



**ELEKTRON IŞINI İLE ERGİTME YÖNTEMİ İLE Ti-6Al-4V İÇİN ISIL
MODELLEME VE ERGİYİK HAVUZUN GEOMETRİK İNCELENMESİ**

Hilal AKILLILAR

**YÜKSEK LİSANS
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2020

Hilal AKILLILAR tarafından hazırlanan “ELEKTRON IŞINI İLE ERGİTME YÖNTEMİ İLE Ti-6Al-4V İÇİN ISIL MODELLEME VE ERGİYİK HAVUZUN GEOMETRİK İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Can ÇOĞUN

Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 22/09/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Cevriye GENCER

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Hilal AKILLILAR

22/09/2020

ELEKTRON IŞINI İLE ERGİTME YÖNTEMİ İLE Ti-6Al-4V İÇİN ISIL MODELLEME VE ERGİYİK HAVUZUN GEOMETRİK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hilal AKILLILAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2020

ÖZET

Katmanlı imalat, günümüzde karmaşık geometrilere sahip fonksiyonel parçaların üretiminde ileri gelen yöntemlerden biri haline gelmiştir. Üretim maliyetini, kullanılan malzeme miktarını, üretim süresini veya kullanılan takım maliyetini en aza indirerek bir dizi avantaj sağlamaktadır. Genel olarak geometrik tasarım verilerinin katmanlar halinde dilimlenmesi ve istenilen nihai şekil oluşuncaya kadar katmanların üst üste serilerek ergitilmesi prensibine dayanır. Kullanılan malzeme çeşidine, enerji kaynağına, malzemenin yığılma şekline göre farklı türde yöntemler bulunmaktadır. Elektron ışını ile ergitme (EBM) yöntemi, toz yataklı katmanlı imalat yöntemlerinden biridir. Vakum ortamında gerçekleşen temassız ergitme yöntemi ile yüksek ergime sıcaklıklarına sahip veya reaktif malzemelerden parça üretimi gerçekleştirilmektedir. Yöntem sırasında kullanılan üretim parametreleri, elde edilecek nihai ürün üzerinde önemli etkilere sahiptir. Işın gücü, tarama hızı, katman kalınlığı, ışın çapı gibi kullanılan parametreler için optimum aralık belirlemek üretilecek parçanın kalitesinin artırılması açısından büyük önem taşımaktadır. Yapılan tez çalışmasında EBM yöntemi modellenerek simülasyon üzerinde, Ti-6Al-4V toz katmanı ve hareketli enerji kaynağı etkileşiminin incelenmesi amaçlanmaktadır. Belirlenen tarama hızı, elektron ışın gücü parametrelerinin, ergiyik havuz üzerinde etkileri incelenmiş, toz katmanında meydana gelen değişimlerden yola çıkılarak uygun parametre aralığı belirlenmiştir. Işın gücünün 1750 W sabit tutularak tarama hızının artırılması, ışın ve toz katmanı arasındaki etkileşim süresinin azalmasıyla ergiyik havuz derinliği 53,1 μm ' den 7,91 μm 'ye kadar azaldığı görülmüştür. Işın hızının 2,4 m/s sabit değerinde ise elektron ışın gücünün artırılması, toz katmanına uygulanan enerji yoğunluğunu artırması sebebi ile ergiyik havuz derinliğini 17,9 μm 'den 53,1 μm 'ye kadar artış görülmüştür. Seçilen parametrelerin ergiyik havuzda meydana gelen en yüksek sıcaklığı büyük oranda etkilediği de simülasyonlar ile belirlenmiştir. Bu sonuçların yanında ergime ve buharlaşma noktaları arasında kalan sıcaklık değerleri için en uygun parametre kombinasyonları, elde edilen grafikler ile belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : Elektron ışını ile ergitme, sayısal analiz, CFD, ANSYS, ergiyik havuz, Ti-6Al-4V

Sayfa Adedi : 67

Danışman : Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

HEAT TRANSFER MODELLING AND SIMULATIONS OF MELT POOL
GEOMETRY FOR ELECTRON BEAM MELTING METHOD WITH Ti-6Al-4V

(M. Sc. Thesis)

Hilal AKILLILAR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2020

ABSTRACT

Additive manufacturing has become one of the leading methods in the production of functional parts with complex geometries. It provides a number of advantages by minimizing the production cost, the amount of material used, the production time or the cost of the tool used. It is generally based on the principle of slicing geometric design data in layers and melting the layers by overlapping until the desired final shape is formed. There are different types of methods depending on the type of material used, energy source, and how the material is built. Electron Beam Melting (EBM) method is one of the powder bed layered manufacturing methods. Parts with high melting temperatures or reactive materials are produced by the non-contact melting method in a vacuum environment. The production parameters used during the method have significant effects on the final product to be obtained. Determining the optimum range for parameters such as beam power, scanning speed, layer thickness, beam diameter is of great importance in terms of increasing the quality of the part to be built. In the study, the EBM method is modelled and it is aimed to analyse the interaction between Ti-6Al-4V powder layer and energy source via simulation. The effects of the determined scanning speed, electron beam power on the melt pool were examined, and parameter range selection was achieved based on the changes in the powder layer. It has been observed that the melt pool depth decreased from 53.1 μm to 7.91 μm by increasing the scanning speed with keeping the beam power constant at 1750 W and decreasing the interaction time between the beam and the powder layer. The increasing the electron beam power, so higher energy density, applied to the powder layer at the fixed value of 2.4 m / s of the beam velocity the melt pool depth increased from 17.9 μm to 53.1 μm . It is also determined by simulations that the selected parameters greatly affect the highest temperature occurring in the melt pool. In addition to these results, the most suitable parameter combinations for the temperature values between the melting and evaporation points were determined with the graphics obtained.

Science Code : 91438

Key Words : Electron beam melting, numerical analysis, CFD, ANSYS, melt pool, Ti-6Al-4V

Page Number : 67

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

TEŞEKKÜR

Tez çalışması sürecinde tüm ilgi ve desteğini esirgemeyen, araştırma ve simülasyonların gerçekleşmesinde kıymetli görüş ve tavsiyeleri ile bana ışık tutan, bilgi ve deneyimlerinden faydalanma şansı verdiği için saygıdeğer hocam ve tez danışmanım Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her boyutunda olduğu gibi bu süreçte de her türlü teşvik ve özveriyi gösteren, maddi manevi desteğini eksik etmeyen aileme, destekleri sayesinde bu aşamaya gelebildiğim Duran KAYA'ya sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	5
3. Ti-6Al-4V ALAŞIMI	11
4. EKLEMELİ İMALAT	15
5. Tİ-6AL-4V İÇİN KATMANLI İMALAT	17
5.1. Elektron Işınıyla Ergitme – Ti-6Al-4V	17
6. EKLEMELİ İMALAT - TOZ YATAKLI ERGİTME YÖNTEMLERİNDE MODELLEME	23
7. MATERYAL-METOD	27
7.1. Modelleme ve Simülasyon.....	29
7.1.1. Ergime ve katılaşma modülü.....	30
7.1.2. Malzeme özellikleri.....	31
7.1.3. Model geometrisi.....	32
7.2. Model Doğrulama	37
8. SİMÜLASYON SONUÇLARI.....	41
8.1. Işın Gücü Parametresinin Etkileri.....	41
8.2. Tarama Hızı Parametresinin Etkileri	43

Sayfa

8.3. Ergime ve Buharlaşma Sıcaklıkları	52
9. SONUÇ VE ÖNERİLER	57
9.1. Öneriler	58
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	67

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Titanyum ve alaşımlarının özellikleri [40]	13
Çizelge 3.2. Ti-6Al-4V alaşımına ait temel özellikler [41]	14
Çizelge 3.3. Ti-6Al-4V katmanlı imalat yöntemi ile üretilmesi sonucunda olması gereken kimyasal bileşimi (% ağırlık).....	14
Çizelge 3.4. Ti-6Al-4V katmanlı imalat yöntemi ile üretilmesi sonucunda elde edilen mekanik özellikler	14
Çizelge 4.1. ASTM F42 standartlarına göre katmanlı imalat yöntemlerinin sınıflandırılması	15
Çizelge 5.1. ARCAM Q20 EBM makinesine ait özellikler.....	19
Çizelge 7.1. Sabit proses parametreleri.....	32
Çizelge 7.2. Proses parametre kombinasyonları	37
Çizelge 8.1. Tarama hızı 2,4 m/s için simülasyon sonuçlarının kıyaslanması	42
Çizelge 8.2. Elektron ışın gücü 1000 W için simülasyon sonuçlarının kıyaslanması	44
Çizelge 8.3. Elektron ışın gücü 1750 W için simülasyon sonuçlarının kıyaslanması	47
Çizelge 8.4. Elektron ışın gücü 500 W için simülasyon sonuçlarının kıyaslanması	50
Çizelge 8.5. Yapılan simülasyonlarda elde edilen ergiyik havuz boyutları değerleri	52
Çizelge 8.6. Tarama gücü 1250 W için sıcaklık dağılım grafiği	53
Çizelge 8.7. Tarama gücü 1500 W için sıcaklık dağılım grafiği	54
Çizelge 8.8. Tarama gücü 750 W için sıcaklık dağılım grafiği	55

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Saf titanyum kristal hücre yapısı [38].....	12
Şekil 3.2. Arayer atomlarının Ti-6Al-4V malzemenin çekme dayanımı üzerindeki etkisi [33].....	12
Şekil 4.1. Katmanlı imalat adımlarının şematik gösterimi [18].....	16
Şekil 5.1. EBM makine görünüşü	18
Şekil 5.2. ARCAM – EBM makine görünüşü	18
Şekil 5.3. ARCAM S12 EBM makinesi üretim haznesi görünüşü [18]	19
Şekil 5.4. EBM üretim adımları	20
Şekil 6.1. Isı girdisi için kullanılan Gaussian model [19].....	24
Şekil 7.1. Termal modelleme için kullanılan akış şeması.....	28
Şekil 7.2. Ti-6Al-4V'nin Sıcaklığa Bağlı Özellikleri, a) yoğunluk, b) iletkenlik, c) özgül ısı [19].....	32
Şekil 7.3. Model geometrisi yan görünüş	33
Şekil 7.4. Model geometrisi izometrik görünüş	34
Şekil 7.5. Geometri için ağ yapısı, a) toz katmanı üstten görünüşü, b) Üretim tablası yan görünüş, c) toz katmanı ve üretim tablası izometrik görünüş.....	35
Şekil 7.6. Toz katmanı tarama alanı üst görünüş	36
Şekil 7.7. Eriyik Havuzu Geometrisinin Boyutları, a) üst yüzey, b) yandan görünüm ..	36
Şekil 7.8. Doğrulama için kullanılan modele ait katman ve ergiyik havuz yandan görünüşü	38
Şekil 7.9. Doğrulama çalışmasından elde edilmiş olan deneysel-simülasyon verileri grafiği	38
Şekil 7.10. Tez çalışmasını deneysel veriler ile doğrulama grafiği	39

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
α	Isıl genleşme katsayısı
$^{\circ}\text{C}$	Derece Celcius
C_p	Malzeme ısı kapasitesi
$\emptyset$	Elektron ışın demeti çapı
D_p	Partikül çapı
h	Entalpi
ΔH	Gizli ısı
He	Helyum
I_o	Elektron ışını yoğunluğu
K	Derece Kelvin
k	Termal iletkenlik
kg	Kilogram
keV	Kilo elektron volt
kW	Kilo watt
m	Metre
mm	Milimetre
μm	Mikrometre
mA	Mili amper
η	Soğurma katsayısı
P	Elektron ışın gücü
t	Katman kalınlığı
T	Sıcaklık
Ti	Titanyum
U	Sistemin iç enerjisi
V	Tarama hızı

Simgeler**Açıklamalar** **ρ**

Yoğunluğu

Q

Harcanan ısı

 ω

Elektron ışını yarıçapı

W

Watt

Kısaltmalar**Açıklamalar****ASTM**

Amerikan Test ve Malzeme Kurumu

CAD

Bilgisayar Destekli Tasarım

CFD

Akışkanlar Dinamiği Analizi

EBM

Elektron Işını ile Ergitme

FEM

Sonlu Elemanlar Analizi

MESH

Ağ Yapı

SEBM

Seçici Elektron Işını ile Ergitme

SLM

Seçici Lazer Ergitme

LENS

Lazer Işını ile Yığma

UDF

Kullanıcı Tanımlı Fonksiyon

3B

3 Boyutlu

1. GİRİŞ

Dünyada en fazla bulunan elementler arasında olan titanyum üstün özellikleri ve bu özelliklerin titanyumun başka elementlerle alaşımlandırılarak geliştirilebilir olması sebebi ile endüstride oldukça yaygın kullanılmaktadır. Sıklıkla kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı, çeliğe göre düşük yoğunluklu olması, yüksek korozyon direncine sahip olması, yüksek sıcaklıklarda yüksek özgül mukavemetinin olması ve biyo-uyumluluğu gibi üstün malzeme özellikleri sayesinde havacılık, otomotiv, uzay, biyomedikal gibi geniş sektörlerde uygulama alanı bulmaktadır. İşlenmesi oldukça zor ve maliyetli olan Ti-6Al-4V malzemeden parça üretiminde kullanılan döküm, dövme, talaşlı imalat gibi geleneksel üretim yöntemlerinin yanı sıra, şekillendirmede günümüzde alışılmamış imalat yöntemlerinin kullanımı da yaygınlaşmaktadır. Özellikle karmaşık geometriye sahip Ti-6Al-4V malzemeli parça üretimi için, düşük atık malzeme oranı ve işleme kolaylığı sağlayan katmanlı imalat teknolojileri vazgeçilmez bir hal almıştır [1–6].

Hızla gelişmekte olan eklemeli imalat günümüzde geniş bir araştırma alanına sahiptir. Katmanlı imalat, 3B geometrisi tasarlanan parçanın verilerinin makineye aktarılması, katman katman malzeme eklenerek üretilmesine dayanan bir yöntemdir [7, 8]. Bütün bir parçadan malzeme kaldırarak nihai geometriyi oluşturma yöntemini kullanan geleneksel üretim yöntemlerinden bu yönü ile ayrılmaktadır. Geleneksel imalat yöntemleri kullanılarak (döküm, talaşlı imalat vs.) üretilmesi zor veya imkansız parçaların (içi boş, kafes yapılı vb.), özel geometriler ile tasarlanması ve katmanlı imalatla üretilebilirliğinin kolaylığı önemli bir avantaj olarak değerlendirilmektedir. Günümüzde Ti-6Al-4V gibi üstün özelliklere sahip malzemelerin bu teknikler ile üretimi yaygınlaşmaktadır. Özellikle havacılık, otomotiv, enerji, medikal alanlar katmanlı imalat teknolojisini kullanan sektörler haline gelmiştir [7–10].

Katmanlı imalat yöntemleri ASTM standartlarına göre 7 farklı kategori altında gruplandırılmaktadır. Bu gruplardan biri olan toz yataklı ergitme sistemleri, malzeme çeşidi olarak toz kullanılması ve nihai parça üretilene kadar toz katmanının belirlenen kalınlıkta serilmesi, geometrik veriler ile her katmanda ergitme meydana getirilmesi prensibine dayanmaktadır. Elektron ışını ile ergitme yöntemi ise toz yataklı sistemler grubunda incelenmekte ve metal toz katmanını ergitme işlemi için elektron demeti kullanılmaktadır. Elektron ışınının kullanıldığı Elektron Işınıyla Ergitme (EBM, Electron

Beam Melting) yöntemi, ARCAM AB Corporation tarafından patenti alınmış ve halen koruma altında olan bir teknolojidir [11,12].

Problem durumu / Konunun tanımı

EBM yöntemi ile üretilen parçaların mekanik özellikleri, yüzey özellikleri kullanılan proses parametrelerinin uygun aralıklarının belirlenmesi ile geliştirilmeye çalışılmaktadır [13]. EBM, yüksek ısı etki derinliği sayesinde artan üretim hızı, yüksek enerji verimliliği gibi faydalar sağlamakta olup, bu sebeple birçok araştırmacı ve sektör tarafından yoğun olarak incelenmektedir [12,14]. EBM teknolojisinin avantajlarına rağmen, patentli bir teknoloji olması cihazlara erişimi kısıtlamakta ve böylelikle henüz geliştirilme sürecinde olan yöntemin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Geometrik tamlik ve yüksek toleranslı parça üretimi zorluğu, parça hataları (çarpılma, boşluk, büzülme vb.), süreç kontrol zorluğu (parametre sayısının fazlalığı) bu dezavantajlar arasında gösterilebilir [15-16]. Sıralanan olumsuzlukların aşılabilmesi amacıyla parametre etkilerinin incelendiği ve elde edilen sonuçların optimize edilmesine yönelik çalışma sayısı artmaktadır. Araştırmaların ve bilimsel çalışma sayılarının giderek çoğalmasına rağmen henüz EBM ve modelleme-simülasyon konularında yayınlanan makale veya çalışma sayısının toz yataklı eklemeli imalat yöntemleri ile kıyaslandığında daha az olduğu görülmektedir. Az sayıda parça üretimi yapılarak geliştirilen modelleme ve simülasyon çalışmalarının EBM parametrelerinin incelenmesinde ve elektron ışını - toz etkileşiminin anlaşılabilmesinde önemli olduğu kabul edilmektedir [9, 14].

Araştırmanın amacı

Geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor veya imkânsız olan parçalar için katmanlı imalat üstün avantajlar sağlamakta ve günümüzde hızla gelişmekte olan teknolojiler arasında bulunmaktadır. EBM yönteminde elektron ışın demeti ile Ti-6Al-4V tozu etkileşimi ile oluşan ergiyik havuz geometrisi, mikro yapı karakteristiği konularında modelleme ve simülasyon yöntemlerine ihtiyaç oldukça artmıştır [17]. Proses parametrelerinin incelenmesi ve parça kalitesinin iyileştirilebilmesi için yapılan deneysel çalışmalar hem maliyet hem de zaman açısından büyük ölçüde kayıp sağlamaktadır. Ayrıca belirli malzemeler için tezgâh üreticilerinin parametrik verileri olmasına rağmen yeni malzemeler için bu sistemlerin geliştirilmesi çok sayıda deneysel çalışma yapılması anlamına

gelmektedir. Bilinen malzemelerin parametre etkilerinin yeni malzemelerde de kullanılabilmesi modelleme çalışmaları ile mümkündür. Yapılan parametre değişikliklerinin mikro yapıda veya ergiyik havuzda ne gibi etkiler meydana getireceğinin incelenmesi de modelleme çalışmaları ile gerçekleştirilmektedir. Bu sebeple modelleme ve simülasyon çalışmaları bu aşamada büyük önem kazanmıştır [18].

Kapsamlı literatür araştırması sonucunda, EBM yöntemi ile simülasyon ve modelleme çalışmalarını kapsayan sınırlı sayıda araştırma olduğu değerlendirilmiştir. Tez çalışmasında, CFD yaklaşımları ve ısı transferi ilkeleri kullanımı ile kullanıcı tanımlı fonksiyon (UDF, User Defined Function) geliştirilerek, toz metal ve elektron ışın demeti etkileşimi incelenmesi, kullanılabilir uygun parametre aralığı elde edilmesi amaçlanmıştır.

Araştırmanın önemi

Literatürde bulunan EBM sistemine yönelik simülasyon çalışmalarının azlığı, EBM sistem parametrelerinin çok sayıda olması ve üretimde parça kalitesinin, üretim verimliliğinin artırılmasının gerekliliği sebebi ile parametre optimizasyonları üzerinde yapılan çalışmaların çoğaltılması önem kazanmış olup, bu gerekçe ile tez konusunda parametreler için kullanım aralığı belirlemeye yönelim söz konusu olmuştur.

Tez çalışması sonucunda EBM yönteminde, Ti-6Al-4V toz malzeme için hangi ışın gücü ve hangi tarama hızı seviyelerinde en uygun ergitme sağlanacağının kolayca anlaşılabilceği grafikler oluşturulmaktadır. Bu yöntemde kullanılan parametreler sonucunda, toz katmanında oluşacak maksimum sıcaklığın, ergiyik havuz derinliği ve genişliğinin tespiti yapılabilmekte, bu sayede üretim için optimum sistem parametresi belirlenebilmektedir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

EBM geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla birçok üstün özelliğe sahip olmasına rağmen, henüz geliştirilme aşamasında olan bir alışılmamış imalat yöntemidir. Üretim kararlılığı, ürün ve proses kalitesi, parça hataları, yüzey sorunları gibi problemlerin çözümü amacı ile mevcut çok sayıda yöntem parametresinin optimizasyonu üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Hem deneysel hem de modelleme - simülasyon temelli çalışmaların önemli olduğu vurgulanmaktadır [19]. EBM yönteminde üretim parametrelerinin fazla olması simülasyon çalışmalarına öncelik verilmesine yol açmaktadır [14].

Literatürde bulunan toz yataklı sistem modelleme çalışmalarındaki başlıca farklılık tozun modellenmesi ile oluşmaktadır. Örneğin, Körner ve diğerleri (2011), yayınladığı çalışmada, tozu partikül boyutu ile modelleyerek kullanmıştır [20]. Fakat kullanmış olduğu mezoskopik yaklaşımın getirdiği karmaşıklık, yüksek maliyet ve gerektirdiği uzun simülasyon süresi sebebi ile geliştirilen modelin büyük ölçekteki çalışmalar için uygun olmayacağı belirlenmiştir. Elde edilen sonuç neticesinde diğer araştırmacılar çoğunlukla model geliştirme aşamasında tozu devamlı kabul etmiştir. Böylece sonlu eleman analizleri sırasında simülasyon süresini oldukça azaltmışlardır.

Riedlbauer ve diğerleri (2017), tozun devamlı olarak kabul edilmesi yaklaşımını kullanarak yaptığı makroskopik çalışmada, Seçimli Elektron Işını ile Ergitme (SEBM, Selective Electron Beam Melting) yöntemini Ti-6Al-4V tozları kullanımı için modellemiştir [21]. Çalışmada sonlu eleman analizi kullanarak tarama hızı, ışın gücü, enerji yoğunluğu gibi parametrelerin ergiyik havuzu ve havuzun katılma süresi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deneysel ve numerik olarak yapılan çalışmalar sonucunda tarama çizgisindeki enerji yoğunluğunun artmasıyla doğru orantılı olarak ergiyik havuzun ömrünün arttığı, enerji sabit tutularak tarama hızı artırıldığında ömrün sabit kaldığı belirtilmiştir. Aynı çalışmada ergiyik havuz boyutlarının tarama çizgisi üzerindeki enerji ile doğrusal bir ilişki içerisinde olmadığı ayrıca belirtilmiştir. Ergiyik havuzun genişliğinin tarama bölgesi enerjisi arttıkça azaldığı, sabit enerjilerde genişliğin de sabit kaldığı görülmüş, ergiyik havuz derinliğinin ise yüksek ışın enerjisi ile (yüksek akım) arttığı belirtilmiştir.

Zah and Lutzman ve diğerleri (2010) makroskobik yaklaşımı kullanarak yaptığı çalışmada tarama hızı ve ışın demeti gücünü, geliştirdiği ısıl model ile analizler gerçekleştirerek araştırmıştır [12]. FE (Finite Element) yöntemi ile geliştirmiş olduğu matematiksel modeli kullanarak, elektron ışın demetinin toz katmanı üzerinde oluşturduğu ergiyik havuzun boyut değişiminde parametrelerin etkisini incelemiştir. Çalışmasında toplamda üç farklı parametre seti ile simülasyonlar gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçlarda ergiyik havuzun geometrik özelliklerini, boyutlarını, şeklini kıyaslamıştır. Tespit ettiği verilerin sonucunda güç değeri 150 W iken tarama hızının artması ile ergiyik havuzun yüksek oranda etkilendiği ortaya çıkmıştır. Güç ve hız değerlerinin sırasıyla 150 W ve 50 mm/s olduğu ışın demeti ile meydana gelen ergiyik havuzun boy/çap oranının en düşük olduğu tespit edilmiştir. Simülasyon sonucunda elde edilen veriler kullanılarak deneysel numuneler üretilmiş, delaminasyon (katman ayrılması) ve melt ball (ergiyik metale ergimemiş toz partikülünün yapışması) hatalarının hangi parametreler aralığında meydana geldiği incelenmiştir. Parametre kombinasyonlarında $V_s > 100$ mm/s ve $P_B > 200$ W değerlerinde olumsuz sonuçlar elde edildiği belirlenmiştir.

Wang ve diğerleri (2008) çalışmasında LENS yönteminde konik hacimli lazer ışınının SS410 metal toz üzerinde oluşturduğu Gaussian dağılımı yaklaşımı ile gerçekleştirilen FEM simülasyonlarında sıcaklık ve faz dönüşümleri üzerindeki etkiler incelenmiştir [22]. Çalışmada tek tarama çizgisinde 10 katman ile üretilen bir duvar simüle edilmiş ve bu simülasyonda sabit bir ergiyik havuz geometrisi oluşturmak için tarama hızı - lazer gücü değerleri optimize edilmiştir. Her bir katmanda ergiyik havuz boyutları incelenmiş ve soğuk üretim tablasının etkileri göz ardı edildiğinde sonuç olarak lazer gücünün katman numarasına olan etkisinin her tarama hızı değerinde doğrusal olduğu gösterilmiştir. Sabit ergiyik havuz geometrisi oluşturmak amacıyla üç farklı hız değerinde ilk ve son katmanda kullanılması gereken güç değerleri elde edilmiştir. Taranmakta olan katman sayısı arttıkça güç değerinin azaltılması ve artan tarama hızı değerlerinde güç değerinin de artırılması gerektiği belirtilmiştir.

Shen ve Chou (2012) çalışmalarında Wang (2008) tarafından yapılan çalışmalar ile doğruladıkları bir FEM modeli geliştirmişlerdir [19, 22]. EBM yöntemi üzerine yapılan çalışmada ısı kaynağı olarak hareketli, Gaussian dağılımına sahip elektron demeti modellenerek, üretilen parçalar üzerindeki ısı transferi incelenmiştir. Işın demeti çapı ile porozitenin ergiyik havuz üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Elde edilen veriler sonucunda ise

belirlenen parametrelerin ergiyik havuz boyutlarını büyük ölçüde etkilediği görülmüştür. Ergiyik havuzun merkezinde oluşan maksimum sıcaklığın artmasıyla doğru orantılı olarak boyutlarının arttığı belirtilmiştir. Porozite seviyesinin artmasının ergiyik havuz merkezinde elde edilen maksimum sıcaklığı ve dolayısıyla enerji kaynağının toz katmanına olan etki derinliğini artırdığı ama ışın hareketi doğrultusunda etki derinliğinin azaldığı görülmüştür. Aynı zamanda ısınma ve soğuma hızlarının porozite seviyesinin azalması ile arttığı belirtilmektedir. Belirlenen bu sonuç porozite seviyesinin tozun iletkenliğine etki ettiğini göstermektedir. Fakat araştırmacı, ergiyik havuzun genişliğinin porozite ile değişmediğini söylemekte ve bu duruma tarama alanının iki tarafından ısıl direncin yüksek olmasını sebep olarak göstermektedir. Ayrıca elde edilen bir başka veri ise, elektron ışın çapının büyütülmesi ile ergiyik havuzda tespit edilen maksimum sıcaklık seviyesinin azaldığı üzerinedir. Bu durum toz katmanında gözlenen sıcaklık dağılım gradyanlarının daha küçük olmasına ve soğumanın daha yavaş meydana gelmesine neden olduğu vurgulanmıştır.

Literatürde bulunan çalışmalar, akış etkisinin (fluid flow) analiz sonuçlarını etkilediğini göstermektedir. Bu sebeple CFD yöntemi, model özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Li ve diğerleri (2004) yaptığı çalışmada, 3B sayısal analizde CFD tekniği kullanarak lazer ışınının seramik malzeme yüzeyi üzerinde oluşturduğu faz değişimini incelemiştir [23]. Aynı çalışmada ergime fazındaki gizli ısının (latent heat of fusion) ve ergiyik havuzdaki akışın, ergiyik havuz şekli ve sıcaklığı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışmalar sonucunda ergime fazındaki gizli ısının bu parametreler üzerinde, akışın etkisinden daha fazla etki sağladığı simülasyonlar ile belirlenmiştir. Yapılan deney sonuçları ile simülasyonlardan elde edilen sonuçların büyük ölçüde örtüştüğü belirtilmiştir.

Ayrıca Rai ve diğerleri (2009) elektron ışın kaynağı tekniğinde 304L metal toz katmanı üzerinde ısı transferini analiz etmek amacı ile CFD yöntemini kullanmıştır [24]. Çalışmada farklı güç yoğunlukları belirlenmiş ve 304L toz katmanı üzerinde üç boyutlu ısı dağılımı, anahtar deliği (key hole) sıvı akışı yaklaşımları kullanarak simülasyonlar yapılmıştır. Oluşturulan modelin, ergiyik havuzda akış desenlerini ve bu desen yaklaşımlarının ergiyik havuz geometrisine etkilerini incelemek amacı ile birçok farklı malzeme üzerinde kullanılabileceği belirtilmektedir.

Rahman ve diğerleri (2017) 3B CFD model geliştirerek konik hacme sahip hareketli elektron ışın demetinin Gaussian dağılımı yaklaşımını kullanmış ve Ti-6Al-4V toz katmanı

ile etkileşimini incelemiştir [25]. Çalışmada sıcaklık dağılımı profili, soğuma hızı, yoğunluk, iletkenlik, entalpi parametreleri değişken olarak kullanılmış, özellikle ergiyik havuzun hareketlerine ve ısı özelliklerine olan etkileri araştırılmıştır. Yapılan bu çalışmalarda taşınımın (convection) ergiyik havuz üzerindeki etkisinin büyük ölçekte önemli olduğu gösterilmektedir. Ergiyik havuz boyutlarının da incelendiği çalışmada, ısı gücünün artırılması ile havuz derinliğinin arttığı, bazı noktalarda katman kalınlığını aştığı görülmüştür. Yapılan simülasyonlarda tek toz katmanı üzerindeki tarama çizgisinin oluşturduğu ergiyik havuzun incelenmesinden ötürü bu durumun uygun olmadığı belirtilmiştir. Elektron ışıının çapının 0,4 mm sabit tutulduğu ve simülasyonlar sonucunda maksimum ergiyik havuz genişliğinin 0,6 mm olduğu, yani elektron ışıının çapından daha büyük olduğu belirtilmiştir. Bu sonuçlara porozite seviyesi %50 oranında sabit alındığında ulaşılmıştır. Porozite seviyesi artırıldığında ergiyik havuz genişliğinin etkilenmediği, derinliğin ve boyunun ise değiştiği görülmüştür. Genişliğin etkilenmemesi hususunun, tarama alanının iki tarafındaki ısı direncin çok fazla olmasından kaynaklanabileceği şeklinde yorumlanmıştır.

Jamshidinia ve diğerleri (2013) ergiyik havuza ait taşınımı (convection) inceleme amacı ile CFD ve FEM yöntemlerini birleştirerek analizleri gerçekleştirmiştir [26]. Yapılan çalışmada elektron demeti tarama hızının sebep olduğu uniform olmayan ısı dağılımının yol açtığı termal gerilimlerin incelenmesini amaçlamıştır. CFD simülasyonlarında sıvı taşınımını, FEM analizinde ise ısı gerilimi göz önünde tutmuştur. Çalışma sonucunda yüzey gerilimindeki negatif sıcaklık katsayısının, akışın dışarı doğru gelişmesine sebep olduğu belirlenmiştir. Üç farklı hız değeri kullanılarak yapılan simülasyonlar sonucunda elektron ışıının tarama hızının ergiyik havuz üzerindeki etkisi de incelenmiştir. En düşük hız seviyesi olan 100 mm/s değerinde, ergime sırasında en büyük ısı gerilime, katılma sırasında ise en düşük ısı gerilime sebep olduğu görülmüştür. Bu durum ergime ve katılma aşamalarındaki ısı gerilim oluşumunda en etkili faktörün ısı girdisi ve katılma hızı olması ile açıklanmıştır. Dolayısıyla en düşük hız seviyesinde ısı girdisinin daha yüksek olmasının ergime sırasında maksimum ısı gerilime yol açtığı açıklanmıştır. Aynı zamanda en yüksek hız seviyesi olan 1000 mm/s değerinde soğuma hızının, 100 mm/s seçildiği simülasyona göre 135 kat daha fazla olduğu hesaplanmış ve bu durumda katılaşmada en yüksek ısı gerilimin en yüksek hız seviyesinde meydana geldiği değerlendirilmiştir.

Galati ve diğerleri (2017) çalışmasında Qi, ve diğerleri (2006) deneysel çalışmalarının verilerinden faydalanarak, EBM yönteminde 316L malzemesinin kullanıldığı simülasyon çalışmalarını gerçekleştirmiş ve sonuçları kıyaslamıştır [27, 28]. Elektron ışını demeti akımı ve tarama hızı değişken parametreler olarak kullanılmıştır. Elde edilen simülasyon verileri ile deneysel veriler arasında ortalama %15 değerinde bir sapma olduğu belirlenmiştir. Bu durumun sebebi, modellemede göz ardı edilen Marangoni etkisi ve melt ball etkisi ile açıklanmıştır. Her iki parametrenin kombinasyonları ile gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen tarama çizgisinin genişliği incelenmiştir. Akım arttıkça genişlik artmakta, tarama hızı arttıkça genişlik azalmaktadır. Bu durum toz katmanının absorbe ettiği enerji miktarı ile açıklanmıştır.

Vastola ve diğerleri (2016) çalışmasında EBM yöntemi kullanılarak, elektron ışını demetinin Ti-6Al-4V toz katmanı üzerindeki etkilerini, özellikle ısı etkilenmiş bölgenin ve ısı direncin seviyesini incelemiştir [29]. Isıl gerilim bölgeleri üzerinde ışın demeti çapı, ışın demeti yoğunluğu, tarama hızı ve ön ısıtma sıcaklığının etkilerini incelemek için hesaplamalar yapmıştır. Çalışmalar sonucunda ısı etkilenmiş bölgenin, elektron ışını demeti çapı ile oldukça bağlantılı olduğu belirtilmiştir.

Cheng ve diğerleri (2014) yaptığı çalışmada sayısal analiz ve deneysel analiz metotlarını birleştirerek EBM yönteminde araştırmalar gerçekleştirmiştir [30]. Çalışmada sonlu eleman analizi yazılım tabanını kullanarak 3B ısı modelin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Porozite seviyesi yöntem parametresi olarak belirlenmiş ve ergiyik havuz üzerinde etkileri araştırılmıştır. Deneysel üretimde, kızılötesi kamera sistemi (NIR) kullanılarak yüzey sıcaklığı değerleri ölçülmüştür. Ti-6Al-4V tozlarının, poroziteden kaynaklı olarak katı cisme göre çok daha düşük termal iletkenlik seviyesinde oldukları sonucuna varılmıştır. Bu durumun elektron ışını taraması sırasında meydana gelen sıcaklık dağılımını etkilediği belirtilmiştir. Elektron ışın demeti çapı, gücü ve tarama hızı değişken parametreler olarak kullanılmış ve çeşitli kombinasyonlarda yapılan simülasyonlar sonucunda meydana gelen ergiyik havuz geometrisi incelenmiştir. Nihai olarak güç seviyesinin artırılmasının, ergiyik havuzda ölçülen maksimum sıcaklığın ve ergiyik havuz boyutlarının artmasına sebep olduğu görülmüştür. Aynı çalışmada, ışın demeti çapının ve tarama hızının artırılması ile maksimum sıcaklığın ve ısı etki derinliğinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca tarama hızının ergiyik havuzu genişliğini doğrusal olarak, derinliğini ve boyunu ise ters orantılı olarak etkilediği belirtilmiştir.

Literatürde yapılan kapsamlı bir tarama, EBM simülasyon çalışmaları üzerinde hala sınırlı sayıda çalışma olduğunu göstermektedir [14].

Bu tez çalışmasında, EBM yöntemi ile Ti-6Al-4V toz metali kullanılarak elektron ışın demeti ve toz etkileşimi fenomeni üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. FEA ve CFD'nin birleştirildiği termo-mekanik özelliklerin incelenebilmesi amacıyla bir model geliştirilerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Ti-6Al-4V malzemesinin sıcaklığa bağlı özellikleri, elektron ışın demetinin Gaussian dağılımına sahip olması UDF kodunda tanımlanmıştır. Sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri ısı iletkenlik, yoğunluk, özgül ısı UDF kodunda hesaplamalara katılacak şekilde düzenlemiştir. Ergiyik havuz üzerindeki parametre kombinasyonlarının değişimleri incelenmiştir. Matematiksel eşitlikler, CFD ve ısı transferi denklemleri kullanılarak geliştirilmiştir. Simülasyonlar, ANSYS yazılımı vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, literatürde yer alan deneysel çalışma sonuçları ve simülasyon verileri ile doğrulanmıştır. Model, önce Shen ve Chou'nun çalışması ile doğrulanmış, elde edilen simülasyon verileri birbirleri ile ve literatür ile kıyaslanmıştır [19].

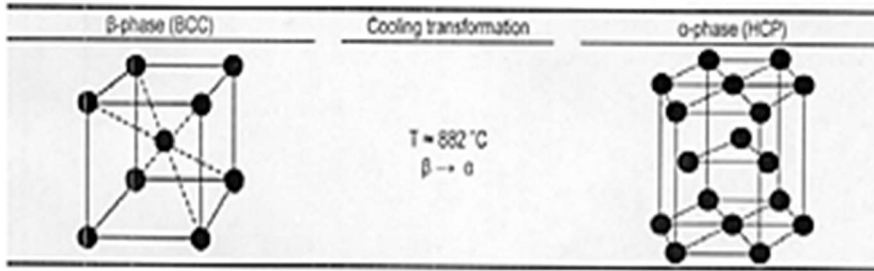
3. Ti-6Al-4V ALAŞIMI

Titanyum, 1791 yılında İngiliz araştırmacı William Gregor tarafından keşfedilmiş ve Alman kimyager Klaproth tarafından isimlendirilmiştir [31]. Titanyum yeryüzünde en çok bulunan elementlerden biri olarak bilinmekte ve alüminyum, demir, magnezyumun yanı sıra endüstride en yaygın kullanılan metallere biridir. Yüksek reaktivite, yüksek ergime sıcaklığı, yüksek korozyon direnci, yüksek özgül mukavemet gibi özelliklere sahiptir [2, 3, 31–33]. Saf halde bulunmayan titanyumun saflaştırılmasının oldukça zor olması metali pahalılaştırmaktadır [2]. Bunun yanı sıra Milan ve diğerleri yaptıkları çalışmalar ile yüksek aşınma direncine, koroziyon ortamlarda yüksek dayanıma sahip olduğuna da değinmişlerdir [3]. Yüksek dayanım, süneklik, korozyona direnç, biyo-uyumluluk gibi birçok avantajlı özelliğinden dolayı özellikle Ti-6Al-4V alaşımı havacılık, uzay teknolojileri, tıp, otomotiv, gemi endüstrisi, enerji gibi çoğu alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [31].

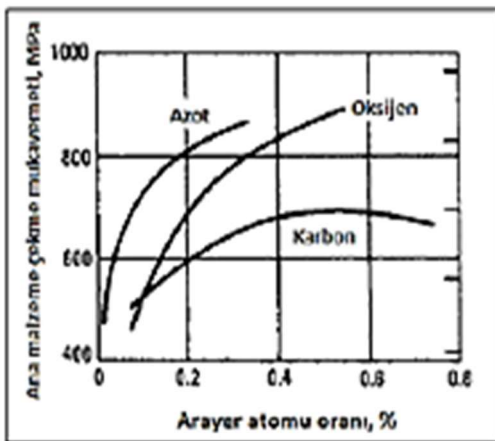
Havacılık ve uzay sanayisi için vazgeçilmez avantaj olan yüksek sıcaklıklarda yüksek özgül mukavemete sahip olması titanyumun kullanımını yaygınlaştırmıştır [3]. Aynı zamanda çeliğe göre düşük yoğunluğa, alüminyuma göre yüksek dayanıma sahip olması ise havacılık sektörü için bu metalin sıklıkla tercih edilebilir olmasını sağlamıştır [3]. Özellikle tercih edilen Ti-6Al-4V alaşımı, havacılık sanayisinde kullanılan titanyum alaşımlarının %60'ını oluşturmaktadır [5]. Biyo-uyumluluğu, kemik benzeri mekanik özelliklere sahip olması, korozyona yüksek direnci, kimyasal reaksiyona girmemesi ise biyomedikal sektörü için titanyumu sıklıkla kullanılır hale getirmiştir [34,35]. Saf titanyum (CP-Ti) ve Ti-6Al-4V alaşımı bu alanda en çok kullanılan çeşitler olup, titanyumun insan vücudu için implant ihtiyacını doğal şekilde karşılayabilen sayılı malzemelerden biri olduğu bilinmektedir [36].

Yüksek reaktivitesi sayesinde oksijen ile temas ettiğinde yüzeyinde meydana gelen oksit tabakası, yüksek korozyon direnci sağlamaktadır. Bu özelliği sayesinde denizcilik sektöründe sıklıkla yer almaktadır [37]. Daha iyi performans, daha yüksek kullanım ömrüne sahip olması, alaşım kompozisyonu değiştirilerek mekanik özelliklerinin geliştirilebilmesi ve diğer metallere kıyasla avantajlı olması ile titanyum ve özellikle Ti-6Al-4V alaşımı çoğu sektörde tercih edilen malzeme halini almıştır. Bütün bunların yanında Titanyum ve alaşımları için en büyük dezavantajın maliyet olduğu belirtilmektedir.

Titanyumun alaşımlandırılması sonucunda faz dönüşümleri oluşmakta ve Ti-6Al-4V alaşımının mikro yapısı içerisinde 2 farklı faz bulunmaktadır. Titanyuma eklenen alaşım elementleri α veya β fazı dengeleyici olarak ayrılmakta ve bunların α - β dönüşüm sıcaklığına olan etkisine göre mikro yapısal farklılıklar oluşmakta, faz dönüşümleri sonucunda malzemede metalürjik değişimler meydana gelmektedir [2, 33]. Titanyum yüksek sıcaklık değerlerinde hacim merkezli kübik yapıdadır ve oda sıcaklığına soğutulduğunda sıkı paketli hekzagonal yapıya dönüşen allotropik faz dönüşümüne sahiptir ve bu dönüşüm Şekil 3.1’ de gösterilmektedir [38]. Titanyum alaşımlarında bulunan N (azot), O (oksijen), C (karbon), ve H (hidrojen) gibi arayer atomlarının miktarlarının allotropik dönüşüm sıcaklığı ve faz dengelenmesi üzerinde etkisi olduğu bilinmektedir. Ti-6Al-4V alaşımı içerisinde bulunan arayer atomlarının, malzemenin çekme dayanımına olan etkisi Şekil 3.2’ de gösterilmektedir [33].



Şekil 3.1. Saf titanyum kristal hücre yapısı [38]



Şekil 3.2. Arayer atomlarının Ti-6Al-4V malzemenin çekme dayanımı üzerindeki etkisi [33]

Alüminyum (Al) hem α hem de β fazları için yüksek çözünürlüğe sahiptir, Titanyumun, Alüminyum ile alaşımlanması α - fazında 550 °C’ye kadar kullanılabilmesine olanak

sağlar. En yaygın kullanılan alaşım elementleri arasındadır. α -dengeleyicisi olarak kullanılan azot (N), karbon (C) ve oksijen (O) arayer elementleridir ve faz dönüşüm sıcaklığını yükseltmektedirler. β -dengeleyicisi olarak kullanılan Vanadyum (V), Niyobyum (Nb), Molibden (Mo), Demir (Fe), Krom (Cr) ve Silisyum (Si) asal yer elementleridir. Alaşım içerisinde bu elementlerin miktarının arttırılması faz dönüşüm sıcaklığını düşürmekte ve malzemede gevrekliğe sebep olmaktadır [33, 39].

Çizelge 3.1. Titanyum ve alaşımlarının özellikleri [40]

α Alaşımları	Saf Titanyum Ti-5Al-2,5Sn	-Yüksek yoğunluk -Yüksek ısıl dayanım -Yüksek mukavemet -Üretim kolaylığı	-Yüksek sürünme dayanımı -Gelişmiş kaynaklanabilirlik
Ağırlıklı α	Ti-8Al-Mo-V Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo		
$\alpha + \beta$ Alaşımları	Ti-6Al-4V Ti-6Al-2Sn-6V		
Ağırlıklı β	Ti-6Al-2sn-4Zr-6Mo Ti-3Al-10V-2Fe		
β Alaşımları	Ti-13V-11Cr-3Al Ti-8Mo-8V-2Fe-3Al		

Endüstriyel uygulamalarda titanyum alaşımları içerisinde en yaygın olarak kullanılanlardan biri Ti-6Al-4V alaşımıdır. İki fazlı bir alaşım olan Ti-6Al-4V, alfa fazını kararlı hale getiren alüminyum (%6 ağırlık oranı), beta fazını kararlı hale getiren vanadyum (%4 ağırlık oranı) bulunmaktadır [2, 31]. Sektörlerde kullanılan Ti-6Al-4V alaşımları döküm yöntemi ile bu alaşım parçaları ise talaşlı imalat yöntemleri ile üretilmektedir. Fakat söz konusu titanyum alaşımlarının işlenmesi olduğunda, benzer sertlikteki metallere kıyasla çok daha yüksek kesme kuvveti gerektirmekte ve bu durumda işleme maliyetini artırmaktadır. Titanyumun düşük ısıl iletkenliği işleme sırasında meydana gelen ısının parçadan uzaklaştırılmasını zorlaştırmaktadır. Yüksek kimyasal reaktivlik, düşük Elastisite modülü gibi sebepler ile titanyum alaşımlarının geleneksel yöntemlerle işlenmesi zorluklar içermektedir [2, 33]. Özellikle Ti-6Al-4V gibi alaşımlarda karmaşık parça üretimi geleneksel yöntemler ile oldukça zor olmakta, önemli miktarda süre ve iş gücü gerektirmektedir. Bu sebepler ile titanyum alaşımlarının günümüz yöntemlerinden katmanlı imalat teknolojileri kullanılarak işlenmesi durumu yaygınlaşmaktadır [5, 6, 31].

Çizelge 3.2. Ti-6Al-4V alaşımına ait temel özellikler [41]

ÖZELLİK	DEĞER
Yoğunluk – Katı Hal (ρ)	4,43 g/cm ³
Yoğunluk – Sıvı Hal (ρ)	3,89 g/cm ³
Katılaşma Sıcaklığı	1604 °C
Ergime Sıcaklığı	1660 °C
$\alpha \rightarrow \beta$ Dönüşüm Sıcaklığı	750 °C
$\alpha + \beta \rightarrow \beta$ Dönüşüm Sıcaklığı	980 °C
Martenzit Dönüşüm Sıcaklığı	750 °C veya 610 °C
Sertlik	349 HV

Ti-6Al-4V alaşımı için çeşitli yöntemler ile üretilmesi sonrasında elde edilmesi gereken kimyasal bileşimler Amerikan Malzeme ve Test Kurumu (ASTM) tarafından standart hale getirilmiş ve Çizelge 3.3’te sunulmuştur. Aynı zamanda Ti-6Al-4V için katmanlı imalat sonrası olması beklenen bazı mekanik özellikler de Çizelge 3.2’ de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Ti-6Al-4V katmanlı imalat yöntemi ile üretilmesi sonucunda olması gereken kimyasal bileşimi (% ağırlık)

ELEMENT	Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
ASTM F2924-14	Denge	5,5-6,75	3,5-4,5	0,3	0,2	0,08	0,05	0,015

Çizelge 3.4. Ti-6Al-4V katmanlı imalat yöntemi ile üretilmesi sonucunda elde edilen mekanik özellikler

MEKANİK ÖZELLİKLER	Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	% Uzama
ASTM F2924-14	825 MPa	895 MPa	>10

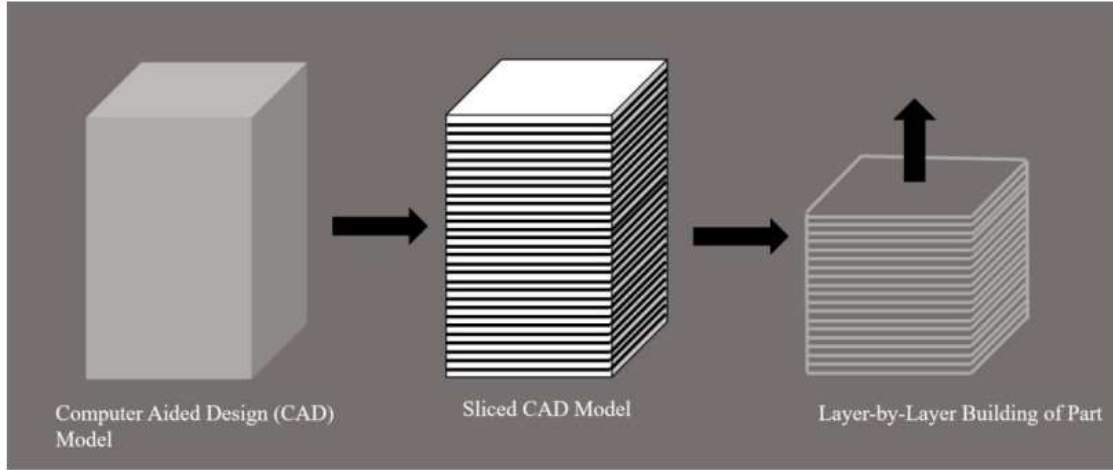
4. EKLEMELİ İMALAT

Eklemeli imalat, 1980’li yıllarda ilk defa bilgisayar destekli tasarım kullanılarak 3B parça üretimi hızlı prototipleme amacı ile ortaya çıkarılmıştır [42, 43]. ASTM standartlarında ise “malzeme eksilterek üretme yöntemlerinin tersine, katman katman malzeme ekleme yolu ile 3B geometrik tasarım ile parça üretmek için malzeme birleştirme süreci” şeklinde tanımlanmaktadır [44]. Katı modeli tasarlanan parçanın, katmanlara dilimlenmiş verilerinin makineye aktarılması ile başlayan süreçte, katman katman malzeme eklenerek Şekil 4.1’ de gösterildiği gibi üretimin gerçekleştirilmesine dayanan bir yöntemdir [7, 8]. Katmanlı imalat yöntemi ile polimer, seramik ve metal parçalar üretilmekte olup, kullanılan malzeme çeşidi, malzemeyi ekleme yöntemi gibi özelliklere göre de gruplara ayrılmaktadır. Katmanlı imalatın geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla birçok üstün özelliğinin bulunması, günümüzde bu yöntemlerin yaygın şekilde kullanılır olmasına olanak sağlamıştır [42, 43].

ASTM F42 komitesinin 2009 yılında şekillendirdiği hali ile katmanlı imalat teknolojileri 7 kategori altında, Çizelge 4.1’ de gösterildiği gibi sınıflandırılmıştır [44,45].

Çizelge 4.1. ASTM F42 standartlarına göre katmanlı imalat yöntemlerinin sınıflandırılması

YÖNTEM	UYGULAMA
Malzeme Ekstrüzyonu	Polimer prototipleme
Polimerizasyon	Prototipleme ve yüksek yüzey hassasiyeti
Yapıştırıcı Püskürtme	Prototipleme ve döküm örnekleri
Malzeme Püskürtme	Görsel prototipleme
Toz Yataklı Ergitme	Fonksiyonel prototipleme, fonksiyonel mühendislik parçaları
Levha/Saç Laminasyon	Prototipleme
Doğrudan Enerji Depolama	Prototipleme, fonksiyonel parça ve metal parça tamiri



Şekil 4.1. Katmanlı imalat adımlarının şematik gösterimi [18]

Geleneksel üretim yöntemleri göz önünde bulundurulduğunda katmanlı imalatın avantajları [10,18,30,46];

- Daha az malzeme ile üretim: Talaşlı imalat gibi bütün parçadan malzeme eksilterek yapılan üretimde meydana gelen malzeme israfının azaltılması
- Üretim kaynaklarının verimliliği: Katmanlı imalat için gerekli olmayan, geleneksel üretim yöntemlerinde kullanılan takımların, kalıpların gerektirdiği maliyet
- Tasarım özgürlüğü: Geleneksel yöntemler ile üretimin zorluğundan kaynaklı olarak geometrik tasarımın kısıtlanması, katmanlı imalat ile daha esnek tasarım sağlanabilmesi
- Üretim esnekliği: Geleneksel yöntemlerin gerektirdiği parça bağlama ve kurulum süreç maliyetlerinin daha düşük olması
- Operatör etkisi: Üretilen parçanın kalitesinin cihaza ve parametrelere bağlı olması ile operatör faktörünün kaliteye etkisinin az olması

olarak sıralanabilir.

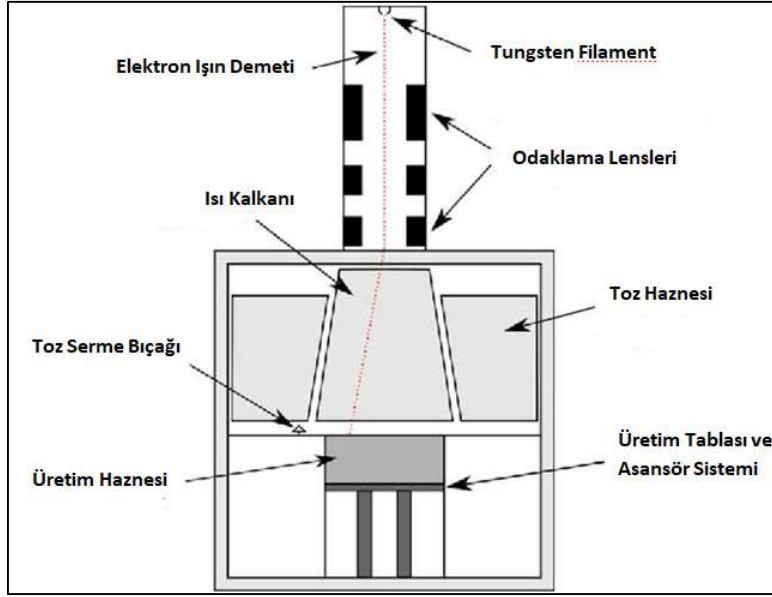
5. Tİ-6AL-4V İÇİN KATMANLI İMALAT

Ti-6Al-4V alaşımı için parça üretiminde ve şekillendirmede genellikle döküm, dövme gibi geleneksel imalat yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerin zorlukları, titanyum alaşımları için var olan işleme zorluklarına Bölüm 3'te değinilmiştir. Karmaşık geometrilerde parça üretiminin yüksek hassasiyette sağlanabilmesinin geleneksel yöntemler ile bazı durumlarda mümkün olmaması, bazı durumlarda ise imkânsız olması durumu katmanlı imalat teknolojileri kullanılarak Ti-6Al-4V parça üretiminin günümüzde oldukça yaygınlaşmasını sağlamıştır. Yüksek geometrik karmaşıklığa sahip Ti-6Al-4V parçaları üretmede toz yataklı katmanlı imalat veya doğrudan enerji yığma gibi katmanlı imalat teknikleri kullanılabilmektedir [39,47–49]. Tez çalışmasında EBM üzerinde durulacaktır.

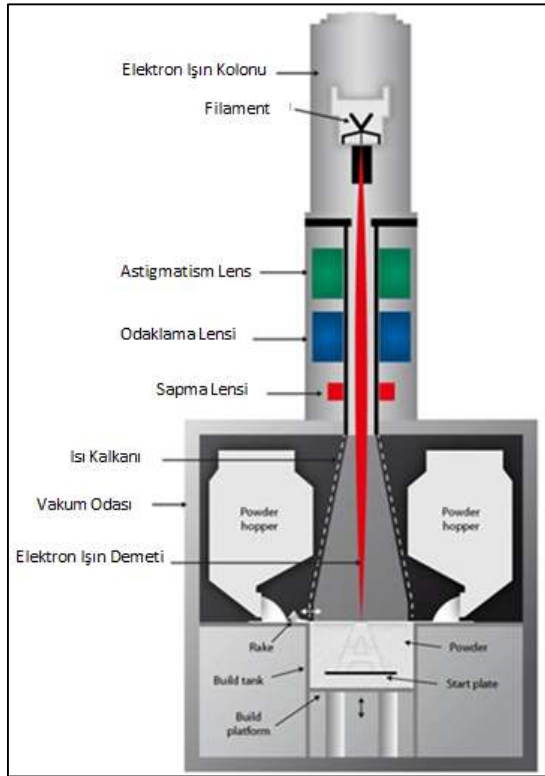
5.1. Elektron Işınıyla Ergitme – Ti-6Al-4V

Toz yataklı ergitme sistemlerinden biri olan EBM yöntemi, kontrollü bir atmosfer ile vakum altında parça üretimi sağlar. EBM yöntemine ait üretim adımlarının şematik gösterimi Şekil 5.1' de verilmiştir [30]. Elektron ışını demetinin üretimde enerji kaynağı olarak kullanıldığı ilk makaleler 1992'de yayınlanmıştır. Sonrasında 1997 yılında ARCAM AB Corporation, EBM sisteminin S12 ve A2 makineleri ile patentini almıştır [11,12]. İlk defa 2001 yılında ticarileştirilen ARCAM cihazı, üretim ekipmanları ve yöntem şeması Şekil 5.2' de gösterilmiştir. İlk zamanlarda yalnızca takım çeliği tozu kullanılarak parça üretilen yöntem için günümüzde titanyum ve alaşımları, kobalt alaşımları, nikel alaşımları, bakır toz metalleriyle kullanılabilmektedir [50–52].

EBM yöntemi ile üretilen parçaların mekanik özellikleri, yüzey özellikleri proses parametrelerinin süreç üzerindeki etkilerinin incelenmesi ve bu doğrultuda yapılan optimizasyona yönelik çalışmalar ile geliştirilebilmektedir [13]. EBM, yüksek etki derinliği sayesinde artan üretim hızı, yüksek enerji verimliliği, ortalama üretim maliyeti gibi faydaları dolayısıyla birçok araştırmacı ve sektör tarafından yoğun olarak incelenmektedir [12,14].



Şekil 5.1. EBM makine görünüşü



Şekil 5.2. ARCAM – EBM makine görünüşü

Şekil 5.1’ de görüldüğü üzere EBM sisteminde elektron tabancası sayesinde, tungsten filamentin ısıtılması ile hızlanarak yüksek kinetik enerjiye (60 keV) ulaşan elektronlar ışın demeti oluşturmaktadır. Elektron demeti manyetik lensler ile odaklanarak toz katmanının

yüzeyine gönderilmekte ve katmanda istenilen tarama şekli ile ergitme meydana getirmektedir. Elektron demeti ve ortamın etkileşimini engellemek için sistem yaklaşık olarak 10^{-4} torr vakum altında çalıştırılmaktadır. Buna ek olarak sistemin ısı kararlılığını sağlamak ve toz katmanında elektrik yükü birikmesini engellemek amacı ile belirli bir miktar Helyum gazı çalışma ortamında kullanılmaktadır [7,50,53–55].

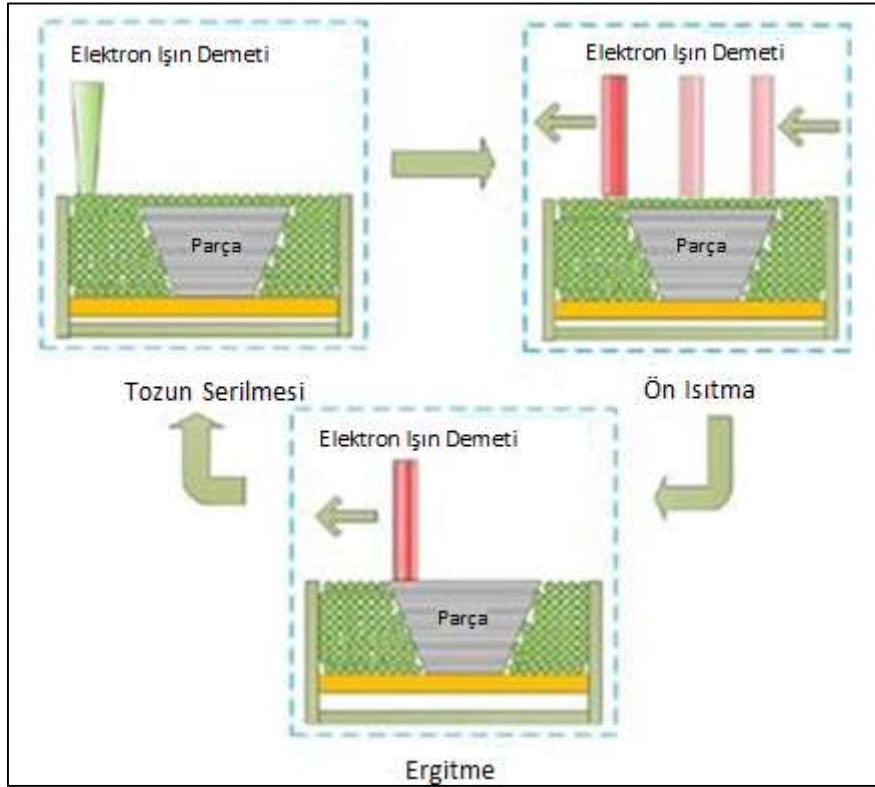
Çizelge 5.1. ARCAM Q20 EBM makinesine ait özellikler

ÖZELLİKLER	DEĞERLER
Boyut (W x D x H)	2300x1300x2600 mm
Ağırlık	2900 kg
Güç Kaynağı	3 x 400 V, 32 A, 7 kW
Maks. Üretim Hacmi (Çap x Yükseklik)	350 x 380 mm
Maks. Işın Gücü	3000 W
Min. Işın Çapı	180 μ m
Pozisyonlama Süresi	10 ms
Vakum Basıncı	1×10^{-4} mbar
Soy gaz Basıncı (He)	1×10^{-3} mbar



Şekil 5.3. ARCAM S12 EBM makinesi üretim haznesi görünüşü [18]

EBM ile üretilmiş bir parçanın tabladan çıkartılmadan önceki hali Şekil 5.3 ile verilmiştir. Üretim, belirlenen katman kalınlığı kadar toz tabakasının başlangıç tablasına serilmesi ile başlatılır. Kısmen düşük akım ve kısmen yüksek tarama hızı ile metal tozunu sinterleyerek, ışın demetinin toz katmanına çarpmasının ardından oluşacak toz bulutunu engellemek amacı ile ön ısıtma işlemi uygulanır. Daha sonra, aynı katman elektron demeti ile taranarak “ergime” işlemi belirlenen katman geometrisi verileri ile gerçekleştirilir. Parça üretim planlamasında varsa destek elemanları “wafer” işlemiyle oluşturulur ve son olarak, kafes yapı geometrileri varsa “ağ” işlemi uygulanır. Metal toz katmanında ergitme işlemi biterildiğinde üretim tablasının katman kalınlığında aşağı inmesi ile yeniden toz katmanı serilerek bu işlem nihai parça tamamlanana kadar sürdürülür (Şekil 5.4). Üretim tamamlandığında haznedeki mevcut He basıncı artırılarak parçanın elektrik yüklenmesi engellenir ve bu basınç artışı sayesinde ısı iletimi ile parça da soğutulmuş olur [54,56–58].



Şekil 5.4. EBM üretim adımları

EBM teknolojisinde avantajlarına rağmen hala geliştirilme sürecinde olması sebebiyle birçok dezavantajı da bulunmaktadır. Geometrik hassasiyetin zorluğu, parça hataları (çarpılma, boşluk, büzülme vb.), süreç kontrol zorluğu (parametre sayısının fazlalığı) dezavantajlar arasında gösterilebilir [15,16]. EBM yöntemi ile üretilen Ti-6Al-4V parçalar için literatürde araştırılan birçok yapı hatası bulunmaktadır. Kısmi ergime veya

sinterlenmiş tozlar gibi sebepler ile parça içerisinde meydana gelen kusurların, üretim parametrelerinin uygun değer aralıklarında kullanımı ile önüne geçilmeye çalışılmaktadır. Katman kalınlığı, elektron demeti enerjisi, akımı, tarama hızı, odak çapı gibi parametrelerin optimizasyonunun, üretilecek nihai parça kalitesini belirlemede oldukça etkili olduğu bilinmektedir [59].

6. EKLEMELİ İMALAT - TOZ YATAKLI ERGİTME YÖNTEMLERİNDE MODELLEME

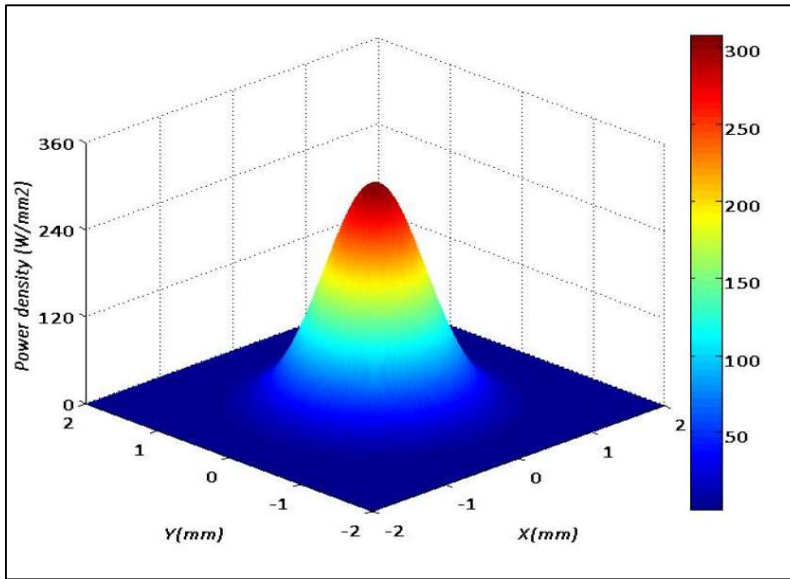
Katmanlı imalat sistemlerinde ve özellikle bu tez çalışmasında üzerinde durulacak olan toz yataklı ergitme sistemleri prensipte, ıının toz katmanı ile buluşmasının ardından, tozun ergimesi ve iletim, ıınınım veya ortamdaki asal gazın taşınım etkisi ile ergiyik tozun katılaşması gibi bir dizi ısı etkiye bağlıdır. Çalışma sisteminde iletim, taşınım ve ıınınım olarak ısı transferi çeşitleri görülmektedir. Sistem içerisinde meydana gelen ısı transferi birçok üretim yönteminde olduğu gibi katmanlı imalat da büyük önem taşımaktadır [54]. Meydana gelen üç ana ısı transferi sonucunda üretim alanında termal genleşmeler, iç gerilmeler, sıcaklık dağılımı etkileri parçalarda oluşan hataların temellerini oluşturmaktadır. Parçalarda sıcaklık farklılıkları ve ısı transferi etkileri sonucunda meydana gelen ısı gerilme, kısmi ergime gibi olumsuz durumların tespit edilebilmesi için günümüzde birçok deneysel yöntem bulunmaktadır. Ancak, bu yöntemlerin işçilik, zaman ve ilave maliyet gerektirmesi gibi dezavantajları mevcuttur. Diğer bir taraftan, üretilecek parça geometrisi veya üretim doğrultusu değiştirildiğinde meydana gelecek hataların farklılık göstermesi, bir parça için yapılan deneysel tespit yöntemlerini etkisiz bırakmaktadır [54, 60, 61].

Katmanlı imalat teknolojilerinde üretim sırasında parça kalitesine doğrudan veya dolaylı olarak etkisi olan çok sayıda proses parametresi bulunmaktadır. Üretim sırasında uygun olmayan parametrelerin seçimi doğrudan parça kalitesine etki etmektedir. Proses parametrelerinin kombinasyon sayısının fazlalığı sebebiyle deneysel geliştirme için çok yüksek miktarda deneme yapılması gerekliliği vardır. Bu durum ise işçilik, zaman ve maliyet açısından olumsuz etki yaratmaktadır. Bu durumun önüne geçilmesi amacıyla sayısal modelleme ve simülasyon yöntemleri, parçada oluşabilecek hataların öngörülmesinde oldukça işlevsel hale gelmiştir [60–62].

Katmanlı imalatta modelleme işlemleri, malzeme, proses ve yapısal olarak alt gruplara ayrılmaktadır [63]. Diğer taraftan kullanılan modelleme teknikleri ölçeklere göre de mikro, mezo ve makro olarak sınıflandırılabilir [64]. Ölçeklendirme arasındaki temel fark, toz yataklı sistemlerde tozun parçacık olarak veya sürekli bir gövde olarak değerlendirilmesinden kaynaklanmaktadır [54]. Körner ve diğerleri (2011) yayınladığı çalışmada, tozu partikül boyutu ile modelleyerek kullanmıştır [20]. Fakat uyguladığı bu mezoskopik yaklaşımın getirdiği karmaşıklık, yüksek maliyet ve gerektirdiği uzun zaman

sebebi ile modelin büyük ölçekteki çalışmalar için uygun olmayacağı belirtilmiştir. Simülasyon süresini azaltabilmek amacıyla Riedlbauer tozun devamlı olarak kabul edilmesi yaklaşımını kullanarak yaptığı makroskopik çalışmasında, SEBM yöntemi Ti-6Al-4V tozları için modellenmiştir [21]. Zah ve Lutzman ise yine makroskopik yaklaşımı ile FEM kullanarak geliştirmiş olduğu matematiksel model sayesinde elektron ışın demetinin toz katmanı üzerinde oluşturduğu ergiyik havuzun geometrik değişiminde parametrelerin etkisini incelemiştir [12].

Termal simülasyonlarda ısı girdisinin yatay düzlemdeki dağılımı ve düşey düzlemde soğurulması ile birlikte modellenmesi gerekmektedir [61]. Bu çalışmada üzerinde durulacak olan toz yataklı ergitme sistemlerinden EBM yönteminde, ısı girdisi modelleme için literatürde farklı yaklaşımlar bulunmaktadır [54]. Qi ve diğerleri yaptıkları çalışmada elektron ışını kare bir tabana, katman kalınlığı kadar yüksekliğe sahip prizmatik, düzgün bir hacimsel dağılım olarak modellemiştir [65]. Sonrasında yapılan çalışmalarda hareketli ısı kaynağı, genellikle SLM de kullanılan, Gaussian dağılımına sahip, çan şeklinde bir hacim olarak modellenmiştir [54]. Zäh ve Lutzmann, Cheng ve Price, Shen ve Chou, Galati ve diğerleri, Riedlbauer ve diğerleri Gaussian dağılımına sahip ısı kaynağı ile modelleme yapmış ve ısı kaynağı formülasyonları ile etki derinliği fonksiyonlarında çeşitli yöntemler kullanmışlardır [12, 19, 21, 27, 30]. Şekil 6.1' de Shen ve Chou tarafından yapılan çalışmada ısı girdisi modellenmesi için kullanılan Gaussian dağılımı gösterilmektedir [19].



Şekil 6.1. Isı girdisi için kullanılan Gaussian model [19]

Termal simülasyonlar çoğunlukla seçilen parametrelerin ısı dağılımı, ergiyik havuz boyutları ve geometrisi, sıcaklık-zaman geçmişi üzerindeki etkilerini incelemek amacı ile kullanılmaktadır. Geliştirilen modelin, kullanılmasından önce doğrulama işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Üretim sırasında alınan termal görüntüler ile üretim sonrasında parçaya yapılan metalografik incelemeler veya literatür verileri ile geliştirilen modelin doğrulaması yapılmaktadır [54,61].

Mühendislik problemlerinin el ile hesaplama yöntemi kullanılarak çözümlerinin imkânsız hale gelmesi nedeniyle nümerik çözüm teknikleri geliştirilmiştir. FEM yöntemi ilgili diferansiyel denklemlerin çözümünde uygulanan ve katmanlı imalat proseslerini simüle etmek için yaygın olarak kullanılan çözüm tekniğidir. Bu yöntem analiz edilmek istenen çeşitli geometriye sahip yapıların, daha basit ve daha küçük geometrilere ayırarak yaklaşık olarak nümerik çözüm yapılması prensibine dayanmaktadır ve bu yöntem ile zamana bağlı karmaşık problemlerin çözümüne imkan sağlanmaktadır. ANSYS, ABAQUS, HyperWorks, COMSOL vb. programlar modellerin simülasyonunda kullanılan çözümleyici yazılımlardır. FEM yöntemi ile hem termal hem de mekanik analiz yapılabilmektedir [66,67].

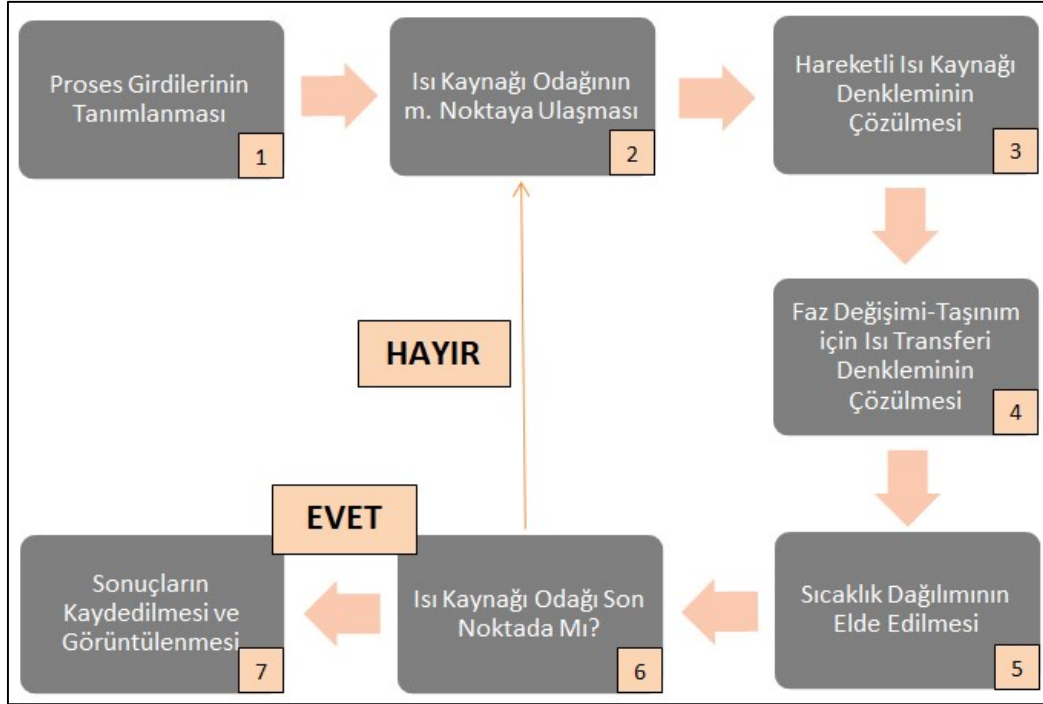
Yapılan termal analiz çalışmaları, geometride meydana gelen ısı transferi sırasında akışkanlık özelliklerinin, sonlu elemanlar yöntemlerine kıyasla simülasyon sonuçlarını etkileyebileceğini göstermiştir. Bu çalışmalar sonucunda CFD ile modellemenin sonuçları etkileyebileceği görülmüştür. Li ve diğerleri, lazer ile ergitme yöntemi sırasında seramik malzemeler üzerinde meydana gelen faz değişimini incelemek amacı ile CFD prensibi kullanarak 3B sayısal modelleme çalışmaları yapmıştır [23]. Ayrıca Rai ve diğerleri, 304L tozlar üzerindeki elektron ışını kaynağının sıcaklık dağılımını analiz etmek için sayısal bir ısı transferi ve sıvı akış modeli kullanmıştır [24]. Her iki çalışma, ergiyik havuzundan konveksiyon yoluyla ısı transferinin, ergiyik havuzu boyutu ve şeklinin hesaplanmasında önemli ve etkili olduğunu göstermektedir. Rahman ve diğerleri EBM' de Gauss dağılımına sahip hareketli bir ısı kaynağının Ti-6Al-4V tozları ile etkileşimini incelemek amacıyla 3B CFD model geliştirmiş ve ergiyik havuzunu, ergime ve katılaşmanın özelliklerini araştırmıştır [25]. Diğer taraftan Jamshidinia ve diğerleri, farklı parametrelerin ısı dağılımı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ve Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kombinasyonu ile 3B model geliştirmiştir [26]. Geliştirilen

model EBM sisteminde düzgün olmayan termal dağılım nedeniyle oluşan termal gerilimlerin sistem üzerindeki etkisinin araştırılmasında kullanılmıştır.

7. MATERYAL-METOD

Bu tez çalışmasında toz yataklı katmanlı imalat sistemlerinden biri olan EBM yönteminde, elektron ışını ve Ti-6Al-4V toz etkileşiminin incelenmesi amacıyla sayısal model geliştirilmiştir. Geliştirilen model ile yapılan simülasyonlar sonucunda ergiyik havuz boyutları ve sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Aynı zamanda seçilen çeşitli parametrelerin ergime ve buharlaşma üzerindeki etkileri, kullanılabilir optimum parametre aralığı belirlenmesi amacı ile incelenmiştir. Geliştirilen model, literatürde deneysel incelemesi de bulunan veriler ile doğrulanmıştır.

EBM, geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla çok daha avantajlı olmasına rağmen, hala gelişmekte olan bir alışılmamış imalat tekniği olarak kabul edilebilmektedir. Üretim hassasiyeti, yüzey kalitesi, ürün kusurları gibi üretim yetersizliklerinin önüne geçilmesi amacıyla proses parametreleri optimizasyonu, doğru ısı transferi modeli ve ısı kaynağı modelleme konularında araştırmaların artırılması gerekmektedir [19]. Literatürde EBM yöntemi kullanılarak yapılan deneysel çalışmaların artmasına rağmen, EBM parametrelerinin modellenmesi ve simülasyonu konularında yapılan teorik çalışmaların diğer metal katmanlı imalat prosesleri ile kıyaslandığında sınırlı sayıda yayınlandığı görülmektedir. Bu durumun sebebi olarak EBM sürecinin oldukça karmaşık bir yapısının bulunması ve üretilen yüksek performansa sahip parçanın sayısal modellemesindeki zorluklar olduğu belirtilmektedir [14]. Bahsedilen bu durumlar sonucunda, yapılan tez çalışmasında metal katmanlı imalat yöntemlerinden elektron ışını ile ergitme prosesi üzerine yoğunlaşılmasına karar verilmiştir. Tez çalışmasında hedef malzeme Ti-6Al-4V olarak belirlenmiştir. Geliştirilen modelin UDF kodlaması C programlama dilinde hazırlanmıştır. FEM ve CFD ile UDF çözümlmeleri ANSYS Fluent 19.1 yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Termal modelleme için kullanılan akış şeması Şekil 7.1 ile gösterilmiştir.



Şekil 7.1. Termal modelleme için kullanılan akış şeması

Modelleme faaliyetlerinde ilk adım olarak hazırlık çalışmaları ve proses girdilerinin tanımlanması gelmektedir. Model geliştirilmesi sırasında 1 numaralı adımda yapılan iş ve işlemler;

- Geometrik verilerin yazılıma aktarılması,
- Oluşturulan geometrinin ağ yapısının meydana getirilmesi,
- Bu yapıdaki element verilerinin modele aktarılması,
- Isı kaynağı verilerinin modele aktarılması,
- Hareketli ısı kaynağının toz katmanında izleyeceği yolun belirlenmesi (koordinatlar),
- Sınır şartlarının belirlenmesi,
- Malzeme özelliklerinin modele aktarılmasıdır.

Sonrasında simülasyon başlatılarak 2. adımın gerçekleşmesi için belirlenen mesafede elektron ışınının ilerleyişi birim elamanlara göre ısı transferi problemleri çözülmesiyle devam etmektedir. Son adımda analiz tamamlanarak veriler kaydedilmektedir.

Modelleme altında yapılan ihmal ve kabuller;

- Geliştirilen modelde toz katmanının sürekli olduğu kabul edilmiştir.

- Modelleme ve simülasyonlar sırasında girilen verilerde toz malzemenin yoğunluğunda ergime ve katılaşma sırasında değişiklik olduğu kabul edilmiş ve sıcaklığa bağlı değerler UDF kodda uygulanmıştır.
- Sistemin modellenmesi sırasında ortam vakum altında değerlendirilmiş ve ısınım ve taşınım ihmal edilmiştir.
- Modelleme hazırlık aşamasında proses girdileri kısmında belirlenen malzeme özellikleri literatür verileri kıyaslanarak, yapılan çalışmalardan elde edilmiş olup doğru oldukları kabulü yapılmıştır.

7.1. Modelleme ve Simülasyon

EBM sürecinin modellenmesi sırasında, Gauss dağılımına sahip doğrusal yol izleyen elektron demeti toz katmanına uygulanmıştır. Elektron demetinden toz tabakasına ısı giriş dağılımının simülasyonu ANSYS yazılımı kullanılarak çözümlenmiştir. Yazılımda kullanılması amacıyla, ısı kaynağı ve ısı iletkenlik, yoğunluk, özgül ısı gibi sıcaklığa bağlı değişken Ti-6Al-4V özellikleri için fonksiyonlar UDF içerisinde tanımlanmıştır. Sıcaklığa bağlı fonksiyonlar için literatür araştırması sonucunda Price ve diğerleri tarafından yapılan deneysel çalışmadan faydalanılmıştır [30]. Ayrıca, ergiyen tozun bir birim alan üzerindeki oranını anlayabilmek için, yazılımın katılaşma ve erime modülü simülasyon sonuçlarına uygulanmıştır.

Elektron ısı ve toz tabakası arasındaki etkileşimin bir sonucu olarak ısı transferi için kullanılan denklem Eş. 7.1 ile gösterilmiştir:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla T) + S_h \quad (7.1)$$

T, ρ, C_p ve K sırasıyla ilgili malzeme sıcaklığı, yoğunluğu, özgül ısı (malzemenin ısı kapasitesi) ve ısı iletkenlik katsayısını ifade etmektedir. ∇T ise malzemenin ergime ve katılaşma durumlarında meydana gelen sıcaklık değişimini göstermektedir. Sisteme enerji girdisinin sağlanmasının ardından toz katmanında ergime ve katılaşma meydana gelmekte ve bu durumda harcanan enerji kısmı ($Q=cp \times \nabla T$) Eş. 7.1.'in sol tarafında ifade edilmektedir. Enerji girdisi sağlandıktan sonra malzemede ergime ve katılaşma olacaktır. Bu kapsamda ergime ve katılaşma sürecinde enerjinin harcanan kısmı Eş. 7.2.'de verilen S_h , Gauss profiline sahip olduğu kabul edilen ısı kaynağının tanımı olan terimle gösterilmektedir [68]:

$$S_h = AI_o\alpha \exp(-2 \frac{(x-v_x t)^2 + (y-v_y t)^2}{\omega^2}) + \alpha z \quad (7.2)$$

Eş. 7.2’de A malzeme absorpsiyon katsayısı, α etkili Absorpsiyon katsayısı, I_o elektron ışını yoğunluğunu, v_x ve v_y ışın hız bileşenlerini, t süreyi, x ve y ışın demetinin başlangıç pozisyonlarını betimlemektedir. Eş. 7.3. 7.4. ve 7.5. ile gösterilen I_o , ω , D_b ve D_p formüllerinde ω elektron ışını etkili yarıçapı, D_b elektron ışın çapı ve D_p toz çapını, P ise ışın gücünü temsil etmektedir. Elektron ışın yarıçapı için kullanılan formülasyon için ilgili literatür verilerinden yararlanılmıştır [30]:

$$I_o = \frac{2P}{\pi \omega^2} \quad (7.3)$$

$$\omega = \frac{D_b}{2 \cdot 2,146} \quad (7.4)$$

$$\alpha = \frac{1}{D_p} \quad (7.5)$$

7.1.1. Ergime ve katılaşma modülü

Entalpi - gözeneklilik tekniği EBM sırasında meydana gelen ergime ve katılaşmayı tanımlamak için kullanılmaktadır. Teknik, sistemdeki toplam ısı olarak tanımlanabilen entalpiye dayanmaktadır. Böylece entalpi sistemin iç enerjisi ile basınç ve hacim çarpımının toplamına eşit kabul edilmektedir (Eş. 7.6- 7.7). Diğer yol ise, hissedilebilir ısı ve malzemedeki gizli ısı toplamı şeklindedir. Durum şu şekilde gösterilmiştir:

$$H=U+PV \quad (7.6)$$

veya

$$H=h + \Delta H \quad (7.7)$$

Burada U , P , V , h , ΔH iç enerji, basınç, hacimdeki değişiklik, hissedilebilir ısı ve gizli ısıdır. h ve ΔH şu şekilde Eş. 7.8 ve 7.9. ile tarif edilmektedir:

$$h= h_{ref} + C_p \Delta T \quad (7.8)$$

$$\Delta H = \beta L \quad (7.9)$$

h_{ref} , L , C_p ve β sırası ile referans olan entalpi değeri, malzeme içindeki gizli ısı, özgül ısı ve katı-sıvı oranıdır. β Eş. 7.10. ile tarif edilebilmektedir:

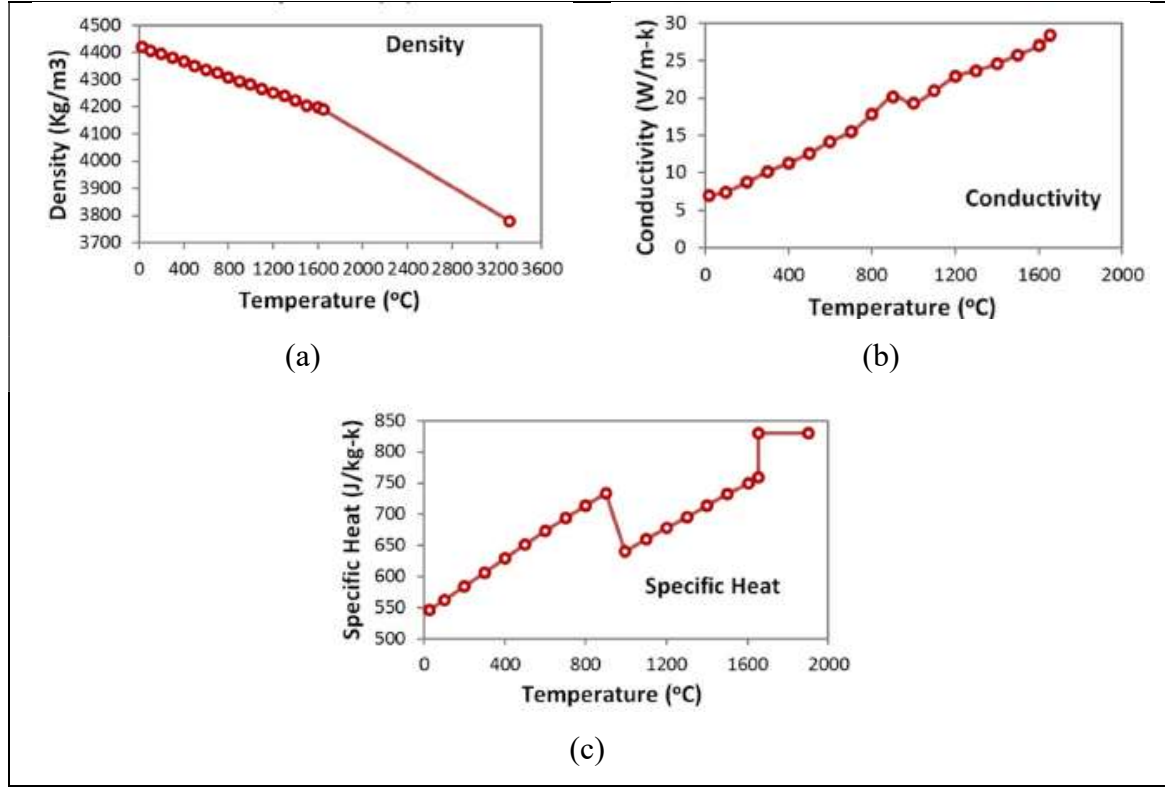
$$\beta = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{so}} \quad (7.10)$$

Dolayısıyla, denklemler vasıtasıyla, sıcaklık değeri hesaplanabilmekte ve etkileşim bölgesi içinde meydana gelen ergime veya katılaşmayı hesaplamak için de kullanılabilmektedir.

7.1.2. Malzeme özellikleri

Metal katmanlı imalat prosesinde, mevcut sistemlerde farklı toz metaller ile çalışmalar yapılabilmektedir ve söz konusu malzeme çeşitliği oldukça fazladır. Toz malzemelerin özelliklerinin elde edilebilmesi, sıcaklığa bağlı olarak değişkenlik göstermeleri nedeniyle çok sayıda deneysel faaliyet ile mümkün olmaktadır. Tez çalışmasında hedef malzeme olarak belirlenen Ti-6Al-4V tozları için, oluşturulan termal modelde, sıcaklığa bağlı değişken bazı malzeme özellikleri literatürde yer alan veriler kullanılarak, fonksiyon halinde belirlenmiştir. Geniş sıcaklık aralığında kullanılabilmesi sebebi ile Ti-6Al-4V için Shen ve Chou tarafından yapılan deneysel bir çalışma referans alınarak, yoğunluk, ısı iletkenlik ve özgül ısı değerleri fonksiyon halinde kullanılmıştır [19]. Şekil 7.2' de sıcaklığa bağlı Ti-6Al-4V özelliklerinin grafikleri gösterilmektedir. Grafiklerden elde edilen değerler ile fiziksel özellikler C programlama dili kullanılarak sıcaklığa bağlı (T) polinom fonksiyonlar olarak kodlanmıştır.

Ti-6Al-4V için yayma katsayısı (emissivity) literatür verileri baz alınarak 0,7 kabul edilmiştir [19]. Ayrıca, soğurma katsayısı (absorption efficiency) Rouquette ve diğerleri tarafından yayınlanan makaleye göre 0,9 olarak kabul edilmiştir [69]. Ergime ve katılaşma sıcaklıkları T_m ve T_s sırasıyla 1665 °C ve 1605 °C olarak kullanılmıştır [2, 19]. Kullanılan diğer sabit proses parametreleri Çizelge 7.1' de verilmiştir.



Şekil 7.2. Ti-6Al-4V'nin Sıcaklığa Bağlı Özellikleri, a) yoğunluk, b) iletkenlik, c) özgül ısı [19]

Çizelge 7.1. Sabit proses parametreleri

PARAMETRELER	DEĞERLER
Katılma Sıcaklığı T_s (°C)	1605 [2,19]
Ergime Sıcaklığı T_l (°C)	1665 [2,19]
Gizli Isı L_f (kJ/Kg K)	286 [26]
Soğurma Katsayısı η	0.9 [19,30,69]
Hızlanma Voltajı U (kV)	60 [19]
Katman Kalınlığı t_{katman} (mm)	0,05
Elektron Işın Çapı ϕ (mm)	0,4
Işın Etki Derinliği d_P (mm)	0,05
Ön Isıtma Sıcaklığı $T_{ön ısıtma}$ (°C)	730 [30]

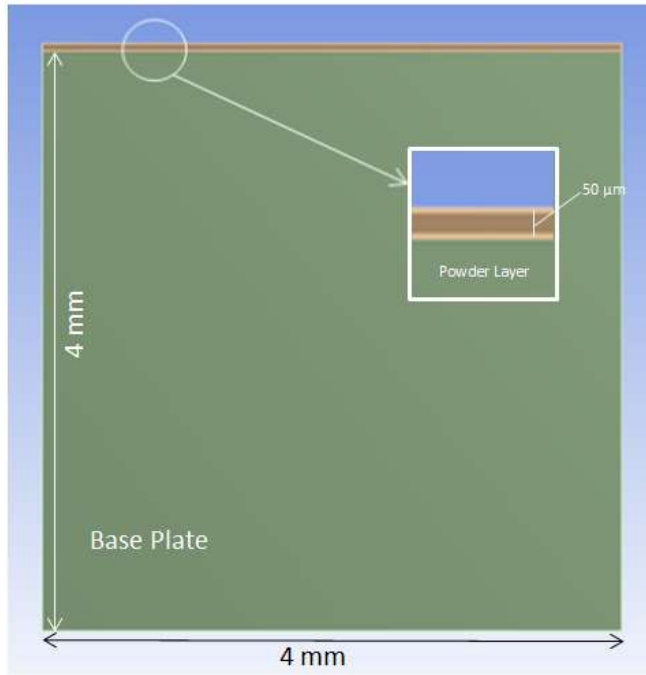
7.1.3. Model geometrisi

Termal modelleme aşamasında yapılan hazırlık işlemleri; değişken malzeme özelliklerinin yazılıma entegrasyonunun sağlanması, seçilen parametrelerin belirlenerek kod içerisinde tanıtılması, yine kod üzerinde ısı kaynağının hareket noktasının ve koordinatlarının

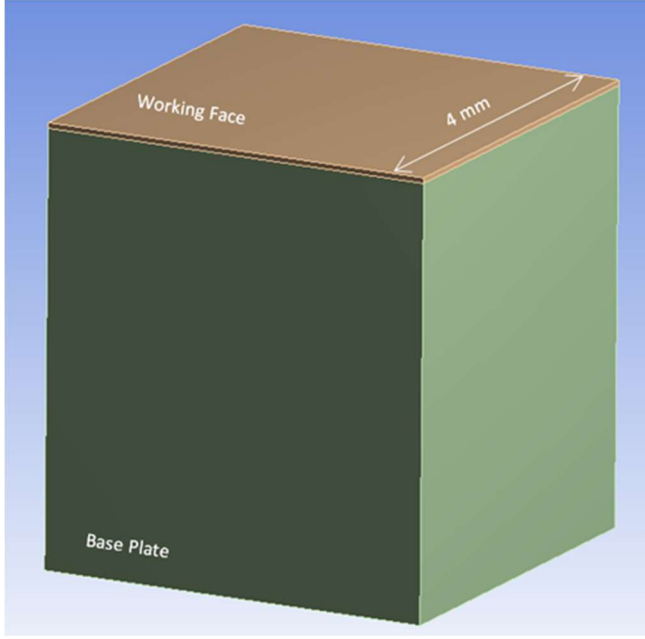
belirlenmesi, ANSYS yazılımı için kullanılır hale getirilmesi olarak belirtilebilir. Sonraki adım, model geometrisinin oluşturulmasıdır.

Tez çalışmasında belirlenen parametrelere ait daha sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak ifade edilecek kombinasyon sayısının fazla olması ve simülasyon zamanının mümkün olduğunca azaltılması gerekçeleri ile, parça geometrisi küçük tutulmuştur.

Toz katmanının başlangıç koşulu olarak 730°C ön ısıtma uygulanmıştır. Analizde kullanılan model geometrisi Şekil 7.3 ve Şekil 7.4 ile gösterilmektedir. Model geometrisinde 4 mm x 4 mm x 4 mm boyutlarına sahip üretim tablası kullanılmıştır. Tablanın üst yüzeyine $50\mu\text{m}$ kalınlığında tek katman toz tabakası uygulanmıştır.

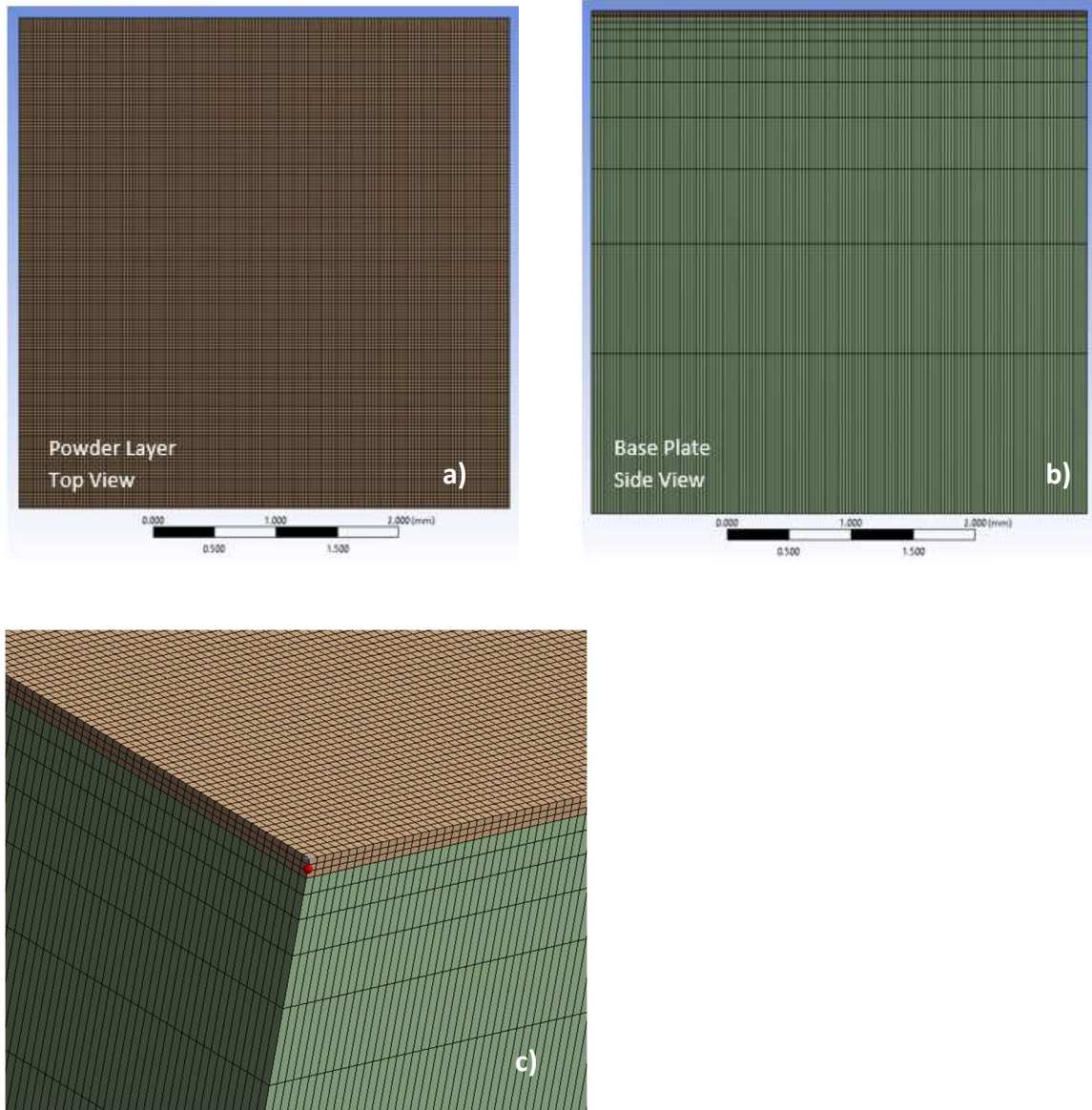


Şekil 7.3. Model geometrisi yan görünüş



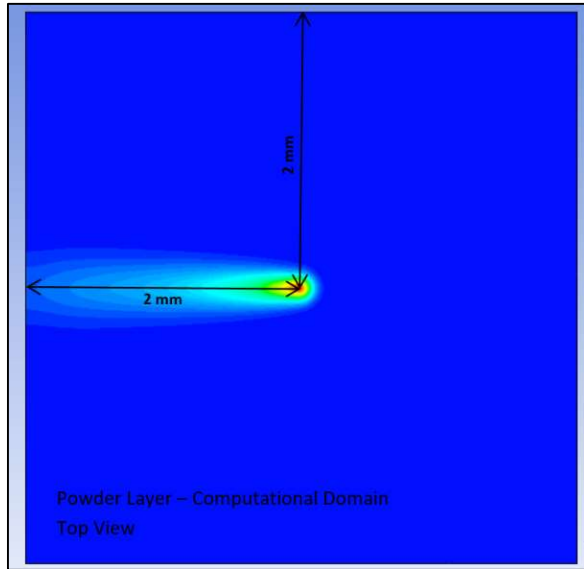
Şekil 7.4. Model geometrisi izometrik görünüş

Geometrinin ardından ağ örgüsünün oluşturulması aşaması gelmektedir. Burada dikkat edilen husus analizin yapılacağı toz katmanı ağ örgüsüne ait element boyutlarının olabildiğince küçük boyutlu tutulmasıdır. Isı kaynağının ergitme işlemi sırasında büyük boyuttaki elemanlarda ısının hapsolmesi ve bu nedenle ağ içerisinde sıcaklık farklarının oluşması ihtimalinin önüne geçilerek meydana gelebilecek sayısal hataları engellemek gerekmektedir. Bu amaç ile elementler oldukça küçük boyutlarda oluşturulmuştur. Fakat ağ elemanları boyutu küçüldükçe sayısı artış göstermekte ve böylelikle iterasyon süresi uzamaktadır. Simülasyon zamanını azaltmak amacıyla üretim tablasının üst yüzeyinden alt kısmına doğru ağ elemanı boyutu büyütülmüştür. Şekil 7.5’ te oluşturulan ağ örgüsü ve toz katmanındaki ince boyut gösterilmiştir. Oluşturulan termal model için eleman sayısı yaklaşık 332 800’e ulaşmıştır.



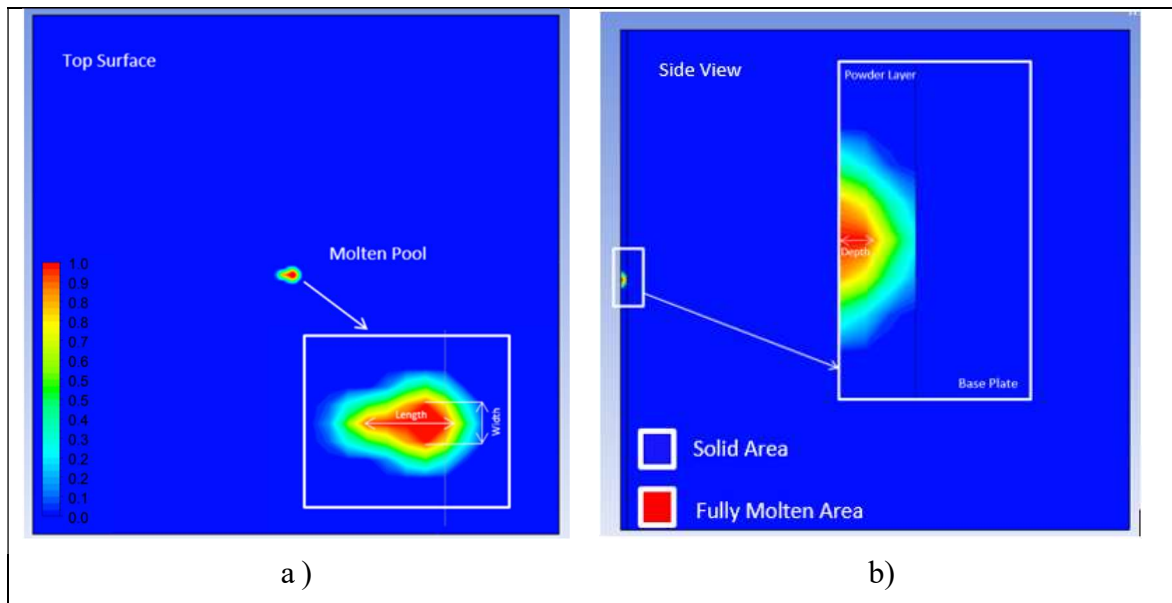
Şekil 7.5. Geometri için ağ yapı, a) toz katmanı üstten görünüşü, b) Üretim tablası yan görünüş, c) toz katmanı ve üretim tablası izometrik görünüş

Modellenen ısı kaynağı için belirlenen başlangıç noktası ve hareket doğrultusu, yani analiz aşamasında kullanılan modelleme alanı Şekil 7.6’ da gösterilmiştir. 0,4 mm sabit odak çapına sahip hareketli elektron ışın demeti 50 μm kalınlığındaki toz katmanının üstünde belirlenen parametre kombinasyonlarında doğrusal bir yol izlemiştir. Seçilen proses parametrelerinin kombinasyonları Çizelge 7.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 7.6. Toz katmanı tarama alanı üst görünüş

Analiz sonucunda ölçülen ergiyik havuz boyutlarının şematik bir diyagramı Şekil 7.7’ de gösterilmiştir. Şekillerde, ergiyik havuzun boyutları için ölçümler tarif edilmiştir.



Şekil 7.7. Eriyik Havuzu Geometrisinin Boyutları, a) üst yüzey, b) yandan görünüm

Çizelge 7.2. Proses parametre kombinasyonları

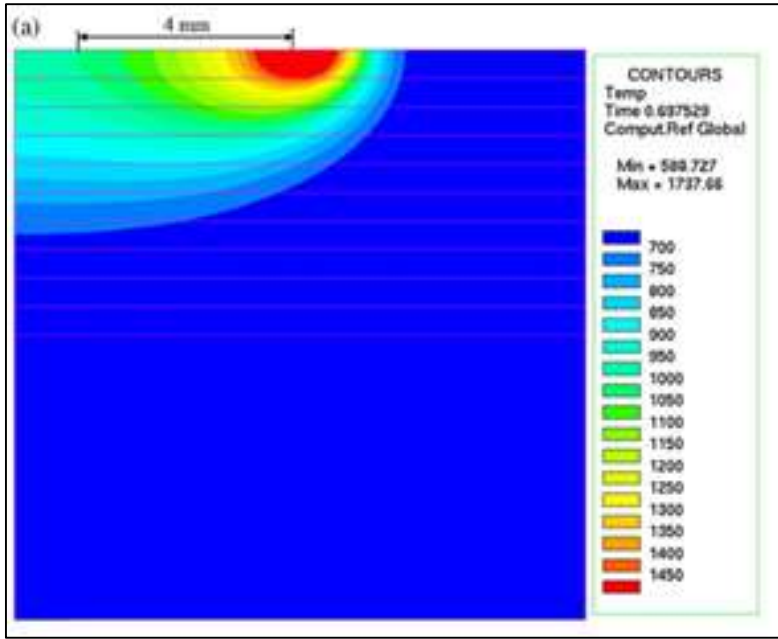
Güç (W)	1750	1500	1250	1000	750	500
Akım (mA)	29,1	25	20,8	16,7	12,5	8,3
Hız (m/s)	14					
	12					
	10					
	8					
	5,6					
	4					
	2,4					
	1,6					
	0,8					
	0,4					
	0,2					
	0,1					
	0,05					
	0,025					
	0,01					

7.2. Model Doğrulama

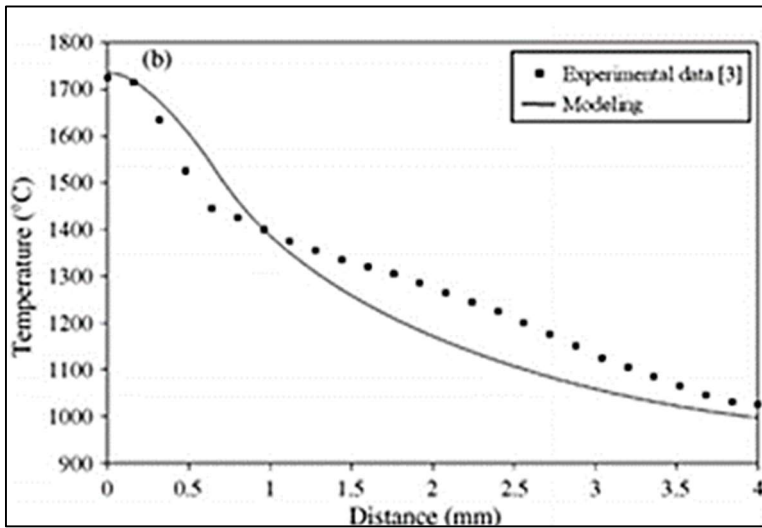
Termal modelleme sırasında geliştirilen model için deneysel, teorik veriler veya literatür verileri sayesinde doğrulama yapılabildiği 6. Bölümde ayrıntıları ile anlatılmıştır. Deneysel doğrulamanın zorluklarından ve EBM yöntemine ait deneysel verilerin yetersizliğinden dolayı tez çalışmasında kullanılan model literatürde bulunan Wang ve diğerleri [22] çalışması ile doğrulanmıştır. Wang ve diğerleri çalışmalarında LENS yönteminde FEM analizi ile ergiyik havuzun incelenmesi amacıyla termal model oluşturmuşlar ve modellerini Hofmeister ve diğerleri tarafından 316L malzemesi için yapılan deneysel çalışma ile doğrulamışlardır [22,70]. Deneysel olarak doğrulanmış bir modelin tez çalışmasında geliştirilen model için doğrulama amacıyla referans alınması yakınsama oranını oldukça artırmıştır.

Hofmeister ve diğerleri çalışmasında SS316 çeliğini LENS yöntemi ile ürettikleri parçaları yüksek hızlı kamera teknikleri ile görüntülemiş ve termal dağılımları incelemiştir [70].

Wang ve diğerleri ise bu deneysel çalışmadan elde edilen grafiği kullanarak, benzer özelliklere sahip SS410 için LENS yönteminde ait termal modellerini doğrulamış ve simülasyonları gerçekleştirmiştir [22]. Simülasyonlar sırasında üst üste yığılan 10 katman kullanmış fakat termal analiz sadece en üst katman için uygulanmıştır (Şekil 7.8). Doğruladığı modeli ile çalışmasında ergiyik havuzunu incelemek için kullanmıştır. Şekil 7.9’ da verilen grafikte elde edilen doğrulanmış simülasyon sonuçları gösterilmektedir.

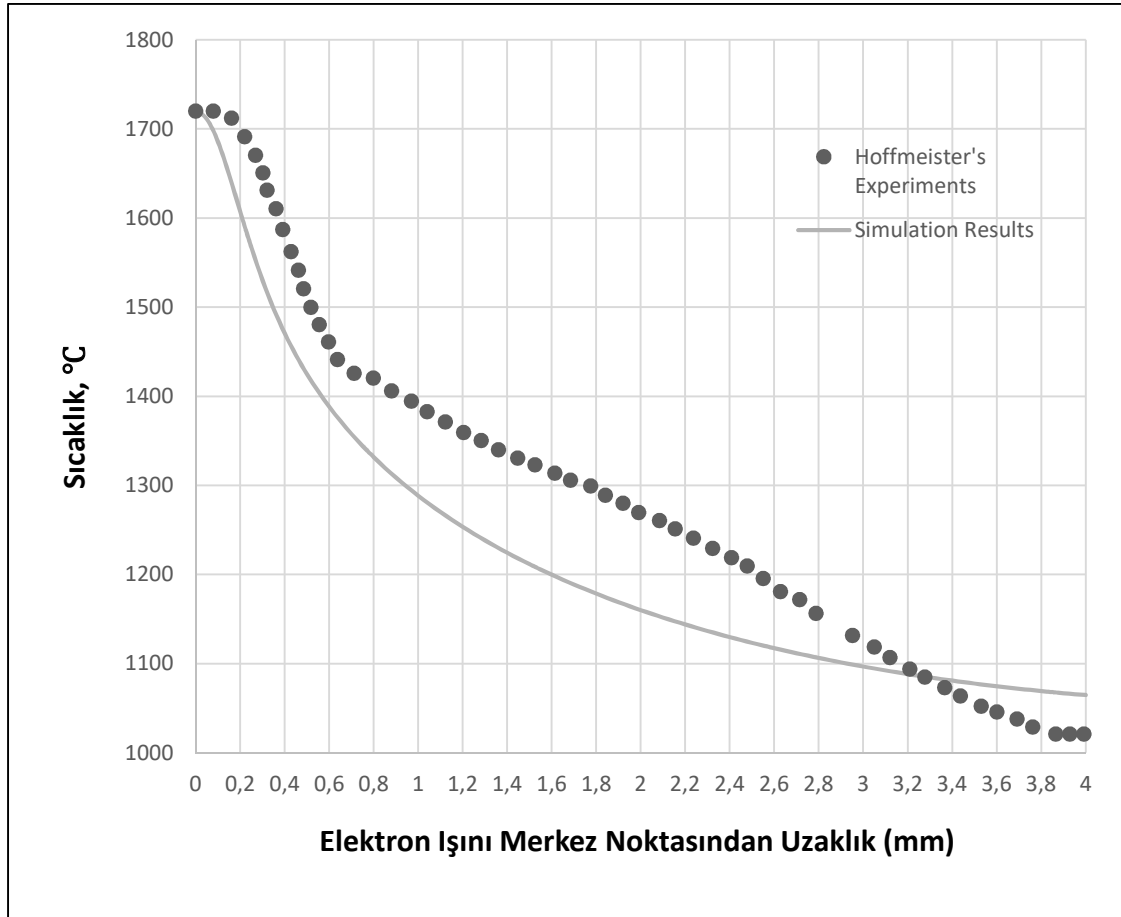


Şekil 7.8. Doğrulama için kullanılan modele ait katman ve ergiyik havuz yandan görünüşü



Şekil 7.9. Doğrulama çalışmasından elde edilmiş olan deneysel-simülasyon verileri grafiği

Tez çalışmasında oluşturulan modelde, Hofmeister ve diğerleri deneysel çalışmasından elde ettikleri ve Wang ve diğerleri çalışmasında belirtilen termal grafiği kullanılarak doğrulamak amacı ile malzeme özellikleri ve sistem parametreleri modele uygulanmıştır [22, 70]. Çalışma sonucunda Şekil 7.10' da verilen grafik kabul edilebilir bir hata payı ile elde edilmiştir.



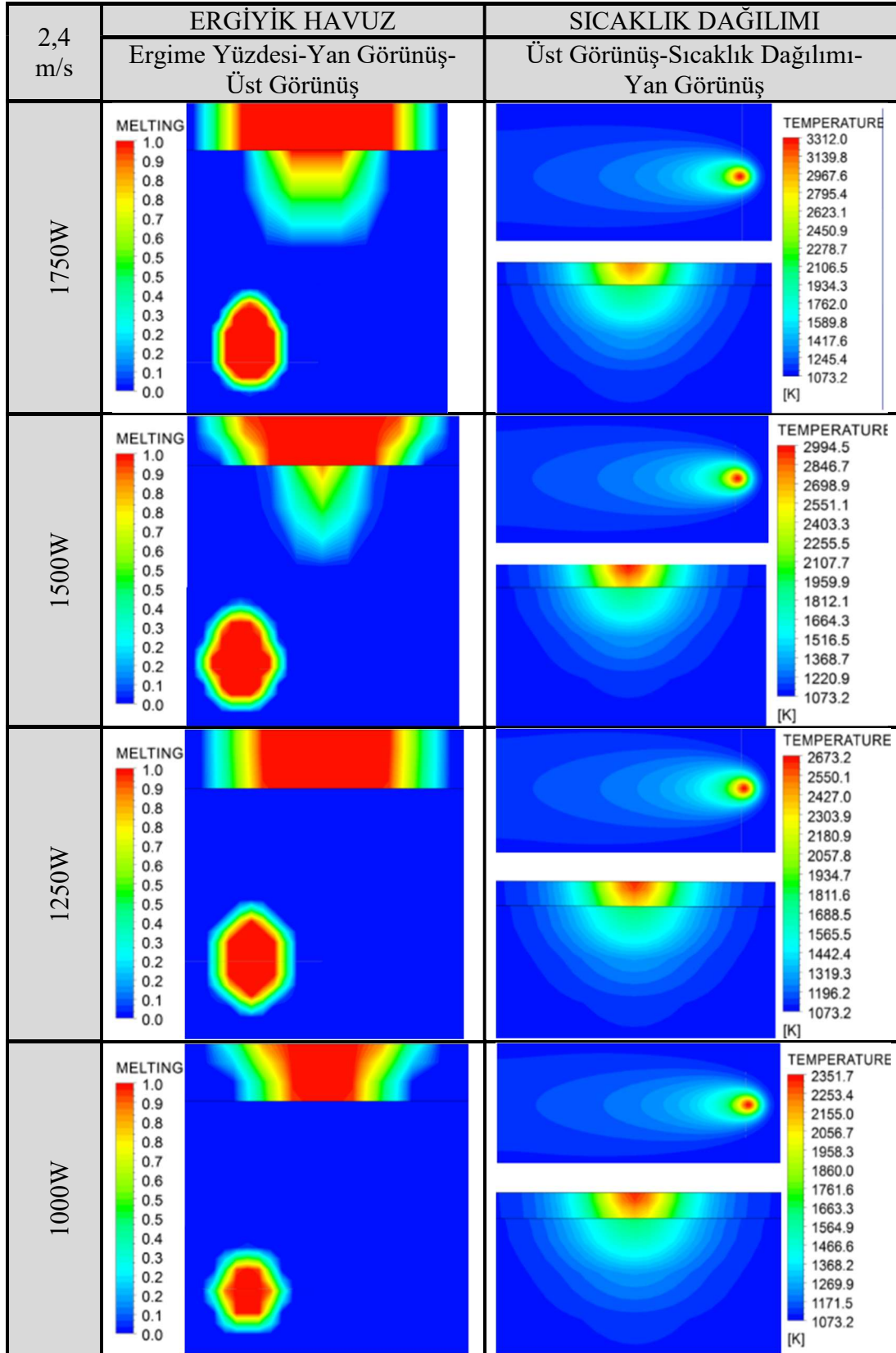
Şekil 7.10. Tez çalışmasını deneysel veriler ile doğrulama grafiği

8. SİMÜLASYON SONUÇLARI

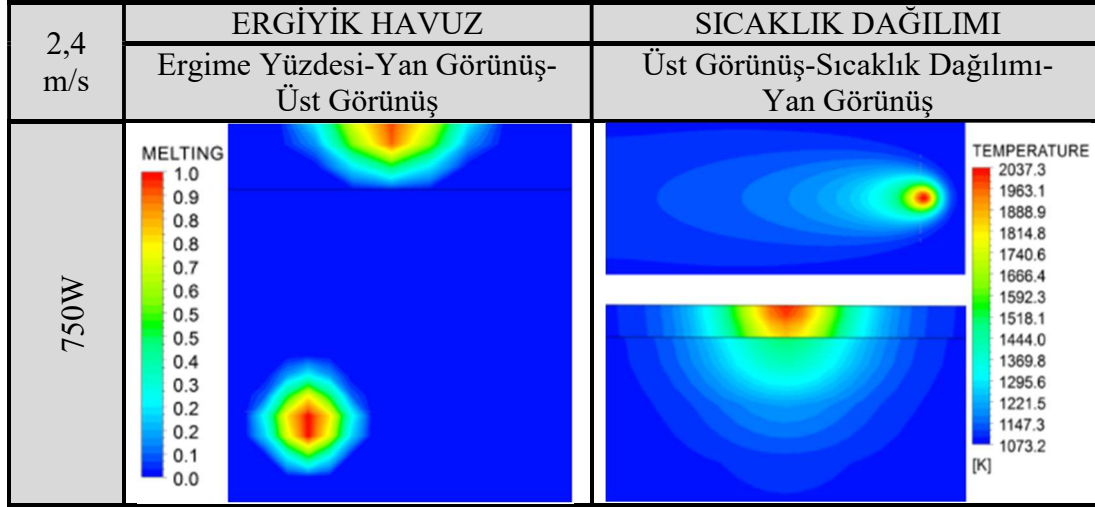
8.1. Işın Gücü Parametresinin Etkileri

Ergiyik havuzunun ve sıcaklık dağılım profilinin yan kesit ve üstten görünüşleri, artan güç değerleri ve sabit tarama hızında ergimeye ve sıcaklık dağılımına etkileri görülmektedir. Çizelge 8.1’de, sabit 2,4 m/s tarama hızına ve değişken elektron ışın gücü değerlerine sahip simülasyon sonuçlarının kıyaslaması verilmiştir. Elektron ışın gücü artırıldığında toz katmanı üzerine nüfuz eden enerji yoğunluğunun artmasıyla ergiyik havuzunda oluşan maksimum sıcaklık değerinin arttığı görülmektedir. Güç ile sıcaklık değeri doğru orantılı şekilde değişmektedir. Sıcaklığın ve enerji yoğunluğunun artmasıyla ergiyik havuz genişliği ve derinliğinin arttığı görülmektedir. Güç değeri azaldıkça ergiyik havuz derinliğinin toz katmanı kalınlığına ulaşamadığı, böylelikle 2,4 m/s tarama hızında 750 W kombinasyonunun yeterli ergitmeyi sağlayamadığı anlaşılmıştır. Işın tarama hızının 2,4 m/s olduğu durumda, güç değerinin 1500W seviyesinin üzerine çıkılması ile ergiyik havuz derinliğinin katman kalınlığını geçmeye başladığı, 1750 W değerinin alt katmanı da ergitmeye başladığı görülmektedir. (Çizelge 8.1). Ergiyik havuz derinliği alt katmana ulaştığında, ısı kaynağı tarafından toz katmanına verilen enerji yoğunluğu tozun veya üretim tablasının içine doğru iletmeye eğilimli hale gelir. Bunun sonucunda ergiyik havuz genişliğinde meydana gelen artış oranı azalır. 2,4 m/s hız örneğinde bu durum açıkça görülmektedir [71]. Bu parametre kombinasyonu, tarama hızı sabit tutulduğunda ışın izi olarak görülebilen sıcaklık gradyan profillerinde önemli bir değişim olmadığını, yalnızca maksimum sıcaklık seviyesinin güç ile beraber değiştiğini göstermiştir. Tarama hızının değişmemesinin, katman üzerine uygulanan enerji yoğunluğunun süresini sabit tutmakta olduğu, bunun da sıcaklık dağılımı profilinde benzer gradyanlara sahip katmanlar oluşturduğu şeklinde yorumlanmaktadır. Elektron ışınının aynı hız değerinde tarama yapması, tarama başlangıç ve bitiş noktasındaki ışın izinin değişik güç değerlerinde de benzer olmasını sağlamaktadır. Işın izinin oluşturduğu gradyanların enine genişliğinin tarama stratejisinde iki paralel ışın tarama doğrultusu arasındaki mesafe olarak bilinen “hatch distance” üzerinde etkisi bulunmaktadır. Üst üste örtüşen yüksek enerjili alanların malzemede biriken artık gerilmeyi ve mikro yapıyı etkileyeceği öngörülmektedir.

Çizelge 8.1. Tarama hızı 2,4 m/s için simülasyon sonuçlarının kıyaslanması



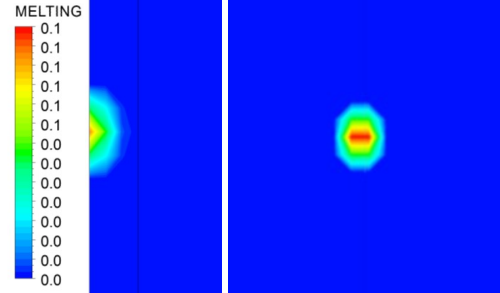
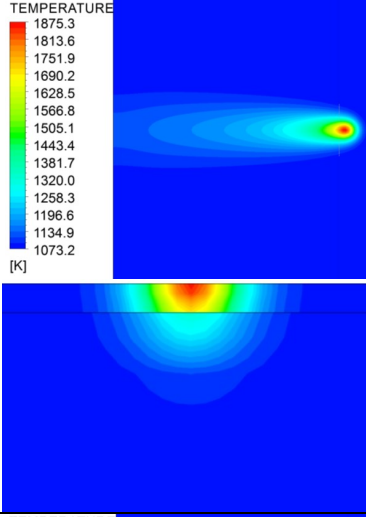
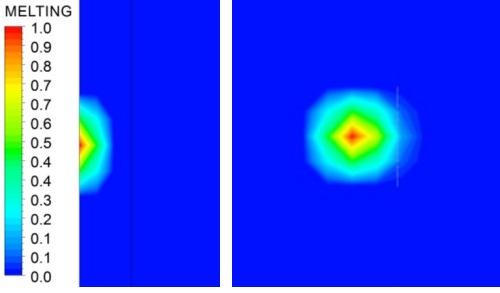
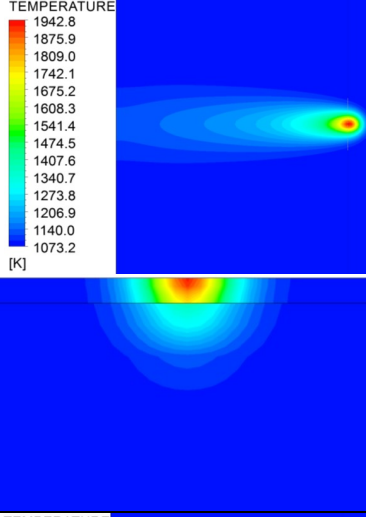
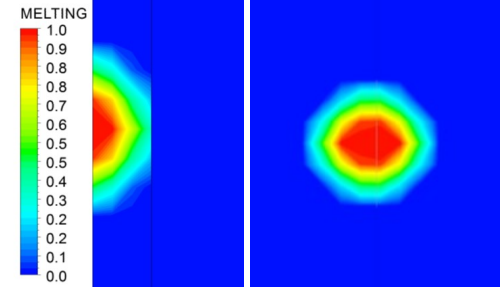
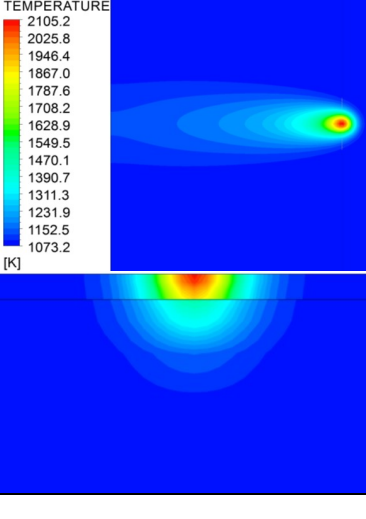
Çizelge 8.1. (devam) Tarama hızı 2,4 m/s için simülasyon sonuçlarının kıyaslanması



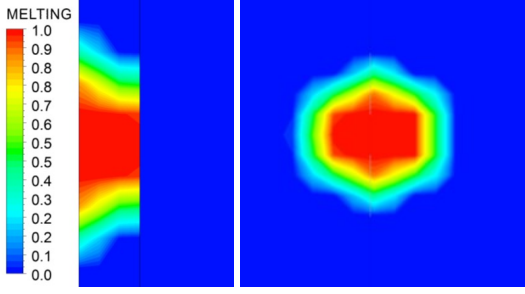
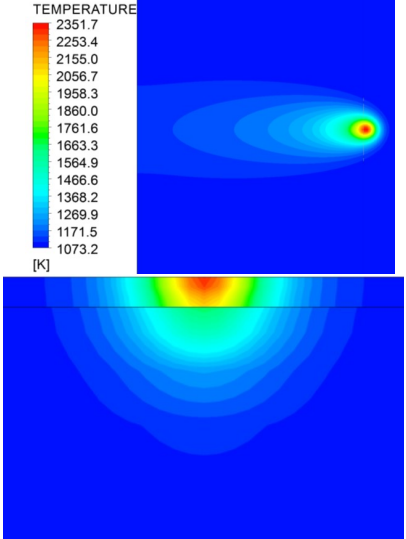
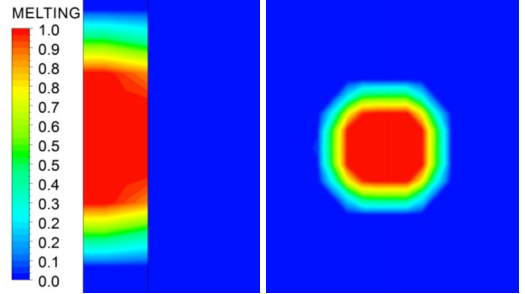
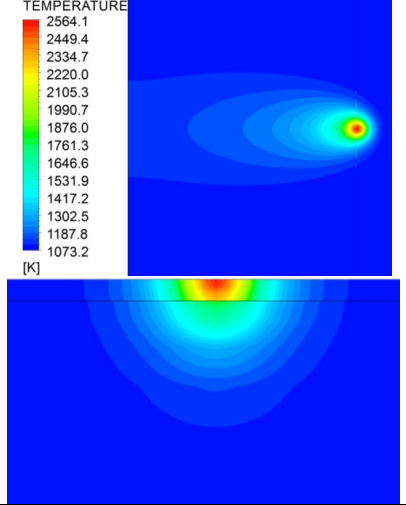
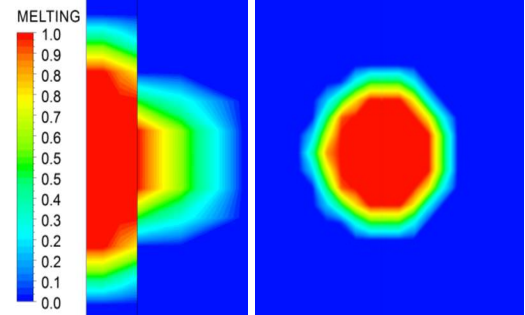
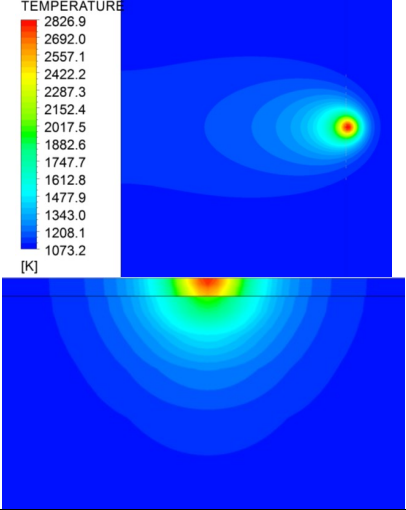
8.2. Tarama Hızı Parametresinin Etkileri

Çizelge 8.2’de 1000 W elektron ışın gücü sabit tutularak uygulanan tarama hızı değerleri sonucunda elde edilen ergiyik havuz boyutları ve sıcaklık dağılımları gösterilmiştir. Tarama hızının değişmesi, katman üzerine uygulanan enerjinin temas süresini etkilemektedir. Bu sebeple elektron ışını yavaşladığında, 1000 W değerindeki ısı kaynağı, toz katmanına daha uzun süre nüfuz etmekte, elektron ışını hızlandığında ısı kaynağı toz malzemeyi ertitmeye zaman bulamadan taramayı tamamlamakta olduğu çizelgedeki simülasyon sonuçlarından anlaşılmaktadır. 1000 W güç değerinde 0,8 m/s ve daha düşük tarama hızlarında ergiyik havuz derinliğinin katman kalınlığını aşarak, alt katmanı ertitmeye başladığı görülmektedir. Yine 1000 W tarama hızında 4 m/s ve daha yüksek tarama hızlarında toz katmanının kısmi ertimeye maruz kaldığı görülmektedir. Tarama hızının ergiyik havuz boyutları üzerinde etkisi oldukça yüksektir. Diğer taraftan tarama hızı, maksimum sıcaklık seviyesini ve sıcaklık dağılımını da etkilemektedir. Tarama hızı arttıkça ışın ilerleme hattı boyunca sıcaklık düşmekte, gradyan profilleri genişleyerek ışının ilerleme başlangıç ile bitiş noktası arasındaki sıcaklık farkı da azalmaktadır. Tarama hızı azaldığında ise sıcaklık artmakta çünkü elektron ışınının bir bölgeye olan temas süresi artmaktadır. Dolayısıyla ışın ilerlemesi başlangıç ve bitiş noktası arasındaki sıcaklık farkı artmaktadır. Tarama hızının azalmasıyla toz parçacıkları arasındaki ısı iletimi süresinin artması ile toz katmanının ve alt katmanların sıcaklık seviyelerindeki artış da çizelgede gösterilen gradyan profilleri ile anlaşılmaktadır.

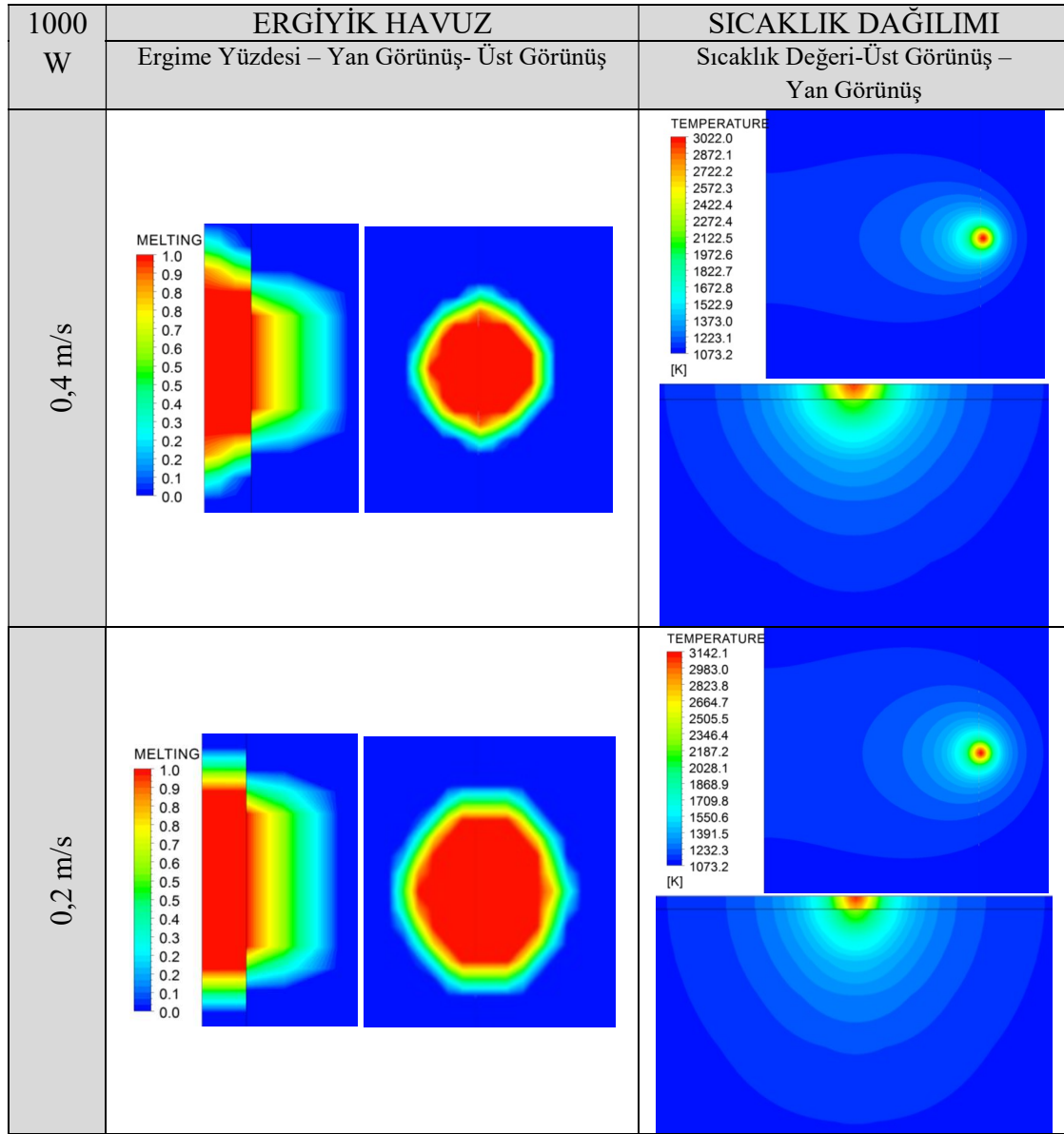
Çizelge 8.2. Elektron ışın gücü 1000 W için simülasyon sonuçlarının kıyaslanması

1000 W	ERGİYİK HAVUZ	SICAKLIK DAĞILIMI
	Ergime Yüzdesi – Yan Görünüş- Üst Görünüş	Sıcaklık Değeri-Üst Görünüş – Yan Görünüş
6,4 m/s		
5,6 m/s		
4 m/s		

Çizelge 8.2. (devam) Elektron ışıın gücü 1000 W için simülasyon sonuçlarının kıyaslanması

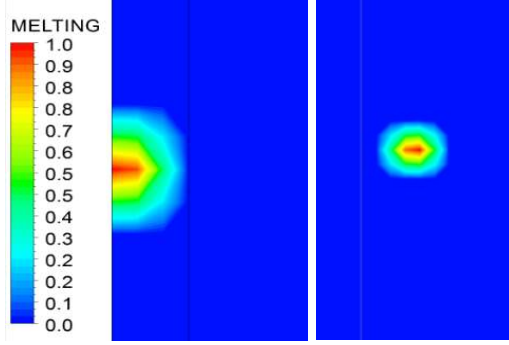
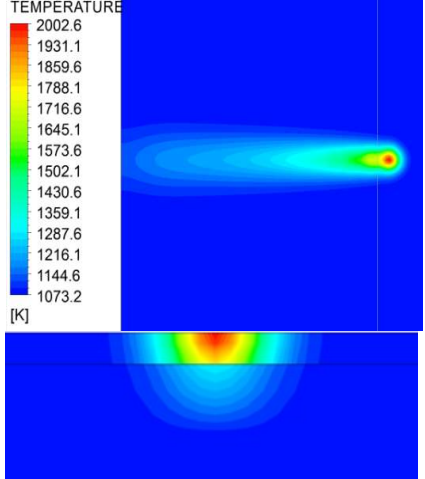
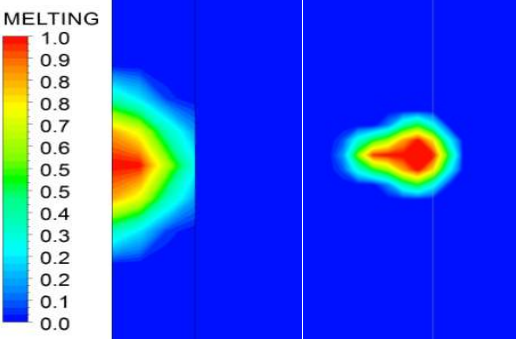
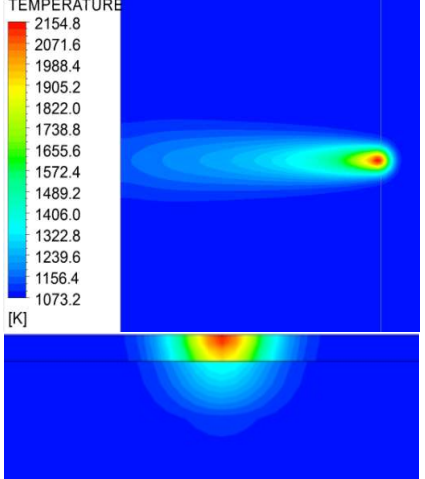
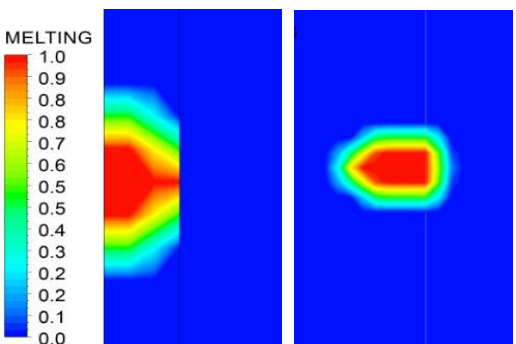
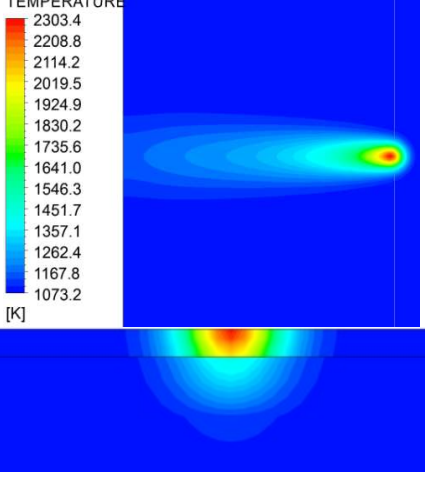
1000 W	ERGİYİK HAVUZ	SICAKLIK DAĞILIMI
	Ergime Yüzdesi – Yan Görünüş- Üst Görünüş	Sıcaklık Değeri-Üst Görünüş – Yan Görünüş
2,4m/s		
1,6 m/s		
0,8m/s		

Çizelge 8.2. (devam) Elektron ışıın gücü 1000 W için simülasyon sonuçlarının kıyaslanması

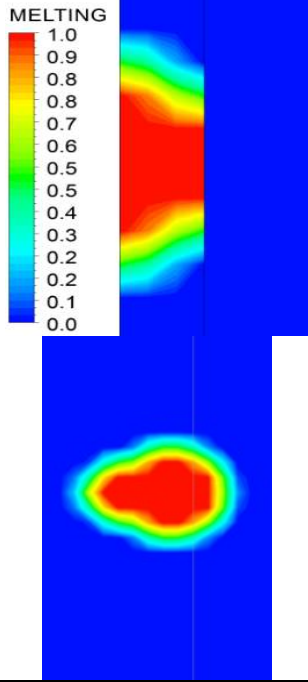
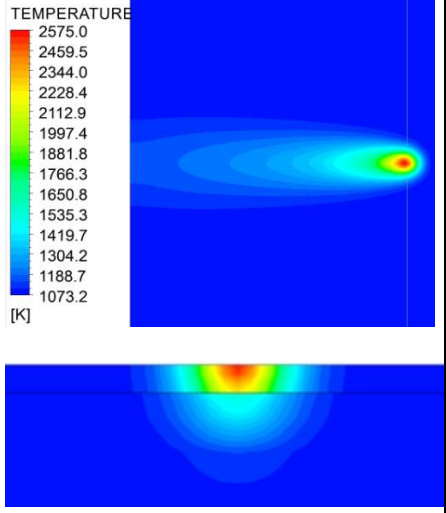
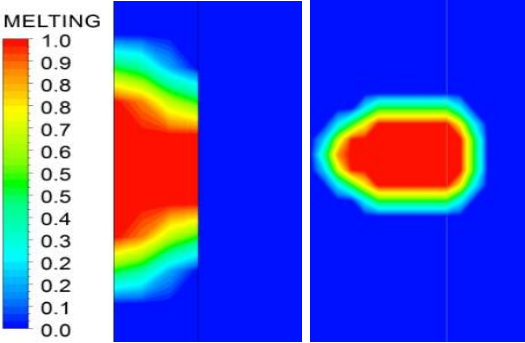
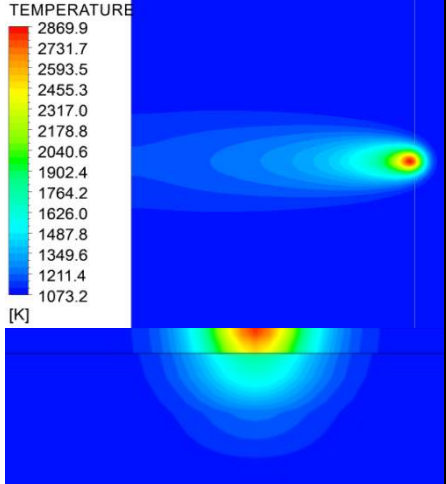


Çizelge 8.3'te 1750 W sabit elektron ışıın gücüne sahip parametre kombinasyonunda hız parametrelerinin değışimi ile ergiyik havuzunda ve sıcaklık dağılımında meydana gelen etkiler gösterilmektedir. Çizelgeden de anlaşılacağı gibi, yüksek güç ve yavaş ışıın ilerleme hızlarında meydana gelen maksimum sıcaklığın buharlaşma sıcaklığını ($T_e=3042\text{ }^{\circ}\text{C}$) aştığı görülmektedir [72]. Pratikte uygulama açısından, 1750 W güç değeri için 2,4 m/s tarama hızından daha yavaş hızlar, yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle buharlaşmaya sebebiyet vermekte olduğundan ergitme için uygun bulunmadığı değerlendirilmektedir.

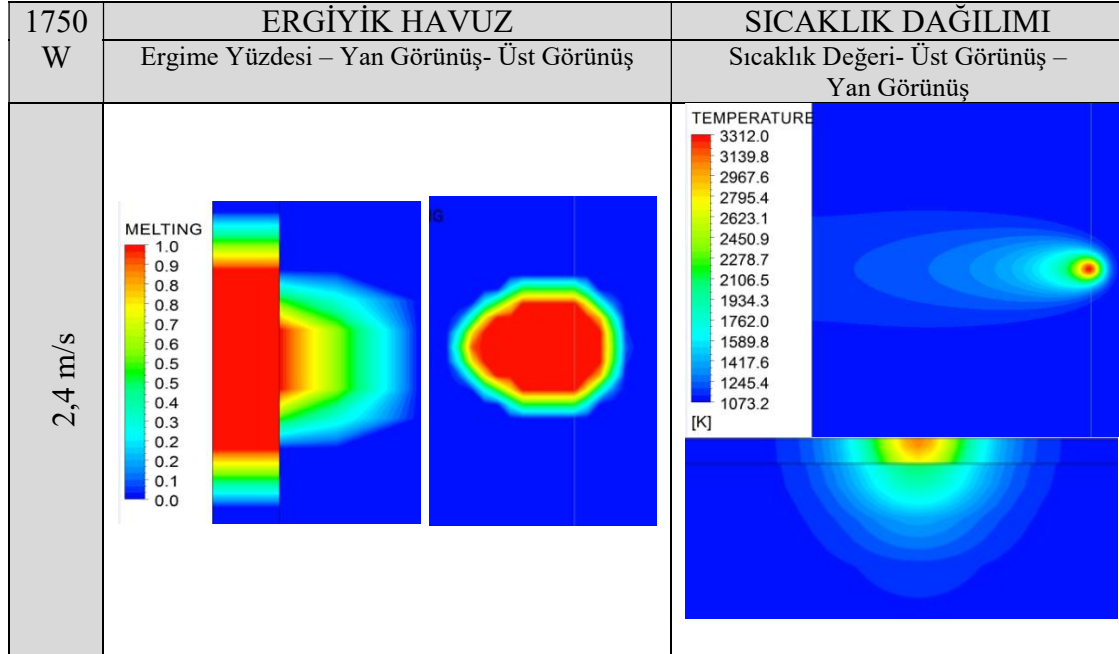
Çizelge 8.3. Elektron ışın gücü 1750 W için simülasyon sonuçlarının kıyaslanması

1750 W	ERGİYİK HAVUZ	SICAKLIK DAĞILIMI
	Ergime Yüzdesi – Yan Görünüş- Üst Görünüş	Sıcaklık Değeri- Üst Görünüş – Yan Görünüş
14 m/s		
10 m/s		
8 m/s		

Çizelge 8.3. (devam) Elektron ışıın gücü 1750 W için simülasyon sonuçlarının kıyaslanması

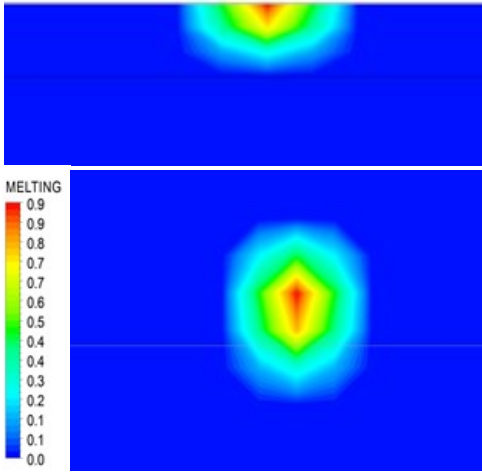
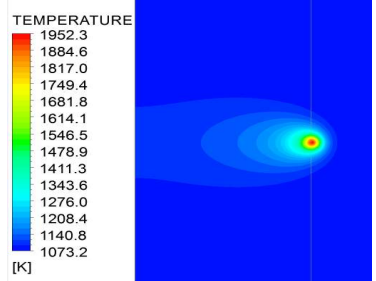
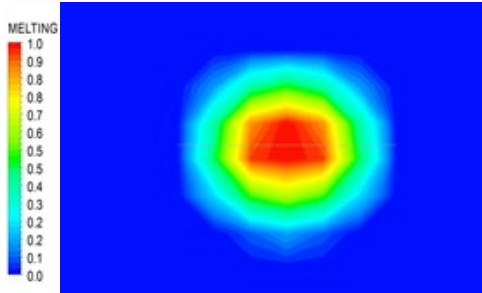
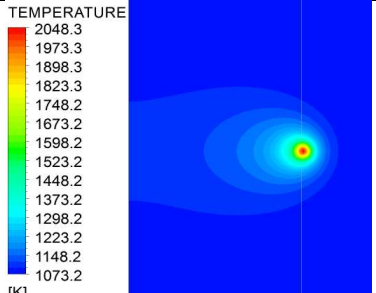
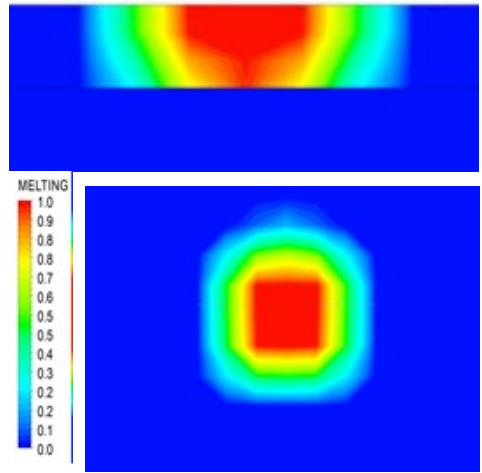
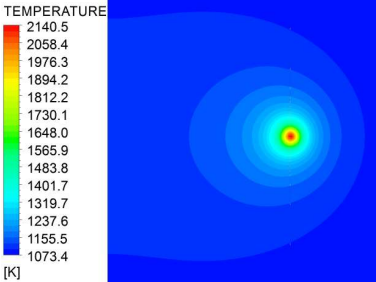
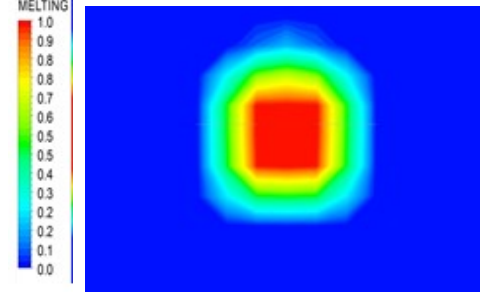
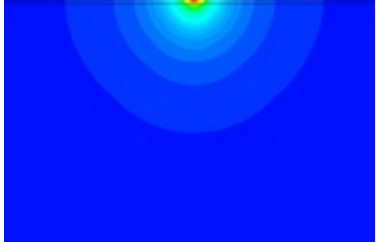
1750 W	ERGİYİK HAVUZ	SICAKLIK DAĞILIMI
	Ergime Yüzdesi – Yan Görünüş- Üst Görünüş	Sıcaklık Değeri- Üst Görünüş – Yan Görünüş
5,6 m/s		
		

Çizelge 8.3. (devam) Elektron ışın gücü 1750 W için simülasyon sonuçlarının kıyaslanması

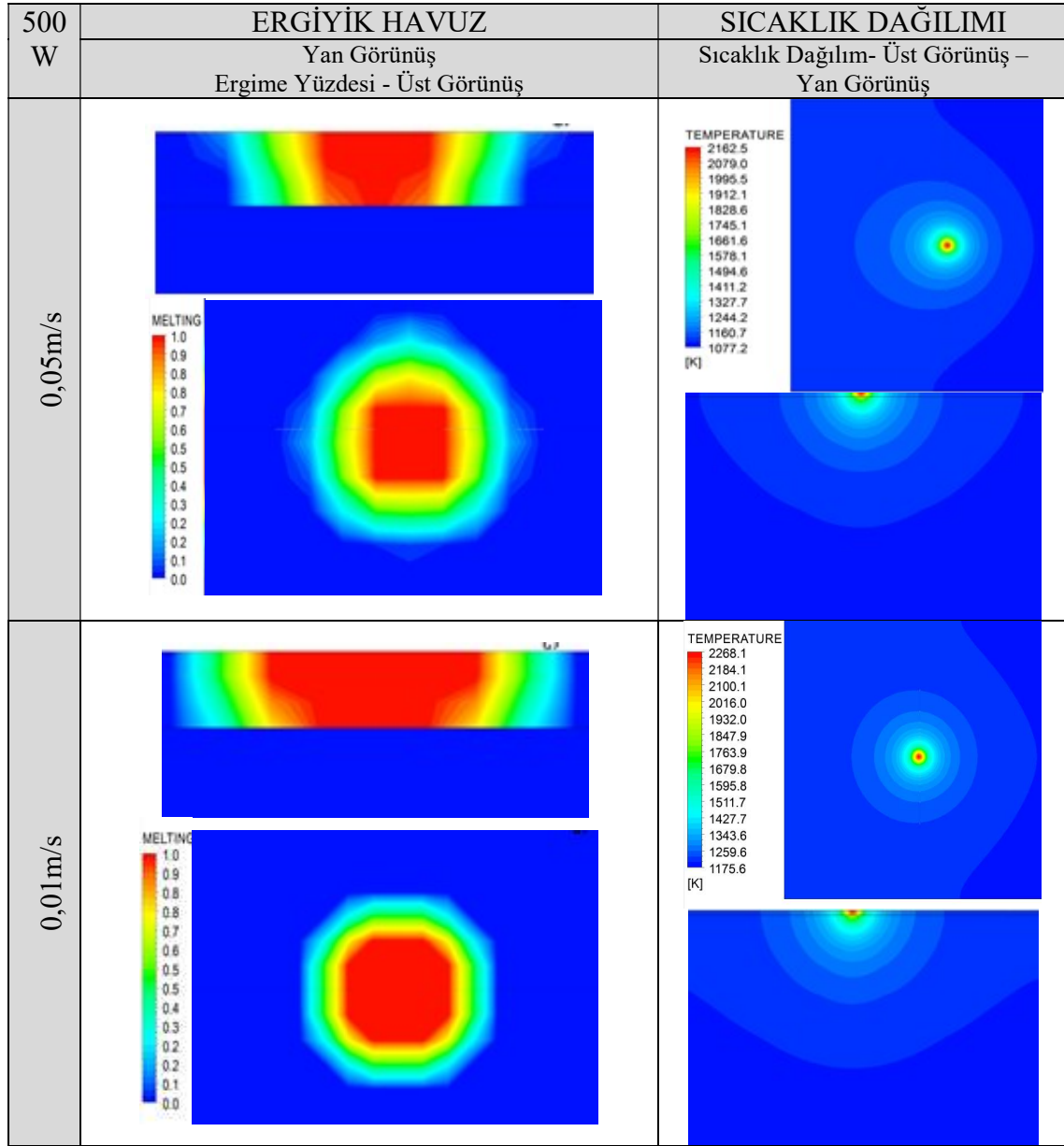


Çizelge 8.4'te 500 W sabit elektron ışın gücüne sahip parametre kombinasyonunda hız parametresinin etkileri görülmektedir. Tarama hızı 0,4 m/s seviyesinden 0,01 m/s seviyesine düşürülerek, ergiyik havuz ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkiler incelenmiştir. Tarama hızı azaldıkça ergiyik havuz boyutlarının, maksimum sıcaklığın arttığı ve sıcaklık dağılımı gradyan profillerinin genişlediği açıkça görülmektedir. Çizelge 8.4'te görüldüğü üzere 500 W gibi düşük ışın gücü ve tarama hızının 0,01 m/s değerine kadar düşürülse bile buharlaşma meydana gelmemektedir. Bu sebeple düşük güç seviyelerinin, ergiyik havuzda buharlaşma olmaması açısından güvenli olduğu söylenebilir. Ayrıca daha düşük hız seviyeleri, pratikte tezgah kullanımı sırasında mümkün olmamaktadır.

Çizelge 8.4. Elektron ışıın gücü 500 W için simülasyon sonuçlarının kıyaslanması

500 W	ERGİYİK HAVUZ	SICAKLIK DAĞILIMI
	Yan Görünüş Ergime Yüzdesi - Üst Görünüş	Sıcaklık Dağılımı- Üst Görünüş – Yan Görünüş
0,8 m/s		
		
0,4 m/s		
		

Çizelge 8.4. (devam) Elektron ışı ışın gücü 500 W için simülasyon sonuçlarının kıyaslanması



Çizelge 8.5'te parametre kombinasyonları ile gerçekleştirilen simülasyonlar sonucunda elde edilen ergiyik havuz boyutları verilmiştir. Tarama hızının azaltılması veya ışın gücünün artırılması ergiyik havuz boyutlarının büyümesine sebep olmaktadır. Ergiyik havuz derinliğinin toz katman kalınlığına ulaşmasının ardından alt katmanı ertitmeye başladığı ana kadar olan zamanda ergiyik havuz genişliğinin artış gösterdiği, ışının alt katmanı ertitmeye başladığında ergiyik havuz genişliğindeki artışın da azaldığı görülmektedir. 1250W güç seviyesine bakıldığında, 5,6 m/s ve 4 m/s tarama hızlarında ergiyik havuz derinliği henüz katman kalınlığını geçmediği görülmekte olup, genişlik artış miktarını %3,2 seviyesinde olduğu belirlenmektedir. 4m/s değerinden 0,8 m/s değerine

kadar yapılan simülasyonlarda ise toz katmanı kalınlığı kadar ergiyik havuzu derinliği olmakta ve genişlik artış oranı %48-51 seviyelerine ulaşmaktadır. Tarama hızının 0,8 m/s ve 0,4 m/s olduğu durumlarda ise ergiyik havuz derinliği toz katmanı altına ilerlemekte ve genişlik artış oranı yaklaşık %7 seviyesine düşmektedir. Bu durum Sadowski ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada enerji yoğunluğu girdisinin üretim tablasında iletim yolu ile yayılması şeklinde açıklanmaktadır [71].

Çizelge 8.5. Yapılan simülasyonlarda elde edilen ergiyik havuz boyutları değerleri

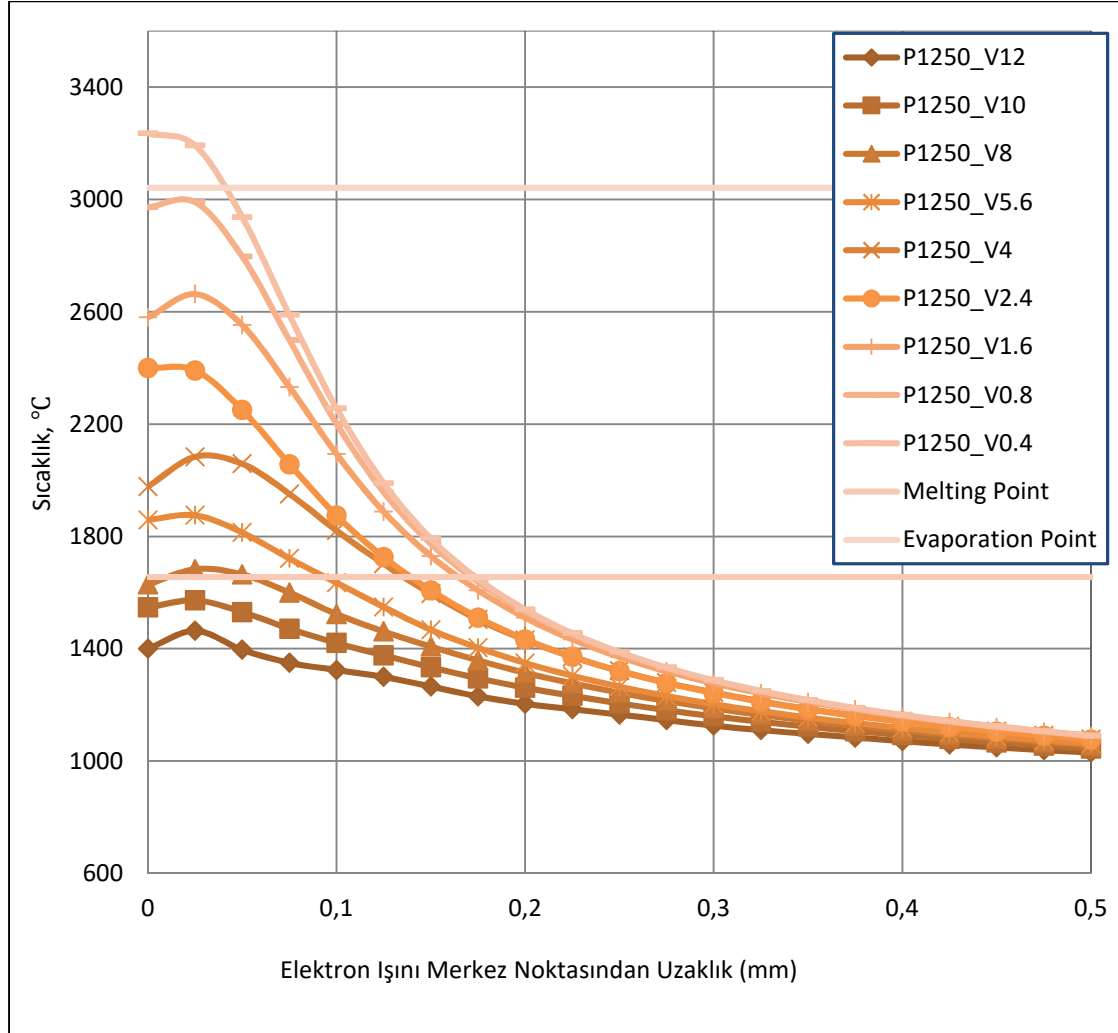
1750W			1500 W			1250 W		
Velocity (m/s)	Width (μm)	Depth (μm)	Velocity (m/s)	Width (μm)	Depth (μm)	Velocity (m/s)	Width (μm)	Depth (μm)
14	2.56	7.91	12	2.38	1.35	8	2.36	1.54
12	3.0	16.5	10	3.66	9.18	5.6	50.90	19.8
10	45.4	19.4	8	52.2	19.0	4	54.10	50.0
8	53.2	50.0	5.6	53.7	49.1	2.4	102.0	50.0
5.6	103.0	50.0	4	104.0	50.0	1.6	153.0	50.0
4	110.0	50.0	2.4	153.0	54.3	0.8	203.0	53.0
2.4	155.0	53.1	1.6	173.0	55.0	0.4	210.0	54.0
1000W			750W			500W		
Velocity (m/s)	Width (μm)	Depth (μm)	Velocity (m/s)	Width (μm)	Depth (μm)	Velocity (m/s)	Width (μm)	Depth (μm)
5.6	3.15	1.45	2.4	8.2	17.9	0.8	4.580	3.47
4	42.0	18.0	1.6	53.1	49.2	0.4	33.40	20.30
2.4	68.1	50.0	0.8	103.0	50.0	0.2	56.00	34.00
1.6	103.0	50.0	0.4	112.0	50.0	0.1	57.40	50.00
0.8	153.0	53.0	0.2	155.0	53.0	0.05	58.00	50.00
0.4	163.0	53.5	0.1	158.0	53.6	0.025	64.00	50.00
0.2	203.0	54.0	0.05	158.0	57.0	0.01	104.00	50.00
-	-	-	0.025	159.0	58.0	-	-	-
-	-	-	0.01	207.0	60.0			

8.3. Ergime ve Buharlaşma Sıcaklıkları

Tez çalışmasının amaçlarından birisi, belirlenen çeşitli parametreler için her bir kombinasyonda simülasyon gerçekleştirerek, ergime ve buharlaşma seviyelerine ulaşan değerler için optimum parametre aralığı belirlemektir. Çizelge 8.6' da verilen grafikte görüldüğü üzere, 1250 W güç seviyesine sahip elektron ışın demetinin, 8 m/s değerinde ergimeye başladığı, daha yüksek hız seviyelerinde ise toz katmanında ergime olmadığı anlaşılmaktadır. Aynı güç seviyesinde 0,8 m/s tarama hızında Ti-6Al-4V toz katmanında buharlaşma meydana geldiği ve daha düşük hızların kullanımının uygun olmadığı

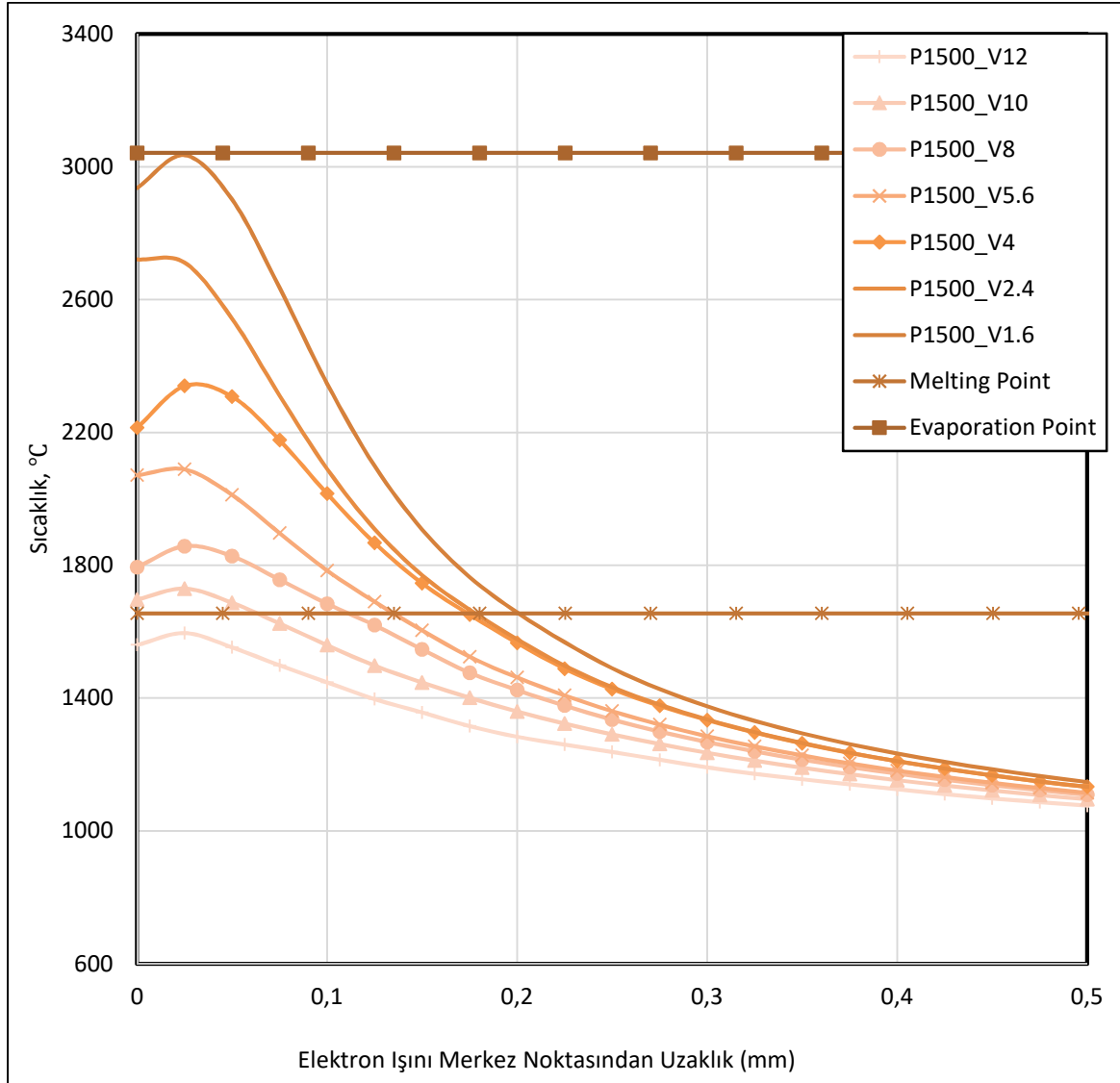
görülmektedir. Elde edilen bu grafik EBM yöntemi ile Ti-6Al-4V parça üretiminde seçilen elektron ışın gücü için optimum tarama hızlarını göstermektedir.

Çizelge 8.6. Tarama gücü 1250 W için sıcaklık dağılım grafiği



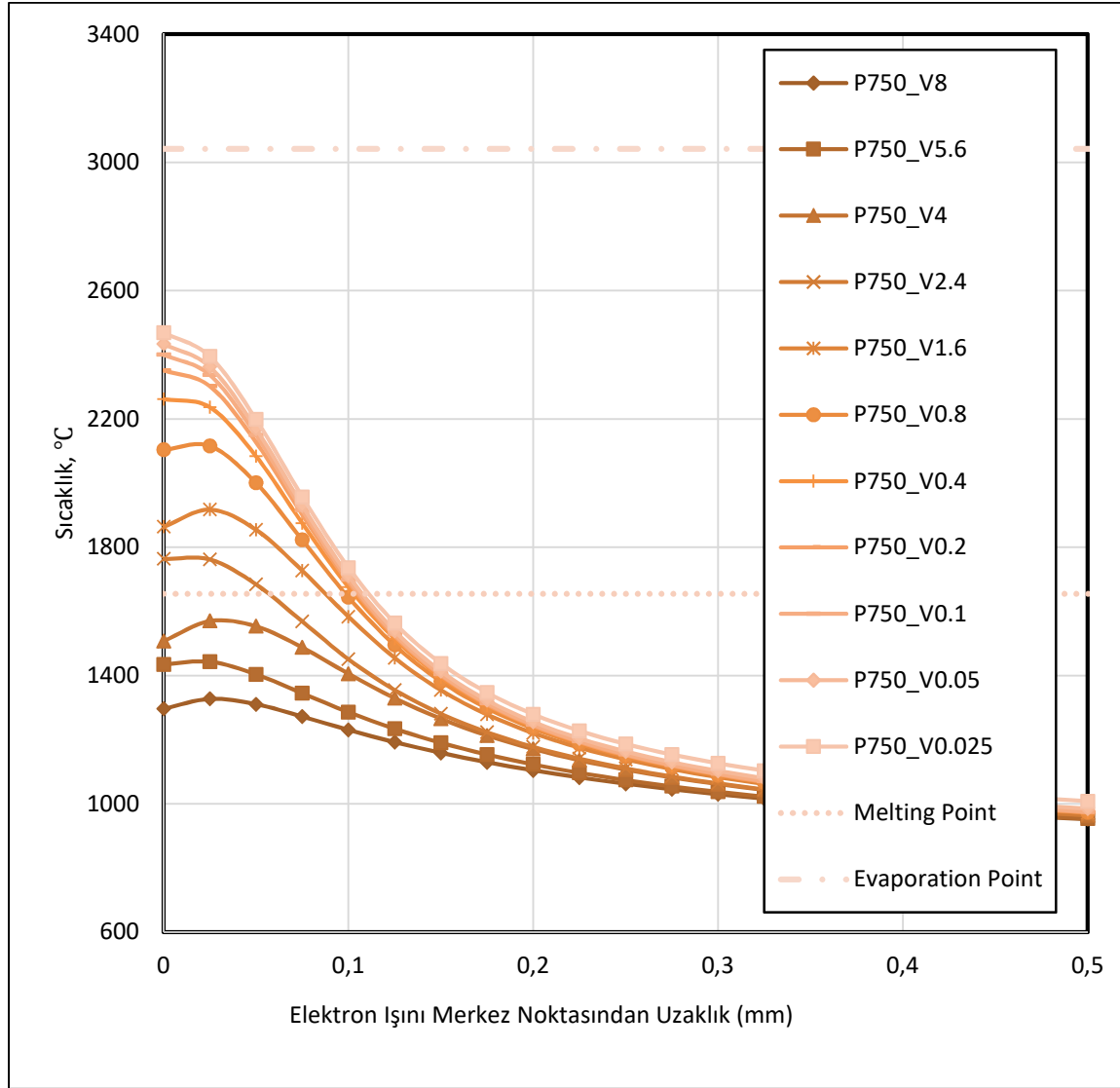
Çizelge 8.7' de verilen grafikte görüldüğü üzere, 1500 W güç seviyesine sahip elektron ışın demetinin, 10 m/s değerinde ergimeye başladığı, daha yüksek hız seviyelerinde ise toz katmanında ergime olmadığı anlaşılmaktadır. Aynı güç değerinde 1,6 m/s tarama hızından daha düşük seviyelerde Ti-6Al-4V toz katmanında buharlaşma meydana geldiği ve daha düşük hızların kullanımının uygun olmadığı görülmektedir. Elde edilen bu grafik EBM yöntemi ile Ti-6Al-4V parça üretiminde seçilen elektron ışın gücü için optimum tarama hız aralığını göstermektedir.

Çizelge 8.7. Tarama gücü 1500 W için sıcaklık dağılım grafiği



Çizelge 8.8' de verilen grafikte görüldüğü üzere, 750 W güç seviyesine sahip elektron ışın demeti için, 4 m/s hız seviyesinde bile toz katmanında ergimenin başlamadığı görülmektedir. Daha düşük hızlarda başlayan ergime durumu için, 0,05 m/s değerlerine kadar simülasyon yapıldığı fakat toz katmanında buharlaşma seviyesine ulaşamadığı görülmektedir. Simülasyonu gerçekleştirilen 0,05 m/s hız değerinden daha düşük hızların kullanımının pratikte zaten uygun olmadığı bilinmekte olup bu durum 750 W gibi düşük güç seviyelerinin toz katmanının buharlaşması açısından güvenli değerler olduğunu göstermektedir. Elde edilen bu grafik EBM yöntemi ile Ti-6Al-4V parça üretiminde seçilen elektron ışın güç değeri için optimum tarama hız aralığını göstermektedir.

Çizelge 8.8. Tarama gücü 750 W için sıcaklık dağılım grafiği



1250 W - 1500 W gibi güç değerlerinde (Çizelge 8.6-8.7) uygulanan tarama hızlarının maksimum sıcaklığa olan etkisi benzer oranlarda olmasına rağmen Çizelge 8.8’ de görüldüğü üzere 750 W gibi düşük güç seviyesinde tarama hızının azaltılması ile sıcaklığa olan etki azalmaktadır. Düşük güç seviyelerinde buharlaşma sıcaklığına ulaşmanın zorluğundan bahsedildiği üzere çizelgede de bu durum görülmektedir. Tarama hızının düşürülmesi ile belli bir noktadan sonra sıcaklıkta meydana gelen artış oldukça küçük olmaktadır.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında EBM sistemini ve Ti-6Al-4V toz katmanı ile elektron ışını etkileşimi daha iyi anlayabilmek amacı ile termal model geliştirilmiş ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak analizleri yapılmıştır.

Ergiyik havuzu şekil ve boyutlarını, sıcaklık dağılımını incelemek için üç boyutlu bir model geliştirilmiştir. Yapılan simülasyonlarda iki ana parametre belirlenmiştir. Tarama hızı ve elektron ışın gücü parametrelerinin kombinasyonlarının kullanılması sonucunda elde edilen verilen incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar sırasıyla;

- Belirlenen iki ana parametre, tarama hızı ve ışın gücü, ergiyik havuz geometrisi, boyutları ve sıcaklık dağılımı üzerinde büyük ölçüde etkilidir. Elde edilen simülasyon sonuçları açıkça göstermektedir ki, tarama hızının artırılması ile ergiyik havuzda ölçülen maksimum sıcaklık seviyesi düşmektedir. 1500 W güç seviyesinde 12 m/s tarama hızı kullanıldığında 1647,4 °C (Çizelge 8.7) sıcaklık seviyesine ulaşılmış ve ergiyik havuz oluşmadığı görülmüştür. Fakat, tarama hızının 10 m/s değerine düşürülmesi ile sıcaklık 1729,9 °C (Çizelge 8.7) değerine ulaşmış ve toz katmanında tamamen ergime başlamıştır. Bu durumda tarama hızının sıcaklık seviyesini yüksek oranda etkilediği görülmüştür. Diğer taraftan tarama hızının daha da düşürülmesi sonucunda toz katmanında buharlaşma görülmeye başlamıştır. Tarama hızı parametresi elektron ışını ile toz katmanı arasındaki etkileşim süresini doğrudan etkilemektedir. Sabit güç seviyesinde tarama hızı azaltıldığında, etkileşim süresi artmakta, bu durum da ergiyik havuzun derinliği ve genişliğinin artmasına sebep olmaktadır.
- Tarama hızının değiştirilmesi sabit güç seviyesinde, toz katmanında sıcaklık dağılımını büyük ölçüde etkilemektedir. Hız değeri artırıldığında, taramanın başlangıç noktası ile bitiş noktasındaki sıcaklık farkının azaldığı görülmüştür. Daha düşük tarama hızlarında elektron ışınının birim alana uyguladığı etkileşim süresinin artması sebebi ile sıcaklık seviyesi yükselmekte ve ergime alt katmanlara ulaşmaktadır. Fakat ışın gücü parametresinin sabit tarama hızlarında, sıcaklık dağılımını değiştirmediği, tarama başlangıç ve bitiş noktasındaki sıcaklık farkının değişik güç seviyelerinde benzer kaldığı görülmüştür.

- Benzer şekilde elektron ışın gücü parametresinin ergiyik havuz içerisinde ölçülen maksimum sıcaklığın, ergiyik havuz boyutlarını büyük ölçüde etkilediği görülmüştür. Güç değeri artırıldığında toz katmanına nüfuz eden enerji yoğunluğunun arttığı, bu sebeple maksimum sıcaklığın yükseldiği görülmektedir. Işın gücünü devamlı artırmanın toz katmanını buharlaşma seviyesine getirdiği de yapılan simülasyonlar sonucunda anlaşılmıştır. Aynı zamanda ergiyik havuz geometrisi ve boyutlarının değişken parametreden etkilendiği görülmüş, güç seviyesinin azaltılması ile ergiyik havuz genişliği ve derinliğinin küçüldüğü belirlenmiştir. Elektron ışın gücü azaltıldıkça, belirli bir seviyeden sonra ergime olmadığı, ergiyik havuz derinliğinin katman kalınlığına ulaşamadığı görülmüştür.
- 750 W gibi düşük ışın gücü değerleri için, ergime seviyesine ulaşabilecek hız değerleri oldukça düşüktür. Yapılan simülasyon sonucunda 750 W değeri için 2,4 m/s tarama hızında ergime sıcaklığında ulaşılabilirdiği görülmüştür (Çizelge 8.8). 750 W güç değerinde 0,01 m/s tarama hızı için gerçekleştirilen simülasyonda bile buharlaşma seviyesine gelinemediği gözlemlenmiş olup, bu durum düşük güç seviyelerinin buharlaşma sıcaklığına ulaşmasının oldukça zor olduğunu göstermiştir. Deneysel EBM prosedürü için 0,01 m/s'den daha düşük hız mümkün görünmemektedir.
- Parametre kombinasyonları sonucunda gerçekleştirilen simülasyonlarda, ergiyik havuz boyutlarının ölçülen en büyük derinliği ve genişliği Çizelge 8.4' te verilmiştir. Enerji yoğunluğu, her koşul için elektron ışını gücünün (W) tarama hızına (m/s) oranı olarak hesaplandığında en yüksek yoğunluk seviyesi, 750 W ve 0,01 m/s parametrelerinde elde edilmektedir. Çizelge 8.5' te verilen değerlerden yola çıkarak genel bir yaklaşım yapıldığında, enerji yoğunluğunun ergiyik havuzu derinliğinin artmasını doğrudan etkilerken, havuzun genişliğini dolaylı olarak etkilediği söylenebilmektedir. Elde edilen bu sonuç yüzey alanlarına temas eden ergimiş metal tozları arasında düşük ısı transferi olması gerekçesi ile açıklanabilmektedir.

9.1. Öneriler

Bu çalışmadan sonra yapılması önerilen çalışmalar:

- Tez çalışmasında kullanılan termal modelin, deneysel olarak EBM sistemi ve Ti-6Al-4V tozlarından parça üretimi sırasında görüntüleme sistemi kullanımı ile doğrulanması,

- Çalışmanın termal modelleme ile sınırlı kalmaması için geliştirilen modelin mekanik analizler için geliştirilmesi ve deneysel çıktılarına mekanik testler uygulanarak verilerin kıyaslanması,
- Çalışmada kullanılan Ti-6Al-4V malzemenin yerine, daha az çalışılmış olan ve EBM cihazında kullanılabilen toz malzemeler üzerinde simülasyonların gerçekleştirilmesi,
- Çalışmada tek katman ve doğrusal tarama ile sistem modellenmiş olup, çok katman kullanımının denenmesi, aynı zamanda paralel tarama çizgilerinin birbiri ile etkileşimi sonucunda meydana gelen sıcaklık dağılımının incelenmesi tarama şeklinin değiştirilmesinin analizler üzerindeki etkisinin incelenmesi,
- Çalışmada özellikle toz katmanında ağ yapının oluşturulması sırasında farklı metodolojiler kullanılarak analize olan etkilerinin incelenmesi veya analizin yapıldığı alanda kullanılan ağ element boyutları ve sayısı için yapılan değişikliklerin analize olan etkilerinin incelenmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Peters, M., ve Leyens, C. (Editörler). (2003). *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. Darmstadt: Wiley Online Books, 1-36.
2. Boyer R., Collings E.W. ve Welsch G. (Editörler). (1994). *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*. Amerika: ASM International, 287-291.
3. Trtica, M., Radak, B., Gakovic, B., Milovanovic, D., Batani, D., ve Desai, T. (2009). Surface modifications of Ti6Al4V by a picosecond Nd:YAG laser. *Laser and Particle Beams*, 27(1), 85-90.
4. Çakır C. ve Ensarioğlu M. C. (2005). Titanyum ve Alaşımlarının İşlenebilirlik Etüdü. *Mühendis ve Makine*, 46 (546), 36-46.
5. Sing S. L., An J., Yeong W. Y. ve Wiria F. E. (2016). Laser and Electron-Beam Powder-Bed Additive Manufacturing of Metallic Implants: A Review on Processes, Materials and Designs, *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society*, 34(3), 369-385.
6. Bremen S., Meiners W. ve Diatlov A. (2012). Selective laser melting, a manufacturing technology for the future, *Laser Technik Journal*, 9(2), 33-38.
7. Gibson, I., Rosen, D. ve Stucker, B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies – Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing* (Birinci baskı). Boston, MA: Springer, 36-159.
8. Levy G. N., Schindel R. ve Kruth J. P. (2003). Rapid Manufacturing and Rapid Tooling with Layer Manufacturing (LM) Technologies, State Of The Art And Future Perspectives. *CIRP Annals*, 52(2), 589-609.
9. Attar E. (2011). *Simulation of Selective Electron Beam Melting Processes*, Doktora tezi, Technischen Fakultät der Universität Erlangen, Nürnberg, 73-80.
10. Huang, S. H., Liu, P., Mokasdar A. ve Hou L. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 1191–1203.
11. Vayre B., Vignat F. ve Villeneuve F. (2012). Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. *Mechanics & Industry*, 13 (2) 89-96.
12. Zäh M. F. ve S. Lutzmann. (2010). Modelling and simulation of electron beam melting. *Production Engineering*, 4(1), 15–23.
13. Murr L.E., Esquivel E.V., Quinones S.A., Gaytan S.M., Lopez M.I., Martinez E.Y., Medina F., Hernandez D.H., Martinez E., Martinez J.L., Stafford S.W., Brown D.K., Hoppe T., Meyers W., Lindhe U. ve Wicker R.B. (2009). Microstructures and mechanical properties of electron beam-rapid manufactured Ti-6Al-4V biomedical prototypes compared to wrought Ti-6Al-4V. *Materials Characterization*, 60(2), 96–105.

14. Xibing G., Ted A. ve Kevin C. (2012). Review on Powder-Based Electron Beam Additive Manufacturing Technology. *ASME/ISCIE 2012 International Symposium on Flexible Automation*, 507-515.
15. Paul R. ve Gerner F. (2014). Effect of Thermal Deformation on Part Errors in Metal Powder Based Additive Manufacturing Processes. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(3), 1–12.
16. Sammons P. M., Bristow D. A., ve Landers R. G. (2013). Height Dependent Laser Metal Deposition Process Modeling. *The Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135, 1–7.
17. Gockel J., Beuth J. ve Taminger K. (2014). Integrated control of solidification microstructure and melt pool dimensions in electron beam wire feed additive manufacturing of Ti-6Al-4V. *Additive Manufacturing*, 1(4), 119-126.
18. Narra S. P. (2017). *Melt Pool Geometry and Microstructure Control Across Alloys in Metal Based Additive Manufacturing Processes*. Doktora Tezi, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 11-56.
19. Shen N. ve Chou K. (2012). Thermal Modeling of Electron Beam Additive Manufacturing Process: Powder Sintering Effects, *Proceedings of the ASME 2012 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, 287-295.
20. Körner C., Attar E., ve Heintl P. (2011). Mesoscopic simulation of selective beam melting processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 978–987.
21. Riedlbauer D., Scharowsky T., Singer R. F., Steinmann P., Körner C., ve Mergheim J. (2017). Macroscopic simulation and experimental measurement of melt pool characteristics in selective electron beam melting of Ti-6Al-4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, 1309–1317.
22. Wang L., Felicelli S., Gooroochurn Y., Wang P. T. ve Horstemeyer M. F. (2008). Optimization of the LENS® process for steady molten pool size. *Materials Science and Engineering: A*, 474(1–2), 148–156.
23. Li J. F., Li L., ve Stott F. H. (2004). A three-dimensional numerical model for a convection-diffusion phase change process during laser melting of ceramic materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(25), 5523–5539.
24. Rai R. (2009). Heat transfer and fluid flow during electron beam welding of 21Cr – 6Ni – 9Mn steel and Ti – 6Al – 4V alloy. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(2), 025503.
25. Rahman M. S., Schilling P. J. ve Herrington P. D., Chakravarty U. K. (2017). Thermal Analysis of Electron Beam Additive Manufacturing Using Ti-6Al-4V Powder-Bed. *Proceedings of the ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 1: Advances in Aerospace Technology*, V001T03A021, 1–13.

26. Jamshidinia M., Kong F. ve Kovacevic R. (2013). The Coupled CFD-FEM Model of Electron Beam Melting® (EBM). *ASME District F - Early Career Technical Conference, ECTC 2013 Conference Proceedings*, 12, 163-171.
27. Galati M., Iuliano L., Salmi A. ve Atzeni E. (2017). Modelling energy source and powder properties for the development of a thermal FE model of the EBM additive manufacturing process. *Additive Manufacturing*, 14, 49–59.
28. Qi, H. B., Yan, Y. N., Lin, F., He, W. ve Zhang R. J. (2006). Direct metal part forming of 316L stainless steel powder by electron beam selective melting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220(11):1845-1853.
29. Vastola G, Zhang G, Pei Q. X. ve Zhang Y. (2016). Controlling of residual stress in additive manufacturing of Ti-6Al-4V by finite element modeling. *Additive Manufacturing*, 12, 231–239.
30. Cheng, B., Price, S., Lydon, J., Cooper, K., ve Chou, K. (2014). On Process Temperature in Powder-Bed Electron Beam Additive Manufacturing: Model Development and Validation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(6), 061018.
31. Peters, M., ve Leyens, C. (Editörler). (2003). *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. Darmstadt: Wiley Online Books, 423-451.
32. Brooks C. (1982). *Heat treatment, structure, and properties of nonferrous alloys*. Ohio: American Society for Metals, 176-235.
33. Matthew J. D. (2000). *Titanium: a technical guide*. Ohio: American Society for Metals, 75-86.
34. Boyer R. R. (1996). An overview on the use of titanium in the aerospace industry. *Materials Science and Engineering: A*, 213:103–14
35. Hench L. L. ve Wilson J. (1984). Surface-active biomaterials. *Science*, 9;226(4675):630-6.
36. Prasad, K., Bazaka, O., Chua, M., Rochford, M., Fedrick, L., Spoor, J., Symes, R., Tieppo, M., Collins, C., Cao, A., Markwell, D., Ostrikov, K. K., ve Bazaka, K. (2017). Metallic Biomaterials: Current Challenges and Opportunities. *Materials*, 10(8), 884.
37. Bas F. E., Atiq M., Rehman U., Yıldırım Y., Avcu E., Üstel F. ve Boccaccin A. R. (2018). Electrophoretic co-deposition of PEEK-hydroxyapatite composite coatings for biomedical applications. *Colloids and Surfaces B : Biointerfaces*, 169, 176–82.
38. Veiga C, Davim J. P. ve Loureiro, A. (2012). Properties and applications of titanium alloys: A brief review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 32. 133-148.
39. Lütjering, G. ve Williams, J. C. (2007). *Engineering Materials and Process-Titanium*. Berlin: Springer. 53-173.

40. Collings, E. W. (1988). Introduction to titanium alloy design. In: Alloying, Walter, J. L., Jackson, M. R. ve Sims, C. T. (Editörler). *ASM Internationals, Metals Park*. 257-370
41. Yan, M. ve Yu P. (2015). An Overview Of Densification, Microstructure and Mechanical Property Of Additively Manufactured Ti-6Al-4V Comparison Among Selective Laser Melting, Electron Beam Melting, Laser Metal Deposition And Selective Laser Sintering And With Conventional Power Metallurgy. Lakshmanan A. (Editör). *Sintering Techniques of Materials*. Birinci baskı. Londra. IntechOpen Limited, 77-98.
42. Wong, K. V. ve Hernandez A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 2012, 208760.
43. Jarosinski, W.ve Zhang J. (2018). Additive manufacturing processes and equipment. Additive Manufacturing. Zhang J. ve Jung J. G. (Editörler). *Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications*. Birinci baskı. Oxford: Butterworth-Heinemann, 39-51.
44. İnternet: ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (2015), *ASTM Standards*. Web: <https://www.astm.org/Standards/F2792.htm> 8 Ağustos 2020'de alınmıştır.
45. İnternet: ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (2015), *ASTM Standards*. Web: <https://compass.astm.org/Standards/HISTORICAL/F2792-10.htm> 7 Temmuz 2020'de alınmıştır.
46. Vaezi M., Chianrabutra S., Mellor B. ve Yang S. (2013). Multiple material additive manufacturing – Part 1: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, 8(1), 19-50.
47. Matthew J. D. (1988). *Titanium: a technical guide*. Ohio: ASM International, 75-86.
48. Liu S, Shin Y. C. (2019). Additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: A review. *Materials & Design*, 164, 107552.
49. Herzog D., Seyda V., Wycisk E. ve Emmelmann C. (2006). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371-392.
50. Murr, L.E., Gaytan, S. M., Ramirez, R. A., Martinez, E., ve Hernandez, J. (2012). Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies. *Journal of Materials Science & Technology*. 21(1), 1-14.
51. İnternet: Arcam Elektron ışını ile ergitme tezgahı teknik ürün broşürü. URL: <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/arcamebmcorp-brochure-fnlv3.pdf>.
52. İnternet: Arcam Elektron ışını ile ergitme tezgahı üreticisinin eklemeli imalat teknolojisi hakkında bilgilendirme yazısı. URL: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing>.

53. Gaytan, S. M. (2013). Advanced metal powder based manufacturing of complex components by electron beam melting. *Materials Technology*. 24(3), 180-190.
54. Galati, M. ve Iuliano, L. (2018). A literature review of powder-based electron beam melting focusing on numerical simulations. *Additive Manufacturing*. 19, 1–20.
55. Körner, C. ve Group, F. (2016). Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting — A review. *Internationals Materials Reviews*. 61(5), 361-377.
56. Facchini, L. ve Molinari, A. (2008). Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V produced by electron beam melting of pre-alloyed powders. *Rapid Prototyping Journal*. 15(3), 171–178.
57. Tammas-Williams, S., Zhao, H., Léonard, F., Derguti, F., Todd, I. ve Prangnell, P. B. (2015). Materials characterization xct analysis of the influence of melt strategies on defect population in Ti – 6Al – 4V components manufactured by selective electron beam melting. *Material Characterization*. 102, 47–61.
58. Yiğitbaşı, S. (2018). *Elektron Işını Ergitme Yöntemi ile Üretilen Ti6Al4V Parçaların Farklı Kurulum Yönlerindeki Mekanik Özellikleri ve Topoloji Optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 15-34.
59. Doğu, M. (2019). *Ti-6Al-4V Alaşımının 3 Boyutlu Elektron Demeti Ergitme Yöntemiyle Üretilmesi ve İkincil İşlemlerin Geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 15-32.
60. Van B. L., Vansteenkiste, G. ve Boyer. J. C. (2012). Comparisons of numerical modelling of the selective laser melting. *Key Engineering Materials*, 504, 1067-1072.
61. Poyraz, Ö. (2018). *Metallerin Lazer Katmanlı İmalatında Kullanılan Proses Parametrelerinin Etkisinin, Modelleme ve Simülasyon Yöntemleri Kullanılarak İncelenmesi*. Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 22-83.
62. Poyraz, Ö. ve M. C. Kuşhan. (2018). Systematical review on the numerical simulations of laser powder bed additive manufacturing. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 36(4), 1193-1210.
63. Radaj, D.(2012). *Heat effects of welding: temperature field, residual stress, distortion*. (İkinci baskı) Germany: Springer Science & Business Media, 129-315.
64. Kolossov, S. (2005). Non-linear model and finite element simulation of the selective laser sintering process. *École polytechnique fédérale de Lausanne*. 12-20.

65. Qi, H. B, Yan, ., Y. N., Lin, F ve Zhang R. J. (2007). Scanning method of filling lines in electron beam selective melting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 221(12), 1685-1694
66. Akbaş, E. (2019). *Filament Beslemeli 3d Yazıcının Nozul Bölgesinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Modellenmesi ve Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 19-28.
67. Yardımcı, F. (2019). *Toz Yatağında Katmanlı İmalat Prosesinin Sonlu Elemanlarla Modellenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 7-42.
68. Cline, T. R. ve Anthony H. E. (1977). Heat treating and melting material with a scanning laser or electron beam. *Journal of Applied Physics*, 48, 3895-3900.
69. Rouquette, S., Guo, J. ve Le Masson, P. (2007). Estimation of the parameters of a Gaussian heat source by the Levenberg – Marquardt method: Application to the electron beam welding. *International Journal of Thermal Sciences*, 46(2),128–138.
70. Ensiz, W., Griffith, M. ve Hofmeister, M. (1999). Understanding thermal behavior in the LENS process. *Material Science Engineering*, 20(2-3), 107-113
71. Sadowski, M., Ladani, L., Brindley, W. ve Romano, J. (2016). Optimizing quality of additively manufactured Inconel 718 using powder bed laser melting process. *Additive Manufacturing*, 11, 60–70.
72. Rai, R. R., Elmer, J. W., Palmer, T. A. ve Debroy, T. (2007). Heat transfer and fluid flow during keyhole mode laser welding of tantalum, Ti-6Al-4V, 304L stainless steel and vanadium. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(18), 5753–5766.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AKILLILAR, Hilal
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 10.10.1994, Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (534) 547 17 87
 e-mail : hilal.akillilar@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Ege Üniversitesi Makine Mühendisliği	2017
Lise	Yavuz Sultan Selim Anadolu Lisesi	2012

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2019-Halen	TÜBİTAK-TEYDEB	Bilimsel Prog. Uz. Yrd.

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Akıllılar H., Küçüktürk G., Abdelmoula M. E. S., Kaya D. ve Gümüş B. (2020). *Ti6Al4V için Elektron Işın Ergitme Yönteminin Simülasyonu ile Işın-Toz Etkileşiminin İncelenmesi*, III. Uluslararası Savunma Sanayii Sempozyumu'nda sunum için kabul alındı, Kırıkkale.

Hobiler

-



GAZİ GELECEKTİR...