

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SECİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİNİN ÇOKLU FİZİK
MODELLEMESİ**

BİROL KÖSE

KOCAELİ 2020

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SECİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİNİN ÇOKLU FİZİK
MODELLEMESİ

BİROL KÖSE

Prof.Dr. Zafer BİNGÜL

Danışman, Kocaeli Üniversitesi

.....

Doç.Dr. Erhan AKMAN

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

.....

Doç.Dr. Yusuf KAYNAK

Jüri Üyesi, Marmara Üniversitesi

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 06.02.2020

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Eklemeli imalat günümüzde kullanılan geleneksel imalat yöntemlerine bir alternatif olarak gelişen bir teknolojidir. Eklemeli imalat geleneksel imalat yöntemleriyle karşılaştırıldığı zaman düşük enerji tüketimi, düşük artık malzeme ve maliyet, esnek çalışma ve diğer üretim yöntemleriyle üretilemeyecek karmaşık geometrilerin üretilebilmesi açısından avantajlı olmaktadır. Bu çalışmada, eklemeli imalatta en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olan seçici lazer ergitme (SLM) modellenmiş ve parametre optimizasyonu yapılmıştır. SLM yöntemi özellikle metal endüstride yaygın olarak tercih edilmektedir. SLM prosesinin daha iyi anlaşılabilmesi ve en uygun parametreler ile çalışılması açısından bu çalışma yapılması gerekli olduğu düşünülmektedir. Yapılan bu modellemede SLM prosesi Ti6Al4V alaşımı için incelenmiştir.

Yapmış olduğum bu çalışmamla Mekatronik Mühendisliği yüksek lisans eğitimimin sonuna gelmiş bulunuyorum. Bu anlamda proje kapsamında benden yardımını esirgemeyen saygıdeğer hocam Arş. Gör. Ethem KELEKÇİ' ye ve gerek proje gerekse mühendisliğin esasları ve gelişen dünya standartlarına adaptasyon açısından saygı duyarak örnek aldığım değerli danışman hocam Prof. Dr. Zafer BİNGÜL' e mühendisliğin sadece bir meslek değil aynı zamanda dünyaya farklı bir bakış açısı ve sürekli bir gelişme süreci olduğunu öğreterek mesleğime saygı duyarak sevmemi sağladığı için teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen ve beni bugünlere getiren aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Şubat – 2020

Birol KÖSE

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ÖZET.....	ix
ABSTRACT.....	x
GİRİŞ	1
1. LİTERATÜR TARAMASI VE GENEL BİLGİLER	4
1.1. Eklemeli İmalat Yöntemi Çeşitleri.....	7
1.1.1. Foto polimerizasyonu.....	7
1.1.2. Malzeme ekstrüzyonu	9
1.1.3. Malzeme püskürtme	10
1.1.4. Yapıştırıcı püskürtme	13
1.1.5. Tabaka laminasyonu.....	14
1.1.6. Direk enerji depolama	16
1.1.7. Toz yatağı füzyonu.....	18
1.2. Eklemeli İmalatta Kullanılan Malzemeler	21
1.2.1. Metaller ve alaşımlar.....	21
1.2.2. Polimerler ve kompozitler.....	24
1.2.3. Seramikler	25
1.3. Eklemeli İmalatın Kullanıldığı Alanlar	27
1.4. Üretim İşlem Basamakları.....	29
1.4.1. CAD dosyalarının aktarılması.....	29
1.4.2. Kafes (Lattice) yapı oluşturulması	30
1.4.3. Onarım ve düzenleme	32
1.4.4. Boyut ve net şekil tanımlama	32
1.4.5. Paketleme ve konumlandırma	33
1.4.6. Destek yapılar.....	34
1.4.7. Simülasyon ve dilimleme	34
1.4.8. Parametre optimizasyonu ve yörünge planlaması.....	35
1.4.9. Yörünge aktarılması ve üretim.....	37
1.4.10. Son işlem ve ürün	38
2. MODELLEME YAKLAŞIMI.....	39
2.1. Malzeme Modellemesi	39
2.2. Isı Kaynağı Modellemesi	41
2.3. Faz Dönüşümü Modellemesi.....	41
2.4. Yörünge Modellemesi	42
2.5. Isı Transferi Modellemesi	45

2.6. Ekipmanlar ve Deneysel Ortamın Oluşturulması.....	47
2.7. Çoklu Fizik Modellemesi	48
3. DENEYSEL SONUÇLAR VE MODELLEME SONUÇLARI.....	52
3.1. Deneysel Sonuçlar ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması	53
3.2. Farklı güç ve hız değerlerinde yapılan modellemeler	55
3.2.1. 750mm/s hız için yapılan model sonuçları	56
3.2.2. 1000 mm/s hız için yapılan model sonuçları.....	59
3.2.3. 2000mm/s hız modelleri sonuçları	63
3.2.4. 5000 mm/s hız için model sonuçları	68
3.3. Maksimum sıcaklık farkı sonuçları ve yörünge hız optimizasyonu.....	74
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	77
KAYNAKÇA	79
EKLER.....	83
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	90
ÖZGEÇMİŞ	91

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Wohlers raporuna göre yıllara göre toz yatağı füzyonu malzeme satışı oranları	4
Şekil 1.2. Toz yatağı füzyonu Makinesinin görüntüsü.....	5
Şekil 1.3. Toz yatağı füzyonu makinesi üretim alanı	5
Şekil 1.4. SLA baskı yöntemi.....	7
Şekil 1.5. a) SLA b) DLP c) CDLP	8
Şekil 1.6. FDM makinesi.....	9
Şekil 1.7. FDM	10
Şekil 1.8. Malzeme püskürtme makinesi ile üretilen bazı parçalar	11
Şekil 1.9. a) Malzeme püskürtme b) Nano partikül püskürtme c) DOD	12
Şekil 1.10. ExOne firmasının yapıştırıcı püskürtme makinesi	13
Şekil 1.11. Yapıştırıcı püskürtme	14
Şekil 1.12. Tabaka laminasyonu çalışma mekanizması	15
Şekil 1.13. Mazak Hibrit çoklu-görev makinesi.....	17
Şekil 1.14. Beam DED Makinesi lazerli Üretim kafası.....	17
Şekil 1.15. a) LENS b) EBAM.....	18
Şekil 1.16. Trumpf makinesi üretim alanı	19
Şekil 1.17. a) SLS b) SLM c) EBM d) MJF.....	20
Şekil 1.18. Trumpf metal biyomedikal parçaları	23
Şekil 1.19. Ultimaker yazıcı ve ABS filamentten üretilen parçalar	25
Şekil 1.20. Yapıştırıcı püskürtme yöntemi ile üretilen seramik parçalar	26
Şekil 1.21. AM işlem basamakları	29
Şekil 1.22. Solidworks programında oluşturulmuş CAD örneği.....	30
Şekil 1.23. Lattice yapısı örnekleri: A) BCC B) BCCZ C) FCC D) FCCZ E) kübik F) sekizli makas G) elmas	31
Şekil 1.24. STL dosya formatı.....	31
Şekil 1.25. Katmanlı imalatla üretilen yüzey kalitesi düşük bir parça	32
Şekil 1.26. Uçak koltuk kemeri tokası optimizasyonu	33
Şekil 1.27. Simufact programında üretim için hazırlanan parçalar	33
Şekil 1.28. Toz yatağı füzyonu ile üretilen destek yapıların bulunduğu metal parçalar	34
Şekil 1.29. CAD, Dilimleme ve 3 boyutlu üretim.....	35
Şekil 1.30. Comsol Multiphysics programı arayüzü	35
Şekil 1.31. a) paralel tarama b) darbe tarama c) spiral tarama d) satranç tahtası tarama.....	36
Şekil 1.32. Cura programında oluşturulmuş 3B yazıcı için bir G kodu	37
Şekil 1.33. PBF makinesi çalışma görüntüsü	38
Şekil 1.34. PBF teknolojisiyle üretilen parçaların kalıntı tozlarından temizlenmesi.....	38
Şekil 2.1. Comsol mesh görüntüsü	39

Şekil 2.2.	Gaussian modeli	41
Şekil 2.3.	Tarama yörüngesi	43
Şekil 2.4.	Tarama yörüngesinin bir kısmı	44
Şekil 2.5.	Zamana göre X pozisyonu değişimi.....	44
Şekil 2.6.	Zamana göre Y pozisyonu değişimi.....	45
Şekil 2.7.	Comsol ısı transferi ara yüzü.....	46
Şekil 2.8.	Jonaet ve diğ. kullandığı deney düzeneği.....	48
Şekil 2.9.	Deneyin yapıldığı METALSYS 150 makinesi.....	48
Şekil 2.10.	SLM sistem bölümleri.....	49
Şekil 2.11.	Tarama yörüngesi.....	50
Şekil 2.12.	Gauss modeli ile tarama kesişimi.....	50
Şekil 3.1.	Modellemede oluşan ergime havuzu.....	52
Şekil 3.2.	Modellemede oluşan sıcaklık	53
Şekil 3.3.	Modellemede oluşan stres	53
Şekil 3.4.	750 mm/s hız tarama yörüngesi	56
Şekil 3.5.	120 W güç ve 750 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği.....	56
Şekil 3.6.	150 W güç ve 750 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği.....	57
Şekil 3.7.	120 W güç ve 750 mm/s hız için ergime havuzu	57
Şekil 3.8.	150 W güç ve 750 mm/s hız için ergime havuzu	58
Şekil 3.9.	120 W güç ve 750 mm/s hız için ergime havuzu sıcaklık dağılımı.....	58
Şekil 3.10.	150 W güç ve 750 mm/s hız için ergime havuzu sıcaklık dağılımı.....	59
Şekil 3.11.	1000 mm/s hız için tarama yörüngesi	59
Şekil 3.12.	120 W güç ve 1000 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği.....	60
Şekil 3.13.	150 W güç ve 1000 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği.....	60
Şekil 3.14.	120 W güç ve 1000 mm/s hız için ergime havuzu	61
Şekil 3.15.	150 W güç ve 1000 mm/s hız için ergime havuzu	61
Şekil 3.16.	120 W güç ve 1000 mm/s hız için ergime havuzunun sıcaklık dağılımı.....	62
Şekil 3.17.	150 W güç ve 1000 mm/s hız için ergime havuzunun sıcaklık dağılımı.....	62
Şekil 3.18.	2000 mm/s hız için tarama yörüngesi	63
Şekil 3.19.	120 W güç ve 2000 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği.....	63
Şekil 3.20.	150 W güç ve 2000 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği.....	64
Şekil 3.21.	250 W güç ve 2000 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği.....	64
Şekil 3.22.	120 W güç ve 2000 mm/s hız için ergime havuzu	65
Şekil 3.23.	150 W güç ve 2000 mm/s hız için ergime havuzu	65
Şekil 3.24.	250 W güç ve 2000 mm/s hız için ergime havuzu	66
Şekil 3.25.	120 W güç ve 2000 mm/s hız için ergime havuzu sıcaklık dağılımı.....	66
Şekil 3.26.	150 W güç ve 2000 mm/s hız için ergime havuzu sıcaklık dağılımı.....	67
Şekil 3.27.	250 W güç ve 2000 mm/s hız için ergime havuzu sıcaklık dağılımı.....	67
Şekil 3.28.	5000 mm/s hız için tarama yörüngesi	68

Şekil 3.29. 120 W güç ve 5000 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği.....	68
Şekil 3.30. 150 W güç ve 5000 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği.....	69
Şekil 3.31. 250 W güç ve 5000 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği.....	69
Şekil 3.32. 400 W güç ve 5000 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği.....	70
Şekil 3.33. 120 W güç ve 5000 mm/s hız için ergime havuzu	70
Şekil 3.34. 150 W güç ve 5000 mm/s hız için ergime havuzu	71
Şekil 3.35. 200 W güç ve 5000 mm/s hız için ergime havuzu	71
Şekil 3.36. 400 W güç ve 5000 mm/s hız için ergime havuzu	72
Şekil 3.37. 120 W güç ve 5000 mm/s hız için erime havuzu sıcaklık dağılımı.....	72
Şekil 3.38. 150 W güç ve 5000 mm/s hız için ergime havuzu sıcaklık dağılımı.....	73
Şekil 3.39. 250 W güç ve 5000 mm/s hız için ergime havuzu sıcaklık dağılımı.....	73
Şekil 3.40. 400 W güç ve 5000 mm/s hız için erime havuzu sıcaklık dağılımı.....	74

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Foto polimerizasyonu üreticiler ve kullanılan malzemeler	9
Tablo 1.2. Malzeme ekstrüzyonu üreticiler ve kullanılan malzemeler	10
Tablo 1.3. Malzeme püskürtme üreticiler ve kullanılan malzemeler	12
Tablo 1.4. Yapıştırıcı püskürtme üreticiler ve kullanılan malzemeler	14
Tablo 1.5. DED üreticiler ve kullanılan malzemeler	18
Tablo 1.6. Toz yatağı füzyonu üreticileri ve malzemeleri.....	21
Tablo 1.7. Eklemeli üretimde en yaygın kullanılan metaller	23
Tablo 1.8. AM teknolojileri ve kullanım alanları	28
Tablo 2.1. Modellemede kullanılan parametreler.....	40
Tablo 3.1. Simulasyon ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması.....	54
Tablo 3.2. Modellerin ilk ve son tarama satırı sıcaklığı	76

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

P	: Lazer Gücü (W)
u	: Lazer Tarama Hızı (mm/s)
R	: Lazer Işın Çapı (μm)
h	: Tarama Mesafesi (μm)
ε_{em}	: Yayınım Katsayısı
η	: Emilim Katsayısı
h_c	: Isı Transferi Katsayısı ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)
C_p	: Isı Kapasitesi (kJ/kgK)
K	: Isıl İletkenlik Katsayısı ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)
ρ	: Yoğunluk Katsayısı (g/cm^3)
L_f	: Ergime Isısı (j/kg)
σ_B	: Stefan-Boltzmann Sabiti ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4$)
$d\gamma/dT$: Yüzey Gerilim Gradyanı (N/mK)

Kısaltmalar

3D	: 3 Dimension (3 Boyutlu)
AM	: Additive Manufacturing (Eklemeli İmalat)
CAD	: Computer-Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CDLP	: Continuous Direct Light Processing (Sürekli Doğrudan Işık İşleme)
DED	: Direct Energy Deposition (Doğrudan Enerji Depolaması)
DLP	: Direct Light Processing (Doğrudan Işık İşleme)
DOD	: Drop on Demand (Gereken Nokta Üzerine Damlatmak)
EBAM	: Electron Beam Additive Manufacturing (Elektron Demeti Eklemeli İmalatı)
EBM	: Electron Beam Melting (Elektron Işını Ergitme)
FDM	: Fused Deposition Modeling (Eriyik Biriktirme Modellendirme)
LENS	: Laser Engineered Net Shape (Lazerle Tasarlanmış Ağ Şekli)
LOM	: Laminated Object Manufacturing (Lamine Nesne Üretimi)
MJF	: Multi Jet Fusion (Çoklu Jet Füzyonu)
NPJ	: Nano Particle Jetting (Nano Parçacık Püskürtme)
PBF	: Powder Bed Fusion (Toz Yatağı Füzyonu)
SLA	: Stereolitografi
SLM	: Selective Laser Melting (Seçici Lazer Ergitme)
SLS	: Selective Laser Sintering (Seçici Lazer Sinterleme)
STL	: Standard Triangle Language (Standart Üçgen Dili)
UAM	: Ultrasonic Additive Manufacturing (Ultrasonik Katkı Madde Üretimi)
UV	: Ultraviyole

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİNİN ÇOKLU FİZİK MODELLEMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, metal eklemeli imalat işleminin termal ve mekanik özellikleri, comsol çoklu fizik programında seçici lazer erime (SLM) yöntemiyle modellendi ve analiz edildi. Modellemede farklı fiziksel ögeler comsol çoklu fizik programında eş zamanlı çalıştırıldı. SLM işlemi, toz malzemenin lazer ışınlarıyla ergitilerek birbirine bağlanması esasına dayanır. Uygulamadaki en büyük problemler ergime sırasındaki ısı stres, boşluklar ve çarpımalardır. Bu uygulamanın en önemli kısmı, optimum tarama hızı ve lazer gücüyle malzeme ısı transferidir. Modelleme başta havacılık olmak üzere birçok sektörde kullanılan Ti6Al4V malzemesi için yapılmıştır. Ti6Al4V malzemesinin geleneksel imalat yöntemleriyle işlenmesi zor ve maliyetli olduğu için eklemeli imalat yöntemi geleneksel yöntemlere göre daha uygundur. Toz yerine yüksek çözünürlüklü katı yüzey kullanılmıştır. Lazer ışını yoğunluk dağılımı gauss biçiminde modellenmiştir. Farklı güç ve tarama hızı değerleri için, lazer ışını yüzey üzerinde hareket ettirilerek ısı transferi sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki deney sonuçları ile aynı koşullar altında karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda modelleme sonuçlarıyla literatürde yapılan deneysel sonuçların örtüştüğü görülmektedir. Bu çalışmanın amacı, işlenecek malzemeler için en uygun parametreleri bulmak ve ergime sırasındaki ısı gerilmeleri, boşlukları ve bozulmaları azaltmaktır. Bu modelleme işlem davranışını izlemesi ve kontrol edilmesi için önemlidir. Ayrıca bu çalışma ile SLM işleminde kullanılan veya yeni eklenecek olan malzemelerin çalışma parametrelerinin tahmin edilebileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Erime Derinliği, Katkı Maddesi Üretimi, Lazer Işını, Parametre Optimizasyonu, Seçici Lazer Ergitme

MODELLING OF SELECTIVE LASER MELTING PROCESS BY USING MULTIPLE PHYSICAL APPROACH

ABSTRACT

In this study, the thermal and mechanical properties of the powder bed fusion process were analyzed in COMSOL Multiphysics program by the selective laser melting (SLM) method. In modeling, different physical baskets were run simultaneously in the comsol multiphysics program. The SLM process is based on during the melting the powder material with laser beams. The biggest problems encountered in the application are thermal stress, gaps and distortions during melting. The most important part of this process is the heat transfer to the material with optimum laser power at the desired scanning speed. Modeling was made for Ti6Al4V material used in many sectors, especially aviation. Since the Ti6Al4V material is difficult and costly to process with conventional manufacturing methods, the additive manufacturing method is more suitable than conventional methods. In the modeling, the high resolution solid surface is used instead of powder. Laser beam intensity distribution is modeled in gaussian form. For different power and scanning speed values, the laser beam is moved over the surface and heat transfer is provided. The results obtained were compared under the same conditions as the experimental results in the literature. As a result of this comparison, it is seen that the modeling results overlap with the experimental results in the literature. The aim of this study is to find the most optimum parameters for the materials to be processed and to eliminate thermal stresses, gaps and distortions during melting. In this modelling, process behavior can be monitored and controlled. Also with this study, it is believed that the working parameters of the materials used in the SLM process or which will be added new can be predicted.

Keywords: Melt Depth, Additive Manufacturing, Laser Beam, Parameter Optimization, SLM

GİRİŞ

Dilimize eklemeli imalat olarak çevrilen “additive manufacturing” (AM) sürekli gelişen teknolojinin bir getirisi olup, üç boyutlu nesnelerin dijital modellerden üretilmesine olanak sağlar. Genellikle polimer, seramik veya metal gibi malzemelerin katmanlarını art arda yerleştirerek ürün imal eden bir üretim teknolojisi metodudur. Eklemeli üretim, çıkarma (ör. delme ve kesme) ve şekillendirme (ör. döküm, bükme ve kalıplama) içeren geleneksel talaşlı ve talaşsız üretim yöntemlerinin aksine, üretilecek olan üründe kullanılacak hammaddelerin toz, tel, reçine vb. (metal tozu, filament vb.) yapı taşlarını birleştirerek ürün imal eden bir direkt üretim yöntemidir. Günümüzün gelişen teknolojisi ve endüstriyel koşullarında yetersiz kalan geleneksel üretim yöntemleri eklemeli imalat (AM) gibi yeni üretim yöntemleri geliştirilmesine neden olmaktadır. Hızlı prototipleme, esnek çalışma, düşük enerji tüketimi, minimum sarf (atık) madde, diğer üretim yöntemleriyle üretilmeyecek farklı şekil ve geometriye sahip ürünlerin üretilmesi ve kullanım kolaylığı bu üretim metodunu diğer üretim yöntemlerinden ayıran en önemli özelliklerdir.

Eklemeli üretim, 3 boyutlu CAD verilerini kullanarak katmanlar halinde karmaşık geometriler üretmek için geliştirilmiş bir yöntemdir. Esnek üretim açısından geleneksel yöntemlerden daha avantajlıdır. Ancak, bu avantajı elde etmek için optimize edilmiş işlem parametreleriyle çalışmak çok önemlidir. Aksi takdirde, genel parça kalitesi, mekanik ve termal kusurlar nedeniyle düşük olabilir. Optimum parametrelerle üretilen parçalarda termal gerilmeler ve yapısal bozulma en aza indirilir ve verimlilik artırılır. Çalışma verimliliği ve esnekliği bakımından havacılık, biyomedikal ve enerji başta olmak üzere birçok sektörde kullanılmaktadır.

Başlangıçta sadece hızlı prototip üretmek için bir yol olarak düşünülen eklemeli üretim, günümüzde nihai bir ürün sunmak için gittikçe artan bir oranda kullanılmaya başlanılmaktadır. Son gelişmelerle eklemeli imalat makinelerinin hız ve performansındaki ilerleme, malzemelerin çeşitlendirilmesi, makine ve malzeme fiyatlarındaki düşüş bu teknolojiye olan ilgiyi daha da arttırmaktadır. Eklemeli imalat

şu anda dünya genelinde ülkelerin üretim geliştirme adına en fazla yatırım ve ar-ge çalışmasının yapıldığı alanların başında gelmektedir.

Bu çalışmada, endüstride en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olan toz yatağı füzyonu yöntemi comsol çoklu fizik programında modellenmiştir. Modellemede düşük yoğunluğu, yüksek sıcaklık özellikleri ve yüksek mukavemet / ağırlık oranı özellikleri nedeniyle malzeme olarak Ti6Al4V kullanılmıştır. Ti6Al4V, havacılık endüstrisinde en yaygın kullanılan malzemelerden biridir [1]. Toz yatağı füzyonu işleminde, enerji lazer ışınından toza aktarılır. Aktarılan enerji, yapı alanında ısıya dönüştürerek tozu eritir. Erimiş tozlar hedef geometriyi oluşturmak için alt katmanlarla birleşir. Bu işlem sırasında yüksek sıcaklık değişimleri ve hızlı faz dönüşümü nedeniyle bir sıcaklık gradyanı oluşur. Sıcaklık ve faz değişiminin parça kalitesi açısından kontrol edilmesi önemlidir. Bu sorunu çözmek için geçmişte farklı deneyler, matematiksel modeller ve simülasyonlar yapılmış ve buna benzer çalışmalar halen devam etmektedir.

Bu modellemede, malzemenin ısıl ve yapısal parametre değerleri sisteme sıcaklığın bir fonksiyonu olarak girildi ve kullanılacak malzeme modellendi. Comsol' un ısı transfer modülü modellemede kullanıldı. Lazer ışını yoğunluk dağılımı gauss biçiminde modellendi. Farklı güç ve tarama hızı değerleri için, lazer ışını yüzey üzerinde hareket ettirildi ve ısı transferi sağlandı. Modelleme Jonaet at. [1] deneysel çalışmasındaki benzer koşullarında çalıştırıldı ve elde edilen sonuçlar karşılaştırıldı.

Bu çalışmanın amaçları:

- (i) Lazer ışını ve malzemelerinin etkileşimlerini incelemek için bir model sunmak
- (ii) İşlenecek malzemeler için işlem parametrelerini optimize etmek ve ergime sırasındaki ısıl gerilmeleri, boşlukları ve çarpıklıkları ortadan kaldırmak
- (iii) Mevcut SLM işleminde kullanılan veya yeni eklenecek olan malzemelerin çalışma parametrelerinin tahmin etmek.
- (iv) Farklı güç ve hız değerlerinin birbiri ile olan ilişkisini ortaya koyarak birbirine uygun hız ve güç çalışma aralıkları sunmaktır.

Birinci bölümde literatür taraması ve genel bilgiler, tez konusu tanıtılmıştır. Literatürde yapılan benzer çalışmalar gözden geçirilmiştir. Eklemeli imalat yöntemleri ve bu yöntemlerin detaylı özellikleri sunulmuştur. Eklemeli imalatta kullanılan

malzemeler ve bu malzemelerin kullanıldığı alanlar tanıtılmaktadır. Eklemeli imalat süreci adım adım detaylı bir şekilde verilmektedir. Eklemeli imalat sürecinin temel kavramlarından bazıları bu bölümde tanıtılmaktadır. SLM'nin çalışma prensipleri tanıtılmaktadır.

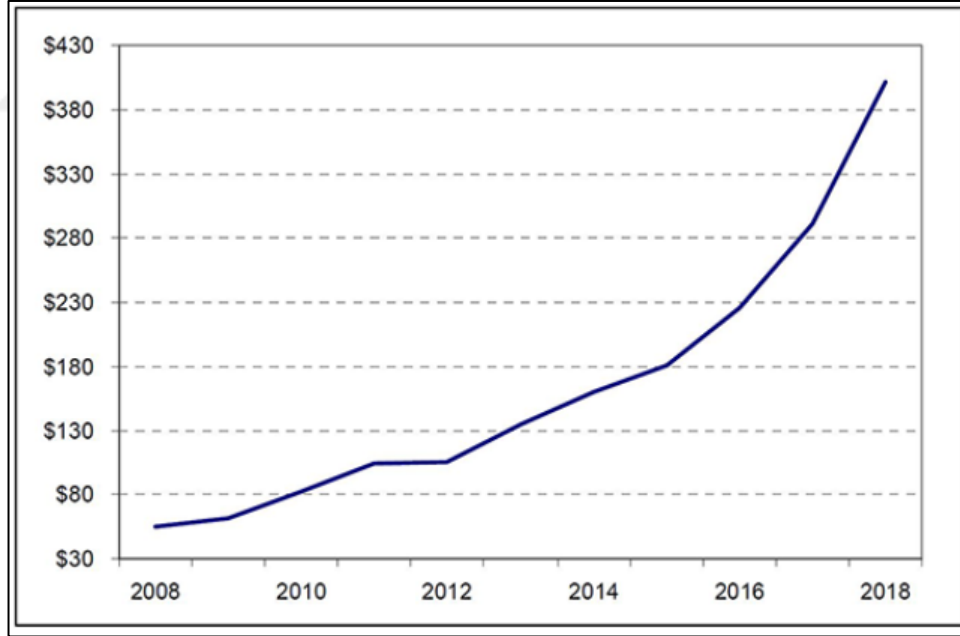
İkinci bölümde modelleme yaklaşımı, Ti6Al4V alaşımının modellemesi yapılmış ve özellikleri aktarılmıştır. Kullanılan lazer ısı kaynağı hakkında matematiksel modeli bu bölümde yapılmıştır. SLM işlemi sırasında oluşan toz, sıvı ve katı fazları arasındaki ilişki açıklanmıştır. Lazer ve malzeme arasında iletim, taşınım ve radyasyon oluşan ısı transferi modeli oluşturulmuştur. Sistemin çalışma parametreleri incelenmiş ve kullanılan metot tanıtılmıştır. Endüstriyel makinelerin çalışma parametreleri ile modellemede kullanılan parametreler karşılaştırılmıştır. Sistemde kullanılan tarama yörüngesi ve lazer ışın şiddeti gibi çalışma parametreleri bu bölümde sunulmuştur. Son olarak referans alınan makale de ki deneyin yapıldığı ortam ve kullanılan ekipmanlar tanıtılmıştır.

Üçüncü bölümde deneysel sonuçlar ve modelleme sonuçları, literatürden elde edilen deneysel sonuçlarla modelleme sonuçları kıyaslanmıştır. Kullanılan giriş parametrelerinin sistem üzerindeki etkileri incelenmiştir. 120, 150, 250 ve 400 Watt güç değeri için 750, 1000, 2000 ve 5000 mm/s hızlarda denemeler yapılmış elde edilen sonuçlar grafiklerle aktarılmıştır. Çıkış parametreleri ile giriş parametreleri arasındaki ilişki sunulmuştur.

Dördüncü bölümde sonuçlar ve öneriler, modelleme sonuçları yorumlanmış ve sistemin genel değerlendirmesi yapılmıştır. Ürün kalitesini etkileyen hata ve bozukluklara karşı öneriler sunulmuştur.

1. LİTERATÜR TARAMASI VE GENEL BİLGİLER

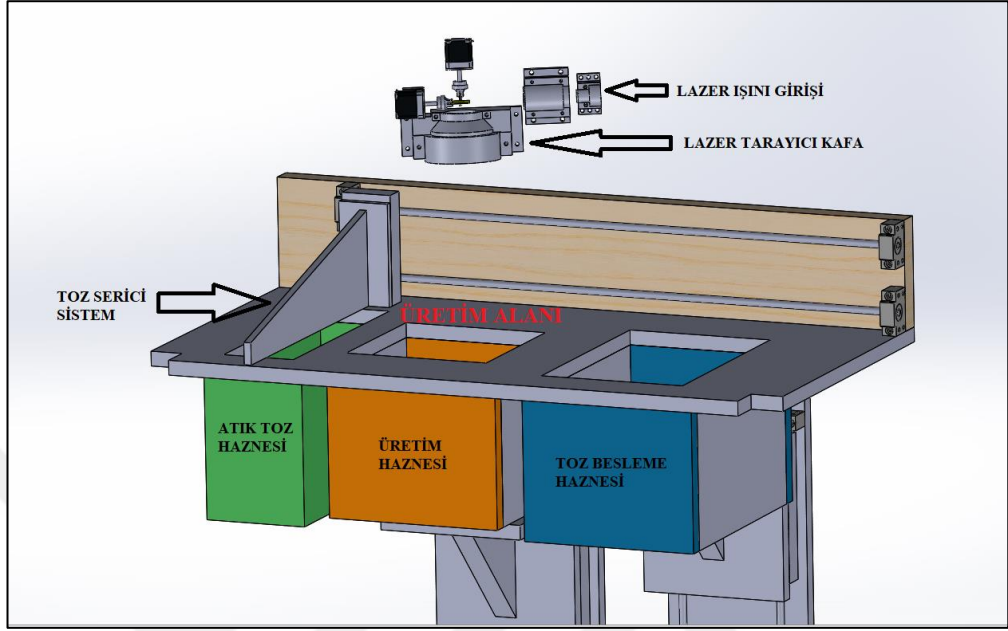
Wohlers raporu, eklemeli imalat konusunda sektör lideri olan ve bu alandaki gelişmeler ile analizlerin her yıl yayınlandığı rapordur. Her yıl küresel çalışmaların, eklemeli imalat malzemelerinin, uygulamaların, sistemlerin, hizmetlerin, tasarımların, yazılımların, patentlerin, standartların, yatırımın ve araştırmanın büyümesi, gelişmesi ve geleceği hakkında bir rapor yayınlamaktadır. Bu rapora göre, eklemeli imalatın genel malzeme alanında 2018 yılında endüstride rekor bir büyüme görülmüştür. Şekil 1.1. de gösterildiği gibi metallere elde edilen gelir %41,9 artarken, her yıl %40' dan fazla olmak üzere beş yıllık bir büyüme çizgisi sürdürmektedir. Wohlers topluluğu, malzeme tedarikçileri ve müşterileri arasındaki bu kadar sıkı bir etkileşimin olmasının, üretim uygulamalarında AM kullanımının artan bir göstergesi olduğunu söylemektedir [2].



Şekil 1.1. Wohlers raporuna göre yıllara göre toz yatağı füzyonu malzeme satışı oranları [2]

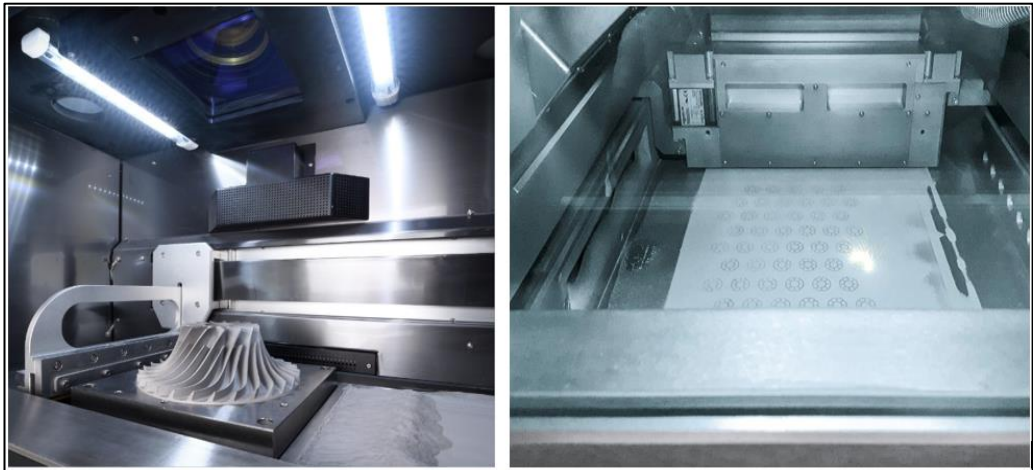
Seçici lazer eritme (SLM) teknolojisi metal 3 boyutlu üretim için en çok tercih edilen yöntemdir. Boyutsal parça doğruluğu, yüksek malzeme çeşitliliği, düşük artık malzeme oranı ve yüksek yoğunluk SLM teknolojisinin diğer yöntemlere göre öne çıkaran en önemli özelliklerdir. SLM makinesi genel olarak lazer güç ünitesi, tarayıcı

kafa ve serici sistem olmak üzere 3 bölümden oluşmaktadır. Bu bölümlerin şematik gösterimi şekil 1.2. de verilmiştir.



Şekil 1.2. Toz yatağı füzyonu makinesinin görüntüsü

SLM makinesi bu 3 bölüm birbirine uygun bir şekilde montaj edilerek oluşur. Genel olarak piyasadaki bütün makineler bu bölümlerden oluşur. Makineleri birbirinden ayıran kısım, kullandıkları yazılımlar ve bilgi birikimleridir. Makinenin verimli çalışabilmesi için önemli olan elemanların birbirine uyumlu çalışması ve doğru çalışma parametrelerini kullanmasıdır. Şekil 1.3. te toz yatağı füzyonu makinesinin üretim alanı gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Toz yatağı füzyonu makinesi üretim alanı [3, 4]

SLM işleminde ergitme ve sıcaklık davranışını araştırmak için kullanılan en yaygın sayısal yöntem sonlu elemanlar yöntemidir [1]. Yadroitsev ve diğ. [5] Ti6Al4V alaşımı şeklinin sıcaklık özelliklerini farklı lazer gücünde ve tarama hızında seçici lazer ergitme ile analiz ettiler. Jonaet ve diğ. [1] maksimum sıcaklıkları karşılaştırmak için sonlu elemanlar modellemesi ve deneyi geliştirdi. Leuders ve diğ. [6] seçici lazer ergitme ile işlenen bir TiAl6V4 alaşımı için döngüsel yükleme altında gözenek ve artık gerilmelerin, mikro yapı ve çatlak büyümesiyle olan ilişkisini inceledi. Fischer ve diğ. [7] sürekli dalganın ve darbe atımlı lazer sinterleme işleminin maksimum sıcaklığını ölçmek için deneysel araştırmalar yaptılar. Song ve diğ. [8] Ti6Al4V parçası için işlem parametrelerin yoğunluğa, mikro sertliğe ve yüzey pürüzlülüğüne etkisini araştırdı ve bu nedenle sayısal bir analiz ve deneysel çalışma gerçekleştirdi. Dilip ve diğ. [9] işlem parametrelerinin dökme parçalardaki gözeneklilik ve mikro yapılardaki ilişkilerini ve ergime havuzundaki tek iz yataklarındaki davranışlarını analiz ettiler. Sun ve diğ. [10] deneysel tekniğin istatistiksel tasarımı olarak seçilen parametreleri optimize etmek için Taguchi yöntemi kullandı ve yoğunluk, lazer gücü, tarama hızı, toz kalınlığı ve tarama stratejisi arasında doğrusal ilişki olduğunu ifade eden bir regresyon denklemi ortaya koydu. Lee ve Zhang [11] Ayrık Elementler Metodu ve üç boyutlu bir geçici ısı ve akışkan akış simülasyonuna dayanan bir ergime havuz modeli sundu. Ali ve diğ. [12] tabaka kalınlığının, farklı lazer gücünün Ti6Al4V bileşenleri üzerindeki termal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini analiz etti. Gusarov ve diğ. [13] yerel bir sıcaklık alanı sağlayan birleştirilmiş radyasyon transferi ve termal difüzyon için bir model önerdi ve tarama hızının toz erimesi üzerine etkilerini inceledi. Fu ve Guo [14] SLM'de Ti6Al4V 'nin çok katmanlı birikimini simüle etmek için üç boyutlu bir sonlu eleman simülasyon modeli geliştirdi. Ergime havuzu şekli ve boyutları tahmin etti ve deneysel olarak doğruladı. Ayrıca, proses parametreleri ve materyallerinin eritme prosesi üzerindeki etkileri değerlendirdi. Kruth ve diğ. [15] termal gerilmeleri basit ve hızlı bir şekilde değerlendirmek için yeni bir pragmatik yöntem geliştirdi ve bu yöntemi, farklı lazer tarama modellerinin, lazer parametre ayarlarının ve daha temel proses değişikliklerinin artık gerilmeler üzerindeki etkisini değerlendirmek ve niteliksel olarak karşılaştırmak için kullandı.

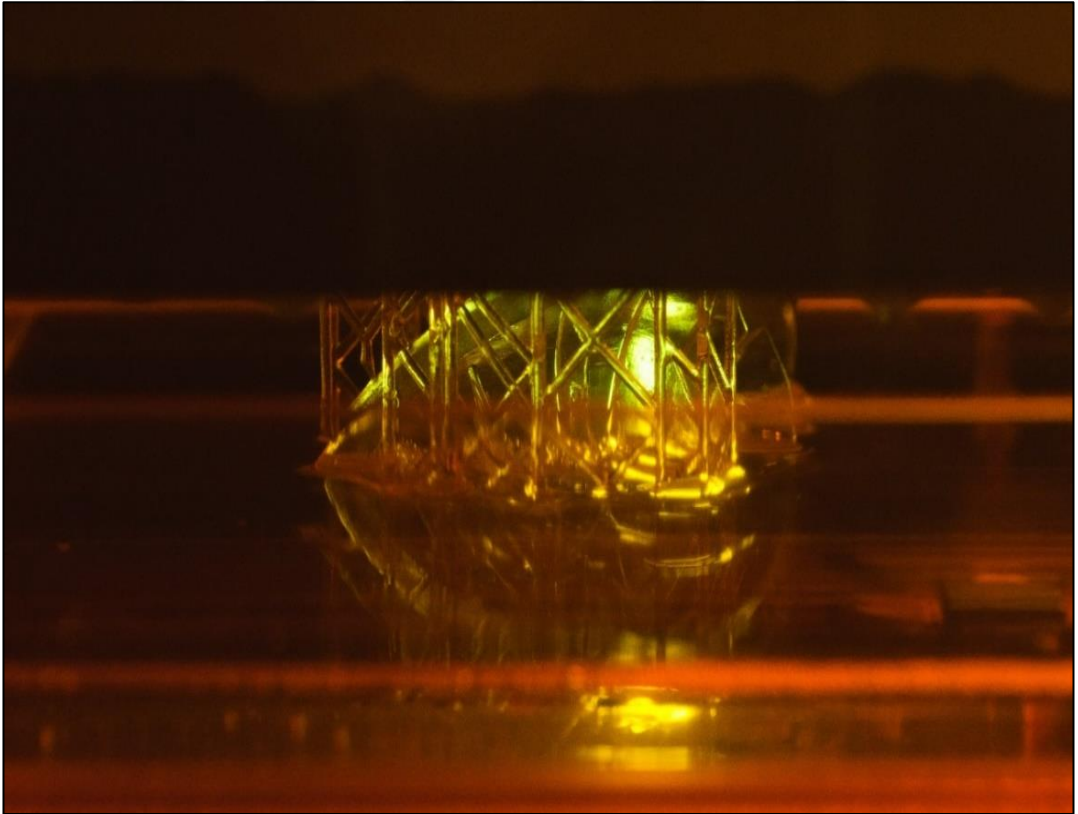
1.1. Eklemeli İmalat Yöntemi Çeşitleri

Belirli bir tasarım için en uygun eklemeli üretim prosesini seçmek genellikle zor olabilir. Geniş 3D baskı yöntemleri ve materyalleri, genellikle birçok işlem için uygundur, ancak her biri boyutsal doğruluk, yüzey bitirme veya işleme sonrası gerekliliklerde değişiklikler sunar.

Bu bölümde katma değerli üretim teknolojileri arasındaki farkı kategorize edilerek açıklanmaktadır. En yaygın eklemeli imalat üretim yöntemlerini ve bu yöntemlerin her biri ile ilgili en yaygın uygulamalar ve malzemelerle birlikte tanımlanmaktadır.

1.1.1. Foto polimerizasyonu

Foto polimerizasyon, bir fotopolimer reçinesinin belirli bir dalga boyundaki ışığa maruz bırakılması ve katı hale gelmesi için kimyasal reaksiyona girmesi durumunda oluşur. Bu olay eklemeli imalatta bir katmanın oluşturmak için kullanılır. Şekil 1.4. te SLA baskı yöntemi gösterilmektedir. Katmanların birbirine eklemesiyle ürün üretilir.



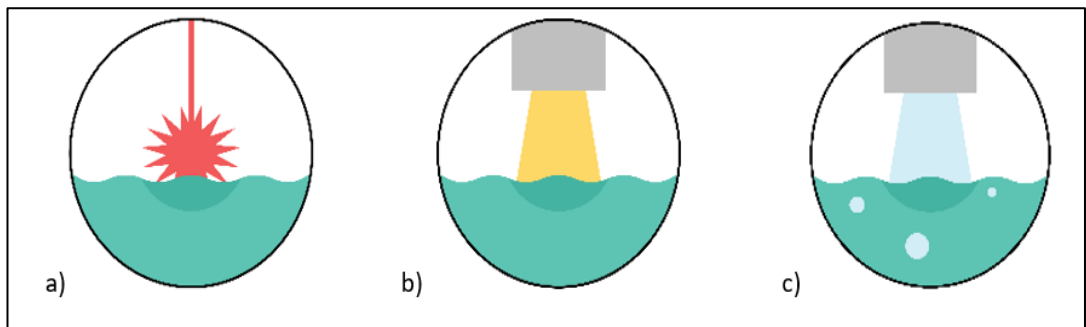
Şekil 1.4. SLA baskı yöntemi [16]

Kullanılan Teknolojiler

Stereolitografi (SLA), sıvı foto polimer reçinesi ile dolu yarı saydam bir tanka batırılmış bir yapı platformu kullanır. İnşaat platformu batırıldıktan sonra, makinenin içinde bulunan tek nokta lazer, malzemenin katılaşması için tank tabanından bir tasarımın kesit alanını (katmanı) noktalar şeklinde lazerle işler. Katman lazerle haritalanır ve katılaştırıldıktan sonra, platform yukarı kaldırılır. Parçanın altında yeni bir reçine tabakası akışı sağlar. Bu işlem katı bir parça üretmek için tabakaya sürekli tekrarlanır. Mekanik özellikleri iyileştirmek için parçalar genellikle UV ile sertleştirilir.

Doğrudan ışık işleme (DLP), SLA 'ya kıyasla parçaları üretmek için hemen hemen aynı yöntemi izlemektedir. Başlıca fark, DLP 'nin her katmanı tek seferde göstermek için bir dijital ışık projektör ekranı kullanmasıdır. Projektör dijital bir ekran olduğu için, her tabakanın görüntüsü kare piksellerden oluşur ve voksel olarak adlandırılan küçük dikdörtgen yapılardan oluşan bir tabaka oluşturur. DLP, bazı bölümler için SLA 'ya kıyasla daha hızlı yazdırma süreleri elde edebilir. Zira kesit alanının tamamını bir lazerle izlemek yerine her bir katmanın tümünü bir kerede ortaya çıkarır.

Sürekli doğrudan ışık işleme (CDLP), DLP ile aynı şekilde parçalar üretir, ancak yapı plakasının Z yönünde (yukarı doğru) sürekli hareketine dayanır. DLP ile benzer şekilde projektör kullanılır. Görüntüler videoya benzer şekilde seri bir şekilde işlenir. Bu yazıcının, her tabaka üretildikten sonra parçayı yapı plakasından durdurması ve ayırması gerekmediğinden, daha hızlı üretim sağlar. Şekil 1.5. te foto polimerizasyon yönteminde kullanılan teknolojiler gösterilmektedir.



Şekil 1.5. a) SLA b) DLP c) CDLP [5]

Uygulamalar

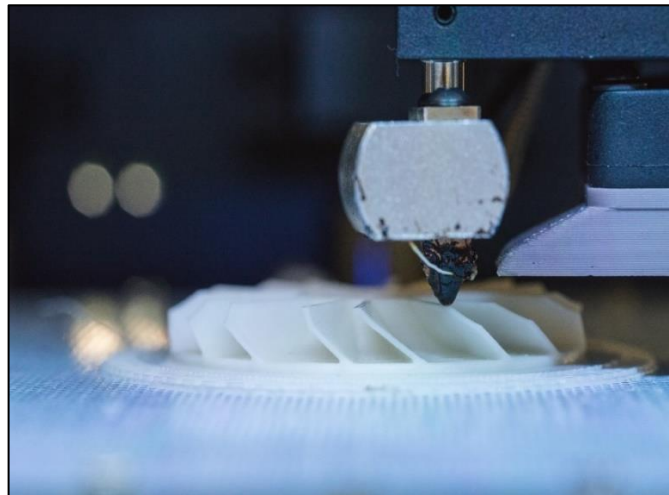
Foto polimerleştirme işlemleri, ince detaylara sahip parçalar üretmekte mükemmel ve pürüzsüz bir yüzey kalitesi sağlar. Bu özellik, mücevherat, enjeksiyon kalıbı ve birçok diş ve tıbbi uygulamalar için ideal kılar. Tablo 1.1. de foto polimerizasyonu makine üreticileri ve kullanılan malzemeler gösterilmiştir. Foto polimerizasyonun başlıca sınırlamaları, yapı büyüklüğü ve parça mukavemetidir.

Tablo 1.1. Foto polimerizasyonu üreticiler ve kullanılan malzemeler [16]

Teknoloji	Önde Gelen Üreticiler	Malzemeler
SLA	Formlabs, 3D Systems, DWS	Standart, sert, esnek, şeffaf ve dökülebilir reçineler
DLP	B9 Creator, MoonRay	Standart ve dökülebilir reçineler
CDLP	Carbon3D, EnvisionTEC	Standart, sert, esnek, şeffaf ve dökülebilir reçineler

1.1.2. Malzeme ekstrüzyonu

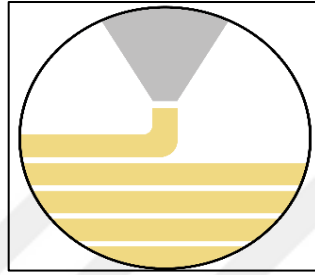
Diş macununun bir tüpten nasıl sıkıldığına benzer şekilde, malzeme ekstrüzyon teknolojileri, bir materyali bir meme vasıtasıyla bir yapım plakası üzerine iter. Belirli bir yol takip edilerek tabaka kat kat artar. Şekil 1.6. da gösterildiği gibi bu teknolojiye termoplastik malzeme ısıtmalı bir memeden önceden belirlenmiş bir yola doğru iterek parçaları oluşturur. Şu an dünya çapında en çok kullanılan eklemeli imalat çeşididir.



Şekil 1.6. FDM makinesi [5]

Kullanılan Teknolojiler

Eriyik biriktirme modellendirme (FDM), katı bir termoplastik malzeme (filament) dizisini ısıtılmış bir memeden iterek işlem sırasında eritir. Yazıcı, bu erimiş durumdaki malzemeyi katman planı doğrultusunda soğuyarak katılaşacağı yere bırakır. Bu işlem tekrarlanarak katmanlar üst üste eklenerek parça oluşturulur. Şekil 1.7. de gösterilen FDM, en yaygın kullanılan 3D yazdırma teknolojisidir.



Şekil 1.7. FDM [16]

Uygulamalar

Fonksiyonel olmayan prototipler üretmek için hızlı ve uygun maliyetli yöntemdir. Tablo 1.2. de malzeme ekstrüzyonu makine üreticileri ve kullanılan malzemeler gösterilmiştir. FDM, boyutsal doğruluk sınırlamaları vardır, sıcaklığa karşı dirençsizdir ve çok anizotropiktir.

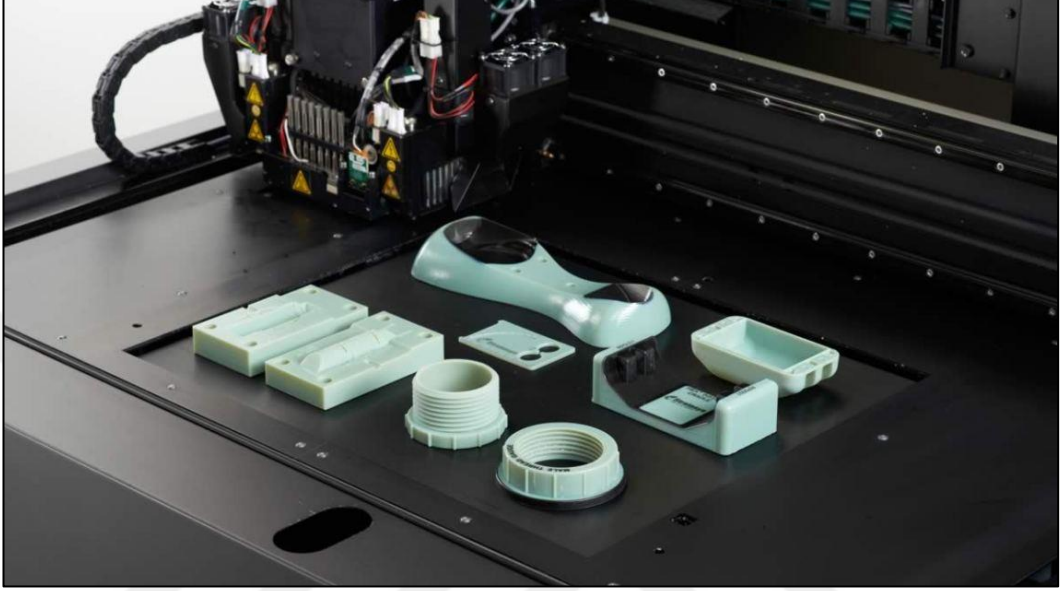
Tablo 1.2. Malzeme ekstrüzyonu üreticiler ve kullanılan malzemeler [16]

Teknoloji	Önde Gelen Üreticiler	Malzemeler
FDM	Stratasys, Ultimaker, MakerBot, Markforged	ABS, PLA, Naylon, PC, fiber takviyeli Naylon, ULTEM, egzotik filamentler (ahşap dolgulu, metal dolgulu vb.)

1.1.3. Malzeme püskürtme

Malzeme püskürtme çoğu zaman 2D mürekkep püskürtme işlemiyle karşılaştırılır. Malzeme Püskürtme, bir sıvı reçinenin küçük damlacıklarını biriktirir ve daha sonra nesne katmanını tabaka halinde oluşturmak için UV ışığı ile sertleştirir. Işık ya da yüksek sıcaklığa maruz kalındığında sertleşen ya da sertleştiren foto polimerleri,

metalleri ya da mumları kullanarak katmanı oluşturur. Malzeme Püskürtme 3D baskı, parçaların çok malzemeli bir şekilde hassasiyetle ve minimum malzeme israfıyla üretilmesini sağlar. Şekil 1.8. de bu teknoloji ile üretilen parçalar gösterilmiştir. Tıbbi modeller, prototipler ve döküm kalıpları için kullanılır.



Şekil 1.8. Malzeme püskürtme makinesi ile üretilen bazı parçalar [17]

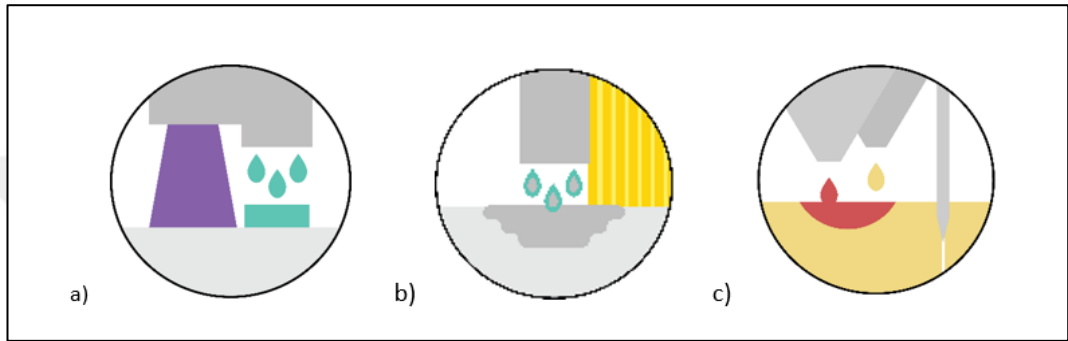
Kullanılan Teknolojiler

Malzeme püskürtme, bir bölüm katman oluşturmak için bir yazıcı kafasındaki yüzlerce minik memeden damlacıklar halinde foto polimer dağıtır. Bu damlacıklar yapı platformuna biriktirildiklerinde UV ışığı kullanılarak kürenir ve katılırlar. Bu şekilde katman oluşur. Bu işlem tekrarlanarak parça oluşturulur.

Nano parçacık püskürtme (NPJ), metal nanopartiküller içeren veya nanopartikülleri destekleyen bir kartuş olarak yazıcıya yüklenen ve son derece ince damlacık katmanlarında yapı tablasına püskürtülen bir sıvı kullanır. Püskürtme işlemi sırasında yüksek sıcaklıklar sıvıların buharlaşmasına neden olur ve geri kalan metal partiküller katmanı oluşturur.

DOD (gerekli nokta üzerine damlatmak) malzeme püskürtme yazıcıları, yapı malzemelerinin (tipik olarak mum benzeri bir malzeme) biriktirilmesi ve çözünebilir destek malzemesi olmak üzere 2 farklı püskürtmeye sahiptir. Geleneksel AM

tekniklerine benzer şekilde DOD yazıcıları, bir bileşen bir katmanını üretmek için püskürtme kafası yapı alanında noktasal şekilde belirli bir yolu takip eder. Bu makinelerde, bir sonraki katmanı yazdırmadan önce mükemmel düz bir yüzey elde etmek için her katın üretilmesinden sonra yapım alanı kayganlaştırıcı sıvı ile düzeltilir. DOD teknolojisi tipik olarak döküm kalıp modeller üretmek için kullanılır. Bu teknolojiye birden fazla farklı malzeme kullanılabilir. Şekil 1.9. da malzeme püskürtme yönteminde kullanılan teknolojiler gösterilmektedir.



Şekil 1.9. a) Malzeme püskürtme b) Nano partikül püskürtme c) DOD [5]

Uygulamalar

Malzeme püskürtme, mükemmel detaylar, yüksek doğruluk ve pürüzsüz yüzey kalitesi sağlayan gerçekçi prototipler için idealdir. Malzeme püskürtme, bir tasarımcının bir tasarımın birden çok renkte ve bir dizi materyalde tek bir baskıda yazdırılmasını sağlar. Tablo 1.3. te malzeme püskürtme makine üreticileri ve kullanılan malzemeler gösterilmiştir. Malzeme püskürtme teknolojileri ile basımın en büyük sakıncaları yüksek maliyet ve UV ile aktive edilen foto polimerlerin mekanik özelliklerini zamanla kaybedilmeleridir.

Tablo 1.3. Malzeme püskürtme üreticiler ve kullanılan malzemeler [16]

Teknoloji	Önde Gelen Üreticiler	Malzemeler
Malzeme püskürtme	Stratasys (Polyjet), 3D Systems (MultiJet)	Sert, şeffaf, çok renkli, kauçuk benzeri, ABS benzeri. Çok malzemeli ve çok renkli baskı mevcut
NPJ	Xjet	Paslanmaz çelik ve seramik
DOD	Solidscape	Wax

1.1.4. Yapıştırıcı püskürtme

Toz parçacıklarını birleştirmek için seçici bir şekilde bir sıvı bağlama maddesinin biriktirildiği bir eklemeli imalat üretim prosesidir. Bir parça oluşturmak için toz serilir ardından yapıştırıcı madde püskürtülerek tozlar birleştirilir. Metaller, kumlar ve seramikler dahil olmak üzere çeşitli malzemeleri basabilir. Kum gibi bazı malzemeler ilave işlem gerektirmez. Diğer malzemeler tipik olarak sertleştirilir ve sinterlenir. Katı metallere yüksek yoğunluklara ulaşmak için sıcak izostatik presleme kullanılabilir. Geleneksel kağıtlara basmaya benzer. Bağlayıcı, mürekkep gibi işlev görür ve toz gibi son katmanı oluşturan toz katmanları boyunca hareket eder. Çok büyük nesnelere basma özelliğine sahiptir. Oda büyüklüğündeki mimari yapılar basılmıştır. Şekil 1.10. da ExOne firmasının yapıştırıcı püskürtme makinesi gösterilmiştir.

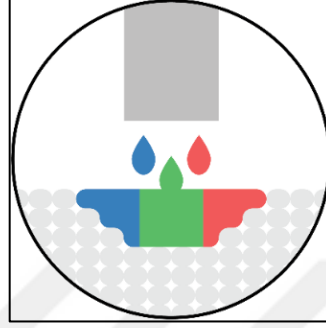


Şekil 1.10. ExOne firmasının yapıştırıcı püskürtme makinesi [17]

Kullanılan Teknolojiler

Yapıştırıcı püskürtme, baskı kafası parçayı oluşturan bir kesit alanı (katmanı) üretmek için ortalama 80 mikron çapında bağlayıcı damlacıkları biriktiren baskı yüzeyinin üzerinde hareket eder. Bir katman basıldıktan sonra toz yatağı indirilir ve yeni bir toz katmanı son basılan katmanın üzerine yayılır. Bu işlem katı bir parça oluşana kadar

tekrarlanır. Parça daha sonra iyileşmek ve güç kazanmak için tozda kalır. Bundan sonraki kısımda toz yatağından çıkarılır ve bağlı olmayan toz basınçlı hava vasıtasıyla uzaklaştırılır. Bağlayıcı macununun en önemli avantajlarından biri de nozulların karmaşık geometrilere çok sayıda renkte baskı yapılmasına izin veren renk içerebilmesidir. Şekil 1.11. de yapıştırıcı püskürtme şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.11. Yapıştırıcı püskürtme [16]

Uygulamalar

Bağlayıcı püskürtme, estetik ve form vitrini uygulamaları, mimari modeller, ambalajlama, ergonomik doğrulama vb. uygulamalar için uygundur. Tablo 1.4. te yapıştırıcı püskürtme makine üreticileri ve kullanılan malzemeler gösterilmektedir. Genellikle bağlayıcı veya tutkal bağlantısının kırılma doğası nedeniyle yüklerin uygulandığı fonksiyonel uygulamalar için uygun değildir.

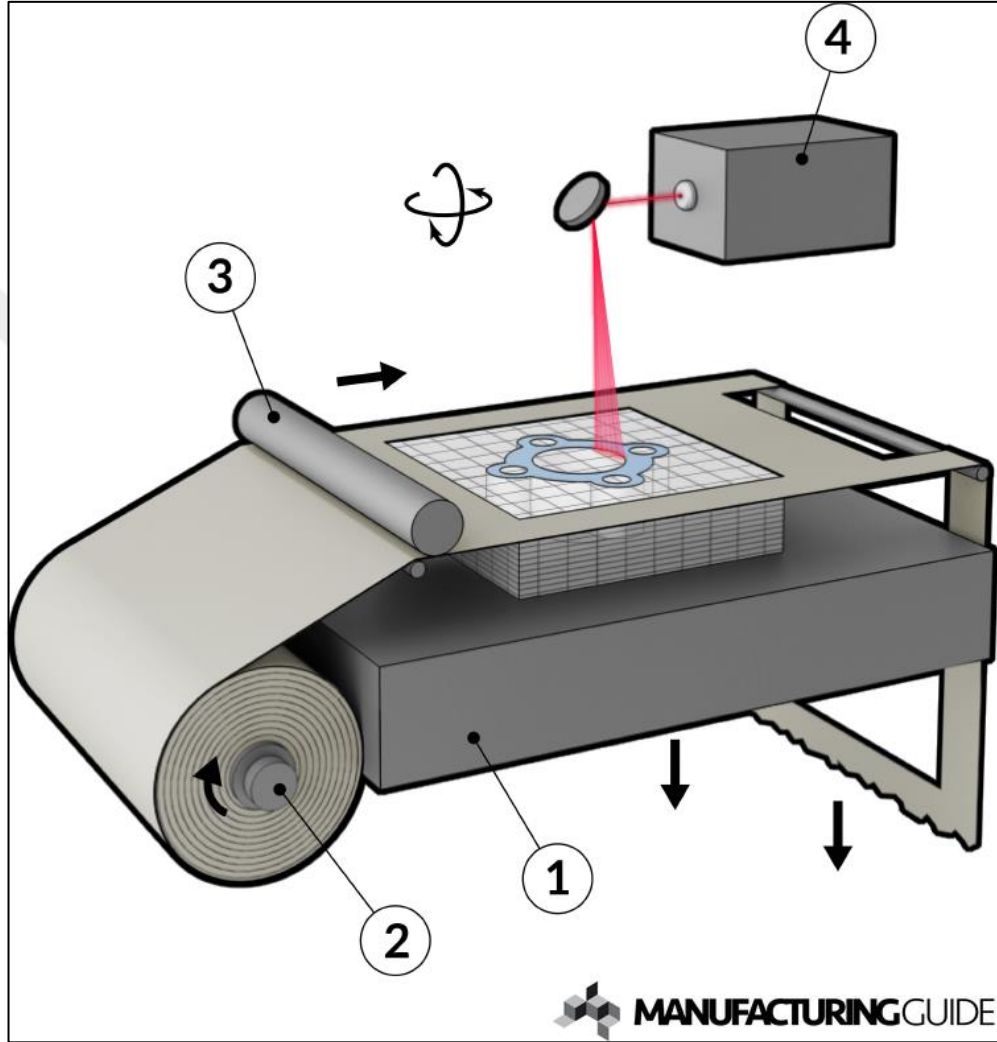
Tablo 1.4. Yapıştırıcı püskürtme üreticiler ve kullanılan malzemeler [16]

Teknoloji	Önde Gelen Üreticiler	Malzemeler
Yapıştırıcı püskürtme	3D Systems, Voxeljet	Silika kumu, PMMA parçacık malzemesi, alçıtaşı
Yapıştırıcı püskürtme	ExOne	Paslanmaz çelik, seramik, kobalt-krom, tungsten-karbid

1.1.5. Tabaka laminasyonu

Tabaka laminasyon, genellikle besleme makaraları sistemi ile ince malzeme tabakalarının 3 boyutlu bir nesneyi oluşturmak üzere kesilerek tabaka tabaka birleştirildiği bir eklemeli üretim (AM) metodolojisidir. Üretilen parça saç

kalınlığına göre dilimlenir ve malzeme kesme yatağına üzerine yerleştirilir. Üretilecek parçayı oluşturacak katmanlar CAD dosyasında oluşturulduğu gibi bıçak veya lazerle kesilir. Katmanlar birbirine yapıştırıcı veya ultrasonik kaynak ile bağlanır. Şekil 1.12. de tabaka laminasyonu çalışma mekanizması gösterilmiştir. Bu işlem parça üretilene kadar sürekli malzeme akışı ve defalarca kesme işlemi şeklinde devam eder [18].



Şekil 1.12. Tabaka laminasyonu çalışma mekanizması [18]

Kullanılan Teknolojiler

Lamine nesne üretimi (LOM), çeşitli kağıt malzemelerinden üretilen ilk katkı maddesi üretim tekniklerinden biridir. Avantajlar arasında, kolayca bulunabilen ve ucuz olan A4 kağıdın yanı sıra, diğerlerine kıyasla nispeten basit ve ucuz bir kurulum bulunur.

Ultrasonik katkı maddesi üretimi (UAM) işlemi, ultrasonik kaynak kullanarak birbirine bağlanmış metal tabakalarını kullanır. İşlem, bağlanmamış metalin ilave CNC işlemlerini gerektirir. LOM 'dan farklı olarak, metal elle kolayca çıkarılamaz ve istenmeyen malzemeler işlenerek çıkarılmalıdır. Frezeleme, her katman eklendikten sonra veya işlemin tamamından sonra gerçekleşebilir. Kullanılan metaller alüminyum, bakır, paslanmaz çelik ve titanyumdur. İşlem düşük sıcaklıktadır ve iç geometrilerin oluşturulmasını sağlar. Bir önemli avantaj, işlemin farklı malzemeleri bağlayabilmesi ve metalin ergimemesi nedeniyle nispeten az enerji gerektirmesidir, bunun yerine ultrasonik frekans ve basınç kombinasyonu kullanılır

Uygulamalar

Tabaka laminasyon, daha az hassas eklemeli imalat yöntemlerinden biridir. Genellikle işlevsel olmayan prototipler, döküm kalıpları ve kolay işlenebilen malzemelerden yapılan diğer basit tasarımları 3D baskı için hızlı ve düşük maliyetli bir yol olarak kullanılırlar. Yapı malzemelerinin baskının ortasında değişmesine izin verdiği için, kompozit malzemeler yapmak için tabaka laminasyonu da kullanılır.

Çok fazla tercih edilen bir yöntem olmayan tabaka laminasyonun da genellikle kâğıt, haddelenebilecek herhangi bir sac malzeme ve plastik malzemeler kullanılır.

1.1.6. Direk enerji depolama

Doğrudan enerji depolaması (DED), tozun aksel hareketli nozul (kafa) aracılığıyla malzemenin çökeceği alana enerjiyle birlikte uygulanması işlemidir. Bu şekilde toz yayılmadan alt tabakayla birleşir. Ağırlıklı olarak metal tozları veya tel ile kullanılır. Metal eklemeli yazıcılara göre üretim hızı yüksektir. İnşa boyutu sınırı üretim kafanın aksel hareket mesafesiyle sınırlıdır. Diğer üretim yöntemleriyle birlikte kullanılabilir. Hibrit kullanıma uygundur. Aşağıdaki şekil 1.13. da mazak firmasının ürettiği CNC ve AM hibrit makine gösterilmiştir. Şekil 1.14. te Beam DED makinesi lazerli Üretim kafası gösterilmiştir.



Şekil 1.13. Mazak hibrit çoklu-görev makinesi [19]

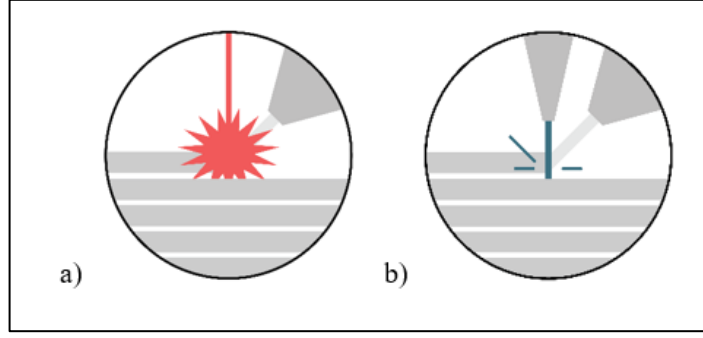


Şekil 1.14. Beam DED Makinesi lazerli Üretim kafası [20]

Kullanılan Teknolojiler

Lazerle tasarlanmış ağ şekli (LENS) teknolojisi, kat olarak katı bir parça tabakası oluşturacak şekilde toz eritmek için lazer gücünü kullanır. Lazer ışını, toz püskürtücü ve atıl gaz borularından oluşan bir çökme kafasını kullanır. Alt tabaka, tipik olarak, parçanın üzerine konduğu yassı bir metal plaka veya malzemenin eklendiği mevcut bir kısımdır. Lazer inşaat alanında erimiş bir havuz oluşturur ve toz püskürterek ergitilir ve daha sonra katılır.

Elektron demeti katkı maddesi imalatı (EBAM), metal tozu ve bir elektron demeti ısı kaynağı olarak erime havuzu oluşturmak için kullanılır. LENS 'e benzer bir şekilde parça üreten elektron demetleri lazerlere göre daha verimli ve başlangıçta uzayda kullanılmak üzere tasarlanmış olan teknoloji ile vakum altında çalışır. Şekil 1.15. te DED yönteminde kullanılan teknolojiler gösterilmektedir.



Şekil 1.15. a) LENS b) EBAM [16]

Uygulamalar

DED teknolojileri sadece metal katkılı üretimde kullanılır. Prosesin doğası, var olan bileşenlerin (türbin bıçakları gibi) tamir edilmesi veya materyal eklenmesi için idealdir. Tablo 1.5. te DED makine üreticileri ve kullanılan malzemeler gösterilmiştir. Otomotiv , havacılık ve biomedikal alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

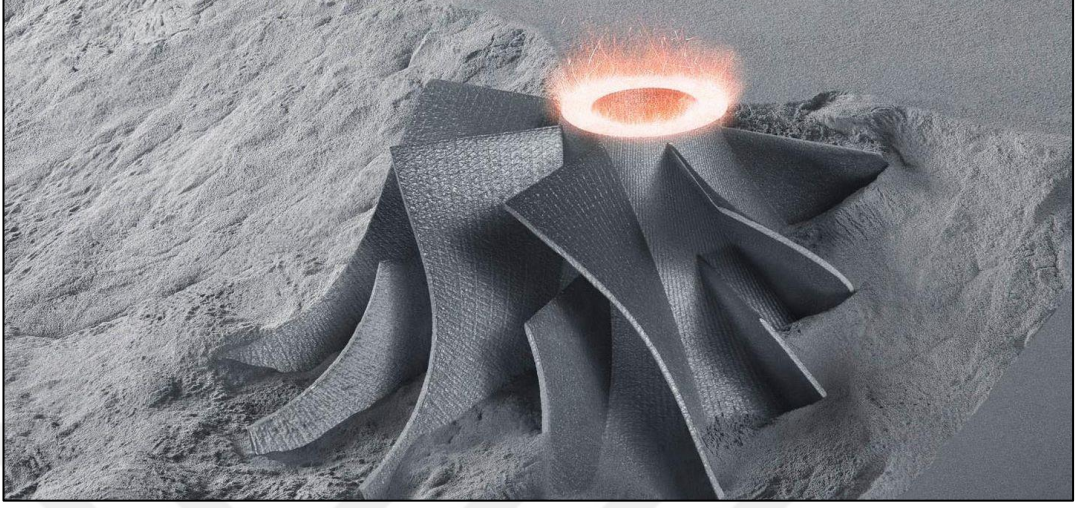
Tablo 1.5. DED üreticiler ve kullanılan malzemeler [16]

Teknoloji	Önde Gelen Üreticiler	Malzemeler
LENS	Optomec	Titanyum, paslanmaz çelik, alüminyum, bakır, takım çeliği
EBAM	Sciaky inc	Titanyum, paslanmaz çelik, alüminyum, bakır nikel, 4340 çelik

1.1.7. Toz yatağı füzyonu

Toz yatağı füzyon (PBF) teknolojileri, bir katı parça üretmek için toz parçacıkları ile bir inşaat alanı öngörülen bir bölgeye ergime sağlamak için termal bir kaynak kullanmaktadır. PBF teknolojilerindeki ana çeşitlemeler, farklı enerji kaynaklarından (lazerler veya elektron ışınları) ve süreçte kullanılan tozlardan (plastik veya metaller) kaynaklanmaktadır. Toz yatağı füzyon (PBF) yöntemleri, malzeme tozunu ergetmek ve birleştirmek için bir lazer veya elektron ışını kullanır. Tüm PBF uygulamaları, toz malzemenin önceki katmanlara yayılmasını içerir. Bunu bir merdane veya bir bıçak gibi mekanizmalarla yapar. İnşaat alanı haznesi katmanlar işlendikçe katman kalınlığı kadar aşağıya doğru hareket ederek yeni toz katmanının serilmesine izin verir. Bu

işlem parça oluşana kadar devam eder. Şekil 1.16. da trumpf makinesi üretim alanı gösterilmiştir. Metal endüstride en yaygın kullanılan yöntemdir.



Şekil 1.16. Trumpf makinesi üretim alanı [21]

Kullanılan Teknolojiler

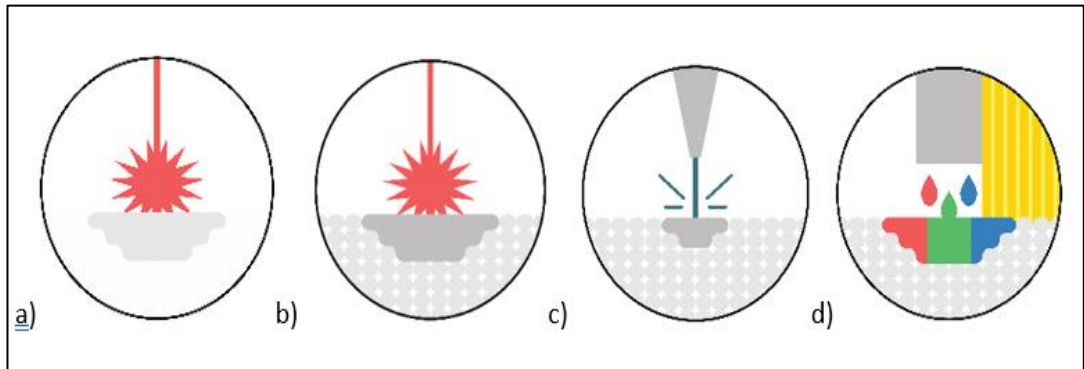
Seçici Lazer Sinterleme (SLS), katı bir yapı oluşturmak için bir kerede bir katman halinde toz halindeki ince tabakaları sinterlemek için bir lazer kullanır. İşlem, bir yapı platformunun üzerine ilk toz tabakasını yayarak başlar. Parçanın kesiti daha sonra lazerle sinterlenir (katılaştırır), yapı platformu bir katman kalınlığında düşer. Yeni bir toz tabakası uygulanır ve süreç katı bir parça üretilene kadar tekrarlanır. Bu işlemin sonucunda oluşan parça tamamen toza gömülü bir şekilde bulunur. Parça tozdan alınır ve daha sonra basınçlı hava temizlenir. Endüstride, SLS genellikle tozdan naylon (bazen seramik) parçalar üretmek için kullanılan sinterleme sürecini ifade eder.

Seçici lazer eritme (SLM), diğer adıyla metal lazer sinterleme (DMLS), SLS ile aynı yöntemi kullanarak parçalar üretir. Temel fark, SLM ve DMLS'nin metal parçaların üretiminde kullanılmasıdır. SLS'nin aksine, SLM ve DMLS, oluşturma işlemi sırasında oluşan yüksek kalıcı gerilmeleri dengelemek için bozulmanın meydana gelme ihtimalini sınırlamaya yardımcı olmak için destek yapılar gerektirir. SLM, en büyük kurulu tabana sahip en iyi yerleşmiş metal AM sürecidir.

Elektron ışını eritme (EBM), diğer PBF teknolojilerinin aksine, metal toz parçacıkları arasında füzyonu başlatmak için bir lazer yerine bir yüksek enerjili elektron ışınlarını

kullanır. Odaklanmış bir elektron demeti ince bir toz katmanı boyunca tarar ve belirli bir kesit alanı üzerinde lokal eritme ve katılaşmaya neden olur. Bu katmanlar katı bir parça oluşturmak üzere inşa edilir. Elektron demeti sistemleri parçalarda daha az kalıntı stres üretir, daha az distorsiyona (bozulma) ve ankraj (destek yapılarına) ihtiyaç duyulur. EBM daha az enerji kullanır ve SLS 'den daha hızlı bir katman üretebilirken minimum özellik boyutu, toz parçacık boyutu, katman kalınlığı ve yüzey kaplaması tipik olarak daha büyüktür. EBM parçaları da vakum içinde üretilir ve işlem sadece iletken malzemelerle kullanılabilir.

Çoklu Jet Füzyonu (MJF), proses olarak SLS ve malzeme püskürtme teknolojilerinin bir kombinasyonudur. Mürekkep püskürtmeli püskürtme uçlarına sahip bir taşıyıcı (masaüstü 2D yazıcılarda kullanılan püskürtme uçlarına benzer şekilde) baskı alanından geçer ve kaynaştırma maddesini ince bir plastik toz tabakasına biriktirir. Aynı zamanda, sinterlemeyi engelleyerek çözünürlüğü artıran bir detaylandırma maddesi, parçanın kenarına yakın bir yere basılır. Yüksek güçte bir IR enerji kaynağı daha sonra yapım yatağının üzerinden geçer ve kaynaştırıcı maddenin dağıtıldığı bölgeleri birbirine bağlarken tozun geri kalan kısmında herhangi bir aktivasyon olmaz. İşlem tüm parçalar tamamlanıncaya kadar tekrar eder. Parça tamamlanınca çarpılmaların oluşmaması için yavaş bir şekilde soğumaya bırakılır. Şekil 1.17. de toz yatağı yönteminde kullanılan teknolojiler gösterilmektedir.



Şekil 1.17. a) SLS b) SLM c) EBM d) MJF [16]

Uygulamalar

PBF teknolojileri, karmaşık geometrilerin kolayca oluşturulmasına olanak tanıyan çok sayıda tasarım özgürlüğü sunar. Genellikle destek gerektirmez. Üretilen parçalar

genellikle geniş bir yelpazedeki son işlem yöntemleri ile yüksek mukavemet ve sertliğe sahip olabileceği için motor pervaneleri, yanma odaları vb. uç kısımları üretmeye uygundur. PBF 'nin sınırlamaları çoğunlukla yüzey kaplaması (yüzey porozitesi ve pürüzlülüğü), hava boşlukları, parçanın büzülmesi veya bozulması ve tozun taşınması veya bertaraf edilmesi ile ilgili zorlukların etrafında toplanmaktadır. Tablo 1.6. da toz yatağı füzyonu makine üreticileri ve malzemeleri gösterilmiştir.

Tablo 1.6. Toz yatağı füzyonu üreticileri ve malzemeleri [16]

Teknoloji	Önde Gelen Üreticiler	Malzemeler
SLS	EOS, Stratasys	Naylon, Alümid, Karbon fiber dolgulu naylon, PEEK, TPU
SLM/DMLS	EOS, 3D Systems, Sinterit	Alüminyum, Titanyum, Paslanmaz Çelik, Nikel alaşımları, Krom-Kobalt
EBM	Arcam	Titanyum, Krom-Kobalt
MJF	HP	Naylon

1.2. Eklemeli İmalatta Kullanılan Malzemeler

Eklemeli imalat teknolojilerinde üretim yöntemini belirleyen temel kriter üretimin yapılacağı malzemedir. Hammadde besleme stokunu belirli AM işlemine uygun bir formda üretilebilme kabiliyeti, malzemenin AM tarafından uygun şekilde işlenebilmesi, malzeme ile istenilen geometri formun işlenebilme kapasitesi ve malzemenin performans özellikleri AM teknolojisinde kullanılabilir olması için göz önüne alınan kriterlerdir. Eklemeli imalatta genellikle polimerler, seramikler ve metaller olmak üzere üç tip malzeme kullanılabilir. Malzemeler toz, tel, kâğıt, plaka veya sıvı reçine formundadır [22].

1.2.1. Metaller ve alaşımlar

Metal eklemeli üretim, son yıllarda mükemmel büyüme perspektifleri göstermektedir. Bu teknoloji ağırlıklı olarak havacılık endüstrisindeki araştırma, prototipleme veya ileri uygulamalar için kullanılmaktadır. Ayrıca biyomedikal, savunma ve otomotiv endüstrilerinde de kullanılmaktadır [2]. Metal AM, geleneksel üretim yöntemlerine

kıyasla özel bağlantıları olan karmaşık geometrilerin üretimi için büyük özgürlük sağlar. Özellikle, yapısal, koruyucu mühendislik ve yalıtım problemlerine aynı anda çözümler sağlamak için çok fonksiyonlu bileşenler geliştirilebilir.

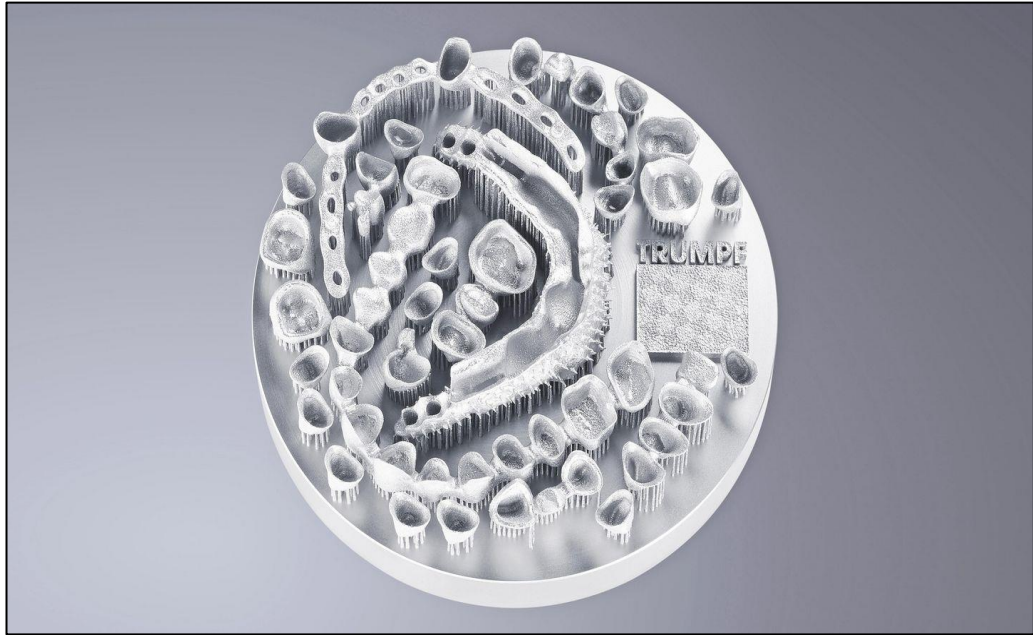
Genellikle 3B baskı metallerinin işleme, bir lazer veya bir elektron ışını gibi bir enerji kaynağı kullanılarak metalik ham maddelerin ergitilmesinden (toz veya tel) oluşur. Ergimiş malzeme, katı bir kısım oluşturmak için katmanlara dönüştürülür. Metal baskıda en yaygın kullanılan teknikler toz yataklı füzyon (PBF) ve doğrudan enerji biriktirmedir (DED). Bu işlemler daha yüksek doğruluk veya hız sağlayabilir. Paslanmaz ve takım çelikleri, bazı alüminyum alaşımları, titanyum ve alaşımları ve nikel bazlı alaşımlar gibi birçok metalik malzemeler, PBF tabanlı AM işlemleri kullanılarak üretilebilir [23]. PBF teknolojileri iyi mekanik özelliklere sahip bileşenleri ve yüksek hassasiyetle karmaşık şekilleri ($\pm 0,02$ mm) üretebilir. Ancak, bu teknolojiler oldukça yavaştır ve bu nedenle çoğunlukla küçük parçalar için kullanılır.

Titanyum ve alaşımları, çelik alaşımları, birkaç alüminyum alaşım, nikel alaşımları ve bazı kobalt bazlı ve magnezyum alaşımları AM için optimize edilmiştir [23]. Özellikle, titanyum ve alaşımları, çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılan yüksek performanslı malzemelerdir. Geleneksel üretim yöntemleri ile yüksek işleme maliyetleri ve uzun teslim süresi ile karakterize edilirler. Böylece AM, daha düşük maliyetle çok karmaşık yapılar üreterek önemli ekonomik avantajlar sunabilir. Ti ve Ti6Al4V özellikle şu anda havacılık ve biyomedikal alanlardaki ticari uygulamalar için kullanılmaktadır. Şekil 1.18. de trumpf firmasının biyomedikal uygulamalar için katmalı imalatla ürettiği metal parçalar gösterilmektedir.

Çok fonksiyonlu optimizasyon, ağırlık özelleştirme, azaltılmış malzeme atığı, daha az montaj bileşeni ve hasar görmüş veya aşınmış metal parçaları tamir etme olanağı başlıca avantajlarıdır. Bunun dışında sınırlı alaşım seçimi, boyutsal yanlışlık ve zayıf yüzey kalitesi ve telerezon, ısıl işlem vb. son işlem gerektirmesi başlıca dezavantajlarıdır [24]. Tablo 1.7. de eklemeli üretimde yöntemlerinde en yaygın kullanılan metaller gösterilmektedir.

Tablo 1.7. Eklemeli üretimde en yaygın kullanılan metalller

Metaller	Malzemeler
Alüminyum Alaşımlar	AlSi10Mg / AlSi7Mg / AlSi12
Kobalt Bazlı Alaşımlar	ASTM F75 / CoCrWC
Titanyum Alaşımlar	Titanium Grade 2 / Ti6Al4V / Ti6Al4V ELI / TiAl6Nb7
Nikel Bazlı Alaşımlar	Hastelloy X / Inconel 625 / Inconel 713 / Inconel 718 / Inconel 738
Değerli Metal Alaşımları	Altın / Gümüş
Bakır Alaşımları	CC 480 K
Paslanmaz Çelikler	SS 304 / SS 316 L / SS 410 / SS 440 / 15-5 PH / 17-4 PH
Takım Çelikleri	AISI 420 / Marage 300 / H13 / AISI D2 / AISI A2 / AISI S7

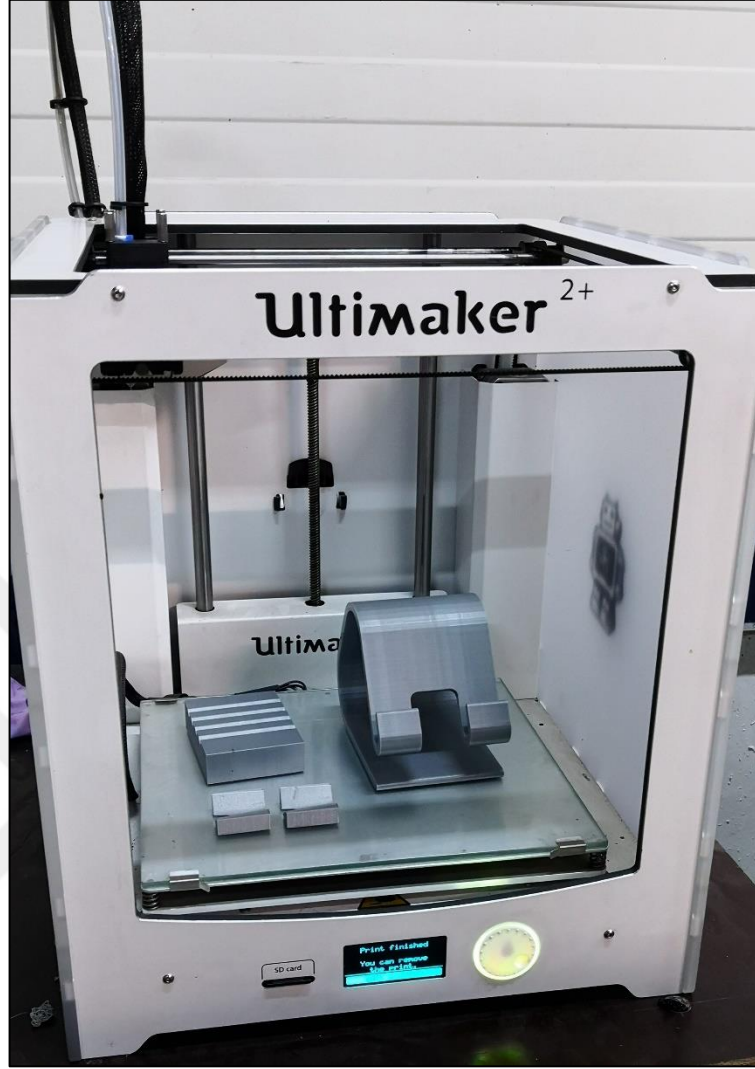


Şekil 1.18. Trumpf metal biyomedical parçaları [21]

1.2.2. Polimerler ve kompozitler

Polimerler, çeşitliliği ve farklı 3D baskı işlemlerine uyum kolaylıkları nedeniyle 3B baskı endüstrisindeki en yaygın malzemeler olarak kabul edilir. AM üretimi için polimerler, termoplastik filamentler, reaktif monomerler, reçine veya toz formunda bulunur. Polimerlerin ve kompozitlerin 3B baskısını kullanma kabiliyeti ile havacılık, mimari, sanat, tekstil, oyuncak imalatı ve tıbbi alanlar gibi birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. 3B baskı kullanarak kompozitlerin üretilmesinin geometrik doğruluk, karmaşık yapıların üretilebilirliği ve özelleştirme gibi faydaları bulunur. Ayrıca, bu işlem, özelleştirilmiş ürünler için kalıplama ve ekstrüzyon gibi diğer geleneksel biçimlendirme yöntemlerinden daha uygun maliyetli olabilir. Öte yandan, 3B yazıcılar tarafından üretilen saf polimer ürünler, doğal olarak sıcaklık ve yük karşısındaki dayanım eksikliğinden dolayı yalnızca kavramsal prototipler için kullanılır. Daha iyi performansa sahip gelişmiş polimer kompozitlerin üretimi için çeşitli yöntem ve malzemelerin geliştirilmesine yol açan, 3 boyutlu baskılı polimerlerin düşük mekanik özelliklerinin çözülmesine yönelik yapılan çalışmalar günümüzde de devam etmektedir [25].

Wohlers topluluğu tarafından yapılan yıllık endüstri araştırmasına göre, endüstriyel sektörlerdeki 3B baskı pazarının yaklaşık %50'si fotopolimerler kullanılarak üretilen prototipler oluşturmaktadır [2]. Hızlı prototipleme, düşük maliyet, karmaşık yapılar üretim kolaylığı ve ağırlık optimizasyonu başlıca avantajlarıdır. Bunun dışında zayıf mekanik özellikler, sınırlı polimer ve takviye seçimi ve anizotropik mekanik özellikler gibi özellikler dezavantajlarıdır [24]. Şekil 1.19. de ultimaker firmasına ait FDM yazıcı ve ABS filamentten üretilen parçalar gösterilmektedir.



Şekil 1.19. Ultimaker yazıcı ve ABS filamentten üretilen parçalar

1.2.3. Seramikler

Seramikler, metaller ve polimerlerle karşılaştırıldığında, seramik malzemelerin doğası gereği mekanik sertlikleri ve kırılganlıkları dolayı geleneksel üretim yöntemleriyle üretilmeleri son derece zordur. AM teknolojisinin düşük maliyet, geometrik özgürlük ve esnek üretimi gibi özelliklerinden dolayı seramikler için çok elverişli hale gelmektedir. Seramik eklemeli imalatı, seramik malzemelerin ardışık katmanlar halinde bırakılmasıyla 3B nesnelerin üretildiği bir üretim sürecidir. 3D baskı aynı zamanda belirli bir geometrinin tasarımında hızlı değişiklik yapılmasını sağladığı için hızlı prototipleme için de en uygun araçtır. Ekstrüzyon veya enjeksiyon kalıplama gibi geleneksel üretim teknikleri, süreci yeni bir tasarıma uyarlamak için daha uzun ön

sürelere sahiptir ve sıklıkla yeni takımlara yatırım yapılmasını gerektirir. Toz esaslı eklemeli üretim yönteminde basılan nesne toz yatağı içinde kendiliğinden desteklenir ve 3B modeline destek yapılarının eklenmesi gerekmez. Baskı işlemi tamamlandığında, bağlı olmayan toz çıkarılır, böylece işlemden tekrar tekrar kullanılabilir. Kullanılmayan tozun son derece düşük kayıplarla geri dönüştürülebilmesi gerçeği, bu süreci endüstriyel ölçekte sürdürülebilir ve finansal olarak uygulanabilir kılan önemli bir faktördür [22, 26] .

Biyomedikal, havacılık, otomotiv ve kimya endüstrisi seramik malzemelerin başlıca kullanım alanlarıdır. Şekil 1.20. de yapıştırıcı püskürtme yöntemi ile üretilen seramik parçalar gösterilmektedir. Kafeslerin yapıların gözenekliliğinin kontrolü, insan vücudu organları için karmaşık yapıların ve yapı iskelelerinin basılması, düşük imalat süresi, kompozisyon ve mikro yapı üzerinde daha iyi kontrol bu malzemelerin başlıca avantajlarıdır. Bunun dışında AM ta elverişli seramik çeşidinin sınırlı olması, boyutsal hatalar ve düşük yüzey kalitesi ve üretim sonrası sinterleme gibi işleme gerektirmesi dikkat edilmesi gereken dezavantajlardır [24].



Şekil 1.20. Yapıştırıcı püskürtme yöntemi ile üretilen seramik parçalar [27]

1.3. Eklemeli İmalatın Kullanıldığı Alanlar

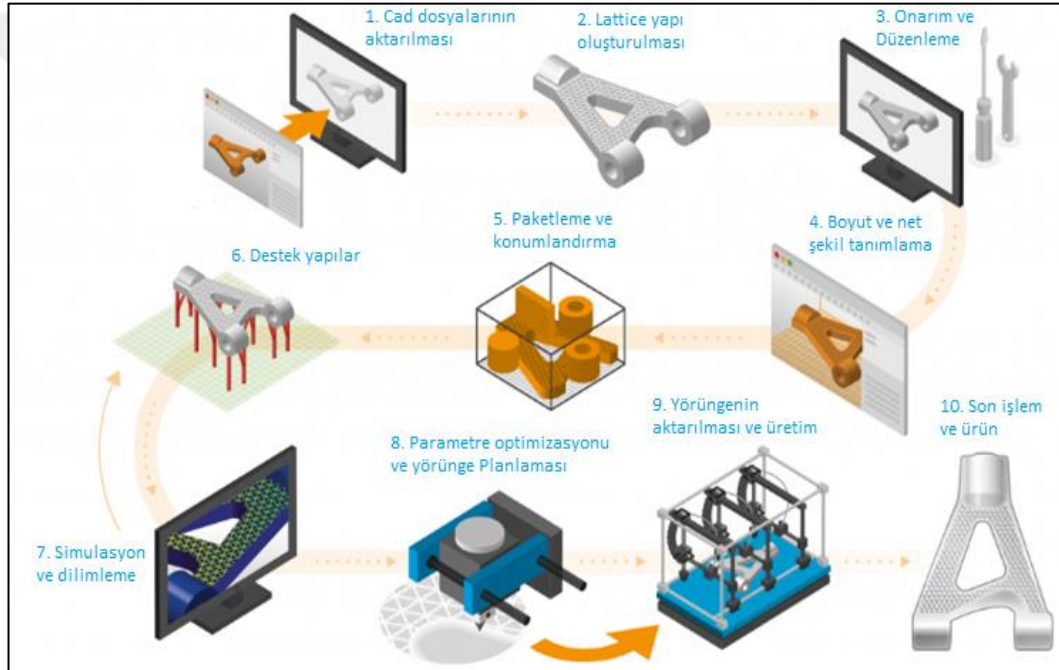
Eklemeli üretim kullanılmaya başlandığı ilk zamanlarında hiç kimse bu teknolojinin şu anda olduğu kadar endüstride devrim yapabileceğini düşünmemektedir. Bunun temel nedeni eklemeli imalatın yalnızca hızlı prototipleme alanında kullanılacağı düşüncesidir. Yıllar geçtikçe, farklı eklemeli imalat teknolojileri geliştirilmiş, malzeme kullanımı, azalan maliyetler ve üretim hızlandırma gibi gelişmeler farklı sektörlerde büyük faydalar sağlamıştır. Günümüzde çok fazla sektörde kullanılmaya başlanan eklemeli imalatın en yaygın kullanıldığı sektörler: havacılık, medikal, otomotiv, enerji ve kullanıcı ürünleridir. Tablo 1.8. de kullanılan bütün AM teknolojileri ve kullanım alanları gösterilmiştir.

Tablo 1.8. AM teknolojileri ve kullanım alanları [28]

Kullanılan eklemeli imalat teknolojisi	Malzemeler	Uygulamalar	Avantajlar	Sınırlamalar	Son işlem
Foto Polimerizasyon	Foto aktif monomere sahip bir reçine, Hibrit polimer-seramikler	Biyomedikal, Elektronik, Prototipleme	Yüksek yüzey kalitesi ve geometrik doğruluk	Yüksek maliyet, sınırlı malzeme çeşitliliği, düşük baskı hızı	Çapak ve destek yapı alma
Malzeme Ektrüzyonu (FDM)	ABS, Polilaktik asit (PLA), polietilen, polieter keton, polikarbonat gibi termoplastikler, polimerler	Hızlı prototipler, eğitim ve takım modelleri, oyuncaklar	Düşük malzeme ve yatırım maliyeti, yüksek üretim hızı	Düşük geometrik hassasiyet ve yüzey kalitesi, sınırlı malzeme, düşük mekanik ve termal özellik	Çapak ve destek yapı alma
Malzeme Püskürtme (Material Jetting)	Polimerler, plastikler, beton	Biyomedikal, eğitim ve araştırma	Yüksek üretim boyutları, düşük maliyet, esnek üretim, yüksek üretim hızı	Sınırlı malzeme, düşük boyutsal ve geometrik doğruluk	Çapak ve destek yapı alma
Yapıştırıcı Püskürtme (Binder Jetting)	Polimerler, seramikler, metaller	Biyomedikal, eğitim ve araştırma	Yüksek parçanın kalitesi ve geometrik hassasiyet, hammadde malzemesinde esneklik	Artık ısı gerilmeler, istenmeyen gözeneklilik	Sinterleme ve Isıl işlem
Tabaka Laminasyonu	Polimer kompozitler, seramik, kâğıt, metaller	Elektronik, doku üretimi, Kağıt imalatı, Döküm endüstrisi,	Yüksek üretim hızı, düşük atık gerilmeler, düşük maliyet, düşük sarf malzeme	Düşük yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyet, karmaşık şekillerin imalatında sınırlama	İç kısımda artık kalıntısı giderici, pres
Direk Enerji Depolama	Metaller, seramikler	Havacılık, Onarım, kaplama, biyomedikal	Yüksek üretim hızı, düşük maliyet, mükemmel mekanik özellikler, onarım ve güçlendirme için mükemmel	Düşük doğruluk, düşük yüzey kalitesi, yoğun bir destek yapısına ihtiyaç, İnce detaylarla karmaşık şekillerin baskısında sınırlama	Isıl işlem ve talaş kaldırma
Toz Yatağı Füzyonu	Metaller, seramikler	Havacılık, enerji, elektronik, otomotiv, biyomedikal	Geometrik özgürlük, yüksek malzeme çeşitliliği, yüksek yoğunluk ve hassasiyet	İnsert gaz, porozite, ısı çarpılmalar	Toz temizleme, ısıl işlem ve telerezon

1.4. Üretim İşlem Basamakları

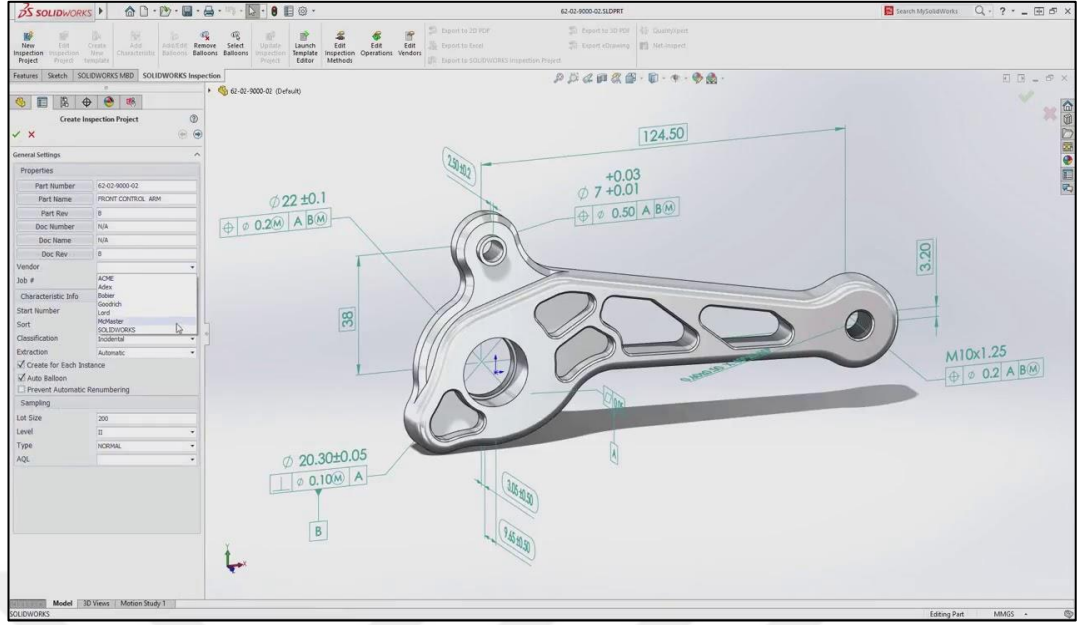
Eklemeli imalat, bir tasarımın veya nesnenin bir dizi dijital görüntüsünü çeken ve bunları profesyonel sınıf endüstriyel bir makineye gönderen bilgisayar destekli tasarım (CAD) modelleme yazılımı ile başlar. Makine, malzemeleri katman-katman ekleyerek öğeyi oluşturmak için dizayndaki açıklamaları plan olarak kullanır. Mikron cinsinden ölçülen katmanlar üç boyutlu bir nesne ortaya çıkıncaya kadar yüzlerce veya binlerce eklenir. Hammaddeler sıvı, toz veya tabaka halinde olabilir ve tipik olarak plastikler ve diğer polimerler, metaller veya seramiklerdir. Şekil 1.21. de eklemeli imalatın işlem adımları gösterilmektedir.



Şekil 1.21. AM işlem basamakları [29]

1.4.1. CAD dosyalarının aktarılması

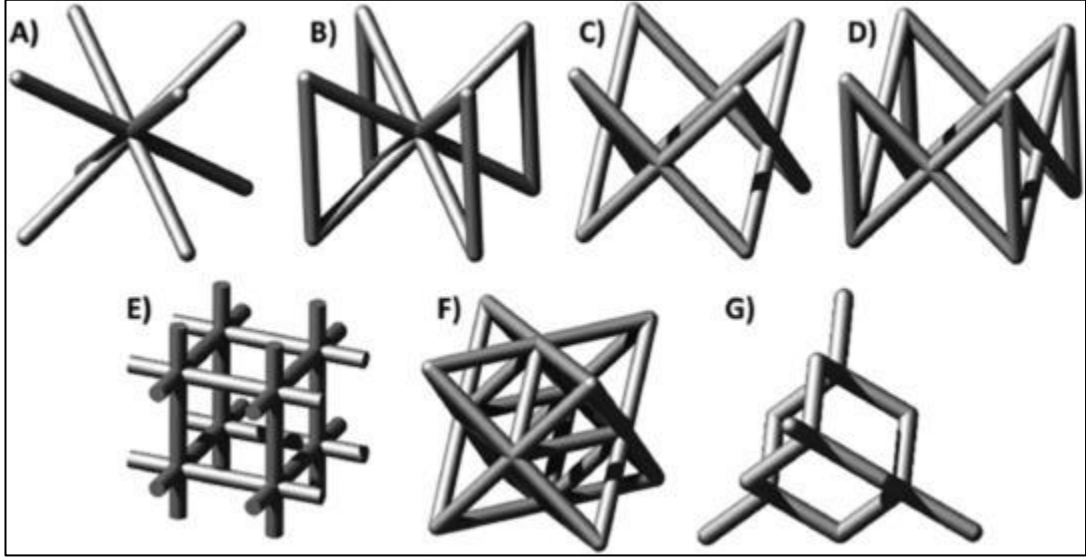
Eklemeli imalatın ilk adımı üretilecek olan nesnenin Solidworks, Catia, Autodesk, NX vb. 3 boyutlu tasarım programları kullanılarak uygun ölçülerde tasarlanması işlemidir. Bu şekilde üretilmesi düşünülen nesne bilgisayara aktarılır. Şekil 1.22. de Solidworks programında çizilmiş bir parça örneği verilmektedir.



Şekil 1.22. Solidworks programında oluşturulmuş CAD örneği

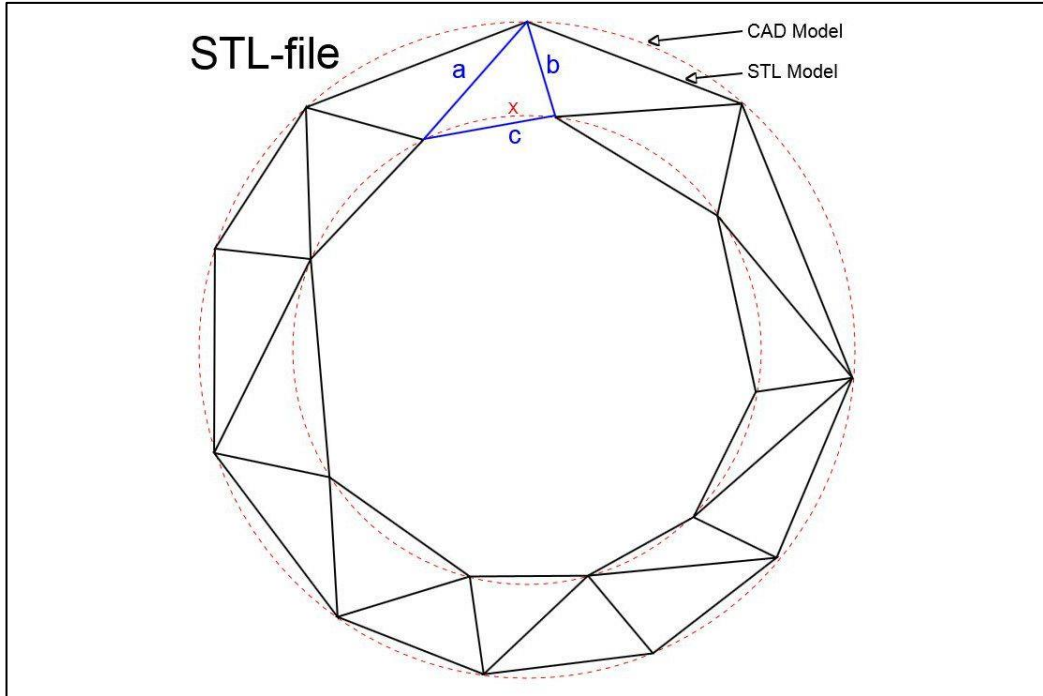
1.4.2. Kafes (Lattice) yapı oluşturulması

Kafes yapılar topolojik olarak düzenlenmiş, bir veya daha fazla birbirini tekrarlayan birim hücreden oluşan üç boyutlu açık hücreli yapılardır. Bu hücreler, belirli düğümlerle birbirine bağlanarak 3 boyutlu yapıyı oluştururlar. AM kafes yapılarının, özellikle Eklemeli imalatın olanak sağladığı daha büyük boyutlu geometrik kontrol ve öngörülebilirlik nedeniyle eşdeğer gözenekliliğe sahip geleneksel imalat yöntemleri ile üretilen hücresel yapılardan önemli ölçüde daha iyi performans göstermektedir. Bağlanma şekilleri, boyutları, mekanik özellikleri vb. özelliklerine göre çok sayıda kafes yapısı bulunmaktadır. Şekil 1.23. te SLM teknolojisinde yaygın kullanılan örnek kafes yapıları gösterilmiştir.



Şekil 1.23. Lattice yapısı örnekleri: A) BCC B) BCCZ C) FCC D) FCCZ E) kübik F) sekizli makas G) elmas [30]

Bu adımda CAD programında tasarlanan nesneyi oluşturan yüzeyler ve katmanlar küçük üçgenlere bölünür ve STL şekilde tanımlanır. STL, "3D Systems" firması tarafından oluşturulan stereolitografi CAD yazılımına özgü bir dosya formatıdır. STL, (Standard Triangle Language) "Standart Üçgen Dili" anlamına gelmektedir. Şekil 1.24. te gösterilmektedir.



Şekil 1.24. STL dosya formatı [31]

1.4.3. Onarım ve düzenleme

Bu adımda mevcut tasarım eklemeli üretime uygunluğu kontrol edilir ve hatalar giderilir. Oluşturulan 3 boyutlu çizim kullanılacak AM teknoloji ve uygulanacak son işleme göre tekrar düzenlenir. Şekil 1.25. te katmanlı üretimle üretilen yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluğu düşük metal bir parça gösterilmektedir.



Şekil 1.25. Katmanlı imalatla üretilen yüzey kalitesi düşük bir parça [32]

1.4.4. Boyut ve net şekil tanımlama

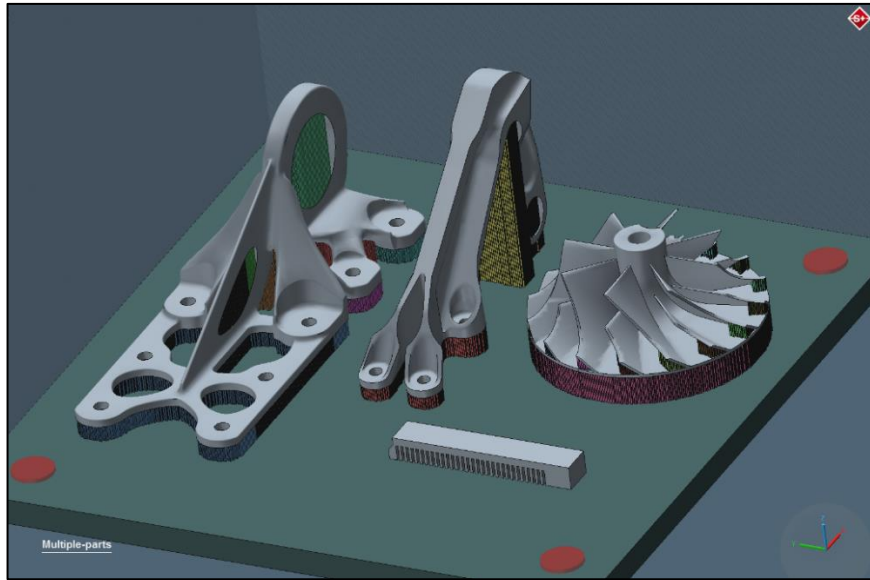
Eklemeli imalatın diğer üretim yöntemlerine göre en büyük avantajlarından biri de mevcut mekanik ve yapısal özellikleri değiştirmeden tasarımın gereksiz kısımlarının çıkarılabilmesidir. Bu şekilde minimum malzeme kullanılarak parça maliyet düşer ve parçaların ağırlıkları azalır. Bu işleme topoloji optimizasyonu adı verilir. Topoloji optimizasyonu tasarımın belirlenmiş bazı sınır koşulları içerisinde boyut ve şekil olarak en uygun şekilde düzenlenmesidir. Şekil 1.26. de topoloji optimizasyonu yapılmış bazı parçalar verilmiştir. Şekil 1.26. de gösterilen kemer tokasından bir uçakta 850 adet bulunmaktadır. Yapılan topoloji optimizasyonu ile her toka 68 gram hafifletilerek toplamda 57,8 kg uçak hafifletilmiştir.



Şekil 1.26. Uçak koltuk kemeri tokası optimizasyonu [33]

1.4.5. Paketleme ve konumlandırma

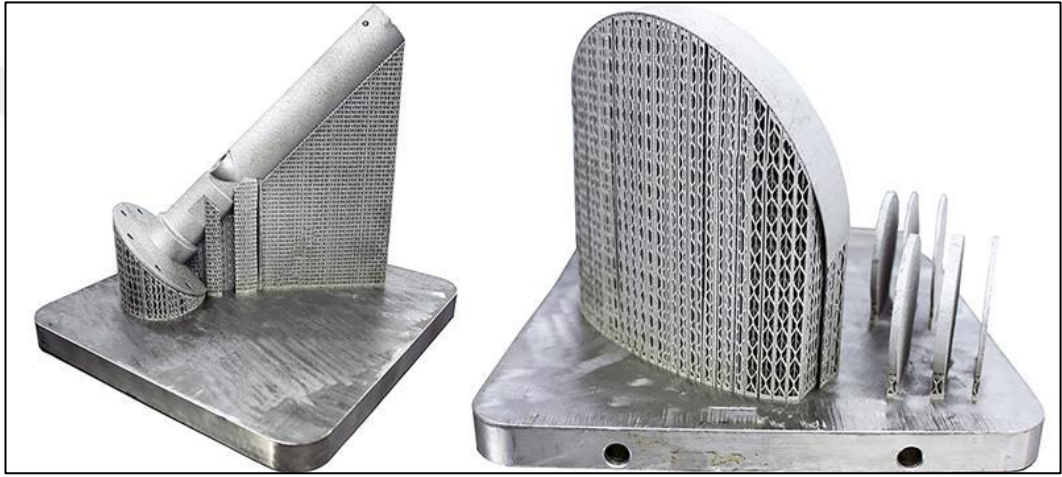
Bu adımda üretilecek olan ürün daha önceden tanımlanmış olan üretim alanına uygun bir şekilde konumlandırılır. Konumlandırma aynı anda üretilecek olan parçalar var ise birbirine en yakın şekilde yapılmaya çalışılır. Parçanın en uygun konum ve oryantasyonda yerleştirilmesi üretimin süresi ve destek yapılar açısından büyük önem taşır. Şekil 1.27. de Simufact programında üretim için hazırlanan parçaların görüntüsü verilmektedir.



Şekil 1.27. Simufact programında üretim için hazırlanan parçalar [34]

1.4.6. Destek yapılar

Destek yapıları tasarımda ve son üründe bulunmayan tasarım gerekleridir. Parçanın şekline, boyutuna, oryantasyon eğimine, üretim metoduna ve malzemeye göre farklılık gösterir. Üretimin daha sağlıklı yapılabilmesi için üretim esnasından parça yüzeylerinin şeklini ve formunu destekleyen yapılardır. Bu adımda üretilecek olan parça için en uygun oryantasyon seçilir ve destek yapıları oluşturulur. Destek yapıları ürünün üretim kalitesini artırmak için oldukça önemlidir. Aşağıdaki şekil 1.28. de metal destek yapılar gösterilmektedir.



Şekil 1.28. Toz yatağı füzyonu ile üretilen destek yapıların bulunduğu metal parçalar [35]

1.4.7. Simülasyon ve dilimleme

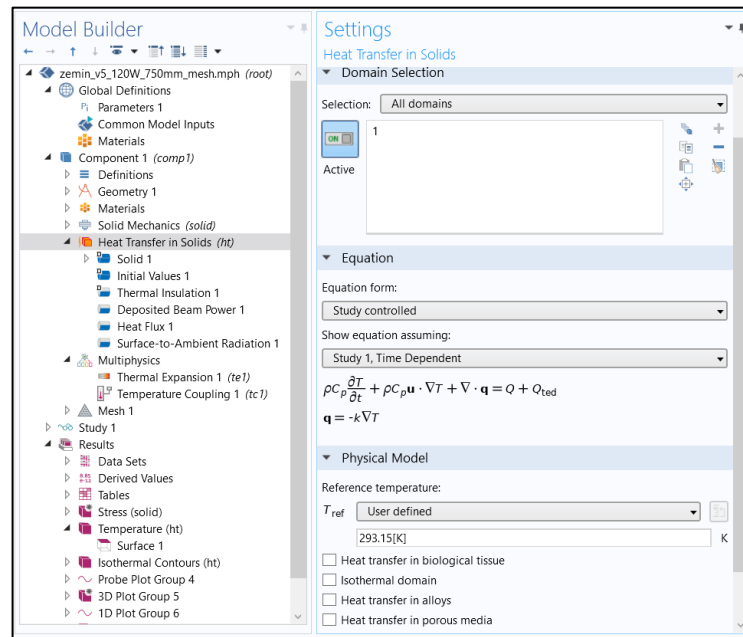
Bu bölümde kullanılacak malzeme ve üretilecek ürüne bağlı olarak katman kalınlığı belirlenir. Katman kalınlığı belirlendikten sonra parça katmanlarına ayrılarak dilimlenir. Bu dilimle işlemi ürünün üretim süresini belirler ve simülasyon yapılır. Mevcut eklemeli üretim yöntemleri, karmaşık mimarilere sahip net şekilli yapıların üretilebilmesine olanak tanır. Böylece çok adımlı işlemlere ve bağlantı elemanları veya takımlara olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Ancak eklemeli imalatta parçaların üretilebilmesi için işlem kapasitesine göre parçalar küçük adımlar diğer adıyla katmanlara bölünür. Katmanlar üst üste gelerek birleştiğinde ise net şekli oluşturur. Aşağıdaki şekil 1.29. te gösterilmiştir.



Şekil 1.29. CAD, Dilimleme ve 3 boyutlu üretim

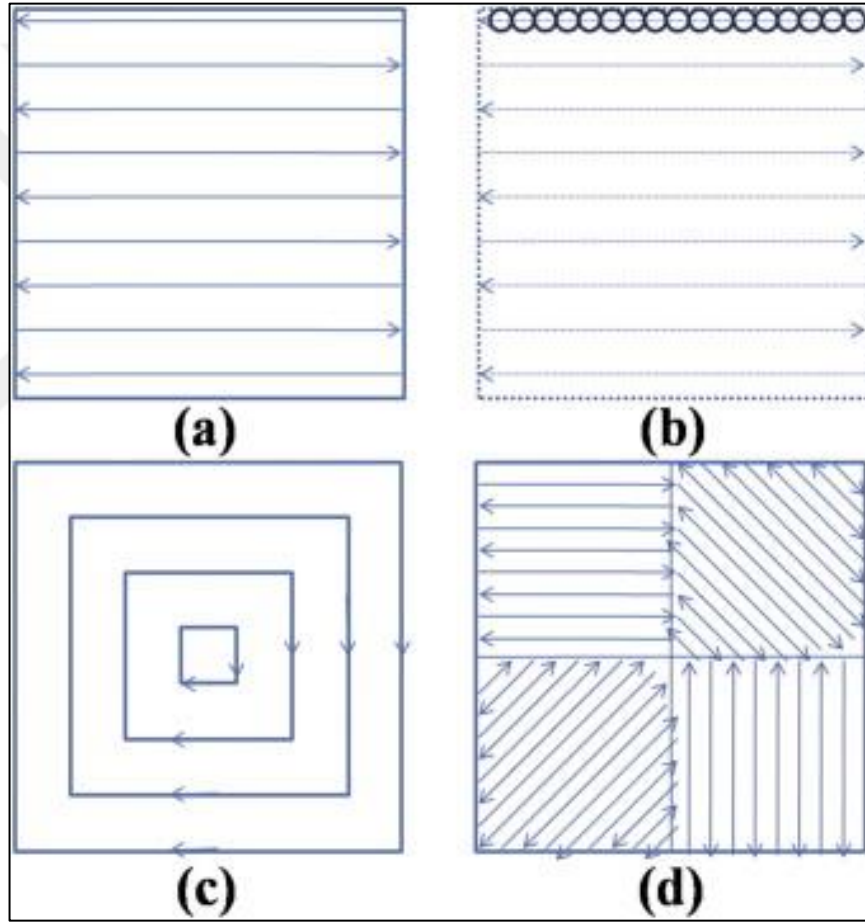
1.4.8. Parametre optimizasyonu ve yörünge planlaması

Bu adıma kadar olan çalışmalar bazı farklılıklar olmasına karşı genelde benzerlik gösterir. Bu adımda ürünün kalitesini belli edecek olan çalışma parametreleri belirlenir. Üretim esnasında oluşabilecek boşlukları, çarpılmaları, şekil bozuklukları vb. hataları gidermek için optimum çalışma parametreleri ile çalışmak gerekir. Ayrıca en uygun parametrelerle çalışmak üretimin kalitesini ve verimi artırır. Bu çalışmada sistemin parametre optimizasyonu yapılabilmesi için bir modelleme oluşturulmuş ve Comsol çoklu fizik programında birden fazla fiziksel özellik birbiri ile ilişkilendirilip çalıştırılmıştır. Bu modelleme sistem çalışma parametrelerinin sisteme etkisini anlaşılması açısından önemlidir. Şekil 1.30. da modellemenin yapıldığı Comsol Multiphysics programında oluşturulan fizik sepeti gösterilmektedir.



Şekil 1.30. Comsol Multiphysics programı arayüzü

Tarama stratejisi sistemin en önemli parametrelerinden bir tanesidir. Tarama yörüngesi üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Şekil 1.31. de en çok kullanılan birkaç farklı tarama planı verilmektedir. Bu adımda eklemeli üretimin yapılacağı makine özelliklerine uygun belirlenen çalışma parametreleri ve tarama planına göre bir yörünge planlaması oluşturulur. Oluşturulan yörünge planlaması dilimleme işlemiyle birlikte benzetme (simule) yapılır ve son makine üretim kodları oluşturulur. Bu kodlar bilgisayarlı nümerik kontrol (CNC) makinelerinde kullanılan G kodlarıdır. Oluşturulan bu kodun içerisinde makinenin hareket komutları ve diğer parametrelerini bulundurulur. Aşağıdaki şekil 1.32. de örnek G kodu verilmektedir.



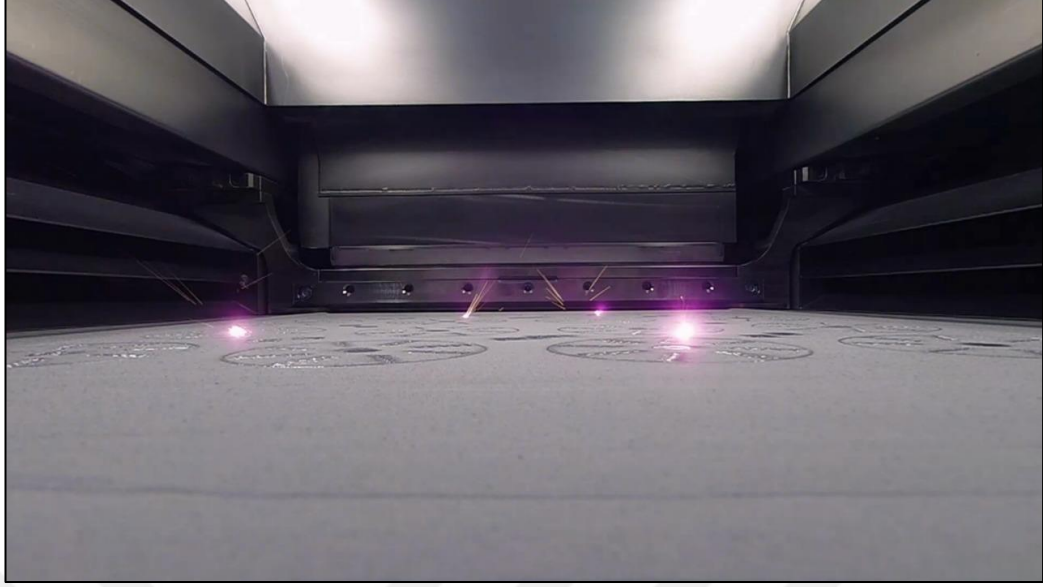
Şekil 1.31. a) paralel tarama b) darbe tarama c) spiral tarama d) satranç tahtası tarama [36]


```
1 ;FLAVOR:UltiGCode
2 ;TIME:5634
3 ;MATERIAL:10358
4 ;MATERIAL2:0
5 ;NOZZLE_DIAMETER:0.4
6 ;Generated with Cura_SteamEngine 4.0.0
7 M82 ;absolute extrusion mode
8
9 G92 E0
10 G10
11 ;LAYER_COUNT:333
12 ;LAYER:0
13 M107
14 G0 F4500 X91.05 Y92.816 Z0.27
15 ;TYPE:SKIRT
16 G11
17 G1 F1800 X91.649 Y92.296 E0.07496
18 G1 X92.298 Y91.84 E0.14992
19 G1 X92.99 Y91.451 E0.22493
20 G1 X93.717 Y91.133 E0.29992
21 G1 X94.473 Y90.89 E0.37496
22 G1 X95.249 Y90.725 E0.44993
23 G1 X96.037 Y90.639 E0.52484
24 G1 X96.5 Y90.625 E0.56861
25 G1 X126.5 Y90.625 E3.40361
26 G1 X127.292 Y90.665 E3.47855
27 G1 X128.077 Y90.784 E3.55358
28 G1 X128.845 Y90.982 E3.62853
29 G1 X129.59 Y91.257 E3.70358
30 G1 X130.303 Y91.604 E3.77851
31 G1 X130.978 Y92.022 E3.85354
32 G1 X131.607 Y92.505 E3.92848
33 G1 X132.184 Y93.05 E4.00349
34 G1 X132.704 Y93.649 E4.07845
35 G1 X133.16 Y94.298 E4.1534
36 G1 X133.549 Y94.99 E4.22842
37 G1 X133.867 Y95.717 E4.30341
38 G1 X134.11 Y96.473 E4.37845
```

Şekil 1.32. Cura programında oluşturulmuş 3B yazıcı için bir G kodu

1.4.9. Yörüngeyi aktarılması ve üretim

Oluşturulan kodlar harici bir bellek veya direk makine bağlantısı ile makineye aktarılır. Gereki çalışma ortamı ve malzemeler hazırlandıktan sonra üretime başlanır. Makine katman katman son ürün oluşana kadar çalışmaya devam eder. Şekil 1.33. te makinenin çalışma sırasındaki bir görüntüsü verilmektedir.



Şekil 1.33. PBF makinesi çalışma görüntüsü [37]

1.4.10. Son işlem ve ürün

Eklemeli imalat prosesi sonrasında ürün makineden alınır ve kullanılan yöntemle ilgili olarak kumların temizlenmesi, destek yapıların kesilmesi (telerezon, yan keski vb. yöntemle göre değişiklik gösterir) sonrasında tavlama vb. işlemler yapılabilmektedir. Şekil 1.34. te kalıntı tozlarından temizlenmesi göstermektedir.



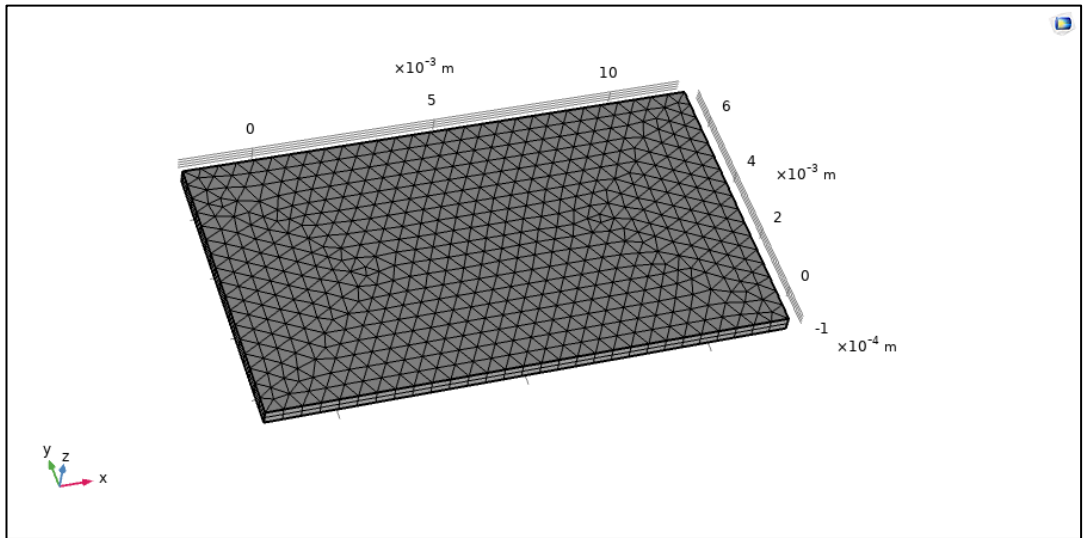
Şekil 1.34. PBF teknolojisiyle üretilen parçaların kalıntı tozlarından temizlenmesi [16]

2. MODELLEME YAKLAŞIMI

Bu çalışmanın amacı toz yatağı füzyonu için SLM işlemi sırasında malzeme özellikleri ve çalışma parametrelerinin sıcaklık dağılımı ve erime havuzuna etkilerini incelemek için sonlu elemanlar metodu ile geçici ve doğrusal olmayan bir termal model sunmaktır. Yapılan bu modellemenin gerçeği yansıtmadığını tespit edebilmek için literatürdeki deneysel çalışmalarla benzer ortam ve çalışma koşulları sağlanmıştır. Comsol Multiphysics programında yapılan bu modelleme malzeme, 3 boyutlu ısı kaynağı, faz dönüşümü, ısı transferi, yörünge, ekipmanlar ve deneysel modelleme ve çoklu fizik modellemesi olmak üzere olmak üzere 6 kısımdan oluşmaktadır. Bu bölümde, bu kısımlar ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

2.1. Malzeme Modellemesi

Modellemede yüksek mukavemet / ağırlık oranı ve mükemmel korozyon direnci özelliklerinden dolayı özellikle havacılık sektöründe çok sık tercih edilen Ti6Al4V alaşımı kullanılmıştır. Bu alaşım toz hammadde olarak kullanılmaktadır. Bu modellemede toz yerine yüksek ağ gözenekli katı bir katman kullanılmıştır. Tabaka boyutları 14 mm x 8 mm x 0.4 mm dir. Şekil 2.1. de Comsol ağ görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Comsol mesh görüntüsü

Kullanılacak olan malzemenin yapısal, mekanik ve termal özellikleri tablo 2.1. de gösterildiği gibi sisteme tanıtılmıştır. Malzemenin Termal Parametreleri tablo 2.2. de gösterildiği gibi sıcaklığın fonksiyonu olarak sisteme tanıtılmıştır.

Tablo 2.1. Modellemede kullanılan parametreler

Parametreler	Sembol	Değeri
Lazer Gücü	P	120-150 (Watt)
Lazer Tarama Hızı	u	750-1000 (mm/s)
Emilim Katsayısı	η	0,3
Lazer Işın Çapı	R	50 (μm)
Tarama Mesafesi	h	30 (μm)
Yayınım Katsayısı	ϵ_{em}	0,121-0,6
Isı Transferi Katsayısı	h_c	14,73 ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)
Isı Kapasitesi	C_p	543-947 (kJ/kgK)
Isıl İletkenlik Katsayısı	k	7,07-41,43 ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)
Yoğunluk Katsayısı	ρ	4,06-4,42 (g/cm^3)
Ergime Isısı	L_f	$3,5 \times 10^5$ (j/kg)
Stefan-Boltzmann Sabiti	σ_B	$5,67 \times 10^{-14}$ ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4$)
Yüzey Gerilim Gradyanı	$d\gamma/dT$	$-2,7 \times 10^{-4}$ (N/mK)

Tablo 2.2. Modellemede kullanılan parametreler

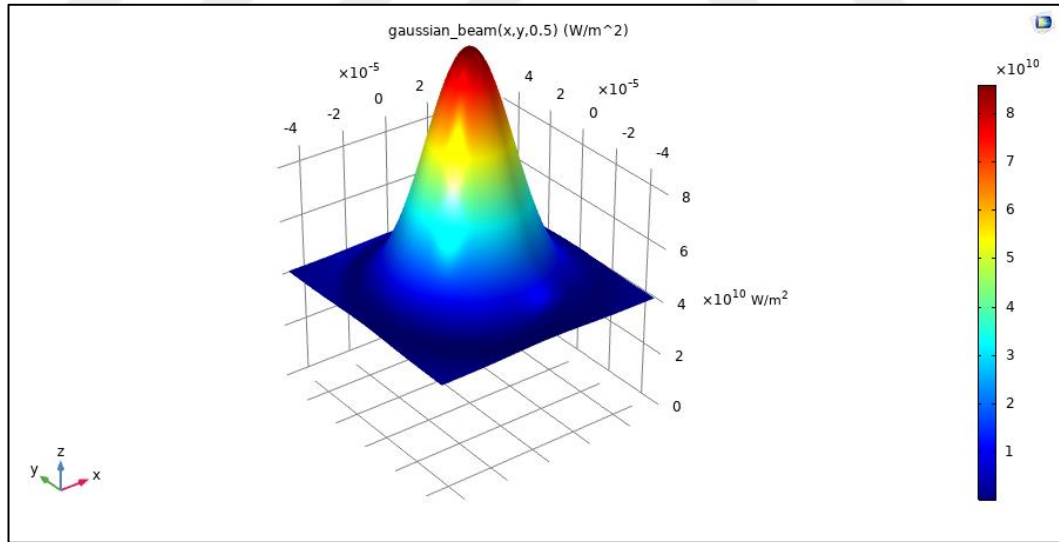
Sıcaklık [$^{\circ}\text{K}$]	Isı kapasitesi c_p [J/kgK]	Termal iletkenlik k [$\text{W}/\text{m K}$]	Yoğunluk [g/cm^3]	Yayınım
293	543	7,07	4,42	0,121
473	566	9,28	4,39	0,178
673	599	11,8	4,36	0,228
873	636	14,5	4,33	0,561
1073	675	17,4	4,3	0,593
1273	713	22	4,27	0,6
1473	745	25	4,24	0,6
1673	770	26	4,21	0,6
1873	810,27	29,81	4,18	0,42
2073	846,24	32,91	4,15	0,405
2273	880,69	35,99	4,12	0,4
2473	914,12	38,97	4,09	0,398
2673	947,30	41,83	4,06	0,395

2.2. Isı Kaynağı Modellemesi

SLM sisteminde ısı kaynağı olarak lazer ışını kullanılır. Lazer ışını toz yüzey üzerinde gezdirilir. Lazer ışınının bir kısmı toz yüzeyden geri yansıma yapar ve geri kalan kısmı ise yüzey tarafından emilir. Emilen bu enerji yüzeyde sıcaklığa dönüşerek tozların erimesini sağlar. Isı kaynağının ergime havuzu oluşturup alt katmanlara da nüfus edebilmesi için şekil 2.2. de gösterilen 3 boyutlu hacimsel TEM00 modunda Gauss ısı kaynağı kullanıldı. Denklem 2.1 hacimsel lazer ısı kaynağı denklemi verilmiştir [38];

$$q = \frac{6\eta\sqrt{3P}}{\pi\sqrt{\pi r_x r_y r_z}} e^{-\frac{3x^2}{r_x^2}} e^{-\frac{3y^2}{r_y^2}} e^{-\frac{3z^2}{r_z^2}} \quad (2.1)$$

Bu denklemde P lazer gücünü ve η malzeme emilim katsayısıdır. Modellemede emilim katsayısı toz Ti6Al4V için $\eta = 0.3$ olarak kabul edilmiştir [39]. Bu denklemde x , y ve z lokal koordinatları ifade etmektedir. Ayrıca r_x , r_y ve r_z lazer ısın çapı değerleridir [40, 41].



Şekil 2.2. Gaussian modeli

2.3. Faz Dönüşümü Modellemesi

SLM teknolojisinde hammadde olarak toz kullanılır. Bu tozlar ısı kaynağından gelen ısı ile faz dönüşümü yaparak erir. Isı kaynağının hareketine göre tozlar sırası ile lazerin ilk bölgeden geçişi ile eriyerek tozdan sıvıya geçer. Lazer bölgeden ayrılınca

soğuyarak sıvıdan katıya geçer ve bir katman oluşur. Daha sonra oluşturulan katmanın üzerine tekrar toz serilir ve aynı işlem yeni serilen toz için tekrarlanır. Ancak bu işlem sırasında alt katmanla birleşmesi için alt katman lazerin geçişi ile eriyerek katıdan sıvıya geçer. Son olarak lazerin bölgeden uzaklaşması ile erimiş haldeki alt katman ve toz katmanı birleşir ve soğuyarak sıvıdan katıya geçer. Bu işlemler sırasında malzemede faz dönüşümü gerçekleşir. Denklem 2.2, 2.3, 2.4, 2.5 ve 2.6 de faz dönüşümü ifade eden eşitlikler verilmiştir

$$k = k_1(1 - f) + k_2f \quad (2.2)$$

$$\rho = \rho_1(1 - f) + \rho_2f \quad (2.3)$$

$$c_p = \frac{\rho_1 c_{p1}(1 - f) + \rho_2 c_{p2}f}{\rho} + L_f \frac{d\varphi}{dT} \quad (2.4)$$

Bu denklemlerde k termal iletkenlik, ρ yoğunluk, c_p sıcaklık kapasitesi, L_f ergime ısısıdır.

$$f = \begin{pmatrix} 0 & T < T_c - \Delta T \\ \frac{T - (T_c - \Delta T)}{2\Delta T} & T_c - \Delta T \leq T \leq T_c + \Delta T \\ 1 & T_c + \Delta T < T \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

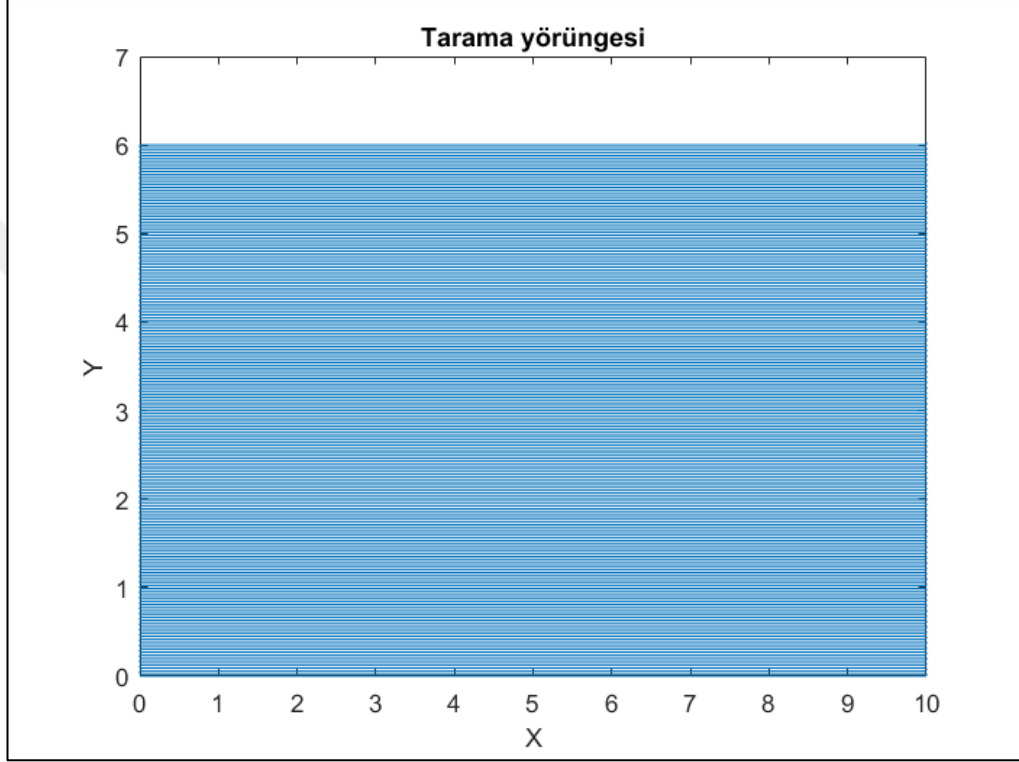
$$\varphi = \frac{\rho_2 f - \rho_1(1 - f)}{2\rho} \quad (2.6)$$

Hacimsel içerik olan f , faz geçişi sırasında 0 ila 1 arasında değişen bir parametredir. T_c , faz değişim sıcaklığı ve φ , faz fraksiyon fonksiyonunu temsil eder [42, 43].

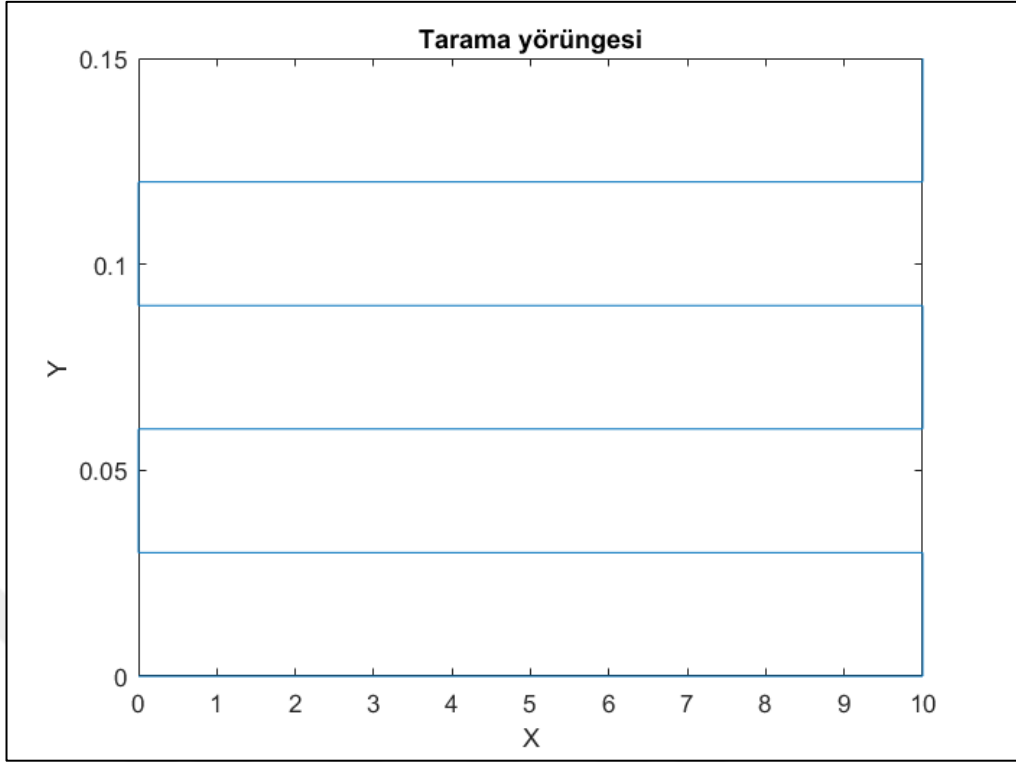
2.4. Yörünge Modellemesi

Sistemin tarama yörüngesi (stratejisi) matlab programı kullanılarak oluşturulmuş ve comsol programına vektör olarak eklenmiştir. Oluşturulan yörünge sabit olup şekil 2.3. te verilmiştir. Şekil 2.4. te yörünge yakınlaştırılarak gösterilmiştir. Yörünge oluşturulurken her bir tarama satırı 50 örnekleme noktasına bölünerek alınmıştır.

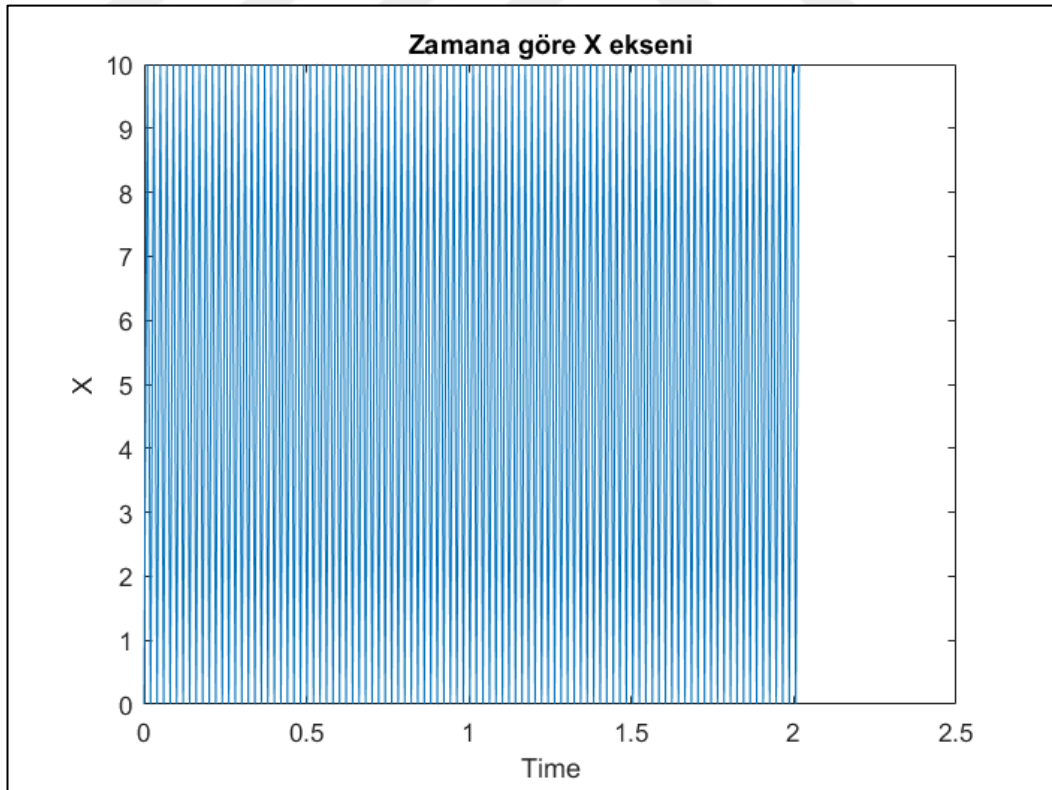
Matlab kodu ile yörüngeye ait x ve y konumlarının bulunduğu vektörler oluşturulmaktadır. Zaman vektörü hıza bağlı olup tarama hızına göre oluşturulmaktadır. Time(t), x ve y vektörleri ile birlikte yörüngeyi oluşturmaktadır. Şekil 2.5. te zamana bağlı x vektörü ve şekil 2.6. da zamana bağlı y vektörü gösterilmiştir. Oluşturulan noktalar arasında geçen süre hıza bağlı olarak değişmektedir.



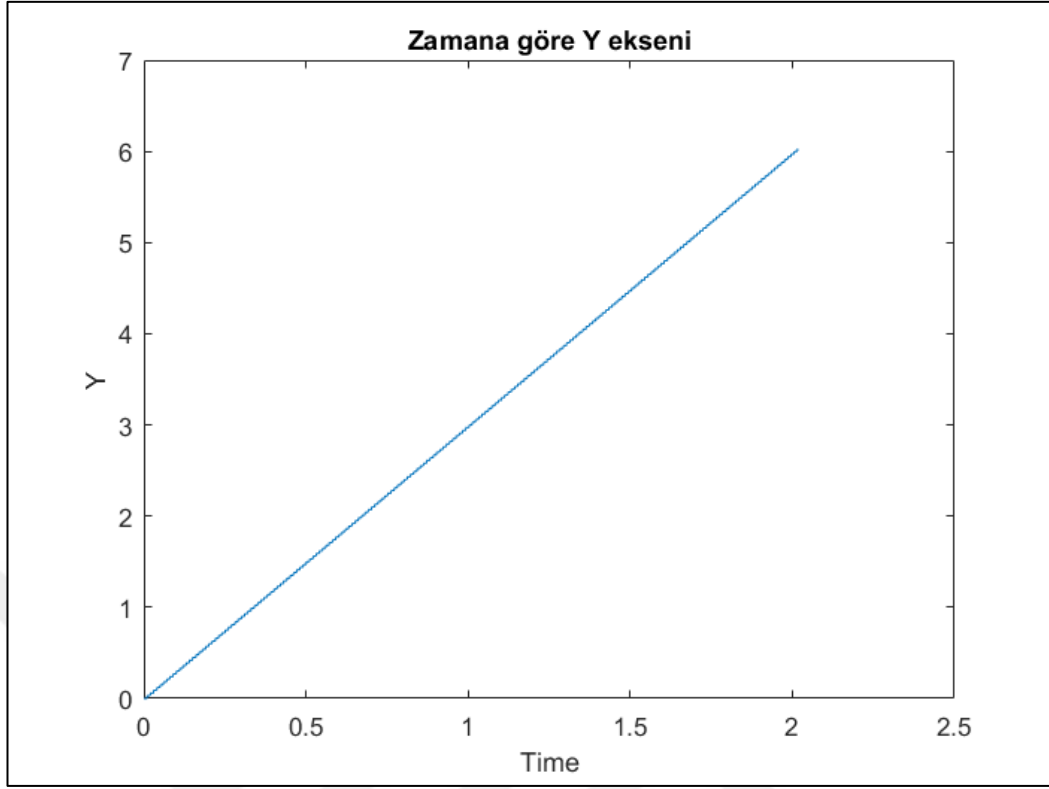
Şekil 2.3. Tarama yörüngesi



Şekil 2.4. Tarama yörüngesinin bir kısmı



Şekil 2.5. Zamana göre X pozisyonu değişimi



Şekil 2.6. Zamana göre Y pozisyonu değişimi

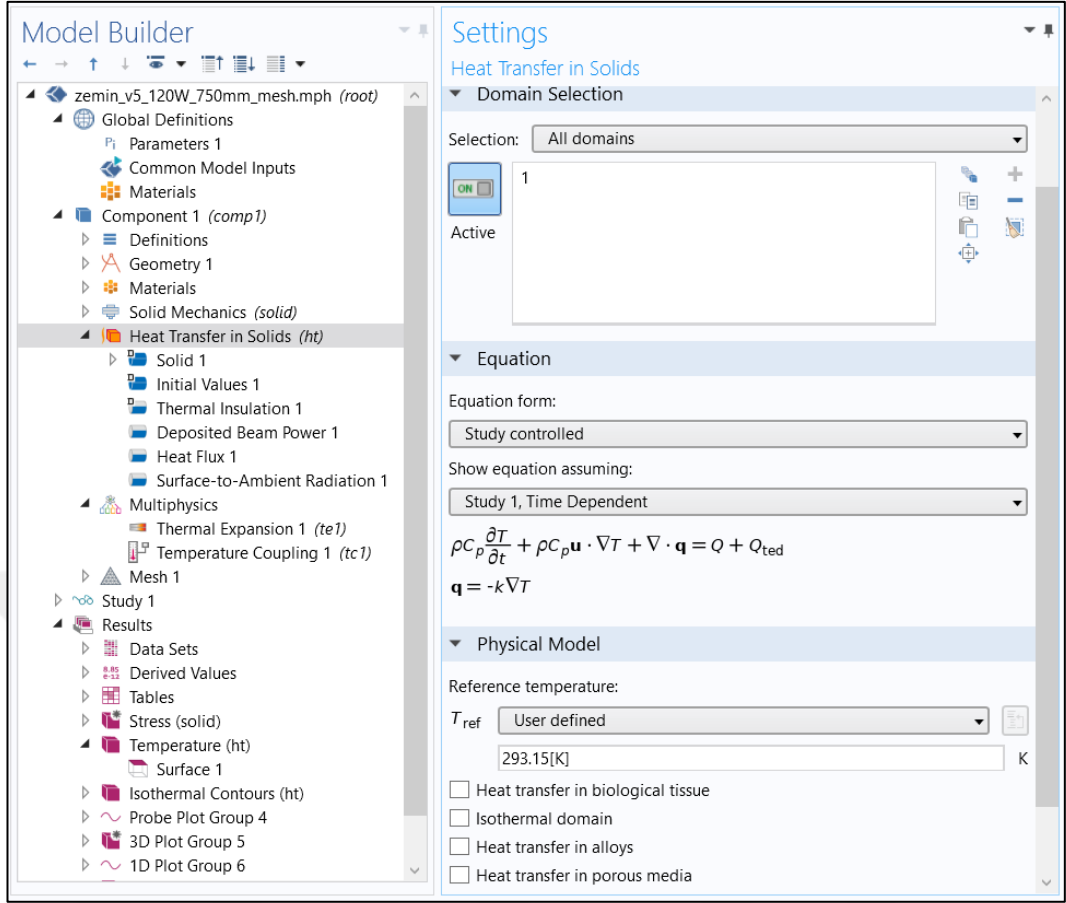
2.5. Isı Transferi Modellemesi

Modellemede lazerin ışınının toz yüzey üzerinde hareket ettirilmesi ile ısı transferi gerçekleşir. Şekil 2.7. de Comsol ısı transferi ara yüzü verilmiştir. Isı transferi iletim, konveksiyon (taşınım) ve radyasyon olmak üzere 3 farklı şekilde yapılmaktadır. Denklem 2.7 da genel ısı transfer eşitliği verilmektedir;

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted} \quad (2.7)$$

Denklem 2.7 de t zaman sabiti, Q_{ted} termoelastik sönümlenme ısısı, Q emilen ısı, u lazer tarama hızı ve q ise ısı akısı vektörü denklem 2.8 şeklinde hesaplanır;

$$q = -k \nabla T \quad (2.8)$$



Şekil 2.7. Comsol ısı transferi ara yüzü

Yüzeyde oluşan radyasyonla ısı transferi Stefan-Boltzmann yasası ile denklem 2.9 da tanımlanır;

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma(T^4 - T_{Amb}^4) \quad (2.9)$$

Yüzey yansımaya katsayısı ε ve Stefan-Boltzmann sabiti σ olmak üzere tanımlanmıştır. T_{Amb}^4 ortam sıcaklığını temsil eder. Konveksiyon ile ısı transferi denklem 2.10 ile tanımlanır;

$$q_{conv} = h_c \cdot (T_{Amb} - T) \quad (2.10)$$

Bu eşitlikte h_c ısı taşınım katsayısıdır ve $h_c = 14.73 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ olarak kabul edilmiştir [44].

2.6. Ekipmanlar ve Deneysel Ortamın Oluşturulması

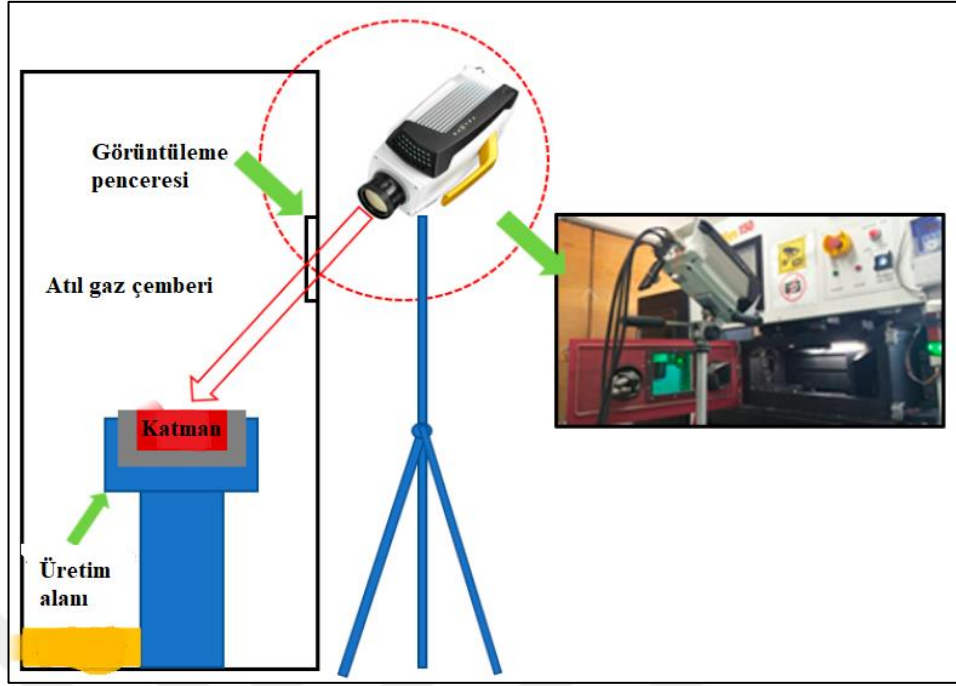
Bu çalışmada Jonaet ve diğ. [1] makalesin de kullandıkları deney ortamının sonuçları kullanılmıştır. Bu bölümde Jonaet ve diğ. [1] kullandıkları ekipmanlar, oluşturduğu deney ve gözlem düzeneği açıklanmaktadır. SLM deneyleri Güney Koreli üretici Winforsys firmasının Metalsys150 makinesiyle yapılmıştır. Bu makinede 200 Watt IPG ytterbium fiber lazer kullanılmaktadır. Deney sırasında üretim haznesi, oksijen seviyesini %0,1 'in altında tutmak için argon koruma gazı ile doldurulmuştur.

Bu çalışmada, SLM Solutions tarafından sağlanan ticari Ti-alaşımı (Ti6Al4V) tozu kullanılmıştır. Alaşımın bileşim oranları tablo 2.3. te verilmiştir. Ortalama toz tane çapı 23-60 mikron aralığındadır.

Tablo 2.3. Ti6Al4V alaşımı birleşim oranları

Bileşenler	Ağırlık oranları
AL	5,50-6,50
V	3,50-4,50
Fe	0,25
C	0,08
N	0,03
O	0,13
H	0,0125
Ti	Kalan

Erişime havuzundaki sıcaklık profilini belirlemek için 640 piksel x 512 piksel ve maksimum 4980 Hz kare hızına sahip bir TELOPS FAST-IR (M350) termal kamera kullanılmıştır. Toz yatağında inşa edilen katman boyutları 10 x 6 x 0.03 mm (uzunluk, genişlik, kalınlığı) dir. Termal kamera bir tripot yardımı ile şekil 2.8. de gösterildiği gibi lazer tarama alanına odaklanan görüntüleme penceresinin yanına yerleştirilmiştir. Deneyler 120-150 Watt lazer gücü ve 750-1000 mm / s tarama hızları için yapılmıştır. Şekil 2.9. de deneyin yapıldığı METALSYS 150 makinesi gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Jonaet ve diğ. kullandığı deney düzeneği [1]

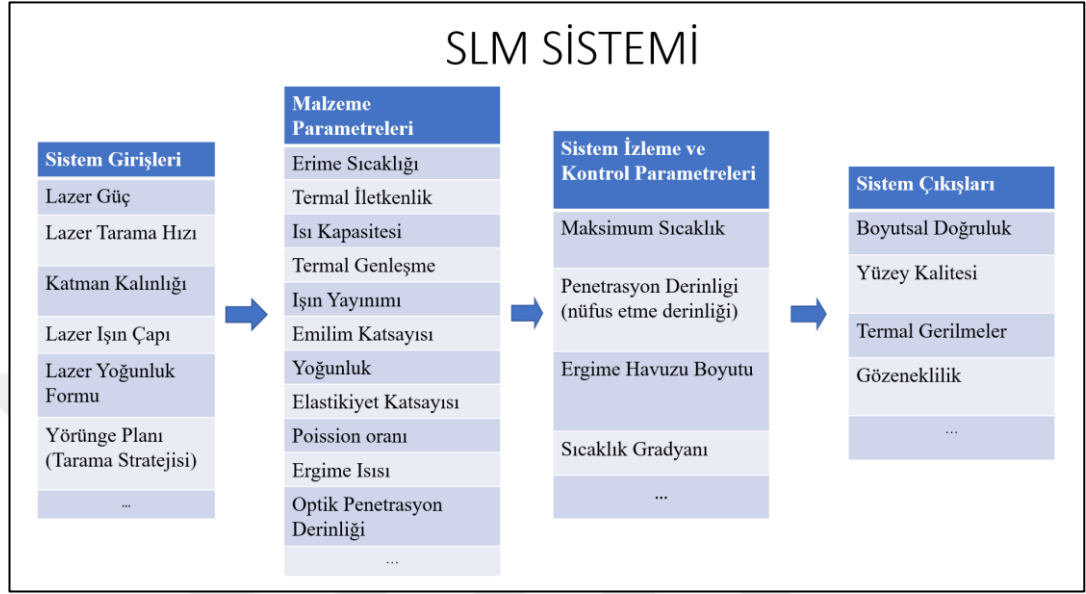


Şekil 2.9. Deneyin yapıldığı METALSYN 150 makinesi

2.7. Çoklu Fizik Modellemesi

SLM sisteminin her bir giriş parametresi farklı özelliklere bağlıdır ve sonuçlar üzerindeki etkisi farklıdır. Sistemin tam anlamıyla anlaşılabilmesi için her bir giriş parametresinin çıkışa olan etkisinin incelenmesi gerekir. Bu inceleme deneysel veya modelleme(simulasyon) olmak üzere 2 farklı şekilde yapılabilir. Deneysel yöntem ekipman ve malzeme gerektirmekte, belirli bir maliyete ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca

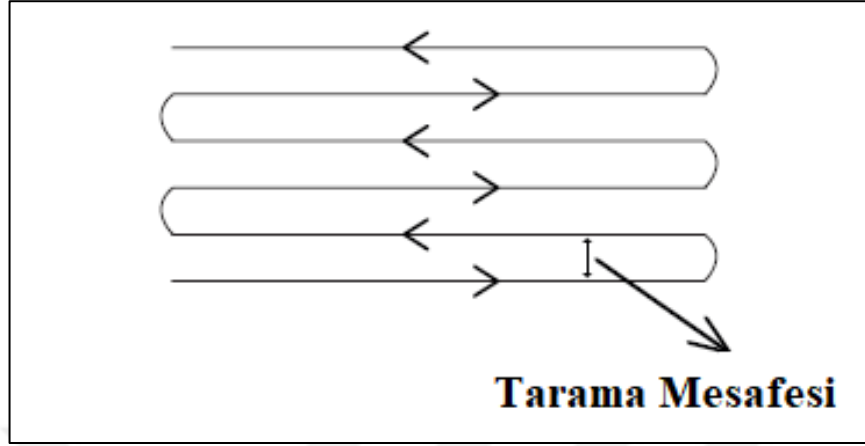
deneysel yöntem modellemeye kıyasla daha fazla zaman almaktadır. Bu açıdan bu tezde sistemin anlaşılabilirliği için bir modelleme sunuldu. Bu modellemede sistemin daha iyi anlaşılabilirliği için şekil 2.10. da gösterildiği gibi 4 başlık halinde incelendi.



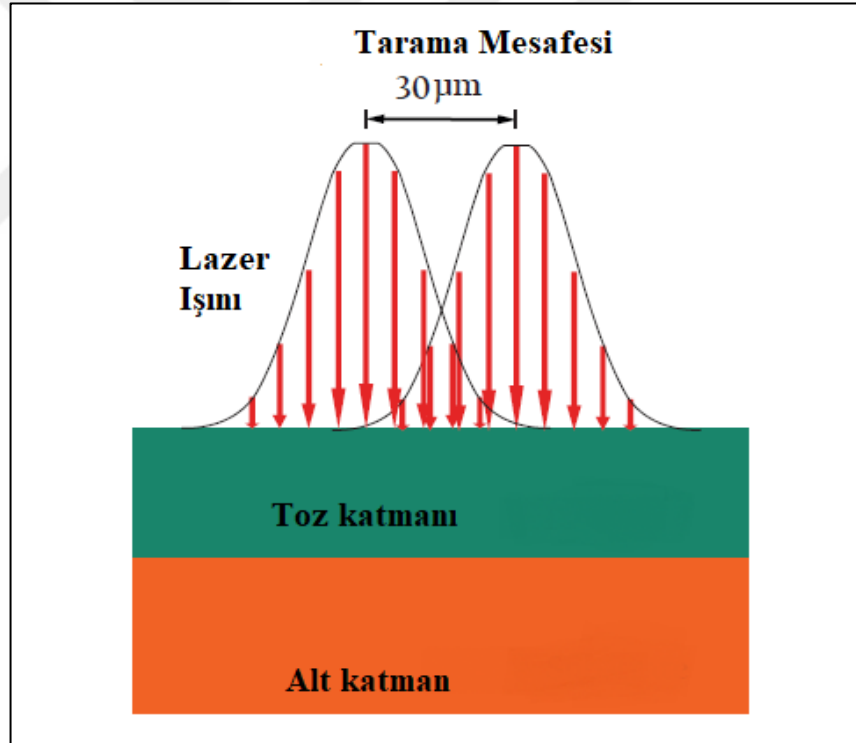
Şekil 2.10 SLM sistem bölümleri

Sistem modellemesinde, literatürde verilen malzeme parametreleri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak bölüm 2 de açıklandığı gibi sisteme tanıtıldı. Lazer güç değeri kullanılan lazer kaynağına bağlıdır. Genellikle endüstride satılan makinelerde bu değer 100 ile 1000 Watt arasındadır. Bu modelde 120 ve 150 Watt değerler kullanılmıştır. Lazer tarama hızı, sistemde kullanılan galvo tarayıcı kafasına göre 100 ile 7000 mm / s arasında değişir. Bu modellemede 750 ve 1000 mm/s hızlar kullanılmıştır. Yapı katı genellikle tozun çapına bağlıdır ve 20 ile 100 mikron arasındaki değerler kullanılır. Bu çalışmada, yapı tabakası 50 mikron olarak kabul edilmiştir. Bu çalışma tek kat için yapılmıştır. Lazer ışınını çapı, SLM makinesinde kullanılan lazer kaynağına ve üretilecek ürünün hassasiyetine bağlı olarak değişir. Bu çalışmada lazer çapı 50 mikron olarak modellenmiştir. Lazer yoğunluk formu, lazerin serbest uzay veya dalga kılavuzu modları olarak lazer kaynağına bağlı olarak değişir [45]. Bu modellemede, serbest uzay gauss Tem00 modlu lazer şiddet formu kullanılır. Gauss Tem00, SLM işlemi için en yaygın kullanılan moddur. Lazer tarama yörüngesi ürün yüzeyine, gözenekliliğe ve termal strese bağlıdır. Bu çalışmada şekil 2.11. de gösterildiği gibi paralel vektör taraması kullanıldı. Tarama mesafesi 30 mikron olarak seçildi ve iki

tarama arasında Şekil 2.12. de gösterildiği gibi bir kesişme bölgesi oluşturularak tarama şeritlerinin birbirine bağlanması sağlandı.



Şekil 2.11. Tarama yörüngesi



Şekil 2.12. Gauss modeli ile tarama kesişimi

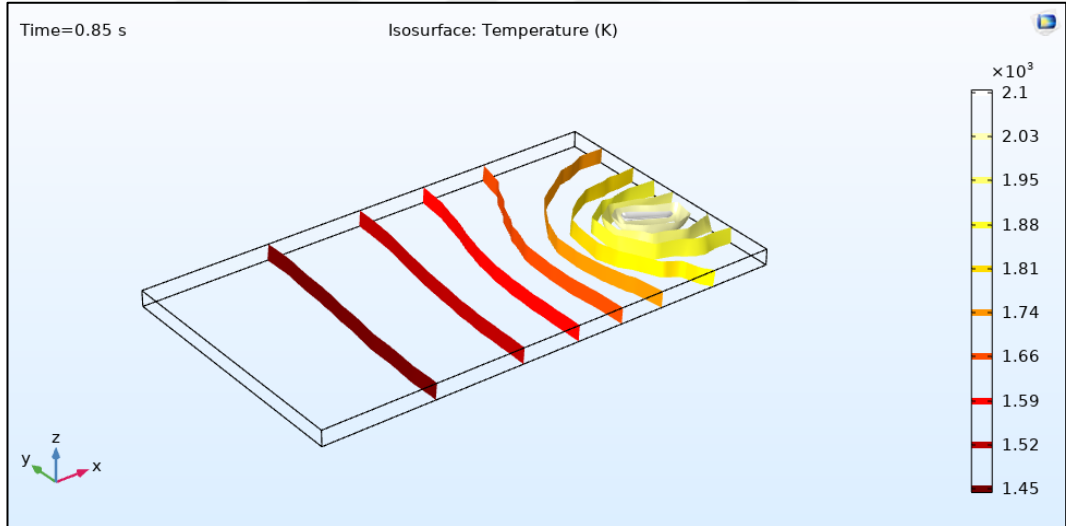
Eklemeli üretimin kalitesi sistem çıkışları olan boyutsal doğruluk, yüzey kalitesi, termal gerilmeler ve gözeneklilik gibi özelliklere bağlıdır. Bu özellikle ancak üretim tamamlandıktan sonra kontrol edilebilir. Sistemi üretim sırasında kontrol etmek için maksimum sıcaklık, ergime havuzu boyutları, penetrasyon derinliği ve sıcaklık gradyanı gibi parametreler izlenebilir. Bu çalışmada maksimum sıcaklık ve sıcaklık

gradyanı gibi parametreler sistemi kontrol edebilmek için ölçülmüştür. Sistem de oluşan yüksek sıcaklık gradyanı sistemin homojenliğini bozarak üretilecek ürünün gözenekliliğini artırır ve üretimin kalitesini düşürür. Bu çalışmada sıcaklık gradyanını azaltmak için sabit hızlı tarama yerine dinamik hızlı bir tarama yörüngesi önerilmiştir.

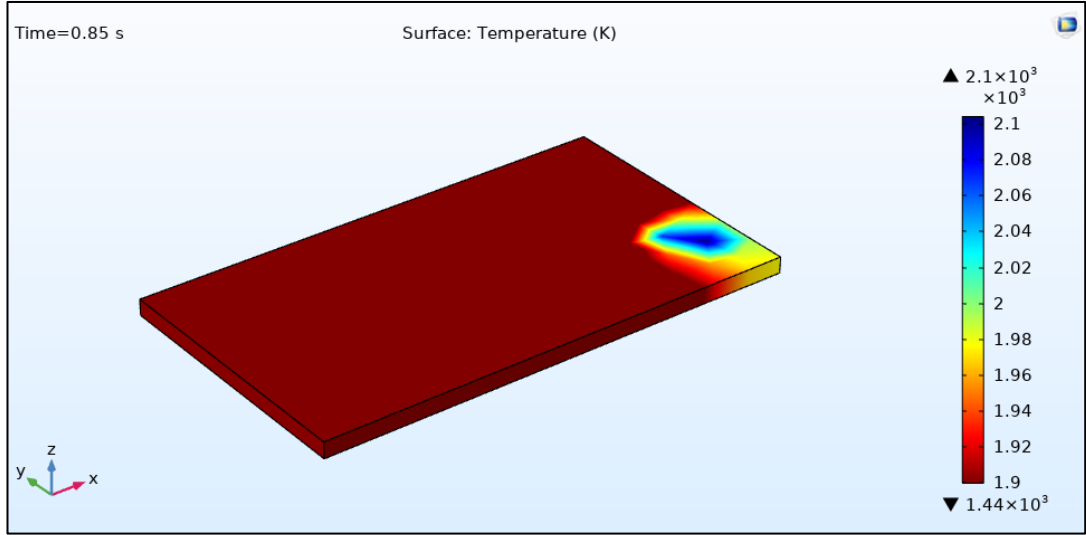
Simülasyonun doğruluğunu test etmek için literatür taraması yapıldı. Simülasyon sonuçları daha önce Jonaet ve ark. [1] yaptığı deney sonuçları ile karşılaştırıldı. Jonaet ve ark. [1] daha önce benzer koşullar altında bir deney yapmış ve bunu bir termal kamera ile izlemiştir. Bu deneyde, farklı tarama sürelerinde farklı güçler ve hızlar için maksimum sıcaklıklar ölçülmüştü. Bu modellemenin koşulları ve Jonaet ve ark. [1] benzerdir. Modelleme, giriş değerleri ve çıkış değerleri arasında bir ilişki sağlar. Bu ilişki ile süreci kontrol edebiliriz. İstenen çıkış değerlerini elde etmek için gereken giriş değerleri modelleme ile belirlenebilir.

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE MODELLEME SONUÇLARI

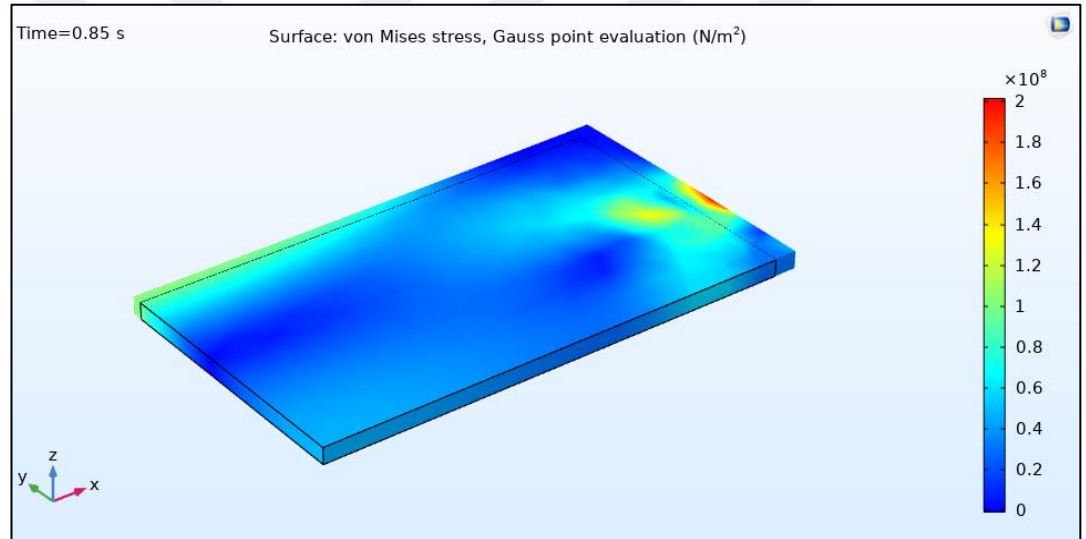
Lazer kaynağından gelen yüksek enerji, üretim alanındaki toz tarafından emilir. Emilen bu enerji toz üzerinde ısı enerjisine dönüşür. Üretim alanında oluşan ısı enerjisi tozların sıcaklığını artırır. Tozların sıcaklığı 1878 K (1604.85° C) 'yi aştığında, katı yüzey ergimeye başlar. Bu sıcaklık değeri Ti6Al4V tozları için ergime sıcaklığıdır. Lazer ışını bulunduğu bölgeyi ergime sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklara ısıtır ve bu bölgede şekil 3.1. de gösterildiği gibi ergime havuzu oluşur. Şekil 3.2. de lazer ışınının malzeme üzerinde oluşturduğu sıcaklık ve şekil 3.3. te ise lazer ışınının oluşturduğu stres gösterilmiştir. Ortaya çıkan ergime havuzu lazerin hareketine bağlıdır. Lazerin konumu değiştiğinde, ergime havuzunun sıcaklığı azalır ve tekrar katılaşır. Bu katılaşmanın bir sonucu olarak, tozlar birbirine ve alt yüzeye bağlanır.



Şekil 3.1. Modellemede oluşan ergime havuzu



Şekil 3.2. Modellemede oluşan sıcaklık



Şekil 3.3. Modellemede oluşan stres

3.1. Deneysel Sonuçlar ve Simülasyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu çalışmada, simülasyon 120 ve 150 Watt güç ile 750 ve 1000 mm / s hızlarda gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları literatürden elde edilen deney sonuçları ile karşılaştırıldı. Sonuçlar tablo 3.1. de gösterilmektedir. Bu çalışmanın sonuçları, yüzey sıcaklığının lazer güç değeri ile doğru orantılı ve tarama hızı değeri ile ters orantılı olduğu göstermektedir. Lazer güç değeri artırıldığında veya tarama hızı değeri düştüğünde, maksimum yüzey sıcaklığı farkı artar. Maksimum yüzey sıcaklığı tozlar arasındaki ısı transferi nedeniyle artar. Ergime havuzu, lazer kaynağının tarama sırasında hareket ettiği bölgede oluşurken, toplam yüzey alanı sıcaklığı da bir miktar

artır. Bu artış nedeniyle, maksimum yüzey sıcaklığı artan tarama süresi ile artar. Yüzey sıcaklığı farkındaki artış, üretilecek ürünün termal gerilme ve polarite değerlerini artırır. Elde edilen termal gradyan, malzemenin yapısal özelliklerinin homojen olarak dağılması engeller. Bu sorun, lazer gücü ve tarama hızı değerlerini optimize ederek çözülebilir. Bu çalışma, süreci anlamak ve parametreleri optimize etmek için önemlidir.

Tablo 3.1. Simulasyon ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

Tarama	Süre[s]	Lazer Güç [Watt]	Hız [mm/s]	Simulasyon Sonuçları[K]	Deneysel Sonuçlar [K]	Hata
1. satır (ilk tarama)	0,0133 s	120 W	750 mm/s	2330	2329	%0,04
201.satır (son tarama)	2,681 s	120 W	750 mm/s	2520	2657	%5,0
1. satır (ilk tarama)	0,0133 s	150 W	750 mm/s	2510	2531	%0,8
201.satır (son tarama)	2,681 s	150 W	750 mm/s	2730	2921	%6,0
1. satır (ilk tarama)	0,09 s	120 W	1000 mm/s	2180	2132	%2,2
201.satır (son tarama)	2,01 s	120 W	1000 mm/s	2350	2354	%1,1
1. satır (ilk tarama)	0,01 s	150 W	1000 mm/s	2390	2297	%0,1
201.satır (son tarama)	2,01 s	150 W	1000 mm/s	2580	2572	%0,3

3.2. Farklı güç ve hız değerlerinde yapılan modellemeler

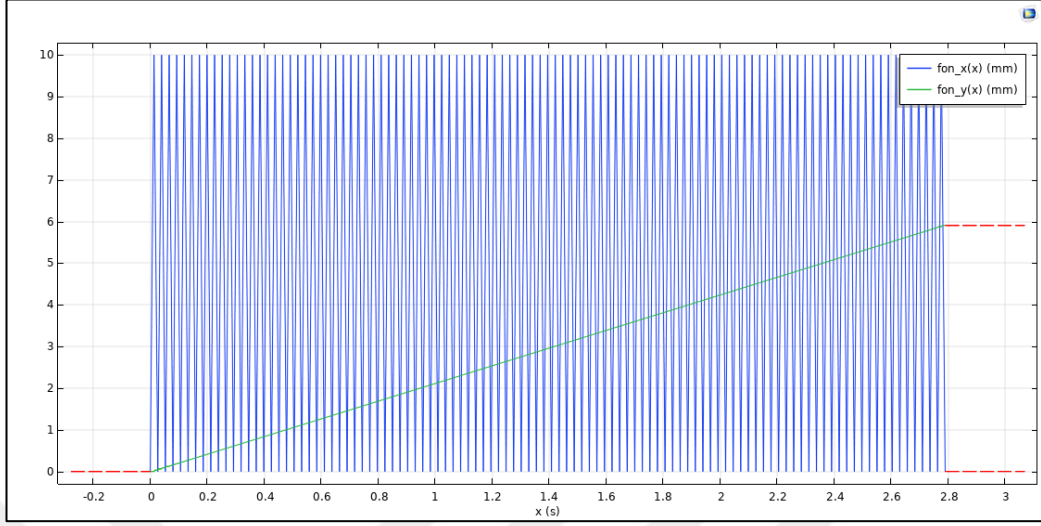
Bu bölümde 750, 1000, 2000 ve 5000 mm/s hız değerinde oluşturulan yörüngeler için 120, 150, 250 ve 400 Watt güç değerlerinde farklı modelleme sonuçları verilmektedir. Şekil 3.4., 3.11., 3.18. ve 3.28. farklı hızlara göre tarama yörüngeleri gösterilmiştir. Tarama yörüngelerinde X ve Y konumları sabittir. Tarama hızına bağlı olarak tarama süresi değişmektedir.

Şekil 3.5., 3.6., 3.12., 3.13., 3.19., 3.20., 3.21., 3.29., 3.30., 3.31. ve 3.32. de farklı hız ve güç değerleri için Maksimum sıcaklık grafiği verilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre Maksimum sıcaklık değeri hız ile ters güç ile doğru orantılıdır. Maksimum sıcaklık grafiğinde oluşan dalgalanmalar tarama yörüngesinin hızının sabit olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu sonuçlara göre aynı hız değeri için dalgalanma oranı güç değeri artıkça arttığı, aynı güç değerlerinde hız değeri artıkça dalgalanma oranı değerinin azaldığı görülmektedir.

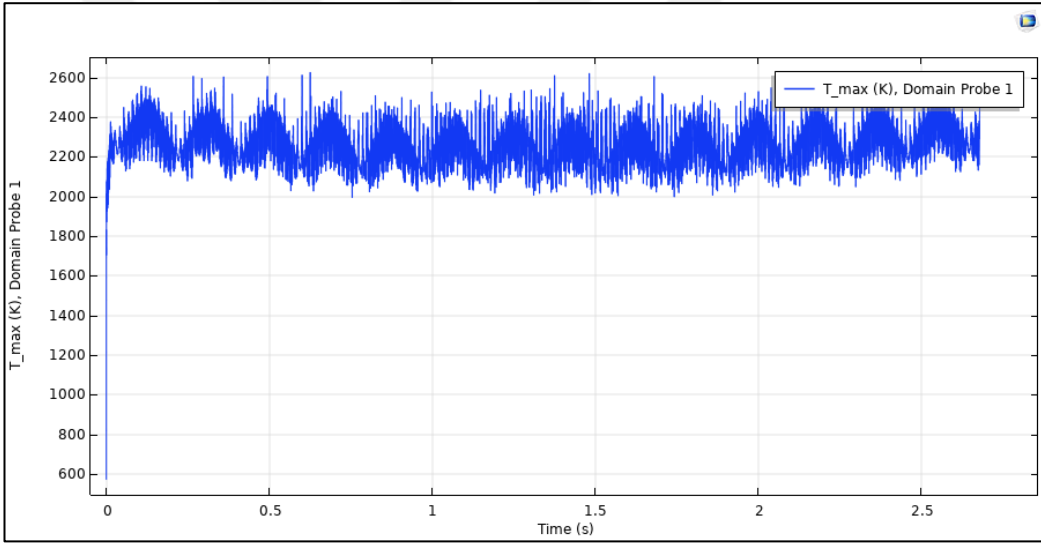
Şekil 3.7., 3.8., 3.14., 3.15., 3.22., 3.23., 3.24., 3.33., 3.34., 3.35. ve 3.36. da farklı hız ve güç değerleri için ergime havuzu gösterilmektedir. Ti6Al4V tozu için ergime sıcaklığı 1873 K, kaynama sıcaklığı ise 3600 K dir. Sonuçlarda oluşan ergime havuzu geometrileri ve yan taraflarında sıcaklık sütunu bulunmaktadır. Bir katmanın düzgün bir şekilde oluşabilmesi ve alt katmana sağlıklı bir şekilde bağlanabilmesi için üretilen katman dışında alt katmanları da eritmesi gerekmektedir. Bu açıdan sağlıklı bir SLM prosesi için kaynak derinliği minimum katman kalınlığının 2 katı olması gerekmektedir. Literatürde bu konuda farklı çalışmalar bulunmaktadır ancak ideal kaynak derinliğinin katman kalınlığının 3 katı olarak kabul edilmektedir. Şekildeki sonuçlar kaynak derinliklerini göstermektedir.

Şekil 3.9., 3.10., 3.16., 3.17., 3.25., 3.26., 3.27., 3.37., 3.38., 3.39. ve 3.40. de farklı hız ve güç değerleri için ergime havuzu sıcaklık dağılımını göstermektedir. SLM işlemi sırasında tozlar hem alt zemin hem de etrafındaki tozlarla da birleşerek tek bir parça oluşturmaktadır. Bu açıdan ergime havuzunun derinliği kadar eni ve boyu da önem taşımaktadır. Bu modelleme ile sağlıklı bir SLM üretimi için gereken, maksimum sıcaklık, penetrasyon derinliği (ergime havuzu derinliği) ve ergime havuzu ölçüleri gibi kaynak özellikleri izlenebilmekte ve kontrol edilebilmektedir.

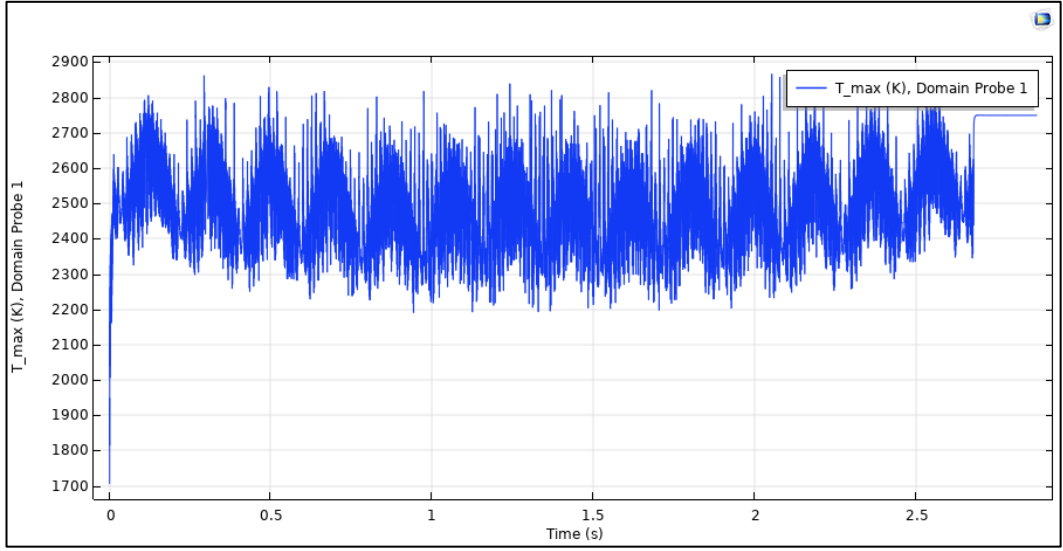
3.2.1. 750mm/s hız için yapılan model sonuçları



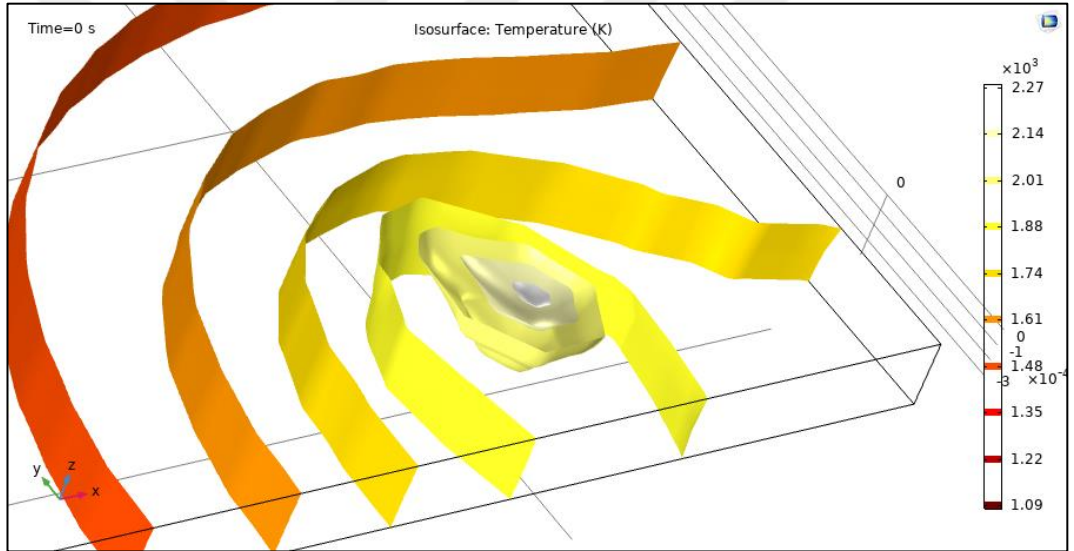
Şekil 3.4. 750 mm/s hız tarama yörüngesi



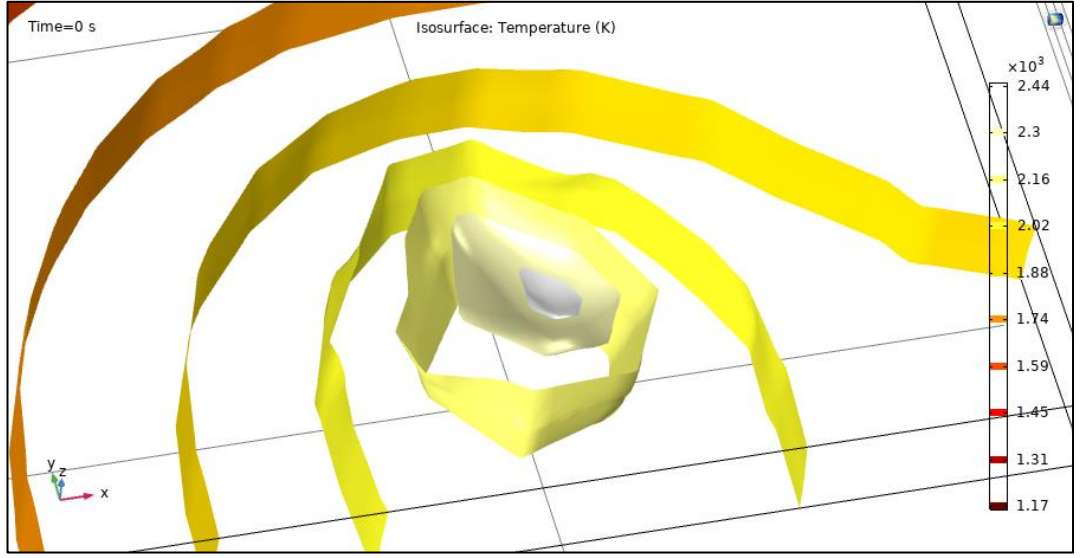
Şekil 3.5. 120 W güç ve 750 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği



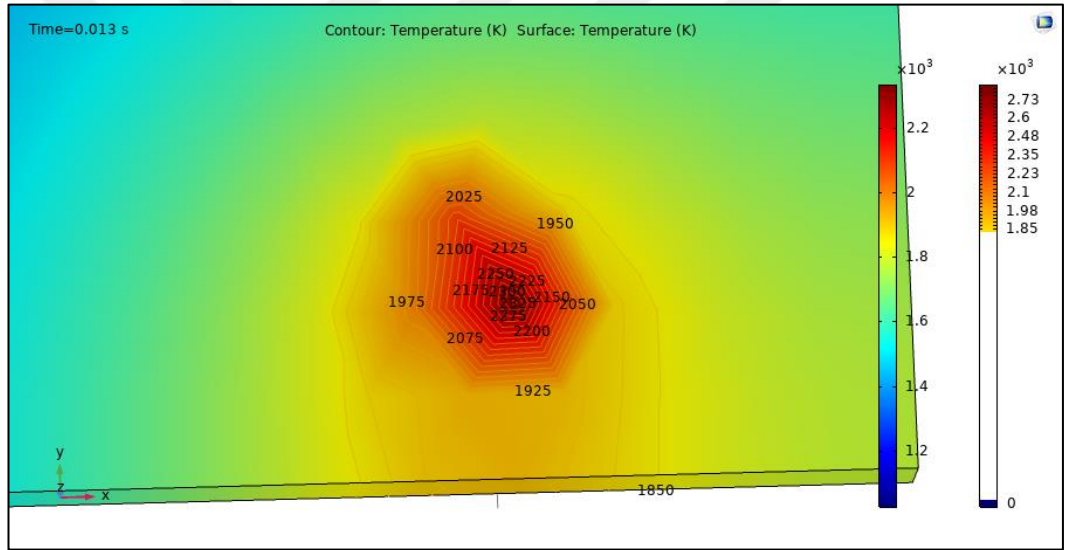
Şekil 3.6. 150 W güç ve 750 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği



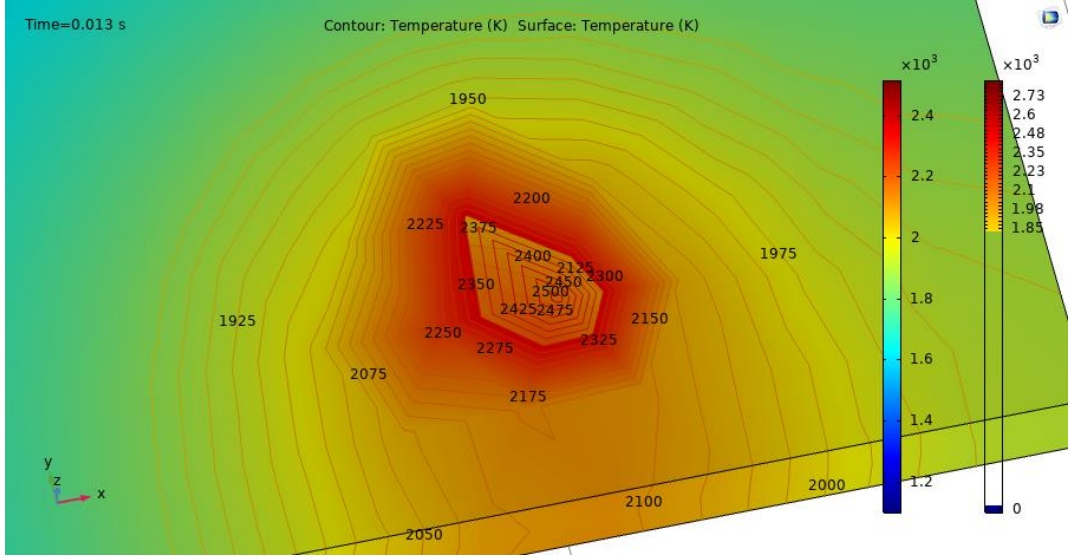
Şekil 3.7. 120 W güç ve 750 mm/s hız için ergime havuzu



Şekil 3.8. 150 W güç ve 750 mm/s hız için ergime havuzu

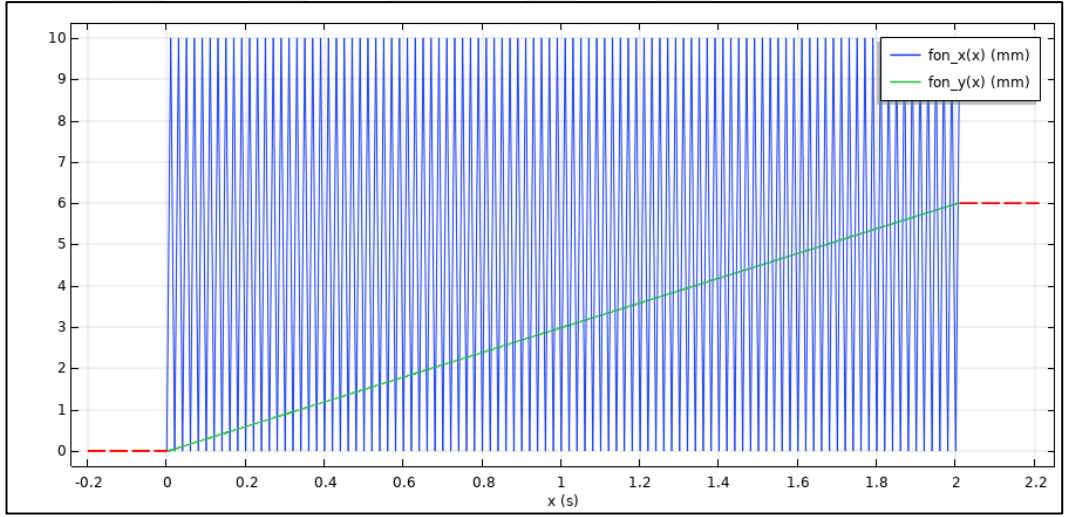


Şekil 3.9. 120 W güç ve 750 mm/s hız için ergime havuzu sıcaklık dağılımı

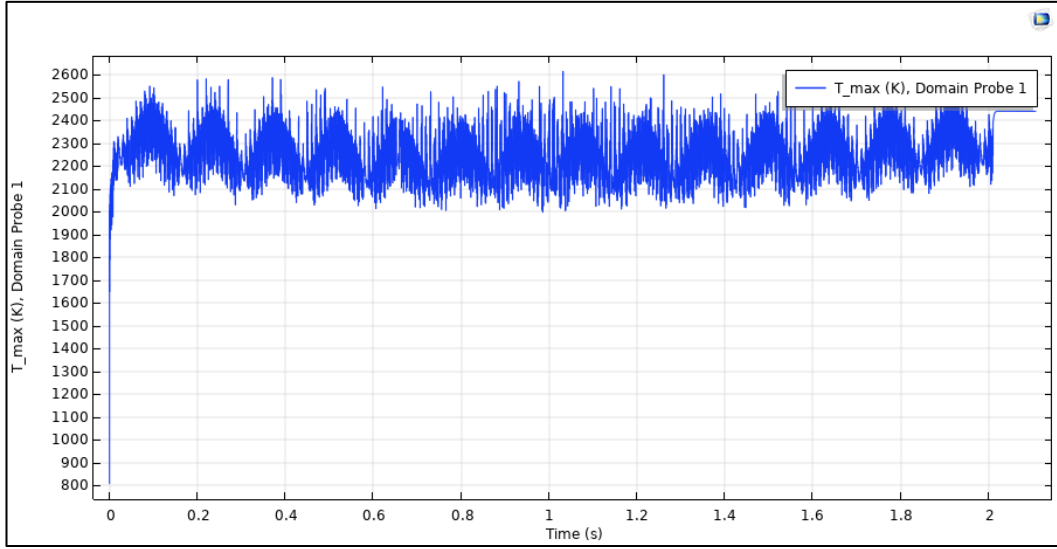


Şekil 3.10. 150 W güç ve 750 mm/s hız için ergime havuzu sıcaklık dağılımı

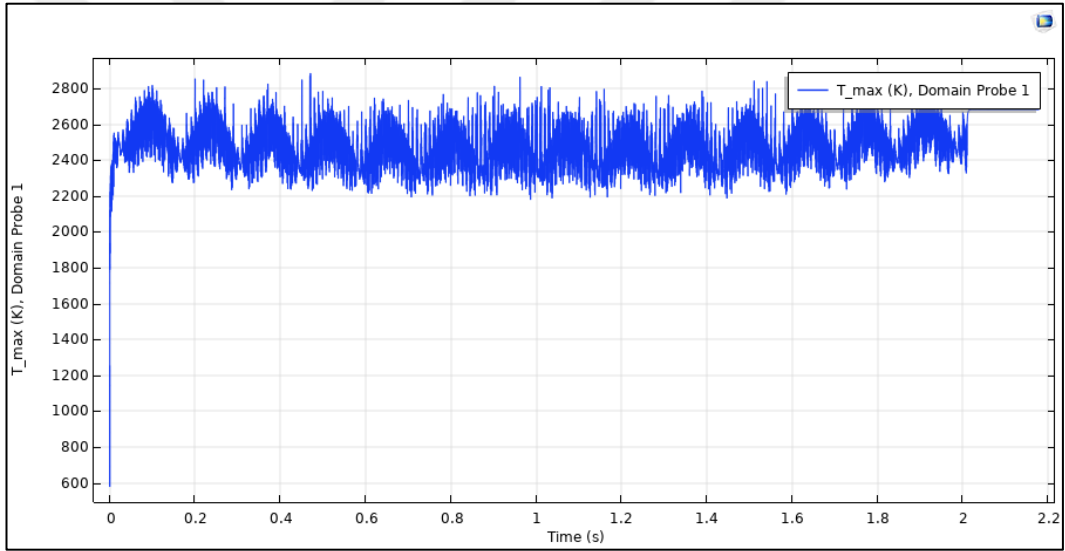
3.2.2. 1000 mm/s hız için yapılan model sonuçları



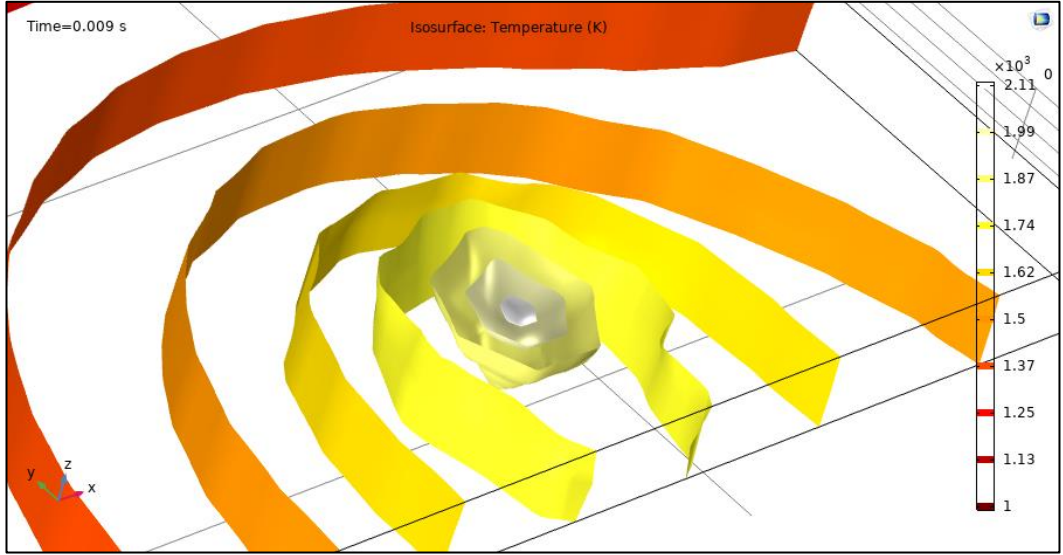
Şekil 3.11. 1000 mm/s hız için tarama yörüngesi



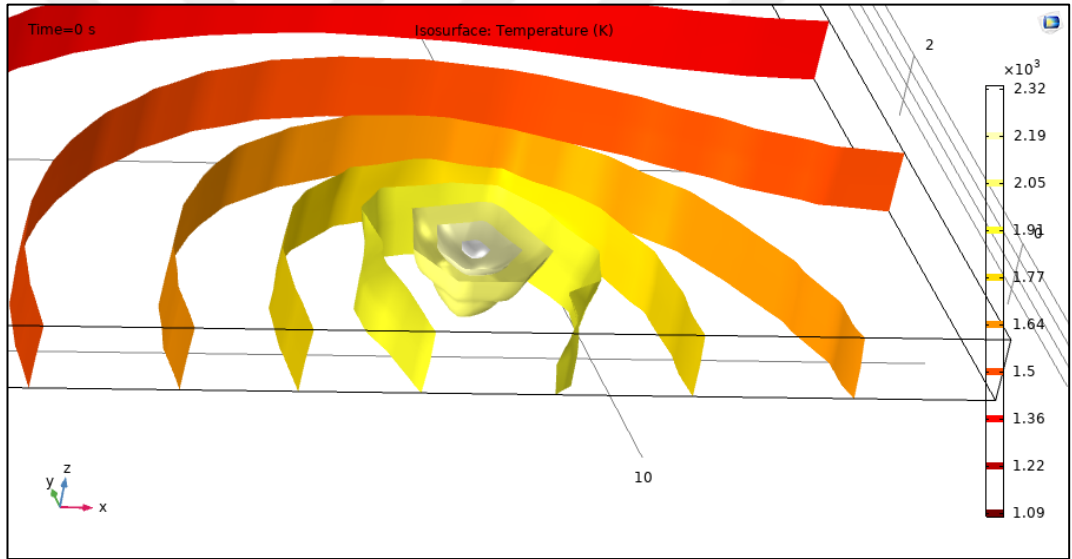
Şekil 3.12. 120 W güç ve 1000 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği



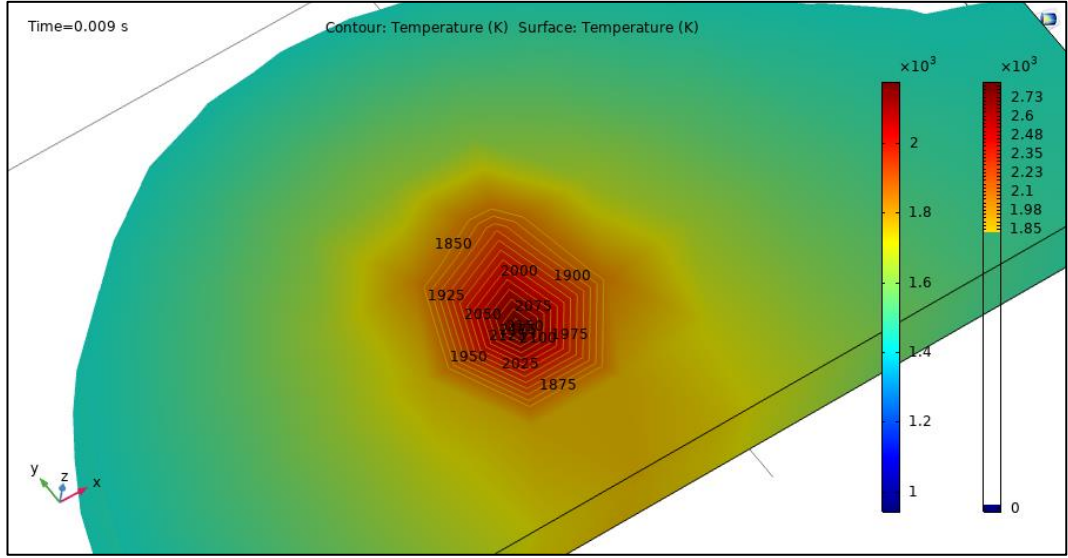
Şekil 3.13. 150 W güç ve 1000 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği



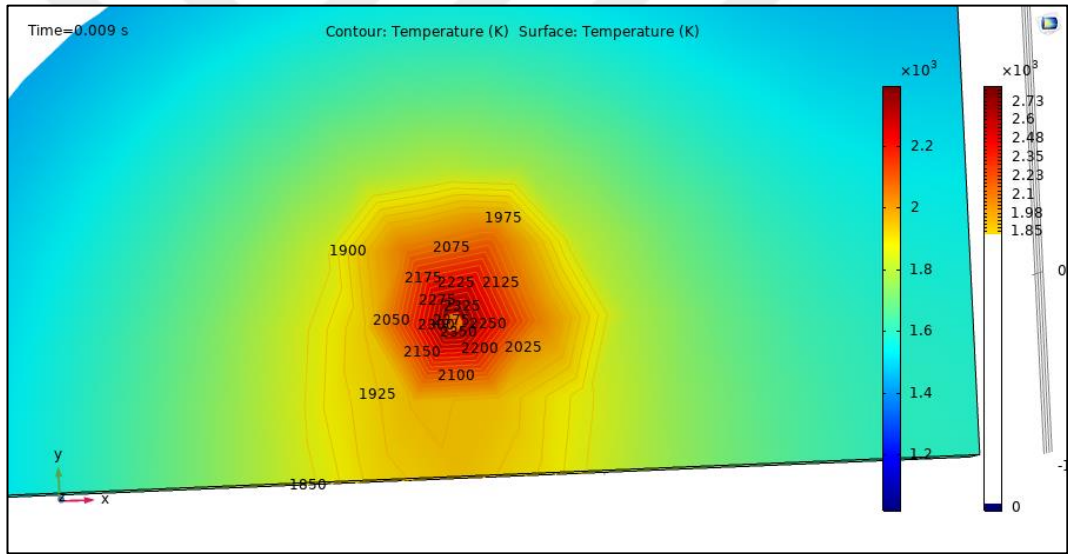
Şekil 3.14. 120 W güç ve 1000 mm/s hız için ergime havuzu



Şekil 3.15. 150 W güç ve 1000 mm/s hız için ergime havuzu

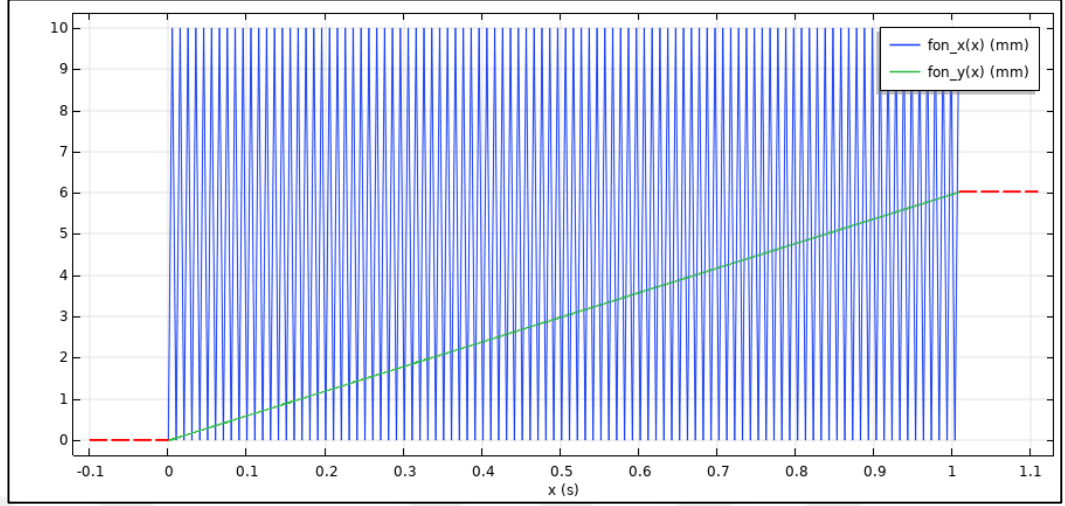


Şekil 3.16. 120 W güç ve 1000 mm/s hız için ergime havuzunun sıcaklık dağılımı

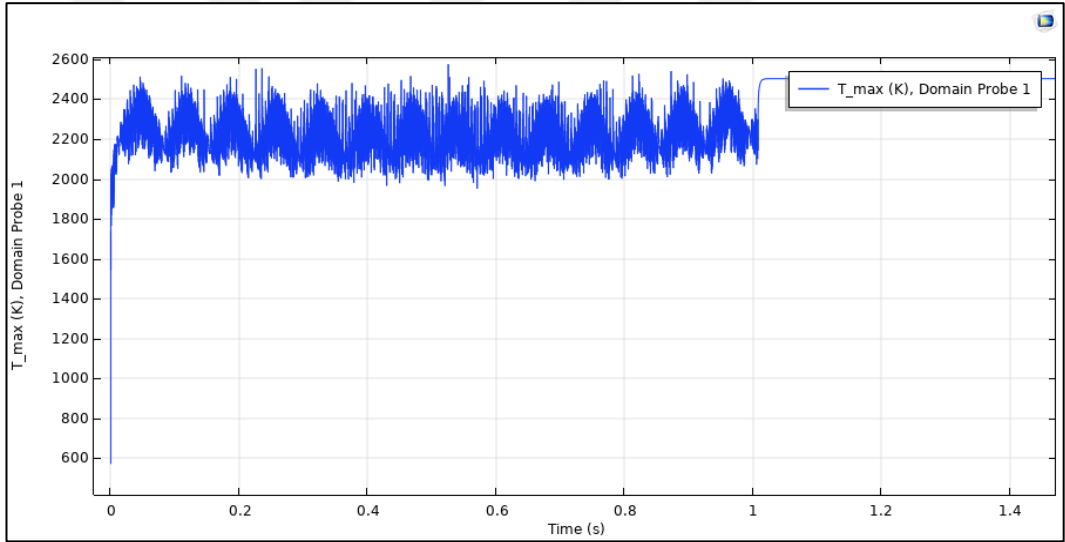


Şekil 3.17. 150 W güç ve 1000 mm/s hız için ergime havuzunun sıcaklık dağılımı

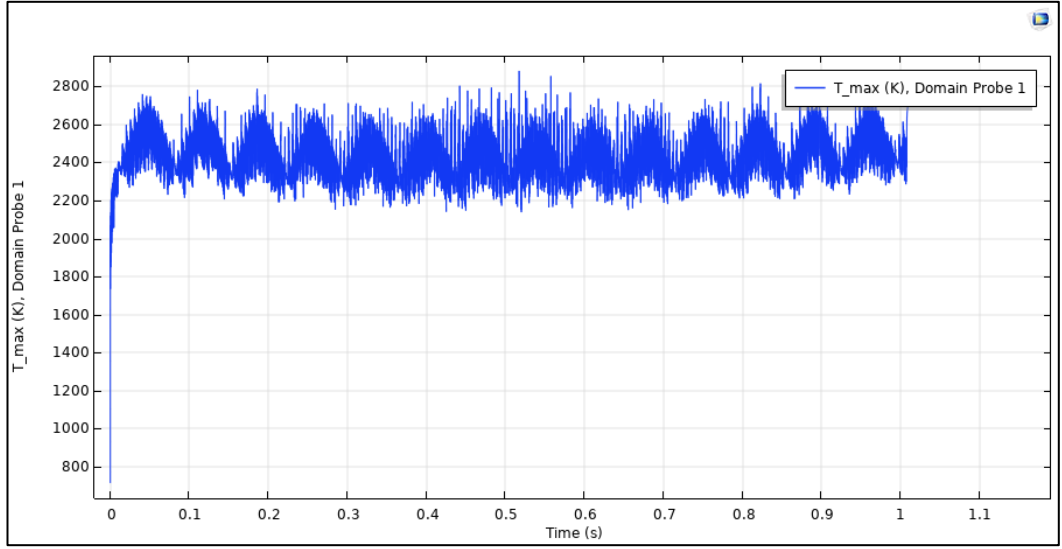
3.2.3. 2000mm/s hız modelleri sonuçları



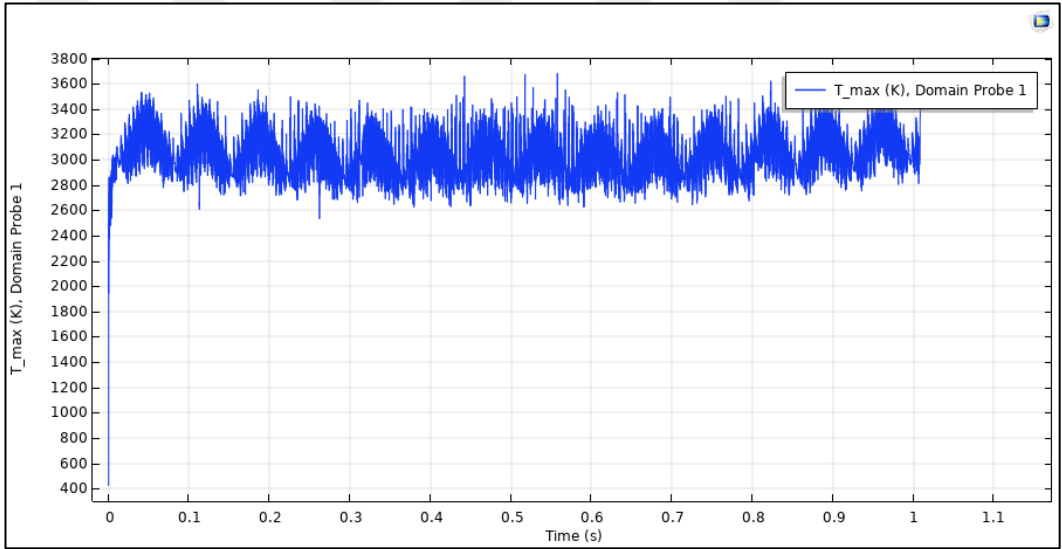
Şekil 3.18. 2000 mm/s hız için tarama yörüngesi



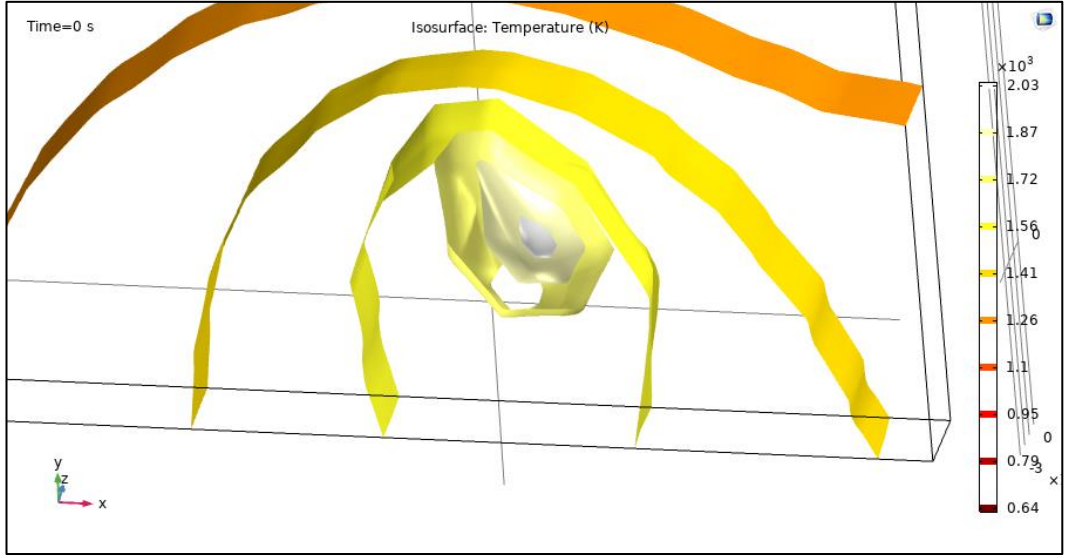
Şekil 3.19. 120 W güç ve 2000 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği



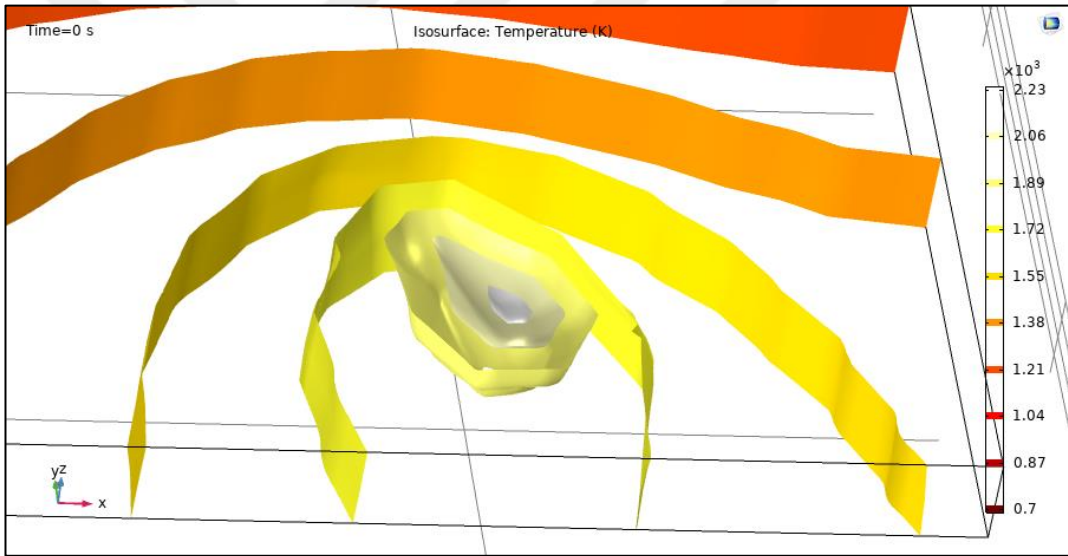
Şekil 3.20. 150 W güç ve 2000 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği



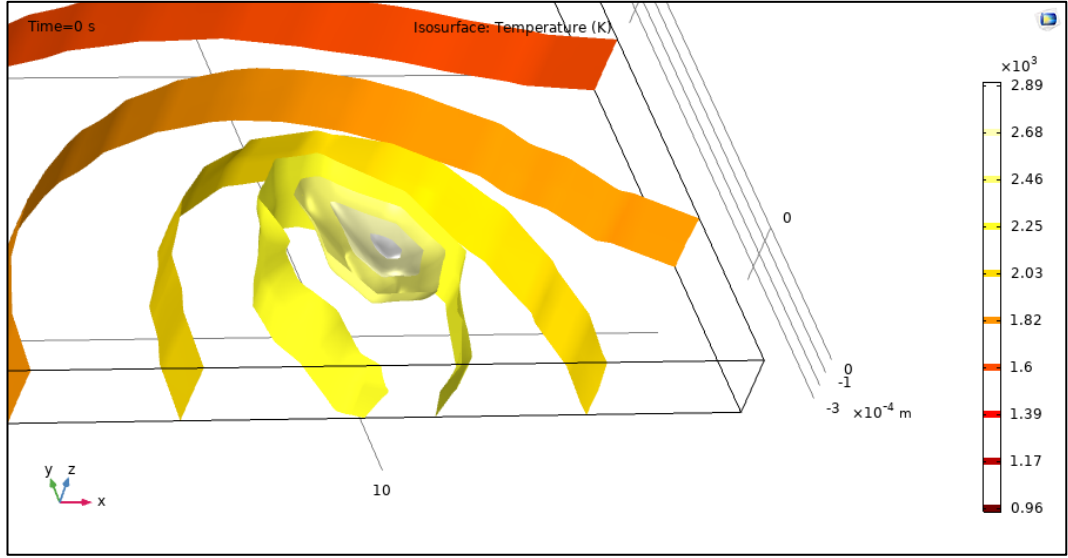
Şekil 3.21. 250 W güç ve 2000 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği



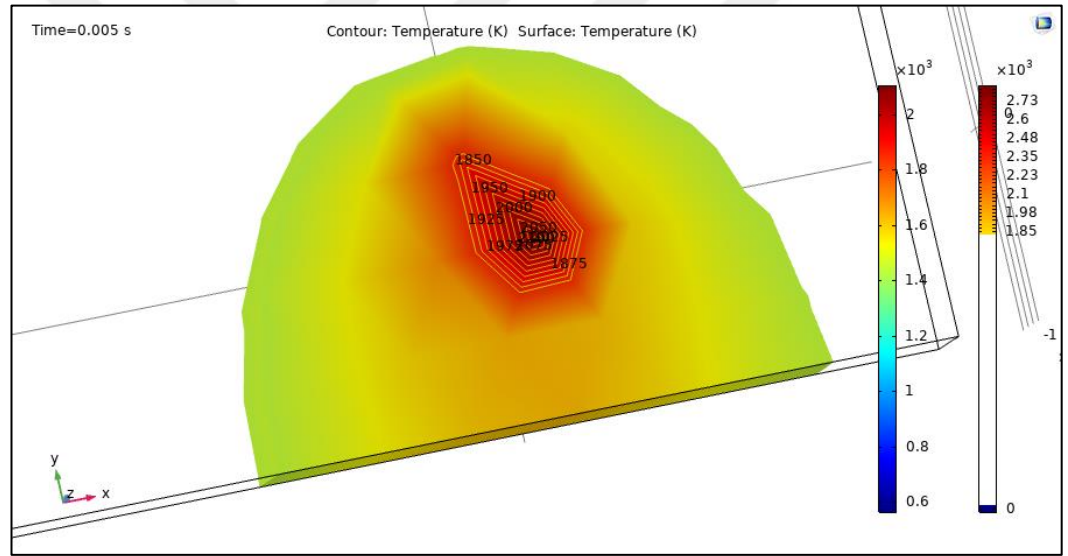
Şekil 3.22. 120 W güç ve 2000 mm/s hız için ergime havuzu



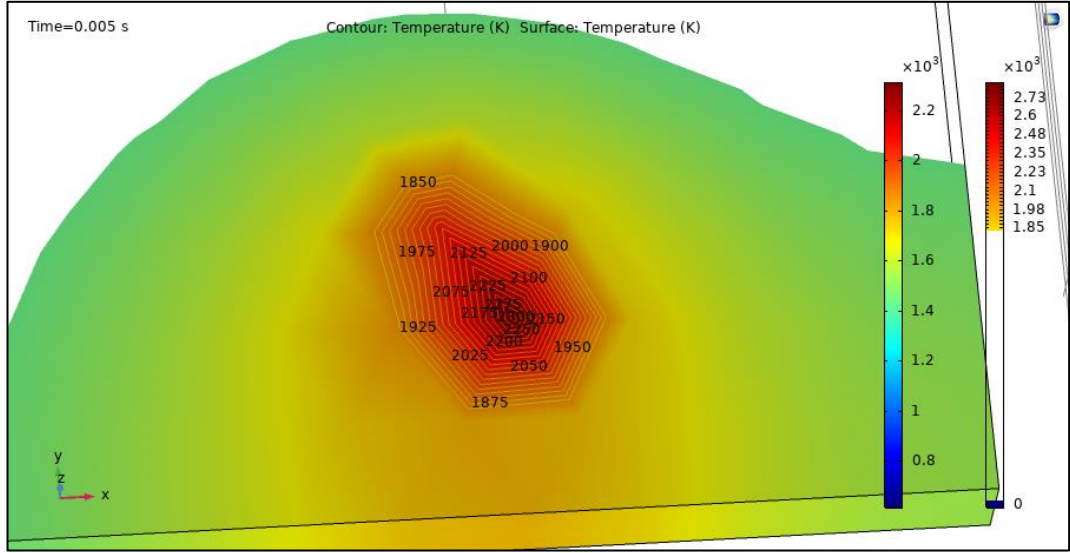
Şekil 3.23. 150 W güç ve 2000 mm/s hız için ergime havuzu



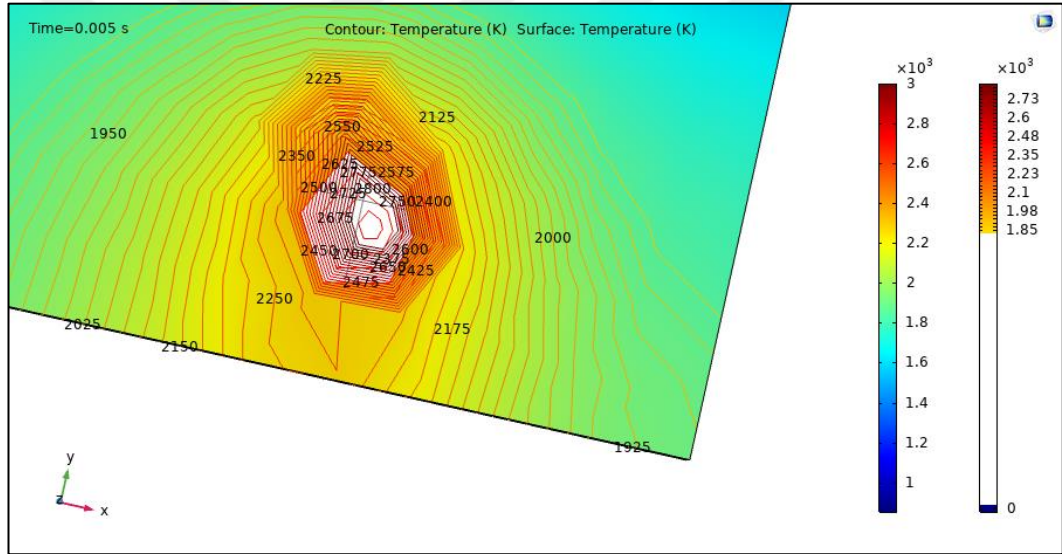
Şekil 3.24. 250 W güç ve 2000 mm/s hız için ergime havuzu



Şekil 3.25. 120 W güç ve 2000 mm/s hız için ergime havuzu sıcaklık dağılımı

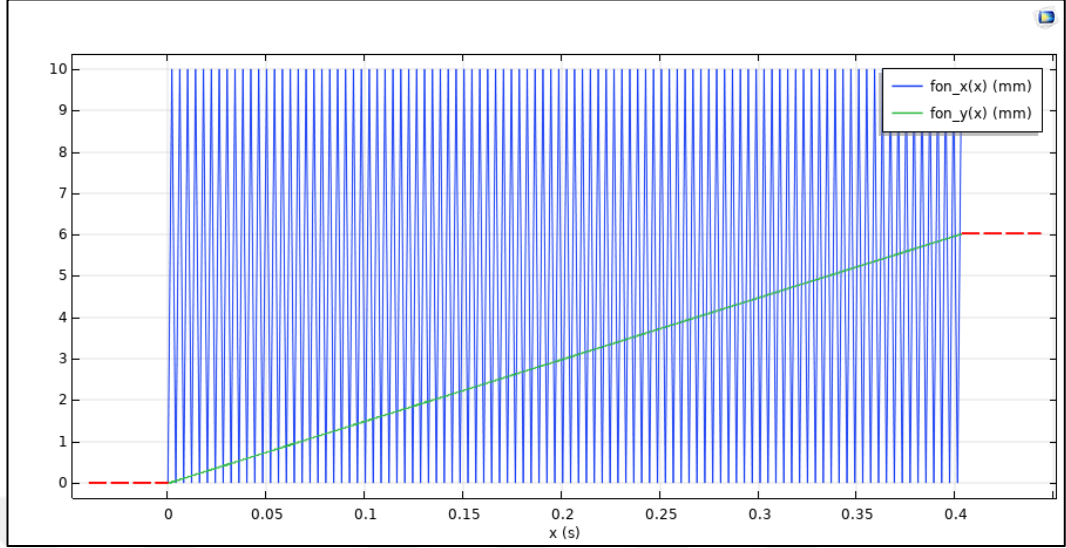


Şekil 3.26. 150 W güç ve 2000 mm/s hız için ergime havuzu sıcaklık dağılımı

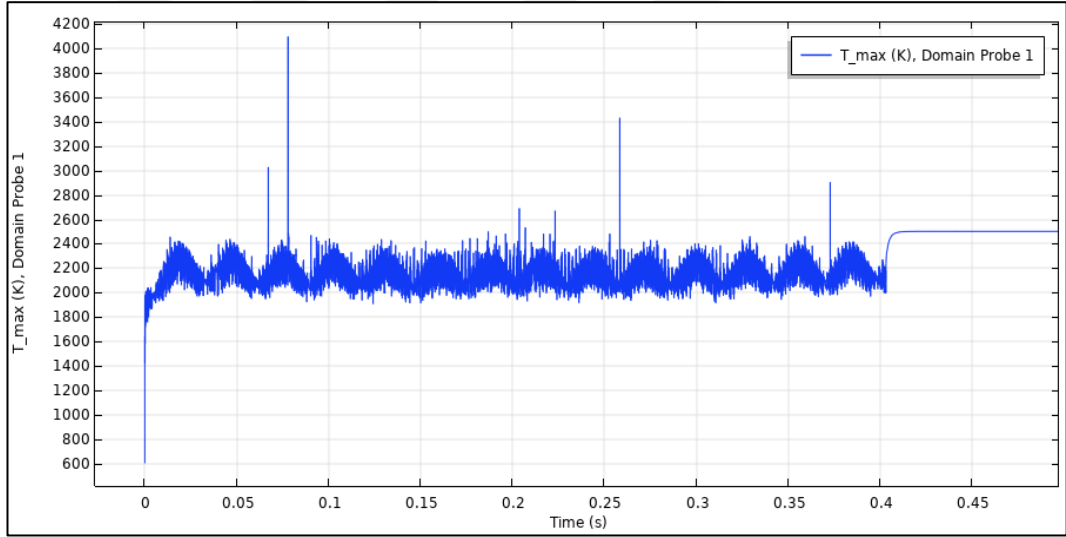


Şekil 3.27. 250 W güç ve 2000 mm/s hız için ergime havuzu sıcaklık dağılımı

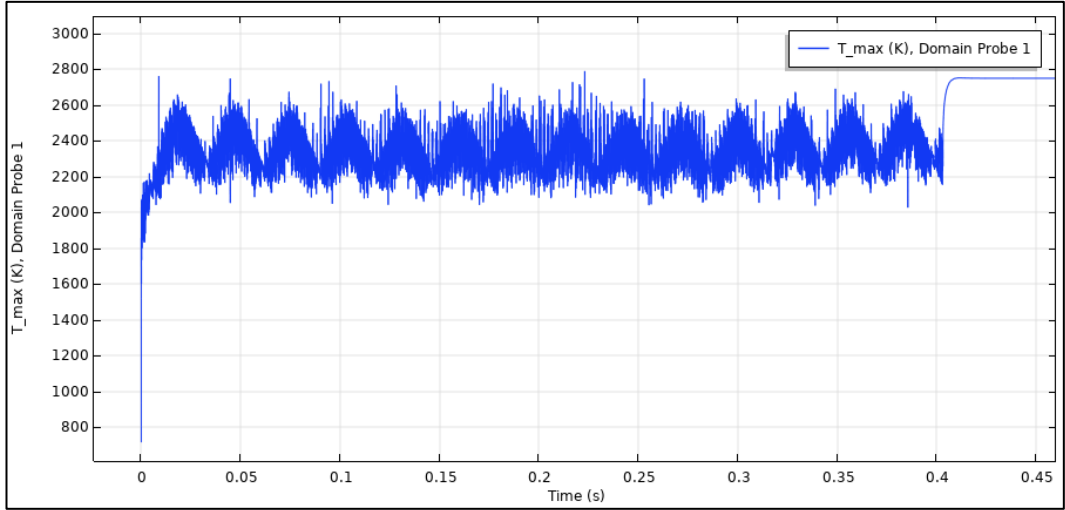
3.2.4. 5000 mm/s hız için model sonuçları



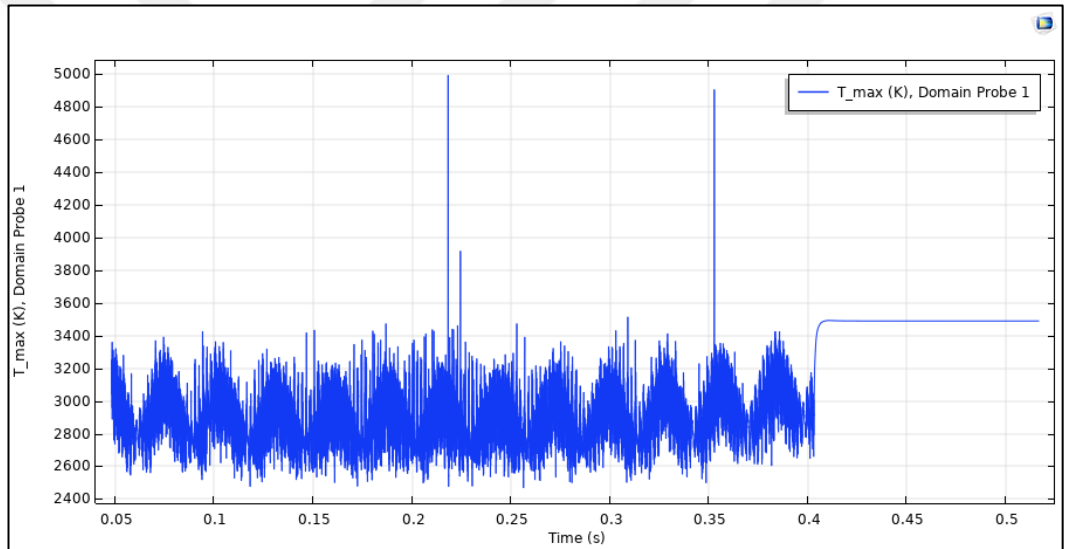
Şekil 3.28. 5000 mm/s hız için tarama yörüngesi



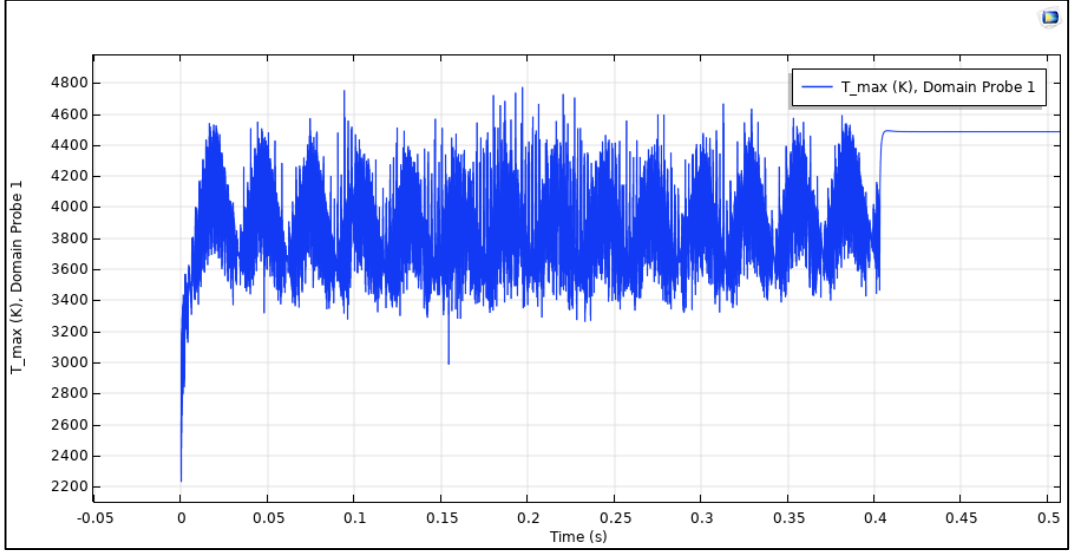
Şekil 3.29. 120 W güç ve 5000 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği



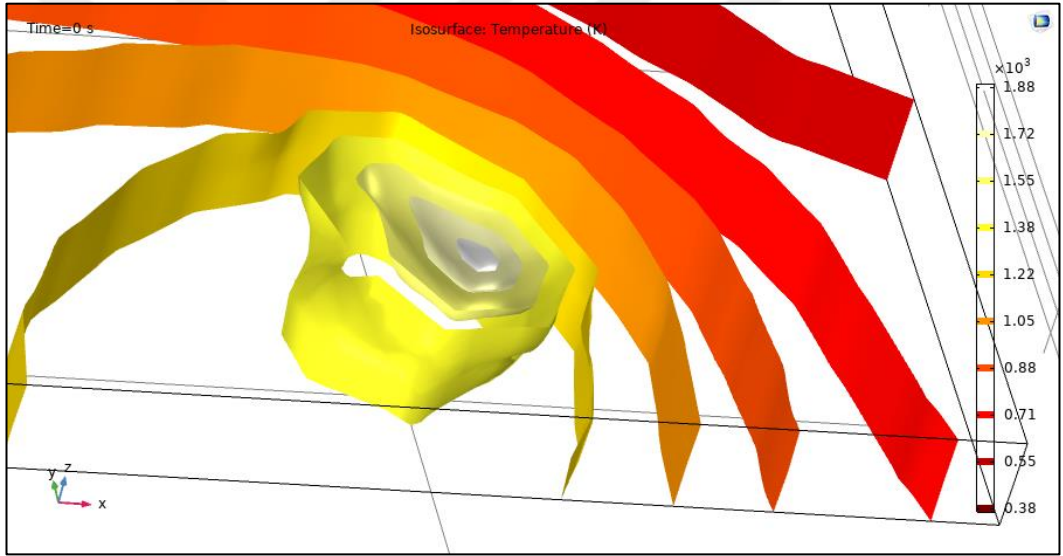
Şekil 3.30. 150 W güç ve 5000 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği



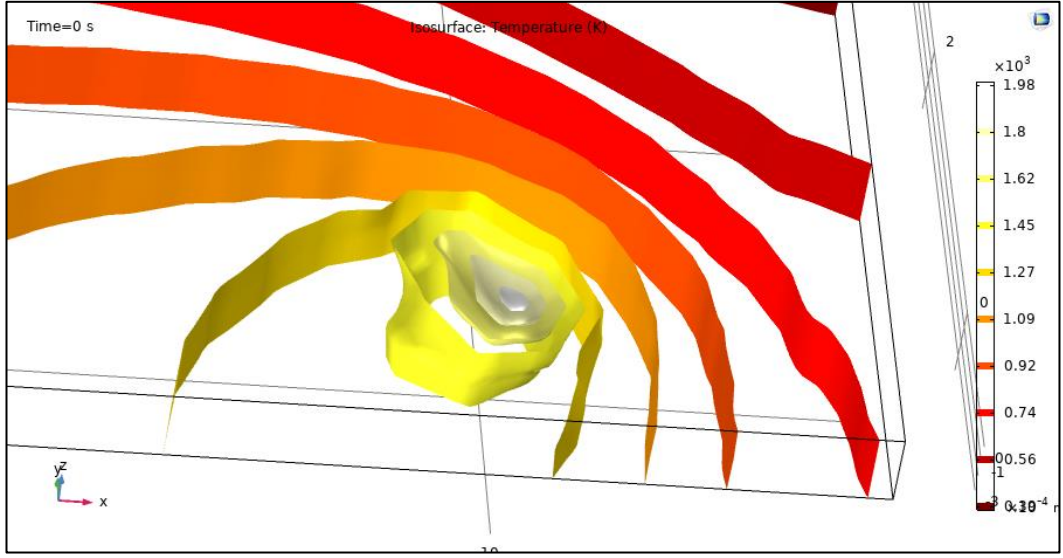
Şekil 3.31. 250 W güç ve 5000 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği



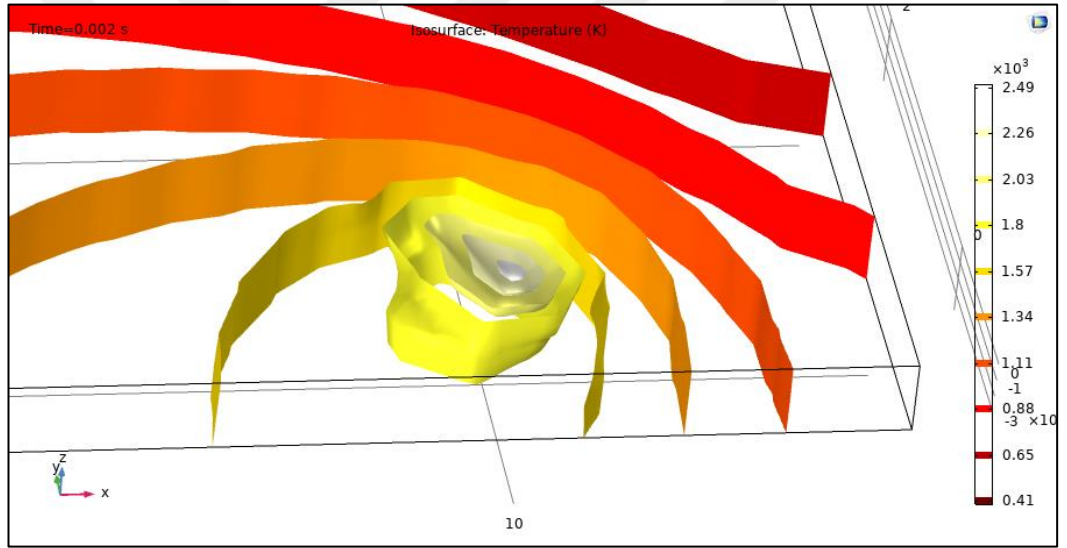
Şekil 3.32. 400 W güç ve 5000 mm/s hız için maksimum sıcaklık grafiği



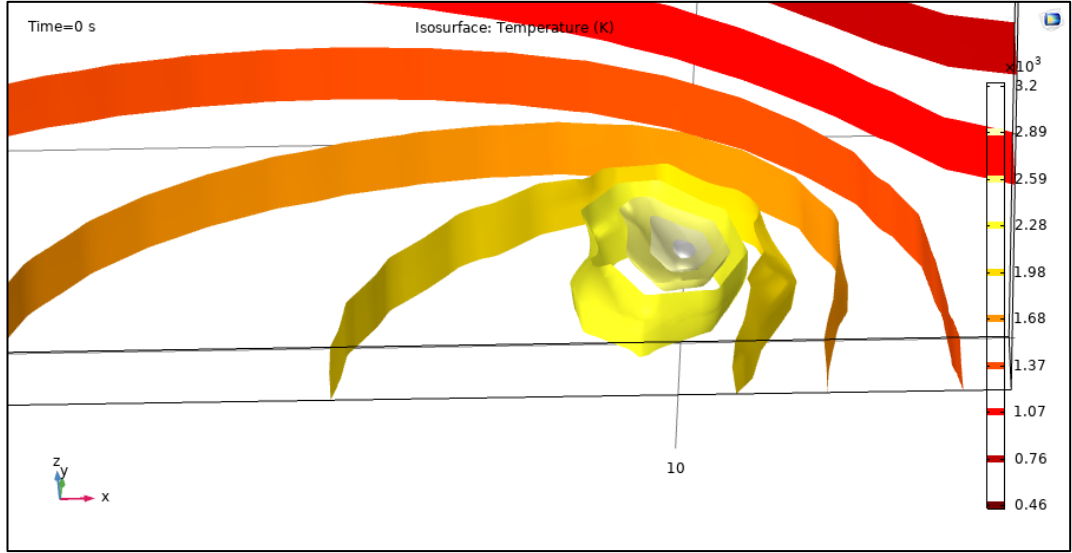
Şekil 3.33. 120 W güç ve 5000 mm/s hız için ergime havuzu



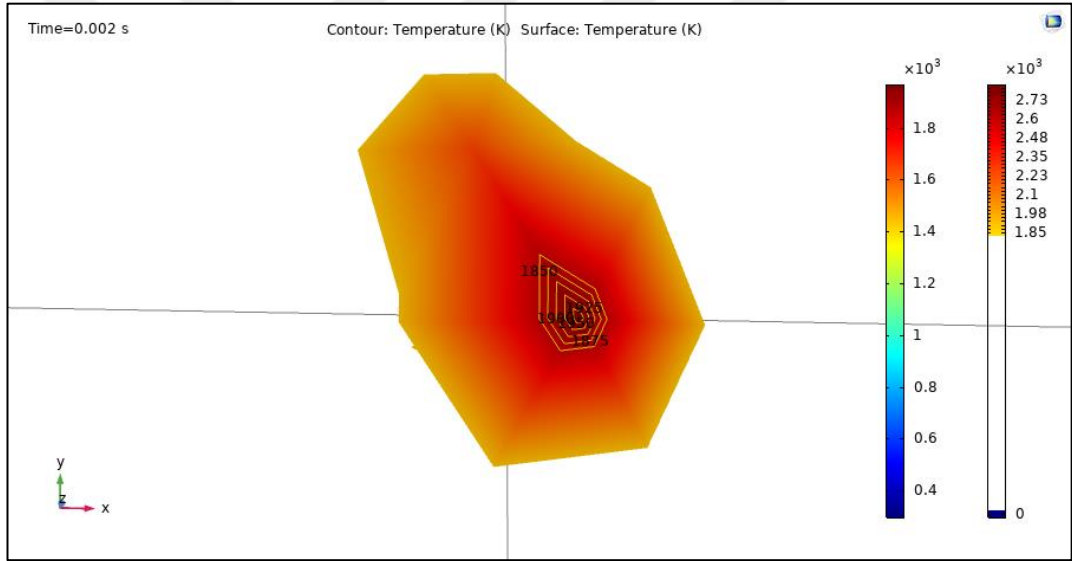
Şekil 3.34. 150 W güç ve 5000 mm/s hız için ergime havuzu



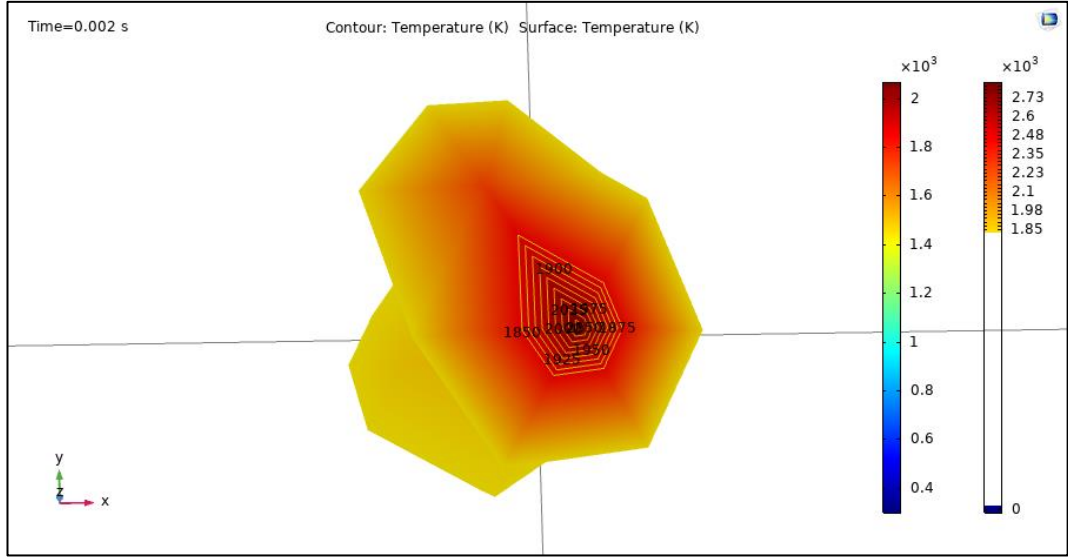
Şekil 3.35. 200 W güç ve 5000 mm/s hız için ergime havuzu



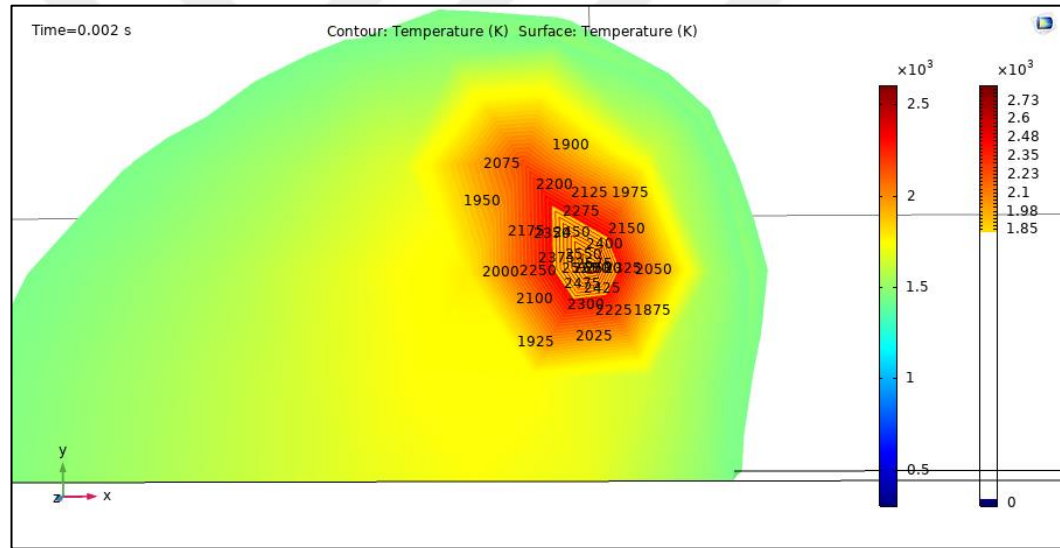
Şekil 3.36. 400 W güç ve 5000 mm/s hız için ergime havuzu



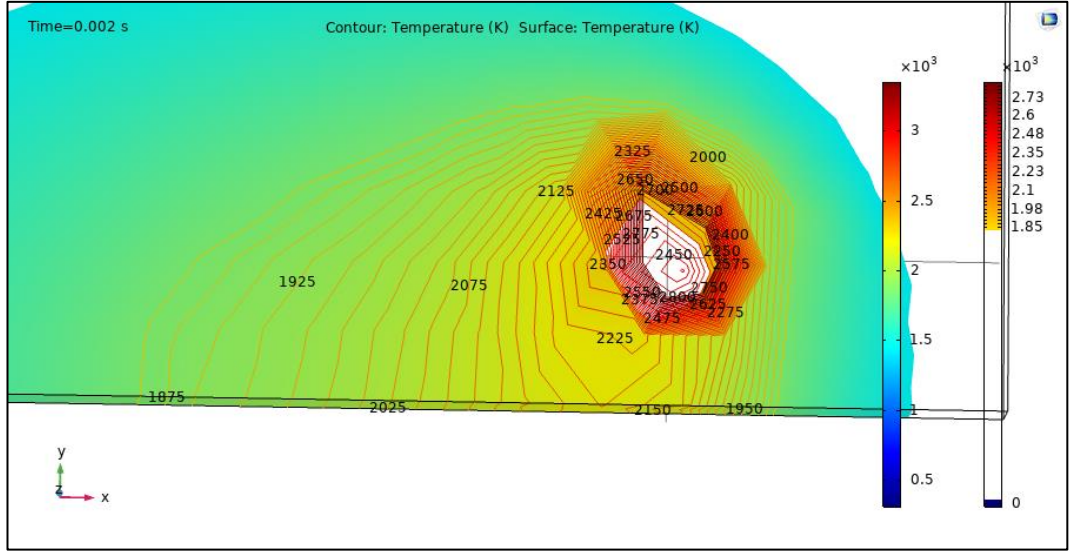
Şekil 3.37. 120 W güç ve 5000 mm/s hız için erime havuzu sıcaklık dağılımı



Şekil 3.38. 150 W güç ve 5000 mm/s hız için ergime havuzu sıcaklık dağılımı



Şekil 3.39. 250 W güç ve 5000 mm/s hız için ergime havuzu sıcaklık dağılımı



Şekil 3.40. 400 W güç ve 5000 mm/s hız için erime havuzu sıcaklık dağılımı

3.3. Maksimum sıcaklık farkı sonuçları ve yörünge hız optimizasyonu

Tablo 3.2. de farklı hız ve güç değerleri için oluşturulan modellerin ilk ve son taramadaki maksimum sıcaklık değerleri gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bütün modellerde ilk tarama ile son tarama arasında bir sıcaklık farkı görülmektedir. Bu sıcaklık farkının temel nedeni malzemenin kendi içerisinde olan ısı transferidir. İlk tarama anında sistemin başlangıç sıcaklığı 273.15 K dir. Ancak ilk tarama ile birlikte katman yavaş yavaş ısınmaya başlar. Tarama işlemi devam ederken son taramaya gelindiğinde yüzey sıcaklığı ısı transferinden dolayı artar. Artan bu yüzey sıcaklığı ve maksimum sıcaklık dalgalanmaları üretilecek parçanın homojenliği bozar. Bu durum üretilecek parça içerisinde ısıl stres, boşluklar ve çarpılmalar meydana getirir. Isıl stres, boşluklar ve ısıl çarpılmalar parça kalitesini düşürmesi sebebiyle istenmeyen durumlardır. Sıcaklığa etki eden en önemli parametrelerden biri, elde edilen simülasyon sonuçlarından da anlaşılacağı gibi tarama hızıdır. Bu bölümde sabit hızda bir tarama yörüngesi yerine tarama sırasında değişen optimum bir dinamik hız yörüngesi üzerine çalışılmıştır. Optimum hız değerleri bulmak için iki farklı yöntem kullanılabilir.

İlk yöntem tarama yörüngesi oluşturmak için denklem 3.1 de gösterildiği gibi 5. dereceden bir polinom tanımlamaktır. Oluşturulan bu polinom konum polinomudur. Bu polinomun türevi alınarak denklem 3.2 de gösterildiği gibi hız denklemi elde

edilebilir. Sonrasında elde edilen bu denklemdeki parametreler bir optimizasyon metodunda çalıştırılarak optimum hız yörüngesi oluşturulabilir;

$$\emptyset = a_1 t_{op}^5 + a_2 t_{op}^4 + a_3 t_{op}^3 + a_4 t_{op}^2 + a_5 t_{op} \quad (3.1)$$

$$d\emptyset = 5a_1 t_{op}^4 + 4a_2 t_{op}^3 + 3a_3 t_{op}^2 + 2a_4 t_{op} + a_5 \quad (3.2)$$

İkinci yöntem ise x ve y ekseninde tarama yörüngesi oluşturmaktır. Oluşturulan bu yörüngedeki tarama satırları belirli sayıda örnekleme yapılarak noktalara bölünür. Sabit hıza göre oluşturulan noktalara bir zaman vektörü atanır. İki nokta arasında geçen süre hıza bağlı olarak delta_t olur. Sonrasında tüm noktalar arasındaki her bir delta_t bir optimizasyon metodu kullanılarak örnekleme sayısına eşit sayıda delta_t çözdürülür. Bu şekilde optimum hız yörüngesi oluşur. Bu çalışmada bu yöntem denenmiş ancak yüksek işlem kapasiteli iş istasyonu ve yeterli zaman olmadığı için herhangi bir sonuç alınamamıştır. Optimizasyonda denenilen matlab yazılımları ek-b kısmında verilmiştir.

Tablo 3.2. Modellerin ilk ve son tarama satırı sıcaklığı

Tarama	Lazer Güç [Watt]	Hız [mm/s]	Simulasyon Sonuçları[K]
1. satır (ilk tarama)	120 W	750 mm/s	2330
201.satır (son tarama)	120 W	750 mm/s	2520
1. satır (ilk tarama)	120 W	1000 mm/s	2180
201.satır (son tarama)	120 W	1000 mm/s	2350
1. satır (ilk tarama)	120 W	2000 mm/s	2100
201.satır (son tarama)	120 W	2000 mm/s	2330
1. satır (ilk tarama)	120 W	5000 mm/s	1970
201.satır (son tarama)	120 W	5000 mm/s	2110
1. satır (ilk tarama)	150 W	750 mm/s	2510
201.satır (son tarama)	150 W	750 mm/s	2730
1. satır (ilk tarama)	150 W	1000 mm/s	2390
201.satır (son tarama)	150 W	1000 mm/s	2580
1. satır (ilk tarama)	150 W	2000 mm/s	2310
201.satır (son tarama)	150 W	2000 mm/s	2570
1. satır (ilk tarama)	150 W	5000 mm/s	2070
201.satır (son tarama)	150 W	5000 mm/s	2320
1. satır (ilk tarama)	250 W	2000 mm/s	3000
201.satır (son tarama)	250 W	2000 mm/s	3230
1. satır (ilk tarama)	250 W	5000 mm/s	2600
201.satır (son tarama)	250 W	5000 mm/s	2970
1. satır (ilk tarama)	400 W	5000 mm/s	3350
201.satır (son tarama)	400 W	5000 mm/s	4010

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Toz yatağı füzyonu ile metal eklemeli imalat yapılması için çalışma parametrelerinin bir model ile elde edilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma parametreleri üretimin verimliliği ve kalitesi için büyük önem taşımaktadır. Bu parametrelerin uygulama öncesinde elde edilebilmesi, işlem sırasındaki zaman ve malzeme kaybını önleme açısından çok önemlidir. Bu çalışma parametrelerinin gerçek uygulama öncesinde elde edilebilmesi amacı ile farklı termal ve yapısal özellikler içeren fizik sepetleri kullanılarak sonlu elemanlar yöntemiyle bir model oluşturularak ısı ve kütle transferi sonuçları elde edilebilmektedir.

Bu çalışmanın sonuçları daha önceden yapılan literatürdeki deney sonuçları ile karşılaştırıldığında, düşük (yaklaşık %6,0) hata oranına sahip bir süreç tahmini yapabileceği anlaşılmaktadır. Ayrıca bu çalışma ile ergime havuzu, maksimum sıcaklık ve stres tahmini yapılabilir.

Bu çalışmada tek üretim katmanı için farklı hız ve güç parametrelerine sahip 11 model çalıştırılmıştır. Oluşturulan bu modellerin comsol çoklu fizik programındaki çözüm süreleri 1 ila 4 saat arasında değişmektedir. Bu modelleri sonucunda oluşan sıcaklık grafiği ve ergime havuzu özellikleri sonuçlar kısmında verilmiştir. Bu sonuçlara bakılarak giriş parametrelerinin sistem üzerindeki etkileri hakkında yorum yapılabilir.

Bu çalışma sonucunda yapı alanı yüzeyinde oluşan sıcaklık gradyanı nedeniyle giriş parametrelerinin optimize edilmesi gerektiği bulunmuştur. Ayrıca, sıcaklık farkını kontrol etmek ve üretim kalitesini artırmak için statik giriş parametreleri yerine dinamik giriş parametrelerinin uygulanması gerektiği düşünülmektedir. Bu parametreleri optimize etmek için optimizasyon algoritmaları denenmiştir. Ancak hem comsol hem de matlab programı yüksek işlemler gerektirmektedir. Bu işlemler çok uzun zaman aldığı ve teknik yetersizliklerden dolayı sonuç alınamamıştır.

Bu çalışmada oluşturulan modelleme SLM sistemin daha iyi anlaşılabilmesi ve kontrolü açısından önem taşımaktadır. Mevcut SLM makineleri genellikle çalışma parametrelerini deneysel yollarla bulmaya çalışmakta ve elde edilen bilgi birikimleri

kişilere veya firmalara özel olmaktadır. Ancak bu bilgi birikimleri elde edilirken harcanan zaman, malzeme ve enerji yüksek bir maliyet ve zorluklara sebep olmaktadır. Bu açıdan böyle bir modellemenin olması harcanan enerji, malzeme ve zamanı en aza indirecek ve üretim kalitesi ile üretimin verimliliğini artıracaktır.

Bu çalışma sonrası yapılacak diğer çalışmalar ile seçici lazer ergitme işleminde günümüzde kullanılan malzemeler için çalışma parametreleri incelenerek üretim kalitesi ve verimliliği artırılabilir. Seçici lazer ergitme işleminde daha önce kullanılmamış farklı malzemelerin uygulamadan önce çalışma parametreleri incelenebilir. Ayrıca bu çalışmada seçilen tarama hızı ve lazer güç değeri dışındaki diğer parametrelerin sisteme üzerindeki etkileri incelenebilir.

İlerideki çalışmalarda bu tez çalışmasında kullanılan model ve ilerleyen araştırmalarla birlikte comsol ve matlab programlarının paralel olarak çalışabileceği entegre model düşünülmektedir. Oluşturulan bu entegre model yüksek işlem kabiliyetli bilgisayarlarda uygun optimizasyon teknikleri kullanılarak çalıştırılması hedeflenmektedir. Sonuç olarak optimizasyondan elde edilecek sonuçlar deneysel sonuçlarla da desteklenip seçici lazer ergitme işleminde kullanılan her malzeme için en uygun çalışma parametrelerin bir tablo halinde literatüre kazandırılması düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Ansari M.J., Nguyen D.S., Park H.S., Investigation of SLM Process in Terms of Temperature Distribution and Melting Pool Size: Modeling and Experimental Approaches, *Materials (Basel)*. 2019,**12**(8),1272, DOI:10.3390/ma12081272.
- [2] Wohlers Report, Wohlers Associates, 2019.
- [3] <https://www.festo.com/group/en/cms/13443.htm>. (Ziyaret Tarihi: 12 Aralık 2019).
- [4] <https://www.primaadditive.com/the-powder-bed-fusion-process/>. (Ziyaret Tarihi: 12 Aralık 2019).
- [5] Yadroitsava I., Els J., Booyesen G., Yadroitsev I., Peculiarities of Single Track Formation from Ti6Al4V Alloy at Different Laser Power Densities by Selective Laser Melting, *South African Journal of Industrial Engineering*, 2015 , **26**, DOI: <https://doi.org/10.7166/26-3-1185>
- [6] Leuders S., Thöne M., Riemer A., Niendorf T., Tröster T., Richard H., Maier H., On the Mechanical Behaviour of Titanium Alloy TiAl6V4 Manufactured by Selective Laser Melting: Fatigue Resistance and Crack Growth Performance, *International Journal of Fatigue*, 2013, **48**, 300-307.
- [7] Fischer P., Locher M., Romano V., Weber H., Kolossov S., Gardon R., Temperature Measurements During Selective Laser Sintering of Titanium Powder, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004 , **44**, 12-13, 1293-1296.
- [8] Song B., Dong S., Zhang B., Liao H., Coddet C., Effects of Processing Parameters on Microstructure and Mechanical Property of Selective Laser Melted Ti6Al4V, *Materials & Design*, 2012, **35**, 120-125.
- [9] Dilip J. J. S., Zhang S., Teng C., Zeng K., Robinson C., Pal D., Stucker B., Influence of Processing Parameters on the Evolution of Melt Pool, Porosity, and Microstructures in Ti-6Al-4V Alloy Parts Fabricated by Selective Laser Melting, *Progress in Additive Manufacturing* , 2017, **2**, 157-167.
- [10] Sun J., Yang Y., Wang D., Parametric Optimization of Selective Laser Melting for Forming Ti6Al4V Samples by Taguchi Method, *Optics & Laser Technology*, 2013, **49**, 118-124.

- [11] Lee Y., Zhang W., Modeling of Heat Transfer, Fluid Flow and Solidification Microstructure of Nickel-Base Superalloy Fabricated by Laser Powder Bed Fusion, *Additive Manufacturing*, 2016, **12**, 178-188.
- [12] Ali H., Ghadbeigi H., Mumtaz K., Processing Parameter Effects on Residual Stress and Mechanical Properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, **27**(8), 4059-4068.
- [13] Gusarov A., Yadroitsev I., Bertrand P., Smurov I., Model of Radiation and Heat Transfer in Laser-Powder Interaction Zone at Selective Laser Melting, *Journal of Heat Transfer*, 2009, **131**, DOI: 10.1115/1.3109245.
- [14] Fu C., Guo Y., Three-Dimensional Temperature Gradient Mechanism in Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2014, **136**, DOI: 10.1115/1.4028539.
- [15] Kruth J.P., Deckers J., Yasa E., Wauthlé R., Assessing and Comparing Influencing Factors of Residual Stresses in Selective Laser Melting Using a Novel Analysis Method, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 2012, **226**(6),980-991.
- [16] Redwood B., Additive Manufacturing Technologies: An Overview, <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview/>. (Ziyaret Tarihi: 12 Aralık 2019).
- [17] <https://www.exone.com/en-US/case-studies/what-is-binder-jetting>. (Ziyaret Tarihi: 13 Aralık 2019).
- [18] Upcraft S., Fletcher. R., The Rapid Prototyping Technologies, *Assembly Automation*, 2003, **23**(4), 318–330.
- [19] <https://www.mazak.com.tr/tr/machines-technology/technology/hybrid-multi-tasking-machine/>. (Ziyaret Tarihi: 13 Aralık 2019).
- [20] <https://www.beam-machines.com/>. (Ziyaret Tarihi: 14 Aralık 2019).
- [21] https://www.trumpf.com/en_CN/anwendungen/additive-fertigung/laser-metal-fusion-lmf/. (Ziyaret Tarihi: 18 Aralık 2019).
- [22] Bourell D., Kruth J. P., Leu M., Levy G., Rosen D., Beese A. M., Clare A., Materials for additive manufacturing, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2017, **66**(2), 659-681.
- [23] Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C., Additive Manufacturing of Metals, *Acta Materialia*, 2016, **117**, 371-392.

- [24] Ngo T.D., Imbalzano G., Kashani A., Nguyen K.T.Q., Hui D., Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges, *Composites Part B: Engineering*, 2018, **143**, 172-196.
- [25] Takezawa A., Kobashi M., Design Methodology for Porous Composites with Tunable Thermal Expansion Produced by Multi-Material Topology Optimization and Additive Manufacturing, *Composites Part B: Engineering*, 2017, **131**, 21-29.
- [26] Travitzky N., Bonet A., Dermeik B., Fey T., Filbert-Demut I., Schlier L., Schloridt T., Greil P., Additive Manufacturing of Ceramic-Based Materials, *Advanced Engineering Materials*, 2014, **16**(6), 729-754.
- [27] <https://www.3dnatives.com/en/ceramic-3d-printing-170420194/>. (Ziyaret Tarihi: 20 Aralık 2019).
- [28] Wang X., Jiang M., Zhou Z., Gou J., Hui D., 3D Printing of Polymer Matrix Composites: A Review and Prospective, *Composites Part B: Engineering*, 2017, **110**, 442-458.
- [29] Peels j., 15 02 2019. <https://3dprint.com/236238/interview-with-alexander-oster-of-autodesk/>. (Ziyaret Tarihi: 20 Aralık 2019).
- [30] Maconachie T., Leary M., Lozanovski B., Zhang X., Qian M., Faruque O., Brandt M., SLM Lattice Structures: Properties, Performance, Applications and Challenges, *Materials & Design*, 2019, **183**, DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108137.
- [31] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:STL-file.jpg>. (Ziyaret Tarihi: 20 Aralık 2019).
- [32] <https://www.wolfrobotics.com/check-out-this-article-from-the-fabricator-on-additive-manufacturing/>. (Ziyaret Tarihi: 26 Aralık 2019).
- [33] https://www.eos.info/industries_markets/aerospace/interior. (Ziyaret Tarihi: 20 Aralık 2019).
- [34] <https://www.simufact.com/news-detail/simufact-to-introduce-third-generation-of-its-metal-additive-manufacturing-simulation-software.html>. (Ziyaret Tarihi: 26 Aralık 2019).
- [35] Cunningham J., The Additive Manufacturing Design Guide, 06 01 2017. <https://www.eurekamagazine.co.uk/design-engineering-features/technology/the-additive-manufacturing-design-guide/149852/>. (Ziyaret Tarihi: 27 Aralık 2019).
- [36] Qian B., Shen Z., Laser Sintering of Ceramics, *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2013, **1**(4), 315-321.

- [37] <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/topics/additive-manufacturing.html>. (Ziyaret Tarihi: 27 Aralık 2019).
- [38] Goldak J., Chakravarti A., Bibby M., A New Finite Element Model for Welding Heat Sources, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1984, **15**, 299-305.
- [39] Fischer P., Romano V., Weber H., Karapatis N., Boillat E., Glardon R., Sintering of Commercially Pure Titanium Powder with a Nd:YAG Laser Source, 2003, *Acta Materialia*, **51**(6), 1651-1662.
- [40] Heigel J., Michaleris P., Reutzel E., Thermo-Mechanical Model Development and Validation of Directed Energy Deposition Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V, *Additive Manufacturing*, 2015, **5**, 9-18.
- [41] Parry L., Ashcroft I., Wildman R., Understanding the Effect of Laser Scan Strategy on Residual Stress in Selective Laser Melting Through Thermo-Mechanical Simulation, *Additive Manufacturing*, 2016, **12**, 1-15.
- [42] Xiang Z., Yin M., Dong G., Mei X., Yin G., Modeling of the Thermal Physical Process and Study on the Reliability of Linear Energy Density for Selective Laser Melting, *Results in Physics*, 2018, **9**, 939-946.
- [43] Kundakcıođlu E., Modeling of Temperature Field, Residual Stresses and Distortions in Direct Laser Metal Sintering, Koc University, 2019, 547638.
- [44] Liu B., Further Process Understanding and Prediction on Selective Laser Melting of Stainless Steel 316L, University of Loughborough, 2013.
- [45] Mitrofanov O., Harrington J. A., Dielectric-Lined Cylindrical Metallic THz Waveguides: Mode Structure and Dispersion, *Optics Express*, 2010, **18**(3), 1898-1903.
- [46] <https://www.beamler.com/3d-printing-capabilities/processes/material-jetting/>. (Ziyaret Tarihi: 13 Aralık 2019).



EKLER

EK A

Matlab yörünge kodu

```
clear all;
clc
s=0; % y eksenindeki değişim
t=1; % adım sayısı
x(1)=0;
xLength=10; % mm
yLength=6.03; % mm
d=1; % Yön
V=5000; % hız mm/s

p=50; % örnekleme sayısı bir taramayı 50 eşit parçaya
bölüyor
h=0.03; % c:y'deki değişim(mikrometre)

for tarama_sayisi=1:(yLength/h)*2 % yLength*1000
mikrometreye dönüştürmek için

if(d==0)
s=s+h;
x(t)=x(t-1);
y(t)=s;

if(x(t)<=0)
d=1;
else
d=-1;
end
else
if(d==1)
m=linspace(0,xLength,p);
x(t:t+p-1)=m;
y(t:t+p-1)=s*ones(1,p);
t=t+p;
d=0;
elseif(d==-1)
m=linspace(xLength,0,p);
x(t:t+p-1)=m;
y(t:t+p-1)=s*ones(1,p);
t=t+p;
d=0;
```



```
end
end
islem_suresi=(((tarama_sayisi/2)*xLength)+yLength)/V);

% işlem süresi
t_step=linspace(0,islem_suresi,t);
tt=t_step(:);
xx=x(:);
yy=y(:);

end
figure(1)
plot(xx,yy)
figure(2)
plot(tt,xx)
figure(3)
plot(tt,yy)

xlswrite('opti',tt,'B2:B10052')
xlswrite('opti',xx,'C2:C10052')
xlswrite('opti',yy,'D2:D10052')
```

EK B

Matlab optimizasyon kodu

```
function [cost_value] = function_cost(x)

model = mphopen('matlab2');
std1=model.study('std1');
time1=std1.feature.create('time1','Transient');

%%
%başlangıç koşulları

model.component('comp1').func('int6').setIndex('table',
0, 0, 0); %x süre
model.component('comp1').func('int6').setIndex('table',
0, 0, 1); %x pozisyon

model.component('comp1').func('int7').setIndex('table',
0, 0, 0); %y süre
model.component('comp1').func('int7').setIndex('table',
0, 0, 1); %y pozisyon

delta_t=0.0005;
first_t=0;
last_t=0.0005;
rota_t(1)=0;
reff_T=2500;
model.param.set('p_laser', '120 [W]');
%%
%dongüye giriş
tt_v = 0:0.01:0.3;
for i = 1:31

    t_pos1=rota_t(i);

model.component('comp1').func('int6').setIndex('table',
t_pos1, i, 0); %x süre

model.component('comp1').func('int7').setIndex('table',
t_pos1, i, 0); %y süre

    rota_t(i+1)=rota_t(i)+x(i);
```

```

    % first_t=first_t+delta_t;

end
time1.set('tlist',tt_v);
std1.run;

    maxT=mphglobal(model,'T_max');
zaman=mphglobal(model,'t');

reff=reff_T*ones(1,31);
reff(1)=0;
error=(reff'-maxT).^2;
ise=sum(error(:));
cost_value=ise;
end

////////////////////////////////////

% clear all; close all
% clc
% Define the details of the table design problem
%%

%%
nVar = 31;
currentX= tt.';

ub=0.005*ones(1,31);
lb=0*ones(1,31);

%%

%%
fobj = @function_cost;
%%
% Define the PSO's paramters
noP = 20;
maxIter = 10;

wMax = 0.9;
wMin = 0.2;
c1 = 2;
c2 = 2;
vMax = (ub - lb).* 0.2;

```

```

vMin = -vMax;
%%
% The PSO algorithm

% Initialize the particles
for k = 1 : noP
    Swarm.Particles(k).X = (ub-lb) .* rand(1,nVar) + lb;
    Swarm.Particles(k).V = zeros(1, nVar);
    Swarm.Particles(k).PBEST.X = zeros(1,nVar);
    Swarm.Particles(k).PBEST.O = inf;

    Swarm.GBEST.X = zeros(1,nVar);
    Swarm.GBEST.O = inf;
end

% Main loop
for t = 1 : maxIter

    % Calculate the objective value
    for k = 1 : noP
        currentX = Swarm.Particles(k).X;
        Swarm.Particles(k).O = fobj(currentX);

        % Update the PBEST
        if Swarm.Particles(k).O <
Swarm.Particles(k).PBEST.O
            Swarm.Particles(k).PBEST.X = currentX;
            Swarm.Particles(k).PBEST.O =
Swarm.Particles(k).O;
        end

        % Update the GBEST
        if Swarm.Particles(k).O < Swarm.GBEST.O
            Swarm.GBEST.X = currentX;
            Swarm.GBEST.O = Swarm.Particles(k).O;
        end
    end

    % Update the X and V vectors
    w = wMax - t .* ((wMax - wMin) / maxIter);

    for k = 1 : noP
        Swarm.Particles(k).V = w .* Swarm.Particles(k).V
+ c1 .* rand(1,nVar) .* (Swarm.Particles(k).PBEST.X -
Swarm.Particles(k).X); ...

```

```

    % Check velocities
    index1 = find(Swarm.Particles(k).V > vMax);
    index2 = find(Swarm.Particles(k).V < vMin);

    Swarm.Particles(k).V(index1) = vMax(index1);
    Swarm.Particles(k).V(index2) = vMin(index2);

    Swarm.Particles(k).X = Swarm.Particles(k).X +
Swarm.Particles(k).V;

    % Check positions
    index1 = find(Swarm.Particles(k).X > ub);
    index2 = find(Swarm.Particles(k).X < lb);

    Swarm.Particles(k).X(index1) = ub(index1);
    Swarm.Particles(k).X(index2) = lb(index2);

end

t
currentX
m_currentX(i,1:6)=currentX;
%ObjectiveFunction
%arrys(i)=
%Swarm.GBEST.O

i=i+1;
outmsg = ['Iteration#', num2str(t) , ' Swarm.GBEST.O
= ' , num2str(Swarm.GBEST.O)];
%disp(outmsg);

cgCurve(t) = Swarm.GBEST.O;

end

semilogy(cgCurve);
xlabel('Iteration#')
ylabel('Weight')

```

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] **Köse B.**, Bingül Z., Demir A., Yüksek Frekanslı Lazer Darbeleri ile Yüzey Temizleme (Ablation) Lazer Uygulama Kafasının Tasarımı ve Prototip Üretilerek Paslı Metal Yüzeyin Temizlenmesi, *18. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı*, Ankara, Türkiye, 23 Eylül 2016.
- [2] **Köse B.**, Bingül Z., Modelling and Parameter Optimization of Selective Laser Melting Process, *21. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı*, İstanbul, Türkiye, 06 Eylül 2019.



ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında Hatay’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Hatay’da tamamladı. 2011 yılında girdiği Kocaeli Mühendislik Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü’nden 1 sene yabancı dil hazırlık ve 4 sene lisans eğitimi olmak üzere 2016 yılında Mekatronik Mühendisi olarak mezun oldu. 2017-2020 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2016 yılında Arma Filtre Sistemleri A.Ş de Ar-Ge ve Ür-Ge mühendisi olarak işe başladı ve halen görevine devam etmektedir.

