



EGE ÜNİVERSİTESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KATMANLI LAZER ERGİTME METODU İLE
ÜRETİME YÖNELİK DÜZENEK GELİŞTİRİLMESİ
VE İŞLEM PARAMETRELERİNİN ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Erdoğan POLAT

Tez Danışmanı : Doç. Dr. İ. Etem SAKLAKOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi : 29.01.2016

Bornova-İZMİR

2016

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**KATMANLI LAZER ERGİTME METODU İLE
ÜRETİME YÖNELİK DÜZENEK GELİŞTİRİLMESİ
VE İŞLEM PARAMETRELERİNİN ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Erdoğan POLAT

Tez Danışmanı : Doç. Dr. İ. Etem SAKLAKOĞLU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Sunuş Tarihi : 29.01.2016

Bornova-İZMİR

2016

Erdoğan POLAT tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan “Katmanlı Lazer Ergitme Metodu İle Üretime Yönelik Düzenek Geliştirilmesi ve İşlem Parametrelerinin Etkilerinin Araştırılması” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 29.01.2016 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

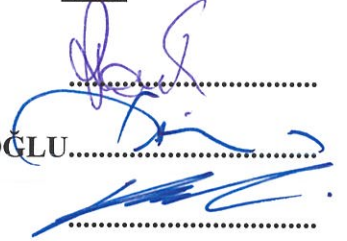
Jüri Üyeleri:

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Rasim İPEK

Raportör Üye : Doç. Dr. İ. Etem SAKLAKOĞLU

Üye : Doç. Dr. Şefika KASMAN

İmza

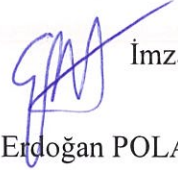


EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi sunduğum “Katmanlı Lazer Ergitme Metodu İle Üretime Yönelik Düzenek Geliştirilmesi ve İşlem Parametrelerinin Etkilerinin Araştırılması” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

29 / 01 / 2016

 İmzası
Erdoğan POLAT

ÖZET**KATMANLI LAZER ERGİTME METODU İLE ÜRETİME
YÖNELİK DÜZENEK GELİŞTİRİLMESİ VE İŞLEM
PARAMETRELERİNİN ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

POLAT, Erdoğan

Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. İ. Etem SAKLAKOĞLU

Ocak 2016, 104 sayfa

Katmanlı lazer ergitme metodu toz yatak uygulamalarından biridir. Bu yöntem ile metal parçaların üç boyutlu doğrudan imalatı mümkün olabilmektedir.

Bu tez kapsamında katmanlı lazer ergitme metodu ile üretime yönelik bir düzenek geliştirilmiştir. Bu düzeneğin üretim yeteneğini belirlemek üzere deneme üretimleri gerçekleştirilmiş, üretimi etkileyen temel işlem parametrelerinin üretilen numunelere (iş parçalarına) etkilerini belirlemeye yönelik deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Deneylerde Stellite-12 muadili toz malzeme kullanılmıştır. Kullanılan toz malzeme XRD ile karakterize edilmiştir. Deneysel çalışmalar üretimi etkileyen en önemli işlem parametrelerinden lazer gücü, lazer tarama hızı, lazer frekansı, lazer tarama şekli ve katman kalınlığı göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler ile 243 farklı kombinasyonda üretilen numuneler optik ve SEM mikroskopisi ile incelenmiştir. MATLAB ortamında geliştirilen program ile görüntü işleme esaslı analizler yapılarak işlem parametrelerinin gözeneklilik oranına olan etkileri karşılaştırılmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda %0,60 gözeneklilik değerine ulaşılmış olup Stellite-12 tozu ile üç boyutlu metalik parçaların katmanlı lazer ergitme metodu ile üretilebilirliğine yönelik umut verici sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar sözcükler: Katmanlı Üretim, Lazer, SLM/SLS, Gözeneklilik.

ABSTRACT**DEVELOPING A DEVICE FOR MANUFACTURING BY
SELECTIVE LASER MELTING METHOD AND INVESTIGATING
PROCESS PARAMETERS EFFECTS**

POLAT, Erdoğan

MSc in Mechanical Eng.

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İ. Etem SAKLAKOĞLU

January 2016, 104 pages

Selective laser melting method is one of the powder bed applications. By this method, it is possible to manufacture three dimensional metal parts directly.

In this thesis, a device for manufacturing by selective laser melting method has been developed. Experimental studies has been carried out to determine effects of basic process parameters on produced samples. Equivalent to Stellite-12 powder was used in the experiments. The powder materials were characterized by XRD. Experimental studies were performed considering the most important process parameters such as laser power output, laser scanning speed, laser frequency, laser scanning route and layer thickness.

The parts which produced using 243 combinations were examined by optical and SEM microscope. Image processing analysis based on the code which is developed in MATLAB has been performed to compare the effects of process parameters on porosity rates.

As a result , it was reached to %0.6 porosity rate . This is very promising results for producibility of three dimensional metallic parts using Stellite-12 powders by laser selective melting method.

Keywords: Selective manufacturing, Laser, SLM/SLS, Porosity

TEŞEKKÜR

Yaptığım çalışmamda beni yönlendiren ve özverili desteklerinden yaralandığım kıymetli hocam Doç. Dr. İ. Etem SAKLAÇOĞLU'na ve değerli eşi Prof. Dr. Nurşen SAKLAÇOĞLU'na, çalışma süresince atölye olanaklarından yararlanmamı sağlayan Laseral Endüstriyel Lazer Sis. San. Tic. Ltd. Şti.ve özel olarak Birhan Ufku GÜZEL, Çağlar TOKEL, Kerem AKTAŞ ve tüm şirket çalışanlarına, kıymetli görüşlerinden yararlandığım ve yakın ilgisini esirgemeyen Uzman Dr. Niyazi ÇAVUŞOĞLU'na ve Araştırma Görevlisi Y. Müh. B. Oğuz GÜRSES'e, tez sürecinde bana her zaman destek olan arkadaşım Y. Müh. Zafer YENİER ile arkadaşım Araştırma Görevlisi Y. Müh. Sercan SABANCI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son ve en önemli olarak bu ve bunun gibi zorlu süreçlerde her zaman olduğu gibi üzerimde çok büyük emekleri olan, maddi manevi desteklerini esirgemeyen ANNEME, BABAMA ve anne yarısı ABLALARIMA teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xx
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. KATMANLI LAZER İMALAT YÖNTEMLERİ	3
2.1. Katmalı Lazer Sinterleme	4
2.1.1. Katmalı lazer sinterleme prosesinin çeşitleri	7
2.2. Katmanlı Lazer Ergitme	9
2.2.1. Katmanlı lazer ergitme yönteminde kullanılan lazerler	11
2.2.2. Katmanlı lazer metodunda kullanılan malzemeler	12
2.2.3. Katmanlı lazer ergitme sistemi parametreleri	12
3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	17
3.1. Türkiye’deki Araştırmalar	17

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.2. Türkiye Dışındaki Araştırmalar	19
3.2.1. İş parçalarının metalürjik özelliklerinin incelendiği araştırmalar	19
3.2.2. İş parçalarının mekanik özelliklerinin incelendiği araştırmalar	24
3.2.3. Kullanılan ham madde özelliklerinin iş parçasına etkilerinin incelendiği araştırmalar	29
3.2.4. Modelleme ve simülasyona yönelik araştırmalar	39
3.2.5. Üretim sistemi geliştirmeye yönelik araştırmalar	40
3.2.6. Genel değerlendirme (review) araştırmalar	42
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	44
4.1. Prototip Makine Geliştirilmesi	44
4.1.1. Prototip makine mekanik sistemi	44
4.2. Prototip makine kontrol sistemi tasarımı	46
4.3. Prototip Makine Lazer Sistemi	48
4.4. Prototip Makine İle Gerçekleştirilen Deneme Üretimleri	49
4.4.1. Deneyde kullanılan malzeme	49
4.4.2. Deneme üretimleri işlem parametreleri (Yöntem)	50
4.4.3. Deneme üretim grupları	52

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

4.4.4. Üretimi etkileyen temel işlem parametrelerinin etkilerini belirlemeye yönelik deneysel çalışmalar	62
4.4.5. XRD analizi	65
5. DENEY SONUÇLARININ ANALİZİ	66
5.1. Kullanılan Toz Malzemenin XRD Analizi	66
5.2. Lazer Güç Parametresinin Analizi	67
5.3. Lazer Tarama Hızı Parametresinin Analizi	74
5.4. Frekans Parametresinin Analizi	77
5.5. Katman Kalınlığı Parametresinin Analizi	79
5.6. Lazer Tarama Şekli Parametresinin Analizi	83
5.7. En Yoğun Numunenin İncelenmesi	84
6. SONUÇ	86
7. ÖNERİLER	88
KAYNAKLAR DİZİNİ	89
ÖZGEÇMİŞ	104
EKLER	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 - Housholder’a ait patent görseli (Housholder, 1981).....	4
2.2 - Deckard’a ait patent görseli (Deckard, 1989).....	5
2.3 - İşlem Şeması.....	5
2.4 - a) İki toz depolu(sol), b) tek toz depolu(orta) ve c) üstten beslemeli sistem (sağ).....	6
2.5 – a)Yatay hareketli süpürge sistemi(sol) ve b)90 derece hareketli süpürge sistemi(sağ)	6
2.6 -Polimer kaplama ile sinterleme	8
2.7 - Fraunhofer Enstitüsüne ait patent görseli ((Fraunhofer Gesellschaft, 2001)...)	9
2.8 - Katmanlı lazer ergitme sistemi	10
2.9 - Katmanlı lazer ergitme akış şeması	10
2.10 - Fiber lazer ışın profili (Kaplan, 2011)	13
2.11 - Tarama aralığı.....	14
2.12 - Işın çakışma durumları (Kasman, 2010).....	15
2.13 - Katman kalınlığı	16
3.1 - Tek hat üretim (Yadroitsev et al, 2012).....	21
3.2 - Tek hat üretilmiş farklı parametrelere ait numuneler(Abe et al, 2003).	26
3.3 - Farklı tek hat üretim ergime morfolojileri (Löber et al, 2014).	38

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 - Katmanlı lazer ergitme makinası tasarımı.....	44
4.2 - Keyence LK-G157 lazer mesafe sensörü	45
4.3 - Ardiuno uno.....	46
4.4 – a) M542Pbf Leadshine mikro step sürücü M542Pbf (sol) ve b) DM422C Leadshine mikro step sürücü (sağ)	46
4.5 – a) FL42STH87-1008A Fulling step motor (sol) ve b) FL57STH84-4004A Fulling step motor (sağ).....	47
4.6 - İmal edilen prototip Katmanlı lazer ergitme makinası.....	49
4.7 - Partikül Boyutu Dağılımı	50
4.8 - Deneme Üretimi iş parçası yerleşim düzeni.....	52
4.9 - Deneme üretimi örnek fotoğraf.....	52
4.10 - Gri tonlu mikroyapı görüntüsü	63
4.11 - Şekil 4.8’de verilen görüntüye ait histogram	63
4.12 - Numune mikroyapı görüntüsü (solda) ve görüntü işleme sonrası oluşturulan yeni görüntü (Sağda).....	64
4.13 - Deneylerde kullanılan SEM cihazı.....	65
4.14 - Deneylerde kullanılan XRD cihazı.....	65
5.1 - Toz numune XRD analiz sonucu	66

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.2 - Stellite 12 XRD analizi (Motallebzadeh, 2015)	67
5.3 - 3 Güç Karşılaştırma 1	69
5.4 - Güç Karşılaştırma 2	69
5.5 - Güç Karşılaştırma 3	69
5.6 - Güç Karşılaştırma 4	70
5.7 - Güç Karşılaştırma 5	70
5.8 - Güç Karşılaştırma 6	70
5.9 - Güç Karşılaştırma 7	71
5.10 - Güç Karşılaştırma 8	71
5.11 - Güç Karşılaştırma 9	71
5.12 - Güç Karşılaştırma 10	72
5.13 - Güç Karşılaştırma 11	72
5.14 - Güç Karşılaştırma 12	72
5.15 - Güç Karşılaştırma 13	73
5.16 - Güç Karşılaştırma 14	73
5.17 - Güç Karşılaştırma 15	73
5.18 - Tarama hızı karşılaştırma 1	75

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.19 - Tarama hızı karşılaştırma 2	75
5.20 - Tarama hızı karşılaştırma 3	76
5.21 - Tarama hızı karşılaştırma 4	76
5.22 - Tarama hızı karşılaştırma 5	77
5.23 - Frekans karşılaştırma 1	78
5.24 - Frekans karşılaştırma 2	79
5.25 - Frekans karşılaştırma 3	79
5.26 - Katman kalınlığı karşılaştırma 1	81
5.27 - Katman kalınlığı karşılaştırma 2	81
5.28 - Katman kalınlığı karşılaştırma 3	81
5.29 - Katman kalınlığı karşılaştırma 4	82
5.30 - Katman kalınlığı karşılaştırma 5	82
5.31 - Katman kalınlığı karşılaştırma 6	83
5.32 - Katman kalınlığı karşılaştırma 7	83
5.33 - En az gözenekli numuneye ait SEM görüntüsü (x500)	85
5.34 - En az gözenekli numuneye ait SEM görüntüsü (x1000)	85

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 - Katmanlı lazer ergitme sistemlerinde kullanılan lazerler	11
4.1 - Ytterbium fiber lazer parametreleri	48
4.2 - Lens Özellikleri	49
4.3 - Sterlite 12 Kimyasal Bileşimi	50
4.4 - İşlem parametreleri	51
4.5 - Deneme Grubu 1'e ait işlem parametreleri.....	53
4.6 - Deneme Grubu 2'e ait işlem parametreleri.....	53
4.7 - Deneme Grubu 3'e ait işlem parametreleri.....	53
4.8 - Deneme Grubu 4'e ait işlem parametreleri.....	54
4.9 - Deneme Grubu 5'e ait işlem parametreleri.....	54
4.10 - Deneme Grubu 6'e ait işlem parametreleri.....	54
4.11 - Deneme Grubu 7'e ait işlem parametreleri.....	55
4.12 - Deneme Grubu 8'e ait işlem parametreleri.....	55
4.13 -Deneme Grubu 9'e ait işlem parametreleri.....	55
4.14 - Deneme Grubu 10'e ait işlem parametreleri.....	56
4.15 - Deneme Grubu 11'e ait işlem parametreleri.....	56
4.16 - Deneme Grubu 12'e ait işlem parametreleri.....	56

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.17 - Deneme Grubu 13'e ait işlem parametreleri	57
4.18 - Deneme Grubu 14'e ait işlem parametreleri	57
4.19 - Deneme Grubu 15'e ait işlem parametreleri	57
4.20 - Deneme Grubu 16'e ait işlem parametreleri	58
4.21 - Deneme Grubu 17'e ait işlem parametreleri	58
4.22 - Deneme Grubu 18'e ait işlem parametreleri	58
4.23 - Deneme Grubu 19'e ait işlem parametreleri	59
4.24 - Deneme Grubu 20'e ait işlem parametreleri	59
4.25 - Deneme Grubu 21'e ait işlem parametreleri	59
4.26 - Deneme Grubu 22'e ait işlem parametreleri	60
4.27 - Deneme Grubu 23'e ait işlem parametreleri	60
4.28 - Deneme Grubu 24'e ait işlem parametreleri	60
4.29 - Deneme Grubu 25'e ait işlem parametreleri	61
4.30 - Deneme Grubu 26'e ait işlem parametreleri	61
4.31 - Deneme Grubu 27'e ait işlem parametreleri	61
5.1 - Güç profil çizelgesi	68
5.2 - Tarama hızı profil çizelgesi	74

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)ÇizelgeSayfa

5.3 - Frekans profil çizelgesi.....	78
5.4 - Katman kalınlığı profil çizelgesi	80
5.5 - 197 numaralı numune parametreleri.....	84

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
W	Lazer gücü (Watt)
V	Lazer tarama hızı (mm/s)
E _s	Enerji yoğunluğu
F	Lazer frekansı
Q _s	Aralık çakışma oranı (%)
Q _p	Atım çakışma oranı (%)
L	Yan yana iki ışın arasındaki mesafe (μm)
t	Tarama yönü arasındaki mesafe, tarama aralığı (μm)
s	İki tarama yönü arasında altalta gelen çakışma mesafesi (μm)

Kısaltmalar

SEM	Taramalı Elektron Mikroskopisi
XPS	X- Ray Yayınım Spektreskopisi
STL	Demet numarası
SLM	Ekip cinsi
SLS	İşlem adı

1. GİRİŞ

Katmanlı imalat; bilgisayar ortamında oluşturulan üç boyutlu bir CAD modelinin üçgensel kafes yüzeyli bir modele (STL) dönüştürülmesi, bu modelin özel yazılımlarla katmanlara ayrılması (dilimlenmesi) ve bu dilimleri oluşturan geometrilerin üst üste binen ve birbirine yapıştırılan katmanlar sayesinde hedeflenen üç boyutlu nihai geometrinin oluşturulması esasına dayanan imalat yöntemlerine verilen genel isimdir.

Günümüzde küreselleşen dünyada gelişen rekabet, ürün ve hizmet özelliklerinin değer kazanması yüksek katma değer yaratma potansiyeline sahip ileri imalat teknolojilerinin kullanımını ve geliştirilmesini önemli hale getirmiştir. İleri imalat yöntemlerinden biri olan katmanlı imalat doğrudan üç boyutlu parça imalatına olanak sağlayan bir yöntem olup yeni nesil imalat teknolojisi olarak tanımlanmaktadır.

Katmanlı imalat teknolojileri hızlı prototipleme ve esnek üretim ihtiyacı ile rekabet koşullarının doğal sonucu olarak doğmuştur. Ürün tasarımı, geliştirme ve imalat süreçlerinde sağlanabilen teknolojik avantajlar bu üretim teknolojisinin popüler olmasını sağlamıştır. Uzaktan üretim/prototiplemeye olanak sağlaması, klasik üretim yöntemleriyle mümkün olmayan karmaşık geometrilerdeki parçaların üretimine olanak sağlaması gibi avantajları sebepleriyle tüm dünyada artan bir ilgiyle araştırma gelişme çalışmalarına konu olmaktadır. Bununla birlikte, ülkemizde katmanlı imalat teknolojilerine konu olan çok az sayıda çalışma bulunmaktadır.

Ülkemizde bu üretim teknolojisinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması için TÜBİTAK tarafından 2015 yılında 1511-MAK-IMLT-2015-2 kodlu, 2014 yılında 1511-MAKİNE-2014-İMT-01 kodlu, 2013 yılında 1511-SAĞLIK-2013-BE-02 kodlu çağrılar yayınlamış olup katmanlı imalat teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar öncelikli araştırma konusu olarak ilan edilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında katmanlı imalat yöntemlerinden biri olan ve metalik malzemelerin doğrudan üç boyutlu imalatına olanak sağlayan katmanlı

lazer ergitme tekniği ile üretim yapma yeteneğine sahip prototip bir makine geliştirilmiş, bu makine ile deneme üretimleri gerçekleştirilmiş ve üretilen parçaların karakterizasyonuna yönelik çalışmalar yapılarak geliştirilen makinanın üretim yeteneği araştırılmıştır.

Elde edilen veriler oldukça umut verici olup geliştirilen makine ülkemizde kendi alanında bir ilk niteliğindedir.

2. KATMANLI LAZER İMALAT YÖNTEMLERİ

Bütün Katmanlı üretim yöntemleri basitçe metal veya polimer tozlarının bir silindir içerisinde istenilen katman boyutlarında katman katman ısıtılarak işlenmesi ile üç boyutlu bir ürün üretilmesi işlemidir.

Katmanlı üretim yöntemlerinin çıkış noktası üretilmesi planlanan bir parçanın prototip imalatı ihtiyacının doğmasıdır. Prototip yapma ihtiyacı ile üretilen ilk numune üstünde istenilen test ve kullanım koşul testlerinin gerçekleşmesi amaçlanmıştır. Hızlı prototipleme işlemleri olarak adlandırılan bu işlemler daha sonra üretim yöntemi olarak da kullanılmaya başlanmıştır. Hızlı prototipleme işlemlerinden bazıları katmanlı laminant üretim, üç boyutlu yazıcı teknolojileri katmanlı lazer sinterleme/ergitme vb. üretim yöntemleridir.

Katmanlı lazer imalat diğer üretim yöntemlerine göre avantajı üretim kısıtlarının daha az olmasıdır. Mesela üretilmek istenilen parçanın şekil bakımından diğer talaşlı imalat ve plastik şekil verme yöntemleri ile üretilemezken katmanlı lazer üretim yöntemleri ile üretimi gerçekleştirilebilir.

Katmanlı lazer üretim yöntemlerinde aslında nokta tabanlı lazer tarama tekniği kullanılır. Plastik malzemeden ilk örnek üretimi için geliştirilmiştir. Bu yaklaşım ek ısı kaynakları kullanarak ve çeşitli katman tabanlı toz malzemeler ile metal ve seramik parçaların üretimi için genişlemiştir. Günümüzde katmanlı üretim yöntemleri ile üretilen malzeme çeşitliliği diğer imalat yöntemlerine göre daha az olsa da hızla çeşitler artmaktadır. Katmanlı üretim ile üretilen parçaların uzay, havacılık, dental, elektronik sektörlerinde kullanımı giderek artmaktadır.

Katmanlı üretim yöntemlerinin bilgisayar kontrollü olmasının sağladığı avantajla üretilen parçanın mekanik analizlerinin yapılabilir. Bu durum analiz sonucu modellemede yapılacak değişikliklerde özgürlük sağlanmaktadır. Operatöre sağladığı kontrol altyapısı ile de kolay kullanım sağlamaktadır.

İmalat yönteminin başlangıç noktası olan prototiplemeden de anlaşılacağı gibi katmanlı lazer üretim yöntemlerinde seri üretim mekanizmaları ana amaç

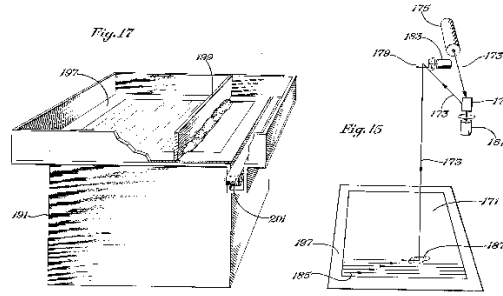
olmamakla birlikte, üretim hızı olarak her zaman hızlı olamadığı da görülmektedir. Genel olarak üretim kısıtı olan modellerde ve daha az malzeme sarfiyatı sebebiyle değerli malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır.

Katmanlı lazer imalat yöntemleri katmanlı lazer sinterleme ve katmanlı lazer ergitme olarak iki ana başlıkta incelenmektedir.

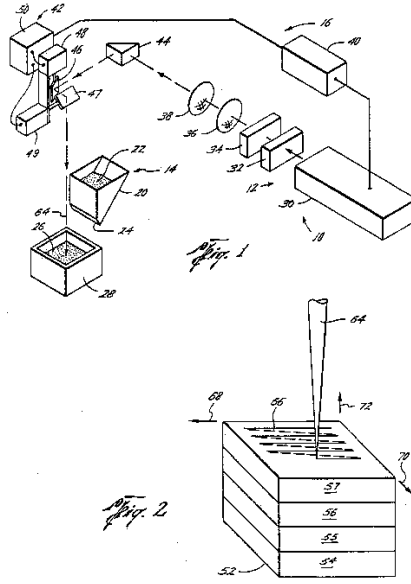
2.1. Katmanlı Lazer Sinterleme

Katmanlı lazer sinterleme işleminin temeli, malzemenin katman katman işlenerek istenilen şekilde üç boyutlu katı halinin oluşturulması işlemidir. Bu işlemde bilgisayar sistemi, lazer sistemi ve mekanik işlemlerden oluşan bir döngünün senkronize edilmesi ile sağlanmaktadır.

Katmanlı lazer sinterleme ile üretim metodu ilk defa Housholder tarafından ve Teksas Üniversitesinde Deckard tarafından tanımlanmaktadır. Metal ve polimer parçaların hızlı üretim metotları arasında en avantajlı metot haline gelmiştir (Housholder,1981; Deckard 1989).

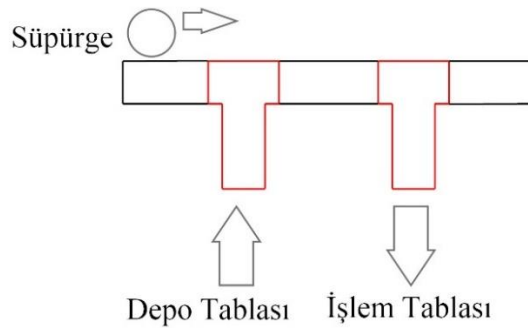


Şekil 2.1 - Housholder'a ait patent görseli (Housholder, 1981)



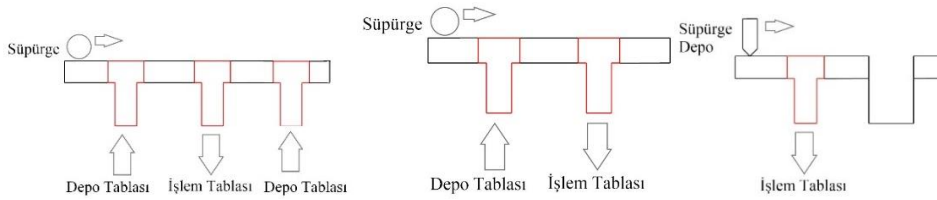
Şekil 2.2 - Deckard'a ait patent görseli (Deckard, 1989)

Katmanlı lazer imalat yönteminde bir bilgisayar yardımıyla oluşturulan üç boyutlu yapıların çizimlerinin bilgisayar ortamında STL formatına getirilmesi sağlanır. STL formatı oluşturulan üç boyutlu yapının istenilen katman boyutlarında dilimlenmesi bir dilimleyici yazılım ile yapılır. Lazer sisteminin kontrolünü sağlayan bilgisayar sistemi elde edilen dilimler ile üretilecek yapının konumlandırma ayarlamalarını yapar. Aynı üretimde birden fazla aynı veya farklı yapı üretilebilir. Lazer sistemine malzeme ile ilgili parametrelerin girilmesi sağlanır. Bu parametrelerden bazıları lazer tarama hızı, lazer gücü, tarama katman kalınlığı, lazer tarama profili, lazer frekansı'dır. Kullanılan malzemeye göre malzeme kütüphanesine atanabilir.



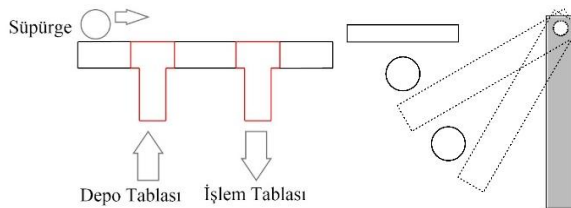
Şekil 2.3 - İşlem Şeması

Şekil 2.3’de süpürge olarak adlandırılan parça toz tabakasının taşınmasını sağlar. Depo tabası olarak adlandıran parça toz malzemenin depolandığı ve istenildiğinde yukarı doğru hareketi ile tozun süpürgeye önüne itilmesini sağlamaktadır. İşlem tablası ise lazer işleminin yapıldığı alan olmakla birlikte aşağı doğru hareketinde istenilen katman tabakasının burada birikmesini sağlamaktadır. Şekil 2.3’de gösterilen şemada olduğu gibi depo tabasına yerleştirilen malzemenin yukarı doğru hareketi ve işlem tabakasının aşağı doğru hareketi ile yüzeyi aşan toz katmanının süpürge yardımı ile işlem tablasına aktarılması sağlanmaktadır. Bu aktarım işlem tablasında toz katmanı oluşmasını sağlamaktadır. Bu döngü her katmanın işlenmesi ile tekrar etmektedir. Döngü son katmanın işlenmesi ile bitmektedir. Sistemin depo, süpürge çeşitleri bulunmaktadır.



Şekil 2.4 - a) İki toz depolu(sol), b) tek toz depolu(orta) ve c) üstten beslemeli sistem (sağ)

Bu çeşitler Şekil 2.4’de gösterildiği gibi iki toz depolu, tek toz depolu ve üstten beslemeli sistem gibi depo çeşitleri de bulunmaktadır.



Şekil 2.5 – a) Yatay hareketli süpürge sistemi(sol) ve b) 90 derece hareketli süpürge sistemi(sağ)

Şekil 2.5’da gösterildiği gibi süpürge sistem çeşitleri de yatay hareketli süpürge ve 90 derece hareketli süpürge gibi çeşitleri de bulunmaktadır.

İşlem tablasında bulunan tozun ön ısıtma işlemi için kullanılan kızılötesi ışınlarla ısıtma, süpürge veya işlem tablasına yerleştirilen resistansların yardımıyla ısıtma sağlanmaktadır. Ön ısıtma işlemi daha çok lazer enerjisi gereksinimi

azaltılması için kullanılır ve eşit dağılmayan ısı genleşme sebebiyle oluşan çarpılmalar olmaması için gereklidir.

Katman döngülerinin sonunda istenilen iki boyutlu dilimleyici yazılımdan gelen yapının işlenmesi sağlanmaktadır. Katman oluşturma döngülerinin başlangıcında önce bilgisayar ortamında gelen dilimleme yazılımının oluşturduğu üç boyutlu yapının altına gelecek destek yapılarının işlenmesine başlanılmaktadır. Destek yapıları bina yapımında olduğu gibi temel görevi görmekte ve üç boyutlu yapıya toz havuzu içerisinde destek sağlamaktadır. İmalat sonunda destek yapıları işlem tablasından yapının ayrılmasında kolaylık sağlamaktadır.

Lazer işleme döngülerin bitmesiyle işlem tablası başlangıç konumuna gelir. Bu konumda toz havuzu içerisinde oluşturulan üç boyutlu yapı etrafındaki tozların temizlenmesi sağlanır ve parça ortaya çıkarılır.

2.1.1. Katmanlı lazer sinterleme prosesinin çeşitleri

Katmanlı lazer sinterleme işlem şekilleri bakımından direkt ve direkt olmayan olarak sınıflandırılır.

2.1.1.1. Direkt katmanlı lazer sinterleme prosesi

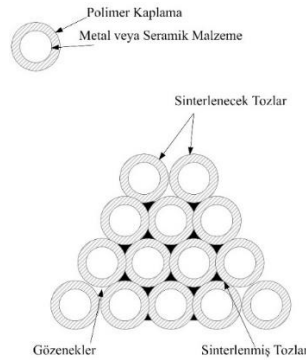
Direkt katmanlı lazer sinterleme işleminde lazer direkt olarak metal veya seramik malzemeye iletilmektedir. Bu proses Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS) ticari ismi olarak da bilinmektedir. Başlıca sorunu gözenekli yapı oluşturmastır. Malzemenin kompozisyonu, tane boyutu ve taşlama ile son işlem bu problemin azaltılmasına yardımcı olmaktadır.

Direkt katmanlı lazer sinterlemede, yüksek enerjiye sahip lazer ışını ile birleşen metal tozu en az sayıda son işlem veya hiç son işlem yapılmadan yüksek yoğunluk (Yüzde seksen teorik yoğunluk) sağlanmaktadır. Bu yöntemin başlıca önemi pahalı ve zaman harcanmasına sebep olan son işlemlerin azaltılmasını sağlamasıdır (Lü et al, 2001).

2.1.1.2. Direkt olmayan katmanlı lazer sinterleme prosesi

Katmanlı lazer sinterleme ile üretilen metal parçalar için sıvı faz sinterleme (Nyrhilla, Amerika Patenti 5,732,323, 1994) işlemi üzerine dayanan tek aşamalı parça üretimi ve iki aşamalı işlem zinciri olarak ayırt edilmektedir. İki aşamalı malzeme sistemi metal parçacıkları ısı olarak sinterlendikten sonra bağlayıcı özelliği olan polimer kullanılmaktadır. Direkt olmayan sistemlerde farklı mikro birleştirme mekanizmaları ile ayırt edilir.

Direkt olmayan proseste, metal tozu partikülleri düşük sıcaklık ve nispeten düşük mukavemetli organik bağlama ile bir araya gelirler. Sonuç tam katı yoğunluklu parçadır. Diğer hızlı prototipleme işlemlerine benzer olarak, bu işlem ile üretilen takım ve parçalardaki hassasiyet analizleri küçük parçalarda büyük bir dağılım ve kabul edilebilir sonuçlar göstermektedir. Neredeyse yakın net ölçüde üretilmektedir. (Levy et al, 2003).



Şekil 2.6 -Polimer kaplama ile sinterleme

Direkt olmayan lazer sinterleme iki farklı yol ile gerçekleşmektedir. Birincisi Şekil 2.6'deki gibi önceden alaşımlanmış metal tozların sinterlenmesidir. Burada polimer kaplama kullanılarak sinterleme gerçekleşiyor iken polimerin düşük ergime noktasından faydalanılmaktadır. İkinci yöntem ise sıvı hal sinterlemesidir.

Sıvı hal sinterleme basitçe toz malzemenin bağlanma mekanizmasıdır. Toz malzeme içerisindeki farklı elementlerin ergime noktalarından faydalanılmaktadır. Lazer sistemi tozu taradığında toz malzeme içerisinde bulunan ergime noktası

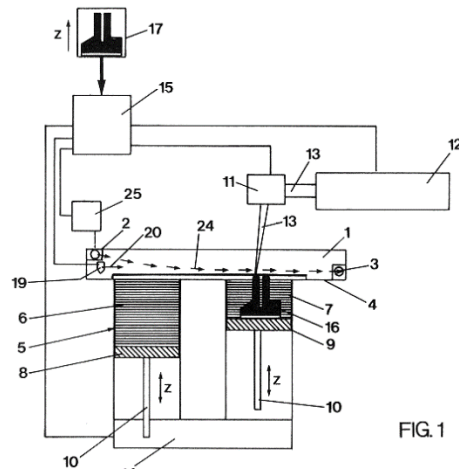
düşük elementin ergitilmesi ve ergime noktası daha yüksek olan malzemeye bağlanması sağlanmaktadır. Bu mekanizmayla sıvı Fazlı sinterleme gerçekleştiğinden az bir sinterleme süresinde yüksek yoğunluk değerlerine hatta neredeyse tam yoğunluğa sahip malzeme üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Mekanizmanın ana avantajı çok hızlı anlık bağlanmadır. (Lü et al, 2001).

Sıvı fazın formasyonu katmanlı lazer sinterleme boyunca genellikle sinterlemeyi artırır. Sinterleme oranının belirlenmesinde önemli faktör sıvı Fazdaki yüzey gerilimidir. Katmanlı lazer sinterleme için 4 ana endişe vardır:

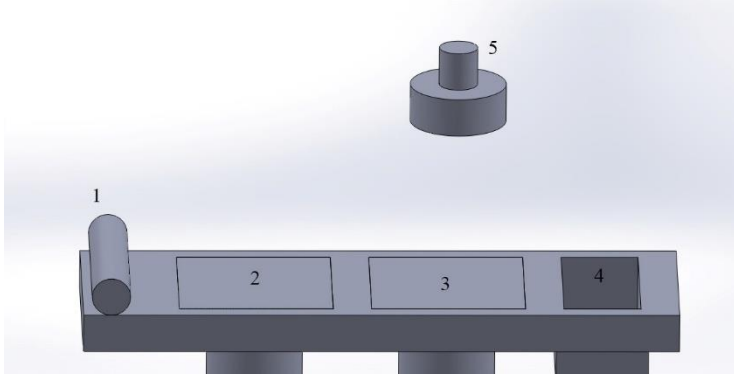
- Isıtma boyunca oluşan sıvı miktarı,
- Sıvının katı çözünebilirliği,
- Katı toz parçacıkları üzerindeki sıvının ıslanabilirliği ve
- Sıvının katı hal difzyonudur.

2.2. Katmanlı Lazer Ergitme

Katmanlı Lazer Ergitme metalin ergitilmesi tabanlı bir işlem olarak ilk kez Meiners W.'ya ait bir patentte bahsedilmektedir (Fraunhofer Gesellschaft, 2001).

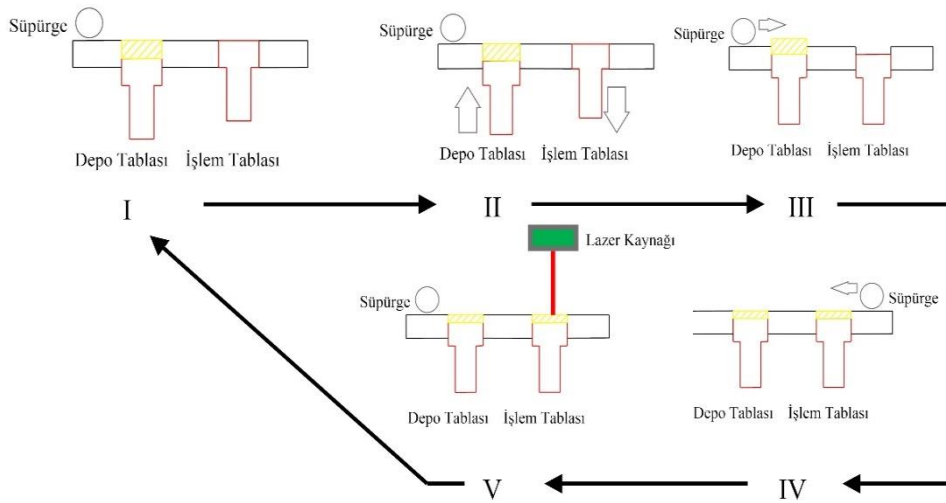


Şekil 2.7 - Fraunhofer Enstitüsüne ait patent görseli ((Fraunhofer Gesellschaft, 2001).



Şekil 2.8 - Katmanlı lazer ergitme sistemi

İşlem için kullanılan donanım katmanlı lazer sinterleme işlemi ile benzerdir. Şekil 2.8'deki gibi 1. Süpürge, 2 Depo tablası, 3 İşlem tablası, 4 Toz gideri, 5 Lazer Sisteminden oluşmaktadır. Bununla birlikte, lazer ışını malzemeyi tamamen eritmektedir. İşlem kaynak teknolojisi ile benzer özellikler taşımaktadır. İşlemin en önemli avantajı malzeme seçimindeki bağımsızlığıdır. Bütün metaller aday malzeme olarak düşünülebilir ve optimize koşullar altında iyi sonuçlar verebilir.



Şekil 2.9 - Katmanlı lazer ergitme akış şeması

Şekil 2.9'daki görüldüğü gibi bir numaralı durumda depo tablası toz malzeme ile doldurulur. İşlem tablası yüzeyle aynı hizada durdurulur. Süpürge ise en başta durmaktadır. İki numaralı durumda depo tablasına istenilen katman kalınlığı boyutunda yukarı doğru hareket verilirken işlem tablasına aynı boyutta aşağıya doğru hareket verilir. Üç numaralı durumda depo tablası yukarı hareket ettiğinden yüzeyde toz birikmesine sebep olmaktadır. İşlem tablası ise istenilen

katman kalınlığı kadar boşluğa sahip olmuştur. Dört numaralı durumda ise süpürge depo tablası yüzeyinde biriken toz malzemenin işlem tablasına yayılmasını sağlamak için önce zeminde soldan sağa hareket etmektedir. Sonra ilk yerine gelmektedir. Beş numaralı durumda işlem tablasında bulunan toz katmanına istenilen geometride lazer ışınları gönderilmekte ve tozun ergitilmesi sağlanmaktadır. Beş adet durum talep edilen geometriye göre sürekli bir döngü oluşturmakta ve üretim gerçekleşmektedir.

Lazer kaynağının maksimum gücü, lazerin odak nokta çapı, lazer kaynağının çeşidi (puls modu veya devamlı modu) vb. lazer parametreleri, malzeme tozunun içeriği, boyutu, şekli vb. toz parametreleri, katman boyutu, çalışma alanı ve süpürgeğin ön ısıtılması vb. makine parametreleri bu prosesdeki karşıya çıkabilecek parametrelerdir. Bu parametrelerin kombinasyonları sonucu çıkan özel parametre ile üretim gerçekleştirilebilir.

2.2.1. Katmanlı lazer ergitme yönteminde kullanılan lazerler

Katmanlı lazer ergitme yönteminde kullanılan lazer çeşitleri Disk lazer, Nd-Yag, CO₂ ve fiber lazerlerdir.

Katmanlı lazer makineleri üreten ticari firmaların kullandığı lazer sistemleri Çizelge 2.1'de gösterildiği gibidir.

Çizelge 2.1 - Katmanlı lazer ergitme sistemlerinde kullanılan lazerler

Üretici Firma	Lazerler
3D Systems Inc, ProX, sPro ve ProX SLM systems	30-200 W CO ₂ lazerler (termoplastikler için)
	50-500 W Fiber lazerler (metaller için)
Eos GmbH: Eosint, Eos M ve Precious M makinelerinde	30 W, 70W veya 2x50 W CO ₂ lazerler (termoplastikler için)
	200 W- 1kW fiber lazerler(metaller için)
SLM Solutions GmbH: SLM systems	400 W - 2 x 1000 W fiber lazerler (metaller için)
Renishaw: AM250	200 W veya 400 W fiber lazer (metaller için)

2.2.2. Katmanlı lazer metodunda kullanılan malzemeler

Termoplastik malzemeler nispeten düşük ergime sıcaklık, düşük ısı iletim ve bilye ile dövme için düşük yatkınlık özellikleri sebebiyle katmanlı üretime metotları ile iyi uyumludur.

Katmanlı lazer ergitme sistemlerinde kullanılan titanyum, demir bazlı, bakır bazlı, bakır volfram bazlı, nikel bazlı, alüminyum bazlı tozlar kullanılmaktadır.

Titanyum alaşımları hali hazırda havacılık ve uzay sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır. Bu sebeple geleceğin üretim yöntemi olarak görülen katmanlı lazer ergitme metodu malzeme listesinde ön plana çıkmaktadır. Titanyum alaşım tozlarından üretilen parçaların dökme ve dövme ile üretilen parçalara göre daha iyi mekanik ve metalürjik özellikler kazandırma çalışmaları sürmektedir.

Demir bazlı alaşım tozlarının piyasada ucuz ve elde edilebilirliği kolay olması sebebiyle katmanlı lazer ergitme makinelerinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Bakır bazlı alaşımlı tozlar bakırı ergitmek zor olduğundan bakır tozunun yanında nikel, wolfram gibi elementler eklenir ve yanına eklenen tozların ergime noktalarından yararlanarak birleştirme sağlanır.

Nikel bazlı alaşım tozlar içeriğinde bulunan nikelin daha hızlı ergime özellikleri sebebiyle tercih edilmektedir.

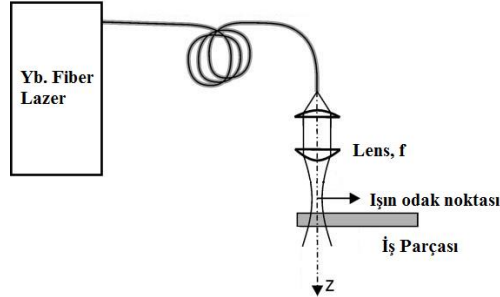
Seramik parçaların katmanlı lazer sinterlemesi yapılmaktadır. Al_2O_3 , MgO , ZrO_2 gibi seramiklerin kimyasal tepkimeye uğrayabilen bir madde eklenerek katmanlı üretimi gerçekleştirilmektedir.

2.2.3. Katmanlı lazer ergitme sistemi parametreleri

2.2.3.1. Lazer ışını çapı

Fiber lazer ışını Şekil 2.10'da görüldüğü gibi lazer profili oluşmaktadır. Lazer ışını odak noktası enerji yoğunluğunun en yüksek olduğu alandır. Lazer odak

noktası lazer ışın çapının lazer profilinde en düşük olduğu yerdir. Enerji yoğunluğunun Fazla olması sebebiyle katmanlı lazer ergitme sisteminde çalışma alanı olarak lazer odak noktası tercih edilmektedir.



Şekil 2.10 - Fiber lazer ışın profili (Kaplan, 2011)

2.2.3.2. Lazer gücü

Lazer gücü, lazer ışının çıkış gücünü ifade etmekte olup birimi Watt (W)'tır.

2.2.3.3. Lazer tarama hızı

Lazer tarama hızı, lazer ışınının iş parçası üzerindeki hareket hızını ifade etmekte olup birimi mm/s'dir.

2.2.3.4. Lazer enerji yoğunluğu

Katmanlı Lazer ergitmede verilen bir malzeme sisteminde, lazerle ergitilmiş yapının kalitesine etki eden anahtar bir faktör olarak kullanılan lazer enerji yoğunluğu E_S 'dir. Lazer enerji yoğunluğu, lazer gücü, lazer ışını odak çapı ve lazer tarama hızı ile tanımlanır.

$$E_S = \frac{P}{v\delta} \text{ (J/cm}^2\text{)} \quad (2.1)$$

Burada P gelen lazer gücünü (Watt), v lazer tarama hızını (cm/s) ve δ lazer ışın çapını (cm) ifade eder (Lü et al, 2001)

Denklemden görüldüğü üzere lazer enerji yoğunluğu sadece gelen lazer gücüne bağlı değildir. Ters orantılı olmak üzere lazer tarama hızı ve lazer ışın odak çapına da bağlıdır.

2.2.3.5. Lazer frekansı

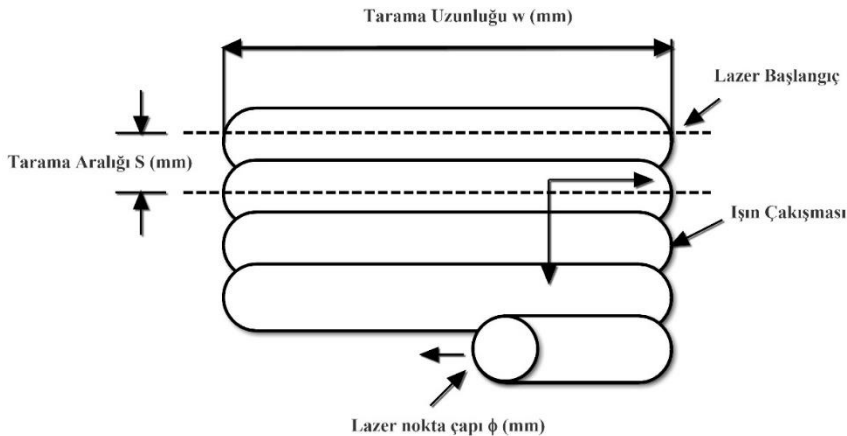
Lazer ışının birim zamandaki atım sayısını ifade etmekte olup birimi kHz'dir

2.2.3.6. Lazer tarama aralığı

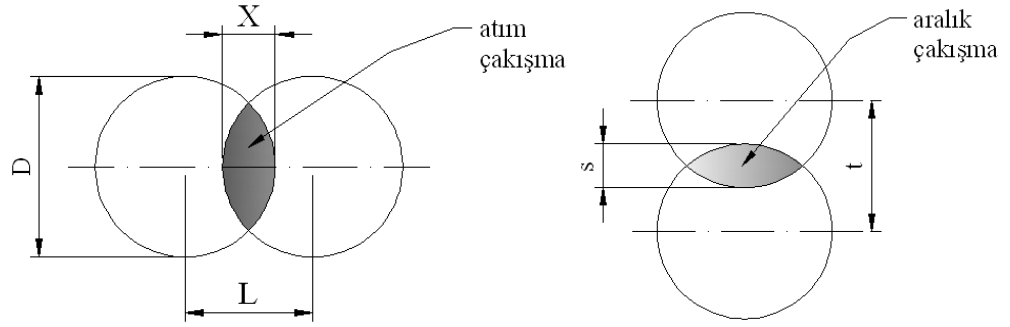
Lazer tarama aralığı iki lazer taramasının arasındaki mesafeyi ifade etmektedir.

$$L = \frac{v}{F} \quad (2.2)$$

Denklem 2.2'de L yan yana iki ışın arasındaki mesafe (μm) iken v ışın tarama hızını (mm/s), F frekansı (kHz) temsil etmektedir. Tarama aralığının tarama hızı ile doğru orantılı olarak arttığı ve frekans değeriyle ters orantılı olarak arttığı görülmektedir. Tarama aralığının azalması ile enerji yoğunluğunun artacağı bilinmekte ancak artan enerji yoğunluğunun yüzey kalitesini azalttığı bilinmektedir.



Şekil 2.11 - Tarama aralığı



Şekil 2.12 - Işın çakışma durumları (Kasman, 2010).

Aralık çakışma oranı iki lazer tarama hattının üst üste bindiği kesişim alan oranını ifade etmektedir. Atım çakışma oranı ise iki lazer atımının hattının üst üste bindiği kesişim alan oranını ifade etmektedir.

$$O_s(\%) = \frac{s}{d} = \left(1 - \frac{t}{d}\right) \times 100 \quad (2.3)$$

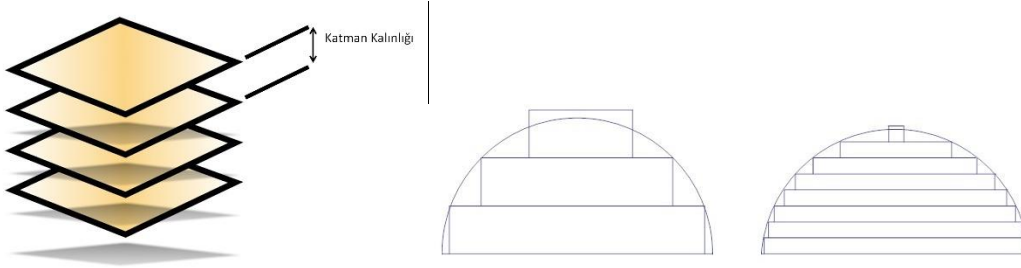
$$O_p(\%) = \frac{x}{d} = \left(1 - \frac{L}{d}\right) \times 100 \quad (2.4)$$

$$O_p(\%) = \frac{x}{d} = \left(1 - \frac{H}{F \cdot d}\right) \times 100 \quad (2.5)$$

Op atım çakışma oranını, Os aralık çakışma oranı, L yan yana iki ışın arasındaki mesafeyi (μm), t iki tarama yönü arasındaki mesafesini (tarama aralığı) (μm), d lazer ışın spot çapını (μm), H ışın tarama hızını (mm/s), F frekansı (kHz), x ışın tarama yönünde ard arda iki ışının çakışma mesafesini, s iki tarama yönü arasında alt alta gelen ışınların çakışma mesafesini ifade etmektedir (Kasman, 2010).

2.2.3.7. Katman kalınlığı

Katman kalınlığı yatayda tek seferde işlenen toz katman boyunu ifade etmektedir. Şekil 2.13’de görüldüğü gibi katman kalınlığı azaldıkça işlem hassasiyeti artmaktadır.



Şekil 2.13 - Katman kalınlığı

2.2.3.8. Işın tarama yönü

Işın tarama yönü ışının izlediği yolu ifade etmektedir. Işın tarama yönü istenilen açı ve profilde elde edilir. Yatayla 0° ile 360° arasında değişen açılarda profiller oluşabilir.

2.2.3.9. Atmosfer kontrolü

Toz tabakasının hacimsel olarak daha fazla ergitilmesi ile atmosfer kontrolü daha önemli bir hal alır. Ergiyen metalin atmosferden oksijen alması ile oksitlenmeler başlar. Atmosferden alınan oksijen sıvı yüzey enerjisini düşürmekte ve ıslana birliliğinin düşmesine yol açmaktadır. Alınan oksijenin yeri ve yoğunluğu yapıda hasar ve boşluklara sebep olmaktadır. Bu sebeplerden dolayı atmosferin kontrolü önemlidir. Atmosfer kontrolü işlemin kapalı bir ortamda gerçekleşmesi gerekmektedir. Kapalı alanın öncelikle vakumla oksijen seviyesinin düşürülmesi gerekmektedir. Vakumlanan kapalı ortamın çeşitli gazlarla koruyucu ortam yapılması için doldurulması sağlanmaktadır. Kullanılacak olan malzeme sistemine göre nitrojen, hidrojen, argon, nitrojen hidrojen karışımı koruyucu ortam olarak kullanılmaktadır. Farklı gazlar kullanımı ıslana birlilik probleminin çözümünü sağlamaktadır.

Son işlem yapılır iken argon gazı koruyuculuğu kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak çeşitli oksijen giderme kaplamaları veya bileşenler kullanımı ıslana birliliğin artırılmasında katmanlı lazer ergitme malzeme sisteminde kullanılmaktadır. Oksijen giderme prensibi, toz malzeme partiküllerinin yüzeylerinde oksit tabakasının azaltılmasıdır. Bu oksijen gidericiler $ZnCl_2$, $NaCO_3$, $KCrO_3$, Si ve H_3BO_3 içermektedir (Lü et al, 2001)

3. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde ülkemizde ve tüm dünyada katmanlı lazer imalat teknolojisi kapsamında gerçekleştirilen akademik araştırmalar incelenerek literatürde yer alan konu ile ilgili çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

Katmanlı imalat yöntemini esas alan çalışmaların ülkemizde oldukça sınırlı olduğu anlaşılmış olup Türkiye’de gerçekleştirilen ve literatürde bulunan tüm çalışmalara yer verilmiştir.

Türkiye dışındaki araştırmalar dört ana başlıkta toplanarak değerlendirilmiştir. Bunlar:

- İş parçalarının metalürjik özelliklerinin incelendiği araştırmaları,
- İş parçalarının mekanik özelliklerinin incelendiği araştırmaları,
- Kullanılan ham madde özelliklerinin iş parçasına etkilerinin incelendiği araştırmaları,
- Modelleme ve simülasyona yönelik araştırmaları,
- Üretim sistemi geliştirmeye yönelik araştırmaları,
- Genel değerlendirme (review) araştırmalarıdır.

3.1. Türkiye’deki Araştırmalar

Ülkemizde katmanlı lazer imalat teknolojisine ilişkin oldukça az sayıda çalışma yapılmış olup aşağıda bu çalışmalar ilişkin özet bilgiler verilmiştir.

Araştırmacı Özkan İLKGÜN tarafından 2005 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde “Lazer sinterleme hızlı prototipleme teknolojisinde üretim parametrelerinin, parça gözenek yapısı ve delik özellikleri üzerindeki etkileri” başlıklı yüksek lisans tezinde; lazer sinterleme teknolojisi ile polimer malzeme kullanılarak üretilen önceden tasarlanmış gözenekli yapıların üretilebilme kabiliyetleri araştırılmıştır (İlkgün, 2005).

Araştırmacı Mehmet Mahir SOFU tarafından 2007 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde “hızlı direkt imalatla

kullanılan seçici lazer sinterleme ve ergitme cihazının gövde tasarımı ve imalatı” başlıklı yüksek lisans tezinde katmanlı lazer sinterleme ve katmanlı lazer ergitme makinelerine lineer motorlar ve galvano tarayıcı adapte edilerek gövde tasarımının CAD modeli yapılmıştır (Sofu, 2007).

Araştırmacı Cevdet Murat TEKİN tarafından 2009 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde “Katmanlı lazer sinterleme ile üretilen gözenekli polimer malzemelerin modellemesi ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi” başlıklı yüksek lisans tezinde lazer sinterleme yöntemi ile üretilen gözenekli malzemelerin, üretimi - gözenek yapısı (mikroyapı) - mekanik özellik ilişkileri incelenmiştir (Tekin, 2009).

Araştırmacı Jande Yusufu Abeid CHANDFE tarafından 2009 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde “Lazer sinterleme hızlı prototipleme yöntemi kullanılarak derecelendirilmiş homojen ve gözenekli polimerik malzeme üretimi ve karakterizasyonu” başlıklı yüksek lisans tezinde sinterleme yöntemi kullanılarak, düzenli ve derecelendirilmiş gözenekli polimerik malzeme üretimi yapmıştır. Üretimde EOSINT P380 lazer sinterleme makinesi ile poliamid PA2200 plastik toz kullanılmıştır. Farklı gözeneğe sahip parçalar üretmek için lazer tarama aralığı, lazer gücü ve lazer tarama hızı üretim parametreleri değiştirilmiştir. Bu sayede homojen (düzenli) gözenekli ve derecelendirilmiş gözenekli yapıya sahip parçalar üretilmiştir (Chandfe, 2009).

Araştırmacı Gözde Anıl GÜRBÜZ tarafından 2012 yılında Çukurova Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı’nda “Selektif lazer sinterizasyonu ile oluşturulan co-cr alaşımların invitro olarak değerlendirilmesi” başlıklı doktora tezinde selektif lazer sinterizasyon yöntemi kullanılarak elde edilen örneklerin mekanik özellikleri ile döküm yöntemi kullanılarak elde edilen Ni-Cr (Bego Wirobond C) ve Co-Cr (Bego Wiron 99) alaşımlarından elde edilen örneklerin mekanik özelliklerini germe testi kullanılarak karşılaştırmak, çekme testi sonrası ayrılan kırık yüzeylerinin mikroskobik olarak değerlendirmek ve polisajlı yüzeylerin mikroyapısını tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) kullanarak incelemek, grupların elemental içeriklerini karşılaştırmak,

porselen fırınlama aşamalarının metal alt yapı örneklerinin kenar uyumuna etkisini incelemektir (Gürbüz, 2012).

Araştırmacı diş hekimi Özge ÇELİK tarafından 2015 yılında Hacettepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü'nde "Titanyum alaşım yüzeylerin selektif lazer ergitme işlemi ile kaplanması sonrası hgf-1 proliferasyonunun değerlendirilmesi" başlıklı doktora tezinde hem biyo uyumluluğunun hem de yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla, tornalanmış Grade 5 titanyum disklerin, SLM işlemi ile Grade 23 titanyumla kaplanması sonrası insan dişeti fibroblast hücrelerinin (HGF-1) proliferasyonunu incelemiştir (Çelik, 2015).

Araştırmacı Mehmet Akif ERSOY tarafından 2015 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi İmalat Mühendisliği Bölümü'nde "Doğrudan metal lazer sinterleme yöntemiyle dental implant üretimi" başlıklı yüksek lisans tezinde farklı yiv tasarımıyla yüzey alanı artırılmış bir implant tasarlanmıştır. Doğrudan metal lazer sinterleme metodu ile ikinci bir işleme gerek kalmadan implant yüzeyinde oluşturulan gözenekler incelenmiştir (Ersoy, 2015).

3.2. Türkiye Dışındaki Araştırmalar

3.2.1. İş parçalarının metalürjik özelliklerinin incelendiği araştırmalar

Eberhard Abele, Hanns A. Stoffregen, Michael Kniepkamp ve Sebastian Lang'ın 2014 yılında yayınladıkları "İnce cidarlı gözenekli elementlerin üretimi için katmanlı lazer ergitme" başlıklı makalelerinde ince cidarlı parça üretimi amaçlanarak farklı gözeneklik değerlerinde üretilen parçalar incelenmiştir (Abele et al, 2014).

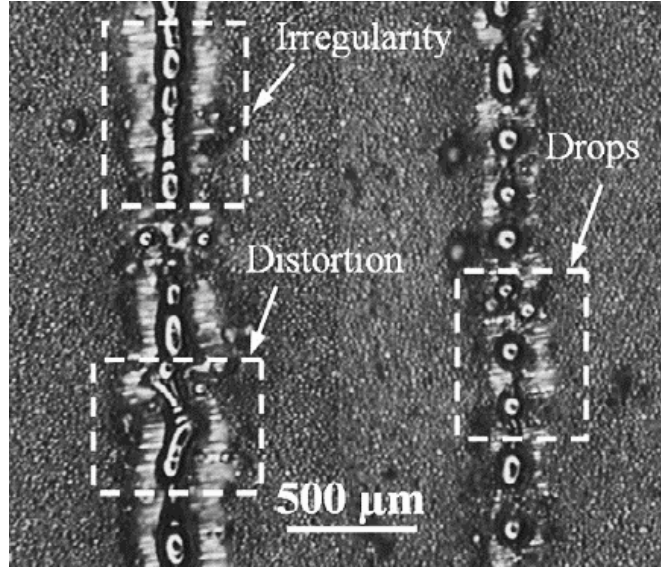
H. K. Rafi, N. V. Karthik, Haijun Gong, Thomas L. Starr ve Brent E. Stucker'in 2013 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme ve elektron ışını ile ergitme ile üretilmiş Ti6Al4V parçaların mikroyapıları ve mekanik özellikleri" başlıklı makalelerinde katmanlı lazer ergitme ve elektron ışını ile ergitme metotlarının karşılaştırılmalı olarak incelenmesi yapılmıştır. Elektron ışını ile

ergitme metodunun yüzeyinin merdiven efekti yüzünden daha pürüzlü olduğu görülmüştür. İki metot arasında farklı mikroyapı sonuçları ortaya çıkmıştır. Katmanlı lazer ergitme ile üretilen parçanın yorulma limiti elektron ışını ile ergitme ile üretilen parçaya göre daha Fazla çıkmıştır (Rafı et al, 2013).

H. Krauss ve M. F. Zaeh'in 2013 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme metodunun işlem güvenirliği ve üretilen bilirliliği üzerine araştırmalar" başlıklı makalelerinde Inconel 718 malzemesini tabla üzerinde beş farklı açıda, iki farklı duvar kalınlığında ve farklı tabaka kalınlıklarında üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen numuneler hat enerjileri ve pürüzlülük değerlerine göre incelenmiştir. İnce duvar parametresinde üretilen numunelerin karşılaştırmalı değerlerinin üretim açısından dezavantajlı olduğu görülmüştür (Krauss et al, 2013).

Andreas Gebhardt, Michael Schmidt ve Jan Steffen Hötter 2010 yılında yayınladıkları "Realizer masaüstü Katmanlı lazer ergitme makinesi ile eklemeli imalat ve dış endüstrisindeki uygulamaları" başlıklı makalelerinde üç parça uygulama dış köprüsü oluşturmuş ve destek yapılarının mikroyapı özelliklerini incelemişlerdir. (Gebhardt et al, 2010).

I.Yadroitsev, P. Krkhmalev, I. Yadroitsava, S. Johnson ve I. Smurov'un 2012 yılında yayınladıkları "Enerji girdisinin katmanlı lazer ergitme ile metal tozuyla tek hat üretiminin morfolojisine ve mikro yapısına etkisi " başlıklı makalelerinde 316L paslanmaz çelik tozu kullanılarak lazer gücü, katman kalınlığı ve ışın çapı parametreleri sabit tutularak tarama hızı parametresi değiştirilerek yapılan tek hat üretimlerde ön ısıtmanın önemi araştırılmıştır. Ön ısıtmanın hücre aralarına etkisinin düşük olduğu tespit edilmiştir. Ön ısıtma temas açısını ve hat yüksekliğini kontrol ederken, tarama hızı iz genişliğini ve temas bölgesi büyüklüğünün kontrolünü sağladığı görülmüştür. Şekil 3.1'de bu çalışmada elde edilen tek hat üretim örnekleri gösterilmektedir (Yadroitsev et al, 2012).



Şekil 3.1 - Tek hat üretim (Yadroitsev et al, 2012)

K. Monroy, J. Delgado ve J. Ciurana 2013 yılında yayınladıkları “Katmanlı lazer ergitme üretimi işlemiyle CoCrMo alaşımları üzerine boşluk formasyonu çalışması” başlıklı makalelerinde CoCrMo alaşımları ile üretilen numunelerin boşluk karakterizyonu üzerine çalışmışlardır. İşlem sırasında gaz sıkışması sebebiyle dairesel pürüzsüz duvarlı boşluklar gözlenmiştir. Yüksek katman kalınlıklarında düşük boşluklar elde edilmiştir. Ortalama boşluk alanı bulunmuştur. Tarama hızları düştükçe ortalama boşluktan daha yüksek boşluk alanları oluştuğu gözlenmiştir (Monroy et al, 2013).

Dongdong Gu, Yves-Christian Hagedorn, Wilhelm Meiners, Konrad Wissenbach ve Reinhart Poprawe’nin 2011 yılında yayınladıkları “Katmanlı lazer ergitme ile nano kristal TiC güçlendirilmiş kütle form nano kompozit Ti matrisi: yoğunlaştırma, büyüme mekanizması ve aşınma davranışı” başlıklı makalelerinde hacimsel enerji yoğunluğu kullanılarak üretilen malzemelerin yoğunluğu, yorulma ve aşınma dayanımları incelenmiştir (Gu et al, 2011).

Dongdong Gu, Yves-Christian Hagedorn, Wilhelm Meiners, Guangbin Meng, Rui Joao Santos Batista, Konrad Wissenbach ve Reinhart Poprawe’nin 2012 yılında yayınladıkları “Katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş ticari saf titanyumun yoğunluk davranışı, mikro yapı gelişimi ve aşınma performansı” başlıklı

makalelerinde lazer tarama hızı değişiminin mikroyapı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi yapılmıştır (Gu et al, 2012).

Baicheng Zhang, Jing Chen ve Christian Coddet'in 2013 yılında yayınladıkları "Ti-Ni karışımı tozlu katmanlı lazer ergitme ile yerinde şekil hafızalı alaşımların mikro yapı ve dönüşüm davranışı" başlıklı makalelerinde katmanlı lazer ergitme ile üretilen yerinde şekil hafızalı alaşımların Faz değişimleri ve yoğunluk değişimi incelenmiştir. Düşük lazer tarama hızlarında daha yoğun yapılar elde edildiği görülmüştür. Düşük lazer tarama hızları ve göreceli daha Fazla ergime süresinde oluşan Faz değişimleri gözlemlenmiştir (Zhang et al, 2013).

Bo Song, Shujuan Dong, Pierre Coddet, Genshu Zhou, Sheng Ouyang, Hanlin Liao ve Christian Coddet'in 2013 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş hibrit nano-mikro SiC takviyeli demir matrisli kompozitlerin çekme davranışı ve mikroyapıları" başlıklı makalelerinde SiC takviyesinin üretime olan etkisi incelenmiştir. SiC takviyesi ile kısmi ergime kararsızlığı olduğu ve küçük partiküllerin yüzeyde biriktiği belirtilmiştir (Song et al, 2013).

Bo Song, Shujuan Dong, Sihao Deng, Hanlin Liao ve Christian Coddet'in 2013 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş demir parçaların çekme davranışı ve mikroyapıları" başlıklı makalelerinde demir tozlarının farklı lazer tarama hızları ve farklı lazer güçleri ile üretimi yapılmıştır. Numunelerin çekme davranışı ve mikro yapıları incelenmiştir. Standart üretim demire göre katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş demir arasında çekme dayanımında artış olduğu görülmüştür (Song et al, 2013).

E. Yasa ve J-P. Kruth'un 2011 yılında yayınladıkları "Lazerle yeniden ergitilmeye maruz kalmış katmanlı lazer ergitilmiş 316L paslanmaz çelik parçaların mikro yapısal incelenmesi" başlıklı makalelerinde katmanlı lazer ergitme işleminde Fazlardan lazer taramaları ile metalin tekrar ergitilmesi işlemine maruz bırakılan parça ile tek lazer tarama ile üretilen parçanın mikroyapısal karşılaştırılması yapılmıştır. Tekrar ergitilmeye maruz kalan parçalarda %100'e yakın yoğunluk değerlerine ulaşılmış ve %90'a kadar yüzey iyileşmesi gözlemlenmiştir. Tekrar ergitme işleminde ergiyik havuzlarının kaybolması sağlanmış ve bu olayın

gözenekliliği azaltmasına mukabil daha iyi mekanik özelliklere yol açacağı öngörülmüştür (Yasa et al, 2011).

S. Amin Yavari, R. Wauthle, A.J. Böttger, J. Schrooten, H. Weinans, A.A. Zadpoor'un 2013 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme kullanılarak üretilmiş ısıtma işlem ve anotlanmış gözenekli titanyum biyomalzemenin yüzeyinin kristal yapısı ve nano topografik özellikleri" başlıklı makalelerinde üç farklı ısıtma işlem görmüş gözenekli titanyum biyomalzemenin yüzey topografisi çıkarılmış ve incelenmiştir (Yavari et al, 2013).

Dongdong Gu ve Wilhelm Meiners'in 2010 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme ile hazırlanmış yerinde WC sinterlenmiş karbür bazlı sert metallerin yerleşim mekanizması ve mikro yapı karakterizasyonu" başlıklı makalelerinde katmanlı lazer ergitme ile hazırlanmış yerinde WC sinterlenmiş karbür bazlı sert metallerin yerleşim mekanizması, mikro sertliği ve mikro yapı karakterizasyonu incelenmiştir. Yüzde 96,3 kadar yoğunluk değerleri gözlemlenmiştir. Düşük lazer girişinde oluşan M6C yapısı arttığı ve yapı şeklinin taneli yapıdan dairesel forma döndüğü görülmüştür. Maksimum sertlik değerleri tespit edilmiştir (Gu et al, 2010).

Dongdong Gu, Hongqiao Wang, Fei Chang, Donghua Dai, Pengpeng Yuan, Yves-Christian Hagedorn ve Wilhelm Meiners'in 2014 yılında yayınladıkları "TiC/AlSi10Mg yığın formu nano kompozitlerinin uygun hale getirilmiş mikroyapı ve özellikler ile katmanlı lazer ergitme eklemeli imalatı" başlıklı makalelerinde parametre değişimi ile numunelere istenilen özellik ve mikro yapı kazandırılması amaçlanmıştır. Enerji girişi artışı ile gözenekliliğin azaldığı gözlemlenmiştir (Gu et al, 2014).

Li Zeng, Nan Xiang ve Bin Wei'nin 2014 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme ve geleneksel işlem ile üretilen kobalt krom molibden metal seramik alaşımının korozyon dayanımı karşılaştırılması" başlıklı makalelerinde porselen kaplanmış ve kaplanmamış olarak üretilen katmanlı lazer ergitme ve geleneksel işlem numunelerinin iki farklı test koşulunda oluşan korozyon dayanımı incelenmiştir. Porselen kaplama işleminin korozyon dayanımı etkisinin gözle

görülebilen bir fark yaratmadığı gözlemlenmiştir. Katmanlı lazer ergitme ve geleneksel işlem numunelerinin korozyon dayanımlarının benzer sonuç verdiği gözlemlenmiştir (Zeng et al, 2014).

Holger Dürr, Rolf Pilz ve Nuri Saad Eleser'in 1999 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer sinterleme vasıtasıyla EDM elektrotlarının hızlı takımlanması" başlıklı makalelerinde katmanlı lazer ergitme metodu ile bronz nikel toz kullanılarak üretilmiş EDM elektrotlarının üretimi gerçekleştirilmiştir. Tarama hızının ve tarama aralıklarının optimizasyondaki önemli olduğu belirtilmiştir. Düşük tarama hızlarının pürüzlülüğü azalttığı görülmüştür (Dürr et al, 1999).

3.2.2. İş parçalarının mekanik özelliklerinin incelendiği araştırmalar

X. J. Wang, L.C. Zhang, M.H. Fang ve T.B. Sercombe'nin 2014 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitilmiş Al-12Si alaşımının atmosferinin yapıya ve özelliklerine etkisi" başlıklı makalelerinde katmanlı lazer ergitme atmosferin sertlik, yoğunluk ve sünekliğe olan etkisi incelenmiştir. Argon, nitrojen ve helyum atmosferlerinin katmanlı lazer ergitme ile yapılan üretimler ile geleneksel olarak kullanılan azot ile karşılaştırılmasında yoğunluk ve sertlik değerlerinde gözlemlenebilir fark gözlemlenmemiştir. Buna rağmen helyum ortamında düşük süneklik gözlemlenmiş ve bunun sebebinin gözenek kümesinin mikroyapıdaki yerleşiminin sonucu olabileceği belirtilmiştir. Argon ve nitrojen atmosferlerinin geleneksel metoda göre bir buçuk kat akma mukavemeti, yüzde yirmi daha yüksek kopma dayanımı ve kopmaya kadar iki kat uzama sağladığı gözlemlenmiştir (Wang et al, 2014).

C. Casavola, S. L. Campanelli ve C. Pappalettere'nin 2009 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme işlemi tarafından oluşan artık gerilmelerin dağılımı üzerine ön çalışma" başlıklı makalelerinde tablada üç farklı yerde konuşlanan numunelerin dört farklı tabaka kalınlığında üretimi gerçekleştirilmiş ve artık gerilmeleri incelenmiştir. Numune pozisyonuna göre artık gerilimdeki farklılıklar gösterilmiştir. En Fazla yüzeyde gerilmeler gözlenmiş belli bir derinliğe kadar derinlik arttıkça gerilmelerin azaldığı gözlemlenmiştir. Bütün numunelerde

(yerleşime bakılmaksızın) belli bir ölçüde artık gerilimlerin nerdeyse eşit olduğu gözlemlenmiştir (Casavola et al, 2009).

S. Leuders, M. Thöne, A. Riemer, T. Niendorf, T. Tröster, H.A. Richard ve H.J. Mainer'ın 2012 yılında yayınladıkları “Katmanlı lazer ergitme ile üretilen TiAl6V4 titanyum alaşımının mekanik özellikleri üzerine: Yorulma dayanımı ve çatlak büyüme performansı” başlıklı makalelerinde TiAl6V4 titanyum alaşımının yorulma dayanımı ve çatlak büyüme performansı yanı sıra mikroyapı ile mekanik özelliklerin ilişkisi incelenmiştir. Isıl işlem görmüş katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş TiAl6V4 titanyum alaşımının çatlak büyümesinin geleneksel olarak üretilen ile benzer özellikler gösterdiği görülmüştür (Leuders et al, 2012).

T. Laoui, E. Santos, K. Osakada, M. Shiomi, M. Morita, S. K. Sahik, N. K. Tolochko, F. Abe ve M. Takahashi'nin 2006 yılında yayınladıkları “Lazerle işleme ile üretilmiş titanyum implant modellerinin özellikleri” başlıklı makalelerinde titanyum malzeme kullanılarak üretilmesi planlanan implant için optimizasyon yapılmıştır. Tarama hızı, lazer gücü, tarama aralıkları ve lazer çeşitleri değiştirilerek üretilen numunelere yorulma testi yapılmıştır (Laoui et al, 2006).

F. Abe, E. Costa Santos, Y. Kitamura, K. Osakada ve M. Shiomi'nin 2003 yılında yayınladıkları “Katmanlı lazer ergitme işlemi ile hızlı prototiplemede titanyum model üzerine şekil verme koşullarının etkisi” başlıklı makalelerinde önce titanyum tozlarından tek hat testi uygulanmış buradan çıkan sonuçlarla parametreler daraltılmıştır. Daha sonra lazer gücünün ve tarama hızının yoğunluk ve yorulma üzerine etkisi incelenmiştir. Bu etkilerin incelenmesi sonucunda yüksek yoğunluğa sahip titanyum modellerin bu metotla üretililebileceği görülmüştür. Şekil 3.2 Tek hat üretilmiş farklı parametrelere ait numunelere ait fotoğraflar gösterilmiştir (Abe et al, 2003).



(a) $P = 0.25$ kW, $w = 4$ ms, $f = 50$ Hz



(b) $P = 1$ kW, $w = 1$ ms, $f = 50$ Hz



10 mm

(c) $P = 2$ kW, $w = 1$ ms, $f = 25$ Hz

Şekil 3.2 - Tek hat üretilmiş farklı parametrelere ait numuneler(Abe et al, 2003).

E. C. Santos, K. Osakada, M. Shiomi, Y. Kitamura ve F. Abe'nin 2004 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme işlemi ile saf titanyum modellerin mikro yapı ve mekanik özellikleri" başlıklı makalelerinde kullanılan parametreler ile üretilen tüm modellerin yoğunluğunun yüksek olmakla birlikte parametre optimizasyonu ile daha da yükselebileceği görülmüştür. Dövme ile üretilen titanyum numunelerin sertlik değerlerinden daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Sebebinin ortamdaki alınan oksijen olduğu belirtilmiştir (Santos et al, 2004).

Erhard Brandl, Ulrike Heckenberger, Vitus Holzinger ve Damien Buchbinder'in 2011 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme kullanılarak AlSi10Mg'nin eklemeli imalatı: mikroyapı, yüksek çevrim yorulma ve çatlak davranışı" başlıklı makalelerinde farklı ön ısıtma sıcaklıklarında ve farklı açıl

yönlerde üretilen numunelerin mikroyapı yorulma dayanımları karşılaştırılmıştır (Brandl et al, 2011).

H. Khalid Rafi, Thomas L. Starr ve Brent E. Stucker'ın 2013 yılında yayınladıkları “Katmanlı lazer ergitme ile üretilen Ti6Al4V ve 15-5 paslanmaz çelik parçaların çekme, yorulma ve çatlak davranışının karşılaştırılması” başlıklı makalelerinde üretilen Ti6Al4V ve 15-5 paslanmaz çelik parçaların çekme değerlerinin dövme ile üretilmiş Ti6Al4V ve 15-5 paslanmaz çelik parçalara göre eşdeğer ve hatta daha iyi olduğu gözlenmiştir. Katmanlı lazer ergitme üretilen Ti6Al4V parçanın yorulma performansının standarda göre daha iyi olduğu belirtilmiştir(Rafi et al, 2013).

Y. Sun, A. Moroz ve K. Alrbaey'in 2013 yılında yayınladıkları “Katmanlı lazer ergitilmiş 316L paslanmaz çeliğin korozyon davranışı ve kaymalı aşınma karakteristiği” başlıklı makalelerinde üretilen numunelerin tarama hızları karşılaştırılarak yüksek yoğunluk elde edilmiştir. Boşluklu yapının azaltılmasının korozyon direncine etkisi incelenmiştir (Sun et al, 2013).

Kai Guan, Zemin Wang, Ming Gao, Xiangyou Li ve Xiaoyan Zeng'in 2013 yılında yayınladıkları “Katmanlı lazer ile ergitilmiş 304 paslanmaz çeliğin işleme parametrelerinin çekme özelliklerine etkisi” başlıklı makalelerinde katmanlı lazer ile ergitilmiş 304 paslanmaz çeliğin katman tabakası, bindirme oranı, tarama yön açısı, işlem yönü parametreleri değiştirilerek üretimi gerçekleştirilmiş ve çekme özellikleri incelenmiştir. Tam katı üretilebilen numunelerin 304 paslanmaz çeliğin çekme ve uzama özelliklerinin bakımdan dövme ile üretilen 304 paslanmaz çeliğe göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Katman kalınlığının pürüzlülükte anahtar rol üstlendiği belirtilmiştir. Değişik yönlerde imal edilmiş numunelerin anisotropi için güçlü kanıt olduğu gösterilmiş. Yatay numunelerin optimize edilmiş mukavemet ve süneklik kombinasyonu gösterilmiştir (Guan et al, 2013).

Luca Facchini, Emanuele Magalini, Pierfrancesco Robotti, Alberto Molinari, Simon Höges ve Konrad Wissenbach'ın 2010 yılında yayınladıkları “Ön alaşımlama yapılmış tozlar kullanarak katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş Ti-6Al-4V alaşımının sünekliliği” başlıklı makalelerinde sıcak işlenmiş ve tavlanmış tozlar

kullanılarak katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş ve katmanlı lazer ergitme ile üretilip ısıtılma maruz kalmış parçaların mikro yapıları ve sünekliliği incelenmiştir. Mikro yapı ve çekme incelemeleri sonucunda katmanlı lazer ergitme metodu ile üretilmiş parçaların sıcak işlenmiş ve tavllanmış parçalara göre daha yüksek mukavemete sahip olduğu ve sünekliliğin düşük olduğu gözlemlenmiştir. Fakat üretim sonrası yapılan ısıtılma işlemin sünekliliği artırırken mukavemetinde düşüş gözlemlenmiştir (Facchini et al, 2010).

P. Edwards ve M. Ramulu'nun 2014 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitilmiş Ti-6Al-4V'nin yorulma performansı değerlendirilmesi" başlıklı makalelerinde aynı parametreler ile fakat üç farklı yönde üretilmiş test numunelerinin yorulma performansları karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Ti-6Al-4V'nin katmanlı lazer ergitme ile üretimi sonrası artık gerilmelerin giderilmesi için son işlem stres giderme işlemi yada izostatik sıcak presleme yapılması gerektiği öngörülmüştür. Numunelerin yorulma dayanımı dövme ile üretilene göre yüzde yetmiş beş daha düşük olduğu görülmüş ve bunun sebebinin yüzey işlemi, gözeneklilik ve artık gerilmeler olduğu belirtilmiştir. Üretim yönünün öneminin belirgin olduğu görülmüştür (Edwards et al, 2014).

Brecht Van Hooreweder ve Jean-Pierre Kruth'un 2014 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer sinterlenmiş Polyamide 12 parçaların yüksek çevrim yorulma özellikleri" başlıklı makalelerinde iki yönde katmanlı lazer sinterleme ve enjeksiyon kalıplama ile üretilmiş yalın ve çentikli numunelerin yüksek çevrim yorulma özellikleri incelenmiştir. Yönlü üretimin yüksek çevrim yorulma özellikleri üzerinde etkisi olmadığı ve bunun sebebinin optimum üretim yöntemi ve tam yoğunluğa yakın parça üretimi olduğu belirtilmiştir (Hooreweder et al, 2014).

P. Lipinski, A. Barbas ve A.-S. Bonnet'in 2013 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş ince duvarlı düzey 2 titanyum numunelerin kırılma davranışı. Gözenekli titanyum implantların ömür tahmini uygulaması" başlıklı makalelerinde implant olarak kullanılacak titanyum malzemeden katmanlı lazer ergitme ile üretilen parçaların yorulma ömürleri incelenmiştir (Lipinski et al, 2013).

K. Kempen, L. Thijs, J. Van Humbeeck ve J.-P. Kruth'un 2012 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş AlSi10Mg'nin mekanik özellikleri" başlıklı makalelerinde iki farklı yönde üretilmiş AlSi10Mg malzemeye Charpy testi uygulanıp mekanik özellikleri incelenmiştir (Kempen et al, 2012).

Fude Wang'ın 2011 yılında yayınladığı "Katmanlı lazer ergitme teknolojisi ile Hastelloy X hızlı eklemeli katman üretimi üzerine mekanik özelliklerin incelenmesi" başlıklı makalelerinde Hastelloy X malzemesinin optimum parametrelerle üretimi gerçekleştirilmiş ve sıcak izostatik basınç işleminin etkisi incelenmiştir. Sıcak izostatik basınç işleminin hataların giderilmesi ve yoğunluğun artmasında etkisi gözlemlenmiştir (Wang, 2011).

K. Senthilkumaran, Pulak m Pandey ve P.V.M. Rao'nun 2009 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitmede parçaların hassasiyeti üzerine imalat stratejilerinin etkisi" başlıklı makalelerinde katmanlı lazer ergitme ile üretilen parçada lazer ışının dengelenmesinin çekmeye etkisi incelenmiştir. Lazer ışını tarama aralıklarının doğru ayarlanmamasının çekmeye olumsuz etkisi gözlenmiştir. Tarama yönünün ve tarama alanının etkisi tarama yönünün doğrultusundaki çekmeye olan etkisinin dikey yöndeki çekmeye olan etkisine göre daha az olduğu gözlemlenmiştir (Senthilkumaran et al, 2009).

3.2.3. Kullanılan ham madde özelliklerinin iş parçasına etkilerinin incelendiği araştırmalar

Qingbo Jia ve Dongdon Gu'nun 2013 yılında yayınladıkları "Inconel 718 süper alaşımının katmanlı lazer ergitme ile üretimi: Yoğunluk, Mikro yapı ve özellikleri" başlıklı makalelerinde farklı parametreler kullanılarak üretim gerçekleştirilmiştir. Numunelerin mikro yapıları, sertliği, yoğunluğu, oksidasyon zamanları ve aşınma performansı incelenmiştir. Malzeme için optimum lazer enerjisi tespiti yapılmıştır. Lazer enerjisi artırılarak başarılı mikro yapılar elde edilmiştir. Daha düşük sürtünme kat sayısı gözlemlenmiştir. Optimum yüksek sıcaklık oksidasyon direnci tespit edilmiştir (Jia et al, 2013).

Bo Song, Shujuan Dong, Qi Liu, Hanlin Liao ve Christian Coddet'in 2013 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş demir parçaların vakum ısıtma işlemi: mikro yapı, artan gerilme ve çekme davranışı" başlıklı makalelerinde vakum ısıtma işlemi yapılan ve yapılmayan numunelerin mikro yapıları, artan gerilmeleri ve çekme davranışı incelenmiştir. Tavlanmış numunelerin elastik modülünde düşüş gözlemlenirken, akma dayanımı, üst çekme dayanımı ve gerinim değerlerinde artış gözlemlenmiştir (Song et al, 2013).

Liciane Sabadin Bertol, Wilson Kindlein Junior, Fabio Pinto da Silva ve Claus Aumund-Kopp'un 2010 yılında yayınladıkları "Tıbbi Dizayn:Ti-6Al-4V malzemesinin direkt metal lazer sinterlemesi" başlıklı makalelerinde bilgisayar tomografisi ile bir beyin tümörü hastasından elde ettikleri üç boyutlu kafa tarama görüntüsünden bir model oluşturulmuş. Oluşturulmuş modelden elde edilmek istenen yapının farklı tarama aralıkları, tarama hızı ile üretimi gerçekleştirilmiş. Bu parametrelerin son yoğunluk ve sertlik değerleri ölçülmüştür. Değerlerin karşılaştırılması ile optimum bir parametre belirlenmiştir (Bertol et al, 2010).

Mike Vasquez, John Cross, Neil Hopkinson ve Barry Haworth'un 2012 yılında yayınladıkları "Kar kayağı uygulamaları için yeni lazer sinterleme malzemeleri geliştirilmesi" başlıklı makalelerinde kar kayağı yapımında kullanılması için uygun aday malzeme seçilmiştir. Bu malzeme için çeşitli parametreler belirleyip istenilen özelliklere sahip olması sağlanmıştır (Vasquez et al, 2012).

Dongdong Gu, Yves-Christian Hagedorn, Wilhelm Meiners, Konrad Wissenbach ve Reinhart Poprawe'nin 2010 yılında yayınladıkları "TiC7Ti5Si3 kompozitlerinin alışılmışın dışındaki güçlendirilmiş mimari ve yüksek performans ile yerinde katmalı lazer ergitilmesi" başlıklı makalelerinde TiC7 ve Ti5Si3 malzemeleri kullanılarak farklı tarama hızlarında üretimi gerçekleştirilmiştir. Numuneler mikro yapıları, sertliği, yoğunluğu ve aşınma performansı yönünden incelenmiştir. Lazer enerjisinin mikroyapıyı etkileyen anahtar faktör olduğu tespit edilmiştir. Sertlik artışında güçlendirilmemiş mimariye göre üç kat Fazla sertlik artışı görülmüştür. Daha düşük sürtünme kat sayısı gözlemlenmiştir. Belirli bir

lazer enerji yoğunluğu düşürülünce yoğunluğun, sertliğin ve sürtünme dayanımının düştüğü gözlemlenmiştir (Gu et al, 2010).

Kozo Osakada ve Masanori Shiomi'nin 2006 yılında yayınladıkları “Tozların katmanlı lazer ergitme ile metalik ürünlerin esnek üretimi” başlıklı makalelerinde alüminyum, bakır, demir, paslanmaz çelik, krom, titanyum ve nikel bazlı alaşım malzemelerin tozlarının tek hat testi uygulanarak incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Demir, titanyum ve nikel bazlı alaşım malzemelerin bu üretim şekli için iyi birer aday olduğu belirlenmiştir (Osakada et al, 2006).

Candice Majewski ve Neil Hopkinson'un 2008 yılında yayınladıkları “Katmanlı lazer ergitilmiş Nylon-12 malzemenin partikül ergitme derecesi” başlıklı makalelerinde üretimde kullanılan lazer gücünün Nylon-12 malzemeye etkisi incelenmiştir (Majewski et al, 2008).

L.C. Zhang, D. Klemm, J. Eckert, Y. L. Hao ve T. B. Sercombe'nin 2011 yılında yayınladıkları “Biyomedikal Ti-24Nb-4Zr-8Sn alaşımının katmanlı lazer ergitme ile üretimi ve mekanik davranışı” başlıklı makalelerinde biyomedikal Ti-24Nb-4Zr-8Sn alaşımının katmanlı lazer ergitme ile üretimi gerçekleştirilmiştir. Farklı lazer tarama hızları kullanılarak üretilen numunelerin Vickers sertliği ve yoğunluk profili çıkarılmıştır. Sıcak haddeme ve sıcak dövme ile üretilmiş numunelerle karşılaştırmalı mekanik özellikler incelenmiştir. Tarama hızı düştükçe yoğunluk ve sertlik değerlerinin arttığı gözlenmiştir (Zhang et al, 2011).

Yves-Christian Hagedorn, Jan Wilkes, Wilhelm Meiners, Konrad Wissenbach ve Reinhart Poprawe'nin 2010 yılında yayınladıkları “Katmanlı lazer ergitme ile net şekilli yüksek performans oksit seramik parçalar” başlıklı makalelerinde katmanlı lazer ergitme ile oksit seramik numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin yoğunluk bakımından yüksek olduğu gözlenmiştir. Yüzeysel çatlakların ergitme noktasının biraz altında ısıtılarak elimine edilmesi sağlanmıştır. Isısal şokların azaltılması tablanın sıcaklığının yüksek sıcaklıklara çıkarılması ile sağlanmıştır (Hagedorn et al, 2010).

I. Shishkovsky, I. Yadroitsev ve I. Smurov'un 2012 yılında yayınladıkları "Nitinol tozunun katmanlı lazer ergitilmesi" başlıklı makalelerinde Nitinol tozuna uyguladıkları katmanlı lazer ergitme metodunda iki farklı tarama hızında numuneler elde etmiş. Numunelerin hangi sektörde kullanıla bileceği incelenmiştir (Shishkovsky et al, 2012).

Bo Song, Shujuan Dong, Pierre Coddet, Hanlin Liao ve Christian Coddet'in 2013 yılında yayınladıkları "Nikel Krom alaşımlı parçaların katmanlı lazer ergitme ile üretimi: sütun mikroyapısı ve anizotropik mekanik davranışı" başlıklı makalelerinde katmanlı lazer ergitme metodu ile üretilmiş nikel krom alaşımlarının mikroyapıları, sertliği ve çekme davranışı incelenmiştir. Lazer tarama hızının azalmasının sütun tane boyutunun artmasını sağladığı gözlenmiştir. Lazer hızının artması ile sertlik değerlerinin düştüğü gözlenmiştir. Akma dayanımı ve üst çekme dayanımının artmasının lazer tarama hızının artması ile olduğu gözlenmiştir (Song et al, 2013).

T. H. C. Childs, C. Hauser ve M. Badrossamay'ın 2007 yılında yayınladıkları "Paslanmaz ve takım çelikleri metal tozlarının katmanlı lazer sinterlenmesi/ergitilmesi: deneyler ve modelleme" başlıklı makalelerinde tek hat olarak üretilen toz katmanlarının değişik parametreler kullanılarak üst üste binen katman profilleri incelenmiştir. Kullanılan parametreler toz büyüklüğü, lazer tarama hızı, lazer ışın çapı, iki farklı malzeme tipi ve lazer gücüdür. Isıl iletim ve eriyik akış dolaşımı tarafından yönlendirilen yüzey gerilimleri oluşturmeyen iki ana faktör belirlenmiştir. Bunların lazer gücünün metal tozunun kısmen ergimesini sağlayan aralıklarda olması ve lazer tarama hızının belirli bir yavaşlıkta olması gerektiği belirtilmiştir (Childs et al, 2007).

E. Sallica-Leva, A. L. Jardini ve J. B. Fogagnolo'nun 2013 yılında yayınladıkları "Katmalı lazer ergitme ile elde edilmiş boşluklu Ti-6Al-4V parçalarının mikroyapı ve mekanik davranışları" başlıklı makalelerinde iki farklı parametre takımıyla oluşturulan boşluklu Ti-6Al-4V numunelerin mikroyapıları, sertlik değerleri, çekme dayanımları ve göreceli yoğunluk değerleri incelenmiştir. Üretilen numunelerin bilgisayarda tasarlanan parçalara göre daha ince olduğu gözlemlenmiştir. Sebep olarak da verilen lazer gücünün yüksekliği ve içeriğinde

bulunan nitrojen ve oksijen seviyeleri olduğu görülmüştür (Sallica-Leva et al, 2013).

V. Seyda, N. Kaufmann ve C. Emmelmann'ın 2012 yılında yayınladıkları “Lazer ergitmede Ti-6Al-4V toz malzemenin yaşlandırma işleminin incelenmesi” başlıklı makalelerinde yaşlandırma uygulanmış Ti-6Al-4V toz malzemenin uygulanmayana göre karşılaştırmalı özellikleri incelenmiştir. Uygulanan yaşlandırma işlemi sonucu yoğunlukta, yüzey pürüzlülüğünde, sertlikte ve mekanik dayanımda artış gözlemlenmiştir (Seyda et al, 2012).

Dongdong Gu ve Yifu Shen'in 2006 yılında yayınladıkları “Katmanlı lazer sinterleme ile hazırlanmış alt mikron WC-Co/Cu yığın metal matris kompozitlerin mikroyapıdaki takviye ağırlık bölümüne etkisi ve özellikleri” başlıklı makalelerinde numunelerin WC-Co/Cu takviyesinin ağırlık oranları değiştirilerek üretimi gerçekleştirilmiş ve mikro yapısı incelenmiştir (Gu et al, 2006).

A.Simchi ve D. Godlinski'nin 2010 yılında yayınladıkları “A356/SiC kompozit tozlarının lazer sinterleme boyunca mikroyapı ve yoğunluk değerlendirilmesi” başlıklı makalelerinde tarama oranı, sinterleme atmosferi, tarama boşluğu, SiC hacim oranı ve SiC partikül büyüklüğü parametrelerinin mikroyapıya ve yoğunluğa olan etkisi incelenmiştir. Argon atmosferinde yapılan sinterlemenin yoğunluğu yapılmayana göre çok az artışı gözlemlenmiştir. SiC partikül boyutunun arttırılmasının düşük yoğunluklara sebep olduğu görülmüştür. Seramik parçaların ergime kararlılığının artırmakta olduğu ve küçük içe yığılmış gözeneklere sahip olanların daha Fazla devamlı yüzey morfolojisi gözlemlenmiştir (Simchi et al, 2010).

A.Simchi ve D. Godlinski'nin 2008 yılında yayınladıkları “SiC partiküllerinin Al-7Si-0.3Mg alaşımının lazer sinterlemesine etkisi” başlıklı makalelerinde oransal SiC partiküllerinin lazer sinterlemeye olan etkisi incelenmiştir. Yüzde beş SiC partikül içeriğinin yoğunlaşma oranında artışa sebep olduğu görülmüştür. Daha yüksek partikül içeriklerinde yoğunlaşma oranında düşüş gözlemlenmiştir (Simchi et al, 2008).

P. Kanagarajah, F. Brenne, T. Niendorf ve H.J. Maier’ın 2013 yılında yayınladıkları “Katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş inconel 939: Statik ve periyodik yükleme altındaki mekanik özellikleri üzerine sıcaklığın ve mikro yapının etkisi ” başlıklı makalelerinde farklı tarama hızları, farklı tarama aralıkları ve farklı üretim yönleri ile üretilen numunelerin mikro yapı özellikleri ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Geleneksel iki aşamalı ısıtıl işlemin tekrar kristalizasyona yol açtığı görülmüştür. Yine de tane boyutlarının döküm ile üretilen numunelerle karşılaştırıldığında önemli derece küçük olduğu gözlemlenmiştir. Bütün koşullarda katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş numunelerin akma dayanımı dökümle üretilenlere göre yüksek çıkmıştır. Katmanlı lazer ergitme ile üretilen numunelerin periyodik yükleme altındaki performansının dökümle üretilen numunelere göre önemli derecede yüksek çıktığı gözlemlenmiştir (Kanagarajah et al, 2013).

F. Abe, K. Osakada, M. Shiomi, K. Uematsu ve M. Matsumoto’nun 2001 yılında yayınladıkları “Katmanlı lazer ergitme ile metal tozlarından sert takımların üretilmesi” başlıklı makalelerinde alüminyum, bakır, demir, paslanmaz çelik, krom ve nikel bazlı alaşımların katmanlı lazer ergitilme ile üretimi gerçekleştirilmiştir. Çift lazer tarama sisteminin etkisi incelenmiştir. Çıkan sonuçlara göre nikel bazlı alaşımlarının diğer malzemelere göre daha iyi bir aday olduğu gözlemlenmiştir (Abe et al, 2001).

Dongdong Gu, Guangbin Meng, Chuang Li, Wilhelm Meiners ve Reinhart Poprawe’nin 2012 yılında yayınladıkları “TiC/Ti yığın nano kompozitlerin katmanlı lazer ergitilmesi: Nano boyut takviyesinin etkisi” başlıklı makalelerinde dört farklı oranda takviye edilmiş TiC/Ti yığın nano kompozitlerin mikro sertlik ve mikroyapıları incelenmiştir. Optimum takviye oranı karşılaştırmalar sonucu tespit edilmiştir. Belli bir TiC/Ti takviye oranından sonra sertlik ve aşınma performansının düştüğü gözlemlenmiştir (Gu et al, 2012).

Shaun Eshraghi ve Suman Das’ın 2012 yılında yayınladıkları “Kemik doku mühendisliği için katmanlı lazer ergitme ile hazırlanmış polycaprolactone-hydroxyapatite kompozit yapı iskelelerinin basmaya ilişkin mekanik özelliklerinin mikromekanik sonlu elemanlar modelleme ve deneysel karakterizasyonu” başlıklı makalelerinde farklı oranlarda üretilmiş polycaprolactone-hydroxyapatite

kompozit malzemelerin sonlu elemanlar yöntemi ve katmanlı lazer ergitme ile imalatı gerçekleştirilmiş. Saf polycaprolactone'a göre mekanik özelliklerinde iyileşme gözlemlenmiştir. Karmaşık yapı işlemlerinde önceden tahmin edinilir mekanik özellikler oluşacağı gözlemlenmiştir (Eshraghi et al, 2012).

Krishna C.R. Kolan, Ming C. Leu, Gregory E. Hilmas ve Mariano Velez'in 2012 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer sinterleme ile yapılmış 13-93 biyo aktif gözenekli yapı camın mekanik özellikleri üzerine malzemenin, işlem parametrelerinin ve model gövde sıvılarının etkisi " başlıklı makalelerinde 13-93 biyo aktif cam tozunun yapıştırıcı madde içerme oranının etkisi, ısıtma oranlarının etkisi ve katmanlı lazer sinterleme parametrelerinin etkisi incelenmiştir (Kolan et al, 2012).

Baicheng Zhang, Nour-Eddine Fenineche, Lin Zhu, Hanlin Liao ve Christian Coddet'in 2011 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme teknolojisi ile hazırlanmış mıknatıs alaşımının (Fe-30%Ni) manyetik özellikleri üzerine çalışmalar" başlıklı makalelerinde farklı lazer güçlerinde ve lazer tarama hızlarında üretilmiş numunelerin manyetik özellikleri karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Çalışmada katmanlı lazer ergitme teknolojisinin demir ve nikel tozlarının ergitilmesinde yüksek potansiyele sahip olduğu görülmüştür. Tane boyutlarının küçültülmesini sağlamakla birlikte bu olayın yumuşak manyetizasyonu artırdığı görülmüştür (Zhang et al, 2011).

Baicheng Zhang, Nour-Eddine Fenineche, Hanlin Liao ve Christian Coddet'in 2013 yılında yayınladıkları "Fe-80%Ni tozlarının katmanlı lazer ergitme ile yerinde sentezlenmiş FeNi₃'ün manyetik özellikleri" başlıklı makalelerinde farklı lazer güçlerinde ve lazer tarama hızlarında üretilmiş numunelerin manyetik özellikleri karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Daha büyük kafes yapıları ve küçük tane boyutlarının düşük lazer hızlarında elde edildiği görülmüştür (Zhang et al, 2013).

Therese Bormann, Bert Müller, Michael Schinhammer, Anja Kessler, Peter Thalmann ve Michael de Wild'in 2014 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitilmiş nikel titanyumun mikroyapısı" başlıklı makalelerinde katmanlı lazer

ergitmede lazer gücünün, tarama hızının ve tarama yönünün mikro yapıya olan etkisi incelenmiştir. Lazer gücünün artırılması ile tane boyutunun ve gözenekliliğin arttığı gözlemlenmiştir. Uyguladıkları en düşük lazer gücü ile düşük tane boyutları ve düşük gözeneklilik gözlemlenmiştir (Bormann et al, 2014).

Paul A. Rometsch, Daniele Pelliccia, Dacian Tomus ve Xinhua Wu'nun 2014 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş Hastelloy X numunenin çok renkli x-ray radyografi kusur tespit limitlerinin değerlendirilmesi" başlıklı makalelerinde çok renkli x-ray radyografi kullanılarak malzemede bulunan kusurlar tespit edilmiştir. Farklı katman tabakalarında üretilen çubuk, küre ve disk şeklindeki numunelerin kusur modellemesi yapıp incelenmiştir (Rometsch et al, 2014).

B. Vrancken, L. Thijs, J. –P. Kruth ve J. Van Humbeeck'in 2014 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitilmiş özgün β titanyum metal kompozitinin mikro yapısı ve mekanik özellikleri" başlıklı makalelerinde Ti-6Al-4V ve Ti-6Al-4V'a eklenmiş yüzde on orandaki molibdenin mikro yapıya ve mekanik özelliklere olan etkisi incelenmiştir (Vrancken et al, 2014).

Nesma T. Aboulkhair, Nicola M. Everitt, Ian Ashcroft ve Chris Tuck'ın 2014 yılında yayınladıkları "AlSi10Mg parçaların katmanlı lazer ergitme ile üretiminde gözenekliliğin azaltılması" başlıklı makalelerinde lazer tarama aralıkları, hızı ve yönü kullanılarak üretilen numunelerin gözenekliliği incelenmiştir. Lazer tarama aralıklarının düşük tutulup üst üste binme ortamının oluşumu sağlanıp daha düşük soğuma oluşturulması gerektiği görülmüştür. Anahtar delikleri olarak adlandırılan ergimeyen tozların sıkışması ile oluşan gözeneklerin oluşması probleminin çoklu tarama ile çözülebileceği öngörülmüştür (Aboulkhair et al, 2014).

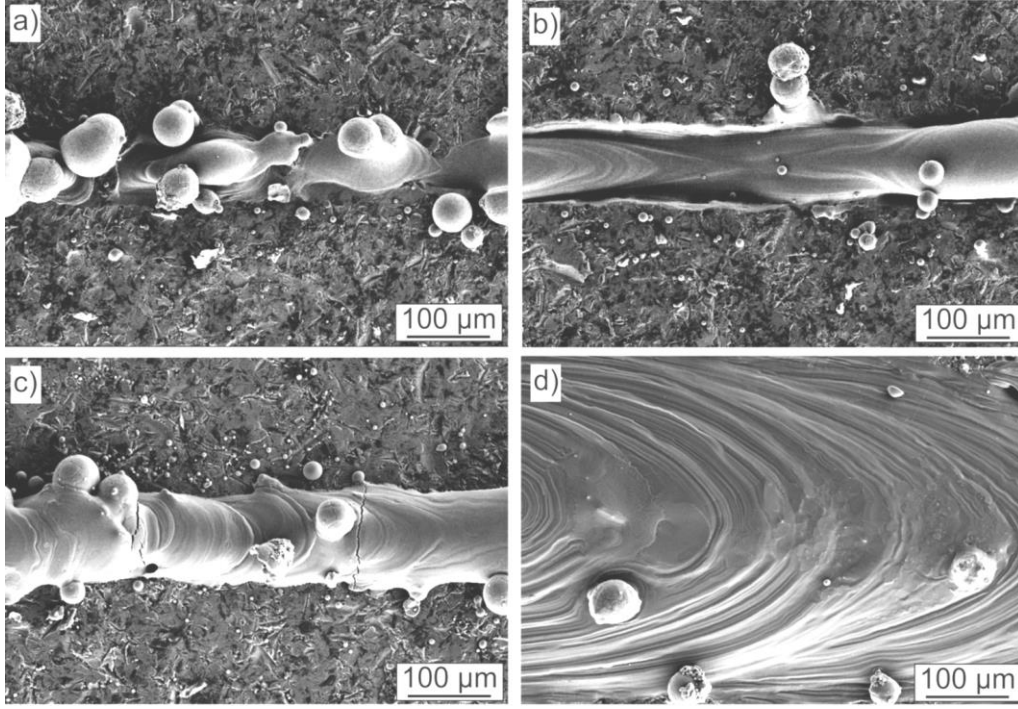
I. Shis, I. Yadroitsev, Ph. Bertrand ve I. Smurov'un 2007 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer sinterleme/ergitme ile alumina-zirkonyum seramiklerinin sentezlenmesi" başlıklı makalelerinde katmanlı lazer sinterleme/ergitme ile alumina-zirkonyum seramiklerinin sentezlenmesi yapılmış

ve mikro yapı özellikleri incelenmiştir. Optimum üretim parametreleri elde edilmiş ve üretim parametrelerinin daraltılması gerçekleştirilmiştir (Shis et al, 2007).

P. Fox, S. Pogson, C.J. Sutcliffe ve E. Jones'un 2008 yılında yayınladıkları "Kobalt krom alaşımı üzerine katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş gözenekli titanyum/tantal kaplamaları arasındaki ara yüz etkileşimleri" başlıklı makalelerinde kobalt krom alaşımı üzerine katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş gözenekli titanyum/tantal kaplamalar yapılmıştır (Fox et al, 2008).

Mari Koike, Preston Greer, Kelly Owen, Guo Lilly, Lawrence E. Murr, Sara M. Gaytan, Edwin Martinez ve Toru Okabe'nin 2011 yılında yayınladıkları "hızlı prototipleme teknolojileri kullanılarak üretilen titanyum alaşımların değerlendirilmesi-Elektron ışın ergitme ve lazer ışın ergitme" başlıklı makalelerinde katmanlı lazer ergitme, elektron ışın ergitme ve döküm ile üretilmiş titanyum malzemelerin mekanik özellikleri, korozyon direnci ve aşınma davranışı incelenmiştir. Dökme ve dövme ile üretilmiş malzemelere göre katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş numuneler aşınma davranışı olarak karşılaştırılabilir seviyede olduğu belirtilmiştir (Koike et al, 2011).

Lukas Löber, Frank Peter Schimansky, Uta Kühn, Florian Pyczak ve Jürgen Eckert 2014 yılında yayınladıkları "Beta-katılaşmış TNM-B1 titanyum alüminyum alaşımının katmanlı lazer ergitilmesi" başlıklı makalelerinde TNM-B1 titanyum alüminyum alaşımının tek hatlı üretimi gerçekleştirilmiş ve üç boyutlu üretim için parametreler tespit edilmiştir. Optimum parametreler ile üç boyutlu olarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3'de farklı tek hat üretim ergime morfolojileri gösterilmektedir (Löber et al, 2014).



Şekil 3.3 - Farklı tek hat üretim ergime morfolojileri (Löber et al, 2014).

Dietamar Drummer, Katrin Wudy ve Maximilian Drexler'in 2014 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş plastik parçaların bozunum davranışına enerji girişinin etkisi" başlıklı makalelerinde katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş PA12 numunelerinin yaşlanma davranışı incelenmiştir. Yaşlanma davranışları akışkanlık davranışı kullanılarak incelenmiştir. Enerji yoğunluğu girişi ortalama moleküler ağırlığında değişikliğe ve kopma uzamasında azalmaya yol açtığı gösterilmiştir (Drummer et al, 2014).

Edward Chlebus, Bogumila Kuznicka, Robert Dziedzic ve Tomasz Kurzynowski'nin 2014 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme ile renyum alaşımlanmış titanyum" başlıklı makalelerinde renyum ile titanyum tozlarının optimum karışım oranı tespit etmeye yönelik incelemeler gerçekleştirilmiştir (Chlebus et al, 2014).

L. C. Ardila, F. Garciandia, J. B. Gonzalez-Diaz, P. Alvarez, A. Echeverria, M. M. Petite, R. Deffley ve J. Ochoa'nın 2014 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme yöntemi ile üretilmiş parçaların özellikleri üzerine IN718 geri dönüşüm tozlarının tekrar kullanımının etkisi" başlıklı makalelerinde tekrar tekrar kullanılan IN718 tozlarının yapıları incelenmiştir. İnceleme sonuçlarında toz

kullanım verimliliği tespit edilmiştir. On dört defa kullanılan ve kullanım sonrası elenen ve kurutulan tozlarda mikroyapıda düşük miktarda değişiklikler tespit edilmiş ve kompozisyonun değişmediği görülmüştür (Ardila et al, 2014).

I.Theodorakos, F. Zacharatos, R. Geremia, D. Karnakis ve I. Zergioti'nin 2014 yılında yayınladıkları “Esnek elektronik uygulamaları için gümüş nanopartiküllerinin ve mürekkebinin katmanlı lazer sinterlemesi” başlıklı makalelerinde gümüş nanopartiküllerinin farklı lazer parametreleri ile üretimi gerçekleştirilmiş ve incelenmiştir (Theodorakos et al, 2014).

3.2.4. Modelleme ve simülasyona yönelik araştırmalar

R. S. Khmyrov, S. N. Grigoriev, A. A. Okunkova ve A. V. Gusarov'un 2014 yılında yayınladıkları “Quartz camının katmanlı lazer ergitilmesi olasılığı” başlıklı makalelerinde quartz camının üretiminin modellenmesi ve sıcaklık dağılımları ile ilgili optimum sonuçlar bulunmuştur. (Khmyrov et al, 2014).

K. B. Hazlehurst, C. J. Wang ve M. Stanford'ın 2013 yılında yayınladıkları “Lazer ergitme teknolojileri kullanılarak üretilmiş işlevsel olarak derecelenmiş yatay dağılımlı yapılara sahip cobalt krom molibden uyluk gövdesinin potansiyel uygulaması” başlıklı makalelerinde lazer ergitme teknolojiyle üretilebilecek boşluklu işlevsel olarak derecelenmiş yatay dağılımlı yapılara sahip cobalt krom molibden uyluk gövdesinin yapılabileceği hipotez olarak incelenmiştir (Hazlehurst et al, 2013).

Rishi Ganeriwala ve Tarek I. Zohdi'nin 2014 yılında yayınladıkları “Katmanlı lazer sinterleme üretim işleminin simülasyonu ve çoklu fizik modellenmesi” başlıklı makalelerinde toz tanelerinin küresel olarak kabul edilerek tozun yayılımının ve lazerin ısıtma etkisinin modellenmesi yapılmıştır (Ganeriwala et al, 2014).

I.Kovaleva, O. Kovalev ve I. Smurov'un 2014 yılında yayınladıkları “Katmanlı lazer ergitmede toz partiküllerinin rasgele paketleme katmanında ısı ve kütle transferi modellenmesi” başlıklı makalelerinde katmanlı lazer ergitme ile toz

katmanı oluşumunun ısı ve kütle transferi yönünden modellenmesi yapılmıştır (Kovaleva et al, 2014).

F. Verhaeghe, T. Craeghs, J. Heulens ve L. Pandelaers'in 2009 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme ile buharlaşma için faydalı modellenme" başlıklı makalelerinde buharlaştırma sebebiyle oluşan çekme davranışının matematiksel modellenmesi yapılmıştır. Kullanılan güç değerlerinde buharlaşma tespit edilmiştir (Verhaeghe et al, 2009).

Sankhya Mohanty ve Jesper H. Hattel'in 2014 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme işleminin sayısal yöntem bazlı olarak güvenilirlik tahmini" başlıklı makalelerinde Monte Carlo simülasyonu kullanılarak Ti6Al4V tozunun katmanlı lazer ergitme işleminin sayısal modellenmesi incelenmiştir (Mohanty et al, 2014).

Donghua Dai ve Dongdong Gu'nun 2013 yılında yayınladıkları "Bakır matrisli kompozitlerin katmalı lazer ergitilme boyunca yoğunlaşma mekanizması ve ısı davranışı: Simülasyon ve deneyler" başlıklı makalelerinde yüzde doksan dokuz saflıktaki bakır tozu içeren bakır matrisli kompozitlerin katmalı lazer ergitilme boyunca olan ısı davranışı ve yoğunlaşma mekanizması matematiksel modelleme ve ısı profilleri çıkartılarak incelenmiştir (Dai et al, 2013).

3.2.5. Üretim sistemi geliştirmeye yönelik araştırmalar

Tero Kumpulainen, Jussi Pekkanen, Jani Valkama, Jarmo Laakso, Reijo Tuokko ve Matti Mantysalo 2010 yılında yayınladıkları "Düşük sıcaklık nanopartikülün sürekli diyet ve darbeli fiber lazerle sinterlenmesi " başlıklı makalelerinde gümüş partiküllerinin sürekli diyet ve darbeli fiber lazer etkisi altında sinterlemesi gerçekleştirilmiştir. Devamlı diyet lazerin elektrik karakteristiğine ve sinterleme hızına sahip olması gözlemlenmiş. Darbeli fiber lazerin düşük güç eşiğine, büyük ışın çapına ve darbelerin tekrar oranlarına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu sebepler ile devamlı diyet lazerin darbeli fiber lazere göre daha avantajlı olduğu gözlemlenmiştir (Kumpulainen et al, 2010).

Philipp Lott, Henrich Schleifenbaum, Wilhelm Meiners, Konrad Wissenbach, Christian Hinke ve Jan Bültmann'ın 2011 yılında yayınladıkları “Katmanlı lazer ergitme için yerinde proses izlemesi için optik sistem dizaynı” başlıklı makalelerinde katmanlı lazer ergitme sistemine entegre edilen optik sistemle ışın profilleri çıkarılmıştır. Değişik lensler kullanılarak teşvik edici sonuçlar edilmiştir (Lott et al, 2011).

Y. Chivel'in 2013 yılında yayınladığı “Katmanlı lazer ergitmenin işlemede sıcaklık gözetlemesindeki optik” başlıklı makalesinde üst katman üretimindeki işlemin optik olarak incelemesini yapmıştır. İşlemdaki sıcaklık ve zaman değişimini incelemiştir (Chivel, 2013).

Yu Chivel ve I. Smurov'un 2010 yılında yayınladıkları “Katmanlı lazer ergitme/sinterlemede canlı sıcaklık gözlemlenmesi” başlıklı makalelerinde katmanlı lazer üretim sistemlerine monte ettikleri canlı sıcaklık izleme sistemi ile gözenekli yapının kontrolünü amaçlamıştır (Chivel et al,2010).

N. Hopkinson, C.E. Majewski ve H. Zarringhalam'ın 2009 yılında yayınladıkları “Katmanlı lazer ergitmedeki partikül ergime derecesinin ölçülmesi” başlıklı makalelerinde farklı tarama aralıkları, lazer güçleri ve tabla ısıtma dereceleri kullanarak polimer malzeme kullanarak uyguladığı katmanlı lazer sinterleme işlemindeki numunelere optik mikroskop, çekme testi vasıtasıyla karşılaştırmalı olarak ergime derecesi incelenmiştir (Hopkinson et al, 2009).

Tom Craeghs, Stijin Clijsters, Jean-Pierre Kruth, Florian Bechmann ve Marie-Christin Ebert'in 2012 yılında yayınladıkları “Optik işlem izlemeye sahip katmanlı lazer ergitme prosesinde işlem hataları tespiti” başlıklı makalelerinde katmanlı lazer ergitme makinasına monte ettikleri optik işlem izleme sistemiyle ısı streslerin ve çıkıntı alanlarındaki yüksek ısıtılma sebebiyle oluşan deformasyonun tespiti için eriyik havuzu haritalanması yapılmıştır (Craeghs et al, 2012).

I. Yadroitsev ve I. Smurov'un 2010 yılında yayınladıkları “Katmanlı lazer ergitme teknolojisi: tek hat lazer ergitilmiş katman kararlılığından karmaşık şekilli üç boyutlu parçalara” başlıklı makalelerinde iki farklı malzemeden tek katmanlı

hatlar lazer ile işlenip çok katmanlı işlem için incelenmiştir. Stabil ve stabil olmayan alanlar tespit edilmiş. Stabil olmayan alanların hattın devamlı olmadığı durumlarda olduğu gözlemlenmiştir. Stabillığın olmadığı durumların düzensizlikler ve çarpılmaların meydana geldiği ve bu durumun düşük tarama hızlarında olduğu gözlemlenmiştir. Buna karşın yüksek tarama hızlarında da yumaklanma etkisinin arttığı gözlemlenmiştir (Yadroitsev et al, 2010).

Tom Craeghs, Florian Bechmann, Sebastian Berumen ve Jean-Pierre Kruth'un 2010 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitme için optik sensör kullanarak geri besleme kontrolü" başlıklı makalelerinde yoğunluğu ve yüzey kalitesini artırmak için kullanılacak katmanlı lazer ergitme makinasına monte edilen optik geri besleme sistemi tasarlanmıştır (Craeghs et al, 2010).

Harald Krauss, Thomas Zeugner ve Michael F. Zaeh'in 2014 yılında yayınladıkları "Thermografi ile katmanlı lazer ergitme işleminin katmanlı olarak izlenmesi" başlıklı makalelerinde termografi ile izlenen katmanlı lazer ergitme işleminin hatalarını bulmaya yönelik incelenmelerde bulunmuştur (Krauss et al, 2014).

A.Neef, V. Seyda, D. Herzog, C. Emmelmann, M. Schönleber ve M. Kogel-Hollacher'in 2014 yılında yayınladıkları "Katmanlı lazer ergitmede düşük bağdaşık girişimölçer" başlıklı makalelerinde katmanlı lazer ergitme sistemine monte edilen girişimölçer ile izlenen katmanlı lazer ergitme işleminin hatalarını bulmaya yönelik incelenme yapılmıştır (Neef et al, 2014).

3.2.6. Genel değerlendirme (review) araştırmalar

Edson Costa Santos, Masanari Shiomi, Kozo Osakada ve Tahar Laoui'nin 2005 yılında yayınladıkları "Lazer şekillendirme ile metal parçaların hızlı imalatı" başlıklı makalelerinde katmanlı lazer üretim yöntemlerinin genel olarak incelenmesi yapılmıştır (Santos et al, 2005).

Gideon N. Levy, Ralf Schindel ve J.P. Kruth'un 2003 yılında yayınladıkları "Sanatsal ve gelecek bakış açısından katmanlı üretim teknolojileri ile hızlı imalat

ve hızlı işleme” başlıklı makalelerinde katmanlı üretim metotlarının sınıflandırılması, kullanım alanları, kullanılan malzemeler ve karşılaştırılmaları incelenmiştir (Levy et al, 2003).

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar üç aşamadan oluşmaktadır. Bunlar sırayla;

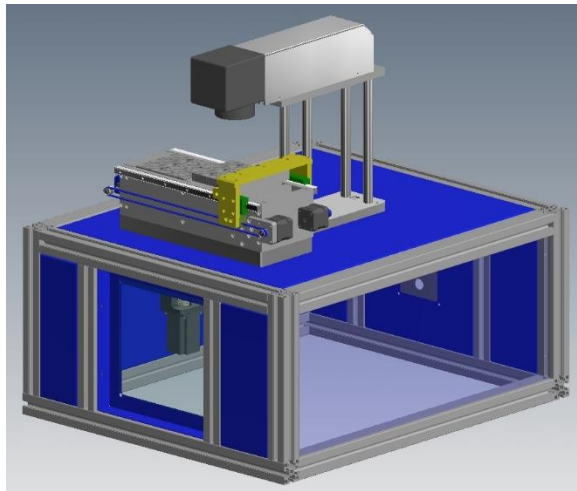
- Katmanlı lazer ergitme yöntemi ile üretim için prototip bir makine geliştirilmesi
- Prototip makine ile gerçekleştirilen deneme üretimleri
- Üretimi etkileyen temel işlem parametrelerinin üretilen numunelere (iş parçalarına) etkilerini belirlemeye yönelik deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Aşağıda tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar belirtilen aşamalara uygun olarak anlatılmıştır.

4.1. Prototip Makine Geliştirilmesi

4.1.1. Prototip makine mekanik sistemi

Tasarımı yapılan makine bir adet depoya, bir adet işlem tablasına, bir adet süpürge sistemine sahiptir. Sistem kontrolü arduino alt yapısı ile kurulmuştur. Kullanılan lazer sistemi ise 20 watt güce sahip fiber lazer donanımına sahiptir.



Şekil 4.1 - Katmanlı lazer ergitme makinası tasarımı

Makine iki ana mekanik sistemden oluşmaktadır. Bunlardan ilki depo ve işlem tablasına hareket veren mekanik sistem diğeri ise süpürgeye hareket veren mekanik sistemdir.

Depoya hareket veren mekanik sistem; sensör, depo motoru, mikro adım sürücü, hatveli mil ve kaplinden oluşmaktadır. İşlem tablasına hareket veren mekanik sistem; sensör, işlem tablası motoru, mikro adım sürücü, hatveli mil ve kaplinden oluşmaktadır.

Depo tablasına monte edilen mil ilerleme sisteminin kaplin sistemi ile motor miline bağlantısı sağlanmıştır. Mile tahrik veren motorun seçiminde ise istenilen ilerleme verilmesi için motor hesapları yapılmıştır.

Süpürge sistemine hareket veren mekanik sistem sensör, süpürge motorları, kayış kassak mekanizması, araba ray sisteminden oluşmaktadır.

Tabla ve depo tablalarının ilerleme hassasiyeti kontrolü Keyence LK-G157 lazer mesafe sensörü ile kontrol edilmiştir. Verilen 100 μm ilerleme miktarında kontrol yapılmış sistemin doğru çalıştığı belirlenmiştir. Şekil 4.2’de verildiği gibi 100 μm ilerleme miktarında sensörden ölçülen değer 102.3 μm ölçülmüştür. Cihazın yeterli hassasiyete sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 4.2 - Keyence LK-G157 lazer mesafe sensörü

4.2. Prototip makine kontrol sistemi tasarımı

Makinenin kontrolü bir adet arduino uno mikro denetleyici bordu ile sağlanmaktadır. Denetleyici, arduino uno ATmega328p işlemcisine 14 dijital I/O portuna ve 6 adet analog giriş pinine sahiptir.



Şekil 4.3 - Arduino uno

Motor sürücüsü olarak iki adet M542Pbf Leadshine mikro step sürücü (biri tabla motorunu diğeri ise işlem tablası motorunu sürmek üzere) kullanılmıştır. Süpürge motor sürücülerini olarak bir adet DM422C Leadshine mikro step sürücü kullanılmıştır.



Şekil 4.4 – a) M542Pbf Leadshine mikro step sürücü M542Pbf (sol) ve b) DM422C Leadshine mikro step sürücü (sağ)

Motor ve sürücü seçimi yapılırken depo ve işlem tablası motorlarının hassas ilerlemeye sahip olması planlanmıştır. Bu amaçla iki adet FL57STH84-4004A Fulling step motor biri tabla motoru diğeri ise işlem tablası motoru olmak üzere

kullanılmıştır. İki adet FL42STH87-1008A Fulling step motor süpürge motoru olmak üzere kullanılmıştır.



Şekil 4.5 – a) FL42STH87-1008A Fulling step motor (sol) ve b) FL57STH84-4004A Fulling step motor (sağ)

Sistem tasarımında sistemin otomatik ve manuel olmak üzere iki tip çalışma modunda çalışması planlanmıştır. Dört adet AUTONICS PR12-4DN endüktif yakınlık sensörü kullanılmıştır.

Otomatik modda kontrol devresi ile lazer sistemi haberleşerek kontrol programında istenilen katman ilerlemesi kadar ilerleme sağlanmakta ve bu işlem bir döngü şeklinde gerçekleşmektedir. Manuel modda ise kontrol sistemi ile lazer sisteminin haberleşmesi yerine bir buton kullanılmıştır. Manuel mod kontrolü, teknik ayar ve bakım için planlanmıştır.

Sistem çalışmaya başlamadan önce referans noktasına getirilerek sıfırlanması gerekmektedir. Sistem açılışında, hareket edip kontrolsüz kazalara sebep olmaması için kullanıcıya anahtar ile kontrol sağlanmıştır.

Otomatik ve manuel çalışma modları ve sıfırlama işlemi için makinenin durumunu görmek ve duruma uygun kontrol sağlayabilmek için makine dört adet sensör ile akıllandırılmıştır. Bu sensörlerden iki tanesi sıfırlama anında tabla ve işlem tablasının konumlandırılması için kullanılmıştır. Diğer iki sensör ise süpürge istenilen noktalara ulaşmasını kontrol etmek için kullanılmıştır.

Sistemde iki adet Allen Bready röle (12-24Vdc) kullanılmıştır. Mikro denetleyiciden lazere giden başlangıç sinyali ve lazerden mikro denetleyiciye lazerin yazma işi sonunda gelen bitiş sinyallerini tetiklemek için kullanılmıştır.

Ayrıca optokuplörler devresi ile elektriksel izolasyon sağlanarak lazere giden sinyaldeki oluşabilecek gürültünün önüne geçilmiştir.

4.3. Prototip Makine Lazer Sistemi

Katmanlı lazer ergitme sistemi için tercih edilen lazer Ytterbium fiber atım lazeridir. Literatürde çoğunlukla metal malzemeler için tercih edilen sistemlerinin ve ticari olarak üretilen makine sistemlerinin fiber olması sebebiyle tercih edilmiştir. Kullanılan lazerin parametresi Çizelge 4.1’deki gibidir.

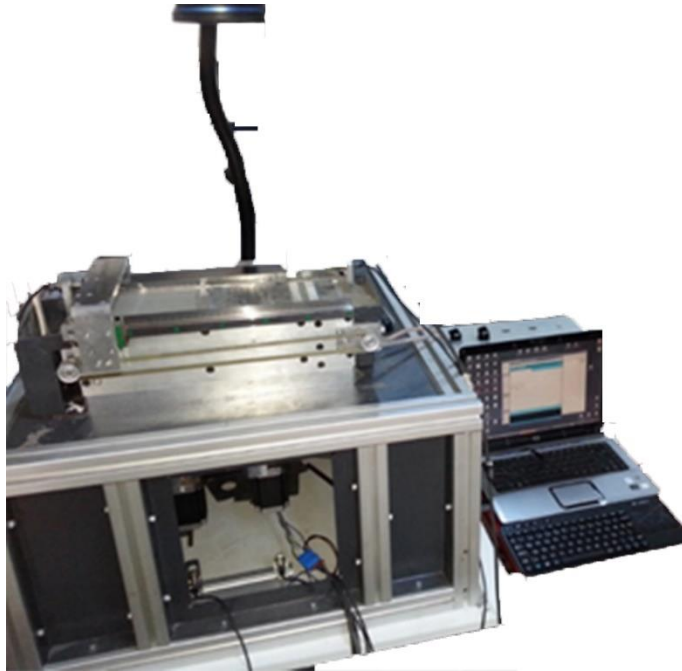
Çizelge 4.1 - Ytterbium fiber lazer parametreleri

Parametreler	Birim	YLP-0.5/80/20
Çalışma Modu		Atım (puls)
Atım başına düşen enerji (20kHz)	mJ	0,5
Polarizasyon		Rastgele
Merkezi emisyon dalga boyu	nm	1060-1070
Emisyon bant genişliği (FWHM)	nm	<3
Atım genişliği, (FWHM)	ns	80
Atım tekrarlama oranı	KHz	20-100
Nominal ortalama çıkış gücü	W	10
Çıkış gücü ayarlanabilirliği	%	10-100
Uzun vadeli güç istikrarı	%	<5
Tipik ışın kalitesi, M2		1.6
Fiber teslim çıktı uzunluğu	m	3-8
Çalışma Voltajı	V AC	110/220
Maksimum güç tüketimi	W	160
Boyutları	mm	215x285x95
Ağırlığı	kg	7

Lazer sisteminde kullanılan lens özellikleri Çizelge 4.2’deki gibidir.

Çizelge 4.2 - Lens Özellikleri

Parametre	F-teta lens
Odak uzaklığı	160 mm
Dalga boyu	1030-1080 nm
Çapraz tarama açısı	40 ⁰
Geri çalışma mesafesi	183,6 mm
Flanş odak mesafesi	267,6 mm



Şekil 4.6 - İmal edilen prototip Katmanlı lazer ergitme makinası

4.4. Prototip Makine İle Gerçekleştirilen Deneme Üretimleri

4.4.1. Deneyde kullanılan malzeme

Bu çalışmada kullanılan toz malzeme Stellite 12 muadili Co-Cr alaşımlı malzemedir. Stellite 12 sertlik ve kimyasal dayanıma ihtiyaç duyulan parçaların imalatında kullanılmaktadır. Vana ve vana yataklarında özellikle egzoz valflarında, makineli tüfek namlularında, dental ve tıp sektöründe, yapay kalça eklemi ve kemik değişiminde kullanılan yapılarda, talaşlı imalat takımlarında kullanılmaktadır. Farklı sektörlerdeki geniş kullanım alanı ve katmanlı lazer imalat ile ilgili

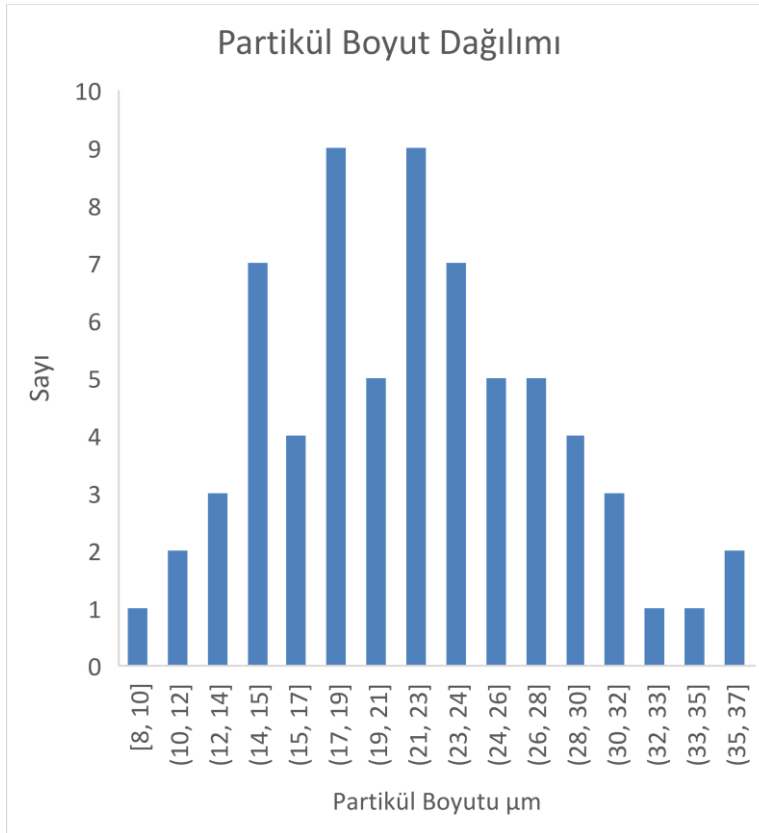
literatürde çalışılmamış olması bu malzeme seçiminin gerekçelerini oluşturmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan toz malzemenin kimyasal bileşimi Çizelge 4.3'te verildiği gibidir.

Çizelge 4.3 - Sterlite 12 Kimyasal Bileşimi

Malzeme	Co	Cr	W	Si	Fe	C	Ni
Sterlite 12	Balans	28,5	8	<2	<2	1,4	1,5

Partikül boyut dağılımını belirlemek amacıyla optik mikroskoptan alınan toz numune görüntüleri IC Measure yazılımı kullanılarak boyutlandırılmış ve elde edilen değerlerden partikül boyut dağılım grafiği oluşturulmuştur. Şekil 4.7'de partikül boyut dağılım grafiği verilmiştir. Elde edilen verilere göre deneylerde kullanılan ve ticari olarak <53 μm değeri ile tanımlanan tozların ortalama tane boyutu 21 μm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.7 Partikül Boyutu Dağılımı

4.4.2. Deneme üretimleri işlem parametreleri (Yöntem)

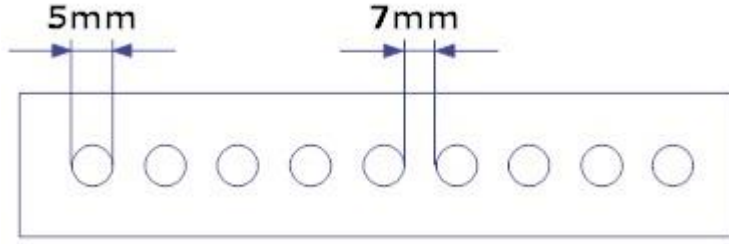
Katmanlı lazer ergitme işlemine etki ettiği düşünülür beş farklı parametrenin değişimini dikkate alan bir deney tasarımı yapılmıştır. Kullanılan parametreler lazer gücü, lazer tarama frekansı, lazer tarama hızı, katman kalınlığı ve lazer tarama şeklidir. Her bir parametrenin düşük, orta ve yüksek olarak belirlenen üç farklı değerinin etkilerini belirlemeye yönelik deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan işlem parametreleri ve değerleri Çizelge 4.4'te listelenmiştir.

Çizelge 4.4 - İşlem parametreleri

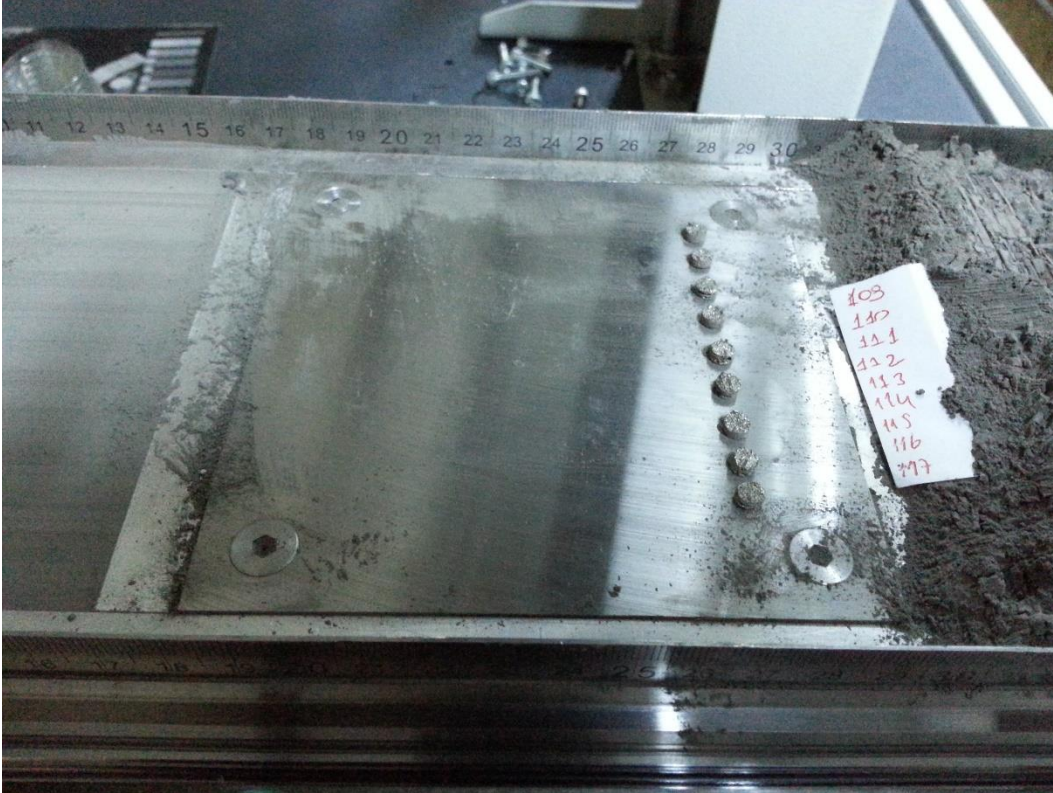
Parametreler	Birim	Seviyeler		
		1	2	3
Güç	W	20	15	10
Frekans	kHz	100	75	50
Hız	mm/s	100	75	50
Katman Kalınlığı	μm	100	50	25
Tarama Şekli		A 	B 	C 

Temel işlem parametrelerinin etkilerini belirlemeye yönelik olarak Çizelge 4.4'de listelenen parametreler ve değerleri için üç farklı dizaynda, 243 farklı kombinasyon içeren bir deney düzeni kurulup deneysel çalışmalar bu deney düzenine göre başlamıştır. Fakat 10W değerinde üretilen numunelerden istenilen verim elde edilemeyince 10W'lık tüm numunelerin imalatı iptal edilmiştir. Numune olarak 5mm çapında silindir parça imalatı yapılmıştır.

Deneme üretim çalışmaları 5 mm çapında 7 mm aralıklı olarak yerleşim düzeni ile gerçekleştirilmiş olup dikeyde silindir geometrisi oluşturulması hedeflenmiştir. Üretim sırasında uygulanan iş parçası yerleşim düzeni Şekil 4.8'de görüldüğü gibidir.



Şekil 4.8 - Deneme Üretimi iş parçası yerleşim düzeni



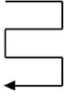
Şekil 4.9 - Deneme üretimi örnek fotoğraf

4.4.3. Deneme üretim grupları

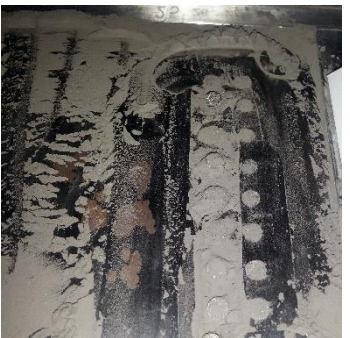
İşlem parametrelerinin iş parçasına etkilerini belirlemeye yönelik olarak kullanılan lazer işlem parametrelerin karşılaştırılabilmesi için dokuzlu üretim gruplarına ayrılmıştır.

Çizelge 4.5'den Çizelge 4.31'e kadar deneme üretim gruplarına ilişkin bilgiler verilmiştir.

Çizelge 4.5 - Deneme Grubu 1'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
1	20	100	100	50		
2	20	75	100	50		
3	20	50	100	50		
4	20	100	75	50		
5	20	75	75	50		
6	20	50	75	50		
7	20	100	50	50		
8	20	75	50	50		
9	20	50	50	50		

Çizelge 4.6 - Deneme Grubu 2'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
10	15	100	100	50		
11	15	75	100	50		
12	15	50	100	50		
13	15	100	75	50		
14	15	75	75	50		
15	15	50	75	50		
16	15	100	50	50		
17	15	75	50	50		
18	15	50	50	50		

Çizelge 4.7 - Deneme Grubu 3'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
19	10	100	100	50		
20	10	75	100	50		
21	10	50	100	50		
22	10	100	75	50		
23	10	75	75	50		
24	10	50	75	50		
25	10	100	50	50		
26	10	75	50	50		
27	10	50	50	50		

Çizelge 4.8 - Deneme Grubu 4'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
28	15	100	100	50		
29	15	75	100	50		
30	15	50	100	50		
31	15	100	75	50		
32	15	75	75	50		
33	15	50	75	50		
34	15	100	50	50		
35	15	75	50	50		
36	15	50	50	50		

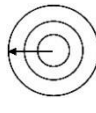
Çizelge 4.9 - Deneme Grubu 5'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
37	20	100	100	50		
38	20	75	100	50		
39	20	50	100	50		
40	20	100	75	50		
41	20	75	75	50		
42	20	50	75	50		
43	20	100	50	50		
44	20	75	50	50		
45	20	50	50	50		

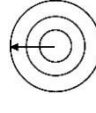
Çizelge 4.10 - Deneme Grubu 6'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
46	10	100	100	50		
47	10	75	100	50		
48	10	50	100	50		
49	10	100	75	50		
50	10	75	75	50		
51	10	50	75	50		
52	10	100	50	50		
53	10	75	50	50		
54	10	50	50	50		

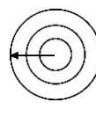
Çizelge 4.11 - Deneme Grubu 7'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
55	20	100	100	50		
56	20	75	100	50		
57	20	50	100	50		
58	20	100	75	50		
59	20	75	75	50		
60	20	50	75	50		
61	20	100	50	50		
62	20	75	50	50		
63	20	50	50	50		

Çizelge 4.12 - Deneme Grubu 8'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
64	15	100	100	50		
65	15	75	100	50		
66	15	50	100	50		
67	15	100	75	50		
68	15	75	75	50		
69	15	50	75	50		
70	15	100	50	50		
71	15	75	50	50		
72	15	50	50	50		

Çizelge 4.13 -Deneme Grubu 9'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
73	10	100	100	50		İPTAL
74	10	75	100	50		
75	10	50	100	50		
76	10	100	75	50		
77	10	75	75	50		
78	10	50	75	50		
79	10	100	50	50		
80	10	75	50	50		
81	10	50	50	50		

Çizelge 4.14 - Deneme Grubu 10'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
82	20	100	100	100		
83	20	75	100	100		
84	20	50	100	100		
85	20	100	75	100		
86	20	75	75	100		
87	20	50	75	100		
88	20	100	50	100		
89	20	75	50	100		
90	20	50	50	100		

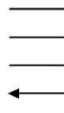
Çizelge 4.15 - Deneme Grubu 11'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
91	15	100	100	100		
92	15	75	100	100		
93	15	50	100	100		
94	15	100	75	100		
95	15	75	75	100		
96	15	50	75	100		
97	15	100	50	100		
98	15	75	50	100		
99	15	50	50	100		

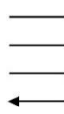
Çizelge 4.16 - Deneme Grubu 12'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
100	10	100	100	100		İPTAL
101	10	75	100	100		
102	10	50	100	100		
103	10	100	75	100		
104	10	75	75	100		
105	10	50	75	100		
106	10	100	50	100		
107	10	75	50	100		
108	10	50	50	100		

Çizelge 4.17 - Deneme Grubu 13'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
109	20	100	100	100		
110	20	75	100	100		
111	20	50	100	100		
112	20	100	75	100		
113	20	75	75	100		
114	20	50	75	100		
115	20	100	50	100		
116	20	75	50	100		
117	20	50	50	100		

Çizelge 4.18 - Deneme Grubu 14'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
118	15	100	100	100		
119	15	75	100	100		
120	15	50	100	100		
121	15	100	75	100		
122	15	75	75	100		
123	15	50	75	100		
124	15	100	50	100		
125	15	75	50	100		
126	15	50	50	100		

Çizelge 4.19 - Deneme Grubu 15'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
127	10	100	100	100		İPTAL
128	10	75	100	100		
129	10	50	100	100		
130	10	100	75	100		
131	10	75	75	100		
132	10	50	75	100		
133	10	100	50	100		
134	10	75	50	100		
135	10	50	50	100		

Çizelge 4.20 - Deneme Grubu 16'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
136	20	100	100	100		
137	20	75	100	100		
138	20	50	100	100		
139	20	100	75	100		
140	20	75	75	100		
141	20	50	75	100		
142	20	100	50	100		
143	20	75	50	100		
144	20	50	50	100		

Çizelge 4.21 - Deneme Grubu 17'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
145	15	100	100	100		
146	15	75	100	100		
147	15	50	100	100		
148	15	100	75	100		
149	15	75	75	100		
150	15	50	75	100		
151	15	100	50	100		
152	15	75	50	100		
153	15	50	50	100		

Çizelge 4.22 - Deneme Grubu 18'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
154	10	100	100	100		İPTAL
155	10	75	100	100		
156	10	50	100	100		
157	10	100	75	100		
158	10	75	75	100		
159	10	50	75	100		
160	10	100	50	100		
161	10	75	50	100		
162	10	50	50	100		

Çizelge 4.23 -Deneme Grubu 19'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
163	20	100	100	25		
164	20	75	100	25		
165	20	50	100	25		
166	20	100	75	25		
167	20	75	75	25		
168	20	50	75	25		
169	20	100	50	25		
170	20	75	50	25		
171	20	50	50	25		

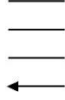
Çizelge 4.24 - Deneme Grubu 20'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
172	15	100	100	25		
173	15	75	100	25		
174	15	50	100	25		
175	15	100	75	25		
176	15	75	75	25		
177	15	50	75	25		
178	15	100	50	25		
179	15	75	50	25		
180	15	50	50	25		

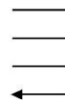
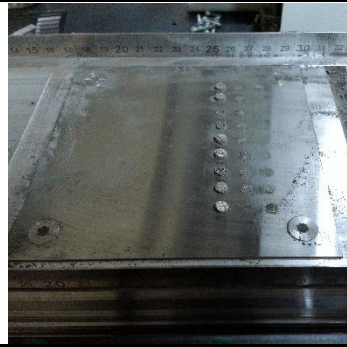
Çizelge 4.25 - Deneme Grubu 21'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
181	10	100	100	25		İPTAL
182	10	75	100	25		
183	10	50	100	25		
184	10	100	75	25		
185	10	75	75	25		
186	10	50	75	25		
187	10	100	50	25		
188	10	75	50	25		
189	10	50	50	25		

Çizelge 4.26 - Deneme Grubu 22'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
190	20	100	100	25		
191	20	75	100	25		
192	20	50	100	25		
193	20	100	75	25		
194	20	75	75	25		
195	20	50	75	25		
196	20	100	50	25		
197	20	75	50	25		
198	20	50	50	25		

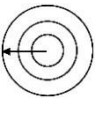
Çizelge 4.27 - Deneme Grubu 23'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
199	15	100	100	25		
200	15	75	100	25		
201	15	50	100	25		
202	15	100	75	25		
203	15	75	75	25		
204	15	50	75	25		
205	15	100	50	25		
206	15	75	50	25		
207	15	50	50	25		

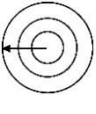
Çizelge 4.28 - Deneme Grubu 24'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
208	10	100	100	25		İPTAL
209	10	75	100	25		
210	10	50	100	25		
211	10	100	75	25		
212	10	75	75	25		
213	10	50	75	25		
214	10	100	50	25		
215	10	75	50	25		
216	10	50	50	25		

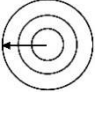
Çizelge 4.29 - Deneme Grubu 25'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (µm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
217	20	100	100	25		
218	20	75	100	25		
219	20	50	100	25		
220	20	100	75	25		
221	20	75	75	25		
222	20	50	75	25		
223	20	100	50	25		
224	20	75	50	25		
225	20	50	50	25		

Çizelge 4.30 - Deneme Grubu 26'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (µm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
226	15	100	100	25		
227	15	75	100	25		
228	15	50	100	25		
229	15	100	75	25		
230	15	75	75	25		
231	15	50	75	25		
232	15	100	50	25		
233	15	75	50	25		
234	15	50	50	25		

Çizelge 4.31 - Deneme Grubu 27'e ait işlem parametreleri

No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (µm)	Tarama Şekli	Deneme Grubu Resmi
235	10	100	100	25		İPTAL
236	10	75	100	25		
237	10	50	100	25		
238	10	100	75	25		
239	10	75	75	25		
240	10	50	75	25		
241	10	100	50	25		
242	10	75	50	25		
243	10	50	50	25		

4.4.4. Üretimi etkileyen temel işlem parametrelerinin etkilerini belirlemeye yönelik deneysel çalışmalar

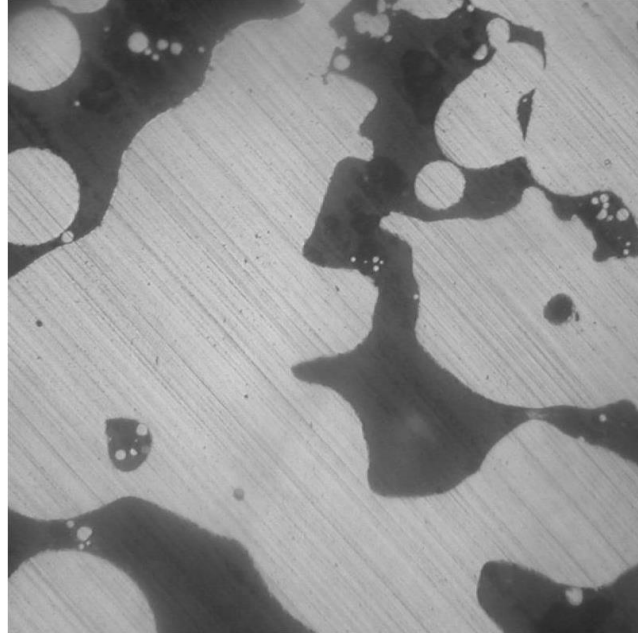
Bu bölümde deneme üretimi gerçekleştirilen iş parçalarının karakterizasyonuna yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda iş parçaları optik ve SEM mikroskobisi ile incelenmiştir. Mikroskobik görüntüler Matlab ortamında geliştirilen program yardımıyla işlenmiş ve görüntü analizleri yapılmıştır. Lazerli katmanlı ergitme yöntemi ile imal edilen iş parçalarının gözenekliliği değerlendirme kriteri olarak belirlenmiştir. Gözeneklilik Matlab programıyla belirlenmiş olup, seçilen bir alandaki gözenek/boşluğun dolu kısımlara oranı olarak değerlendirilmiştir.

4.4.4.1. Optik mikroskopi incelemesi

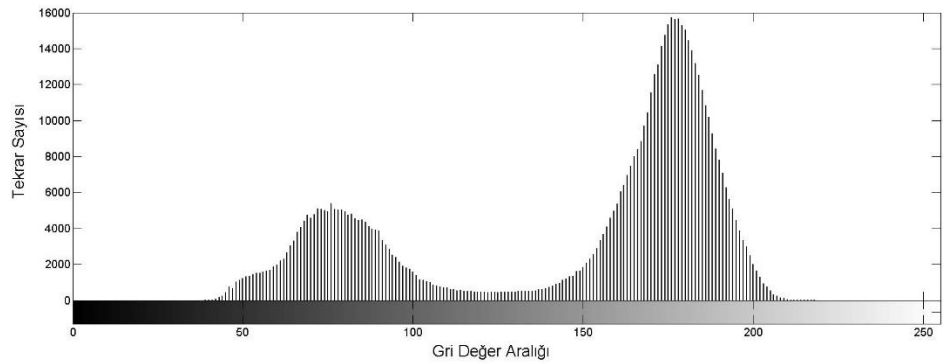
Mikroyapı incelemeleri Ege Üniversitesi Makina mühendisliği bölümüne ait Nikon P330 model dijital kameralı optik mikroskop ile elde edilmiştir. Mikro yapı incelemesinde standart yüzey parlatma işlemi görmüş numunelerin görüntüleri alınmıştır.

Metal mikroskobu ile alınan görüntülerin matlab yazılımı kullanılarak işlenmesi

Görüntü iki boyutlu bir sinyaldir ve her görüntü farklı gri ton değerlerinden oluşmaktadır. Gri değerler 0'dan başlamakta 255 ile son bulmaktadır. Yani gri tonlu bir görüntüde 256 tane farklı gri ton değeri bulunmaktadır. Burada 256 gri değeri bir byte olarak tanımlanmaktadır. 0 gri değeri kural olarak siyah renge, 255 gri değeri ise beyaza karşılık gelmektedir. Bu değerler arasında ise gri tonlar bulunmaktadır. Gri tonlu bir görüntüde (Şekil 4.10) bulunan gri tonların miktarını gösteren (Şekil 4.11) diyagramlara histogram adı verilmektedir. Histogramın yatay eksenı gri ton değerini gösterirken, düşey eksenı ise o gri ton değerinin görüntü içerisinde bulunma miktarını göstermektedir(John C. Russ, 1999).



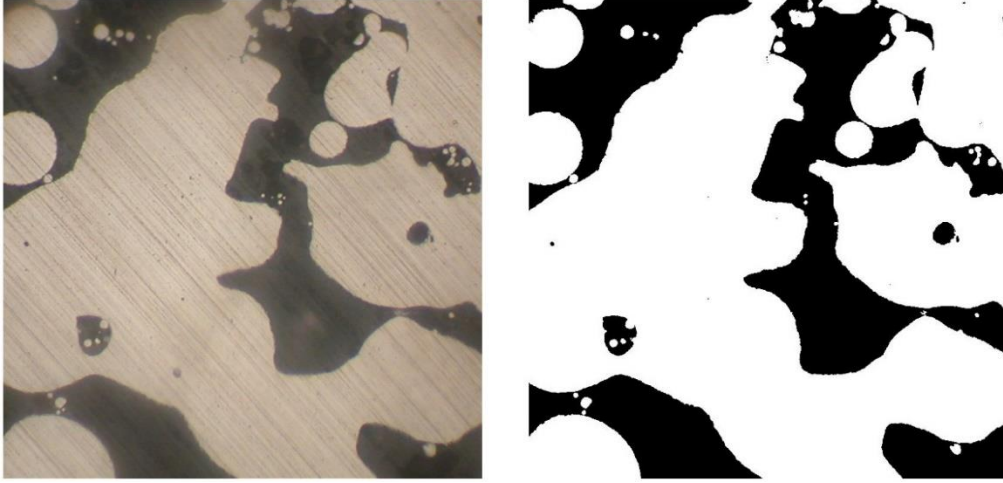
Şekil 4.10 - Gri tonlu mikroyapı görüntüsü



Şekil 4.11 - Şekil 4.8’de verilen görüntüye ait histogram

Bu çalışmada tasarımı ve imalatı tamamlanan prototip katmanlı lazer ergitme cihazı ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen numuneler, metal mikroskobu kullanılarak mikroyapısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla elde edilen görüntüler Matlab yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Yazılan Matlab kodu EK-1’de sunulmuştur. Numunelerin doluluk oranlarını belirlemek üzere mikroskop görüntüleri dolu alanlar beyaz (0 gri ton değeri), boş alanlar siyah (255 gri ton değeri) olacak şekilde işlenerek yeni görüntüler Şekil 4.12’deki gibi oluşturulmuştur. Elde edilen bu yeni görüntülerin sadece 0 gri ton değeri ve 255 gri ton değerinden oluşan histogramları kullanarak görüntü içerisindeki toplam beyaz piksel miktarının görüntünün toplam piksel sayısına oranı belirlenmiştir. Bu

oran doluluk oranı olarak değerlendirilmiş, böylece farklı parametreler altında üretilmiş numunelerin gözeneklilik değerleri irdelenmiştir.



Şekil 4.12 - Numune mikroyapı görüntüsü (solda) ve görüntü işleme sonrası oluşturulan yeni görüntü (Sağda)

4.4.4.2. SEM Analizi

SEM incelemeleri optik mikroskopi ve Matlab sonucu en iyi sonuç veren numuneye uygulanmıştır. Bu sayede en iyi sonuç veren numuneye ilişkin daha detaylı inceleme yapılmıştır.

Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasındaki etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra dijital sinyallere çevrilmesi ile gerçekleşmektedir.

SEM (Scanning Electron Microscope, Taramalı Elektron Mikroskobu) analiz çalışmaları Dokuz Eylül Üniversitesi Metalurji Mühendisliğindeki Eumex JEOL JSM-6060 LV cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.13’de cihazın fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 4.13 - Deneylerde kullanılan SEM cihazı

4.4.5. XRD analizi

Deneylerde kullanılan toz malzemenin karakterizasyonu için analiz çalışmaları İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Araştırma Merkezi'nde bulunan (İYTE-MAM) Philips X'Pert Pro XRD cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.14'de cihazın fotoğrafı görülmektedir.

X-Ray Diffraction (XRD) spektroskopisi ultraviyole ışıktan daha kuvvetli fakat gamma ışınından daha zayıf enerjili X-ışınları kullanılarak yapılan analizi temel alır. XRD ile malzemelerin kristal yapılarına ilişkin detaylı bilgi edinmek mümkündür.



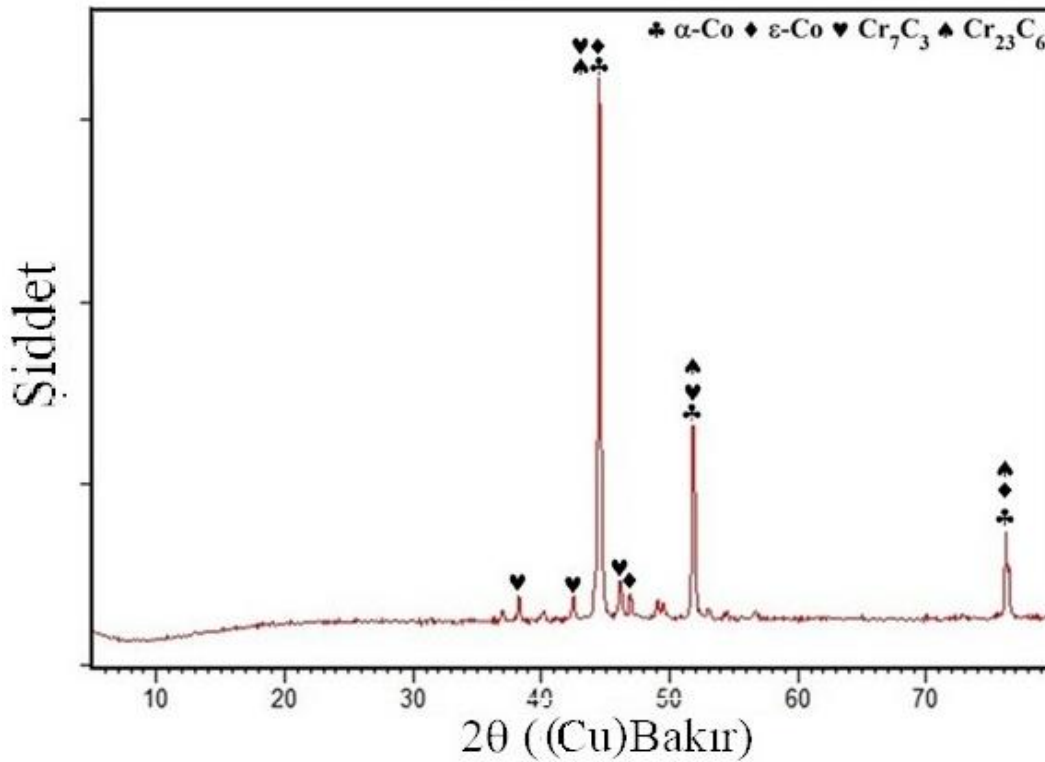
Şekil 4.14 - Deneylerde kullanılan XRD cihazı

5. DENEY SONUÇLARININ ANALİZİ

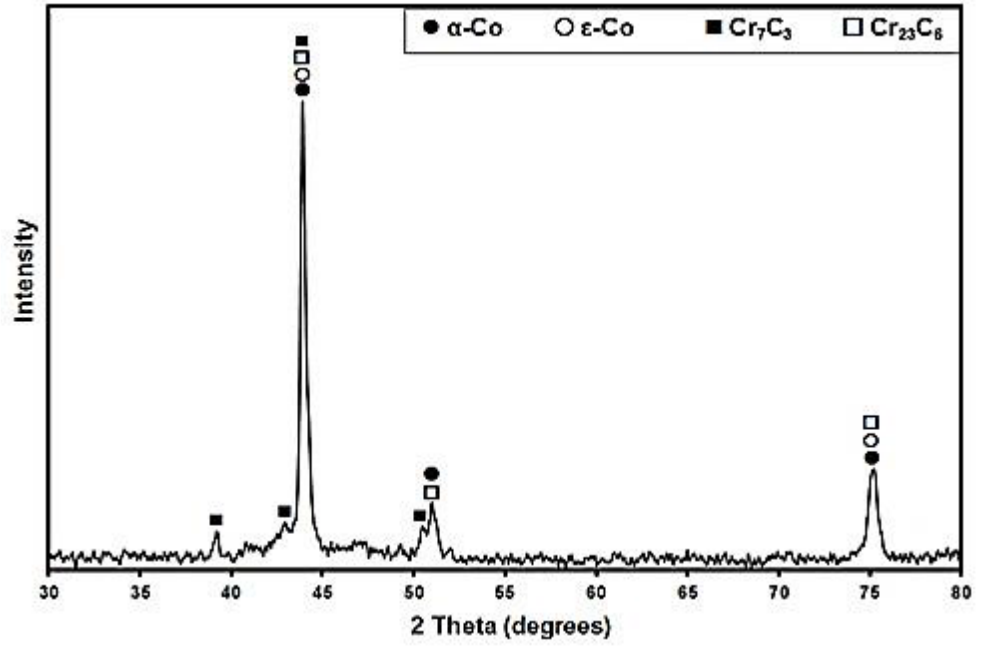
5.1. Kullanılan Toz Malzemenin XRD Analizi

Deneyler sırasında kullanılan Stellite 12 muadili toz malzemeye XRD analizleri yapılmıştır. Şekil 5.1’de elde edilen XRD grafiği görülmektedir. Analizlerin sonucunda α -cobalt, ϵ -cobalt elementlerinin piklerine rastlanmıştır. Bununla birlikte yapılan analizler sonucunda α -cobalt ve ϵ -cobalt elementlerinin dışında ayrıca Cr_7C_3 ve Cr_{23}C_6 (Krom karbür) bileşiklerinin piklerine de rastlanmıştır.

Literatürde Stellite 12 malzemesinin XRD incelemeleri Wang ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiş olup (Motallebzadeh, 2015) Şekil 5.2’de verilen ve bu tez kapsamında elde edilen XRD paterni ile uyuşmakta olduğu görülmektedir. Bu sebeple kullanılan malzemenin Stellite 12 olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.1 - Toz numune XRD analiz sonucu



Şekil 5.2 - Stellite 12 XRD analizi (Motallebzadeh, 2015)

5.2. Lazer Güç Parametresinin Analizi

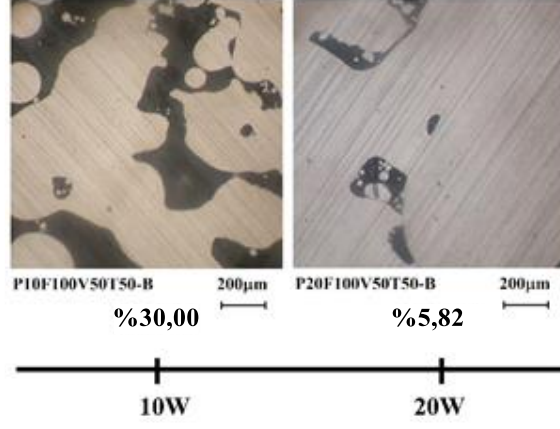
Bu bölümde lazer gücünün, katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş numunelerin gözenekliliğine olan etkisi analiz edilmiştir. Katmanlı lazer ergitme işlemine etki eden enerji yoğunluğu formül 2.1’de verilmiştir. Buna göre lazer gücü arttıkça enerji yoğunluğu da artmaktadır. Bu sebeple yüksek lazer gücü ile daha yüksek enerji yoğunluğu sağlanırken iş parçasında gözenekliliğin azalması beklenmektedir.

Sadece lazer gücü değişimi sağlanıp diğer parametrelerin sabit tutulması ile elde edilen güç profili Çizelge 5.1’deki gibidir. Çizelgede belirtilen parametreler ile elde edilen numunelerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 5.3’den Şekil 5.17’ye kadar verilmiştir.

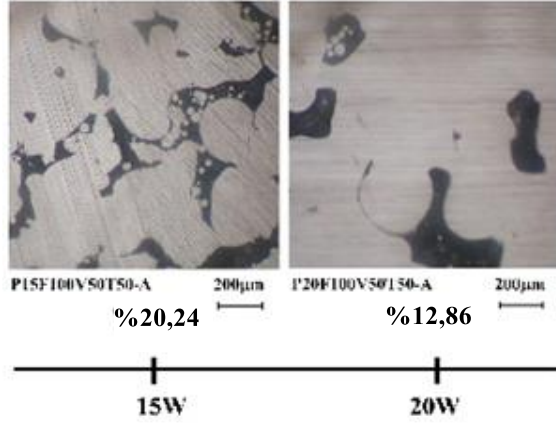
Elde edilen sonuçlara göre lazer gücü arttıkça numune gözenekliliğin azaldığı görülmektedir.

Çizelge 5.1 - Güç profil çizelgesi

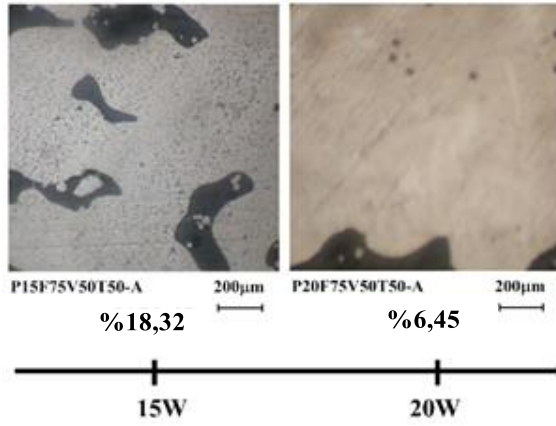
LAZER GÜÇ PROFİLİ							
No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (µm)	Tarama Şekli	Gözeneklilik (%)	Şekil No
43	20	100	50	50	B	5,82	Şekil 6.3
52	10	100	50	50	B	30	
7	20	100	50	50	A	12,86	Şekil 6.4
16	15	100	50	50	A	20,24	
8	20	75	50	50	A	6,45	Şekil 6.5
17	15	75	50	50	A	18,32	
9	20	50	50	50	A	12,92	Şekil 6.6
18	15	50	50	50	A	24,36	
41	20	75	75	50	B	19,17	Şekil 6.7
32	15	75	75	50	B	34,32	
42	20	50	75	50	B	16,39	Şekil 6.8
33	15	50	75	50	B	29,25	
89	20	75	50	100	A	12,47	Şekil 6.9
98	15	75	50	100	A	23,51	
90	20	50	50	100	A	13,86	Şekil 6.10
99	15	50	50	100	A	33,55	
110	20	75	100	100	B	20,68	Şekil 6.11
119	15	75	100	100	B	29,46	
112	20	100	75	100	B	17,21	Şekil 6.12
121	15	100	75	100	B	25,39	
140	20	75	75	100	C	13,51	Şekil 6.13
149	15	75	75	100	C	25,9	
169	20	100	50	25	A	8,83	Şekil 6.14
178	15	100	50	25	A	20,22	
170	20	75	50	25	A	2,91	Şekil 6.15
179	15	75	50	25	A	13,79	
197	20	75	50	25	B	0,6	Şekil 6.16
206	15	75	50	25	B	18,64	
198	20	50	50	25	B	4,13	Şekil 6.17
207	15	50	50	25	B	11,28	



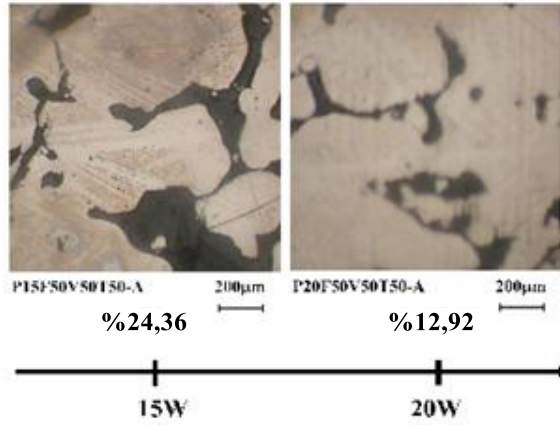
Şekil 5.3 - 3 Güç Karşılaştırma 1



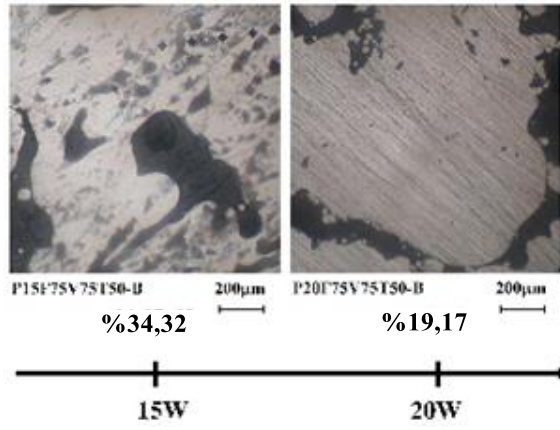
Şekil 5.4 - Güç Karşılaştırma 2



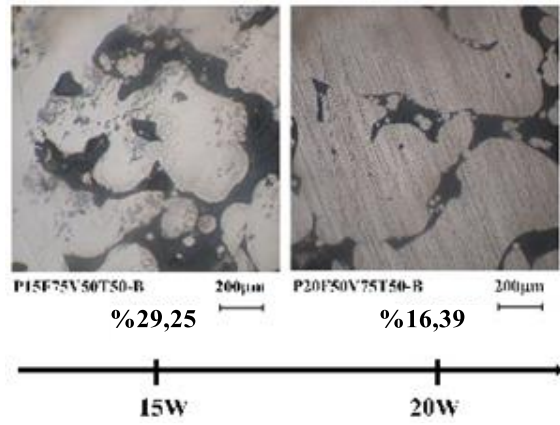
Şekil 5.5 - Güç Karşılaştırma 3



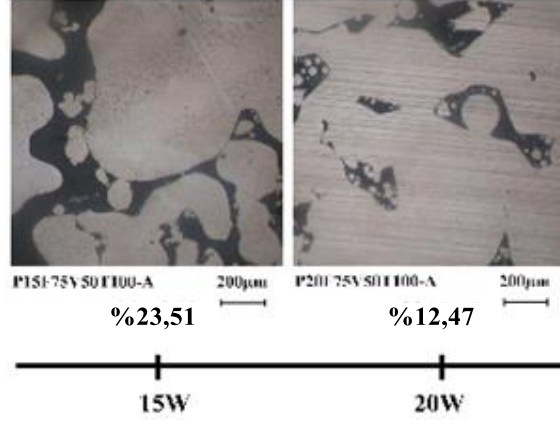
Şekil 5.6 - Güç Karşılaştırma 4



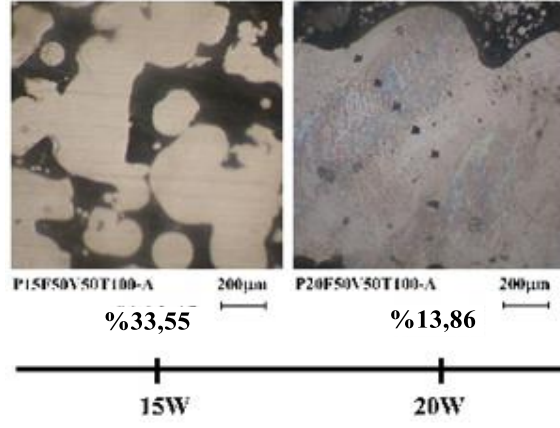
Şekil 5.7 - Güç Karşılaştırma 5



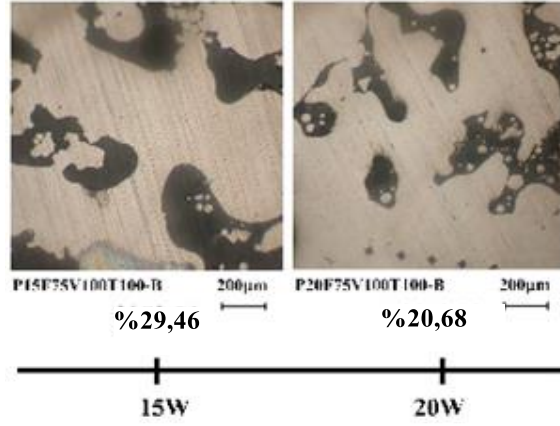
Şekil 5.8 - Güç Karşılaştırma 6



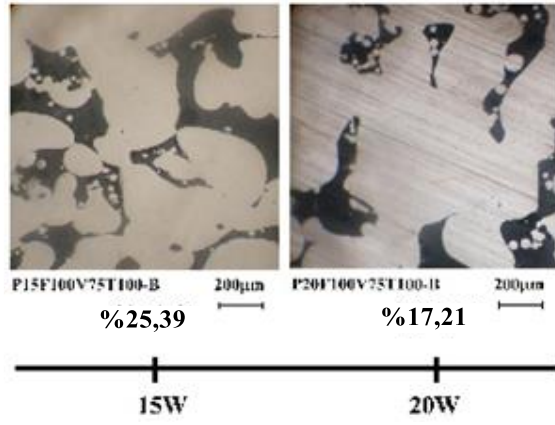
Şekil 5.9 - Güç Karşılaştırma 7



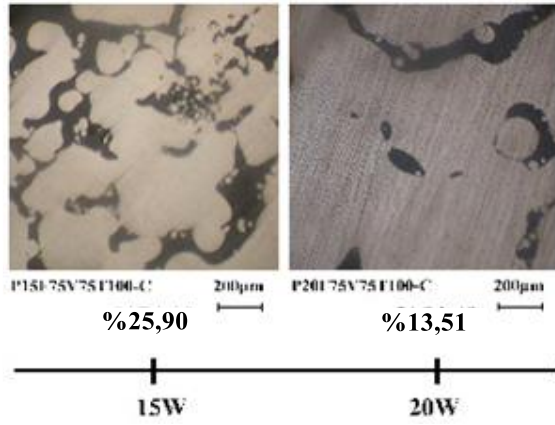
Şekil 5.10 - Güç Karşılaştırma 8



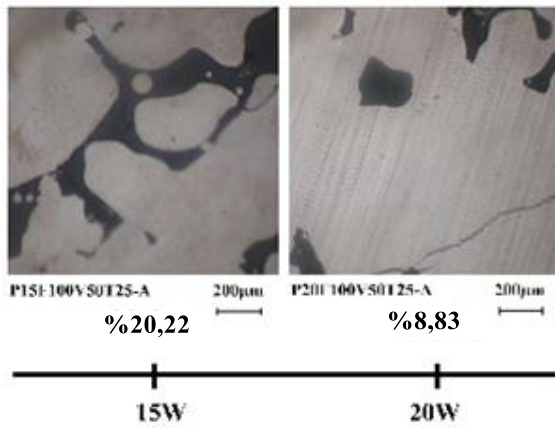
Şekil 5.11 - Güç Karşılaştırma 9



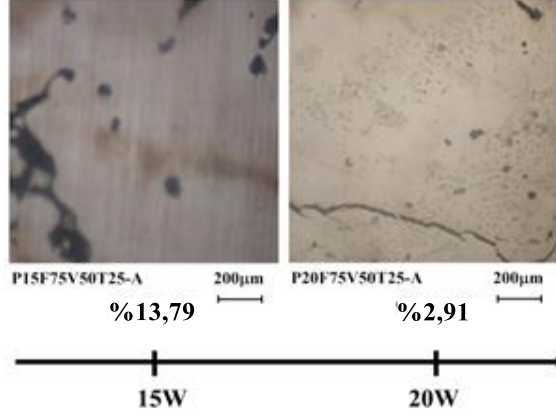
Şekil 5.12 - Güç Karşılaştırma 10



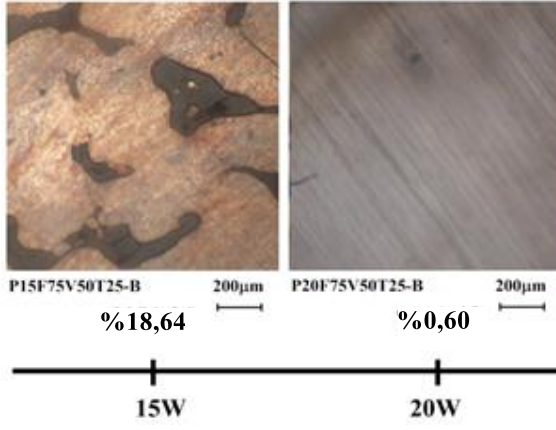
Şekil 5.13 - Güç Karşılaştırma 11



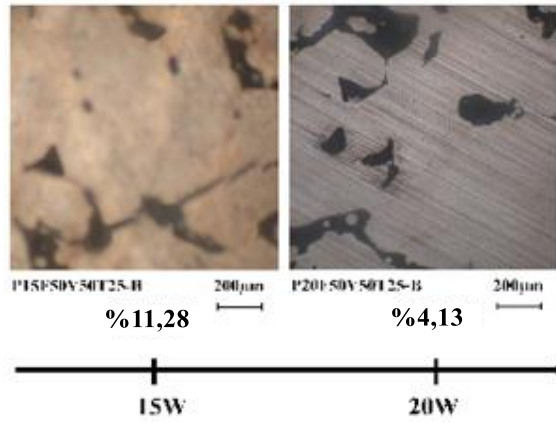
Şekil 5.14 - Güç Karşılaştırma 12



Şekil 5.15 - Güç Karşılaştırma 13



Şekil 5.16 - Güç Karşılaştırma 14



Şekil 5.17 - Güç Karşılaştırma 15

5.3. Lazer Tarama Hızı Parametresinin Analizi

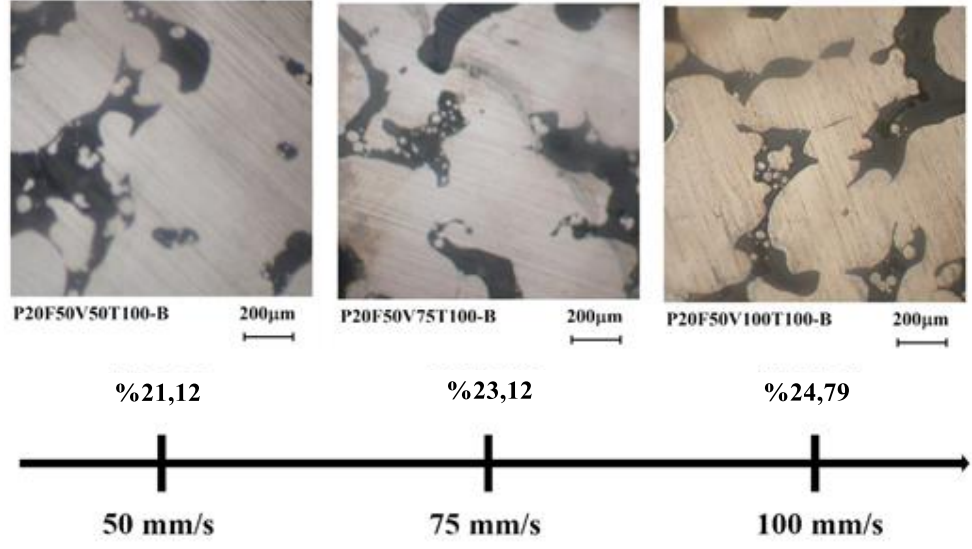
Bu bölümde lazer tarama hızının, katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş numunelerin gözenekliliğe olan etkisi analiz edilmiştir. Katmanlı lazer ergitme işlemine etki eden enerji yoğunluğu formül 2.1’de belirtildiği gibidir. Buna göre lazer tarama hızı azaldıkça enerji yoğunluğu artmaktadır. Bu sebeple düşük lazer tarama hızı ile daha yüksek enerji yoğunluğu gerçekleşirken iş parçası gözenekliliğin azalması beklenmektedir.

Sadece lazer tarama hız değişimi sağlanıp diğer parametrelerin sabit tutulması ile elde edilen lazer tarama hızı profili Çizelge 5.2’deki gibidir. Çizelgede belirtilen parametreler ile elde edilen numunelerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 5.18’den Şekil 5.22’a kadar verilmiştir.

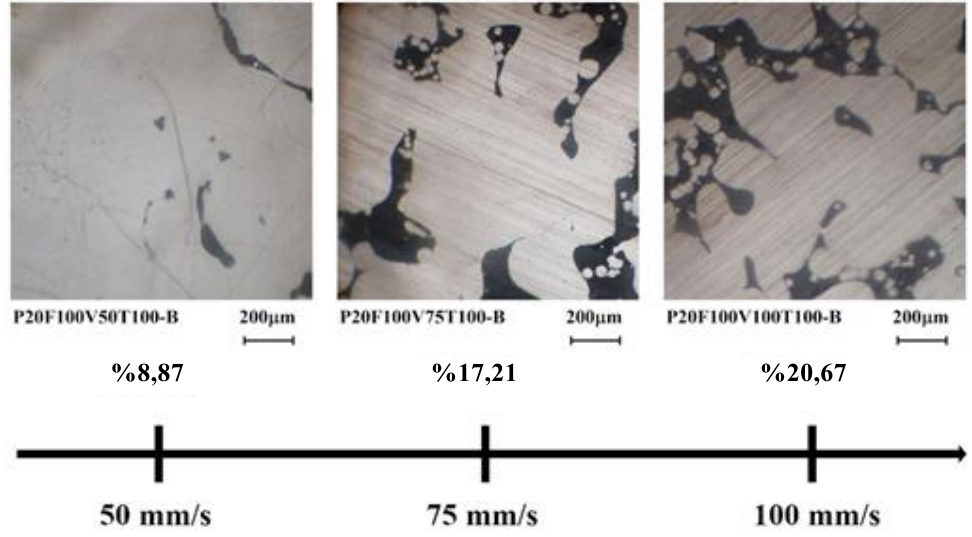
Elde edilen sonuçlara göre lazer tarama hızı azaldıkça numune gözenekliliğin de azaldığı görülmektedir.

Çizelge 5.2 - Tarama hızı profil çizelgesi

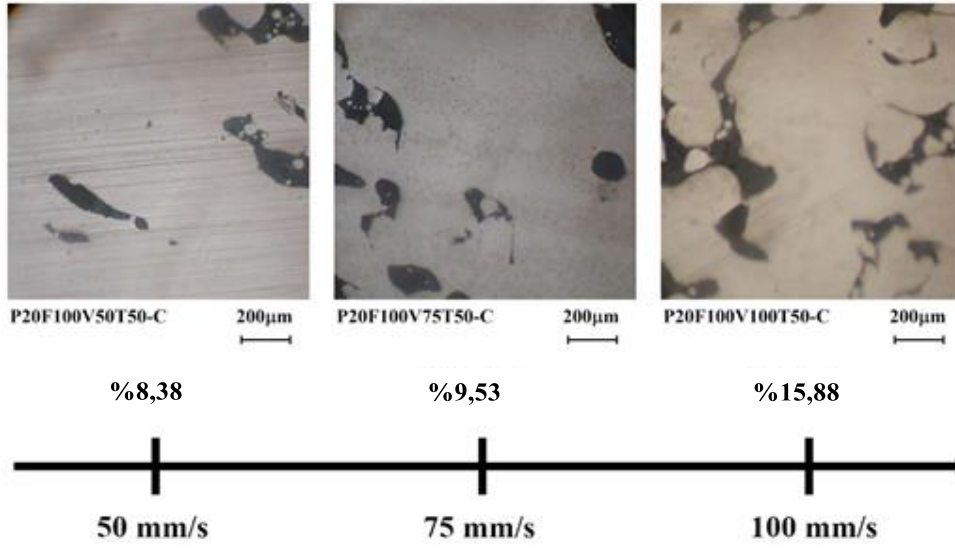
LAZER TARAMA HIZI PROFİLİ							Şekil No
No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (µm)	Tarama Şekli	Gözeneklilik (%)	
37	20W	100	100	50	B	20,82	Şekil 5.18
40	20W	100	75	50	B	18,58	
43	20W	100	50	50	B	2,82	
39	20W	50	100	50	B	25,69	Şekil 5.19
42	20W	50	75	50	B	24,21	
45	20W	50	50	50	B	20,47	
55	20W	100	100	50	C	15,88	Şekil 5.20
58	20W	100	75	50	C	9,53	
61	20W	100	50	50	C	8,38	
109	20W	100	100	100	B	20,67	Şekil 5.21
112	20W	100	75	100	B	17,21	
115	20W	100	50	100	B	2,68	
111	20W	50	100	100	B	24,79	Şekil 5.22
114	20W	50	75	100	B	23,12	
117	20W	50	50	100	B	21,12	



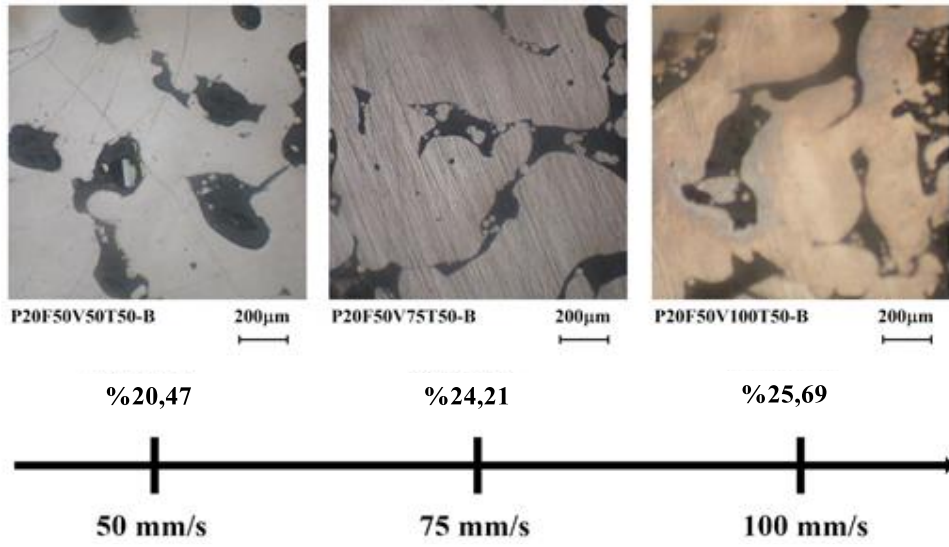
Şekil 5.18 - Tarama hızı karşılaştırma 1



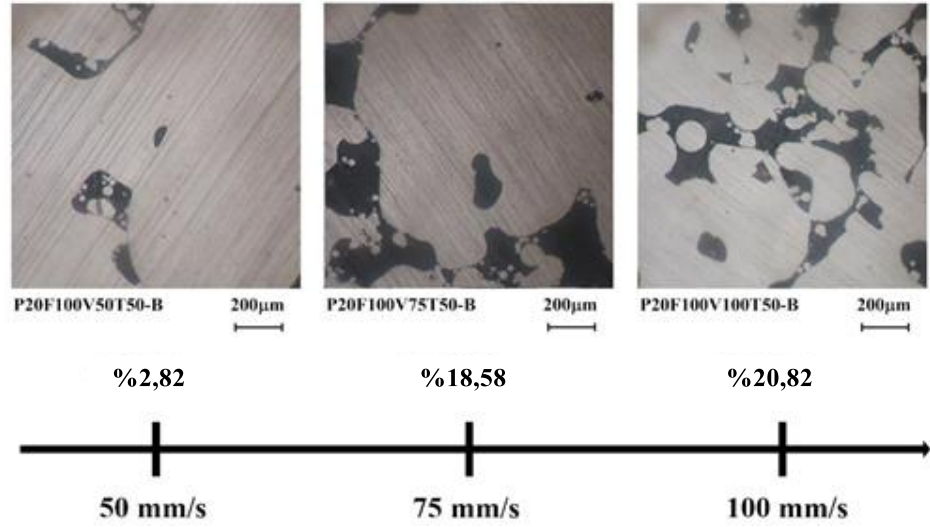
Şekil 5.19 - Tarama hızı karşılaştırma 2



Şekil 5.20 - Tarama hızı karşılaştırma 3



Şekil 5.21 - Tarama hızı karşılaştırma 4



Şekil 5.22 - Tarama hızı karşılaştırma 5

5.4. Frekans Parametresinin Analizi

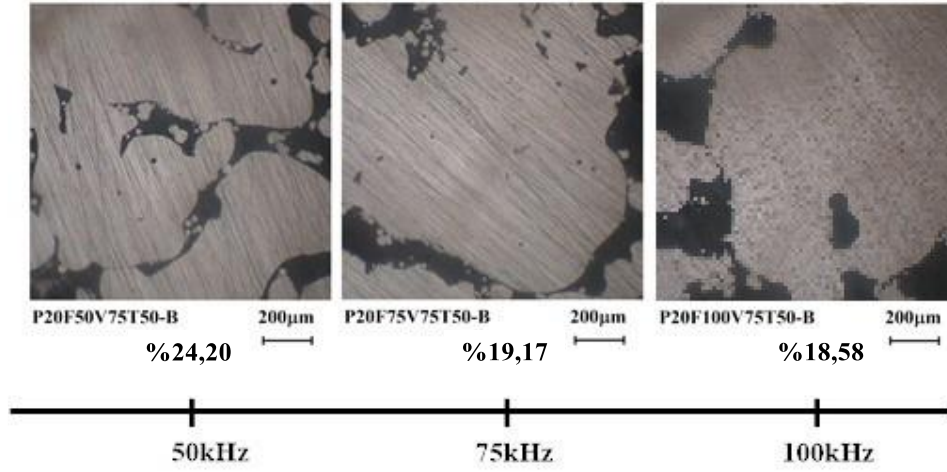
Bu bölümde lazer frekansının, katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş numunelerin gözenekliliğine olan etkisi analiz edilmiştir. Katmanlı lazer ergitme işlemine lazer frekansının etkisi formül 2.2 ve 2.5’de belirtilmiştir. Buna göre lazer frekansı arttıkça lazer atım çakışma oranının arttığı görülmektedir. Üst üste binme oranlarının artmasından dolayı yüksek lazer frekansı ile enerji yoğunluğu artarken gözenekliliğin azalması beklenmektedir.

Sadece lazer frekans değişimi sağlanıp diğer parametrelerin sabit tutulması ile elde edilen lazer frekans profili Çizelge 5.3’deki gibidir. Çizelgede belirtilen parametreler ile elde edilen numunelerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 5.23’den Şekil 5.25’e kadar verilmiştir.

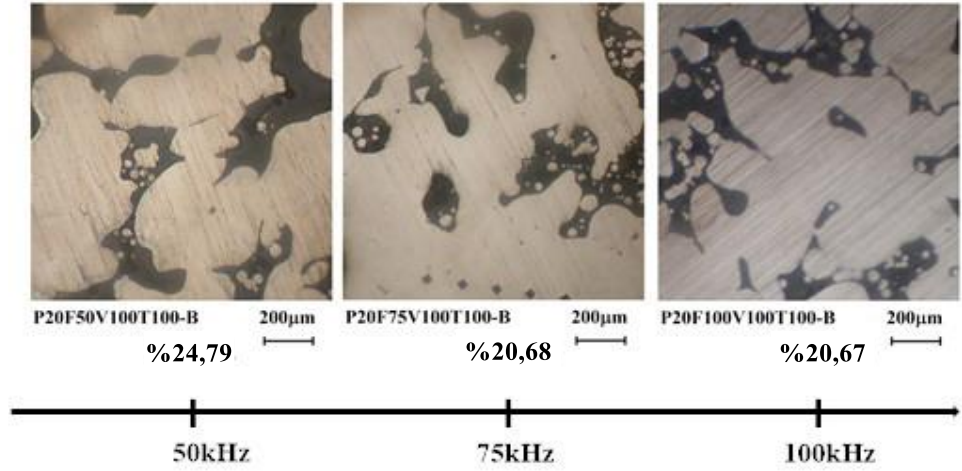
Elde edilen sonuçlara göre lazer frekansı arttıkça gözenekliliğin azaldığı görülmektedir.

Çizelge 5.3 - Frekans profil çizelgesi

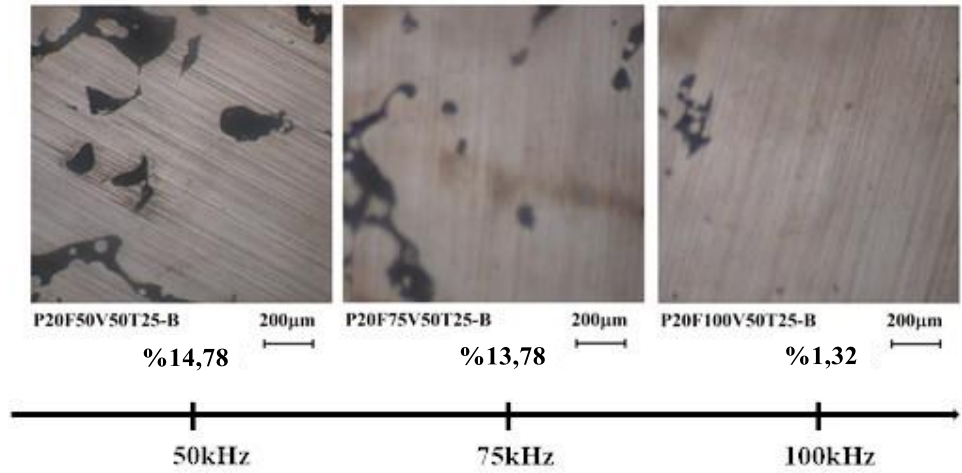
FREKANS PROFİLİ							Şekil No
No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μm)	Tarama Şekli	Gözeneklilik (%)	
40	20W	100	75	50	B	18,58	Şekil 5.23
41	20W	75	75	50	B	19,17	
42	20W	50	75	50	B	24,2	
109	20W	100	100	100	B	20,67	Şekil 5.24
110	20W	75	100	100	B	20,68	
111	20W	50	100	100	B	24,79	
115	20W	100	50	100	B	1,32	Şekil 5.25
116	20W	75	50	100	B	11,78	
117	20W	50	50	100	B	14,78	



Şekil 5.23 - Frekans karşılaştırma 1



Şekil 5.24 - Frekans karşılaştırma 2



Şekil 5.25 - Frekans karşılaştırma 3

5.5. Katman Kalınlığı Parametresinin Analizi

Bu bölümde katman kalınlığının, katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş numunelerin gözenekliliğine olan etkisi analiz edilmiştir. Katmanlı lazer ergitme işlemine katman kalınlığının etkisi Şekil 2.13’de belirtilmiştir. Buna göre katman kalınlığı azaldıkça işlem çözünürlüğünün artması, dolayısıyla gözenekliliğin azalması beklenmektedir.

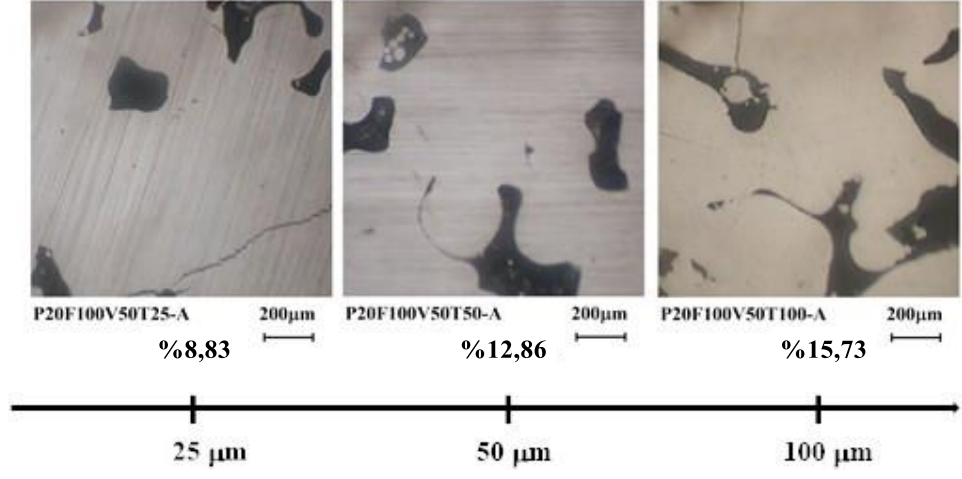
Sadece katman kalınlığı değişimi sağlanıp diğer parametrelerin sabit tutulması ile elde edilen katman kalınlığı profili Çizelge 5.4’deki gibidir. Çizelgede

belirtilen parametreler ile elde edilen numunelerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 5.26'dan Şekil 5.32'ye kadar verilmiştir.

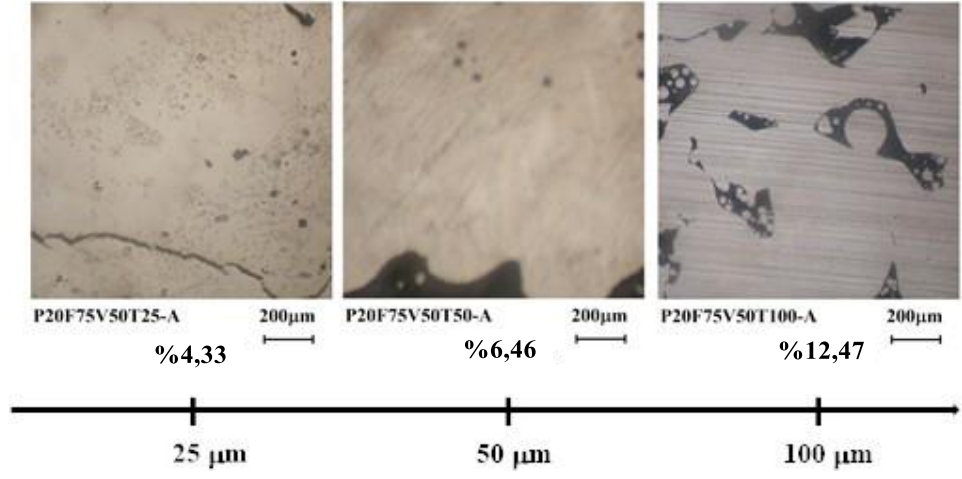
Elde edilen sonuçlara göre katman kalınlığı azaldıkça gözenekliliğin de azaldığı görülmektedir.

Çizelge 5.4 - Katman kalınlığı profil çizelgesi

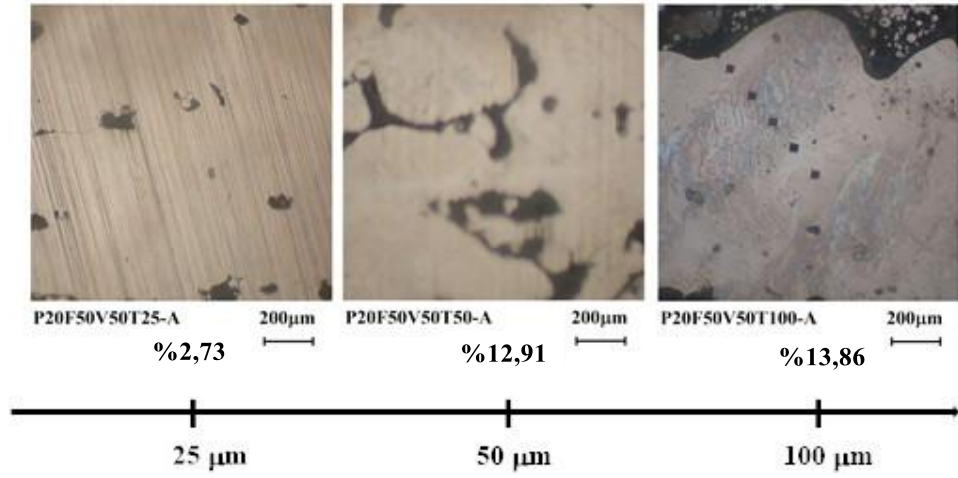
KATMAN KALINLIĞI PROFİLİ							Şekil No
No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (µm)	Tarama Şekli	Gözeneklilik (%)	
7	20W	100	50	50	A	12,86	Şekil 5.26
88	20W	100	50	100	A	16,47	
169	20W	100	50	25	A	8,83	
8	20W	75	50	50	A	6,46	Şekil 5.27
89	20W	75	50	100	A	12,47	
170	20W	75	50	25	A	4,33	
9	20W	50	50	50	A	12,91	Şekil 5.28
90	20W	50	50	100	A	13,86	
171	20W	50	50	25	A	2,73	
17	15W	75	50	50	A	18,32	Şekil 5.29
98	15W	75	50	100	A	23,51	
179	15W	75	50	25	A	13,79	
18	15W	50	50	50	A	24,36	Şekil 5.30
99	15W	50	50	100	A	33,55	
180	15W	50	50	25	A	21,4	
43	20W	100	50	50	B	5,82	Şekil 5.31
115	20W	100	50	100	B	8,87	
196	20W	100	50	25	B	1,32	
45	20W	50	50	50	B	20,47	Şekil 5.32
117	20W	50	50	100	B	26,61	
198	20W	50	50	25	B	4,13	



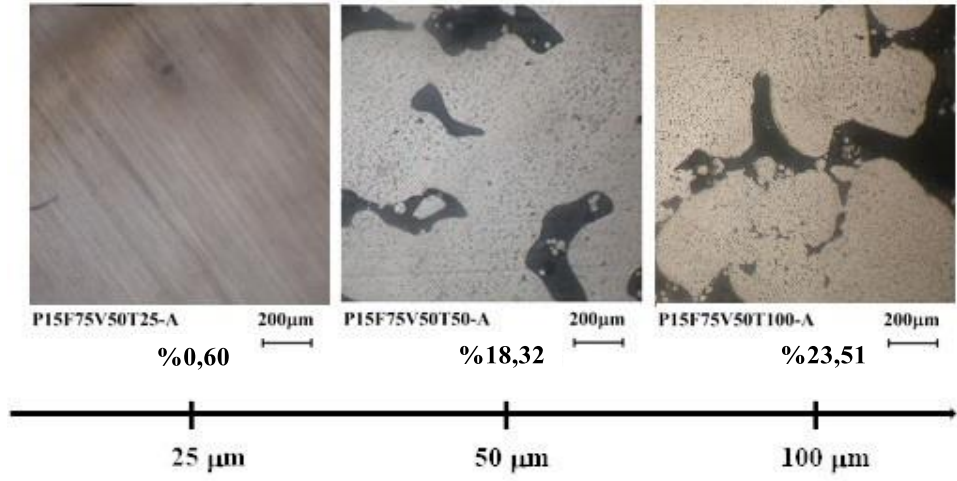
Şekil 5.26 - Katman kalınlığı karşılaştırma 1



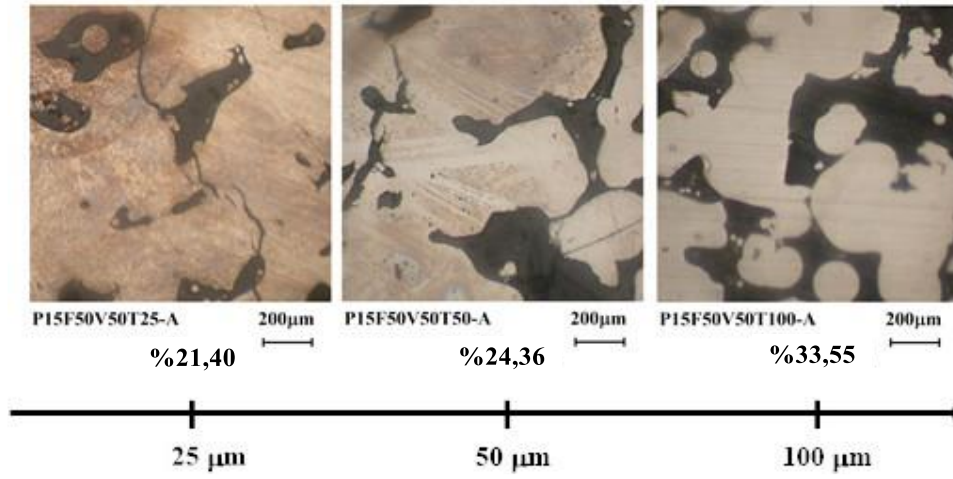
Şekil 5.27 - Katman kalınlığı karşılaştırma 2



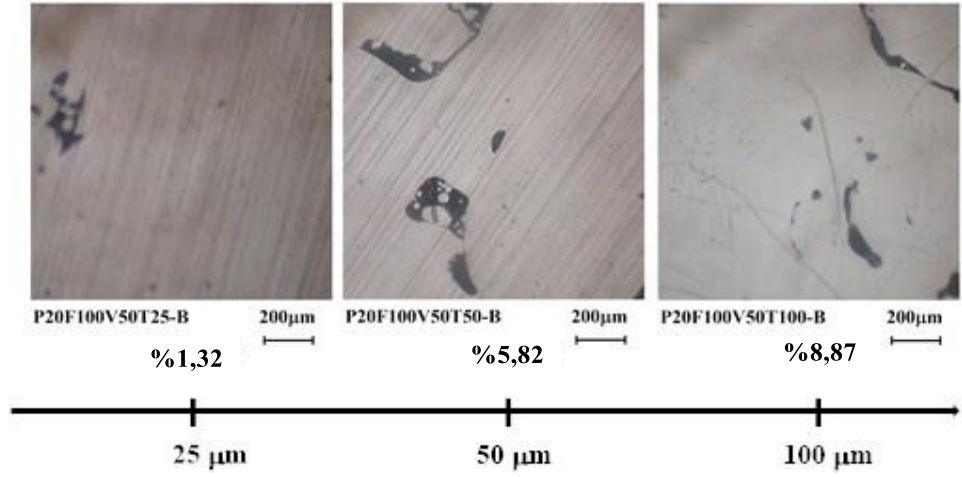
Şekil 5.28 - Katman kalınlığı karşılaştırma 3



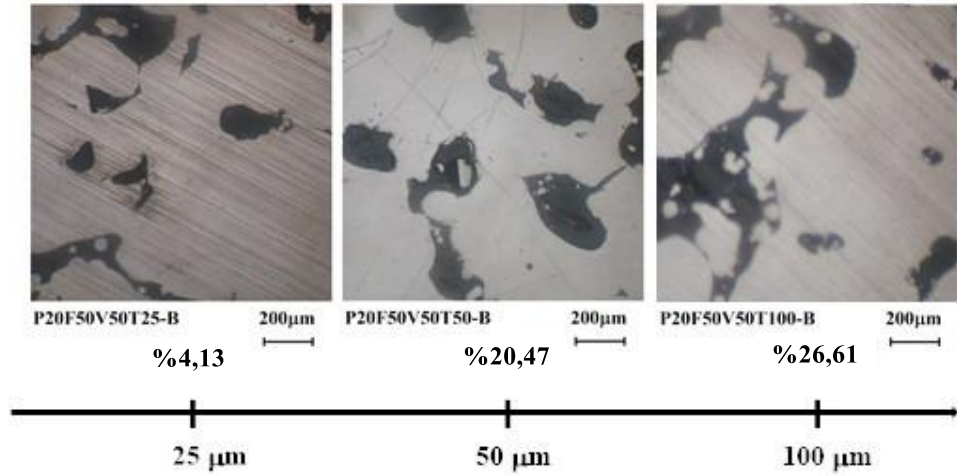
Şekil 5.29 - Katman kalınlığı karşılaştırma 4



Şekil 5.30 - Katman kalınlığı karşılaştırma 5



Şekil 5.31 - Katman kalınlığı karşılaştırma 6



Şekil 5.32 - Katman kalınlığı karşılaştırma 7

5.6. Lazer Tarama Şekli Parametresinin Analizi

Bu bölümde lazer tarama şeklinin, katmanlı lazer ergitme ile üretilmiş numunelerin gözenekliliğine olan etkisi analiz edilmiştir. Katmanlı lazer ergitme işlemine lazer tarama şeklinin etkisini belirlemek üzere üç farklı tarama şekli uygulanmıştır. Çizelge 4.4'te uygulanan tarama şekilleri belirtilmiştir. Buna göre tarama şeklinin iş parçasının gözenekliliğine etki edebileceği varsayılarak deneyler yapılmıştır. Deneylerde taramanın sürekli ve paralel çizgilerden oluşan 'A' şekli, kesikli ve paralel çizgilerden oluşan 'B' şekli ve iç içe çemberlerden oluşan 'C' şeklinde uygulanmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmalar sonucu tarama şeklinin gözenekliliğe etkisini gösteren anlamlı bir sonuç bulunamamıştır.

5.7. En Az Gözenekli Numunenin İncelenmesi

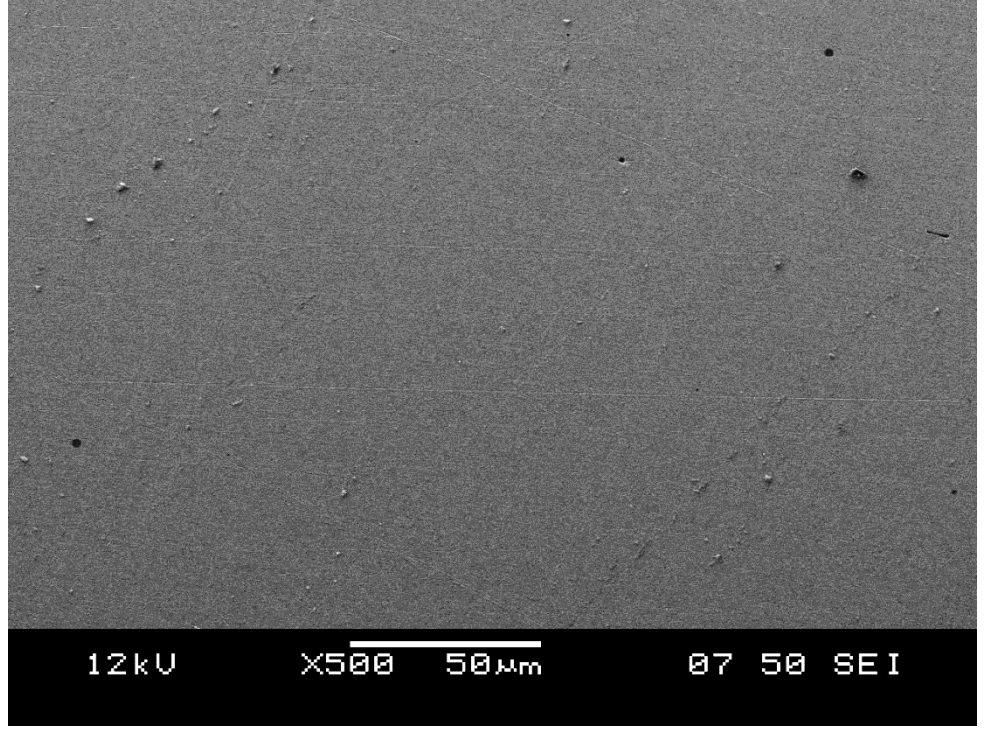
Gerçekleştirilen tüm denemeler sonucunda elde edilen en az gözenekli numune %0,6 gözenekliliğe ulaşan 197 numaralı numunedir. Bu numune; en düşük tarama hızı değeri olan 50 mm/s, en düşük katman kalınlığı değeri olan 25 μ m en yüksek güç değeri olan 20W ve 75 kHz frekans değerlerinde elde edilmiştir. Bu numunede “B” tipi tarama şekli uygulanmıştır. Bu numunede uygulanan işlem parametreleri çizelge 5.5’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.5 - 197 numaralı numune parametreleri

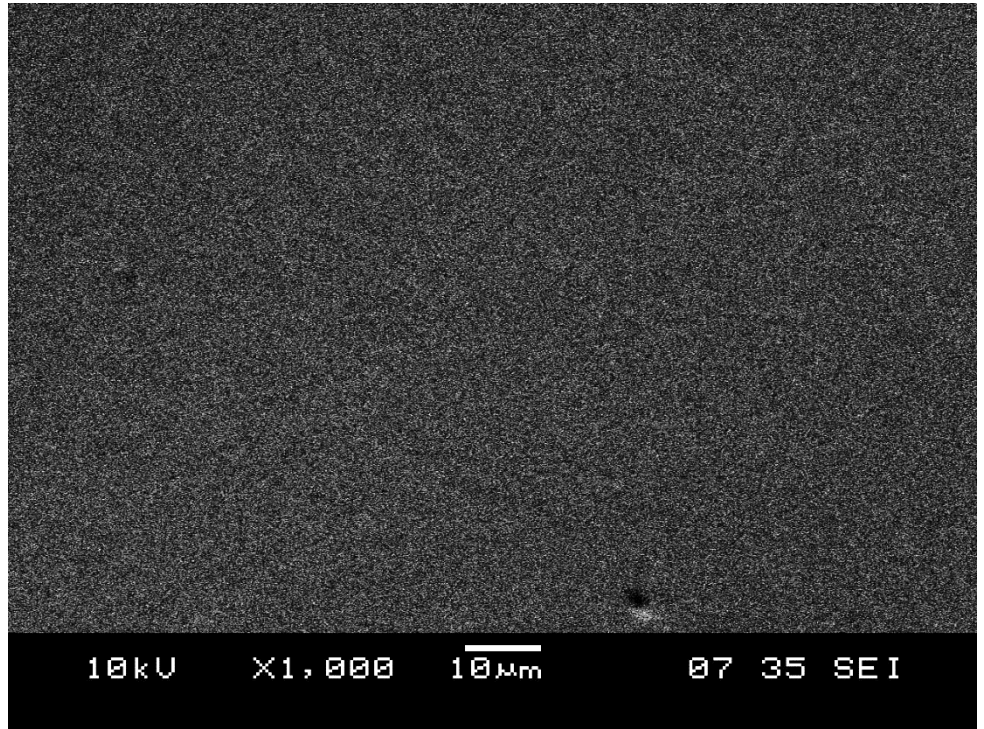
No	Güç (W)	Frekans (kHz)	Hız (mm/s)	Katman Kalınlığı (μ m)	Tarama Şekli	Gözeneklilik (%)
197	20	75	50	25	B	0,6

En iyi sonuç veren 197 numaralı numunenin mikroyapısı SEM ile detaylı incelenmiştir. Şekil 5.33 ve Şekil 5.34’da bu numunenin SEM ile elde edilen görüntüleri verilmiştir.

SEM görüntüleri ile 197 numaralı parçaya ait %0,6 gözeneklilik değeri örtüşmektedir. Elde edilen görüntü ile kullanılan toz malzemenin en büyük tane boyutunun 53 μ m olduğu göz önüne alınarak katmanlı lazer ergitme yöntemi ile Stellite 12 malzemesinin üretilebilirliğine yönelik önemli bir veri sağlanmıştır.



Şekil 5.33 - En az gözenekli numuneye ait SEM görüntüsü (x500)



Şekil 5.34 - En az gözenekli numuneye ait SEM görüntüsü (x1000)

6. SONUÇ

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar üç aşamada gerçekleştirilmiş olup sırasıyla;

- Katmanlı lazer ergitme yöntemi ile üretim yapma yeteneğine sahip düzeneğin (prototip bir makinanın) tasarımı, imalat ve montaj çalışmaları tamamlanmış ve çalışır hale getirilmiştir.
- Prototip olarak imal edilen makine ile katmanlı lazer imalat yöntemini etkileyen temel işlem parametrelerini kapsayan üç farklı dizaynda, 243 farklı kombinasyon içeren bir deney düzeni kurulup bu deney düzenine göre deneme üretimleri gerçekleştirilmiştir.
- İşlem parametrelerinin üretilen iş parçasına etkilerini belirlemeye yönelik inceleme çalışmaları yapılmıştır.

Deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Deney sonuçlarına göre; diğer tüm işlem parametreleri sabit tutulduğunda lazer gücündeki artışın gözenekliliği azalttığı tespit edilmiştir. En iyi sonuçlara en yüksek güç değeri olan 20W ile ulaşılmıştır.
2. Deney sonuçlarına göre; diğer tüm işlem parametreleri sabit tutulduğunda lazer tarama hızındaki azalışın gözenekliliği azalttığı tespit edilmiştir. En iyi sonuçlara en düşük lazer tarama hızı değeri olan 50 mm/s ile ulaşılmıştır.
3. Deney sonuçlarına göre; diğer tüm işlem parametreleri sabit tutulduğunda lazer frekansındaki artışın gözenekliliği azalttığı tespit edilmiştir. En iyi sonuçlara en yüksek frekans değeri olan 100 kHz ile ulaşılmıştır.
4. Deney sonuçlarına göre; diğer tüm işlem parametreleri sabit tutulduğunda katman kalınlığındaki azalışın gözenekliliği azalttığı tespit edilmiştir. En iyi sonuçlara en düşük katman kalınlığı olan 50 μm ile ulaşılmıştır.

5. Deney sonuçlarına göre; diğer tüm işlem parametreleri sabit tutulduğunda tarama şeklinin gözenekliliğe etkisini gösteren anlamlı bir sonuç bulunamamıştır.
6. Gerçekleştirilen tüm deney sonuçlarına göre; en az gözenekliliğe %0,6 değerindeki 197 numaralı numune ile ulaşılmıştır. Bu numune; 20W lazer gücü, 50 mm/s lazer tarama hızı, 75 kHz lazer frekansı, 25 µm katman kalınlığı ve “B” tipi tarama şeklinde uygulanan işlem parametreleri ile elde edilmiştir.

Elde edilen tüm sonuçlar gözönüne alındığında; lazer gücündeki artışın, tarama hızındaki azalmanın ve lazer frekansındaki artışın lazer enerji yoğunluğunu arttırdığı, dolayısıyla birim zamandaki ısı girdisinin artmasına sebep olduğu söylenebilir. Isı girdisindeki artışın daha etkin ergimenin gerçekleşmesine sebep olduğu ve bu durumun gözenekliliği azaltıcı etki yarattığı düşünülmektedir.

Literatürde malzemelerin katmanlı lazer ergitme yöntemi ile üretebilirliğine yönelik değerlendirmelerin tek hat (çizgisel) üretim denemeleri ile yürütülmekte olduğu görülmektedir. Bu tez kapsamında tek hat ile yapılan üretilebilirlik değerlendirmelerinden daha ileri ve güvenilir sonuçlar veren alan değerlendirmeleri yapılmıştır. Bu sebeple elde edilen sonuçların Stellite 12 malzemesinin katmanlı lazer üretim yöntemine uygunluğuna yönelik yeterli verinin sağlandığı söylenebilir.

7. ÖNERİLER

1. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışma sonucu katmanlı lazer ergitme yöntemine etki eden en önemli faktörün enerji yoğunluğu olduğu anlaşılmıştır. Bu çalışmada maksimum 20W gücünde fiber atımlı lazer cihazı kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiş olup, mikro ölçekte hedeflenen gözeneklilik değerine ulaşmakla birlikte makro ölçekte yapılan hacimsel incelemede hedeflenen değerlere ulaşılammıştır. Bundan sonraki çalışmalarda daha yüksek enerji yoğunluğu elde etmek üzere daha yüksek güç sağlayacak lazer kaynakları ile çalışılmasının daha etkili sonuçlar verebileceği düşünülmektedir.

2. Üretim koşullarında atmosferik kontrol yapılmasının fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

3. Üretim aşamasında ortam sıcaklığının ve soğuma koşullarının kontrollü olarak yapılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

4. Toz malzemenin tekrar kullanımının (geri dönüşümün) üretim verimine katkılarının inceleneceği çalışmaların gerek akademik, gerek çevre koruma gerekse maliyet yönünden önemli olduğu düşünülmektedir.

5. Üretim aşamasında üretilen parçaların anlık kalite kontrolüne yönelik sistemlerin geliştirilmesine yönelik çalışmaların gerek akademik gerekse üretim maliyeti yönünden önemli olduğu düşünülmektedir.

6. Üretim koşullarının üretilen parça kalitesine etkilerinin öngörülebilmesine yönelik olarak yapılacak matematiksel modelleme ve simülasyon çalışmalarının gerek akademik gerekse üretim süreçleri açısından oldukça değerli olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abe, F., Costa Santos, E., Kitamura, Y., Osakada, K., and Shiomi, M.,** 2003, Influence of forming conditions on the titanium model in rapid prototyping with the selective laser melting process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 217(1), 119–126 p.
- Abe, F., Osakada, K., Shiomi, M., Uematsu, K., and Matsumoto, M.,** 2001, The manufacturing of hard tools from metallic powders by selective laser melting, *Journal of Materials Processing Technology*, 111(1-3), 210–213 p.
- Abele, E., Stoffregen, H. A., Kniepkamp, M., Lang, S., and Hampe, M.,** 2015, Selective laser melting for manufacturing of thin-walled porous elements, *Journal of Materials Processing Technology*, 215, 114–122 p.
- Aboulkhair, N. T., Everitt, N. M., Ashcroft, I., and Tuck, C.,** 2014, Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting, *Additive Manufacturing*, 1-4, 77–86 p.
- Amin Yavari, S., Wauthle, R., Böttger, A. J., Schrooten, J., Weinans, H., and Zadpoor, A. A.,** 2014, Crystal structure and nanotopographical features on the surface of heat-treated and anodized porous titanium biomaterials produced using selective laser melting, *Applied Surface Science*, 290, 287–294 p.
- Ardila, L. C., Garciandia, F., González-Díaz, J. B., Álvarez, P., Echeverria, A., Petite, M. M., et al.,** 2014, Effect of IN718 Recycled Powder Reuse on Properties of Parts Manufactured by Means of Selective Laser Melting, *Physics Procedia*, 56, 99–107 p.
- Badrossamay, M., and Childs, T. H. C.,** 2007, Further studies in selective laser melting of stainless and tool steel powders, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(5), 779–784 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Bertol, L. S., Júnior, W. K., Silva, F. P. da, and Aumund-Kopp, C.,** 2010, Medical design: Direct metal laser sintering of Ti–6Al–4V, *Materials and Design*, 31(8), 3982–3988 p.
- Bertrand, P., and Smurov, I.,** 2007, Laser Assisted Direct Manufacturing, in: 67320H–67320H–5 pp. Retrieved January 13, 2016, from <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=822745>
- Bormann, T., Müller, B., Schinhammer, M., Kessler, A., Thalmann, P., and de Wild, M.,** 2014, Microstructure of selective laser melted nickel–titanium, *Materials Characterization*, 94, 189–202 p.
- Brandl, E., Heckenberger, U., Holzinger, V., and Buchbinder, D.,** 2012, Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior, *Materials and Design*, 34, 159–169 p.
- Casavola, C., Campanelli, S. L., and Pappalettere, C.,** 2009, Preliminary investigation on distribution of residual stress generated by the selective laser melting process, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 44(1), 93–104 p.
- Challis, V. J., Xu, X., Zhang, L. C., Roberts, A. P., Grotowski, J. F., and Sercombe, T. B.,** 2014, High specific strength and stiffness structures produced using selective laser melting, *Materials and Design*, 63, 783–788 p.
- Chen, J., Zhang, Z., Chen, X., Zhang, C., Zhang, G., and Xu, Z.,** 2014, Design and manufacture of customized dental implants by using reverse engineering and selective laser melting technology, *The Journal of prosthetic dentistry*, 112(5), 1088–1095 p.
- Chivel, Y., and Smurov, I.,** 2010, On-line temperature monitoring in selective laser Sintering/melting, *Physics Procedia*, 5, 515–521 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chivel, Y.**, 2013, Optical In-Process Temperature Monitoring of Selective Laser Melting, *Physics Procedia*, 41, 904–910 p.
- Chlebus, E., Kuźnicka, B., Dziedzic, R., and Kurzynowski, T.**, 2015, Titanium alloyed with rhenium by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*, 620, 155–163 p.
- Craeghs, T., Bechmann, F., Berumen, S., and Kruth, J.-P.**, 2010, Feedback control of Layerwise Laser Melting using optical sensors, *Physics Procedia*, 5, 505–514 p.
- Craeghs, T., Clijsters, S., Kruth, J.-P., Bechmann, F., and Ebert, M.-C.**, 2012, Detection of Process Failures in Layerwise Laser Melting with Optical Process Monitoring, *Physics Procedia*, 39, 753–759 p.
- Dai, D., and Gu, D.**, 2014, Thermal behavior and densification mechanism during selective laser melting of copper matrix composites: Simulation and experiments, *Materials and Design*, 55, 482–491 p.
- Deckard C.**, 1989, Methods and apparatus for producing parts by selective laser sintering, Google Patents. Retrieved January 13, 2016, from <http://www.google.com/patents/US4863538>
- Drummer, D., Wudy, K., and Drexler, M.**, 2014, Influence of Energy Input on Degradation Behavior of Plastic Components Manufactured by Selective Laser Melting, *Physics Procedia*, 56, 176–183 p.
- Dürr, H., Pilz, R., and Eleser, N. S.**, 1999, Rapid tooling of EDM electrodes by means of selective laser sintering, *Computers in Industry*, 39(1), 35–45 p.
- Edwards, P., and Ramulu, M.**, 2014, Fatigue performance evaluation of selective laser melted Ti–6Al–4V, *Materials Science and Engineering: A*, 598, 327–337 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Eshraghi, S., and Das, S.,** 2012, Micromechanical finite-element modeling and experimental characterization of the compressive mechanical properties of polycaprolactone–hydroxyapatite composite scaffolds prepared by selective laser sintering for bone tissue engineering, *Acta Biomaterialia*, 8(8), 3138–3143 p.
- Facchini, L., Magalini, E., Robotti, P., Molinari, A., Höges, S., and Wissenbach, K.,** 2010, Ductility of a Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting of prealloyed powders, *Rapid Prototyping Journal*, 16(6), 450–459 p.
- Fox, P., Pogson, S., Sutcliffe, C. J., and Jones, E.,** 2008, Interface interactions between porous titanium/tantalum coatings, produced by Selective Laser Melting (SLM), on a cobalt–chromium alloy, *Surface and Coatings Technology*, 202(20), 5001–5007 p.
- Ganeriwala, R., and Zohdi, T. I.,** 2014, Multiphysics Modeling and Simulation of Selective Laser Sintering Manufacturing Processes, *Procedia CIRP*, 14, 299–304 p.
- Gebhardt, A., Schmidt, F.-M., Hötter, J.-S., Sokalla, W., and Sokalla, P.,** 2010, Additive Manufacturing by selective laser melting the realizer desktop machine and its application for the dental industry, *Physics Procedia*, 5, 543–549 p.
- Gibson, I., Rosen, D., and Stucker, B.,** 2015, Additive Manufacturing Technologies, New York, NY: Springer New York. Retrieved January 13, 2016, from <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- Gu, D., and Meiners, W.,** 2010, Microstructure characteristics and formation mechanisms of in situ WC cemented carbide based hardmetals prepared by Selective Laser Melting, *Materials Science and Engineering: A*, 527(29-30), 7585–7592 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gu, D., and Shen, Y.,** 2007, Influence of reinforcement weight fraction on microstructure and properties of submicron WC–Co/Cu bulk MMCs prepared by direct laser sintering, *Journal of Alloys and Compounds*, 431(1-2), 112–120 p.
- Gu, D., Hagedorn, Y.-C., Meiners, W., Meng, G., Batista, R. J. S., Wissenbach, K., et al.,** 2012, Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium, *Acta Materialia*, 60(9), 3849–3860 p.
- Gu, D., Hagedorn, Y.-C., Meiners, W., Wissenbach, K., and Poprawe, R.,** 2011, Selective Laser Melting of in-situ TiC/Ti₅Si₃ composites with novel reinforcement architecture and elevated performance, *Surface and Coatings Technology*, 205(10), 3285–3292 p.
- Gu, D., Hagedorn, Y.-C., Meiners, W., Wissenbach, K., and Poprawe, R.,** 2011, Nanocrystalline TiC reinforced Ti matrix bulk-form nanocomposites by Selective Laser Melting (SLM): Densification, growth mechanism and wear behavior, *Composites Science and Technology*, 71(13), 1612–1620 p.
- Gu, D., Meng, G., Li, C., Meiners, W., and Poprawe, R.,** 2012, Selective laser melting of TiC/Ti bulk nanocomposites: Influence of nanoscale reinforcement, *Scripta Materialia*, 67(2), 185–188 p.
- Gu, D., Wang, H., Chang, F., Dai, D., Yuan, P., Hagedorn, Y.-C., et al.,** 2014, Selective Laser Melting Additive Manufacturing of TiC/AlSi₁₀Mg Bulk-form Nanocomposites with Tailored Microstructures and Properties, *Physics Procedia*, 56, 108–116 p.
- Guan, K., Wang, Z., Gao, M., Li, X., and Zeng, X.,** 2013, Effects of processing parameters on tensile properties of selective laser melted 304 stainless steel, *Materials and Design*, 50, 581–586 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hazlehurst, K. B., Wang, C. J., and Stanford, M.,** 2013, The potential application of a Cobalt Chrome Molybdenum femoral stem with functionally graded orthotropic structures manufactured using Laser Melting technologies, *Medical Hypotheses*, 81(6), 1096–1099 p.
- Hopkinson, N., Majewski, C. E., and Zarringhalam, H.,** 2009, Quantifying the degree of particle melt in Selective Laser Sintering®, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(1), 197–200 p.
- Housholder R.,** 1981, Molding process, Google Patents. Retrieved January 13, 2016, from <http://www.google.com/patents/US4247508>
- Jia, Q., and Gu, D.,** 2014, Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties, *Journal of Alloys and Compounds*, 585, 713–721 p.
- Kanagarajah, P., Brenne, F., Niendorf, T., and Maier, H. J.,** 2013, Inconel 939 processed by selective laser melting: Effect of microstructure and temperature on the mechanical properties under static and cyclic loading, *Materials Science and Engineering: A*, 588, 188–195 p.
- Kanazawa, M., Iwaki, M., Minakuchi, S., and Nomura, N.,** 2014, Fabrication of titanium alloy frameworks for complete dentures by selective laser melting, *The Journal of prosthetic dentistry*, 112(6), 1441–1447 p.
- Kaplan, A. F.,** 2011, Analysis and modeling of a high-power Yb: fiber laser beam profile, *Optical Engineering*, 50(5), 054201–054201 pp.
- Kasman, Ş.,** 2010, Lazerle Oyma İşlem Parametrelerinin Yüzey Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi Ve Optimizasyonu, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 263s (yayımlanmamış)

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kempen, K., Thijs, L., Van Humbeeck, J., and Kruth, J.-P.,** 2012, Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting, *Physics Procedia*, 39, 439–446 p.
- Khmyrov, R. S., Grigoriev, S. N., Okunkova, A. A., and Gusarov, A. V.,** 2014, On the Possibility of Selective Laser Melting of Quartz Glass, *Physics Procedia*, 56, 345–356 p.
- Koike, M., Greer, P., Owen, K., Lilly, G., Murr, L. E., Gaytan, S. M., et al.,** 2011, Evaluation of Titanium Alloys Fabricated Using Rapid Prototyping Technologies—Electron Beam Melting and Laser Beam Melting, *Materials*, 4(12), 1776–1792 p.
- Kolan, K. C. R., Leu, M. C., Hilmas, G. E., and Velez, M.,** 2012, Effect of material, process parameters, and simulated body fluids on mechanical properties of 13-93 bioactive glass porous constructs made by selective laser sintering, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 13, 14–24 p.
- Kovaleva, I., Kovalev, O., and Smurov, I.,** 2014, Model of Heat and Mass Transfer in Random Packing Layer of Powder Particles in Selective Laser Melting, *Physics Procedia*, 56, 400–410 p.
- Krauss, H., and Zaeh, M. F.,** 2013, Investigations on Manufacturability and Process Reliability of Selective Laser Melting, *Physics Procedia*, 41, 815–822 p.
- Krauss, H., Zeugner, T., and Zaeh, M. F.,** 2014, Layerwise Monitoring of the Selective Laser Melting Process by Thermography, *Physics Procedia*, 56, 64–71 p.
- Kumpulainen, T., Pekkanen, J., Valkama, J., Laakso, J., Tuokko, R., and Mäntysalo, M.,** 2011, Low temperature nanoparticle sintering with continuous wave and pulse lasers, *Optics and Laser Technology*, 43(3), 570–576 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Laoui, T., Santos, E., Osakada, K., Shiomi, M., Morita, M., Shaik, S. K., et al.,** 2006, Properties of Titanium Dental Implant Models Made by Laser Processing, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 220(6), 857–863 p.
- Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H. A., et al.,** 2013, On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance, *International Journal of Fatigue*, 48, 300–307 p.
- Levy, G. N., Schindel, R., and Kruth, J. P.,** 2003, Rapid Manufacturing And Rapid Tooling With Layer Manufacturing (Lm) Technologies, State Of The Art And Future Perspectives, *Cirp Annals - Manufacturing Technology*, 52(2), 589–609 p.
- Lipinski, P., Barbas, A., and Bonnet, A.-S.,** 2013, Fatigue behavior of thin-walled grade 2 titanium samples processed by selective laser melting. Application to life prediction of porous titanium implants, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 28, 274–290 p.
- Lott, P., Schleifenbaum, H., Meiners, W., Wissenbach, K., Hinke, C., and Bültmann, J.,** 2011, Design of an Optical system for the In Situ Process Monitoring of Selective Laser Melting (SLM), *Physics Procedia*, 12, 683–690 p.
- Löber, L., Schimansky, F. P., Kühn, U., Pyczak, F., and Eckert, J.,** 2014, Selective laser melting of a beta-solidifying TNM-B1 titanium aluminide alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 214(9), 1852–1860 p.
- Meiners, W., Wissenbach, K., and Gasser, A.,** 2001, Selective laser sintering at melting temperature, Google Patents. Retrieved January 13, 2016, from <http://www.google.com/patents/US6215093>
- Mohanty, S., and Hattel, J. H.,** 2014, Numerical Model based Reliability Estimation of Selective Laser Melting Process, *Physics Procedia*, 56, 379–389 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Monroy, K., Delgado, J., and Ciurana, J.,** 2013, Study of the Pore Formation on CoCrMo Alloys by Selective Laser Melting Manufacturing Process, *Procedia Engineering*, 63, 361–369 p.
- Motallebzadeh, A., Atar, E., and Cimenoglu, H.,** 2015, Microstructure and Tribological Properties of PTA Deposited Stellite 12 Coating on Steel Substrate, Retrieved January 14, 2016, from <http://www.hrpub.org/download/20151208/MST23-15490408.pdf>
- Neef, A., Seyda, V., Herzog, D., Emmelmann, C., Schönleber, M., and Kogel-Hollacher, M.,** 2014, Low Coherence Interferometry in Selective Laser Melting, *Physics Procedia*, 56, 82–89 p.
- Nyrhila, O. J.,** 1998, *Method for fabricating dimensionally accurate pieces by laser sintering*, Google Patents. Retrieved January 13, 2016, from <http://www.google.com/patents/US5732323>
- Osakada, K., and Shiomi, M.,** 2006, Flexible manufacturing of metallic products by selective laser melting of powder, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(11), 1188–1193 p.
- Papadakis, L., Loizou, A., Risse, J., and Schrage, J.,** 2014, Numerical Computation of Component Shape Distortion Manufactured by Selective Laser Melting, *Procedia CIRP*, 18, 90–95 p.
- Rafi, H. K., Karthik, N. V., Gong, H., Starr, T. L., and Stucker, B. E.,** 2013, Microstructures and Mechanical Properties of Ti6Al4V Parts Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(12), 3872–3883 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Rafi, H. K., Starr, T. L., and Stucker, B. E.,** 2013, A comparison of the tensile, fatigue, and fracture behavior of Ti-6Al-4V and 15-5 PH stainless steel parts made by selective laser melting, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(5-8), 1299–1309 p.
- Rometsch, P. A., Pelliccia, D., Tomus, D., and Wu, X.,** 2014, Evaluation of polychromatic X-ray radiography defect detection limits in a sample fabricated from Hastelloy X by selective laser melting, *NDT and E International*, 62, 184–192 p.
- Russ, J. C.,** 2011, The image processing handbook, Boca Raton: CRC Press.
- Sallica-Leva, E., Jardini, A. L., and Fogagnolo, J. B.,** 2013, Microstructure and mechanical behavior of porous Ti-6Al-4V parts obtained by selective laser melting, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 26, 98–108 p.
- Santos, E. C., Osakada, K., Shiomi, M., Kitamura, Y., and Abe, F.,** 2004, Microstructure and mechanical properties of pure titanium models fabricated by selective laser melting, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 218(7), 711–719 p.
- Santos, E. C., Shiomi, M., Osakada, K., and Laoui, T.,** 2006, Rapid manufacturing of metal components by laser forming, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12-13), 1459–1468 p.
- Senthilkumaran, K., Pandey, P. M., and Rao, P. V. M.,** 2009, Influence of building strategies on the accuracy of parts in selective laser sintering, *Materials and Design*, 30(8), 2946–2954 p.
- Sercombe, T., Jones, N., Day, R., and Kop, A.,** 2008, Heat treatment of Ti-6Al-7Nb components produced by selective laser melting, *Rapid Prototyping Journal*, 14(5), 300–304 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Seyda, V., Kaufmann, N., and Emmelmann, C.,** 2012, Investigation of Aging Processes of Ti-6Al-4 V Powder Material in Laser Melting, *Physics Procedia*, 39, 425–431 p.
- Shishkovsky, I., Yadroitsev, I., and Smurov, I.,** 2012, Direct Selective Laser Melting of Nitinol Powder, *Physics Procedia*, 39, 447–454 p.
- Shishkovsky, I., Yadroitsev, I., Bertrand, P., and Smurov, I.,** 2007, Alumina–zirconium ceramics synthesis by selective laser sintering/melting, *Applied Surface Science*, 254(4), 966–970 p.
- Simchi, A., and Godlinski, D.,** 2008, Effect of SiC particles on the laser sintering of Al–7Si–0.3Mg alloy, *Scripta Materialia*, 59(2), 199–202 p.
- Simchi, A., and Godlinski, D.,** 2011, Densification and microstructural evolution during laser sintering of A356/SiC composite powders, *Journal of Materials Science*, 46(5), 1446–1454 p.
- Song, B., Dong, S., Coddet, P., Liao, H., and Coddet, C.,** 2014, Fabrication of NiCr alloy parts by selective laser melting: Columnar microstructure and anisotropic mechanical behavior, *Materials and Design*, 53, 1–7 p.
- Song, B., Dong, S., Coddet, P., Zhou, G., Ouyang, S., Liao, H., et al.,** 2013, Microstructure and tensile behavior of hybrid nano-micro SiC reinforced iron matrix composites produced by selective laser melting, *Journal of Alloys and Compounds*, 579, 415–421 p.
- Song, B., Dong, S., Deng, S., Liao, H., and Coddet, C.,** 2014, Microstructure and tensile properties of iron parts fabricated by selective laser melting, *Optics and Laser Technology*, 56, 451–460 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Song, B., Dong, S., Liu, Q., Liao, H., and Coddet, C.,** 2014, Vacuum heat treatment of iron parts produced by selective laser melting: Microstructure, residual stress and tensile behavior, *Materials and Design*, 54, 727–733 p.
- Sun, Y., Moroz, A., and Alrbaey, K.,** 2014, Sliding Wear Characteristics and Corrosion Behaviour of Selective Laser Melted 316L Stainless Steel, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(2), 518–526 p.
- Takaichi, A., Suyalatu, Nakamoto, T., Joko, N., Nomura, N., Tsutsumi, Y., et al.,** 2013, Microstructures and mechanical properties of Co–29Cr–6Mo alloy fabricated by selective laser melting process for dental applications, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 21, 67–76 p.
- Tarzia, V., Bottio, T., Testolin, L., and Gerosa, G.,** 2007, Extended (31 years) durability of a Starr-Edwards prosthesis in mitral position, *Interactive CardioVascular and Thoracic Surgery*, 6(4), 570–571 pp.
- Theodorakos, I., Zacharatos, F., Geremia, R., Karnakis, D., and Zergioti, I.,** 2015, Selective laser sintering of Ag nanoparticles ink for applications in flexible electronics, *Applied Surface Science*, 336, 157–162 p.
- Van Hooreweder, B., and Kruth, J.-P.,** 2014, High cycle fatigue properties of selective laser sintered parts in polyamide 12, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63(1), 241–244 p.
- Vasquez, M., Cross, J., Hopkinson, N., and Haworth, B.,** 2012, Developing new laser sintering materials for snowboarding applications, *Procedia Engineering*, 34, 325–330 p.
- Verhaeghe, F., Craeghs, T., Heulens, J., and Pandelaers, L.,** 2009, A pragmatic model for selective laser melting with evaporation, *Acta Materialia*, 57(20), 6006–6012 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J.-P., and Van Humbeeck, J.,** 2014, Microstructure and mechanical properties of a novel β titanium metallic composite by selective laser melting, *Acta Materialia*, 68, 150–158 p.
- Wang, F.,** 2012, Mechanical property study on rapid additive layer manufacture Hastelloy® X alloy by selective laser melting technology, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(5-8), 545–551 p.
- Wang, X. J., Zhang, L. C., Fang, M. H., and Sercombe, T. B.,** 2014, The effect of atmosphere on the structure and properties of a selective laser melted Al–12Si alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 597, 370–375 p.
- Xu, D., Xiang, N., and Wei, B.,** 2014, The marginal fit of selective laser melting–fabricated metal crowns: An in vitro study, *The Journal of prosthetic dentistry*, 112(6), 1437–1440 p.
- Yadroitsev, I., and Smurov, I.,** 2010, Selective laser melting technology: From the single laser melted track stability to 3D parts of complex shape, *Physics Procedia*, 5, 551–560 p.
- Yadroitsev, I., Bertrand, P., Laget, B., and Smurov, I.,** 2007, Application of laser assisted technologies for fabrication of functionally graded coatings and objects for the International Thermonuclear Experimental Reactor components, *Journal of Nuclear Materials*, 362(2-3), 189–196 pp.
- Yadroitsev, I., Krakhmalev, P., Yadroitsava, I., Johansson, S., and Smurov, I.,** 2013, Energy input effect on morphology and microstructure of selective laser melting single track from metallic powder, *Journal of Materials Processing Technology*, 213(4), 606–613 p.
- Yang, X., Xiang, N., and Wei, B.,** 2014, Effect of fluoride content on ion release from cast and selective laser melting-processed Co-Cr-Mo alloys, *The Journal of prosthetic dentistry*, 112(5), 1212–1216 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Yasa, E., and Kruth, J.-P.,** 2011, Microstructural investigation of Selective Laser Melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting, *Procedia Engineering*, 19, 389–395 p.
- Yves-Christian, H., Jan, W., Wilhelm, M., Konrad, W., and Reinhart, P.,** 2010, Net shaped high performance oxide ceramic parts by selective laser melting, *Procedia*, 5, 587–594 p.
- Zarringhalam, H., Majewski, C., and Hopkinson, N.,** 2009, Degree of particle melt in Nylon-12 selective laser-sintered parts, *Rapid Prototyping Journal*, 15(2), 126–132 p.
- Zeng, L., Xiang, N., and Wei, B.,** 2014, A comparison of corrosion resistance of cobalt-chromium-molybdenum metal ceramic alloy fabricated with selective laser melting and traditional processing, *The Journal of prosthetic dentistry*, 112(5), 1217–1224 p.
- Zhang, B., Chen, J., and Coddet, C.,** 2013, Microstructure and Transformation Behavior of in-situ Shape Memory Alloys by Selective Laser Melting Ti–Ni Mixed Powder, *Journal of Materials Science and Technology*, 29(9), 863–867 p.
- Zhang, B., Fenineche, N.-E., Liao, H., and Coddet, C.,** 2013, Magnetic properties of in-situ synthesized FeNi₃ by selective laser melting Fe-80%Ni powders, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 336, 49–54 p.
- Zhang, B., Fenineche, N.-E., Liao, H., and Coddet, C.,** 2013, Microstructure and Magnetic Properties of Fe–Ni Alloy Fabricated by Selective Laser Melting Fe/Ni Mixed Powders, *Journal of Materials Science and Technology*, 29(8), 757–760 p.
- Zhang, B., Fenineche, N.-E., Zhu, L., Liao, H., and Coddet, C.,** 2012, Studies of magnetic properties of permalloy (Fe–30%Ni) prepared by SLM technology, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 324(4), 495–500 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Zhang, D. Q., Cai, Q. Z., Liu, J. H., Zhang, L., and Li, R. D.,** 2010, Select laser melting of W–Ni–Fe powders: simulation and experimental study, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51(5-8), 649–658 p.
- Zhang, D., Cai, Q., Liu, J., and Li, R.,** 2011, Research on Process and Microstructure Formation of W-Ni-Fe Alloy Fabricated by Selective Laser Melting, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 20(6), 1049–1054 p.
- Zhang, L. C., Klemm, D., Eckert, J., Hao, Y. L., and Sercombe, T. B.,** 2011, Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of a biomedical Ti–24Nb–4Zr–8Sn alloy, *Scripta Materialia*, 65(1), 21–24 p.

ÖZGEÇMİŞ

Erdoğan POLAT, 1986 yılında Adana’da doğdu. 2010 yılında Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Mezuniyet sonrası Şanlı Döküm A.Ş.’de ihracat müdürü ve makine mühendisi olarak çalıştı. 2011 yılında Asteğmen olarak askerliğini yaptı. 2012 yılında ÖYP kapsamında İskenderun Teknik Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat mühendisliği ABD’da Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Aynı yıl Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina mühendisliği ABD’da (ÖYP) 35. Madde kapsamında Araştırma Görevlisi olarak atandı ve hali hazırda çalışmalarını burada sürdürmektedir.

EKLER

Ek 1 Matlab Görüntü İşleme Kodu

```
files = dir('*.*jpg'); %makes structure files with info on all jpg's

out=zeros(length(files));

fileID2 = fopen('ratios.txt','w');

for i=1:length(files)

filenamee=['C:\Users\sercan\Desktop\photos\' files(i,1).name] ;

I=imread(filenamee);

I=rgb2gray(I);

imshow(I);

figure;

[pathstr,name,ext] = fileparts(filenamee)

J = imadjust(I);

level = graythresh(J);

bw = im2bw(J,level);

bw = bwareaopen(bw, 1);

imshow(bw)

imwrite(bw,[name 'v2.jpg'])

imhist(bw);

figure;

imshow(bw);

[counts,x]=imhist(bw);
```

```
a=[x,counts];

beyaz=a(2,2);

toplama=a(2,2)+a(1,2);

ratio=beyaz/toplam*100;

r(i,:)=[ratio];

txtline=strcat(files(i,1).name,',',num2str(ratio));

fprintf(fileID2,'%12s\n',txtline);

out(i)=ratio;

end

fclose(fileID2);
```