



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME İŞLEMİNDE Tİ-6AL-4V İÇİN SICAKLIĞA
BAĞLI MİKROYAPI DÖNÜŞÜMLERİNİN ANALİZİ VE
YERİNDE MARTENZİT AYRIŞMA YAKLAŞIMLARI**

Ayşe Kübra YILDIZ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSİLİĞİ 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.

Ayşe Kübra YILDIZ

27/07/2022

SEÇİCİ LAZER ERGİTME İŞLEMİNDE Tİ-6AL-4V İÇİN SICAKLIĞA BAĞLI
MİKROYAPI DÖNÜŞÜMLERİNİN ANALİZİ VE
YERİNDE MARTENZİT AYRIŞMA YAKLAŞIMLARI
(Doktora Tezi)

Ayşe Kübra YILDIZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Temmuz 2022

ÖZET

Seçici Lazer Ergitme (SLE) sırasında, erişilen yüksek sıcaklıklar ve hızlı soğuma hızları nedeniyle, Ti-6Al-4V alaşımlı parçalarda sünekliği zayıf martenzit α' mikroyapılar oluşmaktadır. Öte yandan, $\alpha+\beta$ mikroyapıyla daha yüksek mukavemet ve süneklik elde etmek mümkündür. Yerinde martenzit ayrışma yöntemiyle, martenzit α' mikroyapısı lamelli ($\alpha+\beta$) mikroyapılara dönüştürülebilmektedir. Ancak, ayrışma için özel koşullar gerekmekte olup, bu koşulların belirlenmesi zordur. Bu tez çalışmasında, serili toz katman üzerinde seçici olarak lazer tarama işleminin sürekli değişen termal davranışını değerlendirmek için, çok taramalı ve çok katmanlı olmak üzere etkili bir model geliştirilmiştir. Model için ayrıca, Ti-6Al-4V için z-yönünde iletkenlik geliştirme faktörünü (λ_z) ve emilimi hesaplayan ampirik yaklaşımlar türetilmiştir. Lokal sıcaklık gradyanları ile mikroyapı dönüşümünü doğrudan ilişkilendirmeyi mümkün kılan fenomenolojik bir yaklaşım kullanılmıştır. Bu dönüşümlerin üretim parametreleriyle ilişkileri ele alınarak, martenzit ayrışmasının evreleri açıklanmıştır. Model ile deneysel çalışmaların tutarlılığı kontrol edilmiştir. Ayrıca, martenzit ayrışması için zor olan 30 μm toz katman kalınlığı ve 85 μm lazer çapına sahip bir lazer için parametre seti oluşturulmuş ve bir örnek geometrinin lazer toz yatak füzyonlu bir eklemeli imalat tezgahında üretimi yapılarak mikroyapısı analiz edilmiştir. Ayrıca, farklı özellikteki destek yapı, üretim oryantasyonları, tarama stratejileri ve tekrar ısıtma işlemlerinin termal analizi yapılarak, martenzit ayrışmasına olan etkileri incelenmiştir. Yüksek tabla sıcaklıklarında toz serme süreleri iyileştirilerek martenzitin ayrışmasına olanak sağlayan yeni parametre setleri belirlenmiştir. Yüksek boşluklu destek yapıların ve genişleyen kesitli yapıların martenzit ayrışmasına olumlu etkileri tespit edilirken, tarama stratejisi ve tekrar ısıtma işleminin önemli ölçüde etkisi olmadığı görülmüştür. Tabla sıcaklığı ve toz serme sürelerinin ayrışma için önemli parametreler olduğu belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 91437
Anahtar Kelimeler : Seçici Lazer Ergitme, Eklemeli İmalat, Ti-6Al-4V
Sayfa Adedi : 100
Danışman : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

ANALYSIS OF TEMPERATURE DEPENDENT MICROSTRUCTURE
TRANSFORMATIONS AND IN-SITU MARTENSITE DECOMPOSITION
APPROACHES FOR Ti-6Al-4V IN SELECTIVE LASER MELTING

(Ph. D. Thesis)

Ayşe Kübra YILDIZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2022

ABSTRACT

In Selective Laser Melting (SLM), due to the high temperatures and rapid cooling rates, martensite α' microstructures with poor ductility are formed in Ti-6Al-4V alloy. However, the higher strength and ductility can be obtained by $\alpha+\beta$ microstructure. Via in-situ martensite decomposition method, the martensite α' microstructure can be turned into lamellar ($\alpha+\beta$) microstructures. However, special conditions are required for decomposition to occur, and these conditions are difficult to determine. In this thesis, an efficient multi-tracks and multi-layer model has been developed to evaluate the ever-changing thermal behavior of the laser scanning process selectively on the laid powder layer. The model includes empirical approaches to determine conductivity enhancement factor in the z-direction (λ_z) and absorptivity for Ti-6Al-4V. A phenomenological approach has been employed, which allowed to directly relate the local time dependent temperature gradients to the microstructure transformation evolution. These transformations in relation to process parameters and the required stages of martensite decomposition have been explained. The consistency of the experimental studies with the model was checked. In addition, parameters were estimated for a powder layer thickness of 30 μm and a laser with a beam diameter of 85 μm , where decomposition would be difficult, and a sample geometry was fabricated on a laser powder bed fusion additive manufacturing machine and its microstructure was analyzed. In addition, the effects of different support structures, build orientations, scanning strategies and reheating processes on martensite decomposition were investigated by thermal analysis. New parameter sets were determined that allow the decomposition of martensite by improving the powder laying times at high substrate temperatures. While positive effects of high-void support structures and expanding cross-section structures on martensite decomposition were detected, it was observed that the scanning strategy and reheating process did not have a significant effect. Substrate temperature and powder laying times were determined to be important parameters for decomposition.

Science Code : 91437

Key Words : Selective Laser Melting, Additive Manufacturing, Ti-6Al-4V

Page Number : 100

Supervisor : Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

TEŞEKKÜR

Tez hazırlama sürecimin tamamında bilgi ve tecrübeleriyle çalışmalarına yön veren çok değerli danışmanım Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ'a sonsuz şükranlarımı sunarım. Ayrıca, tez dönemi boyunca değerli katkıları, tecrübe ve rehberliklerinden faydalandığım tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Rahmi ÜNAL ve Doç. Dr. Sezer ÖZERİNÇ hocalarıma teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarında, DKTM2018/05 proje numarasıyla verdiği maddi destekleri için Türk Havacılık Uzay Sanayii (TUSAŞ)'ne teşekkür ederim. Maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen ve her daim yanımda olan aileme teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
2.1. Eklemeli İmalat Teknolojisi	5
2.2. Seçici Lazer Ergitme Yöntemi	6
2.2.1. Çalışma prensibi	6
2.2.2. Üretim parametreleri	8
2.2.3. Destek yapılar.....	9
2.2.4. Üretim oryantasyonu.....	12
2.3. Ti-6Al-4V Alaşımının Fiziksel Metalürjisi ve Faz Dönüşümleri	13
2.3.1. Ti-6Al-4V alaşımlarında mikroyapı oluşumları.....	15
2.4. SLE de Ti-6Al-4V Alaşımının Mikroyapısı	18
2.5. Yerinde Martenzit Ayrışma Yaklaşımları.....	23
2.5.1. Martenzit ayrışmasına parametrelerin etkisi	27
3. MATEMATİKSEL MODELLEME	33
3.1. SLE Yönteminde Fiziksel Süreç	33

	Sayfa
3.1.1. Isı kaynağı modellemesi	34
3.1.2. İlk şart ve sınır şartları	35
3.1.3. Malzeme özellikleri	36
3.1.4. Parametre kombinasyonları	37
3.1.5. Odak uzaklığına (OU) göre lazer çapının hesaplanması	37
3.1.6. Geometri ve tarama stratejisi.....	39
3.1.7. Histeresiz malzeme davranışı.....	40
3.1.8. Etkili katman kalınlığı hesaplama.....	40
3.1.9. Emilim katsayısı.....	42
3.2. Destek Yapıların Termal Modellemesi	44
3.3. Üretim Oryantasyonun Termal Modellemesi	45
3.3.1. Daralan ve genişleyen kesit alanlı üretim oryantasyonun modellenmesi.	46
3.3.2. Martenzit ayrışması için geometri modellenmesi	48
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	49
4.1. Tek Katman ve Tek Taramalı Ergiyik Havuzu Boyutlarının Doğrulanması.....	49
4.2. Tek Katman ve Çok Taramalı Sayısal Modelleme	55
4.3. Çok Katman ve Çok Taramalı Sayısal Modelleme	58
4.4. Deneysel Doğrulama Çalışmaları.....	65
4.5. Destek Yapıların Termal Davranışa ve Martenzit Ayrışmasına Etkisi.....	72
4.6. Üretim Oryantasyonunun Termal Davranışa ve Martenzit Ayrışmasına Etkisi.	75
4.6.1. Üretim yönünde daralan ve genişleyen kesit alanların termal yapısı	75
4.6.2. Üretim oryantasyonunun martenzit ayrışmasına etkisi	77
4.7. Tabla Sıcaklığı ve Toz Serme Süre Değişkenli Parametre Setleri Belirleme.....	78
4.8. Tarama Stratejisinin Sıcaklık Dağılımında Rolü.....	81

	Sayfa
4.9. Tekrar Isıtmanın (Tekrar Ergitme) Ayırışmaya Etkileri	84
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	87
KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ	99



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Eklemeli imalat yöntemleri	6
Çizelge 2.2. SLE sürecindeki üretim parametreleri	8
Çizelge 3.1. Ti-6Al-4V için malzeme özellikleri	36
Çizelge 3.2. Sayısal modellemede kullanılan parametre kombinasyonları	37
Çizelge 3.3. Parametre seti.....	44
Çizelge 3.4. Parametre seti.....	46
Çizelge 4.1. Hesaplanan λ_z faktörü 1,0'dan büyük olan parametre kombinasyonları.....	53
Çizelge 4.2. Sayısal modellemede kullanılan parametrelerin λ_z faktörleri ve emilim katsayıları.....	54
Çizelge 4.3. S3 parametre değerleri.....	62
Çizelge 4.4. Ti-6Al-4V (15-45 μm) metal toz özellikleri	66
Çizelge 4.5. Parametre setleri	79

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. SLE sürecinin şeması.....	7
Şekil 2.2. Çeşitli tarama stratejileri; bant (a), zikzak (b), spiral(c) ve ada (d).....	9
Şekil 2.3. Kritik üretim açısının gösterimi.....	10
Şekil 2.4. Çeşitli geometrilere destek yapılar	11
Şekil 2.5. Titanyum alaşımının sıcaklığa göre faz değişimleri ve kafes yapıları	14
Şekil 2.6. Ti-6Al-4V alaşımının sıcaklığa bağlı katı hal dönüşlerinin şematik gösterimi.....	15
Şekil 2.7. Ti-6Al-4V malzemesinin sıcaklığa bağlı faz diyagramı.....	19
Şekil 2.8. SLE Ti64 ve Ti64+10Mo parçaların gerilim-gerinim eğrisi	22
Şekil 2.9. SLE (mavi) ve ısıtıl işlem uygulanmış SLEnin (kırmızı) gerilim-gerinim eğrisi	22
Şekil 2.10. α ve β fazların en/boy oranlarına göre SLE parçaların gerilim-gerinim eğrileri	23
Şekil 2.11. Birinci katmanda depolanan alt sıcaklık değerlerinin martenzitik ayrışma sıcaklığına erişim süreçlerinin şematik görünümü.....	24
Şekil 2.12. Ti-6Al-4V için soğuma hızına bağlı faz dönüşümleri	25
Şekil 2.13. X katmanın ardından birinci katmanın martenzit α' dan $\alpha+\beta'$ 'ye dönüşümü.	26
Şekil 2.14. 60 μm ve 90 μm katman kalınlıklarında α çıta genişlikleri.....	28
Şekil 2.15. Tabla sıcaklıklarına göre dayanım-uzama değerleri.....	29
Şekil 2.16. Katmanlar arası toz serme süresine göre β çıta genişlikleri	30
Şekil 2.17. Katmanlar arası toz serme süresine göre β çıta genişlikleri	30
Şekil 3.1. Gauss dağılımı (a) ve ışın genişliği ifadeleri (b)	34
Şekil 3.2. Modelde tanımlanan sınır şartları	36
Şekil 3.3. Lazerin gauss profilinin odak noktasını şeması ve odak noktası parametreleri.....	38

Şekil	Sayfa
Şekil 3.4. Çok katmanlı model ağ geometrisinin şeması (a) ve SLE simülasyonları sırasında tarama stratejisi (b).....	39
Şekil 3.5. İlk toz katmanın katılma sonrası çökme görünümü	41
Şekil 3.6. Parametrelerle ilişkili emilim katsayıları değerleri.....	43
Şekil 3.7. SLE sürecini 3D ve 2D şematik görünümü	45
Şekil 3.8. SLE’de farklı oryantasyonlarda üretilen parçalardaki ısı iletimi.....	46
Şekil 3.9. Daralan (a) ve genişleyen (b) parçaların üretim oryantasyonları	47
Şekil 3.10. Genişleyen ve daralan parçalar için tasarlanan ağ geometrisi	47
Şekil 3.11. Genişleyen-sabit(a) ve sabit-daralan(b) parçaların üretim oryantasyonları..	48
Şekil 4.1. S1’in birinci katmanındaki lazer taraması sırasında sıcaklık gradyanları.....	49
Şekil 4.2. PD/V oranlarına göre deney ve simülasyon ergiyik havuzu genişlikleri	51
Şekil 4.3. PD/V oranlarının bir fonksiyonu olarak 50 μm (a) ve 70 μm (b) lazer yarıçapı için deney ve simülasyon (τ formülü ve sabit) ergiyik havuzu derinlikleri	51
Şekil 4.4. Güç, tarama hızı ve lazer nokta yarıçapının bir fonksiyonu olarak λ_z faktörleri	54
Şekil 4.5. S1 ve S2’nin ilk katmanı taranması sırasında oluşan xz kesitindeki sıcaklık gradyanları.....	55
Şekil 4.6. S2 parametresindeki birinci katmanın taranma sırasındaki görüntüleri	56
Şekil 4.7. Birinci katmanda S1 (a) ve S2 (b) için taranma ve 1 s toz serme süreci boyunca P konumunda gerçekleşen sıcaklık sonuçları.....	56
Şekil 4.8. S2 parametresindeki birinci katmanın taranarak 1 s soğuma sonrası izometrik (a) ve xz kesiti (b) görüntüleri	57
Şekil 4.9. S1 için ilk 10 katman taranmasında birinci katman üzerindeki P konumunun sıcaklık sonuçları	58
Şekil 4.10. S2 için ilk 10 katman taranmasında birinci katman üzerindeki P konumunun sıcaklık sonuçları	59
Şekil 4.11. S1, S2 ve S3’ün birinci katman için sonraki katmanların sayısına bağlı olarak T_{vs} sıcaklık değişimi	61

Şekil	Sayfa
Şekil 4.12. S1 ve S2'nin birinci katman için sonraki katmanların sayısına bağlı olarak soğuma hızları	63
Şekil 4.13. S2'nin sonraki katmanların taranmasına bağlı olarak n'inci katmanlarının sayısal T_{vs} ve T_p sıcaklıkları	64
Şekil 4.14. İlk katmanda 1s ara katman süresi için, tarama alanına göre hesaplanan T_{vs} sıcaklıkları	67
Şekil 4.15. P noktasının beş katman taranmasıyla hesaplanan sıcaklık sonuçları ($\beta = 0,75$; $H = 2\text{mm}$).....	73
Şekil 4.16. Farklı destek yapıları için P noktasındaki T_{vs} sıcaklık sonuçları.....	73
Şekil 4.17. $\beta = 0,75$; $H = 2\text{ mm}$ ve 4mm durumları için soğuma hızları	74
Şekil 4.18. Daralan ve genişleyen yapılar için 5 katmanın taranması sonucu birinci katmandaki P noktasının sıcaklık sonuçları.....	75
Şekil 4.19. Daralan ve genişleyen parçalar için 5 katmanın taranması sonucu birinci katmandaki T_{vs} sıcaklıkları.....	76
Şekil 4.20. SD ve GS için 12 katmanın taranması sonucu birinci katmandaki T_{vs} sıcaklıkları.....	77
Şekil 4.21. SD ve GS için 12 katmanın taranması sonucu birinci katmandaki soğuma hızları	78
Şekil 4.22. Parametre setlerinin üst katmanların taranması sonucu birinci katmandaki T_{vs} sıcaklıkları	80
Şekil 4.23. S4 ve S5'in birinci katman için sonraki katmanların sayısına bağlı olarak soğuma hızları	81
Şekil 4.24. Zikzak (a) ada (b) tarama stratejilerinin geometrik deseni ve tarama sırasındaki sıcaklık gradyanları.....	82
Şekil 4.25. Zikzak (a) ve ada (b) tarama stratejisi için P noktasının sıcaklık-zaman grafiği	83
Şekil 4.26. Tekrar taranma sırasında ilk katmanın 0,47 s'deki sıcaklık dağılımı	84
Şekil 4.27. Katman üst yüzey merkezinin tarama sırasındaki termal geçmişi.....	85
Şekil 4.28. Katman üst yüzey merkezinin tarama sonrası soğuma sürecindeki termal geçmişi	85

Şekil**Sayfa**

Şekil 4.29. Birinci katman üst yüzey merkezinin tekrar tarama ve 1 s sonrası soğuma sürecindeki termal geçmişi.....	86
---	----



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Sarkan yüzeylerde oluşan çarpılmalar.....	10
Resim 2.2. Farklı oryantasyonlarda üretilmiş aynı geometride numuneler	12
Resim 2.3. Ti-6Al-4V alaşımının farklı soğuma hızlarından türetilen lamelli mikroyapıların optik mikrograf görüntüleri.....	16
Resim 2.4. Ti-6Al-4V alaşımının iki modlu mikroyapısının optik mikrograf görüntüleri.....	16
Resim 2.5. Ti-6Al-4V alaşımının eş eksenli mikroyapı optik mikrograf görüntüsü.....	17
Resim 2.6. Ti-6Al-4V alaşımının martenzit α' mikroyapı optik görüntüsü.....	18
Resim 2.7. SLE ile üretilmiş Ti-6Al-4V kübik numunelerinin XOZ kesitinden SEM görüntüleri; (b) ve (c), (a)'da gösterilen beyaz kutuların büyötmeleridir	20
Resim 2.8. Martenzit α' mikroyapısı (a) ve ultrince lamelli ($\alpha+\beta$) mikroyapısı (b)	21
Resim 3.1. Toz yatağında ısı transferinin şematik gösterimi	33
Resim 4.1. Ti-6Al-4V alaşımının tek tarama izinde ergiyik havuz en kesitleri	50
Resim 4.2. Enavision-250 eklemeli imalat makinesi (a) ve kontrol ünitesi ekranı (b) ..	66
Resim 4.3. Üretim haznesi (a) ve S3 numunesinin lazerle taranması (b)	68
Resim 4.4. S3 numunesi ve destek yapının geometrisi (a), üretilen S3 numunesi (b) ve %75 boşluklu destek yapının xy-kesiti görüntüsü (c)	68
Resim 4.5. Parçanın çoğunda gözlemlenen iğnemsiz martenzit α' mikroyapıların SEM (a) ve optik mikroskop (b) görüntüleri	69
Resim 4.6. S3 parçasının yakın bölgelerinde optik mikroskop görüntüleri	70
Resim 4.7. S3 parçasının merkeze yakın bölgelerdeki SEM görüntüleri.....	71

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
C_p	Özgül ısı kapasitesi, J/kgK
CR	Soğuma hızı, K/s veya °C/s
D	Lazer çapı, μm
E	Enerji yoğunluğu, J/mm ³
h	Bindirme mesafesi, μm
h_c	Konvansiyonel ısı iletim katsayısı, W/m ² K
k	Isı iletim katsayısı, W/mK
L	Özgül ısı, kJ/kg
m	Tarama izi sayısı
n	Katman sayısı
OU	Odak uzaklığı, mm
P	Lazer gücü, W
PD	Güç yoğunluğu, MW/cm ²
Q	Heat, W/m ³
q	Isı akısı, W/m ²
r	Lazer yarıçapı, μm
T_{sub}	Tabla sıcaklığı, K
T_c	Belirli sıcaklık, K
T_s	Katılaşma sıcaklığı, K
T_l	Sıvılaşma sıcaklığı, K
T_β	Beta geçiş sıcaklığı, K
T_{ms}	Martenzit başlama sıcaklığı, K
T_{md}	Martenzit ayrışma sıcaklığı, K
T_p	En yüksek sıcaklık, K
T_{vs}	Depolanan sıcaklık, μm
t	Zaman, s veya ms
t_i	Katmanlar arası süre, toz serme süresi, s

Simgeler**Açıklamalar**

V	Lazer hızı, m/s veya mm/s
x	Uzaysal koordinat, m
y	Uzaysal koordinat, m
z	Uzaysal koordinat, m
ϕ	Toz yatağı porozitesi
τ	Emilim katsayısı
ρ	Yoğunluk, kg/m ³
ε	Emisyon katsayısı
λ	Termal iletkenlik faktörü
Ψ	Katman kalınlığı, μm

Kısaltmalar**Açıklamalar**

Eİ	Eklemeli imalat
GS	Genişleyen sabit
SD	Sabit daralan
SLE	Seçici lazer ergitme

1. GİRİŞ

Son zamanlarda, kompleks ve spesifik parçaların düşük maliyetle elde edilmesine yönelik artan talepler nedeniyle eklemeli imalat (Eİ) teknolojisi yoğun ilgi görmektedir [1]. Genel olarak üç boyutlu (3B) baskı olarak da adlandırılan Eİ, malzeme katmanlarının art arda birleştirilmesiyle 3B parça üretimi olarak tanımlanmaktadır. Kullanılan malzemeye ve yöntemine göre alt gruplara ayrılan bu teknolojiden [2], seçici lazer ergitme (SLE) yöntemi parçanın mikroyapı ve mekanik performansını geliştirilmesi konusunda sahip olduğu potansiyelden dolayı dikkatleri üzerine çekmektedir. SLE, katman halinde serilen metal tozlarının lazer ışını tarafından taranarak eritilmesi ve birbirine kaynaşması esasına dayanmaktadır. Bu yöntem, spesifik ve karmaşık geometrileri malzeme israfı yapmadan tek seferde üretebilmesi nedeniyle de tıp, biomedikal, enerji, havacılık ve uzay sektörlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir [3].

SLE, birçok üretim parametresine sahip olup, bu parametrelerin kontrol edilmesini sağlamaktadır. Her parametrenin farklı derecelerde, termal davranışa, katılma davranışına, mikroyapıya, mekanik özelliklere, yüzey pürüzlülüğüne, yoğunluğa, yorulma ömrüne, artık gerilime ve bozulmalara etkisi bulunmaktadır [4]. Bununla birlikte, bu teknoloji tarafından üretilen bileşenlerin üretim parametreleri, mikroyapı ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkinin tam olarak anlaşılması büyük önem arz etmektedir.

SLE işlemi sırasında kullanılan metal ve alaşımlarının fiziksel özellikleri de nihai parçaların özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Parçanın; mukavemet, süneklik, sertlik gibi çok sayıda mekanik özelliği, işlem sonucu oluşan faz morfolojisine, tane boyutuna ve dislokasyonlara bağlıdır [5]. Bu sebeple de, mikroyapılar geliştirilmiş performanslı yapıların tasarımı ve uygulaması için kritik öneme sahiptir. Ti-6Al-4V alaşımı, yüksek mukavemet-ağırlık oranı, korozyona karşı mükemmel direnci ve iyi biyouyumluluğu nedeniyle en önemli mühendislik malzemelerinden biri kabul edilmektedir [6]. Bu sebeple de, SLE uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Ti-6Al-4V alaşımı iki fazlı ($\alpha+\beta$) mikroyapıya sahiptir. Çeşitli termomekanik, ısıtma işlem, soğutma hızı vb. termal süreçler uygulanarak, bu alaşımdan çeşitli mikroyapılar elde edebilmek mümkündür. Böylelikle, aynı alaşımdan farklı mekanik performanslarda parçalar üretilmektedir [7].

SLE ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımlarının mikroyapı oluşum süreci ve farklı çalışma koşulları altındaki davranışları henüz tam bilinmemektedir. SLE sürecinde, katmanların lazerle taranması sonucu yüksek sıcaklıklara çıkması ve katılaşma sırasında hızlı soğuması nedeniyle, üretilen parçalarda sertlik değeri yüksek, ince iğnemsli martenzit α' yapısı oluşmaktadır [8]. Martenzit mikroyapılar, yüksek mukavemet özelliği gösterirken süneklik bakımından zayıftır. Bu sebeple, bu yapılar genellikle mühendislik kalite standartları şartlarını karşılayamadıkları için tercih edilmemektedir. Halbuki, $\alpha+\beta$ mikroyapısı ile hem daha yüksek mukavemet hem de daha yüksek süneklik özellikleri elde edilebilmektedir [9]. $\alpha+\beta$ mikroyapısı elde etme yöntemlerinden biri de, yerinde martenzit ayrışma metodudur. Bu metodun, diğer yöntemlere göre zaman-maliyet kaybı, mekanik performans gibi durumlarda avantajları bulunmaktadır. Bu metod, diğer yöntemlere nazaran yeni olup, hakkında çok az çalışma bulunmaktadır. Martenzit ayrışmanın gerçekleşebilmesi için, özel koşulların sağlanması gerekmekte olup, bu koşulların tahmini ve tespiti zordur. Martenzit ayrışması için gereken koşullardan biri, katman sıcaklığının yeterli bir süre martenzit ayrışma sıcaklığının üzerinde kalabilmesidir. Diğer ise, bu sıcaklık üzerinde iken katman soğuma hızının kritik soğuma hızının altına düşmesidir. Bu iki koşul sağlandığında, ayrışma başlayabilmektedir [10].

SLE işlemi boyunca, lazer-metal toz etkileşimleri gerçekleşmekte ve tekrarlanan erime-katılaşma sonucunda da çok sayıda döngüsel termal olaylar yaşanmaktadır [11]. Sıcaklık gradyan mekanizması, ergiyik havuz bölgesini ve stabilitesini kontrol ederek nihai mikroyapı ve mekanik özelliklerini belirlemektedir. Sıcaklık gradyanı doğru bir şekilde ölçülebilir ve kontrol edilebilirse, üretilen parçaların bütünlüğü ve işlevselliği önemli ölçüde geliştirilebilmektedir. Ancak, sıcaklık gradyan boyutlarının mikro ölçekte ve geçici olması sebebiyle, anlık değişen sıcaklıkların ölçülmesi çok zordur. Bu sebeple, süreç mekanizmasına ilişkin bilgi edinmek için, nümerik modelleme geliştirilerek, temel sıcaklık gradyan mekanizması hesaplanabilmekte ve sistemde yaşanan termodinamik olaylar çözümlenebilmektedir. Diğer yandan, model oluşturulurken birçok termo-mekanik olgunun dahil edilmesi, gerçeğine uygunluğu artırırken, sayısal hesaplama maliyeti yüksek performanslı bilgisayarların bile hesaplayamadığı bir noktaya geçebilmektedir. Özellikle, çoklu katmanlı modellemelerde hesap maliyetleri katlanarak artmaktadır. Bu nedenle, son derece karmaşık ve zaman alıcı lazer tozu yatağı süreçleri için doğru ve tahmine dayalı modellere ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez çalışmasında, seçici lazer ergitme uygulamalarında Ti-6Al-4V alaşımı için sıcaklığa bağlı mikroyapı dönüşümlerinin sayısal analizi ile yerinde martenzit ayrışma yaklaşımlarının araştırılması amaçlanmaktadır.

Bu amaçlar doğrultusunda tez çalışmasının hedefleri aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- SLE sürecinin anlık değişen sıcaklık davranışının analizi için çoklu tarama izi ve çoklu katmanda etkin ısıl iletkenlik yaklaşımı ile geliştirilmiş etkili bir model geliştirmek
- SLE uygulamalarında Ti-6Al-4V alaşımı için parametrelere bağlı λ_z termal iletkenlik faktör sayılarını hesaplayan ampirik bir formül türetmek
- Yerel zamana bağlı sıcaklık gradyanlarını mikroyapı dönüşümleri ile doğrudan ilişkilendirerek, bu dönüşümlerin üretim parametreleri ile ilişkisini açıklamak
- Martenzit ayrışma oluşumunu ve oluşum koşullarını açıklamak
- Modelle martenzit ayrışması elde edilebilecek yeni parametre setleri belirlemek, bu parametre setlerinde parça ürettirilerek mikroyapı analizini yapmak
- Destek yapıları ile üretim oryantasyonunun termal analizi yapılarak martenzit ayrışmasına olan etkilerini incelemek
- Ticari makinelerle yönelik olarak, daha uzun toz serme süreleri için martenzit ayrışması gerçekleşebilen yeni parametre setleri belirlemek
- Farklı tarama stratejilerinin ve tekrar ısıtma (ergitme) işlemlerinin katmandaki sıcaklık dağılıma olan etkilerini analiz ederek, martenzit ayrışımı olan etkilerini araştırmak

Bu tez çalışması giriş, literatür taraması, matematiksel modelleme, bulgular ve tartışma ile sonuç ve öneriler olmak üzere beş ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, bu tez çalışmasının araştırma arka planı, motivasyonu ve hedefleri tanıtılmış, literatürdeki eksikliklerden bahsedilerek, tezin organizasyonu hakkında bilgi verilmiştir. İkinci bölümde, seçici lazer ergitme, Ti-6Al-4V, mikroyapı ve martenzit ayrışması konularında teorik bilgiler ile literatür çalışmaları/bulguları verilmiş olup, bu tez çalışmasının literatüre olan katkıları belirtilmiştir. Üçüncü bölümde, üç boyutlu matematiksel modelin temel aşamaları ile detaylı olarak açıklanmış, çok katmanlı çok taramalı ile nihai haline getirilen model çeşitli parametrelerin analizi için daha da geliştirilmiştir. Dördüncü bölümde, tezi hedeflerine yönelik nümerik analiz sonuçları, model doğrulaması, formül türetme, deneysel çalışmalar ve martenzit ayrışma yaklaşımlarından elde edilen bulgular detaylı olarak açıklanmıştır. Son bölümde ise, tez çalışması kapsamında elde edilen temel sonuçlar

maddeler halinde verilerek, konunun geliştirilmesi amacıyla gelecek çalışmalar için çeşitli öneriler sunulmuştur.



2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, seçici lazer ergitme yöntemi, Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapı-mekanik özellikleri ve yerinde martenzit ayrışması konularına ilişkin literatürde yapılan çalışmalar ve elde edilen bulgular özetlenmiştir. İlk bölümde, eklemeli imalat ve teknikleri konusundan kısaca bahsedilmiş, ikinci bölümde ise seçici lazer ergitmenin çalışma prensibi, üretim parametreleri, destek yapılar ve üretim oryantasyonu hakkında literatüre dayalı bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde, Ti-6Al-4V alaşımının fiziksel metalurjisi ve faz dönüşümleri açıklanarak, mikroyapı oluşumları hakkında elde edilen literatür bulguları özetlenmiştir. Dördüncü bölümde, SLE ile üretilen Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapısının hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Beşinci bölümde, yerinde martenzit ayrışma oluşumu hakkında teorik bilgiler verilerek, oluşum koşulları ve yaklaşımlarına ilişkin literatürden elde edilen bulgular özetlenmiştir. Ayrıca, parametrelerin martenzit ayrışması üzerindeki etkileri açıklanarak, bu konuda günümüze kadar yapılmış literatür çalışmalarından ve bulgularından bahsedilmiştir.

2.1. Eklemeli İmalat Teknolojisi

3B baskı olarak da bilinen eklemeli imalat, malzeme katmanlarının art arda birleştirilmesiyle üç boyutlu parça elde edilmesi esasına dayanmaktadır. Katı, sıvı veya süspansiyon bazlı olabilen malzemeler, arzu edilen kesitte geometri oluşturabilmek için belirli konumda biriktirilerek kaynaştırılmakta ve bu kesitler sırayla eklenerek üç boyutlu parça elde edilmektedir.

1980'lerin sonlarında ortaya çıkarak, günümüzde geliştirilmesine devam edilen [5] eklemeli imalat yöntemi, geleneksel imalat yöntemleri ile karşılaştırıldığında, bu yöntemin malzeme israfı yapmaması, spesifik ve karmaşık geometrileri, tek seferde, hızlı ve seri üretmesi, üretim sonrası ekstra maliyete ihtiyaç duymaması gibi avantajları bulunmaktadır [12]. Bu sebeple de, uzay ve havacılık başta olmak üzere otomotiv, biomedikal ve enerji endüstrilerinde eklemeli imalat teknolojisi yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. ASTM F42 standardına göre eklemeli imalat yöntemleri yedi alt sınıfa ayrılmış olup [2], yöntemlere ait genel bilgiler Çizelge 2.1. de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. Eklemeli imalat yöntemleri [2]

Sınıflandırma	Çalışma prensibi	Malzemeler
Yapıştırıcı Püskürtme	Katman halinde serilen toz parçacıkların yapıştırıcı püskürtülmesiyle birbirine yapıştırılması ile üretilir	Polimerler, seramikler
Direkt Enerji Biriktirme	Odaklanmış termal enerjinin metal tozlarını eriterek biriktirir	Metaller
Malzeme Ekstrüzyonu	Nozzle tarafından eritilip dökülen malzemenin katmanlı üretilmesidir	Polimerler, kompozitler
Malzeme Püskürtme	Damlacıklar halinde malzeme püskürtülmesidir	Polimerler, seramikler, kompozitler
Toz Yataklı Birleştirme	Serilen tozların termal enerji ile kaynaştırılmasıdır	Metaller, seramikler
Plaka Tabakalaştırma	Plaka malzemelerin birbirine yapıştırılmasıdır	Polimerler, seramikler, metaller
Havuz Fotopolimerizasyonu	Sıvı polimerin havuzda ışıkla sertleştirilmesidir.	Polimerler, seramikler

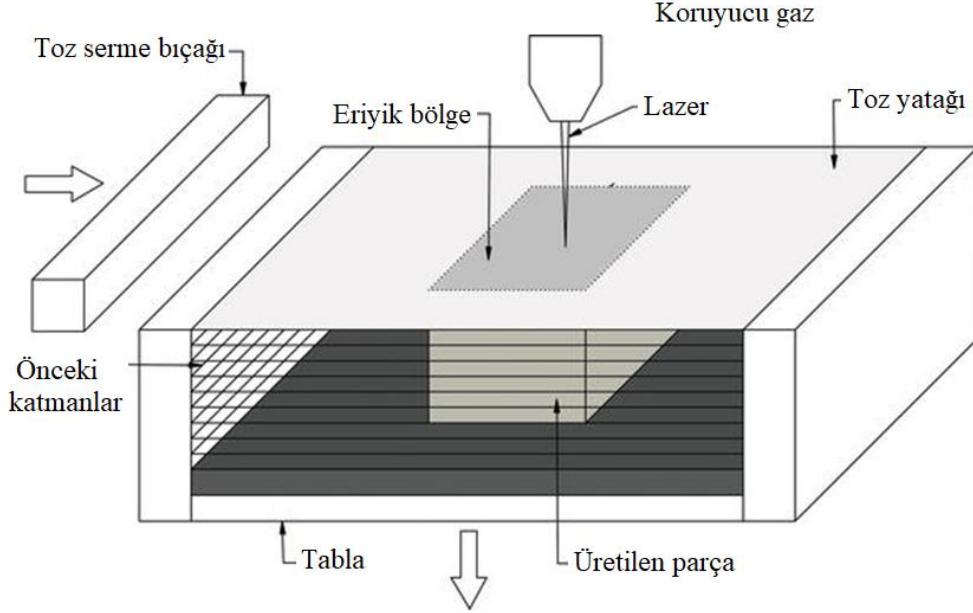
Toz yataklı birleştirme, metal parçalar için toz bazlı en etkili eklemeli imalat yöntemi olarak geliştirilmiştir. Katman halinde serilen metal tozlarının eritilmesi veya sinterlenmesine dayanan bu yöntemde, enerji kaynağı olarak lazer veya elektron ışını kullanılmaktadır. Sahip olduğu özelliklere (enerji kaynağı, ortam şartları, erime/sinterleme vb.) göre bu yöntem kendi içerisinde gruplara ayrılmış olup, elektron ışını ergitme (EBM), seçici lazer ergitme (SLE), seçici lazer sinterleme (SLS) ve direkt metal lazer sinterleme (DMLS) olarak kategorize edilmektedir [13]. Bunlar arasında SLE, geliştirilebilir mikroyapılı ve yüksek mekanik özellikli parça üretimi konusunda sahip olduğu potansiyelden dolayı, eklemeli imalat teknolojilerinin en dikkat çekici yöntemlerinden biri olmuştur.

2.2. Seçici Lazer Ergitme Yöntemi

2.2.1. Çalışma prensibi

Seçici Lazer Ergitme (SLE) işlemi, lazer-toz etkileşimine dayanmakta olup, koruyucu gaz ortamında yapılan bu işlem, katman kalınlığında serilen metal tozların yüksek enerjili lazer

ile taranması ve ardışık katmanlarda hedeflenen parça elde edilene kadar bu işlemin tekrarlanması olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.1) [14].



Şekil 2.1. SLE sürecinin şeması [14]

Üretim sırasındaki oksidasyonu önlemek amacıyla, üretim ortamı argon gibi koruyucu gazlarla doldurularak düşük oksijenli bir atmosfer sağlanmaktadır. Metal tozlar, geri çekilebilir platform üzerine konarak, ardından bir serme sistemi ile katman kalınlığında yayılmaktadır. Optik ünite vasıtasıyla, lazer ışını tarayıcı aynalar ile üretilerek metal tozlarını lokal olarak eritmek için yönlendirilmektedir. Yeterli lazer gücü uygulandığında, taranan katmandaki metal tozları ve katılaşmış alt katmanın belli bir kısmını eritilerek sıvı bir ergiyik havuz bölgesi oluşturulmaktadır. Daha sonra, ergiyik havuzun hızlı bir şekilde katılaşmasıyla da, ardışık katmanların ve taramaların birbiriyle kaynaşması sağlanmaktadır. Katmanın taranmasından sonra, alt tabla katman kalınlığında aşağı indirilerek, bir sonraki katman için aynı işlem uygulanmakta ve nihai parça imal edilene kadar bu işlemler tekrarlanmaktadır.

SLE, geleneksel imalat yöntemleriyle üretilemeyen yenilikçi şekil ve yapılarla sahip karmaşık parçaların imal edebilme, çok malzemeli üretime olanak sağlamak veya iki farklı malzemeyi tek bir parça içinde birleştirebilme vb. yetenekleriyle, ticari ve endüstriyel uygulamalar için çok fonksiyonlu bileşenlerin üretimi için aktif olarak tercih edilmektedir [15].

2.2.2. Üretim parametreleri

SLE işlemi, karmaşık bir dizi termo-mekanik süreçlerin bileşiminden oluşmaktadır. Bu süreci etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Bunlar kabaca; malzeme, lazer, tarama ve ortam parametreleri (Çizelge 2.2) olarak sınıflandırılmaktadır [16,17].

Çizelge 2.2. SLE sürecindeki üretim parametreleri [16]

Malzemeler	Lazer	Tarama	Ortam
malzeme bileşimi	lazer tarama modu	tarama hızı	tabla sıcaklığı
toz bağıl yoğunluğu	dalga boyu	bindirme mesafesi	gaz akış hızı
parçacık boyutu dağılımı	lazer gücü	katman kalınlığı	inert gaz türü
parçacık şekli	offset noktası	tarama açısı	parça oryantasyonu
termal özellikler	lazer nokta boyutu	tarama deseni	parça yerleştirme
toz akışkanlığı	lazer tipi	sınır konturları	ortam basıncı

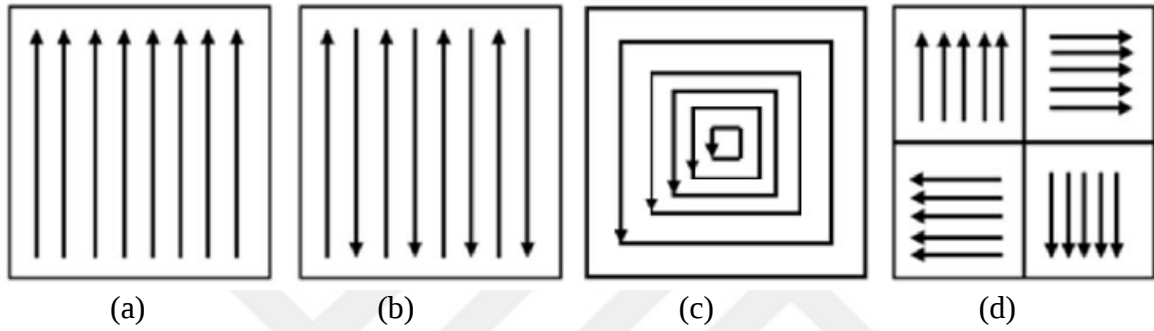
Bu kadar çok malzeme ve üretim parametresi göz önüne alındığında, en yüksek standartta parçalar üretebilmek için ilgili faktörlerin dikkatli bir şekilde izlenmesi gerekmektedir. Bu durum, SLE sürecinin sınırlarını tanımlamaktadır.

SLE için birincil üretim parametreleri; lazer gücü, tarama hızı, bindirme mesafesi ve katman kalınlığı olup, bu parametreler hacimsel bir birimde lazer ışınının metal toza ilettiği enerjiyi, yani enerji yoğunluğunu ($E = P/vht$, P,v,h,t sırasıyla lazer gücü, hızı, bindirme mesafesi ve katman kalınlığıdır) belirlemektedirler [18].

Üretim parametreleri parçanın mikroyapısı, mekanik özellikleri, deformasyonu, geometrik doğruluğu ve yüzey pürüzlülüğünü doğrudan etkilediğinden [16], parçanın kalitesi için çok önemlidir. Üretim parametrelerinin optimize edilmesi ve uyarlanması, beklenen nihai mikroyapı ve mekanik performansı elde etmek için etkili bir yöntemdir.

Üretim sürecinde, katmanlar arası ve/veya katman içi farklı tarama desenleri oluşturulabilmektedir. Tarama esnasında lazerin katman üzerinde takip ettiği yol olarak tanımlanan tarama stratejisi, katman üzerindeki lokal sıcaklık dağılımını belirlediği için

parçada görülen termal genleşme, deformasyon ve artık gerilmeleri doğrudan etkilemektedir [19]. Böylelikle, tarama stratejisi konfigürasyonu SLE bileşenlerinin kalitesini etkilemektedir. Uygulamada en çok karşılaşılan tarama stratejileri; bant, zikzak, spiral ve satranç (ada) tarama desenidir (Şekil 2.2) [20]. Tarama stratejisinin etkileri; tarama yönüne, tarama sırasına, tarama vektörü döndürme açısına, tarama vektörü uzunluğuna, tarama süresine ve bindirme mesafesi seçeneklerine göre kontrol edilebilmektedir.



Şekil 2.2. Çeşitli tarama stratejileri; bant (a), zikzak (b), spiral (c) ve ada (d) [20]

Metal ve alaşım mikroyapıları, malzemenin özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Mukavemet, sertlik ve sürünme direnci gibi malzemelerin çok sayıda mekanik özelliği, faz morfolojisine, tane boyutuna ve oryantasyona ve işleminden kaynaklanan dislokasyonlara bağlıdır [21]. Bu nedenle, mikroyapıdaki değişiklik malzeme özelliklerinde bir değişikliğe yol açabilmekte ve parçayı kullanım için uygunsuz hale getirebilmektedir. Bu kapsamda, mikroyapılar, geliştirilmiş performanslı yapıların tasarımı ve uygulaması için kritik öneme sahip olmaktadır.

2.2.3. Destek yapılar

Üretilen parçayı tabladan ayırma, üretim sırasında çarpılmaları önleme vb. durumlar için kullanılan destek (support) yapılar da SLE sürecinde yaşanan termo-mekanik olayları etkilemekte ve parçanın mikroyapı ve mekanik özellikleri değiştirebilmektedir [22]. Bu sebeple, parça optimizasyonunda bu parametrelerin de göz önünde bulundurulması önem taşımaktadır.

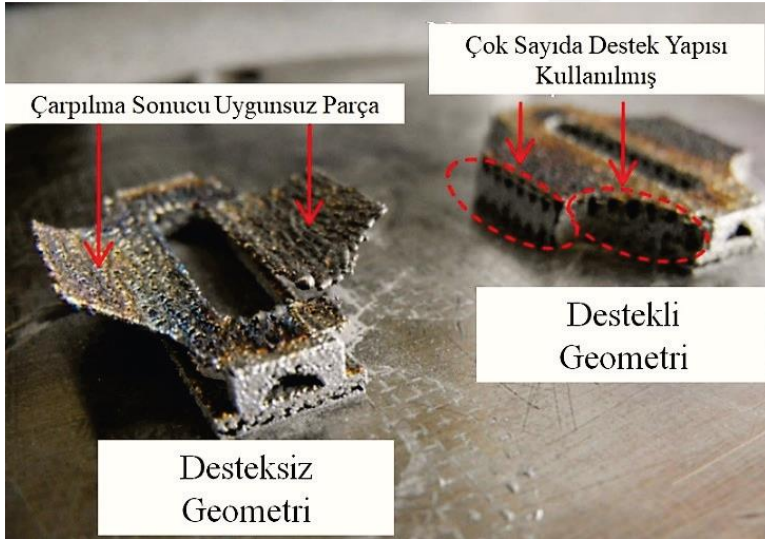
SLE'de genellikle parçaya ek olarak, alt tablanın parçaya temasını engelleyen destek yapı

da üretilmektedir. Ayrıca bu yapılar, parçanın sarkan yüzeylerini desteklemek için de kullanılmaktadır. Bu yüzeylerin eğimleri, yatay düzlem ile yaptıkları açı olarak tanımlanmaktadır. Kritik seviyenin (45°) üzerinde açıya sahip olan eğimli yüzeyler kendi kendini destekleyebildikleri için destek yapılara ihtiyaç duymamaktadırlar [23].



Şekil 2.3. Kritik üretim açısının gösterimi

Ancak, 45° altındaki açılar için, destek yapılar gerekmektedir. Çünkü destek yapı kullanılmadığı takdirde, eğimli yüzeylerde çarpılma, akma, alt kısımlarda cüruf oluşumu gözlemlenebilirken, ayrıca toz serme/düzetme bıçağına çarpması sonucu üretim durabilmektedir (Resim 2.1) [24].

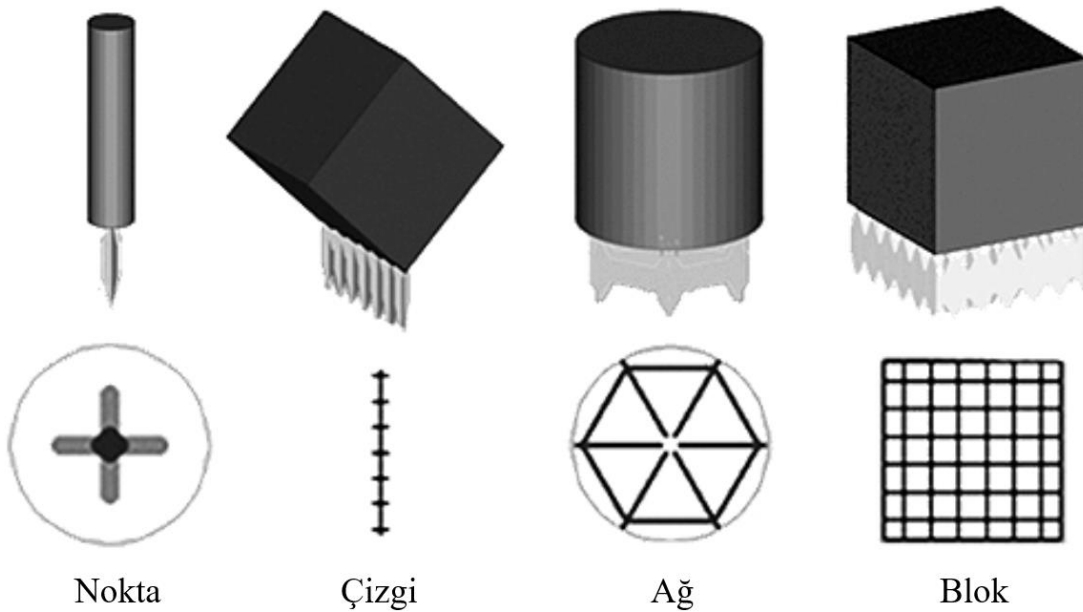


Resim 2.1. Sarkan yüzeylerde oluşan çarpılmalar [24]

Bu yapılara, parçayı yapı platformuna sabitlemek, parça içindeki ısı iletimini kontrol etmek ve eğilme ve/veya çökmeyi önlemek için ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte, destek yapılarının varlığı, hem parça üretimi için gereken süreyi hem de işlem sonrası işlemlerin zamanını ve karmaşıklığını artırmaktadır [22]. Desteklenen yüzeylerin miktarını en aza

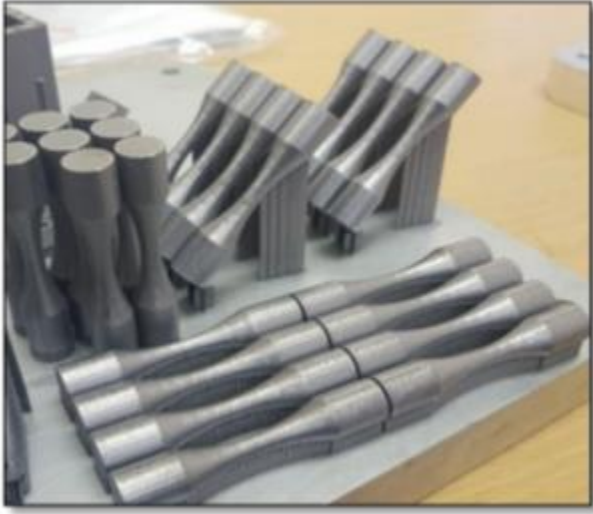
indirmek, destek yapının parçadan ayrılmasını kolaylaştırmakta ve süreç verimliliğini artırmaktadır. Sonuç olarak, destek yapılarının geometrik tasarımı ve optimizasyonu, SLE tarafından üretilen metalik parçaların sürdürülebilirliğini ve verimliliğini artırmak için gerekmektedir. Bu sebeple, destek yapıların geliştirilmesine yönelik literatürde deneysel ve nümerik çalışmalara devam edilmektedir [25]. Üretimde, çeşitli kafes geometrilerinde destek yapılar kullanılabilmektedir. Şekil 2.4. te ihtiyaca göre tasarlanmış çeşitli kafes geometrilerinde destek yapıları gösterilmektedir [23].

Destek yapılar sayesinde, ayrıca, ısı iletimi ile parça içindeki sıcaklık dağılımı kontrol edilebilmektedir. Özellikle, yüksek sıcaklıklarda ön ısıtmanın mümkün olmadığı durumlarda, önemi daha da artmaktadır. Destek yapılar, alt tablaya iletilen ısı transfer oranını kontrol ettikleri için, istenilen bazı mekanik özelliklerin elde edilmesinde yardımcı bir rol oynayabilmektedir. Enerjinin çoğu destek yapılar boyunca alt tabla yönünde aktığı için, destek yapılar süreç kontrolü bağlamında önemlidir [26]. Destek yapıların boşluk oranının yüksek olması, bu yapıların ısı iletim katsayısını düşürdüğü için, giren enerjinin parça içerisinde kalmasını sağlayarak ısı birikimine yardımcı olabilmektedir. Bu durum, mikroyapı ve mekanik özellik iyileştirmelerine katkı sağlayabilmektedir.



2.2.4. Üretim oryantasyonu

Üretim oryantasyonu, parça kalitesi açısından dikkat edilmesi gereken konulardan biridir. Üretim oryantasyonu, parçayı oluşturan katmanların birikim yönelimi olup, parça kalitesi, üretim sonrası işlemler, inşa süresi ve maliyeti vb. üzerinde önemli etkilere sahiptir. Ayrıca; üretim oryantasyonunun SLE parçalarının mikroyapısını ve mekanik özelliklerini etkileyebileceği mevcut çalışmalarda görülmektedir [27]. Farklı yapısal açılarda ve yönlerde aynı geometriye sahip parçalar üretilerek çeşitli mikroyapı ve mekanik özellikler elde etmek mümkündür [28].



Resim 2.2. Farklı oryantasyonlarda üretilmiş aynı geometride numuneler [28]

Üretim oryantasyonunun, mekanik özellikler üzerindeki etki mekanizması, malzeme özellikleri ve SLE süreçleriyle birlikte komplike hale gelmektedir. Bununla birlikte, en son gelinen noktada belli malzeme ve süreç koşulları altında, üretim oryantasyonunun performansa yönelik etkileri analizi kapsamlı olmamaktadır. Yapılan çalışmalara bakıldığında, etkileme mekanizmasının yalnızca bir veya iki faktöre bağlı olarak analiz edildiği görülmüştür [29]. Literatürdeki önceki çalışmalar çoğunlukla yatay-dikey yönler ve bazı eksen dışı performansa odaklanmış olup, bu çalışmalarda oryantasyonun dayanım, süneklik, yorulma, gözeneklik, yüzey kalitesi ve artık gerilme üzerine olan etkileri deneysel olarak gösterilmiştir [29,30].

Yeni ürünler tasarlanırken veya mevcut ürünleri yeniden tasarlarlarken tüm aşamalarda üretim oryantasyonu dikkate alınmalıdır. Parça kalitesinin yanında, iyi bir yönlendirme

seçimi ile gerekli destek sayısı da sınırlandırılabilir.

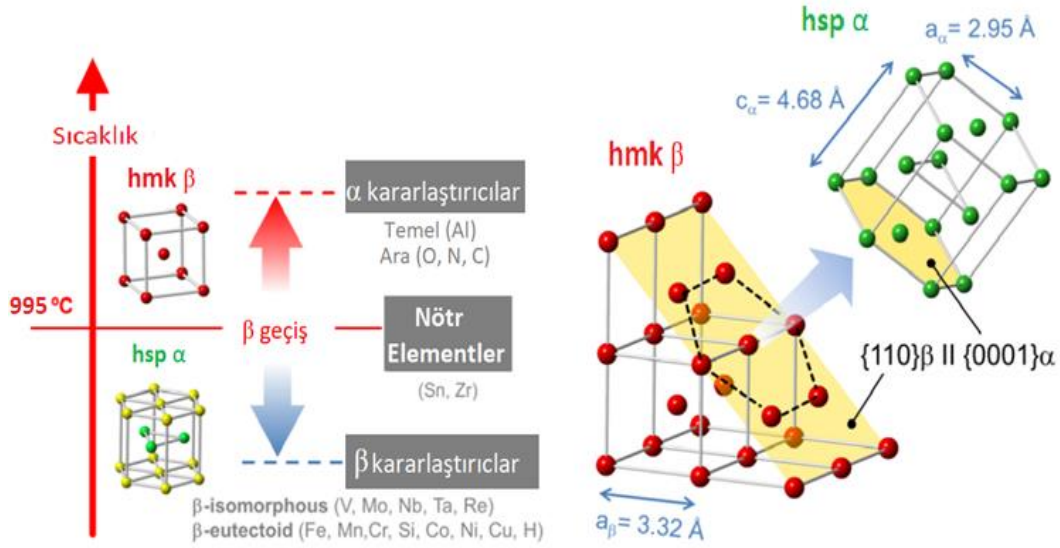
Üretim oryantasyonunun etkileri radikal olarak proseste meydana gelen termo-mekanik olaylara dayanmaktadır. SLE'de parçalar, tozlar arasındaki boşluklar nedeniyle iletkenliği çok düşük olan bir toz yatağında üretilmektedir. Bu nedenle de, emilen ısıнын çoğu, katılmış katmanlardan alt tablaya doğru akmaktadır. Bu özellik kullanılarak, üretim oryantasyonlu katmanlarda ısı birikimi ve soğuma hızı kontrol edilerek, mikroyapı ve mekanik özellik geliştirilebileceği değerlendirilmektedir.

Deneyisel olarak, SLE'de mikro ölçekte hızla değişen ısı akış oranlarını ölçmek çok zordur. Bu nedenle, üretim oryantasyonunun termal etkilerine ilişkin sayısal çalışmalar gerekmektedir.

2.3. Ti-6Al-4V Alaşımının Fiziksel Metalürjisi ve Faz Dönüşümleri

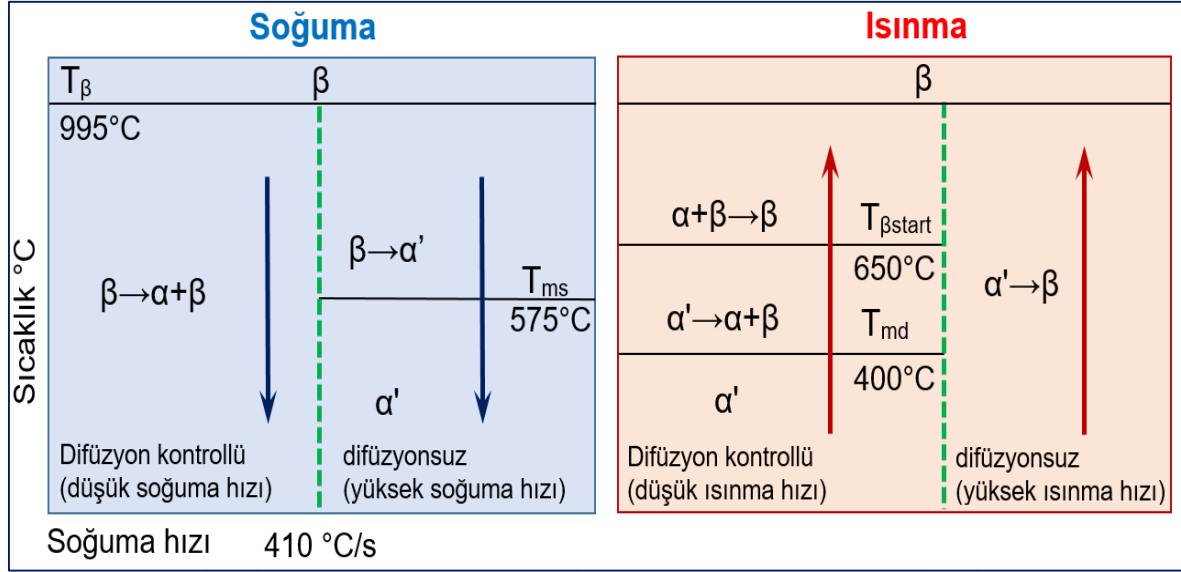
Titanyum; mükemmel korozyon direnci, yüksek dayanım, iyi biouyumluluk ve düşük termal genleşme gibi özellikleri olan hafif bir metaldir. Düşük sıcaklıklarda HSP (Hegzagonal Sıkı Paket) α , 823°C'nin üzerinde HMK (Hacim Merkezli Kübik) β mikroyapıdadır (Şekil 2.5). Alfa fazındaki titanyum oda sıcaklığında, beta fazındaki titanyum ise yüksek sıcaklıklarda kararlı hale gelmektedir [31]. Saf Titanyumun alaşımlanmasıyla, oda sıcaklığındaki allotropik fazların geçiş sıcaklıkları ve α ile β fazının hacim oranları önemli ölçüde değişmektedir. Alaşım elementleri, α / β geçiş sıcaklığını yükselterek α fazını daha da stabilize edebilir, α / β geçiş sıcaklığını düşürerek β fazını stabilize edebilir ya da yalnızca katı çözelti düzleştirici olarak hareket ederek geçiş sıcaklığını etkilemeyebilmektedir [32]. Titanyuma, alfa dengeleyici elementlerin (Al, O, H vb., β geçiş sıcaklığını artırır) ve beta dengeleyici elementlerinin (V, Ta, Mo, Nb vb., β geçiş sıcaklığını düşürür) eklenmesiyle oluşan alaşımlar, eklenen elementlerin özelliği ve miktarına göre, alaşımdaki faz kararlılıklarını ve faz dönüşüm sıcaklıklarını belirlemektedirler. Titanyum alaşımları, alaşımdaki β dengeleyici elementlerin ağırlıkça oranına göre, alfa (ağırlıkça $\leq 4\%$ β), alfa+beta (ağırlıkça 4~6% β) ve beta (ağırlıkça $\geq 4\%$ β) olarak sınıflandırılmaktadır [31]. Alfa ve beta faz içeriği, alaşıma farklı mekanik performanslar kazandırmaktadır. Alfa içeriği, malzemenin dayanım, korozyona karşı direnci vb. artırırken, beta içeriği ise, sünekliği, tokluğu vb. artırmaktadır [33]. Bu sebeple, mekanik performansı yüksek parçalar elde edimi için, titanyum alaşımlarındaki

elementlerin oranları çok önemlidir.



Şekil 2.5. Titanyum alaşımlarının sıcaklığa göre faz değişimleri ve kafes yapıları [31]

Ti-6Al-4V, ağırlıkça %6 alüminyum ve ağırlıkça %4 vanadyum içeren titanyum alaşımıdır. Oda sıcaklığında çift fazlı $\alpha+\beta$ mikroyapıya sahiptir. Ti-6Al-4V alaşımının faz dönüşümleri, işlem sürecinde yaşanan termal geçmiş ve soğuma hızlarına bağlıdır. Tam erime ve katılaşmayı içeren üretim süreçlerinde, Ti-6Al-4V alaşımında sıvı $\rightarrow \beta \rightarrow (\alpha+\beta)$ veya sıvı $\rightarrow \beta \rightarrow \alpha'$ faz dönüşümleri gerçekleşebilmektedir. Oda sıcaklığında $\alpha+\beta$ mikroyapıda bulunan Ti-6Al-4V alaşımı, ısınma sürecinde; $T_{\beta\text{start}}$ (650°C) sıcaklığına erişen α yapılar β yapısına dönüşmeye başlamaktadır [7]. T_β (995°C) sıcaklığının üstüne çıkıldığı zaman ise tüm mikroyapı β fazına geçmektedir. Soğuma sürecinde ise; T_β sıcaklığına kadar düştüğünde, β 'dan soğuma hızına bağlı olarak farklı faz formları oluşmaya başlamaktadır. Yavaş soğuma hızlarında (<410 °C/s) difüzyon kontrollü α fazı oluşurken, yüksek soğuma hızlarında (>410 °C/s) ise difüzyonsuz martenzit α' fazı oluşmaktadır [34]. Yüksek soğuma hızlarındaki iken sıcaklık T_{ms} (575°C) martenzit başlangıç sıcaklığının altına düşmesi durumunda ise, mikroyapı tamamen martenzit α' fazına dönüşmektedir. α' ve α fazların ikisi de HSP kafes yapılarına sahip olmasına rağmen, α' fazı V ile aşırı doymuş iken α fazı V'den yoksundur. Bu sebeple de, c/a (kafes parametreleri) oranları farklıdır ve bu şekilde bu iki faz ayırt edilebilmektedir [35]. Literatürden alınan Ti-6Al-4V alaşımının sıcaklığa bağlı katı hal dönüşüm bulguları, özet olarak Şekil 2.6'da şema ile gösterilmektedir.



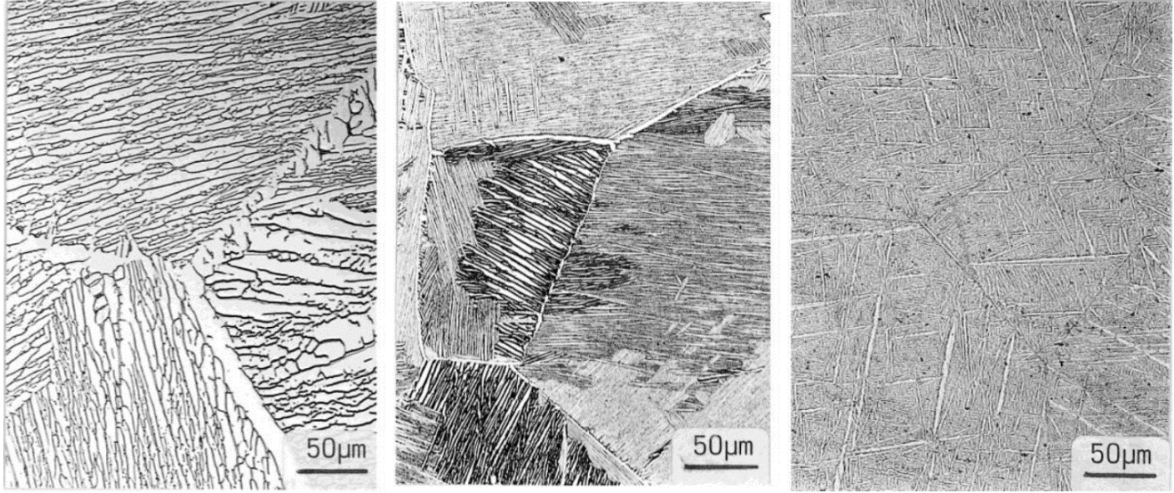
Şekil 2.6. Ti-6Al-4V alaşımının sıcaklığa bağlı katı hal dönüşlerinin şematik gösterimi

2.3.1. Ti-6Al-4V alaşımlarında mikroyapı oluşumları

Çeşitli termomekanik, ısıtma işlemi, soğutma hızı vb. termal süreçler uygulanarak, bu alaşımdan çeşitli mikroyapılar elde edebilmek mümkündür. Termal işlemlerle yüksek sıcaklıklara ulaşan Ti-6Al-4V alaşımında, soğuma hızına bağlı olarak farklı fazlar oluşabilmektedir [7]. Ti alaşımlarının mekanik özelliklerinde mikro dokuların önemli bir rol oynadığı bilinse de, Ti alaşım üretimi sırasında doku gelişiminin anlaşılması konusu hala gizemini korumakta olup, bununla ilgili çalışmalar çok yönlü olarak devam etmektedir.

Lamelli Mikroyapı

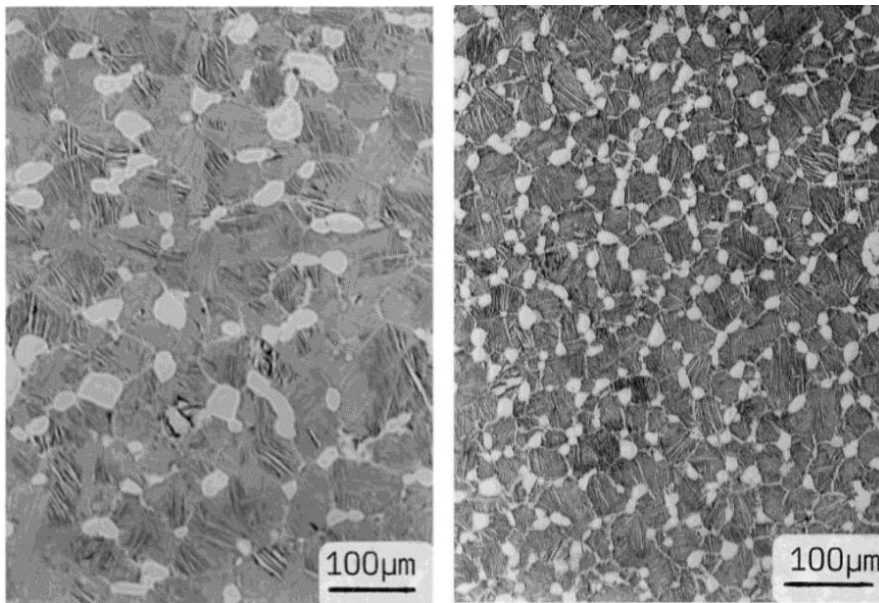
Adını bu mikroyapıda bulunan α fazının Resim 2.3'te gösterildiği gibi lamelli veya çubuk benzeri bir şekle sahip olmasından almaktadır [5]. Fazların en/boy oranı yüksektir. β geçiş sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklardan, $\beta \rightarrow \alpha$ dönüşümüyle β tanelerinden lamelli α paketleri ortaya çıkmaktadır. Orta soğuma hızlarında β tanelerinin içinden vanadyumca zengin α lamelli fazlarının çekirdeklenmesi ve büyümesiyle oluşmaktadır. Soğuma hızlarına bağlı olarak lamelli yapıların en/boy oranları kontrol edilebilmektedir. Bu durum, elde edilen mekanik performansı doğrudan etkilemektedir. Özellikle, en/boy oranının birden farklı olması malzemenin dayanım ve süneklik değerlerini önemli ölçüde etkilemektedir.



Resim 2.3. Ti-6Al-4V alaşımının farklı soğuma hızlarından türetilen lamelli mikroyapıların optik mikroskop görüntüleri [5]

İki Modlu Mikroyapı

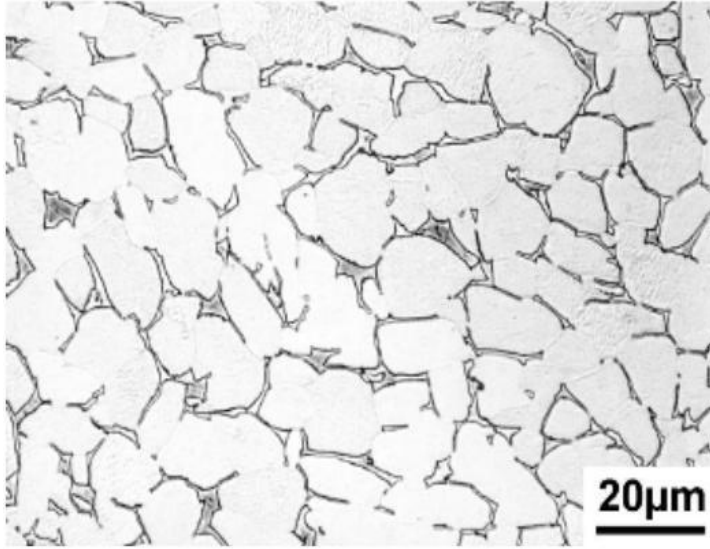
İki modlu (bimodal, dupleks) mikroyapı, lamelli ve eş eksenli yapıların kombinasyonudur (Resim 2.4) [5]. β tane sınırlarının üçlü noktasında yer alan eş eksenli alfa taneleri ile beta taneleri arasında dağılmış lamelli α kolonileri şeklindeki mikroyapılardır. Bu yapıların elde ediniimi, lamelli yapılara benzer olup, farklı olarak, soğuma sürecinin β geçiş sıcaklığının altında başlatılması gerekmektedir. Lamelli yapıya göre dayanımı daha düşük ve sünekliği daha fazladır.



Resim 2.4. Ti-6Al-4V alaşımının iki modlu mikroyapısının optik mikroskop görüntüleri [5]

Eş Eksenli Mikroyapı

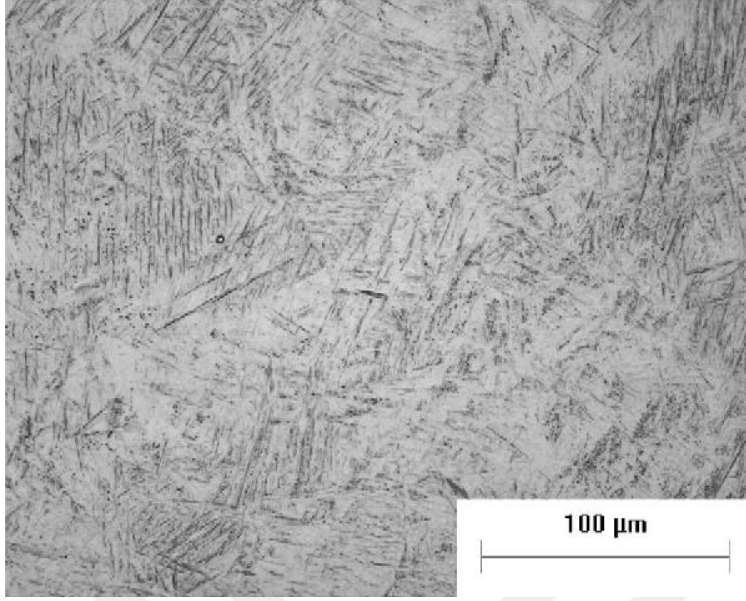
α fazının en/boy oranının birbirine yakın şekle sahip olan yapılardır. β geçiş sıcaklığının biraz altından, β tanelerinin yavaş soğuma hızlarında dönüşmesiyle, ya da α fazının orta sıcaklarda yeniden kristalleşmesi ile elde edilebilmektedir [36]. Ayrıca, uzun süre düşük sıcaklıklarda ısıtılma işlemi tabi tutulmasıyla elde edilmektedir. Eş eksenli mikroyapılar, yüksek süneklik (olası süper plastik deformasyon) ve yorulma çatlakları çekirdeklenmesine karşı direnç ile karakterize edilmektedir. Dayanımı, lamelli yapılara nispeten daha düşüktür [5].



Resim 2.5. Ti-6Al-4V alaşımının eş eksenli mikroyapı optik mikrograf görüntüsü [36]

Martenzit Mikroyapı

Yüksek soğuma hızlarında, β fazı tamamen α' martenzitik faza dönüşmektedir [37]. Bu kararsız yapılar, küçük iğnelere benzer sivri şekillerdir. Bu yapılar, α fazı gibi HSP kafes sistemine sahiptir, ancak α' fazı denge α fazına göre daha yüksek V içeriği göstermektedir [35]. Bu yapılar dayanım olarak yüksek performans gösterirken, süneklik ve tokluk değerleri çok düşüktür.



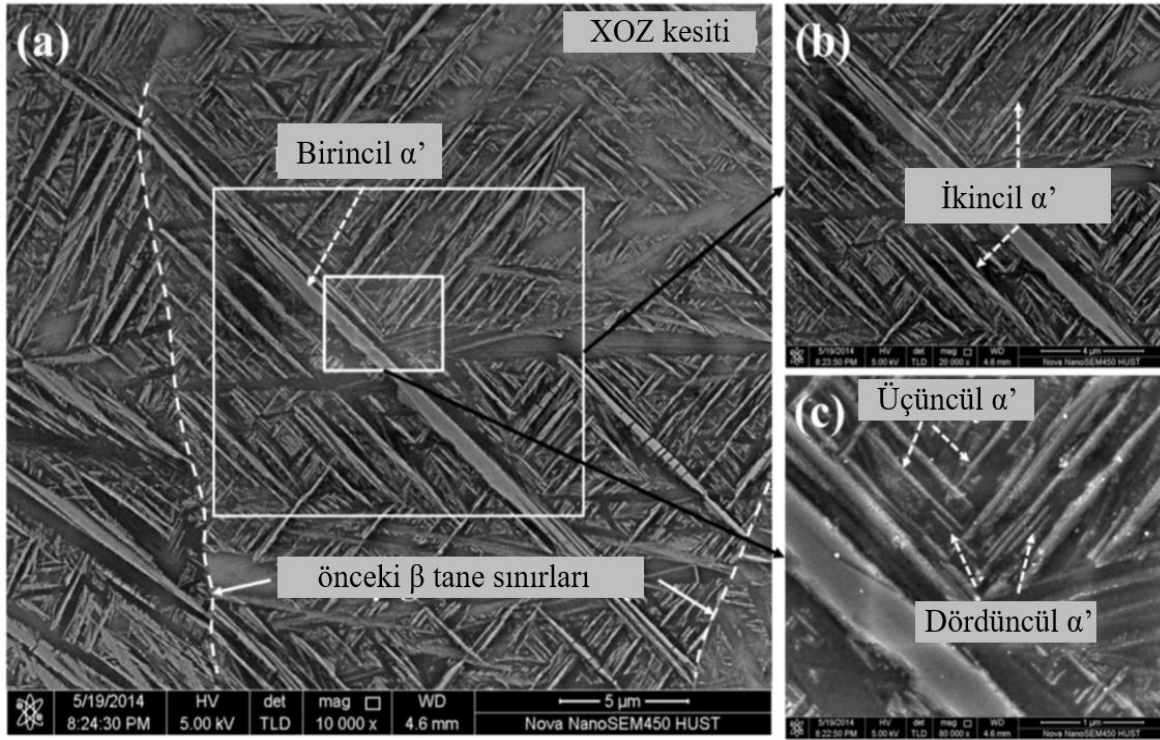
Resim 2.6. Ti-6Al-4V alaşımasının martenzit α' mikroyapı optik görüntüsü [38]

Bu mikroyapılar parçaya farklı mekanik özellikler katmaktadır. Mikroyapıdaki fazların tane büyüklüğü, miktarları, en/boy oranları ve dağılımları da üretilen parçanın mekanik özelliklerini etkileyen bir diğer faktördür [5, 7].

2.4. SLE de Ti-6Al-4V Alaşımasının Mikroyapısı

SLE uygulamalarında parçadan beklenen özelliklere göre çok çeşitli metal ve metal alaşımları (özellikle, alüminyum, titanyum, kobalt ve nikel alaşımları) kullanılmaktadır. Sahip olduğu mekanik özelliklerden dolayı titanyum ve alaşımları bu uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir [39]. Titanyum alaşımları yüksek mekanik performansa sahip olmasına karşın, doğada titanyum elementi az bulunmakta ve alaşımlarının elde edilmesi de yüksek maliyet gerektirmektedir. Bu sebeple, eklemeli imalat yöntemleri, işlem sırasında malzeme israfı yapmaması ve maksimum verimde malzemeyi kullanmasından dolayı da, titanyum ve alaşımlarının kullanılmasında büyük ilgi görmüştür. Özellikle Ti-6Al-4V, mükemmel korozyon direnci, yüksek dayanım, iyi biouyumluluk ve düşük termal genleşme gibi özellikleri olan hafif bir alaşım olmasından dolayı, en önemli mühendislik malzemelerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle de Ti-6Al-4V, en çok araştırılan SLE malzemelerindendir. Ancak, SLE tarafından üretilen Ti-6Al-4V parçalarının mikroyapılarıyla ilgili sınırlamalar bulunmaktadır.

SLE ile üretilen parçalarda katılaşma sırasında hızlı soğumadan dolayı sertlik değeri

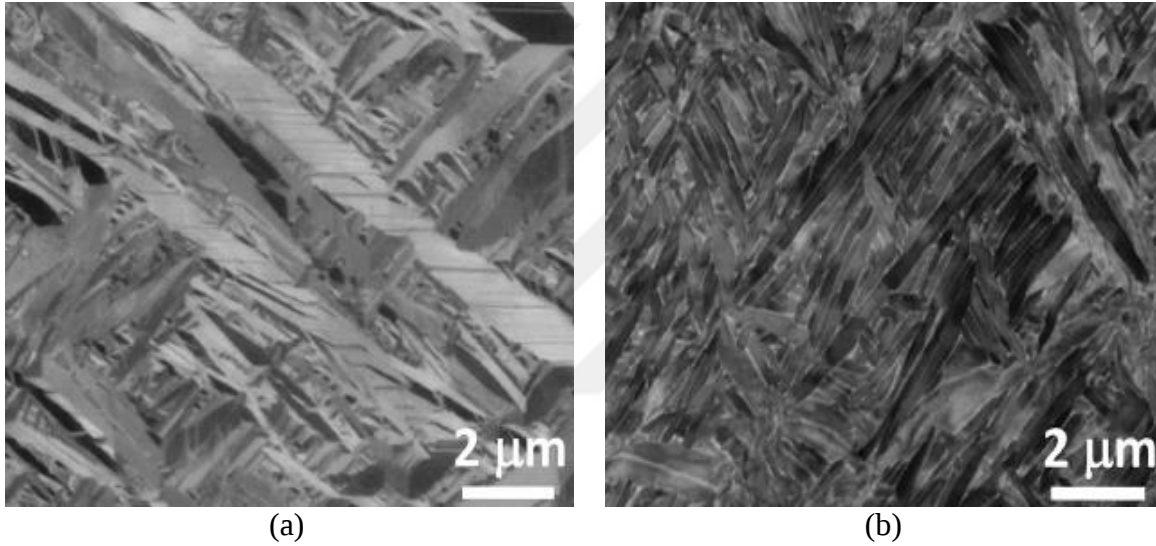


Resim 2.7. SLE ile üretilmiş Ti-6Al-4V kübik numunelerinin XOZ kesitinden SEM görüntüleri; (b) ve (c), (a)'da gösterilen beyaz kutuların büyütme görüntüleri [35]

SLE de ilk katmanın taranmasından sonra, çok yüksek sıcaklık değerlerine ulaşan ergiyik metal tozları, çok yüksek soğuma hızıyla katılarak martenzitik yapıyı oluşturmaktadır. İkinci katmanın serilerek taranmasıyla bu termal döngü tekrar eder ve martenzitik yapı yüksek sıcaklıklara çıkıp soğuma ile tekrar alt sıcaklığa erişir. Üst katmanlar eklenip tarandıkça, alt katmanlar sürekli etkisi kademeli azalan termal döngülere (ısınma-soğuma) maruz kalmaktadır. Bu durum, katmanların mikroyapılarını etkilemektedir. Bu termal döngüler nedeniyle, nihai mikroyapıda hiyerarşik bir biçimde birincil, ikincil, üçüncül ve dördüncül α' martenzit fazlar elde edilmektedir [43]. Nispeten daha kaba olan birincil ve ikincil α' martenzit yapılar, termal döngülerin erken aşamalarında çekirdeklenip büyümekte ve sonraki termal döngüleri takiben büyümeye devam etmektedir. Bununla birlikte, üçüncül ve dördüncül α' martenzit yapılar daha ince incedir. Bunun nedeninin, bu yapıların termal döngülerin sonraki aşamalarında oluşması ve büyümelerinin daha önce çöktürülmüş α' martenzitlerin (birincil, ikincil vb.) sınırları ile sınırlı tutulmasından dolayı olduğu tahmin edilmektedir [35].

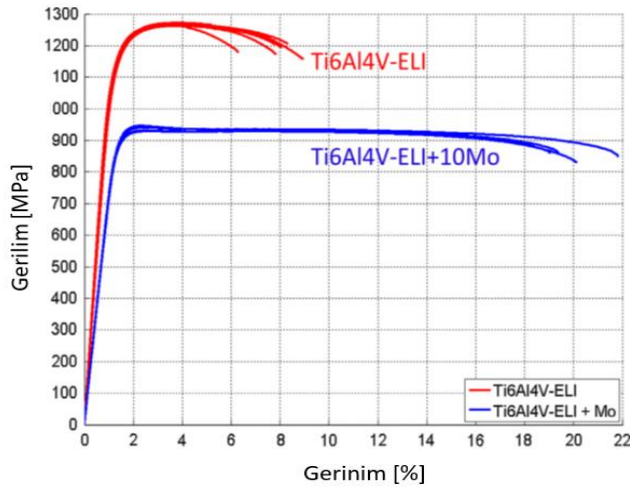
Mikroyapıların mekanik özellikler üzerindeki etkisi oldukça önemlidir. SLE Ti-6Al-4V numunelerinde ince bir şekilde oluşturulmuş α' martenzit mikroyapısının varlığı,

geleneksel olarak üretilen bileşenlere kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti ve yüksek akma gerilimi göstermesini sağlamaktadır [9]. Öte yandan, martenzitin gevrek (kırılgan) yapısından dolayı süneklik, tokluk ve dinamik yük etkisindeki dayanım mekanik özelliklerinde düşük performans göstermesine sebep olmaktadır [40]. Martenzit α' mikroyapıyı farklı denge ($\alpha+\beta$) faz morfolojilerine dönüştürerek, parçanın çekme özellikleri ve özellikle de sünekliği geliştirilebilmektedir [9,10]. Bunun yanında, literatüre ve uygulamalara bakıldığında, yüksek performans elde etmek için, mikroyapının $\alpha+\beta$ fazlı olmasının yanı sıra, fazların oranları, dağılımları, çita en/boy oranları, boyutları, birbirleriyle etkileşimin de önemli olduğu görülmektedir [9].



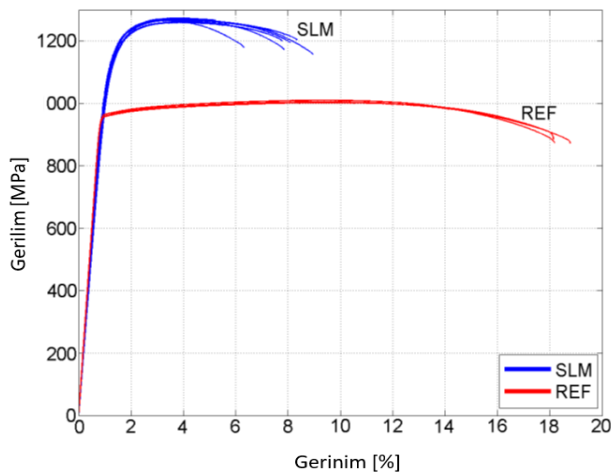
Resim 2.8. Martenzit α' mikroyapısı (a) ve ultrince lamelli ($\alpha+\beta$) mikroyapısı (b) [9]

SLE işlem sonrası parça mikroyapısının martenzit α' faz formu yerine $\alpha+\beta$ (Resim 2.8) ikili faz formunda üretilebilmesi için birkaç alternatif bulunmaktadır. Alternatiflerden bir tanesi; toz malzemesine β geçiş sıcaklığını düşürmek amacıyla β dengeleyici elementler eklenebilmektedir. Bu işlem sonrası oda sıcaklığında parçanın mikroyapısında α fazlarının yanında β fazlarının da yer alması sağlanabilmektedir. Ancak, malzemeye β stabilizer eklemek, parçanın sünekliğini (tokluğunu) artırsa da, malzemedeki yüzdelik α stabilizer miktarı azalttığı için parçanın dayanımını düşürerek, parçanın mekanik performansını olumsuz etkilemektedir [44,45].



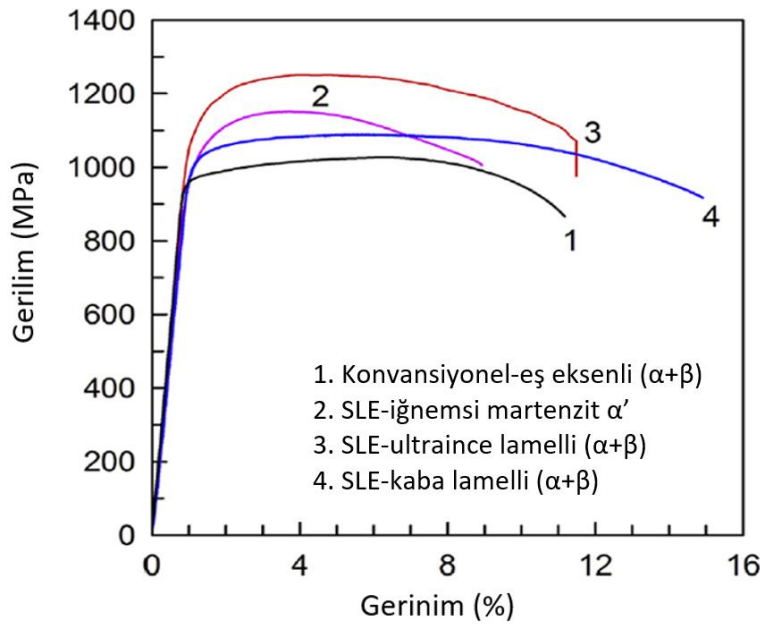
Şekil 2.8. SLE Ti64 ve Ti64+10Mo parçaların gerilim-gerinim eğrisi [45]

Bir diğer alternatif ise; SLE sonrası ısıtma işlem uygulanmasıdır. Isıtma işlem, metal ve alaşımlarının, malzeme özelliklerini ve/veya içyapısını değiştirmek amacıyla, faz diyagramlarına bağlı olarak ergime sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda, belli bir sıcaklık-zaman programı dahilinde uygulanan ısıtma ve soğutma işlemlerin bütünüdür. Isıtma işlem, SLE ile üretilen parçaların sünekliğini artırması için sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak, bu işlemler parçanın sünekliğini iyileştirmesinin yanında, parçanın dayanım performansını negatif yönde etkilemektedir. Ayrıca, ikincil bir işlem olması üretim açısından maliyet ve süre kaybına yol açmaktadır. Isıtma işlem uygulanmış mikroyapılar, uzun süre sabit sıcaklıkta bekletilmekte ve yavaş soğumaya bağlı olarak, kaba $\alpha+\beta$ çita genişlikli mikroyapıya sahip olmaktadır. Bu durum, parçanın süneklik ve tokluk değerlerinde artışa sebep olurken, dayanım performansında düşüşe neden olmaktadır [46,47] (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. SLE (mavi) ve ısıtma işlem uygulanmış SLE in (kırmızı) gerilim-gerinim eğrisi [47]

Alternatif olarak, elektron ışını eritme (EBM) uygulamalarında da, alt tabla sıcaklığının martenzit başlangıç sıcaklığının (M_s) 575°C ($\sim 730\text{--}750^\circ\text{C}$) üzerinde olması sebebiyle martenzit dönüşümü engellenerek, doğrudan üretim sırasında lamelli α/β mikroyapı elde edilmektedir [48]. Fakat bununla birlikte, yüksek sıcaklıklara uzun süre maruz kalmadan ötürü, SLE martenzitik yapıya kıyasla daha düşük mukavemetli kaba lamelli α/β üretilmektedir [49].



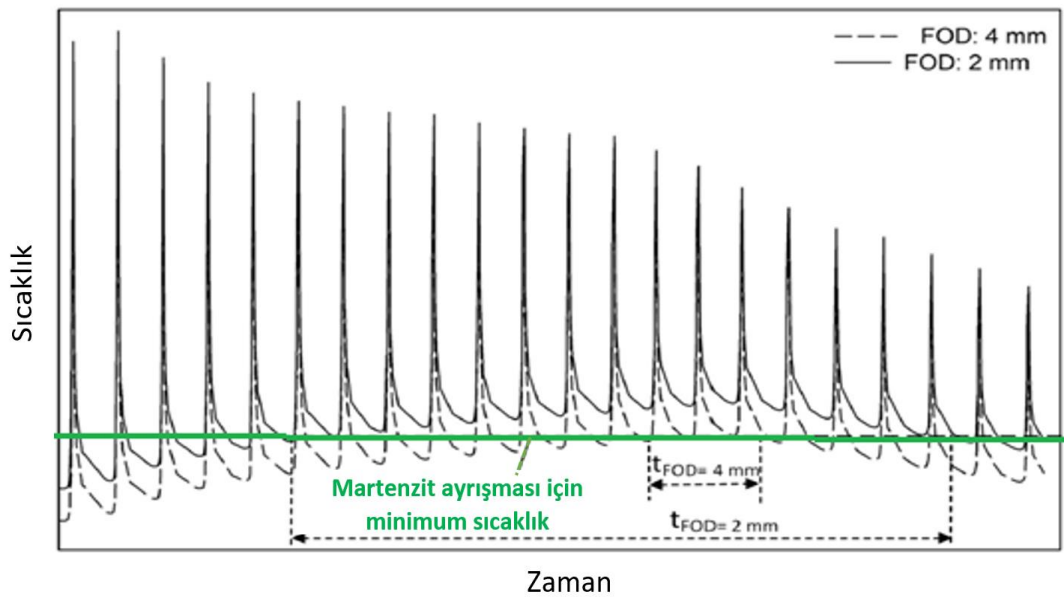
Şekil 2.10. α ve β fazların en/boy oranlarına göre SLE parçaların gerilim-gerinim eğrileri [9]

Son zamanlarda yapılan birkaç yeni çalışmayla, üretim parametrelerin alışagelmış değerlerinden farklı (bindirme mesafesinin $100\ \mu\text{m}$ dan $40\ \mu\text{m}$ lara kadar düşürülmesi [50], odak noktası mesafesinin (OU) artırımı [40], katman kalınlığının artırımı ($\geq 60\ \mu\text{m}$) [9], vb.) optimizasyonları ile martenzit ayrışması oluşumu için özel koşullar yerine getirilerek lamelli α/β mikroyapı dönüşümü başarılabilmektedir. Ayrıca, enerji yoğunluğu, tabla sıcaklığı ve katmanlar arası toz serme süreleri de martenzit ayrışımı için önemli parametrelerdir. Çünkü bu parametreler, katmanlarda biriken ısı miktarını ve soğuma hızlarını doğrudan etkilemektedir.

2.5. Yerinde Martenzit Ayrışma Yaklaşımları

SLE de n'inci katmanın mikroyapısı, önceki katmanın mikroyapısına, mevcut termal

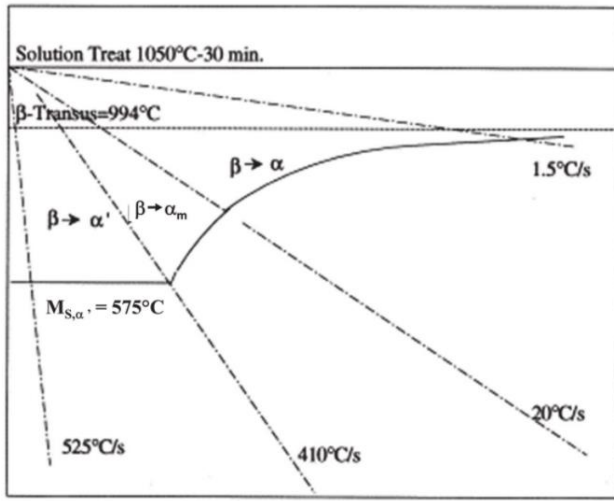
gradyanın maksimum sıcaklığına, kalma süresine ve soğuma hızına bağlı olarak şekillenmektedir. Yani, yeni katmanların birikmesi yeni termal döngüler oluşmakta ve bunun bir sonucu olarak daha önceki biriktirilen katmanlarda ek faz dönüşümlerine sebep olmaktadır. Ayrıca, bu termal döngüler maruz kalan biriken katmanlarda sıcaklık artışına sebep olmaktadır. Bazı literatür çalışmalarında [10, 48], depolanan katman için zamana bağlı sıcaklık değişimine ilişkin tahmin yapılmıştır (basitlik için; bir nokta tüm katmanı temsil etmektedir). Buna göre, her ısınma-soğuma işleminden sonra ilgili katmanın ulaştığı son sıcaklık değerleri olan depolanan sıcaklık değeri (T_{vs}), önce belirli bir değere (T_c) kadar yükselmekte, daha sonra bir süre (Δt) değişmeden devam etmekte ve ardından da kademeli olarak azalmaktadır. Eğer, T_c sıcaklığı Ti-6Al-4V malzemesi için martenzitik ayrışması başlangıç sıcaklığı olan 400°C 'den yüksek olursa ve bu sıcaklığın üzerinde yeterli Δt sürede kalırsa, martenzitik mikroyapıdan α ve β fazlı mikroyapıya dönüşümü sağlayabilmektedir (Şekil 2.11). Buna ilaveten, katmalar eklendikçe ilk katmanda hissedilen üst sıcaklığının da, yüksek soğumadan etkilenmemesi için, bir limit olması gerektiğini belirtilmektedir. Deneysel çalışmalar sonucunda Ti-6Al-4V malzemesi için, ilk katmanda hissedilen üst sıcaklığın da 900°C den fazla olmaması gerektiği de belirtilmekte olup, aksi halde, katmanın yüksek soğumadan etkileneceği ve dönüşümün gerçekleşmeyeceği savunulmaktadır [9].



Şekil 2.11. Birinci katmanda depolanan alt sıcaklık değerlerinin martenzitik ayrışma sıcaklığına erişim süreçlerinin şematik görünümü [10]

Öte yandan, T_{vs} sıcaklık şartının sağlanmasının yanında, martenzit dönüşümü için soğuma

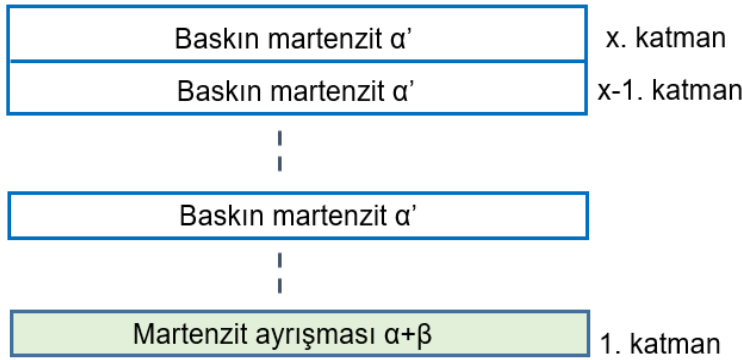
hızının önemi kritiktir. Zira, martenzit mikroyapısının dönüşü (ayrışması) için bu iki şartın sağlanması gerekmektedir. Yüksek sıcaklıklardaki ($\geq T_{\beta}$ sıcaklığı) Ti-6Al-4V alaşımında soğuma hızına bağlı olarak, $\text{sıvı} \rightarrow \beta \rightarrow (\alpha + \beta)$ veya $\text{sıvı} \rightarrow \beta \rightarrow \alpha'$ faz dönüşümleri gerçekleşebilmektedir. Yavaş soğuma hızlarında ($< 410^\circ\text{C/s}$), yani difüzyon kontrollü süreçle α fazı oluşurken, yüksek soğuma hızlarında ($> 410^\circ\text{C/s}$) ise difüzyonsuz süreç ile martenzit α' fazı oluşmaktadır (Şekil 2.6). Yüksek soğuma hızlarındaki iken sıcaklık T_{ms} (575°C) martenzit başlangıç sıcaklığının altına düşmesi durumunda ise, mikroyapı tamamen martenzit α' fazına dönüşmektedir.



Şekil 2.12. Ti-6Al-4V için soğuma hızına bağlı faz dönüşümleri [1]

SLE de, bir katmanın taranmasıyla katman anlık olarak çok yüksek sıcaklıklara çıkmakta ve tarama sonrası katman sıcaklığı ani bir düşüşle (10^4 - 10^6°C/s) ortam sıcaklığına inmektedir [9]. Bu sebeple de, katılaşma sürecinde difüzyon kontrollü bir soğuma mümkün olmamaktadır. Böylelikle de, taranan her katman martenzit mikroyapıya sahip olmaktadır. Bunun önüne geçmek, yani difüzyon kontrollü soğumayı yakalamak için iki yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan ilki, üst katman eklendikçe, ardışık katmanların alt katmanları maruz bıraktığı kademeli azalan termal döngülerin neden olduğu difüzyon kontrollü soğuma biçimidir. Çünkü üst katmanların uzaklaştıkça alt katmanlara olan ısı etkisi azalmaktadır. Ayrıca, alt katmanlarda üst katmanların taranması ile sıcaklık birikmesi de yaşanmaktadır. Bu durum, alt katmanların soğuma hızını düşürmektedir. Böylelikle, alt katmanın soğuma hızının kritik soğuma hızının (410°C/s [34]) altına düştüğü vakit, ayrıca o katmanın sıcaklığı ayrışma kritik sıcaklığının üzerinde olduğu takdirde martenzit dönüşümü mümkün kılınarak, ayrışma başlayabilmektedir. Literatürde deneysel

çalışmalarla, martenzit ayrışması için gereken şartlar yerine getirilerek $\alpha+\beta$ mikroyapı elde edilmiş parçalara bakıldığında, parçanın üst kısmında martenzit mikroyapıya rastlanıldığı belirtilmektedir. Bunun nedeni, üst katmanların kritik sıcaklığı sağlamasına karşın, bu üst katmanların üzerine kritik soğuma hızının altına inecek kadar termal döngülere maruz kalamamasıdır. Bu tezde de, bu yaklaşım esas alınarak, martenzit ayrışmasının değerlendirilmesi yapılmıştır.



Şekil 2.13. X katmanın ardından birinci katmanın martenzit α' dan $\alpha+\beta$ 'ye dönüşümü

Diğer bir yaklaşım ise, katman içinde iki şartın sağlayabilmektir. Bunun için lazer tekrar ısıtma (ergitme) süreci uygulanabilmektedir. Bu sürecin de kendi içerisinde iki seçeneği bulunmaktadır; biri komşu taramaları arasındaki bindirme mesafesini çok kısa tutmaktır (100 μm dan 40 μm lara kadar[50]). Böylelikle, yeniden ısıtma ve yeniden eritme etkisi göstererek ardışık ergiyik havuzlarının üst üste binme mesafesini arttırılmaktadır. Ancak, çok küçük bindirme mesafesi, lazer enerjisinin çok konsantre olmasına ve gözenek oluşumuna neden olan ve numunelerin yoğunluğunu negatif etkileyen aşırı ısınmaya neden olabilmektedir [51]. Ayrıca, bindirme mesafesi enerji yoğunluğunu doğrudan etkilediği için ($E=P/v.h.t$), çok yüksek enerji yoğunluğu, anahtar deliği rejimi boşluklarına neden olabilir ve lazer tarama izlerini düzensiz hale de getirebilmektedir. Bu nedenle de, enerji yoğunluğunun uygun bir aralıkta kontrol altında tutulması ve aşırı enerji girişinden kaçınılması, nihai parçaların performansı için önem arz etmektedir. Öte yandan, bindirme mesafesinin azaltılması, üretim süresinin artmasına ve ekstra enerji ihtiyacına neden olacağından tercih de edilmeyebilmektedir. Diğer seçenek ise, taranan katmanın üst katman serilmeden önce tekrar tekrar taranmasıdır. Bu seçenekle, katmanın istenen sıcaklığa ve soğuma hızına erişebilmesi için, lazer enerji yoğunluğu kademeli olarak kontrollü düşürülerek katmanın tekrar tekrar taranması gerekmektedir. Bununla birlikte, katmanların üst katmanın taranması sonucu oluşan termal döngülerden etkilenmemesi için

de, bu işlemin düşük enerji yoğunluklarında yapılması gerekebilmektedir. Bu sebeple de, kritik sıcaklık şartının sağlanabilmesi için de yüksek tabla sıcaklıklarında (ön ısıtma) üretime ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, tekrar taramalardan dolayı, parça üretim süresinin artması ve ilaveten enerjiye ihtiyaç duyulması, bu seçeneği tercih edilmemesine neden olabilmektedir.

2.5.1. Martenzit ayrışmasına parametrelerin etkisi

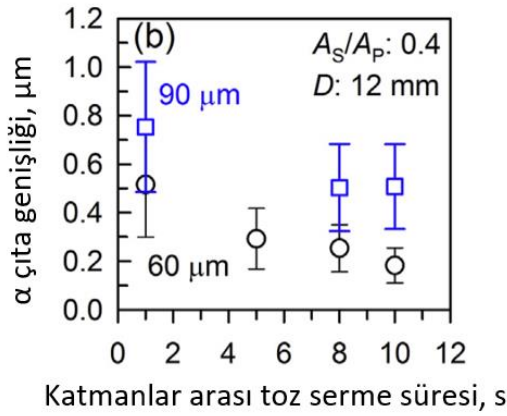
SLE de martenzit ayrışması için üretim parametreleri ve bu parametrelerin doğru kombinasyonu oldukça önemlidir. Literatürde, SLE üretim parametrelerin optimizasyonu ile, martenzitik bir yapıdan ultra ince katmanlı bir $\alpha+\beta$ yapısına dönüşmeyi başarılmış çalışmalar bulunmaktadır [9, 50]. Bunlardan birisi, özellikle odak uzaklığı (OU) mesafesi parametresinin optimize edilmesiyle martenzit ayrışması elde edebilen deneysel çalışmadır. Birim alan başına toza iletilen enerji miktarını kontrol eden OU mesafesi değiştirilerek optimize edilmiştir. Sadece, OU mesafesi değiştirilerek farklı mikroyapılar elde edebileceği gösterilmektedir. OU parametresinin martenzit ayrışması için önemli olduğu vurgulanırken, tek başına ayrışmayı sağlayamadığı, diğer parametrelerle uygun kombinasyonu sonucu dönüşümün gerçekleştirilebileceği bildirilmiştir [40].

Bindirme mesafesinin azaltılması da (100 μm dan 40 μm lara kadar düşürülmesi) martenzit ayrışmayı destekleyici hamlelerden birisidir [50]. Bununla birlikte, küçük bindirme mesafesi, üretim süresini büyük ölçüde artırmakta, ayrıca aşırı yeniden erimeye ve parça içinde boşlukların artma riskine yol açmaktadır. Ayrıca, bununla ilgili literatürde kısıtlı bilgiler bulunmakta ve parça mukavemeti ve sünekliği üzerindeki etkileri de net değildir.

Martenzit ayrışması için, en belirleyici parametrelerden birisi de enerji yoğunluğudur. Katmanlar arası füzyonu ve minimum ayrışma sıcaklığı kriterini sağlayabilmek adına enerji yoğunluğunun yüksek tutulması önemlidir. Ancak, enerji yoğunluğu yükseltirken ergiyik havuzun anahtar deliği rejimine geçmemesine dikkat edilmelidir [52].

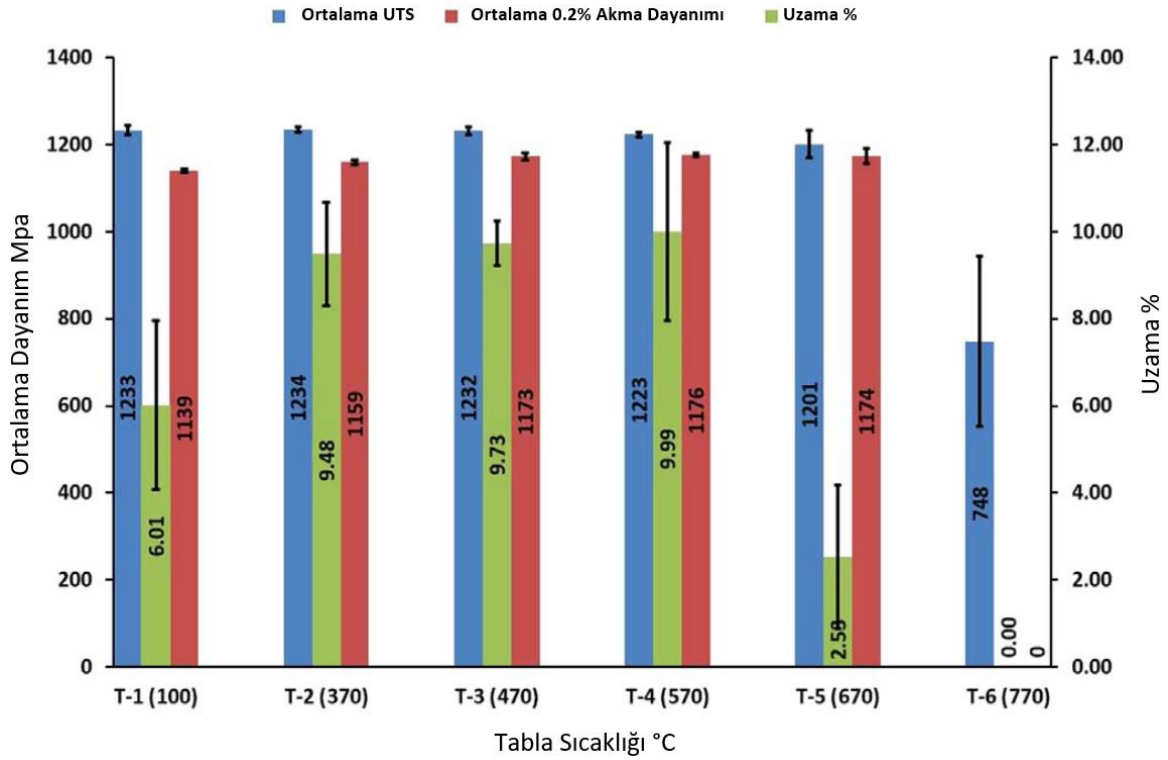
Tek başına yeterli olmasa da katman kalınlığının da martenzit ayrışmasında belirleyici etkileri bulunmaktadır. Çünkü katman kalınlığının, tekrarlanan termal döngüler ile soğuma hızları üzerinde etkileri bulunmaktadır. Katman kalınlığı arttıkça, katmanların soğuma hızı azalmaktadır. Bu durum, kritik soğuma hızının altına düşmesine yardımcı olmakta ve

martenzit ayrışmasını kolaylaştırmaktadır. Katman kalınlığının yüksek olması, lamelli ($\alpha + \beta$) mikroyapılarda düşük olanlara nispeten daha kaba çita genişlikli faz yapılarına neden olmaktadır [9]. Ancak, katman kalınlığının da limitleri bulunmaktadır. Çünkü katman kalınlığının yüksek olması, katmanı eritmek ve alt katmanlarla füzyon problemi yaşanmaması için daha yüksek enerji ihtiyacına sebebiyet vermektedir. Ayrıca, katman kalınlığı yüksek parçalarda, porozite riski artabilmektedir.



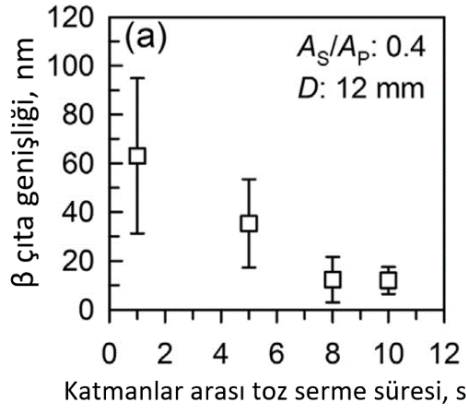
Şekil 2.14. 60 μm ve 90 μm katman kalınlıklarında α çita genişlikleri [9]

Tabla sıcaklığının arttırılması, SLE işlemi sırasında soğuma hızının kontrol edilmesine ve termal gradyanların azaltılmasına yardımcı olabilmektedir. Tabla sıcaklığı, ayrışma için minimum ayrışma sıcaklığı kriterini sağlayabilmek adına oldukça önemli bir parametredir. Literatürde, değişken tabla sıcaklıkları kullanarak başka bir martenzit ayrıştırma yöntemi geliştirilmiştir. Değişken tabla sıcaklıkları en yüksek (770°C) ve en düşük (100°C) karşılaştırıldığına, farklı mikroyapıları gözlemlenmiştir. Tüm sıcaklık aralığında önceki β taneciklerinin mevcut olmakla birlikte, bu β tanelerinin içinde sıcaklık artmasıyla martenzit mikroyapının ayrışmaya başladığı görülmüştür. 570°C tabla sıcaklığında tam martenzit ayrışması gözlemlenmiş, bu sıcaklıkta, tane sınırı β olan α kolonileri içeren $\alpha + \beta$ yapısı tespit edilmiştir. Ayrıca, tabla sıcaklığı arttıkça daha kaba $\alpha + \beta$ mikroyapılar elde edilmiştir [53]. Martenzit yapıdan $\alpha + \beta$ mikroyapıya geçmesiyle, β fazının artması sonucunda da süneklik artmaktadır. Lamelli $\alpha + \beta$ mikroyapılarda da, çita kalınlıklarının artmasıyla (kabalaşmasıyla) süneklik daha da artarken, dayanımda nispeten düşüş yaşanabilmektedir [9]. Sonuç olarak, artan tabla sıcaklığının martenzit ayrışmasına pozitif yönde etkileri bulunmaktadır.



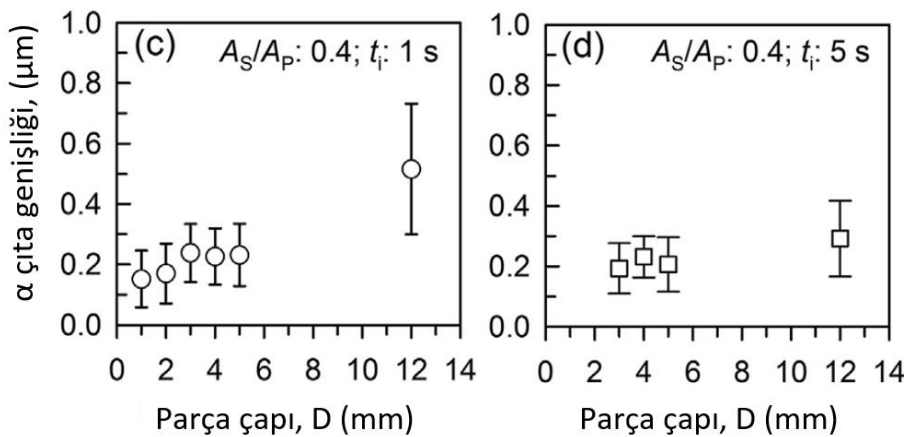
Şekil 2.15. Tabla sıcaklıklarına göre dayanım-uzama değerleri [53]

Katmanlı biriktirme yaklaşımında, martenzit ayrışması için en önemli parametrelerden birisi de katmanlar arası toz serme süresidir. Çünkü bu süreçte, katman soğumaya devam etmektedir. Martenzit ayrışmasındaki esaslardan biri de, katmanlarda ısı birikimini sağlayarak, katman sıcaklığını arttırmaktır (Şekil 2.1). Böylelikle, katman sıcaklığı minimum martenzit ayrışma sıcaklığının üzerine çıkartılabilir ve bir süre bu sıcaklığın üzerinde tutulabilmektedir. Soğuma hızı kriteri de sağlandığı takdirde bu süreç boyunca martenzit ayrışması devam edebilmektedir. Bu sebeple de, katmanlar arası toz serme süresi ne kadar kısa tutulabilirse, martenzit ayrışma olasılığı da o kadar artmaktadır. Çeşitli toz serme sürelerinde, martenzit dönüşümü ile elde edilen lamelli $\alpha+\beta$ mikroyapılar karşılaştırıldığında, toz serme süreleri uzadıkça β fazın çıta genişliklerinde azalmalar tespit edilmiştir (Şekil 2.16.) [9]. Bu durum, toz serme süresinin artmasının martenzit ayrışma olasılığını düşürdüğünü göstermektedir. Diğer yandan, SLE makinelerin toz serme sisteminin geliştirilerek, serme süresinin azaltılması, parça üretimini de hızlandıracaktır. Günümüzde ticari makinelara bakıldığında, SLE makinelerin çoğunda, toz serme sistemlerinin geliştirilmeye ihtiyaç duyulduğu tespit edilmektedir. Çünkü bu makinelerde toz serme süresi yaklaşık 10-13 saniyelerinde tutulmaktadır. Bu durum, martenzit ayrışma olayını olumsuz yönde etkilemektedir.



Şekil 2.16. Katmanlar arası toz serme süresine göre β çita genişlikleri [9]

Parça büyüklüğünün de, SLE sürecinde yaşanan ısı transfer olaylarına ve soğuma hızına etkileri bulunmaktadır. Bu sebeple de, mikroyapı ve mekanik özellikleri de doğrudan etkilemektedir. Katmanda taranan alanın büyümesi, tarama izi sayısını artırmakta ve böylelikle katmana giren enerji artmaktadır. Bu durum, katmanda depolanan ısı miktarını artırarak, sıcaklığı artırmaktadır. Ayrıca, büyük kütlelerin soğuma hızları da yavaşlamaktadır. Bu iki durum, martenzit ayrışmayı desteklemektedir. Fakat parça büyüklüğünü arttırmak, parçanın merkezi ve kenarları arasındaki sıcaklık farkının da artmasına sebep olmaktadır. Böylelikle, parça içindeki mikroyapı dağılımının homojenliğini engelleyebilmektedir. Bu da, parça kalitesini etkileyebilmektedir. Bu sebeple, parça boyutlarının belirlenmesinde limitlere dikkat edilmesi önem arz edebilmektedir. Literatürde bir çalışmada, taranan alanın büyüklüğü ile faz kalınlıklarına olan etkileri gösterilmiştir (Şekil 2.17). Parça çapının büyütülmesi, daha kaba lamelli $\alpha+\beta$ mikroyapı elde edilmesine neden olduğu tespit edilmiştir [9].



Şekil 2.17. Katmanlar arası toz serme süresine göre β çita genişlikleri [9]

SLE sürecinde, işlem parametrelerinin ve parametre kombinasyonlarının üretilen parçanın mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisini incelemek, parçanın optimizasyonunu yapmak için deneysel çalışmalar etkili bir yöntem olsa da maliyet ve zaman açısından sorunlara yol açabilmektedir. Sıcaklık gradyan mekanizması, ergiyik havuz bölgesini ve stabilitesini kontrol ederek nihai mikroyapı ve mekanik özelliklerini doğrudan etkilediği için SLE için kritik öneme sahiptir. Sıcaklık gradyanı doğru bir şekilde ölçülebilir ve kontrol edilebilirse, üretilen parçaların bütünlüğü ve işlevselliği önemli ölçüde geliştirilebilmektedir. Ancak, sıcaklık gradyan boyutlarının çok küçük ve geçici olması sebebiyle ölçülmesi çok zordur. Bu sebeple, süreç mekanizmasına ilişkin bilgi edinmek için sonlu elemanlar yöntemine bağlı bir simülasyon kullanımına gerek duyulmaktadır. Böylelikle, geliştirilen sonlu elemanlar modeli ile temel sıcaklık gradyan mekanizmasını görülerek, sistemde yaşanan termodinamik olaylar çözümlenebilmektedir [11,14].

Deneme yanılma yöntemleri yerine kullanabilen simülasyon çalışmaları, zaman ve maliyet kaybını en aza indirebildiği için akademi ve sektör camiası tarafından büyük ilgi görmektedir. Seçici lazer eritme (SLE), günümüzde mevcut teknikleri kullanarak fiziksel parametrelerin ölçülmesini güç, hatta bazıları imkansız olan birden fazla termo-mekanik olayları içeren karmaşık bir süreçtir. Böyle bir durumda simülasyon, sürecin ayrıntılarını daha iyi anlamayı sağlayacak bir yöntemdir. Bu aşamada, modelleme için tercih edilen sonlu elemanlar yazılımı da büyük önem arz etmektedir. Günümüzde, birçok sonlu elemanlar yazılımları (Comsol, Ansys, Flow-3D vb.) bulunmaktadır. Bu sebeple, çalışmalarda amaca ve ihtiyacı en kolay ve en çok karşılayan yazılımı belirlenmesi, sürecin modellenmesi safhasında önemlidir. COMSOL Multiphysics sonlu elemanlar yazılımı, mühendislik, üretim ve bilimsel araştırmaların birçok alanlarında tasarımları, cihazları ve süreçleri simüle etmek için kullanılmaktadır. Geometri, malzeme özellikleri ve fiziksel olayların tanımlanması gibi modelleme iş akışındaki tüm adımları içeren bu yazılım, doğru ve hassas sonuçlar elde edinceye kadar da çözümlemeye devam etmektedir [54]. Ayrıca, birçok fiziksel olayı aynı anda simüle etmeyi sağlayan bu yazılım hareketli ısı kaynağı, malzeme etkileşimi, birden fazla fiziksel olayı içeren çalışmalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Bu nedenle, bu tezdeki tüm nümerik çalışmalar bu yazılım kullanılarak yapılmıştır.

Diğer yandan, karmaşık süreçlerde simülasyon ihtiyacı duyulsa da, güvenilir ve sağlam bir model elde etmek de bir o kadar zorlaşmaktadır. Bir modele birçok termo-mekanik

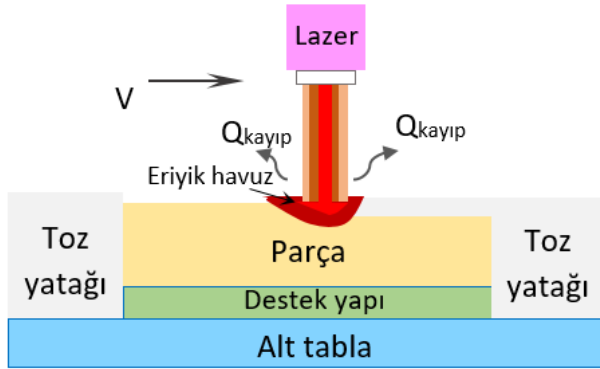
olgunun dahil edilmesi, gerçeğine uygunluğu artırırken, sayısal hesaplama maliyeti yüksek performanslı bilgisayarların bile hesaplayamadığı bir noktaya geçebilmektedir. Özellikle, çoklu katmanlı modellemelerde hesap maliyetleri katlanarak artmaktadır. Bu kapsamda, son derece karmaşık ve zaman alıcı lazer tozu yatağı süreçleri için doğru ve tahmine dayalı modellere ihtiyaç duyulmaktadır.

Martenzit ayrışması alanında literatürde sadece deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda genel olarak deneme-yanılma yöntemiyle martenzit ayrışma gerçekleşmiş parametre setleri belirlenmiş ve bu parametrelerle üretilen parçaların mikroyapı-mekanik özellikleri incelenmiştir. Martenzit ayrışması ve oluşum koşullarına termo-fiziksel olarak yaklaşılma, bu alanda nümerik bir çalışma yapılmamıştır. Halbuki, martenzit ayrışım koşulları lokal sıcaklık ve soğuma hızlarına bağlı olduğu için, bu koşulların deneysel olarak belirlenmesi çok zordur. Bu nedenle, son derece karmaşık ve zaman alıcı lazer tozu yatağı süreçlerinde, martenzit ayrışımının nasıl gerçekleştiğini, koşulların nasıl oluştuğunu açıklayabilmek için doğru ve tahmine dayalı modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda, literatürde herhangi bir nümerik çalışma bulunmamaktadır. Ayrıca, literatürde çoklu tarama-çoklu katmanlı modeller sınırlı sayıda olup, bu modellerin termo-fiziksel olarak gerçekliği arttırıcı eylemlerle (parametrelere bağlı emilim katsayısının kullanılması, histerisiz malzeme davranışının tanımlanması, çoklu katmanlar için; yeterli tarama izinin modellenmesi, katmanlar arası toz serme süresinin göz önünde bulundurulması, etkin katman kalınlıklarının kullanılması vb.) geliştirilmesine de ihtiyaç duyulmaktadır.

3. MATEMATİKSEL MODELLEME

3.1. SLE Yönteminde Fiziksel Süreç

Termal simülasyon, SLE üretimi sırasında ergiyik havuzunun boyutunu ve termal profilleri tahmin etmek için iyi bir şekilde kurulmuş etkili bir yaklaşımdır. SLE, optik, ısı transferi, malzeme bilimi ve mekaniği vb. fiziksel olayları içeren komplike bir termo-fiziksel süreçtir. SLE, koruyucu gaz ortamında tabaka halinde yayılan metal tozların yüksek enerjili lazer ışını ile taranması, tozların birbirleri ve alt tabaka ile kaynaşması, daha sonra alt tablanın bir tabaka aşağı indirilerek işlemin tekrarlanması işlemidir (Resim 3.1). Her bir katmanın taranmasıyla, lazerden çıkan enerjinin büyük bir kısmı toz yatak tarafından emilip alt tablaya iletilirken, geri kalan kısmı konveksiyon, radyasyon vb. termal olaylarla kaybolmaktadır. Ayrıca bu süreç, metal tozlarının birbiriyle sinterlenmesi ve erimesi (faz ve şekil değişimi), kaldırma kuvveti ve yüzey gerilimi gradyanı ile indüklenen sıvı metal hareketi, yüksek buharlaşma ve bunun sonucunda oluşan geri tepme basıncı, dalgalanmalar ve sıvı metal yüzeyindeki bozulmalar, kimyasal reaksiyonları vb. fiziksel olaylarını da içermektedir [55].



Resim 3.1. Toz yatağında ısı transferinin şematik gösterimi

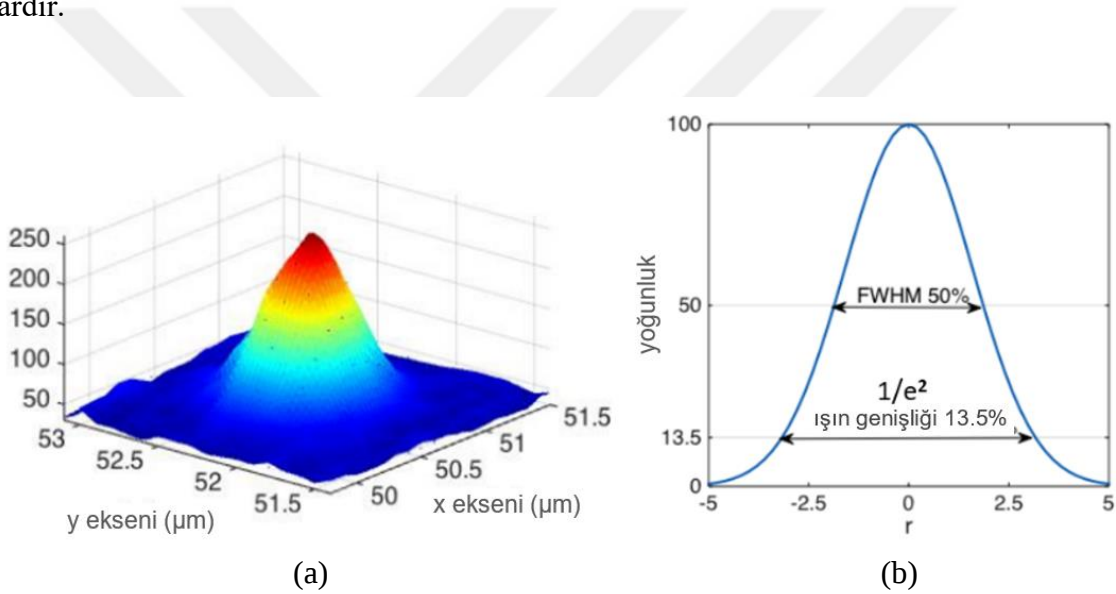
SLE nin ısı transferi genel denklemi [4]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (3.1)$$

Burada, ρ malzeme yoğunluğu (kg/m^3), c malzeme ısı kapasitesi katsayısı (J/kgK), T sıcaklık, t etkileşim zamanı, k ısı iletkenlik katsayısı (W/mK) ve Q (W/m^3) ise hacimsel ısı üretimidir.

3.1.1. Isı kaynağı modellemesi

SLE işleminde; katman halinde serilen metal tozlarının üzerine hareketli ısı kaynağı olarak lazer uygulanmaktadır. Hareketli lazer ışını, gerçeğe en yakın olarak Gauss enerji dağılımı profili olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3.1). Gauss dağılımlı ısı akışının, lazer ışın gücünün merkezde maksimum, merkezden uzaklaştıkça kademeli olarak gücü azalan bir yapısı vardır.



Şekil 3.1. Gauss dağılımı (a) ve ışın genişliği ifadeleri (b)

Isı kaynağı için, yaygın olarak tercih edilen $1/e^2$ ışın genişliği ifadesi kullanılmıştır. Burada e değeri euler sayısı (2.718...) olup, $1/e^2$ ifadesi maksimum yoğunluk değerinin 0.135 katında olan marjinal dağılımdaki iki nokta arasındaki mesafeyi göstermektedir.

Yoğunluk profili aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$I(r_0) = I_0 \exp\left(-\frac{2(r_0^2)}{r^2}\right) \quad (3.2)$$

Burada, r teorik ışın genişliği yarıçapı ve $r_0=r$ deki yoğunluk maksimum değeri $1/e^2$ katına tekabül etmektedir;

$$I(r)=I_0 \exp(-2) \quad (3.3)$$

Böylelikle, gauss ısı kaynağı aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

$$q = \frac{2\tau P}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{2(x^2+y^2)}{r^2}\right) \quad (3.4)$$

Burada, q , τ , P , r ve x - y terimleri sırasıyla, ısı akısı, emilim katsayısı, lazer gücü, lazer yarıçapı ve lazerin merkeze olan mesafesini göstermektedir.

3.1.2. İlk şart ve sınır şartları

İlk Şart

SLE de; işlem öncesi üretim ortamına ön ısıtma verilmekte olup, sabit bir ortam sıcaklığında da işleme devam edilmektedir. Bu nedenle, modellemede $t = 0$ 'da ilk şart sıcaklığı tanımlanmıştır.

$$T(x,y,z,t)|_{t=0} = T_0 \quad (3.5)$$

Sınır Şartları

İşlem boyunca toz yatağındaki ısı kayıpları, termal iletim, termal konveksiyon ve termal radyasyon kayıpları ile yaşanmaktadır. Bu ısı kayıpları, sınır şartları altında tanımlanmaktadır.

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} + h(T - T_0) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4) = Q \quad (3.6)$$

Burada; ε termal radyasyon katsayısı, h konveksiyon ısı transfer katsayısı, σ ise Stefan-Boltzmann sabiti ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$) dir.

Modelde, toz yatağının üst yüzeyine termal konveksiyon ve termal radyasyon tanımlanmıştır. Ayrıca, toz yatağı ve destek yapının yan yüzeyleri ve alt tablanın boşta

Çizelge 3.1. (devamı) Ti-6Al-4V için malzeme özellikleri

Sıvı özgül ısı kapasitesi c_{pl} (J/kgK)	831 [59]
Katı ısı iletim katsayısı k_s (W/mK)	$1,25+0,015T$; $T \leq 1268$ $3,15+0,012T$; $1268 < T \leq 1923$ [58]
Sıvı ısı iletim katsayısı k_l (W/mK)	$-12,75+0,024T$; $T > 1923$ [58]
Toz ısı iletim katsayısı k_p (W/mK)	$0,0014T+0,2204$; $T < 1923$ [60]
Yoğunluk ρ (kg/m ³)	4200 [59]
Özgül ısı L (kJ/kg)	286 [59]
Emisyon katsayısı ε	$0,6$; $T \leq 1500$ $0,4$; $T > 1500$ [61]
Konvansiyonel ısı iletim katsayısı h_c	10 W/m ² K

3.1.4. Parametre kombinasyonları

Bu modellemede, martenzit ayrıştırma yoluyla, α' martenzit mikroyapı yerine lamelli ($\alpha+\beta$) mikroyapılı parça üretmeyi başaran deneysel çalışmaların [9,34] parametre kombinasyonları ele alınmıştır (Çizelge 3.2). Bu parametre setleri, yüksek güçte lazer kullanılırken, defokus yöntemiyle lazerin toz yatak üzerindeki etki alanı büyük tutulmuştur. İki parametre setinin katman kalınlıkları alışlagelmişden daha yüksek olup, hızları ayarlanarak, enerji yoğunlukları sabit tutulmuştur. Ayrışma için önemli etkenlerden biri olan tabla sıcaklığı da yüksek seçilmiş olup, iki parametre seti için 200 °C alınmıştır.

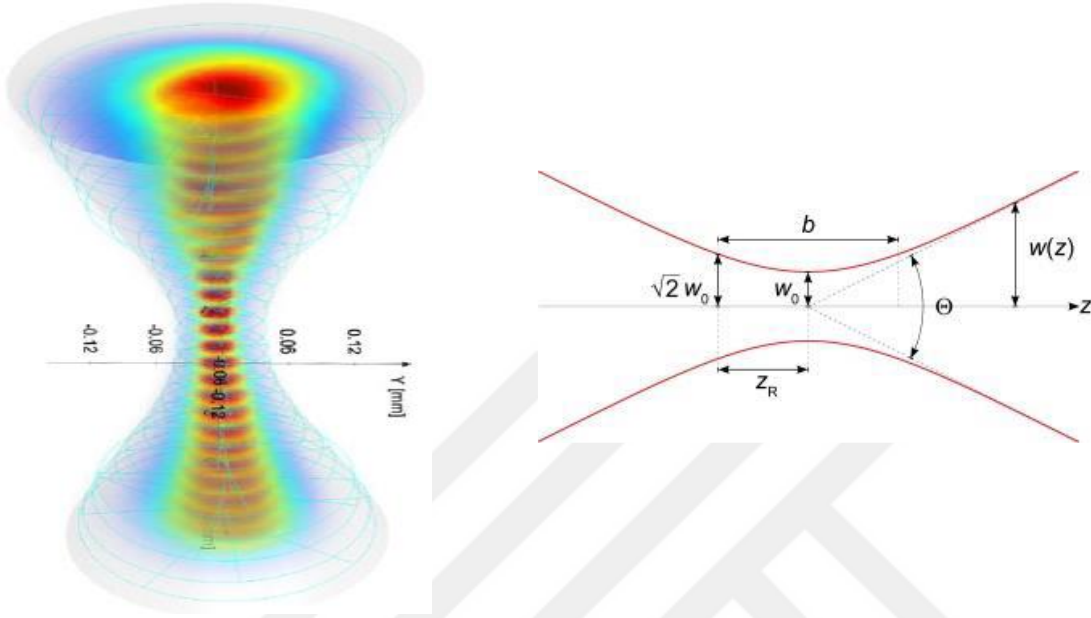
Çizelge 3.2. Sayısal modellemede kullanılan parametre kombinasyonları [9, 34]

	Güç W	Hız mm/s	Katman kalınlığı μm	OU mm	Lazer yarıçapı μm	Bindirme mesafesi μm	Ortam sıcaklığı, ön ısıtma °C	Enerji yoğunluğu J/mm ³
S1	375	1029	60	2	89	120	200	50,62
S2	375	686	90	2	89	120	200	50,62

3.1.5. Odak uzaklığına (OU) göre lazer çapının hesaplanması

Lazer, lazer kolonundan çıktıktan sonra ayna ve merceklerin etkisiyle odak mesafesi uzaklığında, odak noktası oluşur. Bu noktada lazerin çapı en küçük gücü ise

maksimumdur. Bu noktadan sonra lazerin çapı tekrar büyüyerek, birim kare düşen gücü ise azalmaktadır. İşte söz konusu odak noktasından malzeme yüzeyine olan mesafeye odak uzaklığı denilmektedir [41].



Şekil 3.3. Lazerin gauss profilinin odak noktasını şeması ve odak noktası parametreleri [22]

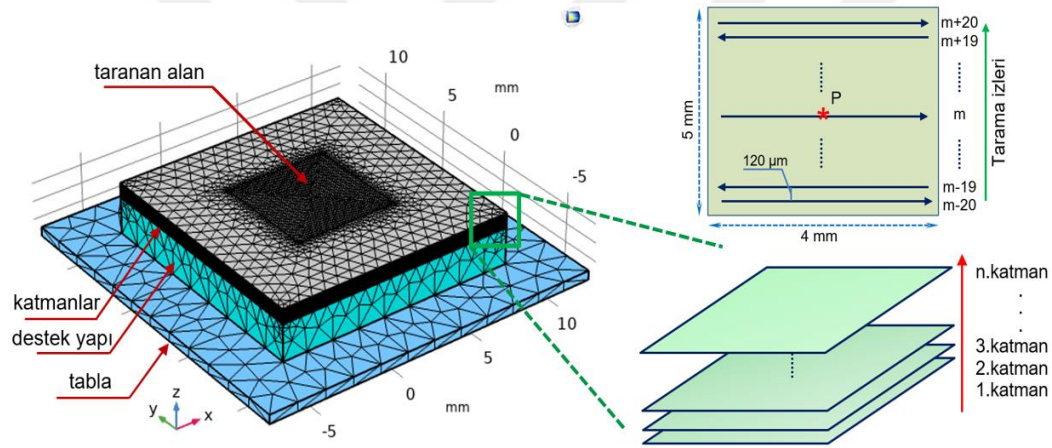
Odak noktası çapı ve odak uzaklığı, lazere ve bulunduğu ortama bağlı değişmekte olup, deneysel olarak ölçme ile bu değerlere sahip olunmaktadır (Şekil 3.3). Bu değerler, aşağıda belirtilen formüle uygulanarak, istenilen OU mesafesindeki lazer çapı hesaplanabilmektedir [41].

$$\begin{aligned}
 w(z) &= w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} & w(z) &= z \text{ pozisyonundaki yarıçap} \\
 w_0 &= w(0) = \text{bel yarıçapı} & & \\
 z_R &= \text{Rayleigh aralığı} & & \\
 z_R &= \frac{\pi w_0^2}{\lambda} & \lambda &= \text{dalga boyu}
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Eş. 3.7'ye göre 2 mm OU mesafesi için etkin lazer yarıçapı 89 μm olarak hesaplanmış olup, bu değer etkin lazer yarıçapı olarak modellemede kullanılmıştır.

3.1.6. Geometri ve tarama stratejisi

Modelde, toz katmanların her biri, taranan alanlar, destek yapısı ve alt tabla blok geometri olarak tasarlanmıştır (Şekil 3.4). S1 ve S2 parametre setlerinde martenzit ayrışmasının gerçekleşebilmesi için, 1 saniye katmanlar arası toz serme süresinde gereken minimum parça en kesiti 20 mm^2 'dir [9]. Bu sebeple, modelde taranan alan boyutları 20 mm^2 olarak tasarlanmıştır. Şekil 3.4'te gösterildiği gibi her katman için $120 \mu\text{m}$ tarama aralığı (bindirme mesafesi) ile 41 bitişik tarama şeklinde modellenmiştir. Simülasyon sırasında hesaplamayı sadeleştirmek adına her katmanda, tüm katmanı temsilen merkezi P noktasının sonuçları referans alınmıştır. SLE'de parçalar toz yatağın içinde üretildikleri için taranan alanını çevreleyen toz yatağı geometrisi tasarlanmıştır.



Şekil 3.4. Çok katmanlı model ağ geometrisinin şeması (a) ve SLE simülasyonları sırasında tarama stratejisi (b)

Sonlu elemanlar yönteminin doğruluğu ve yakınsaması, geometriyi oluşturan birim elemanın küçüklüğüne (inceliğine) bağlıdır. Özellikle, modelde gauss dağılımı uygulandığında, ısı akısı giriş bölgesindeki sonlu birim eleman sayısının dikkatli bir şekilde seçilmesi doğru sonuçlar elde edilmesi için büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle, model geometrisinde lazerle taranan alanlar için çok daha ince bir ağ tanımlanmıştır (Şekil 3.4).

Bu çalışma, çok taramalı ve çok katmanlı modelleme ile olası martenzit ayrışma koşullarının tahminine odaklanmaktadır. Doğru ve gerçekçi sonuçlar elde etmek için, modelde birçok termo-fiziksel olaylar (iletim, konvansiyonel, radyasyon, ani buharlaşma, geri tepme basıncı, termokapiler etkiler vb.) göz önünde bulundurulmuştur. Bu durum,

simülasyonun hesap yükünü oldukça yükseltmektedir. Ayrıca, çok taramalı (41 tarama izi) ve çok katmanlı (10 katman) model olması hesap yükünü katlayarak arttırmaktadır (her bir parametre seti için hesaplama süresi 120 saati aşmıştır). Bu nedenle hesaplama maliyeti göz önünde bulundurularak, her katman için zikzak tarama strateji uygulanmıştır.

3.1.7. Histeresiz malzeme davranışı

Metal toz katmanları, Geometri başlığı altında blok olarak modellenirken, malzeme tanımı olarak, sıcaklığa bağlı değişen toz malzeme termal iletkenlik katsayısı ($k(t)$, W/(m·K)), yoğunluk ($\rho(t)$, kg/m³), özgül ısı katsayısı ($Cp(t)$, J/g.K) ve entalpi ($H(t)$, J/g) değerleri tanımlanmıştır. Modellemede; taranan katman metal toz olarak tanımlanırken, üst katmana çıkıldığında tarama sonrası katılaşma olduğu için alt katmanlar katı blok olarak tanımlanmıştır. Katı bloğun malzeme özellikleri yine sıcaklığa bağlı değişkenler olarak modellenmiştir.

Proseste her katman ısınma sırasında tozdan sıvıya geçme özelliğine sahipken, katılaşma sırasında sıvıdan katıya geçme özelliği göstermektedir. Böylece modeli güçlendirmek adına histerezis malzeme davranışı için faz faktörleri (Θ_{liq} ve Θ_{lmx} , Eş. 3.8) tanımlanmıştır.

$$\Theta_{liq} = \begin{cases} 0 & T \leq T_s \\ (T - T_s)/(T_l - T_s) & T_s < T < T_l \\ 1 & T \geq T_l \end{cases} \quad (3.8)$$

$$\Theta_{lmx} = \begin{cases} 0 & t=0, \text{ initial condition} \\ \Theta_{liq} & \Theta_{lmx} \leq \Theta_{liq} \\ \Theta_{lmx} & \Theta_{lmx} > \Theta_{liq} \end{cases}$$

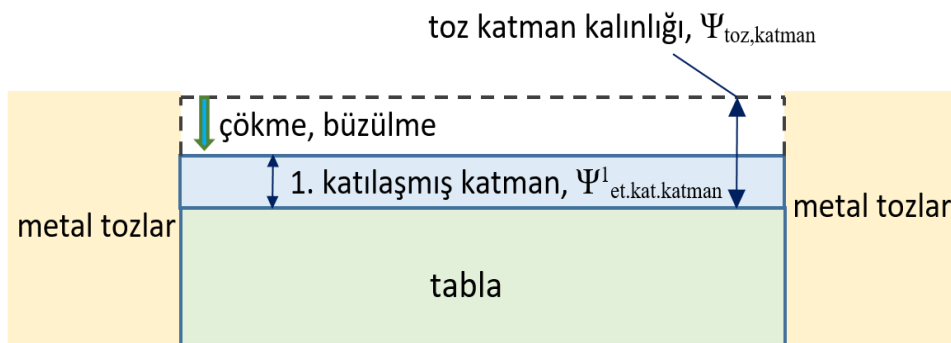
Burada T_s ve T_l sırasıyla katılaşma ve sıvılaşma sıcaklıklarıdır. Böylelikle, simülasyon sırasında faz dönüşümleri (toz $\rightarrow$ sıvı $\rightarrow$ katı) gerçekleştirilerek, faz geçişleri sürekli güncellenmiş ve korunmuştur.

3.1.8. Etkili katman kalınlığı hesaplama

SLE sırasında, lazer-metal toz etkileşimi ile her katman toz $\rightarrow$ sıvı $\rightarrow$ katı dönüşümleri yaşamaktadır. Metal tozların serilmesiyle elde edilen toz katman yatağı gözenekli bir

yapıya sahip olup, katmanın boşluk oranı genelde 0,4 ila 0,6 arasında değişmektedir [62,63]. Bu nedenle nispi toz yoğunluğuna bağlı olarak katmanda, katılaşmadan sonra, çökme (büzülme) meydana gelmektedir. Böylelikle, katman kalınlığı ilk halinden daha düşük kalınlıklara sahip olabilmektedir.

Her katman eklendikçe, alt tabla aynı nominal katman kalınlığında ($\Psi_{toz,katman}$) alçaltılmaktadır. İlk katman serilip, katmanın üretim alanı tarandıktan sonra, taranan bölgelerde çökme meydana gelmektedir. Daha sonra, tabla aynı nominal katman kalınlığında ($\Psi_{toz,katman}$) alçaltılmaktadır. İkinci katman serilip bıçakla üstü düzeltilmektedir. Burada, taranmayan bölgelerin yüksekliği nominal katman kalınlığında artmaktadır. Ancak, ilk katmanda taranmış alan yüksekliği çökmeden dolayı daha düşük yüksekliğe indiği için (Şekil 3.5), ikinci katman kalınlığı serildiğinde nominal katman kalınlığından daha yüksek kalınlığına sahip olmaktadır. İkinci katmanda tarandığında, yine çökme meydana gelmektedir. Bu bağlamda, katmanın boşluk oranı büyük önem arz etmektedir.



Şekil 3.5. İlk toz katmanın katılaşma sonrası çökme görünümü

Literatürde bu konuyla ilgili çeşitli yaklaşımlar vardır [63,64] ve bunlardan biri aşağıdaki gibidir:

$$\Psi_{et.toz.katman}^n = \Psi_{toz.katman} + \Psi_{et.toz.katman}^{n-1} - \Psi_{et.kat.katman}^{n-1} \quad (3.9)$$

$$\Psi_{et.kat.katman}^n = (1-\phi) \Psi_{et.toz.katman}^n \quad (3.10)$$

Hesaplamalarda, katman boşluk oranı (ϕ) 0,5 kabul edilmiştir. Denklemlerde, $\Psi_{net.toz.katman}$ ve $\Psi_{net.kat.katman}$, sırasıyla, etkili toz katman kalınlığı ve etkili katılaşmış katman kalınlığını göstermektedir.

Hesaplama maliyeti göz önünde bulundurularak, her katman için etkili katılmış katman kalınlığı hesaplanarak, modelleme çalışmalarında kullanılmıştır.

3.1.9. Emilim katsayısı

Ergiyik havuzu morfolojisi ve sıcaklığa karmaşık bir şekilde bağlı olan emilme enerjisi, lazer gücü, tarama hızı ve lazer çapından etkilenerek, iletim-anahtar deliği modu eşiği boyunca büyük ölçüde değişir. Bu nedenle, emilim katsayılarının bu parametrelerin bir fonksiyonu olarak hesaba katılması, gerçek ergiyik havuzu boyutlarının elde edilmesi için önemlidir. SLE, metal tozlarının birbirine sıçraması, erimesi ve sinterlenmesi (faz ve şekil değişimi), kaldırma kuvveti ve yüzey gerilimi gradyanı ile indüklenen sıvı metal hareketi, yüksek buharlaşma ve bunun sonucunda oluşan geri tepme basıncı, dalgalanmalar ve sıvı metal yüzeyindeki bozulmalar gibi birçok fiziksel olguları içermektedir [55]. Tüm bu olgular, süreci büyük ölçüde karmaşıktırmakta ve çok yüksek hesaplama maliyetlerine yol açmaktadır.

Mikro ölçekte, lazer hareket ederken sürekli değişen termal davranışın hesaplanması, hesaplama maliyetini artırmaktadır. Ayrıca, çok taramalı (20 mm^2 , 81 tarama izi) ve çok katmanlı (10 katman) modellemelerde bu hesaplama maliyeti katlanarak daha da artmaktadır. Böylesine büyük bir maliyet, yazılım ve bilgisayarın sınırlarını aşarak hesaplamayı imkansız hale getirebilmektedir. Öte yandan, gerçek sonuçlar elde etmek için tüm bu fenomenlerin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu nedenle, son derece karmaşık ve zaman alıcı lazer tozu yatağı işlemleri için doğru ve verimli emilim ifadelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, bu çalışmada, tüm olguları içinde barındıran uygun bir etkili emilim ifadesi kullanılmıştır.

Bir önceki çalışmada [55], lazer gücü ve lazer hızının emilimi önemli ölçüde etkilediği belirlenmiş olup, $100 \text{ }\mu\text{m}$ lazer çapı için bu iki etki dikkate alınarak ampirik bir emilim ifadesi üretilmiştir. Lazer çapının genişliği doğrudan güç yoğunluğunu (Power density, $PD=P/(\pi D^2/4)$, P lazer gücü, D lazer çapı) etkilemektedir. Güç yoğunluğu, birim kare başına düşen güç miktarını göstermekte olup, ergiyik havuz bölgesindeki emilimi belirleyen baş etkenlerdendir. Bu sebeple, etkili emilim değeri hesaplanırken, lazer çapı parametresinin de ifadeye eklenmesi yararlı olacaktır. Bu çalışmada, bu ifade, çeşitli lazer çaplarında kullanılabilmesi için lazer gücü, tarama hızının yanında, lazer çapına da bağlı

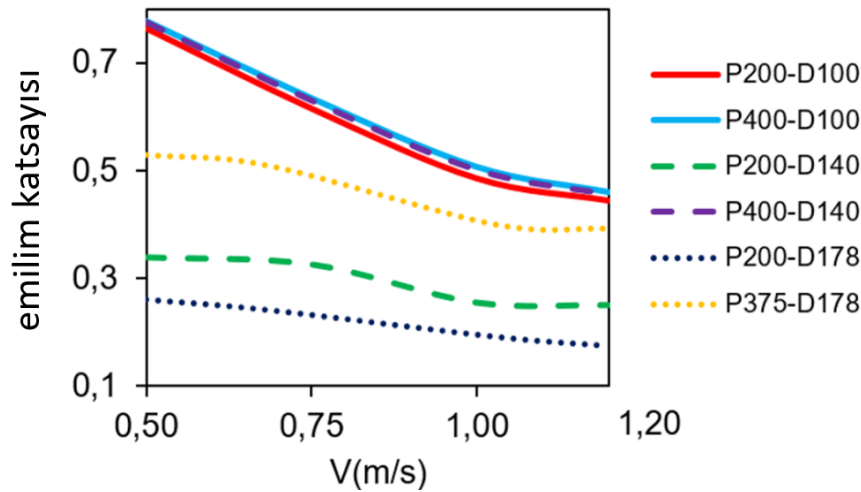
hale getirilerek geliştirilmiştir. Bu etkili emilim ifadesi, önceki çalışmalardaki [65, 66] ergiyik havuzu boyutları ile karşılaştırılarak doğrulaması yapılmıştır. Geliştirilmiş etkili emilim ifadesi aşağıdaki gibidir;

$$\tau = A + \frac{B}{1 + e^{-\left(\frac{V-V_0}{C}\right)}} \quad (3.11)$$

$$A = 0,2327 + \frac{0,201}{1 + e^{-\left(\frac{P_*\left(\frac{100}{D}\right)^2 - 114,4438}{28,281}\right)}}, B = 0,4424 + \frac{-0,5679}{1 + e^{-\left(\frac{P_*\left(\frac{100}{D}\right)^2 - 153,3912}{-13,2179}\right)}}$$

$$C = -0,1748 + \frac{0,4684}{1 + e^{-\left(\frac{P_*\left(\frac{100}{D}\right)^2 - 116,8547}{-25,7217}\right)}}, V_0 = 0,7173 + \frac{0,1275}{1 + e^{-\left(\frac{P_*\left(\frac{100}{D}\right)^2 - 154,6268}{-2,444}\right)}}$$

Burada, güç P (W), lazer hızı V (m/s) ve lazer çapı D (μm)' dir. Formüle göre bu modellemelerde kullanılan güç, tarama hızı ve lazer çapının bir fonksiyonu olarak emilim katsayılarının grafiği Şekil 3.6'da gösterilmektedir



Şekil 3.6. Parametrelerle ilişkili emilim katsayıları değerleri

Grafiğin yatay ekseninde tarama hızı parametresi gösterilirken, güç ve lazer çapı parametreleri ise işaret tablosunda belirtilmektedir. Burada; örnek olarak P200-D100 etiketi 200 W lazer gücü ve 100 μm lazer çapını temsil etmektedir.

3.2. Destek Yapıların Termal Modellemesi

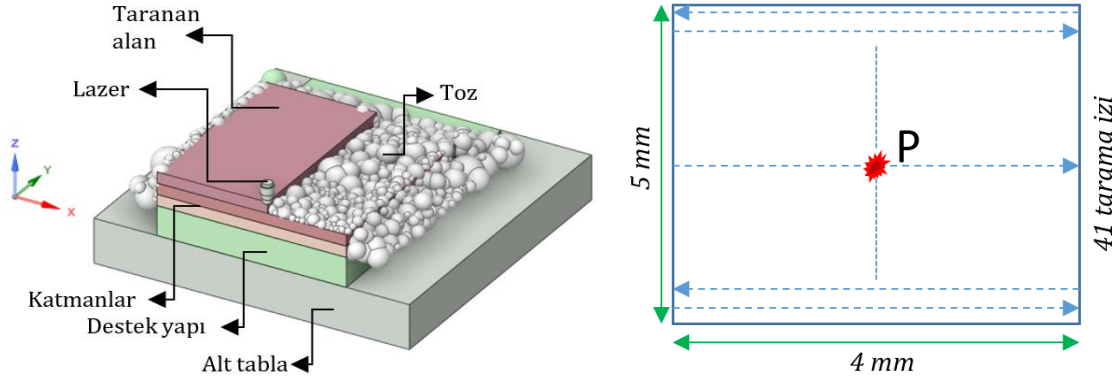
Destek yapıları imal edilen parçanın akması ve bozulması gibi durumları önlemek için tercih edilmektedir. Bir diğer durum olarak, bu yapıların optimizasyonu ile mikroyapıyı uyarlamak mümkün olmaktadır. Parça ve alt tabla arasında oluşturulan destek yapıları, alt tabakaya ısı transfer oranını kontrol ettikleri için, bazı durumlarda istenilen bazı mekanik özelliklerin elde edilmesinde yardımcı bir rol oynayabilmektedir. Enerjinin çoğu destek yapılar boyunca alt tabla yönünde aktığı için, destek yapılar süreç kontrolü bağlamında önemlidir. Bu nedenle, uygun lazer parametreleri, soğuma süresi ve alt tabla sıcaklığının yanında, destek yapılarla da martenzit ayrışmasına katkıda bulunabilmektedir.

Bu bölümde, destek yapı yüksekliği ve boşluk oranının katmanlar üzerindeki termal etkisi sayısal olarak analiz edilmiştir. Etkiyi göstermek için üç farklı boşluk oranı ve yükseklik test edilmiştir. Parametre seti (Çizelge 3.3), tasarlanan modelde deneme-yanılma ve literatür araştırmalarına göre belirlenmiştir. Katmanlar arası soğuma süresi 1 saniye ve her katmanda 20 mm² (41 tarama izi) tarama alanı alınmıştır. Tabla sıcaklığının ayrışmaya olan pozitif etkilerinden dolayı yüksek tutularak, 200 °C alınmıştır. Parametreler bağlı enerji yoğunluğu düşük elde edilmiş olup, z yönünde iletim katsayısında artırımına gereksinim duyulup duyulmadığı kontrol edilmiş ve ergiyik havuzun anahtar deliği (keyhole) rejimine geçmediği tespit edilmiştir.

Çizelge 3.3 Parametre seti

Güç (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Nom. Katman Kalınlığı (µm)	Lazer Çapı (µm)	Bindirme Mesafesi (µm)	Tabla Sıcaklığı (K)	Enerji Yoğunluğu (J/mm ³)	τ	λ_z
350	1000	60	180	120	473	48,61	0,375	1

Destek yapının etkisini karşılaştırmak için 2 mm yükseklik için üç farklı boşluk oranı ($\beta = 0; 0,5; 0,75$) değerlendirilmiştir. 0,75 boşluk oranı için de iki farklı yükseklik ($H = 0,5$ mm; 4 mm) hesaplanmıştır.



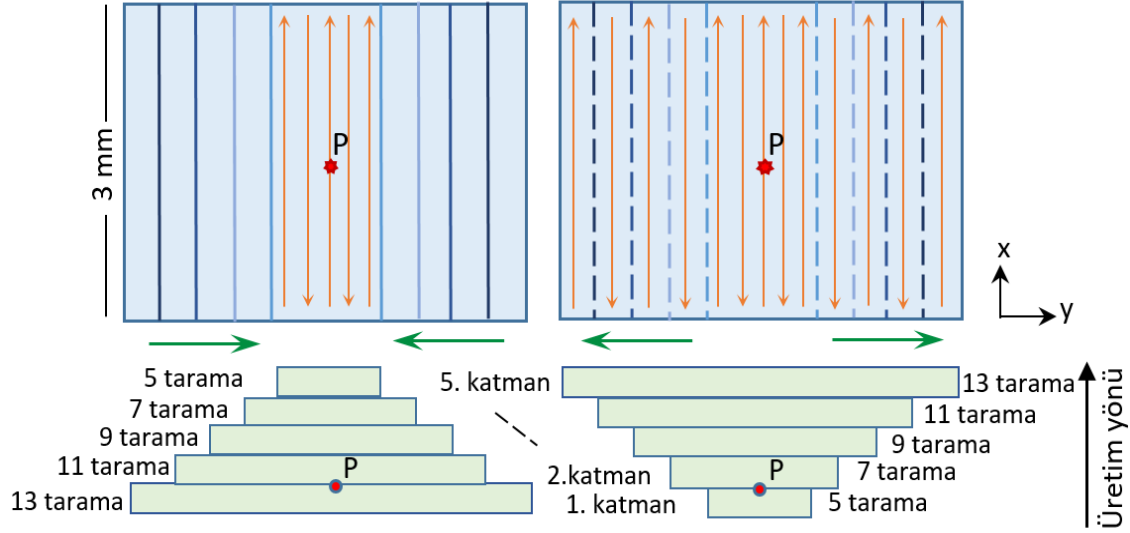
Şekil 3.7. SLE sürecinin 3D ve 2D şematik görünümü

3.3. Üretim Oryantasyonun Termal Modellemesi

Üretim oryantasyonu parça kalitesi açısından dikkat edilmesi gereken konulardan biridir. Aynı geometriye sahip parçalar farklı yapısal açılarda ve yönlerde üretilerek, çeşitli mikroyapı ve mekanik özellikler elde etmek mümkündür [28]. Literatürdeki üretim oryantasyonu ile ilgili çalışmalara bakıldığında, çoğunlukla yatay-dikey yönlerde ve birkaç da eksen dışı performanslarda ilgilenildiği görülmüştür. Bu çalışmalarda, deneysel olarak oryantasyonun dayanım, süneklik, yorulma, gözeneklilik, yüzey kalitesi ve artık gerilme üzerindeki etkileri gösterilmiştir [29,30]. Üretim oryantasyonunun mekanik özellikler üzerindeki etkisi çok karmaşıktır. Çünkü temelde bu etki, süreçte gerçekleşen termo-mekanik olaylara dayanmaktadır. Deneysel olarak, SLE'de mikro ölçekte hızla değişen ısı akış oranlarını ölçmek çok zordur. Bu nedenle de, üretim oryantasyonunun termal etkileri için sayısal çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, üretim oryantasyonunun martenzit ayrışması üzerindeki etkileri konusunda da henüz bir çalışma yapılmamıştır. Bu kapsamda, üretim oryantasyonunun olası termal etkilerini açıklamak için etkili bir model tasarlanarak, her yeni katmanda daralan ve genişleyen kesit alanına sahip parçalar için detaylı ısı analizleri yapılmıştır. Ek olarak, aynı geometri için farklı üretim oryantasyonlarının martensit ayrışmasını nasıl etkileyebileceği hesaplamalı olarak değerlendirilmiştir.

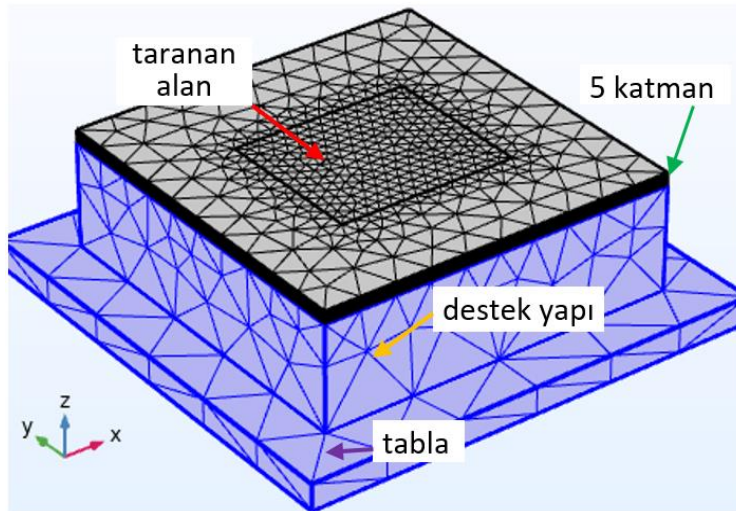
SLE'de parçalar, tozlar arasındaki boşluklar nedeniyle iletkenliği çok düşük olan bir toz yatağında üretilmektedir (Çizelge 3.1). Bu nedenle de, emilen ısıнын çoğu, katılaşmış katmanlardan alt tablaya doğru akmaktadır. Bu özellik kullanılarak, üretim oryantasyonlu katmanlarda ısı birikimi ve soğuma hızı kontrol edilerek, mikroyapı ve mekanik özellik geliştirilebilir. Isı akışı yönünde daralmalar (nozul etkisi), katmanlarda depolanan

geometrisi elde edilmiştir (Şekil 3.9). Sadelik için, tüm katmanı temsilen ilk katman üzerindeki merkezde yer alan P noktasının sonuçları referans alınmıştır.



Şekil 3.9 Daralan (a) ve genişleyen (b) parçaların üretim oryantasyonları

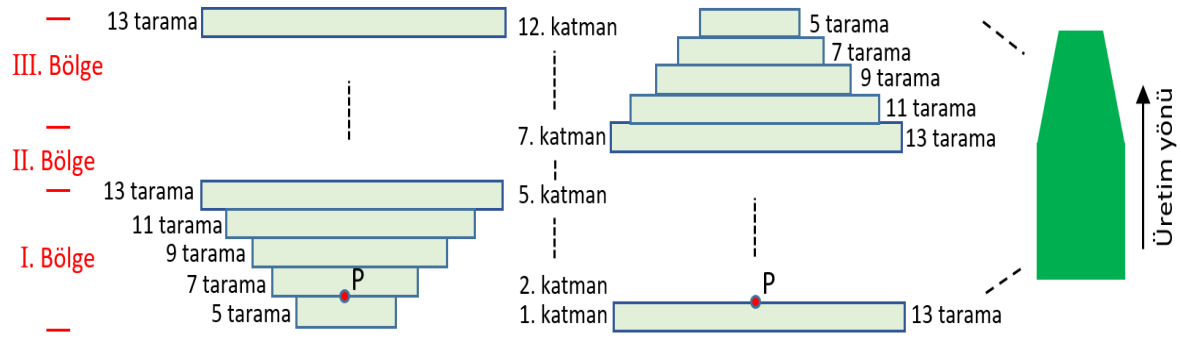
Blok olarak modellenen alt tabla, destek yapı, toz yatağı ve 5 katman geometrileri, iki ayrı durum için 13000 birim elemanla ağlanmıştır (Şekil 3.10). Lazerle taranan alanda mikro ölçekte anlık termo-mekanik değişiklikler yaşanmakta olup, daha hassas ve kesin sonuçlar elde etmek için bu bölgeler çok daha ince bir ağ ile tanımlanmıştır.



Şekil 3.10. Genişleyen ve daralan parçalar için tasarlanan ağ geometrisi

3.3.2. Martenzit ayrışması için geometri modellenmesi

Martenzit ayrışmasının mikroyapı ve mekanik performans üzerindeki olumlu etkisi bilinmekte olup [9,48], bu bağlamda üretim oryantasyonunun ayrışma üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, biri genişleyen-sabit (GS) yönelimli, diğeri ise sabit-daralan (SD) yönelimli (Şekil 3.11) olacak şekilde, aynı geometriye sahip iki parça 12 katmanlı tasarlanmıştır. Bu parçaların katman katman sıcaklık geçmişleri hesaplanarak, üretim oryantasyonlarının olası martenzit ayrışması üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır.

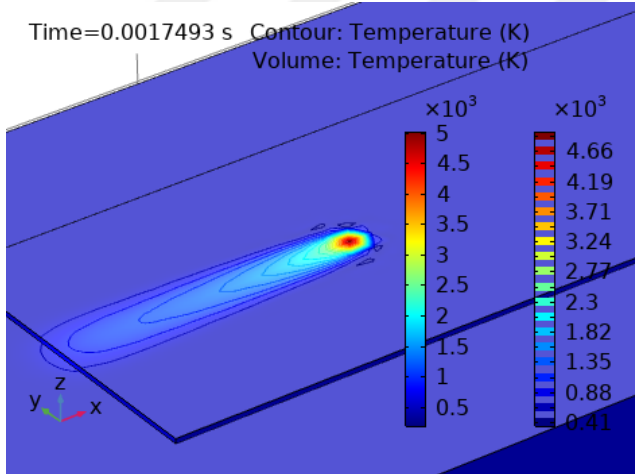


Şekil 3.11. Genişleyen-sabit (a) ve sabit-daralan (b) parçaların üretim oryantasyonları

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Tek Katman ve Tek Taramalı Ergiyik Havuzu Boyutlarının Doğrulaması

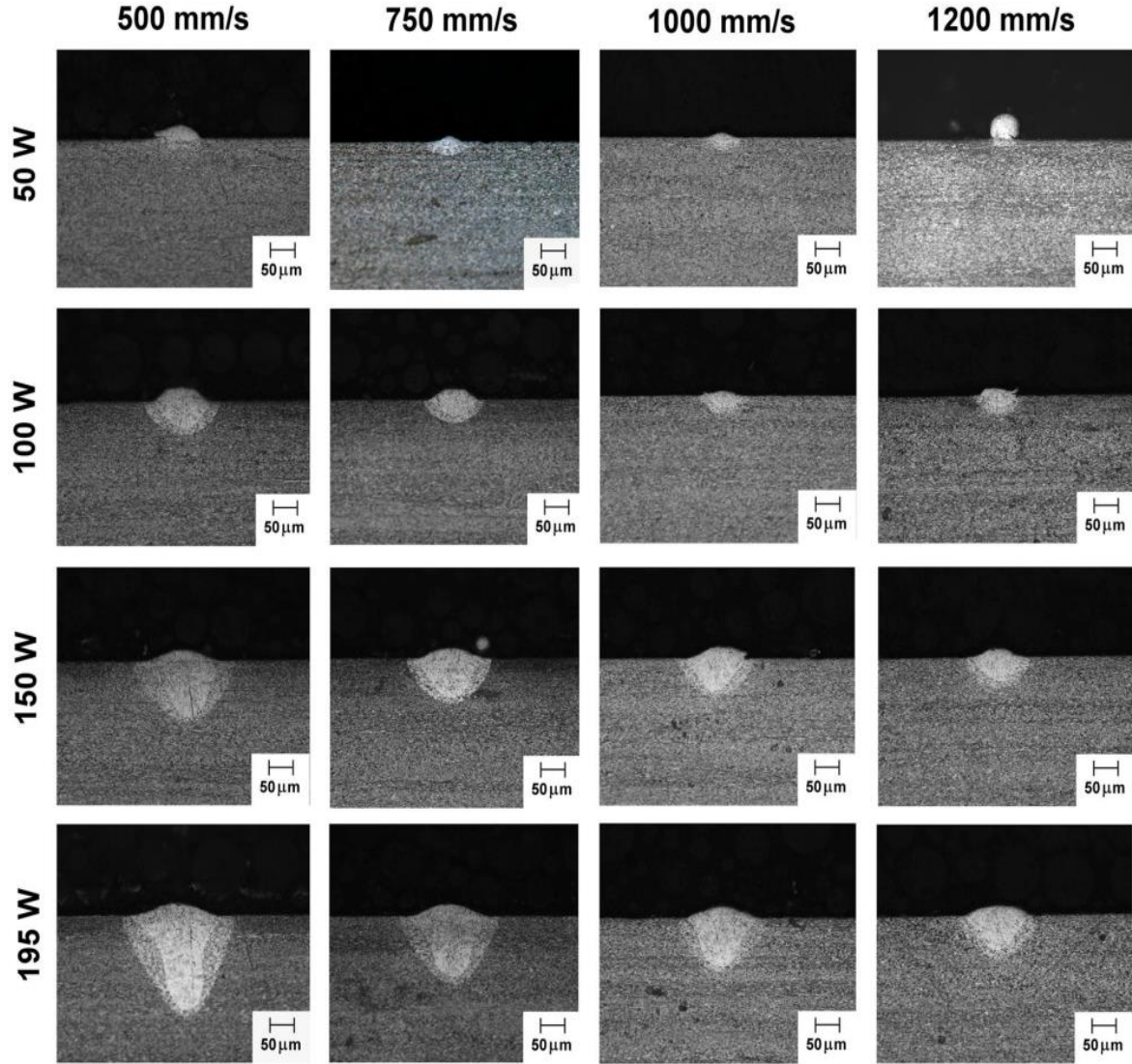
Modelleme çalışmalarında öncelikli olarak, ilk katmanın üzerinde tek tarama izinde lazer hareket ettirilerek, tarama boyunca oluşan ergiyik havuzlar incelenmiştir. Şekil 4.1’de, S1 parametre setinde toz katmanının lazerle tarama sırasında oluşan sıcaklık gradyanları ve üç boyutlu ergiyik havuzun tipik bir modelleme sonucunu göstermektedir. Ergiyik havuz geometrisi elips şekli göstermektedir. Lazerin merkezine denk gelen toz yatağı yüzeyinde sıcaklık maksimum değerine ulaşırken, y ekseninin iki tarafında enerji azalarak dağılmaktadır. Ti-6Al-4V malzemesinin erime sıcaklığı ergiyik havuzun sınırlarını belirlerken, ergiyik havuzun sınırlarında ısıdan etkilenen bölgeler (heat affected zone) oluşmaktadır. Ayrıca, lazer hareketinin tersi yönünde, malzeme özellikleri, lazer hızı-gücü, katılma vb. etkenlere bağlı olarak ısıdan etkilenmiş bölgeler meydana gelmektedir. Yüksek güçlü lazerle sıvılaştıran ergiyik havuz tarama sonrası çok hızlı katılma sürecine girmekte, yol boyunca tarama izi oluşmaktadır.



Şekil 4.1. S1'in birinci katmanındaki lazer taraması sırasında sıcaklık gradyanları

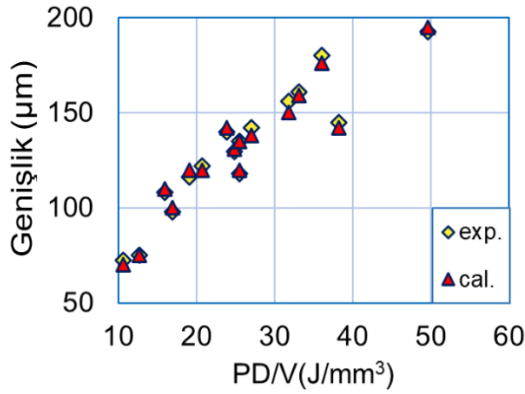
Modelin doğrulamasını yapmak için, aynı parametre setinde, model ergiyik havuz boyutları ile deneysel ergiyik havuz boyutları karşılaştırılmıştır. Bunun için, literatürden deneysel olarak elde edilmiş tek katmanda tek taramalı ergiyik havuzu boyutları kullanılmıştır. Bu ergiyik havuzların parametre seti değerleri; lazer gücü 100-500W, lazer hızı 450-1200 mm/s, lazer yarıçapı 50-70 μm aralığında olup 30 μm katman kalınlığında elde edilmiştir [65, 66]. Bu parametre setlerinde, modele uygulanarak simulasyon ergiyik

havuz boyutları elde edilmiştir.



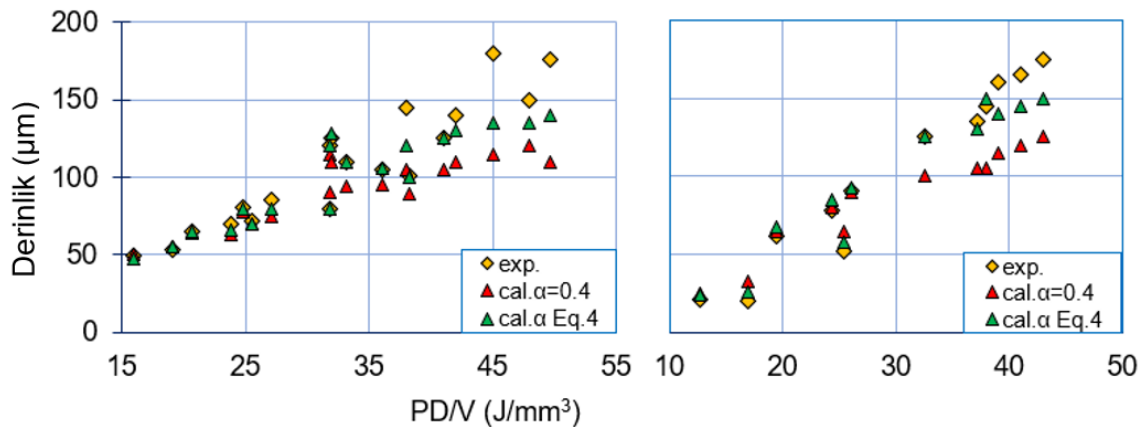
Resim 4.1. Ti-6Al-4V alaşımasının tek tarama izinde ergiyik havuz en kesitleri [64]

Lazer çapının büyüklüğü ve enerji yoğunluğunun şiddetine bağlı olarak farklı ergiyik havuz genişlikleri ölçülmüştür. Isı girdisi yüksek ve lazer çapı yüksek parametrelerde malzeme iletimine bağlı olarak daha yüksek ergiyik havuz genişlikleri elde edilmiştir. Aynı parametrede, deneysel ve simülasyon ergiyik havuz genişlikleri kıyaslandığında, birbiriyle $\sim \pm \max \% 4$ toleransla benzer değerler elde edildiği görülmüştür (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. PD/V oranlarına göre deney ve simülasyon ergiyik havuzu genişlikleri

Aynı parametrelerde, ergiyik havuz derinlikleri de karşılaştırılmıştır. Ergiyik havuz oluşumunda, özellikle sınırlarının oluşumunda, emilim katsayısı çok önemlidir. Literatürdeki nümerik çalışmalarda; parametrelerin etkisi göz önünde bulundurulmaksızın emilim katsayısı genellikle 0,3-0,4 olarak kabul edilmektedir [60,67]. Ancak, ergiyik havuz oluşumunda birçok termo-fiziksel olaylar yaşanmakta olup, bu olayların hepsi ergiyik havuz morfolojisini etkilemektedir. Doğru havuz boyutlarını elde etmek amacıyla, bu çalışmada tüm bu fiziksel olayları içinde barındıran parametre fonksiyonlu etkili bir emilim ifadesi kullanılmıştır. Emilim katsayısının etkisini görebilmek adına, aynı parametrelerde, 50 μm (a) ve 70 μm (b) lazer nokta yarıçapları için, 0,4 emilimli simülasyon, Eş. 3.11 emilimli simülasyon ve deneysel ergiyik havuz derinlikleri kıyaslanmıştır (Şekil 4.3). Kıyaslama ısı akısı için belirleyen parametre olan PD/V oranının bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Burada; PD lazerin güç yoğunluğu olup, V ise lazerin hızıdır.



Şekil 4.3. PD/V oranlarının bir fonksiyonu olarak 50 μm (a) ve 70 μm (b) lazer yarıçapı için deney ve simülasyon (τ formülü ve sabit) ergiyik havuzu derinlikleri

Ergiyik havuz derinlikleri, enerji yoğunluğu arttıkça ve lazer çapı küçüldükçe, arttığı görülmüştür. Emilim katsayısının sabit değer yerine parametrelerle ilişkili formüle göre alınması, gerçek ergiyik havuz boyutlarını elde etme eğilimini arttırdığı gözlemlenmiştir. Denklemleri emilim katsayılı simülasyon derinliklerinin, 0,4 emilim katsayılı simülasyon derinliklerine göre deneysel sonuçlara daha yakın çıkmıştır.

Toz yatağını tarayan lazer düşük hızlarda ve yüksek güç yoğunluklarında tarandığında, buharlaşma sonucu geri tepme basıncının neden olduğu bir topolojik çöküntü (anahtar deliği, keyhole) oluşmakta ve ergiyik havuz derinliği beklenenden çok daha aşağıya nüfuz edebilmektedir. Bu sebeple, PD/V değeri yüksek parametre değerleri için anahtar deliği rejiminin de hesaba katılması gerekmektedir. Şekil 4.3'te görüleceği üzere, denklemleri emilim katsayılı simülasyon derinliklerinin, 0,4 emilim katsayılı simülasyon derinliklerine göre daha yüksek PD/V değerlerinde deneyselle tutarlı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Bu durum, emilim katsayısının anahtar deliği rejimine uyumunu göstermiştir. PD/V oranını yaklaşık 25 J/mm^3 'ün üzerine çıkması, ergiyik havuzu derinliğinin anahtar deliği moduna geçme riskini artırmaktadır [65,68]. Şekil 4.3'de de, $50 \mu\text{m}$ lazer yarıçapı için deney ve simülasyon ergiyik havuzu derinlikleri karşılaştırıldığında, deney ve emilim formüllü simülasyon ile elde edilen derinlik değerlerinin, PD/V oranı 38 J/mm^3 'e kadar ($\sim \pm$ maks $5 \mu\text{m}$ toleransla) benzer sonuçlara ulaştığı görülmüştür. Deney ve 0,4 emilimli simülasyon ile elde edilen değerlerin ise, PD/V oranı 27 J/mm^3 'e kadar ($\sim \pm$ maks $5 \mu\text{m}$ toleransla) benzer sonuçlara ulaştığı görülmüştür. Ayrıca, benzer bir şekilde, $70 \mu\text{m}$ lazer yarıçapı için deney ve simülasyon ergiyik havuzu derinliklerinin karşılaştırılması sonucunda da, deney ve emilim formüllü simülasyon ile elde edilen derinlik değerleri PD/V oranı 39 J/mm^3 'e kadar ($\sim \pm$ maks $5 \mu\text{m}$ toleransla), deney ve 0,4 emilimli simülasyon ile elde edilen değerler ise, PD/V oranı 25 J/mm^3 'e kadar ($\sim \pm$ maks $5 \mu\text{m}$ toleransla) benzer sonuçlara ulaşıldığı gözlemlenmiştir.

PD/V oranı bu eşik değerlerden büyük olan simülasyon ergiyik havuzu derinlikleri anahtar deliği rejiminden dolayı, deneysel ergiyik havuzu derinliklerinden nispeten daha düşük çıkmıştır. Bu nedenle, örtüşmeyen ergiyik havuz derinlikleri için, deneysel derinliklerle benzer sonuçlar elde etmek amacıyla, z yönündeki malzeme sıvı iletim katsayısının geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu etkiyi dahil etmek, literatürde bazı yaklaşımlar bulunmaktadır [69,70]. Bunlardan birisi de, anizotropik geliştirilmiş termal iletkenlik yöntemidir (AETC). Bu yöntemde, Marangoni taşınımı yoluyla iletilen ek ısı akışını

hesaba katmak için, malzemenin z yönündeki iletkenlik katsayısı, sanal λ_z faktörü ($k_z = \lambda_z \cdot k$) ile çarpılmaktadır [69]. Bu faktörler, deneysel ergiyik havuz boyutlarından çıkarılarak elde edilmektedir. Bu kapsamda, Şekil 4.2 de örtüşmeyen ergiyik havuz derinlik sonuçları kullanılarak, λ_z faktör sayıları tespit edilmiştir (Çizelge 4.1). Modelde, malzemenin z yönünde iletim katsayısı arttırılarak, deneysel ergiyik havuz derinlikleri elde edilmiştir. Böylelikle, aynı parametrede, deneysel ergiyik havuz derinliklerine ulaşmak için ihtiyaç duyulan faktör sayıları elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. Hesaplanan λ_z faktörü 1,0'dan büyük olan parametre kombinasyonları

P (W)	V (mm/s)	r (μm)	PD (MW/cm ²)	PD/V (J/mm ³)	τ	Dz _{exp} (μm)	Dz _{sim} (μm)	Dz _{exp} -Dz _{sim} (μm)	λ_z
170	450	50	2,2	48	0,694	150	135	15	1,5
195	500	50	2,5	50	0,760	176	140	36	2
250	750	50	3,2	42	0,632	140	130	10	1,3
300	1000	50	3,8	38	0,506	145	120	25	1,8
350	1000	50	4,5	45	0,507	180	135	45	3,5
450	750	70	2,9	39	0,633	155	140	15	1,4
475	750	70	3,1	41	0,634	165	145	20	2
500	750	70	3,2	43	0,634	175	150	25	2,5

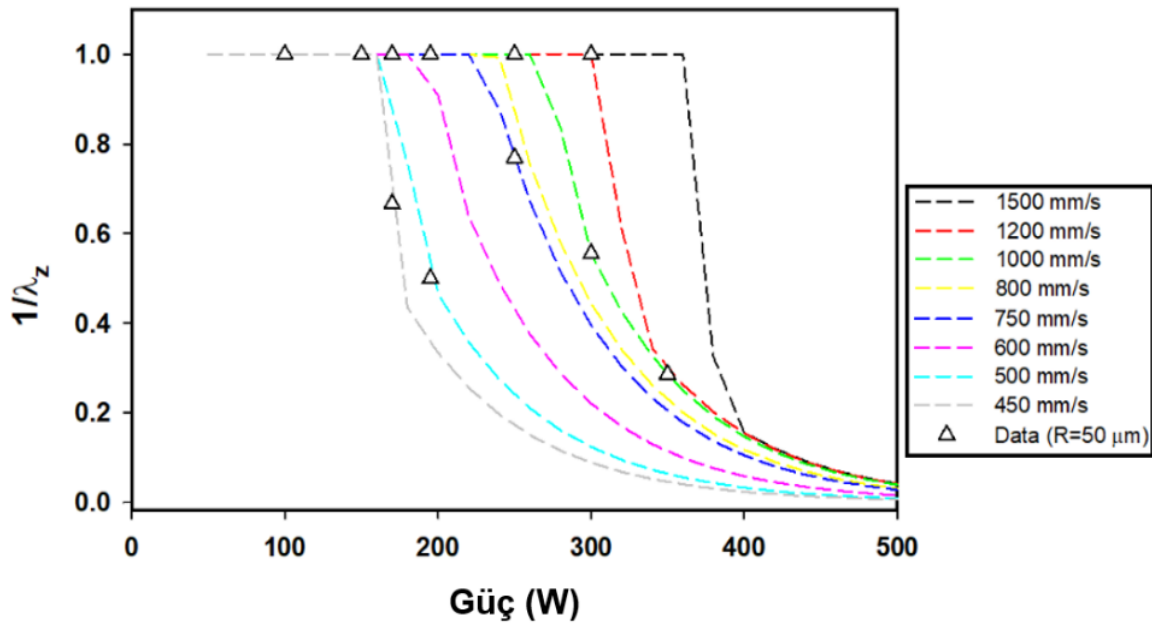
Çizelge 4.1. kullanılarak, SLE'de Ti-6Al-4V malzemesi için, modellemelerde parametrelere bağlı olarak z yönünde k_z artırımına ihtiyaç olup olmadığını belirlemek ve artırım katsayısını tespit etmek için, korelasyonla güç, tarama hızı ve lazer nokta çapına bağlı genel bir λ_z formülü türetilmiştir.

$$\lambda_z = 1 + \frac{A e^{0,0133 P \left(\frac{100}{D}\right)^{1,527}} - 1}{1 + e^{P_0 - P \left(\frac{100}{D}\right)^{1,99}}} \quad \begin{aligned} A &= 0,0313 + 6,9384 e^{-8,1359 V} \\ P_0 &= 199,87 V + 80,08 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Burada; güç P (W), lazer hızı V (m/s) ve lazer çapı D (μm)'dir. Bu formül ile λ_z faktörü istenilen güç, hız ve çap parametrelerinde hesaplanabilmekte olup, modellemedeki ergiyik havuzu derinliği ile gerçek ergiyik havuzu derinliği eşleştirilebilmektedir (Şekil 4.4).

S1 ve S2 parametre setlerinin Eş. 4.1 ile hesaplanan λ_z faktörlerinin sonuçlarına göre 1,0 çıkmaktadır. S1 ve S2'nin PD/V oranlarının 25 J/mm³'ten küçük olması da ergiyik

havuzlarının anahtar deliği rejimine girmemesini bu sonucu desteklemektedir (Çizelge 4.2). Böylelikle, modellemedeki ergiyik havuz derinlikleri için k_z iletkenlik artırımına ihtiyaç duyulmadığı tespit edilmiştir. Modelleme sonuçlarına göre simülasyon ergiyik havuz genişlikleri S1 için 230 μm ve S2 için 270 μm 'dir. S2'nin S1'den daha yüksek genişlikte olmasının nedeni, aynı enerji yoğunluğuna sahip olmalarına rağmen, S2'nin PD/V değerinin daha yüksek olmasından dolayı olduğu değerlendirilmiştir.



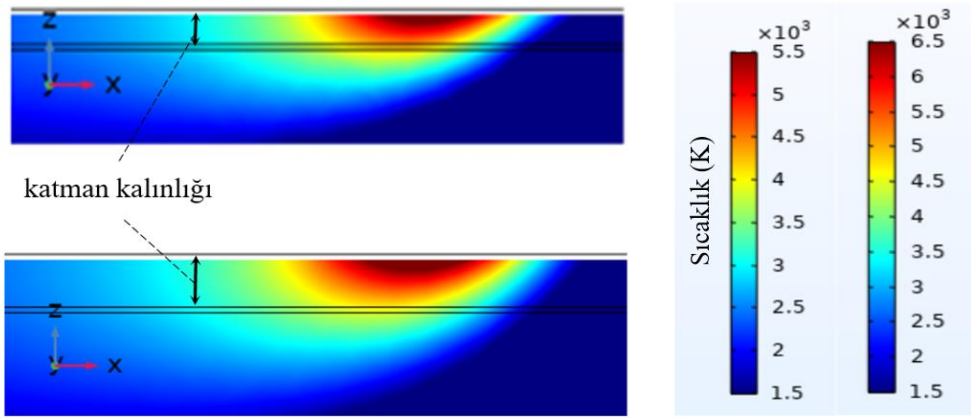
Şekil 4.4. Güç, tarama hızı ve lazer nokta yarıçapının bir fonksiyonu olarak λ_z faktörleri

Çizelge 4.2. Sayısal modellemede kullanılan parametrelerin λ_z faktörleri ve emilim katsayıları

Numune	P (W)	V (mm/s)	r (μm)	PD (MW/cm ²)	PD/V (J/mm ³)	τ	λ_z
S1	375	1029	89	1,51	15	0,4	1
S2	375	686	89	1,51	22	0,509	1

S1 ve S2 için simülasyon ergiyik havuz derinlikleri gösterilmiş olup, sırasıyla S1 için 90 μm ve S2 için 120 μm ölçülmüştür (Şekil 4.5). Ti-6Al-4V malzemesinin ergime sıcaklığı 1923 K olup, ısıdan etkilenen bölgeler de 1600 K lere kadar düşebilmektedir [71]. Ergiyik havuzun derinlik sınırları, bu sıcaklıklar baz alınarak belirlenmiştir. Güç yoğunluğunun aynı olmasına, S2 tarama hızının daha yavaş olması, zaman bazda aynı noktaya lazerin etki süresini artmasına yol açmakta ve ergiyik havuz derinliğinin daha yüksek olmasına neden olmuştur. Ayrıca, ileriki çalışmalarda da görülmüş ki, S2 nin katman kalınlığının daha

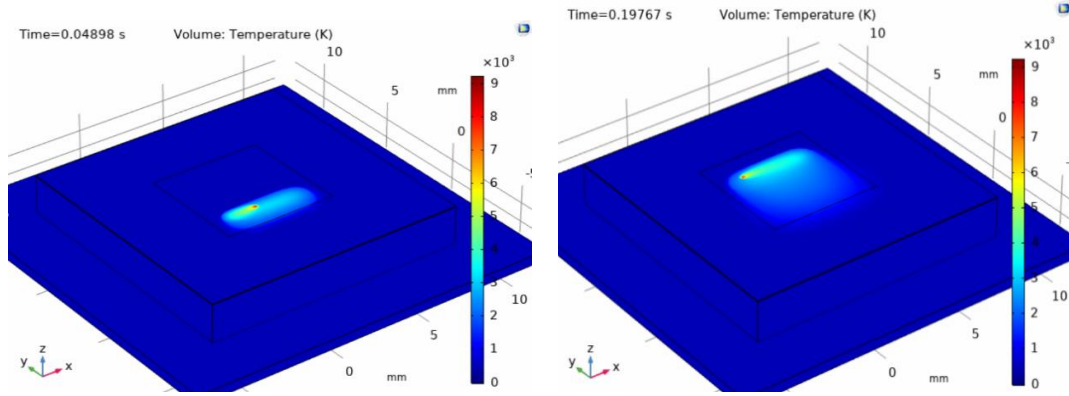
yüksek olması da ısı yayılımını pozitif yönde etkileyerek, ergiyik havuzun daha derinlere nüfuz etmesini kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, tarama sırasında S2 parametre setinin toz yüzeyinin eriştiği maksimum sıcaklığın daha yüksek ve sıcaklık gradyan boyutlarının da daha geniş olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebinin, aynı enerji yoğunluklarına sahip olmasına rağmen, S2' nin PD/V oranının ve katman kalınlığının yüksek olmasına bağlanmıştır.



Şekil 4.5. S1 ve S2'nin ilk katmanı taranması sırasında oluşan xz kesitindeki sıcaklık gradyanları

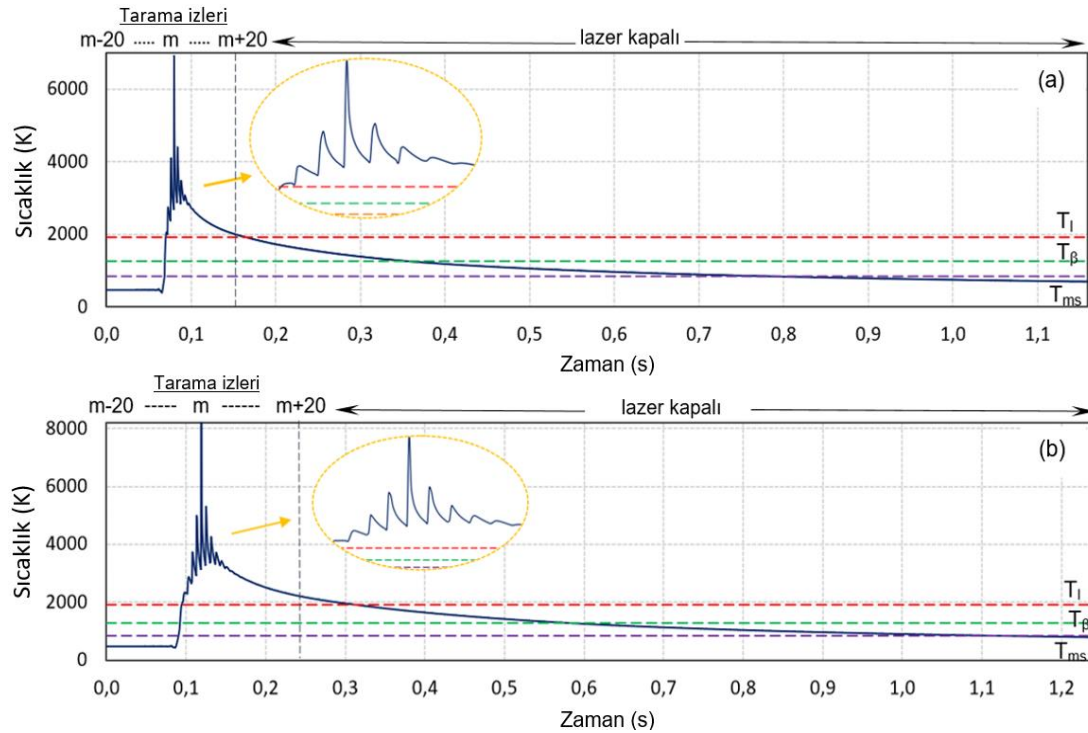
4.2. Tek Katman ve Çok Taramalı Sayısal Modelleme

Tek katmanda, zikzak tarama stratejisinde (Şekil 3.4), önceki komşu tarama izleri ($m-1$, $m-2$, ..., $m-20$) ile sonraki komşu tarama izlerinin ($m+1$, $m+2$, ..., $m+20$), Şekil 3.4'te de belirtilen P konumu üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla zamana bağlı sıcaklık değişimlerinin hesaplamalı olarak modellenmiştir (Şekil 4.7). Destek yapının yüksek poroziteli oluşu, çok daha düşük termal iletkenliğe sağlarken, katmanda daha fazla ısı birikimine ve daha az ısı dağılımına yol açmış ve bu durum da ilk katmanın tamamında ısı kaybını geciktirmiştir. Bu sebeple, ilk katmanın taranması sırasında ergiyik havuzunun ulaştığı en yüksek sıcaklık S1 için 6872 K ve S2 için 8202 K olup, her iki sıcaklık da Ti-6Al-4V'nin erime sıcaklığını (T_i) ve beta geçiş sıcaklığını (T_β) aştığı için, yüksek soğuma hızı >410 K/s nedeniyle de katılaşmadan sonra β faz tamamen martenzit α' mikroyapıya dönüşmüştür. Şekil 4.6'da S2 parametresinde birinci katmanın taranması sırasındaki ergiyik havuz görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 4.6. S2 parametresindeki birinci katmanın tarama sırasındaki görüntüleri

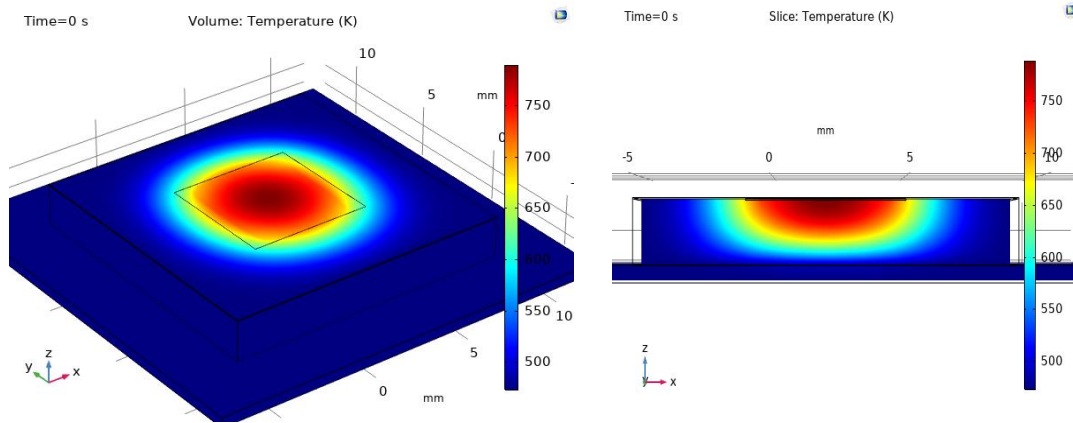
S1 parametre seti için lazer kalma süresi ($t_r=2r_0/V$, r_0 lazer yarıçapı ve V tarama hızı) 172,98 μs ve S2 parametre seti için ise 259,47 μs 'dir. Lazer aynı noktada ne kadar uzun süre kalırsa, lazerin nüfuz derinliği artmakta, öte yandan ise tüm katmanı taramak için ihtiyaç duyulan süre artmaktadır. Daha uzun lazer kalma süresi nedeniyle, S2'nin eriştiği en yüksek sıcaklıklar, tüm katman tarama izleri boyunca S1'den daha yüksek elde edilmiştir. Ayrıca katman kalınlığının artması, katmanın ısıyı kendinde tutma süresini arttırmakta ve soğuma hızlarını da yavaşlatmaktadır. Bu nedenle de, S2'de depolanan sıcaklık değerleri daha yüksek sıcaklıklara ulaşmıştır.



Şekil 4.7. Birinci katmanda S1 (a) ve S2 (b) için tarama ve 1 s toz serme süreci boyunca P konumunda gerçekleşen sıcaklık sonuçları

P noktasından önceki ardışık tarama izleri, mesafeleri ile ters orantılı olarak P konumunun sıcaklığını arttırmıştır. Bu tarama izleri, P noktasını ön ısıtma işlem (ön ısıtma) olarak etkiledikleri için m'inci tarama izinde P noktasının T_{vs} sıcaklığı da giderek artmıştır. P konumunun sıcaklığı sırasıyla, S1 ve S2 için 15. ve 13. tarama izinlerinden sonra etkilenmeye başlamıştır. Bu fark, katmandaki bir noktanın sıcaklığını etkileyen tarama iz sayısının doğrudan parametrelerle ilişkili olduğunu göstermiştir.

Buna bağlı olarak, P noktasından sonraki bitişik tarama izleri ise, P noktasının taranması sonrası, P noktası üzerinde bir ısıtma işlem etkisi göstererek, hem ısı girdisi olarak sıcaklığı arttırmış hem de bu süreçte soğuma hızını da düşürmüştür ve toplamda da T_{vs} sıcaklığının yükselmesine yardımcı olmuştur. S1 için P noktasından sonra 4. S2 için ise 5. tarama izi sonrası, P noktasında gerçekleşen ani sıcaklık iniş-çıkışları etkisini yitirmekte, bu tarama izinden sonraki tarama izleri ise kontrollü olarak sıcaklık ve soğuma hızının düşmesine katkı sağlamıştır. 41 tarama izinden sonra, lazer kapanmakta ve P noktası sıcaklığında hızlı düşüş ve çok yüksek soğuma hızı gözlemlenmiştir. S2 parametre setinde taramadan 1 saniye sonra hesaplanan sıcaklık gradyanları farklı eksenlerde Şekil 4.8'de gösterilmiştir. 1 s soğuma sonrası, merkezin daha geç soğumasından ötürü, katmandaki maksimum sıcaklık değerleri merkezde elde edilmiş ve bu sıcaklık değerleri merkezden dışarıya doğru kademeli olarak azalmıştır.



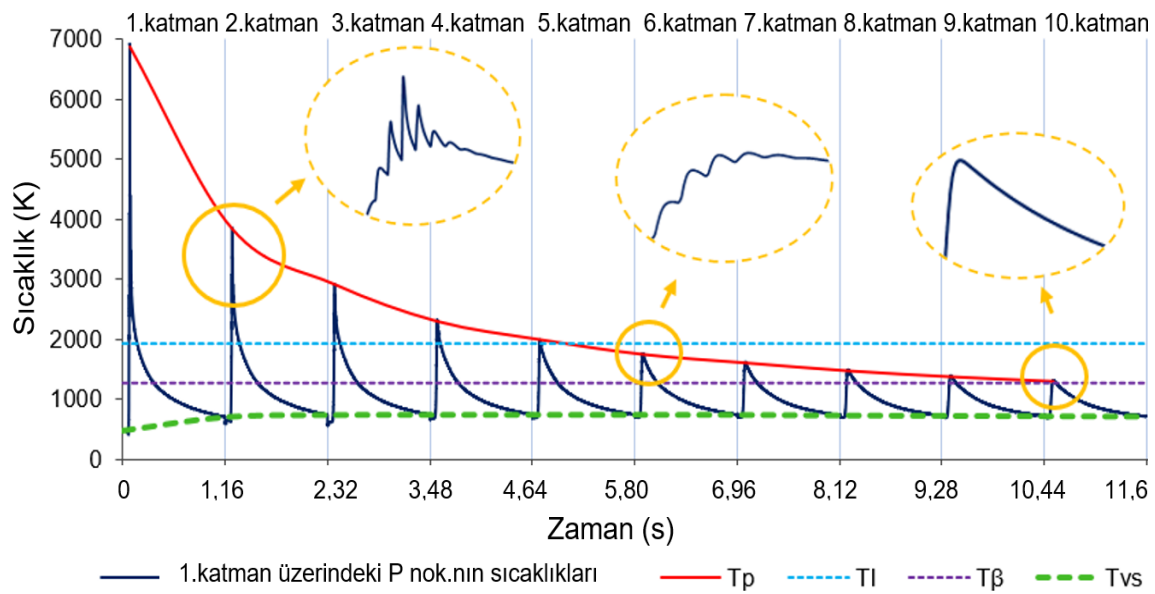
Şekil 4.8. S2 parametresindeki birinci katmanın taranarak 1 s soğuma sonrası izometrik (a) ve xz kesiti (b) görüntüleri

P noktasının sıcaklığı, S1 için (m-3) tarama izi ve S2 için ise (m-4) tarama izine kadar kademeli olarak artarak T_{β} 'nin üzerine çıkmış ve mikroyapının tamamının β fazına dönüşmesini sağlamıştır. P noktasından sonraki tarama izleri ise, kontrollü sıcaklık düşüşü

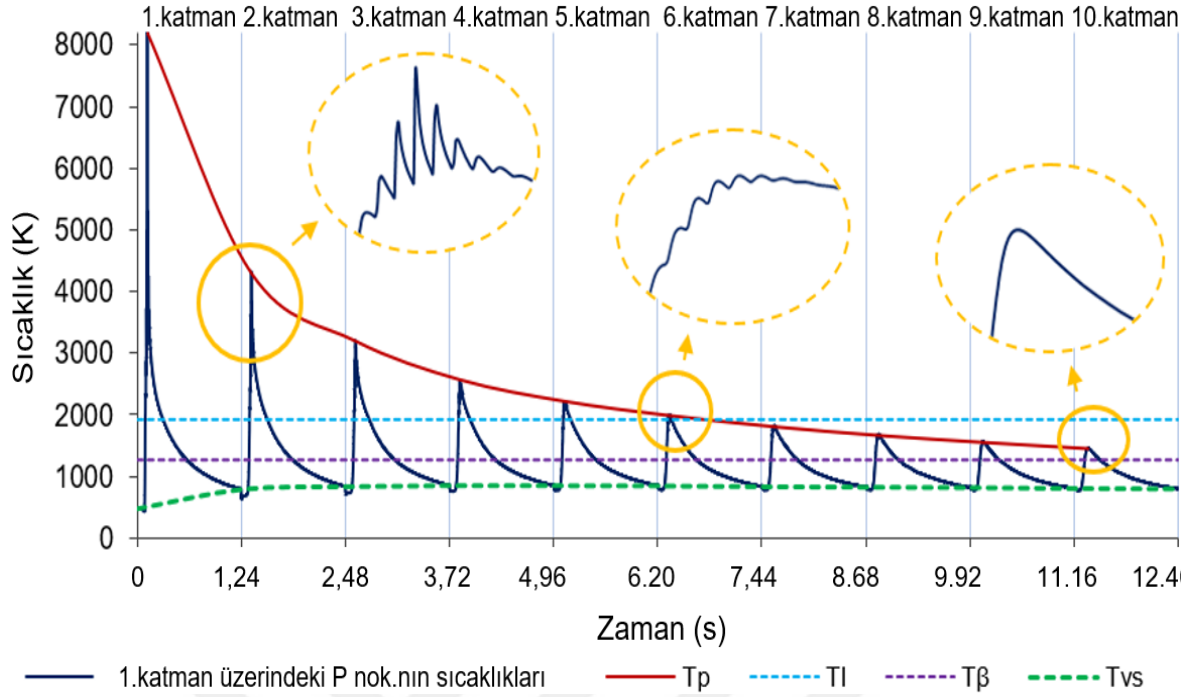
sağlamış, böylelikle de tarama sonra erdiğinde P noktasının sıcaklığının T_β sıcaklığının üzerinde kalmıştır. Yani, tarama bittiğinde katman hala tamamen β fazındadır. Katman taranması bittikten sonra katmanlar arası toz serme süresi başlamaktadır. Bu süre bir üst katmanın serilerek lazerin üst katmanı taramaya başlamadan önceki süre zarfını kapsamaktadır. 1 saniye toz serme süresinde ise, katman hızlı bir şekilde soğumuş ve mikroyapısı sütunlu β tanelerin arasında tamamen martenzit α' fazına dönüşmüştür.

4.3. Çok Katman ve Çok Taramalı Sayısal Modelleme

Birinci katmanın lazer taraması tamamlandıktan sonra, sonraki katmanlar z yönünde eklenmiş ve bu eklenen katmanlar taranarak, birinci katman üzerindeki P noktası üzerindeki termal etkileri değerlendirilmiştir (Şekil 4.9 ve 4.10). Sonraki katmanlar sırasıyla tarandıkça, ilk katmandaki P konumu, ilk katmanla benzer katman içi termal desenler yaşanmış, ancak etkinin yoğunluğu mesafeyle orantılı olarak kademeli azalmıştır. Bu işlemler, kademeli olarak azalan bir ısıtma işlemi gibi ilk katmanı etkileyerek, yüksek soğuma hızından kaynaklanan artık gerilmelerin azalmasına katkıda bulunmuştur. n'inci katmanlar, birinci katmana benzer bir -ön ısıtma, erime, son ısıtma- işlemlerine maruz kalmakta olup, sonraki katmanların taranmasının bir sonucu olarak katmanın tamamen yeniden eritilmesinin önünü açarak, ardışık katmanlar arasında sağlam bir ara yüzün oluşmasını sağlamıştır.



Şekil 4.9. S1 için ilk 10 katman taranmasında birinci katman üzerindeki P konumunun sıcaklık sonuçları



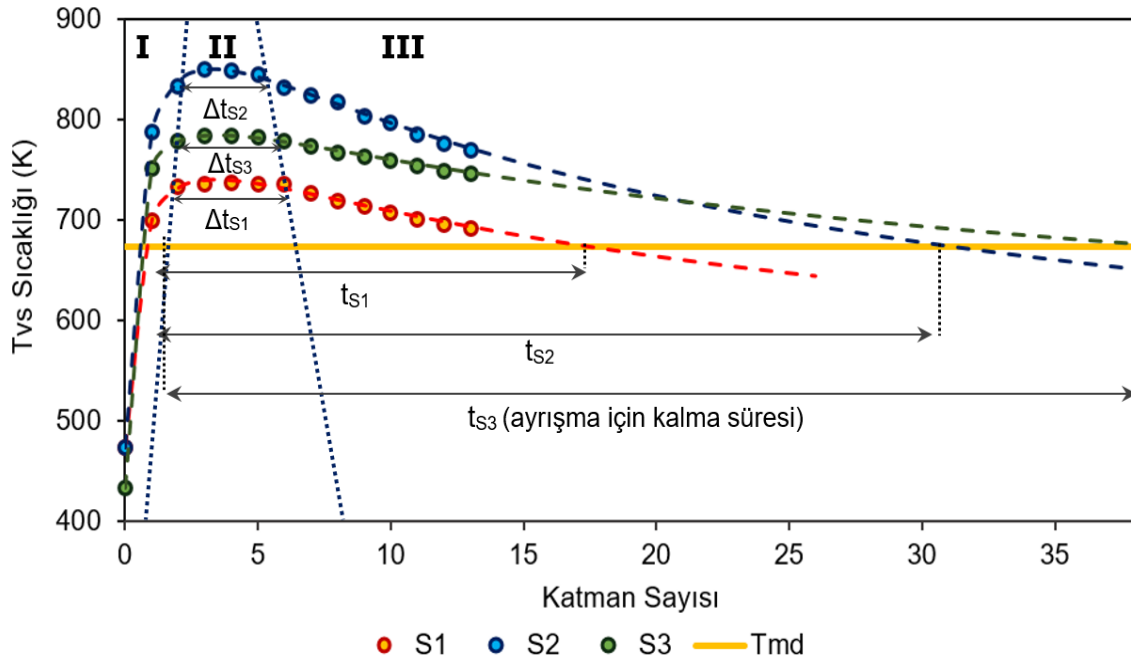
Şekil 4.10. S2 için ilk 10 katman taranmasında birinci katman üzerindeki P konumunun sıcaklık sonuçları

S1 ve S2 için her katmanın tarama süreleri sırasıyla 0,16 sn ve 0,24 sn olup, her ikisinde de katmanlar arası gecikme süresi (t_i) 1 saniye alınmıştır. Sırasıyla katmanlar serilip tarandıkça, ilk katmanda inişli-çıkışlı termal döngüler hesaplanmış olup, ulaşılan en yüksek sıcaklıklar (T_p) kırmızı çizgi ile vurgulanmıştır. Genel olarak, T_p sıcaklıkları 4. katmana kadar önemli ölçüde düşerken, bu azalma, sonraki katmanlarda (kırmızı çizgi) yavaşlamıştır. Bunun nedeni, z yönündeki mesafe arttıkça malzeme özelliklerine bağlı olarak iletimin azalmasıdır. Ayrıca z-yönünde artan mesafeden dolayı, bitişik ve ana taramalar nedeniyle oluşan tepeler birbirine yaklaşmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, tüm katmanlar ve taramalar sürecince S2 nin ulaştığı T_p sıcaklıkları S1'den daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi ise, S2 de seçilen katman kalınlığının S1'den daha yüksek olmasına bağlanmıştır. Ayrıca, S2 nin tarama hızının daha yavaş olması, bir birim karedeki lazer maruz süresini artırmış ve böylelikle de sıcaklıkları yükseltmiştir. Katman sayısının bir fonksiyonu olarak modeldeki ilk 10 katmanın taranması sonucu birinci katman sonuçları üzerinde hesaplanan T_p sıcaklıkları korelasyonla ilişkilendirilerek aşağıdaki ifadeler türetilmiştir;

$$T_{PS1}=473+6382,6n^{-0,895} \quad \text{ve} \quad T_{PS2}=473+7647,6n^{-0,924} \quad (4.2)$$

burada n katman sayısı olup, T_p 'nin birimi K'dir. n değeri ne kadar artarsa artsın tepe sıcaklığı ortam sıcaklığının (473 K) altına düşmeyeceğinden, n sonsuza giderken ekstrapolasyon ifadesi 473 K'ye yakınsamalıdır. Bu nedenle, Eş. 4.2 hem modelde hesaplanan T_p sıcaklıklarına uymakta hem de rasyonel sınırlara (T_{amb}) yaklaşmaktadır. Bu ifadeler pragmatik olup, ifadelerin amacı, termal döngüler nedeniyle birinci katmanın T_p sıcaklıklarının bir güç fonksiyonu (matematik tanımı) ile azaldığını göstermektir. Ayrıca, 10. katmandan sonra T_p sıcaklıklarının hareketini kabaca tahmin etmek için de bu ifadeler kullanılabilir.

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da, üst katmanlar tarandıkça, birinci katmanda depolanan sıcaklıklar (T_{vs}) yeşil kesikli çizgi ile vurgulanmıştır. Şekil 4.11'de ise bu sıcaklıkların katman sayısına göre değişimi gösterilmiştir. İlk katmanın taranması ve soğuma süresinin ardından P konumundaki T_{vs} sıcaklıkları S1 için 699 K ve S2 için 788 K olarak hesaplanmıştır. Bu sıcaklıklar martensit ayrışmasının başlangıç sıcaklığını (T_{md} , 673 K) aşmakta olup, ayrışmanın ilk şartını sağlamıştır. Ancak, katılaşma sırasında meydana gelen yüksek soğuma hızı > 410 K/s nedeniyle, birinci katmanda martensit α' mikroyapısı oluşmuştur. Sonraki katmanlar (2. ve 3. katman) ekledikten sonra, ısı giriş oranı ısı dağılımından daha yüksek olduğundan, P konumundaki sıcaklık, belirli bir değere (T_c , S1 için ~ 736 K ve S2 için ~ 849 K, I. Bölge) ulaşmaya kadar kademeli olarak artmış, daha sonra bu sıcaklıklar bir süre stabilize (Δt_{s1} ve Δt_{s2} , II. Bölge) devam etmiştir. Sonraki katmanlarda, mesafeden dolayı, ısı girdisi ısı dağılımını geçemeyerek, T_{vs} sıcaklığı kademeli düşmüştür (III. Bölge). Grafikte, S2 nin T_{vs} sıcaklık değerleri S1 den daha yüksek olup, daha uzun süre T_{md} sıcaklığının üzerinde devam etmiştir. Eğer T_c sıcaklığı T_{md} ' den daha yüksek olursa ve sonraki n'inci katman, ayrışma için yeterince uzun kalma süresi sağlamak üzere biriktirilirse, ilk katmanın mikroyapısı α' dan $\alpha + \beta$ 'ya dönüşümü sağlanabilmektedir. S1 ve S2 için birinci katmanın sıcaklıkları, sırasıyla 18 ve 30 sonraki katmanın taranmasına kadar T_{md} sıcaklığının üzerinde seyretmiştir. Bu süreler, ayrışma için kalma süresi olup, $t_{s1} \sim 20$ sn ve $t_{s2} \sim 36$ s'dir. S2'nin daha yüksek katman kalınlığına ve daha uzun lazere maruz kalma süresine sahip olması, katmanların daha yüksek sıcaklıklara ulaşmasını sağlamış, böylelikle de S2'nin ayrışma için kalma süresini artırmıştır. Bu da, S2'nin S1'e kıyasla çok daha kaba $\alpha + \beta$ lata yapısını açıklamaktadır [9]. Ayrıca, literatürdeki deneysel sonuçlarla olan uyum, oluşturulan modelin doğruluğu ve gerçekliğini göstermiş olup, modelle gerçek sonuçlar üretebileceği görülmüştür.



Şekil 4.11. S1, S2 ve S3'ün birinci katman için sonraki katmanların sayısına bağlı olarak T_{vs} sıcaklık değişimi

Bu modelleme ile, 30 μm katman kalınlığı ve daha düşük tabla sıcaklığı uygulamaları için, çeşitli parametre setleri nümerik olarak hesaplanarak belirlenmiştir. Belirlenen parametre setlerinden birisi de S3 parametre seti olup, parametrelere ilişkin değerler Tablo 4.3'te verilmiştir. S3'ü belirlerken; S1 ve S2 ile aynı ara katman süresi (t_s) ve tarama alanı (20mm²) kullanılmıştır. S3 parametreleri hesaplanırken, S1 ve S2'de elde edilen termal desenlere benzer sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır (Şekil 4.9-11). S3 için aynı tarama alanını karşılamak için, bindirme mesafesinden dolayı 81 bitişik tarama izli modellenmiştir. Daha az katman kalınlığı daha yüksek soğuma hızına neden olmaktadır. Ayrıca, S1 ve S2 den daha düşük tabla sıcaklığında parametre seti hazırlanmaktadır. Bu negatif durumlar göz önünde bulundurularak, S1 ve S2'de elde edilen T_{vs} sıcaklıklarına yakın sonuçlar elde edebilmek adına, S3 te daha yüksek bir enerji yoğunluğuna sahip olacak parametre seti tasarlanmıştır. S3 parametre setindeki modelleme sonuçları karşılaştırıldığında, S3'ün T_{vs} sıcaklıkları, S1 ve S2'nin T_{vs} sıcaklıklarının arasında elde edilmiştir (Şekil 4.11). Daha az katman kalınlıklarında, aynı sayıda ara katmanlardan iletilen ısı miktarı daha fazla olduğu için, üst katmanlar eklendikçe iletin ısı miktarı arasındaki fark da daha azdır. Bu durum, S3'ün III. Bölgesinde T_{vs} sıcaklıklarının daha yavaş düşmesine ve S3'ün T_{md} sıcaklığının üzerinde daha uzun süre kalmasına neden olmuştur (Şekil 4.11).

Çizelge 4.3. S3 parametre değerleri

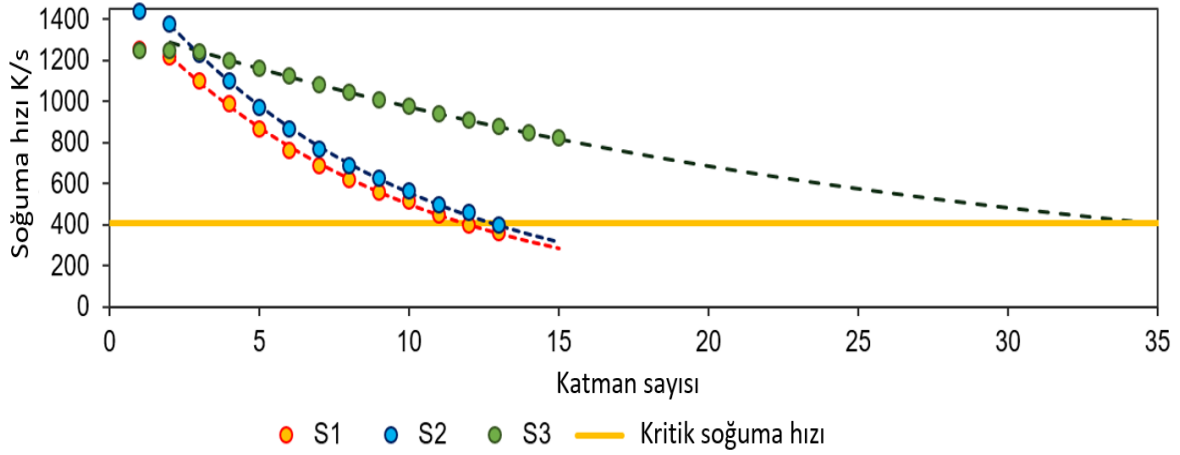
Numune	Güç (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Nom. Katman Kalınlığı (μm)	Lazer Çapı (μm)	Bindirme Mesafesi (μm)	Tabla Sıcaklığı (K)	Enerji Yoğunluğu (J/mm^3)	τ	λ_z
S3	170	700	30	85	60	433	134,92	0,66	1

On üçüncü katmandan sonra P noktasındaki değişim monoton bir davranış göstermiş ve hesaplama maliyeti aşırı artmıştır (her parametre seti için hesaplama 100 saati aşmaktadır). Bu sebeple, on üçüncü katmandan sonra ekstrapolasyon yapılarak hesaplama maliyeti düşürülmüştür. İlk katman için hesaplanan T_{vs} sıcaklık sonuçları (Şekil 4.11'deki noktalar) korelasyonla ilişkilendirilerek, katman sayısının bir fonksiyonu olarak $R=0,9987$ toleransla aşağıdaki denklemler türetilmiştir;

$$\begin{aligned}
 T_{vs_{S1}} &= 473 + \frac{9095,5}{n} e^{\left[-0,5 \left(\frac{\ln\left(\frac{n}{338,5}\right)}{2,14} \right)^2 \right]} \\
 T_{vs_{S2}} &= 473 + \frac{9009,2}{n} e^{\left[-0,5 \left(\frac{\ln\left(\frac{n}{171,5}\right)}{1,98} \right)^2 \right]} \\
 T_{vs_{S3}} &= 433 + \frac{59160}{n} e^{\left[-0,5 \left(\frac{\ln\left(\frac{n}{8131}\right)}{2,78} \right)^2 \right]}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

burada n katman sayısı olup, T_{vs} 'nin birimi K'dir. Bu ifade hem modelde hesaplanan T_p sıcaklıklarına uymakta olup hem de n sonsuza giderken S1 ve S2 için 473 K'ye (T_{amb}) ve S3 için 433 K'ye yakınsamaktadır. Pragmatik bu ifadelerle, on üçüncü katman sonraki katmanlarda birinci katmanın T_{vs} sıcaklıkları $R=0,9987$ doğruluk oranıyla tahmin edilebilmektedir.

T_{vs} sıcaklığı T_{md} sıcaklığının üzerinde olduğu sürece ayrışma için ilk koşul sağlanmıştır. Burada, T_{vs} sıcaklığının T_{md} sıcaklığının üzerinde kaldığı süre de büyük önem arz etmektedir. Öte yandan, martenzit ayrışması için, katmanın soğuma hızının kritik soğuma hızından (410 K/s) daha düşük olmasına da ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 4.12'de, birinci katman için sonraki katmanların sayısına bağlı olarak soğuma hızları gösterilmektedir.



Şekil 4.12. S1 ve S2'nin birinci katman için sonraki katmanların sayısına bağlı olarak soğuma hızları

S1, S2 ve S3'ün ilk katmanın soğuma hızları başlangıçta çok yüksektir. S1 ve S2 için, sonraki katmanların sayısı arttıkça soğuma hızları süratle azalmaktadır. S3 için ilk katmanın soğuma hızları ise, daha düşük katman kalınlığına sahip olması nedeniyle, S1 ve S2'ye göre daha yavaş azalmaktadır. Bu nedenle S3, kritik soğuma hızına S1 ve S2'den çok daha geç ulaşmaktadır. S3'ün T_{vs} sıcaklıkları T_{md} sıcaklığının üzerinde daha uzun süre devam etse de, soğuma hızının kritik soğuma hızının altına daha uzun süre sonra düşmesi ayrışmayı geciktirmektedir. Ardışık 13 katmanın taranmasıyla, ilk katmanda hesaplanan soğuma hızları (Şekil 4.11 'deki noktalar) arasında korelasyonla ilişkilendirilerek, katman sayısının bir fonksiyonu olarak aşağıdaki denklemler türetilmiştir;

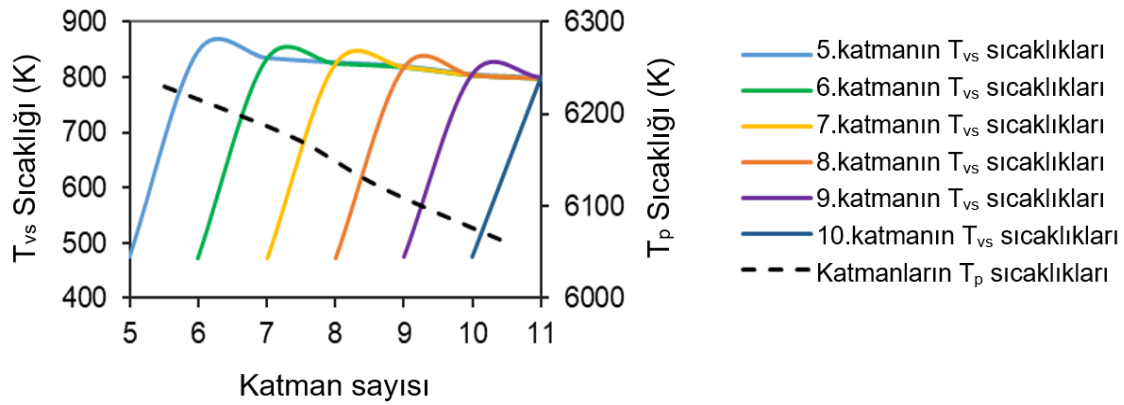
$$\begin{aligned} CR_{S1} &= 1529,6e(-0,112n), \quad CR_{S2} = 1726,1e(-0,114n) \quad n > 1 \\ CR_{S3} &= 1383e(-0,035n) \quad n > 2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

burada n katman sayısı olup, CR birimi K/s 'dir. Bu ekstrapolasyon ifadesi, modelde hesaplanan CR soğuma hızları ile (Şekil 4.11'deki noktalar) örtüşmektedir. İlk onüç katmanda S3 parametre setinin soğuma hızı istenilen soğuma hızına inememiştir. Bu ifadeler kullanılarak, hem S3 soğuma hızının kritik soğuma hızına indiği katman sayısı hesaplanmış, hem de tüm parametre setleri için sonraki katmanlar için gerçekleşecek soğuma hızları tahmin edilebilmiştir.

Soğuma hızları kritik soğutma hızına düştüğünde (sırasıyla S1, S2 ve S3 için 11., 12. ve 34. ardışık katmanı takiben), ilk katmanın martensite dönüşümü de ($\beta \rightarrow \alpha'$) önlenmiş

olmaktadır. Sonuç olarak, taranan sonraki katmanların sayısı arttıkça, biriken katmanın soğuma hızı kademeli olarak azalarak, α 'nın tamamen $\alpha + \beta$ 'ya dönüşmesini sağlamıştır.

Çok boşluklu destek yapıların termal iletkenlikleri düşüktür. Bu sebeple, ısı iletimini keserek üst katmanlarda daha çok ısı birikimine neden olmaktadır. Katılaşmış katmanların yüksek iletkenliği ise, emilen ısının doğrudan katılaşmış katmanlardan alt tabakaya doğru akmasına neden olmaktadır. Ara katmanlar destek yapısından uzak oldukları için, destek yapının avantajlarından yararlanamamaktadırlar. Sonraki katmanlar eklendikçe, desteğin üst katmanlar üzerindeki ısı etkisi aralarındaki mesafeyle orantılı olarak azalmaktadır. Bu bağlamda, ara katmanların termal analizleri araştırılmıştır. Analiz de, S2 parametre setinin taranması sırasında, 5 den 10 a kadarki katmanların sıcaklık sonuçları değerlendirilmiştir.



Şekil 4.13. S2'nin sonraki katmanların taranmasına bağlı olarak n'inci katmanlarının sayısal T_{vs} ve T_p sıcaklıkları

Yüksek ısı dağılımı nedeniyle, n'inci katmanların ulaştığı T_p sıcaklıkları, birinci katmanın ulaştığı T_p sıcaklığından (8202 K) daha düşük olup, n'inci katman arttıkça bu değer kademeli olarak azalmıştır. Her katmanın T_{vs} sıcaklığı sadece kendi taranmasında artış göstermiştir. Bu ara katmanların üzerine eklenen katmanların taranmasında ise, T_{vs} sıcaklıklarının ilk katmanın aksine (bir süre stabilize devam etmeden) direkt kademeli düşüşe geçmiştir. Bu durum, enerji girdisinin ısı dağılımından daha düşük olmasından kaynaklanmıştır. Ayrıca, yüksek ısı dağılımı nedeniyle bitişik katmanların T_{vs} sıcaklıkları birbiriyle uyum sağlamış olup, benzer değerler almıştır (± 1 K). Bu nedenle de, kendi taranmasından sonraki üst katmanların taranmasında ara katmanların T_{vs} sıcaklıkları üst üste çakışmıştır (Şekil 4.13).

Her katmanın T_{vs} sıcaklıkları T_{md} sıcaklığından daha yüksek olup, üzerine eklenen katmanların taranması ile, martensit ayrışması için yeterince uzun kalma süresi sağlamaktadır. Böylelikle, biriken katmanın soğuma hızı kademeli olarak azalarak, α' dan $\alpha+\beta'$ ya dönüşümü sağlanmıştır.

4.4. Deneysel Doğrulama Çalışmaları

Nümerik hesaplanarak belirlenen S3 parametre seti için deneysel doğrulama çalışması yapılmıştır. Numune, Gazi Üniversitesi Eklemeli İmalat Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi (EKTAM)'ndeki Ermaksan Makine A.Ş. tarafından geliştirilen Enavision 250 SLE makinesinde üretilmiştir (Resim 4.2). Enavision 250 SLE makinesi, 1071 nm dalga boyuna sahip 500 W sürekli modda fiber lazere sahiptir. Üretim işlemi, O_2 seviyesi 50-100 ppm aralığında tutularak yüksek saflıkta Argon gazı ile doldurulmuş ortamda gerçekleştirilmiştir.

Partiküllerin ilk toz kalitesi (boyut, boyut dağılımı vb.) nihai ürün kalitesini etkileyen önemli bir faktördür. Bu sebeple, iyi akışkanlık sağlamak için bu çalışmada dar partikül boyutu dağılımına ve neredeyse küresel bir şekle sahip olan bir toz kullanılmıştır. Plazma atomizasyon yöntemiyle üretilen Ti-6Al-4V tozu (ASTM B348, grade 5 standartları) AP&C (GE Additive, Canada) firmasından tedarik edilmiş olup, ortalama toz boyutu 15-45 μm arasındadır. Tablo 3.4'te, kullanılan toz hakkında ayrıntılı bilgiler gösterilmiştir.



(a)



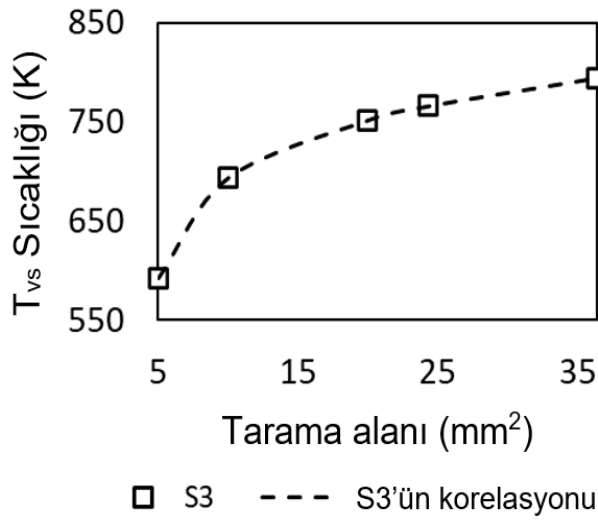
Resim 4.2. Enavision-250 eklemeli imalat makinesi (a) ve kontrol ünitesi ekranı (b)

Çizelge 4.4. Ti-6Al-4V (15-45 μm) metal toz özellikleri

Özellik	
Sınıf	Grade 5
Görünür Yoğunluk	2,5 g/cm ³
Parça Boyut Dağılımı	
D10	20 μm
D50	33 μm
D90	44 μm
Akışkanlık	
Hall Flow Test	30 s
Carney Flow Test	10 s

Yüksek tabla sıcaklığının martenzit ayrışması üzerindeki olumlu etkileri bilinmektedir [9,50]. Ancak, üretimde kullanılan SLE makinesinin tabla sıcaklığı 160°C'nin üzerine çıkartıldığı takdirde tablada sıkışma meydana geldiğinden, S3 parametre kombinasyonunda tabla sıcaklığı 160°C (433 K) olarak alınarak hesaplanmıştır. Ayrıca hesaplamalarda, S1 ve S2'deki koşulları sağlamak için, S3'ü tasarlarırken katmanlar arası gecikme süresi S1 ve S2'deki süre (1 s) ile aynı alınmış olup, buna göre parametre seti oluşturulmuştur. Ancak, kullanılan SLE makinesinin toz yayma mekanizmasının yavaş olması ve toz serme bıçağının ısıya duyarlı olması nedeniyle katmanlar arası gecikme süresi, üretim sırasında

değiştirilememiş ve 13 s alınmıştır. Bu nedenle 13 s soğuma süresinin negatif etkisini azaltmak için, parçada kütle artırımına yönelerek parça boyutları büyültülmüştür. Çünkü daha önceki deneysel çalışmalarda ve model uygulamalarında, taranan alanın artması katmandaki T_{vs} sıcaklığında artışa neden olmaktadır. Ancak, yapılan nümerik çalışmalar, T_{vs} sıcaklığını arttırmada parça boyutunun limitleri olduğu, belli bir birim kareden sonra sıcaklık artırım etkisinin kademeli kaybolduğunu da göstermiştir. Çünkü, tarama alanının büyümesi enerji girişini arttırsa da, tarama izleri arasındaki mesafenin artması, süreden dolayı daha çok soğuması vb. parametrelerin ortaya çıkması sebebiyle etkisi azalmaktadır.



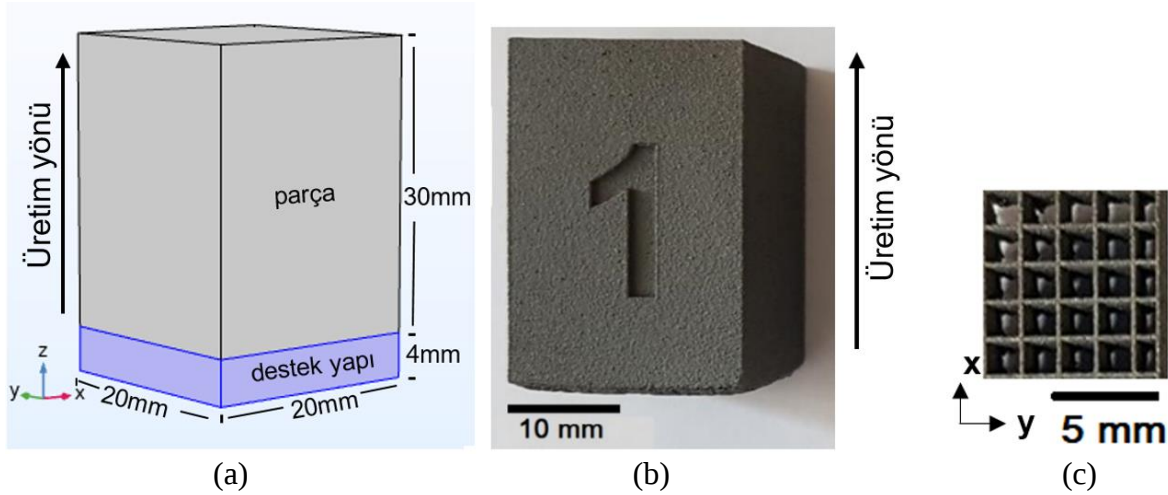
Şekil 4.14. İlk katmanda 1 s ara katman süresi için, tarama alanına göre hesaplanan T_{vs} sıcaklıkları

S3 parametre seti kullanılarak, 5 mm² den 36 mm² kadar tarama alanlarında sayısal hesaplama yapılarak, her tarama alanı için 1 s lik soğuma süresinde T_{vs} sıcaklıkları hesaplanmıştır (Şekil 4.14). Bu T_{vs} sıcaklıkları birbiriyle ilişkilendirilerek $R=0,9807$ toleransında korelasyon ifadesi türetilmiştir. Bu korelasyona göre, 400 mm² tarama alanlı ilk katman için T_{vs} sıcaklığı 945 K olarak hesaplanmıştır. Sonraki katmanların eklenmesiyle bu sıcaklığın kademeli olarak artacağı ve bir süre stabilizesini koruduktan sonra da kademeli bir düşüş yaşayacağı ön görülmüştür. Böylelikle, martensit ayrışmasının başlamasında, 13 s'lik bir soğuma süresi için 400 mm² tarama alanının yeterli olabileceği tahmin edilmiştir.



Resim 4.3. Üretim haznesi (a) ve S3 numunesinin lazerle taranması (b)

S3 numunesi ($20 \times 20 \text{ mm}^2$ kesit alanlı ve 30 mm yükseklikte, Resim 4.4.a), Tablo 4.3'teki parametreler kullanılarak, 4 mm yüksekliğinde ve % 75 boşluk oranında blok geometrili destek yapı üzerine inşa edilmiştir (Resim 4.4). Üretim haznesi ile üretim sırasındaki tarama görüntüsü Resim 3.3'te gösterilmiştir. Üretim bittikten sonra, destek yapıyı numune tabladan sökölümüş, daha sonra da numune destek yapıdan kesilerek çıkarılmıştır (Resim 4.4.b.c) Üretim öncesi ve sonrası numuneye herhangi bir ısıt işlem ve/veya başka işlemler uygulanmamıştır.

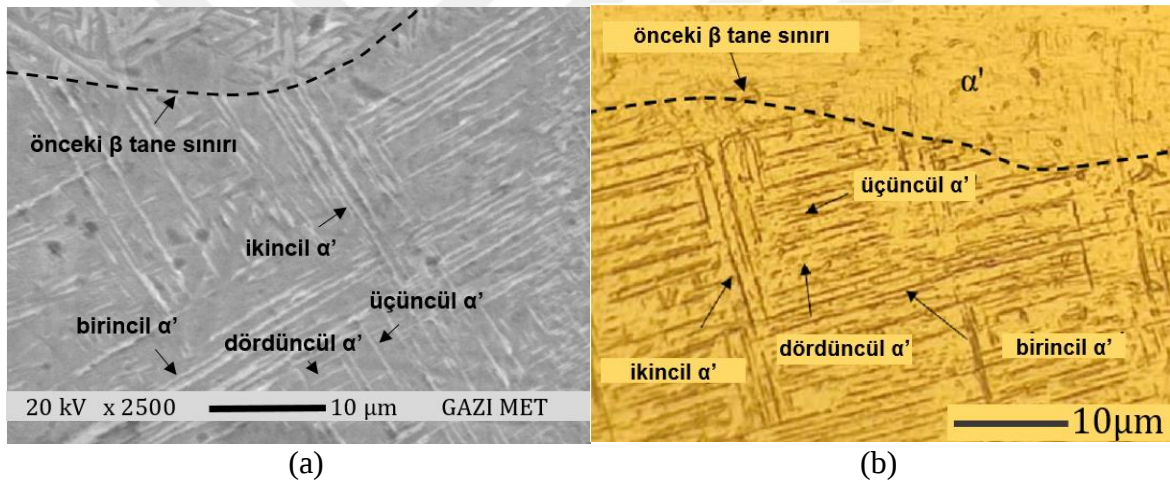


Resim 4.4. S3 numunesi ve destek yapının geometrisi (a), üretilen S3 numunesi (b) ve %75 boşluklu destek yapının xy-kesiti görüntüsü (c)

Üretilen S3 numunesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi laboratuvarında y eksen uzunluğunun orta noktasından yapı yönünde (xz-boyunca) kesilmiş ve görüntülenecek yüzey zımpara kâğıdı ile parlatılmıştır. Daha sonra da zımparalanan yüzey, Kroll's çözeltisi

ile (3ml HF, 6ml HCL, 5ml HNO₃ ve 190ml H₂O kullanılarak) dağlanmıştır. Deneme-yanılma yoluyla, parça yüzeyi mikro düzeyde görüntülenecek hale getirilmiştir. Yüzey üzerinde, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop (OM) kullanılarak mikroyapı analizi yapılmıştır.

S3 numunesinin optik mikroskop görüntülerine göre bakıldığında, hacmin çoğunda sütunlu β taneleri arasında iğnems α' martenzit mikroyapıları gözlemlenmiştir. Bu durum, S3 numunesinde martenzit ayrışmasının gerçekleşmesi için gerekli tüm koşulların yerine getirilmediğini göstermektedir. Katmanlar arası soğuma süresi (13 s) çok uzun olduğu için, katmanların T_{vs} sıcaklıkları parçanın çoğu kısmında yeterli bir süre T_{md} sıcaklığının üzerinde tutulamamıştır.

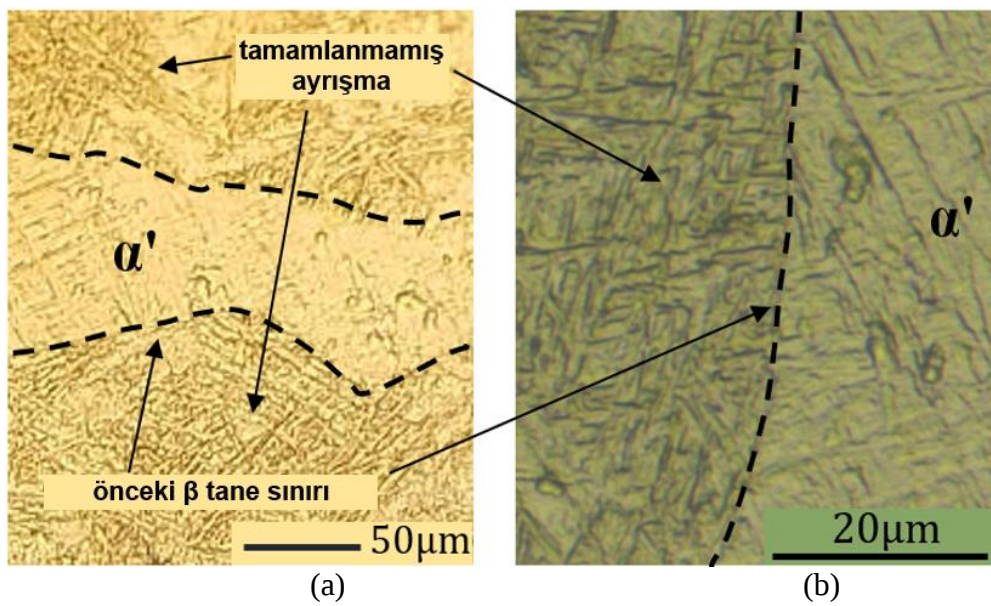


Resim 4.5. Parçanın çoğunda gözlemlenen iğnems martenzit α' mikroyapılarının SEM (a) ve optik mikroskop (b) görüntüleri

Optik mikroskop ve SEM görüntüleri incelendiğinde, sütunlu β taneleri arasındaki martenzit mikroyapıda hiyerarşik bir biçimde birincil, ikincil, üçüncül ve dördüncül α' martenzit fazlar tespit edilmiştir. Böyle bir hiyerarşik yapı elde edilmesinin sebebi, SLE de ardışık katmanların taranması sonucu oluşan termal döngülerdir (ısınma-soğuma). İlk taramalarda oluşan birincil martenzit yapılar, ardışık termal döngülerin etkisiyle büyümeye devam etmektedir. Birincil martenzitlerin, ana eksenleri onlarca mikrometre ve küçük eksenleri birkaç mikrometre olan nispeten kaba lamelli yapılardır. Bu birincil α' martenzit yapılarına dik veya paralel olan birçok ince ikincil α' martenzit yapıları (büyük eksenleri-bir düzine mikrometre ve küçük eksenleri-yüzlerce nanometre) bulunmaktadır. Sonraki katmanları takiben de, sırasıyla birçok çok daha ince üçüncül α' (birkaç mikrometre) ve

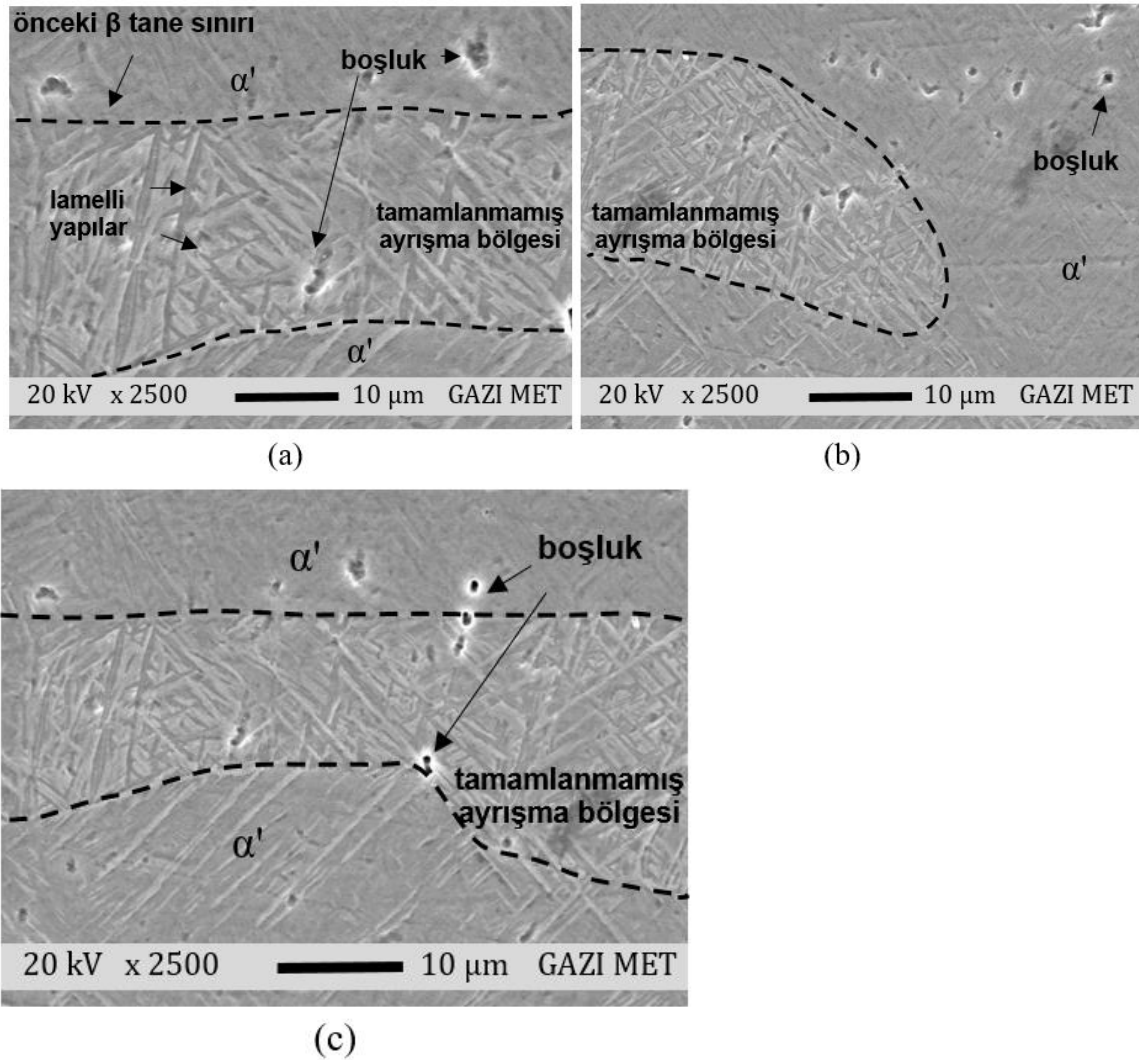
dördüncül α' martenzit (yüzlerce nanometre) mikroyapılar oluşmaktadır (Şekil 4.5). Birincil ve ikincil α' martenzitlerin nispeten daha kaba olması, bu yapıların, termal döngülerin erken aşamalarında çekirdeklenip büyüdüğünü ve sonraki termal döngüleri takiben de büyümeye devam ettiğini göstermektedir. Öte yandan, üçüncül ve dördüncül α' martensitlerin daha ince yapılı olmasının nedeni ise, bu yapıların termal döngülerin sonraki aşamalarında oluşması ve büyümelerinin daha önce çöktürülmüş α' martensitlerin (birincil, ikincil, vb.) sınırları ile sınırlandırılmış olmasından dolayı olduğu tahmin edilmektedir [72,73].

13 s soğuma süresinin etkisini azaltmak için kütle artırımına gidilse de, hacmin büyük çoğunluğunda ayrışma için yeterli olmamıştır. Bununla birlikte, martenzit ayrışması, numunenin farklı bölgelerinde β tane sınırları arasında başladığı görülmüştür. Parçanın merkezine yakın yerlerde ortaya çıkan bu bölgelerde, ayrışmanın başladığı ancak tamamlanmadığı görülmüştür (Resim 4.6). Bu bölgelerin merkez civarında ortaya çıkmasının sebebi, merkez bölgelerin kenarlara göre daha yavaş soğumasıdır. Ayrıca, orta katmanların alt katmanlardan daha düşük T_p sıcaklıklarına ulaşması da, orta katmanların soğuma hızını yavaşlatması da etkili olduğu düşünülmektedir. Buna ilaveten, kütle artırımı ile parça boyutlarının büyümesi, merkez ve kenarlar arasındaki mesafeyi arttırdığı için, kütle içerisindeki ısı iletiminin etkisi belli bir mesafeden sonra azalmakta ve kenarlara yeterli miktarda ısı gönderilemediği değerlendirilmiştir.



Resim 4.6. S3 parçasının yakın bölgelerinde optik mikroskop görüntüleri

Resim 4.7’de de, S3 parçasının merkezi bölgelerindeki martenzit ayrışmasının başladığı bölgelerin SEM görüntüleri gösterilmektedir. Bu görüntülerde, β tane sınırları arasındaki martenzit α' yapılardan bir kısmı, ayrışmanın başlaması için gereken koşulları yerine getirilebildiği, ancak tam çözünme için yeterli olmadığı gözlemlenmiştir. Bu mikroyapı, literatürdeki [9] tamamen ayrışamayan ve lamelli $\alpha+\beta$ ve α' martenzit karışımı olarak kalan görüntülerle uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Ayrışmaya başlayan bu fazlar, L/D oranı yaklaşık 10 olan mikrometre büyüklüklerinde lamelli yapılar şeklinde (Resim 4.7) olup, literatürde yer alan lamelli $(\alpha+\beta)+\alpha'$ yapıların boyutları ile de uyumlu olduğu görülmüştür [74].



Resim 4.7. S3 parçasının merkeze yakın bölgelerdeki SEM görüntüleri

Sonuç olarak, martenzitin ayrışmaya başladığı fakat tamamlanmadığı bölgelerin oluşmasının nedeni, bu bölgelerde T_{vs} sıcaklıklarının T_{md} sıcaklığının üzerine çıkması, ancak

ayırışma için yeterli süre boyunca T_{md} sıcaklığının üzerinde devam edememesidir (Resim 4.7). Ayrıca, bu bölgelerin oluşması, soğuma hızlarının kritik soğuma hızının (410 K/sn) altına düşmesinden kaynaklanmaktadır. Böylelikle, lamelli $\alpha+\beta$ yapıların düşük (30 μm) katman kalınlıklarında da üretilebileceği değerlendirilmiştir. Bunun için soğuma hızının düşürülmesi ve altlık sıcaklığının 200°C'ye çıkarılmasının da ayırışmaya önemli katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

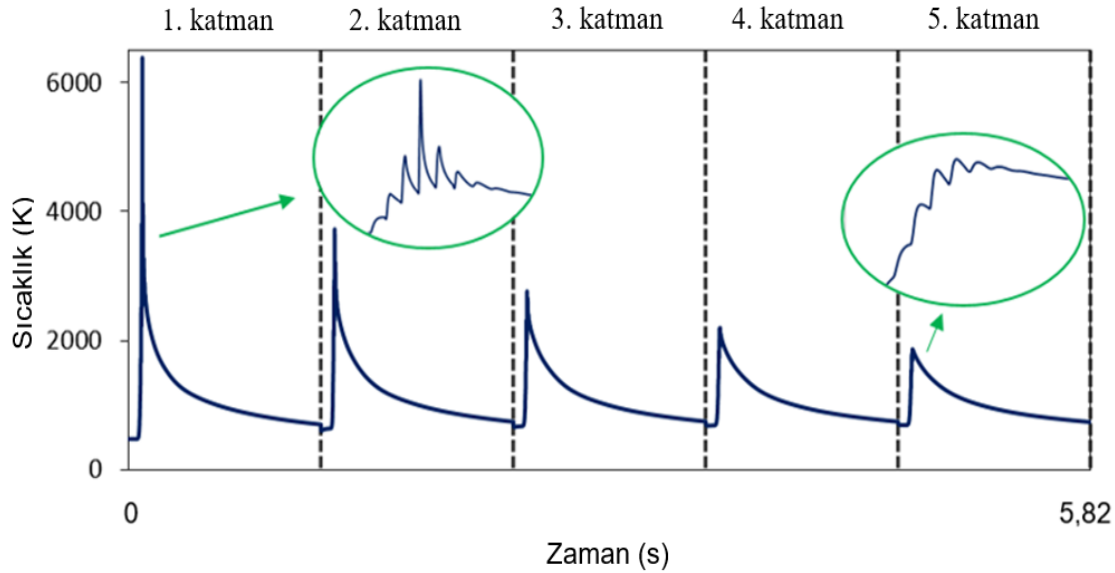
4.5. Destek Yapıların Termal Davranışa ve Martenzit Ayırışmasına Etkisi

Destek yapıları imal edilen parçanın akması ve bozulması gibi durumları önlemek için tercih edilmektedir. Bir diğer durum olarak, bu yapıların optimizasyonu ile mikroyapıyı uyarlamak mümkün olmaktadır. Parça ve alt tabla arasında oluşturulan destek yapıları, alt tabakaya ısı transfer oranını kontrol ettikleri için, bazı durumlarda istenilen bazı mekanik özelliklerin elde edilmesinde yardımcı bir rol oynayabilmektedir. Enerjinin çoğu destek yapılar boyunca alt tabla yönünde aktığı için, destek yapılar süreç kontrolü bağlamında önemlidir. Bu nedenle, uygun lazer parametreleri, soğuma süresi ve alt tabla sıcaklığının yanında, destek yapılarla da martenzit ayırışması gerçekleştirilebilir. Bu bölümde, destek yapı yüksekliği ve boşluk oranının katmanlar üzerindeki termal etkisi sayısal olarak analiz edilmiştir. Etkiyi göstermek için üç farklı boşluk oranı ve yükseklik test edilmiştir. Parametre seti (Çizelge 3.3), tasarlanan modelde deneme-yanılma ve literatür araştırmalarına göre belirlenmiştir. Katmanlar arası soğuma süresi 1 s ve her katmanda 20 mm^2 (41 tarama izi) tarama alanı alınmıştır.

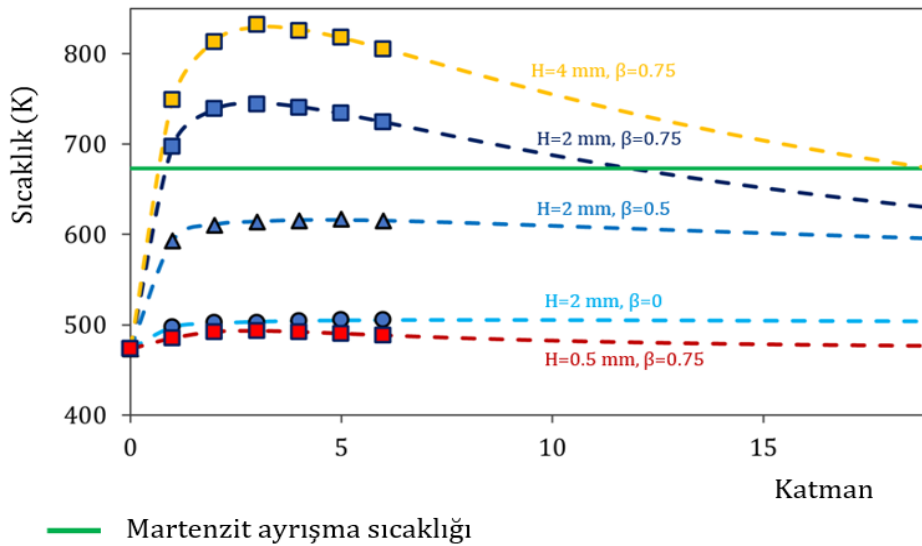
Destek yapının etkisini karşılaştırmak için 2 mm yükseklik için üç farklı boşluk oranı ($\beta = 0, 0,5, 0,75$) değerlendirilmiştir. 0,75 boşluk oranı için de iki farklı yükseklik ($H = 0,5 \text{ mm}, 4 \text{ mm}$) hesaplanmıştır. Altıncı katmandan sonra P noktasındaki değişim monoton bir davranış gösterdiğinden ekstrapolasyon ile hesaplama maliyeti düşürülmüştür. Sonuç olarak, altı yeni katman ile beş ayrı durum için toplam yaklaşık 100 saatlik hesaplama yapılmıştır.

Birinci katman üst yüzeyinin merkezindeki P noktasının beş katman taranmasıyla elde edilen ayrıntılı sıcaklık sonuçları, örnek bir durum olarak Şekil 4.15'te sunulmuştur. Görülebileceği gibi, sıcaklık periyodik olarak bitişik taramalardan ve ardışık katmanlardan etkilenmiş, ancak bu etki kademeli olarak azalarak bir süre sonra da kaybolmuştur. Tarama

sırasındaki ısınma ve soğuma sonrasındaki sıcaklık sonuçlarındaki fark kademeli olarak azalmıştır. Böylece her yeni katman için ulaşılan minimum sıcaklıklar (T_{vs}) birleştirilerek bir nevi sıcaklık köprüsü oluşturmuştur (Şekil 4.16).



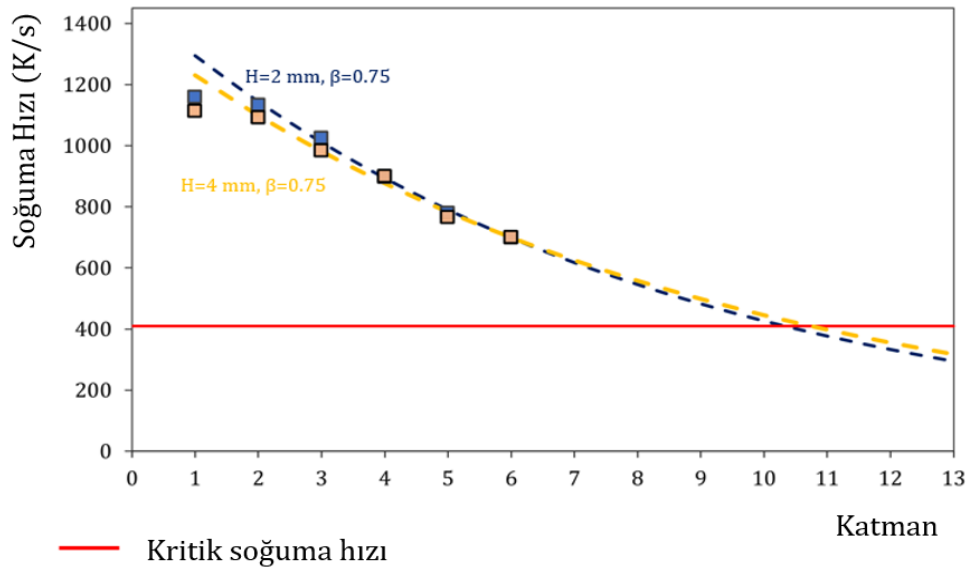
Şekil 4.15. P noktasının beş katman taranmasıyla hesaplanan sıcaklık sonuçları ($\beta = 0,75$; $H = 2 \text{ mm}$)



Şekil 4.16. Farklı destek yapıları için P noktasındaki T_{vs} sıcaklık sonuçları

Şekil 4.16'da görüldüğü üzere, 2 mm destek yapı yüksekliği için boşluk oranı arttıkça sistemde ısı birikimi sağlanabilmektedir. 2 mm 0,75 boşluk oranındaki destek yapıda, yeni katmanlar eklendikçe, birinci katmanda depolanan T_{vs} sıcaklığı artarak martenzit ayrışma sıcaklığının (T_{md}) üzerine geçmiş ve ayrışma koşullarından biri olan T_{md} sıcaklık şartını

sağlayabilmiştir. Öte yandan 0,75 boşluk oranı için destek yapı yüksekliğinin 0,5 mm'ye düşmesi sistemi ciddi şekilde etkilemiştir. Destek yapı yüksekliğinin azaltılması, destek yapı üzerinde ısı birikimi için belli bir değerden sonra yetersiz kalmıştır. Böylelikle, sistem hızla soğumuş ve yüzey sıcaklığına yaklaşmıştır. 4 mm 0,75 boşluk oranındaki destek yapıda ise, P noktasının T_{vs} sıcaklıkları tüm varyasyonlar arasında en yüksek değerleri almıştır (Şekil 4.16). Bu durum, destek yapı yüksekliği ve boşluk oranının önemini ortaya koymuştur. Sonuç olarak da, 0,75'lik bir boşluk oranı için, 2 ve 4 mm'lik destek yapı yükseklikleri, P noktasında martenzit ayrışmasını başlatılması için ilk şartı sağlayabilmiştir. 0,75 boşluk oranında 4 mm destek yapı yüksekliğindeki T_{vs} sıcaklıkları, 2 mm yüksekliğe göre, çok daha uzun T_{md} sıcaklığının üzerinde kaldığı için, ayrışma olasılığı çok daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.17. $\beta = 0,75$; $H = 2$ mm ve 4 mm durumları için soğuma hızları

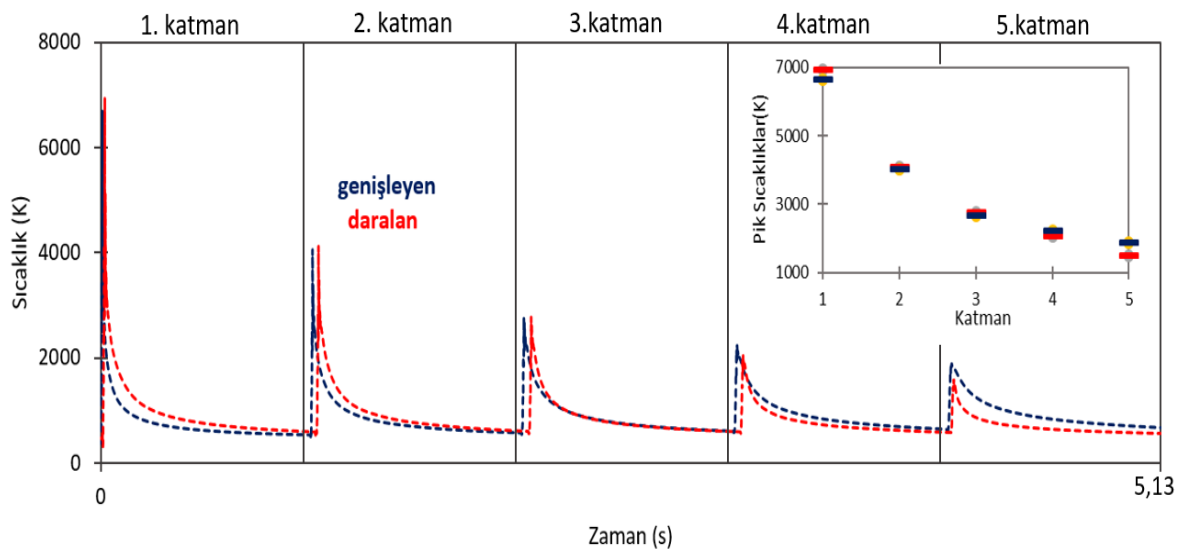
Martenzit ayrışma sıcaklığı ilk koşul olarak kabul edilebilirken, ayrışmayı garanti etmemektedir. Bu sıcaklık civarlarındayken, soğutma hızının da yeterince düşük olmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu kapsamda, sıcaklığın martenzit ayrışma sıcaklığının altına düşmeden önce, soğuma hızının kritik soğuma hızının da altına düşmesi gerekmektedir. Şekil 4.17'de martenzit ayrışmasının meydana gelebileceği iki durum için soğuma hızları verilmektedir. Görüldüğü gibi on birinci katmanda soğuma hızı kritik hızın altındadır. Her iki durumda da sıcaklık kritik sıcaklığın altına düşmediği için ayrışma meydana gelebilir. Ancak 4 mm kalınlık için daha rahat olacağı düşünülebilir. Çünkü bu koşulu ayrışma sıcaklığına ulaşmadan çok daha önce karşılamıştır.

Sonuç olarak, destek yapıları mikroyapı uyarlamasında yardımcı olabilmektedir. Bununla birlikte, bazı sınırlamalar ve dezavantajlar da dikkate alınmalıdır. Bunlardan en önemlisi ısı işlem sonucunda oluşabilecek bozulmalardır. Yüksek boşluk oranlı destek yapıların olumlu etkileri olmasına karşın, destek yapının bozulmaya uğramadan parçanın üretilmesini sağlayabilmesi de gerekmektedir. Bu bağlamda, ideal bir üretime ulaşmak için bu konunun detaylı ele alınması önem taşımaktadır. Ayrıca zaman ve toz kullanımı bağlamında da tasarım değerlendirmeleri yapılmasının da faydalı olacağı değerlendirilmiştir.

4.6. Üretim Oryantasyonunun Termal Davranışa ve Martenzit Ayrışmasına Etkisi

4.6.1. Üretim yönünde daralan ve genişleyen kesit alanların termal yapısı

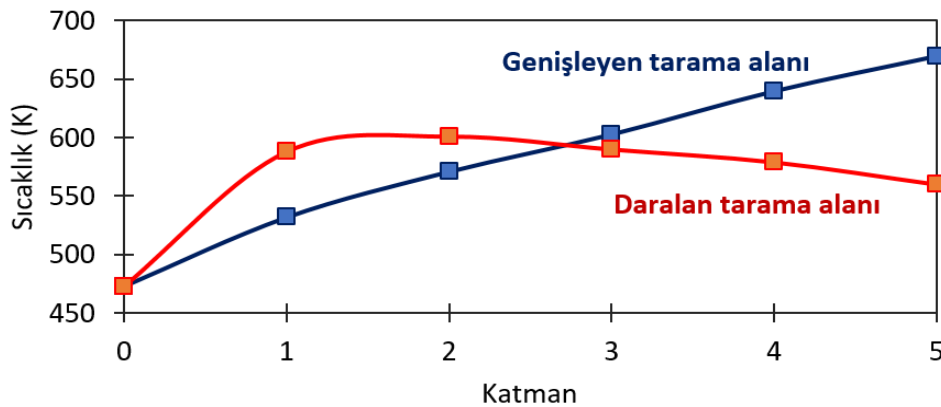
Üretim oryantasyonunun etkisini belirlemek için, aynı geometriye sahip iki parça, üretim yönünde tek eksenle genişleyen ve daralan olarak modellenerek, katmanlardaki termal sonuçlar analiz edilmiştir. Genişleme yöneliminin tarama alanı 5 katman boyunca artan ($5 \rightarrow 13$ tarama izi), daralma yöneliminin tarama alanı ise 5 katman boyunca azalan ($13 \rightarrow 5$ tarama izi) olacak şekilde tasarlanmış olup, taranması sürecinde hesaplanan, birinci katmandaki P noktasının ayrıntılı termal geçmişi Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Beş katmanlı iki durum için, simülasyon süresi toplamda 6 saat sürmüştür.



Şekil 4.18. Daralan ve genişleyen yapılar için 5 katmanın taranması sonucu birinci katmandaki P noktasının sıcaklık sonuçları

Şekil 4.18’de görüleceği üzere, birinci katmandaki P noktasının sıcaklığı hiyerarşik olarak ardışık tarama izlerinden ve ardışık katmanlardan etkilenmiş olup, bu etki mesafeyle orantılı olarak giderek azalmıştır. Taranan katmanların P noktasına olan mesafesi arttıkça, P noktası sıcaklığındaki sıçramalar da azalmıştır. İlk katmanlarda, daralan yapının genişleyen yapıdan daha çok tarama izine sahip olmasından dolayı, eriştiği maksimum sıcaklıklar da daha yüksek olmuştur. Ancak sonraki katmanlarda, genişleyen yapıda tarama izinin giderek artması, daralan yapıda ise paralel olarak azalmasıyla, genişleyen yapının eriştiği maksimum sıcaklar daralan yapıya yetişmiş ve ilerleyen katmanlarda da geçmiştir.

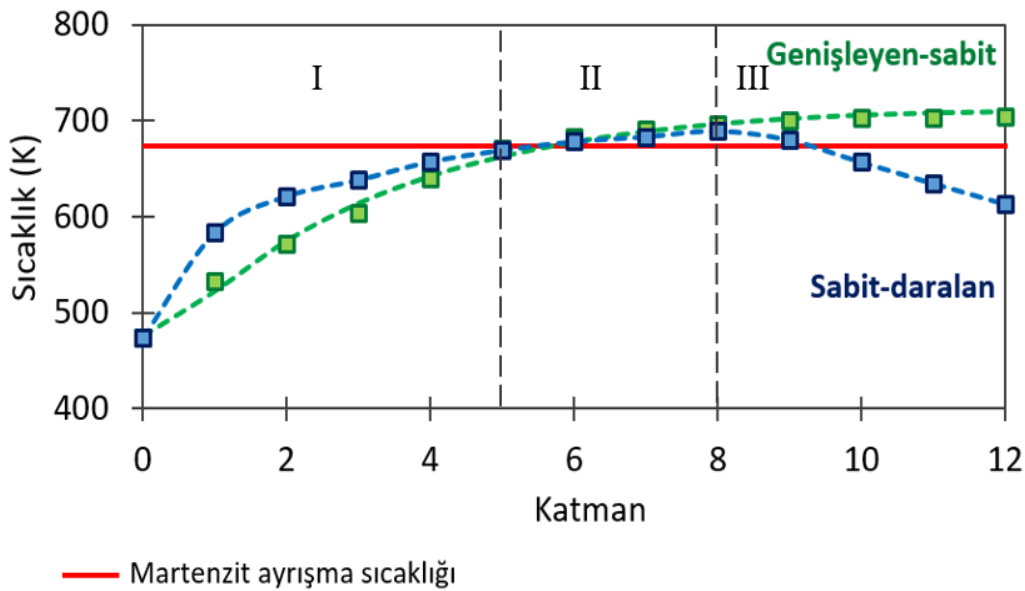
Birinci katman, sonraki katmanlarda meydana gelen termal döngülerden (ısınma-soğuma) etkilenmiştir. Soğuma sonrası birinci katmanda depolanan sıcaklıkların birleştirilmesiyle bir tür ısı köprüsü olduğu gözlemlenmiştir. Daralan ve genişleyen oryantasyonlar için her ısınma-soğuma işleminden sonra birinci katmanda depolanan sıcaklıklar (T_{vs}) Şekil 4.19’da gösterilmiştir. Tarama alanındaki sürekli artış sayesinde, genişleyen yapıda katmana uygulanan toplam enerji yükselmiş ve bu da, P noktasında depolanan sıcaklıkları sürekli artırmıştır. Öte yandan, daralan yapıda, daha yüksek tarama alanı nedeniyle ilk başlarda T_{vs} sıcaklıkları daha yüksek çıkmıştır. Ancak, her yeni katmanda tarama alanının sürekli azalması nedeniyle, katmana uygulanan toplam enerji azalmış ve bu da T_{vs} sıcaklıklarını düşürmüştür. Böylelikle, aynı geometrinin farklı üretim yönelimleri karşılaştırıldığında, aynı katmanlarda depolanan sıcaklıkların farklı olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda, genişleyen yapı yönünün (ısı akışının tersi) sıcaklık depolaması açısından daha faydalı olduğu belirlenmiştir. Isı akışı yönündeki daralmalar, alt katmanlarda sıcaklık artışına sebebiyet vermiştir.



Şekil 4.19. Daralan ve genişleyen parçalar için 5 katmanın taranması sonucu birinci katmandaki T_{vs} sıcaklıkları

4.6.2. Üretim oryantasyonunun martenzit ayrışmasına etkisi

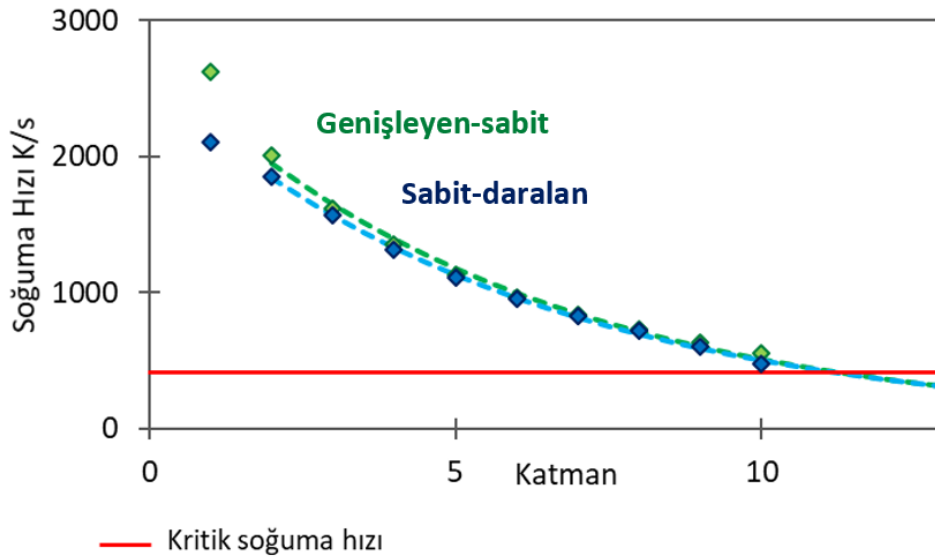
Üretim oryantasyonunun martenzit ayrışması üzerindeki etkilerini incelemek için modellenen 12 katmanlı iki parçanın birinci katmanında depolanan sıcaklık (T_{vs}) sonuçları Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Bu parçalar yedi katmanlı sabit tarama alanlı ve beş katmanlı genişleyen/daralan tarama alanlı olup, toplamda 12 katmanlı aynı geometrilerdir. I. bölgede (ilk beş katman), SD (sabit-daralan en kesitli)’nin tarama alanı sabitken (13 tarama izi), GS (genişleyen-sabit en kesitli)’nin tarama alanı ise her yeni katmanda 5’den 13’üncü tarama izine doğru artarak üretim gerçekleştirilmiştir. Bu bölgede, iki durum için tarama izi sayısına bağlı farklı T_{vs} sıcaklıkları sonuçları elde edilmesine rağmen, beş katman taranması sonucunda, bu iki durumun T_{vs} sıcaklıkları birbirine çok yakın sonuçlara ulaşmıştır. II. bölgede, her iki durumda da aynı tarama alanına (tarama izi sayısı aynı) devam edildiğinden benzer T_{vs} sıcaklık sonuçları hesaplanmıştır. Son olarak ise, III. bölgede (son beş katman) her yeni katman için SD’nin tarama alanı azaldığından (13→5 tarama izi), depolanan sıcaklık değerleri kademeli olarak azalmıştır. GS’nin tarama alanı sabit (13 tarama izi) olduğu için ise, T_{vs} sıcaklıkları sabit değerlerde devam etmiştir.



Şekil 4.20. SD ve GS için 12 katmanın taranması sonucu birinci katmandaki T_{vs} sıcaklıkları

Aynı geometriye sahip olmasına rağmen, SD üretim oryantasyonlu parçanın birinci katmanı kısa bir süre T_{md} sıcaklığının üzerinde kalırken (martenzit ayrışması için yetersiz), GS üretim oryantasyonlu parçanın birinci katmanı T_{md} sıcaklığının üzerinde uzun süre

devam edebilmiştir. Burada, GS'nin martenzit ayrışması için ihtiyaç duyulan birinci şartı sağlaması konusunda daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. Diğer yandan, ayrışma için gereken ikinci koşul durumu (kritik soğuma hızı) da kontrol edilmiştir (Şekil 4.21). SD üretim oryantasyonu için, T_{vs} sıcaklıkları T_{md} sıcaklığının üzerinde kaldığı süre boyunca, birinci katmanın soğuma hızının 410 K/s'nin altına inemediği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, SD de martenzit ayrışmanın başlayamadığı sonucu çıkarılmıştır. GS üretim oryantasyonunda ise, on katman sonrasında soğuma hızı 410 K/s'nin altına düştüğü hesaplanmıştır. Onuncu ve ileriki katmanlarda T_{vs} sıcaklığı hala T_{md} sıcaklığının üzerinde devam ettiği için de, ayrışma için iki koşul sağlanmış ve ayrışma başlamıştır.



Şekil 4.21. SD ve GS için 12 katmanın taranması sonucu birinci katmandaki soğuma hızları

Sonuç olarak, bu bölümde aynı geometrili farklı oryantasyonlu yapı modellenerek, üretim oryantasyonunun termal süreçler üzerindeki etkileri gösterilmiştir. İki durum için, katmanlarda depolanan sıcaklıkların (T_{vs}) farklı olduğu ve genişleyen üretim yönünün (ısı akışının tersi) daha faydalı olduğu tespit edilmiştir. Üretim oryantasyonunun, bazı bölümlerde martenzit ayrışmasını mümkün kıldığı ve lamelli $\alpha+\beta$ mikroyapı elde edilmesine yardımcı olduğu gösterilmiştir.

4.7. Tabla Sıcaklığı ve Toz Serme Süre Değişkenli Parametre Setleri Belirleme

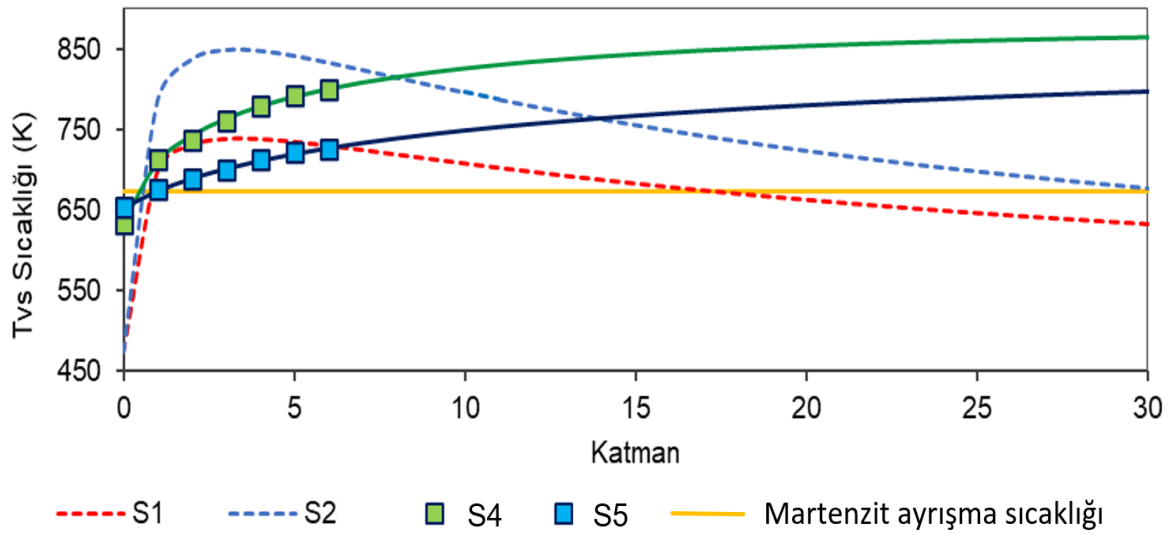
Literatürde ve bu tez kapsamında yapılan nümerik ve deneysel çalışmalara bakıldığında,

yerinde martenzit ayrışması için ihtiyaç duyulan koşulların sağlanmasında tabla sıcaklığı ve toz serme süresi parametrelerinin kritik öneme sahip olduğu görülmüştür. Çünkü bu parametreler, doğrudan katmanlarda biriken ısı miktarını ve katmanların soğuma hızını etkilemektedir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda, toz serme süresi 1 saniye alınmıştır. 1 saniye için literatürde deneysel çalışmalar bulunmakta olup, toz serme süresinin kısa tutulmasının martenzit ayrışmaya olan pozitif etkileri nümerik çalışmalarla da ispatlanmıştır. Ancak günümüzde ulusal ve uluslararası birçok ticari SLE makinelerinin toz serme sürelerinin çok uzun sürdüğü (13 saniyelere kadar çıkmaktadır) gözlemlenmiş olup, bu makinelerin toz serme sistemlerinin iyileştirilmesinin faydalı olacağı değerlendirilmiştir. Bu bağlamda, toz serme süresinin limitlerini arttırmak için, yeni parametre setleri için nümerik çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, nümerik modelde deneme yanılma yapılarak, 10x10x10 mm³ parça boyutlarında üretilmek üzere iki adet parametre seti belirlenmiştir (Çizelge 4.5). S4 ve S5'nin işlem parametreleri aynı olup, tabla sıcaklığı ve toz serme süreleri değişkenlik göstermektedir.

Çizelge 4.5. Parametre setleri

Güç	Tarama hızı	Lazer yarıçapı	Bindirme mesafesi	Nom.katman kalınlığı	Tabla sıcaklığı	Toz serme süresi	Destek yapı yüksekliği	Destek yapı boşluk oranı
P(W)	v _s (mm/s)	r(μm)	ht(μm)	lt(μm)	°C	t _i (s)	sl (mm)	%
S4	355	1000	75	100	60	360	2	75
S5	355	1000	75	100	60	380	2	75

Şekil 4.22' de S1, S2, S4 ve S5 parametre setleri için üst katmanların taranması sonucu elde edilen birinci katmandaki T_{vs} sıcaklık sonuçları gösterilmiştir. Grafikte kare işaretler S4 ve S5'in hesaplamalı sıcaklık sonuçlarını göstermektedir. Bu sıcaklık sonuçları katmanlar eklendikçe monotonik davranış göstermekte olup, korelasyonla gözlenen eğilim grafikte mavi ve yeşil çizgiler ile gösterilmiştir. Tabla sıcaklığının daha yüksek alınması, S4 ve S5'in T_{vs} sıcaklığını S1 ve S2'den daha üst sıcaklıklardan başlamasını sağlamıştır. Başlangıç sıcaklıklarının, T_{md} sıcaklığına yakın olması ayrışma eğilimini arttırmıştır. S1 ve S2'ye göre toz serme süresini arttırmak ayrışma için negatif etki göstermiştir. Bu negatif etkiyi, parametre setleri belirlerken tabla sıcaklığı ve enerji yoğunluğu parametreleriyle azaltmaya çalışılmıştır.



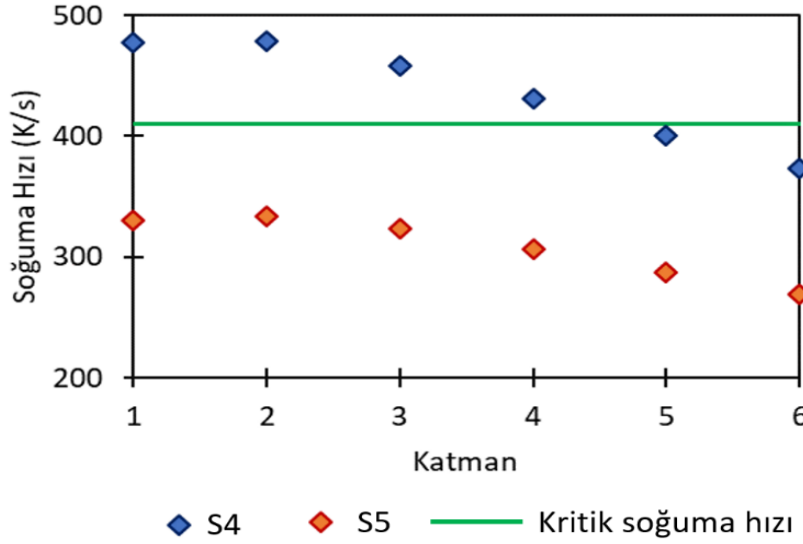
Şekil 4.22. Parametre setlerinin üst katmanların taranması sonucu birinci katmandaki T_{vs} sıcaklıkları

Toz serme sürelerinin arttırılması, birinci katmandaki T_{vs} sıcaklıklarının artışı olumsuz etkilemiş ve yavaşlatmıştır. Ancak, üst katmanlar eklendikçe, S4 ve S5'in T_{vs} sıcaklıklarının S1 ve S2'ye göre de daha kararlı hareket ettiği gözlemlenmiştir. S1 ve S2 parametre setlerinde, T_{vs} sıcaklıkları kısa bir süre artmış, yine kısa bir süre stabil devam etmiş ve sonunda da hızlı bir sıcaklık düşüşü eğilimi göstermiştir. Bu durum, S1 ve S2'nin T_{md} sıcaklığının üzerinde kalma süresini kısa tutmuştur. S4 ve S5 parametre setlerinde ise, T_{vs} sıcaklıkları artış miktarı S1 ve S2'ye göre daha az olmasına rağmen, daha kararlı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, gözlenen eğilime göre de uzun bir süre T_{md} sıcaklığının üzerinde kaldığı görülmüştür. Bu durum, martenzit ayrışması için güzel bir sonuç olduğu, parça bütününde ayrışmanın başarılabilmesi değerlendirilmektedir. Hatta daha kaba lamelli $\alpha+\beta$ mikroyapısı elde edilebileceği de düşünülmektedir.

Öte yandan, martenzit ayrışmasının gerçekleşebilmesi için, T_{md} sıcaklık şartının yanında kritik soğuma hızı şartının da sağlanması gerekmektedir. S4 ve S5'in üst katmanların taranması sonucu birinci katmandaki soğuma hızları Şekil 4.23'te gösterilmiştir.

Grafikten görülebileceği üzere, S4 parametre setinin soğuma hızları dördüncü katmandan sonra kritik soğuma hızının altına düşmüştür. S5 parametre setinin soğuma hızları ise, ilk katmandan itibaren kritik soğuma hızının altında seyretmiştir. Daha uzun toz serme süresi ve yüksek tabla sıcaklıkları soğuma hızını yavaşlatmıştır. Böylelikle, S4 ve S5 parametre setleri ayrışma koşullarını daha erken katmanlarda yerine getirebilmiştir. Bu sebeple de,

martenzit ayrışma süresi çok daha uzun sürmüştür. Bu durum, $\alpha' \rightarrow \alpha + \beta$ dönüşüm oranını arttırırken, dönüşmüş lamelli $\alpha + \beta$ mikroyapılarının da kabalaşmasına neden olabilmektedir.



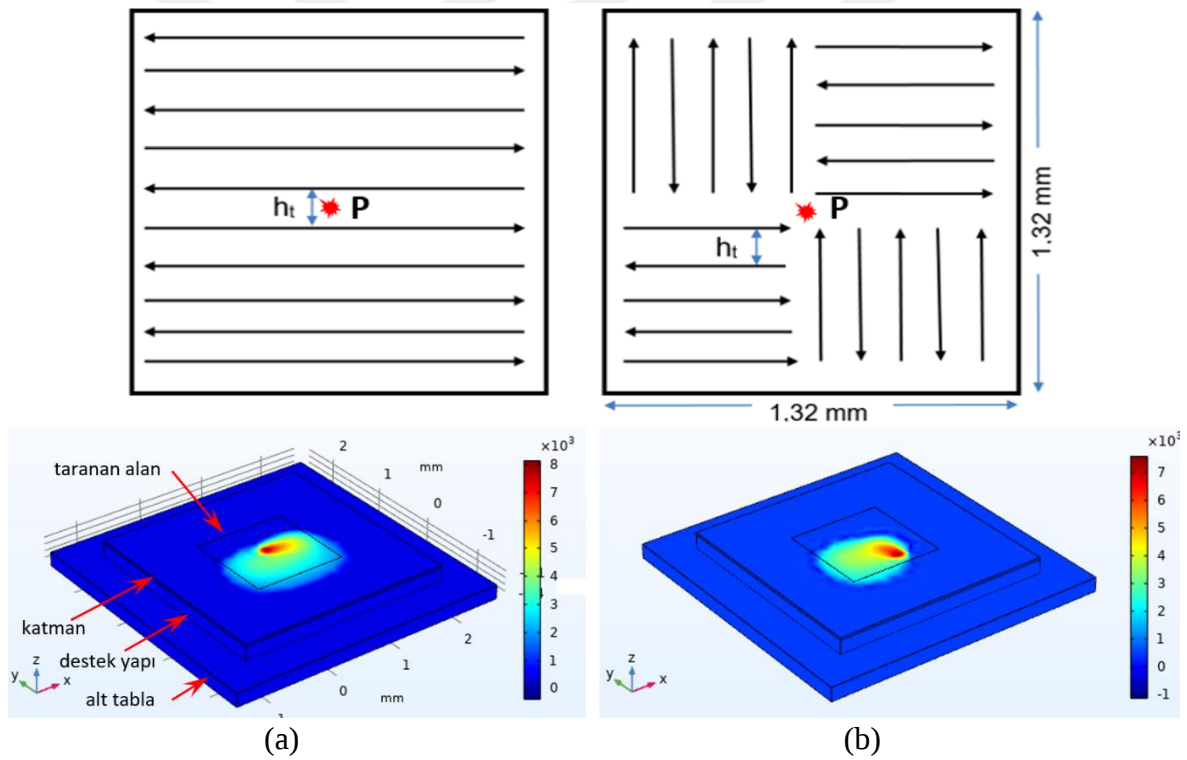
Şekil 4.23. S4 ve S5'in birinci katman için sonraki katmanların sayısına bağlı olarak soğuma hızları

Martenzit dönüşümü başlatmak için, tüm koşulları yerine getirmek zor olmasına karşın, yüksek mekanik performans (yüksek dayanım-yüksek süneklik) elde etmek için dönüşüm süresi ve sıcaklığı da büyük önem arz etmektedir. Ayrışma süresinin uzun olması ve ayrışmanın yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmesi, dönüşen lamelli $\alpha + \beta$ mikroyapılarının kabalaşmasına neden olmaktadır. Kaba lamelli yapılar, parçanın sünekliğini daha da arttırırken, parçanın dayanımında nispeten düşüşe neden olabilmektedir. Bu sebeple, parça dayanımı açısından, lamelli yapılar üretilirken en/boy oranlarına dikkat edilmesi gerekmektedir.

4.8. Tarama Stratejisinin Sıcaklık Dağılımında Rolü

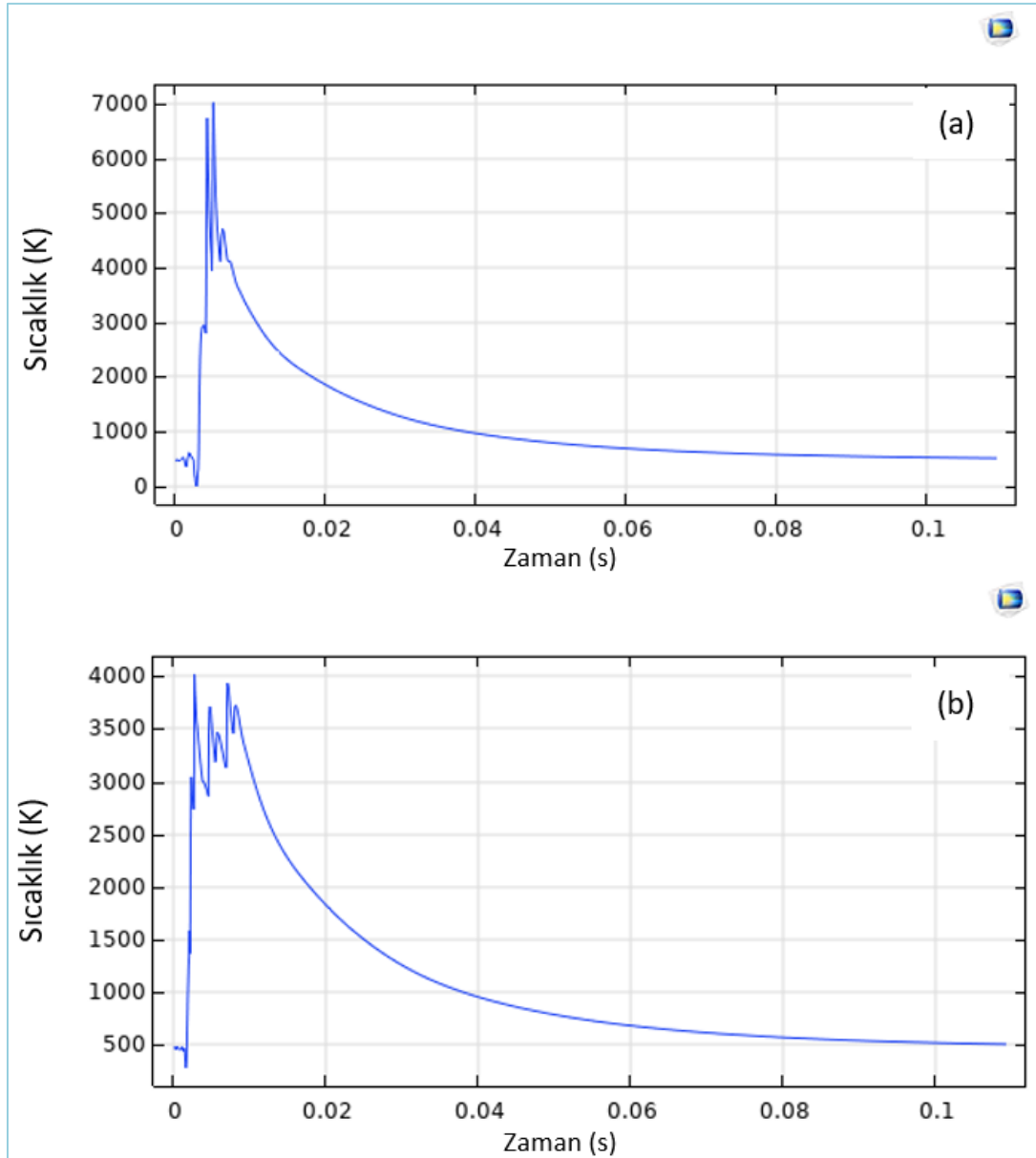
Tarama stratejisi, her katmanda lazer ışını tarafından takip edilen geometrik desendir. Tarama stratejisinde, lazerin katman üzerinde izlediği yol değişkenlik göstereceği gibi, bu yol her katmanda da değişkenlik gösterebilmektedir. Tarama stratejisinin, katmanın herhangi bir yerindeki lokal termal gradyanlara ve soğuma süreçlerine etkileri bulunmaktadır. Bu durum, artık gerilmeler, yoğunlaşma, yüzey pürüzlülüğü ve kusurlar gibi özellikleri etkileyerek nihai parçanın kalitesini belirlemektedir [19].

Literatüre bakıldığında, mekanik performans (kalıcı gerilmeler, yüzey pürüzlülüğü vb.) bakımından uygun tarama stratejilerden birisi de ada tarama stratejisidir. Ancak, her katman için ada tarama stratejisi uygulamak, hesaplama maliyetini katlayarak artırmaktadır. Bu çalışma, çok taramalı ve çok katmanlı modellemeyle olası martenzit ayrışma koşullarının tahminine odaklanmıştır. Hesaplama maliyetini düşürmek için, 20 mm² tarama alanı için basit zikzak tarama stratejisi kullanılmış olup, bu tarama deseni her bir parametre seti için de on katman tekrarlanmıştır. Basit bir tarama stratejisi kullanılmasına rağmen, her parametre seti için hesaplama maliyeti 100 saati aşmıştır. Ancak, tarama stratejisinin katmandaki lokal sıcaklık dağılımları ve soğuma hızı üzerindeki etkilerini görebilmek için, aynı parametre setinde küçük bir tarama alanı modelleyerek, zikzak ve ada tarama stratejileri karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.24. Zikzak (a) ada (b) tarama stratejilerinin geometrik deseni ve tarama sırasındaki sıcaklık gradyanları

Zikzak ve ada tarama stratejilerinde, ilk katmanın taranması ve 0,1 s soğuma süresi sonrası boyunca hesaplanan zamana bağlı sıcaklık sonuçları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Lazer ışınının katman üzerinde izlediği yol farklı olduğu için, ilk katmandaki P noktası komşu tarama izlerinde olan mesafesi de değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple, iki durum için tarama boyunca P noktasının sıcaklığı farklı değerler almıştır.



Şekil 4.25. Zikzak (a) ve ada (b) tarama stratejisi için P noktasının sıcaklık-zaman grafiği

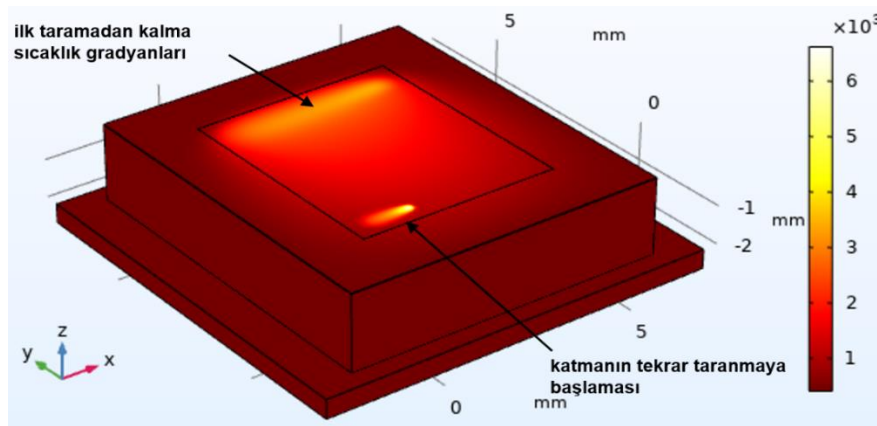
Tarama sırasında sıcaklık sonuçları karşılaştırıldığında, ada tarama stratejisinin zikzak tarama stratejisine göre daha düşük en yüksek sıcaklıklara ulaştığı görülmüştür. Ayrıca, tarama izlerinin uzunluğunun daha kısa oluşu, komşu izlerden daha tutarlı etkilendiği görülmüştür. Bu durum, ada tarama stratejisinde daha az kalıcı gerilmelerin oluştuğunu kanıtlamaktadır. Ayrıca sıcaklık sonuçları, ada tarama stratejisinde lazer enerjisinin katman içerisinde daha kontrollü yayıldığı belirlenmiştir. 0,1 s soğuma süresi sonrasında ise, zikzak ve ada tarama stratejisi için ilk katmanın T_{vs} sıcaklıkları sırasıyla 507,57 K ve 508,56 K olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.25). T_{vs} sıcaklıklarının yakın olması, martenzit ayrışması için ilk koşulun sağlanmasında tarama stratejisini önemli ölçüde etkilemediği

görülmüştür. Bu nedenle de, hesaplama maliyeti göz önünde bulundurularak, çok katmanlı modelde zikzak tarama stratejisi kullanılmıştır.

Tarama stratejisinin etkileri; farklı tarama yönlerine, tarama sırasına, tarama vektörü döndürme açısına, tarama vektörü uzunluğuna, tarama süresine, tarama alanına, katmanlar arası döndürme açısına vb. göre değişkenlik göstermektedir. Bu kapsamda, ileriki çalışmalarda, bu parametrelerin sıcaklık dağılımlarına ve katılma sürecine etkilerinin de detaylı olarak incelenmesi faydalı olacağı değerlendirilmiştir.

4.9. Tekrar Isıtmanın (Tekrar Ergitme) Ayrışmaya Etkileri

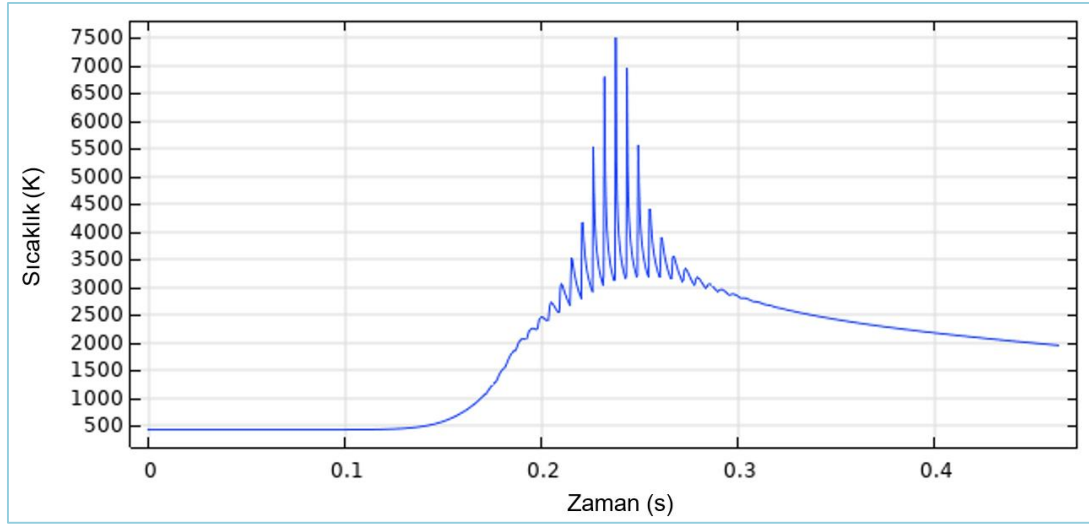
SLE’de tekrar ısıtma, taranan katmanın üst katman serilmeden önce tekrar taranması işlemidir. Bu işlem sırasında, katmana tekrar enerji girişi olduğu için, katmanın T_{vs} sıcaklığının artırılması ve soğuma hızının kontrol altına alınabilmesi (martenzit ayrışması şartları) açısından olumlu etkileri olabileceği düşünülmüş ve bu konuda küçük çapta modelleme çalışması yapılmıştır. Tekrar ısıtmada parametre seti belirlerken dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan birisi enerji yoğunluğunun ilk taramadan çok daha düşük (yaklaşık yarısı kadar) alınmasıdır. Çünkü buradaki amaç, tarama sırasında yüksek sıcaklıklara çıkıp yüksek soğuma hızlarında katılma katmanının, düşük enerji girişi ile soğuma hızı ve sıcaklık düşüşünde kontrolü sağlayabilmektir. Bununla birlikte, alt katmanın üst katmanların taranmasından etkilenmemesi için de, bu işlemin düşük enerji yoğunluklarında yapılması gerekebilmektedir.



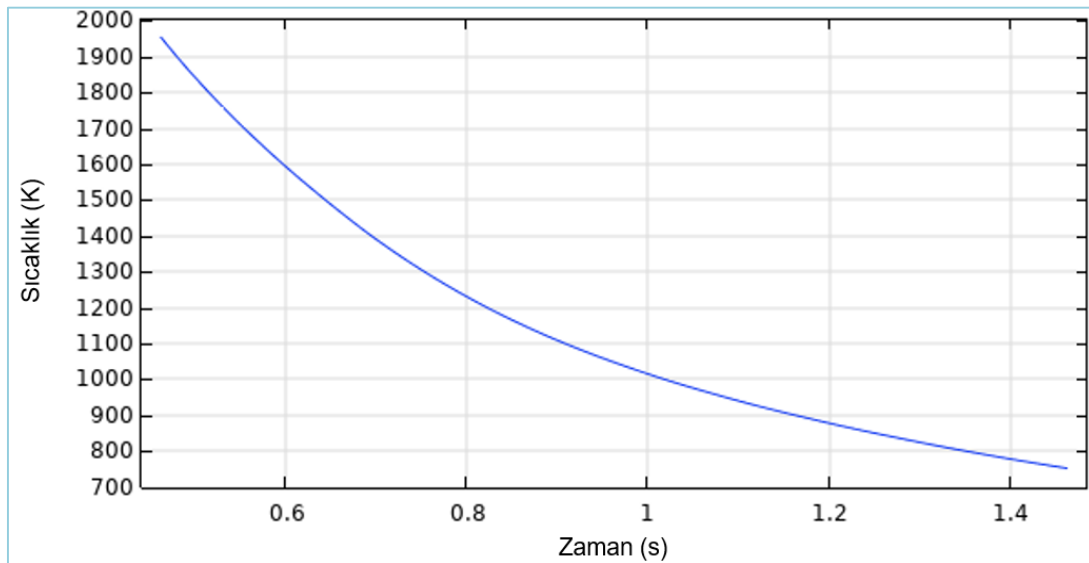
Şekil 4.26. Tekrar tarama sırasında ilk katmanın 0,47 s'deki sıcaklık dağılımı

Model, 20 mm^2 ($60 \text{ }\mu\text{m}$ bindirme mesafesinde 81 tarama izi) tarama alanında tasarlanmış olup, S3 parametre setinde iki durum karşılaştırılmıştır. Birinci durumda, ilk katman taranmış ve 1s soğuma süresine bırakılmıştır. İkinci durumda ise, ilk katman tarandıktan sonra yarı enerji yoğunluğunda ($69,04 \text{ J/mm}^3$) tekrar taranmış (Şekil 4.26) ve 1s soğuma süresine bırakılmıştır.

Birinci duruma ait tarama sırasındaki sıcaklık sonuçları Şekil 4.27’de verilmiştir. Şekil 4.28’de ise, tarama sonrası 1 saniye soğuma süresi boyunca gerçekleşen sıcaklık düşüşü gösterilmiştir.

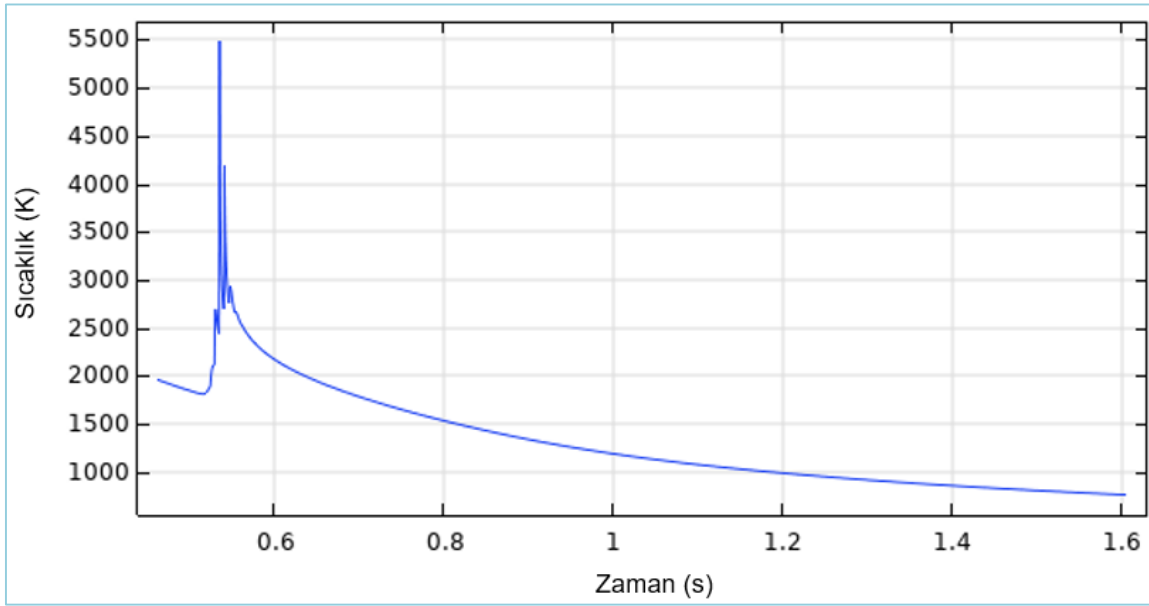


Şekil 4.27. Katman üst yüzey merkezinin tarama sırasındaki termal geçmişi



Şekil 4.28. Katman üst yüzey merkezinin tarama sonrası soğuma sürecindeki termal geçmişi

Birinci durum için ilk katmanın, tarama bittiği andaki sıcaklık değeri 1953 K ve 1 saniye soğuma sonrası son sıcaklık değeri ise 751,62 K olarak hesaplanmıştır. İkinci durum için ise, tekrar tarama ve 1 saniye soğuma süresi sonunda ulaşılan son sıcaklık 763,98 K olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.29). Sonuçlar karşılaştırıldığında, 20 mm² tarama alanı için ilaveten 69,04 J/mm³ enerji yoğunluğu ve 0.14 s tekrar tarama süresi harcanarak, ilk katmanın T_{vs} sıcaklığında 10 K artış sağlanmıştır.



Şekil 4.29. Birinci katman üst yüzey merkezinin tekrar tarama ve 1 s sonrası soğuma sürecindeki termal geçişi

Tekrar ısıtmanın, katmanda biriken T_{vs} sıcaklığının arttırmada pozitif etkileri olduğu tespit edilmiştir, ancak bu işlemin katmanlar arası toz serme sorununu çözmek için tek başına yeterli olmadığı görülmüştür. Ayrıca, pozitif etkilerini görmek için, yüksek enerji yoğunluklarına ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir. Öte yandan, alt tabla sıcaklığının yükseltilmesinin ve/veya katmanlar arası toz serme süresinin azaltılmasının tekrar ısıtmaya göre, martenzit ayrışma koşullarını sağlamada daha etkin olduğu değerlendirilmiştir.

Tekrar ısıtma işleminde, kritik sıcaklık şartının sağlanabilmesi için, yine yüksek tabla sıcaklıklarına (ön ısıtma) ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte, tekrar taramalardan dolayı, parça üretim süresi artmakta, ayrıca, ilave enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebepler, tekrar ısıtma tercihini negatif yönde etkileyebilmektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, seçici lazer ergitme uygulamalarında Ti-6Al-4V alaşımı için sıcaklığa bağlı mikroyapı dönüşümlerinin sayısal analizi ile yerinde martenzit ayrışma yaklaşımlarının araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda geliştirilen model, SLE'de gerçekleşen tüm termo-fiziksel olguları göz önünde bulundurularak tasarlanmış olup, histeresiz malzeme davranışı, etkili katman kalınlığı, emilim vb. davranışlarını da kapsamaktadır. Bu model sayesinde, hem önceki çalışmalardaki martenzit ayrışmasının nasıl gerçekleştiği açıklanabilmiş hem de ayrışma gerçekleşebilen yeni parametre setleri belirlemek mümkün hale getirilebilmiştir. Ayrıca tezde, literatüre katkı olarak SLE uygulamalarında Ti-6Al-4V alaşımı için termal iletkenlik faktör sayılarını λ_z hesaplayan ampirik bir formül türetilmiştir. Bu formül, parametre fonksiyonlu olduğu için tüm parametre setlerinde kullanılabilir özellikte olup, gelecekteki Ti-6Al-4V alaşımlı çalışmalarda kullanılabilecektir.

Ayrıca, martenzit ayrışması için zor olan 30 μm toz katman kalınlığı ve 85 μm lazer çapına sahip bir lazer için parametre seti tahmin edilmiştir. Bir örnek geometrinin lazer toz yatak ergitmeli bir eklemeli imalat tezgahında üretimi yapılarak mikroyapısı analiz edilmiştir. Farklı boşluk oranı ve kalınlıktaki destek yapıların termal analizi yapılarak, martenzit ayrışmasına olan etkileri incelenmiştir. Ek olarak, aynı geometride farklı üretim oryantasyonlarının katmanlar üzerindeki termal etkileri irdelenerek, bu durumun martenzit ayrışmasına etkileri değerlendirilmiştir. Yüksek tabla sıcaklıklarında toz serme süreleri iyileştirilerek martenzitin ayrışmasına olanak sağlayan yeni parametre setleri belirlenmiştir. Farklı tarama stratejilerinin katman içindeki sıcaklık dağılımı üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Martenzit ayrışması için alternatif seçenek olarak tekrar ısıtma işleminin etkileri araştırılmıştır. Çalışmada elde edilen temel sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir,

SLE'de çok taramalı ve çok katmanlı modelleme sonucunda, lazer tarama sürecinin katmandaki her noktada sürekli değişen termal davranışına sebep olduğu ve üst katmanlar eklendikçe bu değişimin devam ettiği tespit edilmiştir. Süreç boyunca katmanda, lazerin konumuna ve enerji yoğunluğuna bağlı termal zıplamalar (ani ısınma-soğuma) yaşandığı gözlemlenmiştir.

Ti-6Al-4V için modellemede, reel ergiyik havuz boyutlarına ulaşmada z-yönünde iletkenlik geliştirme faktörü (λ_z) ve emilim ifadelerinin önemli olduğu belirlenmiş olup, her parametre seti için bu ifadelerin özgün olarak hesaplanmasının (parametre fonksiyonlu olarak) simülasyon sonuçlarının gerçekçiliğini arttırdığı görülmüştür.

Modelde, Ti-6Al-4V için z-yönünde iletkenlik geliştirme faktörünü (λ_z) ve emilimi belirleyen ampirik yaklaşımlarla üretim parametre fonksiyonlu ifadeler türetilmiştir.

Çok taramalı ve çok katmanlı SLE sürecinde, yaşanan termal döngülerden (termal iniş-çıkışlar) Ti-6Al-4V alaşımının mikroyapısının sürekli değiştiği ($\alpha+\beta\rightarrow\beta\rightarrow\alpha'\rightarrow\beta\rightarrow\alpha'\dots$) ve yüksek soğuma hızlarından ötürü katılaşma sonrası martenzit α' mikroyapıya dönüştüğü tespit edilmiştir. Çok taramalı ve çok katmanlı lazerle taranması sırasında, enerji emilimine bağlı olarak katmanda sıcaklık depolanmasına neden olduğu görülmüştür.

Tarama izleri ile çok katmanlı SLE süreciyle, katman sıcaklığı artırılarak ve soğuma hızı kontrol altına alarak, martenzit ayrışmasının mümkün olabileceği gösterilmiştir.

Literatürde deneysel olarak martenzit ayrışması gerçekleştiği tespit edilen parametre setlerinin, çok taramalı ve çok katmanlı modellemesi yapılarak, SLE süreci içinde martenzit ayrışmasının nasıl gerçekleştiği aşamalı olarak açıklanmıştır. Farklı parametre setlerinin farklı mikroyapı ve faz kalınlıklarına nasıl sebep olduğu anlatılmıştır.

Aynı enerji yoğunluğuna sahip olmasına rağmen farklı katman kalınlığı ve tarama hızındaki parametre setlerinde martenzit ayrışma sürelerinin farklı olduğu ve buna bağlı olarak farklı mikroyapılar elde edildiği görülmüştür.

Martenzit ayrışmasının zor olacağı, 30 μm toz katman kalınlığı ve 85 μm ışın çapına sahip bir lazer için parametre seti tahmin edilmiştir. Belirlenen parametre seti için, ticari bir makinede kübik bir numune üretilmiştir. Makinedeki sınırlamalardan dolayı (toz serme süresinin aşırı uzun olması), kütle artırımına gidilmiştir. Böylelikle, martenzit ayrışması numunenin merkezinde başlatılabilmektedir. Merkezi bölgelerde elde edilebilmesinin sebebinin ise, büyük parça boyutları nedeniyle merkezi bölgelerin daha yavaş soğuma hızlarına, daha düşük T_p sıcaklıklarına ve ayrışmanın başlaması için yeterli olan daha düşük ısı yayılımlarına sahip olması olarak yorumlanmıştır.

Tamamlanmamış ayrışma bölgeleri, ayrışmaya başlayan lamelli yapılardan ve sütunlu önceki β tane sınırları arasındaki α' martenzit mikroyapılarından oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum, uygun koşullar sağlandığında 30 μm tabaka kalınlığında da lamelli yapıların üretilebileceğini göstermiştir.

Martenzit ayrışması için soğuma süresi ve alt tabla sıcaklığının kritik olduğu görülmüştür.

Yüksek soğuma süresinin olumsuz etkisini ortadan kaldırmak için sadece parça boyutlarının büyütülmesinin yeterli olamayacağı görülmüştür.

Numunenin büyük bir kısmında martenzit ayrışmasını sağlamak için, soğuma hızını (toz serme süresini) düşürmenin ve alt tabla sıcaklığının minimum 200°C'ye çıkarmanın umut verici olduğu değerlendirilmiştir.

Destek yapıların boşluk oranı ve geometrilerin, katmanda depolanan sıcaklıkları ve soğuma hızlarının kontrol altına alınmasında etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca, martenzit ayrışması oluşumunda yardımcı rol oynayabileceği tespit edilmiştir.

Aynı geometride farklı oryantasyonlarda üretilen yapılarda, katmanlardaki termal süreçlerinde ve soğuma hızlarında farklılıklar tespit edilmiştir. Genişleyen üretim yönünün (ısı akışının tersi) daha faydalı olduğu tespit edilmiştir. Üretim oryantasyonunun, bazı bölümlerde martenzit ayrışmasını mümkün kıldığı ve lamelli $\alpha+\beta$ mikroyapı elde edilmesine yardımcı olduğu görülmüştür.

Yüksek tabla sıcaklıklarında toz serme süreleri iyileştirilerek martenzitin ayrışmasına olanak sağlayan yeni parametre setleri belirlenmiştir. Toz serme sürelerinin arttırılması, birinci katmandaki T_{vs} sıcaklıklarının artışı olumsuz etkilemiş ve yavaşlatmıştır. Ancak, üst katmanlar eklendikçe, T_{vs} sıcaklıklarının daha kararlı hareket ettiği ve çok daha uzun süre T_{md} sıcaklığının üzerinde kalmasını yardımcı olduğu tespit edilmiştir.

Farklı tarama stratejilerinin katman içindeki sıcaklık dağılımı üzerindeki etkileri için modelleme çalışmaları yapılmış, zamana bağlı sıcaklık sonuçları karşılaştırılmıştır. Tarama stratejilerinin, katmandaki yaşanan termal zıplamalarda etkili olduğu görülmüştür. Bu durumun, kalıcı gerilmelere, çarpılmalar vb. olumlu etkileri olacağı değerlendirilmiştir.

Ancak, katmana giren enerji girişinde önemli bir değişiklik oluşturmadığından, katmanda sıcaklık depolanmasında etkisi olmadığı görülmüştür.

Martenzit ayrışması için alternatif parametre olarak tekrar ısıtma işlemi araştırılmıştır. Tekrar ısıtma işleminin, martenzit ayrışmasına olumlu etkileri olduğu görülmüştür. Ancak, bunun tabla sıcaklığı ya da toz serme süresi parametreleri kadar etkili olmadığı değerlendirilmiştir. Ayrıca, tekrar ısıtma işleminde, ekstradan enerji ve üretim zamanına ihtiyaç duyulduğu, aynı katmanın tekrar tekrar taranmasının katmanı deformasyona uğratabileceği nedeniyle de, bu işlemin tercih edilmesini düşürebileceği değerlendirilmiştir.

Yerinde martenzit ayrışma yaklaşımı yakın bir zamanda keşfedilmiş olup, hakkında çok az çalışma bulunmaktadır. Bu yöntemle, ekstradan zaman ve maliyet harcamaksızın, mikroyapının geliştirilmesiyle daha yüksek mekanik performansta parçalar elde etmek mümkündür. Bu sebeple, bu yöntem literatüre ve üretim sektörüne önemli katkılar sağlayabilecek potansiyele sahiptir. Bu kapsamda, martenzit ayrışma yaklaşımları ve ayrışmayı etkileyen faktörlere ilişkin detaylı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tezde, SLE'de süreç içerisinde sıcaklık ve mikroyapıya bağlı martenzit ayrışmasının nasıl olduğu irdelenerek, parametrelerle ilişki ayrışma yaklaşımları üzerinde durulmuştur. Farklı faktörler denenerek, martenzit ayrışma gerçekleştirilmeye çalışılmıştır. Ancak, bu çalışma martenzit ayrışmasının tamamiyle anlaşılması için yeterli olmayıp, bu konuyla ilgili yeni çalışmalar yapılması faydalı olacaktır. Martenzit ayrışması, oluşum koşulları, mikroyapı-mekanik özelliklere olan etkileri hakkında daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, martenzit ayrışmanın parça içindeki dağılımı (homojenlik) konusunda da detaylı çalışmalar yapmak, yöntemi geliştirecektir. Martenzit ayrışması için yeni yaklaşımlar ortaya çıkarılması üretim sektöründe tercih çeşitliliğini arttıracığı için, martenzit ayrışmasının daha kolay elde edebilmesini mümkün hale getireceği değerlendirilmektedir. Özellikle, katman biriktirilmesi yaklaşımı yerine tek katman içinde martenzit ayrışmasını gerçekleştirebilen yaklaşımlar ortaya çıkarılmasının, parçada mikroyapı dağılımını homojenleştireceği, böylelikle, parçanın her yerinde aynı mekanik performans elde edilmesine katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Liu, S. and Shin, Y. C. (2019). Additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: A review. *Materials & Design*, 164 (5), 1-23.
2. ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, (2012), ASTM International.
3. Arman, A. (2016). *A Micromechanical-based Computational Framework for Modeling the Mechanical Properties of the Metallic Parts Fabricated by Selective Laser Melting*, Yüksek Lisans Tezi, The University of Toledo, Toledo.
4. Tan, P. (2020). *Process modelling for selective laser melting additive manufacturing*, Doctoral Thesis, Nanyang Technological University, Singapore.
5. Marco, S. (2014). *Microstructure evolution and mechanical properties of selective laser melted Ti-6Al-4V*, Doctoral Thesis, Loughborough University, Leicestershire.
6. Nguyen, H. D., Pramanik, A., Basak, A. K., Dong, Y., Prakash, C., Depnath, S., Shankar, S., Jawahir, I. S., Dixit, S., Buddhi, D. (2022). A critical review on additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*, 18 (5-6), 4641-4661.
7. Salsi, E., Chiumenti, M. and Cervera, M. A., (2018). Modeling of Microstructure Evolution of Ti-6Al-4V for Additive Manufacturing. *Metals*, 8 (8), 633-660.
8. Qiu, C., Adkins, N. J. E. and Attallah, M. M. (2013). Microstructure and Tensile Properties of Selectively Laser-Melted and of HIPed Laser-Melted Ti-6Al-4V, *Materials Science and Engineering A*, 578 (30), 230–239.
9. Xu, W., Lui, E. W., Pateras, A., Qian, M. and Brandt, M., (2017), In Situ Tailoring Microstructure in Additively Manufactured Ti-6Al-4V for Superior Mechanical Performance, *Acta Materialia*, 125 (37), 390-400.
10. Xu, W., Sun, S., Elambasseril, J., Liu, Q., Brandt, M. and Qian, M., (2015), Ti-6Al-4V Additively Manufactured by Selective Laser Melting with Superior Mechanical Properties, *The Minerals, Metals & Materials Society*, 67 (3), 668–673.
11. Mollamahmutoğlu, M. and Yılmaz, O. (2021). Volumetric Heat Source Model for Laser-Based Powder Bed Fusion Process in Additive Manufacturing. *Thermal Science and Engineering Progress*, 25 (5-8), 1-9.
12. Kruth, J. P., Leu, M. C., Nakagawa, T., (1998), Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping, *CIRP Annals*, 47(2), 525-540.
13. Zhang, X., Liou, F., (2021), *Chapter 1 - Introduction to additive manufacturing*, In *Handbooks in Advanced Manufacturing*, first edition, United States: Elsevier, 1-31.

14. Pitassi, D., Savoia, E., Fontanari, V., Molinari, A., Luchin, V., Zappini, G. & Benedetti, M. (2018). *Finite Element Thermal Analysis of Metal Parts Additively Manufactured via Selective Laser Melting*. In: *Finite Element Method - Simulation, Numerical Analysis and Solution Techniques*, first edition, Croatia: Intech, 123-156.
15. Yen, Y. C., Kai, C., Dong, Z., Liu, Z., Zhang, D., Loh, L.E., Leong, S.S. (2015). Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*, 2 (4), 1-22.
16. Khoa, D. D, (2021), *Microstructure characterizing and mechanical properties of Selective Laser Melted Ti-6AL-4V alloys*, PhD thesis, University of Glasgow, Glasgow.
17. Oyesola, M., Mpofu, K., Mathe, N., Fatoba, S., Hoosain, S. and Daniyan, I., (2021), Optimization of selective laser melting process parameters for surface quality performance of the fabricated Ti-6Al-4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114 (5-6), 1585–1599.
18. Hengfeng, G., Haijun, G., Deepankar, P., Rafi, H., Thomas, S., Brent, S. (2013). *Influences of Energy Density on Porosity and Microstructure of Selective Laser Melted 17-4PH Stainless Steel*. 24th International SFF Symposium-An Additive Manufacturing Conference, SFF 2013.
19. Zhang, W., Tong, M., Harrison, N. M. (2020). Scanning strategies effect on temperature, residual stress and deformation by multi-laser beam powder bed fusion manufacturing, *Additive Manufacturing*, 36 (5), 1-13.
20. Chen, H., Gu, D., Ge, Q., Shi, X., Zhang, H. Wang, R., Zhang, H. and Kosiba, K. (2021). Role of laser scan strategies in defect control, microstructural evolution and mechanical properties of steel matrix composites prepared by laser additive manufacturing, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 28 (3), 462-474.
21. Zhang, X., Yocom, C., Mao, B., Liao, Y. (2019). Microstructure evolution during selective laser melting of metallic materials: A review. *Journal of Laser Applications*, 31 (3), 1-19.
22. Zeng, K., (2015). *Optimization of support structures for selective laser melting*, Doctoral Theses, University of Louisville, Louisville.
23. Thomas, D. (2009). *The development of design rules for selective laser melting*. Doctoral Thesis, Cardiff Metropolitan University, Cardiff.
24. Poyraz, Ö. and Kushan, M., (2018). Investigation of the effect of different process parameters for laser additive manufacturing of metals. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*. 33 (2), 729-742.
25. Yang, L., Zuyu, L., Peng, W. and Shikui, C. (2018). Generating support structures for additive manufacturing with continuum topology optimization methods. *Rapid Prototyping Journal*. 25 (2), 232-246.

26. Yıldız, A. K., Mollamahmutoğlu, M., Yılmaz, O. and Dogan, E., (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 (2), 549-554.
27. Hartunian P, Eshraghi M. (2018). Effect of Build Orientation on the Microstructure and Mechanical Properties of Selective Laser-Melted Ti-6Al-4V Alloy. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2 (4), 69-82.
28. Kruth, J. P., Badrossamay, M., Yasa, E., Deckers, J., Thijs, L. and Humbeeck, J. (2010). *Part and material properties in selective laser melting of metals*, 16th International Symposium on Electromachining, ISEM 2010.
29. Ren, S., Chen, Y., Liu, T. and Qu, X., (2019). Effect of Build Orientation on Mechanical Properties and Microstructure of Ti-6Al-4V Manufactured by Selective Laser Melting, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50 (9), 4388–4409.
30. Alsalla, H. H., Smith, C. and Hao, L., (2018). Effect of build orientation on the surface quality, microstructure and mechanical properties of selective laser melting 316L stainless steel, *Rapid Prototyping Journal*, 24 (1), 9-17.
31. Vila, P. B. (2015). *Phase transformation kinetics during continuous heating of $\alpha+\beta$ and metastable β titanium alloys*. Doctoral Thesis, Vienna University of Technology, Vienna.
32. Villa, M., Brooks, J. W., Turner, R., Wang, H., Frédéric, B., Ward, R. (2019). Microstructural Modeling of the $\alpha+\beta$ Phase in Ti-6Al-4V: A Diffusion-Based Approach. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 50 (12), 2898–2911.
33. Ran, J., Jiang, F., Sun, X., Chen, Z., Tian, C. and Zhao H. (2020). Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Fabricated by Electron Beam Melting. *Crystals*. 10 (11), 972-990.
34. Cho, J. Y., Xu, W., Brandt, M. and Qian, M., (2019). Selective Laser Melting-Fabricated Ti-6Al-4V Alloy: Microstructural Inhomogeneity, Consequent Variations in Elastic Modulus and Implications, *Optics and Laser Technology*, 111 (4), 664-670.
35. Yang, J., Yu, H., Yin, J., Gao, M., Wang, Z. and Zeng, X., (2016). Formation and Control of Martensite in Ti-6Al-4V Alloy Produced by Selective Laser Melting, *Materials and Design*, 108 (C), 308–318.
36. Fan, Y., Tian, W., Guo, Y., Sun, Z. and Xu, J. (2016). Relationships among the Microstructure, Mechanical Properties, and Fatigue Behavior in Thin Ti-6Al-4V, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016 (10), 1-9.
37. Motyka, M. (2021). Martensite Formation and Decomposition during Traditional and AM Processing of Two-Phase Titanium Alloys—An Overview, *Metals*, 11 (3), 481-497.

38. Sallica-Leva, E., Caram, R., Jardini, A.L., and Fogagnolo, J.B. (2016). Ductility improvement due to martensite α' decomposition in porous Ti-6Al-4V parts produced by selective laser melting for orthopedic implants. *Journal of The Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 54 (2016), 149-158 .
39. Agapovichev A. V, Kokareva V. V, Smelov V. G and Sotov A. V. (2016) *Selective laser melting of titanium alloy: investigation of mechanical properties and microstructure*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 156 (1), 1-6.
40. Xu, W., Brandt, M., Sun, S., Elambasseril, J., Liu, Q. and Latham, K., (2015). Additive Manufacturing of Strong and Ductile Ti-6Al-4V by Selective Laser Melting via in Situ Martensite Decomposition, *Acta Materialia*, 85 (2015), 74-84.
41. Ahmadi M, (2017). *Investigation of Ti-6Al-4V microstructure effects on process material interaction during micro milling*, Yüksek lisans tezi, Bilkent üniversitesi, Ankara.
42. Sui, Q., Li, P., Wang, K., Yin, X., Liu, L., Zhang, Y., Zhang, Q., Wang, S. and Wang, L. (2019). Effect of Build Orientation on the Corrosion Behavior and Mechanical Properties of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V. *Metals*. 9 (9), 976-989.
43. Snehashis, P., Gorazd, L., Vanja, K. Drstvensek, I. (2018). Evolution of metallurgical properties of Ti-6Al-4V alloy fabricated in different energy densities in the Selective Laser Melting technique. *Journal of Manufacturing Processes*, 35 (2018), 538-546.
44. Sing, S. L., (2019). *Selective Laser Melting of Novel Titanium-Tantalum Alloy as Orthopaedic Biomaterial*, first edition, Singapore: Springer, 37-63.
45. Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J.P. and Van Humbeeck, J. (2014) Microstructure and Mechanical Properties of a Novel β Titanium Metallic Composite by Selective Laser Melting, *Acta Materialia*, 68 (15), 150-158.
46. Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J. P. and Van Humbeeck, J. (2012) Heat treatment of Ti-6Al-4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and Mechanical properties, *Journal of Alloys and Compounds*, 541 (541), 177-185.
47. Yadroitsev, I., Krakhmalev, P. and Yadroitsava, I., (2013) Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V Alloy for Biomedical Applications: Temperature Monitoring and Microstructural Evolution, *Journal of Alloys and Compounds*, 583 (C), 404-409.
48. Zafari, A., Barati, M. R., Xia, K. (2019). Controlling martensitic decomposition during selective laser melting to achieve best ductility in high strength Ti-6Al-4V, *Materials Science and Engineering: A*, 744 (47), 445-455.
49. Rafi, H., Karthik, N., Haijun, G., Thomas, S. and Brent, S. (2013). Microstructures and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Parts Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22 (12), 3872-3883.

50. Barriobero-Vila, P., Gussone, J., Haubrich, J., Sandlöbes, S., Da Silva, J. C., Cloetens, P., Schell, N. and Requena, G. (2017). Inducing Stable $\alpha + \beta$ Microstructures during Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V Using Intensified Intrinsic Heat Treatments. *Materials*, 10 (3), 268-282.
51. Tenbrock, C., Fischer, F. G., Wissenbach, K. Schleifenbaum, J. H., Wagenblast, P., Meiners, W. and Wagner, J. (2020). Influence of keyhole and conduction mode melting for top-hat shaped beam profiles in laser powder bed fusion, *Journal of Materials Processing Technology*, 278 (2020), 1-10.
52. Yuze, H., Tristan, F., Samuel, C., Sebastian, M., Kamel, F., Jeyan, T., Leung, C. L. A. and Lee, P. (2021). Keyhole fluctuation and pore formation mechanisms during laser powder bed fusion additive manufacturing, *Nature Communications*, 13 (1170), 1-11.
53. Ali, H., Ma, L., Ghadbeigi, H. and Mumtaz, K. (2017). In-situ residual stress reduction, martensitic decomposition and mechanical properties enhancement through high temperature powder bed pre-heating of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V, *Materials Science and Engineering: A*, 695 (23), 211-220.
54. Willy, H. J., Li, X., Chen, Z., Herng, T. S., Chang, S., Ong, C. Y. O., Li, C. and Ding, J. (2018). Model of laser energy absorption adjusted to optical measurements with effective use in finite element simulation of selective laser melting, *Materials and Design*, 157 (3), 24–34.
55. Mollamahmutoğlu, M. and Yılmaz, O. (2021). Volumetric Heat Source Model for Laser-Based Powder Bed Fusion Process in Additive Manufacturing, *Thermal Science and Engineering Progress*, 25 (5-8), 1-9.
56. Promoppatum, P., (2018). *Numerical Modeling of Thermal and Mechanical Behaviors in the Selective Laser Sintering of Metals*, Doctoral Thesis, Carnegie Mellon University, Department of Mechanical Engineering, Pittsburgh.
57. Boyer, R; Welsch, G. and Collings, E. W., (1994). *Materials properties handbook: titanium alloys*, first edition, Ohio: ASM International, 1-1169.
58. Mills, K. C. (2002). *Recommended Values of Thermophysical Properties for Selected Commercial Alloys*, first edition, Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 1-234.
59. Fan, Z. and Liou, F. (2012). *Numerical Modeling of The Additive Manufacturing (AM) Processes of Titanium Alloy*. In: *Titanium Alloys-Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications*, first edition, Croatia: Intech, 1-28.
60. Gong, X., Cheng, B., Price, S. and Chou, K., (2013). Powder-bed electron-beam-melting additive manufacturing: powder characterization, process simulation and metrology, *ASME Early Career Technical Conference (ECTC), District F*, 59-66).
61. Parry, L., Ashcroft, I. A. R and Wildman, D., (2016). Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation, *Additive Manufacturing*, 12 (PA), 1-15.

62. Riedlbauer, D., Scharowsky, T., Singer, R. F., Steinmann, P., Körner, C. and 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*, 88 (5-8), 1309–1317.
63. Gu, H., Gong, H., Dilip, J. J. S, Pal, D., Hicks, A., Doak, H. and Stucker, B.(2014). *Effects of Powder Variation on the Microstructure and Tensile Strength of Ti-6Al-4V Parts Fabricated by Selective Laser Melting*, 25th annual international solid freeform fabrication symposium.
64. Mollamahmutoglu, M., Yilmaz, O., Unal, R., Gumus, B. and Tan, E., (2022). The effect of evaporation and recoil pressure on energy loss and melt pool profile in selective electron beam melting, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120 (5-6), 4041-4050.
65. Dilip, J. J. S, Zhang, S., Teng, C., Zeng, K., Robinson, C. and Pal, D. (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 (12),157–167.
66. Cunningham, R., Zhao, C., Parab, N., Kantzos, C., Pauza, J. and Fezzaa, K. (2019). Keyhole Threshold and Morphology in Laser Melting Revealed by Ultrahigh-Speed X-Ray Imaging, *Science*, 363 (6429), 849–852.
67. Ansari, M. J., Nguyen D. S. and Park H. S. (2019). Investigation of SLM Process in Terms of Temperature Distribution and Melting Pool Size: Modeling and Experimental Approaches. *Materials*, 12 (8), 1272-1290.
68. Eriksson, I., Powell, J. and Kaplan, A. (2011).Measurements of Fluid Flow on Keyhole Front During Laser Welding, *Science and Technology of Welding & Joining*, 16 (7), 636-641.
69. Ladania, L., Romano, J., Brindley, W. and Burlatsky, S. (2017). Effective Liquid Conductivity for Improved Simulation of Thermal Transport in Laser Beam Melting Powder Bed Technology, *Additive Manufacturing*, 14 (C), 13–23.
70. Ancellottia, S., Fontanaria, V., Molinaria, A., Iacobb, E., Belluttib, P., Luchinc, V., Zappinic, G. and Benedettia, M. (2019). Numerical/Experimental Strategies to Infer Enhanced Liquid Thermal Conductivity and Roughness in Laser Powder-Bed Fusion Processes, *Additive Manufacturing*, 27 (46), 552–564.
71. Wu, Y. C., San, C. H., Chang, C. H., Lin, H. J., Marwan, R., Baba, S. Hwang, W. S. (2018). Numerical modeling of melt-pool behavior in selective laser melting with random powder distribution and experimental validation, *Journal of Materials Processing Technology*, 254 (7), 72-78.
72. Yang, J., Yu, H., Yin, J., Gao, M., Wang, Z. and Zeng, X. (2016). Formation and Control of Martensite in Ti-6Al-4V Alloy Produced by Selective Laser Melting, *Materials and Design*, 108 (C), 308–318.

73. Do, D. K. (2021). *Microstructure Characterizing and Mechanical Properties of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V Alloys*, Doctoral Thesis, University of Glasgow, Glasgow.
74. Kalashnikov, K., Rubtsov, V., Savchenko, N., Kalashnikova, T., Osipovich, K., Eliseev, A. and Chumaevskii A. V. (2019). The Effect of Wire Feed Geometry on Electron Beam Freeform 3D Printing of Complex-Shaped Samples from Ti-6Al-4V Alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105 (4), 3147–3156.







ĞAZİ ĞELECEKTİR..