KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRO-OPTİK SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

METAL TOZLARININ LAZER İLE BİRLEŞTİRİLEREK KATMANLI PARÇA ÜRETİMİ

KAAN TURAN

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRO OPTİK SİSTEM
MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

METAL TOZLARININ LAZER İLE BİRLEŞTİRİLEREK KATMANLI PARÇA ÜRETİMİ

KAAN TURAN

Doç.Dr.Erhan AKMAN
Danışman, Kocaeli Üniv. .....

Prof.Dr.Arif DEMİR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Prof.Dr.Necati Fevzi ECEVİT
Jüri Üyesi, Gebze Teknik Üniv. .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 08.07.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince destek ve yardımlarını esirgemeyerek çalışmalarımın her aşamasında yanımda olarak fikir ve düşünceleri ile gelecekteki bilimsel, akademik çalışmalarımda ilerlemem için ışık tutan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Erhan Akman'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalışmalarım sırasında destek olarak, yol göstericiliği ile hem bilimsel alanda hem de hayata karşı farklı bakış açıları kazanarak gelişme sağlamama ve kendisi ile çalışma fırsatı bularak, bana imkân veren değerli hocam Sayın Prof. Dr. Arif Demir'e teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımda ekipman ve laboratuvarları kullanmama imkân veren Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi LATARUM, Havacılık Malzemeleri Araştırma Geliştirme Laboratuvarı HAMAG, yönetici ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Eğitim hayatım süresince yanımda olarak gösterdikleri destek, inanç ve sabır için Aileme teşekkür eder ve bu çalışmamı onlara ithaf ederim. Birlikte daha çok başarılara imza atacağız…

Saygılarımla

Temmuz – 2019 Kaan TURAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR…..……..... i
İÇİNDEKİLER…….... ii
ŞEKİLLER DİZİNİ…… .iii
TABLOLAR DİZİNİ…….. iv
SİMGELER VE KISALTMALAR…… v
ÖZET…….. x
ABSTRACT…… xi
GİRİŞ……..... 1
1.KATMANLI ÜRETİM TEKNİKLER……..... 3
1.1 Katmanlı üretim……..…….. 4
1.1.1. Katmanlı üretim tekniğinin çeşitleri……..... 5
1.1.2. Fused Deposition Modelling (FDM)…….…… 5
1.1.3. Stereolithograph(SLA)……..... 7
1.1.4. Material Jetting……..... 9
1.1.5. Binder Jetting…… 11
1.1.6. Electron Beam Melting (EBM)…….. 13
1.1.7. Selective Laser Sintering (SLS)……..15
2.SLS KATMANLI ÜRETİM TEKNİĞİ…….....18
2.1. Selective Laser Sintering Yöntemi……. 18
2.2. Selective Laser Sintering Yöntemi Avantajları……... 25
2.3. Mekanik ve Yazılımsal Tasarım……..... 26
2.4. Lazer Malzeme Etkileşimi……..... 30
2.5. Metallerin Fiziksel Özellikleri…… 32
2.6. Selective Laser Sintering Parametre Belirleme……... 34
2.7. SLS Parametrelerinin Birleşme Üzerine Etkisi……... 36
2.8. Üretilen Numunelerin Kalite Test Yöntemi……38
3.MALZEME VE METHOD…… 40
3.1. SLS Sistem Mekanik Tasarımı…… 41
3.2. SLS Sistem Yazılım ve Elektronik Tasarım…… 47
3.3. Sistem Üzerinde Kullanılan Lazerlerin Özellikleri…….....50
4.SLS YÖNTEMİ İLE 3D YAPILAR OLUŞTURULMASI……52
4.1. SLS Metodu İle Üretilen Parça Özelliği……..... 52
5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER…… 65
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER…….. 67
KAYNAKLAR……..…….. 68
ÖZGEÇMİŞ…… 70

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Katmanlı üretim tekniği ile üretilmiş parça…… 4
Şekil 1.2. Katmanlı üretim tekniği ile sağlık alanında üretilmiş protez bacak…… 4
Şekil 1.3. FDM sistem çalışma görüntüsü……... 6
Şekil 1.4. Ticari olarak satılmakta olan FDM makineleri…… 7
Şekil 1.5. SLA üretim tekniği ile model üretim şeması……... 8
Şekil 1.6. Ticari olarak satılmakta olan SLA makinesi…….. 9
Şekil 1.7. Material Jetting tekniği model üretim şeması……. 10
Şekil 1.8. Ticari olarak satılmakta olan Material Jetting yazıcı ve üretilen numuneler …….. 11
Şekil 1.9. Binder Jetting tekniği model üretim şeması…… 12
Şekil 1.10. Ticari olarak satılmakta olan Binder Jetting yazıcı ……..…….. 13
Şekil 1.11. Electron Beam Melting(EBM) model üretim şeması …….…… 14
Şekil 1.12. Ticari olarak satılmakta olan EBM yazıcı ……..…… 15
Şekil 1.1. SLS katmanlı üretim tekniği ile parça üretimi…….16
Şekil 2.1. SLS sisteminin çalışma şeması……19
Şekil 2.2. Cad programında parça tasarımı……...20
Şekil 2.3. Tasarımı gerçeleştirilen tasarımın stl dosya formatona dönüşümü …… 20
Şekil 2.4. Modelin dilimlere ayrılması ……... 21
Şekil 2.5. Nd- Yag kristali…….. 22
Şekil 2.6. Fiber lazer sistemi lazer oluşumu …….. 22
Şekil 2.7. Ticari olarak fiber lazer üreten başlıca firmalar…… 23
Şekil 2.8. CO_2 lazer tüpü …… 24
Şekil 2.9. Lazer galvo kafa üretimi……..25
Şekil 2.10. SLS katmanlı üretim şeması ……... 27
Şekil 2.11. SLS katmanlı üretim makinesi …….....28
Şekil 2.12. 3D Yazıcılar için ticari olarak satılan yazılım örneği ……29
Şekil 2.13. EOS firmasına ait SLS sisteminin mekanik ve yazılımsal şeması…….. 29
Şekil 2.14. Absorsiyon,yansıma ve Polarizasyon Şeması ……30
Şekil 2.15 SLS tekniğinde lazer ışınınıntoz malzeme içerisinde yayılma modellemesi ……... 31
Şekil 2.16. Lazer malzeme etkileşimi……32
Şekil 2.17. Yüzeye Aktarılan Enerjiyi Etkiyen Parametreler ……... 34
Şekil 2.18. Belirlenen parametrelerin kullanım şeması …… 37
Şekil 2.19. Lazer overlap şeması …….. 37
Şekil 2.20. SLS Üretim Tekniği Tarama Stratejisi ……... 38
Şekil 3.1. Sistem ana şase iskelet tasarımı …….. 42
Şekil 3.2. Toz besleme modülü tasarımı ve üretilmiş görüntüsü……. 42
Şekil 3.3. Toz besleme ünitesi iç yapısı ……... 43
Şekil 3.4. Toz yayma ünitesi tasarımı …….. 44
Şekil 3.5. Toz yayma ünitesi ……. 45
Şekil 3.6. Isıtıcı yatağı …… 45
Şekil 3.7. Dimmer devresi ……. 46

Şekil 3.8. Sistem bilgisayar ortamında gerçekleştirilen tasarımı ve üretim sonrası görüntüleri …….....47
Şekil 3.9. Sistem yazılım arayüzü ……...47
Şekil 3.10. Arduino mega ve sürücü kartı ……... 48

Şekil 3.11. Sistem üzerinde kullanılan motorlar ……...49
Şekil 3.12. Ezcad yazılım arayüzü …….. 49
Şekil 3.13. Gaussian beam profil görüntüsü…….... 50
Şekil 3.14. SLS sisteminde kullanılan fiber lazere ait görüntü ve teknik özelikler…... 50
Şekil 3.15. Komparatör cihazı…..... 51
Şekil 4.1. CoCr kimyasal özelliği ve kullanım alanı …….. 53
Şekil 4.2. Sistem içerisine serilmiş CrCo tozu ……53
Şekil 4.3. Sistem içerisine yerleştirilen levha ile oksidasyon değişim analizi……54
Şekil 4.4. Sistem içerisine yerleştirilen levha ile oksidasyon değişimine ait mikroskop görüntüleri …….....55
Şekil 4.5. CrCo tozu içerisinde bulunan Co tarafından bağlanan oksit tabaksı……. 56
Şekil 4.6. SLS tekniği ile parça üretim anı ……. 57
Şekil 4.7. İşlenen parçanın tabladan çıkarılmadan önceki görüntüsü……. 57
Şekil 4.8. Değişken güç parametrelerine bağlı olarak oluşan parçaların yüzey mikroskop görüntüleri …….....58
Şekil 4.9. Değişken güç parametrelerine bağlı olarak oluşan parçaların kesit mikroskop görüntüleri …….....59
Şekil 4.10. Parçaların profilometre görüntüleri……..……. 60
Şekil 4.11. Parçaların profilometre görüntüleri……..……. 60
Şekil 4.12. Parçaların profilometre görüntüleri……..……. 60
Şekil 4.13. Değişken güç parametrelerine göre SEM analiz görüntüleri …… 60
Şekil 4.14. Lazer tarama çizgilerinin görünümü ……..…… 61
Şekil 4.15. Değişken güç parametrelerine göre SEM analiz kesit görüntüleri ……..… 61
Şekil 4.16. EDX analizi…….…… 62
Şekil 4.17. Tarama stratejisi……..……..…64

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Katmanlı üretim teknikleri……..…….17
Tablo 3.1. Literatür kaynaklarından elde edilen SLS sistemlerinde kullanılan tozlar ve özellikleri ……..... 40
Tablo 3.2. Literatür kaynaklarında kullanılan lazer ve parametre değerleri…..……...41
Tablo 4.1. Parça üretiminde kullanılan parametreler……..……...56
Tablo 4.2. Parça üretiminde güç değişimine bağlı kullanılan parametreler……. 57

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A : Lazer spot alanı, (cm^2)
c : Işık hızı, (m/s)
E : Lazer enerjisi, (Joule)
F : Lazer akısı, (J/cm^2)
μ : Lazer frekansı, (Hz)
h : Planck sabiti, (J.s)
I : Lazer enerji yoğunluğu, (J/cm^2)
l : Yapıştırma örtüşme uzunluğu, (mm)
P : Lazer ortalama gücü, (Watt)
Ra : Yüzey Pürüzlülüğü, (um)
V : Lazer tarama hızı, (mm/s)
t : Birim zaman, (sn)
ta : Yapıştırıcı kalınlığı, (um)
ts : Alt katman kalınlığı, (mm)
w : Bağlantı genişliği, (mm)
ω_0 : Lazer odak noktasının yarıçapı, (um)
τ_y : Yapıştırıcının akma kesme mukavemeti,(mPa)
τ_r : Yapıştırıcının kesme dayanımı, (mPa)
σ_y : Yapıştırıcının akma gerilimi, (mPa)
λ : Lazer dalga boyu, (m)
k_B : Boltzman sabiti
T : Sıcaklık
c : Işık Hızı
u(v) : Karacisim ışıma enerji yoğunluğu
I(v) : Birim frekans başına lazer şiddeti
L : Kalınlık
A : Tesir kesiti
I_0 : Soğurulan lazer şiddeti
g(v) : Kazanç katsayısı
z : Ortam uzunluğu
m : Metre
$\sigma_{ul}(v)$: Uyarılmış ışıma tesir kesiti
d_a : Silindirik bir lazer kazanç ortamının yarıçapı
l_g : Kazanç ortamının başlangıç uzunluğu
B : Işık kaynağı parlaklığı
P : Lazer gücü
u(v) : Karacisim ışıma enerji yoğunluğu
I(v) : Birim frekans başına lazer şiddeti
L : Kalınlık
A : Tesir kesiti
I_0 : Soğurulan lazer şiddeti
z : Ortam uzunluğu
m : Metre

$\sigma_{ul}(\nu)$	: Uyarılmış ışıma tesir kesiti
d_a	: Silindirik bir lazer kazanç ortamının yarıçapı
l_g	: Kazanç ortamının başlangıç uzunluğu
B	: Işık kaynağı parlaklığı
P	: Lazer gücü
D	: Dairesel demet kesit çapı
Θ	: Sapma açısı
Te	: Malzeme erime sıcaklığı
Ty	: Malzeme yüzey sıcaklığı
ms	: Milisaniye
µs	: Mikrosaniye
cm	: Santimetre
GHz	: Gigahertz (10^{-9}Hz)
nm	: Nanometre
ps	: Pikosaniye
W	: Watt
J	: Juole
E	: Atım Enerjisi
t_a	: Atım Süresi
k	: Isısal İletkenlik Katsayısı
α	: Soğurma Katsayısı
κ	: Isısal Yayılım Katsayısı
t_k	: Isısal Zaman Sabiti
w	: Gausyen Demet Yarıçapı
t_e	: Malzemenin erimesi için gereken süre
ρ	: Madde yoğunluğu
L_f	: Gizli füzyon sıcaklığı
z_h	: Kaynak havuzu derinliği
T_b	: Buharlaşma sıcaklığı
n	: Kırılma indisi
δ	: Malzemede enerjinin depo edildiği derinlik
λ	: Dalgaboyu
$D_ı$	: Malzeme içinde ısının etki ettiği dikey mesafe
t_B	: Malzemenin buharlaşma sıcaklığına ulaşma zamanı
F	: Soğurulan ışıma
A_s	: Lazer spot alanı
D_{delik}	: Lazer ile kaynak işlemi sırasında buharlaşan metal nedeni ile oluşan deliğin derinliği
V	: Kaynak hızı
L_s	: Hareket sırasında malzeme yüzeyine çarpan spotun uzunluğu
f	: Lazer atım frekansı
PER	: Lazer spotlarının üst üste binme oranı
I_{doy}	: Doyma şiddeti

Kısaltmalar

CW	: Contionus Wave (Sürekli mod lazer)
LATARUM	: Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezi
Nd:YAG	: Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet
PW	: Pulsed Wave (Atımlı mod lazer)

METAL TOZLARININ LAZER İLE BİRLEŞTİRİLEREK KATMANLI PARÇA ÜRETİMİ

ÖZET

Üretim yöntemlerinin Endüstri 4.0'a hazırlandığı günümüzde otomasyon teknolojilerinde de önemli gelişmelerin olduğu gözlenmektedir. Bunlarda en önemlilerinden biride üzerinde yoğun proje çalışmalarının gerçekleştirildiği 3D yazıcılardır. 3D yazıcılar (katmanlı imalat) birçok alanda hızlı bir şekilde hayatımıza girmiştir. Katmanlı imalat (Additive Manufacturing) yöntemleri yapılan tasarımlara üretim sınırlaması getirmeden ve tüm malzeme türleri ile çalışma imkânı sağlayan, talaşlı imalat yöntemlerine göre büyük avantaj sağlayan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Katmanlı imalata yönelik birçok uygulama bulunmakla birlikte, bu uygulamalar, yöntemine ve malzemelerine göre sınıflandırılmaktadır. Bu sistemlerde; toz içerisinde tasarımın bir kesiti lazer ile eritilir ve üzerine yeni bir katman toz ilave edilerek sıradaki katman eritilerek eklenir. Katmanlı imalat yöntemleri, geleneksel yöntemler ile oldukça zor imal edilebilecek geometrileri işleme imkânı tanımaktadır. Bilgisayar ortamında modellenen hemen her türlü şekil, katmanlar halinde dökülerek/işlenerek üretilebilmektedir. Özellikle görülen yüzeylerin altında havalandırma/soğutma kanalları, destek yapıları gibi ancak özel döküm veya çok hassas metal kaldırma işlemleri gerektiren yapılar, katmanlar halinde dökülebilmektedir. Katmanlı imalat teknolojileri, klasik imalat yöntemlerine göre çok fazla kısıt içermemesi, özellikle prototip uygulamalarda çok hızlı çözüm sağlaması gibi birçok avantaja sahiptir.

Bu çalışmada 50W fiber lazerin dahil edildiği Kobalt-Krom alaşımı metal tozları ile katmanlı imalat yapılabilecek sistemin tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada sisteme dahil edilen lazerin ve sistem parametrelerinin katmanlı üretim yöntemi üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Yapılan bu tez çalışmasında birçok endüstri alanında kullanılabilecek katmanlı üretim tekniğinin düşük güçlü fiber lazerler ile yapılabileceği ve yüksek güçlü lazerin ürettiği malzeme standardında malzeme üretilebileceği incelenmiştir.

Yapılan bu tez çalışmasında birçok endüstri alanında kullanılabilecek katmanlı üretim tekniğinin düşük güçlü fiber lazerler ile yapılabileceği ve yüksek güçlü lazerin ürettiği malzeme standardında malzeme üretilebileceği incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: 3D Metal Yazıcı, Katmanlı Üretim, Katmanlı İmalat Tekniği.

LAYERED MANUFACTURİNG OF PARTS BY COMBİNİNG METAL POWDERS WİTH

ABSTRACT

With the Industry 4.0, technological innovations have been introduced in the manufacturing processes in industry. Many of the printers have been entered into our lives in a lot of areas. The application application aimed at layered manufacturing is listed here, according to the method and materials thereof. In these systems; a section of the design in the powder is melted with laser and a new layer above. The layered manufacturing types recognize the technology of processing geometries that can be produced with traditional enterprises rather difficult. Almost all kinds of shapes modeled in computer environment, can be produced by pouring / processing in layers. It can be poured into layers in areas where sensitive metals are present, such as support structures, but in areas where special metals are present. Layered manufacturing technologies have the advantage of not having too many constraints according to classical manufacturing methods and providing very fast solutions in prototype applications.

In this study, 50W fiber laser is incorporated with different types of metal powders (Nickel, Cobalt) with a system for layered manufacturing. In addition, 200W CO2 laser with Al2O3 and polymer powders were produced by the machine which is designed and designed.

In this thesis, it has been investigated that the multilayered production technique can be used with low power fiber lasers which can be used in many industrial fields and it is possible to produce material standard material produced by high power laser.

Keywords: 3D Metal Printer, Layered Manufacturing, Manufacturing Method.

GİRİŞ

Teknolojide yaşanan gelişmeler ile 4. Sanayi devriminin savunma, havacılık ve uzay, sağlık, imalat sanayi endüstrisine entegre olmasıyla imalat yöntemlerinde de değişikliğe gidilmiştir. Makine üzerinde kullanılacak mekanik parça tasarım ve imalatı, malzeme özellikleri, çalışma şartları gibi değişkenler göz önünde bulundurulduğunda geleneksel imalat üretim yöntemlerinin çeşitli avantaj ve dezavantajları ortaya çıkmaktadır. Üretim süreçlerinin birleştirilerek imalat teknolojilerinin geliştirilmesi ihtiyacı doğmaktadır. Geleneksel ve eklemeli imalat yöntemlerinin bir arada kullanıldığı hibrit imalat yöntem ve teknikleri yaygınlaşmaya başlamıştır. Endüstri kollarında farklı özelliklere sahip malzemeler kullanılmaktadır. Farklı tür ve özellikte malzemeler ile başta havacılık-uzay, savunma endüstrisinde titanyum malzemeler üzerinde çalışılırken üretim sanayinde paslanmaz çelik ve kalıp çeliği üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Araştırma geliştirme çalışmalarında farklı malzemeler ile protatipleme yapma yeteneği önemli bir çalışma alanıdır. Bu gelişmeler ile birlikte üretilecek parçanın kullanım alanına uygun olarak sertlik, hafiflik, mukavemet gibi özellikleri öne çıkarmak için imalat tekniklerinin avantajları göz önüne alınmaktadır. Klasik imalat yöntemlerinde protatipleme ve daha sonrasında imalata geçme aşaması çok uzun süre almaktadır. Yeni teknoloji ile birlikte lazer sitemlerininde sanayide aktif kullanılmaya başlaması sonucunda son yıllarda ortaya çıkan katmanalı üretim imalat tekniği yardımıyla karmaşık ve zor geometrilere sahip parçaların üretimine yönelik önemli bir adım atılmıştır. Bu teknoloji ile klasik imalat teknikleri ile üretimi zor olana parçalar katmanlı üretim teknolojisi ile çok kısa sürede üretilmektedir. Protatipleme ve üretim aşamasında geçilmede zaman kazandırarak lazer sistemleri ile yapılabilecek yeni bir üretim tekniği ortaya çıkmıştır.

Bölüm 2'de Katmanlı üretim tekniklerinden olan ve tez çalışmasında faydalandığımz Selective Laser Sintering tekniği hakkında litaratür ve çalışma prensibi hakkında temel bilgiler verilecektir. Lazer malzeme etkileşimi sırasında oluşan teknik bilgiler, parameter belirleme ve lazer özeliklerinin parameter üzerindeki etkisi üzerine açıklamalar yer almaktadır.

Bölüm 3'de Malzeme ve metod olarak yapılan sistemin mekanik, elektronik ve yazılımsal özellikleri açıklanarak sanayi üretimine uygun olarak otomasyon yöntemi ile çalışma düzeni hakkında bilgi verilecektir. Metal tozlarının özellikleri ile sistem parametrelerinin oloşturulması üzerine bilgiler yer almaktadır.

Bölüm 4'te Deneysel çalışma sonucunda üretilen malzeminin test sonuçları yar almaktadır. Malzemenin makro ve mikro yapısal özellikleri incelenecektir. Üretilen parçanın dayanımı, yüzey özellikleri ile literature değerleri arasında ilişki kurulacaktır. Kullanılan lazerin gücü ile malzme dayanımı arasında ilişki ve çalışmanın özgünlüğünü belirten ısıtıcı yatağının lazer malzeme etkileşimine katkısı incelenecek ve malzeme yüzeyine testleri ile deforme olma parametreleri yer almaktadır. Elde edilen bilgiler ile değerlendirmeler yapılarak ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Bölüm 5'de bu tezde yapılan çalışmaların sonuçları özetlenerek, gelecekte yapılması olası çalışmalara değinilmiştir.

1. KATMANLI ÜRETİM TEKNİKLERİ

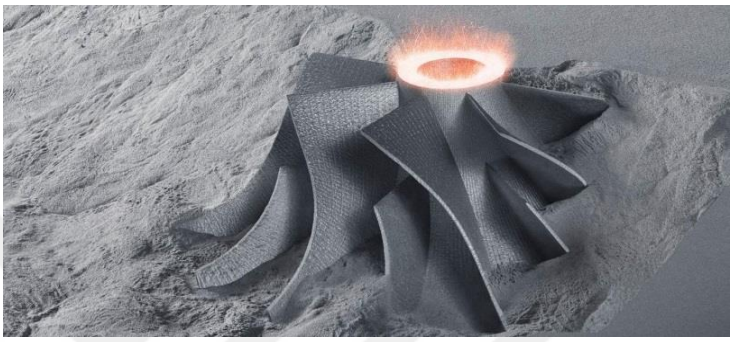
Katmanlı üretim tekniği ingilizce adıyla ‘’Addative Manufacturing’’(AM) günümüzde 3D teknolojisinin imalat sanayine entegre edilmesiyle üretimde kolaylık sağlayan bir teknik olarak karşımıza çıkmaktadır. Hızlı protatipleme yeteneği ile araştırma, geliştirme ve üretim alanlarında kolaylık sağlamaktadır. Katmanlı üretim tekniği ile sıvı, toz malzemeler bileştirile bilmektedir.

Bu bölümde; Katmanlı üretim tekniği hakkında çalışma prensibi, avantajları verilecektir. Kullanılan imalat teknikleri ile üretim zorluğundan ve katmanlı üretim tekniğinin sağladığı yararları yer almaktadır. Katmanlı üretim tekniğinin içerisinde yer alan farklı üretim metodları ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

1.1. Giriş

Katmanlı üretim sistemleri temel olarak 3 ana bileşenden oluşmaktadır [1]. İlk aşamada üretilecek parçanın tasarımının gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Klasik imalat yöntemlerinde tasarlanan her bir parçanın üretime uygunluğuna dikkat edilmesi gerekmektedir. Talaşlı imalat alanında tasarımı karmaşık olan geometrik tasarımın işlenmesi zordur. Katmanlı üretim teknolojisinin sağlandığı en önemli avantaj karmaşık, zor olan geometrik tasarımların üretimine olanak sağlamasıdır. Bu sayede tasarlanan parçanın isteğe uygun olarak üretimi gerçekleştirilmektedir. İkinci aşamada tasarımın uygun dijital dosya türünde kayıt edilmesi gerekmektedir. Günümüzde kullanılan 3D yazıcı gruplarında *stl dosya tipi tercih edilmektedir. Kullanılan yazılım ve program aracılığı doysa formatı açılarak sistem tasarlanan parçayı katmanlara ayırmaktadır. Katmanlara ayrılan her bir parça kullanıcının isteğine ve cihazın üretim çözünürlüğüne bağlı olarak kalınlıklar belirlenmektedir. Üçüncü aşamada katmanlara ayrılmış, tasarlanan parça üretime hazır hale getirilerek cihaz tarafından üretilmeye başlanır.

Klasik imalat tekniğinde takım maliyetleri, imalat süresi ve yeni ürün veya mevcut ürün üzerinde yapılan revize işlemleri ile kayıp zaman gider olarak görülmektedir. Katmanlı üretim teknolojisi kullanılmaya başlandığı ilk zamanlarda hızlı protatipleme avantajından faydalanılmıştır. Günümüzde bu teknoloji Şekil 1.1' de görüldüğü gibi başta savunma, havacılık-uzay sanayi olmak üzere seri üretim ve anlık yedek parça imalatı işlemleri ile klasik imalat yöntemlerini yerini almıştır.



Şekil 1.1. Katmanlı üretim tekniği ile üretilmiş parça [2]

Katmanlı üretim teknolojisinin yaygınlaşması ile sağlık sektörü tarafından da büyük ilgi görmeye başlamıştır. Bu sayede öncelikli olarak Şekil 1.2.'de görüldüğü gibi hızlı protez üretimi ve polimer bazlı organ üretimi üzerinde çalışmalar devam etmektedir [3].



Şekil 1.2. Katmanlı üretim tekniği ile sağlık alanında üretilmiş protez bacak [3]

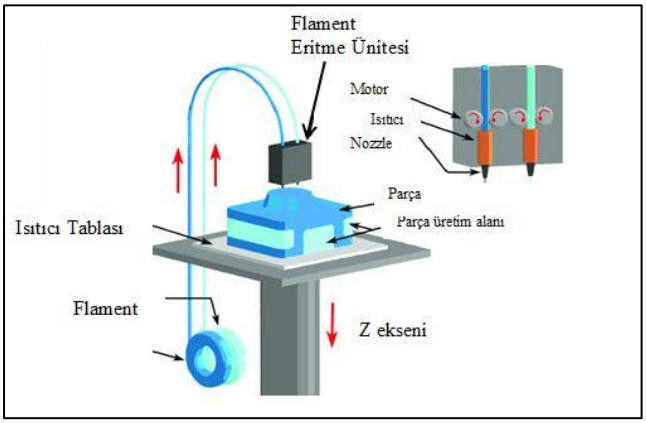
1.1.1. Katmanlı Üretim Tekniğinin Çeşitleri

Katmanlı üretim tekniği (Addative manufacture/AM) kendi içerisinde malzeme türüne ve yapıştırma tekniği gibi özellikler açısından farklılık göstermektir. Bu teknikler aralarında avantaj ve dezavantaja sahiptir.Bu özellikler açısından kullanım alanine göre tercih edilmektedir[4].Bunlar;

- ❖ Fused Deposition Modelling (FDM)
- ❖ Stereolithograph(SLA)
- ❖ Selective Laser Sintering (SLS)
- ❖ Material Jetting
- ❖ Binder Jetting
- ❖ Electron Beam Melting

1.1.2. Fused Deposition Modelling (FDM)

Fused Deposition Modelling (FDM) tekniği 3D yazıcıların kullanılmasıyla birlikte hızlı protatiplemenin ve üretime geçilmeden önceki ilk adımı oluşturan tek kullanılmaya başlandı. FDM tekniğinin süreci 3 aşamada oluşmaktadır [5]. İlk aşamada oluşturulacak model birçok CAD paket programlarında tasarlanmakta ve tasarlanan model *Stl dosya formatında kayıt edilmektedir. İkinci aşamada kayıt edilen dosya FDM tekniği için tasarlanmış paket programa aktarılır. Yazılım içerisinde tasarlanan model slice/dilimlere ayrılmaktadır. Son aşamada sistem tarafından tasarlanan model üretilmektedir. Şekil 1.3'de sistem şemasında görülmektedir.



Şekil 1.3. FDM sistem çalışma görüntüsü [6]

FDM tekniğinde flament adı verilen polimer bazlı malzemeler tercih edilmektedir. Bu malzeme üretilen parçanın ham maddesini oluşturmaktadır. Piyasada farklı renk ve kalınlıklarda ticari olarak satılmak ile birlikte üretilecek protatip parçanın kullanılacağı yere ve kullanıcıya bağlı olarak değişmektedir. Flament malzeme sistemin üst kısmında yer alan içerisinde ısıtıcı rezistans bulunan ısıtıcı ünitesine motorlar aracılığı ile çekilir [5]. Isıtıcı içerisine giren flament kullanılan malzeme cinsine bağlı olarak daha önceden ayarlanmış ısıtıcı içerisinde eritilerek akışkan hale getirilir. Akışkan hale gelmiş olan malzeme yazılım tarafından kontrol edilen üzerinden bulunan ısıtıcı tabla üzerine gönderilir. Isıtıcı tablanın amacı akışkan halde bulunan malzemenin hemen soğumasını engelleyerek çatlama ve bükülme gibi malzemede oluşabilecek stresi engellemektir. Isıtıcı tablanın bağlı olduğu hareket eksenleri ile hareket sağlanarak akışkan fazda bulunan malzeme tasarlanmış modeli adım adım ve katmanlar halinde ortaya çıkarmaktadır [5].

FDM sisteminde kullanım kolaylığı, sarf malzemelerinin ucuz olması ve hızlı protatipleme sistemin avantajları arasındadır. Bu avantajları nedeniyle kullanımı yaygın olarak devam etmektedir[7]. FDM tekniği kullanılan malzeme açısından ve üretilen malzemenin kullanım alanın bağlı olarak dayanımı düşük ve katmanlar arası çözünürlüğü az ürünler üretilmektedir [5].

FDM tekniğinin kullanılmasının yaygınlaşması ile birlikte ticari firmaların bu sistemi cihaz haline getirerek kullanımı kolay ve her sektöre uygun olacak şekilde satmaya başlanmıştır. Şekil 1.4'de ticari olarak satılmakta olan FDM cihazı ve üretilen ürün görselleri sunulmuştur.

1.1.3. Stereolithograph(SLA)

Stereolithograph (SLA) katmanlı üretim tekniğinde 1970 yılında Japon araştırmacıların geliştirmiş oldukları bir tekniktir [9]. SLA teknolojisinde; sıvı halde bulunan reçineyi sertleştirilmiş plastik malzeme formuna dönüştürmek için ultraviolet (UV) lazer veya UV dalga boyunda projector ışık kaynaklarından yararlanılmaktadır. Plastik malzemeler uzun karbon zincirlerinden oluşmaktadır[10].

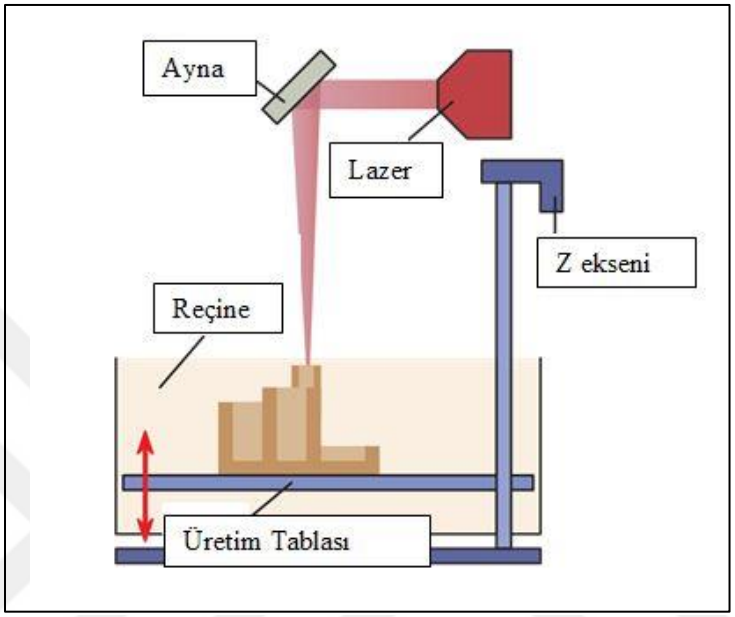


Şekil 1.4. Ticari olarak satılmakta olan FDM makineleri [8]

Karbon zincir ne kadar kısa olursa malzmeme yapısı akışkan ve katı forma henüz geçmemiş durumda olurlar [9]. Reçine malzemesi SLA katmanlı üretim tekniğinin ana malzemesidir. Reçine bir karbon ile binlerce karbon arasında kısa karbon zincirlerinden oluşan akışkan plastic malzemedir. Reçine UV ışık ortamına bırakıldığında karbon zincirleri birleşerek daha uzun karbon zincirleri oluşturarak sert plastik oluşmaktadır. Zincirler uzadıkça ve çapraz bağlantılar oluşturdukça reçine katılaşmaya başlar. Sıvıdan son derece polimerize katı hallere kadar olan tüm işlem, bir milisaniye süresinde gerçekleşir [11]. Reçine ile UV ışığın etkileşime girmesi fotopolimerizasyon işlemi adını alır. Fotopolimerizasyon reaksiyonu sonucu nihai ürün ortaya çıkmamaktadır. Kürleme işlemi ile ürünün mekanik ve termal özellikleri sabit hale getirilmektedir [11].

SLA teknolojisi diğer katmanlı üretim tekniğinde olduğu gibi tasarım yapılması, tasarlanan CAD dosyasının *Stl dosya formatında cihaza aktarılması, modelin üretilmesi ve kürleme işlemlerinden oluşmaktadır. Üretim aşamasında UV lazer ışını bir polimerizasyon işlemini aktive eder ve reçine, üç boyutlu nesnenin katı bir tabakasını oluşturarak sertleşir[10]. Bir tabakayı bitirdikten sonra platform z ekseni doğrultusunda hareket ederek diğer katman üzerine sıvı reçine tabakası yayılır[12]. Reçine çok viskoz olduğu için bir bıçak sıvı reçinenin yüzeyinden geçer ve katı

tabaka ile bıçak arasında bir boşluk bırakır. Tarayıcı, yeni katmanı önceden yapılmış katmana bağlayan yeni bir katmanın katılaştırmaya başlar [10]. Üretim tamamlandıktan sonra kürleme işlemi ile nihai ürün ortaya çıkmaktadır. Şekil 1.5' de SLA sistem şeması yer verilmektedir.



Şekil 1.5. SLA tekniği ile model üretim şeması [12]

SLA tekniğinin en önemli avantajı tıp alanında insan vücuduna uyumlu olacak kalıp, protez ve organ üretme imkanı sağlamasıdır [12]. Bu avantajı sayesinde tıp alanında yoğun bir şekilde tercih edilmektedir. Sanayi alanında ise reçine malzemesinin kürleme sonrasından mekanik ve termal özellikleri stabil olan plastik malzemeler üretmesine rağmen üretilen ürünlerin kullanım alanına göre dayanıklılık özellikleri uygun değildir.[13] SLA yöntemi ile üretilen parçaların dayanımlarını arttırmak adına üretimde kullanılan termoplastik ve termoset malzemeler üzerinde çalışmalar devam etmektedir [9]. Şekil 1.6'da ticari olarak satılmakta olan SLA cihazları görülmektedir.

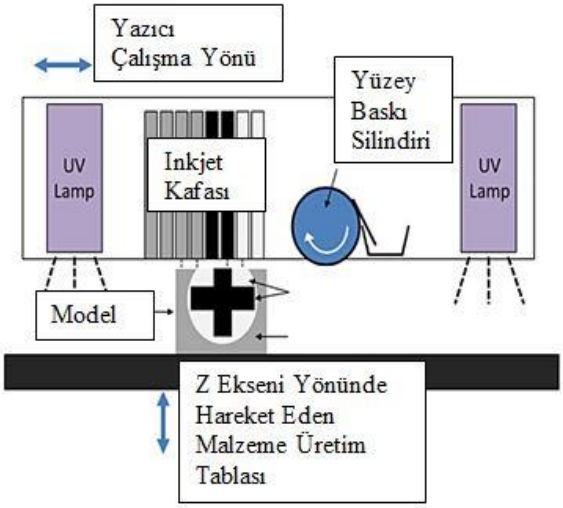


Şekil 1.6. Ticari olarak satılmakta olan SLA makinesi [14]

1.1.4. Material Jetting

Material Jetting katmanlı üretim teknikleri arasında yer alan fotopolimerlerin katmanlı üretimi yöntemidir [15]. Bu teknikte polimer bazlı malzemeler ınkjet baskı kafası yardımıyla oluşturulur. Material Jetting Malzeme püskürtmeli sistemler, özellikle de inkjet tabanlı 3D yazıcılar, nokta (Dod) baskı yöntemini kullanarak çok malzemeli ürünler basma kabiliyetleri nedeniyle son yıllarda popüler hale gelmektedir.[16]

Material Jetting yüksek hassasiyetli ve sıfır malzeme atıklarıyla belirli bir yerde farklı malzemeleri biriktirebilen en yaygın jet bazlı tekniktir. Bu teknikte, düşük viskoziteli mürekkep materyali, ilave çözücüler kullanılmadan basılır ve daha sonra nihai ürünün oluşturulması için katılaştırılır.[17]. Malzeme özellikleri açısından yüksek kürleme hızına sahip foto-sertleştirilebilir malzemeler 3D mürekkep püskürtmeli baskı amacıyla en uygun olanlardır. Foto polimer bazlı malzemelerin katılaştırılması veya kürlemesi için UV ışık kaynağı tercih edilmektedir [19].

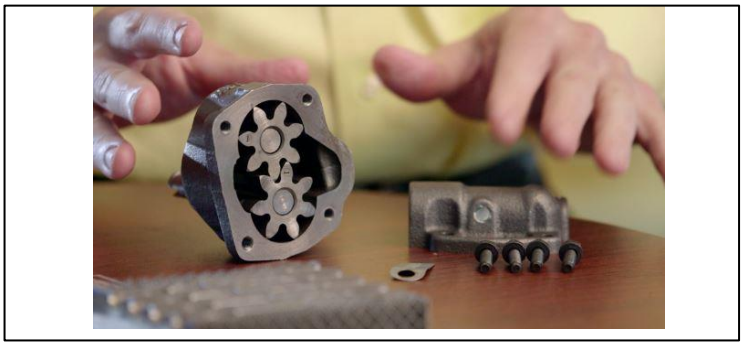


Şekil 1.7. Material Jetting tekniği model üretim şeması [18]

Material Jetting tekniği ile hassas katmanlı üretim yapılmaya imkân vermektedir. Aynı zamanda oluşturam model üzerinde ki keskin hat kenarları diğer tekniklere göre avantaj sağlamaktadır [17]. Material Jetting tekniğinde kullanılan polimer malzemelerin vizkozitesi ve erime sıcaklığı düşük olduğu için malzeme dayanıklılığı düşüktür [16].



Şekil 1.8. Ticari olarak satılmakta olan Material Jetting yazıcı ve üretilen numuneler [19]



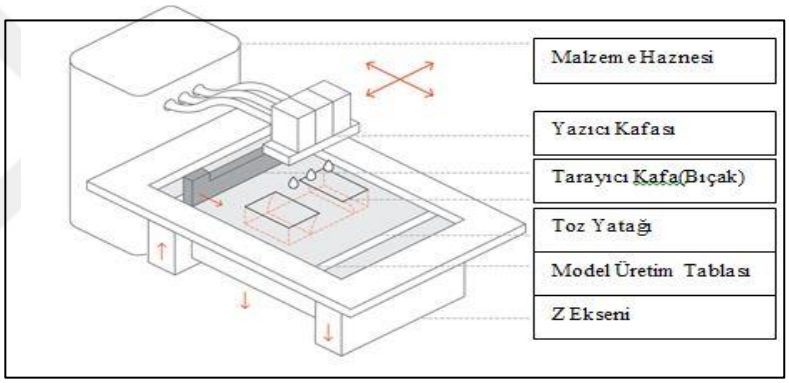
Şekil 1.8. (Devamı) Ticari olarak satılmakta olan Material Jetting yazıcı ve üretilen numuneler [19]

1.1.5. Binder Jetting

Katmanlı üretim tekniği ailesinden olan üretim tekniğidir. Binder Jetting üretim tekniğinde ilave bağlayıcı bir madde olan polimer yapıştırıcı ile modeller oluşturulan üretim yöntemidir[20].Üretim esnasından oluşturulan modelin katmanları arasında sıvı bağlayıcı madde kullanılmaktadır. Bu bağlayıcı malzeme kürleme işlemi sonrası veya ısıtıcı yardımı ile katmanları oluşturmaktadır. Binder Jetting üretim tekniğinde yaygın olarak toz metal, kum ve seramik esaslı malzemeler tercih edilmektedir [20]. Tüm katmanlı üretim tekniklerinde olduğu üzere üretim süreçlerinden oluşan üretim tekniğidir. Binder Jetting model tasarımı üretim aşamasının ilk kısmıdır. Oluşturulan tasarım *stl dosya formatında cihaza aktarılır ve yazılım ile tasarlanan model dilimlere ayrılır. Mazleme seçimi yapılarak sistem tasarlanan modeli üretmektedir. Her katman arasına bağlayıcı madde yazıcı kafası tarafından toz katman üzerine bırakılır. İşlem model tamamlanıncaya kadar devam etmektedir [21]. Proses renkli baskıya izin verir metal, polimer ve seramik malzemeler kullanır. İşlem genellikle diğerlerinden daha hızlıdır ve malzemeyi bırakan baskı kafası deliklerinin sayısını artırarak daha da hızlandırılabilir [22].

Binder Jetting, inşa işlemi sırasında ısıl işlem kullanılmadığı için diğer üretim tekniklerine göre avantaj sağlamaktadır. Bu avantaj üretim sırasında malzeme üzerinde çarpılma, gerilme stressi oluşumunu engellemektedir. Bu üretim tekniğinde parçalar modelin üretildiği çalışma alanında gevşek tozla desteklenir, böylece bir yapı plakasına duyulan gereksinim ortadan kalkar. Binder Jetting, büyük parçaları basma yeteneğine sahiptir ve diğer katkı maddesi üretim yöntemlerinden çok daha

düşük maliyetlidir [20]. Günümüzde bu üretim tekniği düküm sanayinde kumlu kalıp üretiminde kullanılmaktadır. Binder Jetting üretim yönteminin sağladığı avantajları yanı sıra bağlayıcı malzemeninin çevre koşullarına bağlı olarak gerilme ve bağlayıcı kuvvetinin düşük olması üretilen modellerde bozulmaya neden olmaktadır [22]. Üretim tekniği büyük kum döküm kalıplarının üretimi, Binder Jetting 'in en yaygın kullanım alanlarından biridir. Kalıplar genellikle kum veya silika ile basılır.Baskıdan sonra, kalıplar genellikle döküm için hemen hazırdır. Döküm metal bileşeni genellikle kalıp kırılarak dökümden sonra çıkarılır.Bu kalıplar yalnızca bir kez kullanılmasına rağmen, geleneksel üretime kıyasla zaman,maliyet tasarrufu önemlidir ve bu kullanım alanlarında avantaj sağladığı görülmektedir [22]. Şekil 1.9 Binder Jetting üretim yönteminin çalışma şeması ve Şekil 1.10 da satışı yapılan Binder Jetting makine sistem görüntüleri sunulmaktadır.



Şekil 1.9. Binder Jetting tekniği model üretim şeması [20]

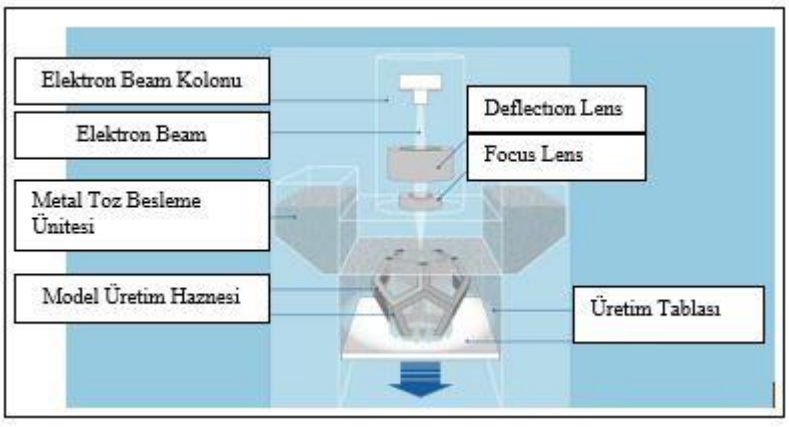


Şekil 1.10. Ticari olarak satılmakta olan Binder Jetting yazıcı [23]

1.1.6. Electron Beam Melting (EBM)

Elektron ışını eritme (EBM), metal tozu veya filamentin konsantre bir elektron ışını ile tamamen eritildiği, yenilikçi katmanlı üretim tekniği yöntemidir. Elektron Işını eritme (EBM), yazıcının toz yatağında bulunan tozun işlenmesi mantığı ile çalışmasından dolayı Selective Laser Sintering (SLS) üretim tekniğine benzemektedir [24].

Elektron ışını erime (EBM) lazer ışını yerine elektron ışını kullanır. Elektron ışını tabancasında bir tungsten filament vakum altında ışık hızının yaklaşık yarısına kadar hızlanan elektriksel olarak yüklenen temel parçacık olan elektronları serbest bırakır. Bu parçacıklar, elektromıknatıslarla hızlandırılır ve manyetik alan, ışını istenen çapa odaklar [25]. İkinci bir manyetik alan, elektron demetini baskı yatağı üzerinde istenen noktaya yönlendirir. Bu, toz parçacıkları üzerinde ısıtma etkisi sağlar. Elektron ışınının düzgün çalışmasını sağlamak için tüm imalatlar bir vakum altında gerçekleştirilir [26]. Vakum ortamı metal tozunun ısıtma üzerine oksitlenmesini önlemede avantaja sahiptir. Elektron ışını eritme, yüksek enerjili, yüksek sıcaklıktaki bir işlemdir ve 2.000 °C kadar yüksek sıcaklıklara ulaşmaktadır. Şekil 1.11 Electron Beam Melting (EBM) tekniği model üretim şeması verilmektedir [24].



Şekil 1.11. Electron Beam Melting(EBM) model üretim şeması[27]

Elektron ışını eritme tekniğinde erime elektrik yüklerine dayanır, bu nedenle kullanılan malzemeler iletken olmalıdır. İletkenlik olmadan elektron ışını ve toz

arasında bir etkileşim meydan gelmemektedir [26]. Bir elektron ışını ile polimer veya seramik parçaların imalatı teknik olarak mümkün değildir. Titanium (Ti6Al4V), Kobalt kromu, Çelik tozları, 316L, Inconel 718 metal tozları sistem için kullanıma en uygun malzeme türleridir [25]. Elektron ışını eritme, işlenmiş parçalara benzer özelliklere sahip ve döküm parçalardan daha iyi özelliklere sahip parçalar üretir [29]. EBM parçaları genellikle DMLS (Direct metal laser sintering) parçalarından daha az destek yapısına ihtiyaç duyar Elektron demeti eritme teknolojisi, kullanıcıların gözeneklilik üzerinde hassas kontrol sahibi olmalarını sağlayarak sinterlemeyi ortadan kaldırır [30]. EBM üretim tekniği vakumlu ortamda yapıldığından üretilecek malzeme boyutunda sınırlamalar mevcuttur. Şekil 1.12 ticari olarak satılmakta olan EBM cihazı sunulmaktadır.

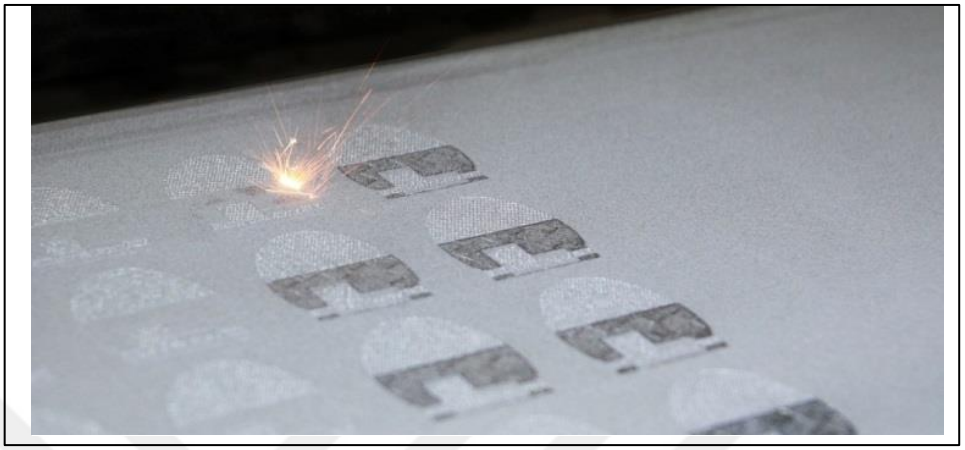


Şekil 1.12. Ticari olarak satılmakta olan EBM yazıcı [28]

1.1.7. Selective Laser Sintering (SLS)

Selective Laser Sintering (SLS) üretim tekniği1980'lerin ortalarında Austin'deki Teksas Üniversitesi'nden Dr. Carl Deckard ve Dr. Joe Beaman tarafından geliştirilen ilk katkı üretim tekniklerinden biridir [31]. Metodları o zamandan beri plastik, metal, cam, seramik ve çeşitli kompozit malzeme tozları gibi çeşitli malzemelerle çalışmak üzere uyarlanmıştır [31].

Selective Laser Sintering (SLS) toz halinde bulunan seramik, plastik ve metal tozlarının 3D modellenmesine dayalı ve mekanik dayanımı yüksek parçalar oluşturmak için lazer teknolojisinden yararlanılan katmanlı üretim tekniğidir.



Şekil 1.13 SLS katmanlı üretim tekniği ile model üretimi[32]

Katmanlı üretim tekniğinde içerisinde metotlarına göre farklı üretim teknikleri mevcuttur. Bu teknikler kullandıkları malzemelere göre kendi içerisinde avantaj ve dezavantajlara sahip olarak sınıflandırılmıştır. Tablo 1.1. özelliklerine göre üretim tekniklerinin sınıflandırıldığı tablodur.Bu sınıflandırma ile katmanlı üretim teknikleri arasında kullanılan malzeme,metod ve özellikleri ifade edilebilmektedir. Bilinen bu özellikler ile son kullanıcı üretmek istediği malzemenin kullanım alanına uygun olacak şekilde üretim tekniklerinden kendisine en uygun olanı seçebilmektedir.

Tablo 1.1. Katmanlı üretim teknikleri

	Üretim Tekniği	**Malzeme**	**Güç Kaynağı**	**Özellikler**
Katı Malzeme Beslemeli	FDM	Termoplastik	Termal Energy	*Ucuz makine ve sarf malzeme *Multi material yazma *Sınırlı parça üretimi *Zayıf ve dayanıksız yüzey

Tablo 1.1.(Devamı) Katmanlı üretim teknikleri

	Üretim Tekniği	**Malzeme**	**Güç Kaynağı**	**Özellikler**
Toz Yataklı	Selective Laser Sintering(SLS)	Polamid/Polimer	Yüksek Güçlü Lazer Işını	*Yüksek hassasiyet *Yoğun parça yapısı *Yüksek özgül mukavemet *Destek noktaları üzerinde üretim
	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Atomize Metal Toz(Paslanmaz çelik-Kobalt Krom-Titanyum-Seramik		
	Selective Laser Melting(SLM)			
	Electron Beam Melting(EBM)		Elektron Beam	
Fotopolimerisazyon	Stereolithografi (SLA)	Fotopolimer, Seramik(AZS) PZT	Ultraviyole Lazer	*Yüksek Üretim Hızı *Alan tarayarak kürleme ile üretim *Destek noktaları için yüksek malzeme sarfiyatı
Material Jetting	PolyJet/InkJet	Fotopolimer	Termal Enerji, Fotokürleme	*Çok çeşit malzeme ile yazdırma *Düşük güçlü malzeme yapısı
Binder Jetting	Binder Printer	Polimer toz(Plaster,reçine) Seramik tozu Metal Tozu	Termal Enerji	*Renkli parça üretimi *Çok çeşit malzeme seçimi

2. SLS KATMANLI ÜRETİM TEKNİĞİ

Giriş

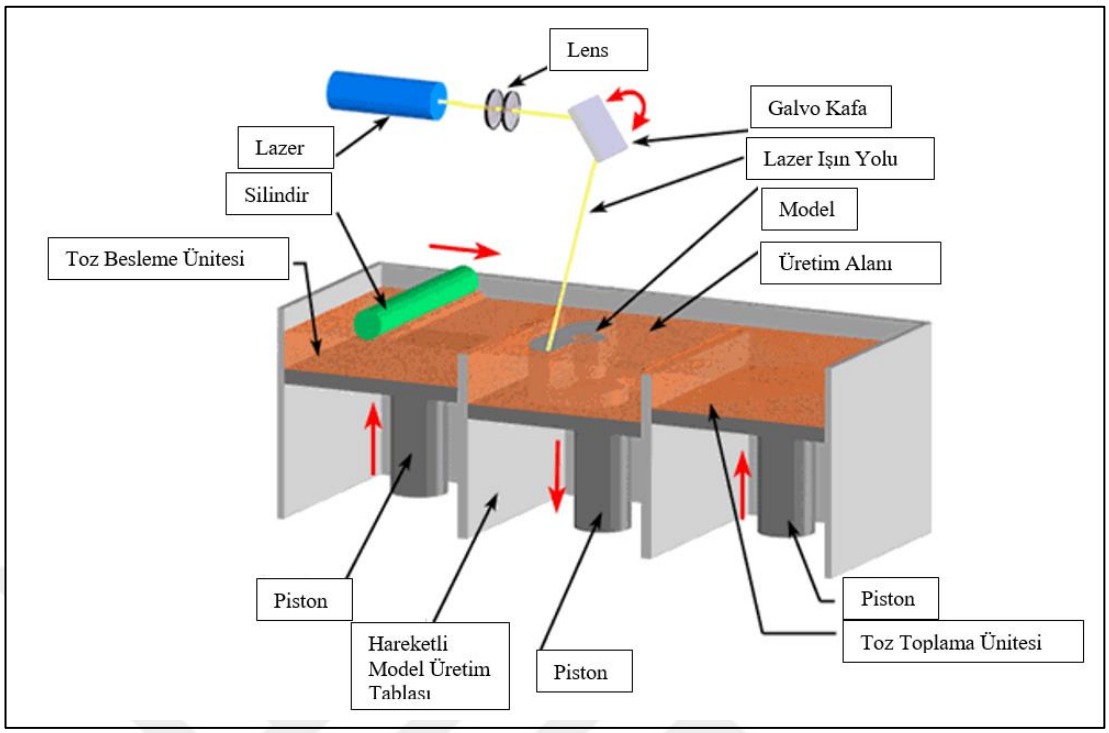
SLS katmanlı üretim alanındaki (Addative Manufacturing-AM) hızlı bir prototipleme tekniğidir. Geleneksel imalat tekniklerinden farklı olarak, AM prosesleri kaynaşık biriktirme veya SLS gibi teknikler yoluyla malzemenin eklenmesine dayanır[31].SLS üretim tekniği bir ara bağlayıcı bulunmadan veya montaj aşamasından geçmeden model üretmeye uygun yöntemdir[32]. Lazer ile toz malzeme üzerine gönderilen ışınlar (fotonlar) malzeme yüzeyinde termal etki yaratarak kullanılan malzemenin erime sıcaklığına getirerek toz partikülleri birbirine kaynaştırmaktadır[32].

Bu bölümde Selective Laser Sintering(SLS) katmanlı üretim tekniği hakkında bilgi verilecektir. Metal malzemlerin üretimine yönelik ve hızlı protatipleme işleminin süreçleri, parameter anlatılacaktır. Yöntemin diğer katmanlı üretim yönlerine göre avantajlarına ve sistemin önemli kısmını oluşturan lazer-malzeme etkileşiminden bahsedilecektir.

2.1. Selective Laser Sintering Yöntemi

SLS yöntemi kullanılan lazerin dalgaboyuna bağlı olarak belirlenen polimerik[33,34] veya metal tozlarının üst üste eritilmesi[35] ve alt katmana bağlanması suretiyle gerçekleştirilen 3D parça üretiminde kullanılan bir tekniktir. SLS sisteminin çalışma şeması Şekil 2.1'de gösterilmiştir.

Sistem üzerinde kullanılacak lazer seçimi üretimi yapılacak model veya parçanın hangi tür malzemeden yapıldığına bağlı olarak değişmektedir. SLS sisteminde lazerden çıkan ışının toz yatağı yüzeyinde aynalar yardımı ile hareketini ve kontrolünü sağlayan galvo ayna / galvo kafa yer almaktadır. Kullanıcaya bağlı olarak F-theta lensin odak mesafesi (f) değişiklik göstermektedir.



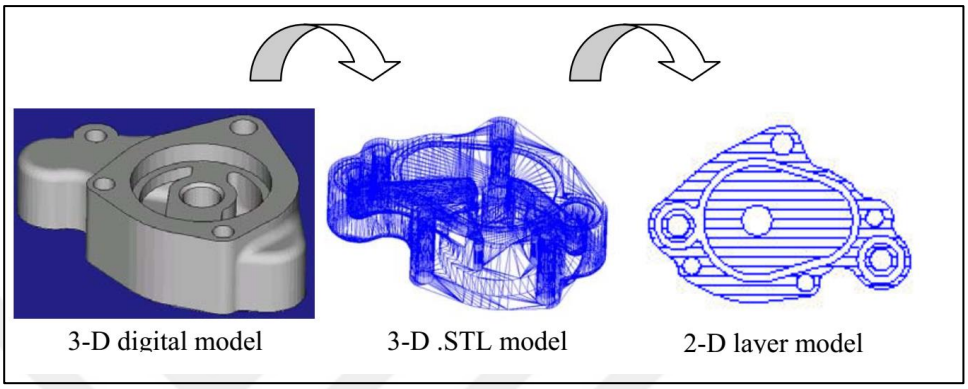
Şekil 2.1. SLS sisteminin çalışma şeması [36]

Üretim tekniğinde katman kalınlığı 20 µm ile 150 µm arasında değişmektedir. Katman kalınlığı miktarı lazer gücüne, toz malzeme tanecik boyutuna ve üretilecek malzemenin kullanım alanına bağlıdır[37]. Katman kalınlığı düşük olması üretilecek parçanın mikro yapısındaki boşlukların azalması, mikro çatlak oluşumunun önlenmesi ve katmanlar arasındaki kaynaşmanın yüksek olmasından dolayı lazer tarafından erimemiş toz malzeme kalmasının önüne geçilerek parçanın çözünürlüğü artmış olacaktır[38]. SLS üretim tekniği termal etkilerin yoğun olduğu bir üretim tekniği olduğu için model kalın üretim tabla üzerinde üretilmelidir[39]. Üretim esnasından termal gerilmeleri azaltmak, parça üzerinden eğrilme, kırılma, bükülme gibi malzeme streslerinin önüne geçilmek için tabla ön ısıtmalı olarak dizayn edilmelidir[37]. SLS üretim kalitesini ve parça dayanımını etkileyen lazer malzeme etkileşim sırasında karşılaşılan önemli konulardan olan oksidasyondur [40]. Lazerin toz malzemeyi eritme sırasında atmosfer ve oda koşullarında bulunan oksijen miktarı malzemede oksitlenmeye neden olmaktadır[41]. Bu oluşum malzemelerin birbirlerine yapışmasını veya yapışan malzemelerin kısa sürede birbirlerinden ayrılmasına neden olarak malzeme dayanımı azaltmaktadır[42]. Üretim sırasında kullanılacak atmosfer koruyucu gazlardan azot veya argon gazı ile oksidasyon

önlenmelidir.

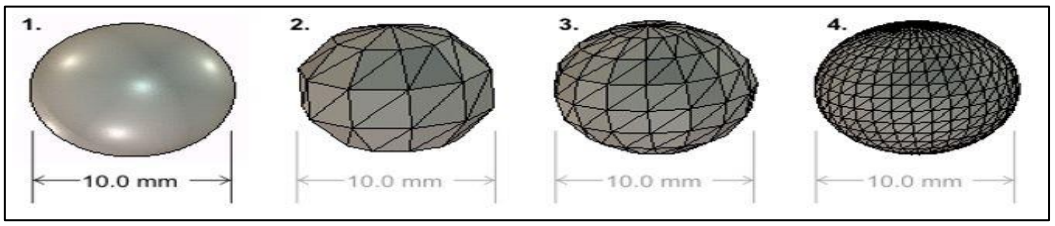
Selective Laser Sintering katmanlı üretim tekniğinde de diğer yöntemlerde olduğu gibi üretim aşamaları mevcuttur. Bu aşamaları sıralıyacak olursak;

-Üretimi gerçekleşecek olan parçanın 3D tasarımı uygun Cad programları ile yapılmalıdır.



Şekil 2.2 Cad programında parça tasarımı [43]

-Cad programında tasarımı gerçekleştirilen parça *stl dosya formatında kayıt edilmelidir.



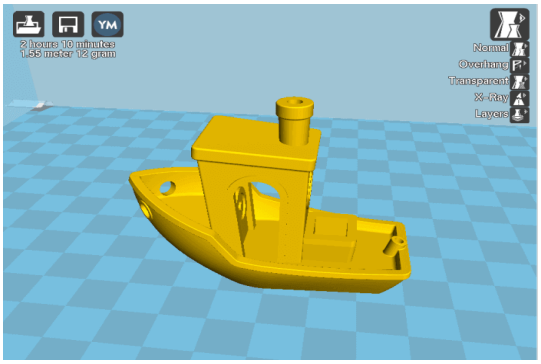
Şekil 2.3 Tasarımı gerçeleştirilen tasarımın stl dosya formatona dönüşümü [44]

-Uygun dosya formatında kayıt edilen dosya SLS tekniğinin çalışmasına uygun yazılıma aktarılmalıdır.

-Yazılım tasarlanan modeli ‘slice’ dilimlere ayırarak katmanlar belirlenir.

-SLS cihazının toz besleme ünitesine uygun toz konulmalıdır.

-Sistem her toz katmanı lazer ile birleştirerek z ekseninde aşağı inerek bir üst katman oluşturmaya devam etmektedir.



Şekil 2.4 Modelin dilimlere ayrılması[45]

SLS katmanlı üretim tekniğinde lazerden gönderilen ışının toz partiküllerin ışını emerek ısınması sonucu eriyerek birbirlerine ve bir alt katmana bağlanarak yapı oluşturmakta ve bu sıralama model parça oluşturulana kadar devam etmektedir.

Selective Laser Sintering Alt Modülleri;

1- Kullanılan Lazerler;

Selective Laser Sintering üretim tekniğinde 2 tip lazer kullanılmaktadır.

*Fiber Lazerler

*CO_2 Lazerler

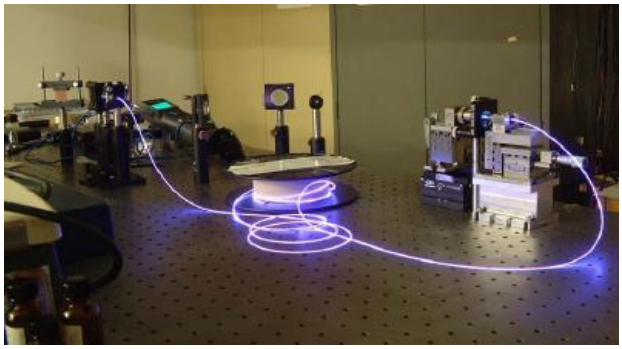
2.1.1. Fiber Lazerler

Fiber lazerler temel olarak aktif ortamları nadir elementlerden oluşan optik fiberler içerisinde fotonları ilerlediği lazer sistemleridir. Genel olarak neodymium, erbiyum, terterum, tulyum, praseodim, holmium ve disprosiyum elementleri kullanılmaktadır. Ticari olarak en çok Nd-Yag (Neodymium doped ytrium aluminium garnet) lazerler kullanılmaktadır. Şekil 2.5 kristal görüntüsü verilmektedir.



Şekil 2.5. Nd- Yag kristali [46]

Bu toprak elemanlarının atom seviyelerinin, daha ucuz bir diyot lazer pompası kaynağının kullanılmasına izin veren ancak yine de yüksek bir enerji çıktısı sağlayacak olan son derece yararlı enerji seviyelerine sahip olmasıdır[47].Fiber içerisinde kaplı olan nadir elementin dışarıdan diyot lazer kaynağı ile pompalanarak atom seviyeleri arasında geçişler ile fiber içerisinde foton demeti oluşturularak kararlı bir yapıya sahip olan lazer elde edilmektedir [48]. Şekil 2.6 Fiber lazer ışın çıkış görseli sunulmuştur.



Şekil 2.6. Fiber lazer sistemi lazer oluşumu [48]

Fiber lazerler ile yüksek yoğunlukları ve yüksek güç çıkışlarına rağmen, aynı zamanda yüksek verimli olmaları nedeniyle soğutmaları kolay olmaktadır. Ticari olarak satılmakta olan birçok lazer firması mevcuttur. Şekil 2.7. Ticari olarak fiber lazer sistemi üreten firmalar sunulmuştur.

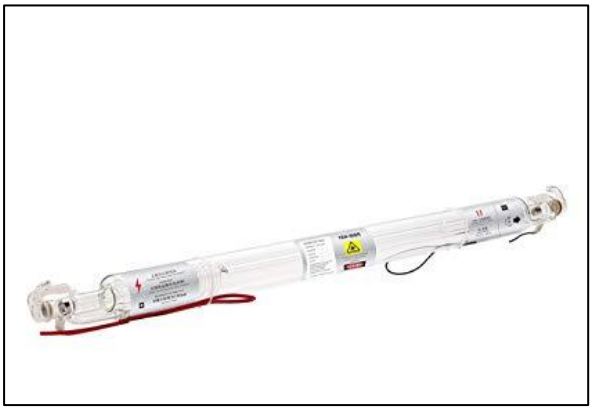


Şekil 2.7. Ticari olarak fiber lazer üreten başlıca firmalar [50]

Katmanlı üretim için tasarladığımız sistemimizde 50 W güce sahip Raycus fiber lazer tercih edilmiştir.

2.1.2. CO_2 Lazerler

CO_2 lazerleri bir tür gaz lazerleridir. AC akımı veya RF(radio frekansı) alanında elektrik akımı ile tüp içerisinde bulunan aktif ortam olan gaz uyarılarak gaz karışımı içerisinde bulunan azot molekülleri titreşim yaparak enerji kazanmaları sağlanmaktadır[51]. Lazerin ışık demeti oluşturabilmesi için azot atomlarının foton şeklinde enerjilerini serbet bırakmaları gerekmektedir. Uyarılmış azot atomları soğuk helyum atomlarına temas ettiğinde enerjilerini foton olarak aktarırlar. Oluşan fotonlar tüp içerinde her iki tarafta bulunan aynalar yardımı ile güçlendirilerek lazer oluşumu sağlanmaktadır[51]. Oluşan lazer ışını elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesinde bulunduğu için 10,6 mikrometre dalga boyuna sahiptir [52]. Şekil 2.8 CO_2 lazer görseli verilmektedir.



Şekil 2.8 CO_2 lazer tüpü [53]

2.1.3. Galvo Kafa

Galvo kafa veya lazer tarayıcı olarak adlandırılmaktadır. Galvo kafa iki tarama aynasından, galvo tarayıcı motoru olarak adlandırılan iki galvanometreden bir f-teta mercek (tarama merceği) oluşmaktadır. CO_2 ve Nd-YAG lazerler için iki tür tarama optiğe sahip galvo kafalar mevcuttur.

Galvo kafalarda dikkate alınacak sınırlamaların şunlardır;

-Lazer ışının kalite faktörü Q($Q=M^2$)

-Tarama açısı sınırlamaları

-Tarayıcı kafasının fiziksel açıklığı

Galvo kafalarda lazer ışını ayna sapma açısının iki katına eşit q açısı ile taranmakatadır.Taranacak alan X ve Y yönlerinde $q=+/- 20^o$ olmaktadır.Alan büyüklüğü 2Ftanq ile hesaplanmaktadır. Şekil 2.9 galvo kafa görüntüsü sunulmaktadır [54].



Şekil 2.9 Lazer galvo kafa[54]

2.2. Selective Laser Sintering Yöntemi Avantajları

SLS katmanlı üretim yöntemi ile çok çeşitli malzemeler ile üretime izin vermektedir. Polimer-metal tozları veya çeşitli çelik alaşım, polimer, naylon ve karbonat türleri SLS tekniği kullanılan malzeme gruplarıdır[55]. Bütün katmanlı üretim tekniklerinde olduğu gibi SLS tekniğininde diğer üretim tekniklerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu özellikler[56];

Avantajlar;

-Tasarım Özgürlüğü: Klasik imalat yöntemleri ile üretilmesi zor olan karmaşık geometriye sahip modellerin üretilmesine imkân vermektedir.

-İmalat Takımlarından Ayrılma**:** Oluşturulan model yapı üzerinde işlem gerektirmemesi nedeniyle maliyetli ve değişimi zaman alan imalat takımları kullanılmayarak kullanıcı için avantaj oluşturmaktadır.

-Hafif Tasarım: Kullanılan malzemenin türüne bağlı olarak tasarımı yapılan hafif ürünler üretilebilmektedir.

-Bütünleşik Parça Üretimi: Montaj gereksinimleri azaltarak parçaları tek bir ürün üzerinde birleştirilebilir. Hareketli parçaların komple montajı mümkündür.

-SLS tekniğinin avantajları ile birçok endüstriyel ve tıp alanında tercih edilmektedir.

Dezavantajlar

-İmalat Süresi: Üretim katmanlardan oluşması nedeniyle parça boyutuna göre yavaş üretmektedir.

-Yüksek Üretim Maliyetleri: Gelişmekte olan teknoloji olması nedeniyle sarf malzeme toz fiyatı yüksektir.

SLS katmanlı üretim tekniğinin günümüzde dezavantajları olmasına karşın havacılık, uzay, savunma, tıp alanında yoğun olarak kullanılmakta ve tercih edilmektedir.

2.3. Mekanik ve Yazılımsal Tasarım

Selective laser sintering üç boyutlu parçaların geleneksel üretim işlemlerinde olduğu gibi çıkarılabilir değil, ilave bir şekilde katmanlar halinde oluşturulmaktadır. Parçaların üç boyutulu olarak çıkarılabilmesi için gerekli olana mekanik ve yazılımsal tasarımlara ihtiyaç duyulmaktadır. SLS üretim tekniği birçok malzeme ile üretime imkân vererek sağladığı avantaj sonucunda tozlu sistemlere uygun mekanik tasarıma ihtiyaç duyulmaktadır. Kullanılan tozların boyutları çok küçük olması nedeniyle yapılacak olan sistemin aynı zamanda kullanıcı veya operator sağlığını etkilemeyecek şekilde yapılması gerekmektedir [56].

SLS tekniğinin endüstriyel olarak yayılması ile birlikte ticari firmalarda birbirlerine benzer mekanik tasarımlar geliştirmişlerdir. SLS sistemi mekanik olarak modüllerden oluşmaktadır. Bu modüller;

-Toz Besleme Modülü

-Toz Yayma Modülü

-Lazer

-Toz Toplama Modülü

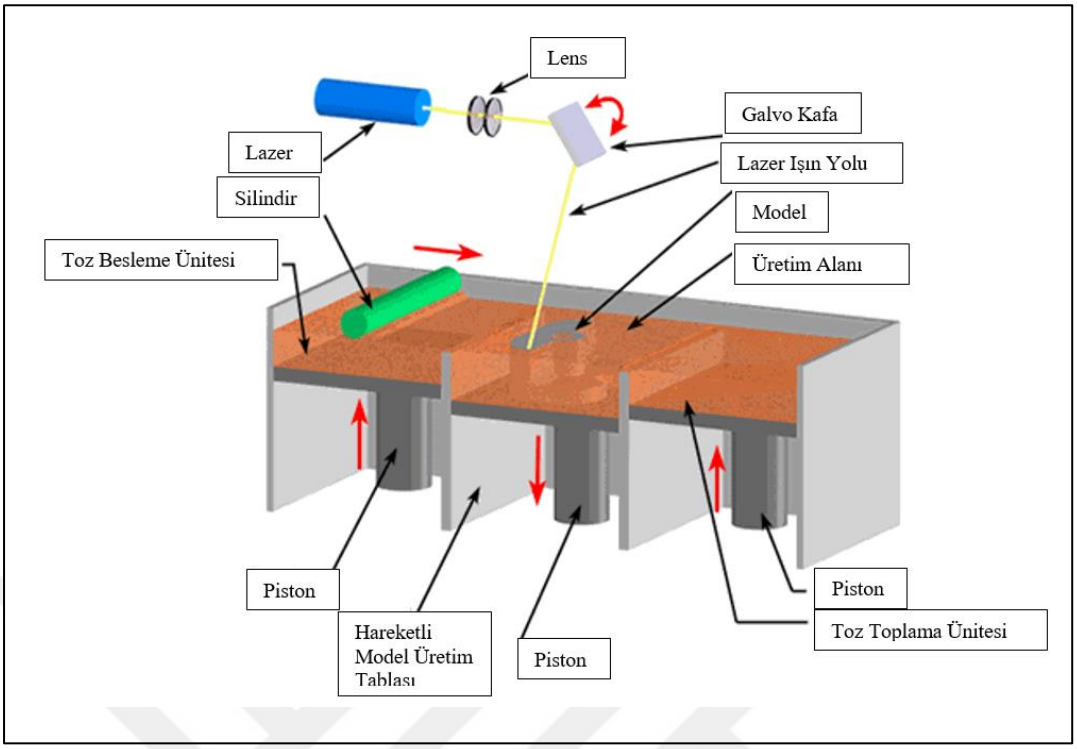
-Gaz Ünitesi kısımlarından oluşur. Şekil 2.10 sistem şeması sunulmaktadır.

2.3.1. Toz Besleme Modülü(Ünitesi)

Toz besleme ünitesi kullanılacak toz malzeminin bulunduğu ünitedir. Ünite haznesi asansörlü bir yapıya sahip olup yazılımsal olarak belirlenen miktarda çalışma alanına besleyen ünitedir.

2.3.2. Toz Yayma Modülü

Toz besleme ünitesi tarafından işlem alanına çıkarılan tozu sistem tasarımına göre silindir veya düz yüzeye sahip levha tarafından istenilen katman kalınlığında yayma işlemi yapılan modüldür.



Şekil 2.10 SLS katmanlı üretim şeması [57]

2.3.3. Lazer

SLS tekniğinin üretimin ana bileşenlerinden oluşan kısımdır. Lazer seçimi kullanılacak toz malzemenin ışın soğurma bandına bağlı olarak seçilmektedir Polimer, seramik bazlı malzemelerin soğurma bandı aralığında çalışan CO2 lazer ile üretim yapılmaktadır. Metal ve metal alaşımlı toz malzemelerde ise Nd-YAG fiber lazer tercih edilmektedir.

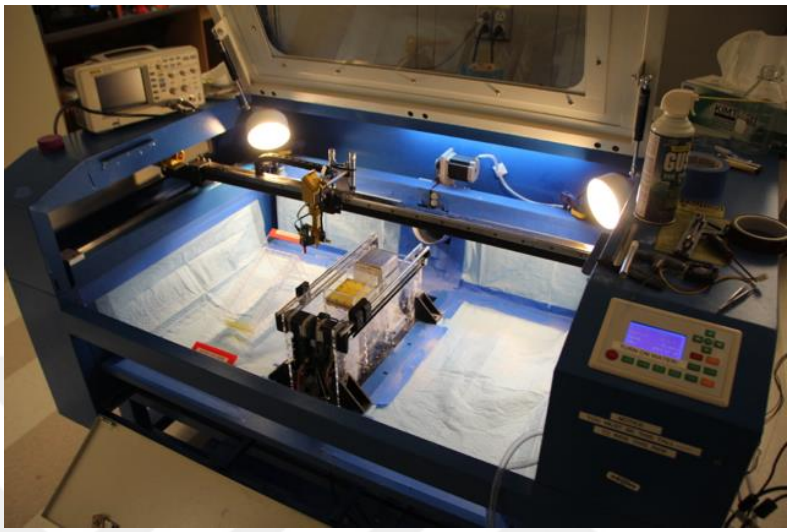
2.3.4. Toz Toplama Modülü

Toz toplama ünitesi toz yayma modülü tarafından işleme alanına yayılan tozun fazla kısmının toplandığı ünitedir.Bu ünite ile toz sarfiyatı azalmakta ve uygun eleme,temizleme işlemlerinden sonar tozun geri döünüşümü sağlanarak tekrar kullanılmasına yardımcı olan ünitedir.

2.3.4. Gaz Ünitesi

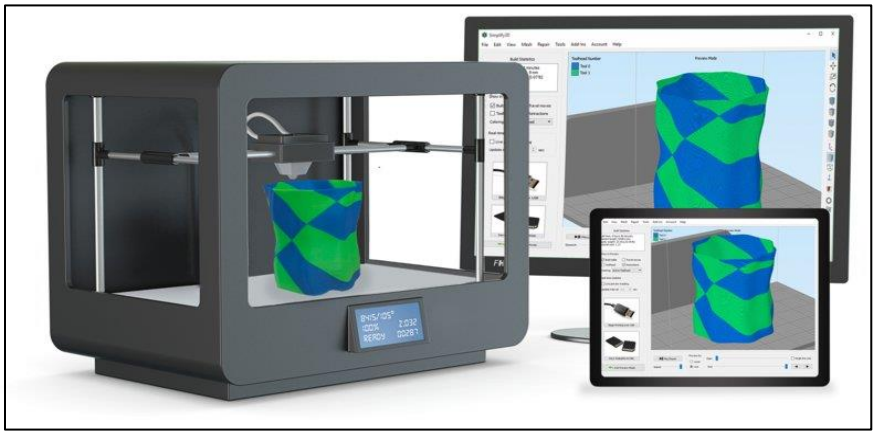
SLS üretim tekniğinde üretim kalitesini etkileyen parametreler arasında yer alan gaz ünitesi sistem içerisindeki atmosfer etkisini azaltmaya yarayan azot, argon gazlarının sistem içerisinine doğru basınç altında gönderilmesi için sistemde yer alan ünitedir.

SLS üretim tekniği, mekanik açıdan belirtilen modüllerden oluşarak otomasyon olarak çalışan sitemdir. Sistem mekaniği yazılımsal olarak koordineli çalışmaktadır. Katmanlı üretim teknikleri için geliştirilmiş bir çok yazılım ticari olarak satılarak kullanıcılara sunulmaktadır.



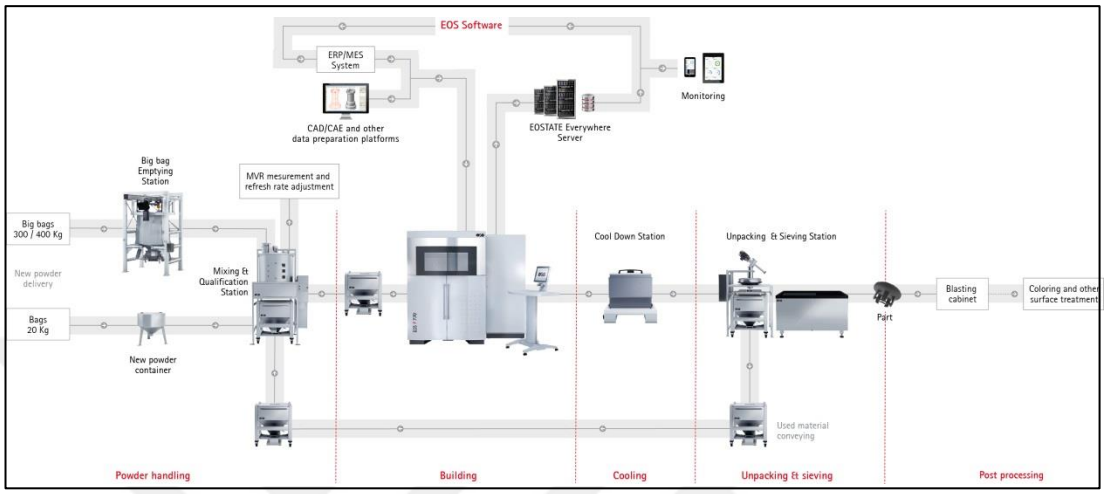
Şekil 2.11. SLS katmanlı üretim makinesi [58]

Katmanlı üretim tekniği için üretilen yazılımlar çalışma sistemi, kullanıcı tarafından üretilecek parçanın tasarımı uygun CAD programında yapılmaktadır. Tasarımı yapılan parça *stl dosya formatında kayıt edilmektedir. Kayıt edilen dosya ticari olarak kullanıcalara sunulan katmanlı üretim programlarına aktarılır. Dosya yazılım tarafından dilimlere ayrılır ve sistem üzerindeki kontrol kartına gönderilen sinyal ile modüller aktif hale getirilir.



Şekil 2.12. 3D Yazıcılar için ticari olarak satılan yazılım örneği [59]

Lazer kontrol ünitesi algıladığı PWM (Pulse width modulation) sinyali ile işleme alanına ışınları galvo kafa üzerindeki aynalar yardımıyla veya lineer hareket ile tasarımı katmanlar halinde işlemektedir [60].



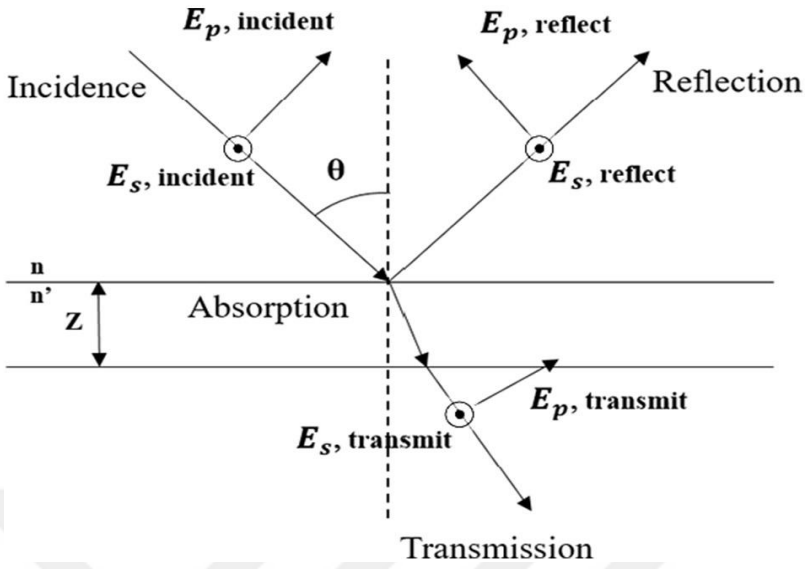
Şekil 2.13. EOS firmasına ait SLS sisteminin mekanik ve yazılımsal şeması [61]

2.4. Lazer Malzeme Etkileşimi

SLS tekniği ile metal katkı maddesi imalatında önemli bir işlem, lazer ışığının metal tozu tarafından emilmesidir. Toz emiciliği bilgisi, sadece katkı maddesi üretiminin optimizasyonunda değil, aynı zamanda lazer sinterleme, kaplama ve alaşım değerlendirmesinde ve SLS işlemlerinde toz yatağı tarafından lazer absorpsiyonu, tam olarak anlaşılması gereken kritik bir konudur. Bu konu uygulamalardaki uygun işleme parametrelerinin seçilmesi ve ayrıca termal girdilerin doğru tanımlanması için önemlidir[63].Emilim sadece toz materyaline ve lazer ışını profiline değil, aynı zamanda toz katmanı kalınlığı, boyut ve hacim dağılımlarına da bağlıdır.[62]

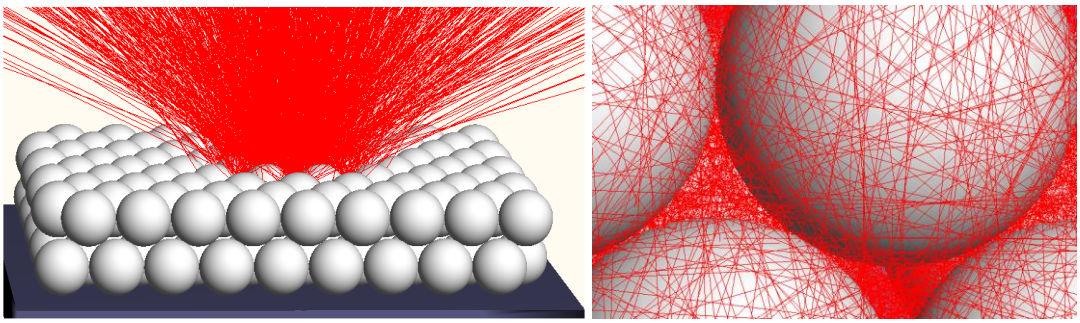
Absorpsiyon modelinin temel fikri, ışık kaynağının (örn.lazer) yaydığı fotonların (ışın) yolunu, parçacıkları ve atmosfer ara yüzündeki yansıma ve kırılma dikkate alarak, enerjiyi uygun şekilde emerek izlemektir [64].Beer Lamber yasası ile toz parçacık içindeki ortamın lineer olduğu varsayılır. Tek bir dalga boyu için bir ortamdaki radyasyon yoğunluğu dağılımı[65];

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} \quad (3.1)$$



Şekil 2.14. Absorsiyon,yansıma ve Polarizasyon Şeması [64]

Optik parametreler ve toz yapısından başlayarak, bir metal tozundaki emilim ve enerji birikimini hesaplamak için kullanılabilecek detaylı bir ışın izleme modeli geliştirilmiştir. Isı iletimi nedeniyle, yarıçapı R olan bir küre üzerinde düzgün olmayan bir şekilde emilen enerjinin homojenleşmesi için zaman c, $\tau_c=R^2/ D$ olup, burada D, metalin termal yayınımlılığıdır. Termal difüzyon süresi yaklaşık 25 µs'dir ve erime süresi yaklaşık olarak daha kısadır[64].Şekil 2.15 toz malzemenin gönderilen lazer ışının absorbe etmesi üzerine modellenmiş görüntüsü sunulmuştur.

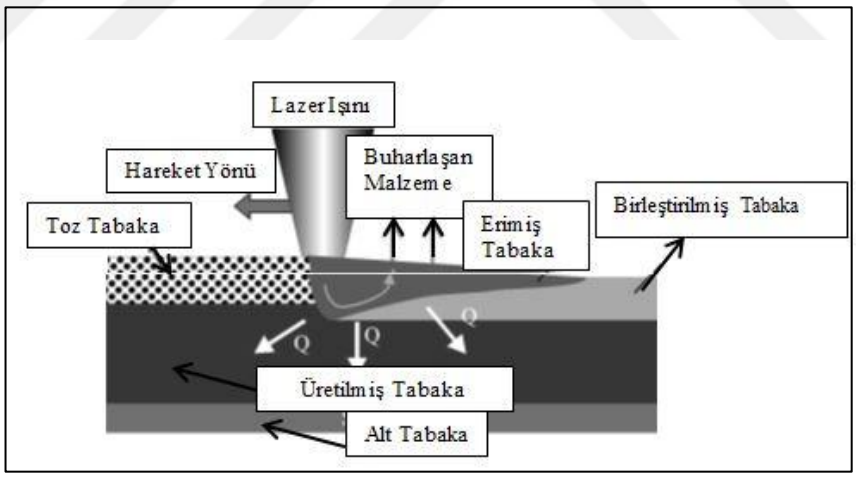


Şekil 2.15. SLS Tekniğinde Lazer ışının toz malzeme içerisinde yayılma modellemesi[64]

SLS tekniğinde kullanılan lazerler ile metalik sinterlemenin fiziksel işlemi, daha önceki dönemde yaygın olarak kullanılan polikarbonat gibi sinterleme amorf

polimerlerinden farklıdır [65]. SLS sırasında, ısı kaynağı tarafından üretilen termal çevrimler fiziksel durum değişikliklerine, metalurjik faz dönüşümlerine, termal gerilmelere ve nihayetinde sıvı hareketine neden olur. Bu fenomenler kaynak, lazer şekillendirme gibi ilgili işlemlerde edinilen bilgiler kullanılarak tanıtılacaktır. Toz malzemenin ışını emerek ısınması sonucu eriyerek birbirlerine ve bir alt katmana bağlanarak yapı oluşturmakta ve bu sıralama model parça oluşturulana kadar devam etmektedir.

Lazer toz yüzeyini taradığında, bölgesel olarak taranan alanda sıcaklık hızla artar ve düşük erime noktalı bağlayıcının erime sıcaklığını (mT) aşar ancak yüksek erime noktalı metalik tozun erime noktasına ulaşmaz[66]. Metalik toz lazer enerjisini hızlı bir şekilde emdikten sonra, bağlayıcı sıvıya dönüşür. Parça, gözeneklerin büzülmesiyle yoğunlaşır ve gözeneklilik azalır. Yerçekimi ve kılcalın kuvveti altında erimiş olan sıvı alt katmanda bulunan yapıya sızarak tutunmaktadır[66]. SLS sisteminde kullanılan lazer ışını Gaussian spota sahiptir. Gaussian lazer için, herhangi bir noktadaki enerji yoğunluğu (W/m^2) olarak gösterilir[63].



Şekil 2.16. Lazer Malzeme Etkileşimi [32]

Metal tozlarının SLS üretim tekniği ile parça üretimi sırasında, genellikle, işlem odasındaki oksijenin, örneğin toz yatağının gözeneklerine hapsolmasından ve içerdiği yüksek sıcaklıklar nedeniyle oksidasyon eşlik eder ve bu oksidasyon SLS sisteminde üretilen parça üzerinde etkilere neden olmaktadır. Yüksek ısı girişleri sadece erime değil aynı zamanda malzemenin buharlaşması da gerçekleşmektedir [67].

2.5 Metallerin Fiziksel Özellikleri

Metal malzemeler kendi içerisinde kimyasal ve fiziksel olarak özelliklere sahiptirler. Metaller ile yapılan ısıl işlemlere göre yumuşak ve sert özelliğe sahip olmaktadır. Yumuşak özelliğe sahip metaller bükülebilir, kesilebilmektedir. Kimyasal olarak metaller elementler ile tepkimeye grime özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Birçok metal malzeme oksijen ile etkileşmeye girerek oksitlenme olarak bilinen değişime uğramaktadır. Metallerin içerisinde bulunan demir-karbon oranına fiziksel özellikleri değişmektedir [69].

SLS tekniğinde kullanılan metaller bilinen tüm metal ve metal alaşımların belirli boyutlardaki tozu kullanılmaktadır. Metal tozu geometik şekillerine göre küresel veya karmaşık geometrilere sahip olacak şekil de üretimi mevcuttur[69]. Malzemelerin birçoğu özelliklerine uygun olarak farklı üretim metodları ile üretilmektedir. Bu yöntemler[69];

- Mekanik Yöntemler

- Kimyasal Yöntemler

- Elektroliz Yöntemi

- Atomizasyon Yöntemi

2.5.1 Mekanik Yöntem

Klasik imalat yöntem araçlarından tornalama, taşlama ve freze işlemleri ile malzeme kaldırılarak iri ve karmaşık geometrilere sahip tozlar üretilmektedir. Talaş kaldırma teknikleri kullanılarak çok iri ve karmaşık tozlar üretilmektedir. Bilyalı öğütme ile tambur içerisine konulan sert bilyalar içerisine konulan malzeme öğütücü içerisinde küçük tozlara bölünür. Öğütülecek malzeme yumuşak, sünek yapıya sahip ise oluşan toz metal yassı hal almaktadır. Bilyalı öğütüme sisteminde demir-krom, demir alaşım, silisyum gibi malzemelerden toz üretilmektedir. Mekanik alaşımlama yönteminde toz malzemelerin birbirlerine kaynaştırılması ve daha sonra bu kaynamayı bozarak daha küçük ve homojen yapıya sahip toz malzemeler üretilmektedir [69].

2.5.2 Kimyasal Yöntem

Metal toz malzeme Üretilen tozlar, öğütülerek ince tozlar haline getirilebilir. Yumuşak Yüksek ısı girişleri sadece erime değil aynı zamanda malzemenin buharlaşması da gerçekleşmektedir [69].

2.5.3 Elektroliz Yöntemi

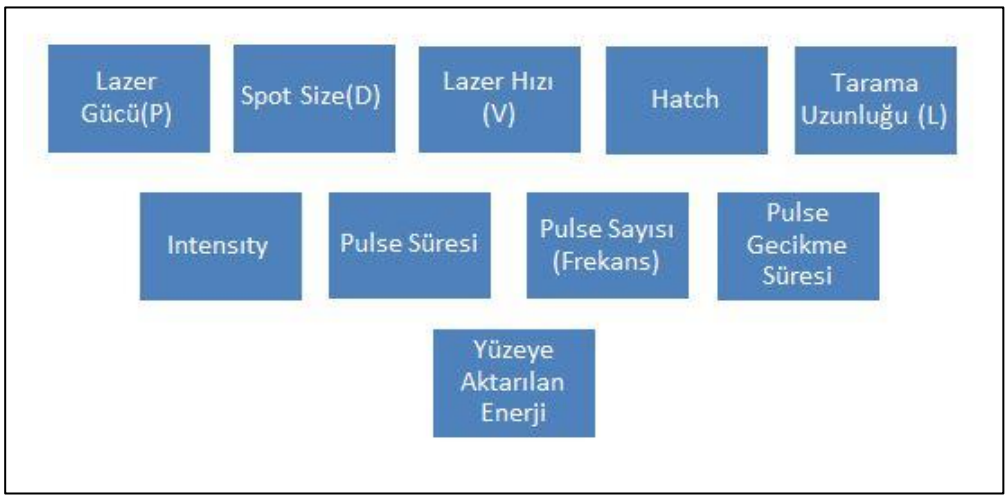
Oksit yapıda oluşan tozlar katot ucunu akım verilerek özel havuzda çökertme işlemi uygulanır. Elektroliz yöntemi kullanılarak bakır tozu elde edilmektedir [69].

2.5.4 Atomizasyon Yöntemi

Atomizasyon yönteminde erimiş halde bulunan metal veya metal alaşım bir haz içerisinden damla halinde akıtılması yolu ile yüksek basınca sahip gaz veya sıvı ile farklı boyutlara sahip toz malzeme üretme yöntemidir. Yöntemde azot, argon gazı oksitlemeyi önleyici gaz olarak tercih edilen yöntemdir [69].

2.6. Selective Laser Sintering Parametre Belirleme

SLS tekniğinde üretim aşamasında parça kalitesini etkileyen bir çok parameter mevcuttur. Bu parametreler parçanın geometrisi ve mekanik özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Aynı zamanda kıvrılma, büzülme, büyüme ve zayıf kenar tanımı gibi geometrik problemlerin yanı sıra yoğunluk, kuvvet ve bozulma gibi fiziksel özelliklerin tümü, parça yüzeyine iletilen enerjinin miktarı ve zamanlamasından etkilenmektedir [70]. Şekil 2.17. de bu parametrelerin enerjiye etkisi tablo sunulmaktadır.



Şekil 2.17. Yüzeye aktarılan enerjiyi etkiyen parametreler [70]

Parça üretiminde yüzeye aktarılan enerjiye ektiyen parametreler yanında parçanın oluşum sırasında diğer bir anlatımla SLS üretim tekniğinde önemli olan parametreler şu şekildedir [70];

- Lazer türü
- Lazer gücü
- Tarama hızı
- Gaz Türü ve basıncı
- Malzeme türü
- Hatch aralığı
- Spot Size
- Frekans dır.

Belirtilen her bir parametre de kendi içerisinde özel stratejiler ve yöntemler barındırmaktadır. Bu bilgiler doğrultusunda sa SLS tekniğinde üretim aşamasında hangi bazı paremetrelerin sabit ve bazı parametrelerin ise değişken olarak üretim stretejisi geliştirilerek malzmeye uygun parametre hassasiyeti yakalanabilmektedir. Bu paremetreleri alt başlıklar halinde açıklanacaktır.

2.6.1. Lazer Türü

Kullanılan malzeme türüne uygun olarak, malzemenin enerji soğurma, erime sıcaklığı gibi malzemeye uygun olarak seçilecek ve uygulamanın da ilk basamağını oluşturan parametredir. CO_2 ve Nd-Yag fiber lazerler SLS sistemler için kullanılan lazerlerdir.

2.6.2 Lazer Gücü

Lazer gücü toz olarak bulunan malzemelerin birbirine ve diğer katmanlarına yapışmasını sağlayacak özelliktir. Katman oluşumu ve tozun tamamen erimesi için gerekli minimum gücün belirlenmesi gerekmektedir. Gücün belirlenmesi kullanılacak malzemenin özellikleri hakkında bilgiye sahip olunmalıdır.

2.6.3. Tarama Hızı

Lazerden çıkan ışınların galvo kafa(tarama kafası) ile yüzeye gönderilmesi yazılım üzerinden hızının belirlenmesi birim yüzeye düşen enerji miktarına bağlı olarak toz malzemenin erimesi, birbirine yapışması sürecini etkileyen

parametredir. Malzeme erime sıcaklığına bağlı olarak hız mm/s olarak hızlı ve yavaş olarak ayarlanmaktadır.

2.6.4. Gaz Türü ve Basıncı

Gaz türü SLS tekniği ile üretilecek parçanın işlem sırasında katmanlar arası ve genel hatlarına bağlanacak oksijenin oksit tabakası oluşturrark malzeme kalitesini olumsuz yönde etkilemesini önleyen parametredir.

2.6.5. Malzeme Türü

SLS katmanlı üretim tekniği birçok malzeme ile çalışmaya uygun olmasından dolayı üretilecek parçanın kullanım alanına uygun olarak malzeme seçimi yapılmaktadır. Malzemenin erime sıcaklığı, yoğunluğu, dayanımı gibi fiziksel ve kimyasal özellikler dikkate alınmalıdır.

2.6.6. Hatch Aralığı

Lazer tarafından gönderilen ışının malzeme yüzeyine gönderilerek tarama yapılması ve her tarama çizgisi aralığını belirliyen parametredir. Lazer spot çapı hatch çizgilerinin yakın olması ile üst üste binme oranı yakalanarak lazer malzeme etkileşimi, malzeme erime ve parça kalitesine etki etmektedir.

2.6.7. Spot Size

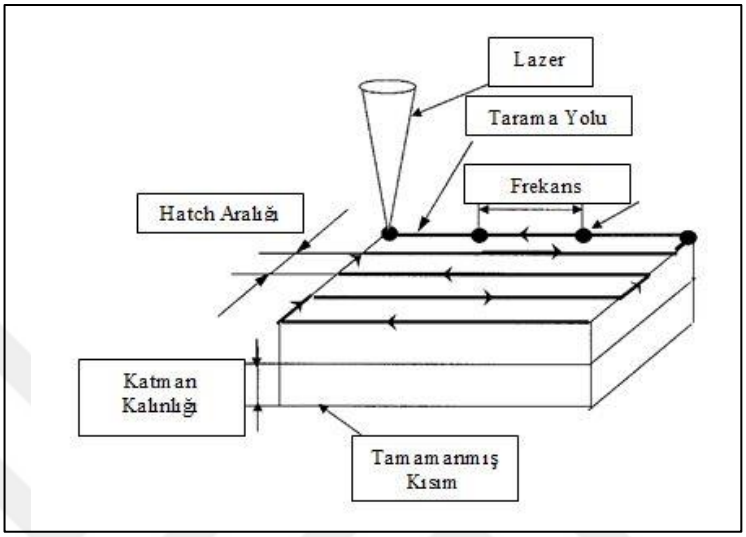
Lazer ışının malzeme üzerine gönderilerek kullanılan merceğin odak uzaklığına bağlı olarak lazer ışını odaklanır. Toz malzeme üzerine gönderilen odaklanmış ışın ile birim alana düşen enerji miktarına bağlı olarak üretim yapılmaktadır. Üretim esnasında odak mesafesi +/- 3mm arasında değiştirerek üretim yapılmaktadır.

2.6.8. Frekans

SLS sisteminde kullanılan lazerin saniyede gönderdiği ışın miktarı belirlenmektedir. Yazılım üzerinden Hz birimi ile verilmektedir. Frekans peak power hesabı yapılmaktadır.

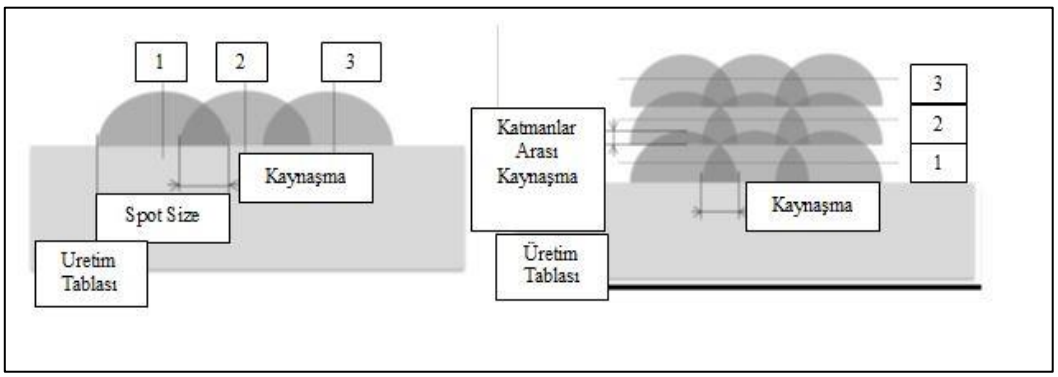
2.7. SLS Parametrelerinin Birleşme Üzerine Etkisi

SLS üretim tekniği için belirlenen enerji ve parça üretim parametrelerinin birleşme üzerine etkilerini inceliyeceğiz. Şekil 2.18 paremetrelerin kullanım şekil üzerinde gösterilmektedir.



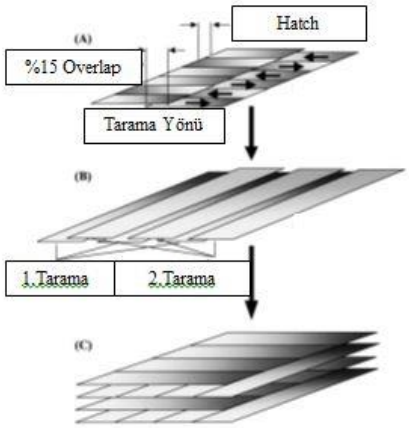
Şekil 2.18. Belirlenen parametrelerin kullanım şeması [38]

Belirlenen parametreler ile birlikte toz malzemenin toz malzemenin katmanlar halinde erimesi ve katmanlar arası birleşmenin en iyi sonuç verecek şekilde olmasına katkı sağlamaktadır. Toz malzemelerin birbirine yapışması için önemli olan diğer parametre lazer ışınının malzeme üzerinde taraması sonucu oluşan her bir atımın üst üste binmesi şeklidir. Bu üst üste binme overlap olarak adlandırılır. Overlopalrın üst üste binme oranı ile her bir tarama çizgisi veya hatch üzerinden geçen spot ile yapışma ve erime oranı arttırılmaktadır [38].



Şekil 2.19. Lazer overlap şeması [38]

Overlap stretejisi ile parçacıklar kaynaşması sağlanarak, tanecikli ve yapısal boşlukların, erimemiş malzeme oluşumu engellenmektedir [71]. Belirlenen bu parameterler yanı sıra tarama stratejiside üretilen parçanın kalitesini arttırma yönünde olumlu etki sunmaktadır [72]. Şekil 2.20. SLS üretim tekniğinde kullanılan tarama stratejisi şeması verilmektedir.



Şekil 2.20. SLS üretim tekniği tarama stratejisi [72]

Tarama stratejisi ile katmalara arası yapışma, mikroçatlak ve yapı içerinde oluşabilcek boşluk oluşmasını engellemek için kullunılmaktadır. Bu teknik ile işlem sırasında her katman arasıda 45° veya 90° parça üretim tablası döndürülerek işlem kalitesini arttırma yönünde uygulama yapılmaktadır.

2.8. Üretilen Numunelerin Kalite Test Yöntemi

SLS katmanlı üretim tekniğinde üretilen parça üzerinde testler yapılmaktadır.Bu testler ile üretilen parça hakkında detaylı bilgi edinilmekte ve kusur,hatalar tespit edilmektedir.Katmanlı üretim sisteminde dayanım,yoğunluk ve çözünürlük hakkında bilgi üretilen parçanın kullanım alanına göre uyumluluğu anlaşılmaktadır.Parça üzerine yapılan başlıca testler;

*SEM Analizleri

*Basma Testi

*Çekme Testi

*Mikroskop Görüntüleri

*Scratch Testi

*XRD

Testleri katmanlı üretim tekniği için kullanılan başlıca testlerdir.

3. MALZEME VE METHOD

Bu tez çalışmasında metal tozlarının katmanlı üretimini gerçekleştirebilecek Selective Laser Sintering sisteminin tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Sisteme dahil edilen atımlı fiber lazer ile içeriğini kobalt-krom metalik tozların oluşturduğu 3 boyutlu örnekler hazırlanmıştır. Bu bölümde Selective Laser Sintering(SLS) katmanlı üretim tekniği ile tasarlanan protatip makinenin mekanik, yazılım ve mekanik aksamın parça üretimi hakkında bilgi verilecektir. Sistemde üzerinde kullanılan modüllerin tanıtımı yapılacaktır.

Literatür araştırmalarında kullanılan metal malzemeler Tablo 3.1. oluşturulmuştur. Oluşturulan tablo ile kullanılacak toz malzemenin sisteme uygunluğu tespit edilmiştir

Tablo 3.1. Literatür kaynaklarından elde edilen SLS sistemlerinde kullanılan tozlar ve özellikleri [77]

Malzeme Türü	Özkütle (g/cm3)	Sıcaklığı (° C)	Minimum Toz Boyutu (µm)
CobaltChromeAlloy	8,29	1350-1430	20
NickelAlloy	8,80	1300-1350	20
Dırect Stell	8,05	1425-1540	20
15-5PH Staınless Stell	8,02	1510	30
Titanyum Alloy	4,51	1670	30
Inconel 718	8,19	1260-1336	20

Literatür sonuçlarında tasarımını gerçekleştireceğimiz sisteme yakın olan çalışma parametreleri Tablo 3.2. de sunulmuştur. Hazırlanan tablo ile üretim esnasında belirlenecek olan parametreler için temel oluşturması hedeflenmiştir.

Tablo 3.2. Literatür kaynaklarında kullanılan lazer ve parametre değerleri [55-65]

Lazer Türü	Güç(W)	Hız(mm/s)	Hatch(µm)	Overlap(%)	Kalınlık(µm)
Fiber Lazer (Pulse)	50 W	100 mm/s	100	25	25-30
CO2 Lazer (CW)	100 W	120 mm/s	100	50	25-30
Fiber Lazer (Pulse)	50 W	50 mm/s	100	50	25-30
Fiber Lazer (Pulse)	100 W	500 mm/s	100	25	25-30
CO2 Lazer (Pulse)	200 W	200 mm/s	100-200	25	25-30
Fiber Lazer (Pulse)	100 W	150 mm/s	100	50	25-30
Fiber Lazer (Pulse)	50 W	50 mm/s	100	25	25-30

SLS katmanlı üretim tekniği hakkında yapılan literatür araştırmaları ve benzer çalışmalarda alınan parametreler referans alınmıştır. Araştırma ve incelemeler sonucunda laboratuvarımızda bulunan lazer kaynakları SLS katmanlı üretim tekniğine uygun güç ve özellikte olduğu tespit edilmiş ve bu bilgiler doğrultusunda sistemimize uygun parametre aralıkları belirlenmiştir. Parametreler laboratuvarımızda bulunan fiber ve CO_2 lazer üzerinde işlenecek malzemelere göre seçilmiştir.

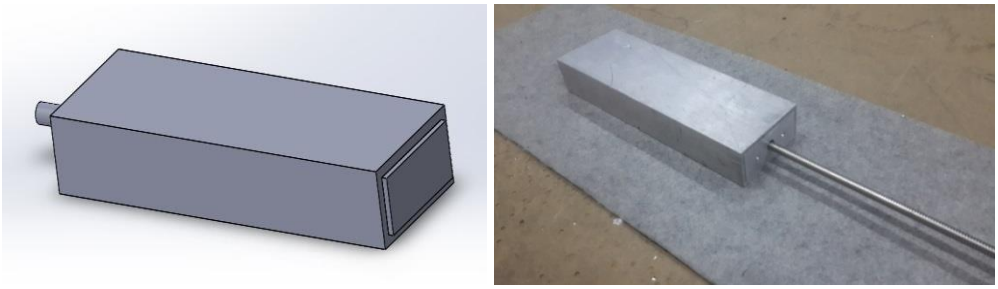
3.1 SLS Sistem Mekanik Tasarımı

Selective Laser Sintering(SLS) katmanlı üretim tekniği ile tasarlanan protatip makinenin mekanik kısmının tasarımında ticari olarak satışı gerçekleştirilen cihazların çalışma sistemleri referans olrak alınmıştır. Sistem tasarımında makine kısımları modül olarak tasarlanarak montaj aşamasında ve olası sistem yenileme, değiştirme durumlarıda kolaylık sağlanması hedeflenmiştir. Sistem tasarımı Cad programında tasarlanmıştır. Tasarıma ilk olarak sistem ana şasesinin tasarımı ile başlamıştır. Şase kısmı işlenecek parça boyutu ve portatif sistem olması amaçlanarak 50cmx50cmx75cm ölçülerinde tasarlanması uygun görülmüştür. Şekil 4.1'de sistem ana şasesinin tasarım görüntüsü verilmektedir. Şase kısmının üretimi 30x30 mm ebatlarında alüminyum sigma profiler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. Sistem ana şase iskelet tasarımı

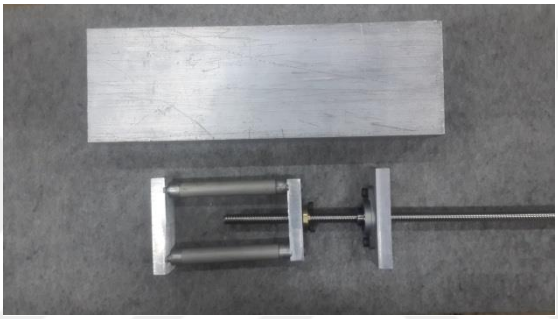
Ana şase iskelet tasarımı tamamlanması ile birlikte toz besleme ünitesi tasarlanmıştır. Toz besleme ünitesi parça üretim tablasına toz besleme işlemine yapan modüldür. Modül yazılımsal olarak belirlenen süre aralığında sisteme toz beslemektedir. Toz besleme ünitesinin hacmi tek seferde üretilecek parça miktarı kadar tasarlanmaktadır. Tasarımını yaptığımız toz besleme ünitesi 200-250cm^3 toz alma hacmine sahiptir. Şekil 3.2 toz besleme modülü tasarımı ve üretilerek hazırlanmış görüntüsü verilmektedir.



Şekil 3.2. Toz besleme modülü tasarımı ve üretilmiş görüntüsü

Toz besleme modülü alüminyum malzemeden imal edilmiş olup mil aracılığı ile motor hareketini içerisinde bulunan parçaya aktararak asansör görevi görmesi sağlanarak oluşturulmuş mekanik düzenektir. Modül hareketini step motor ile sağlanmaktadır. Kontrol kartı üzerinden sürücü devresi aracılığı ile gönderilen PWM sinyal ile hareketini gerçekleştirmektedir. Gönderilen PWM sinyali ile birlikte step motor hareket esnasında 1-1.5mm plakayı yukarı çıkararak sisteme ortalama 8gr toz

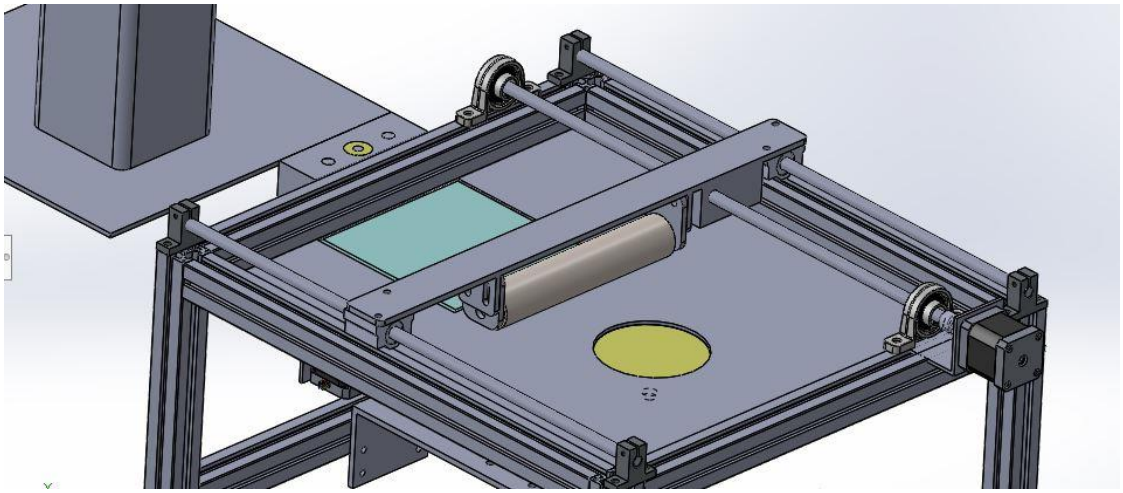
malzeme beslemektedir. Yapılan hassas ayarlamalar ile belirlenen bu miktar işleme alanının tamamını kaplamaktadır. Sistem içerisinde kullanılacak aynı veya farklı malzemelerden üretilmiş tozların boyutlarında oluşacak değişimler ile sistemde takılma veya çalışma durumunu etkileyecek durumların olmaması için modül içerisinde süpürme görevi görecek, dayanımı yüksek olan keçe olarak bilinen malzemeden ayrı bir tabaka yapılmıştır. Bu keçe tabakası hareket esnasında modül duvarları ile hareketli plaka arasına girecek olan toz malzemeyi süpürerek sistem çalışmasını devam ettirmekte aynı zamanda sızdırmazlığı sağlamaktadır. Şekil 3.3.'de toz besleme ünitesinin iç yapısı görülmektedir.



Şekil 3.3. Toz besleme ünitesi iç yapısı

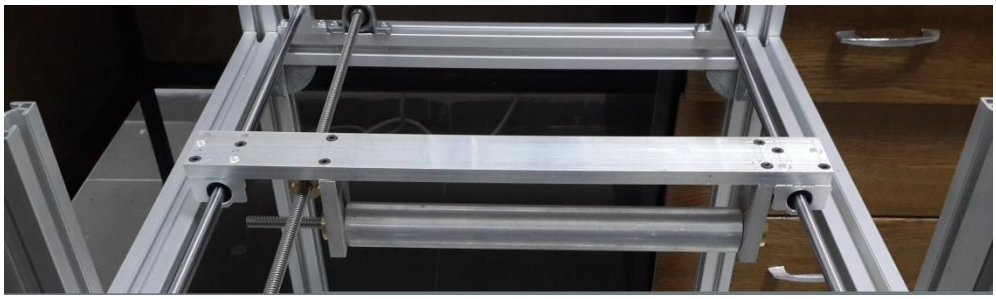
Toz Besleme ünitesinin sisteme toz beslemesi sonucu toz malzemenin işleme alanına aktarılması gerekmektedir. Yapılan tasarım ürünlerinde bu işlem belirli bir açı ile duran ağız kısmı düz olan hareketli bir ünite yardımı ile veya hareket esnasında mil üzerinde dönen silindir eksen ile yapılmaktadır. Gerçekleştirilen bu sistemde hem toz malzemeyi taşıma, yayma işlevi görmesi hemde presleme etkisi yaparak toz malzemeyi sıkıştırmakta ve malzeme içerisinde nemden kaynaklı birleşmeleri kıracağı düşünülerek silindir toz yayma düzeneği kullanılmıştır. Şekil 3.4. toz yayma ünitesi tasarımı sunulmuştur.

Toz yayma ünitesi tasarımında hassas hareket sağlamak için lineer rulman tercih edilmiştir. Sistem üzerine sağ ve sol kenara iki adet mil monte edilerek lineer rulmanlar mil üzerine yerleştirilmiştir. Rulmalar üzerine tasarımı yapılan silindir parçayı taşıyacak levha hazırlanmıştır.



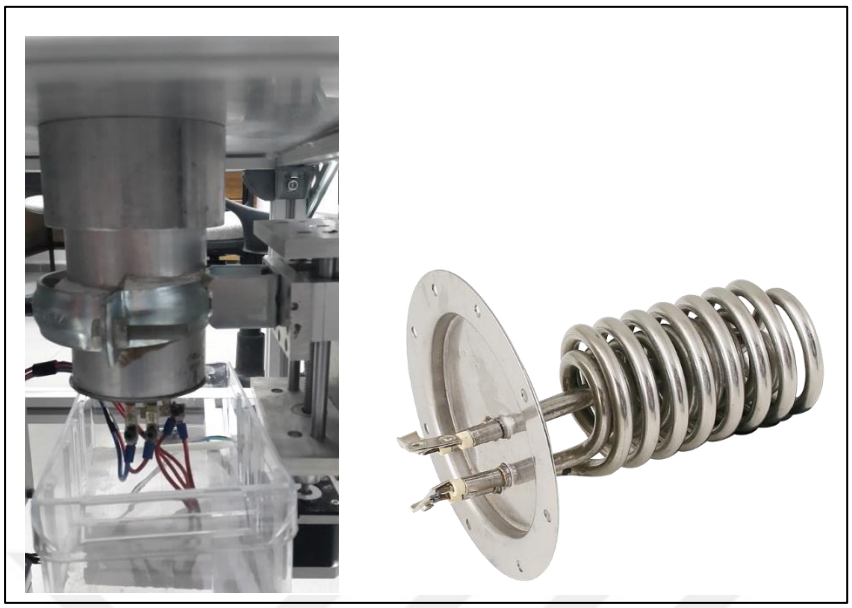
Şekil 3.4. Toz yayma ünitesi tasarımı

Levha üzerine monte edilecek olan T8 somun ile step motor hareketinin vidalı mil aracılığı silindir taşıyıcı levhaya aktarılarak rulman üzerinde hareket etmesi sağlanmaktadır. T8 somun olarak adlandırdığımız parça vidalı milin hareket etmesini sağlayan yatak görevi gören parçadır. Sistem hareketini kontrol kart üzerinden gönderilen pwm sinyali ile yazılımsal olarak belirlenen sürelerde toz besleme modülü tarafından sistem beslenen tozu yaymaktadır. Silindir kısım iki tarafında bulunan rulmanlar üzerine yerleştirilmiş mil üzerinde hareketini sağlamaktadır. Şekil 3.5. üretilmiş olan toz yayma ünitesi görseli verilmektedir.



Şekil 3.5. Toz yayma ünitesi

Parça üretim ünitesi lazer-malzeme etkileşiminin olduğu örneğin oluştuurlacağı ünitedir. Üniteye, üretimi yapılacak tozların ön ısıtılmasını sağlamak amacıyla rezistans dahil edilmiştir. 7500W gücünde olan resistans ile ünite üzerindeki tozların sıcaklığı 230-250°C sıcaklığa kadar arttırılabilmektedir, bu sayede lazer ile daha yüksek tarama hızlarına ulaşılabilinmektedir. Şekil 3.6.'da parça üretim ünitesi ve kullanılan rezistans görülmektedir.



Şekil 3.6. Isıtıcı yatağı

Oluşan sıcaklık lazer-malzeme etkileşimi sırasında oluşan ani olarak ısınma ve soğuma gibi termal etkilerin üretilen parça yapısında oluşacak mikro çatlak ve gözenekli yapılar oluşmasını engellemek için kullanılmaktadır [70]. Sisteme dahil edilen rezistans ile minimum 200°C, maksimum 650°C table sıcaklığına ulaşmaktadır. Üretim ünitesi yüzey sıcaklığını sabit tutmak için sisteme K tipi termokupl dahil edilmiştir. Termokulp için hazırlanan elektronik sürücü devre ve yine sisteme dahil edilen dimmer devresi ile kontrollü olarak gerilim-sıcaklık ayarı yapılmaktadır. Isıtıcının kontrolü ile +/- 3°C lik sapma değerine ulaşılmıştır. Dimmer devresi 220V gerilim ile çalışmakta ve 4000W güce kadar besleme sağlamaktadır. Devrenin çalışma gücünün 7500W ile çalışan rezistansa uygun olması için sigorta değeri yükseltilerek stabil çalışması sağlanmıştır. Şekil 3.7. Dimmer devresi görseli verilmektedir.



Şekil 3.7. Dimmer devresi ve termokulp

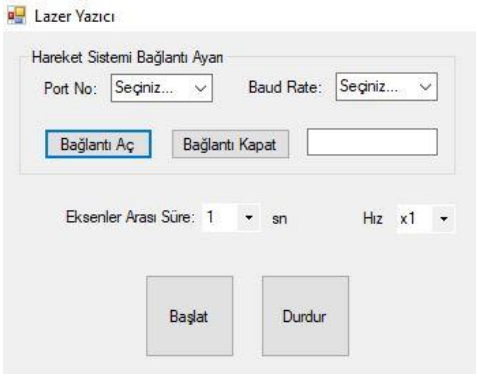
Tasarımları yapılan toz besleme, üretim ünitesi ve toz yayma modülü ayrı ayrı tasarımları ve üretimleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.8.'de SLS sisteminin tüm modüllerin montajının yapıldığı tasarım ve üretim görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 3.8. Sistem bilgisayar ortamında gerçekleştirilen tasarımı ve üretim sonrası görüntüleri.

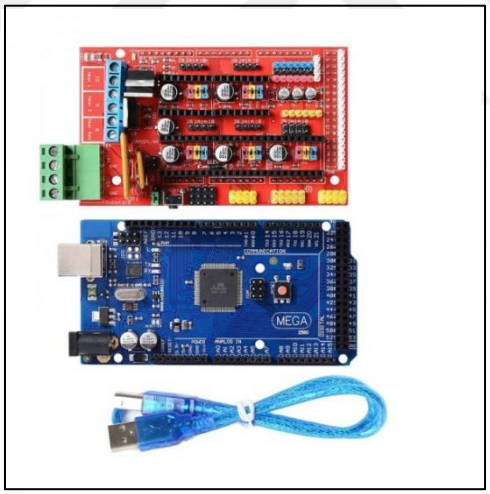
3.2 SLS Sistem Yazılım ve Elektronik Tasarım

SLS katmanlı üretim sistemleri üretilecek parçanın geometrisine bağlı olarak değişsede üretim süreleri uzun olan sistemlerdir. Bu nedenle üretimin otomasyona tabii olması vazgeçilmez bir durumdur. Bu nedenle bu tez çalışmasında üretimi yapılan sistemin kontrol kartının bilgisayar üzerinden çalıştırılabilmesi için bir yazılım gerçekleştirilmiştir. Yazılımımız C# programlama dili ile oluşturularak kontrol kartı üzerinden seri iletişim yolu ile bağlantı kurmaktadır. Kurulan bağlantı ile sistem sonsuz döngü ile çalışarak otomasyona tabii olarak çalışmaktadır. Tasarımı gerçekleştirilen yazılım arayüzü Şekil 3.9. sunulmaktadır.



Şekil 3.9. Sistem yazılım arayüzü

Tasarlanan yazılım ile toz besleme ünitesi, üretim ünitesi ve toz yayma ünitesinin kotrolleri gerçekleştirilmektedir. Modüllerin hız ve yer değiştirme ayarları yapılarak her bir periyot süresi ayarlanabilmekte ve eksenler arası bekleme süresi ile parça oluşum zamanı belirlenebilmektedir. Hareket eksenelerinin kontrolü için arduino mega kartı tercih edilmiştir. Şekil 3.10.'da kullanılan kartın ait görüntü yer almaktadır.



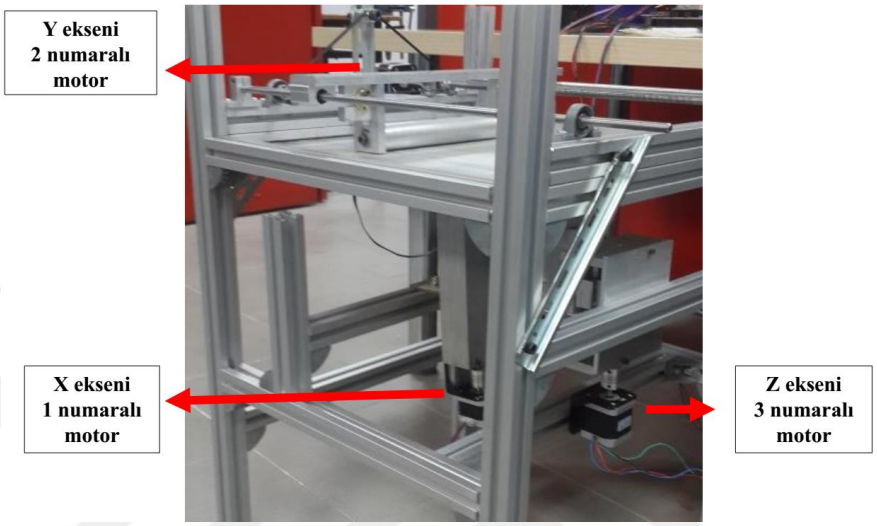
Şekil 3.10. Arduıno mega ve sürücü kartı

Arduino mega kartı üzerine motor sürücü reprap ramps kartı entegre edilmektedir. Sistemimizde 3 adet step motor kullanılmaktadır. Kart sistemi üzerine 3 adet step motor soketi yerleştirilmiştir.Step motor eksenleri;

-1 numaralı step motor X ekseni olup toz besleme ünitesi üzerinde kullanılmıştır
-2 numaralı Y ekseni olup toz yayma ünitesi üzerinde kullnılmıştır

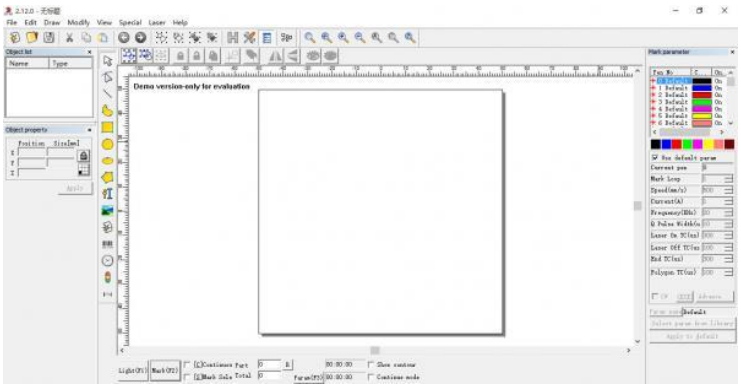
-3 numaralı Z ekseni olup parça üretim ünitesi üzerinde kullanılarak hareket etmeleri sağlanmıştır.

Şekil 3.11. sistem üzerinde kullanılan motorların konumları verilmektedir.



Şekil 3.11. Sistem üzerinde kullanılan motorlar

Lazer tarama sistemlerinde lazer demetinin malzemeye yüzeyine aktarılmasında kullanılan tarayıcı ayna sistemlerinin kontrolü Ezcad yazılımı ile gerçekleştirilmektedir. Ezcad yazılım ile lazer gücü, hız, frekans, hatch ve gecikme süreleri ayarlanabilmektedir. Şekil 3.12.'de Ezcad yazılımı arayüzü görülmektedir.

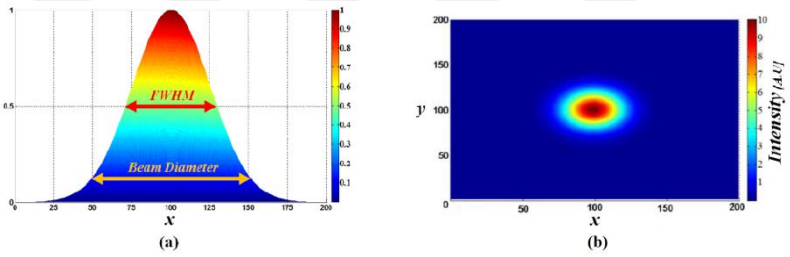


Şekil 3.12. Ezcad yazılım arayüzü

Yaptığımız sistem tasarımı otomasyon olarak stabil halde çalışması sağlanmıştır. Birden fazla sistemin senkronize hareketi ile katmanlı üretim tekniğine uygun mekanik ve mekatronik yapı oluşmuştur.

3.3 Sistem Üzerinde Kullanılan Lazerlerin Özellikleri

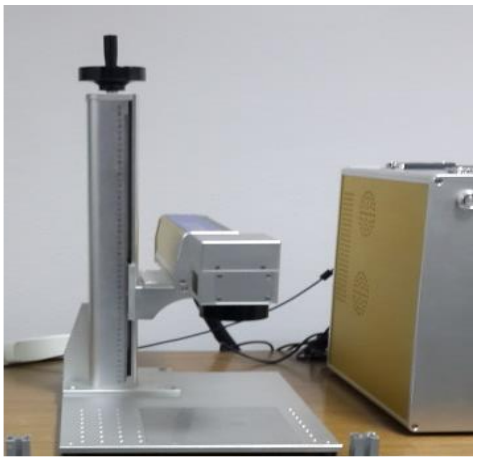
Bu tez çalışmasında metal tozlarını eritilmesi yolu ile birleştirilmesi için atımlı fiber lazer kullanılmıştır. Fiber lazerler aktif ortamı nadir toprak element ile kaplanmış lazerlerdir [48]. Atom seviyeleri arası geçiş sonucu yüksek tepe güçlerine sahip lazerler üretilebilmektedir. Fiber lazerlerin en önemli özelliği kararlı yapıya sahip ve oluşan ışının kalitesi oldukça yüksek olmasıdır. Sistemde kullanılan fiber lazerin demet profil dağılımı SLS tekniğine uygun olarak gaussıan yapıdadır. Şekil 4.13. kullanılan lazer demetinin profili görülmektedir.



Şekil 3.13. Gaussian beam profil görüntüsü [63]

Sistemimizde kullanılan fiber lazerimiz Raycus marka 50 W güce sahip ns atımlı lazerdir. Şekil 3.14. lazer görseli verilmektedir.

Bu tez çalışması sürecinde üretimi gerçekleştirilen SLS sisteminin tasarımı otomasyona tabii olarak stabil halde çalışması sağlanmıştır. Birden fazla sistemin senkronize hareketi ile katmanlı üretim tekniğine uygun mekanik ve mekatronik yapı oluşturulmuştur.



Lazer gücü	50 W
Lazer atım süresi	100 ns
Atım enerjisi	0.95 mJ
Tekrarlama oranı	20-80 kHz

Şekil 3.14. SLS sisteminde kullanılan fiber lazere ait görüntü ve teknik özelikler

Sistemimizde kullanılan toz besleme modülüne ait olan step motor ve parça üretim tablasının katman aralığının belirlenmesi için komparatör aleti kullanılmıştır. Komparatör cihazı üzerine uygulanan kuvvete bağlı olarak üzerinde bulunan birim skalasında ibrenin hareket ederek verdiği ölçümdür.Her bir çizgi aralığı 100 mikrometreye denk denk gelmektedir. İki çizgi arasındaki mesafe alte içerinde yer alan küçük ibre aracılığı ile tespit edilmektedir. Toz besleme ünitesinin toz besleme miktarı step motorun her bir adımının kaç mikrometreye karşılık geldiği ölçülerek yazılım üzerinden motora gönderilen pwm sinyali süresince hareket verilmiştir. Her bir hareket süresince sisteme 15-20 gram toz beslenmiştir. Aynı şekilde parça üretim tablasının her bir adımda kaç mikrometre hareket ettiği ölçülerek yazılım üzerinden gönderilen pwm sinyalinin süresince hareket verilmiştir. Yapılan ölçümlerde her bir adımda 50 mikrometre hareket ettiği ölçüldü. Şekil 3.15. koparatör cihazı görseli verilmiştir.



Şekil 3.15. Komparatör cihazı [79]

CO_2 lazerler tüp içerisinde bulunan gaz ortamının Rf kaynağı ile pompalanarak deşarjı ile oluşan lazerlerdir.10600nm dalga boyuna sahip olup contınıus (CW) olarak atım yapmaktadır. Sistemimizde polimer ve seramik bazlı toz malzemeler 200W gücünde Rofin karbondioksit tüpe sahip CO_2 lazer tercih ederek sistemimiz ile katmanlı üretimin ilk denemeleri yapılmıştır.

4. SELECTİVE LASER SİNTERİNG YÖNTEMİ İLE 3D YAPILARIN OLUŞTURULMASI

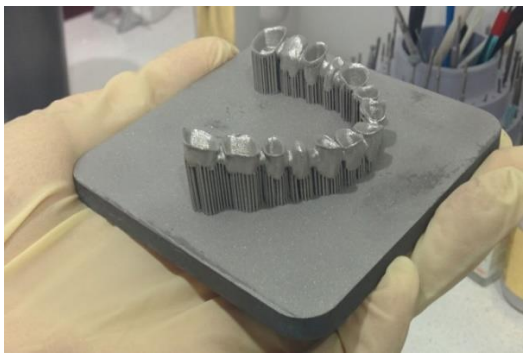
SLS tekniği ile parça üretimden parça kalitesini etkileyen bir çok parametre mevcuttur. Bunlar; lazer demeti spot çapı, hız, frekans, hatch, katman kalınlığı, güç, kullanılan koruyucu gaz ve lazer türüdür [73]. Yoğunluğu ve kalitesi uygun parça imalatı bu parametrelerin en iyi birleşimi ile elde edilmektedir. Birden fazla değişken parametre barındıran SLS tekniğinde bazı parametrelerin sabit tutulması gerekmektedir. Bu sayede oluşabilecek olumsuz üretim sonuçlarında kısa sürede çözüm üretilebilmektedir.

Bu bölümde tasarımı, mekanik montajı ve yazılımı tez kapsamında gerçekleştirilen SLS sistemi ile kobalt-krom alaşımlı tozlar kullanılarak 3D parça imalatı gerçekleştirilerek üretilen parçalara uygulanan testlerin sonuçlarına yer verilmiştir.

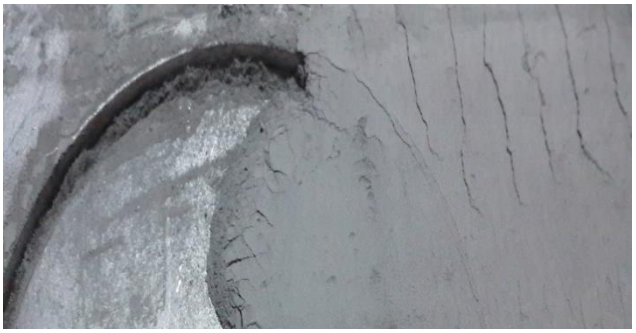
4.1 SLS Metodu ile Üretilen Parça Özelliği

Deneysel çalışmamızda 33µm ve 33µm altı parça boyutuna sahip CrCo tozu kullanılmıştır. CrCo tozları dental ve tıp alanında kullanılmak üzere geliştirilmiş yüksek çekme dayanımı ve yüksek sıcaklık, korozyon etkilerine dayanıklı malzemelerdir. Deneysel üretimde kullanılan CoCr metal tozu biyomedikal ve diş protez uygulamalarında kullanılmakta ve özelikleri Şekil 4.1. verilmektedir.

Chromium, Cr	28,5%
Molybdenum, Mo	6%
Nickel, Ni	0,25%
Iron, Fe	0,2%
Carbon, C	0,22%
Silicone, Si	0,7%
Manganese, Mn	0,5%
Tungsten, W	0,01%
Phosphorus, P	0,01%
Sulphur, S	0,005%
Nitrogen, N	0,15%
Aluminium, Al	0,05%
Titanium, Ti	0,01%
Bor, B	0,006%
Cobalt, Co	Balance



Şekil 4.1. CoCr kimyasal özelliği [74] ve kullanım alanı [76]



Şekil 4.2 Sistem içerisine serilmiş CrCo tozu

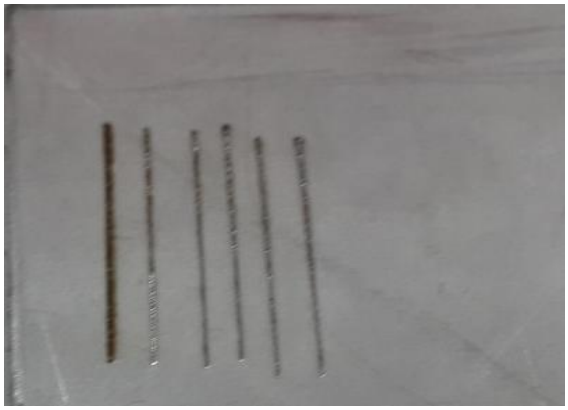
Deney düzeneği içerisinde bulunan toz besleme ünitesi $200cm^3$ toz alma hacmine sahiptir.Üretim aşamasında sabit tutulan parametreler mevcuttur.Bu parametreler;

- Spot çapı
- Hatch
- Gaz türü ve Sisteme beslenen gaz miktarı
- Frekans dır.

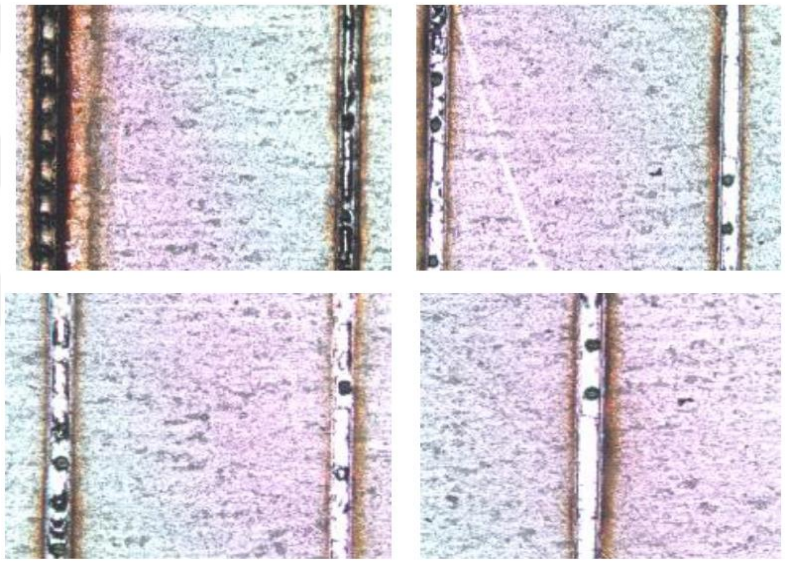
Numune üretim esnasında hız ve güç parametreleri ile değişiklik yapılarak yoğunluğu yüksek numune üretimi hedeflenmiştir.

SLS tekniği ile parça üretimi için hazırlanan sistemin ilk aşamasında sistem içerisinde bulunan hava ortamının yani oksijenin atılması gerekmektedir.Lazer ile etkileşime giren toz içerinde bulunan kobalt oksijeni bağlayarak oksit tabakası oluşturmaktadır [64]. Oluşan oksit tabaka tozların ve katmanların birbirlerine yapışmasına engelleyerek metalurjik olarak bozuk parça üretimine neden olmaktadır [64]. Deney sistemimizde oksijen sensörü bulunmadığından sistem içerisinden uzaklaştırılan oksijenin anlaşılması için yöntem geliştirilmiştir. Üretim ünitesine paslanmaz çelik levha yerleştirilerek levha üzerine belirli periyotlarda gönderilen lazer ışınının koruyucu gaz olmadığı ve gaz olduğu durumlarda levha üzerindeki oksitlenme oranı takip edilmiştir.

Uygulanan bu yöntem ile 9 litre/dk akış hızında gönderilen inert gaz (Argon) 6 dk içerisinde sistem içerisindeki O_2 büyük oranda uzaklaştırdığı sonucuna varılmıştır. Şekil 4.3'de sistem içerisine yerleştirilen levha üzerindeki oksidasyon değişimi görülmektedir.



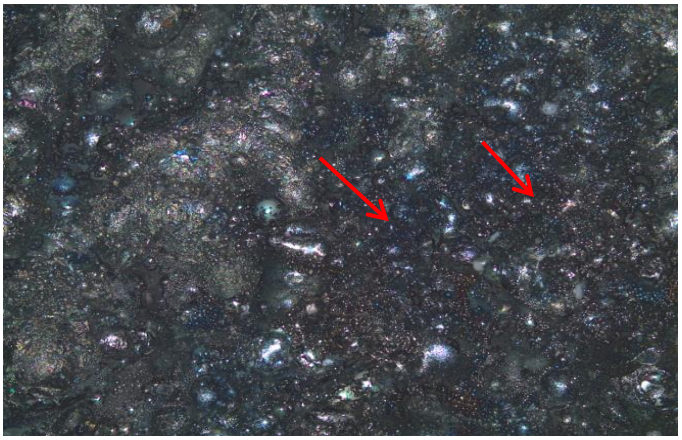
Şekil 4.3. Sistem içerisine yerleştirilen levha ile oksidasyon değişim analizi



Şekil 4.4. Sistem içerisine yerleştirilen levha ile oksidasyon değişim ait mikroskop görüntüleri

Levha üzerine gönderilen lazer ile oluşan çizgiler mikroskop altında incelenmesi sonucu ortam bulunan oksijen miktarının fazlalığı yanma reaksiyonuna neden olacağından Şekil 4.4.'de verilen görüntüde oksijen miktarının sisteme verilen inert gaz ile azalarak lazer malzeme etkileşimi sonucu oluşan yanma reaksiyonun azaldığı görülmüştür.

Kullanılan CrCo tozu içerisinde Co tarafından bağlanan oksit yüzey üzerinde mavi renkte oluşmaktadır.Şekil 4.5. oksit tabakası oluşmuş parça yüzeyi sunulmaktadır.



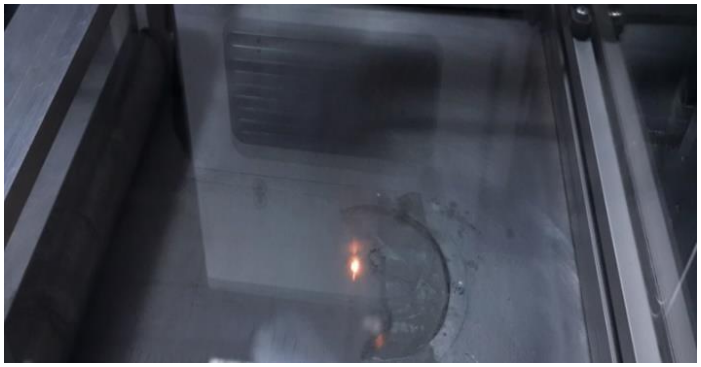
Şekil 4.5. CrCo tozu içerisinde bulunan Co elementi tarafından bağlanan oksit tabakası sistem içerisine yerleştirilen

Tablo 4.1. Parça Üretiminde Kullanılan Parametreler

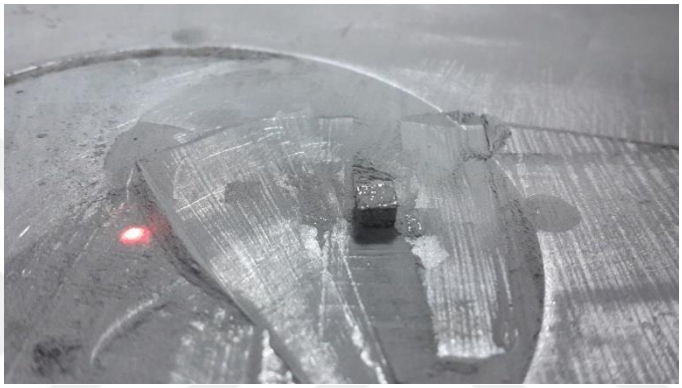
Lazer Türü	Güç(W)	Hız(mm/s)	Hatch(µm)	Spot(µm)
Fiber Lazer (Pulse)	50 W	40 mm/s	100	80
Fiber Lazer (Pulse)	50 W	60mm/s	100	80
Fiber Lazer (Pulse)	50 W	90mm/s	100	80
Fiber Lazer (Pulse)	50 W	120mm/s	100	80
Fiber Lazer (Pulse)	50 W	150mm/s	100	80

SLS tekniği ile parça üretim diğer aşama toz yatağının ısıtılmasıdır.Sistem üzerine entegre edilmiş olan 7.5kW güze sahip ısıtıcı ile yüzey sıcaklığı 250C^{o} de tasarlanan elektronik devre ile sabit tutulmaktadır.

Parça üretiminde lazer yazılımı Ezcad 2.0 ile hareket eksenlerinin hareketini sağlayan yazılımımız ile hız parametresi değişken kabul edilerek 60mm/s ile 150mm/s arasında parça üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.6. parça üretimin anında görsel sunulmaktadır.



Şekil 4.6. SLS tekniği ile parça üretim anı(V=60mm/s)



Şekil 4.7. V=60mm/s hızla işlenen parçanın tabladan çıkarılmadan önceki görüntüsü

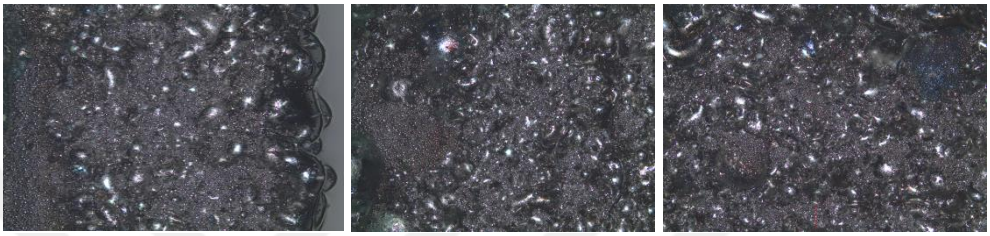
Tablo 4.2. Parça üretiminde güç değişimine bağlı kullanılan parametreler

Lazer Türü	Güc(%)	Hız(mm/s)	Hatch(µm)	Spot(µm)
Fiber Lazer (Pulse) 50 W	60	60 mm/s	100	80
Fiber Lazer (Pulse) 50 W	70	60mm/s	100	80
Fiber Lazer (Pulse) 50 W	80	60mm/s	100	80

Güç parametresinin değişkenliğine bağlı olarak parça karakteristiğinde değişmeler gözlenmiştir. Bu değişimler katmanlar arası yapışmanın güce bağlı olarak azaldığı ve gözenekli yapı oluşumunda artış olduğu gözlenmektedir. Şekil 4.8.Güce bağlı olarak değişkenlik gösteren yapıların mikroskop görüntüsü sunulmaktadır.

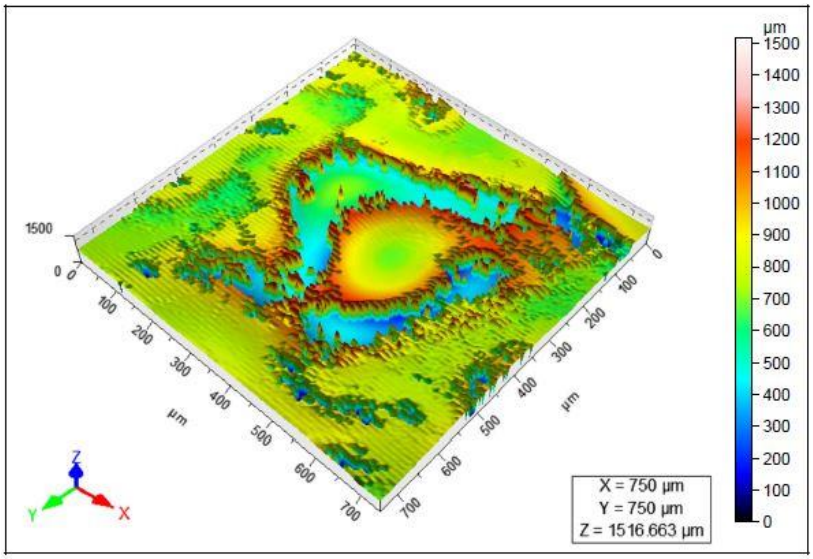


Şekil 4.8. Değişken güç parametrelerine bağlı olarak oluşan parçaların yüzey mikroskop görüntüsü (a) Güç:30 W, b) Güç:35 W ,c) Güç:40 W)



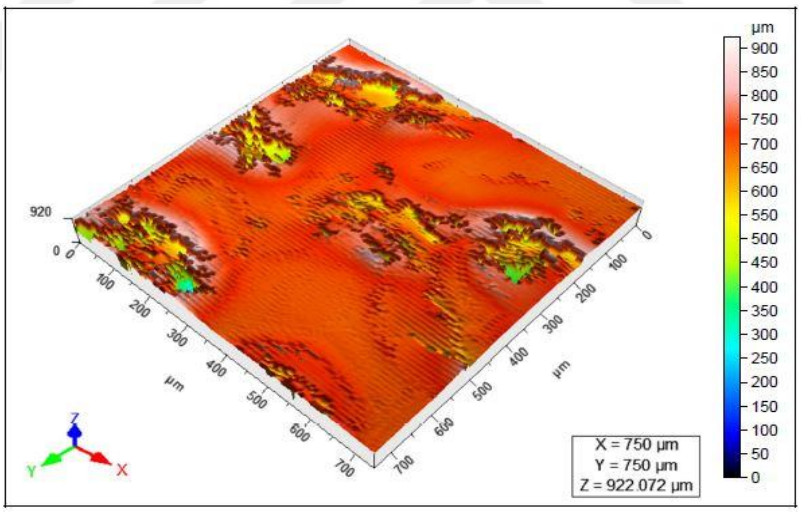
Şekil 4.9. Değişken Güç parametrelerine bağlı olarak oluşan parçaların kesit mikroskop görüntüsü (a) Güç:30 W, b) Güç:35 W ,c) Güç:40 W)

SLS üretim tekniği ile gerçekleştirilen parçaların profilometre ile yüzey pürüzlülük testi yapılarak tozların birbirleri ile yaptıkları bağ yapıları incelmiştir. Güç değişime bağlı olarak üretilen numunelerde elde edilen pürüzlülük analizleri ile düşük güç ile yapılan numunelerde katman üzerinde toz malzemenin tamamı erimediği ve eriyen tozların birlikte bir araya toparlanarak yüzey yapısı oluşturduğu ve bu yapılar arasında gözenekliliğin arttığı görülmüştür.Yüksek güçlerde ise bu birleşme katmanlar arasında daha fazla oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.10. , Şekil4.11. , Şekil 4.12. profilometre görüntüleri verilmektedir.



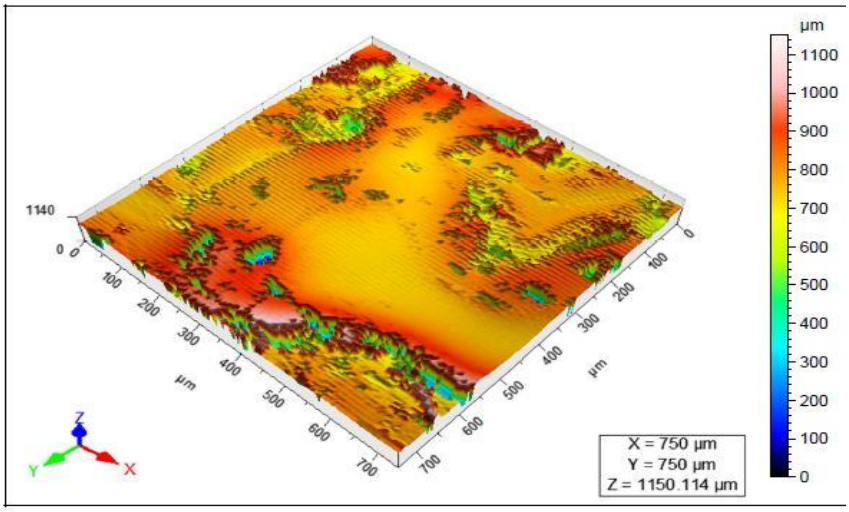
ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	243.006	µm
Ssk	-0.493	
Sku	2.889	
Sp	793.067	µm
Sv	723.595	µm
Sz	1516.663	µm
Sa	186.310	µm

Şekil 4.10. Parçaların profilometre görüntüleri (a) Güç:30 W)



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	93.841	µm
Ssk	-2.368	
Sku	11.585	
Sp	230.873	µm
Sv	691.199	µm
Sz	922.072	µm
Sa	55.784	µm

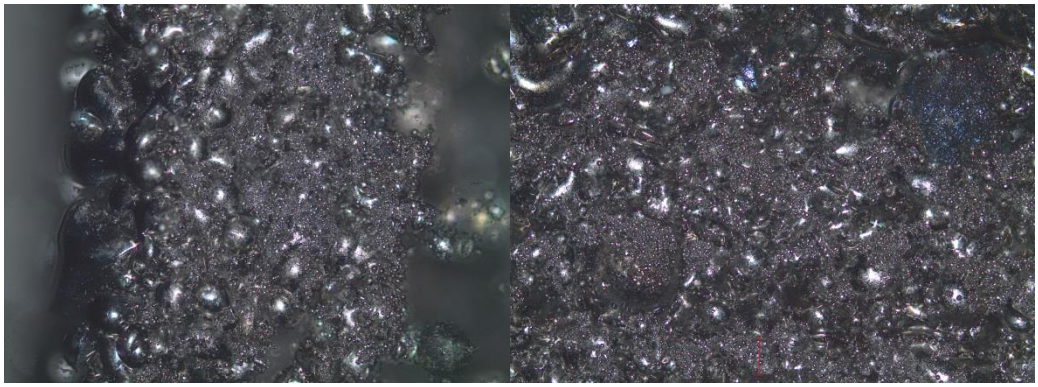
Şekil 4.11. Parçaların profilometre görüntüleri (b) Güç:35 W)



ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	163.240	µm
Ssk	-2.167	
Sku	8.652	
Sp	398.764	µm
Sv	751.350	µm
Sz	1150.114	µm
Sa	96.403	µm

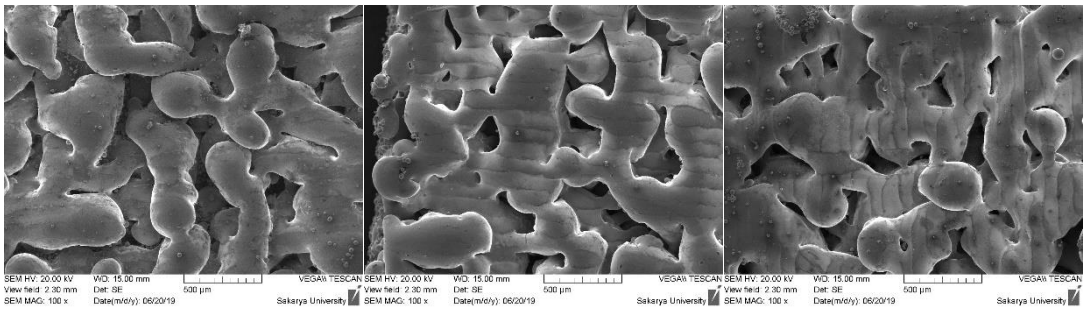
Şekil 4.12. Parçaların profilometre görüntüleri (c) Güç:40 W)

Elde edilen tarama görüntüleri ile birlikte lazer gücü arttıkça lazer malzeme etkileşimi sonucunda yüzeye aktarılan enerji artmakta ve toz malzemenin birbiri ile yapışarak bağ kurması gerçekleşmektedir. Düşük güçlerde gerçekleştirilen çalışmalarda gönderilen lazer ışını ile birim yüzeye aktarılan enerjinin malzeme soğurulmasına bağlı olarak toz malzemeyi ertimekte fakat topaklanma veya önbekleşmeler olarak malzeme kalitesini yoğunluğunu etkilemektedir. Ayrıca katmanlar arası gözenekli yapı oluşarak zayıf bağ yapıları meydana gelmektedir. .Yüksek güçlere çıkıldığında da erime artmakta fakat eriyik malzeme topaklanma veya öbekleşmelere neden olmaktadır. Şekil 4.13. parça kesit yüzeyinden alınan mikroskop görüntüsü verilmektedir.



Şekil 4.13. Düşük ve yüksek güç ile yapılan çalışmada oluşan parçanın iç yapısı

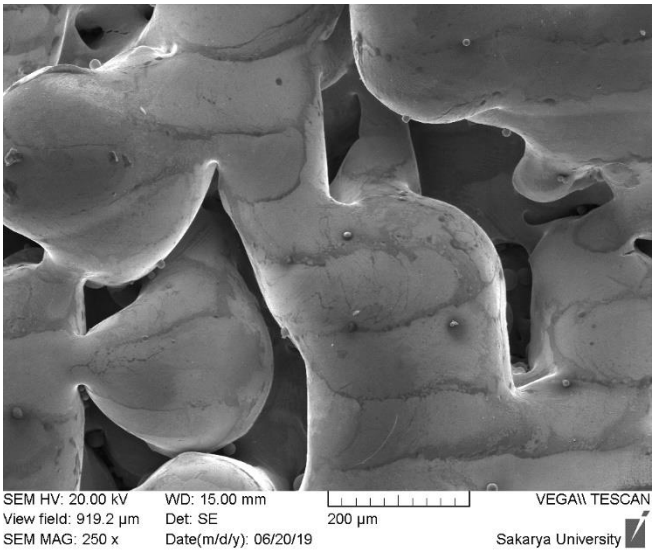
Taramalı elektron mikrokobu(SEM) ve EDX analizleri katmanlı oluşan yapılar incelenmiştir. Şekil 4.14. SEM analiz görüntüleri verilmektedir.



Şekil 4.14. Değişken güç parametrelerine göre SEM analiz görüntüleri (a)Güç:30 W b)Güç:35 W ,c)Güç:40 W)

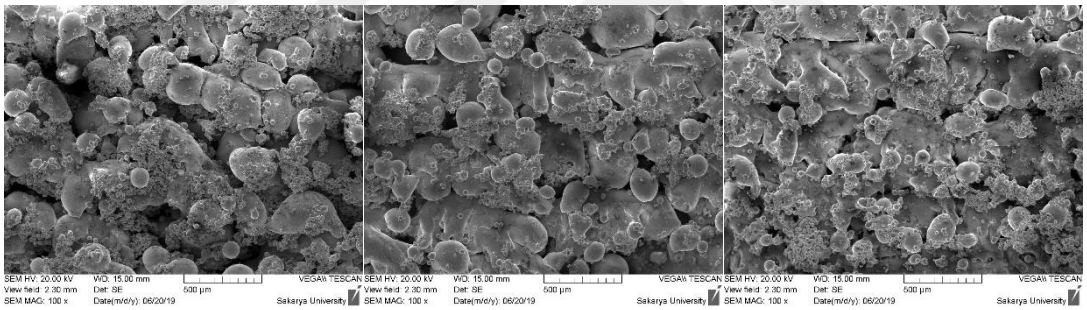
SEM analiz görüntüleri katmanlı üretim esnasında uygulanan 35W güç parametresinin alt ve üst limitlerinde gözenekli yapıların arttığı ve toz malzemenin birleşerek topaklanma veya öbeklenmelere neden olduğu bilgisine ulaşılmıştır. Aynı zaman da Şekil 4.15. alınan görüntüde uygulanan tarama stratejisi ile overloapların üst üste binmesi ve gözenekli yapıların oluşumunun engellenerek katman üzerinde bulunan tozun tamamen eritilerek toz malzemeler ve katmanlar arasında kuvvetli bağ yapı oluşturduğu görülmüştür. Lazer malzeme etkileşimi sırasında lazer yollarının belirgin olduğu görüntülenmiştir. Görüntülerde bağ yapı oluşan yüzey üzerinde toz partiküllere gözlenmiştir. Bu tozlar üretimin biterek toz içerisinden çıkaraılan parça yüzeyinde kalmış olan toz malzemeler olduğu gözlenmiştir. Bu bilgi ile üretim sonrasında alınan malzemenin yoğun temizlik prosesine bırakılması öngörülmüştür.

SEM analizi ile alınan görüntülerde yüzey yapılarında mikro çatlaklar görülmemiştir. SLS üretim tekniğinde karşılaşılan bu önemli sorunun sistem üzerinde yer alan 7,5kW gücündeki ısıtıcı kaynağı ile malzemenin lazer malzeme etkileşimi sırasında ani ısınma ve soğumaya bağlı olarak gerçekleşecek metalürjik stres önlenmiştir.

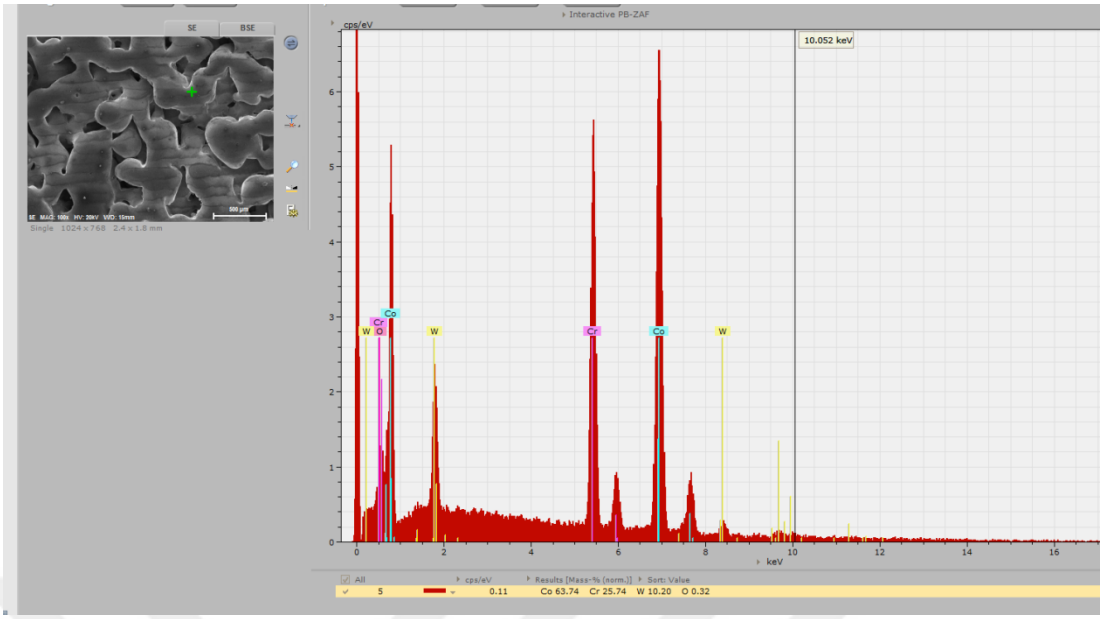


Şekil 4.15. Lazer tarama çizgilerinin görünümü

Bu sıcaklık stratejisi ile oluşan bağ yapıların kuvvetli olduğu yapılan diğer çalışmalarda da görülmüştür.[78]



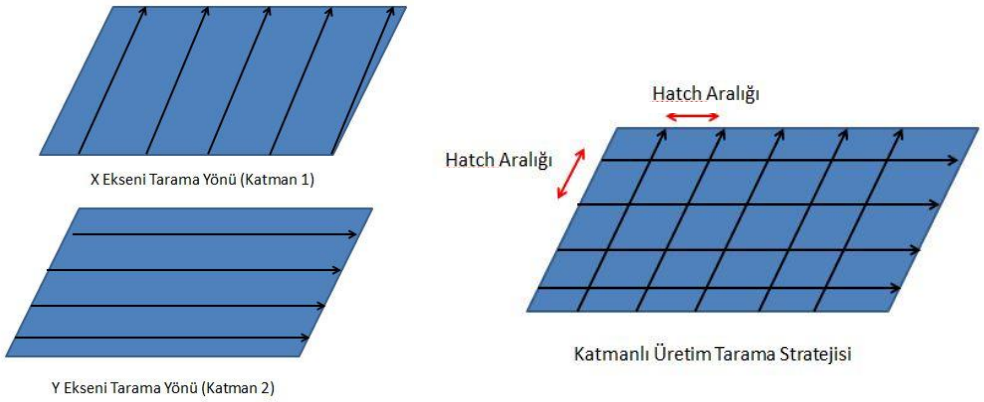
Şekil 4.16. Değişken güç parametrelerine göre SEM analiz kesit görüntüleri



Şekil 4.17. EDX analizi

EDX analizi ile elde edilen pik değerlerinin altında kalan alan içerinde bulunan elementlerin yüzdelik analizini vermektedir. EDX analizi ile alınan bilgiler ile parça yüzeyine bağlanan oksijen miktarının %0,32 değerlerinde olduğu verilmektedir.Aynı zamanda kullanılan toz içerisinde yabancı elemente rastlanılmamıştır. Sistem içerine gönderdiğimiz inhert Argon gazı ile sistem içerisindeki havanın çıkarılarak O_2 miktarı düşürülmüş ve parça yüzeyinde oksidasyon oluşmamıştır.Parça yüzeyinde oluşmayan oksidasyon ile yapışma oranı arttırılmıştır. Yapışma oranının artması yapıca yoğun ve katmanlar arası oluşan bağın kuvvetli olmasına neden olarak sağlam parça üretimi gerçekleştirilmiştir. Görüntülenen EDX piklerinde toz yapısı içerinde bulunan Co,Cr oranın teknik bilgi ile aynı olduğu ve teknik bilginin dışında diğer metal elementelerin bulunmadığı görülmüştür.

Parça üretimi sırasında uyguladığımız tarama startejisi ile katman lar üzerine gönderilen tozların ergitilerek birbirlerine yapışması sağlanmıştır. Bu yapışma ile katmanlar arası ve toz parçacıkları arasında boşluk miktarı minimum düzeye indirilmiştir. Aynı zamanda hatch aralığı ve lazer spot genişliği ölçüleri ile her bir aramada %25 overlap oluşturulmuştur. Katmanlar arasında kalan boşluk yapılar bu tarama strateji ile kapanarak bütün yapı oluşması sağlanmıştır. Şekil 4.18. üretim sırasında kullanılan tarama stratejisi verilmektedir.



Şekil 4.18. Tarama stratejisi

5. SONUÇ VE YORUMLAR

Katmanlı üretim tekniği Endüstri 4.0 ile birlikte havacılık ve uzay, savunma ve üretim alanında hizmet veren sanayi kuruluşlarının gelenkesel imalat teknikleri ile çözümleyemedikleri sorunların çözümlenmesinde katkı sağlayacak üretim teknolojisidir. Bu teknoloji ile birlikte hızlı protatipleme ve hızlı üretim imkanı sunarak yakın gelecekte hızla adapte olacak üretim tekniğidir.

Yapılan tez çalışması ile birlikte mevcut olan sistemlerde bulunan yüksek güçlü lazerle ile imalatı gerçekleştirilen bu üretim tekniğinin düşük güçlü lazerler ile yapılabileceği hedeflenmektedir. Bu hedef doğrultusunda gerekli literatür araştırmaları ile SLS tekniği ile parça üretimi için gerekli olan bilgi birikimi elde edilmektedir.Sistem tasarım, mekanik-mekatronik montajı, yazılımı ile birlikte bütünleşik sistem oluşturularak 50W güce sahip fiber lazer kullanılarak parça imalatı gerçekleştirildi.Sistemin portatif olarak imal edilmesi sağladığı avantaj ile 30μm ve 150 μm aralığındaki tüm metal, seramik ve polimerik malzemelerin işlenebilmektedir.Sistemimizin ilk denemeleri 200W gücünde CO_2 lazer ile seramik(Al_2O_3) tozu ile yapıldı.Parça kalitesini etkileyen bir çok parametre incelenerek hız ve güç parametrelerin de yapılacak ayarlamalar ile kalitesi ve yoğunluğu yüksek parça üretimi gerçekleştirildi. Alınan SEM,EDX,profilometre ve mikroskop görüntüleri ile parça özellikleri tespit edildi.

Analiz sonuçlarında varılan bilgi sistem numune işleme alanı sızdarmazlık özelliğinin yüksek olduğu, bu sayede atmosfer ortamında bulunan O_2 nin uzaklaştırılarak parça üretimi sırasında oksidasyonun önlendiği anlaşılmıştır.Sistem

üzerinde bulunan ısıtıcı yatağı ile mikro çatlak etkisinin önüne geçilerek lazer malzeme etkileşimi başarılı sonuçlanmıştır.Sistemimizin katmanlar arası kalınlığın 400 µm - 420 µm aralığında toz malzemeyi serdiği anlaşılmıştır.Literatür standartların üzerinde olan bu değerin yapılacak ayarlamalar ile çözülebileceği öngörülmektedir.

Bu tez çalışması ile katmanlı imalatın yakın gelecekte geleneksel imalatın yerine geçeceği, bu süre içerisinde de üretim tekniklerinin geliştirilerek avantajlarının artacağı ve düşük güçlü lazer ile üretim yapılabilir ve sistem maliyetleri düşürülebilir.

KAYNAKLAR

[1] Gibson I., Rosen D., StuckeR B. , *Addative Manufacturing Technologies*, Second edition, Springer, 2010, 2015

[2] https://www.trumpf.com/it_IT/prodotti/macchine-sistemi/sistemi-per-ladditive-manufacturing/ (Ziyaret tarihi 17.04.2019)

[3] https://www.spilasers.com/whitepapers/practical-applications-and-uses-for-additive-manufacturing/ (Ziyaret tarihi 17.04.2019)

[4] .Pinkerton A.J. *Department of Engineering, Lancaster University, Bailrigg, Lancaster LA1 4YR United Kingdom*, 2016 "Lasers in Additive Manufacturing"

[5] Sung-Hoon A., MonteroM., Odell D., Roundy S. and Paul K "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS", *ReserchGate* DOI: 10.1108/13552540210441166

[6] https://www.researchgate.net/figure/Fused-Deposition-Modeling-Apparatus-15_fig3_318851030 (Ziyaret tarihi 20.04.2019)

[7] Zein, I., Hutmacher, D. W., Tan, K. C., & Teoh, S. H. , *Elsevier*, 2002 **23**(4), Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications, 1169–1185.

[8] https://www.stratasys.com/fdm-technology , https://3dsourced.com/3d-printing-technologies/fused-deposition-modeling-fdm/ (Ziyaret tarihi 20.04.2019)

[9] https://archive-media.formlabs.com/upload/SLA_Guide.pdf , 2017 (Ziyaret tarihi 20.04.2019)

[10] Beal V. E. and Ahrens C. H. , Wendhausen P. A. "The Use of Stereolithography Rapid Tools in the Manufacturing of Metal Powder Injection Molding Parts"*SCIELO*, DOI:10.1590/S1678-58782004000100007.

[11] Islas R. , Noyola Frías M.A. , Martínez R. , Guillén A.P. , Rangel A.G , "Fundamentals of Stereolithography, an Useful Tool for Diagnosis in Dentistry*" INTERNATIONAL JOURNAL OF DENTAL SCIENCES*, DOI 10.15517/IJDS.V1712.20730

[12] https://www.machinedesign.com/3d-printing/what-s-difference-between stereolithography-and-selective-laser-sintering (Ziyaret tarihi23.04.2019]

[13] Hidalgo H.M , Romo G.W., Estolano RT. ,*NCBI* , 2009 , **20**(5),"Stereolithography: a method for planning thesurgical correction of the hypertelorism. ",1473-7.

[14] https://formlabs.com/blog/history-of-stereolithography-3d-printing/, https://3dprintingindustry.com/news/milkshake3d-launching-new-sla-3d-printer kickstarter-105346/ (Ziyaret Tarihi 23.04.2019)

[15] yang H. , Lim J.C. , Liu Y. , Qi X. , Yap Y.L. , Dikshit V. , Yeong W. and Wei J. , "Performance evaluation of ProJet multi-material jetting 3D printer", *Semantıc Schoolar* ,DOI:10.1080/17452759.2016.1242915

[16] Chen Q, Zhu C, Thouas Ga. "Progress and challenges in biomaterials used for bone tissue engineering: bioactive glasses and elastomeric composites " , *NCBI* , DOI: 10.1186/2194-0517-1-2

[17] Moore J.P ,. Williams C.B "Fatigue properties of parts printed by PolyJet material jetting" , *ResearchGate*, DOI: 10.1108/RPJ-03-2014-0031

[18] https://www.emeraldinsight.com/action/showImage?doi=10.1108/RPJ-03-2014-0031&iName=master.img-000.jpg&w=235&h=163, https://www.lynda.com/CAD-tutorials/Material-jetting-Multijet-modeling/672248/5004988-4.html (Ziyaret tarihi 30.04.2019)

[19] https://3dprint.com/90013/addwii-x1-3d-printer/ (Ziyaret Tarihi 30.04.2019)

[20] https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing(Ziyaret tarihi:01.05.2019)

[21] https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categories of additive manufacturing/binderjetting/ (Ziyaret tarihi:01.05.2019)

[22] https://www.sculpteo.com/en/materials/binder-jetting-material/ (Ziyaret tarihi:01.05.2019)

[23] https://3dprintingindustry.com/news/exone-binder-jet-3d-printing-40670/ (Ziyaret tarihi 01.05.2019)

[24] https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/information/electron-beam-melting-technology (Ziyaret tarihi:01.05.2019)

[25] https://www.3dnatives.com/en/electron-beam-melting100420174/ (Ziyaret tarihi:01.05.2019)

[26] Murr L.E. , Gaytan S.M. , Ceylan A. , Martinez E. , Martinez J.L. , Hernandez D.H. , Machado B.I. , Ramirez D.A. , Medina F. , "Characterization of titanium aluminide alloy components fabricated by additive manufacturing using electron beam melting" , *Elsevıer*, doi:10.1016/j.actamat.2009.11.032

[27] https://www.additively.com/en/learn-about/electron-beam-melting (Ziyaret tarihi 01.05.2019)

[28] https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/ebm machines/arcam-ebm-a2x (Ziyaret tarihi 01.05.2019)

[29] Lawrence E. Murr,Sara M.Gaytan,Diana A. Ramirez, Edwin Martinez, Jennifer Hernandez,KristaN. Amato,Patrick W. Shindo, Francisco R. Medina and Ryan B. Wicker"Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies" , *Springer Nature* , DOI:10.1038/s41524-019-0173-4

[30] Parthasarathy J. , Starly B., Raman S , Christensen A , "Mechanical evaluation of porous titanium (Ti6Al4V) structures with electron beam melting (EBM)", *Elsevier* ,2009 , **3**(3) , 249-259

[31] Kumar S. , Pıtyana S. "Laser- Based Addative Manufacturing of Metals" *Advanced Materials Research* ,2011,**Vol 227** , 92-95

[32] Williams C.B , Mistree F. , Rosen D.W "Towards the desıgn of a layer-based addıtıve manufacturng process for the realızatıon of metal parts of designed mesostructure",16th Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin , 2005

[33] J.P. Kruth X. ,Wang T. , Laoui and L. Froyen "Lasers and materials in selective laser sintering", *Assembly Automatıon* , **Vol.23**, 357-371

[34] Ian Gibson and Dongping Shi "Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process", *Rapid Prototyping Journal* , **Vol.3** , 129-139

[35] Louvis E. , Fox P. , Sutcliffe C.J. , "Selective laser melting of aluminium components", *Elsevier*, **211**(2) ,275-284

[36] https://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sinteringZiyaret tarihi 07.05.2019

[37] Frazier E. W. "Metal Additive Manufacturing: A Review" , Journals of Metarials Engineering and Performance , **23**(6) **,**

[38] Kumar S. "Selective Laser Sintering: A Qualitative and Objective Approach" *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society* , **Vol.55** , 43-47

[39] Abe F. , "The Manufacturing of Hard Tools from Metallic Powders by Selective Laser Melting," *Journal of Materials Processing Technology*,**111**(s 1 -3) ,210-213

[40] D.T. Pham, S.S. Dimov, and F. Lacan, "The Rapid Tool Process: Technical Capabilities and Applications," *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, **214** , 156-162

[41] Gibson I. and Dongping S. "Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process", *Rapid Prototyping Journal* , **Vol.3** ,129-136

[42] Suman Das "Physical aspects of process control in selective laser sintering of metals" , *Advanced Engineering Materıals* , **5**(10) , 701-711

[43] https://3dprint.com/188101/low-cost-selective-laser-sintering/ (Ziyaret tarihi 07.05.2019)

[44] htttps://www.objektifhaber.com.tr/2019/05/04/3d-yazdirma-teknolojilerinde-uretim-sureci (Ziyaret tarihi:03.05.2019)

[45] https://tr.pinterest.com/pin/832673418581264959/ (Ziyaret tarihi:03.05.2019)

[46] http://tr.meta-laser.com/laser-crystals/nd-yag-crystal.html (Ziyaret tarihi:05.05.2019)

[47] Zervas M.N. "High power ytterbium-doped fiber lasers fundamentals and applications" , *International Journal of Modern Physics*, **28**(12)

[48] https://www.spilasers.com/industrial-fiber-lasers/a-history-of-fiber-lasers/ (Ziyaret tarihi:05.05.2019)

[49] https://www.copl.ulaval.ca/en/research/fiber optics and guided wave optics/ (Ziyaret tarihi:05.05.2019)

[50] https://www.barchlaser.com/difference-between-raycus-jpt-max-ipg/ (Ziyaret tarihi:05.05.2019)

[51] https://sciencing.com/co-lasers-work-4899566.html(Ziyarettarihi:05.05.2019)

[52] https://www.rp-photonics.com/co2_lasers.html (Ziyaret tarihi:05.05.2019)

[53] https://de.dhgate.com/product/efr-f2-80w-co2-laser-tube-for-laser-cut-machine/394379372.html (Ziyaret tarihi:05.05.2019)

[54] http://www.sintecoptronics.com/markinghead.asp (Ziyaret tarihi:07.05.2019)

[55] Berger R. “Additive manufacturing” *Strategy Consultants* , 2013

[56] https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/ (Ziyaret tarihi:02.05.2019)

[57] https://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering (Ziyaret tarihi:07.05.2019)

[58] https://3dprint.com/188101/low-cost-selective-laser-sintering/ (Ziyaret tarihi 07.05.2019)

[59] https://www.simplify3d.com/ (Ziyaret tarihi 07.05.2019)

[60] Thomas Duda*. L. Venkat Raghavan“3D Metal Printing Technology”, *PapersOnLine* , **49**(29) ,103-110

[61] https://3dprint.com/188101/low-cost-selective-laser-sintering/ (Ziyaret tarihi 07.05.2019)

[62] C. D. Boley, S. C. Mıtchell, A. M. Rubenchık, and S.S.Q.WU “Metal powder absorptivity: modeling and experiment*”, Lawrence Livermore National Laboratory* , LLNL-JRNL-682544

[63] Yang Y. , Dongdong Y.Y. , Donghua D. , Ma C. “Laser energy absorption behavior of powder particles using ray tracing method during selective laser melting additive manufacturing of aluminum alloy” ,*Elsevier,* **143** ,12-19

[64] Boley C. D. , Khairallah S. A. , Rubenchik A. M. , “Calculation of laser absorption by metal powders in additive manufacturing”, *Applıed Optıcs* , **Vol.54** , 2477-2482

[65] Gusarov A. V. , Yadroitsev I. , Bertrand I. “Model of Radiation and Heat Transfer in Laser-Powder Interaction Zone at Selective Laser Melting” , *Journal of Heat Transfer* , **131**(7)

[66] Ellis A. , Noble C.J. , Hartley L. , Lestrange C., Hopkinson N. and Majewski C.“Materials for high speed sintering” ,*Journal of Materials Research* , **Vol.29** , 2080-2085

[67] Pinkerton A.J. , “Lasers in Additive Manufacturing”, *Elsevier* , **78** ,25-32

[68] https://rahmiunal.net/toz/tozuretimi/powder_product.html (Ziyaret tarihi:11.05.2019)

[69] Kruth J-P. , Mercelis P. and Vaerenbergh J. V. , “Binding mechanisms in selective laser sintering laser melting ” , *Rapid Prototyping Journal* , **Vol.12** 254-265

[70] Wang X. C. , Laoui T. , Bonse1 J. , Kruth1 J. P. , Lauwers B. and. Froyen L . , “Direct Selective Laser Sintering of Hard Metal Powders: Experimental Study and Simulation”, *Advaced Manufacturing Technology* , **19** , 351-357

[71] Thijs L. , Kempen K. , Kruth J.P. , Humbeeck J. V. , “Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder”,Acta Materialia , **61**(5), 1809-1819

[72] Santos E.C. , Shiomi M. , Osakada K. , Laoui T. ,“Rapid manufacturing of metals components by laser forming” ,*Elsevier*, **46** , 1459-1468

[73] http://www.arcam.com/wp-content/uploads/Arcam-ASTM-F75-Cobalt-Chrome.pdf Ziyaret tarihi:19.06.2019

[74] http://palladaplus.com/en/blog/selective-laser-sintering (Ziyaret tarihi:20.06.2019)

[75] https://www.eos.info/material-m (Ziyaret tarihi:20.06.2019)

[76] Strano G. , Hao L. , Everson R.M. , Evans K.E. “Surface Roughness Analysis, Modelling and Prediction in Selective Laser Melting” ,*Journal of Materials Processing Technology* , **213**(4) , 589-597

[77] http://www.teknikicerik.com/komparator-nedir.html (Ziyaret tarihi:26.06.2019)

[78] Ganeriwala R., Zohdi T.I“Multiphysics modeling and simulation of selective laser sintering manufacturing processes” ,*Procedia CIRP* , **Vol.14** , 299-304

ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında Edirne-Keşan'da doğdu. İlk ve ortaokul öğrenimi Ankara'da tamamladı. Lise öğrenimini 2 sene K.K.T.C'de devam edip İzmir'de tamamladı. 2010 senesinde girdiği Uludağ Üniversitesi Fizik bölümünden 2016 senesinde mezun oldu. 2017 senesinde Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde yüksek lisans öğrenimine başladı. 2017 yılında Lazer Teknolojileri Araştırma ve Uygulama Merkezinde 1 sene kısmi zamanlı araştırmacı olarak görev aldı. 2018 yılında Beam Arge Optik Lazer Teknolojileri şirketinde Elektro-Optik Sistem Mühendisi olarak işe başladı ve halen görevine devam etmektedir.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Turan K.** ,Akman E. Investigation of The Time Dependent Variation of TheContact Angle on Laser Textured Surfaces ‘’*TURKISH PHYSICAL SOCIETY 34.TH INTERNATIONAL PHYSICS CONGRESS*’’Bodrum-Turkey September-2018

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] **Turan K.** ,Akman E. Investigation of The Time Dependent Variation of TheContact Angle on Laser Textured Surfaces ‘’*TURKISH PHYSICAL SOCIETY 34.TH INTERNATIONAL PHYSICS CONGRESS*’’Bodrum-Turkey September-2018