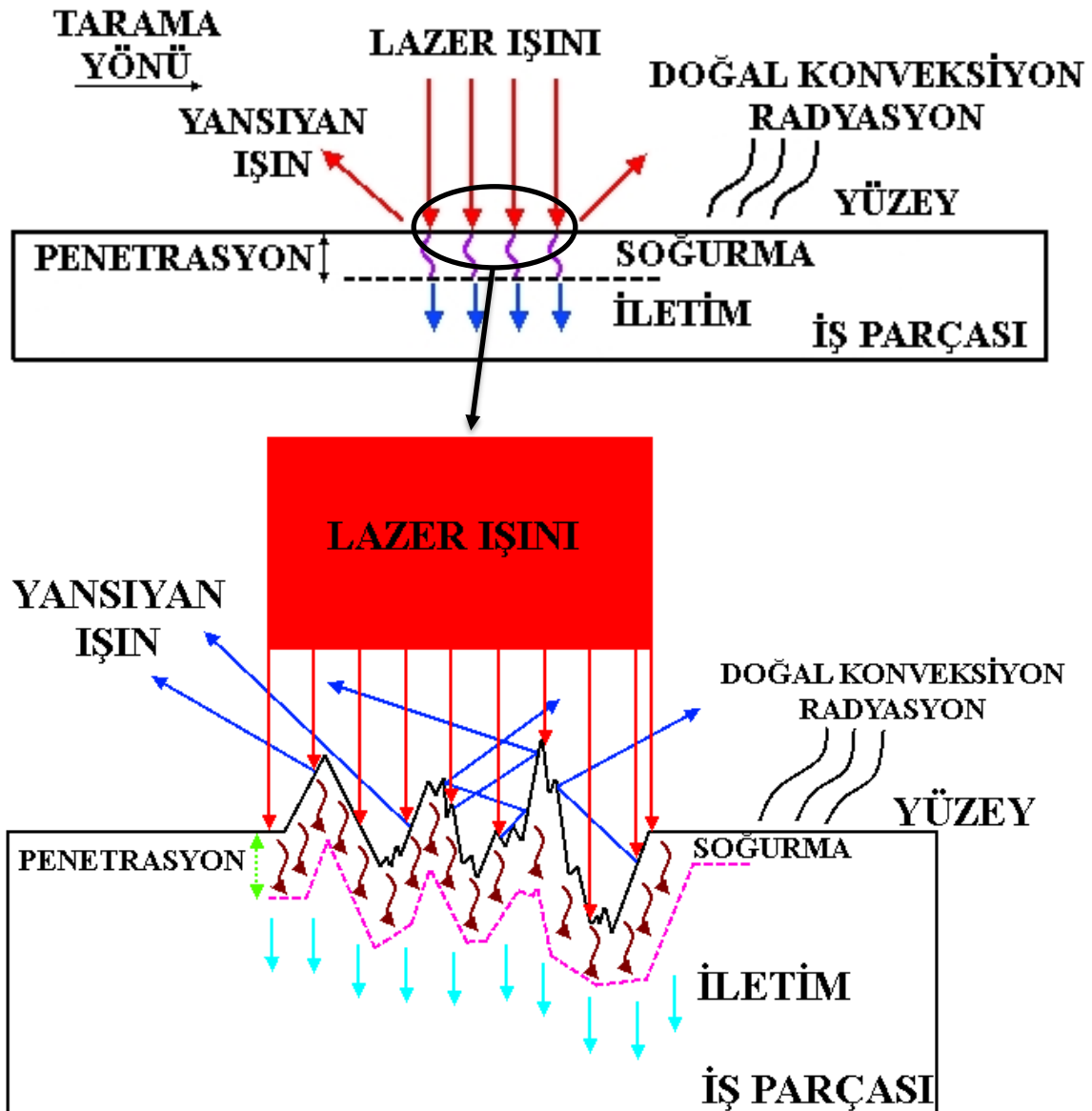
çekimi etkisi altında pürüz tepelerinden pürüz vadilerine doğru akar. Ergiyen pürüz tepeleri, vadileri bu şekilde doldurur ve sonuçta yüzey pürüzü azalmış olur [14–17].



Şekil 2.2. LP işleminin şematik gösterimi [18]

Lazer ışını, tek bir dalga boyunda bir ışık veya çok yüksek yoğunluklu bir ışık sütunudur. Işık, foton denilen enerji paketçiklerinden oluşur ve ışık, sahip olduğu enerjiyi fotonlar yoluyla iletir. Lazerin çalışma prensibi fotonların uyarılmasına dayanmaktadır. Lazerin açılımı, ışığın uyarılmış emisyonla yükseltgenmesidir. Bu yükseltgenmiş ışığı elde etmek için bazı camlar, gazlar ve kristaller kullanılmaktadır. Fiber lazerlerde, aktif ortam optik fiber ile oluşturulur ve enerjisi yükseltilecek elementler olarak genellikle erbiyum, iterbiyum, neodim, tilyum, praseodim, holmiyum ya da disprosyum gibi elementler kullanılır. Bu elementler, elektrik, ışık veya başka bir yolla uyarıldığında, atomun elektronlarının enerjisi artar. Yüksek enerji seviyesine geçen elektronlar bir süre o seviyede kaldıktan sonra termodinamik kanunları gereği düşük enerji seviyesine geçer. Geçiş sırasında yüksek enerji seviyesi ile düşük enerji seviyesi arasındaki fark kadar enerjiyi foton olarak dışarıya salar. Uyarılmış emisyon olarak tanımlanan bu durumda salınan foton başka bir atomun elektronunu uyararak aynı şekilde foton açığa çıkmasını sağlar. Bu şekilde lazer, aynı doğrultuda ilerleyen güçlü bir ışık oluşturur [19]. LP sırasında, lazer yüzeye ışınlar gönderdiğinde, enerjisinin önemli bir kısmının iş parçasına emileceği, geri kalanın yansıtılacağı ve böylece lazerin çevreyi etkileyebileceği söylenebilir. Parça tarafından soğurulan enerjinin oranı, iş parçasının yüzey özelliklerine ve lazer ışınının elektromanyetik dalga özelliklerine bağlıdır [20]. Palslı lazerlerde, pals lazer radyasyonu durduğunda, ergimiş malzemenin katılaşması başlar. Pürüz tepelerinden vadilere malzeme, ergimenin

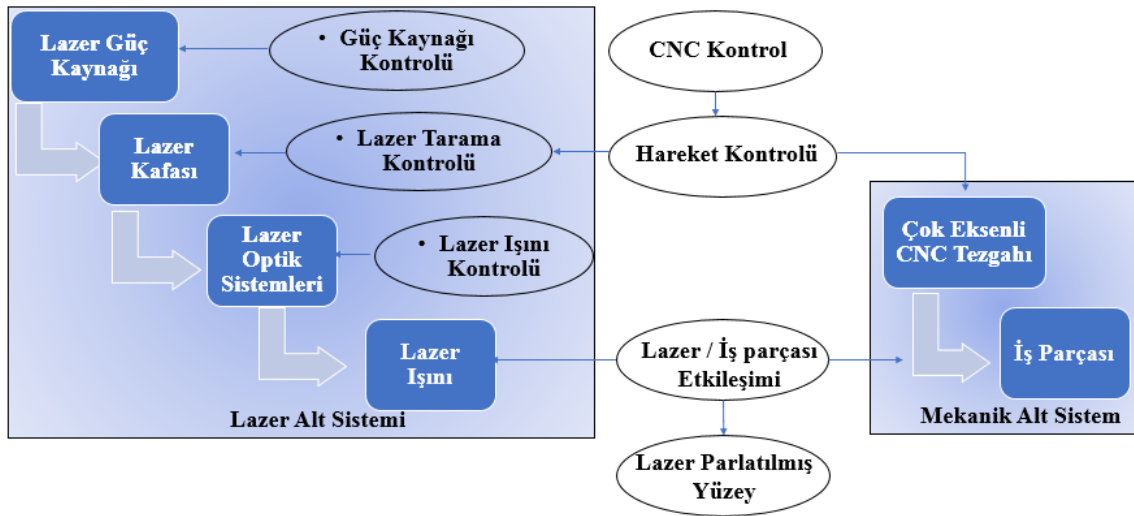
başlaması ve katılaşmanın tamamlanması arasında geçen zaman aralığında taşınabilmektedir. Bu kısa süre, lazer tarama hızını ve/veya pals süresini ayarlayarak kontrol edilebilir. Şekil 2.3'te lazer ışınının bir pals süresi içerisinde parça yüzeyine etkisi ve pürüzler üzerinde oluşturduğu ısıl etkiler şematize edilmiştir. Bu aşamada, lazer ışınının soğurulması ile pürüz tepeleri ergimeye başlar. Lazer ışınının etkisi geçtikten hemen sonra, yüzeyde biriken ısı enerjisi, yüzeyden parçanın iç taraflarına doğru iletim yoluyla ve parça yüzeyinden ortama ise konveksiyon ve radyasyon yoluyla iletilir.



Şekil 2.3. Lazer parlatma sırasında oluşan ısı iletim organizasyonunun şematik gösterimi

Şekil 2.4'te şematik olarak gösterildiği gibi, LP sistemleri, her biri geniş bir parametre yelpazesi tarafından kontrol edilen lazer ve mekanik alt sistemlere ayrılabilen bir dizi

elektro-mekanik ve optik bileşeni kapsar. Lazer alt sistemi, lazer kaynağını, lazer kafası ile ona bağlı çok eksenli bilgisayar nümerik kontrollü (CNC) tezgahı ve ışın enerjisini istenen yere odaklamak için gerekli optik bileşenleri içerir. Lazer alt sisteminin asıl amacı, enerjiyi üretmek ve üretilen enerjiyi LP işleme alanına iletmektir. Mekanik alt sistemde ise standart çok eksenli bir CNC makineye benzer bir yapı vardır. Böylece, elektrik motor sürücülerıyla öteleme ve dönme hareketi sağlayarak iş parçası ile lazer ışını arasında gerekli olan bağlı hareket sağlanmış olur.



Şekil 2.4. Lazer parlatma işleminin süreç basamakları

Lazer alt sisteminde; lazer tipi, lazer ışını enerjisi, lazer yoğunluğu dağılımı, lazer ışını oryantasyonu, pals süresi, pals frekansı ve odak uzaklığı ayarlamaları yapılabilirken, mekanik alt sistemde ise; lazer hızı, tarama stratejisi, taramalar arası mesafe gibi ayarlamalar yapılabilir. İş parçasından ise; başlangıç yüzey topolojisi, optik, termal ve mekanik özellikler gibi lazer parlatma işlemini etkileyecek bilgiler elde edilir. LP işlemi ile yüzey pürüzünün azaltılması işlemi, temelde lazer parametrelerine doğrudan bağlı olduğu gibi, yüzey malzemesi ve parçanın başlangıç yüzey pürüzü gibi faktörlere de bağlıdır [21].

2.2. LP İşlemi ve Yüzey Bütünlüğü

Mühendislik anlamında yüzey, kesme, taşlama, biçimlendirme ve geleneksel olmayan talaş kaldırma işlemleri (elektro erozyon ile işleme, su jeti, lazer işleme, vb.) gibi üretim yöntemleriyle üretilen herhangi bir yüzey anlamına gelir. Mühendislik yüzeyi, üzerine

uygulanan ilgili bitirme işlemlerinden sonra, başlangıç yüzeyine kıyasla yeni özellikler ve karakteristikler elde eder. Bu duruma yüzey bütünlüğü adı verilir. Yüzey bütünlüğü terimi;

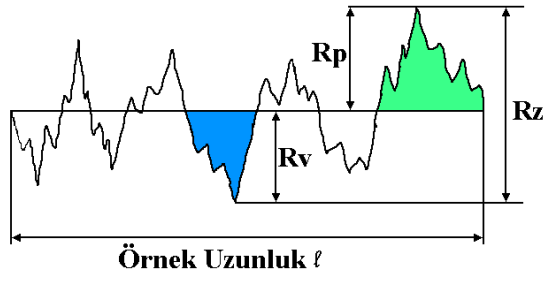
- Yüzeyin morfolojik karakteristiğini (yüzey dokusu, topografyası);
- Yüzeyin mekanik ve mikro yapısal özelliklerini ifade eder [22].

Lazer parlatma işleminin temeli, pürüzlü yüzeyin dokusunu ve topoğrafyası değiştirerek yüzeyi daha pürüzsüz bir hale getirmek üzerine dayanmaktadır. Bu aşamada, lazer parlatma prosesinin ısı etkisi yüzeyin mekanik özelliklerini de değişikliğe uğratar. Yüzey pürüzü, bir malzemenin üretim ve bitirme işlemlerinden sonra elde edilen yüzey dokusu olarak tanımlanır. Mühendislik anlamda yüzey pürüzü üzerinde işlem yapmak için yüzey pürüzünü matematiksel olarak tanımlamak gerekmektedir. Yüzeyi matematiksel olarak tanımlarken, Çizelge 2.1’de gösterilen ISO 4287:1997 [23] ve ISO 25178-2:2030 [24] standartları ile standardize edilmiş ifadelerden yararlanılır.

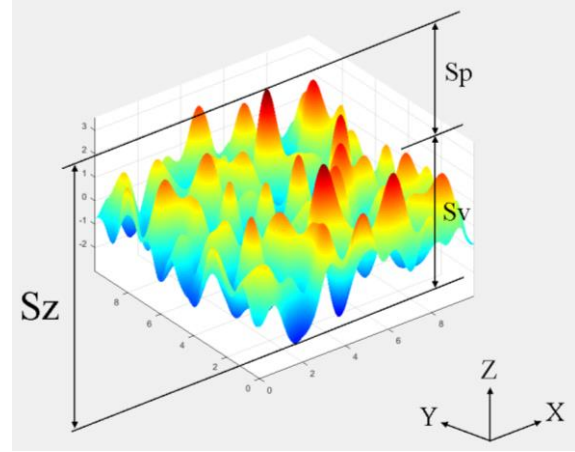
Çizelge 2.1. Yüzey pürüzlülüğünü matematiksel olarak tanımlayan ifadeler listesi

Genlik Parametreleri (Tepe ve Vadiler)	Sembol	Eşdeğer Alansal Semboller	Birim
Maksimum yükseklik	Pz, Rz, Wz	Sz	μm
Maksimum tepe yüksekliği	Pp, Rp, Wp	Sp	μm
Maksimum vadi derinliği	Pv, Rv, Wv	Sv	μm
Aritmetik ortalama sapma	Pa, Ra, Wa	Sa	μm
Kök ortalama kare sapması	Pq, Rq, Wq	Sq	μm
Çarpıklık (ing. Skewness)	Psk, Rsk, Wsk	Ssk	(Birimsiz)
Basıklık (ing. Kurtosis)	Pku, Rku, Wku	Sku	(Birimsiz)

Şekil 2.5’te görüldüğü gibi “ℓ” örnek uzunluğa sahip bir yüzey profilinde, maksimum tepe uzunluğu Rp ve maksimum vadi uzunluğu Rv olarak ifade edilmektedir. Maksimum yükseklik parametresi, bir çizgi doğrultusunda (Rz) ya da alanda (Sz), en yüksek tepe noktası ile en düşük vadi noktasının toplamı olarak tanımlanır. Sz parametresi, profil (çizgi pürüzlülüğü) parametresi Rz’yi üç boyutlu olarak genişletir. Maksimum yükseklik Sz, maksimum tepe yüksekliği Sp ve maksimum vadi derinliği Sv toplamına eşittir. Maksimum yükseklik, endüstride yüzey karakteristiğini belirlemek için sıklıkla kullanılmasına rağmen, tepe noktaların değerlerine bağlı olması nedeniyle çiziklerden, kirlenmeden ve ölçüm gürültüsünden önemli ölçüde etkilenir.



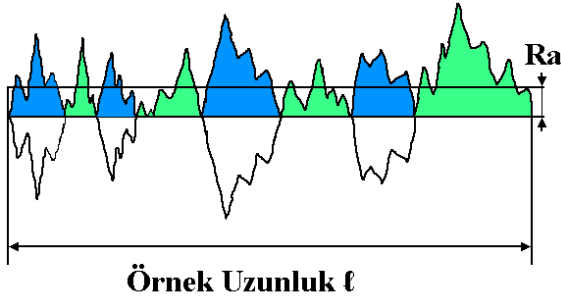
(a)



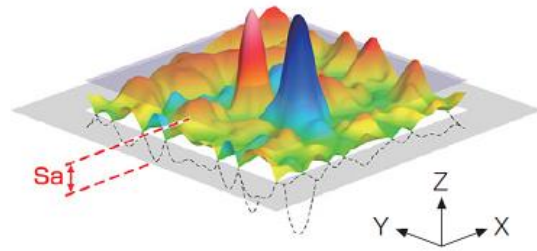
(b)

Şekil 2.5. Yüzey pürüzünde maksimum yüksekliğin şematik gösterimi (a) R_z ve (b) S_z

Şekil 2.6'da şematik olarak gösterilen aritmetik ortalama sapma parametresi R_a , bir örnek uzunluk içindeki mutlak ordinat $Z(x)$ 'in aritmetik ortalamasını temsil eder. S_a ise çizgi pürüzlülüğü parametresi R_a 'yı üç boyutlu olarak genişletilmiş olarak tanımlar. Başka bir deyişle S_a , değerlendirme alanı içindeki mutlak koordinat $Z(x,y)$ 'nin aritmetik ortalamasını temsil etmektedir. En yaygın kullanılan parametrelerden biri olan R_a ve S_a , örnek yüzey için ortalama yükseklik farkının ortalamasıdır.



(a)

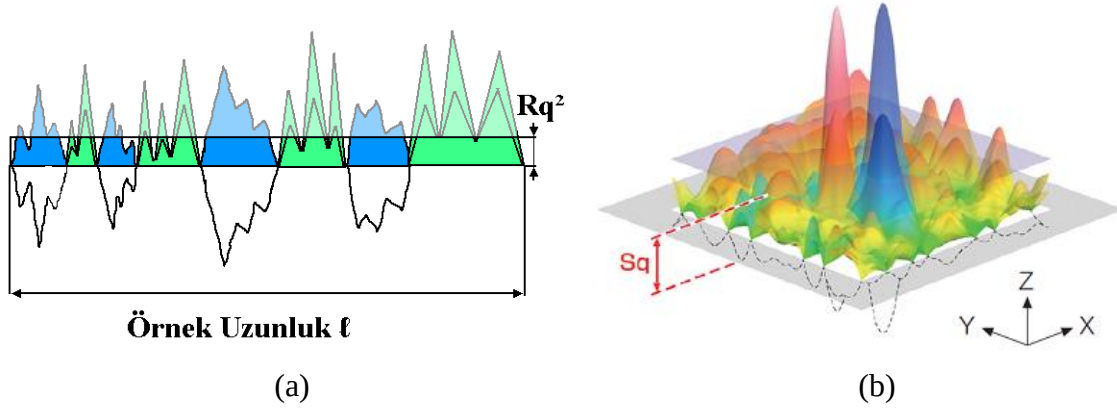


(b)

Şekil 2.6. Yüzey pürüzünde aritmetik ortalama sapmanın şematik gösterimi
(a) R_a ve (b) S_a

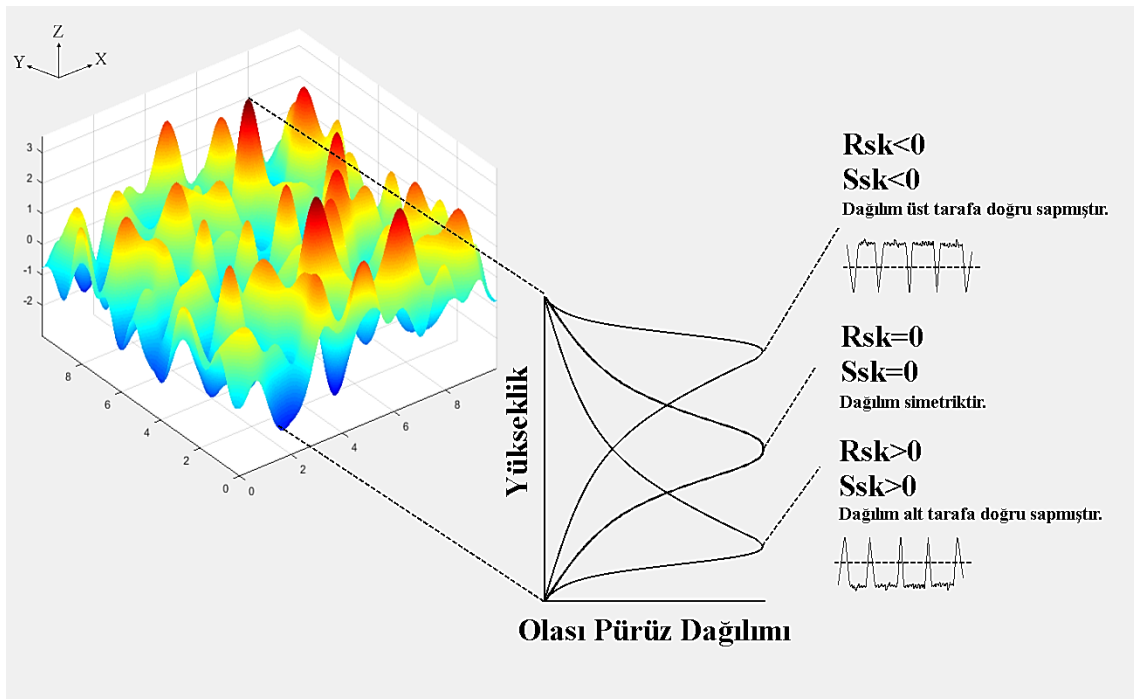
Şekil 2.7'de gösterilen karekök ortalama sapma parametresi R_q , örnek uzunluk içinde $Z(x)$ için karekök ortalama sapmayı temsil etmektedir. S_q parametresi ise R_q profil (çizgi pürüzlülüğü) parametresini, üç boyutlu olarak genişletir. Başka bir deyişle, örnek değerlendirme alanındaki $Z(x,y)$ için karekök ortalama sapmayı temsil etmektedir. R_q ve S_q parametreleri, yükseklik dağılımının standart sapmasına karşılık gelir. R_a/S_a ve R_q/S_q

parametreleri yüzey çiziklerinden, kirlenmeden ve ölçüm gürültüsünden önemli ölçüde etkilenmez ve kolay istatistiksel işlem sağlayarak kararlı sonuçlar verir.



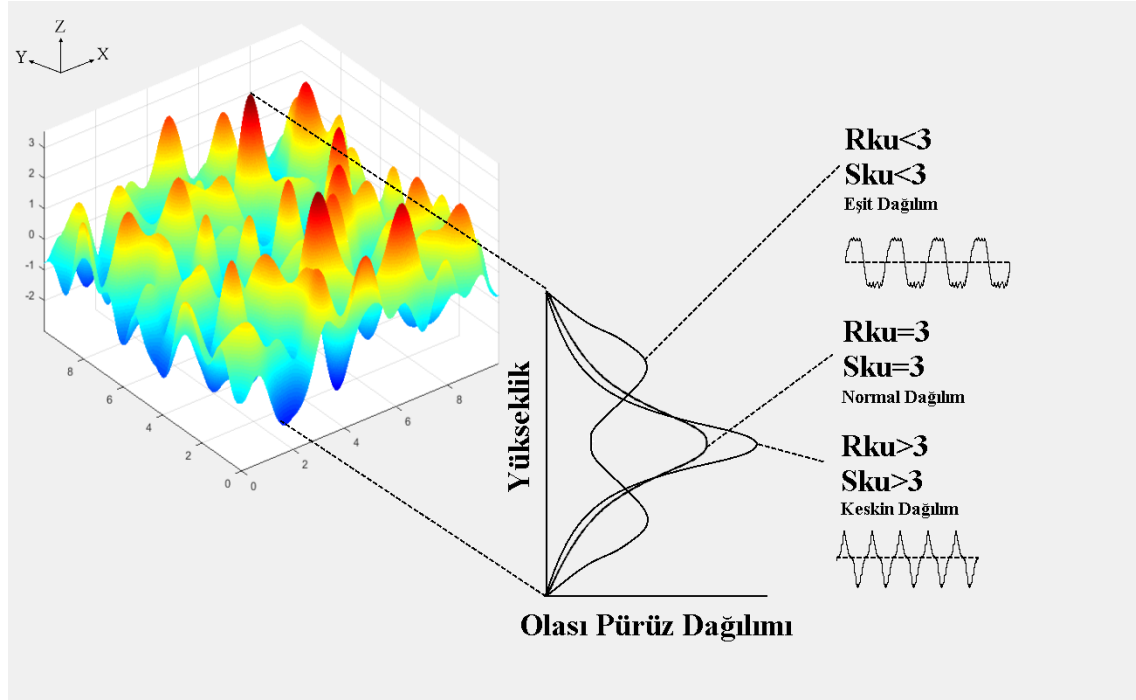
Şekil 2.7. Yüzey pürüzünde karekök ortalama sapmanın şematik gösterimi (a) Rq ve (b) Sq

Yüzey pürüzü yükseklik dağılım eğrisindeki asimetriyi ifade eden parametre, çarpıklık parametresidir (ing, skewness). Şekil 2.8’de yüzey morfolojisi şematize edilmiş ve asimetriklik gösterilmiştir. Rsk/Ssk değerleri 0’e eşitse pürüz dağılımının simetrik olduğu söylenebilir. Rsk/Ssk değerinin 0’den büyük olduğu durumda pürüz dağılımı üst tarafa doğru saptırılmışken, 0’den küçük olduğu durumlarda ise pürüz dağılımı alt tarafa doğru saptırılmıştır.



Şekil 2.8. Yüzey pürüzünde çarpıklığın (Rsk ve Ssk) şematik gösterimi

Şekil 2.9’da şematik olarak gösterilen basıklık/sivrilik (ing. kurtosis) parametresi ile yüzeydeki tepe ve vadilerin uç geometrisi matematiksel olarak ifade edilmektedir. Bu parametre genellikle iki yüzey arasındaki temas derecesini analiz etmek için kullanılır.



Şekil 2.9. Yüzey pürüzünde basıklık/sivrilik (Rku ve Sku) şematik gösterimi

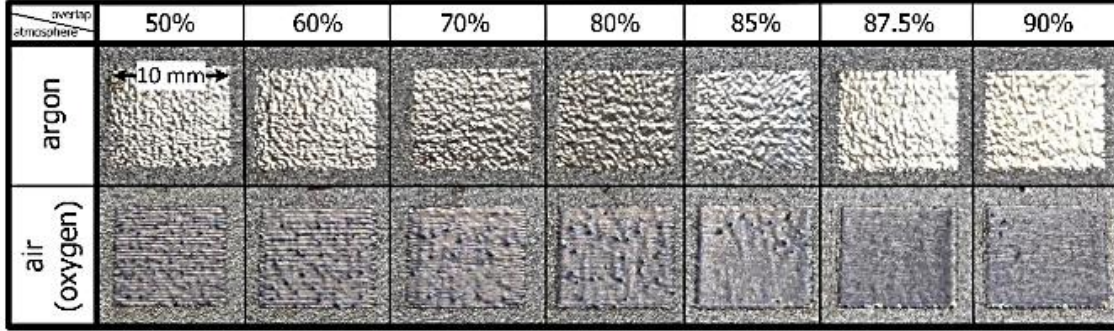
Rku/Sku değerleri 3’e eşitse pürüz dağılımının normal dağılım olduğu söylenebilir. Rku/Sku değerinin 3’ten büyük olduğu durumunda basık bir pürüz dağılımı varken, 3’ten küçük olduğu durumlarda ise pürüz keskin bir yapıdadır.

2.2.1. LP işlemi ile yüzey morfolojisi ilişkisi

LP işleminin yüzey morfolojisine olan etkisi, literatürde sıklıkla yer alan çalışma konularından biridir. Bu bölümde LP işleminin, toz yataklı Eİ yöntemlerinden SLE ve EIE ile üretilmiş parçalar üzerinde uygulanmasını konu alan, işlemin özellikle morfolojik etkilerinin incelendiği, literatürde yer almış çalışmalar incelenmiştir.

Cwikla ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda, SLE ile üretilmiş Inconel 718 numunesinin LP işlemini atmosfer altında ve argon gazı altında uygulamışlar ve sonuçları karşılaştırmışlardır. Argon gazı ve atmosfere açık alanda yapılan deneyler, sabit lazer gücü

ve tarama hızında, lazer tarama izlerinin üst üste binmesinin nihai yüzey üzerindeki etkisi göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir.

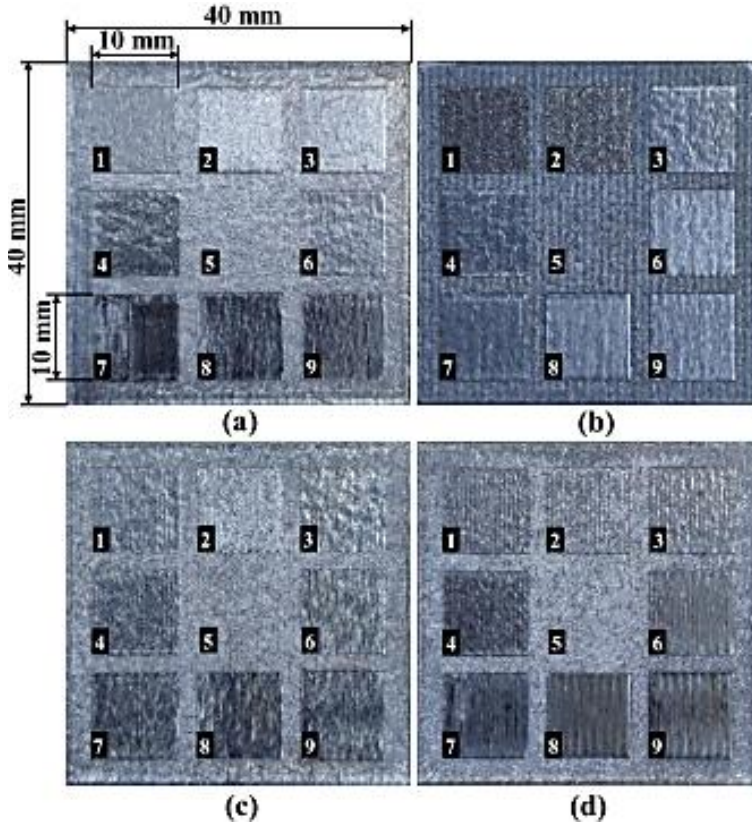


Resim 2.1. Lazerle parlatılmış numunelerin fiziksel görünümü [25]

Resim 2.1’de LP işlemleri gösterilmektedir. Buna göre, LP işleminin atmosfer altında ve argon gazı altı için ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri (Sa) %82,8 ve %87,9 oranında azaltıldığı sonucuna ulaşılmıştır. Oksidasyon katmanı, enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizi kullanılarak karakterize edilmiş ve Ti ve Al oksitlerle ilgili örtüşme oluşumu, yüzey kalitesi üzerinde hayati bir etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır [25].

Zhang ve arkadaşları, LP işlemini SLE ile üretilmiş dört farklı alaşım (Ti-6Al-4V, AlSi10Mg, 316L ve IN718) üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Dört tipik alaşımın lazerle parlatılması, her malzeme için en iyi parametre optimizasyonunu elde etmek için sürekli dalga fiber lazer aracılığıyla sekiz farklı lazer parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Resim 2.2’de gösterildiği gibi her bir LP işlemi için parlatma sonuçları elde edilmiştir. Buna göre, Sa değerleri sırasıyla %62,3, %80, %73,2 ve %81,9 oranında azalmıştır, bu da malzemenin parlatma sonuçları üzerindeki etkisini kanıtlamaktadır [26].

Kumstel ve Kirsch’nin yaptığı çalışmalar ile lazer parlatma yapılan yüzeyin malzemesinin işlem sonuçlarına direkt bir etkisi olduğu kanıtlanmıştır. Çalışmada aynı başlangıç yüzey pürüzlülüğüne sahip Ti-6Al-4V ve Inconel 718 alaşımları üzerine lazer parlatma işlemi uygulanmıştır. Sonuçlar, iki farklı alaşım türü için, farklı nihai pürüzlülük değerleri, parlama süreleri ve yeniden ergitilmiş derinlikler olarak kaydedilmiştir. Bunun nedeni, lazer ışınının malzeme yüzeyi tarafından emilim miktarının malzeme tipine göre farklılık göstermesi olarak yorumlanabilir. Başka bir deyişle, malzemenin kendisi, işlem parametrelerini ve nihai yüzey kalitesini değiştirmek için göz önünde bulundurulması gereken bir faktördür [27].

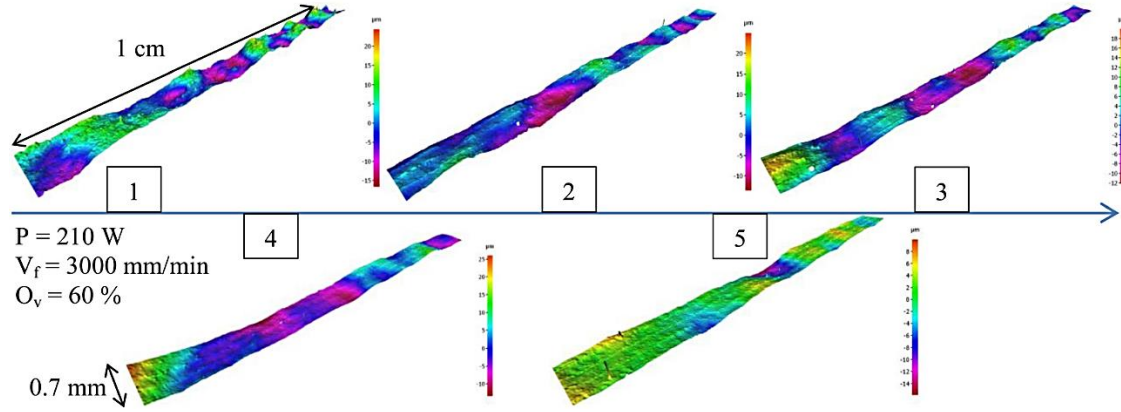


Resim 2.2. LP işlemi yapılan yüzeyler (a) Ti-6Al-4V, (b) AlSi10Mg, (c) 316L ve (d) IN718 [26]

Gora ve arkadaşları SLE ile üretilmiş CoCr ve Ti-6Al-4V alaşımlarının sürekli dalga lazer parlatma işlemi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Ti-6Al-4V numunesi için pürüzlülük başlangıç değerinin %85'ine kadar azaltılmıştır. CoCr numuneleri için ise ilk yüzey kalitesine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü %85 ile %96 oranında azaltılmıştır. Çalışmanın sonucuna göre, kullanılan lazer parametreleri her durumda iyi sonuçlar vermiş olsa da, başlangıç yüzey kalitesinin daha iyi olduğu numunelere uygulanan LP işlemi ile daha kaliteli bir nihai yüzey pürüzü elde edilebilir [28].

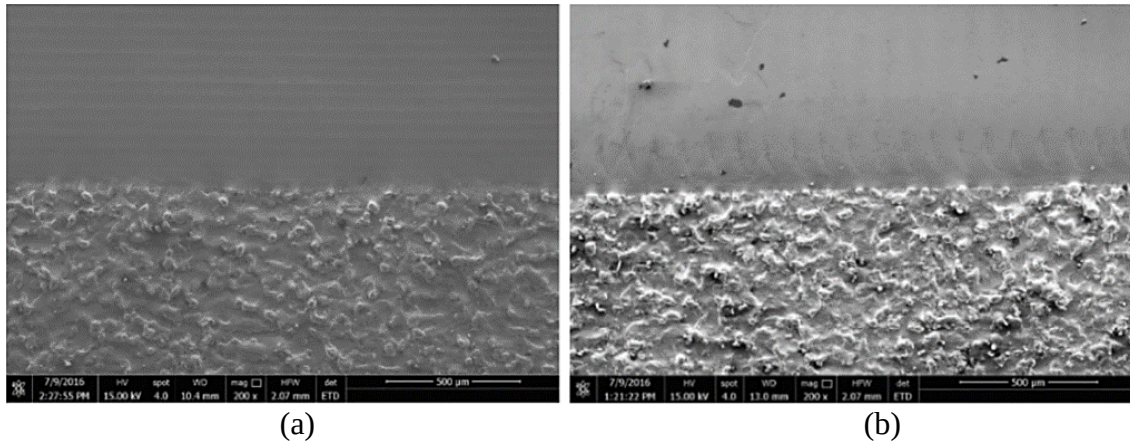
Başka bir çalışmada ise Rosa ve arkadaşları Eİ yöntemlerinden SLE ile üretilen 316L paslanmaz çelik numunelerinin yüzeylerini LP işlemine tabi tutmuşlardır. Yüzey pürüzünü iyileştirmek için çok pasolu bir strateji seçilmiştir. Çok pasolu tarama stratejisi, aynı lazer yoluna göre aynı yüzeye aynı lazer parametrelerinin “n” katını uygulamaktan oluşur ve her geçiş için aynı lazer parametrelerini çalıştıran bu strateji, lazer parlatma işleminin daha iyi sonuçlar vermesini sağlamıştır. Resim 2.3'te gösterildiği gibi, paso sayısı aynı lazer parametreleriyle 1 ile 5 arasında değişmektedir. Beş lazer parlatma taramasından sonra, ilk yüzey topografyası büyük ölçüde pürüzsüz hale getirilmiştir. Bu çalışmada, paso sayısını

arttırarak daha pürüzsüz yüzeye ulaşabildiği soncuna ulaşılmıştır. Bu strateji ile $S_a = 21 \mu\text{m}$ olan numunenin başlangıç yüzey pürüzü, $S_a = 0,79 \mu\text{m}$ 'lık bir nihai yüzey pürüzlülüğüne düşmüştür ve %96'lık bir yüzey pürüzlülüğü azalması elde edilmiştir [29].



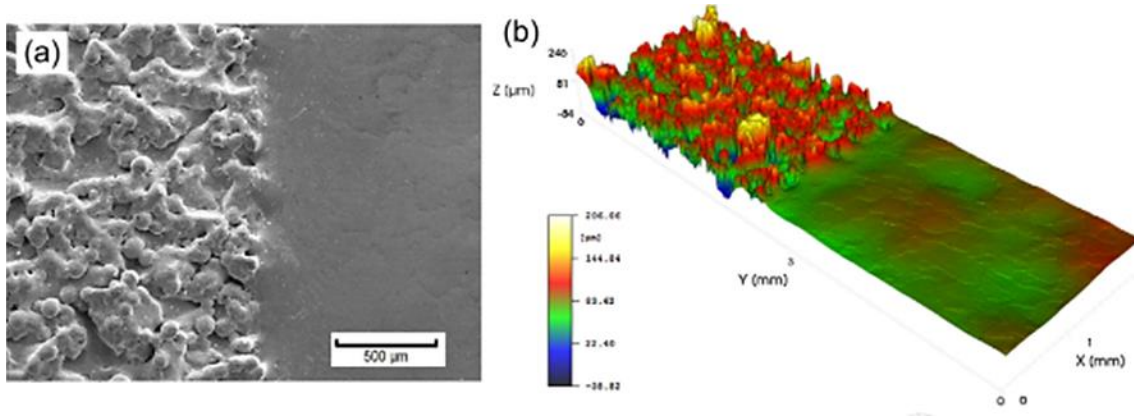
Resim 2.3. Paso sayısına göre yüzey pürüzündeki değişimin morfolojik analizleri [29]

Ma ve arkadaşları yönlendirilmiş enerji yığma (YEH) yöntemi ile üretilmiş Ti-6Al-4V ve TC11 alaşımların pürüzlü yüzeylerinin lazer parlatılması üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada, hem işlem yapılmamış yüzey hem de LP yüzeyler analiz edilerek LP işleminin yüzey morfolojisine, mekanik etkilerine ve mikro yapı değişimlerine olan etkiler incelenmiştir. Çalışmada, LP ve pürüz ilişkisi de incelenmiştir. Resim 2.4'te gösterildiği gibi, başlangıçta $S_a = 5,226 \mu\text{m}$ olarak ölçülen Ti-6Al-4V numunesi işlem sonrası $S_a = 0,375 \mu\text{m}$ olarak ölçülürken, TC11 numunesi ise $S_a = 7.21 \mu\text{m}$ 'den $S_a = 0,73 \mu\text{m}$ seviyelerine düşürülmüştür. LP işlemi, farklı alaşım numunelerine ve farklı başlangıç pürüzlerine göre değişiklikler göstermiştir [6].



Resim 2.4. LP işleminin (a) Ti-6Al-4V ve (b) TC11 numune yüzeylerindeki pürüz azalımını gösteren SEM görüntüleri [6]

Tian ve arkadaşları, EIE ile üretilen Ti-6Al-4V alaşım numunesi yüzeyine yapılan LP işleminin yüzey morfolojisi ile birlikte, mikro yapı değişimi mikro sertlik değişimi ve kalıntı gerilme oluşumu üzerine çalışmışlardır. Bu başlık altında, yapılan çalışmanın yüzey morfolojisi ile olan ilişki incelenmiştir. Çalışmada, LP işlemi uygulanan iş parçasının yüzey pürüzlülüğü yaklaşık olarak %75 oranında azaltılmıştır. Resim 2.5'te taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi ve morfolojik analiz görüntüleri gösterilen numune için başlangıçta yüzey pürüz değeri $S_a = 21,46 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüş ve LP işlemi ile bu değer $S_a = 5,50 \mu\text{m}$ seviyelerine indirilmiştir. Pürüzdeki bu iyileştirme oranı esasen iyi seviyede olarak yorumlanabilir ve mekanik yöntemler ile parlatma işlemleri ile kıyaslanabilecek seviyededir [30].

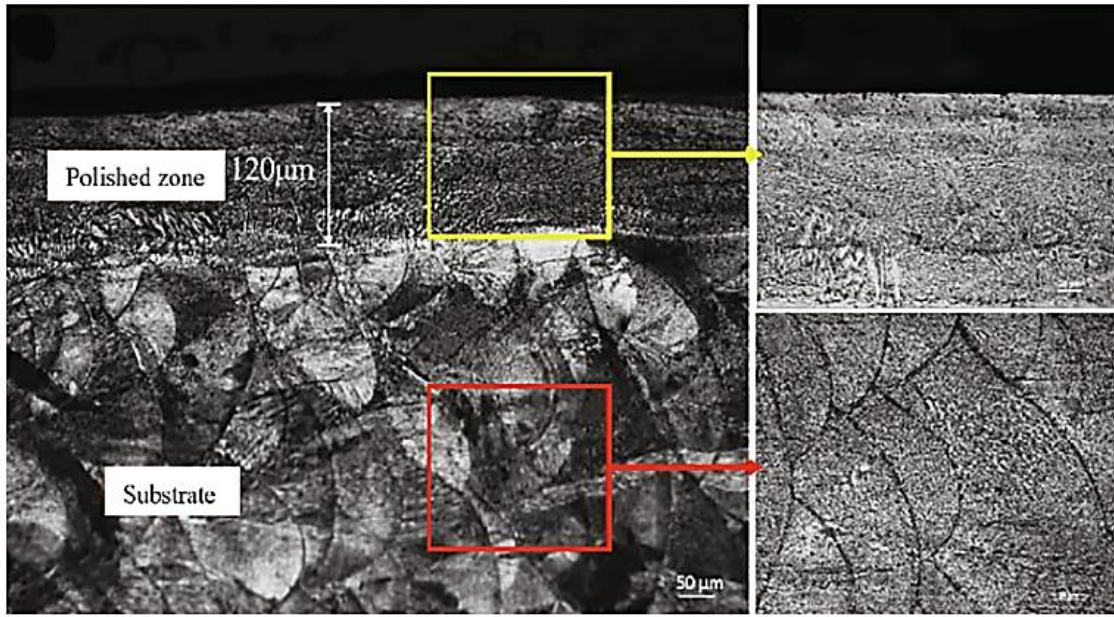


Resim 2.5. İşlem görmemiş ve LP işlemi uygulanmış yüzeyler arasındaki değişimi gösteren a) SEM analizi görüntüsü ve b) morfolojik analizi görüntüsü [30]

2.2.2. LP işlemi ile yüzeyin mekanik ve mikro yapısal ilişkisi

LP işleminin yüzey bütünlüğü ile olan ilişkisi, yüzeyin morfolojik ilişkisine ek olarak mekanik ve kesitsel karakterizasyon incelemesi aracılığıyla mikro yapı analizini kapsamaktadır. Bu bölümde LP işleminin özellikle mekanik ve mikro yapısal etkilerinin incelendiği, literatürde yer almış çalışmalar incelenmiştir.

Zhihao ve arkadaşları SLE ile üretilen Inconel 718 alaşım numunesine LP işlemi uygulamışlardır. Yüzey pürüzlülüğü LP işlemi öncesinde $R_a = 7 \mu\text{m}$ seviyelerinde olan numunenin $R_a = 0,1 \mu\text{m}$ seviyelerinin altına düşürülebileceğini ortaya koymuşlardır. Buna ek olarak, LP işlemi yapılmış alanın mikro yapısı, mikro sertliği ve aşınma direnci incelenmiştir.



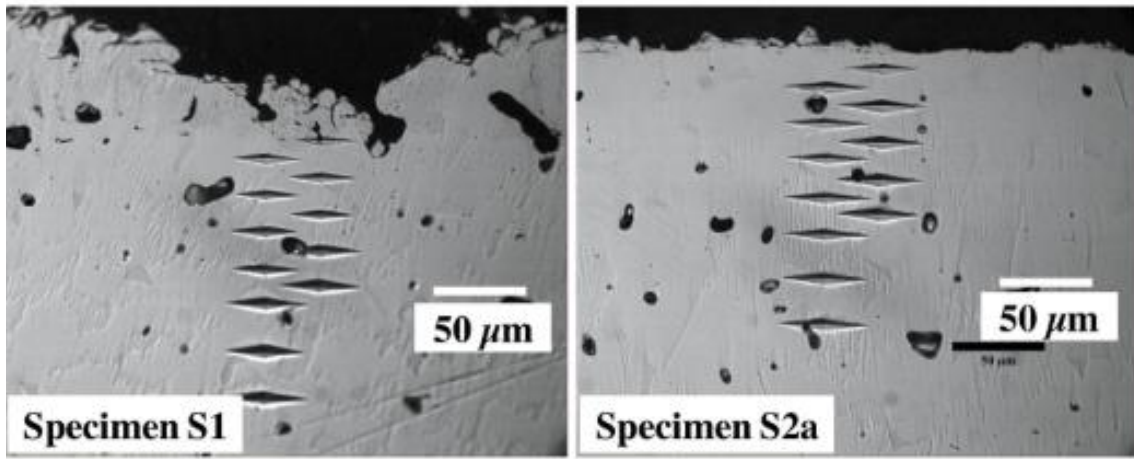
Resim 2.6. LP işlemi yapılan Inconel 718 numunesinin kesit alınmış katmanın optik mikroskop görüntüsü [31]

Resim 2.6’da gösterildiği gibi yüzey lazerle parlatıldıktan sonra, lazerin ısı etkisinin incelenmesi için numuneden kesit alınmıştır. Kesit alınan bölgede gerekli parlatma ve dağlama işlemleri yapıldıktan sonra, lazerin ısı etkisi optik mikroskop ile görüntülenmiştir. Çalışmada, LP sırasında yüksek soğutma hızı gözlemlendiği için lazerle parlatılmış katmanda tane boyutu küçülmüş ve mikro yapıda γ'' fazı çökeltileri oluşmuştur. Başlangıçta, Inconel 718 numunesinin ortalama sertliği yaklaşık 345 HV olarak ölçülmüştür. LP işleminden sonra parlatılmış yüzeyin sertliği %27,5 oranında (yaklaşık 440 HV’ye) artmıştır. Mikro sertlik analizi, mikro yapı analizi ile birlikte analiz edildiğinde, yüzeyin yüksek mikro sertlik değerinin ana sebebi, ilgili bölgedeki çökelme sertleşmesi olarak karşımıza çıkar. Bunun yanı sıra, lazer hızlı ısıtma ve soğutmanın neden olduğu tane küçültme, parlatılmış numunelerin sertliğini iyileştirmek için kullanılabilir [31].

Lamikiz ve arkadaşları SLE ile üretilmiş paslanmaz çelik numunesine LP işlemi uygulayarak yüzey pürüzü parametresi Ra değerinde %80’e varan azalmalara ulaşmışlardır. İşlem görmemiş yüzey pürüzlülüğü $Ra = 7,5 \mu m$ ’den, $Ra = 1,3 \mu m$ ’lik bir nihai pürüzlülük seviyelerine indirilmiştir. Bu çalışmalara ek olarak lazerle parlatılmış yüzeye metalürjik analizler yapıldığında, ısıdan etkilenen bölgelerin çatlak veya gözeneklilik göstermediği gözlemlenmiştir. Lazerden etkilenen bölgeler, ilk bölgelere göre daha homojen bir yapıda olduğu gözlemlenmiştir ve lazerle parlatılmış yüzeyler işlem görmemiş yüzeye göre, daha

sert ve daha homojendir. LP işleminin sadece işlem yapılan alanda, mikroskobik bir tabakayı kapsadığı sonucuna varılabilir. Dolayısıyla, LP işleminin orijinal makro geometriyi etkilemezken, yalnızca yüzey pürüzlülüğünü etkilediği anlamına gelir [21].

Bhaduri ve arkadaşları Eİ ile üretilen paslanmaz çelik (SS316L) numunelerine LP işlemi uygulamışlar ve lazer parametrelerinin yüzey pürüzü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmalarda, işlem görmemiş yüzeylere kıyasla, yüzey kusurlarının belirtisi olmaksızın, optimize edilmiş lazer parametreleri ile alansal yüzey pürüzlülüğünde %94'ün üzerinde bir maksimum azalma elde edilmiştir. Lazer parlatma işleminin etkinliği büyük ölçüde iş parçasının başlangıçtaki yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğu ve ilk pürüzlülük ne kadar yüksekse, Sa'daki azalmanın da o kadar büyük olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



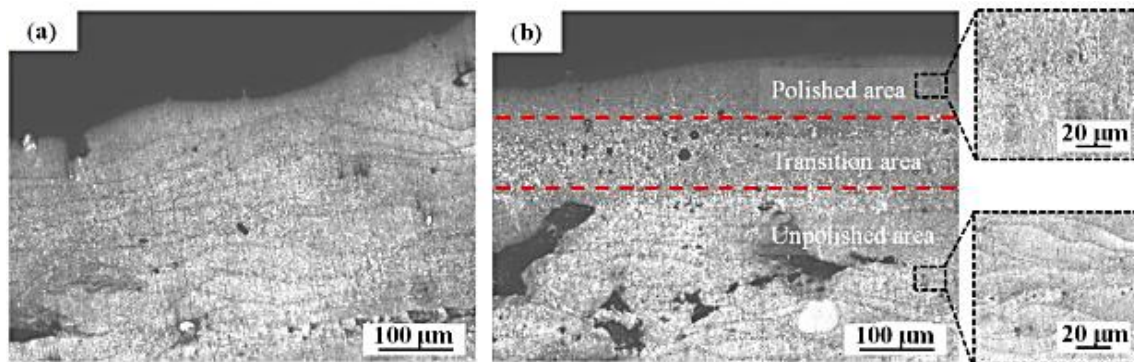
Resim 2.7. Lazerle parlatılmış farklı numunelerdeki temsili mikro-sertlik girintileri [32]

Resim 2.7’de, lazerle parlatılmış yüzey kesitine uygulanmış mikro sertlik testi girintileri gösterilmektedir. Lazer parlatmayı takiben sertlikteki artış, yüzeyin aşınma direncini iyileştirebilirken, yeniden erime nedeniyle alt yüzeyin yoğunlaşması, Eİ ile üretilen parçalarda bulunan gözenekleri ortadan kaldırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle, lazer parlatma teknolojisi, Eİ bileşenlerinin tamamen yoğun dış katmanının çok önemli olduğu uygulamalarda faydalı bir işlemdir [32].

Tian ve arkadaşlarının çalışmış olduğu, EİE ile üretilen Ti-6Al-4V alaşım numunesi yüzeyine yapılan LP işleminin mikro yapı, mikro sertlik ve kalıntı gerilme üzerine etkisi bu başlık altında incelenmiştir. LP sırasında yeniden ergitilen 200 µm derinliğindeki yüzey tabakası, Eİ alt tabakaya göre farklı bir tane yapısı ve yeniden yönlendirilmiş bir doku ortaya

çıkarmıştır. Yeniden ergimiş katmanda sütunlu taneler, alt tabakadan ergimiş yüzeye doğru yeniden gelişmiştir. Çalışmada, malzemenin yüzeyinden 450 μm derinliğe kadar uzanan bir ısıdan etkilenmiş alan gözlemlenmiştir ve bu bölge tamamen (β) olan yaklaşık 300 μm derinliğindeki bir alt yüzey katmanından ve kısmen dönüştürülmüş bir geçiş katmanından oluşmaktadır. Tamamen dönüştürülmüş bölge, birbirini takip eden lazer ışınının geçişi sırasında çok ince bir ($\alpha + \beta$) lamel yapısına dönüşen yapının soğumasıyla martenzitik bir dönüşüme uğraması olarak açıklanabilir. Çok daha ince olan yüzey altı mikro yapısının bir sonucu olarak, LP ile üretilen ısıdan etkilenmiş alan ile aynı derinliğe kadar sertlikte küçük bir artış olduğu gözlemlenmiştir [30].

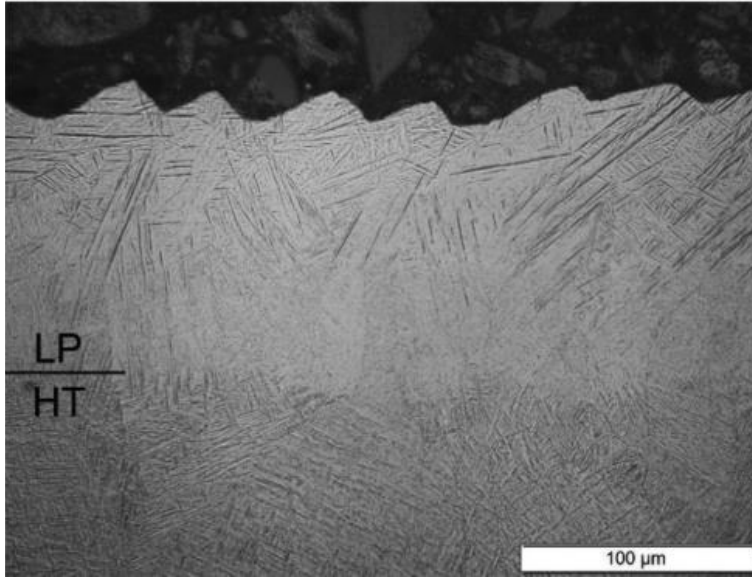
Başka bir çalışmada Zhou ve arkadaşları, lazer temelli toz yataklı Eİ yöntemi ile üretilen alüminyum alaşımı numuneler üzerine LP işlemleri uygulamışlardır. Çalışmada, yüzey morfolojileri, pürüzlülük ve mikro sertlik değişimlerinin lazer parametreleri ile olan ilişkisi araştırılmıştır. Resim 2.8'de gösterildiği gibi, LP işlemi yapıldıktan sonra mikro yapı, kaba sütunlu tane yapısından ince eş eksenli tane yapısına dönüşmüştür. LP sırasında yüksek soğutma oranlarının neden olduğu termal aşırı soğutma, tanecikli etkiyi desteklemiştir. Çalışmanın sonuçlarında, LP işlemi sonrasında, üst yüzeyin yüzey pürüzlülüğü büyük ölçüde azaltılmış ve mikro sertlik değerleri ise önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Ra ve Sa'nın yüzey pürüzlülüğü sırasıyla %70,4 ve %71,3 oranında azaltılırken, LP işleminden sonra mikro sertlik %57,6 artmıştır [33].



Resim 2.8. Optik mikroskop görüntüleri (a) LP işlemi yapılmamış numunenin ve (b) LP işlemi yapılan numune [33]

Solheid ve arkadaşları, lazer temelli toz yataklı Eİ yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımı numunelere LP işlemleri sırasında mikro yapısal değişimi anlamak için bir termal model uygulamışlardır. Mevcut modelleme ergimiş bölgelerin ve ısıdan etkilenen alanların

boyutlarını tahmin etmek üzerine yapılmış ve simülasyon sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda LP işlemi sonrası malzeme sertliği ve artık gerilmeler değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, numuneye LP işlemi ve ısıtma uygulamaları yapılmış ve mikro yapı değişimleri incelenmiştir. Resim 2.9’da gösterildiği gibi, mikro yapılar arasındaki farklılıklar, lazerle parlatılmış alanın martenzitik yapısının ince ve uzun iğne benzeri bir yapıda olduğu ve ısıtma işlemi yapılmış bölgelerde ise mikro yapının lameller bir yapıda olduğu sonucunu çıkarmıştır. Böylece, LP işlemi ile etkilenen yüzey ve yüzeyin hemen alt kısmı martenzitik bölgeye dönüştüğünden, ilgili alanda mikro sertlik değerlerinin yükselmesi beklenirken, çalışmalar sonucunda mikro sertlik değerlerinin azaldığı görülmüştür. Mikro sertlik üzerindeki bu etki, LP işlemi sırasında ortaya çıkabilecek, çatlak veya gözenekler gibi kusurlardan kaynaklanabilir [34].



Resim 2.9. Kesit alınmış Ti-6Al-4V numunesinin LP (üst) ve ısıtma işlemi (alt) görmüş bölgelerin mikro yapı analizi [34]

2.3. LP İşlemi Isıl Davranış ve Modelleme

LP işlemi temel olarak, lazer ışınının yüzeyi ısıtma etkisiyle yüzeyde bir ısıtma işlemi oluşturmaktır. Bu sebeple, lazer kaynağının ısıtma davranışı ve modellenmesi literatürde sıklıkla yer alan çalışma konularından biridir. Yapılan çalışmalarda, uygun teorik modellerle LP sürecinin çeşitli değişkenleri arasında nicel ilişkiler kurmayı amaçlanmıştır. Çalışmaların en önemli hedefleri, genellikle giriş/çıkış parametreleri ile ifade edilen LP davranışı üzerinde doğru tahminler sunmaktır. Bu çalışmalar yapılırken genellikle,

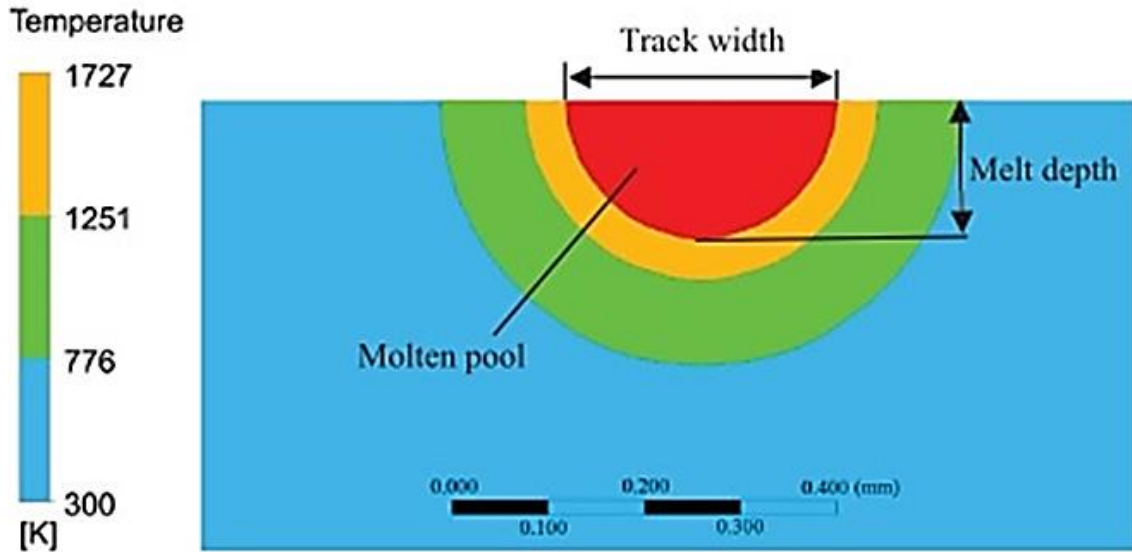
önerilen modelin işlevselliğini arttırmak ve istenen sayısal formülasyonların belirlenmesini sağlamak için, işlem sırasında bazı basitleştirmeler ve/veya varsayımlar yapılır. Bu bölümde lazer ışınının ısı davranışını konu alan, literatürde yer almış çalışmalar incelenmiştir.

Ramos ve arkadaşları, SLE ile üretilmiş numunelerin başlangıç yüzey pürüzlerini basitçe yarım küreler şeklinde modellemeyi önermişlerdir. Lazer gücünün, tarama hızının ve ilk parçacık boyutunun bir fonksiyonu olarak hacimce %40 bronz içeren 420 paslanmaz çelik numunesi için elde edilen yüzey pürüzlülüğü tahminleri, deneysel sonuçlarla kıyaslanmış ve oldukça iyi sonuçlar elde etmişlerdir. Başlangıç yüzeyinin basitleştirilmiş temsili, daha sonra, kapiler ve viskoz sürüklenme basınçlarının etkisi altında ergimiş malzemenin yeniden dağılımının bir sonucu olarak LP işlemi ile parlatılmış yüzey pürüzlülüğündeki azalmaları açıklamak için kullanılan bir modele dâhil edilmiştir [35]. Lazer parlatma sırasında, yüzeyde yüzey sığ ergime (SSM) ve yüzey aşırı ergime (SOM) olmak üzere iki yüzey modifikasyon rejimi tanımlanmıştır. Her rejimin başlangıcı, LP öncesi başlangıç pürüzlülük değerinin yanı sıra, lazer ışınının ısı girdisi ile belirlenir. Lazer ışınının ısı girdisine göre yüzeyde yalnızca kısa bir ergiyik derinliği oluşturulması SSM olarak tanımlanırken, lazer ışınının yüksek ısı girdisi ile oluşturduğu tepe ve vadilerin aşırı ergimesi, SOM mekanizmasını oluşturur. SOM mekanizmasında, yüzey tamamen ergimiş hale gelir. Lazer ışınının hareketi sırasında düşük frekanslı ve yüksek genlikli periyodik yapılar meydana gelmesiyle yüzeyin pürüzlülük değeri artar [35]. Bu sebeple başka bir çalışmada Ramos ve arkadaşları, lazerle parlatılmış yüzeyin derin ergimesinden kaynaklanan SOM mekanizması için termo-fiziksel bir model geliştirmişlerdir. Yapılan modelle, LP işlemi ile elde edilen yüzeyin pürüzlülüğü kabul edilebilir bir doğrulukla tahmin edilebilmiştir. Ayrıca, SOM sonucunda oluşan düşük frekanslı ve yüksek genlikli dalganın LP işleminde pürüzlülük artışları için belirleyici olduğu sonucuna varılmıştır. Buna ek olarak, SSM'den SOM'a geçişin öncelikle lazer enerji yoğunluğundan ve ilk yüzey pürüzlülüğünden etkilendiğine inanılırken, yüzey boyunca ışın hızının LP'den sonra elde edilen nihai pürüzlülük üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır [36].

Marimuthu ve arkadaşları, SLE yöntemi ile üretilmiş Ti-6Al-4V numunesinin nihai yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde kontrol eden ergiyik havuzun dinamiğinin anlaşılmasına yardımcı olmak için hesaplamalı akışkanlar dinamiği temeline dayanan sayısal bir model üzerinde çalışmalar yapmışlardır. LP mekanizması içerisindeki ısı transferi ve ergimiş materyal akışındaki fiziksel olaylar modellenmiş ve analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan

matematiksel modellemede ana denklemler kütlenin korunumu, momentumun korunumu ve enerjinin korunumu denklemlerinden oluşmaktadır. Yapılan nümerik ve deneysel çalışmalar sonucunda, ergiyik havuz taşınımını önemli ölçüde etkileyen ve temelde yüzey kalitesini kontrol eden anahtar parametre lazerin ısı girdisi olarak belirlenmiştir. Ayrıca, minimum ergitme havuz hızı, iyi yüzey kalitesi elde etmek için gerekli olduğu sonucuna ulaşılmıştır [37].

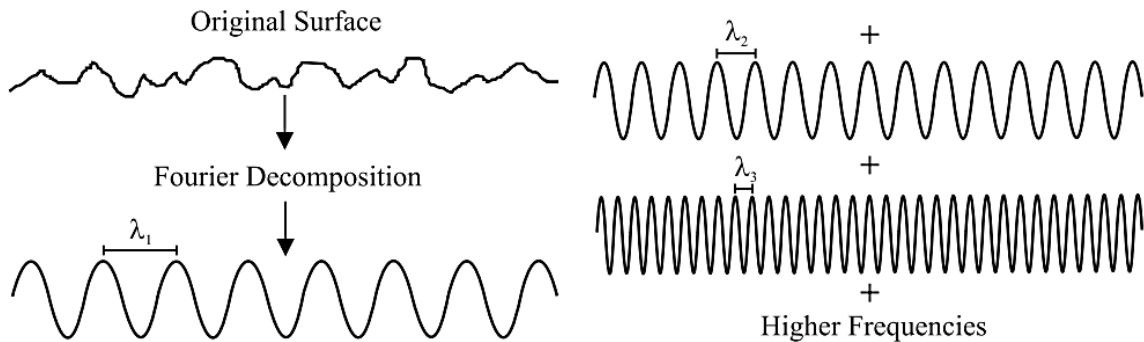
Mohajerani ve arkadaşları, H13 takım çeliğinin LP işlemi sırasındaki iz genişliğini tahmin etmek için üç boyutlu bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen model, iletim, konveksiyon ve radyasyon gibi ısı transferi ve bunun yanı sıra ilgili malzeme özellikleri için sıcaklık ilişkilerini içermektedir. İş parçasının uygun absorptivite değerinin elde edilmesi için kalibrasyon deneyleri yapılmış ve sonuç olarak, geliştirilen modelin proses parametrelerinin ergimiş havuz boyutları ve/veya geometri üzerindeki etkisini doğru bir şekilde tanımlayabilmektedir. Şekil 2.10'da enine kesilmiş düzlemde örnek bir ergimiş havuz gösterilmiştir. Kırmızı renkli alan, 1727 K üzerindeki sıcaklıkları ve LP sırasında geliştirilen ergimiş havuzu temsil eder. Bu çalışmada, sayısal ve deneysel olarak belirlenen iz genişliği arasındaki doğrudan karşılaştırmalar, daha sonra bir işlem davranışı öngörücü şekilde kullanılmak üzere termo-fiziksel modeli kalibre etmek için kullanılabilir [20].



Şekil 2.10. Enine kesilmiş düzlemde örnek ergimiş havuz geometrisi [20]

Shao ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarında ısı transfer analizine ve yüzey pürüzlerinin buharlaşmasına bağlı, LP işlemi için basitleştirilmiş bir model oluşturmışlardır. Model, mikro-pürüzler ve malzeme özelliklerinden oluşur. Bilinen geometrik yüzeye sahip bir metalin LP işlemi için işlem parametrelerini önceden tahmin edilmesini amaçlamaktadır. Fe, Al, Ti ve 304 paslanmaz çelik numunelerinin parlatılması için yapılan öngörü, pürüzdeki sıcaklık değişiminin, substratların orijinal yüzey topografyasıyla önemli ölçüde değiştiğini göstermiştir. Sonuçlar, çoğu metalin palslı lazerle parlatılması için, normalde nano-saniye veya daha az aralığında kısa pals süresine sahip lazer gerekli olduğunu göstermektedir. Çalışmada, 30 nanosaniye atım süresi olan bir lazer kullanılarak çeliğin lazerle parlatılması gerçekleştirilmiş ve yüzey morfolojisi karakterize edilmiştir. Sonuç olarak test edilen numunelerin yüzeylerinde belirgin bir iyileşme gözlemlenmiştir. Yapılan bu yaklaşımla, iletme ve radyasyona dönüşen lazer enerjisi ile ilgili bağlantılar kurulmuş ve lazer parlatma işlemi simule edilmiştir [38].

Ma ve arkadaşları titanyum alaşımı Ti-6Al-4V'nin palslı LP işlemi için ısı transferini ve sıvı akışını birleştiren iki boyutlu sayısal bir model geliştirilmişlerdir. Hem lazer yüzeyinin ergimesi hem de ergiyik havuzunun yeniden çözündürülmesinin, ergiyik havuzunun ve yüzey profilinin geçici dönüşümü hakkında daha gerçekçi bilgi sağladığı düşünülmüştür. Ergiyik derinliği ve yüzey profilinin simülasyon sonuçları, kesitlerin optik görüntüsünden elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada, yüzey profilinin tahmini ergiyik derinliği ve tepe-vadi arası mesafe sırasıyla yaklaşık %26,8 ve %20,0 oranlarında farklılıklar gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır [39].



Şekil 2.11. Pürüzlü bir yüzeyin Fourier bileşenleri ile gösterimi [40]

Perry ve arkadaşları ise lazer pals süresinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki teorik ve deneysel etkisini incelemişlerdir. Şekil 2.11'de görüldüğü gibi, orijinal pürüz davranışı Fourier

bileşenlerine dönüştürülmüş ve bu kabuller sonrasında LP sonucunda oluşacak yeni yüzey durumu tahmin edilmiştir. Bu çalışmada sonlu elemanlar analizi ve sıvı akışı modellemesi sonucunda, daha uzun lazer palslarının, yüzey pürüzlülüğünde daha büyük bir azalmaya neden olduğu öngörülmüştür [40].

Lazer parlatma işlemi dışında, lazer temelli işlemler endüstride sıklıkla yer almaktadır. Lazerle kesme işlemi, lazer kaynağı gibi işlemler de lazerin ısı ilişkisi ile gerçekleştirilen işlemlerdendir. Bu işlemler sırasında lazerin ısı davranışını ve modellenmesi temel olarak lazer parlatma işlemi sırasındaki lazerin davranışı ile ilişkilidir. Keles ve arkadaşları, alüminyum köpük içerisine küçük çaplı bir deliğin lazer ile kesilmesi üzerinde çalışmışlardır ve kesme bölümünde ortaya çıkan termal gerilim alanı, sonlu elemanlar koduyla birlikte incelemişlerdir. Çalışmada, kesme bölümünde geliştirilen sıcaklık ve gerilim alanları sonlu elemanlar metodu kullanılarak sayısal olarak incelenmiş ve sıcaklığın, kesim fazının çevresi etrafındaki substrat malzemesinin sıvı sıcaklığını aştığı, sıvı fazın aşırı ısınmasına neden olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmada, lazer ısıtma işlemine ait Fourier ısı transfer denklemi Eş. 2.1'deki gibi yazılabilir:

$$\rho_{eff} \frac{\partial H(T)}{\partial t} = \left(\nabla(k_{eff}(T) \nabla T) \right) + S_o \quad (2.1)$$

burada ρ_{eff} efektif yoğunluk, H katılaştırmanın gizli ısını içeren sıcaklığa bağlı entalpi, k_{eff} sıcaklığa bağlı termal iletkenliği, ve S_o lazer ışınına benzeyen ısı kaynağı terimidir. Isı kaynağının eşitliği, Eş. 2.2'de verilmiştir.

$$S_o = I_o e^{-\delta z} (1 - r_f) e^{\left(-\frac{(x-r \sin wt)^2 + (y-r \cos wt)^2}{a^2} \right)} \quad (2.2)$$

I_o , lazer gücü yoğunluğu, a Gauss parametresi, r_f yüzey yansıtıcılığı, δ absorbe katsayısı, ρ yoğunluk ve x ile y de, lazer ışını kesilen deliğin çevresi boyunca yüzeyi tararkenki eksenlerdir. Dairesel kesim yapılırken lazer ışını hareketi, sabit bir w açısal hızda deliğin çevresini takip etmektedir [41]. Bu çalışmaya paralel yapılan başka bir çalışmada ise, Keles ve arkadaşları alüminyum 2024 alaşımında üçgen bir geometrinin lazerle kesilmesi araştırılmışlardır. Kesme bölümündeki termal gerilme alanı sonlu eleman kodu kullanılarak tahmin edilmiş ve yüzey sıcaklığı tahminleri termokupl verileri ile doğrulanmıştır. Lazerle

ısıtma ve termal gerilme analizi yapılmış ve ısıtma işlemiyle ilgili ve hareketli levhayı içeren ısı transfer eşitliği Eş. 2.3'teki gibi yazılmıştır.

$$\rho \frac{\partial(H(T))}{\partial t} = (\nabla(k(T)\nabla T)) + \rho U \frac{\partial(Cp(T)T)}{\partial x} + S_o \quad (2.3)$$

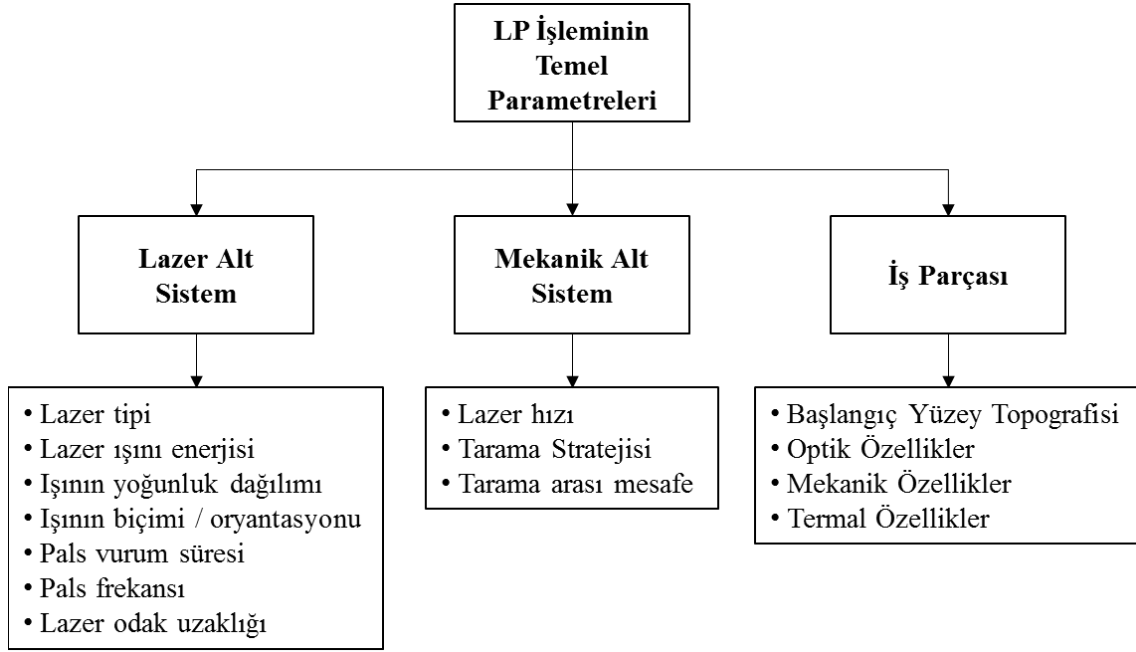
Burada H , katılaşmanın gizli ısını içeren sıcaklığa bağlı entalpi, k , sıcaklığa bağlı termal iletkenlik, ρ , yoğunluk, U , lazer kesim hızına karşılık gelen hareketli levha hızı, $Cp(T)$ sıcaklığa bağlı özgül ısıdır ve S_o , lazer ışınına benzeyen ısı kaynağıdır. Isı kaynağının eşitliği, Eş. 2.4'te verilmiştir.

$$S_o = I_o e^{-\delta z} (1 - r_f) e^{\left(-\frac{x^2+y^2}{a^2}\right)} \quad (2.4)$$

I_o , lazer gücü yoğunluğu, a Gauss parametresi, r_f yüzey yansıtıcılığı, δ absorbe katsayısı, ρ yoğunluk ve x ile y de tarama eksenleridir [42]. Birbirine paralel iki çalışmada da lazerin hareketi sırasında yüzeyin maruz kaldığı enerjinin zamana bağlı davranışı matematiksel olarak ifade edilmiştir. Buna ek olarak, lazerin numune yüzeyi üzerindeki hareketini sağlayan zamana bağlı konumlandırma denklemleri incelenmiştir. Bu iki kavram, LP işleminin ısıl davranışı ve modellenmesi konusunda temel olarak alınmıştır.

2.4. Literatür Özeti ve İlgili Literatür Açığı

Literatürde sıklıkla çalışılan ana konular LP işleminin zorlukları hakkında fikir vermektedir. Çünkü LP işleminin sonuçları lazer tipi, lazer ışını enerjisi, ışının yoğunluk dağılımı, pals vurum süresi ve frekansı, odak uzaklığı gibi genel olarak lazer alt sistem özelliklerine ve lazer hızı, tarama stratejisi ve tarama arası mesafe gibi mekanik alt sistem özellikleriyle birlikte, üzerinde çalışılan malzemenin optik, mekanik ve termal özelliklerine, başlangıç yüzey topografisine bağlıdır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. LP işlemi ile ilişkili temel parametreler

Bu parametrelerin büyük bir kısmı, lazer ile malzeme etkileşimin genel dengesi tarafından belirlenmektedir. Burada birincil rol, yüzey pürüzlülüğünün tatmin edici bir şekilde azaltılmasını sağlamaktır. Bununla birlikte, parlatılmış yüzeyin nihai pürüzlülüğü söz konusu olduğunda, lazer ve mekanik alt sistemlerin getirdiği öngörülebilir parametrelere ek olarak, malzeme özellikleri ve başlangıç yüzey morfolojisi şeklinde iş parçasına bağlıdır. Literatürde Eİ yöntemleri ile üretilen numunelerin yüzeyine LP işlemlerinin uygulanması çalışmalarının sınırlı sayıda olduğu görülmüştür. LP işleminde ısı davranışın hem nihai yüzey pürüzlülüğüne hem de mikro yapı ve mekanik özelliklerin oluşumuna etkisi literatürde vurgulanmıştır. Isıl davranış ve etkilerinin incelendiği çalışmalar literatürde yer alsa da, sınırlı sayıda olduğu bilinmektedir. Özellikle toz yataklı Eİ yöntemlerinden EIE ile üretilmiş Ti-6Al-4V alaşım numunesinin modellenerek LP işlemi sırasındaki lazerin ısıl etkisinin incelendiği çalışmalar literatürde çok fazla yer almadığı gözlemlenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde ilk olarak, yüzeyi üzerine LP işlemi yapılan numunelerin üretim aşamaları ve toz karakterizasyonları açıklanmıştır. Tez çalışmasında yürütülen deneyler kapsamında kullanılan LP sistemi, LP işlemi sonrası yapılan optik mikroskop, SEM ve EDS analizleri, yüzey morfoloji analizleri, yüzey pürüzlülük değerlerinin temini, mikro yapı ve mikro sertlik analizleri ve son olarak yapılan LP işleminin ısı davranışının incelendiği sayısal modelleme analizi açıklanmıştır.

3.1. Numune Üretimi ve Karakterizasyon

Tez çalışması için Ti-6Al-4V alaşım numuneleri, bir ARCAM A2X EIE cihazı ile üretilmiştir. Üretim sırasında katman kalınlığı 50 µm olarak ayarlanmış ve diğer proses parametreleri, üretim sırasında dinamik olarak değişecek şekilde ARCAM A2X cihazı tarafından belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan Ti-6Al-4V alaşım tozu ARCAM firmasından temin edilmiştir. ARCAM'ın veri sayfasına göre, bu toz 45-100 µm'lik bir partikül boyutu dağılımına sahiptir ve kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Ti-6Al-4V tozu için kimyasal kompozisyon analizi

Element	Ti	Al	V	C	Fe	O	Ni	H
Ağırlıkça %	Denge	6	4	0,03	0,1	0,15	0,01	0,03

Yine tez çalışmasında kullanılmak üzere, SLE yöntemi ile Inconel 718 numunesi ENAVISION 250 3D eklemeli imalat makinesi ile üretilmiştir. Çizelge 3.2'de Inconel 718 numunesinin kimyasal kompozisyonu gösterilmektedir. Üretim sırasında kullanılan lazer parametreleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Inconel 718 tozu için kimyasal kompozisyon analizi

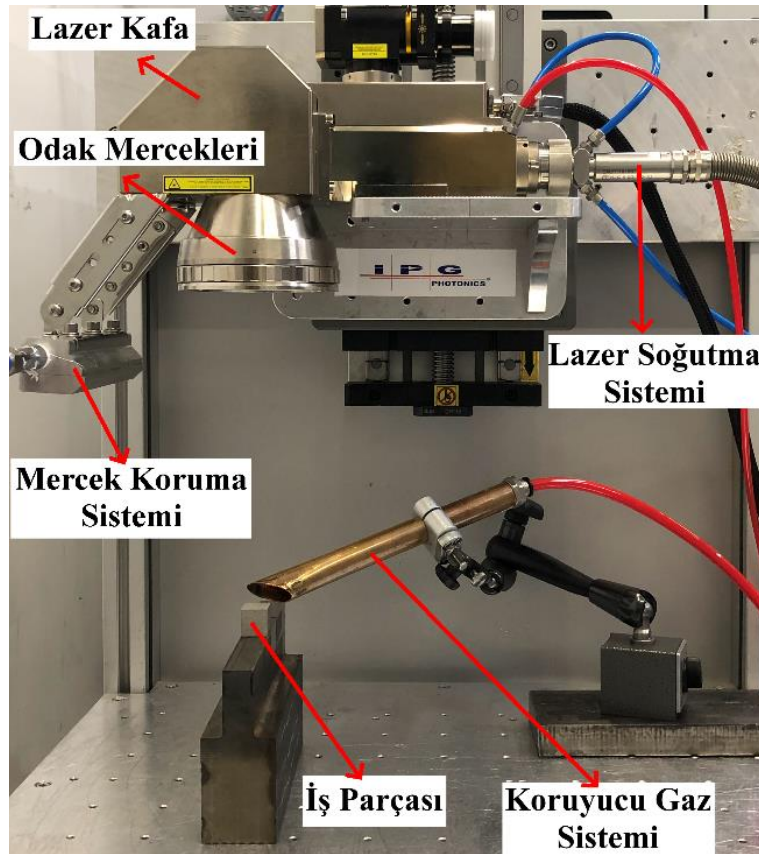
Element	Ni	Cr	Nb+Ta	Mo	Ti	Al	Co	Fe
Ağırlıkça %	50,0	17,0	4,75	2,8	0,65	0,20	0,5	Denge

Çizelge 3.3. Inconel 718 numunesinin SLE ile üretiminde kullanılan parametre seti

Lazer Parametreleri	Değer
Lazer odak çapı	85 μm
Lazer tarama hızı	700 mm/sn
Lazer gücü	190 W
Tarama çizgileri aralığı	70 μm
Toz katman kalınlığı	20 μm
Yeniden toz serilme süresi	11 sn

3.2. LP Deney Düzenegi

Resim 3.1’de gösterilen LP deney düzeneği, IPG Photonics firmasında hazırlanmıştır. Maksimum 1 kW güce sahip YLR-1000 multimode bir iterbiyum fiber lazer, odak mercekleri, gaz dağıtım sistemi, soğutma sistemi ve tümü bir kabin içinde bir çalışma alanına sahiptir.



Resim 3.1. Lazer parlatma işlemi için hazırlanan deney düzeneği

Deneyde lazer kafa tarafından oluşturulan lazer ışını, odak merceklerinde yer alan galvo aynalar ile iş parçası üzerine düşürülmekte ve hareket ettirilmektedir. Lazerin hareket komutları ve parametre veri girişleri aracı bir bilgisayar programı ile kontrol edilmektedir. Lazer parlatma işlemi sırasında, parçadan sıçrayabilecek olası bir talaşın odak merceklerine ulaşmasının engellenmesi amacıyla mercekleri koruyan bir sistem kullanılmaktadır. Lazer su soğutma sistemi ile soğutulurken, sistemde numune üzerine koruyucu gaz gönderimini sağlayan başka bir gaz taşınım sistemi de bulunmaktadır.

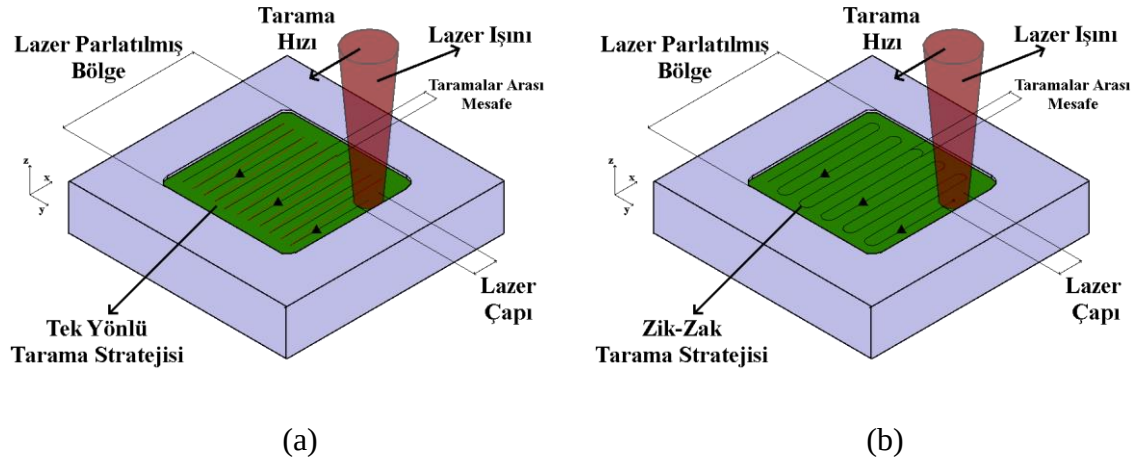
3.3. LP İşlemi Proses Parametreleri

Çizelge 3.4'te gösterildiği gibi, lazerin sabit ve değişken parametreleri mevcuttur. Lazerin dalga boyu 1070 nm, kollimatör ve fokal odak uzaklığı sırasıyla 50 ve 250 mm olarak ayarlanmıştır. Lazer çapı 250 μ m olan sistemin çalışma sahası boyutları 160 $\times$ 160 $\times$ 254 mm (x-y-z)'dir. Değişken lazer parametreleri ise lazer gücü, tarama hızı, taramalar arası mesafe, pals vurum süresi ve tarama stratejisi'dir. Taramalar arası mesafe, ardışık iki lazer tarama arasındaki mesafe olarak tanımlanabilir. Pals vurum süresi, lazer darbesinin uzunluğu olarak ifade edilebilir; diğer bir deyişle, lazerin fiilen enerji yaydığı zamandır. Lazer yörüngelerinin yüzey üzerindeki etkilerini incelemek için zik-zak ve tek yönlü lazer stratejileri seçilmiştir.

Çizelge 3.4. LP işlemlerinde kullanılan sabit ve değişken lazer parametreleri

Sabit Lazer Parametreleri	Değer	Değişken Lazer Parametreleri	Değer
Dalga boyu	1070 $\pm$ 10 nm	Lazer gücü	0 - 1000 W
Lazer pals frekansı	1000 Hz	Tarama hızı	0 - Opsiyonel mm/sn
Kollimatör odak uzaklığı	50 mm	Taramalar arası mesafe	0 - Opsiyonel mm
Fokal odak uzaklığı	250 mm	Pals vurum süresi	0 - Opsiyonel sn
Lazer çapı	250 μ m	Tarama stratejisi	Zik-Zak & Tek yönlü
Çalışma sahası boyutu	160mm $\times$ 160mm $\times$ 254mm (x-y-z)		

Şekil 3.1’de gösterildiği gibi zik-zak stratejisi, lazer ışınının yüzeyle teması kesmeden bir noktadan son noktaya kadar yılan tabanlı algoritma hareketini gerçekleştirmesidir. Öte yandan, tek yönlü stratejide lazer, başlangıç noktasından bitiş noktasına kadar bir çizgi izler. Bir çizgi üzerindeki hareketini bitirdikten hemen sonra lazer, bir önceki çizgiye paralel başka bir çizgiyi taramaya başlar [18].



Şekil 3.1. a) Tek yönlü ve b) Zik-Zak lazer tarama stratejileri [18]

3.4. Yüzey Morfolojisi Analizleri

Bu bölümde, LP işlemi uygulanmış numune yüzeylerinin morfolojik analizleri yapılırken geçen süreçler ve uygulama metotları anlatılmıştır.

3.4.1. Yüzey haritalandırılması ve pürüzlülük ölçümü

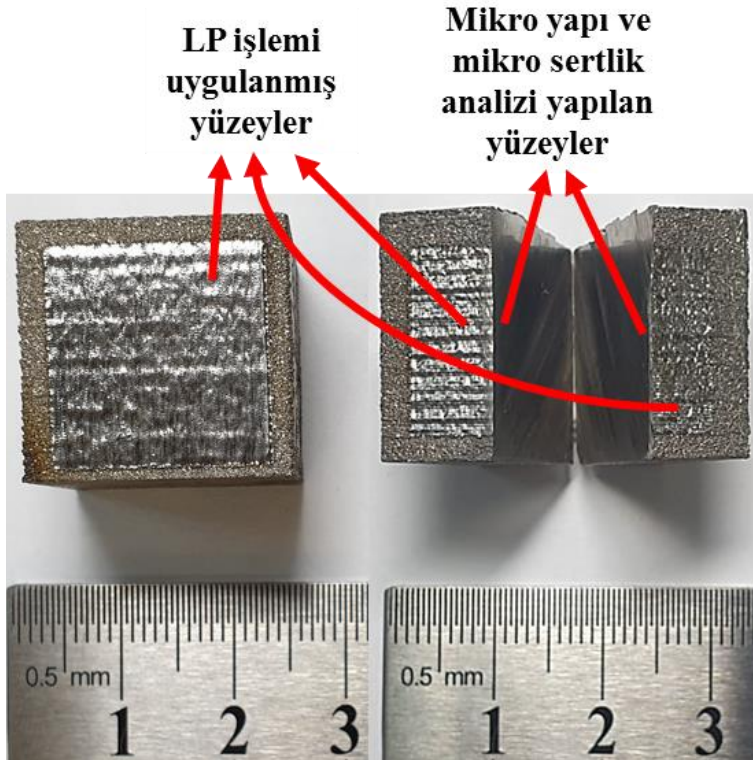
Üretilen numunelerin yüzeyine uygulanan her LP işlemi öncesinde ve sonrasında, yüzeyin morfolojik yapısını ortaya çıkarmak ve yüzey pürüzlülük değerlerini belirleyebilmek için bir üç boyutlu optik yüzey profilleyici beyaz ışık interferometresi olan Polytec TopMap Metro.Lab TMS 150 cihazı kullanılmıştır. Beyaz ışık interferometresinde, numune yüzeyine ışık gönderilerek yüzey taranır. Yüzeydeki küçük mesafe değişiklikleri ışığın farklı yansımalarına neden olur ve yüzey profili ortaya çıkarılabilir. Bu şekilde yüzey pürüzünün matematiksel olarak tanımlandığı pürüzlülük değerleri olan S_a , S_q , S_z , S_{sk} ve S_{ku} değerleri belirlenmiş ve yüzeyin topografyası ortaya çıkarılmıştır.

3.4.2. Mikroskobik analizler

Yüzeylerin mikroskobik olarak incelenmesinde LEICA DMI5000M marka optik mikroskop ve JEOL JSM-6060LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) kullanılmıştır. Yüzeye yapılan her LP işlemi için alınan mikroskop görüntüleriyle kıyaslama yapılmış ve parametrelerle yüzey morfolojisi arasında ilişkiler kurulması amaçlanmıştır.

3.5. Mikro Sertlik ve Mikro Yapı Analizi

Mikro sertlik ölçümleri bir HWMMT-X3B HIGHWOOD mikro sertlik cihazı ile yapılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri yapılırken, Resim 3.2’de gösterildiği gibi lazerle parlatılmış bölge üzerinden kesit alınmıştır böylece yüzeye ve yüzeyin hemen altında ısıdan etkilenen bölgelere mikro sertlik işlemleri uygulanmıştır. Mikro yapı analizleri de yine Resim 3.2’de verilen kesit yüzeyi üzerine yapılmıştır.



Resim 3.2. Mikro sertlik ve mikro yapı analizi yapılan numune yüzeyi kesiti

Mikro yapı analizi yapılmadan önce yüzey zımparalanmış ve parlatılmıştır. Daha sonra yüzeydeki mikro yapı dağılımının ortaya çıkarmak amacıyla dağlama işlemi uygulanmıştır. Hem Inconel 718 hem de Ti-6Al-4V alaşım numunesinin dağlanması, sürtme yöntemi ile gerçekleştirilmiş ve optik mikroskop altında, dağlama işleminin neden olduğu kontrast farkının gözlemlendiği zamana kadar süreç bekletilmiştir. Görüntü alındıktan hemen sonra yüzey alkolle temizlenmiştir. Inconel 718 alaşım numunesinin dağlanması işleminde kullanılan asit karışımı %50 HCl ve %50 HNO₃'tür. Ti-6Al-4V alaşım numunesinin dağlanması işleminde kullanılan asit karışımı ise %1 HF, %2 HNO₃ ve %97 distile sudur.

3.6. Parametre Optimizasyon Çalışmaları

LP işlemlerinde zik-zak tarama stratejisi sabit tutularak, diğer dört parametrenin (lazer gücü, tarama hızı, taramalar arası mesafe ve pals vurum süresi) yüzey pürüz değerlerine (Sa, Sq, Sz, Ssk ve Sku) etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. İstatistikte, yanıt yüzeyi yöntemi birkaç açıklayıcı değişken ile bir veya daha fazla yanıt değişkeni arasındaki ilişkileri araştırır. Başka bir deyişle, yanıt yüzeyi yöntemi gibi istatistiksel yaklaşımlar, operasyonel faktörlerin optimizasyonu ile bir üretimi en iyi sonuçta elde etmek için kullanılabilir [43]. Bu sebeple, Minitab programı kullanılarak yanıt yüzeyi yöntemi ile bir deney tasarımı oluşturulmuştur. Deney tasarımı dört devamlı faktör ve Box-Behnken tasarımı şeklinde oluşturulmuştur. Seçilen bütün faktörlerin sonuçlara etkisi aynı derecede önem arz edecek şekilde ayarlanmıştır. Böylece her bir faktörün etkisi direkt olarak analiz edilmiştir. Deney tasarımında her bir faktör için minimum ve maksimum değerler girilmiştir ve verilen değerler çerçevesinde ortaya bir deney planı çıkarılmıştır. Toplam yirmi-yedi deney seti oluşturulmuştur ve son üç deney parametre seti, deneylerin sürekliliğinin gözlemlenmesi amacıyla aynı seçilmiştir. Oluşturulan deney setleri doğrultusunda numune yüzeyine LP işlemleri uygulanmış ve her yüzeyin pürüzlülük değerleri olan Sa, Sq, Sz, Ssk ve Sku değerleri ölçülmüştür. Program aracılığıyla, Sa, Sq ve Sz değerlerinin minimum, Ssk değerinin sıfıra ve Sku değerinin de üçe yakın olacağı deney seti ortaya çıkarılmıştır. Sonuçlar bu doğrultuda optimize edilerek en uygun deney parametre seti belirlenmiştir.

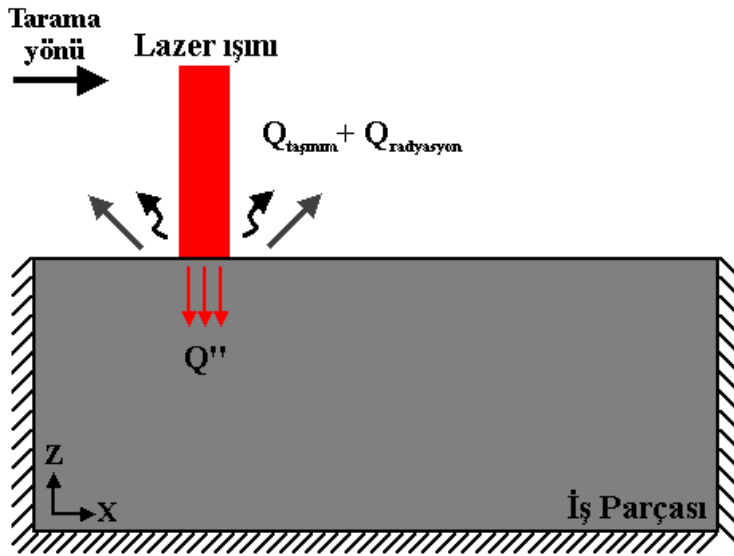
3.7. Isıl Modelleme ve Doğrulama

Bilgisayarların hesaplama yeteneğinin gelişmesiyle özellikle içerisinde ısı etkilerinin olduğu LP gibi işlemlerin ısı davranışının analizi için üç boyutlu modellerden faydalanılması

yaygın hale gelmiştir. Sonlu elemanlar (SE) analizleri gerçek deneylerin tamamlayıcısı olarak sıkça kullanılmaktadır. Böylece, deneyler sırasında ısıl mekanik bilgi alınabilirken aynı zamanda deneylerden alınması oldukça zor veya imkânsız olan data'lara da ulaşmak mümkün hale gelmektedir.

3.7.1. Model tasarımı ve sınır koşulları

Bu bölümde, LP işleminin üç boyutlu ısıl SE modeli geliştirilmiş ve deneylerle doğrulanmıştır. Modelleme için kullanılan numune, EIE yöntemi ile oluşturulan $3 \times 10 \times 1$ mm boyutlarında Ti-6Al-4V alaşım numunesidir. SE çözümleri için 12 çekirdek işlemcili ve 48 GB geçici hafızası olan bir iş istasyonu bilgisayar kullanılmıştır. Şekil 3.2'de, LP işleminde uygulanacak ısı transfer modeli için oluşturulacak sınır koşullarının şematik çizimi verilmiştir.

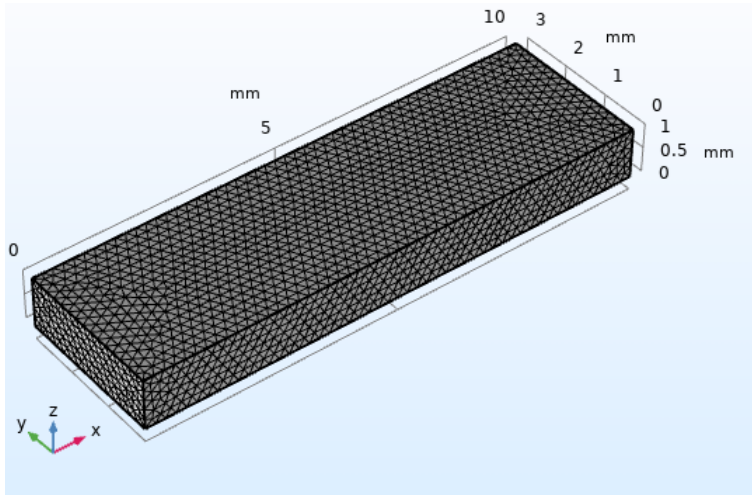


Şekil 3.2. Uygulanan ısı transferi modeli için sınır koşullarının şematik çizimi

Buna göre, lazer ışınının, üst yüzeyi tarayan odaklanmış bir yüzey ısı kaynağı olduğu varsayılmaktadır. Yan ve alt yüzeylerin sıcaklığı oda sıcaklığında ve sabit olarak kabul edilmiş ve üst yüzey taşınım ve radyasyon yoluyla çevre ile ısı alışverişinde bulunmaktadır. Süreç simülasyonları COMSOL Multiphysics 5.4 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.3'te model üzerine uygulanmış sonlu elemanlar ağı gösterilmiştir. SE ağındaki eleman sayısı ve boyutları çözüm süresi ile doğrudan bağıntılıdır. Eleman boyutu ne kadar

küçükse, sonuçlar o kadar hassas çıkarken, boyutlar büyüdükçe sonuçlar hassas olmaktan uzaklaşırlar. Bununla birlikte, küçük boyutlu elemanlar için gereken çözüm süresi uzunken, veri depolama boyutu da fazladır. Bu sebeple, eleman ağı boyutu oluşturulurken dengeli bir strateji geliştirilmesi gerekmektedir. Böylece hem istenilen hassaslıkta sonuçlar alınırken, aynı zamanda modelde daha az eleman kullanılabilmelidir. Oluşturulan 30 mm³ model için oluşturulmuş eleman sayısı 60975'tir.



Şekil 3.3. Model üzerine uygulanmış sonlu elemanlar ağı

3.7.2. Isı kaynağı modeli

Genel ısı transferi denklemi Eş. 3.1'deki gibi ifade edilir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

Burada k , sıcaklığa bağlı termal iletkenlik, C_p sabit basınçtaki özgül ısı kapasitesi ve ρ ise malzemenin yoğunluğudur. Üst yüzeyde gerçekleşen taşınım ve radyasyon ısı transferi sırasıyla Eş. 3.2 ve Eş. 3.3 ile açıklanabilir.

$$Q_{\text{taşınım}} = h(T_{\text{ortam}} - T) \quad (3.2)$$

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma (T_{\text{ortam}}^4 - T^4) \quad (3.3)$$

Burada h taşınım ısı transfer katsayısı, ε yüzey emisyonu ve σ ise Stefan-Boltzman sabitidir. Q_{lazer} ise Gauss fonksiyonu şeklinde yüzeye uygulanan ısı akısı olarak ifade edilir ve Eş. 3.4'teki gibi ifade edilir.

$$Q_{lazer} = \frac{2\alpha P}{\pi R^2} e^{-\frac{2(x^2+y^2)}{R^2}} \quad (3.4)$$

Burada R ısı kaynağının yarıçap mesafesi, α lazer absorpsiyon katsayısı ve P ise lazer gücüdür. LP işleminde gerçekleşen ergime sırasında, sıvı akışının da ısı davranış fiziki üzerinde ve dolayısıyla işlem sırasında ulaşılan maksimum sıcaklıklar üzerinde büyük etkisi vardır. Fakat hesaplama süresini düşük tutmak için sıvı akışı doğrudan olarak dikkate alınmamıştır. Bunun yerine, sıvı termal iletkenlik değeri, elde edilen ergime ve ısıdan etkilenen bölgenin derinlikleri deneylerin gerçekliğini yansıtacak şekilde uyarlanmıştır.

3.7.3. Isıl davranışın doğrulanması

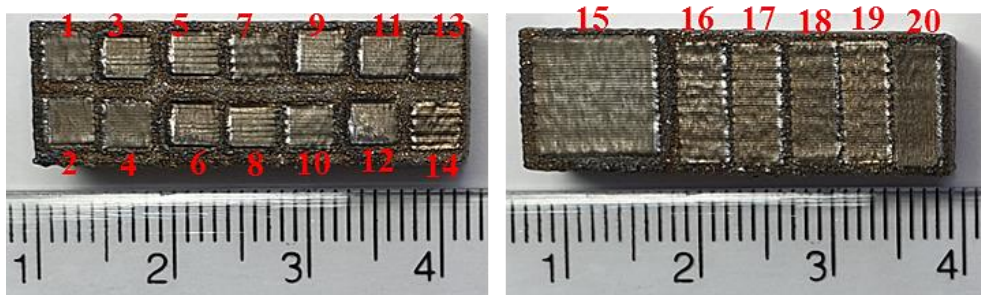
Isıl davranış modellenmesinde, ergime derinliklerinin ve ısıdan etkilenen bölgelerin hızlı bir şekilde değerlendirilmesi için bir termal model benimsenmiş ve modellerin doğrulanması ve LP işlemini etkisinin analizi için Ti-6Al-4V numuneleri ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. Modellemede lazerin yüzey üzerinde hareketi ve hareketi sırasında zamana bağlı bir ısı davranış modellenmiştir. Modellemede kullanılan, ısı kaynağı için girilen lazer parametreleri, malzemenin termal özellikleri ve sınır koşulları ile simule edilen proses, aynı değerlerle deneysel olarak uygulanmıştır. Isı modelinin doğrulanması için lazerin hareketi sonrası oluşan yeniden ergimiş ve ısıdan etkilenmiş alan derinliği analiz edilmiştir ve deneysel çalışmalarda elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır.

4. LP İŞLEMLERİ, YÜZEY MORFOLOJİSİ, YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜ VE SAYISAL MODELLEME ANALİZLERİ

Tez çalışmasının bu bölümünde, EIE ile üretilen Ti-6Al-4V alaşım numunelerine ve SLE ile üretilen Inconel 718 numune yüzeylerine uygulanan LP işlemleri analiz edilmiştir. İlk olarak, yapılan işlemler sonucunda ortaya çıkan parlatılmış yüzeyler analiz edilmiştir. Bu kapsamda, yüzey kusurları incelenmiş, lazer parametrelerinin etkisini incelemek sebebiyle deney tasarımı oluşturulmuş ve parametrelerin etkileri tartışılmıştır. Daha sonra, lazerle parlatılmış yüzeylerin yüzey bütünlüğü analiz edilmiştir. Bu kapsamda, yüzey morfolojisi analiz edilmiş, yüzey pürüzlülük değerleri saptanmış ve mikro yapı ve mikro sertlik analizleri yapılmıştır. Son olarak, proses sayısal olarak modellenmiştir yapılan sonlu elemanlar analizi ile LP işleminin doğrulama işlemi yapılmıştır.

4.1. LP İşlemleri ile Oluşan Yüzey Kusurları

Bu bölümde, farklı parametre setleri ile LP işlemi yapılan EIE yöntemi ile üretilmiş Ti-6Al-4V numunesi yüzeyi incelenmiş ve LP işleminden sonra yüzeyde gözlemlenen yüzey kusurları analiz edilmiştir. Lazer parlatma işlemlerinin etkilerini izlemek ve parametrelerin etkilerini doğrudan gözlemlemek amacıyla, lazer parametreleri rastgele seçilmiştir. Ayrıca, bu çalışma özelinde, proses sırasında koruyucu gaz kullanılmamıştır.



Resim 4.1. Yirmi farklı deney seti ile yapılan LP işlemleri

Resim 4.1’de gösterilen EIE ile üretilmiş Ti-6Al-4V alaşım numunesi yüzeylerine, Çizelge 4.1’de verilen deney setleri ile yirmi farklı LP işlemi yapılmıştır. Çalışmada amaçlanan temel konu pürüzlülük azalması ve olası yüzey kusurlarının görselleştirilmesi ve analiz edilmesi olduğu için proses parametre setleri rastgele seçilmiştir. Buna göre, lazer gücü, tarama hızı, taramalar arası mesafe ve pals vuruş süresi, sırasıyla 300 ile 800 W, 100 ile

400 mm/sn, 0,02 ile 0,04 mm ve 0,0002 ile 0,0007 sn aralığında seçilecek değişkenler olarak ayarlanmıştır.

Yapılan çalışmaların pürüzlülük neticeleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Buna göre, LP işlemi yapılmayan bölgenin, başka bir deyişle üretim sonrası yüzey pürüzlülük değerleri Sa, Sq ve Sz değerleri sırasıyla 44,14; 54,17 ve 320,89 μm olarak ölçülmüştür. LP işlemlerinin, deney parametrelerine bağlı olarak, Sa ve Sq değerlerini sırasıyla %75,1 ile %91,6 oranında ve Sz değerlerini %73,0 ile %90,6 oranında azaltabildiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.1. LP işlemleri için çalışılan deney parametre setleri

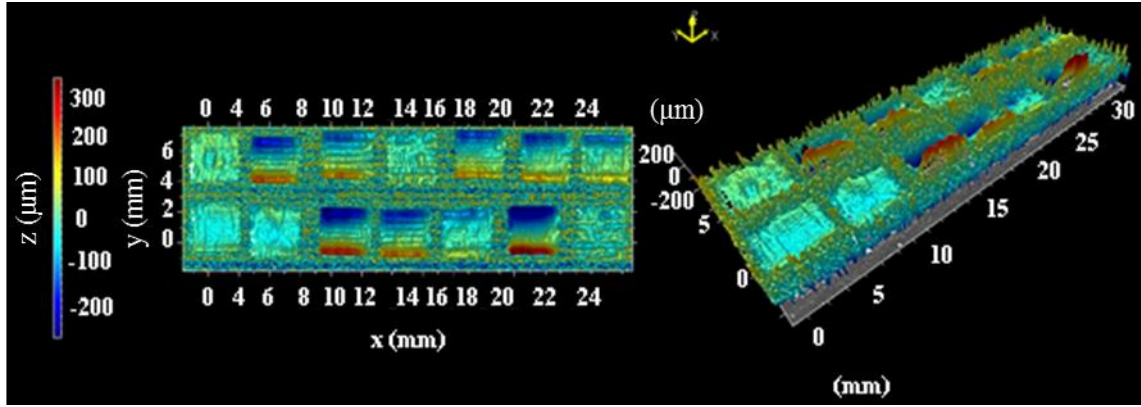
Deney No.	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/sn)	Taramalar Arası Mesafe (mm)	Pals Vurum Süresi (sn)	Tarama Stratejisi	LP Alanı (mm ²)
1	400	245	0,03	0,0007	Zik-Zak	3x3
2	500	220	0,03	0,0007	Zik-Zak	3x3
3	500	360	0,02	0,0007	Tek yönlü	3x3
4	500	220	0,03	0,0006	Zik-Zak	3x3
5	500	450	0,02	0,0007	Tek yönlü	3x3
6	500	320	0,02	0,0007	Tek yönlü	3x3
7	300	180	0,03	0,0007	Tek yönlü	3x3
8	500	400	0,02	0,0007	Tek yönlü	3x3
9	500	300	0,03	0,0007	Tek yönlü	3x3
10	400	245	0,03	0,0007	Tek yönlü	3x3
11	500	220	0,03	0,0006	Tek yönlü	3x3
12	500	220	0,03	0,0007	Tek yönlü	3x3
13	500	200	0,03	0,0005	Tek yönlü	3x3
14	500	200	0,03	0,0003	Tek yönlü	3x3
15	500	220	0,03	0,0007	Zik-Zak	8x8
16	500	200	0,03	0,0005	Zik-Zak	8x3
17	600	200	0,03	0,0004	Zik-Zak	8x3
18	700	200	0,03	0,0004	Zik-Zak	8x3
19	800	200	0,03	0,0003	Zik-Zak	8x3
20	800	100	0,03	0,0002	Zik-Zak	8x3

Resim 4.2’de, yapılan yirmi farklı LP işlemlerinin yüzey morfolojisi verilmiştir. Beyaz ışık interferometresi ile oluşturulan yüzey morfolojisinde Z eksenindeki ölçek $-300\ \mu\text{m}$ ile $+300\ \mu\text{m}$ arasındadır ve renk skalasında mavi, yeşil ve kırmızı sırasıyla $-300\ \mu\text{m}$, $0\ \mu\text{m}$ ve $300\ \mu\text{m}$ ’yi ifade etmektedir.

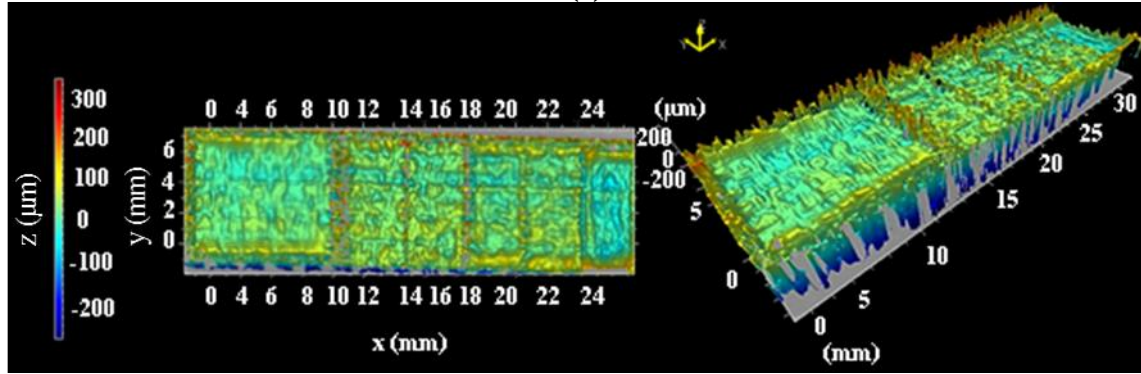
Morfolojik analizlerde görüldüğü üzere LP işleminden sonra bazı yüzeyler paralelliğini yitirmiş ve LP işlemi sınırlarda malzeme birikmesine neden olmuştur. Örneğin altıncı deneyde yüzey pürüzlülük değerleri Sa ve Sq %85,4 oranında ve Sz değeri %83,0 oranında düşürüldüğü, on ikinci deneyde yüzey pürüzlülük değerleri Sa ve Sq değerleri %86,4 oranında ve Sz değeri %77,3 oranında düşürüldüğü belirlenmiştir. Her ne kadar LP işlemi yüzey pürüz değerlerini bu denli dramatik bir şekilde azaltabiliyor olsa da, yapılan bu çalışmadaki sınırlarda malzeme birikmesi, LP işleminde bir kusur olarak nitelendirilir. Buna ek olarak, LP prosesi temel olarak yüzeyin ergitilmesi ve yeniden katılaşması ile ilgili olduğundan, parlatılan bölgelerde oksidasyon ve mikro çatlaklar gibi yüzey kusurları gözlemlenebilir. Resim 4.3’te LP işlemi uygulanmış bir yüzeyin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. LP işlemi uygulanan yüzeylerde oluşan mikro çatlaklar ve oksidasyon kusurları açıkça gözlemlenmiştir. Bu tür kusurlar, yüzeyin kalitesini düşürmenin yanı sıra parçanın kullanım ömrünü de etkiler.

Çizelge 4.2. LP işlemi yapılan yüzeylerin pürüzlülük değerleri

Bölge No	Sa (μm)	Sq (μm)	Sz (μm)	Bölge No	Sa (μm)	Sq (μm)	Sz (μm)
1	8,53	11,09	62,46	13	7,19	9,01	71,59
2	3,69	4,55	30,08	14	10,97	13,78	76,01
3	7,29	9,08	58,48	15	5,52	6,89	39,87
4	4,43	5,55	39,17	16	7,61	9,60	59,64
5	6,46	8,07	49,90	17	7,82	9,90	63,94
6	6,44	8,12	54,46	18	7,31	9,35	58,29
7	8,20	10,43	65,03	19	8,41	10,38	86,34
8	7,02	8,64	50,57	20	8,20	10,12	70,58
9	5,32	7,33	69,39	Standart Sapma İşlem yapılmamış bölge	1,64	2,03	13,7
10	5,48	7,25	49,44				
11	6,39	8,16	56,67				
12	5,99	7,68	72,82				
					44,14	54,27	320,89

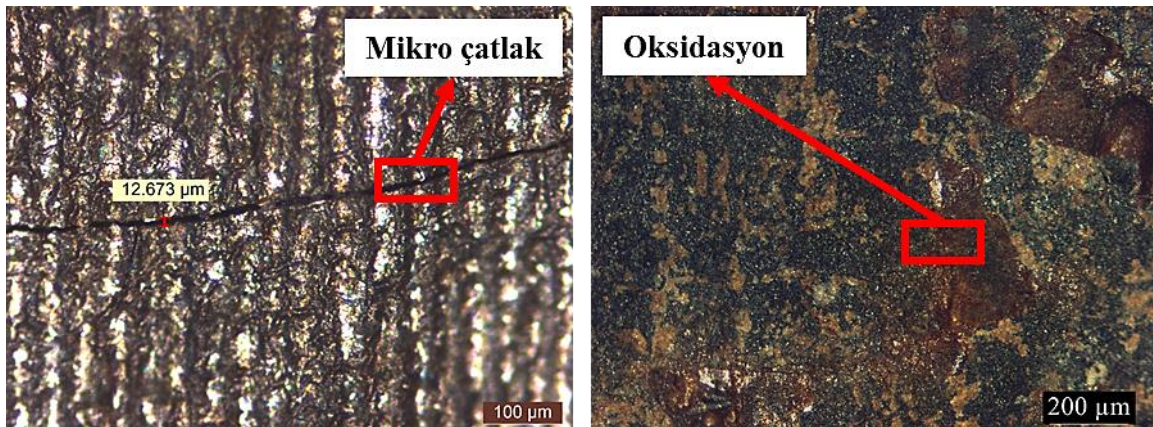


(a)



(b)

Resim 4.2. LP işlemi yapılan yüzeylerin beyaz ışık interferometresi ile incelenmesi, (a) 1'den 14'e kadar olan deneylerin iki ve üç boyutlu görünümü (b) 15'ten 20'ye kadar olan deneylerin iki ve üç boyutlu görünümü (Ölçek: [-300;300μm])

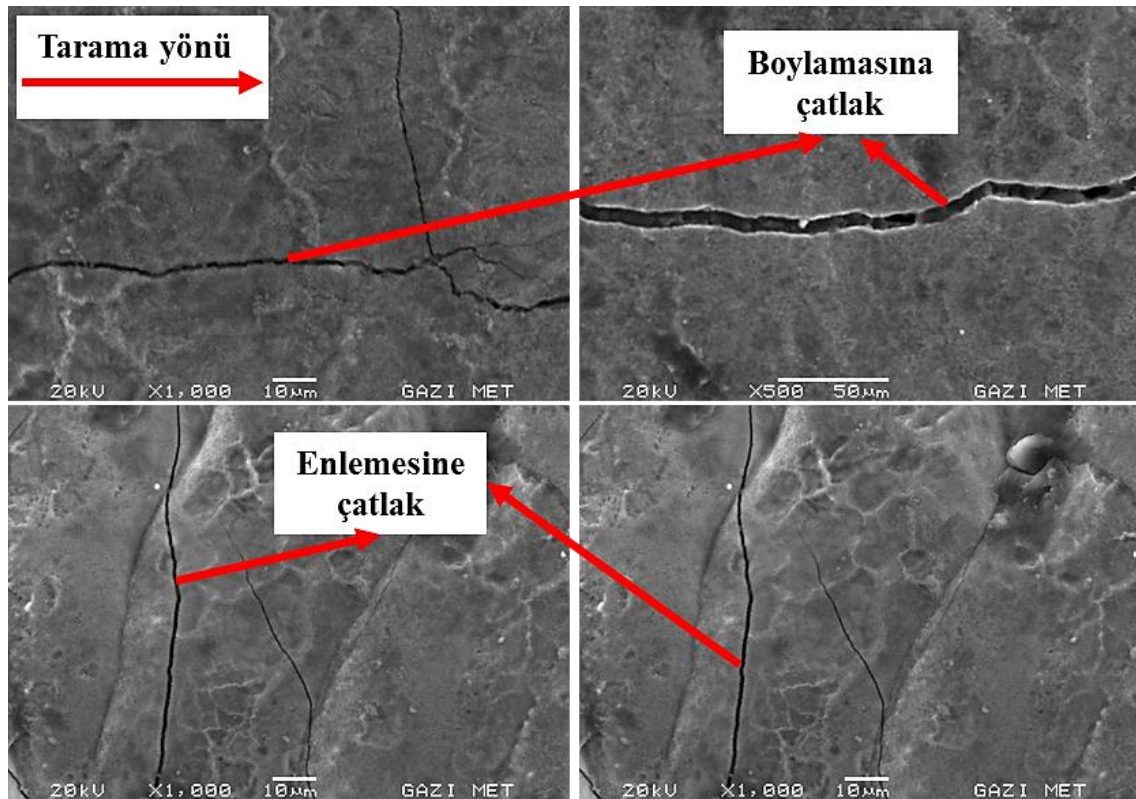


Resim 4.3. LP işlemi uygulanmış yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri

Yüzey Çatlakları

Mikro çatlaklar, ince yüzey tabakasının hızlı ergimesi ve katılaşması nedeniyle LP işlemi sırasında karşılaşılan çok genel yüzey kusurudur. Bu tür çatlaklar, katılaşma çatlakları veya sıcak çatlak olarak tanımlanabilir. Katılaşma çatlaklarının oluşmasına, ergiyik havuzu izleyen

pelteğimsi yapının tane sınırlarında bulunan sıvı film bölgenin kırılması neden olur. Lazer parlatmada, lazer kaynağına benzer şekilde, sıcaklık gradyanları metalurjik ve mekanik faktörler tarafından yönlendirilir. Bu nedenle, lazer parlatmada katılaşma çatlaklarının başlaması, sıcaklık gradyanları tarafından yönlendirilen metalurjik ve mekanik faktörler arasındaki karmaşık etkileşimin sonucudur. Katılaşma mikro yapısı, termal ve metalurjik etkileşimler tarafından kontrol edilirken, yerel ve küresel gerilmeler ve gerinimler, termal ve mekanik etkileşimlerden etkilenir [44]. Katılaşma çatlakları, ısıdan etkilenen bölgede büzülme nedeniyle oluşan mikro yarıklar ile oluşur ve hızlı soğutma sonrasında parlatılmış bölgede mikro çatlaklar olarak yayılır. Sıvılaşma, çatlakların füzyon bölgesine yayılmasına neden olan yeterli termal stres altında ısıdan etkilenen bölge boyunca çatlak oluşumunu başlatabilir [45]. Katılaşma çatlakları, ısıdan etkilenmiş alandaki termal gradyanlar tarafından başlatılır ve LP işlemi sırasında oluşan gerilmeleri etkileyen ana faktörler, birim uzunluk başına ısı ve eriyik havuzu geometrisidir [46–48]. Lazerle parlatılmış yüzeyler üzerinde SEM ile yapılan yüzey incelemeleri, mikro çatlakların sayısının ve uzunluğunun ısı girdisinin miktarı ile ilişkili olduğunu göstermiştir.

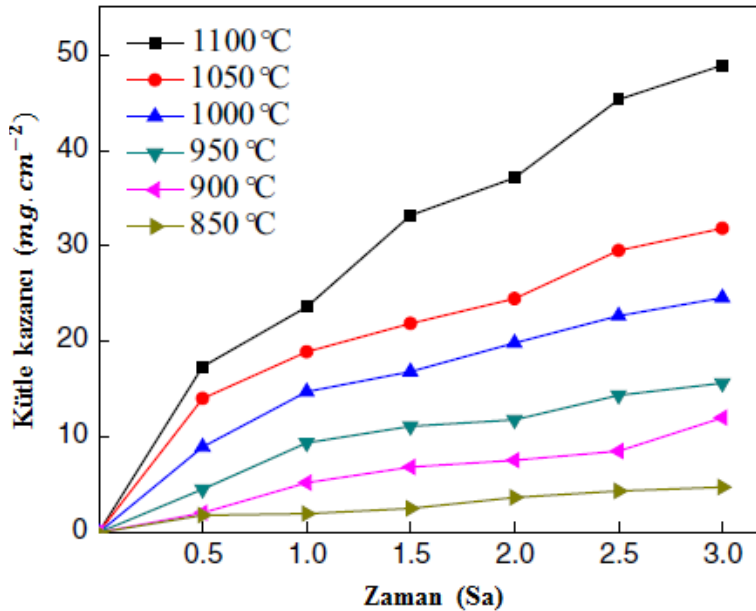


Resim 4.4. Tarama yönüne göre oluşan iki farklı mikro yüzey çatlaklarının SEM görüntüleri [18]

Resim 4.4'te tarama yönüne göre iki farklı mikro çatlak oluşumu gösterilmiştir. Tarama yönü ile aynı doğrultuda oluşan mikro çatlaklar boylamasına, tarama yönüne dik bir şekilde konumlanan mikro çatlaklar ise enine mikro çatlaklar olarak adlandırılmıştır. Boylamasına veya enlemesine mikro çatlak oluşumları, LP sonrası kontrolsüz katılaşma nedeniyle oluşan kalıntı gerilmelerden kaynaklanmış olabilir. Sonuç olarak, ısı girdisi miktarı çatlak oluşumunu doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, istenen yüzey iyileştirmesini elde etmek için ısı girdisi ve işlem parametreleri uygun olarak seçilmelidir.

Oksidasyon

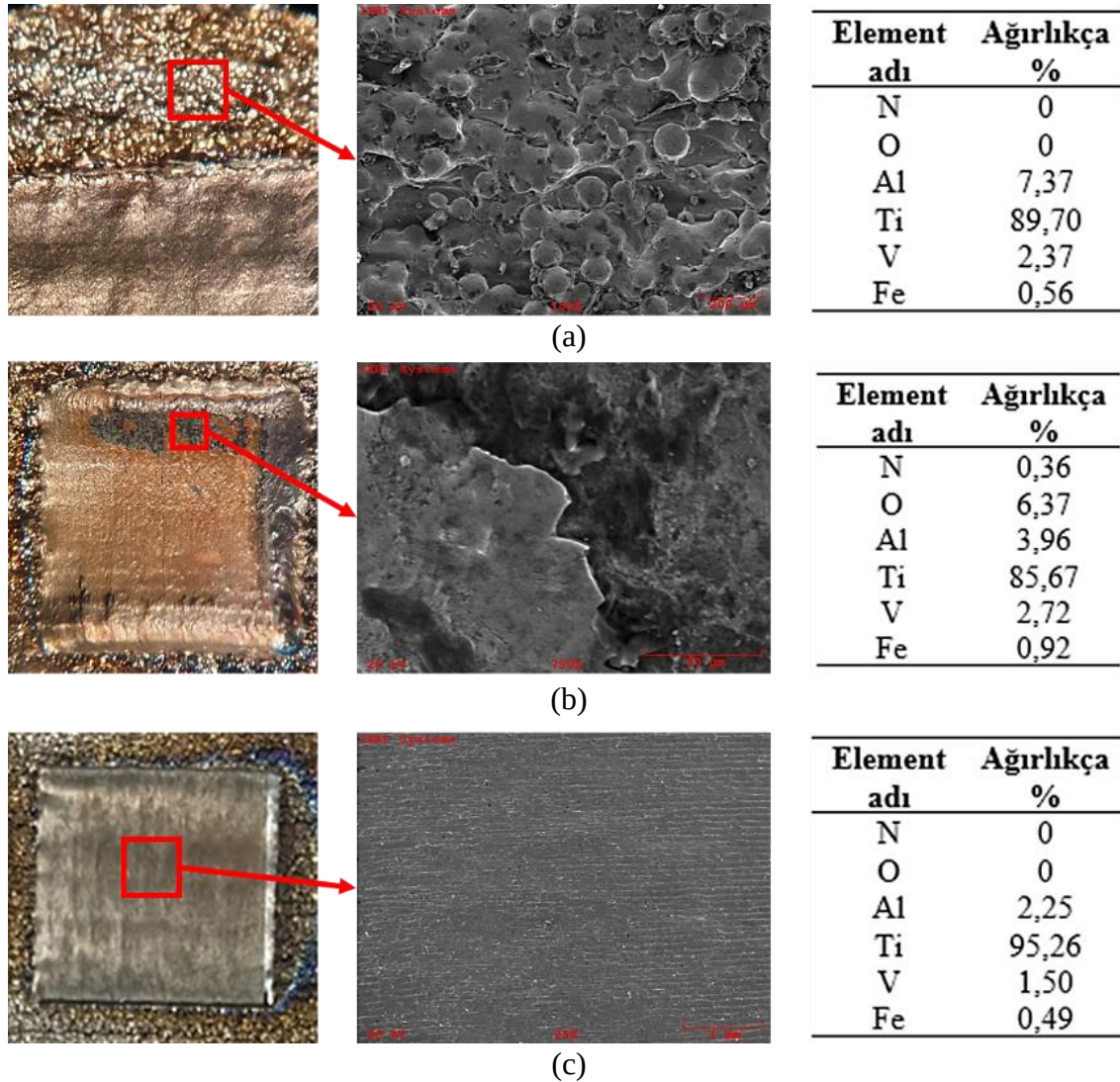
Ti alaşımları oksidasyon problemlerinden dolayı 600 °C ve daha yüksek sıcaklıklarda kullanılamamaktadır. Dong ve arkadaşları, Ti-6Al-4V alaşımının havadaki oksidasyon davranışını 850 ile 1100 °C arasındaki sıcaklıklarda incelemişlerdir. Şekil 4.1'deki grafik Ti-6Al-4V alaşımının yüksek sıcaklıklardaki bekleme sürelerine bağlı olarak ağırlık artışını göstermektedir. Buna göre, alaşımın ağırlığı oksidasyon miktarına bağlı olarak artmaktadır ve oksidasyon miktarı ise yüksek sıcaklığa maruz kalma süresi ile ilişkilidir [49].



Şekil 4.1. Ti-6Al-4V alaşımının 850 - 1100 °C aralığındaki oksidasyon kinetiği eğrileri [49]

LP işleminin prensibi daha farklı bir işleyiş içerisindedir. Parlatma işleminde lazer, çok küçük bir noktanın sıcaklığını Ti-6Al-4V'nin erime noktası olan 1650 °C'nin üzerine çıkarır. Lazer hızla başka bir noktaya hareket eder ve önceki nokta hızla katılaşır. Ergitme

mekanizması çok küçük bir noktada ve çok kısa sürede meydana geldiğinden, tüm geometriyi kapsaması gereken bir inert gaz atmosferinin kullanılması pahalı ekipman ve karmaşık bir gaz kontrolü gerektirecektir. Bu nedenle bu çalışma zaman-oksidasyon ilişkisini araştırmak için koruyucu gaz atmosferi altında yapılmamıştır. Resim 4.5'te işlem yapılmamış yüzeyin, atmosfer altında ve koruyucu gaz (%99,999 Argon) altında LP işlemi yapılan yüzeyler ve bu yüzeylere ait enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizi ile oluşturulan elementler tabloları verilmiştir.



Resim 4.5. SEM ve EDS analizi yapılmış a) İşlem yapılmamış, b) Atmosfer altında LP ve c) koruyucu gaz altında LP işlemi yapılmış yüzeyler ve element tabloları [18]

SEM ve EDS analizi sonuçlarına göre, işlem yapılmamış yüzeyde ve koruyucu gaz altında yapılan LP işlemlerinde oksijene rastlanmamışken, işlem atmosfer altında yapıldığında yüzeyin belli bölgelerinde oksijen atomuna, dolayısıyla yüzeyde oksidasyon yapısının

oluşumuna rastlanmıştır. Yüzeyde oksijen bulunması, yüzeyin işlenmesi sırasında çok küçük bir noktada bile yüksek sıcaklık reaksiyonları ve katılaşma süresine kadar çok kısa ergime nedeniyle yüzeyde oksidasyonun kaçınılmaz olduğunu göstermiştir.

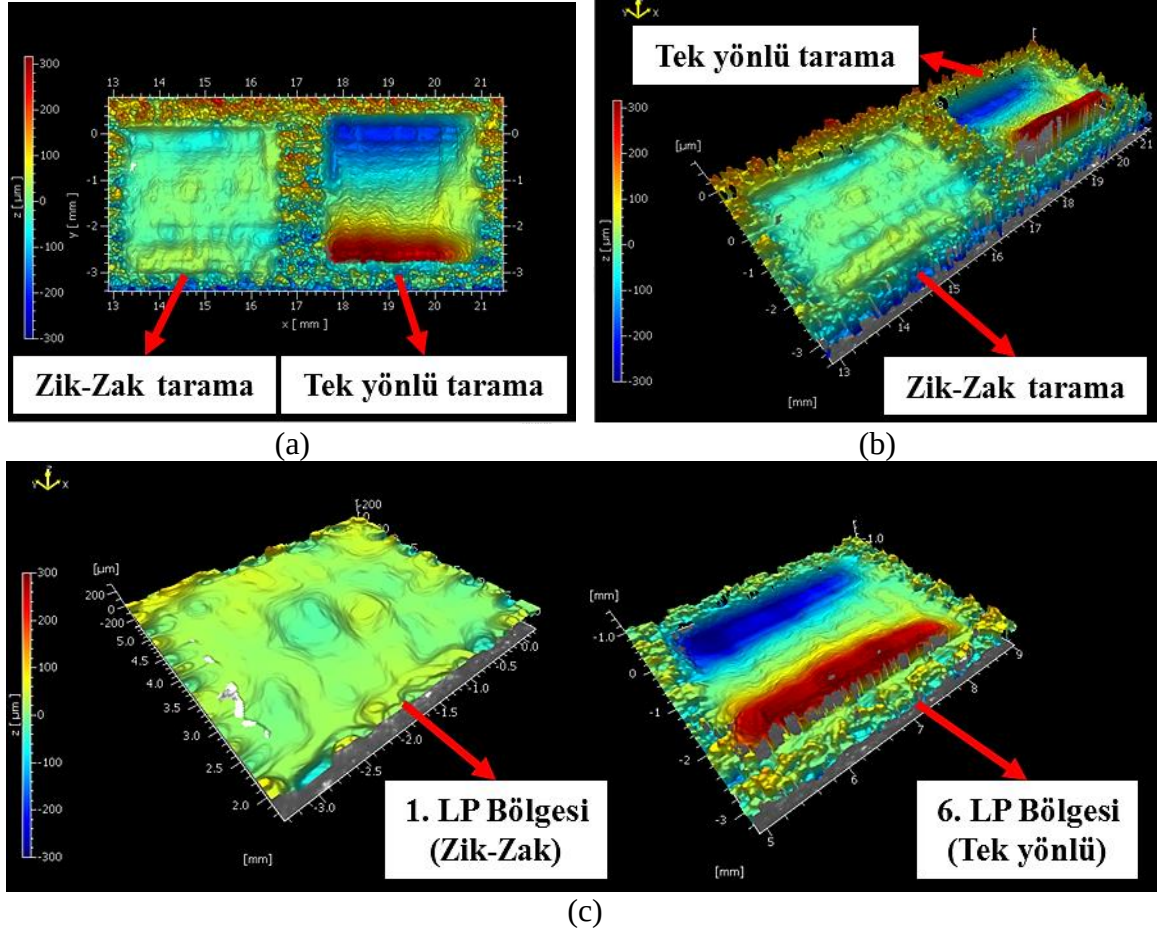
Bu çalışma ayrıca, oksitlenmiş tabakanın lazer parametrelerine dolayısıyla ısı girdisi miktarına göre farklılıklar gösterdiğini göstermiştir. Fakat yine de yüzeyde oluşacak oksidasyon sorununu ortadan tamamen kaldırmak ve güvenli bölgede çalışmak için LP işlemi koruyucu bir ortamda gerçekleştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Bundan sonraki deneysel çalışmaların tamamı argon gazı altında gerçekleştirilmiştir.

Sınırdaki Malzeme Birikmesi

Yapılan çalışmalar neticesinde gözlemlenen bir başka yüzey kusuru ise, LP işlemi sırasında ergiyen malzemenin, lazerin etkisiyle kenarlarda birikmesidir. Sınırlarda malzeme birikmesi, lazer etkileri nedeniyle yüzey paralelliğinin kaybolması olarak tanımlanabilir. LP işleminden önce yüzey paralel ve katı bir formdadır. Lazerin etkisiyle ergiyen metal hareket etmeye başlar ve tarama stratejisi ve lazer parametrelerinin etkisiyle işlem sınırlarında kenarlara doğru bir birikim görülebilir. Tarama stratejisinin ve LP'deki ısı girdisinin yüzey paralelliğini güçlü bir şekilde etkilediği gözlemlenmiştir.

Tek yönlü tarama strateji kullanılarak gerçekleştirilen LP işleminde iki uç nokta arasında bariz bir yükseklik farkı göze çarpmaktadır. Çünkü tek yönlü tarama mekanizması, süpürme işlemine benzemektedir. Başka bir deyişle, tek yönlü tarama stratejisinde lazer, ergimiş malzemeyi başlangıç noktasından son noktaya doğru fiziksel olarak süpürür.

Zik-zak tarama stratejisinde, ergimiş malzemeye tüm yüzey boyunca eşit olarak yayılma fırsatı verildiği için daha düz bir yüzey ortaya çıkmaktadır. Resim 4.6'da, birinci ve altıncı LP bölgesinin morfolojik analizi verilmiştir. Altıncı deney bölgesinde, tek yönlü tarama stratejisi sonucu kenarlarda malzeme biriken bir yapı oluşurken, birinci deney bölgesinde zik-zak tarama stratejisi sonucu daha düzlemsel bir yapı ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni, tek yönlü tarama stratejisinde, yeniden ergitilmiş malzemelerin lazerin başlangıç noktasından son noktaya hareketi olarak analiz edilebilir. Yapılan çalışmalar neticesinde zik-zak tarama stratejisi, diğer tüm LP çalışmalarında kullanılmak üzere seçilmiş ve sınırlarda malzeme birikimi sorunu ortadan kaldırılmıştır.



Resim 4.6. Zik-zak ve tek yönlü tarama stratejileri ile yapılan LP bölgelerinin a) iki boyutlu, b) üç boyutlu ve c) 1 ve 6 numaralı deneylerin iki ve üç boyutlu yüzey morfolojisi (Ölçek: $[-300;300\mu\text{m}]$)

Sonuç olarak, yukarıda belirtilen yüzey kusurlarının ortaya çıkmasında birçok farklı faktör etkili olmuştur. Yüzeyde oluşan mikro çatlaklar, yüzeye giren ısı girdi ve dolayısıyla lazer parametreleri ile doğrudan ilişkilidir. Yüzeyde oksidasyon oluşumu, ortamda koruyucu gaz olup olmasına bağlıyken, sınırlarda malzeme birikimi ise lazerin tarama stratejisi ile ilişkilendirilmiştir. Dolayısıyla bu kusurların giderilmesi adına, bundan sonraki tüm çalışmalar koruyucu gaz altında ve zik-zak tarama stratejisi ile yapılmıştır. Mikro çatlakların azaltılması için ve belirlenen yüzey morfolojisi sonuçlarına ulaşmak amacıyla, uygun lazer parametrelerinin tespiti için deney tasarımları ve ilgili LP deneyleri yapılmıştır.

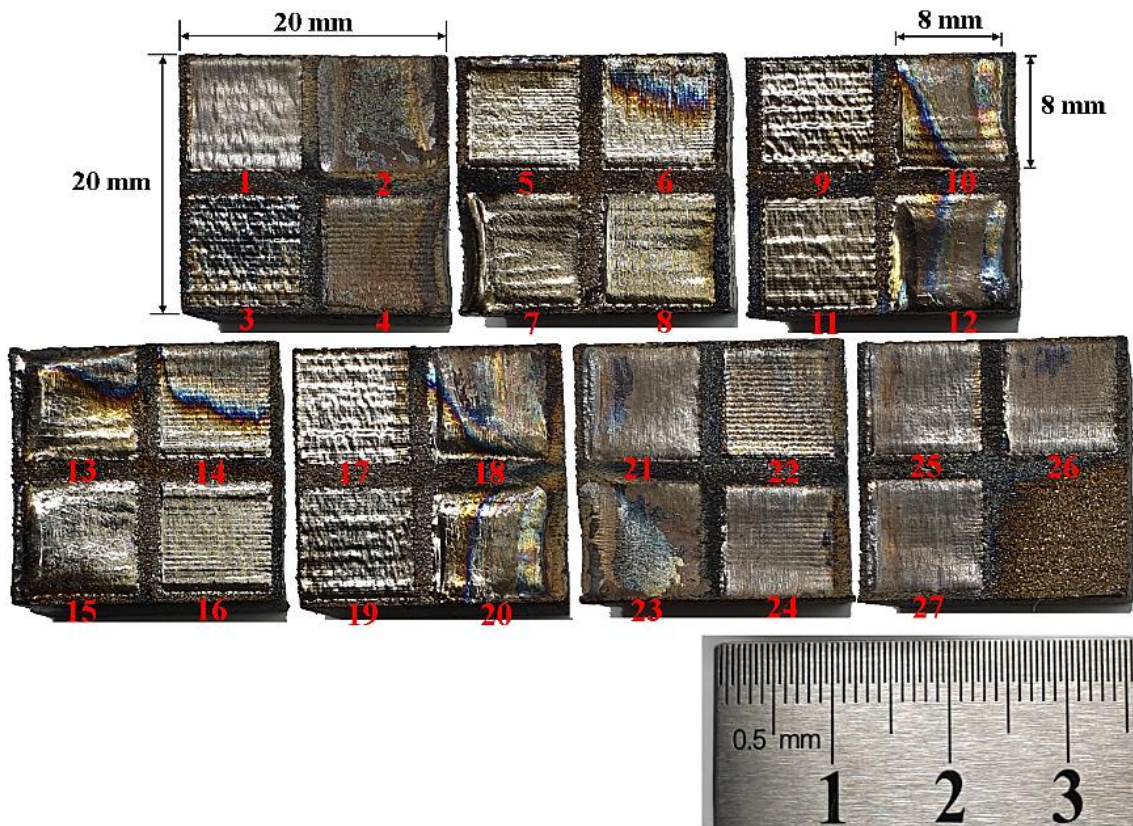
4.2. LP İşlemleri ve Deney Tasarımları

Bu bölümde, LP işlemi sırasında lazer parametrelerinin yüzey morfolojisine etkisini incelemek üzere yanıt yüzeyi yöntemi ile oluşturulan deney tasarımı ve ilgili deneyler

açıklanmıştır. EIE ile üretilen Ti-6Al-4V numuneleri için ve SLE ile üretilen Inconel 718 numunesi için deneysel çalışmalar yapılmış ve sonuçlar analiz edilmiştir.

4.2.1. EIE ile üretilen Ti-6Al-4V alaşım numunesi

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere, iki adet $20 \times 20 \times 20$ mm boyutlarında EIE ile üretilmiş Ti-6Al-4V alaşım numunesi hazırlanmıştır. Daha önce yapılan deneysel çalışmalar ışığında elde edilen ampirik yaklaşımlarla, lazer parametreleri değerlerinin minimum ve maksimum değer aralıkları tespit edilmiştir. Buna göre minimum ve maksimum parametre değerleri sırasıyla lazer gücü için 350 – 600 W, tarama hızı için 150 – 400 mm/sn, taramalar arası mesafe için 0,02 – 0,04 mm ve pals vurum süresi için 0,0006 – 0,0008 sn olarak ayarlanmıştır. Çizelge 4.3'te yanıt yüzeyi yöntemi ile minimum ve maksimum parametreleri belirlenen lazer parametreleri ile oluşturulmuş deney setleri verilmiştir. Her bir deney setlerine bağlı kalınarak, 8×8 mm'lik alanlara yapılan LP işlemleri Resim 4.7'de gösterilmiştir.



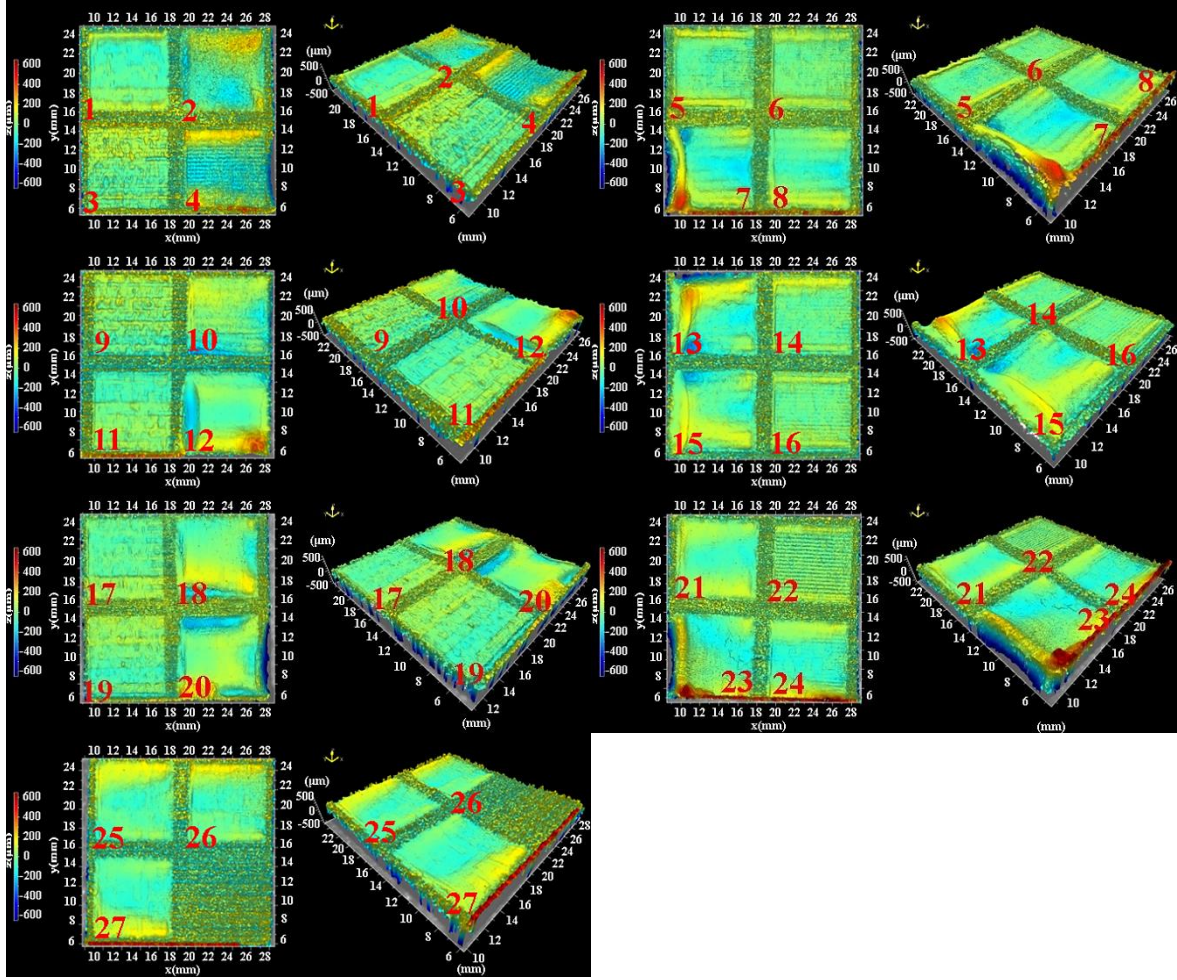
Resim 4.7. Ti-6Al-4V için belirlenen parametre setleri ile yapılan LP işlemleri

Yapılan deneyler sonucunda, yüzey pürüzlülük değerleri farklılıklar göstermiştir. Seçilen deney parametrelerine göre bazı sonuçlarda oldukça iyi Sa, Sq ve Sz değerlerine ulaşılsa da, Ssk ve Sku değerleri istenenden oldukça uzak olduğu saptanmıştır. Bazı deney sonuçlarında ise pürüz değerleri başlangıç değerlerine göre azalmış olsa da pürüz iyileştirme oranı yetersizdir. Her bir yüzeyin morfolojik analizleri bir sonraki başlıkta tartışılmıştır. Yapılan morfolojik analizler, yüzeyin LP işleminin pürüz giderme işlemini optimize etmek için kullanılmış ve bu gaye için de deney parametrelerin optimizasyonunun yapılması planlanmıştır.

Yüzey Morfolojisi Analizleri

Yapılan morfolojik analizler neticesinde, yapılan yirmi yedi deneyin yüzey morfolojisi ortaya çıkarılmıştır. Resim 4.7’de gösterilen LP işlemleri yapılmış bütün yüzeylerin morfolojisi, aynı deney numaralarına bağlı kalınarak, Resim 4.8’de verilmiştir. LP işlemi ile başlangıç yüzey pürüzlülüğü önemli ölçüde azaltılmıştır. Yapılan her deneyde, Sa, Sq, ve Sz değerleri, başlangıç yüzeye göre azalma göstermiştir. Matematiksel anlamda pürüzlülük değerlerindeki en düşük sonuçlara deneyler 7-8-12-13-15-18-20-21’de ulaşılmıştır. Bu deney setleri ile yapılan işlemlerde, Sa ve Sq değerlerinde yaklaşık %88 ile %94 arasında ve Sz değerlerinde ise yaklaşık %84 ile %92 arasında iyileştirme yapılmıştır. LP işlemi yapılmamış yüzeyde Sa ve Sq değerleri sırasıyla 30,41 ve 39,97 μm olarak ölçülmüştür.

Lazer parametreleri (600 W, 275 mm/sn, 0,03 mm ve 0,0008 sn) olan 12. deneyde, sırasıyla 1,74 μm ve 2,38 μm ölçülen Sa ve Sq değerleri, en düşük Sa ve Sq değerleridir. Fakat başlangıçta sırasıyla 0,16 ve 3,87 olarak ölçülen Ssk ve Sku değerleri, 12. deneyde sırasıyla -0,16 ve 8,13 olarak ölçülmüş ve bu sonuçlar istenilen değerlerden oldukça uzaktır. Lazer parametreleri (350 W, 275 mm/sn, 0,03 mm ve 0,0006 sn) olan 9. deneyde, sırasıyla 0,12 ve 3,00 olarak ölçülen Ssk ve Sku değerleri, bütün deneyler arasında istenilen parametrik değerlere en yakın sonuç olarak kaydedilmiştir. Fakat Sa, Sq ve Sz değerleri 9. deneyde sırasıyla 7,58 μm , 9,47 μm ve 73,64 μm olarak ölçülmüş ve bu sonuçlar da istenilen değerlerden oldukça uzaktır. Bu sebeple LP işlemlerinin parametreleri üzerinde analizler yapılmış ve istenilen pürüzlülük değerlerine göre proses optimize edilmiştir.



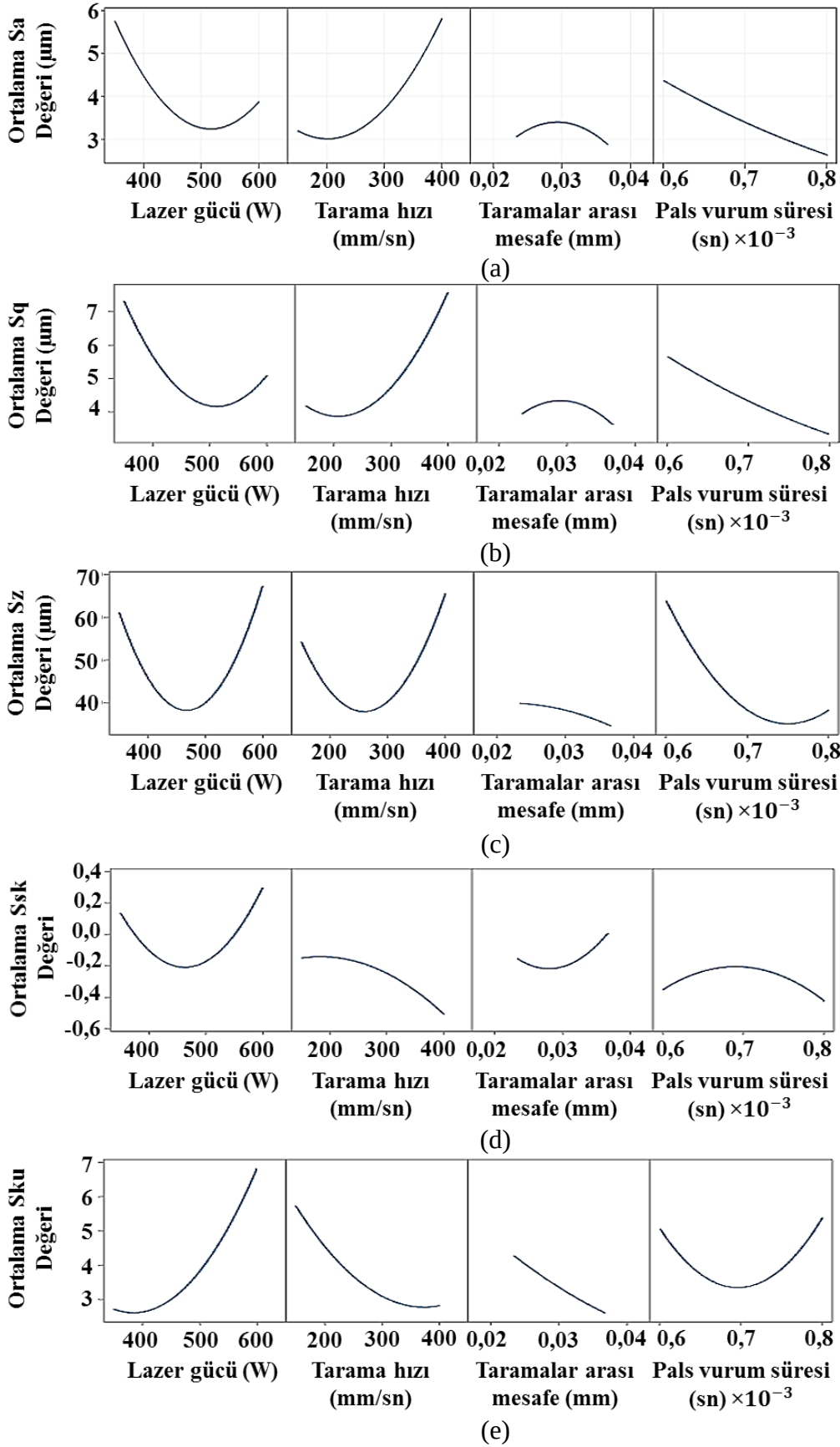
Resim 4.8. Ti-6Al-4V için belirlenen parametre setleri ile yapılan LP işlemlerinin yüzey morfolojisi görüntüleri

Parametre Optimizasyon Çalışmaları

Çizelge 4.3'te verilen deney parametre setleriyle yapılan LP işlemleri, parlatılmış yüzeylerin matematiksel morfoloji sonuçlarına istinaden analiz edilmek üzere Minitab programına sırasıyla girilmiştir. Şekil 4.2'de yüzey pürüzlülük değerleri üzerine lazer parametrelerinin ana etki grafikleri verilmiştir. Buna göre, tek başına Sa ve Sq değerlerinin, lazer parametrelerine göre değişimi incelendiğinde, minimum Sa ve Sq değerleri için lazer gücünün 500 ile 600 W arasında, tarama hızının 200 ile 300 mm/sn taramalar arası mesafenin 0,04 mm ve pals vurum süresinin ise 0,0008 sn olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Yine tek başına Sz değerlerinin, lazer parametrelerine göre değişimi incelendiğinde, minimum Sz değeri için lazer gücünün 400 ile 500 W arasında, tarama hızının 200 ile 300 mm/sn taramalar arası mesafenin 0,03 ile 0,04 mm arasında ve pals vurum süresinin ise 0,0007 ile 0,0008 sn arasında olması gerekmektedir.

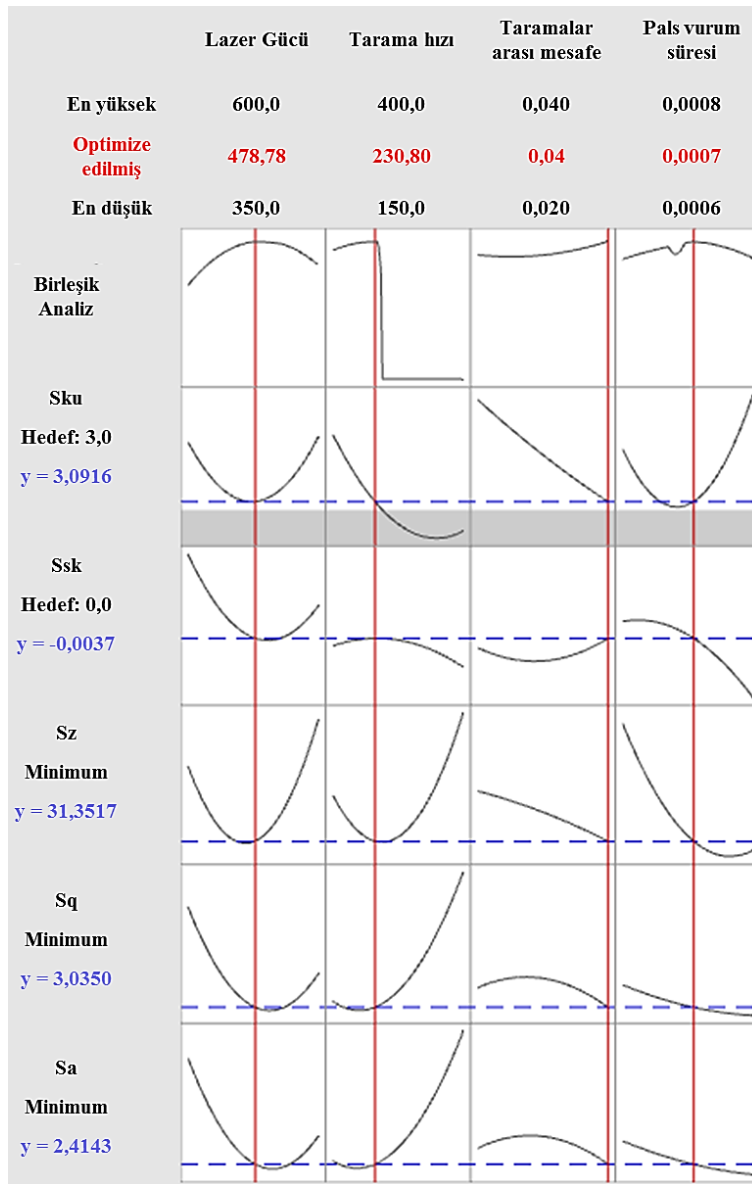
Çizelge 4.3. Ti-6Al-4V için oluşturulan parametre setleri ve pürüzlülük değerleri

Deney No.	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/sn)	Taramalar Arası Mesafe (mm)	Pals Vurum Süresi (sn)	Sa (μm)	Sq (μm)	Sz (μm)	Ssk	Sku
1	350	150	0,03	0,0007	3,73	4,71	34,94	0,33	3,19
2	600	150	0,03	0,0007	5,38	7,27	84,60	0,27	5,64
3	350	400	0,03	0,0007	8,13	10,46	100,5	-0,13	3,79
4	600	400	0,03	0,0007	8,76	11,59	146,0	-0,53	4,98
5	475	275	0,02	0,0006	4,36	5,73	54,96	-0,62	4,22
6	475	275	0,04	0,0006	4,16	5,47	105,0	-0,04	5,86
7	475	275	0,02	0,0008	3,16	3,99	34,55	-0,45	3,11
8	475	275	0,04	0,0008	2,95	3,67	28,73	-0,36	2,90
9	350	275	0,03	0,0006	7,58	9,47	73,64	0,12	3,00
10	600	275	0,03	0,0006	3,92	5,08	93,66	0,31	10,16
11	350	275	0,03	0,0008	4,49	5,71	49,69	0,15	3,38
12	600	275	0,03	0,0008	1,74	2,38	42,89	-0,16	8,63
13	475	150	0,02	0,0007	3,38	4,44	59,45	-0,27	5,52
14	475	400	0,02	0,0007	4,09	5,19	42,47	-0,27	3,26
15	475	150	0,04	0,0007	2,63	3,36	35,82	-0,13	3,58
16	475	400	0,04	0,0007	4,24	5,49	49,86	0,16	3,77
17	350	275	0,02	0,0007	6,09	8,06	105,4	-0,21	4,80
18	600	275	0,02	0,0007	2,52	3,39	62,45	1,14	13,13
19	350	275	0,04	0,0007	6,06	7,78	69,02	0,23	3,90
20	600	275	0,04	0,0007	2,46	3,15	39,29	0,42	4,02
21	475	150	0,03	0,0006	2,38	3,07	58,69	0,12	7,18
22	475	400	0,03	0,0006	7,98	10,80	89,52	-1,14	4,75
23	475	150	0,03	0,0008	3,86	5,25	126,8	-0,47	16,02
24	475	400	0,03	0,0008	3,81	4,79	39,60	-0,38	3,07
25	475	275	0,03	0,0007	3,24	4,13	38,56	-0,27	3,40
26	475	275	0,03	0,0007	3,74	4,80	43,06	-0,21	3,42
27	475	275	0,03	0,0007	3,20	4,05	33,11	-0,14	3,20
Standart Sapma	-----	-----	-----	-----	1,89	2,50	31,56	-----	-----
Lazer parlatma işlemi yapılmamış bölge	-----	-----	-----	-----	30,41	39,97	381,5	0,16	3,87



Şekil 4.2. Yüzey pürüzlülük değerleri üzerine lazer parametrelerinin ana etki grafikleri;
a) Sa, b) Sq, c) Sz, d) Ssk ve e) Sku

Tek başına Ssk değerinin, lazer parametrelerine göre değişimi incelendiğinde, Ssk değerinin 0'e yakın olduğu değerler için lazer gücünün yaklaşık 400 W ve yaklaşık 550 W seviyelerinde, tarama hızının 200 mm/sn'den daha az, taramalar arası mesafenin 0,04 mm ve pals vurum süresinin ise yaklaşık 0,0007 sn olması gerektiği görülmektedir. Son olarak, tek başına Sku değerinin, lazer parametrelerine göre değişimi incelendiğinde, Sku değerinin 3'e yakın olduğu değerler için lazer gücünün yaklaşık 400 W seviyelerinde, tarama hızının 400 mm/sn seviyelerinde, taramalar arası mesafenin 0,03 ile 0,04 mm arasında ve pals vurum süresinin ise yaklaşık 0,0007 sn olması gerektiği görülmektedir.



Şekil 4.3. LP parametrelerinin yüzey pürüzlülük değerleri temel alınarak optimizasyon çalışması

Yapılan çalışmalar neticesinde, Sa ve Sq değerlerini etkileyen en güçlü faktör lazer tarama hızı iken lazer gücü ikinci en etkili faktör olarak belirlenmiştir. Taramalar arası mesafe ve pals vurum süresi bu iki faktöre göre daha az etkili olmuştur. Sz değerine lazer gücü ve lazer tarama hızı faktörleri aynı önemde etkili olmuştur ve pals vurum süresi bu faktörlere yakın önem derecesine sahiptir. Taramalar arası mesafe bu üç faktöre göre daha az etkili olmuştur. Ssk değerini etkileyen en güçlü faktör lazer gücü iken lazer tarama hızı ikinci en etkili faktör olarak belirlenmiştir. Taramalar arası mesafe ve pals vurum süresi bu iki faktöre göre daha az etkili olmuştur. Son olarak, Sku değerine lazer gücü ve lazer tarama hızı faktörleri aynı önemde etkili olurken pals vurum süresi bu faktörlere yakın önem derecesine sahiptir. Taramalar arası mesafe bu üç faktöre göre daha az etkili olmuştur.

Yapılan bu analizler genel olarak bir fikir verse de her bir pürüzlülük değerinin birlikte istenilen değerlere yakın sonuçlar vermesini sağlamak için bütün sonuçları içeren bir optimizasyon çalışması yapılmıştır. Şekil 4.3'te bütün lazer parametrelerinin minimum ve maksimum değerleri, yüzey pürüzlülük sonuçları matematiksel olarak girilmiş ve grafiklerle bu sonuçlar analiz edilmiştir.

Yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda, minimum hedeflenen Sa, Sq, Sz değerleri, sıfır olarak hedeflenen Ssk ve üç olarak hedeflenen Sku değerleri için ortaya bir lazer parametre seti çıkarılmıştır. Şekil 4.3'te kırmızı renkte optimize edilmiş parametre değerleri gösterilmiştir. Buna göre, lazer gücü 478,78 W, tarama hızı 230,80 mm/sn, taramalar arası mesafe 0,04 ve pals vurum süresi 0,0007 sn olarak belirlenmiştir. İstatistiksel çalışmalar sonucunda ortaya çıkarılan bu parametrelerin doğrulanması gerekmektedir. Dolayısıyla optimize edilmiş lazer parametreleriyle işlemler yapılmış ve sonuçlara etkisinin en etkili olduğu belirlenen lazer gücü parametresinde küçük değişiklikler yapılarak ekstra LP işlemleri yapılmıştır.

4.2.2. SLE ile üretilen Inconel 718 alaşım numunesi

Bu deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere, iki adet $20 \times 100 \times 10$ mm boyutlarında SLE ile üretilmiş Inconel 718 alaşım numunesi hazırlanmıştır. Daha önce yapılan deneysel çalışmalar ışığında elde edilen ampirik yaklaşımlarla, lazer parametreleri değerlerinden taramalar arası mesafe 0,03 mm ve pals vurum süresi ise 0,0007 sn olacak şekilde sabit tutulmuştur. Lazer gücü ve tarama hızı parametreleri için minimum ve maksimum değerler

sırasıyla 300 – 360 W ve 255 – 285 mm/sn olarak ayarlanmıştır. Deney setleri, lazer gücü 20 W ve lazer tarama hızı 10 mm/sn artırılarak Çizelge 4.4'te gösterildiği gibi tasarlanmıştır. Her bir deney setlerine bağlı kalınarak, 9×19 mm'lik alanlara yapılan LP işlemleri Resim 4.9'da gösterilmiştir. Yapılan LP işlemleriyle, lazer parametrelerinin Sa ve Sz değerlerine direkt olarak etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğü bakımından en iyi sonuca on ikinci deney ile ulaşılmıştır ve başlangıçta Sa = 15,01 μm ve Sz = 64,57 μm olan pürüz seviyesi, farklı parametrelerin etkisinde Sa değeri için en çok 3,537 μm ve en az 1,517 μm ve Sz değeri için en çok 28,16 μm ve en az 14,94 μm seviyelerine düşürülmüştür.

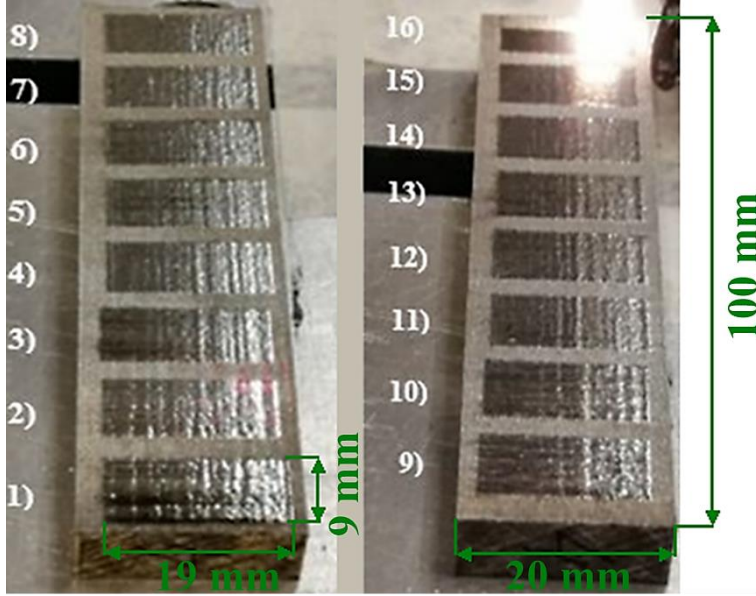
Çizelge 4.4. Inconel 718 için oluşturulan parametre setleri ve pürüzlülük değerleri

Deney No	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Sa (μm)	Sz (μm)	Deney No	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Sa (μm)	Sz (μm)
1	300	255	3,533	28,16	9	340	255	3,537	27,06
2	300	265	2,403	25,05	10	340	265	3,067	22,01
3	300	275	1,923	15,23	11	340	275	2,157	15,97
4	300	285	1,977	15,10	12	340	285	1,517	14,12
5	320	255	1,743	14,94	13	360	255	1,963	15,98
6	320	265	2,507	16,24	14	360	265	2,320	17,38
7	320	275	2,743	25,93	15	360	275	2,170	16,45
8	320	285	2,453	15,45	16	360	285	2,580	20,46
Standart Sapma		-----	-----	-----	---	----	----	0,58	4,91
Lazer parlatma işlemi yapılmamış bölge					---	----	----	15,01	64,57

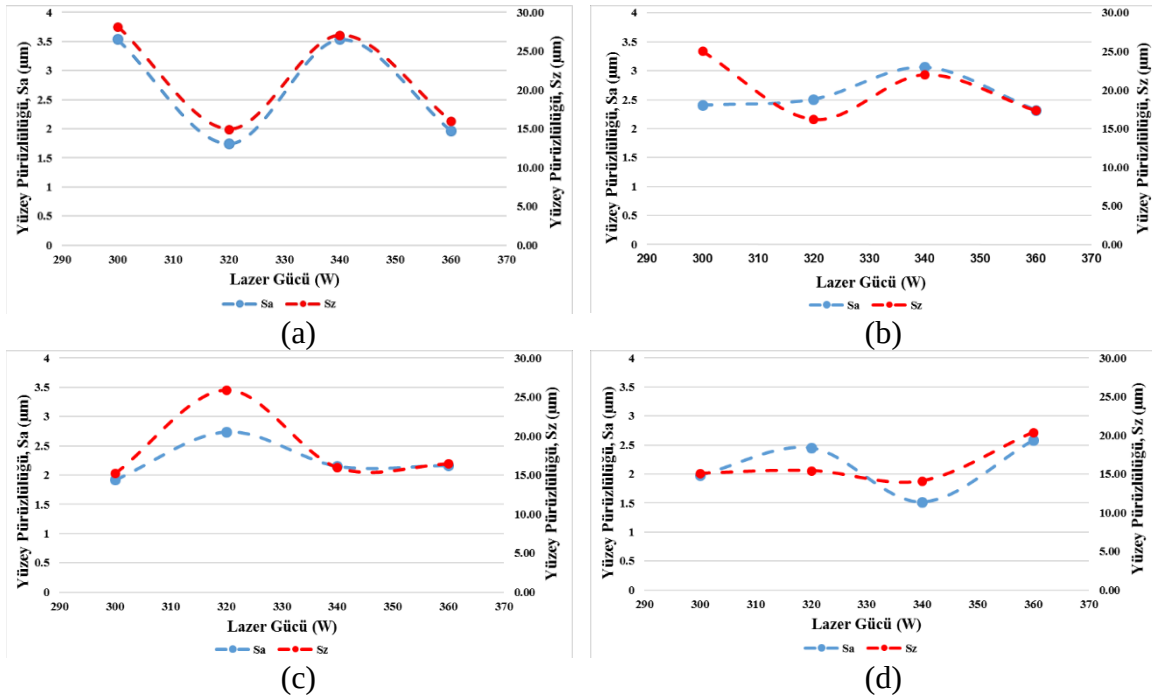
LP işleminde pürüzdeki iyileştirme oranı yüzeye olan ısı girdisi ile doğrudan ilişkilidir. Lazer gücü arttıkça yüzeye ısı girdisi artacağı gibi tarama hızını yavaşlatarak da ısı girdisi artırılır. Bu çalışmada, lazer gücü ve tarama hızı parametreleri, birbirine oldukça yakın seçilmiştir. Literatür çalışmalarından ve ön çalışmalara istinaden bu parametrelerin seçilmesi ile yüzey pürüzünde birbirine çok yakın oranlarda iyileştirme gözlemlenmiştir.

Şekil 4.4'te yer alan grafikler, LP işleminde sırasıyla 255 mm/sn, 265 mm/sn, 275 mm/sn ve 285 mm/sn sabit tarama hızlarında, lazer gücünün lazer pürüzü üzerine etkisini göstermektedir. Her bir grafik için tarama hızı sabit tutulmuş ve ısı girdisi lazer gücü

artırılarak, artırılmıştır. Isı girdisinin gereğinden fazla olması yüzey pürüzünü istenilen oranda iyileştirememesine sebep olmaktadır. Dolayısıyla bu çalışma ile yüzey pürüzü değerini en iyi oranda düşüren parametreler, lazer gücü 340 W ve tarama hızı 285 mm/sn olarak kaydedilmiştir.



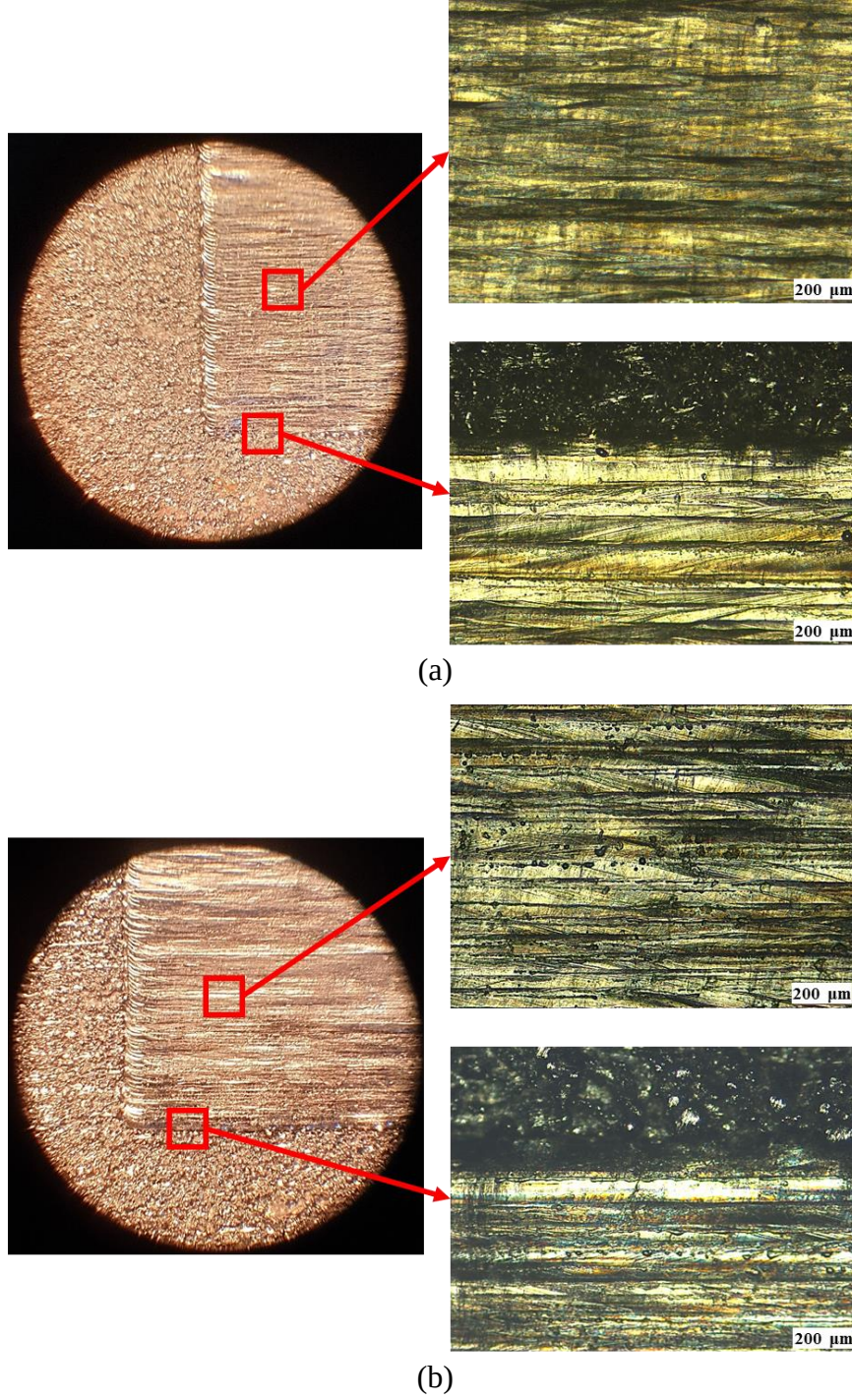
Resim 4.9. Inconel 718 için belirlenen parametre setleri ile yapılan LP işlemleri



Şekil 4.4. Inconel 718 için sabit tarama hızları (a) 255 mm/sn (b) 265 mm/sn (c) 275 mm/sn ve (d) 285 mm/sn için lazer gücünün Sa ve Sz değerlerine etkisi

Mikroskop Analizleri

Inconel 718 numuneleri üzerine yapılan çalışmalarda beklenildiği gibi pürüzlülük sonuçları birbirine oldukça yakın ve parlatılmış yüzeylerin morfolojileri birbirine benzemektedir.



Resim 4.10. Inconel 718 için a) on ikinci ve b) dokuzuncu parametre setleri ile parlatılmış yüzeylerin optik mikroskop görüntüleri

Çalışmada sırasıyla en düşük ve en yüksek Sa ve Sz değerleri sahip deneyler on ikinci ve dokuzuncu deneylerdir. On ikinci deneyde Sa ve Sz değerleri sırasıyla 1,517 μm ve 14,12 μm ve dokuzuncu deneyde Sa ve Sz değerleri sırasıyla 3,537 μm ve 27,06 μm olarak ölçülmüştür. Resim 4.10'da verilen optik mikroskop görüntüleri ile bu iki deneyde elde edilen yüzey profilleri ile işlem görmemiş yüzey morfolojisi kıyaslanabilmektedir. Oksidasyon kusurunu önlemek amacıyla koruyucu gaz altında yapılan işlemlerde optik mikroskop analizleri neticesinde, yüzeyde oluşabilecek mikro çatlaklar gözlemlenmemiştir. Buna ek olarak, zik-zak tarama stratejisi kullanılarak yapılan işlemler neticesinde, LP sınırlarında malzeme birikmemiş ve parlatılmış yüzey paralelliğini korumuştur.

4.2.3. Optimizasyonu yapılmış lazer parametreleri ile yapılan işlemler

Eİ yöntemlerinden sırasıyla SLE ve EIE ile üretilmiş Inconel 718 ve Ti-6Al-4V alaşım numunelerine uygulanan deney tasarımları ve LP işlemleri neticesinde ortaya çıkan sonuçlar önceki başlıklarda tartışılmıştır. Inconel 718 alaşım numunesi yüzeyinde yapılan çalışmalarda, LP işlemleri diğer parametreler sabit tutulmak koşuluyla lazer gücü ve lazer tarama hızı kademeli bir şekilde değiştirilerek yapılmıştır. Bu sebeple, Sa ve Sz değerlerinin en düşük olarak karşımıza çıkan parametre seti belirlenmiş ve Inconel 718 numunesi üzerine daha fazla parametre çalışması yapılmamıştır. Numune yüzeyindeki mikro yapı ve mikro sertlik değişimleri incelenmiştir ve incelemeler sonraki başlıklarda açıklanmıştır.

Bu başlık altında daha önce lazer parametre optimizasyonu yapılan EIE ile üretilmiş Ti-6Al-4V alaşım numunesi yüzeyine yapılan LP işlemleri açıklanmıştır. Bu deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere, 20 × 20 × 20 mm boyutlarında EIE ile üretilmiş Ti-6Al-4V alaşım numunesi hazırlanmıştır. Daha önceki başlıklarda açıklandığı gibi istenilen Sa, Sq, Sz, Ssk ve Sku değerleri için ortaya optimize edilen bir parametre seti çıkarılmış ve bu lazer parametreleri ile deneyler yapılarak yüzeyler analiz edilmiştir (Bkz. Resim 4.3).

Yüzey Morfolojisi Analizleri

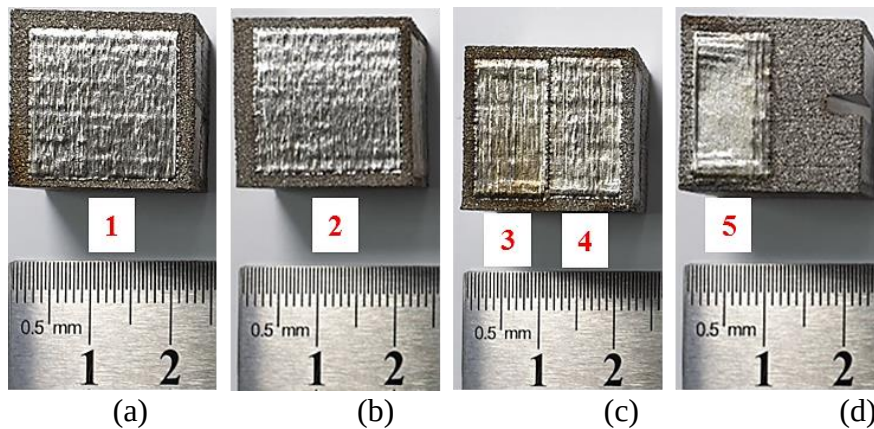
Optimizasyonu yapılan lazer parametre setlerini ve işlem sonucunda elde edilen pürüzlülük sonuçları Çizelge 4.5'te verilmiştir. Oluşturulan yanıt yüzeyi yöntemi deney tasarımı ve alınan sonuçlara istinaden yapılan optimizasyon çalışmaları neticesinde ortaya çıkan lazer parametre seti belirlenmiştir. Bu doğrultuda, birinci ve ikinci deneyler, tam olarak bu

parametre setleri ile yapılmıştır ve yüzey pürüzlülük sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, LP işleminin tekrarlanabilirliğini ve yanıt yüzeyi yöntemi ile oluşturulan deney tasarımının, lazer parametrelerini başarılı bir şekilde optimize edebildiğini göstermiştir.

Çizelge 4.5. Ti-6Al-4V için optimize edilmiş lazer parametreleri ile yapılan LP işlemleri ve pürüzlülük değerleri

Deney No.	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/sn)	Taramalar Arası Mesafe (mm)	Puls Vurum Süresi (sn)	Sa (μm)	Sq (μm)	Sz (μm)	Ssk	Sku
1	475	230	0,04	0,0007	4,19	5,37	49,50	-0,09	3,50
2	475	230	0,04	0,0007	3,80	4,85	76,06	-0,02	3,60
3	500	230	0,03	0,0007	6,00	7,75	70,85	0,36	3,59
4	550	230	0,03	0,0007	6,41	8,14	78,92	-0,04	3,32
5	600	230	0,03	0,0007	3,89	4,95	55,11	-0,05	3,45
Standart Sapma	-----	-----	-----	-----	1,25	1,60	13,06	----	----
Lazer parlatma işlemi yapılmamış bölge	-----	-----	-----	-----	30,41	39,97	381,5	0,16	3,87

Yapılan morfolojik analizler neticesinde, yapılan beş deneyin yüzey morfolojisi ortaya çıkarılmıştır. Resim 4.11’de gösterilen LP işlemleri yapılmış bütün yüzeylerin morfolojisi, aynı deney numaralarına bağlı kalınarak, Resim 4.12’de ve yüzeylerin optik mikroskop analizleri Resim 4.13’te verilmiştir.

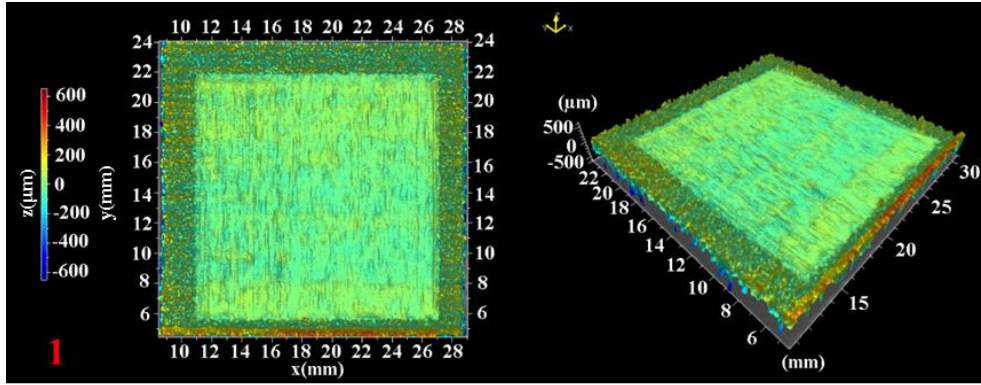


Resim 4.11. Çizelge 10’da verilen parametre setleri ile yapılan LP işlemleri; a) 1. Parametre seti, b) 2. parametre seti, c) 3. ve 4. parametre seti, d) 5. parametre seti

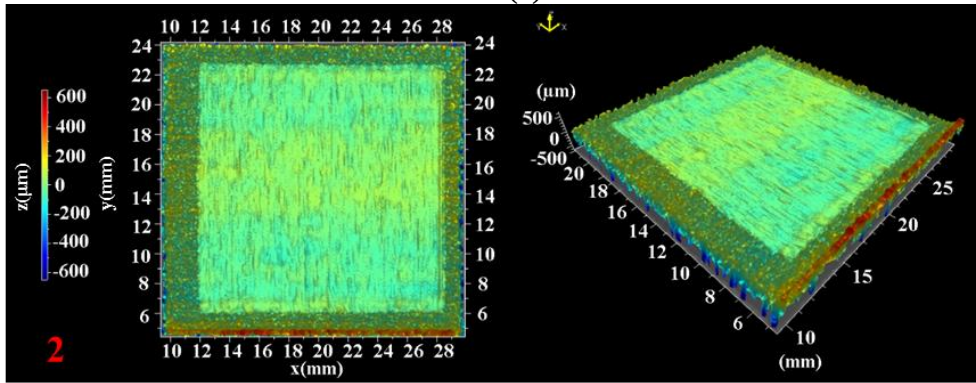
Birinci ve ikinci deneyler, tam olarak optimize edilmiş deney parametreleri ile hazırlanırken, üçüncü, dördüncü ve beşinci deneylerde, LP işlemleri lazer gücü artırılarak hazırlanmıştır. Bu üç deneyin yapılma nedeni istatistiksel sonuçlar ile deneysel sonuçları karşılaştırmaktır. Üçüncü deneyde, diğer parametreler sabit tutularak, lazer gücü 500 W'a, ve dördüncü deneyde ise 550 W'a yükseltilirken, tarama arası mesafe ise 0,03 mm'ye düşürülmüştür. Böylece ısı girdisi artırılmış ve yüzeye olan etkiler incelenmiştir.

Birinci ve ikinci deneylerin morfolojik analizi yapıldığında, yüzeylerin matematiksel olarak pürüz değerleri başarılı bir şekilde istenilen değerlere indirilirken sonuçların tatmin edici seviyede olduğu belirlenmiştir. Bu deney setleri ile yapılan işlemlerde, Sa ve Sq değerlerinde yaklaşık %87 ve Sz değerlerinde ise yaklaşık %80 ile %87 arasında iyileştirme yapılmıştır. Başlangıçta sırasıyla 0,16 ve 3,87 olarak ölçülen Ssk ve Sku değerleri, bu deneylerde sırasıyla -0,09 ve 3,50 olarak ölçülmüş ve bu sonuçlar oldukça tatmin edici sonuçlar olarak kayıtlara geçmiştir. İstatistiksel analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında, LP işlemlerinin matematiksel olarak pürüz iyileştirme miktarları olumlu sonuçlansa da, sonraki üç deney, lazer gücü parametresi kademeli artırılarak yapılmıştır. Daha önce bahsedildiği gibi, yanıt yüzeyi yöntemi analizi sonucunda lazer gücü, pürüz azalımındaki en önemli faktör olarak ortaya çıkmıştır. Bu sebeple, lazer gücündeki değişimler, sonraki üç deney ile incelenmiştir. Üçüncü ve dördüncü deneylerde, yüzey pürüzlülük değerleri Sa, Sq ve Sz, başlangıç değerlerine kıyasla düşürülmüş olsa da, birinci ve ikinci deney sonuçlarına göre oldukça yüksektir.

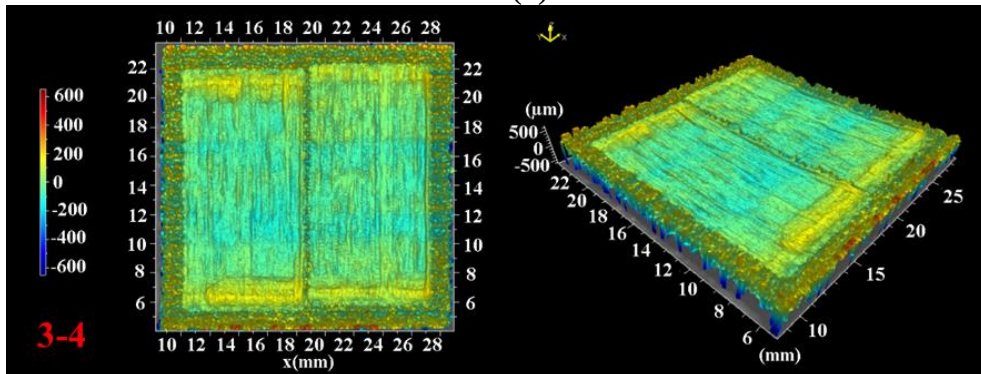
Yapılan beşinci deneyde, lazer gücü aslında çok yüksek değerlendirilebilecek bir değer olan 600 W olarak seçilmiştir. Bu değer, deney tasarımı yapılırken lazer gücü için en yüksek değer olarak belirlenen değerdir. Alınan sonuçlara göre pürüzlülük değerleri, birinci ve ikinci deney sonuçlarına yakın çıkmıştır. Fakat yapılan morfolojik analizler neticesinde yüzeyde dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Isı girdisi, yüzey dalgalanması kusurunun oluşmasında önemli faktördür. Isı girdisi yüksekse, ergiyik havuzun derinliği, tepe-vadi mesafesinden daha yüksek olacaktır. Böylece, tepelerin vadilere taşınmasına izin vermek yerine, lazer tüm metal yüzeyi bir eriyik havuzuna çevirir. Bu, daha yüksek genliklerle daha düşük bir tepe-vadi frekansına neden olur. Böylece metal yüzeyin yüzey pürüzlülüğü artar ve katılma sonrasında yüzeyde dalgalılık ortaya çıkar. Dolayısıyla, lazer gücünün artırıldığı deneylerde ısı girdisinin artırılmasıyla yüzeyde dalgalanmalar oluşmuştur, bu sebeple deneylerde gereğinden fazla lazer gücü kullanılmamıştır.



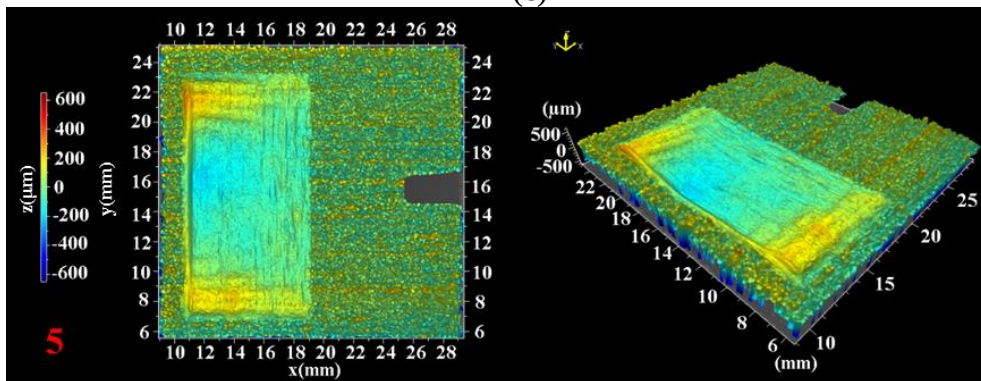
(a)



(b)

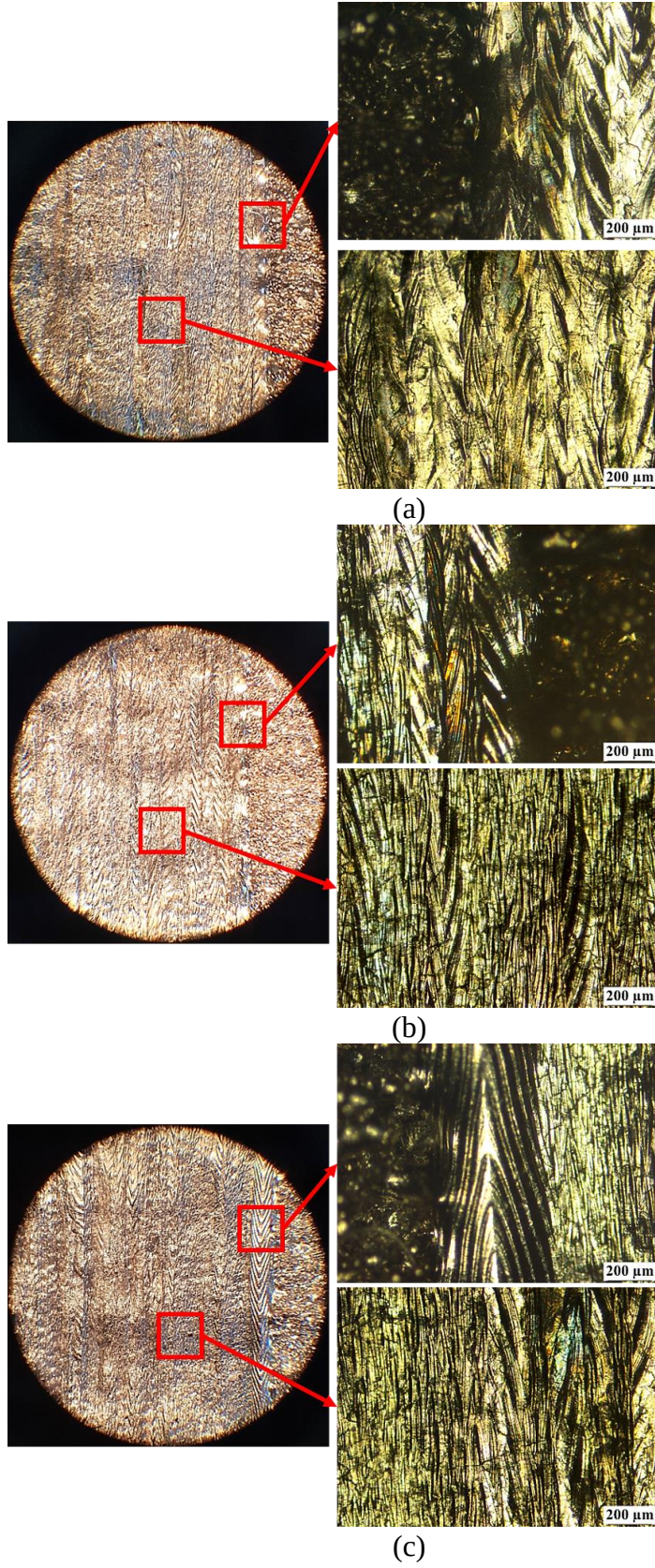


(c)

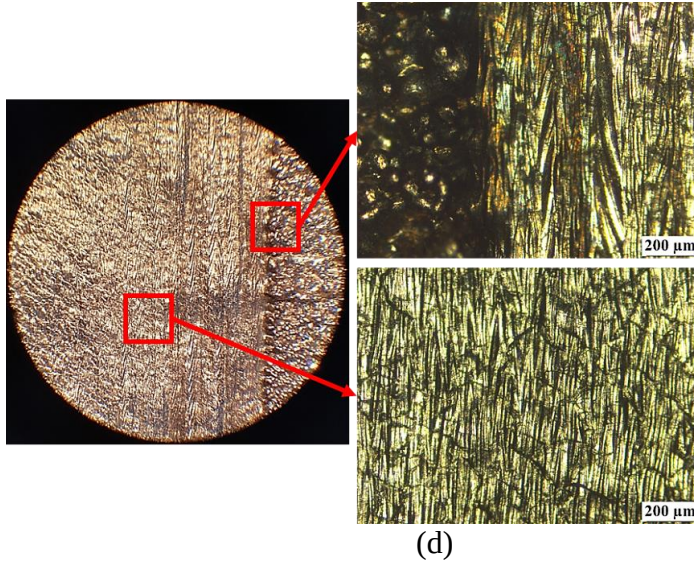


(d)

Resim 4.12. Çizelge 10’da verilen parametre setleri ile yapılan LP işlemlerinin iki ve üç boyutlu yüzey morfoloji görüntüleri; a) 1. parametre seti, b) 2. parametre seti, c) 3. ve 4. parametre seti, d) 5. parametre seti



Resim 4.13. Çizelge 10’da verilen parametre setleri ile yapılan LP optik mikroskop analizleri; a) 1. parametre seti, b) 3. parametre seti, c) 4. parametre seti, d) 5. parametre seti



Resim 4.13. (devam) Çizelge 10’da verilen parametre setleri ile yapılan LP optik mikroskop analizleri; a) 1. parametre seti, b) 3. parametre seti, c) 4. parametre seti, d) 5. parametre seti

Resim 4.13’te, Çizelge 4.5’te verilen deney parametreleri ile yapılan LP işlemlerinin gösterilen optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Birinci ve ikinci deneylerin parametre setleri aynı olduğu için, ikinci deneyin optik mikroskop görüntüsü verilmemiştir. Sırasıyla birinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci deney setlerinin optik mikroskop görüntülerinin analiz edildiğinde, yüzeydeki mikro çatlakların davranışları incelenmiştir. Birinci deneyde, yüzey üzerinde lazer tarama izleri net bir şekilde gözlemlenirken, mikro çatlaklara rastlanılmamıştır. Lazer gücünün artırılarak yapılan denemelerde, yüzeyde yer yer enine mikro çatlakların olduğu gözlemlenmiştir. İkinci deneyde, mikro çatlaklar daha küçük ölçekli olarak kayıt edilirken, lazer gücünün 600 W seçildiği beşinci deneyde, mikro çatlaklar yüzeyde daha sık görülmektedir. Morfolojik analizlerde, yüzeyde oluşan dalgalanmalara, pürüzlülük değerlerinin yüksek çıkmasına ek olarak, mikro çatlakların da ortaya çıkmasıyla lazer gücünün optimize edilen değer dışına çıkılmamasına karar verilmiştir.

4.3. LP İşlemi Sonucunda Yüzey Bütünlüğü Analizi

Lazer parlatma işleminde yüzey bütünlüğü analizi, yüzeyin morfolojik karakteristiğiyle birlikte yüzeyin mikro sertlik ve mikro yapısal özelliklerini ifade eder. Yapılan bütün parlatma deneylerinin yüzey morfolojisi analizleri ilgili başlıklar altında yapılmıştır. Bu başlık altında, LP işlemi yapılan yüzeylere uygulanan mikro sertlik testleri ve mikro yapı

analizleri açıklanmıştır. Mikro sertlik testleri ile LP işleminin malzeme yüzeyindeki mikro sertlik ile ilişkisi ve mikro yapısal analizlerle de tane yönelimleri incelenmiştir.

4.3.1. SLE ile üretilen Inconel 718 alaşım numunesi

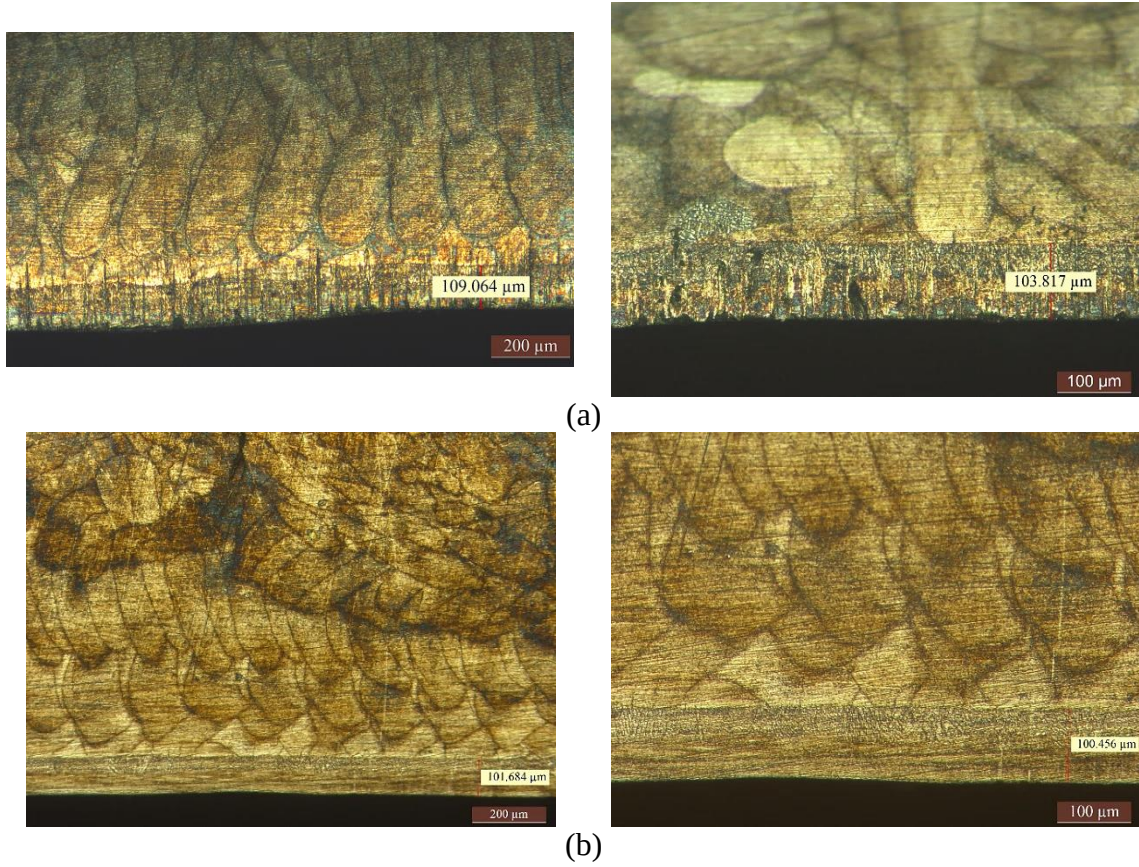
Bu başlık altında, SLE ile üretilen Inconel 718 alaşım numunesi yüzeyine uygulanan LP işlemleri sonrasında, yüzey ve yüzeyin hemen altındaki mikro yapısal değişimler ve ilgili bölgelerdeki mikro sertlik değişimleri incelenmiştir.

Mikro Yapı Analizleri

LP işlemi ile parlatılan yüzeye mikro yapı analizi için ilk olarak SLE ile üretilmiş Inconel 718 numunesi incelenmiştir. Resim 4.14'te iki farklı parametre seti ile yapılmış LP işlemi gösterilmiştir. Çalışma parametreleri (a) numunesi için lazer gücü 340 W, tarama hızı 255 mm/sn olarak ve (b) numunesi için lazer gücü 340 W, tarama hızı 285 mm/sn olarak ve iki tarama arası mesafe ve pals vurum süresi ise, her iki deney için aynı olacak şekilde sırasıyla 0,03 mm ve 0,0007 sn olarak seçilmiştir.

LP işleminden sonra numunenin yüzey kesiti alınmıştır. Yüzey kesiti alınan numunelere zımparalama ve mekanik parlatma işlemi uygulanmış ve bunu takiben yüzey dağlama işlemi uygulanmıştır. Yüzey dağlama işlemi için hacmen %50 HCl ve %50 HNO₃ asit karışımı hazırlanmıştır. Yüzeye bu karışım sürülmüş ve mikroskop altında görüntü elde edilene kadar dağlamaya izin verilmiş ve görüntü alındıktan hemen sonra asit temizlenmiştir.

SLE ile üretilen Inconel 718 numunelerinin mikro yapı görüntüleri, tarama yönüne dik olacak şekilde incelenmiş ve Resim 4.14' te verilmiştir. Optik mikroskop altında incelen görüntülere bakıldığında üretime ait lazer ergitme sınırları ve ergimiş havuz sınırları görülmektedir. Başlangıçta γ fazındaki Inconel 718 alaşımı, üretildikten sonra normalde üç intermetalik çökeltme fazı sergilemektedir: Ni₃(Al,Ti,Nb) bileşimine sahip γ' yüzey merkezli kübik yapı, Ni₃Nb bileşimine sahip γ'' hacim merkezli tetragonal yapı ve Ni₃Nb bileşimine sahip bir ortorombik δ fazı [50–52]. γ'' fazı, γ fazı ile uyumlu bir çökelti oluşturan ana güçlendirme fazıdır [53–55].



Resim 4.14. Inconel 718 için ısıdan etkilenmiş alan ve mikro yapı analizi; lazer parametreleri a) 340 W – 255 mm/sn – 0,03 mm – 0,0007 sn ve b) 340 W – 285 mm/sn – 0,03 mm – 0,0007 sn

LP işlemi, SLE ile oluşan sütunlu yapıyı küçülterek γ'' fazını bu bölgede artırmıştır. Resim 4.14'te dendritik ayrışma modelleri görülmektedir. Dendritik büyüme, tanelerin ve dendritlerin bir katmandan sonraki katmana büyümesi birkaç tarama katmanına yayılır. İnce dendrit yapılar, dendrit kol aralığının yapım süreci sırasında gerçekleşen çok yüksek katılma soğutma hızlarının göstergesidir ve dendrit kol aralığı kalınlaştıkça, soğuma hızının azaldığı yorumu yapılabilir. SLE üretimi boyunca dendritik büyüme, tipik ayrışma modellerine neden olmaktadır. LP bölgesindeki mikro yapılar da sütunlu morfolojiyi korumaktadır, ancak dendritik yapının boyutu daha küçüktür. Yapılan optik mikroskop analizlerinde, lazerin yeniden ergitme tabakasının kalınlığının ilk deney parametreleri ile yaklaşık olarak 103 - 110 μm aralığında ve ikinci deneyde ise 100 - 102 μm ölçülmüştür. İki deney seti arasındaki parametre farkı, lazer tarama hızıdır. Lazer tarama hızının daha yüksek olduğu ikinci çalışmada, yüzeye daha düşük ısı girdisi olacağı için, beklenildiği gibi ısıdan etkilenen bölge daha düşük ölçülmüştür. Yapılan metalürjik testler sonucunda, SLE ile üretilmiş Inconel 718 alaşım numunesinde büyük boyutlu dendritik ve sütun şeklinde yapılar

dikkat çekmiştir. Yüzey kesitinin lazerle parlatılmış bölgesinde ise hızlı katılaşma sebebiyle çok küçük tanelerin oluşumu gözlemlenmiştir. Daha yüksek büyütmede, numunenin mikro yapısı ve lazer tarama yolları tarafından oluşturulan katmanların ayrışma modelleri ortaya çıkmıştır. SLE ile ortaya çıkan bu ayrışma modelleri LP işleminden sonra ortadan kaldırılmıştır.

Mikro Sertlik Analizleri

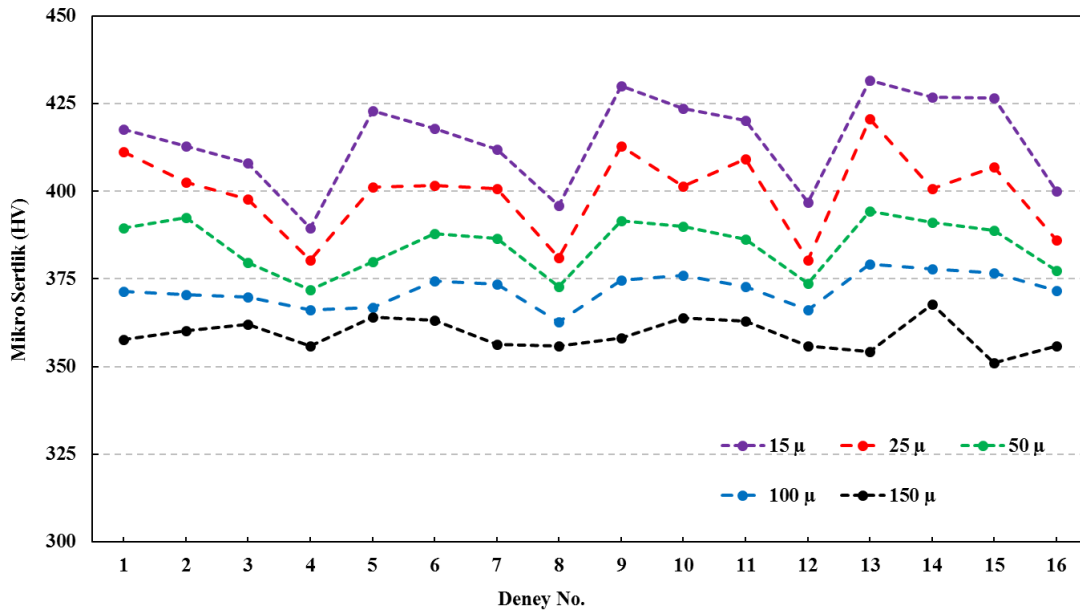
LP işleminden sonra numunelerin sertlik değerlerinin kayda değer bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Çizelge 4.6, lazerle parlatılmış yüzeylerin sırasıyla 15 - 25 - 50 - 100 - 150 μm derinlikteki mikro sertlik değerlerini göstermektedir.

Çizelge 4.6. Inconel 718 için LP işlemi yapılmış yüzeylerin sırasıyla 15-25-50-100-150 μm derinlikteki mikro sertlik değerleri

Deney No	15 μm	25 μm	50 μm	100 μm	150 μm
	Derinlikteki Sertlik (HV)	Derinlikteki Sertlik (HV)	Derinlikteki Sertlik (HV)	Derinlikteki Sertlik (HV)	Derinlikteki Sertlik (HV)
1	417,75	411,28	389,4	371,4	357,615
2	412,765	402,485	392,45	370,5	360,305
3	407,95	397,82	379,625	369,85	362,05
4	389,395	380,3	371,9	366,15	355,8
5	422,9	401,165	380	366,85	364,05
6	417,78	401,58	387,85	374,495	363,11
7	411,93	400,75	386,45	373,4	356,35
8	395,93	380,95	372,8	362,81	355,875
9	429,915	412,9	391,5	374,7	358,25
10	423,525	401,4	389,95	376,02	363,75
11	420,265	409,215	386,4	372,695	363
12	396,9	380,3	373,7	366,15	355,8
13	431,65	420,75	394,4	379,24	354,3
14	426,92	400,755	391	377,75	367,7
15	426,64	406,865	388,8	376,6	351,1
16	399,95	386,05	377,45	371,6	355,765
Standart Sapma	13,14	12,13	7,5	4,7	4,5

Mikro sertlik değerleri ölçölürken, yüzeyin belirli bir derinliğinden iki kez mikro sertlik ölçümü yapılmış ve ortalama değerler alınmıştır. Üretim sonrası yaklaşık 365 HV sertliğe sahip olan Inconel 718 parçaları farklı LP parametreleri ile işlendikten sonra sertlik değerleri yüzeye yakın kısımlarda yaklaşık 24 ile 66 HV arasında artış göstermiştir. Mikro sertlikteki artışın nedeni, bu bölgedeki, ergime ve hızlı bir soğuma sonucu malzemenin mikro yapısındaki değişim ile açıklanabilir. Ergime ve katılaşmanın çok hızlı olduğu LP işlemi, dentritik/sütunlu yapıyı küçültölmüş ve γ fazının mukavemetinin artmasına neden olacak γ'' fazını bu bölgede artırmasına neden olmuştur. Böylece, yüzeyde ve yüzeyin hemen altında malzemenin mikro sertliği artmıştır.

Yüzeyden derine doğru inildikçe LP işleminin etkisinin azalmasından dolayı mikro sertlik değerleri düşmektedir. Yapılan mikro sertlik testleri sonucunda LP işleminin yüzeyden yaklaşık 150 μ m derinliğe kadar etki ettiği görölmüştür.



Şekil 4.5. Inconel 718 için LP işlemi sonucunda, yüzey ve yüzey altının sertlik değişim grafiği

Şekil 4.5'teki grafikte gösterildiği gibi, yüzeye yakın olan bölgelerde (0-15 μ m) sertlik değerinin daha fazla arttığı ve 431 HV değerine kadar ulaştığı görölmüştür. Yüzeyden uzaklaştıkça, mikro sertlik değerinin düştüğü ve 375 - 400 HV değerlerinde değiştıği gözlemlenmiştir. Lazerin ısı etkisinin yitirildiği yaklaşık 100 μ m ve daha derin yerlerdeki ölçümler, üretim sonrası mikro sertliğine (365 HV) yaklaşmıştır ve bu derinlikten sonra LP işlemi, malzeme mikro sertliğine etki etmemektedir.

Sonuç olarak, başlangıç sertlik değerlerine göre yüzeyde ve yüzeyin hemen altındaki bölgede, bütün LP deneylerinde de beklenildiği gibi sertlik değerleri artmıştır. Mikro sertlik değerlerindeki bu dağılımın nedeni, yüzey ile yüzey altında malzemenin mikro yapı değişimidir. Yüzeyden derinlere inildikçe soğuma hızında fark oluşur. Soğuma hızındaki fark malzemenin mikro yapısını ve dolayısıyla mikro sertliğini önemli ölçüde etkiler.

4.3.2. EIE ile üretilen Ti-6Al-4V alaşım numunesi

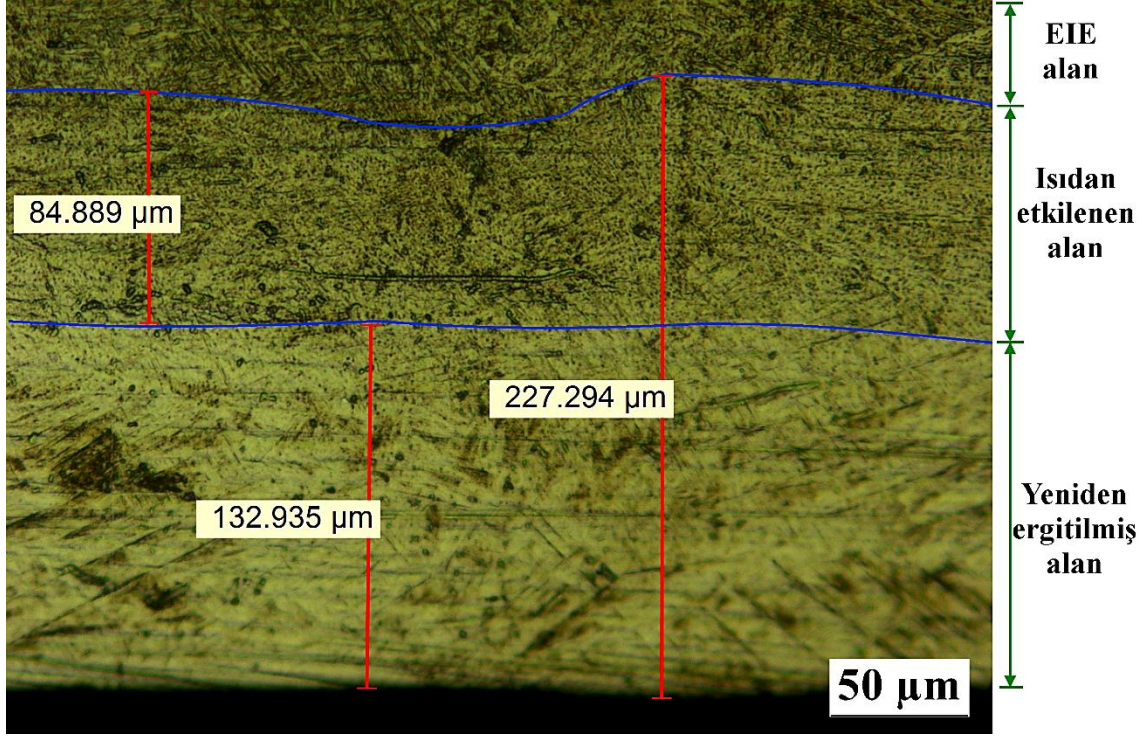
Bu başlık altında, EIE ile üretilen Ti-6Al-4V alaşım numunesi yüzeyine uygulanan LP işlemleri sonrasında, yüzey ve yüzeyin hemen altındaki mikro yapısal değişimler ve ilgili bölgelerdeki mikro sertlik değişimleri incelenmiştir.

Mikro Yapı Analizleri

LP işlemi uygulanan bir parçanın mekanik performansının analiz edilebilmesi için numunedeki ($\alpha+\beta$) dönüşüm mikro yapısı incelenmelidir. Arcam cihazı EIE işlemi sırasında, toz yatağı, yatak sıcaklığını yaklaşık 730 °C'de tutmak için hızla taranan odaksız bir ışın kullanır. Böylece, üretim sırasında yaşanan termal gradyanlar minimuma düşürülür [56]. Bu yüksek üretim sıcaklığı, parça üretilirken numuneyi bir süre boyunca sıcak vaziyette tutabilir, bu da daha homojen bir mikro yapıya ve düşük artık gerilimlere yol açar. LP işleminde alt tabaka soğuk olduğundan ve güç, sıkı geniş bir ergiyik havuzu geometrisi üretilecek şekilde kontrol edildiğinden, EIE işlemine göre daha yüksek bir termal gradyan ve soğutma hızı olacaktır. Bu nedenle koşullar, genellikle soğuk bir yatak kullanan SLE işlemine daha çok benzemektedir [57]. LP sırasında ergimiş ve ısıdan etkilenmiş alan, başlangıçta saniyede 400 °C'nin önemli ölçüde üzerinde bir soğuma hızı ile soğumaktadır ve tamamen martenzitik bir mikro yapının oluşması beklenir [58].

Dağlama yapılan LP işleminin kesitini gösteren Resim 4.15'te görüldüğü gibi, yeniden ergimiş alan (β) fazdan iğnemsî (α') faza dönüşmüştür. Bu bölgelerde mikro yapı iğnemsî (α') yapıdadır ve yapılan çalışmada, bu alanın yüzeyden yaklaşık 130 – 150 μm derinliğe ulaştığı gözlemlenmiştir. Daha derine gidildiğinde, yaklaşık 80 – 90 μm kalınlığında, ısıdan etkilenmiş alan gözlemlenmiştir. Bu tabakada da (β) fazdan iğnemsî (α') faza dönüşüm gözlemlenmiştir. Soğuma hızına bağlı olarak bu tabakada, hem martenzitik hem de lamelli yapılar bulunmaktadır.

Yapılan LP çalışmalarında, birçok iğnemi (α') yapı ergiyik havuzunun altında, parlatılmış yüzeyden yaklaşık 200 - 230 μm derinliğe kadar gözlenmiştir. Bu derinlik altında, alt tabaka malzemesi LP işleminden etkilenmemiştir ve EIE malzemesindeki tipik lamelli ($\alpha+\beta$) yapısına sahiptir.

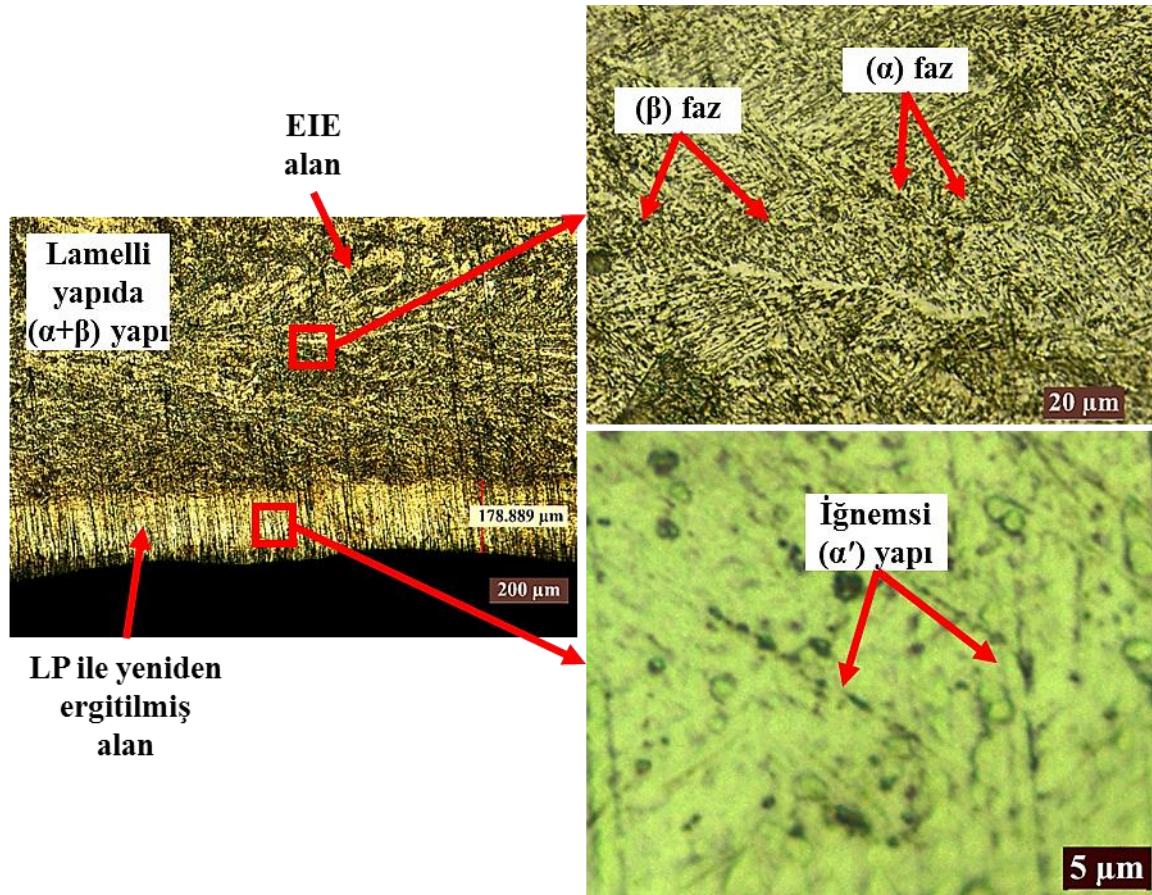


Resim 4.15. LP işlemi ile yeniden ergitilen, ısıdan etkilenen ve lazerin etkisinin olmadığı alanların optik mikroskop görüntüsü

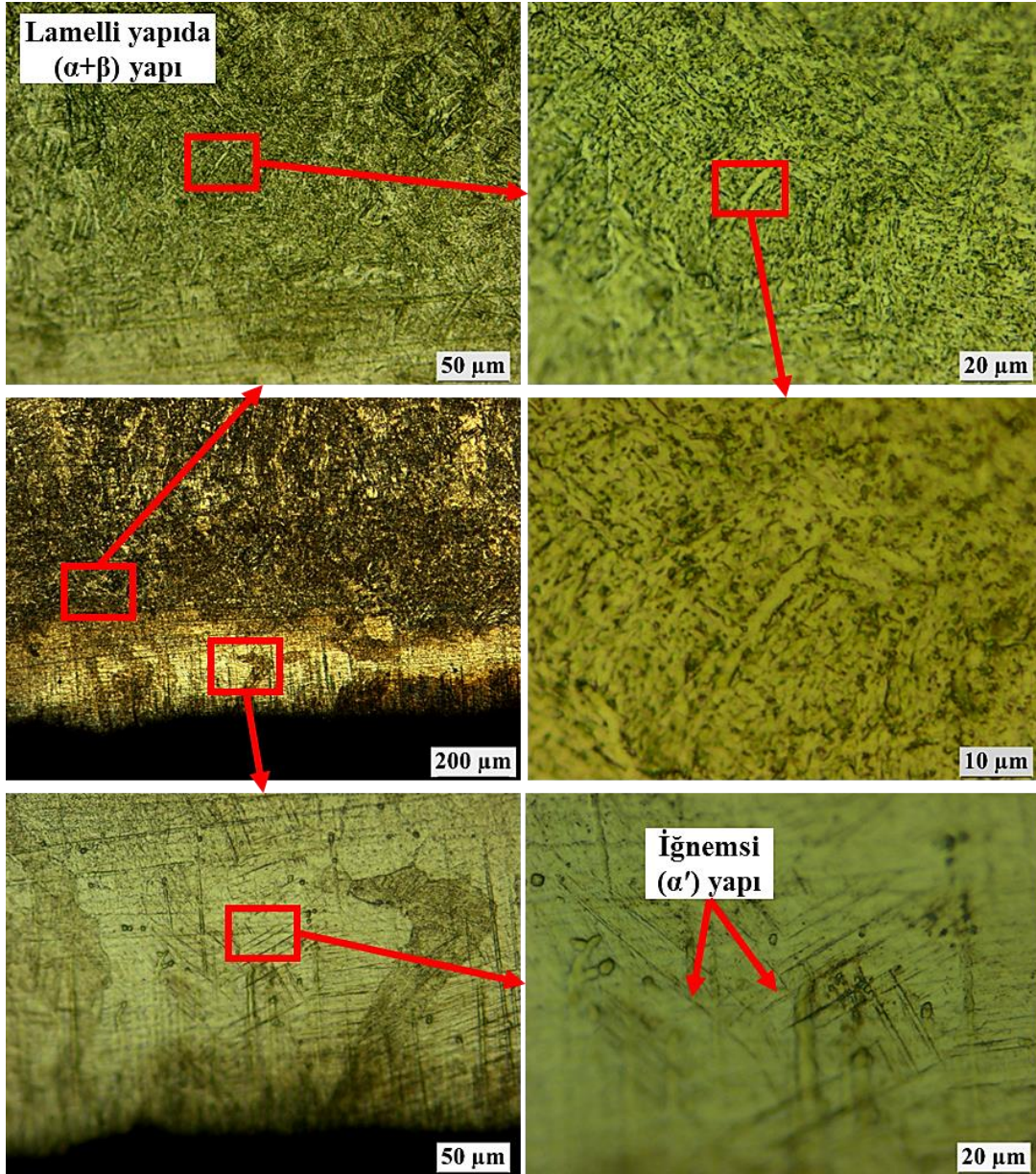
EIE ile üretilen bir Ti-6Al-4V alaşım numunesi yüzeyine LP işlemi uygulandığında, yeniden ergitilen ve EIE alanlarda ortaya çıkan mikro yapılar Resim 4.16'da gösterilmektedir. Burada, EIE ile üretilen Ti-6Al-4V numunesi tipik lamelli ($\alpha+\beta$) fazındadır. Sınırlarda biriken siyah renkte (β) fazı oluşurken, iç tarafta beyaz renkte (α) fazı oluşur. Yeniden ergimiş bölge mikro yapısı, iğnemi (α') fazındadır. LP alanındaki bu faz dönüşüm süreci, esas olarak sıcaklık değişimine ve soğutma hızına bağlıdır [59].

Ti-6Al-4V bir ($\alpha+\beta$) çift fazlı titanyum alaşımıdır. Burada alüminyum, faz geçiş sıcaklığını artırabilen bir (α) fazı stabilizatörüdür ve vanadyum ise (β) faz geçiş sıcaklığını azaltabilen bir stabilizatörüdür. Dönüşüm sıcaklığından itibaren numune çok yavaş bir şekilde soğutulursa ortaya eş eksenli bir ($\alpha+\beta$) mikro yapısı çıkar. Soğuma hızı arttıkça, eş eksenli yapı, lamelli yapıya dönüşmektedir ve numune çok hızlı soğutulduğunda ise mikro yapı

iğnemsisi (α') fazına dönüşmektedir [60]. EIE ile üretim sırasında ortaya çıkan mikro yapı, soğuma hızının ($\alpha+\beta$) fazının eş eksenli olmasına izin vermeyecek, fakat daha lamelli bir hal alacak şekilde olması ile açıklanabilir. LP işlemi etkisiyle çok hızlı bir şekilde ergiyip katılaştıran bölgedeki iğnemsisi (α') fazının ortaya çıkması, likidüs halindeki tabakanın önce tamamen (β) fazına dönüştükten sonra lamelli ($\alpha+\beta$) fazına dönüşebilecek zamanı bulamaması olarak açıklanabilir. Başka bir deyişle, dönüşüm sıcaklığı aşıldığında, ($\alpha+\beta$) fazı neredeyse tamamen (β) fazına dönüşür. Lazer ışını uzaklaştıkça sıcaklık düşer ve iş parçasının yüzeyi hızla soğur. Çok yüksek soğuma hızı, başlangıçtaki (β) fazını, iğne benzeri bir (α') martenzit fazına dönüştür.



Resim 4.16. Ti-6Al-4V numunesi için lazer etkisinin ulaşmadığı, lamelli ($\alpha+\beta$) mikro yapı ve lazer etkisinin görüldüğü, iğnemsisi (α') mikro yapı



Resim 4.17. Ti-6Al-4V numunesi için LP etkilerinin incelendiği farklı büyütme değerlerinde optik mikroskop görüntüleri; lazer etkisinin ulaşmadığı, lamelli ($\alpha+\beta$) mikro yapı ve lazer etkisinin görüldüğü, iğnemsisi (α') mikro yapı

Resim 4.17’de, daha önce bahsedilen optimum lazer parametrelerle (475 W - 230 mm/sn - 0,04 mm - 0,0007 sn) yapılan LP işlemi sonucu ortaya çıkan mikro yapılar gösterilmektedir. Yine bu çalışmada da, lazerin etkilerinin yitirildiği alanlarda, EIE üretim kaynaklı lamelli ($\alpha+\beta$) yapı gözlemlenmiştir. Optik mikroskop analizlerinde beyaz renkte görülen lamelli yapı (α) ve tane sınırlarında biriken siyah renkte gösterilen (β) yapılardır. EIE ile üretim sırasında, ergiyen ve katılaştan Ti-6Al-4V tozlarının soğuma trendi ile ilişkili olarak (β) faz sınırlara birikecek zamanı bulabilir ve mikro yapıda lamelli bir dağılım gözlemlenebilmektedir. LP işlemi ile yüzeydeki pürüz ergidikten hemen sonra çok hızlı bir

şekilde soğuma gerçekleşir. LP işlemi ile yüzey ve yüzeyin hemen altındaki mikro yapının fiziksel hareketi, (β) fazın sınırlarda birikmek için kendisine yeterli süreyi bulamayarak iğnemsî (α') yapıya ve yer yer kütsel şekilde yer alan (β) yapılara dönüşmüş olması şeklinde yorumlanabilir.

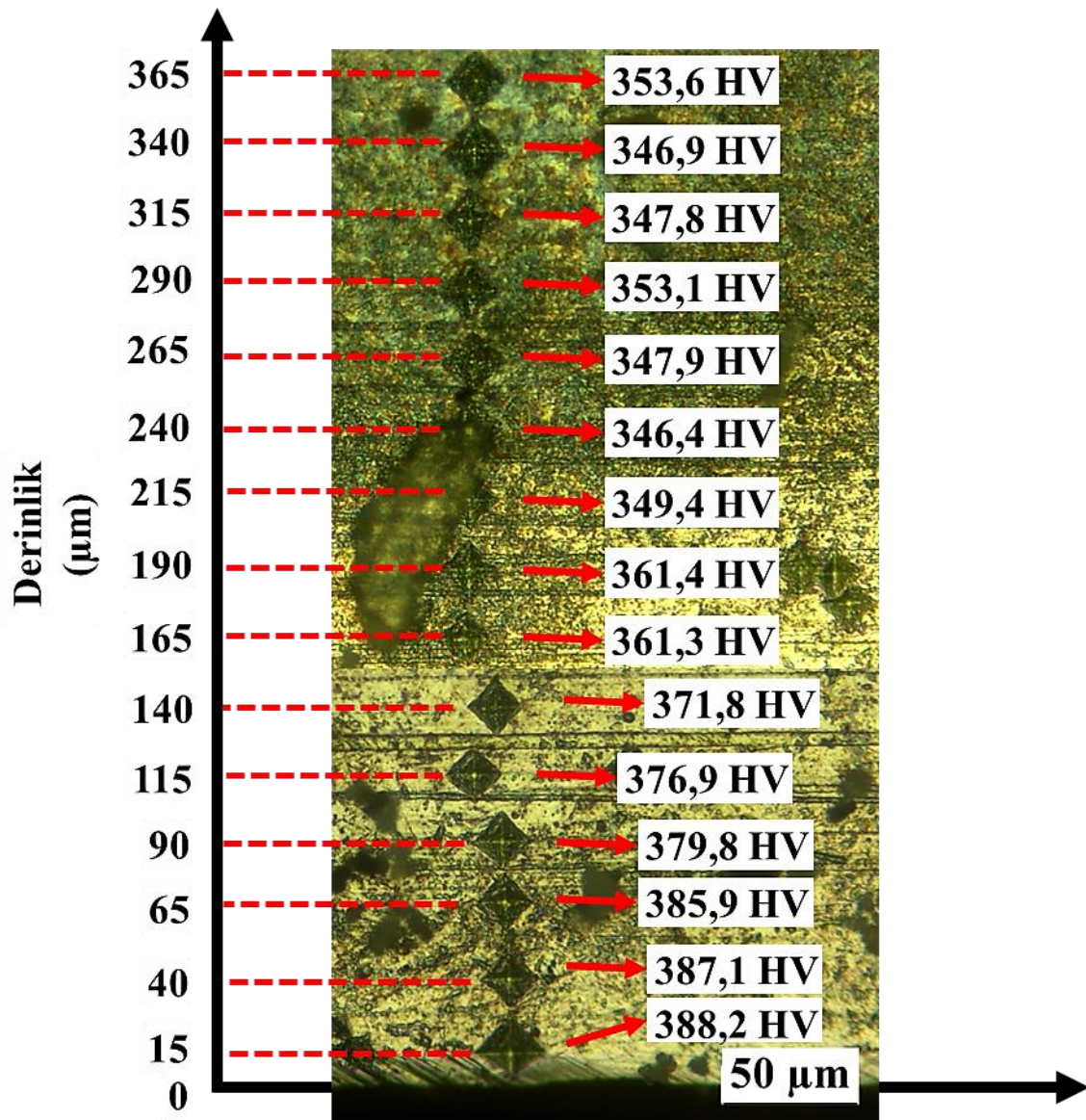
Mikro sertlik analizleri

LP işlemi uygulanan Ti-6Al-4V numunesinin derinliğe göre mikro sertlik dağılımları Resim 4.18'de gösterilmektedir. Arcam EIE cihazı ile üretilen Ti-6Al-4V numunesinin ortalama sertliği yaklaşık 300 – 345 HV olarak ölçülmüştür [61]. Bu çalışmada yapılan, LP işleminin etkisinin gözlemlenmediği yaklaşık 200 μm derinlikten sonraki ölçümlerde, yaklaşık olarak 345 – 355 HV aralığında mikro sertlik değerleri ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlar, literatürde elde edilen sonuçlarla örtüşmektedir. Çalışmada her bir mikro sertlik, yüzeyden aynı derinlikte, birbirini etkilemeyecek şekilde, üç farklı bölgeden alınmış ve ortalama değerler kayıt edilmiştir. İlk ölçüm derinliği, LP işlemi yapılan yüzeyden 15 μm mesafeden alınmıştır ve 25 μm aralıklarla diğer ölçümler devam etmiştir. Çizelge 4.7'de gösterildiği gibi, LP işleminin uygulandığı yüzeyden, 15 μm mesafeden alınan mikro sertlik değeri, 388,2 HV olarak ölçülmüştür. Parlatılmış yüzeyin sertliği, söz konusu malzemenin sertliğine göre %12,5 oranında artmıştır. Mikro yapı analizi ile birlikte analiz edildiğinde, LP işlemi ile ergiyip katılaştıran alandaki iğnemsî (α') yapıların mikro sertliği arttırdığı sonucuna, bu yapıların lamelli ($\alpha+\beta$) yapısından daha sert bir yapıda olduğu sonucuna ulaşılabilir. Bunun yanı sıra, lazerle hızlı ısıtma ve soğutmanın neden olduğu tane inceltme, parlatılmış numunelerin sertliğini iyileştirmede kullanılabilir [62].

Çizelge 4.7. LP işleminde yüzeyden derinliğe göre mikro sertlik ilişkisi

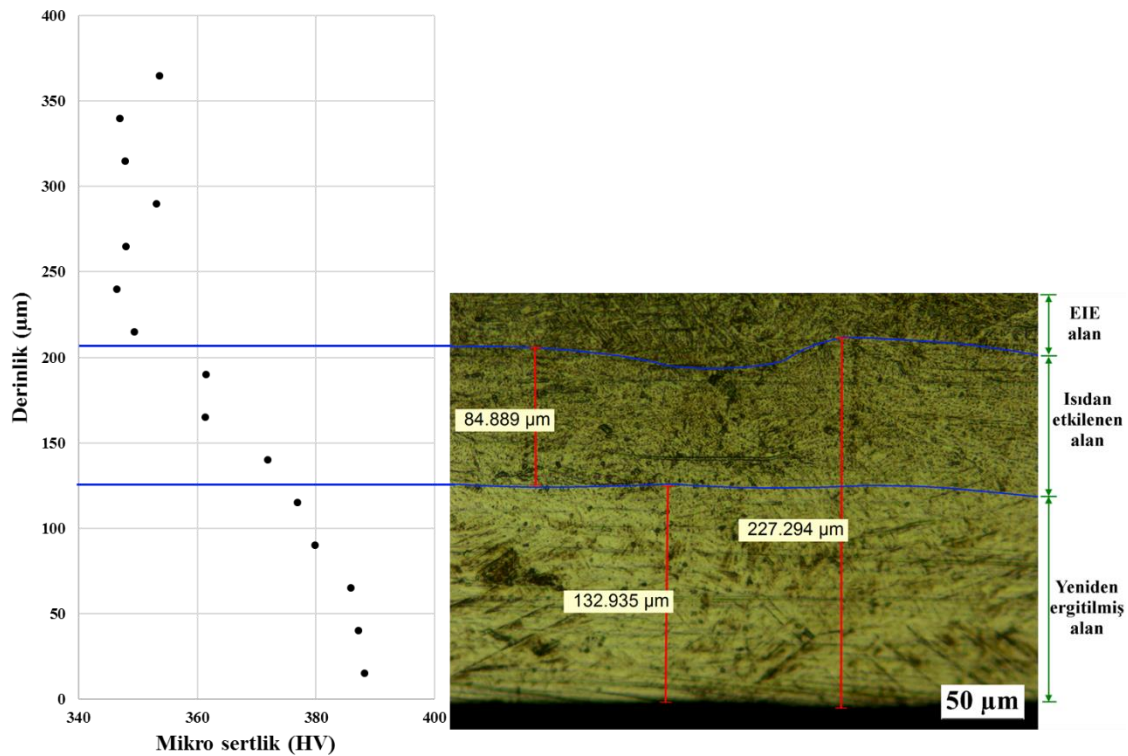
Derinlik (μm)	Mikro sertlik (HV)	Derinlik (μm)	Mikro sertlik (HV)	Derinlik (μm)	Mikro sertlik (HV)
15	388,2	140	371,8	265	347,9
40	387,1	165	361,3	290	353,1
65	385,9	190	361,4	315	347,8
90	379,8	215	349,4	340	346,9
115	376,9	240	346,4	365	353,6

LP işlemi yapılan numunedeki, yeniden ergitilmiş, ısıdan etkilenmiş ve EIE alandaki mikro sertlik değerlerindeki değişim Resim 4.19’da verilmiştir. Buna göre, optik mikroskop analizinde, lazerin etkisi ile ergiyip yeniden katılaştıran alan yaklaşık olarak 130 - 150 μm olarak gözlemlenmiştir. Bu alanda, mikro sertlik değerleri yaklaşık olarak 375 - 385 HV aralığında değişmektedir. Mikro sertlikteki bu artış, martenzit oluşumu ile ilgilidir. Başka bir deyişle, LP yüzey ve ısıdan etkilenen alan, mikro yapı analizleri başlığı altında da bahsedildiği üzere, lamelli ($\alpha+\beta$) fazından ayrışarak, iğnemsî (α') faza dönüşmektedir. Bu martenzit yapı, lazerden etkilenen katmanın yüzey altı akma mukavemetini artırır.



Resim 4.18. LP işlemi yapılan numunenin kesitindeki mikro sertlik dağılımları

Buna ek olarak, ısıdan etkilenen alanda da sertlik artmıştır. Isıdan etkilenen alan, yaklaşık olarak 150 – 230 μm aralığındaki alan olarak analiz edilmiştir ki bu alanda sıcaklık likidüs sıcaklığından ($\sim 1923\text{ K}$) düşük fakat (β) geçiş sıcaklığından ($\sim 1253\text{ K}$) [63] yüksektir. Bu alan içerisinde, yüzeye yakın kısımlarda daha büyük sıcaklık gradyanları olduğu için daha hızlı soğuma gözlenir ve sıcaklık gradyanları merkeze gidildikçe soğuma hızı düşer. Bu alan içerisindeki soğuma hızındaki farkı, (β) fazının martenzit ve ince lamelli ($\alpha+\beta$) olacak şekilde dönüşümüne olanak sağlar. Bu alanda mikro yapı yer yer lamelli ($\alpha+\beta$) ve yer yer martenzit yapıdadır. Martenzit yapının miktarı ile bağlantılı olarak, mikro sertlik değerinin yüzeyden merkeze doğru gidildikçe azalması ve bu değer EIE alanın mikro sertlik değerinden yüksek, yeniden katılaşmış alanın mikro sertlik değerinden ise düşük olması beklenir. Yapılan ölçümler neticesinde, bu yaklaşık 80 - 85 μm 'lik alanda mikro sertlik değerleri yaklaşık 360 HV seviyelerindedir ve grafikte EIE alan ile yeniden ergitilmiş alan arasında bir geçiş bölgesi şeklinde ortaya çıkmıştır. Yaklaşık 230 μm derinlik sonrasında ölçümler 365 μm derinliğe kadar devam etmiştir ve EIE alanında, yedi farklı ölçüm, 25 μm aralıklarla yapılmaya devam edilmiştir. Yüzeyden uzaklaştıkça, mikro sertlik sonuçları, 345 - 350 μm aralığında ölçülmüştür.



Resim 4.19. LP işlemi yapılan numunenin yeniden ergitilmiş, ısıdan etkilenmiş ve EIE alandaki mikro sertlik değerlerindeki değişim grafiği

Sonuç olarak, bu analiz ile yeniden ergitilmiş, ısıdan etkilenmiş ve EIE alanlarındaki mikro sertlik değerlerindeki değişimler ortaya konmuştur. LP işlemi ile ortaya çıkan bu üç alanın optik mikroskop analizi, mikro sertlik değerlerindeki değişimler ile desteklenmiştir.

4.4. Sayısal Modelleme ve Analiz Çalışmaları

LP işleminin ısısal davranışını incelerken ve doğrulamaları gerçekleştirirken COMSOL Multiphysics 5.4 yazılımı kullanılmıştır. Sayısal modelleme gerçekleştirilirken kullanılan model tasarımı, sınır koşulları ve ısı kaynağı modellemesi sırasında kullanılan denklemler üçüncü ana başlık altında anlatılmıştır. Bu başlık altında, yapılan analiz sırasında kullanılan parametreler ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Sayısal modelleme esnasında kullanılan lazer parametreleri ve geometrik parametreler, Çizelge 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Lazer ve geometri parametreleri

Lazer Parametreleri	Değer	Geometri Parametreleri	Değer
Lazer gücü (P)	475 W	En (W)	10 mm
Lazer hızı (V)	230 mm/sn	Boy (L)	3 mm
Taramalar arası mesafe (Hd)	40 μm	Yükseklik (Th)	1 mm
Lazer yarıçapı (R)	125 μm		
Puls vurum süresi (Pw)	0,0007 sn		

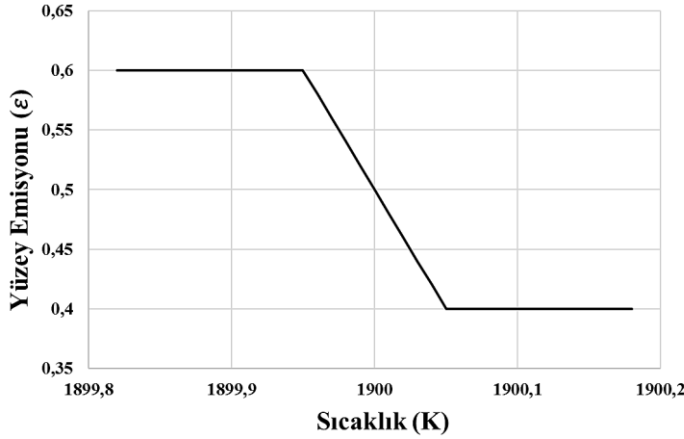
Kullanılan eşitlikler ve analizler

LP işleminin sayısal modellemesi aşağıdaki sınır koşulları hesaba katılarak tasarlanmıştır:

- Numunenin yan ve alt yüzeylerinin sıcaklığı oda sıcaklığında ($\sim 293\text{ K}$) ve sabit olarak kabul edilmiştir.
- Numunenin üst yüzeyinden konveksiyon ve radyasyon yoluyla çevre ile ısı alışverişinde bulunmaktadır.
- Lazer ışını, numunenin üst yüzeyini tarayan, odaklanmış bir yüzey ısı kaynağıdır.

Numunenin üst yüzeyinde tanımlanan taşınım ısı iletimi eşitliği (Bkz. Eş. 3.2) gösterilmiştir. Bu eşitlikte kullanılan h taşınım ısı transfer katsayısı $10\text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ [64] ve ortam sıcaklığı $T_{\text{ortam}} = 293\text{ K}$ olarak alınmıştır. Numunenin üst yüzeyinde tanımlanan radyasyon ısı

iletimi eşitliği (Bkz. Eş. 3.3) gösterilmiştir. Bu eşitlikte kullanılan ε yüzey emisyonu için Şekil 4.6'da gösterilen bir step fonksiyonu tanımlanmıştır. Buna göre, yüzey emisyon değeri, 1900 K kritik noktasında, 0,6'dan 0,4'e düşecek şekilde ve yine eşitlikte yer alan Stefan-Boltzman sabiti, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ olarak tanımlanmıştır [65].



Şekil 4.6. Sıcaklık ile yüzey emisyon parametresi ilişkisi

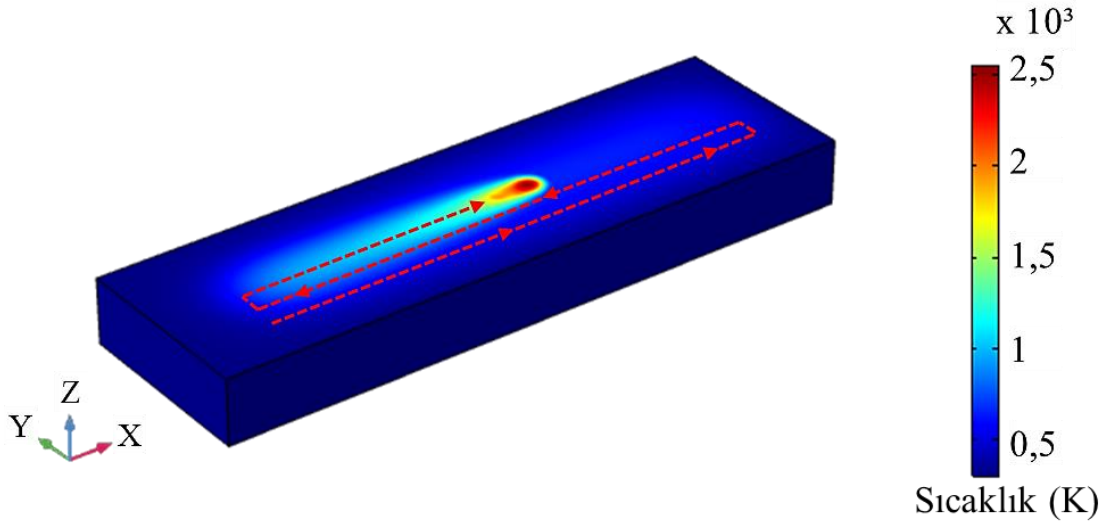
Son olarak, numune yüzeyine yerleştirilen ve zamana göre hareketini gerçekleştiren lazer ısı girdisi eşitliği Eş. 4.1'de verilmiştir.

$$Q_{lazer} = \frac{2 \cdot \alpha \cdot P \cdot Pw(t)}{\pi \cdot R^2} e^{-\frac{2((x-x_{pos})^2 + (y-y_{pos})^2)}{R^2}} \quad (4.1)$$

Burada, absorpsiyon katsayısı $\alpha = 0,271$ [66], lazer gücü $P = 430 W$, lazer ısı kaynağının yarıçap mesafesi $R = 125 \mu m$ olarak alınmıştır. Lazer frekansı saniyede 1000 atım yapacak şekildedir. Bu pals frekansı için, pals vurum süresi, Pw , gücü her bir pals için 0,0007 saniye boyunca açıp, geri kalan 0,0003 saniye için kapalı tutmaya yarayan periyodik bir fonksiyon olarak eşitliğe eklenmiştir. Eşitlikte yer alan x_{pos} ve y_{pos} bileşenleri ise, lazerin 'X' ve 'Y' yönündeki hareketini tanımlamaya yarayan bileşenlerdir.

Yapılan sayısal modellemede, Şekil 4.7'de gösterildiği gibi zik-zak tarama stratejisi ile bir lazer ısı girişi tanımlanmıştır. Lazer ısı girdisi, 'X' eksen yönünde beş gidiş ve beş dönüş hareketi yapmak üzere ayarlanmıştır. Sayısal modellemede, numune yüzeyinde $8 \times 0,4 mm$ 'lik alan taranmıştır. Başka bir deyişle simülasyon, lazer başlangıç noktasından 'X' eksen yönünde 8 mm hareket ettikten sonra, taramalar arası mesafe olan $Hd = 0,04$

mm 'Y' ekseninde hareketini gerçekleştirip, tekrar 8 mm geri gelecek şekilde ayarlanmıştır. Lazerin zik-zak hareketi, on kere tekrarlandıktan sonra sona ermiştir. Deneysel çalışmalardaki LP alanın boyutları, işlemin kısa sürmesi amacıyla bu şekilde revize edilmiştir. LP işlemi simülasyonu, yaklaşık olarak 30 saat sürmüştür. İşlem sırasında, zaman adımı 0,0025 sn olarak belirlenmiş ve işlem toplamda 0,35 sn sürmüştür.



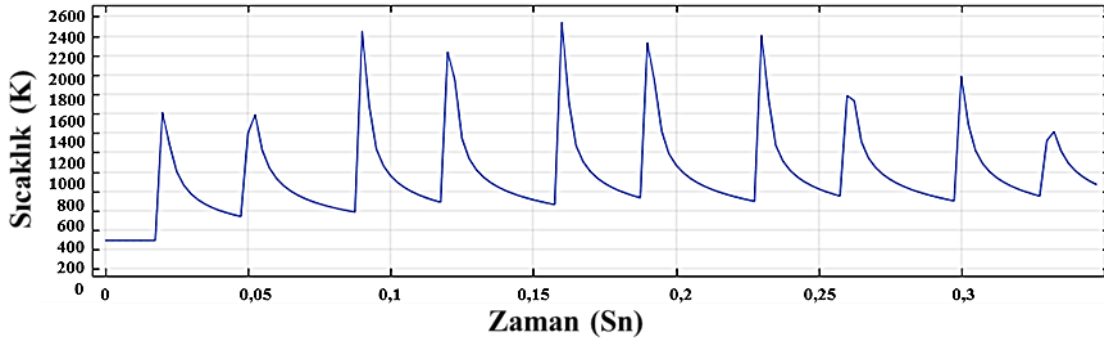
Şekil 4.7. Sayısal modellemede lazer ısı girdisinin simülasyonu

LP işleminin ısısal davranışı incelenirken, lazerin geçtiği noktalar için, Ti-6Al-4V numunesinin likidüs ve (β) geçiş sıcaklığına ulaştığı sıcaklıklar dikkate alınmalıdır. Ti-6Al-4V numunesi için tam martenzit yapının oluşmasını sağlayacak soğuma hızı $410\text{ }^{\circ}\text{C/sn}$ ve üstünde olmalıdır [67]. Ayrıca literatürde Ti-6Al-4V numunesi için martenzit ayrışma sıcaklığının en düşük 673 K olabileceği ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Başka bir deyişle, mikro yapıdaki değişim, sıcaklığın en düşük 673 K olduğu yerlerde gözlemlenebilir. Daha düşük sıcaklıklarda, mikro yapı değişmez [67,68]. Bu sebeple, çalışmada kritik sıcaklık 673 K olarak alınmıştır.

Şekil 4.7'deki görüntüde lazer, parlatma yapılan alanın tam orta noktasındaki konumundadır. Lazer bu konuma, $t = 0,16$ saniye sonunda ulaşmıştır. Şekil 4.8, tam orta noktanın, LP işlem süresi boyunca sıcaklığının zamana göre değişimini gösteren grafiğini göstermektedir. Grafikte de gösterildiği gibi, lazer orta noktaya her yaklaştığında ve uzaklaştığında, sıcaklık anlık olarak çok hızlı bir biçimde yükselmiş ani bir şekilde düşmüştür. On kere tekrarlanan, sıcaklıktaki bu ani yükseliş ve düşüşün nedeni, lazerin ilgili

noktanın önceki veya sonraki tarama yoluna ulaşması olarak yorumlanabilir. Lazer, ilgili orta noktanın sıcaklığını birkaç defa likidüs sıcaklığının (~ 1923 K) [69] üzerine yaklaşık 2550 K seviyelerine çıkarmış ve daha sonra sıcaklık çok hızlı bir şekilde düşmüştür. Genel olarak sıcaklık yaklaşık 1923 K seviyelerini her geçtiğinde, ilgili nokta ergiyecek ve faz dönüşümü tekrar gerçekleşecektir. Bu aşamada soğuma hızı çok önemli bir rol oynar. Ergiyen malzemenin sıcaklığı, 0,0003 saniye sonra likidüs sıcaklığının altına, yaklaşık 1900 K seviyelerine gelmiştir. Bu aşamada, ergiyen noktanın soğuma hızı, yaklaşık olarak 10^6 K/sn'dir.

Buna ek olarak, yüzey sıcaklığının likidüs sıcaklığı ile (β) geçiş sıcaklığı (~ 1253 K) [70] arasındaki soğuma hızı da incelenmelidir. Yapılan analizler neticesinde, bu aralıkta soğuma hızı yaklaşık olarak 10^5 K/sn olarak gözlemlenmiştir. Son olarak, 1253 K ile kritik sıcaklık olarak kabul edilen 673 K arasındaki soğuma da yaklaşık olarak 20×10^3 K/sn olarak belirlenmiştir.

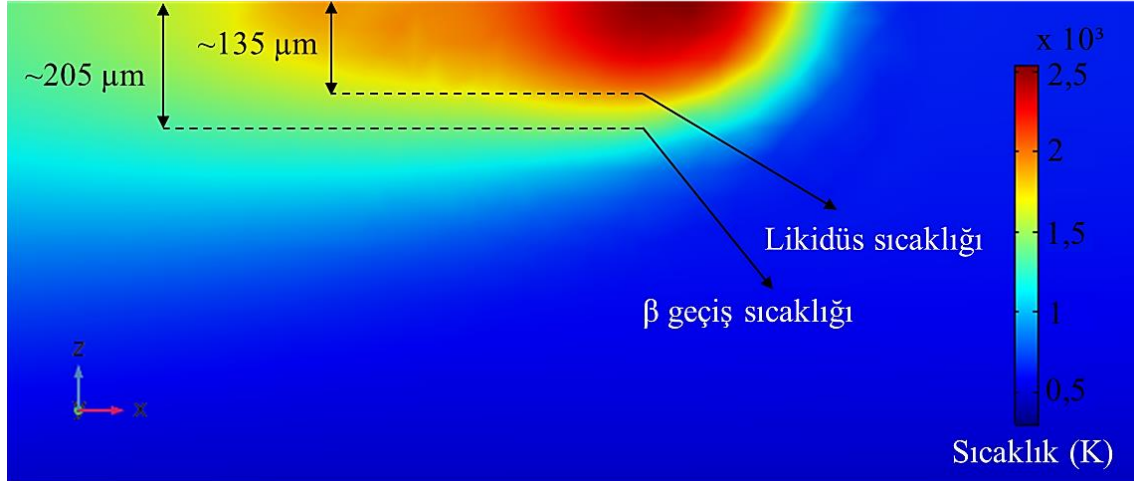


Şekil 4.8. LP sırasında, parlatılan alanın orta noktasının sıcaklığının zamana göre değişim grafiği

Yapılan bu çalışmalar neticesinde, LP işlemi sonucu elde edilen soğuma hızları ve kritik sıcaklıklar dikkate alındığında, yeniden ergitilmiş ve ısıdan etkilenmiş bölgenin soğuma hızlarının oldukça yüksek olduğu ve yapının martenzit yapıda olacağı doğrulanmıştır.

Şekil 4.9, lazerin yüzeyde bir noktadan geçerken o bölgeyi ve hemen altındaki alanı ulaştırdığı sıcaklık değerlerini göstermektedir. Ti-6Al-4V numunesinin likidüs sıcaklığı yaklaşık 1923 K'dir [71]. Yapılan analize göre, yüzey yaklaşık 2500 K seviyelerine ulaşmış ve yüzeyden yaklaşık 135 μ m derinlikte sıcaklık yaklaşık 1923 K'e düşmüştür. Bu alan yeniden ergimiş alan olarak analiz edilmiştir. Alaşım numunesinin (β) geçiş sıcaklığı

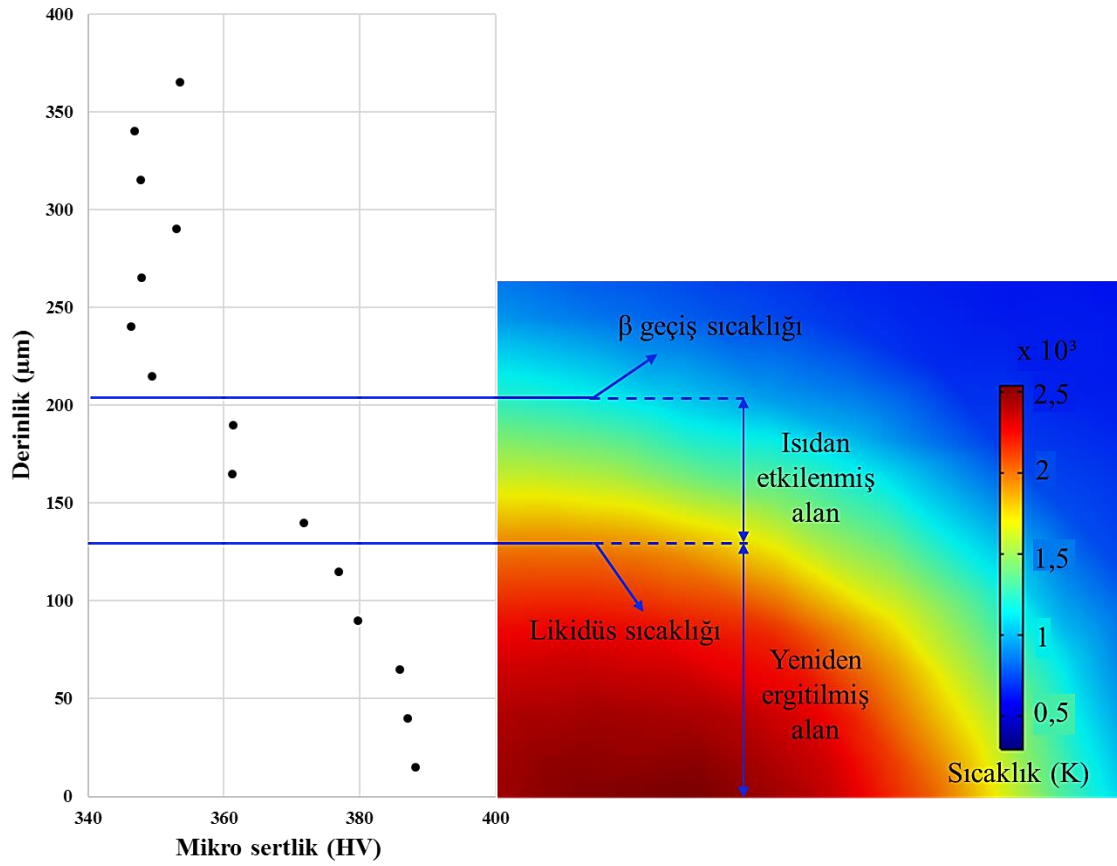
yaklaşık 1253 K'dir [70]. Dolayısıyla, sıcaklığın 1923 ile 1253 K arasında ölçüldüğü alan, ısıdan etkilenmiş alan olarak analiz edilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi yaklaşık 70 μm olarak ölçülen geçiş bölgesi, yaklaşık olarak yüzeyden 135 μm derinlikten başlayarak 205 μm derinlikte son bulmaktadır.



Şekil 4.9. Sayısal modellemelerde likidüs sıcaklığı ve (β) geçiş sıcaklığı bölgelerinin ulaştığı derinliklerinin gösterimi

Yapılan bu analizleri doğrulamak için, sayısal analizler ile ortaya çıkan sonuçlar ile mikro sertlik analiz sonuçları Şekil 4.10'da gösterildiği gibi karşılaştırılmıştır. Analizde EIE bölgesindeki, ısıdan etkilenmiş alandaki ve yeniden ergitilmiş alandaki mikro sertlik değerlerindeki değişimler ile sayısal modelleme ile ortaya çıkan sonuçlar birbiri ile örtüşmüştür.

Deneysel çalışmalar neticesinde, mikro sertlik değerleri yeniden ergitilmiş alanda daha yüksek ölçülmüştür ve yüzeyde maksimum olan mikro sertlik değeri, yüzeyden yaklaşık 130 - 135 μm derinliğe kadar yavaş yavaş azalma eğilimindedir. Isıdan etkilenmiş alan olarak belirlenen yaklaşık 135 - 215 μm aralığında, mikro sertlikte ani bir düşüş gözlemlenmiştir. Bu bölgedeki mikro sertlik değerleri yeniden ergitilmiş alandan daha düşük fakat EIE alandan daha yüksek ölçülmüştür. Son olarak EIE alanda (215 μm derinlik ve sonrasında), mikro sertlik değerleri literatürden elde edilen değerlere paralel değerlerde ölçülmüş ve mikro sertlikteki dağılım ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.10. Sayısal modelleme ile ortaya çıkan sonuçlar ile mikro sertlik analizi sonuçlarının karşılaştırılması

Sayısal modellemede yaklaşık olarak elde edilen yeniden ergitilmiş ve ısıdan etkilenmiş alanların derinlikleri, deneysel sonuçlarda elde edilen optik mikroskop analizler sonuçları ile kıyaslanmıştır. Sayısal modelleme sonuçlarında elde edilen likidüs ve (β) geçiş sıcaklığının gözlemlendiği derinlikler, hem optik mikroskop analizindeki mikro yapı değişikliğinin ortaya konulması ile hem de yaklaşık olarak aynı derinliklerde mikro sertlik değerlerindeki bulgular ile doğrulanmış ve çalışmalarının birbiri ile örtüştüğü sonucuna varılmıştır. Buna göre, deneysel çalışmalar neticesinde, mikro yapı ve mikro sertlik analizleri ile yapılan çalışmalar ile yeniden ergimiş alan derinliği yaklaşık olarak 130 μm olarak bulunmuştur. Sayısal modelleme sonucunda, likidüs sıcaklığına, yaklaşık 135 μm 'de ulaşılmıştır. Bu bölge için sonuçlar yaklaşık % 95 oranında birbiri ile örtüşmüştür. Ayrıca, ısıdan etkilenen alan, deneysel sonuçlara istinaden yaklaşık olarak 225 μm derinlikte gözlemlenirken, bu sonuç sayısal modellemede yaklaşık olarak 205 μm seviyesindedir. Bu bölge için ise sonuçlar yaklaşık % 90 oranında birbiri ile örtüşmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında toz yataklı eklemeli imalat yöntemlerinden SLE ile üretilen Inconel 718 numunesi ve EIE ile üretilen Ti-6Al-4V numunesi yüzeylerine LP işlemi uygulanmıştır. LP işlemi esnasında yüzeyde oluşan ısı davranış etkileri ile numunelerin yüzey bütünlüğü incelenmiştir. Bu kapsamda yüzey morfolojisi ile birlikte kesitsel alandaki mikro yapı ve mikro sertlik özellikleri analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında, LP sonucu oluşan yüzey kusurları, lazer parametrelerinin yüzey morfolojisi üzerine etkileri ve yüzey bütünlüğü incelenmiştir. Doktora çalışması ile elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- LP işlemi yapılan yüzeylerde, kusurlar ortaya çıkmıştır. Bu kusurlar, soğuma hızına bağlı olarak ortaya çıkan termal gradyanların sebep olduğu mikro çatlaklar, işlemin atmosfere açık olarak gerçekleştirilmesine bağlı olarak ortaya çıkan oksidasyon ve lazerin tarama stratejisine bağlı olarak ortaya çıkan sınırlarda malzeme birikmesi olarak sıralanmıştır.
- Oksidasyon sorununun ortadan kaldırılması için işlem koruyucu gaz altında gerçekleştirilirken, sınırda malzeme birikimini önlemek için zik-zak tarama stratejisi kullanılmıştır. Mikro çatlak kusuru ise, parametrik çalışmalar ile ısı girdisi kontrol edilerek önlenmiştir.
- EIE ile üretilen Ti-6Al-4V alaşım numunesi yüzeyine yapılacak LP işlemleri için, deney tasarımı oluşturulmuş ve lazer gücü, tarama hızı, taramalar arası mesafe ve pals vurum süresi için minimum ve maksimum parametre değerleri ayarlanmıştır. LP işlemleri, her bir deney seti ile numune yüzeylerine ayrı ayrı uygulanmıştır.
- Yapılan yüzey morfolojisi çalışmaları ile yüzey pürüzlülük değerleri S_a , S_q , S_z , S_{sk} ve S_{ku} matematiksel olarak ölçülmüştür. Ayrı ayrı analiz edildiğinde, yapılan her deney için, S_a , S_q ve S_z değerleri, başlangıç yüzeye göre azalma göstermiştir. S_a ve S_q değerlerinde yaklaşık %71 ile %94 arasında ve S_z değerlerinde ise yaklaşık %62 ile %92 arasında iyileştirme yapılmıştır. Bazı deneylerde S_{sk} değeri neredeyse sıfıra ve bazı deneylerde ise S_{ku} değeri tam olarak üçe eşit çıkmıştır.
- Elde edilen beş pürüzlülük değerinin sonuçları aynı anda istenilen değerlerde çıkabilmesi için, lazer parametreler istatistiksel olarak optimize edilmiş ve ortaya yeni bir parametre seti çıkmıştır.
- İstatistiksel olarak ortaya çıkan bu deney seti, lazer gücü 478 W, tarama hızı 230 mm/sn, taramalar arası mesafe 0,04 ve pals vurum süresi 0,0007 sn olarak belirlenmiştir. Bu parametre seti, deney çalışmaları ve sayısal modelleme çalışmaları ile doğrulanmıştır.

- SLE ile üretilen Inconel 718 alaşım numunesi yüzeyine yapılacak LP işlemleri için deney tasarımı oluşturulmuştur. Bu çalışmada, taramalar arası mesafe ve pals vurum süresi sabit tutularak, lazer gücü ve tarama hızı parametrelerinin sırasıyla Sa ve Sz değerleri üzerine etkileri incelenmiştir.
- Yapılan yüzey morfolojisi çalışmaları ile yüzey pürüzlülük değerleri Sa ve Sz, matematiksel olarak ölçülmüştür. Aynı ayrı analiz edildiğinde, yapılan her deney için, bu değerler, başlangıç yüzeye göre azalma göstermiştir. Başlangıç değerlerine göre, Sa değerlerinde yaklaşık %76 ile %90 arasında ve Sz değerlerinde ise yaklaşık %56 ile %77 arasında iyileştirme yapılmıştır.
- Sabit hızlarda, lazer gücü parametresinin Sa ve Sz değerlerine olan etkileri incelenmiş ve bu ilişki analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, sırasıyla 0,03 mm taramalar arası mesafe ve 0,0007 sn pals vurum süresi için en iyi sonuca, 340 W lazer gücü ve 285 mm/sn tarama hızı ile ulaşılmıştır.
- EIE ile üretilen Ti-6Al-4V alaşım numunesi için elde edilen optimize edilmiş parametre seti ile numune yüzeyine LP işlemleri yapılarak, istatistiksel verilerle deneysel veriler kıyaslanmıştır.
- Numune yüzeyinin morfolojik analizi yapılmış, Sa ve Sq değerlerinde yaklaşık %88 ve Sz değerlerinde ise yaklaşık %87 oranında iyileştirme yapıldığı gözlemlenmiştir. Başlangıçta sırasıyla 0,16 ve 3,87 olarak ölçülen Ssk ve Sku değerleri, bu deney sonucunda sırasıyla -0,09 ve 3,50 olarak ölçülmüş ve bu sonuçlar oldukça tatmin edici sonuçlar olarak kayıtlara geçmiştir.
- İstatistiksel ve deneysel sonuçlar birbiriyle örtüşen neticelere sahip olsa da, deneysel çalışmalara lazer gücü kademeli artırılarak devam edilmiştir. Yanıt yüzeyi yöntemi analizi sonucunda lazer gücü, pürüz azalımındaki en önemli faktör olarak ortaya çıktığı için, lazer gücündeki değişimler, sonraki üç deney ile incelenmiştir.
- Lazer gücünün kademeli artırılarak devam edilen deneylerde, Sa, Sq ve Sz değerleri, işlem yapılmamış yüzeye kıyasla düşürülmüş olsa da, birinci ve ikinci deney sonuçlarına göre oldukça yüksektir.
- Lazer gücünün çok yüksek değerlendirilebilecek bir değer olan 600 W olarak seçilen son deneyde alınan sonuçlara göre pürüzlülük değerleri, birinci ve ikinci deney sonuçlarına yakın çıkmıştır. Fakat yapılan morfolojik analizler neticesinde yüzeyde dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Bu deneyde, ısı girdisinin yüzey dalgalanması kusurunun oluşmasında önemli faktör olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

- Yapılan deneysel çalışmaların yüzey bütünlüğü analizleri kapsamında, yüzeyin morfolojisi, pürüzlülük değerleri, işlem görmemiş yüzey ile LP yüzeyin morfolojisinin kıyası yapılmış ve analizler sonuçlandırılmıştır. Yüzey bütünlüğü analizleri kapsamında hem SLE hem de EIE ile üretilen numunelerin LP işlemleri sonrasındaki yüzey ve yüzey altının mikro yapı ve mikro sertlik analizleri yapılmıştır.
- İlk olarak SLE ile üretilen Inconel 718 alaşım numunesinin yüzeyine yapılan LP işlemi incelenmiştir. Lazerin yeniden ergitme tabakasının kalınlığının yaklaşık olarak 100 - 110 μm aralığında ölçülmüştür. Lazer tarama hızının daha yüksek olduğu çalışmada yeniden ergitilmiş ve ısıdan etkilenmiş bölgenin derinliği daha düşük ölçülmüştür.
- SLE ile üretildikten sonra numunede büyük boyutlu dendritik ve sütun şeklinde yapılar dikkat çekmiştir. Numunenin mikro yapısı ve üretim sırasındaki lazer tarama yolları tarafından ortaya çıkan katmanların ayrışma modelleri, LP işleminden sonra ortadan kaldırılmıştır.
- LP işleminden sonra numunelerin sertlik değerlerinin kayda değer bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Üretim sonrası yaklaşık 365 HV sertliğe sahip olan Inconel 718 parçaları farklı LP parametreleri ile işlendikten sonra sertlik değerleri yüzeye yakın kısımlarda yaklaşık 24 ile 66 HV arasında artış göstermiştir.
- Yüzeye yakın olan bölgelerde (0 – 15 μm) sertlik değerinin daha fazla arttığı ve 431 HV değerine kadar ulaştığı görülmüştür. Yüzeyden uzaklaştıkça, sertlik değerinin düştüğü ve 375 – 400 HV değerlerinde değiştiği gözlemlenmiştir. Lazerin ısı etkisinin yitirildiği 100 μm ve daha derin yerlerdeki ölçümler, üretim sonrası sertliğine (365 HV) yaklaşmıştır ve bu derinlikten sonra LP işlemi, malzeme sertliğine etki etmemektedir. Sertlikteki bu dağılımın nedeni, yüzey ile yüzey altında malzemenin mikro yapı değişimidir. Soğuma hızındaki fark malzemenin sertliğini önemli ölçüde etkilemektedir.
- Bir sonraki aşamada, EIE ile üretilen Ti-6Al-4V alaşım numunesinin yüzeyine yapılan LP işlemi incelenmiştir. Yeniden ergimiş alan, başka bir deyişle sıcaklığın Ti-6Al-4V numunesinin ergime sıcaklığı olan yaklaşık 1923 K'ne ulaştığı bölgelerde, tam ($\beta \rightarrow \alpha'$) faz dönüşümü gözlemlenmiştir. Bu bölgelerde mikro yapı iğnemsisi (α') yapıdadır.
- Daha derinliğe gidildiğinde, sıcaklığın (β) geçiş sıcaklığı olan yaklaşık 1253 K olarak ölçüldüğü tabaka ısıdan etkilenen alan olarak gösterilmiştir. Bu tabakada da ($\beta \rightarrow \alpha'$) faz dönüşümünün, (β) geçiş sıcaklığının ölçüldüğü alanlara kadar gözlemlenmiştir. Soğuma hızına bağlı olarak bu tabakada, martenzitik ve lamelli yapılar bulunmaktadır.

- Daha da derinlere gidildikçe, numune LP işleminden etkilenmemiştir ve EIE malzemesindeki tipik lamelli ($\alpha+\beta$) yapısına sahiptir.
- LP işleminin etkisinin gözlemlenmediği yaklaşık 200 μm derinlikten sonraki ölçümlerde, yaklaşık olarak 345 – 355 HV aralığında mikro sertlik değerleri ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlar, literatürde elde edilen sonuçlarla örtüşmektedir.
- LP işleminin uygulandığı yüzeyden, 15 μm mesafeden alınan mikro sertlik değeri, 388,2 HV olarak ölçülmüştür. Parlatılmış yüzeyin sertliği, söz konusu malzemenin sertliğine göre %12,5 oranında artmıştır. Mikro yapı analizi ile birlikte analiz edildiğinde, LP işlemi ile ergiyip katılaştıran alandaki iğnemsî (α') yapıların sertliği arttırdığı sonucuna, bu yapıların lamelli ($\alpha+\beta$) yapısından daha sert bir yapıda olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- LP işlemi yapılan numunedeki, yeniden ergitilmiş, ısıdan etkilenmiş ve EIE alandaki mikro sertlik değerlerindeki değişim analiz edilmiştir. Optik mikroskop analizinde, lazerin etkisi ile ergiyip yeniden katılaştıran alan yaklaşık olarak 130 – 150 μm olarak gözlemlenmiştir. Bu alanda, mikro sertlik değerleri yaklaşık olarak 375 – 385 HV aralığında değişmektedir.
- Isıdan etkilenen alan, yaklaşık olarak 150 – 230 μm aralığındaki alan olarak analiz edilmiştir. Yapılan ölçümler neticesinde, bu yaklaşık 80 - 85 μm 'lik alanda mikro sertlik değerleri yaklaşık 360 HV seviyelerindedir ve EIE alan ile yeniden ergitilmiş alan arasında bir geçiş bölgesi şeklinde ortaya çıkmıştır.
- Yaklaşık 230 μm derinlik sonrasında ölçümler 365 μm derinliğe kadar devam etmiştir ve EIE alanında, yedi farklı ölçüm, 25 μm aralıklarla yapılmaya devam edilmiştir. Yüzeyden uzaklaştıkça, mikro sertlik sonuçları, 345 – 350 μm aralığında ölçülmüştür.
- Sonuç olarak, bu analiz ile yeniden ergitilmiş, ısıdan etkilenmiş ve EIE alanlarındaki mikro sertlik değerlerindeki değişimler ortaya konmuştur. LP işlemi ile ortaya çıkan bu üç alanın optik mikroskop analizi, mikro sertlik değerlerindeki değişimler ile desteklenmiştir.
- Sayısal modelleme, EIE ile üretilen Ti-6Al-4V alaşım numunesi yüzeyine optimize edilmiş lazer parametreleri ile yapılmış LP işleminin ısı davranışını doğrulamak için yapılmıştır.
- Sayısal analizler sonuçları ile mikro sertlik analiz sonuçları karşılaştırıldığında, EIE bölgesindeki, ısıdan etkilenmiş alandaki ve yeniden ergitilmiş alanda ölçülen mikro sertlik değerlerindeki değişimler, sayısal modelleme ile ortaya çıkan sonuçlar birbiri ile örtüşmüştür.

- Sayısal modellemede yaklaşık olarak elde edilen yeniden ergitilmiş ve ısıdan etkilenmiş alanların derinlikleri, optik mikroskop analizleri ile kıyaslanmıştır. Sayısal modelleme ile elde edilen likidüs ve (β) geçiş sıcaklığının gözlemlendiği derinlikler yeniden ergimiş alan için yaklaşık % 95 oranında ve ısıdan etkilenmiş alan için yaklaşık % 90 oranında birbiri ile örtüşmüştür.

5.1. Katkı ve Öneriler

Bu tez çalışmasında toz yataklı eklemeli imalat yöntemlerinden sırasıyla SLE ve EIE ile üretilmiş Inconel 718 ve Ti-6Al-4V alaşım numunelerinin yüzeylerine uygulanan LP işlemi analiz edilmiştir. İlk olarak, LP işlemi ile ortaya çıkabilecek yüzey kusurları belirlenmiş ve bu kusurların giderilmesi için çözümler sunulmuştur. Deney tasarımları oluşturulmuş ve parametre çalışmaları ile numuneler üzerinde kullanılabilecek optimize edilmiş lazer parametreleri tayin edilmiştir. LP işleminin yüzey bütünlüğü üzerine etkisi araştırılmış ve morfolojik özelliklere ek olarak, parlatma işleminin mikro yapı ve mikro sertlik üzerine etkileri incelenmiştir. Böylece, kesit alınan numunelerdeki yeniden ergitilmiş ve ısıdan etkilenmiş alanların yüzeyden ne kadar derinliklerde görüldüğü belirlenmiştir. Sayısal modelleme ile ilgili derinliklerdeki sıcaklıklar belirlenerek, yeniden ergitilmiş ve ısıdan etkilenmiş alanın ulaştığı derinlik doğrulanmıştır. Böylece, herhangi bir deneye ihtiyaç duymadan sayısal modelleme ile lazer ısı girdisinin etkisi analiz edilebilecektir.

Tez çalışması gereği, alaşım numunesi ve eklemeli imalat yöntemi belirlenmiş ve belirli bir numune üzerinden çalışmalar genişletilerek nihai bir sonuca ulaştırılmıştır. Dolayısıyla, başka bir üretim yöntemi ve farklı bir alaşım numunesi yüzeyine uygulanacak LP işleminin etkileri ile ilgili çalışmalar yapılabilir. Tez çalışmasında geliştirilen modellemede sadece ısı analizler gerçekleştirilmiş ve model ısı olarak doğrulanmıştır. Gelecek bir çalışmada çoklu fizik modelleme yapılarak, ısı davranışının etkisi ile pürüzlerin malzeme yüzeyindeki ergiyip katılma süreci araştırılabilir. Mikro yapıdaki fazların hangi oranlarda bulunduğunu hesaplamak için detaylı iç yapı analizleri yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Gibson I., Rosen D. W., and Stucker B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies*, (First Edition). Boston, USA: Springer, 1-3.
2. American Society for Testing and Materials. (2015). *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, West Conshohocken, Pennsylvania: American Society for Testing and Materials (ASTM), 1-3.
3. Leary M., Mazur M., Williams H., Yang E., Alghamdi A., Lozanovski B., Zhang X., Shidid D., Farahbod-Sternahl L., Witt G., Kelbassa I., Choong P., Qian M., and Brandt M. (2018). Inconel 625 lattice structures manufactured by selective laser melting (SLM): Mechanical properties, deformation and failure modes. *Materials and Design*, 157(1), 179–199.
4. Chen C., and Tsai H. L. (2018). Fundamental study of the bulge structure generated in laser polishing process. *Optics and Lasers in Engineering*, 107, 54-61.
5. Li J., and Zuo D. (2021). Laser polishing of additive manufactured Ti6Al4V alloy: a review. *Optical Engineering*, 60(2), 1-16.
6. Ma C. P., Guan Y. C., and Zhou W. (2017). Laser polishing of additive manufactured Ti alloys. *Optics and Lasers in Engineering*, 93, 171-177.
7. Liang C., Hu Y., Liu N., Zou X., Wang H., Zhang X., Fu Y., and Hu J. (2020). Laser polishing of Ti6Al4V fabricated by selective laser melting. *Metals*, 10(2), 1-13.
8. McDonald M. W., Gora W. S., Stevenson S. G., Weston N. J., and Hand D. P. (2020). Practical implementation of laser polishing on additively manufactured metallic components. *Journal of Laser Applications*, 32(4), 042019.
9. Obeidi M. A., McCarthy E., O'Connell B., Ahad I. U., and Brabazon D. (2019). Laser polishing of additive manufactured 316L stainless steel synthesized by selective laser melting. *Materials*, 12(6), 1-15.
10. Lambarri J., Leunda J., Soriano C., and Sanz C. (2013). Laser surface smoothing of nickel-based superalloys. *Physics Procedia*, 41, 255-265.
11. Allevi G., Cibeca M., Fioretti R., Marsili R., Montanini R., and Rossi G. (2018). Qualification of additively manufactured aerospace brackets: A comparison between thermoelastic stress analysis and theoretical results. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 126, 252–258.
12. Chai Y., Li R. W., Perriman D. M., Chen S., Qin Q. H., and Smith P. N. (2018). Laser polishing of thermoplastics fabricated using fused deposition modelling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96 (9-12), 4295–4302.
13. Frazier W. E. (2014). Metal additive manufacturing: A review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1917-1928.
14. Krishnan A., and Fang F. (2019). Review on mechanism and process of surface

- polishing using lasers. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 14(3), 299-319.
15. Temmler A., Willenborg E., and Wissenbach K. (2012). Laser Polishing. *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XVII*, 8243, 82430W.
 16. Schanz J., Hofele M., Hitzler L., Merkel M., and Riegel H. (2016). Laser polishing of additive manufactured alsi10mg parts with an oscillating laser beam. *Advanced Structured Materials*, 61, 159-169.
 17. Yung K. C., Zhang S. S., Duan L., Choy H. S., and Cai Z. X. (2019). Laser polishing of additive manufactured tool steel components using pulsed or continuous-wave lasers. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105 (1-4), 425-440.
 18. Nesli S., and Yilmaz O. (2021). Surface characteristics of laser polished Ti-6Al-4V parts produced by electron beam melting additive manufacturing process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114 (1-2), 271-289.
 19. Halina A. (2005). *Introduction to Laser Spectroscopy*, (First Edition). Amsterdam, Netherlands: Elsevier 1-7.
 20. Mohajerani S., Miller J. D., Tutunea-Fatan O. R., and Bordatchev E. V. (2017). Thermo-Physical Modelling of Track Width During Laser Polishing of H13 Tool Steel. *Procedia Manufacturing*, 10, 708-719.
 21. Lamikiz A., Sánchez J. A., López de Lacalle L. N., and Arana J. L. (2007). Laser polishing of parts built up by selective laser sintering. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47 (12-13), 2040–2050.
 22. Heckman J. J., Pinto R., and Savelyev P. A. (2010). *Surface Integrity in Machining*. London, England: Springer-Verlag, 143-181.
 23. International Organization for Standardization. (1999). *ISO 4287:1997, Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Terms, definitions and surface texture parameters*, 1-38.
 24. International Organization for Standardization. (2012). *ISO 25178-2:2030, Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Areal - Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters*, 1-54.
 25. Ćwikła M., Dziedzic R., and Reiner J. (2021). Influence of overlap on surface quality in the laser polishing of 3d printed inconel 718 under the effect of air and argon. *Materials*, 14(6) 1-20.
 26. Zhang D., Yu J., Li H., Zhou X., Song C., Zhang C., Shen S., Liu L., and Dai C. (2020). Investigation of laser polishing of four selective laser melting alloy samples. *Applied Sciences*, 10(3), 1-13.
 27. Kumstel J., and Kirsch B. (2013). Polishing titanium- and nickel-based alloys using cw-laser radiation. *Physics Procedia*, 41, 362-371.
 28. Gora W. S., Tian Y., Cabo A. P., Ardron M., Maier R. R. J., Prangnell P., Weston N. J.,

- and Hand D. P. (2016). Enhancing surface finish of additively manufactured titanium and cobalt chrome elements using laser based finishing. *Physics Procedia*, 83, 258-263.
29. Rosa B., Mognol P., and Hascoët J. (2015). Laser polishing of additive laser manufacturing surfaces. *Journal of Laser Applications*, 27(S2), S29102.
 30. Tian Y., Gora W. S., Cabo A. P., Parimi L. L., Hand D. P., Tammam-Williams S., and Prangnell P. B. (2018). Material interactions in laser polishing powder bed additive manufactured Ti6Al4V components. *Additive Manufacturing*, 20, 11-22.
 31. Zhihao F., Libin L., Longfei C., and Yingchun G. (2018). Laser Polishing of Additive Manufactured Superalloy. *Procedia CIRP*, 71, 150-154.
 32. Bhaduri D., Penchev P., Batal A., Dimov S., Soo S. L., Sten S., Harrysson U., Zhang Z., and Dong H. (2017). Laser polishing of 3D printed mesoscale components. *Applied Surface Science*, 405, 29-46.
 33. Zhou J., Han X., Li H., Liu S., Shen S., Zhou X., and Zhang D. (2021). In-situ laser polishing additive manufactured alsi10mg: Effect of laser polishing strategy on surface morphology, roughness and microhardness. *Materials*, 14(2), 1-19.
 34. Solheid J. S., Mohanty S., Bayat M., Wunsch T., Weidler P. G., Seifert H. J., and Pfleging W. (2020). Laser polishing of additively manufactured Ti-6Al-4V: Microstructure evolution and material properties. *Journal of Laser Applications*, 32(2), 022019.
 35. Ramos J. A., and Bourell D. L. (2002). Modeling of surface roughness enhancement of indirect-SLS metal parts by laser surface polishing. *Proceedings of the TMS Fall Meeting*, 191-202.
 36. Ramos J. A., Bourell D. L., and Beaman J. J. (2003). Surface over-melt during laser polishing of indirect-SLS metal parts. *Materials Research Society Symposium - Proceedings*, 758, 53-61.
 37. Marimuthu S., Triantaphyllou A., Antar M., Wimpenny D., Morton H., and Beard M. (2015). Laser polishing of selective laser melted components. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 95, 97-104.
 38. Shao T. M., Hua M., Tam H. Y., and Cheung E. H. M. (2005). An approach to modelling of laser polishing of metals. *Surface and Coatings Technology*, 197(1), 77-84.
 39. Ma C., Vadali M., Duffie N. A., Pfefferkorn F. E., and Li X. (2013). Melt pool flow and surface evolution during pulsed laser micro polishing of Ti6Al4V. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 135(6), 1-8.
 40. Perry T. L., Werschmoeller D., Li X., Pfefferkorn F. E., and Duffie N. A. (2009). The effect of laser pulse duration and feed rate on pulsed laser polishing of microfabricated nickel samples. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 131(3), 0310021-0310027.
 41. Yilbas B. S., Akhtar S. S., and Keles O. (2015). Laser cutting of small diameter hole in aluminum foam. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79(1-

- 4), 101-111.
42. Yilbas B. S., Akhtar S. S., Keles O., and Boran K. (2015). Laser cutting of triangular geometry into 2024 aluminum alloy: Influence of triangle size on thermal stress field. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(8), 3239–3248.
 43. Karmoker J. R., Hasan I., Ahmed N., Saifuddin M., and Reza M. S. (2019). Development and Optimization of Acyclovir Loaded Mucoadhesive Microspheres by Box - Behnken Design. *Dhaka University Journal of Pharmaceutical Sciences*, 18(1), 1-12.
 44. Cross C. E. (2005). On the origin of weld solidification cracking. *Hot Cracking Phenomena in Welds*, 3-18.
 45. Yusof F., and Jamaluddin M. F. (2014). Welding Defects and Implications on Welded Assemblies. *Comprehensive Materials Processing*, 6, 125-134.
 46. Kadoi K., Fujinaga A., Yamamoto M., and Shinozaki K. (2013). The effect of welding conditions on solidification cracking susceptibility of type 310S stainless steel during laser welding using an in-situ observation technique. *Welding in the World*, 57(3), 383-390.
 47. Dupont J., Lippold J. K. S. (2009). *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys*, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc., 118-123.
 48. Ardakani H. A., and Naffakh-Moosavy H. (2019). The effect of pulsed Nd:YAG laser welding parameters on defects of Kovar to AISI 304L dissimilar joint. *Optics and Laser Technology*, 118(2019), 62-68.
 49. Dong E., Yu W., Cai Q., Cheng L., and Shi J. (2017). High-Temperature Oxidation Kinetics and Behavior of Ti–6Al–4V Alloy. *Oxidation of Metals*, 88 (5-6), 719-732.
 50. Huang L., Cao Y., Li G., and Wang Y. (2020). Microstructure characteristics and mechanical behaviour of a selective laser melted Inconel 718 alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 2440-2454.
 51. Amato K. N., Gaytan S. M., Murr L. E., Martinez E., Shindo P. W., Hernandez J., Collins S., and Medina F. (2012). Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting. *Acta Materialia*, 60(5), 2229–2239.
 52. Cao G. H., Sun T. Y., Wang C. H., Li X., Liu M., Zhang Z. X., Hu P. F., Russell A. M., Schneider R., Gerthsen D., Zhou Z. J., Li C. P., and Chen G. F. (2018). Investigations of γ' , γ'' and δ precipitates in heat-treated Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting. *Materials Characterization*, 136, 398-406.
 53. Maj P., Adamczyk-Cieslak B., Slesik M., Mizera J., Pieja T., Sieniawski J., Gancarczyk T., and Dudek S. (2017). The precipitation processes and mechanical properties of aged inconel 718 alloy after annealing. *Archives of Metallurgy and Materials*, 62(3), 1695-1702.
 54. Park H., and Park J. (1972) Precipitation in Inconel 718 Alloy. *Nuclear Engineering and Technology*, 4(3), 203-213.

55. Liu Y., Ouyang W., Wu H., Xu Z., Sheng L., Zou Q., Zhang M., Zhang W., and Jiao J. (2021). Improving surface quality and superficial microstructure of LDED Inconel 718 superalloy processed by hybrid laser polishing. *Journal of Materials Processing Technology*, 300, 117428.
56. Körner C. (2016). Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting - A review. *International Materials Reviews*, 61(5), 361–377.
57. Murr L. E., Martinez E., Amato K. N., Gaytan S. M., Hernandez J., Ramirez D. A., Shindo P. W., Medina F., and Wicker R. B. (2012). Fabrication of metal and alloy components by additive manufacturing: Examples of 3D materials science. *Journal of Materials Research and Technology*, 1(1), 42-54.
58. Ahmed T., and Rack H. J. (1998). Phase transformations during cooling in $\alpha + \beta$ titanium alloys. *Materials Science and Engineering*, 243 (1-2), 206-211.
59. Li Y. H., Wang B., Ma C. P., Fang Z. H., Chen L. F., Guan Y. C., and Yang S. F. (2019). Material characterization, thermal analysis, and mechanical performance of a laser-polished Ti Alloy prepared by selective laser melting. *Metals*, 9(2), 1-11.
60. Boyer R., Welsch G., and Collings E. W. (1994). *Materials properties handbook : titanium alloys*, USA, ASM International, 483-487.
61. Mandil G., Le V. T., Paris H., and Suard M. (2016). Building new entities from existing titanium part by electron beam melting: microstructures and mechanical properties. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85 (5-8), 1835-1846.
62. Raghavan S., Zhang B., Wang P., Sun C. N., Nai M. L. S., Li T., and Wei J. (2017). Effect of different heat treatments on the microstructure and mechanical properties in selective laser melted INCONEL 718 alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 32(14), 1588–1595.
63. Froes F. H. (2015). *Titanium: Physical Metallurgy, Processing, and Applications*, USA: ASM International, 141-157.
64. Gouge M., and Michaleris P. (2018) *Thermo-mechanical modeling of additive manufacturing*, Cambridge: Elsevier Inc., 41-61.
65. Parry L., Ashcroft I. A., and Wildman R. D. (2016). Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation. *Additive Manufacturing*, 12, 1-15.
66. Mollamahmutoglu M., and Yilmaz O. (2021). Volumetric heat source model for laser-based powder bed fusion process in additive manufacturing. *Thermal Science and Engineering Progress*, 25, 101021.
67. Lu S. L., Qian M., Tang H. P., Yan M., Wang J., and StJohn D. H. (2016). Massive transformation in Ti-6Al-4V additively manufactured by selective electron beam melting. *Acta Materialia*, 104, 303-311.
68. Tchuindjang J. T., Paydas H., Tran H.-S., Carrus R., Duchêne L., Mertens A., and Habraken A.-M. (2021). A New Concept for Modeling Phase Transformations in

- Ti6Al4V Alloy Manufactured by Directed Energy Deposition. *Materials*, 14(11), 2985.
69. Kazantseva N., Krakhmalev P., Thuvander M., Yadroitsev I., Vinogradova N., and Ezhov I. (2018). Martensitic transformations in Ti-6Al-4V (ELI) alloy manufactured by 3D Printing. *Materials Characterization*, 146, 101-112.
 70. Villa M., Brooks J. W., Turner R. P., Wang H., Boitout F., and Ward R. M. (2019). Microstructural Modeling of the $\alpha + \beta$ Phase in Ti-6Al-4V: A Diffusion-Based Approach. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 50(6), 2898-2911.
 71. Sahoo S., and Chou K. (2016). Phase-field simulation of microstructure evolution of Ti-6Al-4V in electron beam additive manufacturing process. *Additive Manufacturing*, 9, 14-24.



GAZİ GELECEKTİR...