



**METAL TOZ YATAKLI ERGİTME İŞLEMLERİNİN ISIL
MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE MİKROYAPIYA ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Mehmet MOLLAMAHMUTOĞLU

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2022

ETİK BEYAN

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

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

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

Mehmet MOLLAMAHMUTOĞLU

27/07/2022

METAL TOZ YATAKLI ERGİTME İŞLEMLERİNİN ISIL MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE MİKROYAPIYA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Mehmet MOLLAMAHMUTOĞLU

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2022

ÖZET

Bu çalışmada, toz yataklı füzyon proseslerinin ısı davranışı ve bu ısı davranışının mikroyapı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, ilk olarak, iki temel toz yatağı prosesi olan seçici lazer ergitme ve elektron demeti ergitmenin yapısı araştırılmıştır. Daha sonra bu prosesler matematiksel olarak modellenmiş ve bazı iyileştirmeler yapılmıştır. Seçici lazer ergitme işleminde Ti-6Al-4V alaşımı için yeni bir hacimsel ısı kaynağı modeli ve ampirik bir emilim korelasyonu geliştirilmiştir. Elektron demeti ergitme işleminde ise buharlaşma olgusu üzerinde durulmuştur. Bu amaçla, buharlaşma enerji kaybı ve buharlaşmanın ergiyik havuzu profili üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ergiyik havuzdaki buharlaşma ısı kaybını ve geri tepme basıncını tanımlamaya yönelik olarak Anisimov yöntemi için matematiksel bir ifade türetilmiştir. Her iki proses için de deneysel çalışmalar yapılmış ve muhtelif Ti-6Al-4V numuneleri üretilmiştir. Seçici lazer ergitme işlemi ile oluşan mikro yapılar incelenmiş ve sayısal analiz ile elde edilen termal çıktılar ile ilişkilendirilmiştir. Böylece 20 K/s altı, 20 ila 410 K/s, 410 ila 1900 K/s ve 1900 K/s üzeri olmak üzere dört soğuma hızı rejimi belirlenmiştir. Elektron demeti ergitme işleminde vakum ortamında meydana gelen muhtemel geri tepme basıncı ve buharlaşma ısı kaybı, deneyden elde edilen katılaşmış eriyik havuzu profilleri ve sayısal analiz yardımıyla araştırılmıştır. Mutedil işlem parametreleriyle gerçekleştirilen taramalarda buharlaşma yollu ısı kaybının yaklaşık %10 civarında olduğu görülmüştür. Vakum ortamında, çeşitli koşullar ve proses parametrelerinde, çeşitli hız rejimlerinin oluşabileceği ve bu rejimler altında buharlaşma ısı kaybının artabileceği sonucuna varılmıştır.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : Eklemeli imalat, toz yataklı ergitme işlemleri, ısı model, mikroyapı

Sayfa Adedi : 100

Danışman : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

DEVELOPMENT OF THERMAL MODELS OF POWDER BED FUSION PROCESSES
AND INVESTIGATION OF ITS EFFECTS ON MICROSTRUCTURE

(Ph. D. Thesis)

Mehmet MOLLAMAHMUTOĞLU

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2022

ABSTRACT

In this study, the thermal behavior of powder bed fusion processes and the effect of this thermal behavior on the microstructure are discussed. For this purpose, the nature of the two principal powder bed processes, selective laser melting and electron beam melting, was investigated. Then, the processes were mathematically modeled, and some improvements were made. A new volumetric heat source model and an empirical absorptivity correlation have been developed for the Ti-6Al-4V alloy in the selective laser melting process. In the electron beam melting process, the evaporation phenomenon is emphasized. For this purpose, evaporative energy loss and the effects of evaporation on the melt pool profile were investigated. A mathematical expression has been derived for the Anisimov method to define the evaporation heat loss and the recoil pressure on the melt pool. Experimental work was carried out for both processes, and various Ti-6Al-4V samples were manufactured. The microstructures formed by the selective laser melting process were examined and correlated with the thermal outputs obtained by numerical analysis. Thus, four cooling rate regimes were determined as below 20 K/s, 20 to 410 K/s, 410 to 1900 K/s, and above 1900 K/s. The possible recoil pressure and evaporative heat loss occurring in the vacuum environment in the electron beam melting process were investigated via the solidified melt pool profiles obtained from the experiment and numerical analysis. In the scans with moderate process parameters, it was observed that the heat loss by evaporation was around 10%. It has been concluded that in a vacuum environment, various speed regimes may occur under various conditions and process parameters, and evaporation heat loss may increase under these regimes.

Science Code : 91438

Key Words : Additive manufacturing, powder bed fusion processes,
thermal model, microstructure

Page Number : 100

Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

TEŞEKKÜR

Doktora çalışması boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ'a, yol gösterici tavırları ve ilgileri nedeniyle değerli Tez İzleme Komitesi üyeleri Prof. Dr. Rahmi ÜNAL, Dr. Öğr. Üyesi Kemal DAVUT ve Doç. Dr. Caner ŞİMŞİR'e ve tez savunma sınavı jürisi üyeleri Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK ve Dr. Öğr. Üyesi Recep Muhammet GÖRGÜLÜARSLAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Bu süreçte gösterdikleri arkadaşlıklarıyla beni yalnız bırakmayan sevgili AMTRG üyelerine, teze altyapısal manada katkı sağlayan TAI ve ASELSAN kurumlarına ve ilgili mühendisleri Dr. Evren TAN ve Dr. Berkay GÜMÜŞ'e ve son olarak her daim yanımda olan aileme minnettarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR	3
2.1. Eklemeli İmalat Yöntemlerine Genel Bakış.....	3
2.2. Seçici Lazer Ergitme İşlemi.....	5
2.2.1. Genel yapısı.....	5
2.2.2. Termo-fiziksel doğası.....	6
2.3. Elektron Demeti Ergitme İşlemi.....	9
2.3.1. Genel yapısı.....	9
2.3.2. Termo-fiziksel doğası.....	11
2.4. Toz Yataklı Sistemlerde Mikroyapı Oluşumu.....	14
2.5. Toz Yataklı Sistemlerde Termal Modelleme.....	16
2.5.1. Seçici Lazer Ergitme.....	16
2.5.2. Elektron Demeti Ergitme.....	20
2.6. Toz Yataklı Sistemlerde Mikroyapı Modellemesi.....	22

Sayfa

3. MATEMATİKSEL MODEL.....	31
3.1. Seçici Lazer Ergitme Prosesi Termal Modeli.....	31
3.1.1. Genel denklemler.....	31
3.1.2. Toz yatakta iletim.....	32
3.1.3. Isı kaynağı.....	37
3.1.4. Emilim korelasyonu.....	42
3.2. Elektron Demeti Ergitme Prosesi Termal Modeli.....	44
3.2.1. Genel denklemler.....	44
3.2.2. Buharlaşma ısı kaybı.....	46
4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	49
4.1. Seçici Lazer Ergitme Prosesi Deneyi.....	49
4.2. Elektron Demeti Ergitme Prosesi Deneyi.....	51
4.3. EDS Haritalama.....	53
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	57
5.1. Termal Modellerin Kurgulanması.....	57
5.2. Seçici Lazer Ergitme Prosesi Deneysel ve Numerik Çalışma Sonucu.....	63
5.2.1. Numunelere genel bakış.....	63
5.2.2. Sütunsu tanecik genişliği ısı akısı ilişkisi.....	66
5.2.3. Üretim sürecinde meydana gelen termal döngüler ve soğuma hızlarının mikroyapıya etkisi.....	67
5.2.4. Çoklu tarama ve çoklu katman katılmış ergiyik havuz boyutları.....	76
5.3. Elektron Demeti Ergitme Prosesi Deneysel ve Numerik Çalışma Sonucu.....	77
5.3.1. Numunelere genel bakış.....	77
5.3.2. Geri tepme basıncı ve β buharlaşma ısı kaybı çarpanı.....	79

	Sayfa
5.3.3. Hesaplanan ve deneysel ergiyik havuz boyutları.....	82
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	85
KAYNAKLAR.....	87
EKLER.....	95
EK-1. Ti-6Al-4V alaşımı termo-fiziksel özellikleri.....	96
EK-2. 150 W-750 mm/s, P noktası termal geçmişi.....	97
ÖZGEÇMİŞ.....	99

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. SLE işleminin modellenmesiyle alakalı hususlar.....	17
Çizelge 4.1. SLE numune üretim parametreleri.....	50
Çizelge 5.1. Numune porozite sorunları.....	65
Çizelge 5.2. Soğuma oranlarının mikro yapıya etkisi.....	73
Çizelge 5.3. İşlem parametreleri ve deneysel katılmış ergiyik havuz boyutları.....	79

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Eklemeli imalat yöntemleri.....	4
Şekil 2.2. SLE işlemi şematığı.....	5
Şekil 2.3. Üzerine lazer ışını düşen bir yüzey.....	7
Şekil 2.4. Yüksek enerjili hareketli bir ısı kaynağının metal yüzeyini ergitmesi.....	8
Şekil 2.5. Toz yatak-lazer etkileşimi.....	9
Şekil 2.6. EDE işlemi şematığı.....	10
Şekil 2.7. Casino kodu ışın takip simülasyonu ile Ti-6Al-4V alaşımında elektron penetrasyonu.....	11
Şekil 2.8. Elektron demeti toz katman etkileşiminin ZEMAX kodu ile incelenmesi ...	12
Şekil 2.9. Enerjinin EDE işleminde toz katman boyunca emilimine örnek simülasyon	13
Şekil 2.10. Saf titanyumda kristal yapısı.....	14
Şekil 2.11. Vanadyum konsantrasyonunun Ti-6Al alaşımına etkisi.....	15
Şekil 2.12. Mikroyapı modellemesine genel bakış.....	22
Şekil 2.13. Ti-6Al-4V Faz denge diyagramı.....	23
Şekil 2.14. Ti-6Al-4V İzotermal faz dönüşümü (β -transus üstü sıcaklıktan ani soğutma ile).....	24
Şekil 2.15. Ti-6Al-4V Sürekli soğuma faz dönüşümü.....	25
Şekil 2.16. Ti-6Al-4V Sürekli ısıtma faz dönüşümü.....	26
Şekil 2.17. Ti-6Al-4V Kristal yapı dönüşüm mekanizması.....	28
Şekil 2.18. Ti-6Al-4V Faz denge alaşım elementlerinin konsantrasyonları (Thermo-Calc).....	29
Şekil 2.19. Titanyum HMK ve HSP matriste vanadyum ve alüminyumun doğal difüzyonu.....	30

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Sürekli ortam olarak tozun iletim davranışına temsili örnek.....	32
Şekil 3.2. Sıvılaşma modeli.....	33
Şekil 3.3. Sıvılaşma iletim çarpanı.....	34
Şekil 3.4. Ti-6Al-4V tozu iletkenlik değerleri.....	35
Şekil 3.5. Toz yatakta çökme modeli.....	36
Şekil 3.6. 2D Gaussian dağılım.....	37
Şekil 3.7. 2D Gaussian dağılım (üstten görünüm).....	38
Şekil 3.8. Beer-Lambert yasası ve enerji seviyelerine göre metala uyarlanması.....	39
Şekil 3.9. Işının karşılaştığı ortamlar.....	40
Şekil 3.10. Ti-6Al-4V emilim korelasyonu.....	44
Şekil 3.11. EDE matematiksel model şematiği.....	46
Şekil 4.1. Numune geometrisi ve üretim yönü.....	49
Şekil 4.2. Numune tarama stratejisi.....	50
Şekil 4.3. SLE Numune #2 dağlanan yüzeyde element dağılımı.....	54
Şekil 4.4. SLE Numune #2 dağlanan yüzeyde EDS haritalama.....	54
Şekil 5.1. SLE tek tarama deneysel ve hesaplamalı ergiyik havuz profilleri.....	57
Şekil 5.2. SLE hesaplamalı ve deneysel katılmış ergiyik havuz boyutları, a) genişlik, b) derinlik, c) boy (sadece hesaplanan).....	58
Şekil 5.3. SLE numune simülasyonları için model konfigürasyonu.....	59
Şekil 5.4. Comsol Multiphysics® SLE simülasyonundan örnek görüntü, sıcaklık dağılımı ve ergiyerek katılan bölgeler.....	60
Şekil 5.5. Comsol Multiphysics® SLE çok katmanlı simülasyonu ergiyik havuz yan profilden sıcaklık dağılımı.....	61
Şekil 5.6. Comsol Multiphysics® EDE simülasyonundan örnek görüntü, üst ve ergiyik havuz yan profilden sıcaklık dağılımı ve yüzey deformasyonu.....	62

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. Comsol Multiphysics® EDE simülasyonundan örnek görüntü, çıkıntı ve çökme ve ağ örgüsü deformasyonu.....	62
Şekil 5.8. Sütunsu tanecik ortalama genişliğinin ısı akısına göre değişimi.....	67
Şekil 5.9. Hesaplama ilgi alanının ortasında, termal döngülerden etkilenen bir P noktası.....	68
Şekil 5.10. 100 W-500 mm/s için mevcut katmanda taramalar sırasında bir noktada meydana gelen termal döngülere örnek.....	69
Şekil 5.11. 100 W-500 mm/s için eklenen katmanların P noktasındaki termal döngüye etkisi.....	70
Şekil 5.12. 150 W-750 mm/s için eklenen son katmanların P noktasındaki termal döngüye etkisi ve ayrışma sıcaklığına girerken sıçramaların sönümlenmesi.....	71
Şekil 5.13. Martenzitik katman kalınlığı için ayrışma sıcaklığında soğuma oranları....	73
Şekil 5.14. Ergiyik havuz genişliğine göre β değişimi.....	80
Şekil 5.15. Ergiyik havuzlar için hesaplanan buharlaşma ısı kaybı yüzdeleri.....	81
Şekil 5.16. Ergiyik havuzlar için hesaplanan buharlaşma kaynaklı kütle kaybı.....	81
Şekil 5.17. Hesaplanan ve deneysel ergiyik havuz boyutları ve β değerleri.....	82
Şekil 5.18. 1 nolu havuz için Comsol Multiphysics® ile geri tepme basıncı nedeniyle oluşan çöküntü ve sıcaklık dağılımını gösteren simülasyon, deneysel katılaşmış ergiyik havuz profili ve hesaplanan profilden kesit.....	83
Şekil 1.1. 150 W-750 mm/s, P noktası termal geçmişi, 1-8. Katmanlar.....	97
Şekil 1.2. 150 W-750 mm/s, P noktası termal geçmişi, 9-12. Katmanlar.....	98

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Üretim odası içinde meydana gelen metalizasyona örnek.....	13
Resim 4.1. SLE deneyi üretilen numuneler.....	51
Resim 4.2. EDE deneyi üretilen numuneler.....	52
Resim 4.3. EDE deney numunesi örneği.....	53
Resim 4.4. SLE Numune #2 dağlanan yüzeyin taramalı elektron mikroskop görüntüsü.....	55
Resim 5.1. SLE tam kesit dağlanmış numune resimleri 1 (Büyütme oranı x5).....	64
Resim 5.2. SLE tam kesit dağlanmış numune resimleri 2 (Büyütme oranı x5).....	65
Resim 5.3. 3 nolu numune üretim yönü boyunca oluşan sütunsu tanecikler (Büyütme oranı x5).....	66
Resim 5.4. Üst katmanların martenzitik ayrışmaya etkisi (Büyütme oranı x5).....	72
Resim 5.5. Gözlemlenen yapılara örnek olarak iğnemsî alfa yapılar, 1900 K/s < (Büyütme oranları x50, x20, x20).....	74
Resim 5.6. Gözlemlenen yapılara örnek olarak Masiv alfa görüntüsü, 410-1900 K/s (Büyütme oranları x10, x20).....	75
Resim 5.7. 19. Katman taraması sonrası, ayrışma sıcaklığında 750 K/s'ye kadar düşen soğuma oranı neticesi yarıda kalmış lamel oluşumu (150W-750 mm/s) (Büyütme oranları x10, x50).....	75
Resim 5.8. Çoklu tarama/çoklu katman katılaşmış ve hesaplanan ergiyik havuzlara örnek 1 (Büyütme oranı x10).....	76
Resim 5.9. Çoklu tarama/çoklu katman katılaşmış ve hesaplanan ergiyik havuzlara örnek 2 (Büyütme oranı x20).....	77
Resim 5.10. EDE deneyi duvar numune örneği ve dağlanmış duvar optik görüntüsü...	77
Resim 5.11. Isıl işlem görmüş SLE numunesi ve EDE numunesi, lamelli mikroyapılar (Büyütme oranı x100).....	78

Resim**Sayfa**

Resim 5.12. EDE deneyi için seçilen katılaşmış ergiyik havuz profillerinin optik görüntüsü (Büyütme oranı x5).....	79
--	----

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

m³	Metreküp
m²	Metrekare
m	Metre
mm	Milimetre
J	Joule
W	Watt
kg	Kilogram
N	Newton
Pa	Pascal

Kısaltmalar

Açıklamalar

EBM	Electron Beam Melting
EDE	Elektron Demeti Ergitme
EDS	Energy-dispersive X-ray spectroscopy
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HAZ	Heat Affected Zone
HMK	Hacim Merkezli Kübik
HSP	Hegzogonal Sıkı Paket
SLE	Seçici Lazer Ergitme
SLM	Selective Laser Melting

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat yönteminin uygulama alanı ve kullanımı her geçen gün artmaktadır. İlk olarak sadece prototipleme ve tamir amacıyla kullanılan bu yöntem, günümüz itibarı ile havacılık, otomotiv, tıp ve ilaç sektörü gibi birçok alanda yaygın hale gelmiştir. Bu yöntemi cazip kılan başlıca hususlar arasında kompleks geometriye sahip parçaların üretilebilirliği, üretimde esneklik, enerji ve malzeme tasarrufu gibi avantajlar sayılabilir. Bununla beraber bazı limitasyonlar ve dezavantajlar da mevcuttur. Limitasyonlara örnek olarak boyut ve malzeme çeşitliliğinin sınırlı oluşu verilebilir. Başlıca dezavantajları ise yavaş üretim hızı, düşük yüzey kalitesi, kullanılan işleme bağlı olarak oluşan kusurlar ve arzu edilmeyen mekanik özelliklerdir.

Eklemeli imalat yöntemlerinin yaygınlaşması, bu yöntemlerin iyileştirilmesi ve geliştirilmesi noktasında araştırmaları gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda son yıllarda oluşan talep neticesinde eklemeli imalat yöntemlerine yönelik akademik çalışmaların sayısında büyük bir ivme yakalanmıştır. Ülkemiz sanayisinin eğilimleri de göz önünde bulundurulursa bu tez ve benzeri akademik çalışmaların motivasyonu daha iyi anlaşılmış olur. İşte bu oluşan motivasyon doğrultusunda bu tezin konusu olarak toz yatak füzyonu proseslerinin termal davranışı ve bu davranışın neticesi olarak oluşan mikroyapılar seçilmiştir. Metal eklemeli imalat sistemleri arasında yaygın olarak kullanılan toz yataklı sistemlerin daha iyi anlaşılması hiç şüphesiz üretilen parçalarda kusurların azaltılmasına ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesine olanak sağlayacaktır.

Toz yataklı sistemler arasında metal parça üretimi bağlamında başlıca iki yöntem vardır. Bunlar lazer toz yatak füzyonu ve elektron demeti ergitme yöntemleridir. Her ne kadar bu iki yöntem prensipte aynı yaklaşıma dayanmaktaysa da kendine has bazı karakteristiklere sahiptirler. Bu nedenle bu tez kapsamında ayrı ayrı incelenerek analiz edilmişlerdir. Fakat her iki yöntemde de kullanılan bir malzeme olan Ti-6Al-4V alaşımı tercih edildiğinden termal davranış ve mikroyapı bağlamında kıyas mümkün olmuştur.

Bu tez çalışmasında lazer toz yatak füzyonu (seçici lazer ergitme) ve elektron demeti ergitme işlemlerinin termal analizi ve lazer toz yatak füzyonunda oluşan başlıca mikroyapılar, teorik ve deneysel açıdan incelenmiştir. Buradaki ilk hedef uygulamaya yönelik olarak mevcut matematiksel modellerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesidir. Böylelikle toz yataklı sistemlerin ısı davranışı hem mikro hem de mezo ölçekte daha net anlaşılmış olacaktır. Bu

durum termal davranışın bir sonucu olarak ortaya çıkan mikroyapı, deformasyon ve artık gerilme gibi birçok ilgi alanı açısından elzemdir. Bu bağlamda seçici lazer ergitme işleminde oluşan mikroyapılar ve sayısal termal analiz ilişkisi tezin ikinci önemli hedefini oluşturmaktadır. Bu hedeflere yönelik ilk adım olarak bu yöntemlerin fiziki ve karakteristik özellikleri üzerinde durularak bir çerçeve çizilmiştir. Ardından ilgili güncel literatür detaylı şekilde taranmıştır. Buna müteakip deneysel çalışma anlamında değişik üretim parametrelerine sahip numuneler üretilmiş ve bunların metalografik analizleri gerçekleştirilmiştir. Termal analize yönelik olarak mevcut literatürden yola çıkılarak model iyileştirilmesi ve geliştirilmesi yapılmıştır. Son olarak termal analiz yoluyla elde edilen çıktılar ile metalografik analiz neticesinde karakterize edilen mikroyapılar arasında bağ kurulmuştur.

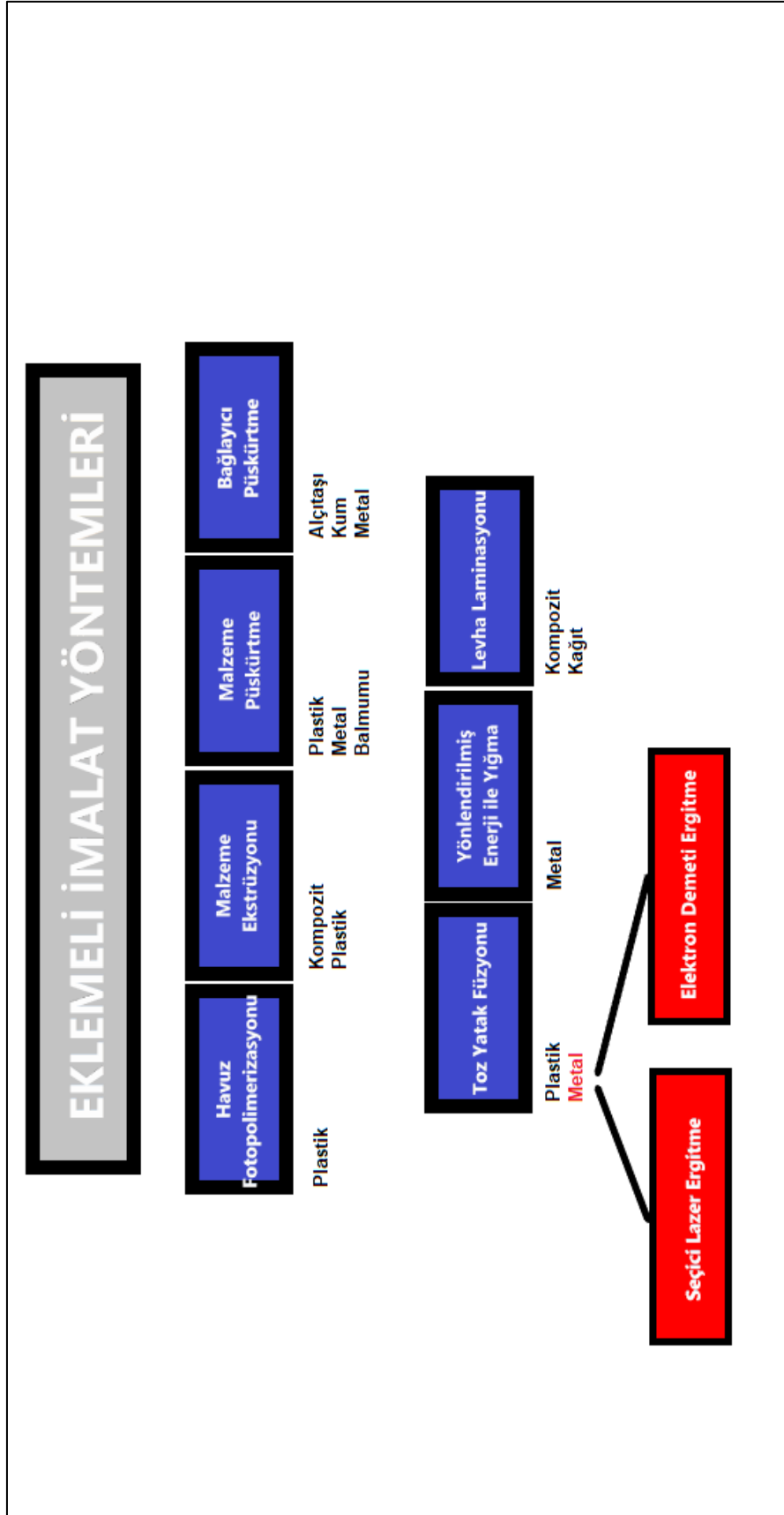
Yukarıda verilen amaçlar doğrultusunda tezde 6 bölüm oluşturulmuştur. Bunlardan ilki tezin konusu ve yapısı hakkında bilgi veren ve mevcut bölüm olan giriş bölümüdür. İkinci bölümde ise literatür gelmektedir. Bu bölümde ilk olarak genel bir özet halinde eklemeli imalat teknolojileri, lazer toz yatak füzyonu ve elektron demeti ergitme işlemleri, işlemlerin termo-fiziksel doğası ve mikro yapı oluşumu ile alakalı bilgiler verilmiştir. Ardından termal ve mikro yapı modellemeleri, ilgili literatür ışığında incelenmiş ve tartışılmıştır. Üçüncü bölümde ayrıntılı olarak termal ve mikroyapı modellemesi üzerinde durulmuştur. Genel olarak lazer toz yatak füzyonu ve elektron demeti ergitme işlemlerinin termal simülasyonu ve simülasyonların dayandığı matematiksel temel açıklanmıştır. Buna ilave olarak kabul edilen varsayımlar, yaklaşımlar, sınır şartları gibi konular üzerinde de durulmuştur. Dördüncü bölüm deneysel çalışma ile alakalı bilgi vermektedir. Deney planı ve numunelerin üretiminin gerçekleştiği makineler hakkında özet bilginin yanı sıra numune şekilleri, üretim stratejisi ve parametreleri üzerinde durulmuştur. Ayrıca bu bölüm EDS haritalama sonuçlarını da ihtiva etmektedir. Beşinci bölüm elde edilen sonuçların iki ayrı proses açısından tartışılması ve değerlendirilmesine yöneliktir. Bu bölümde seçilen numunelerin ayrıntılı mikroskobik analizi mevcuttur. Bu analizler termal modelden elde edilen çıktılarla birleştirilerek zenginleştirilmiştir. Son bölüm olan altıncı bölüm ise sonuç bölümü olup tezde yapılan faaliyetler ve varılan hedefler özetlenmiş, gelecek çalışmalar için bir perspektif çizilmiştir.

2. LİTERATÜR

2.1. Eklemeli İmalat Yöntemlerine Genel Bakış

Eklemeli imalat yöntemleri son yıllarda giderek yaygınlaşmakta ve uygulama alanları genişlemektedir. Parçanın katmanlar halinde üst üste yığılarak imal edilmesine dayanan bu yöntem, konvansiyonel üretim metotları açısından zorluklar içeren durumlarda bazı olanak ve avantajlar sunabilmektedir. İmalatı, klasik yöntemlerle mümkün olmayan veya birkaç basamakta gerçekleştirilebilecek karmaşık geometriye sahip parçalar bu yöntemle tek bir basamakta ve tek parça halinde üretilmektedir.

Eklemeli imalat yöntemlerinin çok boyutlu ve sürekli gelişim içinde olması sınıflandırmayı zorlaştırmaktadır. Fakat genel bir çerçevede Şekil 2.1.'de sunulduğu üzere çizilebilir. Görüleceği üzere hammadde olarak metal ve plastik kullanımı yaygındır. Zira mühendislik malzemeleri içinde metal ve metal alaşımları en genel kullanım alanına sahip olanlardır. Bu malzeme sınıfına yönelik olarak toz yatak füzyonu işlemleri öne çıkmaktadır. Burada en belirgin ayrım tercih edilen ısı kaynağına bağlıdır. Elektron demeti ergitme (EDE, İng. EBM) işleminde ısı kaynağı olarak elektron tabancası kullanılırken seçici lazer ergitme (SLE, İng. SLM) işleminde füzyon, lazer yoluyla sağlanır. Bunun dışında EDE işleminde genel olarak daha yüksek enerji ve tarama hızları ile üretim gerçekleştirilmektedir. İlâveten demet çapı da daha büyüktür. Üretim vakum ortamında gerçekleştirilmektedir ve alt levha sıcaklığı 700 ila 800 °C civarındır. Alt levhanın yüksek sıcaklığa sahip oluşu ve oluşan ergiyik bölgelerin SLE'ye görece büyük oluşu, EDE işleminde oluşan mikro yapıların lamelli hale gelmesine olanak sağlamaktadır. SLE işleminde ise alt levha genellikle oda sıcaklığında olup maksimum 200 °C civarı olabilmektedir. Bununla beraber bazı firmaların yeni SLE makinelerinde tabla sıcaklığının arttırılabilmesine yönelik girişimleri olduğu da gözlemlenmektedir. Bunun yanı sıra SLE'de demet çapı küçüktür. Bu nedenle ani sıvılaşmanın ardından yüksek soğuma hızıyla katılaştıran ergiyik havuzlar neticesinde son derece martenzitik yapılar meydana gelmektedir. Bu durum SLE işleminde oluşan parçaların kırılgan olmasına neden olmaktadır. Bu dezavantajına rağmen SLE daha yaygındır çünkü çelik, titanyum, alüminyum alaşımları başlıca olmak üzere hammadde yelpazesi geniştir. İkinci olarak küçük demet çapı daha iyi boyutsal toleranslar sağlamaktadır.



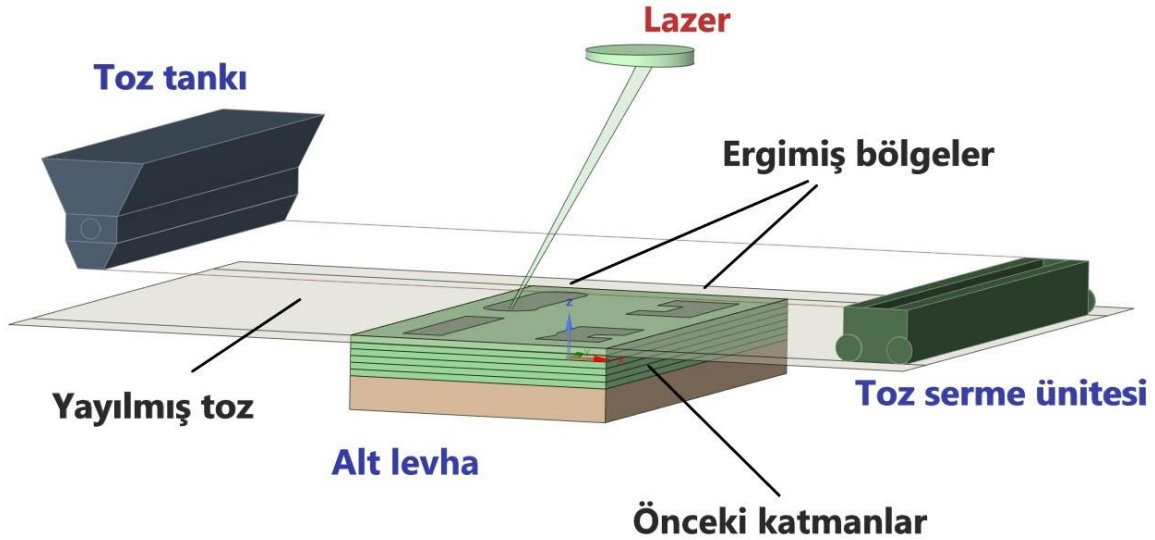
Şekil 2.1. Eklemeli imalat yöntemleri

SLE ve EDE işlemlerinde en yaygın ve ortak kullanılan titanyum alaşımı, bu tezin de konusu olan Ti-6Al-4V'dur. Bu alaşım yüksek korozyon direnci ve özgül dayanıma sahiptir. Yüksek biyouyumluluğu nedeniyle ilk olarak implant ve protez üretiminde tercih edilirken havacılık endüstrisinde de yaygınlaşmaya başlamıştır. Netice olarak gerek iki toz yataklı işleme de hitap etmesi bağlamında olsun gerekse geniş uygulama alanı bakımından değerlendirilsin Ti-6Al-4V'un uygun bir tercih olacağı görülecektir.

2.2. Seçici Lazer Ergitme İşlemi

2.2.1. Genel yapısı

SLE işleminde üretim, soygaz (genellikle argon) altında gerçekleşmektedir. Üretim için gerekli temel unsurlar arasında kontrol edilebilir bir ısı kaynağı (lazer), toz saklama ve serme sistemi, z ekseninde hareket edebilen bir alt levha sayılabilir (Şekil 2.2.). Burada işlem, arzu edilen bölgelerde (yani üretilen parçanın geometrisine bağlı olarak) ısı kaynağı yardımıyla metal tozlarının ergitilerek kaynaştırılması yaklaşımına dayanmaktadır. Aynı prosedür üst üste eklenen katmanlar boyunca tekrarlanarak tasarlanan şeklin 3 boyutlu yapısı elde edilir.



Şekil 2.2. SLE işlemi şematığı

Üretilen parçaların hacmine ve üretim zamanına kıyasla tozların ergime ve birleşmesi boyutsal ve zamansal anlamda çok küçük kalmaktadır. İşlemin temel üretim mekanizması, ani olarak ergiyerek kaynaşan toz yapıların oluşturduğu havuzcuklara dayanmaktadır. Ardından bu havuzcuklar hızla soğuyarak katılaşmaktadır. Tüm bu işlemler mikrometre ve

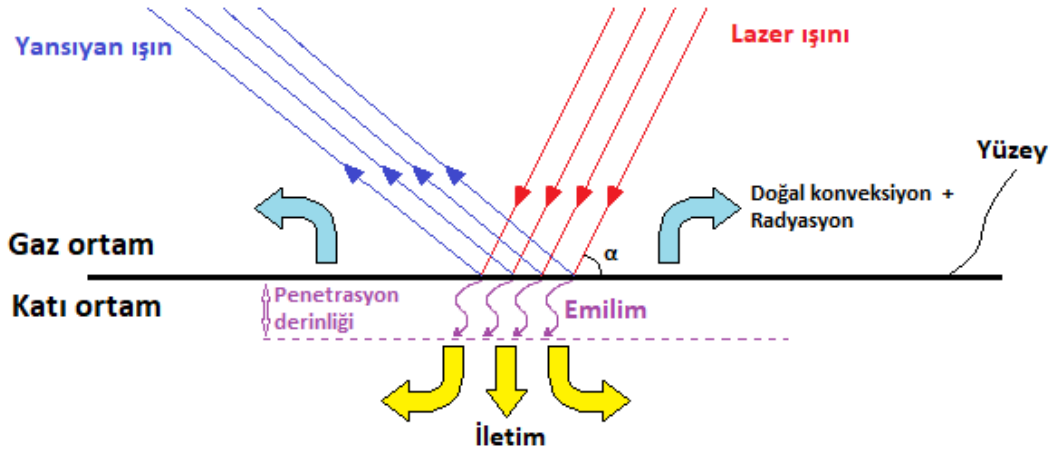
mikrosaniye mertebesinde gerçekleşmektedir. Bu bağlamda parça ile sürecin fiziksel mekanizmasını açıklayan ilgi alanı arasında ölçek bakımından büyük fark vardır. Bu durum işlemin anlaşılmasını ve modellenmesini zorlaştıran başlıca etkenler arasında görülebilir. Çünkü mikro, mezo ve makro ölçeğin her biri işlem için ayrı bir anlam ifade etmektedir. Araştırılan veya ilgi duyulan konu nispetinde değişik ölçek ve yaklaşımlar tercih edilebilmektedir. Bazı araştırma alanları şu şekilde sıralanabilir:

- Katmanlar ve taramalar arasındaki füzyon problemleri
- Distorsiyonlar ve artık gerilmeler
- Mikro yapılar ve çatlaklar
- Parça yüzey pürüzlülüğü
- Anahtar deliği formasyonu oluşumu ve yüksek buharlaşma kaynaklı porozite
- Toplaşma etkisi, tozutma, toz erozyonu ve lazer bulutu gibi olguların incelenmesi

2.2.2. Termo-fiziksel doğası

SLE işlemi, içerisinde değişik fiziksel mekanizmaların bulunduğu karmaşık bir üretim sürecidir. Bu nedenle sürecin, parçalara ayrılarak analiz edilmesi yerinde olur. Bu bağlamda analize, üzerine lazer ışını düşen bir yüzeyin durumu ile başlanabilir. Şekil 2.3.'de görüleceği üzere katı bir yüzey üzerine lazer ışınları vurmaktadır. Bu ışınlar bir çeşit elektromanyetik radyasyondur ve elektromanyetik radyasyon dalgaları enerjiyi bir yerden bir yere taşırlar.

Elektromanyetik radyasyon, kütesiz parçacık olarak kabul edilen foton akışı olarak da açıklanmaktadır. Bu fotonlar, atom, iyon veya moleküllerle etkileşimlere girerler ve enerji düzeylerini arttırırlar. Enerji düzeyi artan atom veya molekül düşük enerji durumuna geçmek isteyecektir. Bunun için ya kendi de fotonlar yayacak veya ortam sıcaklığı yükselecektir.



Şekil 2.3. Üzerine lazer ışını düşen bir yüzey

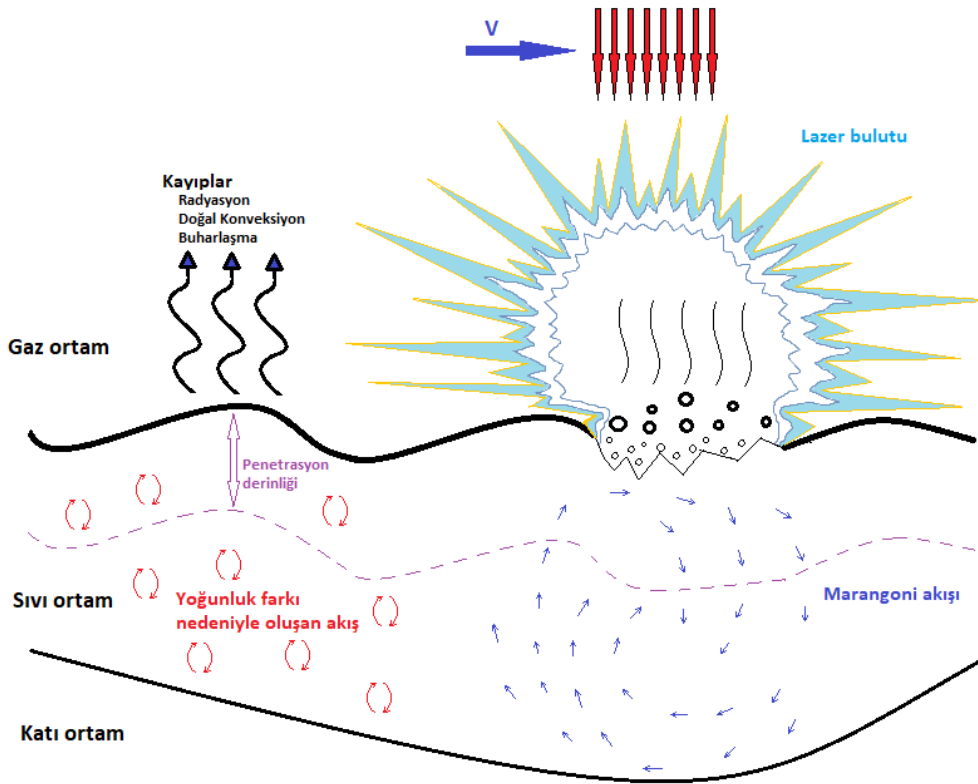
Şekilde görüleceği üzere ışınlar katı ortama gelmeden önce gaz ortamının içinden geçmektedir. Gaz ortamının özelliğine göre bir miktar enerjinin gaz ortamda emileceği ve bir miktar saçılmaların olabileceği bilinmektedir. Fakat bu durumlar analizi basitleştirmek adına çoğu zaman ihmal edilebilecek düzeydedir. İstisnai bir durum olarak yüksek buharlaşmanın olduğu ve/veya lazer bulutu kaynaklı kayıplar mevcut olabilir. Katı yüzeye ulaşan ışınların bir kısmı yansıyarak yüzeyden uzaklaşırken bir kısmı ise katı ortama girerek bir miktar ilerleyebilecektir. Sonuç olarak bu ışınlar, katı ortam içinde emilerek malzemenin sıcaklığının artmasına neden olacaktır. Burada ne kadar ışının yansıtacağı ve ne kadarının hangi penetrasyon derinliğine ulaşabileceği birçok faktöre bağlıdır. Bunlar şu şekilde özetlenebilir:

- Lazer ışını özellikleri (geliş açısı, şiddeti, dalga boyu vs.)
- Gaz ortamının özellikleri
- Katı yüzeyin özellikleri (pürüz, oksitlenme, renk vs.)
- Katı ortamının özellikleri

Lazer radyasyonu neticesinde ısınan malzeme yüzeyi, ısıyı iletim yoluyla alt tabakalara yayarken, bir miktar ısı ise yüzeyden radyasyon ve gazda oluşan doğal konveksiyon yoluyla ortamdaki uzaklaşacaktır. Yapısal değişikliklere neden olmayan mutedil bir lazer radyasyonu neticesinde gözlemlenecek olan senaryo, özet olarak budur.

SLE gibi metal ergitmeye yönelik yüksek enerji yoğunluğuna sahip süreçlerde ise senaryo değişmektedir. Lazerin belirli bir bölgeye odaklanarak şiddetinin artması ve metal yüzeyi üzerinde hareketli hale gelmesi, süreci daha karmaşık bir hale getirir. Şekil 2.4.'de

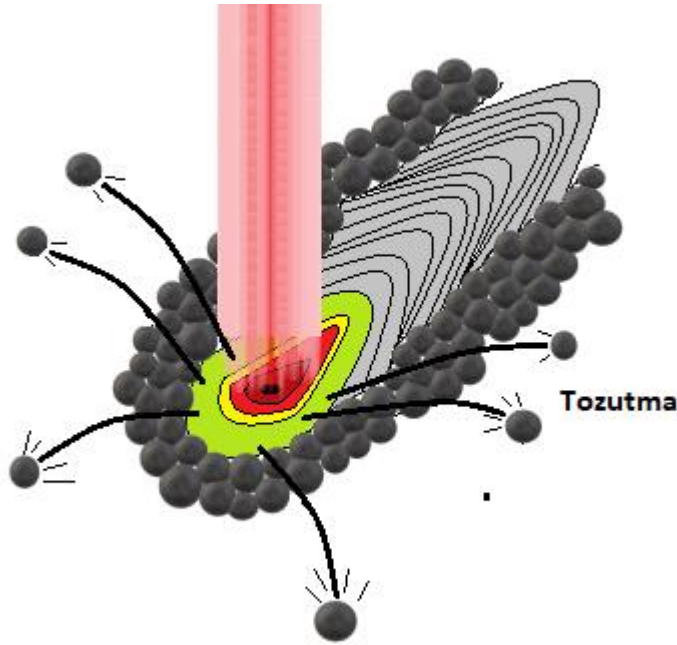
görülebileceği üzere değişik fiziksel mekanizmalar açığa çıkmıştır. Artık faz değişimleri başlamış, sabit katı ortam hareketlenmiş durumdadır. Sıvı içerisindeki yüksek sıcaklık gradyanının tetiklediği Marangoni akışı başlamıştır. Bu akışa göre oldukça zayıf kalsa da yoğunluk farkı da sıvı metal hareketini etkileyebilmektedir. Bunun yanı sıra Şekil 2.3.'deki durumun aksine metal-soy gaz ara yüzeyi de hareketlenmiş, hatta özellikle lazerin etkisi altında kalan bölgelerde, ara yüzeyde parçalanmalar meydana gelebilmektedir. Dolayısıyla lazer enerjisi, bu mekanizmalar altında metal yüzeyinin çok daha derinlerine sıvı metal tarafından taşınmaktadır. Sıcaklığı artan sıvı metal artık sadece enerji değil, buharlaşma yoluyla enerjinin yanı sıra kütle de kaybetmeye başlamıştır. Bu buharlaşma özellikle lazerin olduğu bölgede daha da artarak geri tepme basıncı oluşturur. Bu sayede lazerin kendisi sıvı metal içinde yolunu açarak daha da derinlere nüfuz etmeye başlar. Buna ilave olarak lazerin yoğunlaştığı bölgede, içinde buhar ve parçacıkları barındıran buluta benzer bir yapı meydana gelebilir. Bu bulut süreci ciddi şekilde etkilemekte, kararsızlığa yol açmaktadır.



Şekil 2.4. Yüksek enerjili hareketli bir ısı kaynağının metal yüzeyini ergitmesi

SLE işleminde, alt levha üzerine katman halinde serilen tozun ergitilmesi ve ardından bu serme-ergitme işleminin tekrarlanması neticesinde üretim yapılmaktadır. Dolayısıyla

yukarıdaki analiz, toz yatağın resme girmesiyle tamamlanmış olacaktır. Şekil 2.5.'de görüleceği üzere lazerin hareketi sırasında toz yatak-lazer etkileşimi neticesinde yeni fiziksel olaylar meydana gelecektir. Tozlar ısıнын etkisiyle ergiyerek birbiri ile bağ kurmaya ve birleşmeye başlayacaktır. İdeal bir süreç neticesinde, ilk halde boşluklu bir yapı arz eden toz yapı, boşluların kapanmasıyla yoğun bir yapı haline gelecektir. Kısacası faz değişimi ve yapısal değişim aynı anda gerçekleşecektir. Buna ilave olarak arzu edilmeyen bir durum olarak tozutma olgusu ile de karşılaşılabilir. Tozutma, tozun veya sıvılaşmış metal kütlelerin sıçrayarak ergiyik havuz çevresine serpilme olayıdır. Bu olaya Marangoni akışı, geri tepme basıncı ve ani ısı girdisi gibi mekanizmalar yol açmaktadır. Bu da toz yatakta düzensizliklere ve ergiyik havuzda kütle kaybına neden olur.



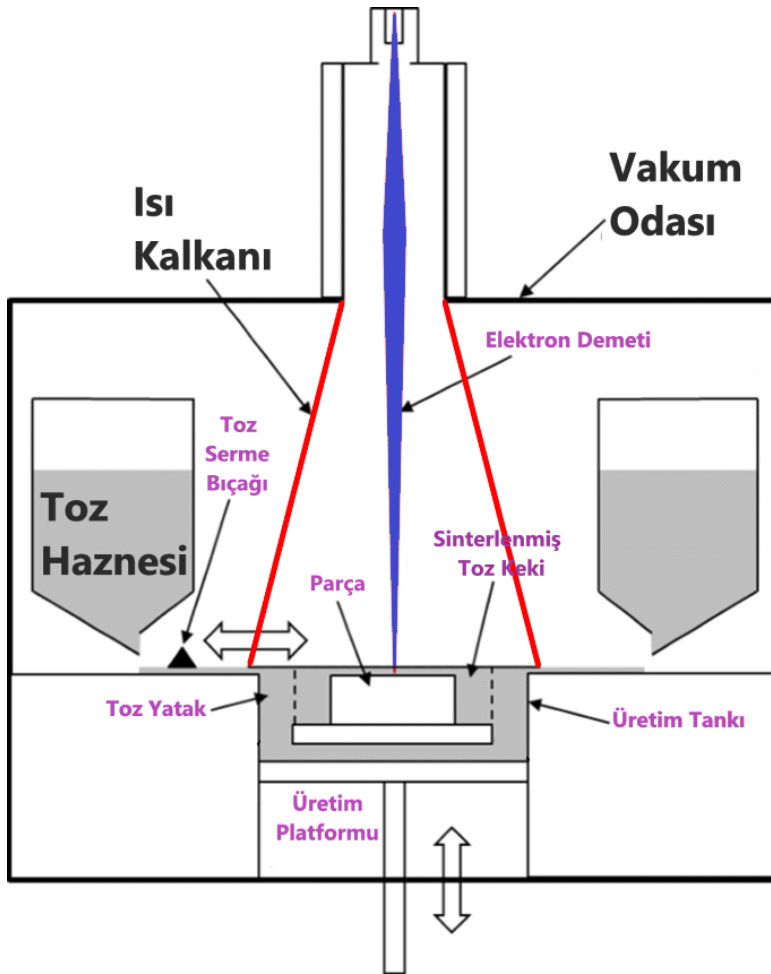
Şekil 2.5. Toz yatak-lazer etkileşimi

2.3. Elektron Demeti Ergitme İşlemi

2.3.1. Genel yapısı

EDE işlemi, üretim metodu bakımından SLE işlemi ile temelde aynıdır: Bir ısı kaynağı vasıtasıyla tozların birbirine ve alt katmanlara kaynaşması yoluyla parça üretilir. Fakat EDE işlemi, elektron tabancası dışında vakum odası, ısı kalkanı gibi özel ekipmanlar ihtiva etmektedir (Şekil 2.6.). Burada EDE işlemini farklı kılan başlıca hususlar şöyle özetlenebilir:

- Isı kaynağı olarak elektron tabancası kullanılır.
- Genellikle SLE işlemine göre daha yüksek tarama hızı, enerji ve daha büyük demet çapı kullanılır. Buna nispetle toz katman kalınlığı ve toz boyutları da artabilir.
- Uygulama vakum ortamında (çok az bir miktar soygaz kullanılır) gerçekleştirilir.
- Her katmanda sintereleme amaçlı, odaklanmamış haldeki elektron demeti ile ön ısıtma yapılır. Bu sebeple bitmiş parça bir toz kekinin/kalıbının içinden temizlenerek alınır.
- Alt levha sıcaklığı 700 °C olup yeni eklenen katmanlarda uygulanan ön ısıtma ile bu sıcaklık daha da artabilir. Bu bağlamda ısı kalkanının önemi daha iyi anlaşılabilir.



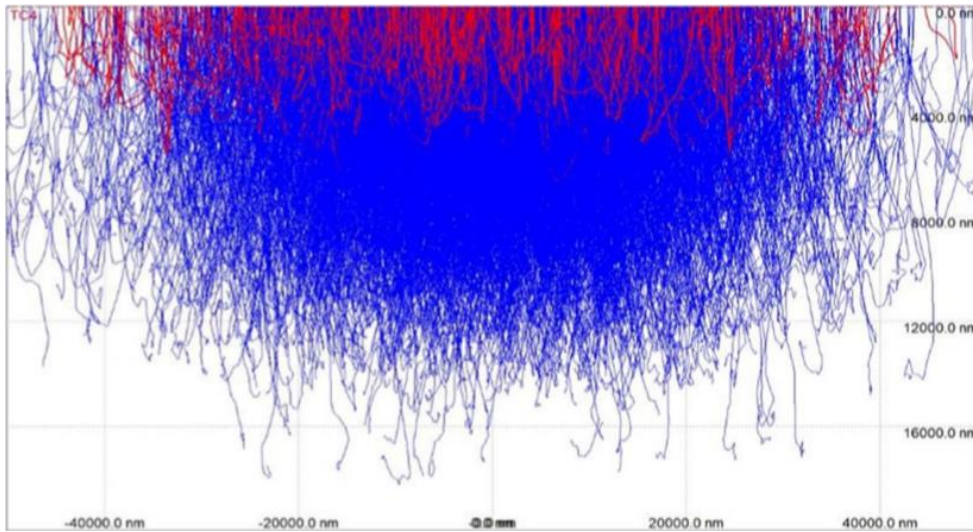
Şekil 2.6. EDE işlemi şematığı

Netice olarak EDE işleminde de SLE işleminde olduğu gibi ergiyik havuzlar meydana gelmekte ve füzyon bu ergiyik havuzların katılaşmasıyla tamamlanmaktadır. Dolayısıyla araştırma ilgi alanları SLE işlemiyle paralellik göstermektedir. Buradaki farklılık daha çok elektron tabancasının modellenmesi ve genel olarak işlemin yüksek sıcaklıkta yürütülmesinden dolayı meydana gelen metalizasyon gibi durumlardır. Ön ısıtma ile yapılan

sinterleme işlemi, negatif elektrostatik şarjdan kaynaklı tozutmayı engellemek için yapılmaktadır. Bu nedenle tozutmaya, toz erozyonu ve toplama gibi problemler beklenmemektedir.

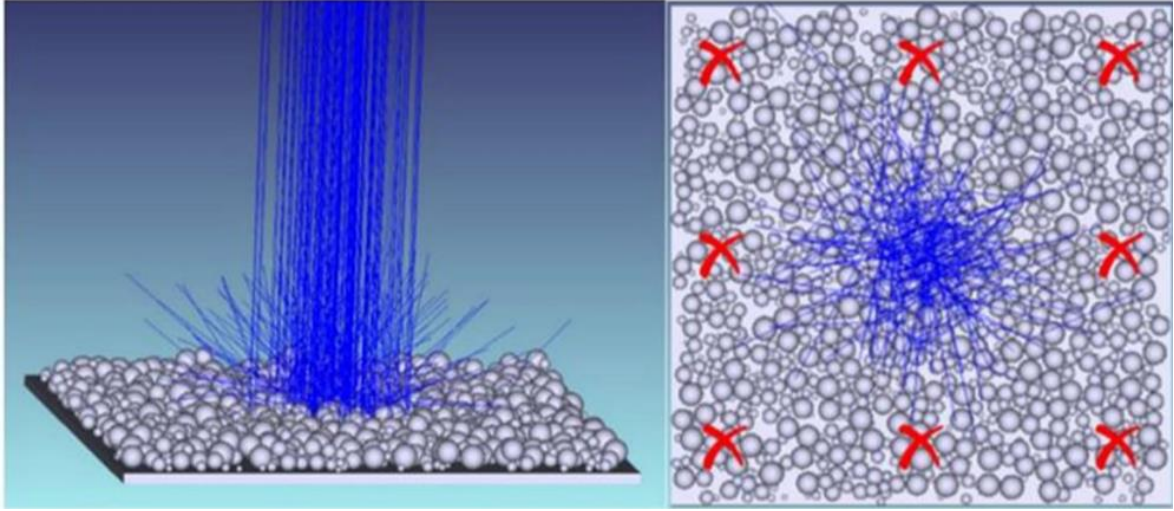
2.3.2. Termo-fiziksel doğası

EDE işleminin termo-fiziksel doğası bazı bakımlardan SLE işlemi ile farklılık göstermektedir. Burada ilk üzerinde durulması gereken konu elektron tabancasının davranışdır. Burada enerji aktarımı, elektronların kinetik enerjisi ile olmaktadır. Oluşturulan elektron alanı neticesinde odaklanarak hızlandırılan elektronlar, metale çarparak ısı açığa çıkarmaktadır. Fotonlara nispeten, elektron penetrasyonu daha derin olabilmektedir. Nitekim literatürde Monte Carlo benzeri ışın takip simülasyonları da Şekil 2.7.'de görüleceği üzere bu penetrasyonun mikrometre seviyelerinde olabileceğini göstermektedir.



Şekil 2.7. Casino kodu ışın takip simülasyonu ile Ti-6Al-4V alaşımında elektron penetrasyonu [1]

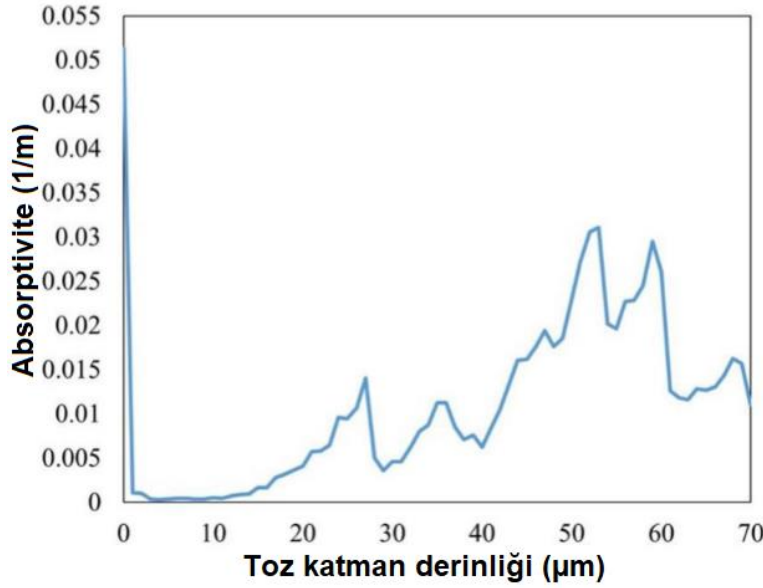
İkinci olarak toz katman kalınlığı EDE işleminde daha fazladır. Bu bakımdan fiziksel anlamda hacimsel ısı kaynağı kullanımı için daha elverişli olduğu düşünülebilir. Nitekim 50~70 mikrometre arasında değişen nominal toz katman kalınlığı elektronların yayılımı için uygun bir yapı oluşturmaktadır. Şekil 2.8.'de görüleceği üzere boşluklu halde bulunan bu yapı, toz katman içi yansımalar sayesinde elektronların katmana nüfuz etmesine olanak vermektedir. Literatürde genellikle bulk malzeme için verilen 0.9 civarı emilim değeri toz yapıda bu nedenle bir miktar daha artmaktadır.



Şekil 2.8. Elektron demeti toz katman etkileşiminin ZEMAX kodu ile incelenmesi [1]

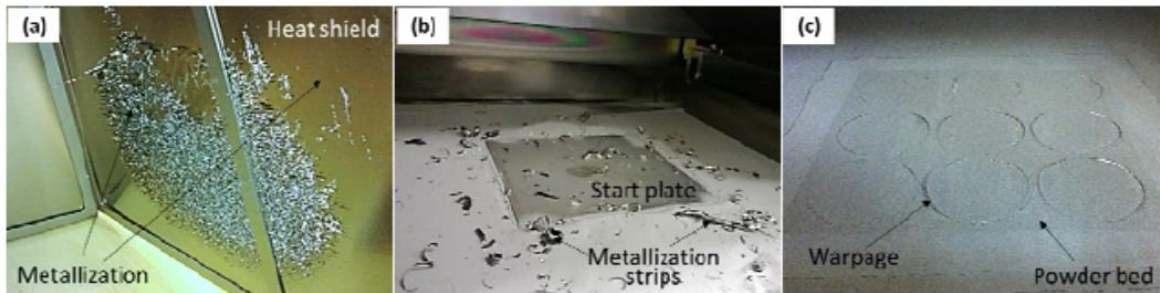
Toz yapıya gelen enerji dağılımı ise Şekil 2.9.'da gösterildiği üzere toz katman boyunca yayılmış şekilde olabilmektedir. Fakat bu durum toz yapının ergimesi ile hızla değişmektedir. Sıvılaştıran metalin derinlik bağlamında Şekil 2.7.'de verilen bulk malzeme penetrasyonunun ötesinde bir penetrasyona olanak sağlayabileceği düşünülemez. Kısacası Şekil 2.9.'daki enerji penetrasyonu kısa sürelidir. Genel olarak enerji emilimi, 10~20 mikrometre mertebesinde olduğundan yüzeysel bir ısı kaynağı kullanımı da değerlendirilebilir. Burada bu enerjinin daha aşağılara nüfuz etmesini sağlayabilecek olgular bağlamında Marangoni akışı ve özellikle geri tepme basıncı akla gelebilir. Fakat vakum ortamında buharlaşma ve meydana gelen muhtemel geri tepme basıncı, SLE'den farklılık gösterecektir.

EDE işleminde buharlaşma yoğun olarak meydana gelmektedir. Bunun başlıca iki sebebi vardır. Bunlardan ilki üretimin sıcak bir ortamda gerçekleşmesidir. Burada sıcaklıktan kasıt ortalama üretim odası sıcaklığıdır. Bu nedenle noktasal sıcaklık bağlamında, büyük demet çapları kullanılması nedeniyle SLE işlemine nispetle sıcaklık yüksek görünmeyebilir fakat EDE işlemi genel olarak daha yüksek enerji kullanılan bir işlemdir. İkinci olarak vakum ortamına yakın düşük basınç, buharlaşmayı kolaylaştırmaktadır. Dolayısıyla üretim odası içinde süregelen bir buharlaşma olmaktadır ve bu durum, kendisini metalizasyon denen bir olguyla açık etmektedir.



Şekil 2.9. Enerjinin EDE işleminde toz katman boyunca emilimine örnek simülasyon [1]

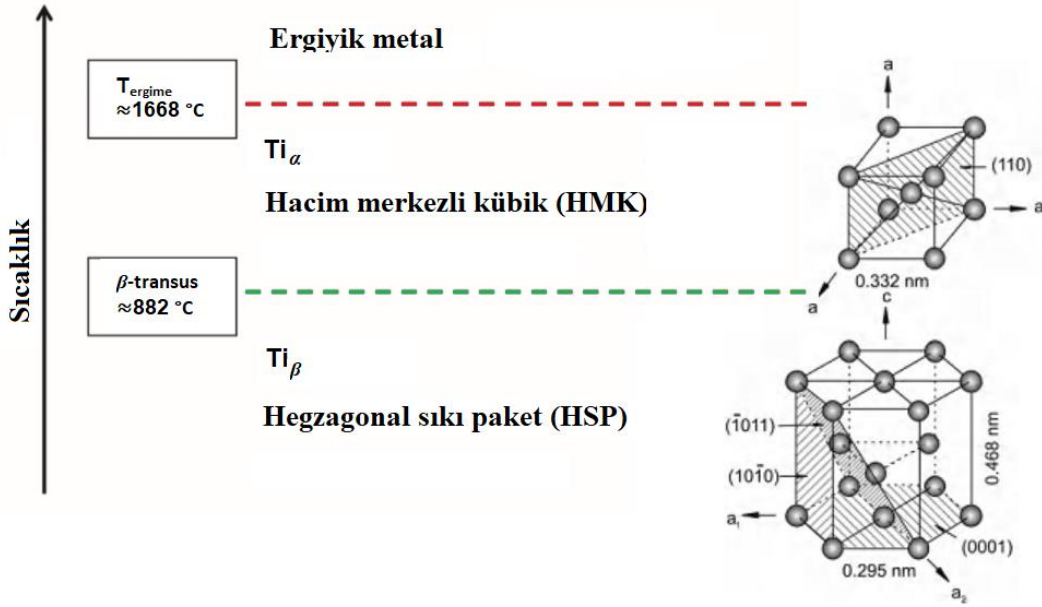
Üretim odasında meydana gelen metalizasyona Resim 2.1.'de örnek verilmiştir. Görüleceği üzere özellikle ısı kalkanı duvarlarında ve zeminde metal öbekleri meydana gelmektedir. Bu durum üretim süreci boyunca kütleli manada ciddi bir buharlaşmanın varlığına delalet etmektedir. Benzer şekilde, buharlaşma kaynaklı belirgin bir enerji kaybından da söz edilebilir. Dolayısıyla EDE işleminde enerji girdisi ile alakalı en büyük belirsizliği belki de bu buharlaşma kaynaklı enerji kaybı oluşturmaktadır. Bu kayıp ergiyik havuz boyutlarının beklenenden az olmasına neden olabilir. Diğer taraftan aynı kayıp, ergiyik havuz derinliğinin beklenmedik şekilde artmasına da dolaylı yoldan sebep olabilir. Çünkü bu tür bir buharlaşma, geri tepme basıncı ile metal sıvı kütesinin havuz çeperlerine itilmesine ve elektronlara yol açılmasına da neden oluyor olabilir. Bu bağlamda SLE işleminde olduğu gibi havuz derinliğinin arttığı durumlar söz konusudur. Fakat vakum ortamında geri tepme basıncının ne denli oluşabileceği ayrı bir sorudur. Burada buharlaşma kaynaklı gaz genişlemelerinin, genellikle kendini sonik patlamalar şeklinde göstermesi muhtemeldir.



Resim 2.1. Üretim odası içinde meydana gelen metalizasyona örnek [2]

2.4. Toz Yataklı Sistemlerde Mikroyapı Oluşumu

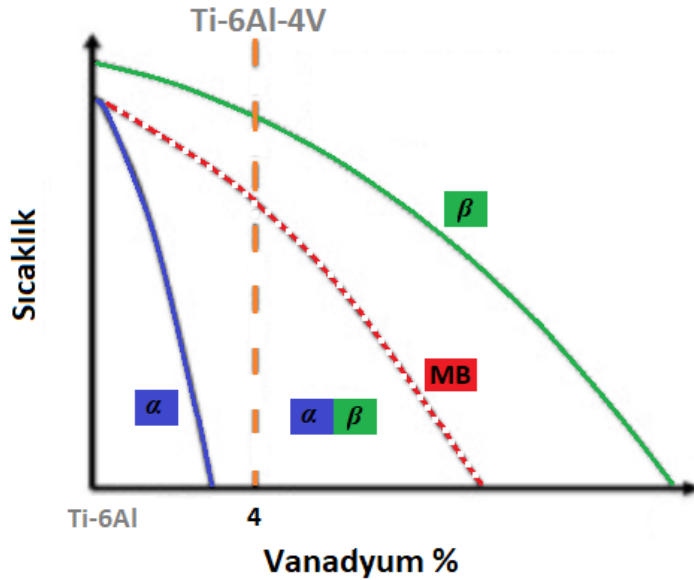
Isıya maruz kalan malzemelerde birtakım değişiklikler meydana gelir. Özellikle ergime sıcaklığının üzerine çıkıldığı SLE ve EDE gibi işlemlerde bu kaçınılmazdır. Ani enerji girdisi neticesinde faz değişimi yaşayan malzeme soğuyarak katılaşır. Toz yataklı sistemlerde bu döngü defalarca tekrarlanabilir ve soğuma oranları oldukça yüksektir. Bu döngü sonucu olarak malzemede mikro düzeyde birçok muhtelif yapı meydana gelmektedir. Oluşan bu mikro yapılar değişik ölçek ve kriterlere göre sınıflandırılabilir. Tane boyutu ve şekli, bu yapıların başında gelmektedir. Tane altı boyutta ise tane dokusu, dislokasyonlar ve kristal yapı gibi mikro yapılar ile karşılaşılmaktadır.



Şekil 2.10.Saf titanyumda kristal yapı

Kristal yapı bağlamında saf titanyum için α (HSP) ve β (HMK) olmak üzere iki adet kararlı yapı bulunmaktadır (Şekil 2.10.). Yaklaşık olarak 882 °C civarında sıcaklık artışı ile beraber β fazına geçiş ve 1668 °C civarı ise ergime başlar. Çeşitli alaşım elementlerinin titanyuma eklenmesi kristal yapıyı etkiler. Oda sıcaklığındaki kristal yapı durumuna göre titanyum alaşımları α , $\alpha+\beta$, β olarak sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma temel olup alfaya yakın, yarı kararlı beta, betaya yakın gibi grupların eklendiği sınıflandırmalar da mevcuttur. Ti-6Al-4V, $\alpha+\beta$ grubu alaşımıdır. İçeriğinde α stabilizatörü olarak alüminyum ve β stabilizatörü olarak vanadyum bulunmaktadır. Bu elementler faz diyagramında α ve β fazın kararlı bir halde beraber bulunduğu bölgeleri mümkün kılar (Şekil 2.11.). Vanadyum oda sıcaklığında β fazın kararlı halde bulunabilmesini sağlarken alüminyum β -transus sıcaklığını 995 derece civarına

yükseltmektedir. Bunun yanı sıra ergime işlemi yaklaşık olarak 1604 (solidüs) ila 1650 (likidüs) °C arasında gerçekleşmektedir.



Şekil 2.11. Vanadyum konsantrasyonunun Ti-6Al alaşımına etkisi

Yeterince yavaş ısınma ve soğumalarda sadece iki faz mevcuttur. Burada yeterince denge halini koruyacak şekilde meydana gelen sıcaklık değişimini ifade etmektedir. Pratik olarak bu mümkün olmasa da yeterince yavaş bir sıcaklık değişiminin bu ideal duruma yakınsadığı düşünülebilir. Bu şekilde ideal bir soğuma ile yaklaşık olarak %90 oranında α ve %10 oranında β faza sahip parçalar elde edilebilir. Buna ilaveten bu iki faz, düşük soğuma neticesinde lamelli yapılar halinde gözükmemektedir. Soğuma oranının yükselmesi ile daha ince lameller elde edilmeye başlar. Bu yapı, Widmanstätten veya sepet örgüsü olarak adlandırılır. Burada α yapısı genel olarak tane sınırında veya Widmanstätten deseni içinde kendini gösterir. Soğuma oranının daha da artması lamellerin incelerek kaybolmasına ve martenzitik yapıların oluşumuna neden olur. Ti-6Al-4V'da bu yapılar desen bağlamında genelde kendini iğnemi veya masif alfa olarak gösterir. Kristal yapı bağlamında ise bu alaşım için literatürde iki martenzitik yapıdan bahsedilmektedir. Bunlardan ilki α' olup HSP yapıdadır. Bu bağlamda normal α ile ayırt edilmeleri kolay değildir. Kristal yapı boyutlarındaki fark ve vanadyum oranı ile ayırt edilebilirler. Daha az yaygın olan bir başka martenzitik yapı ise α'' olup ortorombik yapıdadır. Oluşumu için değişik ısı döngülerinin gerektiği ileri sürülmekle beraber özellikle strese bağlı oluşabildiği de iddia edilmektedir [3].

Martenzitik yapıların oluşumunda değişik fiziksel mekanizmalar rol oynamaktadır. Bu mekanizmalara ilk olarak difüzyon örnek olarak verilebilir. Ti-6Al-4V'da özellikle vanadyum kristal yapı oluşumlarında belirleyici bir elementtir. HSP yapıya sahip martenzitik kristal yapılar, çoğunlukla vanadyumu bünyesinden atmaya fırsat bulamadan ani soğumaya uğrayan yapılardır. Difüzyona zaman tanıyacak yavaş ve ideal bir soğuma, vanadyumun β fazda ve alüminyumun α fazında toplanmasına olanak sağlayacaktır. Dolayısıyla vanadyum ve alüminyumun bu yapılarda değişik oranlarda bulunması görüntülenen desen yelpazesini genişletmektedir. Diğer taraftan stres ise bir diğer faktördür. Özellikle ani sıcaklık değişimleri neticesinde malzeme içinde oluşan stres ve gerinimler değişik yapıların oluşumuna zemin hazırlamaktadır. Burada stresin şiddeti ve oryantasyonu, kristal yapı üzerinde muhtelif etkilere neden olabilir.

2.5. Toz Yataklı Sistemlerde Termal Modelleme

2.5.1. Seçici Lazer Ergitme

SLE işleminin termo-fiziksel doğası isimli bölümde de belirtildiği üzere lazerin metal tozları ile etkileşimi sonucunda birçok fiziksel olay meydana gelir. Tozutma hadisesi, tozların ergimesi ve birbirine sinterlenmesi (faz ve şekil değişimi), kaldırma kuvveti ve yüzey gerilimi gradyanı ile indüklenen sıvı metal hareketi, yüksek buharlaşma ve buna bağlı geri tepme basıncı, sıvı metal yüzeyinde dalgalanmalar ve bozulmalar, ısı kaynağı üstünde bulutumsu yapılar bunlara örnek olarak verilebilir [4]. İşlemin bu denli değişik yönleri olduğu göz önünde bulundurulursa modelleme amaçlı son derece değişik yaklaşımlarda bulunulabileceği görülecektir. Burada önemli olan konu modellemeyi elde edilecek çıktının mahiyeti ve kullanım amacıdır. Esasında SLE işleminde, değişik ilgi alanları oluşturabilecek konuların genişliği sebebiyle modellemede sınır yoktur. Zira son zamanlarda son derece ayrıntılı yaklaşımlar mevcuttur [5-8]. Burada sınır, modelin karmaşıklığı ile beraber gün yüzüne çıkan sorunlar olacaktır. Bunların başında da hesaplama maliyeti ve yakınsama problemleri gelmektedir. Bu bağlamda çalışılacak ölçek, ihtiyaç duyulan model çıktıları ve bu çıktılarından hassasiyet açısından ne beklenildiği gibi konuların başta belirlenerek yol alınması yerinde olur.

SLE işlemi, hareketli bir ısı kaynağı, alt levha, metal tozu ve bunları çevreleyen bir ortamdan (genellikle soy gaz) oluşan bir sistem olarak basitleştirilebilir. Bu sistemin modellenmesine dair üzerinde düşünülmesi gereken temel hususlar Çizelge 2.1.'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. SLE işleminin modellenmesiyle alakalı hususlar

	Sadece İletim (efektif termal iletim)
Tozda ve ergiyik havuzda ısı transferi mekanizması	Yoğunluk farkı ve Marangoni etkisi gibi nedenlerle oluşan konveksiyon (HAD) Tozlar arası radyasyon ve soy gazın etkisi Multi-faz (katı-sıvı-gaz) ısı transferi
	Ergiyik havuz-soy gaz ve ergiyik havuz-toz ara yüz etkileşimleri
Sınırlar ve ara yüz etkileşimleri ve bazı konular	Sabitlenmiş veya hareketli sınırlar Geri tepme basıncı Çeşitli sınır koşulları nedeniyle sistemden ısı ve kütle kayıpları: sabit sıcaklık, doğal / zorlanmış konveksiyon, radyasyon, buharlaşma ve toz tutma kayıpları
Isı kaynağı modellenmesi ve bazı alakalı hususlar	Radyasyon modellemesi Yüzeysel veya hacimsel ısı kaynağı modelleri Enerjinin toz yatağına yayılması ve penetrasyonu Farklı parametrelerin emilime etkisi
Ölçek	Makroskopik, mezoskopik, mikroskopik, nanoskopik
Sayısal ve analitik metotlar	Sürekli ortam modelleri (ör: sonlu farklar yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi ve sonlu hacim yöntemi) veya parçacık modelleri (ör: ayrık elemanlar yöntemi, Lattice-Boltzmann yöntemi, pürüzsüzleştirilmiş parçacık hidrodinamiği ve hibrit modeller) Analitik veya yarı analitik yaklaşımlar
Limitasyonlar	Hesaplama maliyeti ve algoritma kararlılık ve yakınsama problemleri Literatürde malzeme ve toza ait termo-fiziksel özelliklerle alakalı bilgi eksikliği

Ergiyik havuz boyutlarının ve toz yatak boyunca sıcaklık dağılımının makul ölçülerde ve ölçekte hesaplanabilmesi için yukarıda verilen hususlar gözden geçirilmelidir. Esasında bu konuların büyük bir kısmı güncel olsa da hareketli ısı kaynağı problemi üzerine çalışmalar 1940'lara kadar uzanmaktadır. Rosenthal'ın çalışması [9] bu konudaki ilk çabalardan

görülebilir. Bu çalışma birçok yaklaşımın da temeli haline gelmiştir [10, 11]. Bununla birlikte, Rosenthal çalışmasının ilgi alanını ark kaynağı uygulaması oluşturmaktadır. Bu model yarı-durağan duruma dayanmakta ve ihmal edilmesi zor olan faz değişimi, sıcaklığa bağlı özellikler gibi durumları dikkate almamaktadır. Analitik çözümlerin sınırlı oluşu ve bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeler, araştırmacıları sayısal yaklaşımlara dayanan daha sofistike modellere yöneltmiştir. Bununla beraber hesaplama maliyeti ve hız bakımından avantajları olması nedeniyle analitik ve özellikle yarı analitik yaklaşımlar halen ilgi çekebilmektedir [12- 15].

Çizelge 2.1.'de modelleme ilgi alanı olarak verilen her bir hususa yönelik atılan adım, modeli daha karmaşık hale getirir ki bu da daha spesifik bilgi ve hesaplama yeteneği gerektirir. Bu nedenle, daha önce de belirtildiği üzere modelle alakalı beklentiler ve sınırlamalar en başta dikkate alınmalı ve gereksiz karmaşıklıktan arınmış ve makul sonuçlar veren yaklaşımlar tercih edilmelidir. Tozutma veya toplama gibi bazı olgular ilgi alanı değilse, makul sınır koşullarıyla beraber gelişmiş bir efektif termal iletim yaklaşımı mezo ölçekte yeterli bir cevap sağlayabilir. Çünkü efektif termal iletkenlik modeli basit ve geliştirilebilir bir yaklaşımdır. Modelleme basit tutulurken farklı ısı transfer mekanizmaları ve etkileri model içinde sade fonksiyonlar olarak tanımlanabilir. Toz yapının sıvılaştırılmasından kaynaklanan yapısal değişiklikler, konveksiyondan (özellikle Marangoni etkisiyle) kaynaklı sıvı metalin ısı transferindeki artış ve tozlar arasındaki radyasyon etkisi, bu mekanizmalara örnek olarak verilebilir. Marangoni kaynaklı konveksiyon ısı transferi, üzerinde en çok durulan konuların başında gelmektedir. Örnek olarak Ali ve diğerleri [16], basit bir yaklaşımla iletkenliği bir faktörle çarpma yoluna gitmişlerdir. Ladani ve diğerleri [17], konveksiyon etkisini yansıtmak için boyutsuz Marangoni sayısına dayanan bir korelasyon kullanmıştır. Her iki çalışmada da ergiyik havuz genişliği için hesaplama hatası, derinlikten daha yüksek hale gelmiştir. Çünkü iletkenlikteki izotropik bir artırım, derinliğin yanı sıra ergiyik havuzun diğer boyutlarını da arttırmaktadır. Bu nedenle, iletkenlik arttırılırken yön etkisi dikkate alınmalıdır. Bu nedenle Zhang ve diğerleri [18] iletkenliği anizotropik olarak arttırma yolunu tercih etmiştir. Yapılan analiz neticesinde, iletkenliğin derinlik yönündeki artışının en fazla olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu sayede kurgulanan iletkenlik modeli, paslanmaz çelik için yapılmış tek tarama deneylerindeki ergiyik havuz boyutları ile uyum sağlamıştır.

Efektif termal iletim yaklaşımında esas sıkıntı anizotropik iletim çarpanlarının standardının olmamasıdır. Öyle ki bu çarpanlar kullanılan malzemenin yanı sıra lazer enerjisi, tarama hızı

ve demet çapına göre de değişmektedir. Ergiyik havuz genişliği ve boyu, sade bir modelle makul bir hata oranı ile tahmin edilebilmektedir. Fakat SLE gibi küçük demet çaplarının kullanıldığı işlemlerde genellikle penetrasyon tahmini noktasında sıkıntı yaşanmaktadır. Bu bağlamda enerjinin arttığı durumlarda derinlik yönündeki çarpanın ciddi şekilde arttırılması gerekmektedir. Özellikle anahtar deliği rejimlerinde bu belirgin hale gelmektedir. İletim değerindeki ani artış çoğu zaman hesaplama kararlılığını bozabilmektedir. Çünkü derinliği kompanse edecek değeri yakalamak için iletim fonksiyonunun eğimi belirli bir noktada artmaktadır.

Isı transferi mekanizmalarını basit bir şekilde kompanse etmenin bir diğer yolu hacimsel ısı kaynağı yaklaşımıdır. Karışık ısı transferi mekanizmaları eğer modellenemiyorsa veya hesaplama maliyeti çok artıyor ise sade yüzey tipi ısı kaynakları yetersiz kalacaktır. Özellikle geri tepme basıncı kaynaklı metal yüzeyinin deforme olması sonucu enerjinin derinlere nüfuz etmesi, kütle hareketi modellenmeyen durağan modeller için sıkıntılıdır. Yüzeyin derinlik yönünde deforme olduğu bu durumlarda yukarıda belirtilen efektif termal iletim yaklaşımının da bazı problemlerle karşılaşacağı aşıkardır. Bu durumda gelen enerjinin istenilen hacimde uygun bir fonksiyon yardımıyla direk dağıtılması ilgi çekici gelebilir. Bu dağıtım temel olarak iki şekilde yapılabilir: geometrik veya emilim profiline göre [18]. Burada da benzer bir sorun olarak ısı kaynağını tanımlayan fonksiyonların bir standardının olmaması değerlendirilebilir. Burada standarttan kasıt hacimsel ısı kaynağı parametrelerinin genellikle deneysel bir çıktıya dayanarak duruma göre kalibre edilmesidir. Dolayısıyla daha efektif ve genel çözümler sunabilecek ısı kaynağı modelleri üzerine araştırmalar artmıştır. Örnek olarak Gusarov ve Smurov [19], toz-lazer etkileşimi, toz ve alt levhanın emilim davranışı için bir model önermiştir. Yin ve diğerleri [20], Ti-6Al-4V'de ergiyik havuz simülasyonları için hacimsel bir Gauss modeli değerlendirmişlerdir. Hesaplamalar, düşük tarama hızları dışında makul sonuçlar üretebilmiştir. Buna sebep önceden de belirtildiği üzere enerji yoğunluğunun artması ile beraber ortaya çıkan değişik mekanizmalardır. Mishra ve diğerleri [21] iki tip hacimsel ısı kaynağı modelini ele almış ve eksponansiyel emilim profiline sahip Gauss ısı kaynağının yumurta biçimli hacimsel kaynaktan daha iyi olduğunu belirtmiştir. Mishra ve Kumar [22], tek ve çoklu tarama SLE simülasyonları için Beer-Lambert yasasına dayalı hacimsel bir ısı kaynağı modeli kullanmışlardır. Yüksek enerji yoğunluğuna maruz kalan ergiyik havuzlar dışında literatürle iyi bir uyum olduğunu bildirmişlerdir. Bu çalışmada Ti-6Al-4V değerlendirilmiş ve karşılaşılan sıkıntı Yin ve diğerleri [20] ile aynıdır. Benzer şekilde yine Ti-6Al-4V için Ali ve diğerleri [16], iletim

çarpanına ek olarak derinlik yönünde bir parabolik ilişki kabul etmiştir. Isı kaynakları hakkında genel ve kapsayıcı bir bilgi Zhang ve diğerlerinin [18] makalesinde bulunabilir. Çalışmada çeşitli ısı kaynağı modelleri gözden geçirilmiş ve deneysel ergiyik havuz boyutlarına karşı performansları incelenmiştir. Modellerin tümü [18] ergiyik havuz derinliklerini belirgin şekilde deneysel değerlerden az tahmin etmiştir.

Kullanılan modellerle alakalı bir diğer sıkıntı ise emilim değerindeki belirsizliktir. Öyle ki toz yatağa olan enerji girdisindeki bu belirsizlik çoğu modellemeyi anlamsız hale getirmektedir. SLE işleminde Ti-6Al-4V için genellikle ortalama 0.3 ila 0.8 arası değerler değerlendirilmektedir. Bu son derece geniş bir değer aralığıdır ve ciddi hesaplama farkına neden olabilir. Bu büyük farkın sebebi toz yatak yapısı kaynaklı durumlar ve muhtemel anahtar-deliği rejimidir. Son derece ayrıntılı modeller ile zaman ve konuma bağlı olarak direk ışın simülasyonları ile hesaplamaya yönelmek her daim mümkün olmayabilir. Gerçeğe yakın bir simülasyon için toz yatak ergimesi, sıvılaşmaya müteakip sıvı yüzeyinin takibi gerekmektedir. Bu yüzeye gelen ışınların simülasyonu eğer gerçekçi yapılmak istenirse hesaplama maliyeti açısından oldukça yüksektir. Zaman adımı olarak mikro saniyelerin altına inilmesi gerekebilir. Bu süre zarfı içinde tüm fiziksel mekanizmalar modele dahil edilmelidir. Çünkü yukarıda verilen tüm fiziksel mekanizmalar bu enerji girdisine göre meydana gelmekte ve meydana gelen her fiziksel mekanizma da bu girdiyi etkilemektedir. Sonuç olarak mevcut bilgisayar teknolojisi ve yaklaşımlar ile çoğu mikrometre ve mikrosaniye ölçeğin üstü simülasyonlar için bu inandırıcı bir yaklaşım olmayacaktır. Dolayısıyla mezo ölçekte simülasyonlarda, çoğu orta ve ortanın üstü karmaşıklığa sahip modeller için bu değerler hazır girdi olarak verilmesi gerekmektedir. Fakat literatür bu bağlamda tatmin edici bir öneri sunmamaktadır.

2.5.2. Elektron Demeti Ergitme

SLE işlemiyle birçok benzerlik barındıran EDE işlemi, ilgili bölümde belirtildiği üzere özellikle vakum ortamında meydana gelen buharlaşma durumu ile ayrı bir yere konumlanmaktadır. Burada buharlaşma etkisi hem enerji hem de malzeme anlamında belirgin düzeydedir. Bu etki hem makro hem mikro ölçekte kendini hissettirebilir. Örnek olarak alaşım içeriği değişebilir, özellikle alüminyum da ciddi kayıplar görülebilir [23, 24, 25]. Enerji bağlamında ise esas önemli olan durum, buharlaşma kaynaklı kaybın enerji girdisi ve başka muhtelif etkilerinin ergiyik havuz bağlamında oluşturduğu belirsizliktir.

Genel olarak buharlaşma kaynaklı etkiler modellemelerde göz ardı edilmektedir. Daha düşük hesaplama maliyeti nedeniyle, efektif termal iletim modelleri yaygın olarak tercih edilmektedir [26-29]. İhmal edilen etkileri kompanse etmek maksadıyla farklı ısı kaynağı modellerinin kullanılması sıklıkla başvurulmuş bir yöntemdir [30, 31, 32]. Fakat burada sıkıntı daha önce de belirtildiği üzere giren enerjinin nasıl yayılacağından ziyade giren enerjinin ne olduğu ile alakalıdır. Geri tepme basıncının ihmal edilip edilemeyeceği bir başka deyişle enerjinin ne oranda ergiyik havuz dibine taşındığı ise ayrı bir konudur. Nitekim geri tepme basıncının ihmal edildiği ama ergiyik bölgenin sıvı olarak modellendiği çalışmalar mevcuttur [33]. Bu tür çalışmalarda sadece Marangoni akışı değerlendirilmekte ve sıvı yüzeyinde geri tepme basıncı kaynaklı deformasyon hesaba katılmamaktadır. Bu noktadan duruma bakılırsa sıvı modellemenin efektif termal iletim modellerine göre ne ölçekte bir getirisi olabileceği iyi değerlendirilmelidir. Buharlaşma kaynaklı belirsizlik ve geri tepme basıncı söz konusu olmasa bile EDE işlemi açısından sıvı model yaklaşımı SLE'ye göre daha anlamlı olabilir. Çünkü EDE işleminde demet çapı ve ısı kaynağı enerjisi yüksek olduğundan geniş havuzlar meydana gelmektedir. Bu bağlamda derinlik yönü dışındaki diğer kartezyen yönlerde sıvı hareketi, ergiyik havuz boyutunu SLE'ye göre daha çok etkileyebilir. Özetle geniş ergiyik havuzlar daha da genişlemeye meyilli olabilmektedir. Bu bağlamda sıvı modelleme, hesaplama maliyetine rağmen bir parça daha cazip hale gelmektedir. İkinci olarak buharlaşma kaynaklı etkilerin incelenmesine de olanak sağlayabilir. Çünkü buharlaşma kaynaklı enerji kaybı, muhtemel geri tepme basıncı ve düzey deformasyonu, sıvı modellemeyi zaten gerektirmektedir.

Netice olarak buharlaşma kaynaklı enerji kaybı ve muhtemel geri tepme basıncı ergiyik havuz profili ciddi oranda etkileyebilir. Bu iki durumun incelenebilmesi için bir şekilde buhar fazın bizzat kendisinin (başka bir faz alanı olarak) veya etkisinin ifade edilmesi gerekmektedir. Gazın açıkça başka bir faz alanı olarak tanımlanması, bazı avantajlar (ör: hareketli gaz-sıvı ara yüzeyi bakımından) sağlayabilir [34, 35, 36]. Fakat bu tür modellemeler hesaplama maliyeti bakımından sıkıntı oluşturmaktadır. İkinci bir yaklaşım olarak gazın sıvı kütle üzerindeki muhtemel etkilerinin sınır şartı olarak ifade edilmesidir. Burada Anisimov metodu benzeri yaklaşımlar tercih edilmektedir [37, 38]. Fakat bu şartların EDE işlemi için veya daha yalın bir ifadeyle özellikle vakum ortamında nasıl ifade edileceği düşünülmesi gereken bir durumdur.

2.6. Toz Yataklı Sistemlerde Mikroyapı Modellemesi

Toz yataklı sistemlerde mikroyapı modellemesi, termal modellemede olduğu gibi amaç ve limitasyonlar dikkate alınarak yapılmalıdır. Mikroyapı modellemesine genel bir bakış Şekil 2.12.'de sunulmuştur. Şekilde genel bir yapı sunulmakla beraber bu resmin dışında kalan yaklaşımlar veya hibrit modeller de mevcuttur.



Şekil 2.12. Mikroyapı modellemesine genel bakış

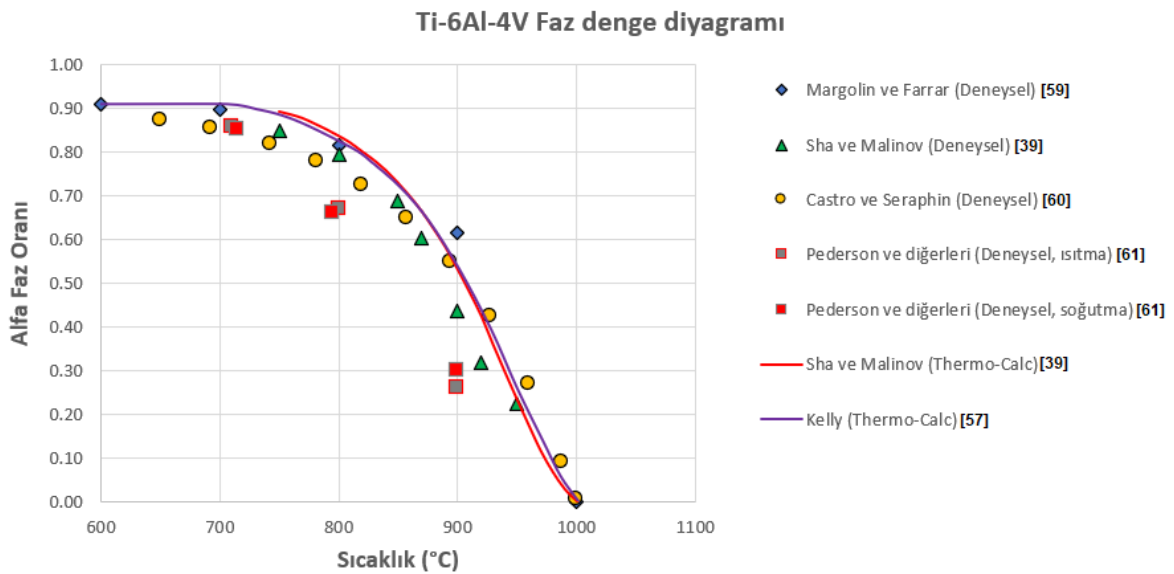
İstatistiksel yaklaşımlar bağlamında özellikle hücresel otomasyon popüler hale gelmiştir. Monte Carlo ile beraber bu yaklaşım daha çok tanecik büyümesi ve yapısına yöneliktir. Diğer taraftan detay bağlamında Faz-Alan denklemleri öne çıkmaktadır. Bu yaklaşımda mikroyapı ile alakalı olarak tanecik büyümesi, dentrit oluşumu, kristal yapı ve yönelimi gibi birçok değişik husus üzerine model kurulabilir. En önemli avantajı ise ara yüzey takibine ihtiyaç bırakmamasıdır. Fakat hesaplama maliyeti açısından bu yaklaşım makro ölçekte uygulanabilir değildir. Sunulan yaklaşımlar ile alakalı detaylı bilgi için verilen referanslara müracaat edilebilir. Bu yaklaşımlara ek olarak destekleyici ve temel olması manasında Calphad [46] gibi sayısal termodinamiğe dayalı metotlara sıklıkla başvurulmaktadır. Termodinamik dengeye [47] dayalı bu metotlar malzeme kinetiğini tek başlarına açıklamaları da bir başlangıç ve dayanak olması bağlamında oldukça önem arz etmektedir.

Yukarıda bahsedilen yaklaşımlar dışında, meydana gelen fiziksel olayların açık bir şekilde modellenmesi yoluna da gidilebilir. Bu durumda ergiyik metal akışı, difüzyon ve artık gerilme gibi birçok karmaşık olayın ayrı ayrı kurgulanması gerekmektedir. Fakat örnek olarak Ti-6Al-4V gibi üçlü sistemlerde difüzyon mekanizması oldukça karışıktır. Sıcaklığa bağlı difüzyon özellikleri, alaşım içindeki metallerin kendi konsantrasyon miktarının yanı sıra diğer metallerinin miktarından da etkilenmesi, sıcaklığa bağlı hacimsel genleşme veya daralma, Kirkendall ve Soret etkileri düşünülmesi gereken olgulardır. Benzer şekilde artık gerilmeler içinde detaylı ve hesaplama maliyeti gerektiren termo-mekaniksel analizlere

ihtiyaç duyulmaktadır. Bu fiziksel olayların daha sade şekilde modellendiği çekirdeklenme, difüzyona dayalı çeşitli faz dönüşümleri içeren yaklaşımlar da bulunmaktadır [48].

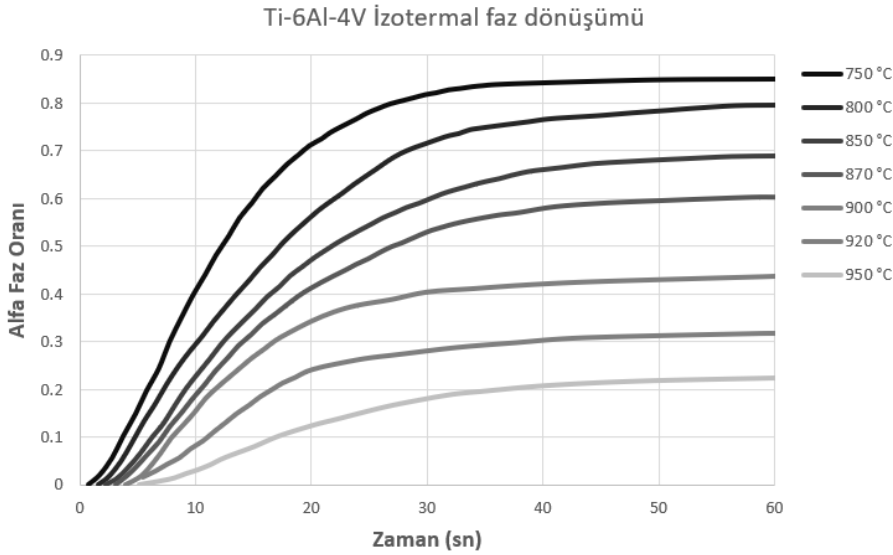
Yukarıda zikredilen modeller için en temel sıkıntı hesaplama maliyetidir. Bu sebeple olgusal yaklaşımlar son derece yaygındır. Termal işlem neticesinde oluşan hacimsel kristal yapı miktarı, mikroyapı bağlamında kıymetli bir bilgidir. JMAK (Johnson–Mehl–Avrami–Kolmogorov) yaklaşımı bu alanda sıklıkla baş vurulan bir yöntemdir. Sıcaklığın zamana göre değişimi bu yöntemin uygulanması için yeterli bir bilgidir. Fakat bu yaklaşım özellikle sıcaklığın periyodik olarak süratle değiştiği eklemeli imalat yöntemleri için sıkıntılar içermektedir. Buna ilave olarak oluşan martenzitik yapılar bağlamında da yardımcı olmamaktadır. Bütün bu kusurlara rağmen uygulama bakımından kolaylığı nedeniyle eklemeli imalat sistemlerinde de tercih edilmektedir [49-58]. Bu çalışmalar genel olarak mevcut yaklaşımın geliştirilerek eklemeli imalat sistemlerine adapte edilmesi üzerinedir. Martenzit miktarı tahmini için genellikle Koistinen-Marburger denklemini baz almaktadırlar.

Şekil 2.13.'de çeşitli çalışmalardan Ti-6Al-4V için faz denge diyagramı sunulmuştur. Burada araştırmacıların kullandığı yöntem, deney ortamı ve düzeneği, denge durumu için beklenen süre, denge sıcaklığına gelmeden önce uygulanan işlem ve alaşım elementleri dışında saflığı bozan elementlerin etkisi farklı neticelerin alınmasına neden olmaktadır. Yine de bazı konular için bir konsensüs olduğu düşünülebilir. Yeterince yavaş ideal bir soğuma neticesinde %90 civarı alfa yapının elde edilmesi beklenebilir.



Şekil 2.13. Ti-6Al-4V Faz denge diyagramı

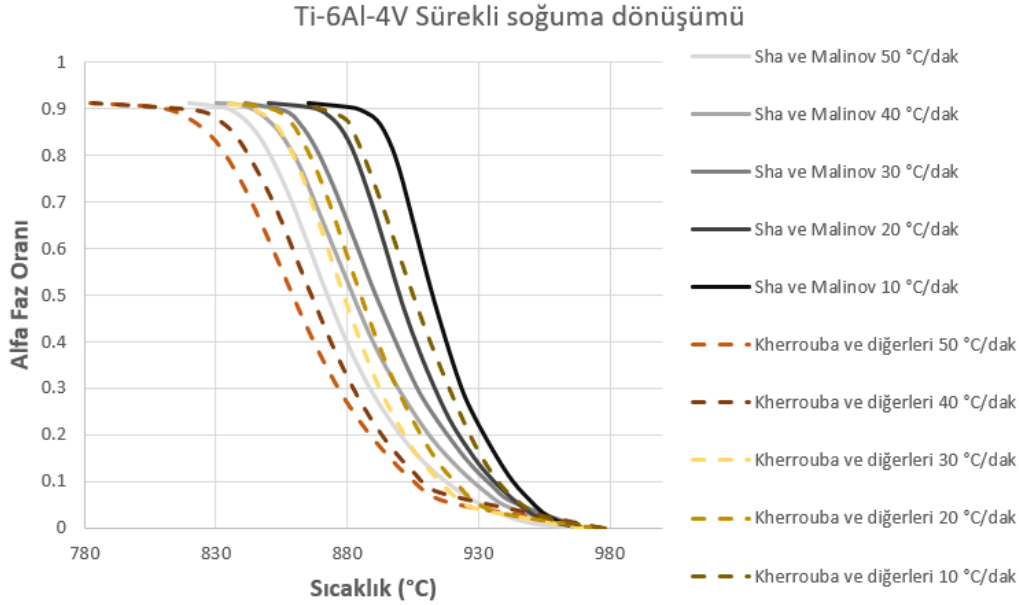
Denge faz diyagramları bir referans noktası olması nedeniyle önemlidir fakat sürecin kinetiği bağlamında bir şey söylememektedir. Hatta termal süreç boyunca faz denge diyagramındaki denge konumlarına hiç ulaşılmayabilir. Diğer taraftan izotermal faz dönüşümleri kinetik modellemeye atılmış ilk adım olarak düşünülebilir. Bu dönüşümler genellikle beta transus sıcaklığının üzerinde bir sıcaklıkta yeterince bekletilen numunenin ani soğutulması neticesinde elde edilirler. İstenilen sıcaklığa varıldığı an sıcaklık sabitlenerek kristal yapı dönüşümü zamana bağlı olarak izlenir. Şekil 2.14.'de değişik sıcaklıklarda tamamen beta bir yapının zamana bağlı dönüşümleri sunulmuştur. İzotermal faz dönüşümleri bağlamında en büyük eksiklik sistemin diğer yönden ($\alpha \rightarrow \beta$) nasıl hareket edeceği konusunda bilgi vermemesidir. Şüphesiz bunda zorluklar bulunmaktadır. Alaşım elementlerinin homojen dağıldığı tamamen bir alfa yapının aniden ısıtılarak bu sıcaklıklarda bekletilmesi neticesinde sistemdeki kristal yapı dönüşümünün incelenmesi şüphesiz cazip olurdu. Fakat böyle bir başlangıç yapısı, vanadyumun varlığı nedeniyle ancak son derece ideal bir martenzitik yapı olabilirdi. Daha önce belirtildiği üzere ideal bir dönüşüm neticesinde oda sıcaklığında bir miktar beta yapı oluştuğundan bu tür bir yapının elde edilmesi kolay değildir.



Şekil 2.14. Ti-6Al-4V İzotermal faz dönüşümü (β -transus üstü sıcaklıktan ani soğutma ile) [39]

Dönüşüm kinetiği bağlamında başlıca üç durum ile karşılaşılabılır. Bunlardan ilkin Şekil 2.14.'deki gibi izotermal faz dönüşümü örnek verilebilir. Kısacası sıcaklığın sabit, zamanın ilerlediği durumdur. Burada değişimin meydana gelip gelmeyeceği itici bir gücün/potansiyel farkın varlığı ile ilgilidir. İkinci bir durum ise zamanla beraber sıcaklığın azalmasıdır ki bu

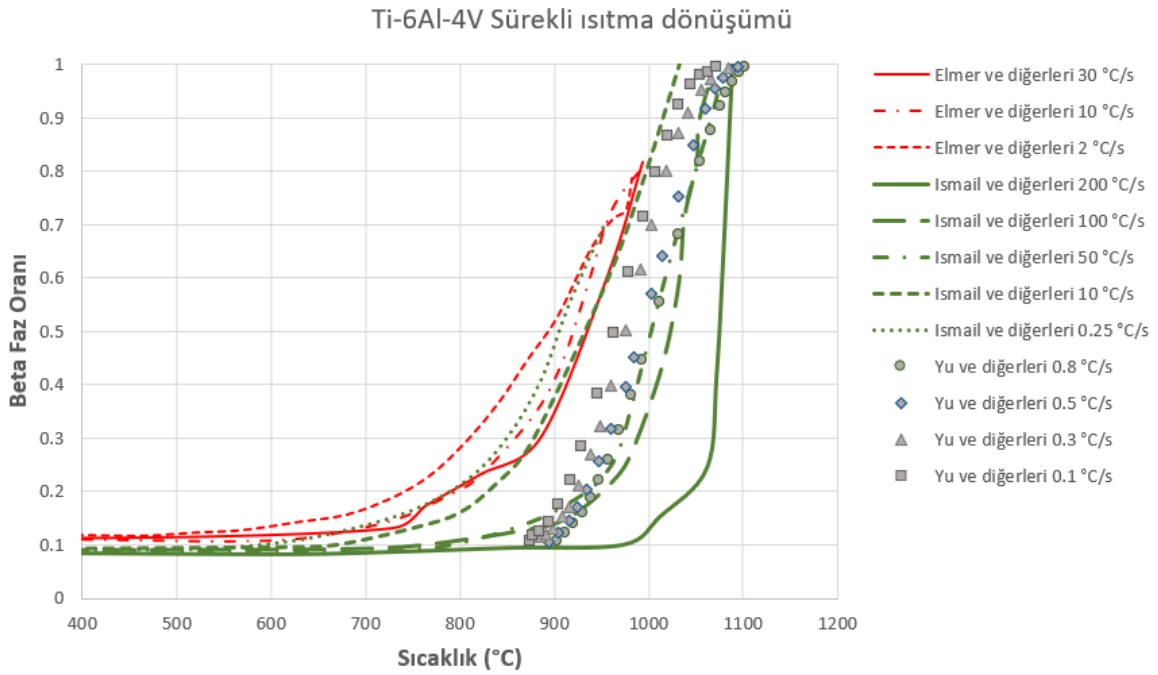
soğuma durumudur. Bu durumda sıcaklığın azalması, sistem üzerinde sıcaklığa bağlı değişen muhtelif itici güçlerin de sürekli değişmesine neden olabilir. Soğuma bağlamında en sade durum olarak sürekli sabit soğuma düşünülebilir. Örnek olarak Şekil 2.15.'de iki farklı kaynaktan sürekli soğuma sürecinde dönüşümler verilmiştir



Şekil 2.15. Ti-6Al-4V Sürekli soğuma faz dönüşümü [39, 52]

Bu eğriler, izotermal faz dönüşümünde olduğu gibi beta transus sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa ısıtılıp yeterince bekletilen numunenin sabit bir soğuma oranı ile soğutulurken gerçekleşen kristal yapı dönüşümünü ifade etmektedir. Görüleceği üzere sabit bir soğutma altında bile deneye bağlı olarak literatürde farklı eğriler bildirilebilmektedir.

Şekil 2.16.'da karşılaşılabilecek üçüncü durum olan ısıtma ile alakalı üç ayrı kaynaktan eğriler sunulmuştur. Sabit ısıtma oranı altında zamanla beraber sıcaklık artmaktadır. Daha önce de belirtildiği üzere çeşitli sebeplerden dolayı kaynaklar arasında farklar olabilmektedir. Fakat Şekil 2.16.'da ilk göze çarpan genel durum, ısıtma hızları arttıkça yüksek sıcaklıklarda alfa yapıların korunabildiğidir. Bu durum kısa bir süreliğine mi yoksa termodinamik bir denge durumu mudur tartışılabilir. Buna ilave olarak dönüşüm başlama sıcaklıkları da ısıtma oranı ile beraber ötelenmektedir. Kısacası beta transus sıcaklığı termal geçmişe göre değişiklikler gösterebilmektedir [63, 64, 65]. Hatta tavlama sonucunda yüksek sıcaklıklarda (1000 °C) dönüşüme uğramamış alfa fazlarına rastlanabilmektedir [66].



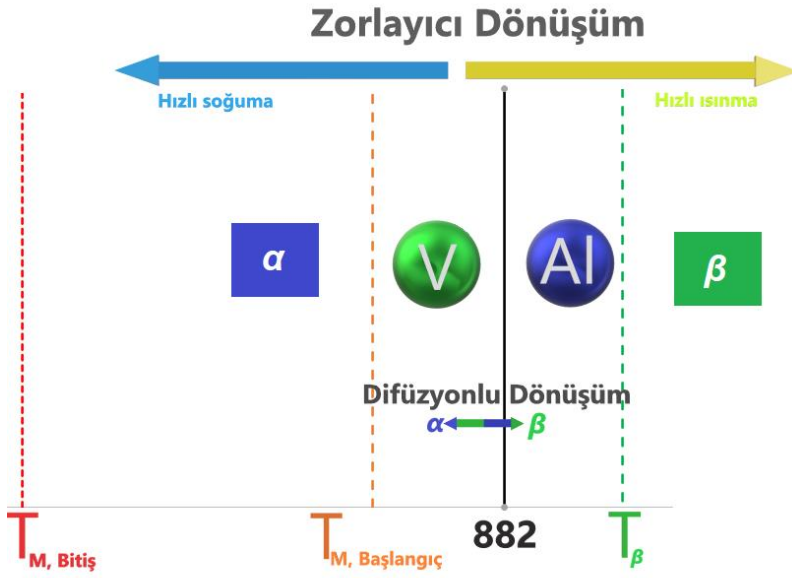
Şekil 2.16. Ti-6Al-4V Sürekli ısıtma faz dönüşümü [62, 63, 64]

Şekil 2.16.'da bir diğer göze çarpan husus ise dönüşüm oranı eğrilerinin 1100 °C'ye doğru iyice dikleşmesidir. Isıtma oranındaki artışa rağmen beta transus ötelemesinin sönümlendiği gözükmemektedir. Bu aslında direk olarak difüzyonsuz dönüşümün habercisidir [49]. Burada iki ayrı mekanizma gözükmemektedir. Eğer ısıtma oranı yüksek ise, malzeme bir an önce sıcaklıkla beraber kristal yapısını dönüştürme ve genişleme eğilimi içine girmektedir. Kısacası bu durumda beta faz oluşumu için alaşım elementlerinin difüzyon yoluyla (uzun-menzilli) hareket etmeleri artık beklenmemektedir. Bu tür bir dönüşüm bu tezde zorlayıcı dönüşüm olarak ifade edilebilir.

Soğuma sırasında meydana gelen ani dönüşüm de ısıtmadaki davranışla paralellik göstermektedir. Ani soğuma uzun-menzilli difüzyona izin vermemektedir. Beta yapının oda sıcaklığında varlığını koruyabilmesi için yüksek vanadyum oranına ihtiyacı vardır. Fakat vanadyum difüzyonuna fırsat tanınmayınca zorlayıcı dönüşüm ile beraber, beta yapılar alfaya dönüşmektedir. Fakat bu alfa yapılar idealden fazla vanadyum içermekte ve dolayısıyla martenzitik yapılar (α' , α'') ortaya çıkmaktadır. Ani sıcaklık değişiklikleri neticesinde oluşan yapılarda, ani genleşme ve büzülme neticesinde oluşan gerilim ve gerinimlerin de etkisi vardır. Bu yapılar gerilimin ortadan kalkmasıyla hızlıca alfa-beta yapılara dönüşebilirler. Bunun için bazen üretilen parçanın tabladan sökülmesi bile yeterli olur. Aksi halde stres giderici ısıtma işlemleri neticesinde bu dönüşüm sağlanabilir [66-70].

Martenzit yapıların sınıflandırılması bağlamında sorunlar [71] olmasına karşın çoğu araştırmacının bildirdiği bazı kabuller vardır. Genel olarak 410 K/s üzerindeki soğuma oranları neticesinde α' denilen yapı oluştuğu kabul görmektedir [49, 57, 58, 72]. 20-410 K/s arası ise masif alfa denilen yapı gözlemlenmektedir [49, 57, 58]. Bu yapıyı martenzitik olarak kabul eden yazarlar da mevcuttur [50, 55]. Bu yapı iğneli martenzit yapının aksine optik mikroskop altında desensiz ve beyaz gözükmemektedir. Fakat BSE analizi ile vanadyum bakımından zengin ultra ince şerit ve noktalar gözlemlenmektedir [72]. Bu bağlamda zorlayıcı ve difüzyonlu dönüşümün kıyaslanabilir olduğu ara bir form olarak da değerlendirilebilir.

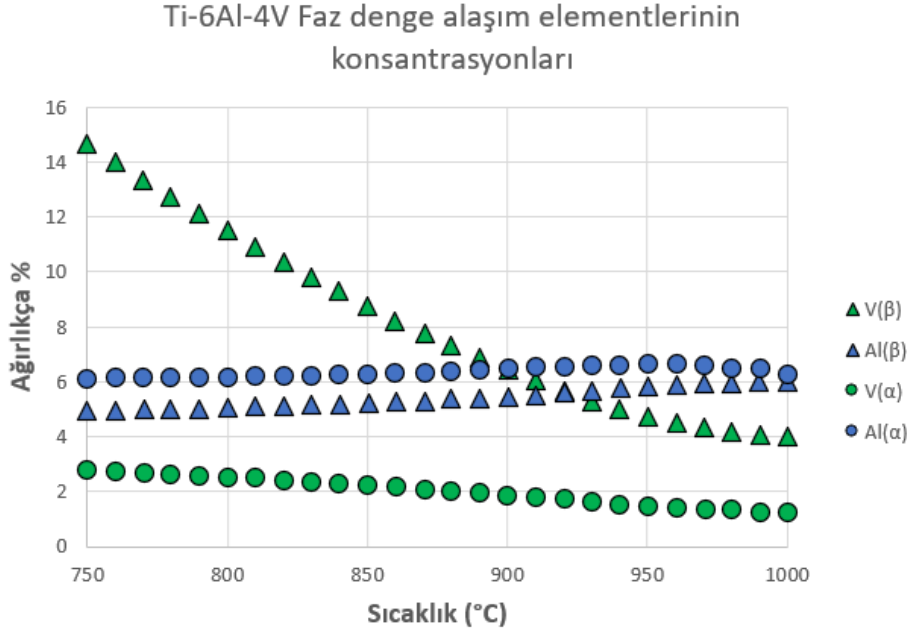
Yüksek alt levha sıcaklığı nedeniyle EDE işleminde lamelli yapılar gözlemlenmektedir. Diğer taraftan SLE işleminde genellikle iğnemsiz martenzit yapılar ise karşılaşılmaması yukarı bilgiler ışığında beklenen bir durumdur. Zira iki işlemde de 103~108 K/s soğuma oranlarına ulaşılmaktadır [66, 73] fakat SLE işleminde tabla sıcaklığı genellikle oda sıcaklığındadır. Böyle yüksek soğuma hızları neticesinde oluşan yapıların anlaşılabilmesi anlamında element alaşımları büyük rol oynayabilir. Örnek olarak lamelli bir yapıda beta fazında vanadyum oranları %30'lara kadar çıkabilmekte, bunun yanında alüminyum oranları oldukça düşük olabilmektedir [74, 75]. Diğer taraftan alfa fazında vanadyum oranı düşük olurken alüminyum oranı alaşım oranını geçebilmektedir. Beta fazın soğuma sırasında yapısını koruyabilmesi için 5~25 oranında vanadyum barındırması gerekebilir [75]. Alfa fazın ise martenzitik olmaması için vanadyumlarından kurtulması gerekmektedir. Tan ve diğerleri [76] martenzit yapıda vanadyum konsantrasyonun 3.5'in üzerinde olduğunu buna mukabil normal HSP yapılarda ise 3'ün altında olduğunu bildirmişlerdir. Kazantseva ve diğerleri [77] SLE sonucu üretilen numunelerde α' ve az miktarda α'' gözlemlemişlerdir. Bu çalışmayı önemli kılan birkaç husus bulunmaktadır. Yazarlar, ağırlıkça vanadyum oranın 4.65 az olduğu beta fazların α' martenzite dönüştüğünü bildirmişlerdir. Diğer taraftan α'' yapısının vanadyumca zengin (9~13) bölgelerin içinde ağırlıkça 5.45~8 oranında vanadyum ihtiva ettiği bildirilmiştir. Belki vanadyum oranının yanı sıra alüminyum oranı martenzitik yapıların oluşması ve sınıflandırılmasında bir başka parametre olabilir. Aynı çalışmada ortorombik bir yapı olan α'' martenzitin α' ya göre daha yumuşak olduğu ve sünekliği arttırdığı da bildirilmiştir.



Şekil 2.17. Ti-6Al-4V Kristal yapı dönüşüm mekanizması

Kristal yapı dönüşüm mekanizması difüzyon bağlamında sanıldığından daha karışık olabilmektedir. Şekil 2.17.'e bakılırsa esasında iki ayrı bölge olduğu düşünülebilir. Eğer saf titanyum olmuş olsaydı 880 °C civarının altında her daim, yapı alfa olma eğiliminde olacaktı. Şekil 2.18.'de Thermo-Calc yazılımı tarafından hesaplanan denge durumu için fazlardaki muhtemel alaşım element konsantrasyonları sunulmuştur. Görüleceği üzere alfa fazı vanadyumunu azaltma eğilimi içindedir. Bu yüzden difüzyon yoluyla, vanadyumlarını beta fazları oluşturarak bu fazda depolamaya başlar. Böylelikle vanadyumu azalmış HSP yapı, ideal hale gelir ve karşılığında ise bir miktar HMK yapıyı kabullenmiş olur. Örnek olarak Şekil 2.14.'deki 880 °C'nin altında eğrilerdeki değişimi ele alalım. Bu durumda alfa yapı bu sıcaklıklar için idealdir. Dolayısıyla dönüşüm başlar fakat vanadyum buna direnç gösterir. Bu yüzden vanadyum beta fazın içine süpürülmeye başlar. Bu süreç ta ki beta faz vanadyum açısından doyuma ulaşana kadar devam eder. Bu yüzden Şekil 2.14.'de eğrilerdeki eğim bir müddet sonra azalmaya başlar. Dönüşüm yavaşlar. Çünkü alfa yapı tercih edilse de vanadyumları saklayacak beta yapılar doymuştur ve dönüşümün devam etmesi azalan beta yapılarıdaki vanadyum oranını daha da yukarı çekecek ve beta fazlar aşırı doymuş hale gelecektir. Diğer taraftan 880 °C üzerindeki eğrilere bakılacak olursa durum çok farklıdır. Bu sefer beta fazı idealdir ve yapı tamamen beta fazındadır. Şekil 2.18.'e bakılırsa bu sefer alüminyum varlığı beta fazını rahatsız etmektedir. Bu yüzden beta fazı fazla alüminyumları saklaması için alfa fazının oluşumuna izin vererek alüminyumları bu faza süpürmeye başlar. Bu süreç beta fazı, alüminyum açısından ideal hale gelinceye kadar

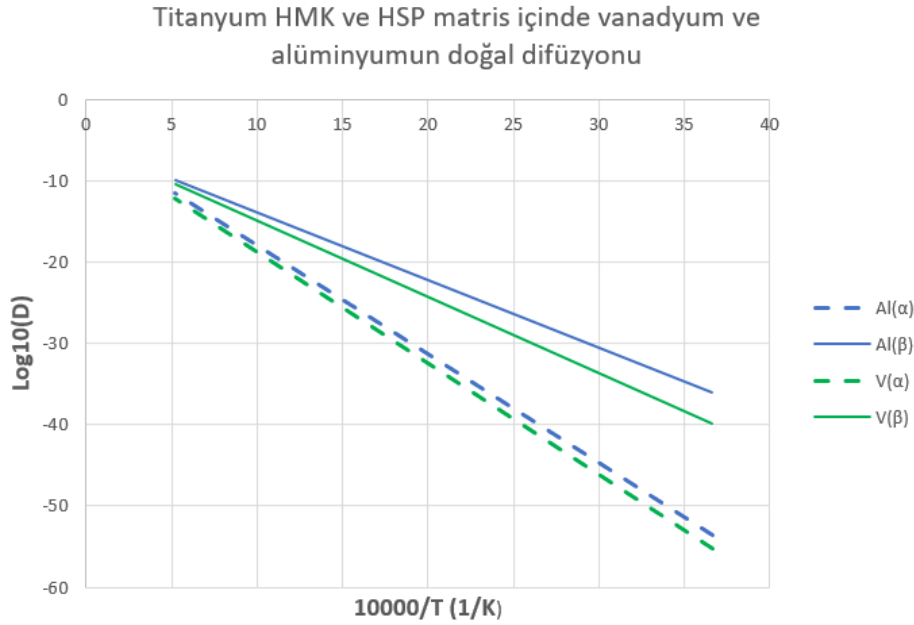
devam eder. Kısaca özetleyecek olursa Şekil 2.14.'de tamamen bir beta fazdan oluşan yapının ani soğutulması neticesinde, sabit sıcaklık altında alfa faza dönüşüm eğrileri mevcuttur. Fakat bu dönüşümlerin arkasında yatan itici kuvvetler eğriler açısından farklı olabilmektedir.



Şekil 2.18. Ti-6Al-4V Faz denge alaşım elementlerinin konsantrasyonları (Thermo-Calc) [39]

Görüleceği üzere dönüşüm mekanizmalarının arkasında değişik itici kuvvetler olabilmektedir. Diğer taraftan difüzyon kontrollü dönüşümlerde dönüşüm başlamadan önceki matris yapı da büyük rol oynamaktadır. Örnek olarak Şekil 2.14.'deki dönüşümlerde 880 °C civarının altında olan eğrileri tekrar değerlendirelim. Başlangıçta ful beta yapı vardı ve alfa yapı arzu ediliyordu. Vanadyum kaynaklı sorun bu beta matris içindeki vanadyumların bazı bölgelere süpürülmesi ile çözülüyordu. Kısacası vanadyumlar, beta fazın içinde rahatça difüzyonla hareket edebiliyorlardı. Bu senaryoyu aynı sıcaklığa getirilmiş ve izotermal bir dönüşüme uğrayacak tamamen alfa bir yapı için düşünelim. Bu yapı tamamen homojen dağılmış vanadyuma ve alüminyuma sahip olsun. Bu durumda alfa yapının olması ideal olmakla beraber vanadyum oranının yüksek oluşu sıkıntı oluşturmaktadır. Yapı tekrardan bu vanadyumlardan kurtulmak için bir şekilde beta fazı oluşumuna razı gelecektir. Fakat bu sefer vanadyumlar, sıkışık bir yapı olan HSP yapı içinde hareket etmek zorundadır. Kısacası HSP yapı içinde difüzyon çok daha düşüktür. Bu durum, neden martenzitik yapıların dönüşümünün daha zaman aldığını açıklamaktadır. Bu yüzden tavlama veya stres giderme amaçlı ısıtılarda belirlenen sıcaklıklarda uzun müddet

parçalar tutulurlar. Çünkü martenzitik yapının dönüşümüne yol veren difüzyon, içinde bulunan matris/ortam nedeniyle düşüktür. Fikir vermesi açısından vanadyum ve alüminyumun, titanyum HMK ve HSP yapı içindeki doğal difüzyon davranışı sıcaklığa bağlı olarak Şekil 2.19.'da verilmiştir. Difüzyon değerinin logaritmik ölçekte olduğuna dikkat edilirse alfa fazdaki difüzyon beta fazdakine göre oldukça düşük kalmaktadır.



Şekil 2.19. Titanyum HMK ve HSP matriste vanadyum ve alüminyumun doğal difüzyonu [78]

Özetlenecek olursa mikroyapı oluşumu birçok fiziksel mekanizmaya bağlı karışık bir süreçtir. Bu bağlamda çeşitli modelleme yaklaşımları mevcuttur. Bu tez kapsamında ve modelleme bağlamında, deneysel optik çıktılar termal analiz ışığında incelenecektir. Burada hesaplanan soğuma oranları ve ergiyik havuzlar ile oluşan tane boyutları ve desenleri üzerine bazı çıkarımlar yapılması hedeflenmiştir.

3. MATEMATİKSEL MODEL

Bu bölümde her iki toz yatak sistemi için kurgulana modellerin ayrıntılı matematiksel açıklaması sunulmuştur.

3.1. Seçici Lazer Ergitme Prosesi Termal Modeli

3.1.1. Genel denklemler

Termal model, hem mezo ölçekte hesaplama maliyeti bağlamında mümkün olan hem de sistemin termal yapısını yeterince gerçekçi bir şekilde ifade eden bir yaklaşım içermelidir. Tez kapsamı ve amacı ile literatür bölümünde sunulan bilgilerin ışığında ayrıntılı bir efektif termal iletkenlik modeli yeterli olacaktır. Genel ısı denklemi entalpi metodu kullanılarak şu şekilde ifade edilebilir [79]:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{Q}''' \quad (3.1)$$

Burada H , ρ , k , T , $\dot{Q}'''$ sırasıyla entalpi [J/kg], yoğunluk [kg/m³], iletkenlik [W/m K], sıcaklık [K] ve hacimsel enerji kaynağıdır [W/m³]. Alaşım, solidüs ve likidüs sıcaklıkları (lapa bölge) arasında ergimeye uğrar. Gizli ısı değerinin, lapa bölge üzerinde lineer olarak yayıldığı varsayılırsa, entalpi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$H = \begin{cases} C_p T & T < T_s \quad \text{katı bölge} \\ C_p T + \frac{T - T_s}{T_l - T_s} L & T_s \leq T \leq T_l \quad \text{lapa bölge} \\ C_p T + L & T > T_l \quad \text{sıvı bölge} \end{cases} \quad (3.2)$$

Sıvılaşma ise şu şekilde ifade edilebilir:

$$\phi = \begin{cases} 0 & H < H_{ref1} \\ \frac{H - H_{ref1}}{H_{ref2} - H_{ref1}} & H_{ref1} \leq H \leq H_{ref2} \\ 1 & H > H_{ref2} \end{cases} \quad (3.3)$$

Eş. 3.3'deki lapa bölgesi referans değerler ise şu hale gelir:

$$\begin{aligned} H_{ref1} &= C_p T_s \\ H_{ref2} &= C_p T_l + L \end{aligned}$$

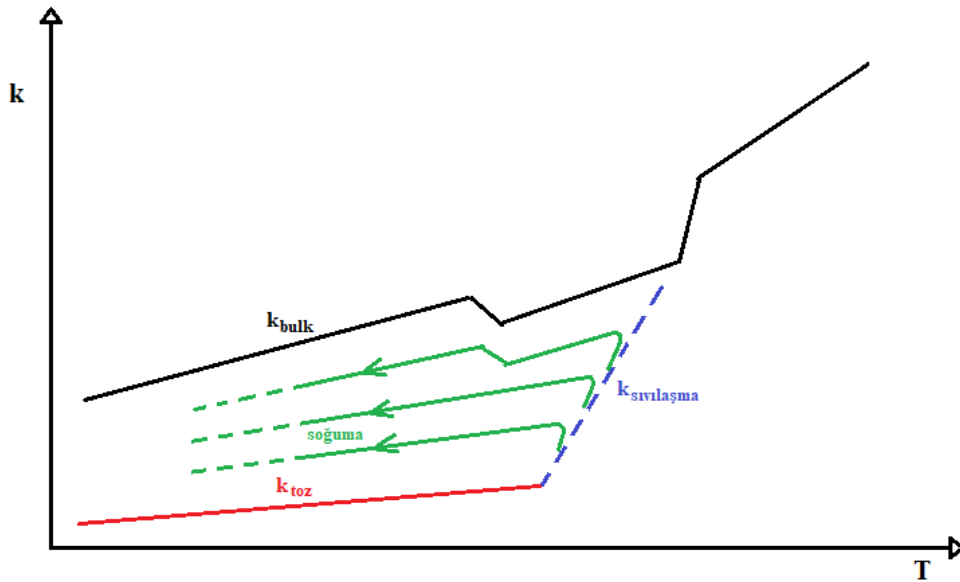
Toz sürekli ortam kabul edilirse, toz yoğunluğu doluluk $(1-\omega)$ oranına göre şu şekilde ifade edilir:

$$\rho_{toz} = \rho_{bulk}(1 - \omega) \quad (3.4)$$

Burada ω toz boşluk oranıdır.

3.1.2. Toz yatakta iletim

Toz yatakta iletim üç durum ile ifade edilebilir [80]. Birincisi, toz yatağı ve bulk metal koşullarını içeren başlangıç halidir. Bulk durum alt tabaka veya herhangi bir katı dolu bölgeyi kapsamaktadır. Toz yatağı iletkenliği, uygun bir toz yatağı korelasyonu veya deneysel bir veriye dayanan bir fonksiyon yardımıyla ifade edilebilir. Bu değer genellikle dökme malzeme iletkenliğinin yaklaşık %1'i kadardır. Dolayısıyla toz yatak iletimindeki hata belli ölçüde tolere edilebilir.



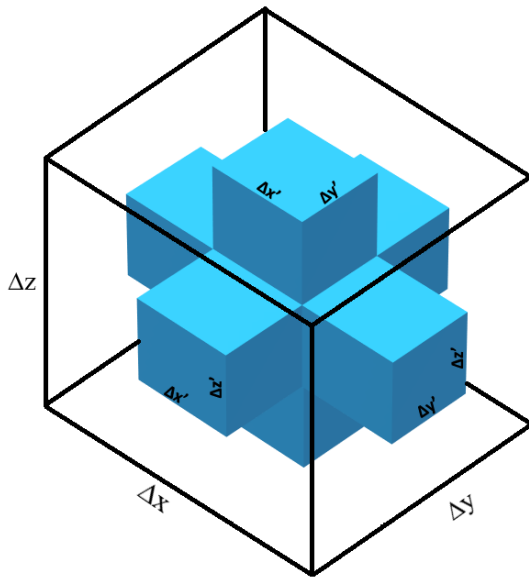
Şekil 3.1. Sürekli ortam olarak tozun iletim davranışına temsili örnek [80]

Katılaşmış metal ortamı ikinci durumdur. Bu durum, katılaşmanın altındaki bir sıcaklığa soğutulmasına rağmen toz halinden daha yüksek iletkenliğe sahip bir ortamı ifade eder. Kısacası ısıya maruz kalmış tozda, en azından belli bir sıcaklığın üzerinde yapısal değişimler meydana gelmiş olması beklenir. Bu durum için illa ki tamamen sıvılaşma gerçekleşmiş olması gerekmemektedir. Zira tozlar arası bağ kurma ve kaynaşma düşük sıcaklıklarda da başlamaktadır. Şekil 3.1.'de örnek olarak verilen iletim davranışı toz ortam için kurgulanabilir. Tozun, solidüs veya daha altı bir sıcaklıktan itibaren kalıcı yapısal değişime uğradığı düşünülebilir. Sonuç olarak toz ortam için yapısal geçmişi takip etmek maksadıyla bir alan değişkeninin tanımlanması gerekmektedir. Bu durum kısa süreli tek taramalar için büyük önem arzermeyebilir. İhmal edilmesi durumunda ısı kaynağı uzaklaştığında likidüsün

altında gerçekleşen soğuma daha yavaş olacaktır. Fakat çoklu tarama ve çoklu kat simülasyonları için büyük önem arz etmektedir. Çünkü mezo ve makro düzeydeki ısı davranışını son derece etkilemektedir. Kısacası mikro yapısal manada ihmal edilemeyecek düzeydedir.

Üçüncü durum ya lapa ya da sıvı yapıdır. Bu durum için tozun sıvılaşmasını tanımlayan bir model gerektirebilir. Şekil 3.1.'de mavi kesikli çizgiyle gösterilen taşıyıcı bir fonksiyon sıvılaştıran bu boşluklu yapıyı ifade edebilir. Çünkü toz sıvılaştırsa da ilk olarak boşluklu bir yapı halindeydi. Sürekli ortam olmaya devam ederken bir şekilde ve bir zaman diliminde kompakt hale gelmesi beklenebilir. Bu zaman dilimi için iletimi tanımlayan bir fonksiyon kullanışlı olabilir. Son olarak, Marangoni veya benzeri etkileri hesaba katmak amacıyla sıvı metal iletimi için bir katsayı veya fonksiyon değerlendirilebilir.

Sıvılaşma modeli (taşıyıcı fonksiyon) Şekil 3.2.'de verilmiştir. Buradaki fikir, iletim yüzeyindeki daralmayı yapay olarak iletim katsayısına yansıtmaya dayanmaktadır. Metal hacminin, doluluk oranına göre korunması ve eleman içinde iletim alanından daha dar bir alan olmaması koşuluyla sıvı metalin her yönde maksimum yüzey alanını sağlayacak şekilde şekillendiği varsayılmıştır.



Şekil 3.2. Sıvılaşma modeli [80]

Sonlu hacim için kütle korunumu uygulanırsa (Şekil 3.2.):

$$(1 - \omega)\Delta x\Delta y\Delta z = \Delta x'\Delta y'\Delta z + \Delta x'\Delta z'\Delta y + \Delta y'\Delta z'\Delta x - 2\Delta x'\Delta y'\Delta z' \quad (3.5)$$

Burada Δx , Δy ve Δz sonlu hacim boyutlarıdır. Daha önce belirtilen varsayım yapılırsa:

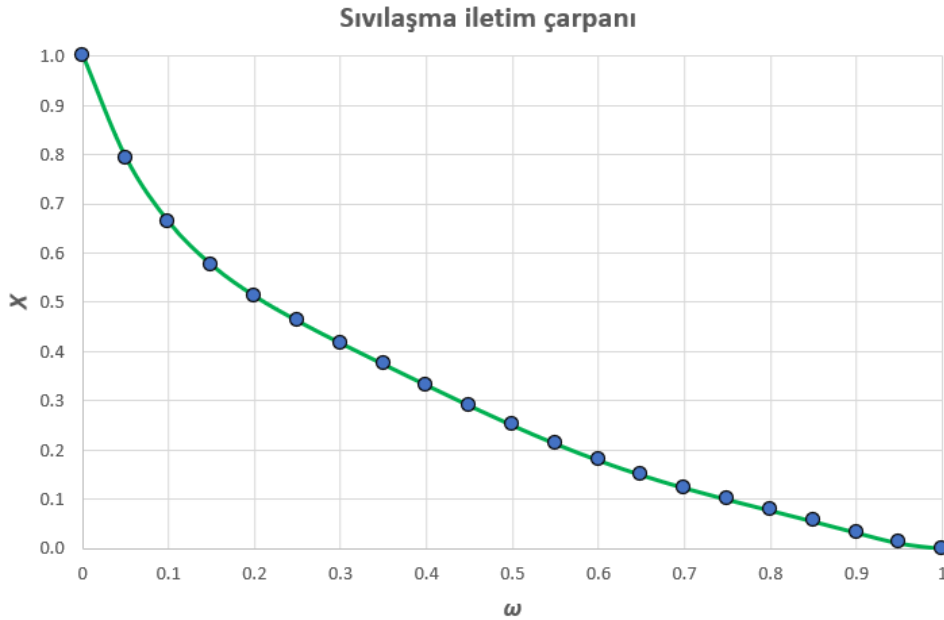
$$\begin{aligned}\Delta x' &= \Delta y' = \Delta z' = \Delta n' \\ \Delta x &= \Delta y = \Delta z = \Delta n\end{aligned}$$

Eş. 3.5 şu hale gelir:

$$1 - \omega = 3 \left(\frac{\Delta n'}{\Delta n} \right)^2 - 2 \left(\frac{\Delta n'}{\Delta n} \right)^3 = 3X - 2X^{3/2} \quad (3.6)$$

Eğer Eş. 3.6, 0 ila 1 arası olan boşluk oranı için sayısal olarak çözülürse, aşağıda boşluk oranı cinsinden verilen polinom (Şekil 3.3.) yaklaşık bir çözüm olarak kullanılabilir [80]:

$$X = (-8.8\omega^5 + 22.2\omega^4 - 21.1\omega^3 + 9.3\omega^2 - 2.6\omega + 1)^2 \quad (3.7)$$



Şekil 3.3. Sıvılaştırma iletim çarpanı [80]

Burada X direk olarak iletim katsayısı çarpanıdır. Eş. 3.7 SLE'de tabla ile parça arasında üretilen, genellikle latis haldeki destek yapıların sürekli ortam olarak kabul edilmesi durumunda iletimlerini tanımlamak amacıyla da kullanılabilir. Sonuç olarak boşluklu yapı için:

$$k_{sıvılaştırma} = X k_{bulk} \quad (3.8)$$

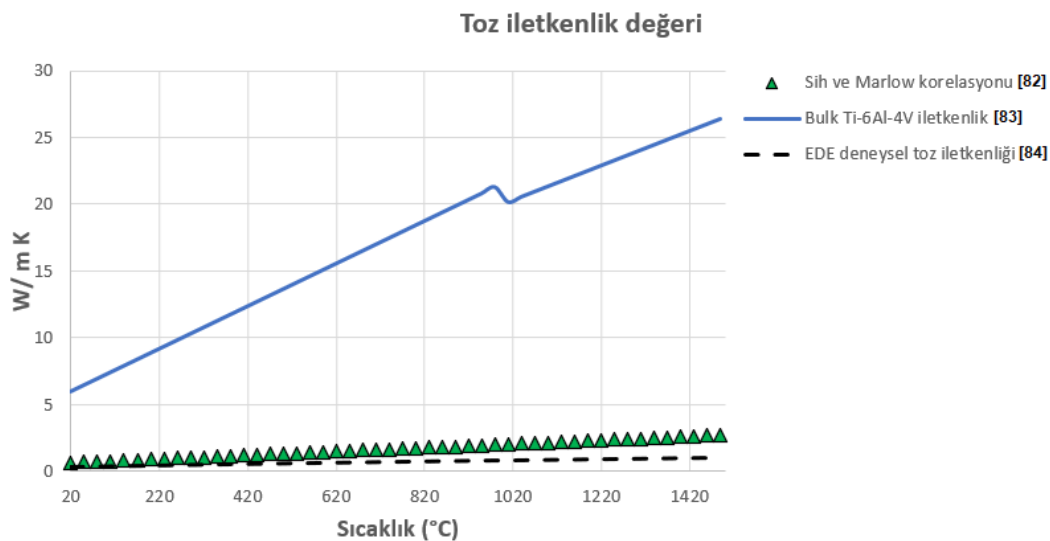
Toz yapısı ile sıvılaştırma arasında sıvılaştırma oranına dayalı doğrusal bir geçiş varsayılırsa, efektif iletkenlik şu şekilde tanımlanabilir:

$$k_{efektif} = (1 - \phi_{maks}) k_{toz} + \phi_{maks} k_{sıvılaştırma} \quad (3.9)$$

Burada ϕ_{maks} ortamın tecrübe ettiği (geçmişten o ana kadar) maksimum sıvılaşmayı ifade eder ve k_{toz} , toz yatağı için iletkenlik fonksiyonudur. Hadley [81] veya Sih ve Barlow [82] tarafından önerilen ampirik korelasyonlar tercih edilebilir. Özellikle Sih ve Barlow korelasyonu (Eş. 3.10) yaygın kullanılsa da bu tür korelasyonların ne kadar katkı sağladığı tartışılabilir. Şekil 3.4.'e bakılırsa bu tür korelasyonlar belirgin anlamda fark yaratmamaktadır. Hadley korelasyonu da yakın değerler vermektedir. Diğer taraftan şekilden görüleceği üzere EDE işleminde toz iletimini (sinterlenmiş toz) ifade eden, deneysel veriye dayalı basit bir fonksiyon da benzer değerleri vermektedir. Hatta Sih ve Barlow korelasyonunun Ti-6Al-4V, argon ortam, 30 mikrometrelik ortalama toz çapı ve 0.5 boşluk oranı için sadece bir kere hesaplaması yeterli olabilir. Görüleceği üzere sıcaklığa bağlı basit bir lineer fonksiyon yoluyla rahatça ifade edilebilmektedir. Bu bağlamda karışık birçok logaritmik ve benzeri fonksiyonları bünyesinde barındıran ve netice anlamında pek bir fark yaratmayan yaklaşımlardan hesaplama maliyeti bağlamında uzak durulmasında yarar vardır. Çünkü kullanılan her ifade, on binlerce sonlu hacim veya elemanda ve her zaman adımında tekrar ve tekrar hesaplanacaktır.

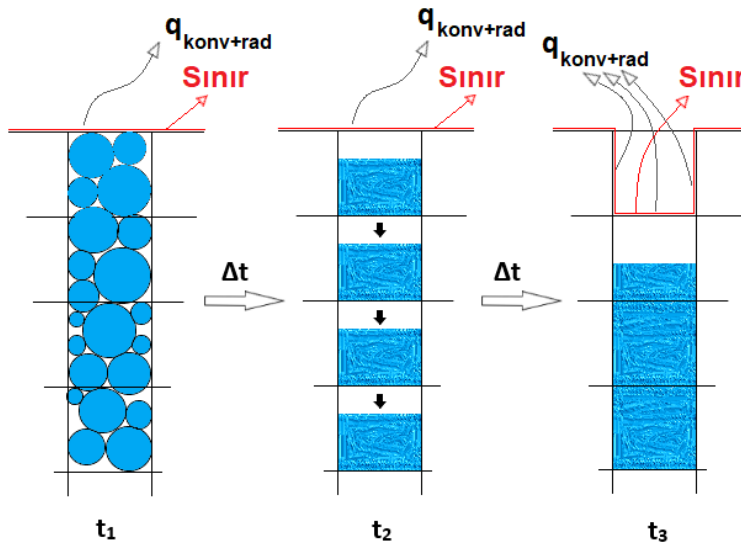
$$k_{toz} = k_{gaz} \left[(1 - \sqrt{1 - \omega}) \left(1 + \omega \frac{k_{rad}}{k_{gaz}} \right) + \sqrt{1 - \omega} \left(\frac{2}{1 - \frac{k_{gaz}}{k_{bulk}}} \left(\frac{2}{1 - \frac{k_{gaz}}{k_{bulk}}} \ln \frac{k_{bulk}}{k_{gaz}} - 1 \right) + \frac{k_{rad}}{k_{gaz}} \right) \right] \quad (3.10)$$

$$k_{rad} = \frac{4}{3} \sigma T^3 D_{toz}$$



Şekil 3.4. Ti-6Al-4V tozu iletkenlik değerleri

Son olarak boşluklu bir yapı olan ve sürekli bir ortam olarak kabul edilen tozun değişimi neticesinde oluşan durum da modellenmelidir. Çünkü ergime sonrasında ve elde edilen parçalarda doluluk oranı %98'lerin üzerinde olmaktadır. Dolayısıyla doluluk oranındaki bu değişiklik modele yansıtılmalıdır. Bu değişik şekillerde yapılabilir. Bunlardan ilki sonlu hacimlere göre tasarlanan modelde [80] olduğu gibi z ekseninde çökme (kütle hareketi) ve sınır şartlarının tekrar belirlenmesi şeklinde olabilir. Şekil 3.5.'de görüleceği üzere tanımlanan çökme şartları sağlanınca kütle hareketi ve ardından ilgili yüzeylerde düşünülen sınır şartları tanımlanabilir.



Şekil 3.5. Toz yatakta çökme modeli [80]

Büzülmeyi sağlayacak şekilde Galati ve diğerlerinin [85] çalışmasında olduğu gibi mekanik yaklaşımlar da mevcuttur. Fakat sıcaklığa göre eleman deformasyonları özellikle yüksek sıcaklık gradyanlarının olduğu SLE gibi işlemlerde eleman problemleri ve bazen yakınsama sıkıntılarına neden olabilmektedir. Hesaplama maliyeti ve yakınsama sorunları oluşturmaması bakımından daha basit yaklaşımlar da tercih edilebilir. Bunlardan en sade olanı efektif katılaşmış katman kalınlığı yaklaşımıdır. Burada her bir katmanda ideal ergime ve katılma sonucunda oluşması beklenen katman kalınlığı kabul edilir. Dolayısıyla bulk malzeme yoğunluğuna fakat toz iletimine sahip bir ortam kullanılır. Her bir katman için önceki katmanların durumuna göre değişen değerler alabilir. Sürekli üst üste gelen tarama bölgeleri için nominal toz katman kalınlığına yakınsar.

$$t_{efek. toz katmanı}^n = t_{nom.toz katmanı} + t_{efek. toz katmanı}^{n-1} - t_{efek. katılaşmış katman}^{n-1} \quad (3.11)$$

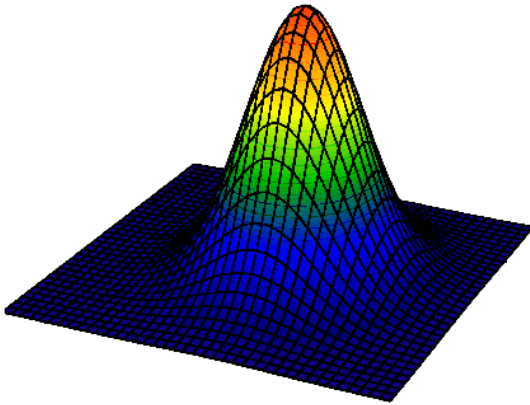
$$t_{efek. katılaşmış katman}^n = (1 - \omega) \times t_{efek. toz katmanı}^n \quad (3.12)$$

3.1.3. Isı kaynağı

Lazerin, uygun bir biçimde ısı kaynağı olarak modele eklenmesi gerekmektedir. Bu değişik şekillerde yapılabilir. Muhtelif 2D veya 3D ısı kaynağı yaklaşımları mevcuttur. Burada esas mesele hem mikro hem de mezo ölçekte kullanılabilecek ve sisteme enerji girdisini doğru şekilde yansıtacak bir ifadenin bulunmasıdır. Mezo ölçek simülasyonlarında en büyük sıkıntılardan biri hesaplama maliyeti nedeniyle birçok fiziksel olgunun açıkça modellenememesidir. Bu bağlamda gerçekçi ergiyik havuz boyutlarını verebilecek hacimsel ısı kaynağı modelleri kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında dinamik bir hacimsel ısı kaynağı modeli geliştirilmiştir [80].

Enerji, toz katman yüzeyine değişik şekillerde gelebilir. Eğer özel bir demet şekli ve enerji yayılımı için dizayn edilmiş bir lazer mevzu bahis değilse enerjinin Gaussian yayılıma sahip olduğu kabul edilebilir (Şekil 3.6.). Bu durumda yüzeye düşen enerji yayılımı şu şekilde ifade edilebilir:

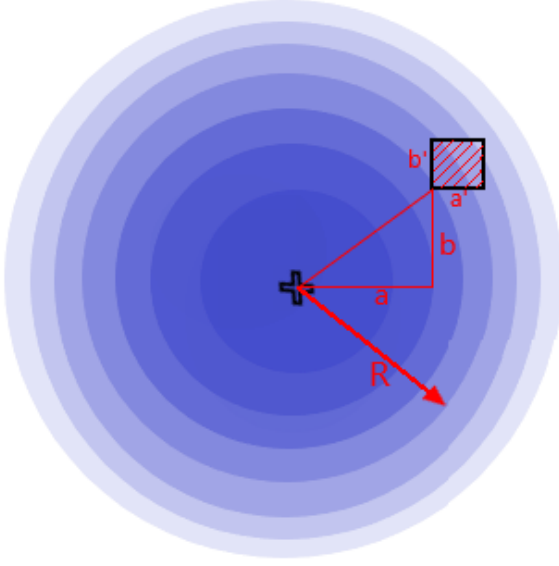
$$q_{lazer} = \frac{\eta \alpha P}{\pi R^2} e^{-\frac{\eta(x^2+y^2)}{R^2}} \quad (3.13)$$



Şekil 3.6. 2D Gaussian dağılım

Burada η konsantrasyon faktörüdür ve demet yarıçapının tanımını gösterir. Kısacası demet çapı değişik biçimlerde ifade edilebilir. Genellikle konsantrasyon faktörünün 2 kabul edildiği tanım yaygındır. P ve α ise sırasıyla lazer gücünü ve emilimi temsil etmektedir. Eş. 3.13'e dayalı enerji yayılımı sayısal olarak bir yüzeye dağıtılabılır. Eğer arzu edilirse herhangi bir bölge için yayılım analitik olarak da ifade edilebilir (Şekil 3.7.):

$$q_{a'b'} = \frac{\alpha P}{4a'b'} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{a\sqrt{\eta}}{R} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{(a+a')\sqrt{\eta}}{R} \right) \right] \left[\operatorname{erf} \left(\frac{b\sqrt{\eta}}{R} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{(b+b')\sqrt{\eta}}{R} \right) \right] \quad (3.14)$$



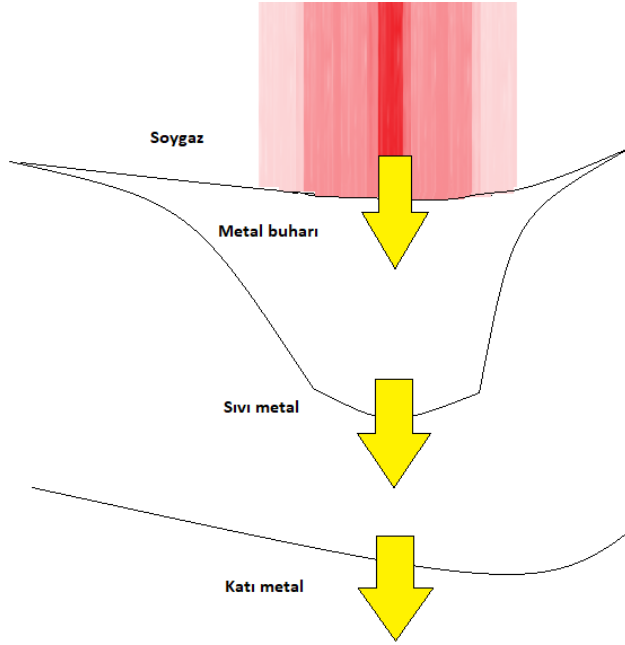
Şekil 3.7. 2D Gaussian dağılım (üstten görünüm)

Yüzeye gelen enerjiyi hacimsel olarak dağıtmak için uygun bir fonksiyona ihtiyaç vardır. Zhang ve diğerlerinin [18] çalışması daha önce de belirtildiği üzere hacimsel ısı kaynakları üzerine kapsayıcı bir çalışmadır. Bu çalışmada, sınıflandırılarak özet halinde verilen hacimsel ısı kaynaklarının en temel özelliği sabit parametrelerin kullanılmasıdır. Bu parametreler ya istenen ergiyik havuz boyutlarını ve şeklini üretecek geometrik ifadeler ya da yüzeye düşen enerjinin z eksenı boyunca nasıl emileceğine karar veren fonksiyonlara dayanmaktadır. Diğer taraftan metal-lazer etkileşimi önceki bölümlerde de belirtildiği üzere birçok değişik olguya dayanmaktadır ve sürekli değişkenlik gösterir. Bu bağlamda metalin sıcaklığına bağlı olarak değişik bir davranış gösterecek dinamik bir ısı kaynağı modeli cazip olabilir.

Başlangıç olarak ısı kaynağının Beer-Lambert yasasını temel aldığı farz sayılabilir. Aslında metal ortam, optik bir ortamdır oldukça uzak bir yapıya sahiptir fakat burada Beer-Lambert yasasına yapılan atıf sadece bir analogidir. Çünkü bir ortam içinde seyahat eden ışığın emilimi, malzemenin özellikleri ve yoğunluğu ile ilgilidir. Benzer şekilde, tasarlanan hacimsel ısı kaynağı, metalin anlık özelliğine göre z eksenı boyunca emilimine izin verecektir. Beer-Lambert yasası aşağıdaki gibi tanımlanır (Şekil 3.8.):

$$e_{\tau} = \frac{I}{I_0} = e^{-\mu z} \quad (3.15)$$

$$e_{\alpha} = 1 - \frac{I}{I_0} = 1 - e^{-\mu z}$$



Şekil 3.9. Işının karşılaştığı ortamlar

Görüleceği üzere soğurulan enerji oranı Eş. 3.15 biçimindedir. Kısacası z eksenı boyunca eksponansiyel bir emilim öngörölmüştür. Bu ifade enerji denkleminin içine konduğunda Eş. 3.16 meydana gelmiştir. Eş. 3.16’da tasarlanan model gereği eksponansiyel ifadenin içinde entalpi ve üst tabakan gelen enerjinin olması beklenmektedir. Fakat entalpi ve gelen enerji eksponansiyelin dışında da mevcuttur. Bu durumda Eş. 3.16’nın direk sayısal çözümü kararlılık sorunlarına neden olabilir. Kararlılık ve doğruluğu sağlamak için çok sayıda iterasyon ve küçük zaman adımları gerekecektir.

Yukarıda bahsedilen problem belki başka bir yaklaşımla aşılabılır. Lazere maruz kalan bölgelerde dominant güç lazerdir. Bu nedenle lazere maruz kalan bölgelerdeki sonlu hacimler, uzayda birbirinden izole edilmiş sistemler olsun. Yanı sıcaklık değişimi sadece ısı kaynağına bağlı bir ortam düşünölsün. Böylelikle enerji denklemleri indirgenmiş hale gelir:

$$\rho_{bulk}(1 - \omega) \frac{\partial H}{\partial t} = (1 - \omega) \times \dot{Q}''' \times [1 - e^{-f(\rho_{bulk}, H, \dot{Q}''', v_{tarama \text{ hızı}}, z)}] \quad (3.17)$$

Eş. 3.17, Eş. 3.16’dan önce çözölməsi gereken, sadece zamana bağlı, öncöl bir diferansiyel denklemdir. Lazere maruz kalan bölgelerdeki sonlu hacimler için, Eş. 3.16’da kullanılan zaman aralığında, emilim oranı belirlemeye yönelik olarak çözölecektir. Kısacası hacimsel enerji kaynağı ve iletim terimi dekupl hale getirilmiştir. Dikkat edilirse boşluk oranı denkleme basit bir çarpan olarak dahil edilmiştir ve Eş. 3.17’de sadeleştirilebilir. Ancak, Eş. 3.16’da sadeleştirilemez.

Eş. 3.17 adi bir diferansiyel denklemdir. Herhangi bir entegrasyon yöntemi ile z eksenı boyunca enerjiye maruz kalan hücreler için çözülebilir. Şekil 3.8.'de gösterildiğı gibi, α (emilim değeri) sadece yüzeydeki üst hücreler için kullanılacaktır. Daha sonra enerji f fonksiyonuna göre z-yönü boyunca emilecektir. Entegrasyon yürütölürken daha küçük bir zaman adımı kullanılacaktır. Yani Eş. 3.16'nın zaman adımı daha küçük adımlara bölünecektir. Dikkat edilirse bu yaklaşımda önceden belirlenmiş bir penetrasyon derinliğı yoktur. Metalin enerji seviyesi ve gelen enerji, penetrasyonu belirleyecektir. Metal sıcaklığı ve yüzeye gelen enerji ise zamana ve mekâna göre değışmektedir. Böylelikle hacimsel enerji kaynağı sürekli şekilde Eş. 3.17 aracılığı ile kendini güncelleme durumundadır.

Geriye Eş. 3.17'deki f fonksiyonunu tanımlamak kaldı. Öncelikle içerdeki ifadeler boyutsuz bir sayı haline getirilebilir:

$$\Lambda = \frac{\dot{Q}'''_z}{\rho_{bulk} H v_{tarama \text{ hızı}}} \quad (3.18)$$

Burada z, sonlu hacim içerisinde derinlik yönünde alınan yoldur. İfadedeki f fonksiyonu parçalı bir biçimde de tanımlanabilir:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dots e^{-A_1 \Lambda^{B_1}} < H_1 \\ \dots e^{-A_2 \Lambda^{B_2}} H_1 \leq H < H_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \dots e^{-A_n \Lambda^{B_n}} H_{n-1} \leq H < H_n \end{array} \right. \quad (3.19)$$

Eksponansiyel ifade içi Λ^B şeklinde bir fonksiyon seçilerek tanımlanmıştır. Lüzumu halinde değışik fonksiyonlar da seçilebilir. Fakat zaten parçalı fonksiyon halinde tanımlama yoluna gidildiğı için sade bir fonksiyon yeterlidir. Çünkü arzu edildiğı oranda parça sayısı artırılabilir. Fakat her bir aralık için muhtelif A ve B katsayıları belirlenmelidir. Dilip ve diğierlerinin [87] çalışması, SLE işleminde katılaşımış ergiyik Ti-6Al-4V havuzlarını deneysel olarak incelemiştir. Özellikle ergiyik havuz boyutlarını bulundurması sebebiyle, Eş. 3.19'daki deneysel katsayıların elde edilmesine olanak sağlayabilir.

Dilip ve diğierlerinin çalışmasının incelenmesi neticesinde üç parçanın yeterli olacağı görölmüştür [80]. Bu üç bölge üç fazı ifade edecek şekilde belirlenmiştir. E_α , katı faz için 1 olarak kabul edilmiştir. Böylece katı tamamen eriyene kadar enerji yüzeydeki katı tarafından emilecek ve alt katmanlara sadece iletim yoluyla aktarılacaktır. Sıvı faz için A ve B sırasıyla

0.5 ve 2 olarak bulunmuştur. Ti-6Al-4V için yaklaşık buharlaşma sıcaklığı olarak 3500 K kabul edilebilir. Buharlaşma sıcaklığının ötesinde A, 0 ($\epsilon_a=0$) olarak kabul edilmiştir. Yani sıvı buhar fazına geçtiğinde, gelen tüm enerjiyi direk aşağıya ilettiği varsayılmıştır. Bu davranış bir bakıma geri tepme basıncının taklidi olarak da değerlendirilebilir. Sonuç olarak, z eksenini boyunca emilim davranışı aşağıdaki gibi olur:

$$\begin{aligned} e_{\alpha_1} &= 1 - e^{-\infty \Lambda^2} = 1 & \text{Katı} \\ e_{\alpha_2} &= 1 - e^{-0.5 \Lambda^2} = f(0.5 \Lambda^2) & \text{Sıvı} \\ e_{\alpha_3} &= 1 - e^{-0 \Lambda^2} = 0 & \text{Gaz} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Sonuç olarak tasarlanan model ergiyik havuz boyutları ve enerji girdisinin doğru bir şekilde belirlenmesi noktasında hem mikro hem de mezo ölçekte yardımcı olabilecek potansiyele sahiptir. Daha fazla ayrıntı ilgili makalede [80] bulunabilir. Aynı makalede, geliştirilen ısı kaynağı modeline ek olarak bir emilim (α) korelasyonu da türetilmiştir. Emilim korelasyonu Eş. 3.19'da metal ortamına giren ilk enerji miktarını belirlemesi nedeniyle oldukça kritiktir. Bu korelasyon, tasarlanan hacimsel ısı kaynağı ile koordineli olacak şekilde uzun iteratif bir çalışma sonucunda açığa çıkmıştır. Bu bir bakıma hacimsel ısı kaynağından daha önemlidir çünkü ortama giren ilk enerjinin doğru tespit edilmemesi geriye kalan hesapları da anlamsız hale getirmektedir. Özellikle yüzeyde meydana gelen birçok olgunun ihmal edildiği modellerde enerji girdisinin doğru bir şekilde yansıtılması oldukça önemlidir. Sonuç olarak tasarlanan hacimsel ısı kaynağı modeli ile veya herhangi bir modelde kullanılmak üzere SLE işleminde Ti-6Al-4V için bir korelasyon türetilmiştir.

3.1.4. Emilim korelasyonu

Literatürdeki en büyük boşluklardan biri güvenilir emilim değerlerinin olmamasıdır. Burada belki de emilimden kasıt, emilimi de içine alan genel bir verimlilik ifadesidir. Kaynak simülasyonlarında, titanyum için genellikle 0.3 ila 0.4 arası değerler yaygın kullanılmaktadır. Fakat bu değerler SLE işleminde genellikle gerçekçi çözümlere olanak vermemektedir. Küçük lazer çapı ve toz yatağı yapısı, emilim değerlerini 0.8'lere kadar yükseltebilmektedir [88]. Deneysel çalışmalar genellikle katı veya toz katmanının düşük enerjiye maruz kaldığı durumları değerlendirmektedir. Ancak termo-fiziksel ve yapısal değişiklikler farklı emilim davranışlarına neden olmaktadır. Bu durumda deneysel verileri sayısal yöntemlerle inceleyerek emilim oranlarını belirlemek belki de en efektif yaklaşım olabilir. Böylece bir emilim haritası oluşturulabilir ve daha genel korelasyonlar geliştirilebilir.

Emilimi etkileyen muhtelif faktörler vardır ve bunlardan biri yansımadır. Yansıyan ışınlar ek olarak, sıçrama nedeniyle toz yatağından çıkan tozlar önemli enerji kaybına ve beklenmedik emilim davranışına neden olabilir [89, 90]. Ayrıca, buharlaşmanın neden olduğu enerji kaybı bir şekilde hesaba katılmalıdır, çünkü ergiyik havuz etrafındaki metal buharlaşması modelde ifade edilmiyorsa gizli bir kayıp olarak emilim değerinin içinde olmalıdır. Bu nedenlerden dolayı, lazer gücüne ek olarak lazer hızı da toz yatağına giren enerjiyi önemli ölçüde etkiler. Bu iki etkiyi göz önünde bulundurarak ampirik bir korelasyon üretmek mümkün olabilir. Bu korelasyon, farklı lazer dalga boyları ve çapları, katman başlangıç sıcaklıkları, toz özellikleri vb. dikkate alınarak yeni deneysel data ile geliştirilebilir.

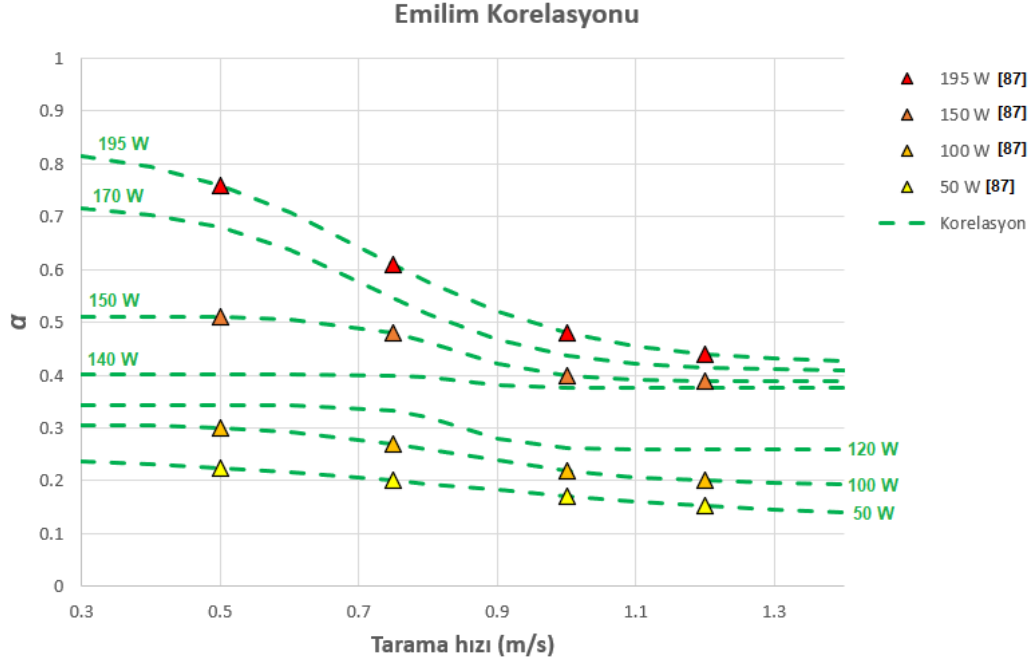
Korelasyon için 0'dan sonsuza kadar, 0 ila 1 arası bir değer veren sürekli bir fonksiyon ideal olacaktır. Ayrıca, anahtar deliği etkisi nedeniyle keskin artışlarla başa çıkabilmelidir. Bu bağlamda sigmoid tipi fonksiyonlar uygundur. Zikredilen çalışmanın [87] iteratif sayısal analizi sonucunda aşağıdaki korelasyon türetilmiştir.

$$\alpha_{Ti-6Al-4V} = \alpha_1 + \alpha_2 / \left[1 + e^{-\left(\frac{V-V_0}{C}\right)} \right] \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0.2327 + \frac{0.201}{1 + e^{-\left(\frac{P-114.4438}{28.281}\right)}} \\ \alpha_2 &= 0.4424 + \frac{-0.5679}{1 + e^{-\left(\frac{P-153.3912}{-13.2179}\right)}} \\ C &= -0.1748 + \frac{0.4684}{1 + e^{-\left(\frac{P-116.8547}{-25.7217}\right)}} \\ V_0 &= 0.7173 + \frac{0.1275}{1 + e^{-\left(\frac{P-154.6248}{-2.444}\right)}} \end{aligned}$$

Eş. 3.21, Şekil 3.10.'da deneysel veri [87] ile beraber çizilmiştir. Görüleceği üzere şekil, SLE işleminde emilim davranışı hakkında bir fikir vermektedir. Genel eğilim, emilimin lazer gücüyle orantılı ve lazer tarama hızıyla ters orantılı olmasıdır. Ancak tozutma ve benzeri olgulardan dolayı geçişler meydana gelebilir. Buna ilave olarak belli bir enerji seviyesinin yukarısında (140 W yukarısı), özellikle tarama hızının da azalmasıyla anahtar deliği şekillenmesi hissedilir hale gelmekte ve beklenmedik oranda enerji, havuz tarafından emilmeye başlamaktadır. İlginçtir ki benzer emilim değerleri (paslanmaz çelik için 0.48-0.65, 170-220 W, 600-1300 mm/s) Zhang ve diğerleri [18] tarafından öngörülmüştür. Bununla birlikte, çeliği eritmek için daha yüksek enerji gerekir, bu da anahtar deliği

yapısının oluşumunu geciktirir. Bu nedenle Zhang ve diğerleri, eşdeğer lazer gücü ve tarama değerleri için biraz daha düşük emilim değerleri elde ettiler.



Şekil 3.10. Ti-6Al-4V emilim korelasyonu

Eş. 3.21, Eş. 3.13’de kullanıma hazırdır. Fakat 100 mikrometre demet çapına sahip bir veriye dayandığı unutulmamalıdır. Değişik demet çaplarında kullanımına basit bir yaklaşım olarak sağlayabilir. Demete bağlı alandaki eksilme, Eş. 3.21’de P değeri içerisinde oransal olarak konabilir. Fakat demet çapı oranının üstel değeri, alansal ifade dolayısıyla 2 olması beklenirken demet çapı hareketi yüzünden daha düşük bir değer daha makul olacaktır. Çünkü alandaki artış, enerji yoğunluğunu azaltsa da tarama yönü boyunca herhangi bir noktanın enerjiye maruz kalma süresi arttırmaktadır. Bu nedenle değişik demet çapları için üstel değerin $\pi/2$ ’ye yakınsayacağı düşünülmektedir. Sonuç olarak Eş. 3.21’in değişik demet çaplarına yönelik kullanımı için bu tez kapsamında her bir P değerinin $(100/D)^{\pi/2}$ ifadesiyle çarpılarak kullanılması tavsiye edilmektedir [91]. Burada D demet çapı olup mikrometre mertebesinde.

3.2. Elektron Demeti Ergitme Prosesi Termal Modeli

3.2.1. Genel denklemler

EDE işleminde ön tarama nedeniyle tozutma gibi olgular dolayısıyla ciddi kayıplar beklenmemektedir. Buna ilave olarak elektron demetinin lazerin aksine yansıma nedeniyle

kayıpları oldukça düşüktür. Bu zaviyeden bakılırsa enerji girdisinin SLE göre daha belirgin olduğu düşünülebilir. Uzun süreli yüksek enerji yoğunluklu üretim, yüksek sıcaklığa sahip alt levha ve vakum ortamı göz önünde bulundurulursa gelen enerjinin üst yüzeyden terkinde buharlaşmanın ciddi bir kayba neden olabileceği düşünülebilir. Bu tez kapsamında ve EDE işlemi bağlamında, bu buharlaşmanın ve muhtemel etkilerinin incelenmesi düşünülmüştür. Buradan hareketle EDE işlemindeki modelde sıvı metal hareketi ve deforme olabilir sıvı yüzeyi açıkça tanımlanmıştır. Bu durumda enerji denkleminin yanı sıra momentum ve süreklilik denklemlerinin de tanımlanması gereklidir. Taşınım eklenmiş enerji denklemi şöyledir:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q \quad (3.22)$$

Burada ρ , c ve k sırasıyla yoğunluk [kg/m^3], özgül ısı [J/kg K] ve iletkenliktir [W/m K]. Q ise ısı akısıdır [W/m^2]:

$$\mathbf{q} = -k \nabla T$$

Momentum ve süreklilik denklemleri ise sırasıyla şöyledir:

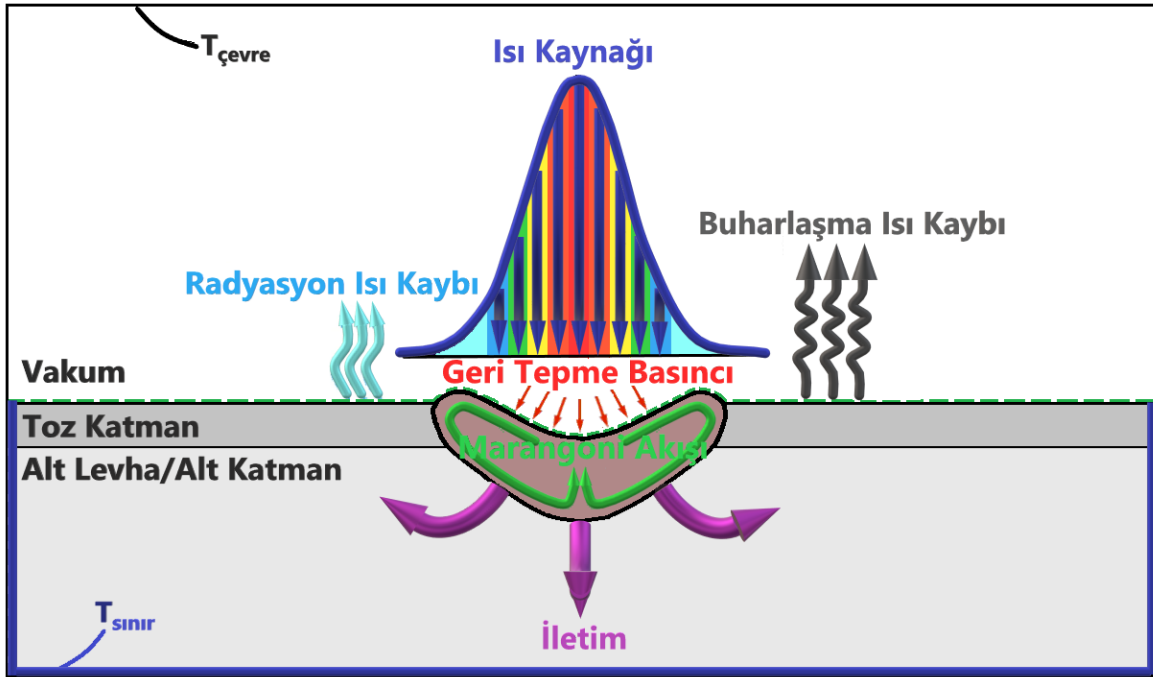
$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} + (\rho - \rho_{ref}) \mathbf{g} \quad (3.23)$$

$$\rho \nabla \cdot (\mathbf{u}) = 0 \quad (3.24)$$

Burada u , g ve F sırasıyla hız [m/s], yer çekimi ivmesi [m/s^2] ve hacim kuvveti [N/m^3] vektörleridir. P basınç [Pa] ve K ise viskoz stres [N/m^2] tensörüdür. Şekil 3.11.'de model şematiği verilmiştir. Enerjinin geldiği yüzeyde serbest yüzey sınır şartı tanımlanacaktır ve yüzey deformasyonu için ise ALE metodu kullanılacaktır. Serbest yüzeyde radyasyon ve buharlaşma ısı kaybı dışında yüzey hareket ve Marangoni için aşağıdaki şartlar tanımlanacaktır:

$$\mathbf{n} \cdot [-p \mathbf{I} + \mathbf{K}] = -p_{ext} \mathbf{n} + \sigma (\nabla_t \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n} - \nabla_t \sigma \quad (3.25)$$

$$\mathbf{u}_{mesh} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \quad (3.26)$$



Şekil 3.11. EDE matematiksel model şematığı [92]

Burada P_{ext} [Pa] ve σ [N/m] sırasıyla dış basınç ve yüzey gerilimi katsayısıdır. Dış basınç terimi muhtemel geri tepme basıncı için kullanılacaktır. Bu durumda geri tepme basıncı için bir ifadeye ihtiyaç vardır. Geri tepmenin vakum ortamında meydana geleceği göz önünde bulundurulursa geri tepmeye sebep olabilecek lokal bir atmosferden bahsedilebilir. O halde bu durum buharlaşma ile ilişkilendirilebilir. Özetle havuz üzerine etkiyen basıncın, havuzda buharlaşma neticesinde oluşan doymuş buhar basıncı ile alakalı olduğu kabul edilirse:

$$P_{ext} = P_{geri\ tepme} = \beta P_v \quad (3.27)$$

Burada β , oranı ifade etmektedir. Sonuç olarak muhtemel geri tepme basıncı, havuzda oluşan doymuş buhar basıncının bir kısmı olabilir. Bu değerin deneysel olarak elde edilmesi düşünülmektedir. Diğer taraftan doymuş buhar basıncı için Antoine denklemi kullanılabilir:

$$P_v = \exp\left(a + \frac{b}{T+c}\right) \quad (3.28)$$

Burada P_v [atm] cinsinden olup a, b, c katsayıları ilgili referanstan [93] saf titanyum için alınmıştır.

3.2.2. Buharlaşma ısı kaybı

Eş. 3.28 ile beraber geri tepme basıncı havuz yüzey sıcaklığına bağlanmış oldu. Havuz yüzey sıcaklığı ise hiç şüphesiz enerji girdisi ve yayılımına ve de kayıplarına bağlıdır. Bu

kayıplardan biri de buharlaşma ısı kaybıdır. Dolayısıyla tüm bu ifadeler birbirine bağlıdır. Nitekim Hertz-Knudsen denkleminde hareketle, buharlaşma akısı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\eta_{buharlaşma} = \frac{P_v - P}{\sqrt{2\pi M R_c T}} \quad (3.29)$$

Burada M [kg/mol], R_c [J/K mol] sırasıyla molar kütle ve gaz sabitidir. P [Pa] ise yüzeyin üzerindeki basınçtır ve daha önce Eş. 3.27’de doymuş buhar basıncı ile ilişkilendirilmişti. Eğer denklemde P yerine konur, düzenlenir ise ısı kaybı olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$q_{buharlaşma \text{ ısı kaybı}} = -(1 - \beta) P_v \frac{M L_{eva}}{\sqrt{2\pi M R_c T}} \quad (3.30)$$

Burada L_{eva} [J/kg] buharlaşma gizil ısıdır. Özetlenecek olursa vakum ortamında buharlaşma sonucu oluşan gazın genleşmesi ve ergiyik havuz yüzeyinden uzaklaşması beklenir. Bu süreç zarfında gazın bir miktar geri tepmeye neden olma ihtimali vardır. Bu gerçekleşirse ergiyik havuz yüzeyi deforme olur ve havuz geometrisi değişir. Bu durum aynı zamanda sıcaklığı ve buharlaşma miktarını da etkiler. Birbirine bağlı halde devam eden bu mekanizmalar genellikle kendini sonik bir patlama şeklinde gösterir. Burada β terimi bu bağlamda bir indikatör olabilir. Çünkü 0.19 ila 0.24 civarı bir değer, çeşitli yaklaşımlara göre etkin vakum basıncı olarak tanımlanır [94]. Bu değerın altında ses hızı aşılr. Bu durumda model açısından transonik veya subsonik durumların oluşması (β ’nın artmasıyla) geri tepme basıncını hissedilir hale getirecektir.

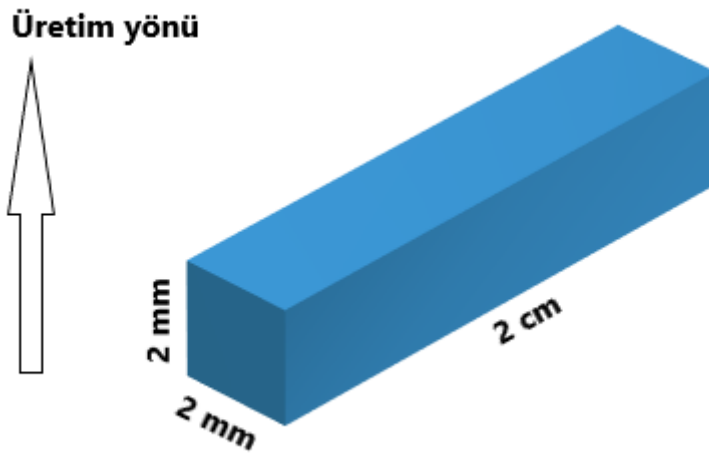
EDE için tasarlanan modelde de SLE işlemindeki toz yatak yapıları kullanılacaktır. Isı kaynağı olarak ise 2D Gaussian tercih edilecektir. Halihazırda geri tepme ve Marangoni akışı modellendiğinden özel bir hacimsel ısı kaynağı modeline ihtiyaç duyulmamıştır. Buna ilave olarak modellemelerde yapılan deneylere göre modelleme manasında esnemeler olabilir. Zira deney tasarımları, özellikle EDE makinasında kullanılan makine algoritması tarafından sınırlandırılmaktadır.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Tez kapsamında iki toz yataklı sistem için de ayrı deneysel çalışma tasarlanmıştır. Bu çalışmalarda amaçlanan hedefler farklıdır. SLE işlemi için değişik enerji yoğunlukları sonucu oluşan muhtelif termal döngülerin numunede ne tür mikro yapılara neden olduğunun incelenmesi amaçlanmıştır. EDE işlemi için ise bu işlemde meydana gelen metalizasyondan hareketle buharlaşma üzerinde durulmuştur. Bu bağlamda buharlaşma kaynaklı enerji kaybının ve buharlaşmanın, ergiyik havuzun boyutsal yapısına etkisinin araştırılması hedeflenmiştir. İki çalışmada da Ti-6Al-4V alaşımı tozlar kullanılmıştır.

4.1. Seçici Lazer Ergitme Prosesi Deneyi

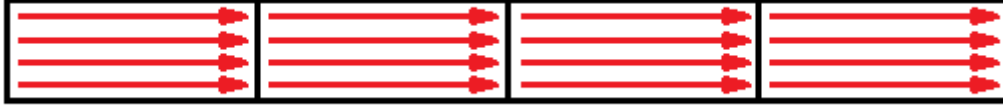
SLE deneyi için muhtelif enerji parametrelerinde numuneler üretilmiştir. Üretim, ERMAKSAN Ena Vision 250 SLM makinasında gerçekleştirilmiştir. Numuneler 2 mm x 2 mm x 20 mm'lik kare prizma şeklinde olup Şekil 4.1.'de geometri ve üretim yönü belirtilmiştir. Numuneler 14 adet olup katman kalınlığı, taramalar arası mesafe, tarama stratejisi, demet çapı ve soğuma süreleri aynıdır. Bu yaklaşım, değişik lazer ve hız parametrelerinin mikro yapı üzerine etkilerinin belirgin şekilde belirlenebilmesi için tercih edilmiştir.



Şekil 4.1. Numune geometrisi ve üretim yönü

Numunelerde Şekil 4.2.'de gösterildiği üzere uniform tarama stratejisi tercih edilmiştir. Buna ilave olarak yeni katmanlar için rotasyon veya yıldız örgü kullanılmamıştır. Bu şekilde bir üretim, bazı durumlarda simülasyonlar için hesaplama maliyetini azaltmaya yönelik olarak ekstrapolasyon benzeri bazı yaklaşımların kullanımına olanak sağlamaktadır. Bunun

yanı sıra termal deformasyonu önlemek amacıyla numuneler 0.5 cm'lik 4 cep halinde üretilmiştir. Ceplerin birbirinden (en azından sınırlardan uzak, merkezi noktalar için) etkilenmediği varsayılırsa hesaplama maliyeti, bir cebin hesaplanmasıyla daha da azaltılabilir.



Şekil 4.2. Numune tarama stratejisi

Üretilen numunelerde kullanılan ortak ve hususi parametreler Çizelge 4.1.'de verilmiştir. Çizelgede soğuma zamanı 1 ve 2 olmak üzere iki adet soğuma zamanı verilmiştir. Bunun sebebi üretim sırasında başka parçaların da üretilmiş olmasıdır. Numuneler tablaya en yakın konumda üretilirken diğer üretilen parçalar için support inşası sürmektedir. Bu supportlar her iki katmanda bir atıldığından her iki katmanda bir soğuma süresi artmıştır. Buradaki soğuma sürelerinden kasıt Şekil 4.2.'deki bir cebin üretimine müteakip lazerin bölgeden uzaklaşması ve en nihayetinde toz serme zamanını kapsamaktadır. Kısacası aynı cebin yeni katmanının üretime başlamasına kadar geçen süreyi ifade etmektedir.

Çizelge 4.1. SLE numune üretim parametreleri

Demet çapı	100 μm			
Toz katman kalınlığı	30 μm			
Tarama arası mesafe	70 μm			
Malzeme	Ti-6Al-4V			
Numune #	Güç (W)	Tarama hızı (m/s)	Soğ. Zamanı 1 (sn)	Soğ. Zamanı 2 (sn)
1	50	0.5	22.17	152.17
2	100	0.5	22.17	152.17
3	100	0.75	22.26	152.26
4	150	0.75	22.26	152.26
5	150	1	22.305	152.305
6	195	1	22.305	152.305
7	195	1.2	22.3275	152.3275
8	125	0.75	22.26	152.26
9	175	0.75	22.26	152.26

Çizelge 4.1 (devam) SLE numune üretim parametreleri

10	175	1	22.305	152.305
11	195	0.5	22.17	152.17
12	195	0.75	22.26	152.26
13	150	0.5	22.17	152.17
14	150	1.2	22.3275	152.3275

Resim 4.1.'de üretilen numuneler gözükmektedir. Numuneler, tarama ceplerinin ortalarından kesilmiş ve ardından bakalitleme ve zımparalama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ardından mikroyapılar, HF ve HNO₃ içeren bir solüsyon kullanılarak pamukla sürtme yoluyla açığa çıkarılmıştır. Bu yöntem hassas dağlama ve dağlamanın kontrolü bağlamında bazı avantajlar sunmaktadır. Optik görüntüleme için ise Leica DMI5000 M marka mikroskop kullanılmıştır.

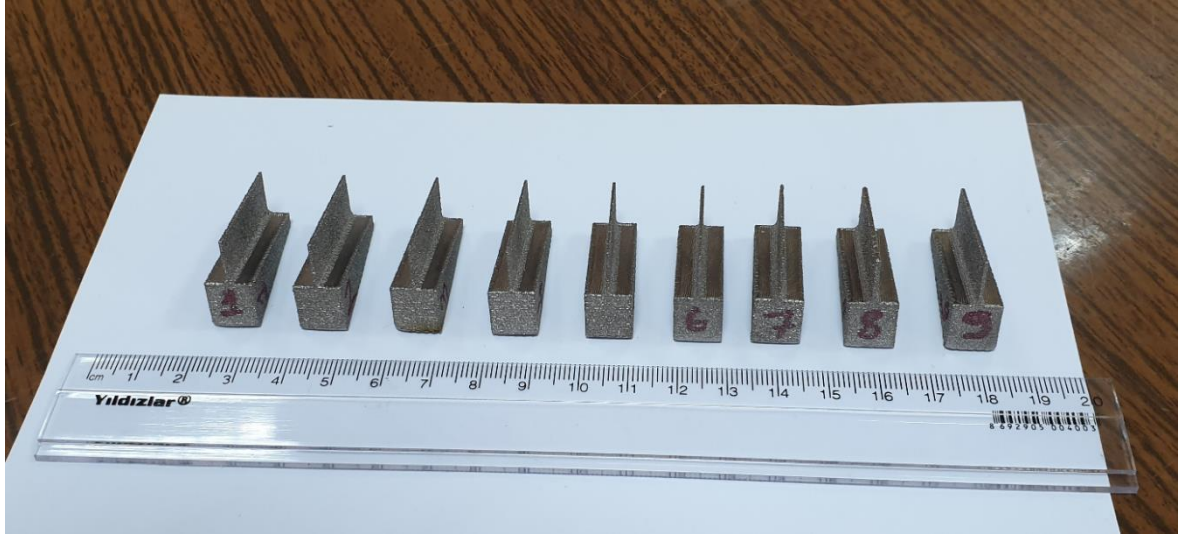


Resim 4.1. SLE deneyi üretilen numuneler

4.2. Elektron Demeti Ergitme Prosesi Deneyi

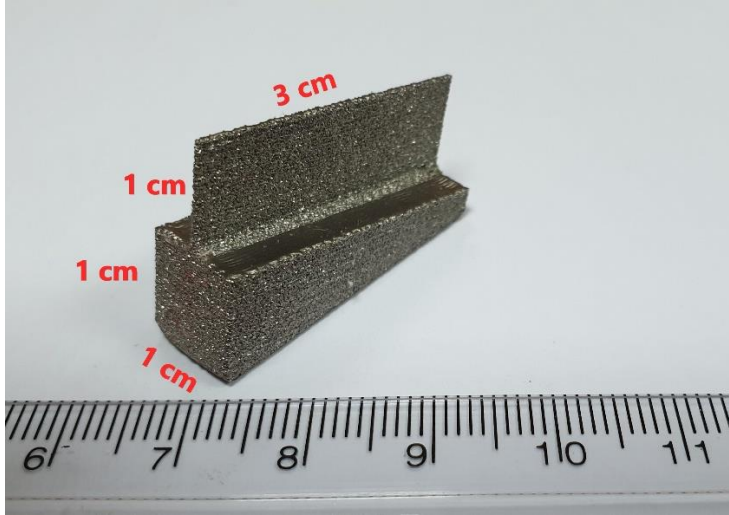
EDE deneysel çalışması, ASELSAN Elektronik Sanayi ve Ticaret A.Ş. ile ortak yürütülen “Eklemeli İmalata Yönelik Elektron Tabancası Geliştirilmesi ve Elektron Demetiyle Metal Tozlarının Etkileşiminin Araştırılması” projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Numune üretimi, ASELSAN bünyesinde, 60 kV hızlanma voltajına sahip bir Arcam A2X EDE makinesinde icra edilmiştir. Bu makinede üretim, 2×10^{-2} mbar’ın altında vakum seviyesinde olup uygulanan akıma göre muhtelif enerji çıktıları elde edilebilmektedir. Makine, üretim parametrelerini ayarlamak için yerleşik bir algoritmaya sahiptir. Bu algoritma demet çapı, enerji, tarama hızı ve tarama stratejisi gibi üretimle alakalı birçok hususa karar vermektedir. Kısacası üretim esnasında bu parametreler sürekli değişebilmektedir. Dolayısıyla operatör

müdahalesine izin verilmediğinden deneysel bağlamda sıkıntılar bulunmaktadır. Makineyi sabit parametreler altında üretime teşvik etmek için bazı yaklaşımlar mevcuttur. İnce cidarlı duvar üretimi [95] bunlardan biridir. Bu nedenle Resim 4.2.'de görüldüğü üzere ince cidarlı bir geometriye sahip numuneler üretilmiştir. Bu tip bir geometride, ergiyik havuzlar önceki taramalardan nispeten daha az etkilendir. Buna ilaveten duvar üretiminin başlamasıyla beraber makine, bazı parametreleri sabitlemektedir. Böylelikle üretim parametresi ve numune çıktısı ilişkilendirilebilir.



Resim 4.2. EDE deneyi üretilen numuneler

Burada duvar için önce bir temel oluşturulmuş ve bu temelin üstüne ise incelen bir duvar inşa edilmiştir (Resim 4.3.). Buradaki amaç muhtelif üst üste tek çizik taramaların etkilerinin incelenmesidir. Ti-6Al-4V'da özellikle mikro boyuttaki muhtelif ergiyik havuzlu üretimlerde ergiyik havuzları birbirinden ayırt etmek (füzyon çizgilerini görmek) oldukça zor olmaktadır. Bu bağlamda bu yöntemle başvurulmasının bir diğer sebebi de görülmüş olur. En azından duvar kalınlığının ergiyik havuz genişliği hakkında bir bilgi vereceği kesindir. Geriye ise üst üste binen bu tekli taramaların birbirinden ayırt edilebilmesi kalmaktadır ve bu durum çoklu taramalara nispetle daha kolaydır.

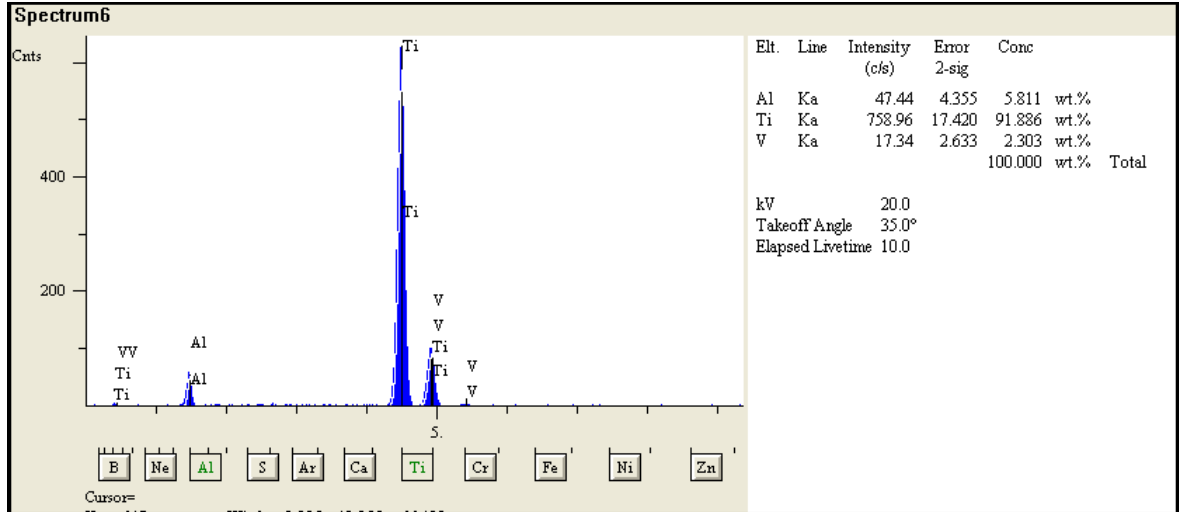


Resim 4.3. EDE deney numunesi örneği

Üretilen numuneler tel erozyon tezgâhı ile kesilmiş ve ardından bakalite alınmıştır. Zımparalama ve parlatma işlemlerinin ardından SLE işleminde olduğu gibi dağlama işlemi tatbik edilerek ergiyik havuzların tespitine çalışılmıştır. Daha sonra tespit edilen ergiyik havuzlardan deneysel manada kullanıma uygun olanları seçilmiştir. Son olarak seçilen ergiyik havuzlara ait parametre değerleri makinenin log dosyasından belirlenmiştir. Bu son derece zorlu ve zaman isteyen bir süreçtir. Zira log dosyaları yüzbinlerce satırdan oluşmakta ve ilgili taramada kullanılan parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Buna ilaveten makinenin kullandığı SF indeks gibi kendine özel tanımlı fonksiyonları vardır ve bazı üretim parametreleri direk olarak log dosyalarında mevcut değildir. Fakat bunların tespitinde kullanılabilecek bazı enstrümanlar mevcuttur [96, 97, 98].

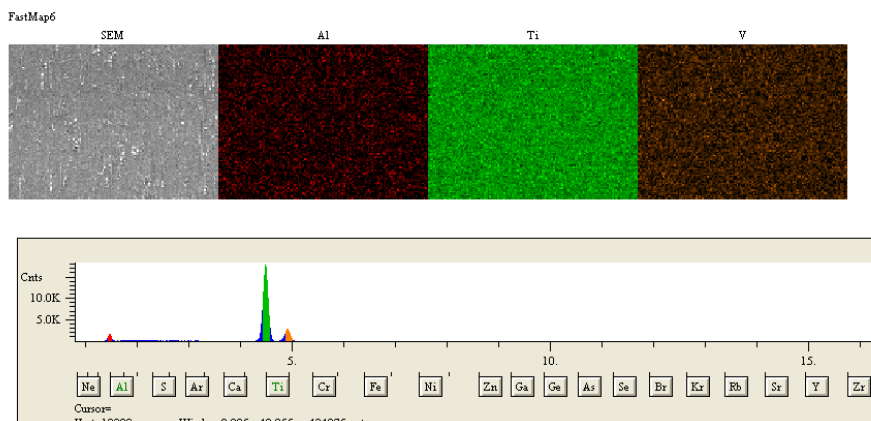
4.3. EDS Haritalama

Üretilen numunelerin alaşım elementi dağılımlarının kontrolü için EDS haritalama analizi yapılmıştır. Analiz, Jeol JEM 6060 LV marka bir taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. Dağlanan numune yüzeylerinde özellikle vanadyum miktarında belirgin düşüş gözlemlenmiştir. Örnek olarak 2 nolu numune için Şekil 4.3.'de yüzeyden elde edilen alaşım element oranı sunulmuştur. Görüleceği üzere vanadyum oranı 4'ün bariz altındadır. Diğer dağlanan numunelerde de aynı durum gözlemlenmiştir.

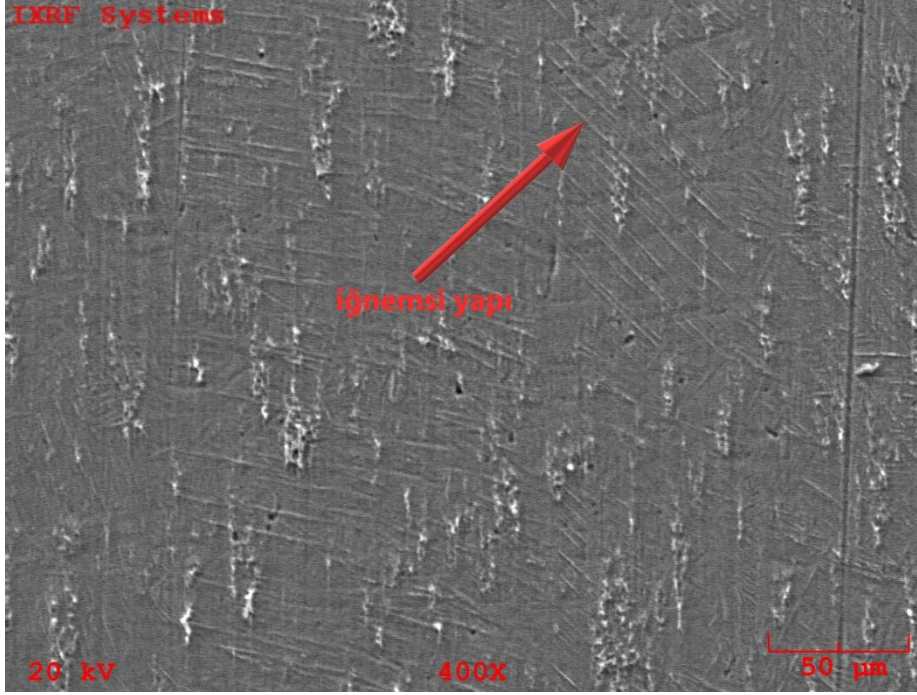


Şekil 4.3. SLE Numune #2 dağlanan yüzeyde element dağılımı

Şekil 4.4.'de aynı numune yüzeyinde alaşım element dağılımı gözükmemektedir. Görüleceği üzere element dağılımı yüzeyde uniform denebilecek şekilde dağılmış bulunmaktadır. Mikrometre seviyesinde gerçekleştirilen üretim neticesinde oluşan değişik mikro yapısal desenler, EDS haritalama ile açığa çıkmamıştır. Örnek olarak vanadyum veya alüminyumun oluşan martenzitik iğnelerin durumuna göre bazı bölgelerde toplanması beklenirdi. Fakat gözükken o ki desenlerin belirgin hale gelebilmesi için daha küçük alan ve daha hassas analize ihtiyaç duyulmaktadır. Zira Resim 4.4.'deki büyütülmüş SEM görüntüsünde görüleceği üzere dağlama sonucu oluşan iğnemsî yapılar oldukça incedir. Alaşım element dağılımı bu ölçekte SEM görüntüsüne kıyasla net bir portre ortaya koymamaktadır.



Şekil 4.4. SLE Numune #2 dağlanan yüzeyde EDS haritalama



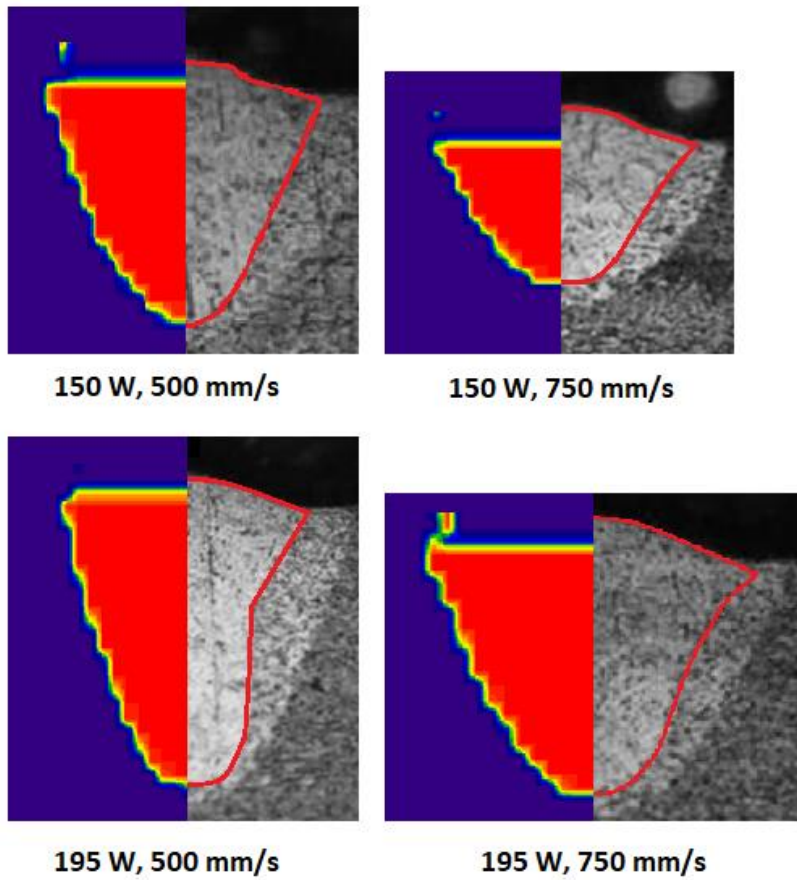
Resim 4.4. SLE Numune #2 dağlanan yüzeyin taramalı elektron mikroskop görüntüsü

Vanadyum miktarının belirgin şekilde düşük çıkması dağlama kaynaklı bir vanadyum kaybı olduğunu da işaret edebilir. Nitekim dağlama neticesinde açığa çıkan lamelli bir yapıda beta fazı optik mikroskopta (SEM'dekinin aksine) siyah gözükmemektedir. Bu durum bu fazın daha fazla aşındığını göstermektedir. Bu faz önceden belirtildiği üzere daha fazla vanadyum barındırmaktadır. Oluşan martenzitik yapılar içinde benzer durum söz konusu olabilir. Örnek olarak verilen Resim 4.4.'deki iğnemsî yapılar ve özellikle bu iğnemsî yapıların etrafı vanadyumca zengin olabilmektedir. Dağlama neticesinde aşınıp giden bu yapılar o yüzeyde ortalama vanadyum seviyesini belirgin düşürmüş olabilir. Bu durumu net şekilde belirlemek üzere aynı numuneler zımparalanarak tekrardan EDS haritalama analizine tabi tutulmuşlardır. Dağlanmamış numuneler, bu sefer Phenom XL G2 masaüstü bir taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir ve vanadyum oranı yaklaşık 4.5 çıkmıştır.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

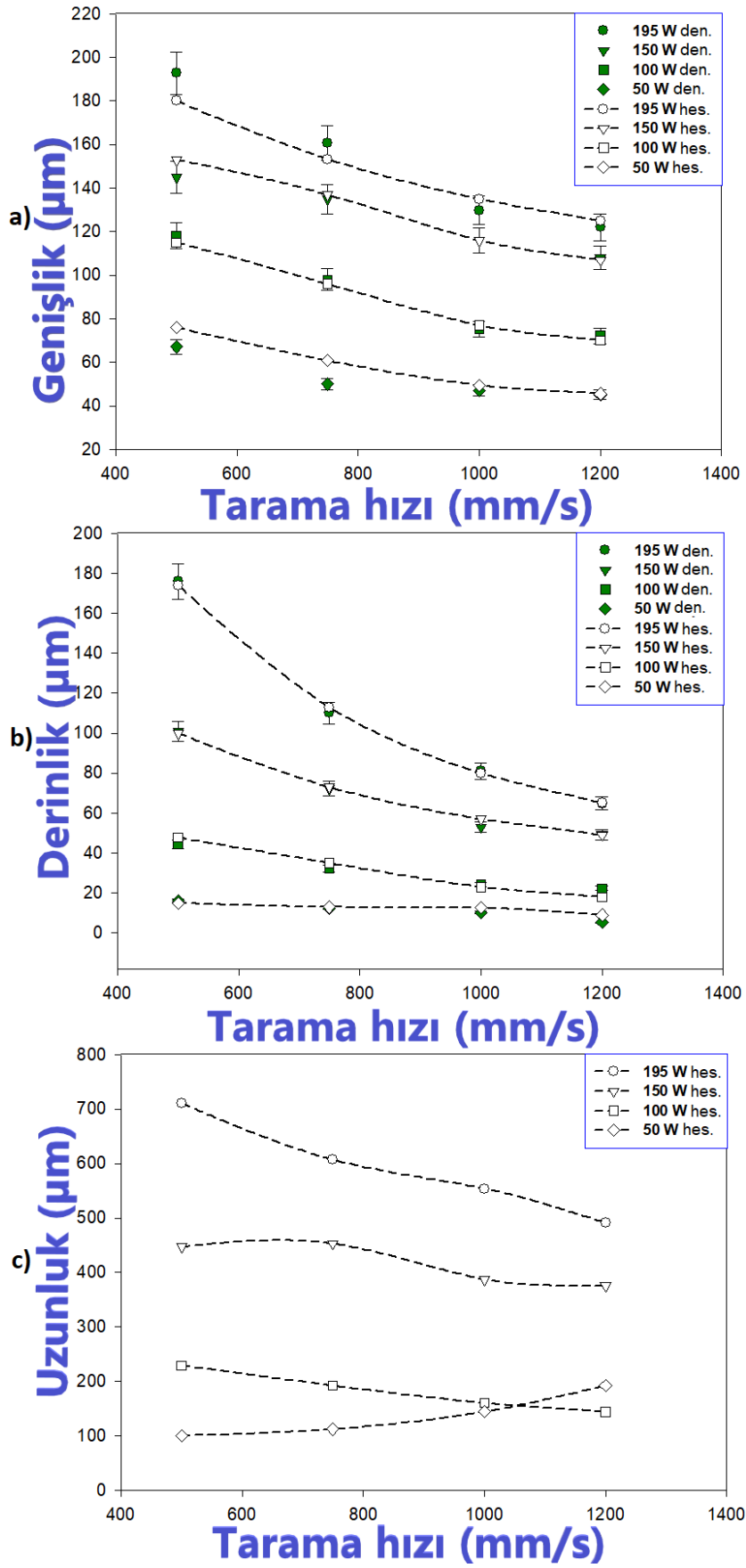
5.1. Termal Modellerin Kurgulanması

Bölüm 3’de geliştirilen SLE modeli, ilk önce FORTRAN dilinde yazılan bir kod ile tek tarama çalışmaları üzerinde denenmiştir [80]. Buradan emilim veya bir başka ifadeyle genel verimlilik korelasyonu olan Eş. 3.21 türetilmiştir. İlgili çalışmadan [80] bazı hesaplamalı ve deneysel ergiyik havuz profilleri Şekil 5.1.’de sunulmuştur. Şekilde görüleceği üzere model, anahtar deliği formasyonu dahil profil bağlamında makul sonuçlar üretebilmektedir.



Şekil 5.1. SLE tek tarama deneysel ve hesaplamalı ergiyik havuz profilleri [80]

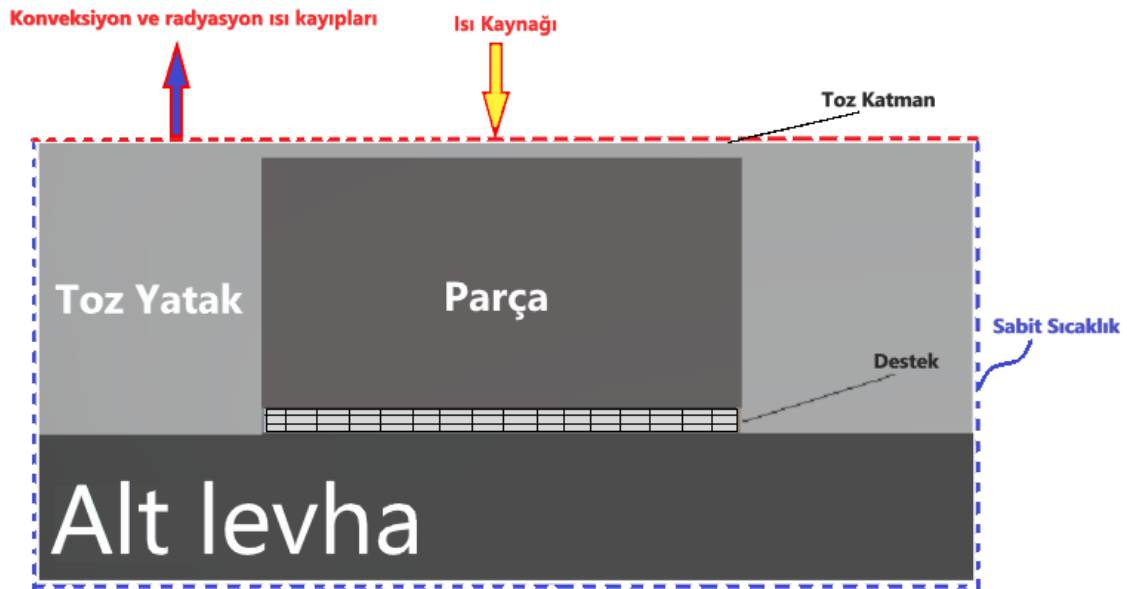
Şekil 5.2.’de ise hesaplamalı ve deneysel ergiyik havuz boyutları verilmiştir. Sol tarafta kırmızı renkli alan hesaplanan ergiyik havuz profilidir. Sağda ise deneysel katılmış ergiyik havuz profilleri mevcuttur. Özellikle yüksek enerji yoğunluklarında derinlik hesaplaması bağlamında sıkıntılar olabilmektedir. Bu bağlamda sonuçlar tatmin edicidir. Diğer taraftan ilgili makalede deneysel bir veri olmadığından kıyaslanma şansı olmasa da ergiyik havuz boyları da sunulmuştur.



Şekil 5.2. SLE hesaplamalı ve deneysel katılmışmış ergiyik havuz boyutları [80], a) genişlik, b) derinlik, c) boy (sadece hesaplanan)

Sonuç olarak ilgili referans için hesaplanan ergiyik havuz boyları $\pm\%7$ gözükmemektedir. Yine aynı referanstan yapılan hesaplamaları endirekt olarak destekleyen bir başka deneysel veri daha mevcuttur. Dikkat edilirse genel trendin aksine 50 W'lık taramalarda ergiyik havuz boyu tarama hızı ile artmaktadır. Çünkü alt katmanla füzyon sağlanamamış ve bu nedenle ergiyik havuz soğuma oranı düşmüştür. Yapılan hesaplama kararsız bir rejime girildiği göstermektedir. Bu durum deneylerde görülen toplama etkisi ile uyumludur [80].

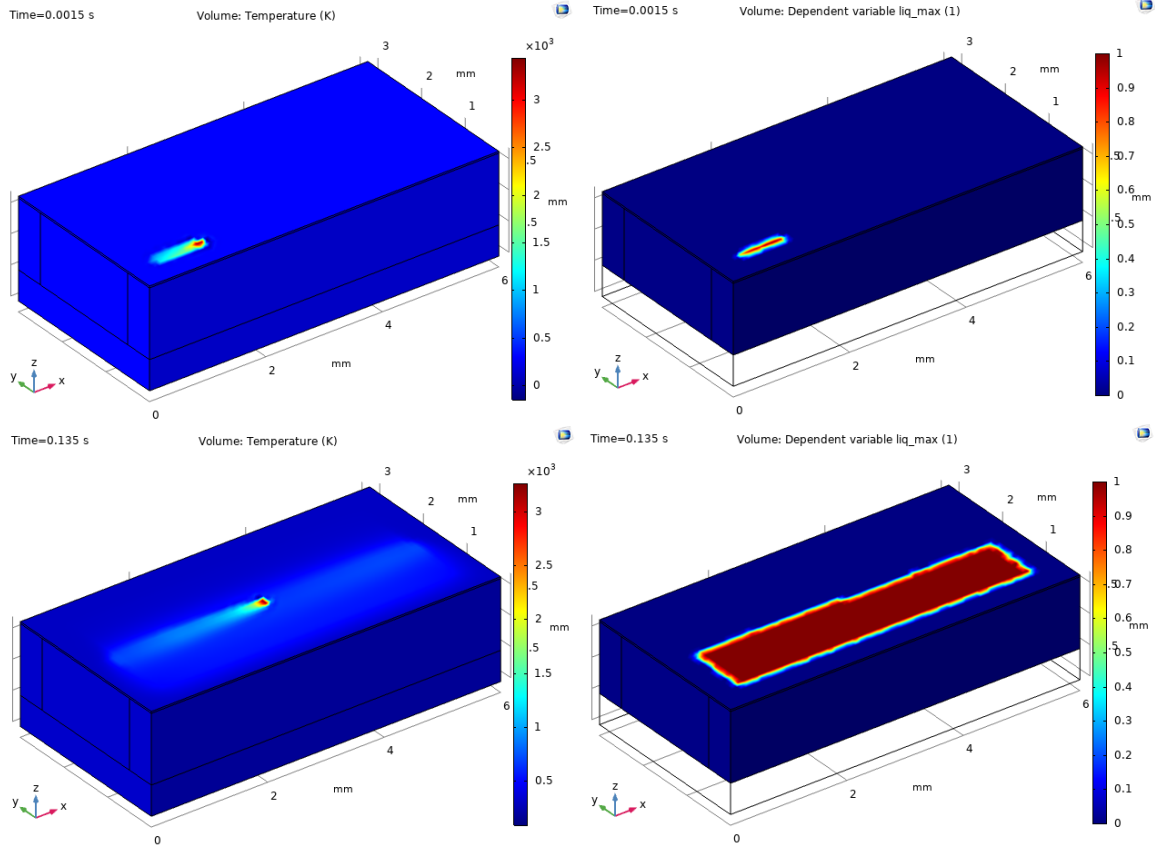
Üretilen numunelerin termal analizinde ise Comsol Multiphysics® programı kullanılmıştır. Çünkü bu program çoklu tarama ve çoklu kat simülasyonları ve görsel sunum açısından birçok kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Mevcut model, Comsol Multiphysics® programına uyarlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Model konfigürasyonu ve sınır şartları Şekil 5.3.'de sunulmuştur. Görüleceği üzere hesaplama alanı alt levha, destek yapı, parça ve parçayı çevreleyen toz katmandan oluşmaktadır. Üst yüzey hariç bütün sınırlarda, yeterli uzaklıkta sabit sıcaklık sınır şartı kullanılmıştır. Üst yüzeyde ise ısı kaynağı girdisi ile konveksiyon ve radyasyon ısı kayıpları mevcuttur. Ti-6Al-4V için kullanılan termo-fiziksel özellikler Ek-1'de verilmiştir.



Şekil 5.3. SLE numune simülasyonları için model konfigürasyonu

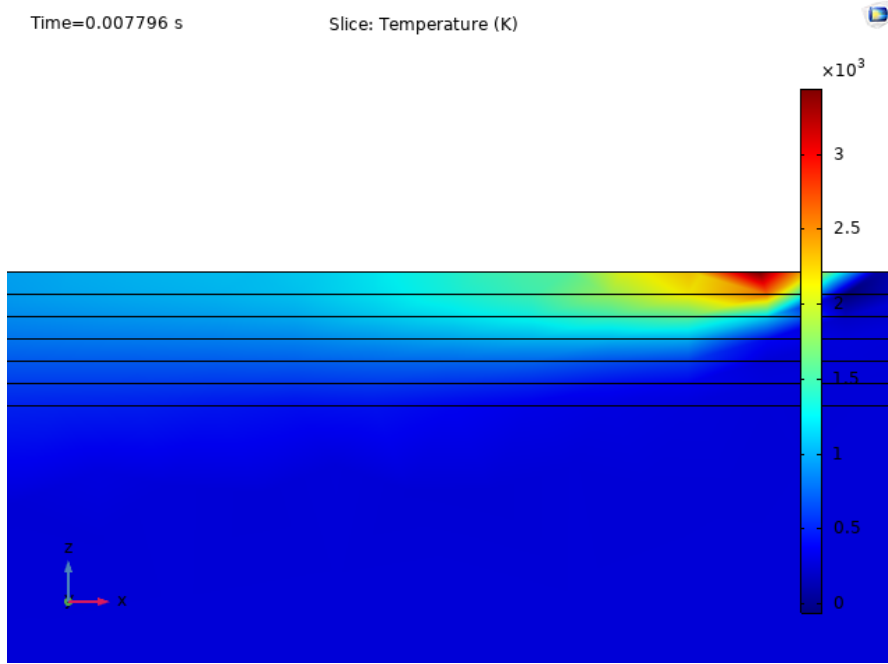
Şekil 5.4.'de Comsol Multiphysics® programında SLE simülasyonundan örnek görüntüler sunulmuştur. Solda hareket halindeki ısı kaynağının oluşturduğu sıcaklık dağılımı ve sağda ise ergiyerek birleşen bölgeler gözükmemektedir. Böylelikle füzyon problemlerini de fark etmek mümkün olmaktadır. Bunun için sıcaklığın yanı sıra sıvılaşma değişkeni (liq_max),

ayrı bir matematik modülü oluşturularak tanımlanmıştır.



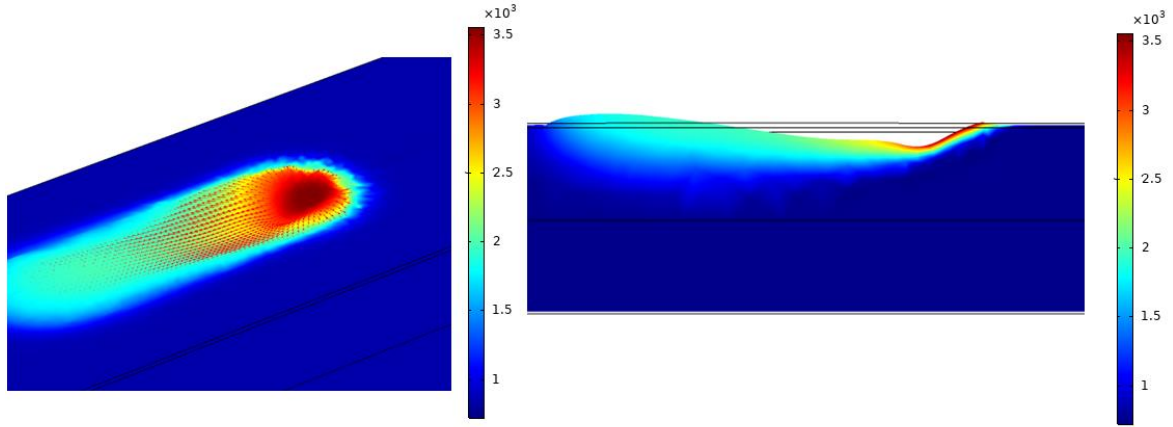
Şekil 5.4. Cansol Multiphysics® SLE simülasyonundan örnek görüntü, sıcaklık dağılımı ve ergiyerek katılan bölgeler

Şekil 5.5.'de ergiyik havuz merkezinden yan profilden bir örnek verilmiştir. Görüleceği üzere çoklu tarama ve çoklu katman simülasyonları icra edilmiştir. Zira ilgi alanındaki herhangi bir nokta hem yan taramalar hem de üst katmanlardan etkilenmektedir. Çoklu katmanın bir noktaya etkisi, girilen enerji düzeyine göre mevcut çalışmada yaklaşık 5 ila 20 katman arası değişebilmektedir. Yapılan SLE deneylerde ısı yığılması olmamakta, bir başka deyişle her katman sonrası soğuma için yeterli bekleme süresi bulunmaktadır. Bu durum hesaplama maliyeti anlamında ciddi bir avantaj sağlamaktadır. Buna rağmen iyi bir analiz için zorunlu minimum ilgi alanı ve dolayısıyla eleman sayısı, enerji girdisine göre ciddi oranda yüksek olabilmektedir. Bu nedenle bazı parametrelerin simülasyonları günler sürmekte ve data çıktısı boyut bağlamında yüzlerce Gb'lara ulaşmaktadır.



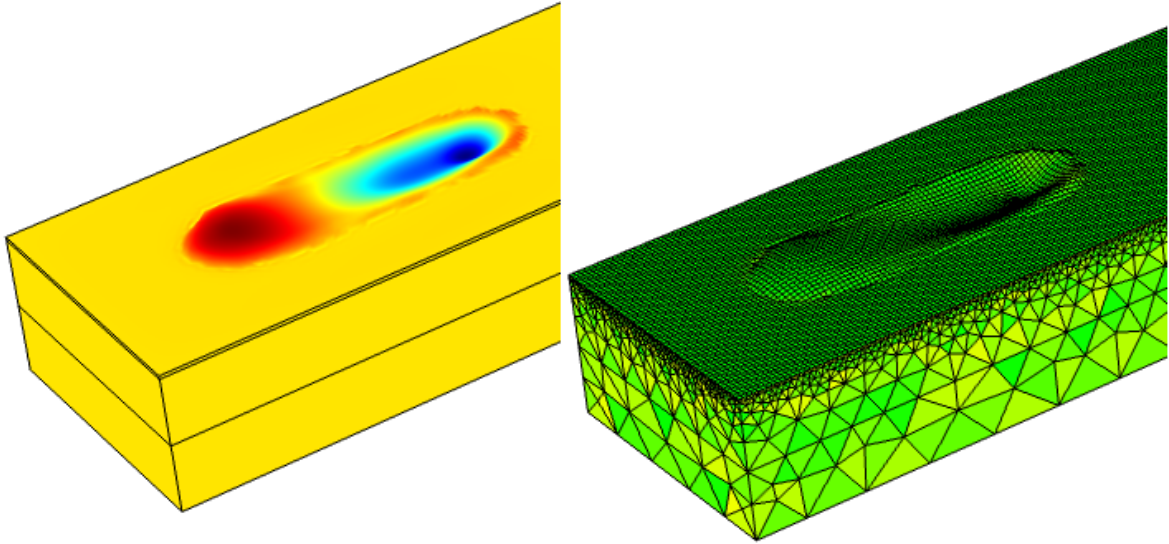
Şekil 5.5. Comsol Multiphysics® SLE çok katmanlı simülasyonu ergiyik havuz yan profilden sıcaklık dağılımı

EDE modeli de Şekil 5.3.'dekine benzer şekildedir. Fakat üst sınırdaki konveksiyon yerine Bölüm 3.2.'de tanımlanan buharlaşma ısı kaybı mevcuttur. Bunun yanı sıra Comsol Multiphysics® akışkan modülü de kullanılmış olup yüzey deforme olabilir serbest yüzey olarak tanımlanmıştır. Burada ergime sonrası katı malzemenin sıvılaşarak hareket etmesi yüksek yapay viskozite yaklaşımı ile sağlanmıştır. Yani katı faz bölgesinde, son derece yüksek bir viskozite değeri tanımlanmıştır. Bu yüksek değer, ilgi alanındaki metal kütleyi hareketsiz tutmalıdır. Sıcaklığın yükselmesiyle beraber solidüs sıcaklığından sonra bu değer, sıvı metalin viskozite değerine yaklaşmalıdır. Böylelikle ergime ile hamurlaşan kütle yavaş bir şekilde bazı kuvvetlerin etkisi altında hareket etmeye başlayabilir. Şekil 5.6.'da simülasyondan bir örnek verilmiştir. Solda ergiyik havuz üzerinde hız vektörleri de görülmektedir. Sağda ise yan profilden bir görüntü verilmiştir. Yüzey gerilimi ve özellikle geri tepme basıncı nedeniyle oluşabilecek bir depresyon (çökme) daha net görülebilir. Eğer bu aşırı bir depresyon ise bazen ALE metodu yetersiz kalabilmektedir. Nitekim ağ örgüleri aşırı deforme (İng. Inverted mesh) olmakta ve hesaplama problemleri ortaya çıkmaktadır. Bu durumda faz-alan veya level set metodu gibi yaklaşımlar gerekebilir. Kısacası gaz veya boşluk alanı da ayrı bir faz olarak tanımlanmalıdır. Ardından bu iki fazın etkileşimi için ayrı denklemler ve yaklaşımlara başvurulabilir.



Şekil 5.6. Comsol Multiphysics® EDE simülasyonundan örnek görüntü, üst ve ergiyik havuz yan profilden sıcaklık dağılımı ve yüzey deformasyonu

Şekil 5.7.'de oluşan deformasyon, z eksenine göre çıkıntı ve depresyon olmak üzere solda gözükmemektedir. Izgara yapı üzerinde etkisi ise sağda gözükmemektedir. Tarama sırasında oluşan bu çıkıntı (İng. Protrusion) ve çökme (İng. Depression) toz yataklarda görülen karakteristik bir durumdur [37]. Tarama başlangıcında oluşan bu yapı geriye doğru süpürülen metal kütlenin donması sonucu oluşmaktadır. Tarama sırasında oluşan depresyon ise ısı kaynağı ile beraber ilerlemekte ve ısı kaynağı geçişinden sonra ise dolmaktadır. Fakat ısı kaynağının durması ile beraber tarama sonunda bir depresyon bölgesi kalıcı olur.



Şekil 5.7. Comsol Multiphysics® EDE simülasyonundan örnek görüntü, çıkıntı ve çökme ve ağ örgüsü deformasyonu

5.2. Seçici Lazer Ergitme Prosesi Deneysel ve Numerik Çalışma Sonucu

5.2.1. Numunelere genel bakış

Resim 5.1. ve 5.2.'de üretilen numunelerin tam kesit dağlanmış optik görüntüleri sunulmuştur. Enerji yoğunluğunun bir sonucu olarak direk göze çarpan ilk olgu bazı numunelerde meydana gelen gözenekli yapılardır. Çizelge 5.1.'de numunelerin porozite durumları özetlenmiştir. 1 nolu numunede meydana gelen porozite yapısal manada diğerlerinden gözle görülür biçimde fark arz etmektedir. 50 Watt ve 500 mm/s tarama hızında üretilen bu numune enerji yoğunluğu bağlamında yetersiz kalmıştır. Zaten katmanlar arası füzyon problemlerinin olacağı numerik analizde de tahmin edilmektedir. Bu nedenle numunede düzensiz gözenek şekilleri gözlemlenmektedir.

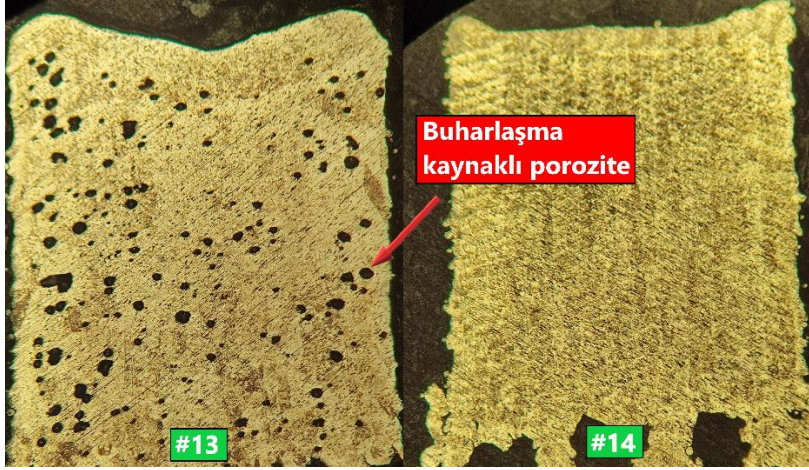
9, 11, 12, 13 nolu numunelerde yüksek enerji yoğunluğu sebebiyle buharlaşma kaynaklı porozite gözükmemektedir. Dikkat edilecek olursa oluşan gözenekler yapısal olarak daha çok ovaldir. Bunun sebebi hapsolan gazın sıvı metal içinde oluşturduğu balonumsu yapıdır. Analizlerde tüm bu numunelerde anahtar deliği rejimi oluşumu beklenmekteydi. Özellikle 11 ve 13 nolu numunelerde son derece yüksek buharlaşma, hatta sayısal analize göre ergiyik havuz içinde kaynama mevcuttur. Diğer taraftan 9 ve 12'de ise yüzeyde meydana gelen bir faz değişimi nedeniyle gaz balonlarının kaçması daha kolay olmuştur. Bu nedenle porozite miktarı 11 ve 13'e göre oldukça düşüktür.

Göze çarpan bir başka ayrıntı ise bazı numunelerde oluşan şeritli yapıdır. Özellikle 4, 5, 6, 7 nolu numunelerde bu bariz gözükmemektedir. Bunun yanı sıra bu numunelerde en üstte belirgin şekilde ayrıışan bir martenzitik bölge olmasıdır. Bu yapının, bazı soğuma oranlarının mikroyapısal değişime etkisinin anlaşılmasında bazı kolaylıklar sağlayabileceği değerlendirilmiştir. Nitekim soğumanın belli bir oranın altına inmesiyle şeritli yapının oluştuğu değerlendirilebilir ki bu oran numerik analizle kabaca tespit edilebilir.

Son bir gözlem ise tarama stratejisinin, son derece düzgün sütunumsu tanecik yapılarının elde edilmesine olanak sağladığıdır. Rotasyonun ve yıldız örgünün olmaması sütunsu taneciklerin genişliğinin net bir şekilde belirlenmesi ve termal analiz ile ilişkilendirilmesi bağlamında avantaj sunmuştur. Özellikle 3 nolu numunede, büyük ölçekte bile rahatlıkla tanecik yapılar ayırt edilmektedir.



Resim 5.1. SLE tam kesit dağlanmış numune resimleri 1 (Büyütme oranı x5)



Resim 5.2. SLE tam kesit dağlanmış numune resimleri 2 (Büyütme oranı x5)

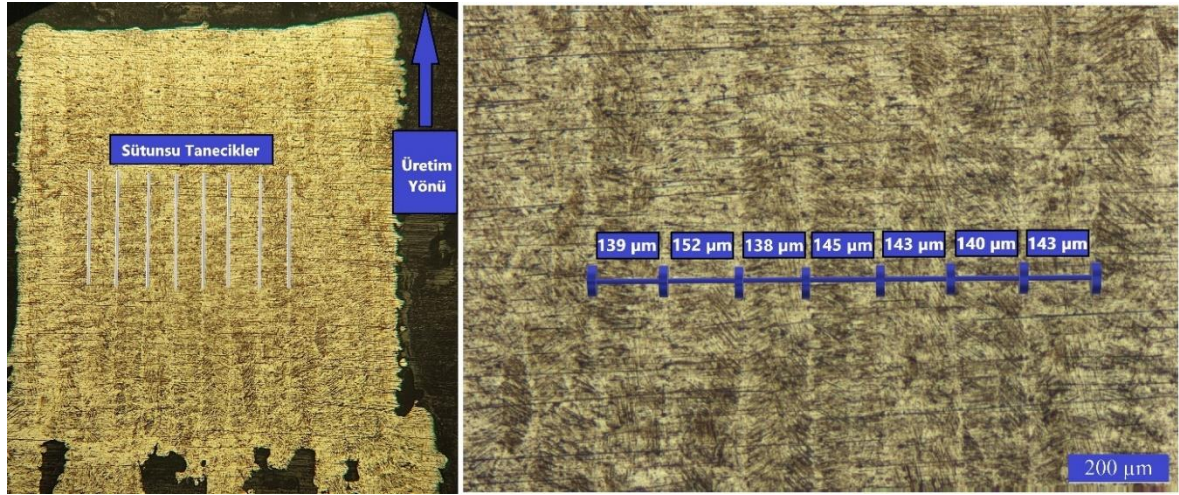
Çizelge 5.1.'de görüleceği üzere on dört numuneden dokuzu üretim bağlamında başarılı kabul edilebilir. Özellikle 1, 11, 13 nolu numuneler ciddi oranda porozite içermektedir ve bu denli boşluklu bir yapı termal yapıyı da rahatlıkla etkileyebilir. Çünkü bu yapı bir çeşit izolasyon gibi davranabilir. Bu da soğuma oranlarını ciddi etkileyebilir. Bu nedenle bu numunelerin daha ileri analizler için değerlendirilmeleri sağlıklı olmaz.

Çizelge 5.1. Numune porozite sorunları

Numune #	Güç (W)	Tarama hızı (m/s)	Porozite problemi	
1	50	0.5	Füzyon problemi	
2	100	0.5		
3	100	0.75		
4	150	0.75		
5	150	1		
6	195	1		
7	195	1.2		
8	125	0.75		
9	175	0.75	Nadir/dairesel	
10	175	1		
11	195	0.5	Çok sayıda değişik ebatta/dairesel	
12	195	0.75	Nadir/dairesel	
13	150	0.5	Çok sayıda değişik ebatta/dairesel	
14	150	1.2		

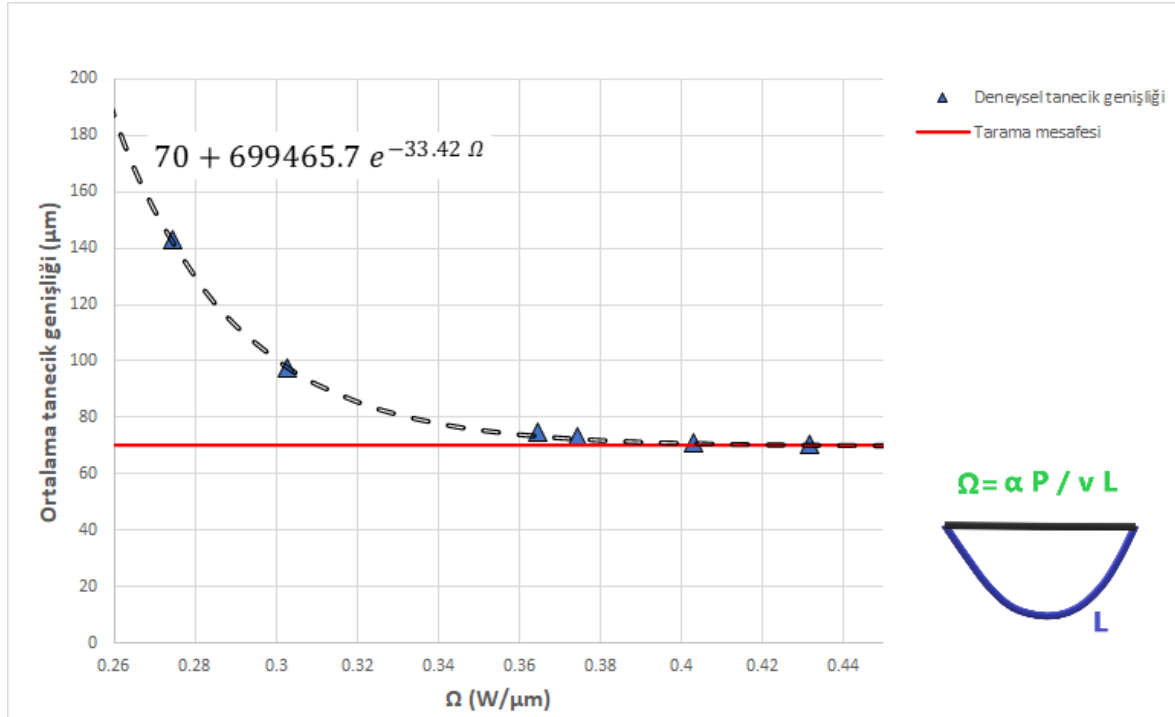
5.2.2. Sütunsu tanecik genişliği ısı akısı ilişkisi

Eklemeli imalat yöntemlerinde enerjinin büyük bölümü, alt levha yönünde akarak ortamdaki uzaklaşmaktadır. Bu nedenle Resim 5.3.'de gösterilen ve üretim yönü boyunca uzanan sütunsu tanecik yapılar SLE işleminde de karakteristiktir. Bu yapıların boyutsal parametreleri hiç şüphesiz termal süreçle iniltilidir. Hatta soğuma oranları ile direkt ilişkilendirilebilirler [99, 100].



Resim 5.3. 3 nolu numune üretim yönü boyunca oluşan sütunsu tanecikler (Büyütme oranı x5)

Şekil 5.8.'de Resim 5.3.'deki gibi tanecik sınırları net bir şekilde belli olan numuneler seçilerek tanecik genişliği ile enerji yoğunluğu ilişkilendirilmiştir. Burada enerji yoğunluğu için ifade edilen Ω ifadesi içinde, tarama yönüne dik olan ergiyik havuz perimetresi kullanılmıştır. Perimetre değeri alt levha yönündeki ısı akısı ile direkt bağlantılıdır. Çünkü bu değer, tarama hızı ile beraber birim zamandaki ısı transferi alanını ifade etmektedir. Ergiyik havuza ait boyutsal bir özellik olması nedeniyle üretim parametreleri gibi kullanıma hazır değildir. Kısacası ya deneysel ya da analiz yoluyla hesaplanarak elde edilmesi gerekmektedir. Şekil 5.8.'deki perimetre değerleri sayısal analizden gelmektedir. Görüleceği üzere deneysel tanecik genişliği ile son derece net bir ilişki elde edilmiştir. Burada göze çarpan bir diğer husus tarama mesafesinin tanecik boyutuna hâkim etkisidir. Tarama mesafesi enerji yoğunluğu bağlamında son derece önemli olduğundan bu şaşırtıcı değildir ve literatürde de bu ilişki bilinmektedir [99, 100]. Şekil 5.8.'de tanecik genişliğinin tarama mesafesine yakınsaması dikkate değerdir. Hiç şüphesiz bu deneysel çalışmanın metodolojisi ile ilgilidir. Bu net tablonun öne çıkmasının asıl nedeni sade bir tarama stratejisi seçilmiş olmasıdır.



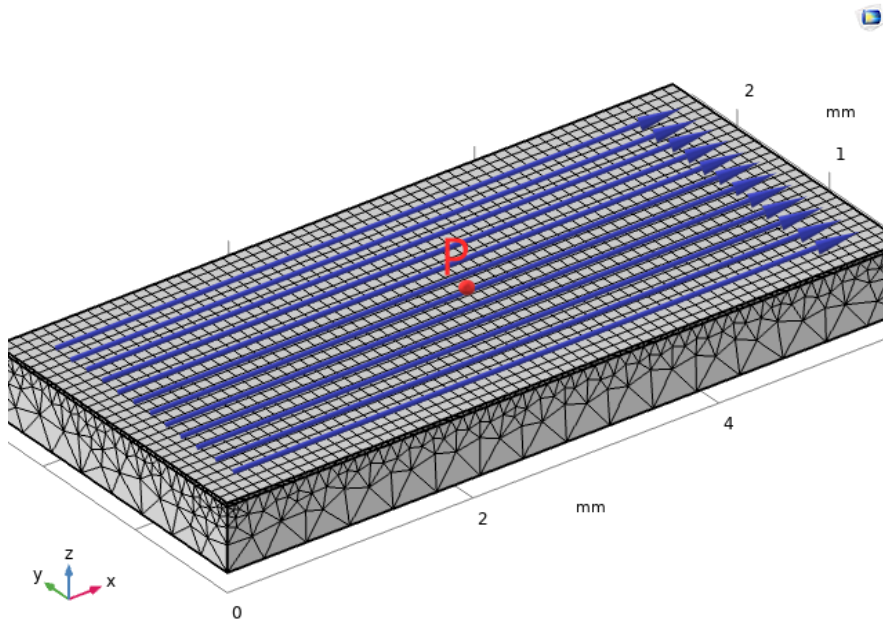
Şekil 5.8. Sütunsu tanecik ortalama genişliğinin ısı akısına göre değişimi

5.2.3. Üretim sürecinde meydana gelen termal döngüler ve soğuma hızlarının mikroyapıya etkisi

SLE işlemi yapısı gereği birbiri ardı gelen ısınma ve soğuma evreleri içermektedir. Burada iki ana unsurdan bahsedilebilir. Bunlar mevcut kattaki yan taramaların etkisi ve müteakip katların etkisidir. Buradan da görüleceği üzere SLE işlemi, mikro düzeyde bir üretim şekli içerse de termal etki bağlamında mezo ve hatta makro seviyeleri kapsamaktadır. Sayısal analiz yoluyla bu termal döngülerin incelenmesi ilgi çekicidir. Çünkü sonuç olarak oluşan mikroyapılar bu döngüler altında meydana gelmektedir.

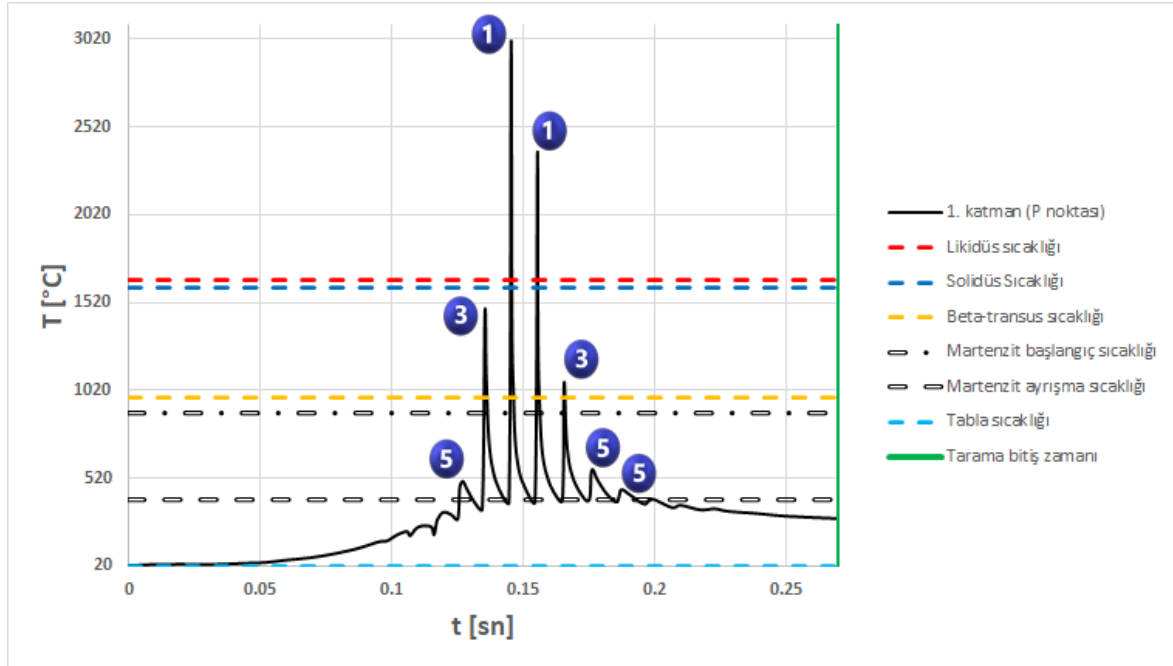
Hesaplama açısından, bütün elemanlarda meydana gelen sıcaklık değişimlerinin sunulması hem mümkün gözükmemekte hem de gereksizdir. Bu bağlamda genel numune karakteristiğini verebilecek bir nokta üzerinden analiz devam edebilir. Zaten deney buna olanak sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Değişmeyen tarama stratejisi, ısı geçmişi bağlamında birbirine benzeyen noktaların elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Şekil 5.9.'a bakılacak olursa orta noktada duran ve taramalardan etkilenen bir P noktası gözükmemektedir. Bu P noktasının yakınındaki birçok noktanın termal döngüsü de aynı P noktası gibi olacaktır. Bu durum tarama alanı sınırlarına yaklaştıkça değişmeye başlar. Fakat orta bölge için ısı geçmişi hemen hemen aynıdır. Benzer şekilde yeni eklenen katmanlar da P noktasını etkileyecektir. Halihazırda deneysel çalışmada katmanlar arası uzun bekleme süreleri ile ısı

birikimi olması engellenmiştir. Dolayısıyla burada eklenen katmanların etkisi de bir süre sonra aynı yan taramalarda olduğu gibi azalacaktır. Burada etkiden kasıt mikroyapısal değişime neden olabilecek bir sıcaklık dalgalanmasıdır. Geriye sadece alt levhaya olan uzaklık dolayısıyla soğuma oranının etkilenmesi kalmaktadır ki belirli bir yükseklikten sonra bu etki de sönümlenmektedir. Çünkü numune, geometrik manada sonsuz uzunluktaki bir duvar haline gelmektedir. Netice olarak numune yüzeylerinden uzak, göbeğe yakın bir noktanın incelenmesi büyük kolaylık sağlar. Çünkü bu bölgede bulunan bütün noktaların termal mazisi hemen hemen aynıdır. Sadece tarama sıralaması bağlamında bir etki/yönelme oluşabilir. Bu etki göz ardı edilirse oluşan mikroyapılar ile termal döngülerin incelenmesi ve ilişkilendirilmesi sade ama etkili bir yöntem olacaktır.



Şekil 5.9. Hesaplama ilgi alanının ortasında, termal döngülerden etkilenen bir P noktası

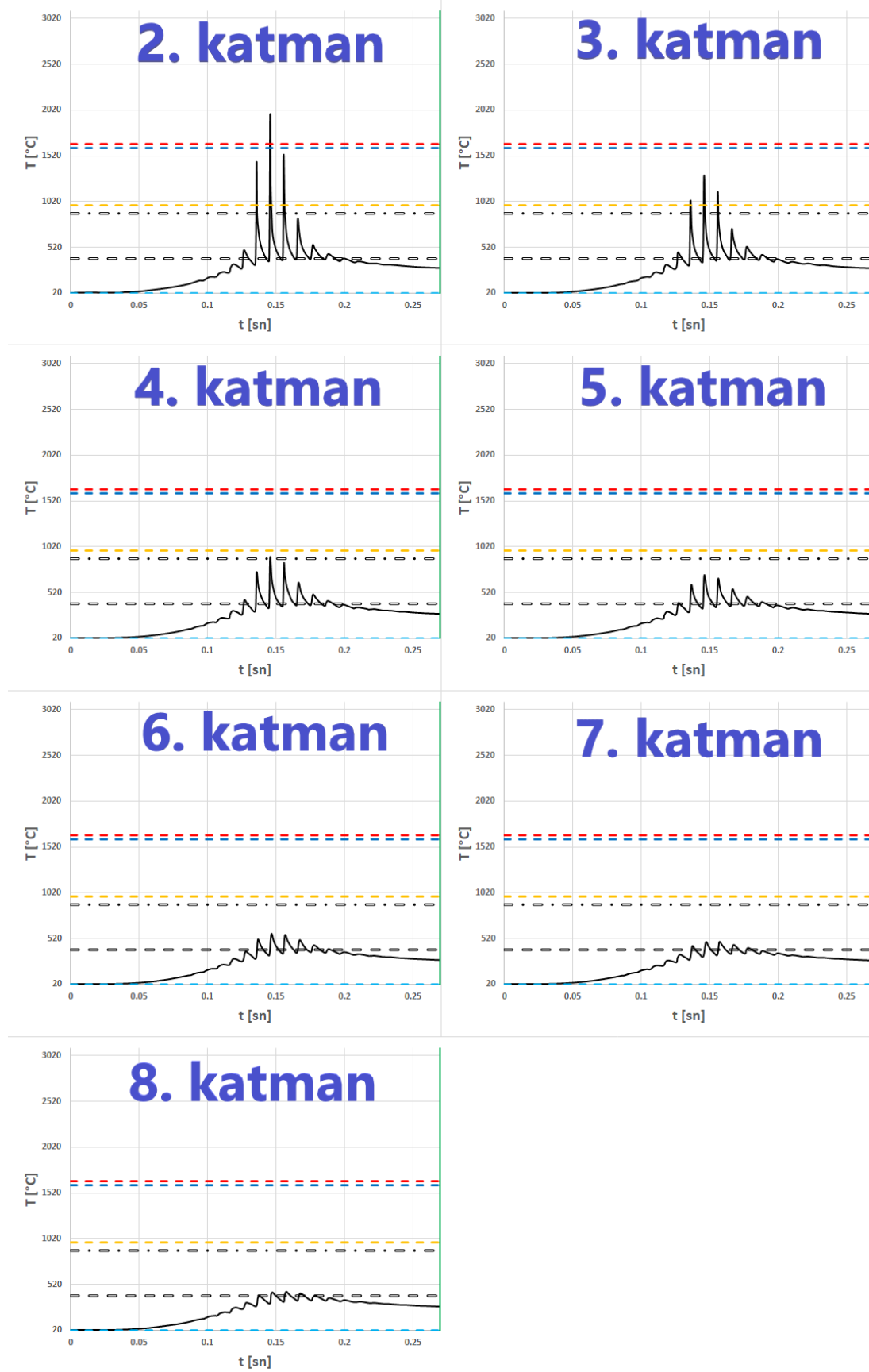
Şekil 5.10.'da yukarıda bahsedilen bir P noktasında meydana gelen termal döngüler sunulmuştur. Görüleceği üzere mevcut katmanda yan taramaların yaklaşması ve uzaklaşması ile beraber sıçramalar oluşmaktadır. Bu sıçramaların maksimumu ise, P noktası üzerindeki tarama sırasında meydana gelmektedir. Fakat sonuç olarak bu sıçramalar lazerin uzaklaşması ile beraber sönümlenmektedir. Hatta öyle ki şekilden görüleceği üzere bir süre sonra martenzit ayrışma sıcaklığının da altına inmektedir. Bu sıcaklık tartışmalı olsa da şekilde Ti-6Al-4V için yaygın kullanılan bir değer olarak 400 °C alınmıştır. Bu değer altına inildikten sonra malzeme mikroyapısal anlamda çok büyük değişikliklerin olması beklenmemektedir.



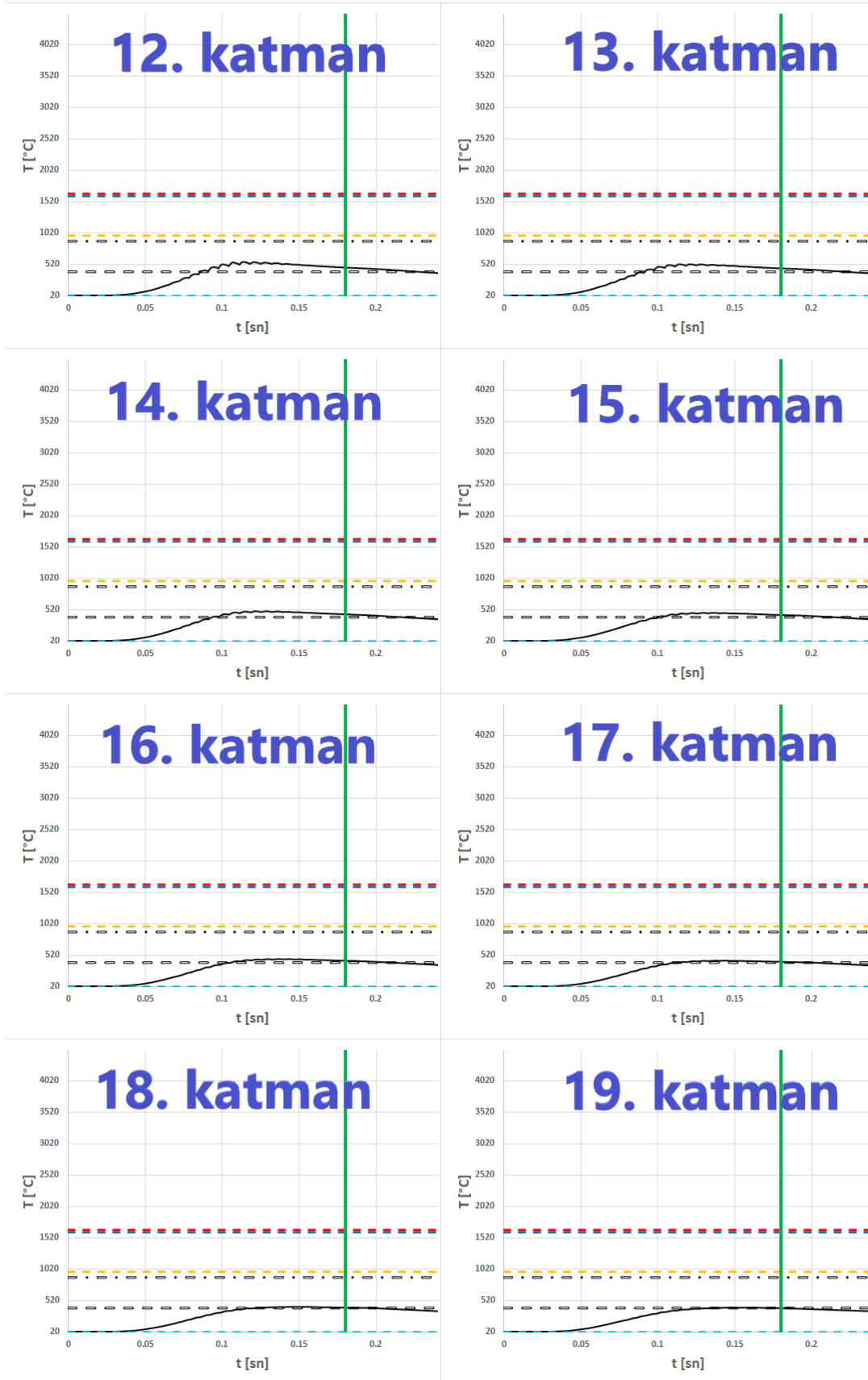
Şekil 5.10. 100 W-500 mm/s için mevcut katmanda taramalar sırasında bir noktada meydana gelen termal döngülere örnek

Şekil 5.10.'da göze çarpan bir diğer husus da sıçramaların mikroyapısal manada sınıflandırılabilceği hususudur. Çünkü bu sıçramaların bir kısmı likidüs noktasını geçerek tam ergimeye (1) neden olmakta, bir kısmı likidüs ve solidüs sıcaklığı (2) arasında olabilmektedir. Solidüs ve Beta-transus arası 3. Tip bir sıçrama olarak görülebilir. Beta-transus ve martenzit başlangıç sıcaklığı (4) arası ve martenzit başlangıç ve martenzit ayrışma sıcaklığı arası (5) diğer tipler olarak kabul edilebilir. Tüm bu döngüler değişik mikroyapı oluşumlarını tetiklemektedir [73].

Şekil 5.11.'de aynı parametre için yeni katmanların P noktasındaki ısı etkisi sunulmuştur. Burada görüleceği üzere P noktası katman yakınlığına göre kademeli olarak etkilenmektedir. Katmanların artmasıyla beraber etki giderek sönümlenmekte ve bir süre sonra martenzit ayrışma sıcaklığının da altına düşmektedir. Bu noktadan sonraki katmanların P noktası üzerindeki mikroyapısal değişime etkisinin azaldığı düşünülebilir. Bu noktada tekrardan hatırlatılması gereken husus ısı birikimin olmamasıdır. Aksi halde yeni gelen katmanların etkisi devamlı olacaktır.

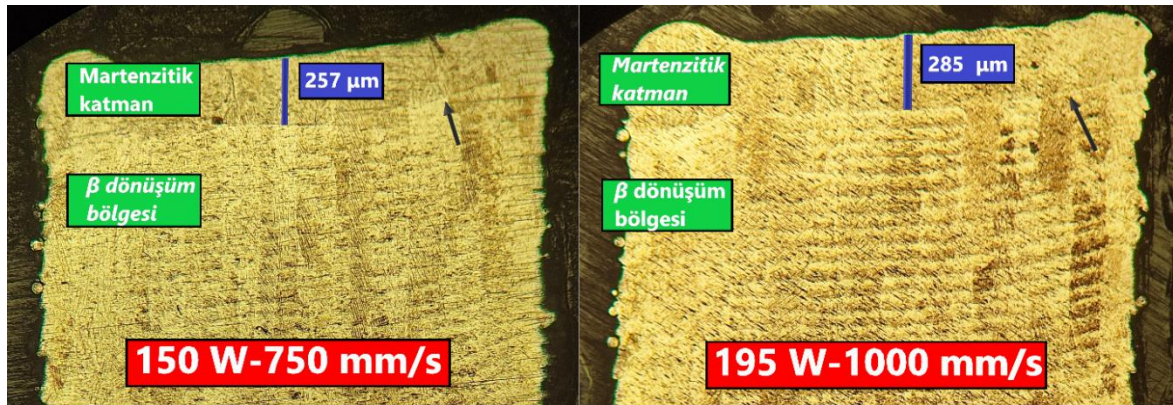


Şekil 5.11. 100 W-500 mm/s için eklenen katmanların P noktasındaki termal döngüye etkisi



Şekil 5.12. 150 W-750 mm/s için eklenen son katmanların P noktasındaki termal döngüye etkisi ve ayrışma sıcaklığına girerken sıçramaların sönümlenmesi

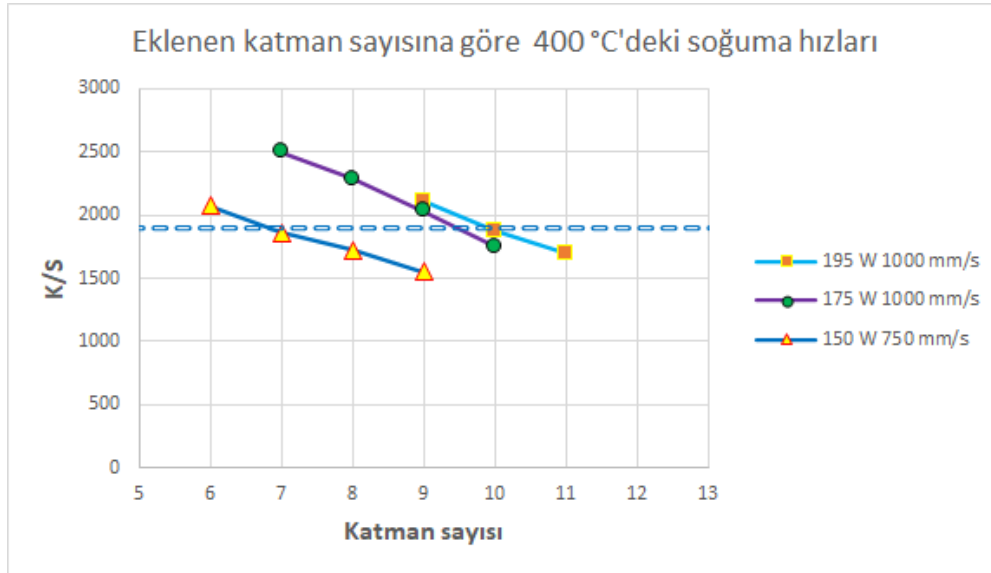
Şekil 5.11.'de dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli husus da sıçramaların oluşturduğu eğrinin sönümlenme davranışdır. Martenzit ayrışma sıcaklığına yaklaştıkça sıçramalar birbirine yaklaşarak düzelmeye başlamaktadır. Bir kirpiyi andıran bu yapı, ayrışma sıcaklığına varıldığında hala yapısını koruyabiliyorsa bu sıcaklığa girerken ani soğuma ve ısınmaların devam ettiği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla daha önceki termal döngülerde oluşan martenzitik yapıların dönüşümüne soğuma oranı dolayısıyla olanak kalmadığı düşünülebilir. Diğer taraftan Şekil 5.12.'de 150 Watt ve 750 mm/s tarama hızı için ayrışma sıcaklığının altına düşmeden önceki son katmanlar verilmiştir (ilk katmanların durumu yüksek enerji yoğunluğuna bir örnek olarak Ek-2'de sunulmuştur). Yüksek enerji yoğunluğundan dolayı üst katman etkisi uzun süre hissedilmektedir ve uzaklık dolayısıyla P noktasında oluşan termal dalgalanma, ayrışma sıcaklığına varmadan düzgün bir eğri halini almaktadır. Bu durum ayrışma sıcaklığı öncesinde ayrışmaya fırsat tanıyabilecek bir soğuma oranına doğru yaklaşıldığını haber vermektedir. Nitekim deneysel çıktılar da bu durumu doğrulamaktadır. Resim 5.1. ve 5.2. hatırlanacak olunursa bazı numuneler şeritli bir yapıya (Ör: 4, 5, 6, 7, 10) sahipken diğer numuneler (Ör: 2, 3, 8, 14) ful martenzitik bir yapıya sahiptir. Bu şeritli yapıların üstünde oluşan şeritsiz yapı ise bu yapıların, üst katmanların termal etkisi neticesinde oluşan yapılar olduğunu göstermektedir. Resim 5.4.'e bakılacak olursa bu daha iyi anlaşılabilir. Görüleceği üzere oluşan martenzit yapının bir kısmı Şekil 5.12.'de üst katmanlar tarafından sağlanan yumuşak soğuma eğrileri ile dönüşüme uğramıştır. Öyle ki martenzit yapının bir kısmı β dönüşüm bantları oluşturarak bu tür bir desene olanak sağlamıştır.



Resim 5.4. Üst katmanların martenzitik ayrışmaya etkisi (Büyütme oranı x5)

Resim 5.4.'de elde edilen deneysel çıktılar, son derece karışık ve ani sıcaklık değişimleri içeren ve mikro düzeyde sıcaklık ölçümünün mümkün olmadığı SLE gibi işlemlerde mikro yapısal değişikliğin soğuma oranları ile ilgisi bağlamında son derece önemlidir. Çünkü bu

çıktılar, martenzitik yapıların oluşumunun anlaşılması ile alakalı dolaylı bir fırsat tanımaktadır. Tepede oluşan ful martenzitik yapının kalınlığı, yapı üzerinde termal etkisi olan son katmanı ifade etmektedir. Bu durumda o katmanın soğuma davranışı üzerine etkisinin bu yapıların oluşumu ile ilişkilendirilmesi önemli bir çıktıdır. Buradan hareketle ayrışma sıcaklığına ulaşıldığı andaki soğuma süreleri bu yapılar için elde edilebilir. Şekil 5.13.'de martenzitik bölge kalınlıklarından ilgili katmanın termal etkisine bakılmıştır. Görüleceği üzere hesaplanan soğuma oranları ortaya anlaşılır bir fotoğraf koymaktadır. Öyle gözükmektedir ki ayrışma sıcaklığına gelindiğinde yaklaşık 1900 K/s'lik soğuma oranının altına inilebilmesi durumunda martenzitik yapıda değişiklikler meydana gelebilmektedir. Aksi halde meydana gelen dönüşümler tamamen zorlayıcı transformasyon olarak görülebilir. Özetle uzun-menzilli difüzyon etkisinin olmadığı düşünülebilir.



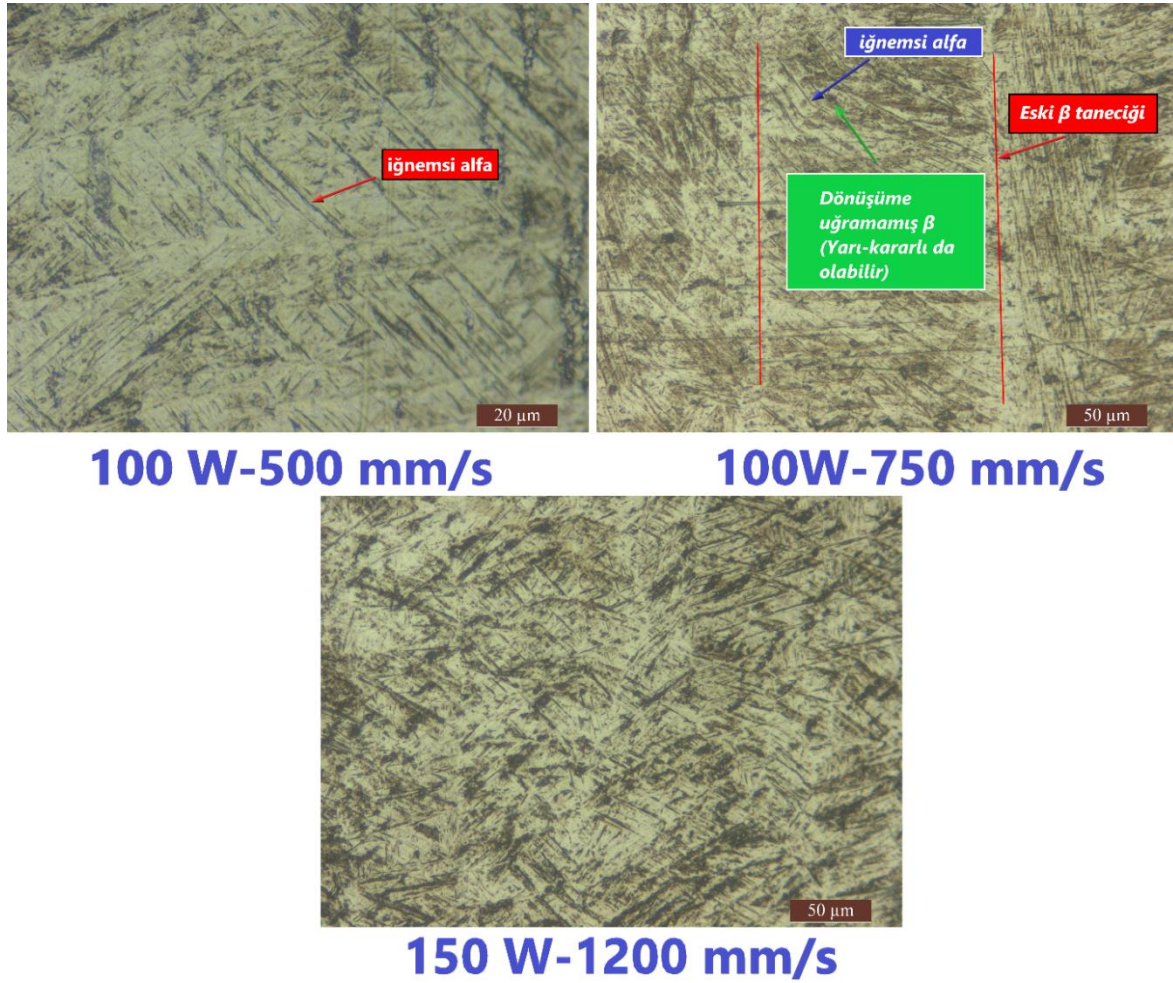
Şekil 5.13. Martenzitik katman kalınlığı için ayrışma sıcaklığında soğuma oranları

Sonuç olarak literatüre katkı bağlamında Ti-6Al-4V için Çizelge 5.2.'de verilen sonuçlara ulaşılabilir:

Çizelge 5.2. Soğuma oranlarının mikro yapıya etkisi

Soğuma Oranı	Transformasyon türü	Mikroyapı
<20 K/s	Difüzyonlu transformasyon	Tamamen lamelli yapı
20-410 K/s	Difüzyonlu (baskın)/zorlayıcı transformasyon	Martenzit içerebilen ince lamelli yapı
410-1900 K/s	Difüzyonlu/zorlayıcı transformasyon (baskın)	Martenzit ağırlıklı yapı
1900 K/s <	Zorlayıcı transformasyon	Ful martenzitik yapı

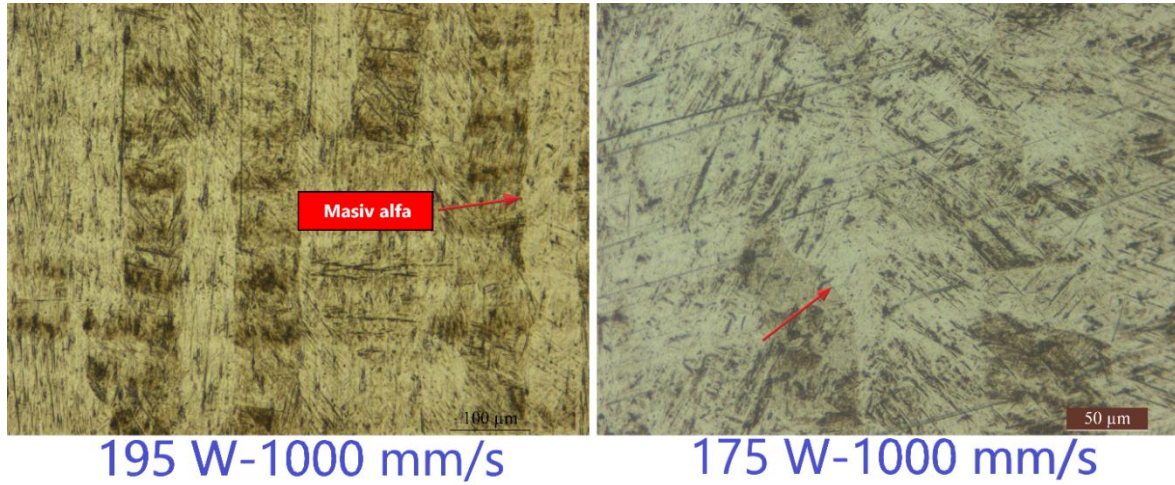
Resim 5.5.'de ayrışma sıcaklığına varıldığında yüksek soğuma oranına sahip numunelerden örnekler verilmiştir. Görüleceği üzere bu tür bir soğuma, genel olarak anizotropik dağılan iğnemsî yapıların oluşmasına sebebiyet vermektedir. 100 Watt-750 mm/s parametresine sahip numunede ergiyik havuz boyutu oldukça küçüktür. Bu durum eski β taneciklerinin sınırlarının rahatlıkla görülebilmesine olanak sağlamakta ve katman boyunca β fazın korunabileceği termal döngüye sahip noktaların oluşumuna olanak sağlamıştır. Nitekim iğnelerin arasında bu tür yoğunlaşmalar gözlemlenebilmektedir.



Resim 5.5. Gözlemlenen yapılara örnek olarak iğnemsî alfa yapılar, 1900 K/s < (Büyütme oranları x50, x20, x20)

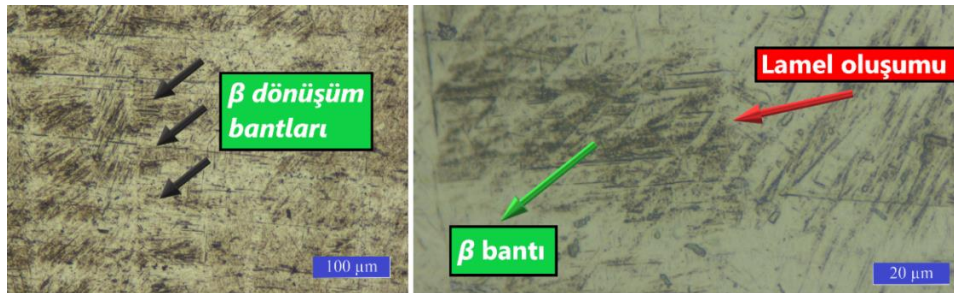
Resim 5.6.'da 410-1900 K/s arası soğuma oranına sahip numunelerden örnek sunulmuştur. Görüleceği üzere mikro yapı, ağırlıklı olarak iğnemsîdir fakat transformasyon tamamen zorlayıcı değildir. Öyle ki eski/önceki β tanecikleri gözlemlenebilmektedir. Bunun yanı sıra literatürde sıkça söz edilen ve literatürle uyumlu olacak şekilde masiv alfa denen yapılara rastlanmaktadır. Anlaşılacağı üzere belirli bir soğuma oranına inildiğinde bu yapılar netçe

gözlemlenebilmektedir ve zorlayıcı transformasyon ile uzun-menzilli difüzyonlu transformasyon arası önemli bir değişim sürecini temsil etmektedir.



Resim 5.6. Gözlemlenen yapılara örnek olarak Masiv alfa görüntüsü, 410-1900 K/s (Büyütme oranları x10, x20)

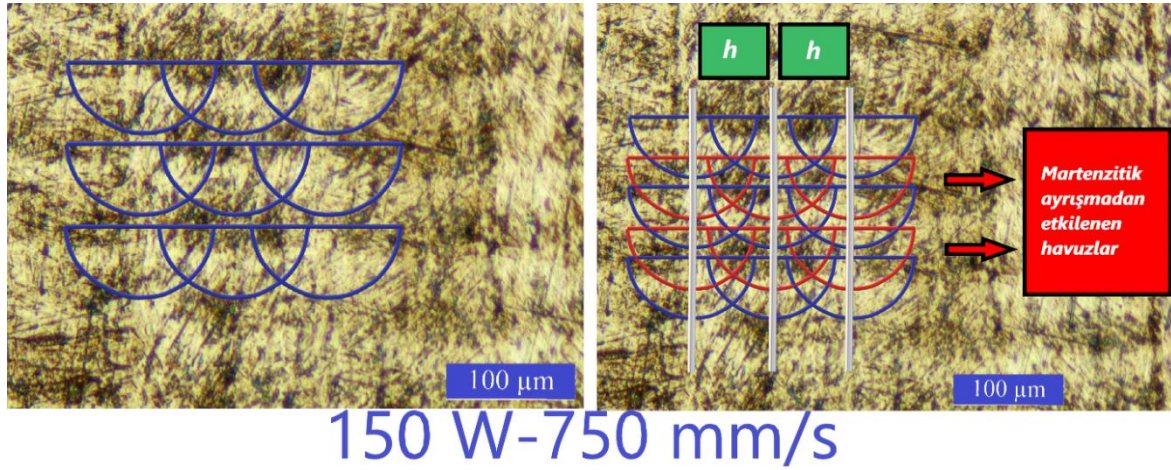
Numunelerde herhangi bir lamelli yapı oluşumu mevcut değildir. Bu zaten beklenen bir durumdur. Zira soğuma oranları, literatürde lamelli yapıların oluşabilmesi için gerekli soğuma oranlarına göre oldukça yüksektir. Bu bağlamda literatürle uyumlu hesaplama değerleri elde edildiği değerlendirilebilir. İlginç bir gözlem olarak lamelli yapılara yaklaşma bağlamında Resim 5.7.'deki yapı örnek olarak verilebilir. Daha önce Resim 5.4.'de bahsedilen beta bantları yakınlaştırıldığında, bu bantların içinde oluşma aşamasında, belli belirsiz alfa lamelleri gözükmemektedir. Transformasyonu tamamlanamamış bu yapılar, en son 750 K/s soğuma sürelerine ulaşılması sonucu ortaya çıkabilmiş gözükmemektedir. Literatürde lamelli yapılar için genel kabul gören 410 K/s'lik soğuma oranı sınırı düşünüldüğünde gözlemlenen sonuç bu dönüşümün nasıl olduğuna ışık tutmakta ve literatürle uyum arz etmektedir.



Resim 5.7. 19. Katman taraması sonrası, ayrışma sıcaklığında 750 K/s'ye kadar düşen soğuma oranı neticesi yarıda kalmış lamel oluşumu (150W-750 mm/s) (Büyütme oranları x10, x50)

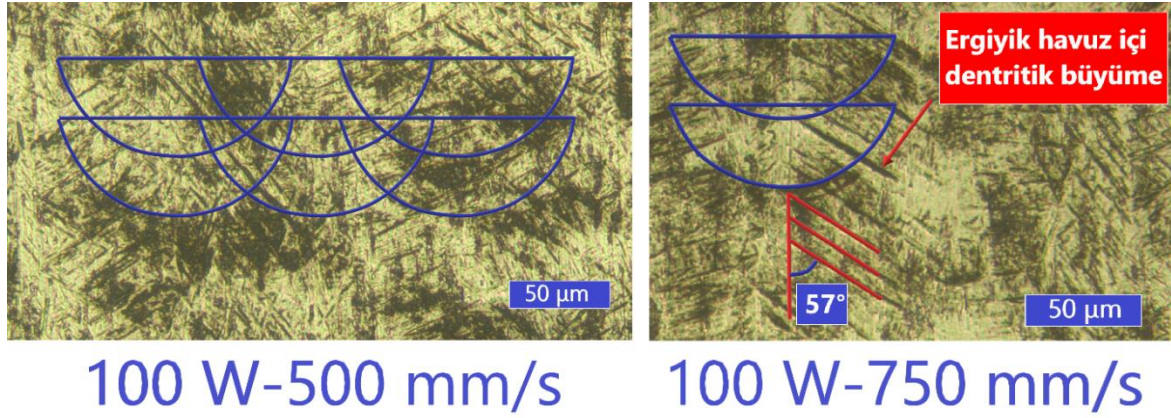
5.2.4. Çoklu tarama ve çoklu katman katılaşmış ergiyik havuz boyutları

Ti-6Al-4V için çoklu tarama ve çoklu katman yoluyla üretilen bir parçada ergiyik havuzların dağlama ve optik görüntüleme ile belirgin şekilde ayırt edilmesi oldukça zordur. Diğer birçok alaşıma nazaran füzyon çizgileri seçilememektedir. Fakat gene de tercih edilen sade tarama stratejisi bazı kıyaslamaları mümkün kılmıştır. Resim 5.8.'de örnek olarak hesaplanan ergiyik havuz boyutları (mavi çizgiyle) dağlanmış numune deseni üzerinde gösterilmiştir. Ergiyik havuzların birbirinden etkilenmesi ve meydana gelen martenzit ayrışması neticesinde sınırlar kaybolmuş ve parça parça belli belirsiz yapılar meydana çıkmıştır. Fakat kabaca tarama mesafesi de göz önüne alınırsa hesaplamalarla, oluşan desenin uyumlu olduğu değerlendirilebilir.



Resim 5.8. Çoklu tarama/çoklu katman katılaşmış ve hesaplanan ergiyik havuzlara örnek 1 (Büyütme oranı x10)

Resim 5.9.'da solda bazı net ergiyik havuz desenleri yakalanabilmiştir. Hesaplanan ergiyik havuz boyutları ile uyum gözükmemektedir. Diğer taraftan sağda ergiyik havuz içi oluşan dentritik büyüme net bir şekilde gözükmemektedir. Burada ergiyik havuz boyutu tam olarak belli olmasa da üretim yönüne göre oluşan bu çam ağacı benzeri yapıda dentrit açısı bu boyutlar hakkında bilgi sağlayabilir. Deneysel olarak burada ölçülen dentrit açısı yaklaşık olarak 57° olarak bulunmuştur. Katılaşma süreci göz önüne alınırsa bu açı, yaklaşık olarak ergiyik havuz genişliğinin ergiyik havuz derinliğine oranının yarısı olmalıdır. Hesaplama yoluyla elde edilen ortalama ergiyik havuz genişliği ve derinliği göz önüne alınırsa bu parametre için 55° 'lik bir açı hesaplanmıştır. Bu bağlamda modelin tutarlı değerler ürettiği değerlendirilebilir.

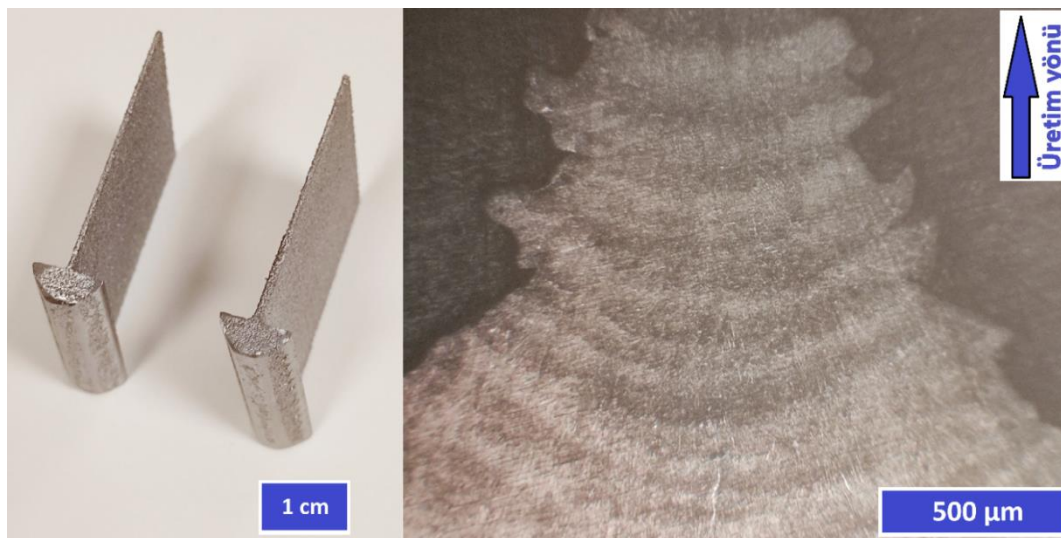


Resim 5.9. Çoklu tarama/çoklu katman katılaşmış ve hesaplanan ergiyik havuzlara örnek 2 (Büyütme oranı x20)

5.3. Elektron Demeti Ergitme Prosesi Deneysel ve Numerik Çalışma Sonucu

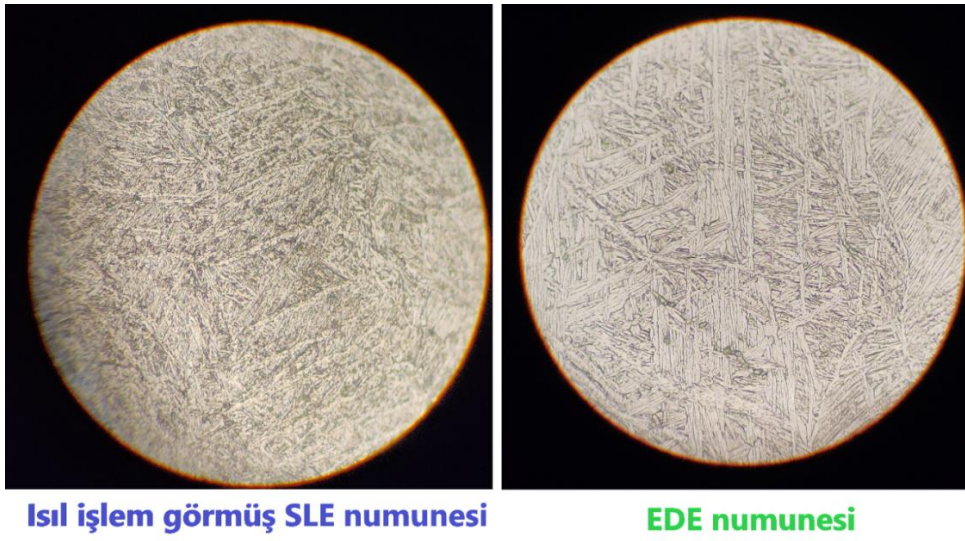
5.3.1. Numunelere genel bakış

EDE deneyi numuneleri daha önce belirtildiği üzere bir taban üzerine inşa edilmiş duvarlardan oluşmaktadır. Resim 5.10.'da görüleceği üzere bu yapıların daha çok temel-duvar arası ve duvar bölümleri deneysel manada kullanılışlı gözükmemektedir. Zira üretim parametreleri, temel kısmı üretilirken sürekli değişmekte olduğu için temel kısmı analiz bağlamında bu tez kapsamında kullanılmamıştır. İkinci olarak yan taramalar nedeniyle katılaşmış ergiyik havuz profillerinin temel kısımda ayırt edilmesi bir hayli zorlaşmaktadır. Diğer taraftan duvar kısmında ise üst üste binen taramalar için ergiyik havuzların ayırt edilebilmesi hassas bir dağlama prosedürü ile mümkün olabilmektedir.



Resim 5.10. EDE deneyi duvar numune örneği ve dağlanmış duvar optik görüntüsü [92]

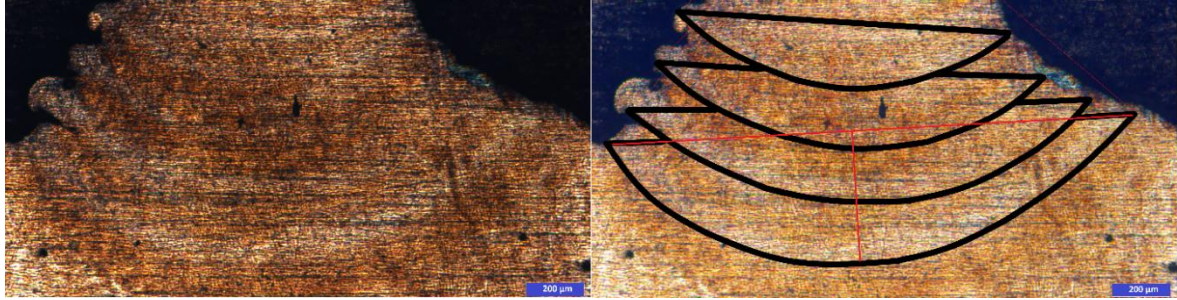
Mikroyapısal açıdan EDE numuneleri beklendiği gibi tamamen lamelli yapıdadır. Resim 5.11.'de görüleceği üzere sağda dağlanmış bir EDE numunesi optik görüntüsü verilmiştir. Solda ise kıyas için ısıtılmış işlem görmüş bir SLE numunesinden örnek sunulmuştur. Isıl işlem neticesinde SLE bölümünde oluşan yapılar görüleceği üzere lamelli bir yapıya evrilmiştir. Bununla beraber göze çarpan ilk husus lamel kalınlıklarının EDE numunesinde bariz büyük olmasıdır. Bunun başlıca sebebi yüksek ısı kaynağı enerjisi ve demet çapı ve yüksek alt levha sıcaklığıdır. Zaten EDE işlemi neticesinde lamelli yapı oluşmasının ana nedeni alt levha sıcaklığının daima martenzit ayrışmanın üzerinde olmasıdır. Bu şekilde yavaş bir soğuma garanti edilmiş olmaktadır.



Resim 5.11. Isıl işlem görmüş SLE numunesi ve EDE numunesi, lamelli mikroyapılar (Büyütme oranı x100)

Tez kapsamında makine ile alakalı deneysel limitasyonlar da göz önünde bulundurularak EDE işlemi için buharlaşma olgusu üzerine odaklanılmıştır. Burada uygun katılaşmış ergiyik havuz profilleri üzerinden bir analiz gerçekleştirilmiştir. Numune incelemeleri sonucu temel-duvar arası birleşim bölgesinin, analiz açısından en verimli yaklaşımı sağlayacağı değerlendirilmiştir. Görünen o ki makine algoritması, temelden duvara geçerken bu iki yapının mukavim bir şekilde füzyonunu sağlamak için, bu ara bölge boyunca büyük ergiyik havuzları meydana getiren yüksek enerjili tek taramalar gerçekleştirmiştir. Bu taramalar neticesinde oluşan ergiyik havuzların füzyon sınırları duvardakilere göre daha net gözükmemektedir. Çünkü bu havuzlar hem ebat olarak daha büyük hem de katılaşma sürecinde konumu itibarı ile şeklini korumaya daha elverişlidir. Diğer taraftan duvar boyunca oluşan ergiyik havuzlar akarak deforme olmaya daha meyillidirler. Özellikle derinlik bağlamında yanıltıcı olabilecek bu havuzlar hali hazırda düşük enerji yoğunlukları altında

üretildiklerinden buharlaşma ve geri tepme basıncı manasında da literatür açısından pek katkı sunmamaktadırlar. Buradan hareketle Resim 5.12.'de sunulan ara bölgeden net katılaşmış ergiyik havuz profilleri elde edilmiştir. Dikkat edilecek olursa katılaşmış kaynak havuzuna benzer şekilde havuz çevresinde oluşan HAZ bölgeleri yapıyı şeritler halinde göstermektedir. Fakat buradaki HAZ bölgeleri haliyle kaynağa nazaran son derece ince olmaktadır.



Resim 5.12. EDE deneyi için seçilen katılaşmış ergiyik havuz profillerinin optik görüntüsü [92] (Büyütme oranı x5)

Şekilde seçilen ergiyik havuz profillerinin boyutları ve ilgili işlem parametreleri Çizelge 5.3.'de sunulmuştur.

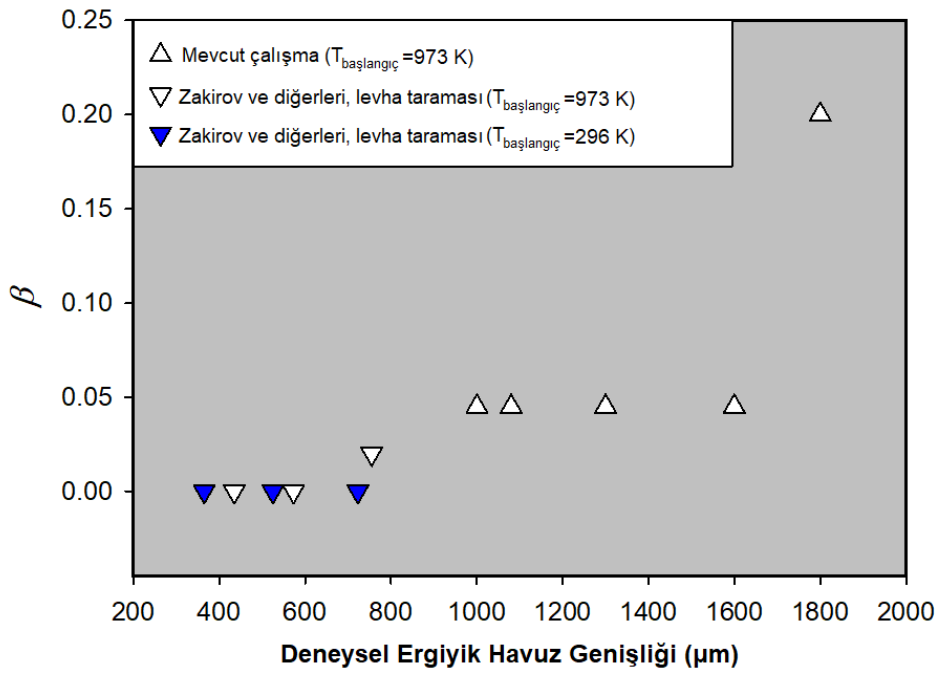
Çizelge 5.3. İşlem parametreleri ve deneysel katılaşmış ergiyik havuz boyutları [92]

Ergiyik havuz no.	Güç [W]	Tarama hızı [mm/s]	Demet çapı MAKİNE [µm]	Havuz genişliği [µm] (±50)	Havuz derinliği [µm] (±20)
1	2280	775.4	620	1800	460
2	2280	775.4	500	1600	390
3	409.7	251.6	540	1300	250
4	241.3	211.6	470	1080	190
5	612	850	430	1000	160

5.3.2. Geri tepme basıncı ve β buharlaşma ısı kaybı çarpanı

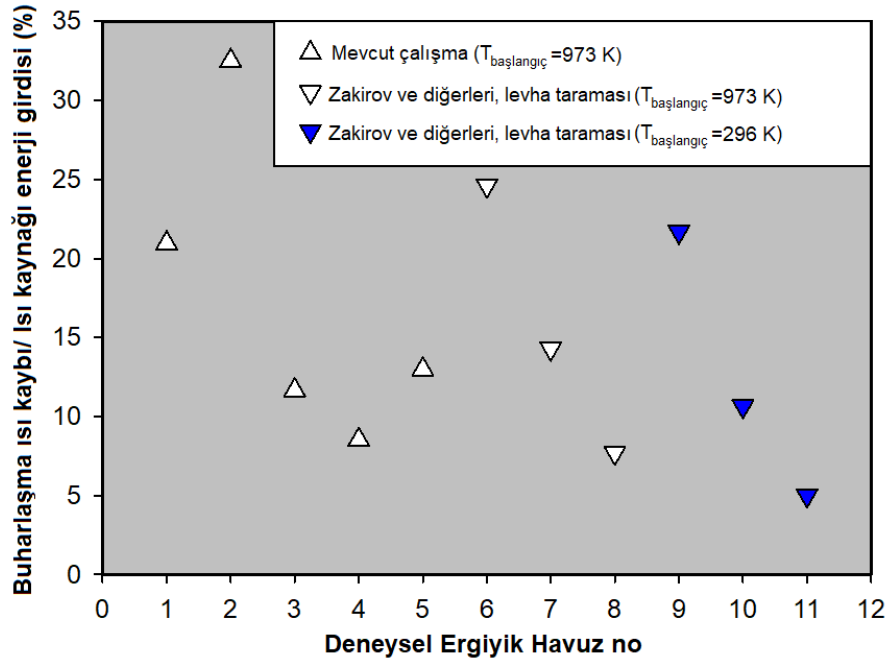
Eş. 3.27 ve 3.30'da verilen β çarpanı ergiyik havuz derinliklerini sağlayacak şekilde hesaplanarak deneysel ergiyik havuz genişliğine göre Şekil 5.14.'de sunulmuştur. Zakirov ve diğerlerinin [38], değişik sıcaklıktaki levha üzerine yaptıkları tek tarama içeren datası da eklenmiştir. Sonuç olarak β değerinin buharlaşma yüzey alanından etkilendiği değerlendirilebilir. Öyle ki küçük havuzlarda belirgin bir değer söz konusu değildir. Bir başka deyişle buharlaşma olmakla beraber geri tepme basıncı bu havuzlarda etkin değildir. Normalde vakum ortamında oluşan gaz akışının çoğunlukla süpersonik olması beklenmektedir. Yüksek enerji yoğunluğu neticesinde oluşan büyük buharlaşma yüzeyi,

belki bu akışın başka bir rejime girmesine olanak sağlıyor olabilir. Nitekim 1 nolu ergiyik havuza gelindiğinde bir geçiş bölgesine girildiği düşünülebilir. Çünkü daha önce de belirtildiği gibi 0.19 ila 0.24 arası bir β değer, efektif vakum basıncı olarak değerlendirilmektedir. Bu değer altında ses hızı aşıldığından bu değere ulaşılması durumunda süpersonik hızdan çıkılarak transonik ve subsonik rejimlere girilmesi beklenir. Halihazırda 1 nolu havuzda bu değer yaklaşık 0.2'dir. Bu havuzda yeni hız rejimine girilmesi ile beraber geri tepme basıncı belirgin şekilde artmıştır.

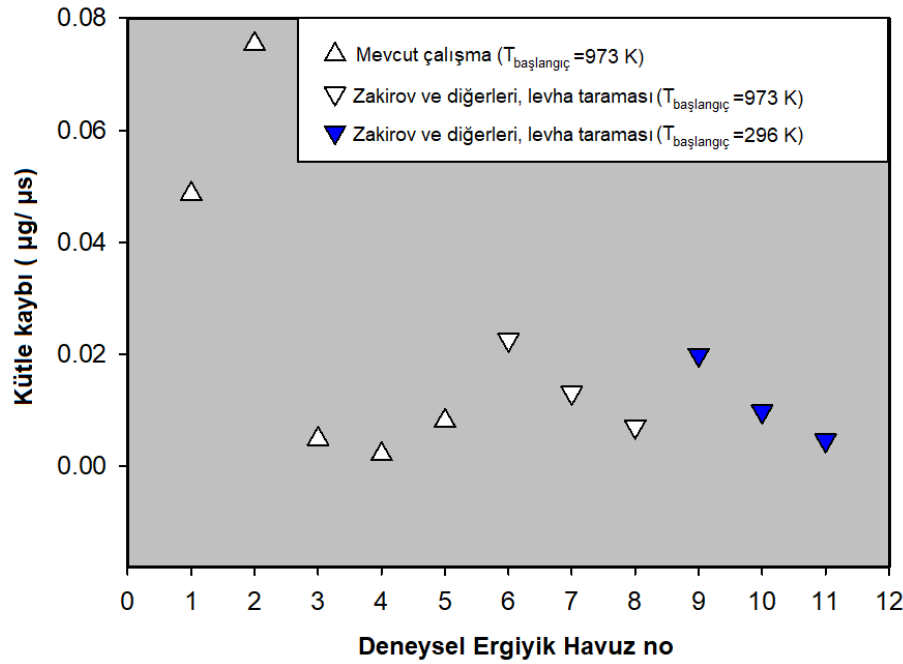


Şekil 5.14. Ergiyik havuz genişliğine göre β değişimi [92]

Şekil 5.15.'de buharlaşma ısı kaybının ısı kaynağından gelen enerjiye göre yüzdelik oranı sunulmuştur. Burada görüleceği üzere ortalama üretim parametreleri için kabaca %10'luk bir değerden söz edilebilir. Fakat enerji yoğunluğunun artması, oranı belirgin şekilde arttırmaktadır. Bu bağlamda özellikle yüksek enerji yoğunluklarında üretim, malzeme ve enerji kaybı nedeniyle anlamsız hale gelmektedir. Bu durum EDE işlemi açısından limitleri göz önüne koyması açısından önemlidir. Bu sebeptendir ki makine algoritması 1 ve 2 nolu havuzlarda kullanılan yüksek enerjiyi normal şartlarda hemen hemen hiçbir zaman kullanmamaktadır. Kullanılan enerji ve daha üstü değerler, sadece odaklanmamış (yayılmış) elektron demeti şeklinde toz katmanda, sinterleme amaçlı ön taramada kullanılmaktadır. Aynı yüksek enerji girdisi istisnai bir durum olmak üzere burada duvar-temel arası füzyonu mukavim hale getirmek için algoritma tarafından uygulanmıştır.



Şekil 5.15. Ergiyik havuzlar için hesaplanan buharlaşma ısı kaybı yüzdeleri [92]

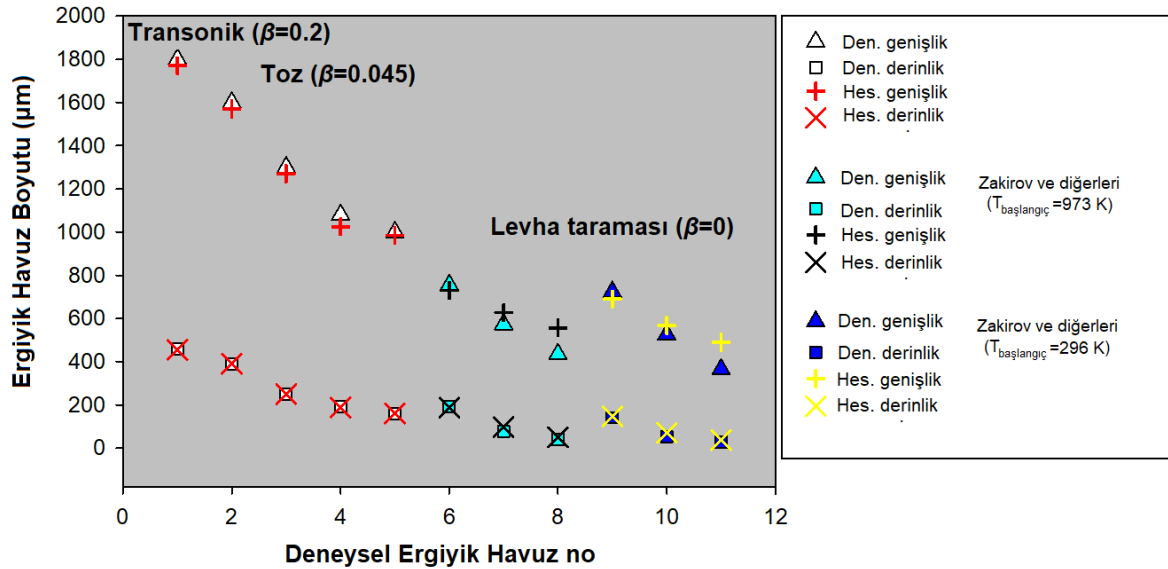


Şekil 5.16. Ergiyik havuzlar için hesaplanan buharlaşma kaynaklı kütle kaybı [92]

Bir fikir vermesi bakımından buharlaşma kaynaklı yaklaşık bir kütle kaybı hesaplanarak Şekil 5.16.'da sunulmuştur. İlk izlenim olarak bu değerlerin oldukça düşük olduğu düşünülebilir. Fakat dikkat edilirse bu kayıplar mikrosaniye mertebesinde ve ortalama bir parçanın üretim süresi saat mertebesinde olabilmektedir. Özellikle yüksek enerji girdileri için düşünülürse bu kayıpların ciddi olacağı görülecektir. Malzeme ve enerji israfının önlenmesi açısından bu analizler önem arz etmektedir.

5.3.3. Hesaplanan ve deneysel ergiyik havuz boyutları

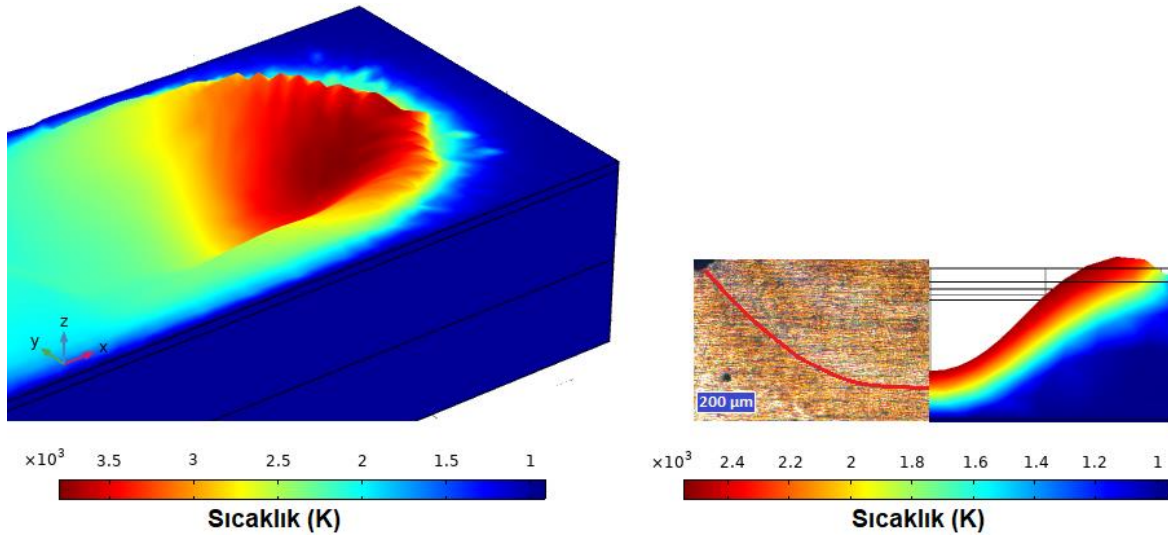
Şekil 5.17.'de hesaplanan ve deneysel ergiyik havuz boyutları sunulmuştur. Burada Zakirov ve diğerlerinin [38] gerçekleştirmiş olduğu levha üzerine taramalar için β değeri sıfır alınmıştır. Ergiyik havuz boyutlarının küçük oluşunun yanı sıra toz katmanının olmayışı da burada bir neden olabilir. Çünkü toz katman ergiyik havuz çevresinde bir çeşit sığınak görevi görüyor olabilir. Özellikle çok katmanlı bir durumda reel toz katman kalınlığı nominalden fazladır. Ergime sırasında ergiyik havuz çökerek bu tozlarla çevrili göze içinde kalmaktadır. Bu göze, buharlaşan gazın kaçışını yavaşlatarak sıkışmaya ve lokal bir atmosfer oluşumuna katkı sağlıyor olabilir. Bu nedenle toz katman durumunda β değeri bir miktar artmaktadır. Bir başka deyişle bir miktar geri tepme basıncından bahsedilebilir. Eğer yüksek enerji yoğunluklarının kullanıldığı özel durumlar mevcut değilse bu tezin bir sonucu olarak β için 0.045 değeri tavsiye edilmektedir. Bu değer ortalama üretim parametreleri ve toz yapı için ideal bir değer olarak görülmüştür. Fakat 1 nolu ergiyik havuzda olduğu gibi bazı ekstrem durumlarda, akış rejiminin aniden değişmesi ile β değerinde sıçrama görülebilir. Bu geri tepme basıncının da ciddi oranda artması anlamına gelmektedir. Böyle bir durumun tam olarak neden ve ne zaman gerçekleşebileceği, bu tez kapsamında olmayıp gelecek çalışmaların konusu olabilir.



Şekil 5.17. Hesaplanan ve deneysel ergiyik havuz boyutları ve β değerleri [92]

Şekil 5.18.'de solda bir örnek olarak Comsol Multiphysics® ile simüle edilen 1 nolu havuz sıcaklık dağılımı ve depresyon oluşumu sunulmuştur. Sağda ise katılaşmış ergiyik havuz profili ile hesaplanan profil kıyaslama amaçlı yan yana verilmiştir. Görüleceği üzere

özellikle yüksek enerji yoğunluklarında geri tepme basıncı, havuz derinliği bağlamında son derece önemlidir.



Şekil 5.18. 1 nolu havuz için Comsol Multiphysics® ile geri tepme basıncı nedeniyle oluşan çöküntü ve sıcaklık dağılımını gösteren simülasyon, deneysel katılaşmış ergiyik havuz profili ve hesaplanan profilden kesit [92]

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında toz yataklı sistemlerde iki temel yöntem olan SLE ve EDE işlemlerinin termal yapıları üzerinde durulmuştur. Bu sistemlerin termal davranışları ve uygulamaya yönelik olarak nasıl modellenebilecekleri üzerine çalışılmıştır. SLE işleminde üretilen numunelerde oluşan mikroyapılar deneysel olarak incelenmiş ve ayrıntılı analiz edilerek termal modelle ilişkilendirilmiştir. Diğer taraftan EDE işlemine yönelik olarak buharlaşma üzerinde durulmuştur. Buharlaşmanın muhtelif sonuçları olarak ergiyik havuz profiline etkisi araştırılmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmalar şu şekilde özetlenebilir:

SLE işlemi:

- SLE işlemi için yeni hacimsel ısı kaynağı modeli geliştirilmiştir.
- Ti-6Al-4V için emilim-verim korelasyonu elde edilmiştir.
- Muhtemel mikroyapıların incelenmesine yönelik deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.
- Deneysel çalışma sonucu çıktıların analizi ve termal model ilişkilendirilmiştir. Bu bağlamda oluşan ergiyik havuz boyutlarının, tarama mesafesi ile beraber sütunsu tanecik genişliğine etkisi gözlemlenmiştir.
- Isıl analiz sonucu elde edilen çeşitli soğuma oranlarının mikroyapıya etkisi belirlenmiştir. Bu bağlamda 20 K/s altı, 20 ila 410 K/s, 410 ila 1900 K/s ve 1900 K/s üzeri olmak üzere dört soğuma hızı rejimi belirlenmiştir. Lamelli yapıların elde edilebilmesi için soğuma oranının ayrışma sıcaklığından önce 410 K/s'nin altına inmesi gerekmektedir. Bu değere yaklaşılması ile transformasyonu tamamlanmamış lameller gözükmeye başlayabilir. 410 ila 1900 K/s soğuma oranı, masiv alfa denilen yapının da gözlemlendiği bir geçiş rejimidir. 1900 K/s üzeri soğuma oranları ise muhtemel artık gerilmelerin de mikroyapı üzerinde etkisinin hissedildiği, tamamen iğnemsî yapıların hüküm sürdüğü bir rejim olarak belirlenmiştir.

EDE işlemi:

- EDE işleminde metalizasyon olgusu ve buharlaşmanın etkisini incelemek maksadıyla model geliştirilmiştir.
- Buharlaşmanın etkilerinin, ergiyik havuz profili ve enerji kaybı açısından değerlendirilmesine yönelik olarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. Mutedil işlem parametrelerinde buharlaşma kaynaklı kaybın yaklaşık olarak %10 civarı olduğu hesaplanmıştır. Yüksek enerji yoğunluklarında buharlaşma oranının da arttığı gözlemlenmektedir. Bu durum EDE işlemi açısından üretim sınırlarını göstermektedir.

- Bazı EDE işlemi modellemelerinde kullanılan Anisimov metodu için sınır şartında buharlaşma kaybı ve geri tepme basıncı için matematiksel bir ifadenin geliştirilmiştir. Burada kullanılan β çarpanı, mutedil enerji yoğunluğuna sahip taramalar için 0.045 olarak saptanmıştır. Fakat enerjinin artmasıyla beraber havuz üstünde meydana gelen akış ve geri tepme basıncının ciddi oranda değişebileceği de değerlendirilmiştir.

Yapılan çalışmanın ışığında muhtemel gelecek çalışmalar şu şekilde olabilir:

- Geliştirilen hacimsel ısı kaynağı modelinin çeşitli alaşımlar için genelleştirilmesi
- Geliştirilen ampirik emilim ifadesinin daha teorik bir yapıya dönüştürülerek muhtelif alaşımlar için genelleştirilmesi
- Ti-6Al-4V için toz yataklı sistemlerde, hesaplama maliyeti düşük, mikroyapısal dönüşüm için kinetik modellerin geliştirilmesi. Burada kristal yapı transformasyonu özellikle önem arz etmektedir.
- Termal süreç sonucunda oluşan artık gerilmenin mikroyapıya etkisinin araştırılması
- EDE işleminde vakum ortamında ergiyik havuz üzerinde meydana gelen muhtelif akış rejimlerinin ve bu rejimlerin üretime etkisinin araştırılması

KAYNAKLAR

1. Le TN, Lo YL, Tran HC. (2019). Multi-scale modeling of selective electron beam melting of Ti6Al4V titanium alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105,545–563
2. Tan Xipeng, Yihongkok, Tor S. B, Chua C. K. (2014). Application of Electron Beam Melting (EBM) in Additive Manufacturing of an Impeller. *Proceedings of the International Conference on Progress in Additive Manufacturing*, 327–332
3. Cai MH, Lee CY, Kang S, Lee YK. (2011). Fine-grained structure fabricated by strain-induced martensite and its reverse transformations in a metastable β titanium alloy. *Scripta Materialia*, 64,1098–1101
4. Cook PS, Murphy AB. (2020). Simulation of melt pool behaviour during additive manufacturing: Underlying physics and progress. *Additive Manufacturing*, 31,100909
5. Khairallah SA, Anderson AT, Rubenchik A, King WE. (2016). Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. *Acta Materialia*, 108,36–45
6. Anwar A Bin, Ibrahim IH, Pham QC. (2019). Spatter transport by inert gas flow in selective laser melting: A simulation study. *Powder Technology*, 352,103–116
7. Zhang X, Cheng B, Tuffile C. (2020). Simulation study of the spatter removal process and optimization design of gas flow system in laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 32,101049
8. Chen H, Yan W. (2020). Spattering and denudation in laser powder bed fusion process: Multiphase flow modelling. *Acta Materialia*, 196,154–167
9. Rosenthal D. (1946). The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments, *Transactions of the ASME*, 43,849–866
10. Nunes A.C. (1983). An extended rosenthal weld model. *Welding Journal*, 62,165–170
11. Eagar T. TN. (1983). Temperature fields produced by traveling distributed heat sources. *Welding Journal*, 62,346–355
12. Yang Y, van Keulen F, Ayas C. (2020). A computationally efficient thermal model for selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 31,100955
13. Yang Y, Knol MF, van Keulen F, Ayas C. (2018). A semi-analytical thermal modelling approach for selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 21,284–297
14. Li J, Wang Q, Michaleris P. (2018). An analytical computation of temperature field evolved in directed energy deposition. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 140,
15. Ning J, Sievers DE, Garmestani H, Liang SY. (2019). Analytical Modeling of In-Process Temperature in Powder Bed Additive Manufacturing Considering Laser Power Absorption, Latent Heat, Scanning Strategy, and Powder Packing. *Materials*, 12,808-823

16. Ali H, Ghadbeigi H, Mumtaz K. (2018). Residual stress development in selective laser-melted Ti6Al4V: a parametric thermal modelling approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2018 97:5, 97,2621–2633
17. Ladani L, Romano J, Brindley W, Burlatsky S. (2017). Effective liquid conductivity for improved simulation of thermal transport in laser beam melting powder bed technology. *Additive Manufacturing*, 14,13–23
18. Zhang Z, Huang Y, Rani Kasinathan A, Shahabad SI, Ali U, Mahmoodkhani Y, Toyserkani E. (2019). 3-Dimensional heat transfer modeling for laser powder-bed fusion additive manufacturing with volumetric heat sources based on varied thermal conductivity and absorptivity. *Optics & Laser Technology*, 109,297–312
19. Gusarov A V., Smurov I. (2010). Modeling the interaction of laser radiation with powder bed at selective laser melting. *Physics Procedia*, 5,381–394
20. Yin J, Peng G, Chen C, Yang J, Zhu H, Ke L, Wang Z, Wang D, Ma M, Wang G, Zeng X. (2018). Thermal behavior and grain growth orientation during selective laser melting of Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 260,57–65
21. Mishra AK, Aggarwal A, Kumar A, Sinha N. (2018). Identification of a suitable volumetric heat source for modelling of selective laser melting of Ti6Al4V powder using numerical and experimental validation approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2018 99:9, 99,2257–2270
22. Mishra AK, Kumar A. (2019). Numerical and experimental analysis of the effect of volumetric energy absorption in powder layer on thermal-fluidic transport in selective laser melting of Ti6Al4V. *Optics & Laser Technology*, 111,227–239
23. Juechter V, Scharowsky T, Singer RF, Körner C. (2014). Processing window and evaporation phenomena for Ti–6Al–4V produced by selective electron beam melting. *Acta Materialia*, 76,252–258
24. Pobel CR, Osmanlic F, Lodes MA, Wachter S, Körner C. (2019). Processing windows for Ti-6Al-4V fabricated by selective electron beam melting with improved beam focus and different scan line spacings. *Rapid Prototyping Journal*, 25,665–671
25. Scharowsky T, Bauereiß A, Körner C. (2017). Influence of the hatching strategy on consolidation during selective electron beam melting of Ti-6Al-4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2017 92:5, 92,2809–2818
26. Shrestha S, Cheng B, Chou K. (2016). An investigation into melt pool effective thermal conductivity for thermal modeling of powder-bed electron beam additive manufacturing. *International Solid Freeform Fabrication Symposium-An Additive Manufacturing Conference*, 208–218
27. Ding X, Koizumi Y, Wei D, Chiba A. (2019). Effect of process parameters on melt pool geometry and microstructure development for electron beam melting of IN718: A systematic single bead analysis study. *Additive Manufacturing*, 26,215–226
28. Koepf JA, Soldner D, Ramsperger M, Mergheim J, Marki M, Körner C. (2019). Numerical microstructure prediction by a coupled finite element cellular automaton model for selective electron beam melting. *Computational Materials Science*, 162,148–155

29. Cheng B, Price S, Lydon J, Cooper K, Chou K. (2014). On Process Temperature in Powder-Bed Electron Beam Additive Manufacturing: Model Development and Validation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 136,
30. Zäh MF, Lutzmann S. (2010). Modelling and simulation of electron beam melting. *Production Engineering*, 4,15–23
31. Galati M, Iuliano L, Salmi A, 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
32. Yan W, Ge W, Smith J, Lin S, Kafka OL, Lin F, Liu WK. (2016). Multi-scale modeling of electron beam melting of functionally graded materials. *Acta Materialia*, 115,403–412
33. Jamshidinia M, Kong F, Kovacevic R. (2013). Numerical modeling of heat distribution in the electron beam melting® of Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135,
34. Körner C, Attar E, Heintl P. (2011). Mesoscopic simulation of selective beam melting processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 211,978–987
35. Yan W, Qian Y, Ma W, Zhou B, Shen Y, Lin F. (2017). Modeling and Experimental Validation of the Electron Beam Selective Melting Process. *Engineering*, 3,701–707
36. Ammer R, Markl M, Ljungblad U, Körner C, Råde U. (2014). Simulating fast electron beam melting with a parallel thermal free surface lattice Boltzmann method. *Computers & Mathematics with Applications*, 67,318–330
37. Zhang T, Li H, Liu S, Shen S, Xie H, Shi W. (2018). Evolution of molten pool during selective laser melting of Ti–6Al–4V. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52,055302
38. Zakirov A, Belousov S, Bogdanova M, Korneev B, Stepanov A, Perepelkina A, Levchenko V, Meshkov A, Potapkin B. (2020). Predictive modeling of laser and electron beam powder bed fusion additive manufacturing of metals at the mesoscale. *Additive Manufacturing*, 35,101236
39. Sha W. MS. (2009). *Titanium Alloys: Modelling of Microstructure, Properties and Applications*. Elsevier, 97, 117, 121, 237, 257, 301
40. Nastac L. (2004). *Modeling and Simulation of Microstructure Evolution in Solidifying Alloys*. Kluwer Academic Publishers, 109
41. Biner SB. (2017). *Programming phase-field modeling*. Springer International Publishing, 1
42. Raabe D., Roters F., Barlat F., Chen L.-Q. (2004). *Continuum Scale Simulation of Engineering Materials*. Wiley-VCH, 37, 57, 77, 185
43. Gouge M, Michaleris P. (2017). *Thermo-mechanical modeling of additive manufacturing*. Elsevier Inc., 99

44. Provatas N, Elder K. (2010). *Phase-Field Methods in Materials Science and Engineering*. Wiley-VCH, 57
45. Janssens KGF, Raabe D, Kozeschnik E, Miodownik MA, Nestler B. (2007). *Computational materials engineering. An Introduction to Microstructure Evolution*. Elsevier Inc., 47, 109, 219
46. Lukas HL, Fries SG, Sundman B. (2007). *Computational thermodynamics : the CALPHAD method*. Cambridge University Press, 1
47. Hillert M. (1998). *Phase equilibria, phase diagrams, and phase transformations : their thermodynamic basis*. Cambridge University Press, 155
48. Balluffi RW, Allen SM, Carter WC. (2005). *Kinetics of Materials*. John Wiley and Sons, 459, 501
49. Tchuindjang JT, Paydas H, Tran H-S, Carrus R, Duchêne L, Mertens A, Habraken A-M. (2021). A New Concept for Modeling Phase Transformations in Ti6Al4V Alloy Manufactured by Directed Energy Deposition. *Materials*, 14,2985
50. Baykasoğlu C, Akyildiz O, Tunay M, To AC. (2020). A process-microstructure finite element simulation framework for predicting phase transformations and microhardness for directed energy deposition of Ti6Al4V. *Additive Manufacturing*, 35,101252
51. Sun W, Shan F, Zong N, Dong H, Jing T. (2021). A simulation and experiment study on phase transformations of Ti-6Al-4V in wire laser additive manufacturing. *Materials & Design*, 207,109843
52. Kherrouba N, Bouabdallah M, Badji R, Carron D, Amir M. (2016). Beta to alpha transformation kinetics and microstructure of Ti-6Al-4V alloy during continuous cooling. *Materials Chemistry and Physics*, 181,462–469
53. Fan Y, Cheng P, Yao YL, Yang Z, Egland K. (2005). Effect of phase transformations on laser forming of Ti–6Al–4V alloy. *Journal of Applied Physics*, 98,013518
54. Fachinotti DV, Cardona A, Baufeld B, Van der Biest O. (2010). Evolution of Microstructure During Shaped Metal Deposition. *Mecánica Comput*, 29, 4927–4934
55. Salsi E, Chiumenti M, Cervera M. (2018). Modeling of Microstructure Evolution of Ti6Al4V for Additive Manufacturing. *Metals 2018, Vol 8, Page 633*, 8,633
56. Yang X, Barrett RA, Tong M, Harrison NM, Leen SB. (2020). Prediction of Microstructure Evolution for Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V. *Procedia Manufacturing*, 47,1178–1183
57. Kelly S.M. (2004). *Thermal and Microstructure Modeling of Metal Deposition Processes with Application to Ti-6Al-4V*, Doktora Tezi, Virginia Polytechnic Institute, Virginia
58. Charles C. (2016). *Microstructure model for Ti-6Al-4V used in simulation of additive manufacturing*, Doktora Tezi, Luleå University of Technology, Luleå

59. Farrar P. A., Margolin H. (1961). The Titanium Rich Region of the Titanium-Aluminium-Vanadium System. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME* . 221,1214–1221
60. Castro R., Seraphin L. (1966). Contribution in the metallographic and structural study of the alloy of titanium TA6V (in French). *Les mémoires scientifiques de la Revue de métallurgie/Scientific memories seen again by metallurgy*, 63,1025–1058
61. Pederson R. (2002). *Microstructure and Phase Transformation of Ti–6Al–4V*, Yüksek lisans Tezi Lulea University of Technology, Lulea
62. Elmer JW, Palmer TA, Babu SS, Specht ED. (2005). In situ observations of lattice expansion and transformation rates of α and β phases in Ti–6Al–4V. *Materials Science and Engineering: A*, 391,104–113
63. Idhil IsmailA., Dehmas M., Aeby-Gautier E., Appolaire B. (2015). Phase transformations kinetics of Ti-6Al-4V during very fast heating using in-situ high-energy x-ray diffraction. *International Conference on Solid-solid phase transformations in inorganic materials*, 259–260
64. Yu H, Li W, Zou H, Li S, Zhai T, Liu L. (2019). Study on Non-Isothermal Transformation of Ti-6Al-4V in Solution Heating Stage. *Metals* 2019, Vol 9, Page 968, 9,968
65. Villa M, Brooks JW, Turner RP, Wang H, Boitout F, Ward RM. (2019). Microstructural Modeling of the $\alpha + \beta$ Phase in Ti-6Al-4V: A Diffusion-Based Approach. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 50,2898–2911
66. Kaschel FR, Vijayaraghavan RK, Shmeliov A, McCarthy EK, Canavan M, McNally PJ, Dowling DP, Nicolosi V, Celikin M. (2020). Mechanism of stress relaxation and phase transformation in additively manufactured Ti-6Al-4V via in situ high temperature XRD and TEM analyses. *Acta Materialia*, 188,720–732
67. He J, Li D, Jiang W, Ke L, Qin G, Ye Y, Qin Q, Qiu D. (2019). The Martensitic Transformation and Mechanical Properties of Ti6Al4V Prepared via Selective Laser Melting. *Materials*, 12,321-334
68. Motyka M, Baran-Sadleja A, Sieniawski J, Wierzbinska M, Gancarczyk K. (2019). Decomposition of deformed $\alpha'(\alpha'')$ martensitic phase in Ti–6Al–4V alloy. *Materials Science and Technology*,35,260-272
69. Barriobero-Vila P, Gussone J, Haubrich J, Sandlöbes S, Da Silva JC, Cloetens P, Scheli N, Requena G. (2017). Inducing Stable $\alpha + \beta$ Microstructures during Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V Using Intensified Intrinsic Heat Treatments. *Materials*, 10,268-281
70. Ter Haar GM, Becker TH. (2021). Low temperature stress relief and martensitic decomposition in selective laser melting produced Ti6Al4V. *Material Design & Processing Communications*, 3,e138
71. Cho J. (2018). *Characterization of the α' -Martensite phase and its decomposition in Ti-6Al-4V additively manufactured by selective laser melting*, Doktora Tezi, RMIT University, Melbourne

72. Lu SL, Qian M, Tang HP, Yan M, Wang J, Stjohn DH. (2016). Massive transformation in Ti-6Al-4V additively manufactured by selective electron beam melting. *Acta Materialia*, 104,303–311
73. Yang J, Yu H, Yin J, Gao M, Wang Z, Zeng X. (2016). Formation and control of martensite in Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting. *Materials & Design*, 108,308–318
74. Safdar A, Wei LY, Snis A, Lai Z. (2012). Evaluation of microstructural development in electron beam melted Ti-6Al-4V. *Materials Characterization*, 65,8–15
75. Xu W, Lui EW, Pateras A, Qian M, Brandt M. (2017). In situ tailoring microstructure in additively manufactured Ti-6Al-4V for superior mechanical performance. *Acta Materialia*, 125,390–400
76. Tan X, Kok Y, Toh WQ, Tan YJ, Descoins M, Mangelinck M, Tor BS, Leong KF, Chua CK. (2016). Revealing martensitic transformation and α/β interface evolution in electron beam melting three-dimensional-printed Ti-6Al-4V. *Scientific Reports 2016* 6:1, 6,1–10
77. Kazantseva N, Krakhmalev P, Thuvander M, Yadroitsev I, Vinogradova N, Ezhov I. (2018). Martensitic transformations in Ti-6Al-4V (ELI) alloy manufactured by 3D Printing. *Materials Characterization*, 146,101–112
78. Gierlotka W, Lothongkum G, Lohwongwatana B, Puncreoburt C. (2019). Atomic mobility in Titanium grade 5 (Ti6Al4V). *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 55,65–77
79. Hahn David W., Özisik M. Necati. (2012). *Heat Conduction*, 3rd ed. wiley
80. Mollamahmutoglu M, Yilmaz O. (2021). Volumetric heat source model for laser-based powder bed fusion process in additive manufacturing. *Thermal Science and Engineering Progress*, 25,101021
81. Hadley GR. (1986). Thermal conductivity of packed metal powders. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 29,909–920
82. Sih SS, Barlow JW. (2010). The Prediction of the Emissivity and Thermal Conductivity of Powder Beds. *Particulate Science and Technology* , 22,427–440
83. Mills KC. (2002). *Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys*. Woodhead
84. Gong Xibing, Cheng Bo, Price Steven, Chou Kevin. (2013). Powder-bed electron-beam-melting additive manufacturing: powder characterization, process simulation and metrology. *Proceedings of the ASME District F Early Career Technical Conference*, 59–66
85. Galati M, Snis A, Iuliano L. (2019). Powder bed properties modelling and 3D thermo-mechanical simulation of the additive manufacturing Electron Beam Melting process. *Additive Manufacturing*, 30,100897
86. Fabbro R. (2019). Scaling laws for the laser welding process in keyhole mode. *Journal of Materials Processing Technology*, 264,346–351

87. Dilip JJS, Zhang S, Teng C, Zeng K, Robinson C, Pal D, Stucker B. (2017). Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting. *Progress in Additive Manufacturing*, 2,157–167
88. Zhang D, Wang W, Guo Y, Hu S, Dong D, Poprawe R, Schleifenbaum JH, Ziegler S. (2019). Numerical simulation in the absorption behavior of Ti6Al4V powder materials to laser energy during SLM. *Journal of Materials Processing Technology*, 268,25–36
89. Arisoy YM, Criaes LE, Özel T. (2019). Modeling and simulation of thermal field and solidification in laser powder bed fusion of nickel alloy IN625. *Optics & Laser Technology*, 109,278–292
90. Zheng H, Li H, Lang L, Gong S, Ge Y. (2018). Effects of scan speed on vapor plume behavior and spatter generation in laser powder bed fusion additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 36,60–67
91. Yildiz AK, Mollamahmutoglu M, Yilmaz O. (2022). Computational Evaluation of Temperature-Dependent Microstructural Transformations of Ti6Al4V for Laser Powder Bed Fusion Process. *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 1,
92. Mollamahmutoglu M, Yilmaz O, Unal R, Gumus B, Tan E. (2022). The effect of evaporation and recoil pressure on energy loss and melt pool profile in selective electron beam melting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120,4041–4050
93. Alcock CB, Itkin VP, Horrigan MK. (2013). Vapour Pressure Equations for the Metallic Elements: 298–2500K. <http://dx.doi.org/101179/cm91984233309>, 23,309–313
94. Safarian J, Engh TA. (2013). Vacuum evaporation of pure metals. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 44,747–753
95. Riedlbauer D, Scharowsky T, Singer RF, Steinmann P, Körner C, Mergheim J. (2016). 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* 2016 88:5, 88,1309–1317
96. Price S, Cheng B, Lydon J, Cooper K, Chou K. (2014). On Process Temperature in Powder-Bed Electron Beam Additive Manufacturing: Process Parameter Effects. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 136,
97. Cheng B, Price S, Gong X, Lydon J, Cooper K, Chou K. (2015). *Speed Function Effects in Electron Beam Additive Manufacturing*. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE), 2A,14-20
98. Al-Bermani Sinan Saadi. (2011). An investigation into microstructure and microstructural control of additive layer manufactured Ti-6Al-4V by electron beam melting. The University of Sheffield
99. Dong Z, Liu Y, Wen W, Ge J, Liang J. (2018). Effect of Hatch Spacing on Melt Pool and As-built Quality During Selective Laser Melting of Stainless Steel: Modeling and Experimental Approaches. *Materials*, 12,50-64

100. Louw DF, Pistorius PGH. (2019). The effect of scan speed and hatch distance on prior-beta grain size in laser powder bed fused Ti-6Al-4V. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103,2277–2286
101. Yıldız AK, Mollamahmutoğlu M, Dogan E, Yılmaz O. (2021). A numerical investigation of the effect of support thickness and void ratio on thermal behavior and possible martensite decomposition in laser powder-bed fusion process. *Journal of Additive Manufacturing Technologies*, 1,549–549
102. Yıldız AK, Mollamahmutoglu M, Yılmaz O. (2023). Computational Evaluation of the Effect of Build Orientation on Thermal Behavior and in-situ Martensite Decomposition for Laser Powder-Bed Fusion (LPBF) Process. *Gazi University Journal of Science*, 1–1
103. Parry L, Ashcroft IA, Wildman RD. (2016). Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation. *Additive Manufacturing*, 12,1–15
104. Aune R, Battezzati L, Brooks R, Egry I, Fecht H-J, Garandet J-P, Mills KC, Passerone A, Quested PN, Ricci E, Schneider S, Seetharaman S, Wunderlich RK, Vinet B. (2005). Surface tension and viscosity of industrial alloys from parabolic flight experiments — Results of theThermoLab project. *Microgravity - Science and Technology 2005* 16:1, 16,11–14

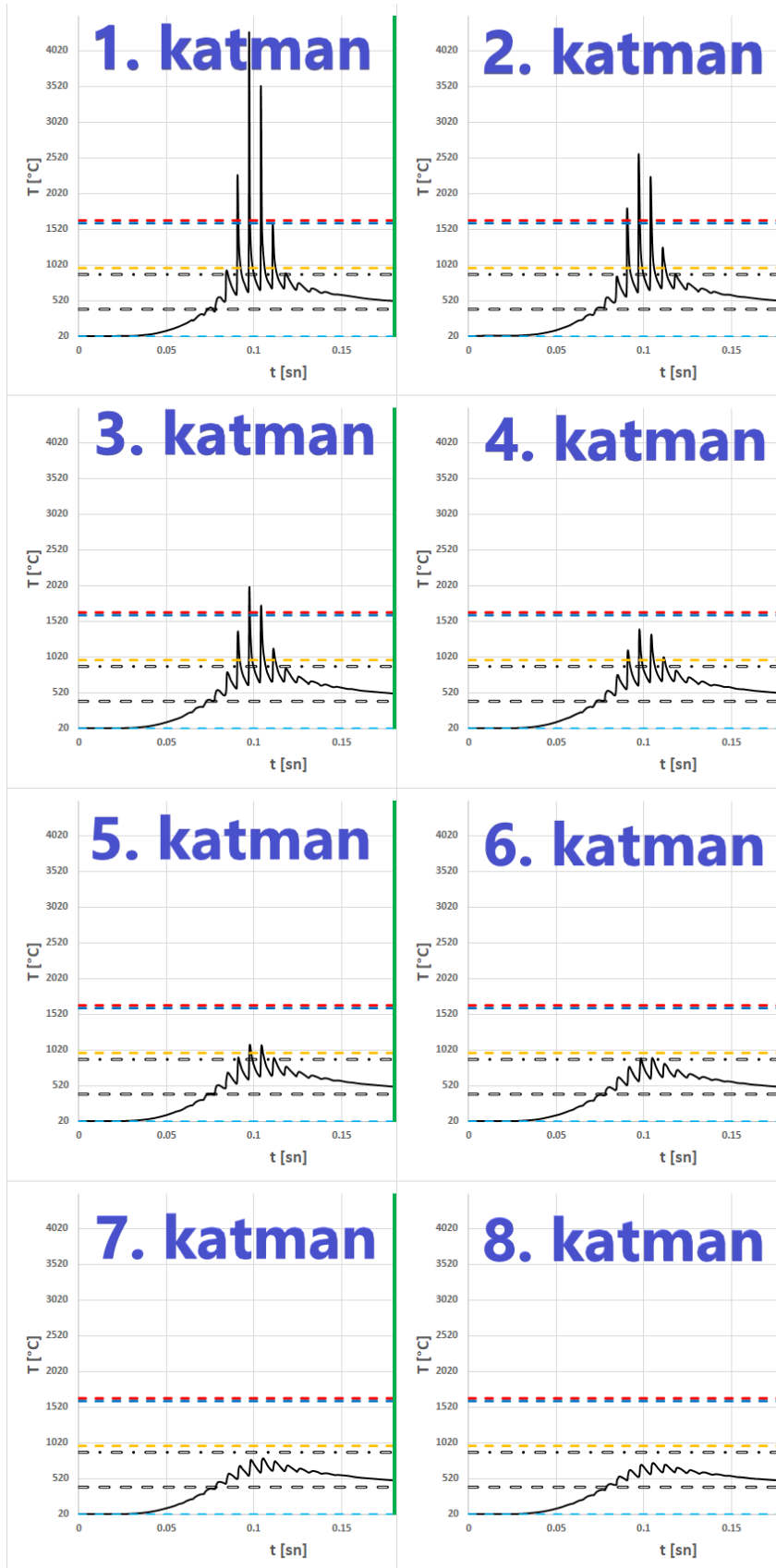
EKLER

EK-1. Ti-6Al-4V alaşımı termo-fiziksel özellikleri

Çizelge 1.1. Ti-6Al-4V alaşımı termo-fiziksel özellikleri

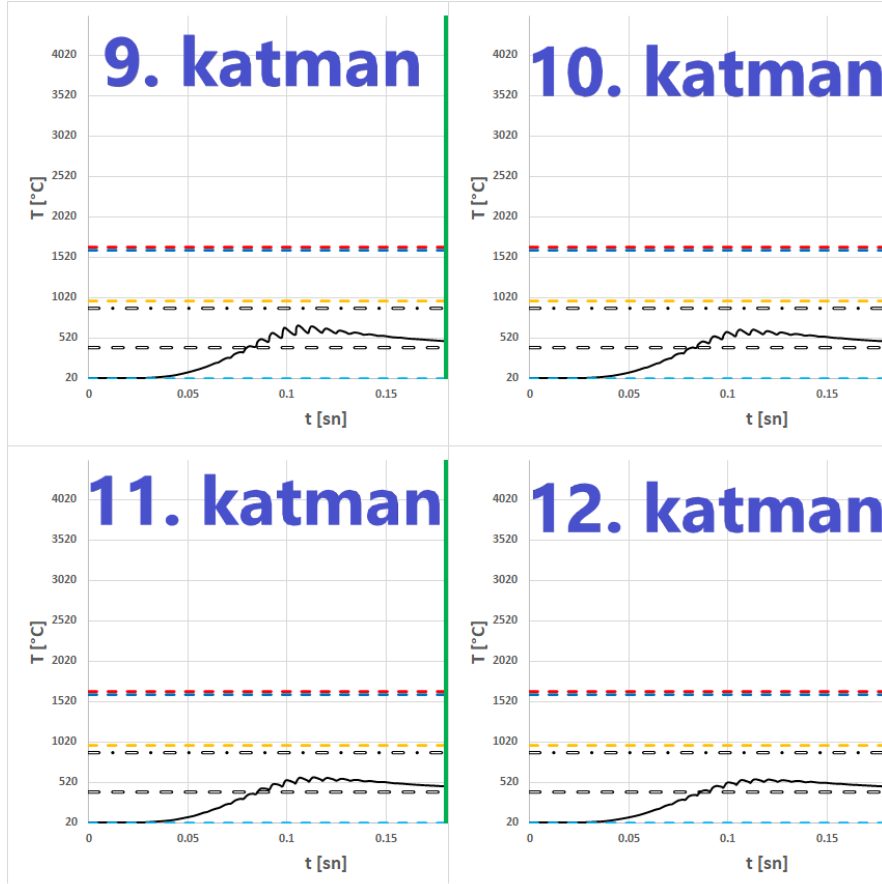
Ti-6Al-4V Termo-fiziksel Özellikleri	Değer/Fonksiyon
Emissivite [-]	0.6 katı [103] 0.4 sıvı
Emilim [-]	0.3-0.4 (SLE) 0.9-1 (EDE)
Bulk termal iletimi [$W m^{-1} K^{-1}$]	$1.26+0.016*T$ $T \leq 1268$ [83] $3.51+0.013*T$ $1268 < T \leq 1923$ $-12.76+0.024*T$ $T > 1923$
Toz iletimi [$W m^{-1} K^{-1}$]	$0.0014*T+0.2204$ $T \leq 1923$ [84] $-12.76+0.024*T$ $T > 1923$
Özgül ısı [$J kg^{-1} K^{-1}$]	$483+0.215*T$ $T \leq 1268$ [83] $412.7+0.1801*T$ $1268 < T \leq 1923$ 831 $T > 1923$
Yoğunluk [$kg m^{-3}$]	$4420-0.154*(T-298)$ katı [83] $3920-0.68*(T-1923)$ sıvı
Füzyon gizil ısı [$J kg^{-1}$]	286000 [83]
Viskozite [Pa s]	$\exp(-1.6+5346/T)*10^{-3}$ [83], [37], [104]
Yüzey gerilimi [$N m^{-1}$]	$1.52-0.00045*(T-1923)$ [104]
Solidüs sıcaklığı [K]	1877
Likidüs sıcaklığı [K]	1923
Buharlaşıma gizil ısı [$J kg^{-1}$]	9830000

EK-2. 150 W-750 mm/s, P noktası termal geçmişi



Şekil 1.1. 150 W-750 mm/s, P noktası termal geçmişi, 1-8. katmanlar

EK-2. (devam) 150 W-750 mm/s, P noktası termal geçmişi



Şekil 1.2. 150 W-750 mm/s, P noktası termal geçmişi, 9-12. katmanlar



ĞAZİ GELECEKTİR..