



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME İŞLEMİNDEKİ ISI TRANSFER MODELİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

Korhan ÖKTEN

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2021

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.

Korhan ÖKTEN

06/04/2021

SEÇİCİ LAZER ERGİTME İŞLEMİNDEKİ ISI TRANSFER MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Korhan ÖKTEN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2021

ÖZET

Bu çalışmada, toz malzemelerin üretim sürecinde kullanılan proses parametrelerinin seçici lazer eritme yöntemi ile belirlenmesine yönelik olarak 3-B zamana bağlı matematiksel bir model geliştirilmiştir. Çalışma kapsamında, Seçici Lazer Ergitme (SLE) yöntemi ile imalat sürecinde parça içerisinde oluşan sıcaklık dağılımı ve eriyik havuzu geometrisinin değişimi, işletim parametrelerinin etkisi altında incelenmiştir. Problem geometrisi, toz katman bölgesi, eriyik havuzu ve işleme sonucu oluşan katı bölgeyi içerecek şekilde yarım silindirik seçilmiştir. Lazer kaynaklı ısı üretiminin geometri içerisinde olduğu düşünülerek 3B zamana bağlı non-homojen ısı denklemi, üç ardışık süreç – x-y düzleminde 2B kararlı durum ısı transferi, x-y düzleminde 2B zamana bağlı ısı transferi ve y-z düzleminde z-yönünde 1B zamana bağlı ısı transferi için tanımlanarak kartezyen koordinat sistemi üzerinde analitik olarak çözülmüştür. Analitik çözüm “Eigen fonksiyon açılımı”, “değişkenlerin ayırıştırılması” ve “değişken değiştirme” metodları kullanılarak elde edilmiştir. Geliştirilen analitik modelin doğrulaması, Ti6V4 malzemesi kullanılarak SLE metodu ile parça üretimi için literatürde mevcut deneysel veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 20-80 W ile 100-250 W aralıklarındaki lazer güç uygulamalarına yönelik parametrik çalışma gerçekleştirilerek farklı lazer gücü, lazer çapı ve metal tozu katman kalınlığı için sıcaklık dağılımları ve faz geçiş geometrileri belirlenerek kıyaslamalı olarak analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonuçları göstermektedir ki, kurgulanan model, mevcut analitik modellere nazaran tahmin doğruluğu yüksek, çözüm süresi düşük ve çoklu taramaya uygundur.

Bilim Kodu : 91412
Anahtar Kelimeler : Seçici lazer ergitme, analitik çözüm, faz geometrisi, sıcaklık dağılımı
Sayfa Adedi : 129
Danışman : Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU

DEVELOPMENT OF THE HEAT TRANSFER MODEL IN THE SELECTIVE LASER MELTING PROCESS

(Ph. D. Thesis)

Korhan ÖKTEN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2021

ABSTRACT

In this study, a 3-D time-dependent mathematical model has been developed to determine the process parameters used in the production process of powder materials by the selective laser melting method. Within the scope of the study, the temperature distribution, and the change of the melt pool geometry during the manufacturing process with the Selective Laser Melting (SLM) method were investigated under the influence of operating parameters. The problem geometry has been chosen to be semi-cylindrical, including the powder layer region, the melt pool, and the solid region formed because of the machining. Considering that laser-induced heat generation was in geometry, the 3D time-dependent non-homogeneous heat equation was defined for three consecutive processes - 2D steady-state heat transfer in the x-y plane, 2D time-dependent heat transfer in the x-y plane, and 1D time-dependent heat transfer in the z-direction in the y-z plane and analytically solved on the Cartesian coordinate system. The analytical solution was obtained by using "Eigenfunction expansion", "separation of variables" and "change of variables" methods. The verification of the developed analytical model was carried out using the experimental data available in the literature to produce parts by the SLM method using Ti6V4 material. The parametric study was carried out for laser power applications in the range of 20-80 W to 100-250 W, and comparative analyzes were performed by determining temperature distributions and phase transition geometries for different laser power, laser diameter, and metal powder layer thickness. The results of the study show that the designed model has high prediction accuracy, low solution time and is suitable for multiple scanning compared to existing analytical models.

Science Code : 91412

Key Words : Selective laser melting, analytical solution, phase geometry, temperature distribution

Page Number : 129

Supervisor : Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU

TEŞEKKÜR

Çalışmam boyunca engin tecrübe ve bilgi birikimiyle beni yönlendiren ve destek olan değerli danışman hocam Prof. Dr. Atilla BIYIKOĞLU' na tüm yardımlarından ötürü teşekkürü bir borç bilirim. Tezimin matematiksel bölümüne önemli katkılarda bulunan, yardımını esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. B. Nafi ÖRNEK' e en içten dileklerle şükranlarımı sunarım. Ayrıca süreçte tezime katkı sunan tez izleme komitesi üyelerine ve tüm Amasya Üniversitesi ailesine teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen değerli aileme, bu süreçte desteğini ve yardımlarını esirgemeyen sevgili eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. PROBLEMİN TANIMI VE MODEL KURGULAMASI.....	13
3.1. Problemin Tanımı.....	13
3.2. Fiziksel model	13
3.3. Lazer Kaynağı Enerji Absorpsiyon Modeli	15
3.4. Ti64 Malzemesinin Termal ve Fiziksel Özellikleri	16
3.5. Analitik Model	18
3.6. Analitik Çözümün Sayısal Hesabı	33
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	39
4.1. Yakınsak Çözüm	39
4.2. Analitik Model Doğrulaması.....	43
4.3. Parametrik Çalışma	56
4.3.1. Düşük güç uygulamaları: Durağan durum	56
4.3.2. Düşük güç uygulamaları: Zamana bağlı durum	76
4.3.3. Yüksek güç uygulamaları: Durağan durum	85

Sayfa

4.3.4. Yüksek güç uygulamaları: Zamana bağlı durum	105
5. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....	117
KAYNAKLAR	123
ÖZGEÇMİŞ	128



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Ti-6Al-4V malzemesi standart kimyasal bileşenleri .	12
Çizelge 2.2. Çelik, alüminyum ve titanyum üretim maliyetlerinin karşılaştırılması.	12
Çizelge 3.1. Ti64 malzemesinin termal ve fiziksel özellikleri	16
Çizelge 3.2. Analitik model korunum denklemi, başlangıç ve sınır koşulları.....	19
Çizelge 3.3. Ardışık denklemlerin korunum denklemi, başlangıç ve sınır koşulları.....	20
Çizelge 3.4. Adım 1: Isı denklemi, sınır ve başlangıç şartları	21
Çizelge 3.5. Adım 2 için korunum denklemleri, sınır ve başlangıç koşulları.....	28
Çizelge 3.6. Adım 3 için korunum denklemleri, sınır ve başlangıç koşulları.....	31
Çizelge 4.1. Düşük güç uygulamaları: P=40 W temsili güç için öz-değer sayılarına karşılık gelen hesaplama süreleri	43
Çizelge 4.2. Yüksek güç uygulamaları: P=250 W temsili güç için öz-değer sayıların karşılık gelen hesaplama süreleri	43
Çizelge 4.3. h13 takım çeliği termo-fiziksel özellikleri ve doğrulama parametreleri	50
Çizelge 4.4. Mevcut analitik model ve deneysel verilerin kıyaslanması.....	50
Çizelge 4.5. Literatürdeki model tahminlerinin ve deneysel verilerden sapma miktarlarının karşılaştırılması.....	52
Çizelge 4.6. Seçilmiş modeller için kabuller ve başlangıç / sınır koşullarının karşılaştırılması	53
Çizelge 4.7. Farklı lazer güçleri ve yüzey sınır koşulu için eriyik havuzu genişliği, derinliği	55

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. SLE prosesinin fiziksel modeli için seçilen temsili hacmin (a) 3-B, (b) 2B x-y düzlem ($V=200$ mm/s) ve (c) 2-B x-y düzlem ($V=400$ mm/s) görüntüsü.....	14
Şekil 3.2. (a) x-y düzlemi ve (b) y-z düzlemi 2-B fiziksel model görünüşleri.....	18
Şekil 3.3.“ Sıcaklık Yazılımı” akış diyagramı	36
Şekil 3.4. “Eriyik Geometri Yazılımı” akış diyagramı	37
Şekil 4.1. (a) $P=40$ W b) $P=250$ W için λ_t öz-değerlere karşı $T_o(0,0)$ sıcaklığının değişimi.....	40
Şekil 4.2. (a) $P=40$ W b) $P=250$ W için β_j öz-değerlere karşı $T_t(0,0,0)$ sıcaklığının değişimi.....	41
Şekil 4.3. (a) $P=40$ W b) $P=250$ W için ν_k öz-değerlere karşı $T_t(0,0,0)$ sıcaklığının değişimi.....	42
Şekil 4.4. Farklı lazer güçlerinde, analitik model ile deneysel çalışma sonuçlarının a) Eriyik havuzu genişliği b) Eriyik havuzu derinliği c) Eriyik havuzu uzunluğu cinsinden kıyaslanması	45
Şekil 4.5. Farklı lazer güçleri için analitik model ve deneysel çalışma sonuçlarının maksimum eriyik havuzu sıcaklığı cinsinden kıyaslanması	47
Şekil 4.6. Mevcut analitik çalışma ve deneysel çalışma sonucu elde edilen eriyik havuz geometrisinin a) 20 W, b) 40 W, c) 60 W, d) 80 W değerleri için kıyaslanması.....	48
Şekil 4.7. Farklı lazer güçleri için analitik model ve deneysel çalışma sonuçlarının a) Eriyik havuzu derinliği ve b) Eriyik havuzu genişliği cinsinden kıyaslanması.....	49
Şekil 4.8. Çözüm bölgesi üst yüzeyi için yalıtım ve birleşik sınır koşullarının a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca sıcaklık dağılımı ve b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca sıcaklık dağılımı cinsinden kıyaslanması	54
Şekil 4.9. Farklı güç değerlerine bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca sıcaklık dağılımı b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca sıcaklık dağılımı c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımı kıyaslanması	57
Şekil 4.10. Farklı lazer güçleri için . a) x-y yönlü eriyik havuzu geometrisi b) z-y yönlü eriyik havuzu geometrisi) z-x yönlü eriyik havuzu geometrisi değişimi	59

Şekil	Sayfa
Şekil 4.11. Farklı lazer çapı değerlerine bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımı kıyaslanması.....	61
Şekil 4.12. Farklı lazer çapları için a) x-y yönlü eriyik havuzu geometrisi b) y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi c) x-z yönlü eriyik havuzu geometrisi değişimi.....	63
Şekil 4.13. Farklı toz yatağı kalınlığı değerlerine bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca sıcaklık dağılımı b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca sıcaklık dağılımı c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımı kıyaslanması	65
Şekil 4.14. Farklı toz yatağı kalınlıkları için a) x-y yönlü eriyik havuzu geometrisi b) y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi c) x-z yönlü eriyik havuzu geometrisi değişimi.....	67
Şekil 4.15. 26 μm lazer çapı büyüklüğü ve 30 μm toz yatak kalınlığı için (a) 20, (b) 40, (c) 60 ve (d) 80W lazer gücü altında çözüm alanı boyunca x-y yönlü izo-sıcaklık haritası ve fazlar arası geçiş.....	69
Şekil 4.16. 26 μm lazer çapı ve 30 μm toz yatak kalınlığı için (a) 20, (b) 40, (c) 60 ve (d) 80W lazer gücü altında çözüm alanı boyunca x-z yönlü izo-sıcaklık haritası ve fazlar arası geçiş	71
Şekil 4.17. 26 μm lazer çapı büyüklüğü ve 30 μm toz yatak kalınlığı için (a) 20, (b) 40, (c) 60 ve (d) 80W lazer gücü altında çözüm alanı boyunca y-z yönlü izo-sıcaklık haritası ve fazlar arası geçiş.....	74
Şekil 4.18. Zaman bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımlarının incelenmesi	76
Şekil 4.19. Zaman bağlı x-z yönlü eriyik havuzu a) $t=0 \mu\text{s}$ b) $t=0.05 \mu\text{s}$ c) $t=0.1 \mu\text{s}$ d) $t=0.15 \mu\text{s}$ anındaki geometrisi.....	78
Şekil 4.20. Zaman bağlı y-z yönlü eriyik havuzu a) $t=0 \mu\text{s}$ b) $t=0.05 \mu\text{s}$ c) $t=0.1 \mu\text{s}$ d) $t=0.15 \mu\text{s}$ anındaki geometrisi.....	81
Şekil 4.21. Zamana bağlı 3-B eriyik havuzu a) $t=0 \mu\text{s}$ b) $t=0.05 \mu\text{s}$ c) $t=0.1 \mu\text{s}$ d) $t=0.15 \mu\text{s}$ anındaki geometrisi.....	83
Şekil 4.22. Farklı güç değerlerine bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımlarının kıyaslanması	86

Şekil	Sayfa
Şekil 4.23. Farklı lazer güçleri için a) x-y yönlü eriyik havuzu geometrisi eriyik havuzu geometrisi b) x-z yönlü eriyik havuzu geometrisi c) y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi değişimi	88
Şekil 4.24. Farklı lazer çapı değerlerine bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımlarının kıyaslanması	90
Şekil 4.25. Farklı lazer çapları için .a) x-y yönlü eriyik havuzu geometrisi b) x-z yönlü eriyik havuzu geometrisi c) y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi değişimi	92
Şekil 4.26. Farklı toz yatağı kalınlığı değerlerine bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımlarının kıyaslanması.....	94
Şekil 4.27. Farklı toz yatağı kalınlıkları için a) x-y yönlü eriyik havuzu geometrisi b) y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi c) y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi değişimi	96
Şekil 4.28. 50 μm lazer çapı büyüklüğü ve 30 μm toz yatak kalınlığı için (a) 100, (b) 150, (c) 200 ve (d) 250 W lazer gücü altında çözüm alanı boyunca x-y yönlü ize-sıcaklık haritası ve fazlar arası geçiş	98
Şekil 4.29. 50 μm lazer çapı ve 30 μm toz yatak kalınlığı için (a) 100, (b) 150, (c) 200 ve (d) 250W lazer gücü altında çözüm alanı boyunca x-z yönlü ize-sıcaklık haritası ve fazlar arası geçiş	100
Şekil 4.30. 50 μm lazer çapı büyüklüğü ve 30 μm toz yatak kalınlığı için (a) 100, (b) 150, (c) 200 ve (d) 250W lazer gücü altında çözüm alanı boyunca y-z yönlü ize-sıcaklık haritası ve fazlar arası geçiş	103
Şekil 4.31. Zaman bağılı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımlarının incelenmesi	105
Şekil 4.32. Zaman bağılı a) $t=0$ μs b) $t=0.1$ μs c) $t=0.2$ μs d) $t=0.25$ μs anındaki x-z yönlü eriyik havuzu geometrisi.....	107
Şekil 4.33. Zaman bağılı a) $t=0$ μs b) $t=0.1$ μs c) $t=0.2$ μs d) $t=0.25$ μs anındaki y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi.....	110
Şekil 4.34. Zamana bağılı a) $t=0$ μs b) $t=0.1$ μs c) $t=0.2$ μs d) $t=0.25$ μs anındaki 3-B eriyik havuzu geometrisi.....	112
Şekil 4.35. a) x-z yönlü b) y-z yönlü çözüm bölgesi sıcaklık dağılımı	115

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
a	Termal yayıcılık
c	Özgül ısı (J/kg K)
c_l	Sıvı özgül ısısı (J/kg K)
c_s	Katı özgül ısısı (J/kg K)
C_1	Katsayı
C_2	Katsayı
C_3	Katsayı
C_4	Katsayı
C_5	Katsayı
ε	Emicilik katsayısı
h_c	Isı transfer katsayısı (W/m K)
i	Öz-değerler
j	Öz-değerler
k	Termal iletkenlik (W/m K)
k_p	Metal tozu termal iletkenliği (W/m K)
k_s	Katı faz termal iletkenliği (W/m K)
L_x	x yönlü uzunluk (μm)
L_y	y yönlü uzunluk (μm)
L_z	z yönlü uzunluk (μm)
n	Katsayı
P	Lazer gücü (W)
R	Lazer çapı (μm)

Simgeler**Açıklamalar**

S	Metal tozu katman kalınlığı (μm)
t	Zaman (μs)
T_a	Çevre sıcaklığı (K)
T_o	$t=0$ anındaki sıcaklık dağılımını veren fonksiyon (K)
T_t	Zamana bağlı sıcaklık dağılımını veren fonksiyon (K)
T_z	z' ye bağlı sıcaklık dağılımını veren fonksiyon (K)
$u(y)$	y' ye bağlı fonksiyon
$v(y)$	y' ye bağlı fonksiyon
$w(x, y)$	x, y' ye bağlı fonksiyon
$X(x)$	x' e bağlı fonksiyon
q	Hacimsel ısı kaynağı (W)
ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
$\Theta(y)$	y' ye bağlı fonksiyon
$\phi(y)$	y' ye bağlı fonksiyon
$\kappa(x)$	x' ye bağlı fonksiyon
$\varphi(y)$	y' ye bağlı fonksiyon
$\tau(t)$	t' ye bağlı fonksiyon
λ	Katsayı
β	Katsayı
ν	Katsayı

Kısaltmalar**Açıklamalar****DMLS**

Direct metal laser sintering

SLE

Seçici lazer ergitme

SHS

Selective heat sintering

SLS

Selective laser sintering



1. GİRİŞ

Katmanlı imalat yöntemleri ilk olarak 80’li yılların sonunda ortaya çıkmış ve 90’lı yıllarda üretime geçilmesi ile birlikte “hızlı üretim yöntemi” olarak anılmaya başlanmıştır [1]. Günümüzde ise uzay, havacılık ve biyomedikal alanları başta olmak üzere birçok alanda uygulanmaktadır [2,3]. Katmanlı imalat yöntemleri, özellikle kompleks yapıların hızlı ve yüksek kalitede üretimine olanak sağlamaktadır. Süreç içerisinde birçok katmanlı imalat yöntemi; “VAT Photo polymerisation”, “Material Jetting”, “Binder Jetting”, “Material Extrusion”, “Sheet lamination”, “Powder Bed Fusion” ortaya çıkmakla birlikte bu yöntemlerin bir kısmı aktif olarak günümüzde kullanılmaktadır [4].

“Powder Bed Fusion” yöntemi, genel olarak toz malzemenin lazer ışını ile ergitilmesi esasına dayanmaktadır. Yöntemin kullanım amacına göre; “Direct metal laser sintering (DMLS)”, “Electron beam melting (EBM)”, “Selective heat sintering (SHS)”, “Selective laser sintering (SLS)” ve “Selective laser melting (SLM, seçici lazer ergitme)” olarak çeşitli uygulamaları bulunmaktadır.

Seçici lazer ergitme (SLE), katmanlı imalat yöntemleri arasında en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. İlk olarak 1990’lı yıllarda Almanya’nın Fraunhofer Enstitüsünde ortaya çıkmıştır ve her geçen gün kullanım oranı artmaktadır [5]. Bu yöntemin avantajı metal tozundan direkt olarak üretim yapılabilmesidir. Böylece diğer yöntemlerle üretimi zahmetli ve uzun süreler alabilen kompleks iş parçaları hızlı ve kolay bir şekilde üretilabilmektedir. Seçici lazer ergitme prosesinde istenilen malzemeye ait toz belirli kalınlıkta tabla üzerine serilir. Sonrasında lazer ile toz katman ergitilir. Ergitme sonrasında katılan malzeme katmanı oluşturur. Bu işlem iş parçası tamamen üretilene kadar devam eder [6]. SLE işlemi sırasında lazer işleminin uygulandığı tabla üzerindeki malzeme içerisinde sıcaklık artışı meydana gelecek ve işlenen malzemenin erime sıcaklığı aşıldığında tabla üzerinde bulunan boşluklu metal toz katmanı erimeye başlayacaktır. Bu proses erime sonucu sıvı hareketini, buharlaşmayı ve büzülme ve genişlemeyi içerisinde barındıran kompleks olaylar zincirini barındırmaktadır. Ayrıca, proses sırasında metal toz havuzu yüksek yoğunlukta lazer ışınına maruz kaldığı için, ışıktan etkilenen bölgelerde yüksek sıcaklık gradyanlerinin oluştuğu ve bu durumun kontrol edilemeyen genişlemelere ve büzölmelere sebep olduğu bilinmektedir. Bu büzölme ve genişlemeler, mamul parçada artık

gerilmelerin, burulma ve çatlakların oluşmasına yol açabilmektedir. SLE işlemi sırasında oluşan bir diğer durum ise, üretim parametrelerinin seçimi sırasında optimal olmayan tarama parametreleri belirlenmesidir. Uygun olmayan parametre seçimi, eriyik havuzunda kararsızlıklar, mamul malzemede gözenekli yapı oluşumu ve mamulün yüksek pürüzlülük değerine sahip olmasına yol açabilmektedir [7,8].

SLE prosesi sırasında oluşan eriyik geometrisi ve malzeme üzerindeki sıcaklık dağılımlarının elde edilmesi, imalat öncesi uygun işletim parametrelerinin seçiminde kritik rol oynaması açısından önemlidir.

Bu çalışmada, bir SLE prosesinin tek yönlü taraması süresince, iş tablası üzerindeki malzeme içerisinde oluşan sıcaklık dağılımının ve eriyik havuzu geometrisinin belirlenmesine yönelik olarak oluşturulan ısı denkleminin analitik çözümü üzerine odaklanılmıştır. Çalışma 5 kısıma ayrılmış olup birinci kısımda – Giriş – katmanlı imalat yöntemleri hakkında tanıtıcı bilgi verildikten sonra bu çalışmada kullanılan SLE imalat yöntemi ile ilgili ayrıntılı bilgilendirme yapılmıştır. Giriş kısmının son paragrafında, tezin organizasyonu hakkında bilgi verilmiş ve amaca yönelik yapılan faaliyetler özetlenmiştir.

İkinci kısımda – Literatür Araştırması – ise, SLE prosesi sürecinde malzeme üzerinde oluşan faz geçiş bölgelerinin tayini ve sıcaklık dağılımlarının belirlenmesine yönelik mevcut çalışmalar belirlenmiş ve sayısal, deneysel ve analitik olarak üç grup altında sunulmuştur.

Üçüncü kısımda – Problemin Tanıtımı ve Model Kurgulaması–, tek taramalı SLE işlemi için oluşturulan 3-B ve 2-B fiziksel model, analitik model ve analitik modelin çözüm yöntemi ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Üçüncü bölümün sonunda analitik çözüm sonucunda elde edilen fonksiyonlar ve bu fonksiyonların sayısal olarak hesaplanmasında kullanılan programlamadan bahsedilmiştir.

Dördüncü kısımda –Sonuçlar ve Tartışma–, oluşturulan analitik model sonucunda elde edilen veriler paylaşılmıştır. İlk olarak oluşturulan modelin doğrulaması literatürde bulunan analitik ve nümerik çalışmalarla gerçekleştirilmiştir. Sonrasında, farklı lazer güçleri, lazer çapları ve toz katman kalınlıkları için sıcaklık dağılımları ve eriyik havuzu geometrileri kıyaslamalı olarak incelenmiştir.

5. Kısımda –Değerlendirme ve Öneriler– çalışmanın genel bir değerlendirilmesi yapılarak öne çıkan sonuçlar vurgulanmış, oluşturulan analitik modelin üstünlükleri ve yapılan parametrik çalışma sonucunda elde edilen önemli bulgular ile parametre seçiminin proses üzerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca, gelecekte yapılması planlanan çalışmalar ve bu çalışmaların literatüre katkıları hakkında bilgilendirme yapılmıştır.





2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

SLE prosesini etkileyen parametrelerin doğru seçimi, hem proses sırasında oluşabilecek hataların önlenmesi için hem de eriyik havuzu geometrisi ve sıcaklık dağılımlarının doğru belirlenebilmesi için önem arz etmektedir. Literatürde SLE prosesi ile ilgili malzeme üzerinde oluşan faz geçiş bölgelerinin tayini ve sıcaklık dağılımlarının belirlenmesine yönelik çalışmalar sayısal, deneysel ve analitik olarak üç grup altında araştırılmış ve aşağıda özetlenmiştir:

A. Sayısal çalışmalar;

Gusarov ve ark. [9], oluşturdukları hacimsel ısı kaynağı modeli ile tek taramalı SLE modelini nümerik olarak incelemişlerdir. Önerilen ısı kaynağı ile toz katman içerisindeki emilim, saçılım etkileri ve radyasyon ile ısı kaybı etkilerini modelleyebilmişlerdir. Ayrıca bu ısı kaynağını termal difüzyon denklemine entegre ederek farklı lazer tarama hızları için sıcaklık dağılımını ve eriyik havuzu geometrisini tahmin etmişlerdir. Nümerik çözümleme ile elde edilen veriler literatürde yapılan deneysel çalışma ile uyum sağlamıştır. Çalışma sonucu lazer tarama hızının artışının, eriyik havuzunun uzunluk genişlik oranını artırdığını ve üretilen bir önceki katmanla temas yüzeyini azalttığını göstermiştir. Verhaeghe ve ark. [10] eriyik havuzu büzülmesini ve lazer ışınının toz katman içerisinde emilimini içeren bir model oluşturmuşlardır. Model dört katman içermektedir. Bunlar, katı, eriyik, metal tozu ve geçiş bölgesi katmanlarıdır. Elde edilen bu model farklı lazer güç değerleri için merkezi farklar metodu ile nümerik olarak çözülmüş ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Sonuçlar modelin deneysel sonuçlarla paralel ve uygulanabilir bir model olduğunu göstermiştir. Loh ve ark. [11] SLM prosesi sırasında metal tozundan katı oluşumuna geçiş sürecini temsil eden nümerik bir model oluşturmuşlardır. Model, proses sırasında eriyik havuzunda oluşan buharlaşma ve metal tozundaki bozulmaları içerecek şekilde tasarlanmıştır ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak farklı lazer güçleri ve tarama hızları için çözülmüştür. Çalışma sonucunda eriyik havuzu oluşumu, eriyik havuzunun soğuma hızı ve sıcaklık dağılımları belirlenmiştir. Li ve ark. [12] yaptıkları çalışmada ısı denklemini kullanarak SLM prosesi sırasında oluşan ısı transferi ve faz geçiş geometrisini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada proses sırasında çözüm bölgesi içerisinde oluşan ısınma, erime, buharlaşma ve soğuma aşamalarını içeren bir model oluşturmuşlardır.

Model, çözüm bölgesi büzülmesini içermekte ve metal tozu, eriyik, katı ve buharlaşma sonucu ortaya çıkan gaz fazını simgeleyen bir fonksiyonu barındırmaktadır.   z m için sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır. Sonuçlar lazer gücü artı ı ve lazer hızı d     n n eriyik havuzu derinliği, genişliği ve uzunluğunu önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Fu ve Guo, [13] yaptıkları çalışmada SLE prosesi için yüzeyden Gaussian ısı kaynağı modelini tercih etmişler, çözüm için ise sonlu elemanlar metodu kullanmışlardır. Ayrıca parametrik çalışma gerçekleştirerek 20, 40, 60 ve 80 W değerleri için sıcaklık dağılımları ve faz geometrilerini saptamışlardır. Fathi ve ark. [14], matematiksel ve deneysel bir çalışma gerçekleştirerek lazer gücü ve tarama hızının eriyik havuzu geometrisi ve çözüm bölgesi içerisindeki sıcaklık dağılımı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlar, tarama hızı d      ve lazer gücü artışına bağlı olarak eriyik havuzu derinliğinin önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Mishra ve ark. [15] yaptıkları çalışmada farklı tip ısı kaynağı modeli kullanımı sonucu elde edilen nümerik verilerin deneysel çalışmalar ile ne kadar uyum sağladığını incelemişlerdir. Gaussian  stel hacimsel ısı kaynağının deneysel sonuçlarla daha fazla uyum sağladığını tespit etmişlerdir. Hussein ve ark. [16] çözüm bölgesi içerisindeki termal gerilmeleri yorumlamak için, SLE işlemi sırasında oluşan sıcaklık dağılımı ve eriyik havuzu geometrisini farklı tarama hızları için incelemişlerdir. Proses ANSYS ticari yazılımında sayısal olarak modellenmiştir. Sonuçlar, lazer tarama hızının artışına bağlı olarak eriyik havuzu uzunluğunun arttığını, buna karşın eriyik havuzu genişliği ve derinliğinin azaldığını göstermiştir. Parry ve ark. [8], SLE işlemi boyunca çözüm bölgesi içerisinde oluşan artık gerilmelerin proses üzerine etkilerini azaltmak adına lazer kaynağı tarama stratejisi belirlemeyi hedeflemişlerdir. Bu  alı ma için bir termomekanik model olu turmu lar ve sonlu elemanlar metodu kullanarak çözmüşlerdir. Tarama stratejisi olarak tekli ve çoklu tarama süreçlerini incelemişler, ayrıca çoklu tarama stratejisi için farklı “hatch” uzunlukları denemişlerdir. Çalışma sonucunda özellikle çoklu taramada, her bir tarama işleminin birbirini önemli oranda etkilediğini ve i  içe geçmiş sıcaklık gradyanleri oluştuğunu belirlemişlerdir. Dolayısı ile incelenen her bir tarama bölgesinin termal ge mi indeki ani değişimlerin atık gerilmeleri artırdığını gözlemlemişlerdir. Zhang ve ark. [17], bir fizik programı aracılığı ile SLE işlemini sonlu elemanlar modeli kullanarak modellemi lerdir. Oluşturulan model erimiş havuzun dinamik özellikleri, faz geçişleri, geri tepme basıncı, yüzey gerilimi ve Marangoni etkisini içinde barındıran kapsamlı bir modeldir. Sonuçlar tekli tarama için sıcaklık dağılımı, akış alanı ve yüzey morfolojisini zamana bağlı olarak sunmaktadır. Elde edilen verilere göre, buharlaşmanın neden olduğu geri tepme basıncının, erimiş havuz dinamiklerinde önemli bir rol oynadığı

ve bu durumun erimiş havuzun başında bir çöküntüye neden olduğu görülmüştür. Song ve ark. [18] yapmış oldukları çalışmada SLE prosesini, bir ticari yazılım olan ANSYS kullanarak nümerik olarak sonlu elemanlar metodu ile incelemişlerdir. Ayrıca nümerik çalışmaya paralel deneysel bir çalışmada gerçekleştirilmiştir. Çalışmada değişen parametreler olarak lazer gücü ve tarama hızı seçilmiştir. Sonuçlar, SLE prosesi sırasında parça yüzeyinde yüksek bir sıcaklık gradyanı oluştuğunu ve lazer tarama hızının artışına bağlı olarak mamul malzemede gözenekli yapı oluşumunun meydana geldiğini göstermiştir. Waqar ve ark. [19] SLE prosesi sırasında oluşan sıcaklık dağılımı ve faz geçiş geometrisini çoklu katman ve çoklu tarama, lazer gücü ve tarama hızı parametreleri için nümerik olarak incelemişlerdir. Analiz 3-B ısı denklemi kullanılarak sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar katman sayısının artışına bağlı olarak çözüm bölgesi içerisindeki maksimum sıcaklığı, eriyik havuzu genişliğini ve derinliğini artırdığını göstermiştir. Ayrıca lazer gücü ve tarama hızlarına bağlı olarak çözüm bölgesinin ısınma ve soğuma oranlarının arttığı saptanan bir diğer bulgudur. Contuzzi ve ark. [20] ısıdan etkilenen bölgede termal gerilmeleri belirlemek amacıyla SLE işlemi sırasındaki oluşan sıcaklık dağılımı ve eriyik havuzu geometrisini tahmin etmek için sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır. Çalışma, geliştirilen kod ile farklı proses parametreleri için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar ışığında farklı durumlar için tarama stratejileri önerilmiştir. Hodge ve ark. [21] SLE sürecinin hesaplanması için sürekli termomekanik bir model geliştirmişlerdir. Bu modelde, metal tozu katmanı içerisindeki radyasyon emilimi ve buna bağlı olarak toz metalin faz değişim gizli enerjisini de kapsayan bir hacimsel ısı kaynağı sunulmuştur. Yapılan çalışma literatürde bulunan deneysel çalışma ile doğrulanarak gelecek çalışmalar için bir başlangıç olarak sunulmuştur. Manvatkar ve ark. [22], zamana bağlı ısı transfer modeli oluşturarak lazer ergitmeli katmanlı imalat işleminde hız vektörleri, sıcaklık gradyanları ve eriyik havuzu içerisindeki sıvı hareketini incelemişlerdir. Sonuçlar lazer hızının artışına bağlı olarak eriyik havuzu içerisindeki konvektif ısı transferinin arttığını göstermiştir. Ilin ve ark. [23], parçanın yerel geometrisine bağlı olarak lazer ışıını eritme işlemi sırasında eriyik havuzu çevresindeki sıcaklık dağılımının sayısal analizine odaklanmışlardır. Çözüm için 3-B ısı denkleminden faydalanılmış ve sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Çalışmada belirli bir çözüm bölgesi içerisinde çoklu tarama işlemi yapılmış, eriyik geometrisi ve sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Sonuçların deneyler ile uyum sağladığı saptanmıştır. Zeng ve ark. [24] SLE prosesinin oldukça kompleks ve dinamik bir süreci barındırdığını ortaya koymuştur. Çözüm için bu dinamik etkileşimleri incelemek ve SLM sırasında termal gelişimi

incelemek adına toz yatağındaki lazere maruz kalma noktasını izleyerek uzamsal doğrusal olmayan termal özelliklere sahip dinamik ağ kullanan bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Modelleme için ANSYS ticari yazılımı kullanılmış ve sonuçlar deneylerle doğrulanmıştır. Yuan ve Gu [25] TiC / AlSi10Mg nano-kompozitlerinin SLE ile üretimi sırasında oluşan erimiş havuzun sıcaklık gelişiminin ve termal davranışının simülasyonunu sonlu hacimler yöntemi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Hesaplama tozdan katıya geçiş, sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerinin ürettiği doğrusal olmayan durumlar ve sıvı akışı gibi bazı önemli fiziksel olaylarda hesaba katılmıştır. Bu yöntem ile Marangoni konveksiyonu, lazer gücü ve tarama hızı gibi SLE işleme parametrelerinin, sıcaklık değişim davranışı ve erimiş havuz boyutları üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Simülasyon sonuçları, Marangoni konveksiyonunun konvektif ısı transferini yoğunlaştırmada ve erimiş havuz geometrisini değiştirmede çok önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Ek olarak, lazer-toz etkileşim bölgesinin sıcaklığı ve erimiş havuz boyutlarının, artan lazer gücü veya azalan tarama hızı ile arttığı saptanan bir diğer husustur. Körner ve ark [26] yaptıkları çalışmada SLE işlemini etkileyen parametreleri incelemek için 2-B, toz partiküllerini göz önüne alan, kafesli Boltzmann modeli oluşturmuşlardır. İşlem parametreleri olarak lazer gücü, lazer tarama hızı ve katman kalınlığı seçilmiştir. Çalışma sabit lazer gücünde ve yüksek tarama hızlarında katman yüzeyinde öngörülemeyen bozukluklara yol açtığını göstermiştir.

B. Deneysel çalışmalar;

Yadroitsev ve ark. [27] yüzey sıcaklığı dağılımının ve Ti64 alaşımının erimiş havuz boyutunun belirlenmesi için bir CCD kamera kullanmışlardır. Ayrıca biyomedikal alanında kullanılabilirliğini incelemek için farklı ısı işlemler uygulanmış ve mikro yapılar incelenmiştir. Sonuçlar, erimiş havuzun maksimum sıcaklığının lazer gücü ile önemli ölçüde arttığını, bununla birlikte ısınma süresi artışıyla, kıyasla az bir miktar arttığını göstermiştir. Cheng ve ark. [28], lazer ışıını kaynaklı katmanlı imalat sürecinde oluşan proses sıcaklıklarını ve diğer termal özellikleri araştırmak için sayısal ve deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sayısal çalışma için sonlu elemanlar metodu kullanmışlardır. Deneysel çalışma için ise yüzey sıcaklıklarını elde etmek için 0.78 μm - 1.08 μm spektral aralığa sahip bir kızılötesi termal görüntüleme cihazı (A LumaSense MCS640 NIR kamera) kullanmışlardır. Çalışma sonucunda metal tozu havuzunun gözenekliliğinin ısı iletkenliği artırdığını, ısı iletkenliğinde sıcaklık dağılımını ve eriyik havuzu geometrisini

etkileyen önemli parametrelerden olduğu vurgulanmıştır. Dolayısıyla metal toz havuzunun gözenekliliğinin artışı çözüm bölgesindeki maksimum sıcaklığı ve eriyik havuzu boyutunu artırmıştır. Benzer şekilde Song ve ark. [18], nümerik ve deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada çoklu tarama işlemi için SLE prosesi sırasında oluşan sıcaklık gradyanlarını ve faz değişim geometrilerini belirlemişlerdir. Deneysel sonuçları optik lazer mikroskobu ile elde etmiş ve nümerik sonuçlarla kıyaslamışlardır. Nümerik verilerin deneysel sonuçlarla uyum sağladığını gözlemlemişlerdir. Antony ve ark. [29], tek taramalı lazer ergitmeli katmalı imalat yönteminde, tarama sırasında lazer parametrelerinin, oluşan eriyik izi, morfolojisi ve homojenliği üzerindeki etkisini, lazer parçacık boyutu analizi, makro ve mikroskobik inceleme gerçekleştirerek deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Nümerik çalışmada sonlu elemanlar metodu, deneysel çalışmada ise malzeme morfolojisini belirlemek için taramalı elektron mikroskobu kullanmışlardır. Çalışma sonucunda lazer gücü, lazer tarama hızı ve ışının nokta boyutu parametrelerinin tarama izi ve morfolojisi üzerine etkisini incelemişler ve en uygun parametrenin 150 W lazer gücü, 2,4 mm/dak tarama hızı ve 400 μm lazer çapı için oluştuğunu belirtmişlerdir. Li ve Gu [30], SLM prosesini incelemek için 500 W çıkış gücüne ve 70 μm çapına sahip bir YLR-500-SM ytter-bium fiber lazer, metal tozu dağıtımı için otomatik bir sistem ve prosesin yönetildiği bir bilgisayar düzeneği kullanmışlardır. Tüm SLM süreci argon atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca aynı şartlarda bir nümerik model oluşturulmuş ve sonlu elemanlar metodu ile çözülmüştür. Sonuçlarda lazer hızının artışına bağlı olarak soğuma miktarının arttığı, lazer gücüne bağlı maksimum sıcaklık değerinin artmasına rağmen lazer tarama hızına bağlı maksimum sıcaklık değerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca lazer gücüne bağlı olarak eriyik havuzu geometrisi artarken lazer hızına bağlı eriyik havuzu geometrisi küçülmektedir. Li ve Gu [31] yaptıkları bir diğer çalışmada tarama hızının ve lazer gücünün SLM termal davranışı üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla 3-B nümerik bir model oluşturmuşlardır. 3-B modelin çözümü için sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Nümerik modellerin doğrulanması için bir de deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel düzenek olarak 200 W çıkış gücüne ve 100 μm çapına sahip bir YLR-500-SM ytter-bium fiber lazer kullanmışlardır. Yüzey morfolojisi, 20 kV' da ikincil elektron modunda bir Quanta 200 taramalı elektron mikroskobu (SEM; FEI, Eindhoven, Hollanda) kullanılarak gözlemlemişlerdir. Çalışma sonucunda farklı lazer gücü ve tarama hızları kombinasyonları için çözüm bölgesi içerisindeki sıcaklık dağılımları ve eriyik havuzu geometrilerini gözlemlemişlerdir.

C. Analitik çalışmalar;

SLE işleminin sıcaklık dağılımlarını ve faz geçiş geometrisini inceleyen nümerik ve deneysel çalışmalar zahmetli, maliyetli, uzun süre ve bilgisayar gücü gerektirmektedir. Analitik çalışmalar ise, gerçekleştirilmesi zor olmakla beraber hem maliyet hem zaman ve hem de bilgisayar gücü açısından daha düşük gereksinimlere sahiptir. Fiziksel problemin analitik olarak doğru modellenmesi gerçekçi sonuçlar elde edilmesi açısından oldukça önemlidir. Literatürde SLE prosesini analitik olarak tanımlayan çalışmalar az olmakla beraber, mevcut modellerin tahmin doğruluğunun artırılmasına yönelik geliştirilmesi gereklidir. Ning ve ark. [32] SLM prosesi için literatürde yaygın olarak kullanılan yarı sonsuz katı yaklaşımıyla yapılan analitik çözümlemenin aksine, yaptıkları çalışmada kapalı bir çözüm bölgesi için analitik model önermişlerdir. Bu modelde lazer hızı sıfır kabul edilmiş ve çözüm bölgesi içerisindeki iletim, taşınım ve radyasyon ile ısı transferi etkileri göz önüne alınmıştır. Çözüm için 3-B ısı denklemi kullanılarak çözüm bölgesi içerisindeki sıcaklık dağılımı ve eriyik havuzu geometrisini saptamaya çalışmışlardır. Isı denkleminin çözümü için Craslaw ve Jeager'in [33] oluşturmuş olduğu ısı denklemi çözümünden yararlanmışlardır. Çalışmada, bu çözüme çözüm bölgesi yüzeyinden ısı kaybını eklemek için süperpozisyon ilkesinden yararlanılmıştır. Çalışmanın sonucunda elde edilen sonuçların deneylerle uyumlu olduğu vurgulanmıştır. Ning ve ark. [34] yaptıkları bir diğer çalışmada Inconel 625 malzemesi için yine Craslaw ve Jeager' in [33] analitik fonksiyonunu kullanarak lazer eritmeli eklemeli imalat işlemini çoklu ve tekli tarama süreçleri açısından değerlendirmişlerdir. Ayrıca farklı tarama stratejilerine bağlı olarak sıcaklık dağılımını ve faz geçişini incelemişlerdir. Çalışmada değişen parametre olarak lazer gücü kullanılmıştır. Sonuçlar lazer gücü artışına bağlı olarak eriyik havuzu geometrisinin arttığını göstermiştir. Fathi ve ark. [35] yaptıkları çalışmada lazer eritmeli katmanlı imalat yöntemi sırasında oluşan sıcaklık dağılımı, eriyik havuzu geometrisi ve eriyik havuzunun hareketini incelemek amacıyla analitik model oluşturmuşlardır. Analitik model için daha önce bahsedilen çalışmalarda olduğu gibi Craslaw ve Jeager' in analitik fonksiyonundan yararlanılmıştır. Yapılan çalışma sonucu elde edilen çıktılar farklı lazer tarama hızı ve lazer güçleri için değerlendirilmiştir. Sonuçlar lazer gücü artışına ve lazer tarama hızı düşüşüne bağlı olarak eriyik havuzunun derinlik ve genişliğinin arttığını göstermiştir. Ayrıca eriyik havuzu yüzeyinde lineer olmayan bir sıvı yüzeyi elde edilmiştir. Yang ve ark. [36] SLE sırasında çözüm bölgesi içerisinde oluşan sıcaklık gradyanlarına ve deformasyonlara bağlı olarak artık gerilmeleri artırdığını ve artık gerilmeleri azaltmak için

tarama stratejilerinin önemli rol oynadığını öne sürmüşlerdir. Bu ilişkiyi araştırmak için literatürden farklı olarak hareketli ısı kaynağını, yüzeyde hareket yönünde sonsuz noktalarla temsil etmişler ve 3-B ısı modelini yarı analitik olarak çözmüşlerdir. Çözüm farklı katman sayıları ve çoklu tarama senaryoları için gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda farklı durumlar için deneysel çalışmalarla doğrulama yapılmıştır. Araya ve Gutierrez [37] yaptıkları çalışmada bir plakada, hareketli bir ısı kaynağı etkisi altında oluşan sıcaklık dağılımını analitik olarak incelemişlerdir. Çözüm için 3-B non-homojen ısı denklemini kullanmışlardır. Isı kaynağı olarak Gaussian hacimsel ısı kaynağı kullanmışlardır. Non-homojen ısı denklemin çözümü için “Eigen fonksiyon açılım” metodunu kullanmışlardır. Çalışmanın sonucunda çözüm bölgesi içerisindeki sıcaklık dağılımları verilmiş ve deneysel doğrulama gerçekleştirilmiştir.

Literatür çalışmaları incelendiğinde, nümerik modellerde SLE işleminin daha kapsamlı olarak ele alınmasına rağmen yüksek bilgisayar kapasitesi gerektirmesi ve çözümlemelerin uzun sürmesi gibi bazı dezavantajları olduğu tespit edilmiştir. Bunun yanında analitik çözümlerin gerçekleştirilebilmesi için oluşturulan modellerde basitleştirici kabullerin fazla olması, gerçek problemten uzaklaşılmasına sebebiyet vermektedir. Ancak, analitik modeller ile çözümlerin daha hızlı elde edilebilmesi ve yüksek bilgisayar kapasitesi gerektirmemesi oldukça önemli bir avantaj sağlamaktadır. Deneysel yöntemler ise hem yüksek maliyetler gerektirmekte hem de SLE işleminin oldukça hızlı bir proses olmasından dolayı ölçüm cihazlarının hassasiyetinden kaynaklanan ölçüm hataları meydana getirmektedir. Dolayısı ile gerçek problemi temsil kabiliyeti yüksek bir analitik model geliştirilmesi, SLE prosesinin modellenmesinde önem arz etmektedir.

Yukarıda bahsedilen avantajlarından dolayı bu çalışmada SLE prosesi sırasında oluşan sıcaklık dağılımları ve eriyik havuzu oluşumunu belirlemek amacı ile analitik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan bu modelde malzeme olarak havacılık, tıp ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasından dolayı, Ti64 malzemesi seçilmiştir. Ti64 malzemesine ait özellikler ve kullanım alanları aşağıda özetlenmiştir.

Ti malzemesi ilk olarak 1950’li yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Ti64, Ti alaşımları içerisinde en yaygın kullanılanlardan birisidir [38]. Ti64, bir $\alpha+\beta$ titanyum alaşımı olup, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek kırılma tokluğu, mükemmel korozyon direnci ve üstün biyo uyumluluk özellikleriyle ön plana çıkmaktadır [39,40,41]. Bunun yanı sıra,

Ti64, hem hafif hem de mukavemetli bir malzeme olması sebebiyle jet motorları, gaz tribünleri ve gövde birleşenlerinin imalatında sıklıkla kullanılmaktadır. Ti64 kullanımı, son yüzyılda denizcilik, otomobil, enerji, kimya ve biyomedikal uygulamaları gibi birçok alanda [42,43] yaygınlaşmış olmakla birlikte zayıf ısı iletkenliği, sertleşme eğilimi ve oksijenle hızlı reaksiyona girmesi sebebiyle geleneksel yöntemlerle ürün imalatı oldukça zordur. Dolayısıyla, Ti64 malzemesinin katmanlı imalat yöntemleri ile üretimde kullanımı diğer yöntemlere nazaran tercih edilmektedir [44]. Çizelge 2.1’ de Ti64 malzemesinin içeriğinde bulunan kimyasal bileşenler % olarak sunulmuştur.

Çizelge 2.1. Ti-6Al-4V malzemesi standart kimyasal bileşenleri [45].

	Al	V	C	Fe	O	N	H	Ti
Ti64	5,5–6,5%	3,5–4,5%	< 0,08%	< 0,25%	< 0,13%	< 0,05%	< 0,012%	Denge

Ti malzemesinin birçok avantajı olmasına rağmen üretimi oldukça maliyetlidir. Çizelge 2.2’ de katmanlı imalatla yaygın olarak kullanılan çelik ve alüminyumun; maden, metal, külçe ve levha şeklindeki üretim maliyetleri titanyum ile kıyaslanmıştır. Çizelgeye göre maden hali için titanyum üretim maliyeti, çeliğin 10, alüminyumun 20 katı seviyesinde; metal hali için titanyum maliyeti, çeliğin 50, alüminyumun 5 katı seviyesinde; Külçe hali için titanyum maliyeti, çeliğin 90, alüminyumun 9 katı seviyesinde ve son olarak levha hali için titanyum maliyeti çeliğin yaklaşık 80, alüminyumun ise 10 katı seviyesindedir. Sonuç olarak, titanyum üretim maliyetinin, katmanlı imalatla kullanılabilecek hammaddelere kıyasla oldukça yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 2.2. Çelik, alüminyum ve titanyum üretim maliyetlerinin karşılaştırılması [46].

Form	Çelik (\$/pound)	Alüminyum (\$/pound)	Titanyum (\$/pound)
Maden	0,02	0,01	0,22
Metal	0,1	1.1	5,44
Külçe	0,15	1,15	9,07
Levha	0,3-0,6	1-5	15-50

Ti64 malzemesinin termal ve fiziksel özellikleri “problemin tanıtımı ve model kurgulaması” bölümünde sunulmuştur.

3. PROBLEMİN TANIMI VE MODEL KURGULAMASI

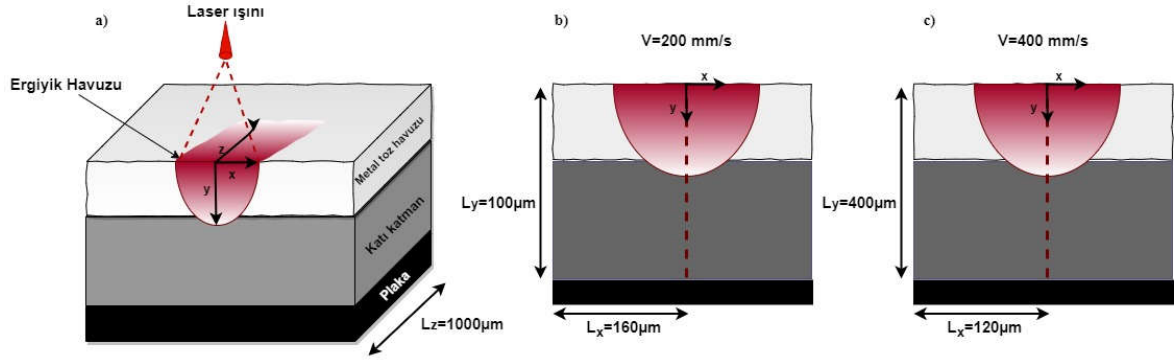
Bu bölümde, teze konu olan problemin tanımı yapıldıktan sonra, problemin çözümüne yönelik olarak oluşturulan fiziksel ve matematiksel model kurgulaması yapılmıştır.

3.1. Problemin Tanımı

Metal parçaların işlenmesinde kullanılan SLE prosesinin tek yönlü taraması süresince, iş tablası üzerinde malzeme içerisinde oluşan sıcaklık dağılımının ve eriyik havuzu geometrisinin belirlenmesine yönelik olarak 3-B zamana bağlı enerji üretiminin olduğu non-homojen ısı denkleminin Kartezyen koordinat sisteminde çözümünün elde edilmesi ve proses öncesi SLE işletim parametrelerinin tayinine yönelik parametrik çalışma gerçekleştirilmesi.

3.2. Fiziksel Model

Parça imalatında kullanılan SLE prosesi, parça geometrisine bağlı olarak istenen şekil elde edilinceye kadar lazer gücünün tarama yönünde ardışık olarak uygulanmasını gerektirmektedir. Bu prosesin fiziksel modeli tek bir tarama için Şekil 3.1(a)'da görüldüğü üzere tasvir edilmiştir. Fiziksel model, 3-B Kartezyen koordinat sisteminde sunulmuş olup, lazer kaynağı, plaka üzerine yerleştirilmiş toz malzeme tabakası, lazer enerjisi sonucu oluşan eriyik havuzu ve işleme prosesi sonucu bir önceki taramada oluşan katı katmanı içermektedir. Fiziksel model, SLE prosesinin, Şekil 3.1 (a)'da görüldüğü üzere, taramanın gerçekleştiği z-yönünde lazer enerjisinin sürekli olarak uygulandığı, eriyik havuzunun lazer enerjisinin uygulandığı nokta etrafında anlık olarak oluştuğu ve lazer kaynağının ilerlemesi ile eşgüdümlü olarak ilerlediği, taşınım, iletim ve radyasyon ısı transferlerinin kombine etkisi ile eriyik havuzdan ortama olan ısı kaybı sonucu ilerleme yönünün arkasında ve bir önceki tarama sonucu toz katmanının altında katı tabaka oluştuğu kabulüne bağlı olarak kurgulanmıştır. Taramanın başlangıcında, $t=0$ anında lazer kaynağının etki ettiği $z=0$ konumunda eriyik havuzunun oluştuğu kabul edilmiştir. Eriyik havuz geometrisi, işlenen malzemenin erime sıcaklığına ulaşıldığı noktalar birleştirilerek elde edilmiştir. Şekil 3.1b ve Şekil 3.1c ise sırasıyla 200 mm/s ve 400 m/s tarama hızlarında x-y düzlemi için temsili hacim boyutlarını göstermektedir.



Şekil 3.1. SLE prosesinin fiziksel modeli için seçilen temsili hacmin (a) 3-B, (b) 2B x-y düzlem ($V=200$ mm/s) ve (c) 2-B x-y düzlem ($V=400$ mm/s) görüntüsü

SLE işletim parametrelerinin belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen parametrik çalışma iki bölüme ayrılmıştır. İlk bölümde, düşük lazer gücü (20, 40, 60, 80 W) gerektiren uygulamalar için gerçekleştirilen SLE işlemi, ikinci bölümde ise yüksek lazer gücü (100, 150, 200, 250 W) gerektiren uygulamalar için gerçekleştirilen SLE işlemi incelenmiştir. Her iki grupta da seçilen güç değerleri literatürde yaygın olarak görülen değerlerdir. SLE prosesinde uygulanan lazer gücüne bağlı olarak malzeme kalınlıkları ve tarama hızları değişmektedir. Literatürde kullanılan değerlerden yararlanılarak düşük lazer güçleri için tarama hızı 200 mm/s ve yüksek lazer güçleri için 400 mm/s olarak seçilmiştir. Lazer gücüne bağlı olarak, analizin gerçekleştirileceği temsili hacim boyutları (L_x , L_y , L_z); düşük lazer güçleri için (160, 100, 1000) mikrometre ve yüksek lazer güçleri için (120, 400, 1000) mikrometre olarak seçilmiştir.

Fiziksel problemin, analitik olarak çözülebilir olması için belirli kabuller yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada, fiziksel modelin oluşturulması sırasında aşağıda sunulan kabuller yapılmıştır.

- Proses sırasında ergime sonucu buharlaşan hava kaynaklı eriyik havuzunun büzülmesi ihmal edilmiştir.
- Sıvı ara yüzeyinde faz değişim enerjisi ihmal edilmiştir.
- Lazer ışınının kontrol hacmine dik olarak etki ettiği kabulü yapılmıştır.
- Erime sonrasında oluşan sıvı bölgenin hareketliliği ihmal edilmiştir.
- Lazer kaynağının 2-B olduğu kabul edilmiştir.

Fiziksel modeli verilen problemin analitik modelinin kurgulanmasına geçilmeden önce SLE prosesi sırasında kullanılan lazer kaynağından yayılan enerjinin analitik modelinin kurgulanması gerekmektedir.

3.3. Lazer Kaynağı Enerji Absorpsiyon Modeli

SLE prosesinin analitik olarak modellenmesinde dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan biri lazer kaynağından yayılan enerjinin malzeme içerisinde absorpsiyonunun doğru tanımlanmasıdır. Literatürde yaygın olarak yüzeysel Gaussian, elipsoid şekilli hacimsel ve Gaussian hacimsel ısı kaynakları kullanılmıştır. Mishra ve ark. [15] yaptıkları çalışmada deneysel uyumun en çok Gaussian hacimsel ısı kaynağı modeli ile sağlandığını belirlemişlerdir. Dolayısıyla, bu çalışmada Gaussian hacimsel ısı kaynağı modeli, SLE sürecine uyarlanmıştır. Tarama sırasında açığa çıkan enerjinin malzeme içerisinde absorpsiyonu, üstel Beer-Lambert absorpsiyon yasasına göre modellenmiştir. Temsili çözüm bölgesi içerisinde seçilen diferansiyel bir dy elemanı üzerine enerji korunum yasası uygulayarak, ısı akısı, yüzey üzerindeki lazer ışığının şiddeti, $I(x,y)$ cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir [47].

$$q(x,y) = -\frac{dI(x,y)}{dy} \quad (3.1)$$

Eş. 3.1' de görülen $I(x,y)$ ifadesi metal toz katmanının yüzeyine gelen toplam lazer ışını şiddetini göstermektedir. Beer-Lambert absorpsiyon yasası SLE prosesine uyarlanarak Eş. 3.2 elde edilir.

$$\frac{dI(x,y)}{dy} = -\frac{1}{S} I(x,y) \quad (3.2)$$

Eş. 3.2' de geçen S ifadesi metal tozu katman kalınlığını göstermektedir. $y=0$ noktasındaki (metal toz yüzeyi) lazer ışını şiddeti, $I_0(x)$ Gaussian dağılıma göre Eş. 3.3' te sunulmuştur.

$$I_0(x) = \frac{2\varepsilon P}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{2x^2}{R^2}\right) \quad (3.3)$$

Eş. 3.3, Eş. 3.1' de yerine yazılırsa Gaussian hacimsel ısı kaynağı, koordinat eksenleri (x ve y), lazer kaynak parametreleri (P ve R) ve malzeme absorpsiyon özellikleri (ε ve S) cinsinden aşağıdaki gibi elde edilir [15].

$$q(x, y) = \frac{2\varepsilon P}{\pi R^2 S} \exp\left(-\frac{2x^2}{R^2}\right) \exp\left(-\frac{|y|}{S}\right) \quad (3.4)$$

Eş. 3.4' te görülen ε , Ti64 malzemesinin absorptivitesini; P, lazer gücünü; R, lazer çapını ve x, y ifadeleri koordinat eksenlerini ifade etmektedir. Analitik modelin çözümüne geçilmeden önce belirlenmesi gereken bir diğer önemli husus Ti64 malzemesinin termal ve fiziksel özellikleridir.

3.4. Ti64 Malzemesinin Termal ve Fiziksel Özellikleri

Analitik modelin doğruluğunu etkileyen en önemli parametrelerden bir diğeri, seçilen malzemelerin termal ve fiziksel özelliklerinin doğru belirlenmesidir. SLE prosesi sırasında temsili hacim içerisindeki metal toz, eriyik ve katı katmanlar için ısı denkleminin çözümünde gerekli olan tüm termo-fiziksel özellikler bu bölümde incelenmiştir.

Çizelge 3.1. Ti64 malzemesinin termal ve fiziksel özellikleri [15]

Katılaşma Sıcaklığı, T_s (K)	1877
Sıvılaşma Sıcaklığı, T_L (K)	1923
Termal iletkenlik, k (W/m K)	$1.25 + 0.015T, T \leq 1268$ $3.15 + 0.012T, 1268 < T \leq 1923$ $-12.75 + 0.024T, T > 1923$
Katı bölge özgül ısısı, c_s (J/kg K)	$483.04 + 0.215T, T \leq 1268$ $412.7 + 0.1801T, 1268 < T \leq 1923$
Sıvı bölge özgül ısısı, c_l (J/kg K)	831
Sıvı yoğunluğu ρ_l (kg/m ³)	4122
Katı yoğunluğu ρ_s (kg/m ³)	4430

Ti64 malzemesinin katı ve sıvı faz için termal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1' de verilmiştir. Tabla üzerine serilen metal tozlarının oluşturduğu katman metal toz yatağı olarak adlandırılmıştır. Gözenekli yapıya sahip olması sebebiyle, metal toz yatağının termal ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde aşağıda öngörülen yaklaşım kullanılmıştır:

Metal toz yatağının ısı iletkenlik katsayısı k_p , katı metal toz parçacıklarının iletkenliği, k_s cinsinden Eş. 3.5' te

$$k_p = k_s (1 - \varphi)^n \quad (3.5)$$

ve benzer şekilde, metal toz yatağının yoğunluğu ρ_p , katı metal toz parçacıklarının yoğunluğu, ρ_s cinsinden Eş. 3.6' da görüldüğü gibi tanımlanmıştır [15].

$$\rho_p = \rho_s (1 - \varphi) \quad (3.6)$$

Eş. 3.5' te görülen n üssü 4 [10] ve metal toz yatağının gözenekliliği, φ ilgili literatürden 0.41 olarak alınmıştır [15]. Metal toz yatağının yayıcılığı Eş. 3.7' de verilmiştir.

$$\varepsilon = \alpha_h \varepsilon_h + (1 - \alpha_h) \varepsilon_s \quad (3.7)$$

Eş. 3.7' de görülen α_h metal toz yatağının boşluğunu, ε_s ise katı toz parçacıklarının absorptivitesini ifade etmekte olup değeri ilgili literatürden [15] 0.19 olarak alınmıştır. Metal toz yatağının boşluğu, α_h toz yatağın gözenekliliği, φ cinsinden Eş. 3.8' de

$$\alpha_h = \frac{0.908\varphi^2}{1.908\varphi^2 - 2\varphi + 1} \quad (3.8)$$

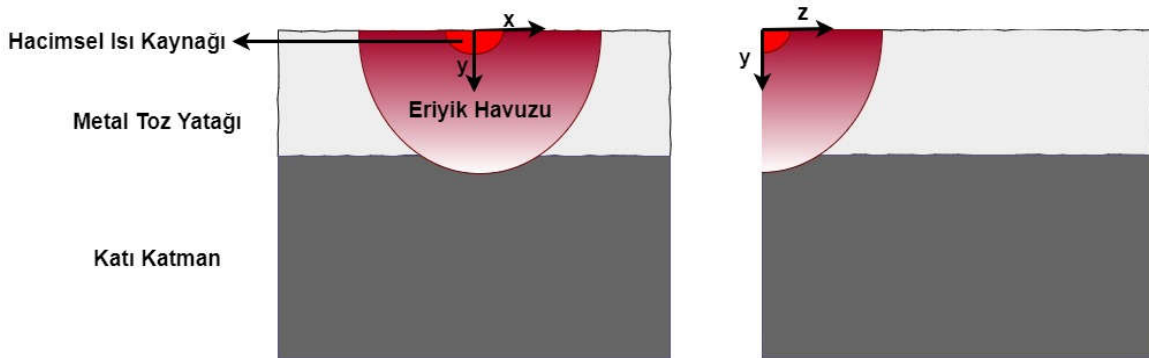
ve metal toz yatağındaki boşlukların yayıcılığı, ε_h ifadesi ise Eş. 3.9' da

$$\varepsilon_h = \frac{\varepsilon_s \left[2 + 3.082 \left(\frac{1-\varphi}{\varphi} \right)^2 \right]}{\varepsilon_s \left[1 + 3.082 \left(\frac{1-\varphi}{\varphi} \right)^2 \right] + 1} \quad (3.9)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

3.5. Analitik Model

Şekil 3.1' de fiziksel modeli verilen problemin analitik modelinin kurgulanabilmesi bazı basitleştirici kabullerin yapılmasını gerekli kılmıştır. Analitik modelin kurgulandığı çözüm bölgesinin x-y ve y-z düzlemlerindeki 2B temsili görünüşleri Şekil 3.2' de sunulmuştur. Matematiksel modelde, fiziksel modelden farklı olarak matematiksel analizin yapıldığı çözüm bölgesi kapsamında işlenecek malzemenin serili olduğu plaka çıkartılmıştır. Ayrıca, fiziksel modelde lazer kaynağının temsili çözüm bölgesi dışında bulunması, analitik modelin çözümünü uygulanan yöntemlerle mümkün kılmamaktadır. Bu problemi elimine etmek amacıyla, lazer kaynağından yayılan enerjinin malzeme içerisinde üretildiği kabulü yapılmıştır. Bu sayede, toz yatağı yüzeyi üzerindeki non-homojen non-lineer sınır şartı elimine edilerek lazer uygulaması sonucu üretilen ısı korunum denklemi bünyesine alınmıştır.



(a) x-y düzlemi 2B görünümü

(b) y-z düzlemi 2B görünümü

Şekil 3.2. (a) x-y düzlemi ve (b) y-z düzlemi 2-B fiziksel model görünüşleri

Şekil 3.2' de fiziksel modeli verilen problemin matematiksel formülasyonu, tüm katmanları içeren temsili çözüm bölgesi için enerji korunum denklemi şeklinde elde

edilmiş ve $x=0$ düzlemine göre problemin simetrik olması nedeniyle, problemin sağ yarısı için geçerli olan sınır şartlarını içerecek şekilde Çizelge 3.2’ de sunulmuştur:

Çizelge 3.2. Analitik model korunum denklemi, başlangıç ve sınır koşulları

Korunum Denklemi	$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q(x,y)}{k} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$	
x – yönü sınır şartı	$\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = 0$	$T_{x=L_x} = T_a$
y – yönü sınır şartı	$\left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} = 0$	$T_{y=L_y} = T_a$
z – yönü sınır şartı	$\left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{z=0} = 0$	$T_{z=L_z} = T_a$
Başlangıç şartı	$T_{t=0} = T_a$	

Bu problem, üç ardışık ısı problemine parçalanarak çözüm elde edilmeye çalışılmıştır. Buna yönelik olarak 3-B non-homojen zamana bağlı ısı denklemi, x-y düzleminde non-homojen kararlı durum 2-B ısı denklemi (Adım-1), x-y düzleminde 2B zamana bağlı ısı denklemi (Adım-2) ve z-yönünde 1-B zamana bağlı ısı denklemleri (Adım-3) kullanılarak Çizelge 3.3’ te görüldüğü gibi alt problemlere parçalanmıştır.

Modelin kurgulanması aşağıda anlatıldığı üzere gerçekleştirilmiştir:

Adım-1’ de non-homojen kararlı durum ısı denklemi, sınır şartları homojen hale dönüştürüldükten sonra analitik olarak çözülür. Adım-1’de elde edilen sıcaklık dağılımı, $T_0(x,y)$, 2B zamana bağlı ısı denkleminde başlangıç şartı olarak tanıtılır ve sınır şartları homojenleştirildikten sonra analitik olarak çözülür. Adım-2’de elde edilen sıcaklık dağılımı, $T_1(x,y)$, 1B zamana bağlı ısı denkleminin z-yönü sınır şartı olarak tanımlanarak çözülür. Adım-3’ de elde edilen sıcaklık dağılımı orijinal problemin çözümünü verecektir.

Çizelge 3.3. Ardışık denklemlerin korunum denklemi, başlangıç ve sınır koşulları

	Adım 1	Adım 2	Adım 3
Korunum Denklemleri	$\frac{\partial^2 T_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_o}{\partial y^2} + \frac{q(x,y)}{k} = 0$	$\frac{\partial^2 T_t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_t}{\partial y^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T_t}{\partial t}$	$\frac{\partial^2 T_z}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T_z}{\partial t}$
x – yönü sınır şartı	$\left(\frac{\partial T_o}{\partial x} \right)_{x=0} = 0$ $T_{o,x=L_x} = T_a$	$\left(\frac{\partial T_t}{\partial x} \right)_{x=0} = 0$ $T_{t,x=L_x} = T_a$	
y – yönü sınır şartı Durum1: Durum2:	$T_{o,y=L_y} = T_a$ $\left(\frac{\partial T_o}{\partial y} \right)_{y=0} = 0$ $\left(\frac{\partial T_o}{\partial y} \right)_{y=0} + \frac{h_c}{k} (T_o - T_a) = 0$	$\left(\frac{\partial T_t}{\partial y} \right)_{y=0} = 0$ $T_{t,y=L_y} = T_a$	
z – yönü sınır şartı			$T_{z,z=z_c} = T_i(x,y,t=0)$ $T_{z,z=L_z} = T_a$
Başlangıç koşulu		$t = 0, T_t = T_o(x,y)$	

Adım—1: 2-B Non-homojen Kararlı Durum Isı Probleminin Analitik Çözümü

2-B non-homojen kararlı durum ısı denkleminin içerdiği non-homojen terim, $q(x,y)$ x ve y bağımsız değişkenlerinin non-lineer fonksiyonu olduğu için çözümü “Eigen Fonksiyon Açılım” metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kararlı durum ısı problemi, ısı üretim terimi yönetici denklem içerisinde tutularak ve sınır şartları değişken değişimi ($\theta_o = T_o - T_a$) ile homojenleştirilerek x-yönünde öz-değer problemine dönüştürülmüştür. y yönünde malzeme yüzeyi sınır şartı, iki farklı durum için; yalıtım sınır şartı ile taşınım ve radyasyon etkilerini içeren kombine ısı transfer şartı için Çizelge 3.4’ te sunulduğu şekilde modellenmiştir.

Çizelge 3.4. Adım 1: Isı denklemleri, sınır ve başlangıç şartları

Korunum Denklemi	$\frac{\partial^2 T_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_o}{\partial y^2} + \frac{q(x,y)}{k} = 0 \quad (3.10)$	$\frac{\partial^2 \theta_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_o}{\partial y^2} + \frac{q(x,y)}{k} = 0 \quad (3.10)$
x - yönü Sınır Şartı	$\left(\frac{\partial T_o}{\partial x} \right)_{x=0} = 0 \quad (3.10a)$	$\left(\frac{\partial \theta_o}{\partial x} \right)_{x=0} = 0 \quad (3.11a)$
	$T_{o,x=L_x} = T_a \quad (3.10b)$	$\theta_{o,x=L_x} = 0 \quad (3.11b)$
y - yönü Sınır Şartı	$T_{o,y=L_y} = T_a \quad (3.10c)$	$\theta_{o,y=L_y} = 0 \quad (3.11c)$
Durum – 1	$\left(\frac{\partial T_o}{\partial y} \right)_{y=0} = 0 \quad (3.10d)$	$\left(\frac{\partial \theta_o}{\partial y} \right)_{y=0} = 0 \quad (3.11d)$
Durum – 2	$\left(\frac{\partial T_o}{\partial y} \right)_{y=0} + \frac{h_c}{k} (T_o - T_a) = 0 \quad (3.10d)$	$\left(\frac{\partial \theta_o}{\partial y} \right)_{y=0} + \frac{h_c}{k} \theta_o = 0 \quad (3.11d)$

Eş. 3.10d’ de taşınım sınır şartında bulunan bileşik ısı transfer katsayısı h_c sıcaklığa bağlı olarak literatürden aşağıdaki gibi seçilmiştir [15].

$$h_c = 2.4 \times 10^{-3} \varepsilon T^{1.61} \quad (3.12)$$

Kararlı durum ısı probleminin çözümü için taşınım sınır şartının homojen ve lineer olması gerekmektedir. Sıcaklığa bağlı bileşik ısı transfer katsayısı, problemin önerilen yöntemle çözülmesini imkânsız kılmaktadır. Bu problemi aşmak için, analitik model, bileşik ısı transfer katsayısı sabit kabul edilerek çözülmüş ve sıcaklık dağılımı bileşik ısı transfer katsayısının fonksiyonu şeklinde elde edilmiştir. Daha sonra, analitik çözümden elde edilen fonksiyon kullanılarak, yüzey üzerindeki her nokta için tahmini sıcaklık değerleri atanmış ve önerilen sıcaklığa bağlı bileşik ısı transfer katsayısından elde edilen değer ile analitik çözümden elde edilen değer eşitlenene kadar hesaplama tekrarlanmıştır. Bu iteratif metot ile yüzey sıcaklıkları güncellenerek gerçek problemi temsil eden çözüm elde edilmiştir.

Eş. 3.10’ da sunulan kararlı durum ısı problemi, non-homojen yönetici diferansiyel denklem ile y-yönünde 1 adet non-homojen sınır şartı içermektedir. Yönetici diferansiyel denklemi non-homojen yapan ifade, lazer enerjisi sonucu malzeme içerisinde üretilen ısı, $q(x,y)$ ’ dir. Bu üretilen ısıнын x ve y değişkenlerine bağlı fonksiyonel ifadesi Eş.3.4’te

verilmiştir. Bu problemin çözümü için literatürde yaygın olarak kullanılan “Eigen Function Expansion” yöntemi önerilmiştir [48].

“Eigen function expansion” metodu, yönetici diferansiyel denklemdeki non-homojen terimin $q(x, y)$ ve çözümün, $\theta_o(x, y)$, sadece bağımsız değişken x ’e bağlı bir fonksiyon ile sadece y ’ye bağlı diğer bir fonksiyonun çarpımı şeklinde tanımlanması esasına dayamaktadır. Bu bağımlılıklar aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$\theta_o(x, y) = \sum_i \Theta_i(y) X_i(x) \quad (3.13)$$

$$q(x, y) = \sum_i \phi_i(y) X_i(x) \quad (3.14)$$

Eşitliklerde görülen $X_i(x)$ ifadesi, öz değerlere karşılık gelen öz fonksiyonlardır. $X_i(x)$ ifadesinin belirlenebilmesi için Eş. 3.11’ in homojen kısmına değişkenlerin ayrıştırılması metodu aşağıda sunulduğu üzere uygulanmıştır.

$$\theta_o(x, y) = \Theta(y) X(x) \quad (3.15)$$

Öz fonksiyon $X(x)$ ve öz değerlerin bulunabilmesi için Eş. 3.15’ te önerilen fonksiyon Eş. 3.11’ in homojen kısmında yerine konularak sadece bağımsız değişken x ’ e bağlı olarak aşağıdaki formda elde edilir.

$$\frac{\Theta''(y)}{\Theta(y)} = -\frac{X''(x)}{X(x)} = -\lambda^2 \rightarrow X''(x) = \lambda^2 X(x) \quad (3.16)$$

Eş. 3.16, $\lambda > 0$ için çözülmüş ($\lambda < 0$ ve $\lambda = 0$ için çözüm aşıkardır), öz değer ve öz fonksiyonlar aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$X_i(x) = \cos(\lambda_i x), \quad \lambda_i = \left(\frac{2i+1}{2} \right) \frac{\pi}{L_x}, \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (3.17)$$

Bu işlemin ardından non-homojen eşitliğin çözümüne geçilmiş ve Eş. 3.13, Eş. 3.11' de görülen iletim ile ısı transferi eşitliğine uyarlanarak aşağıdaki gibi türetilmiştir.

$$\theta''_{o,y}(x, y) = \sum_i \Theta''_i(y) \cos(\lambda_i x) \quad (3.18)$$

$$\theta''_{o,x}(x, y) = \sum_i -\lambda_i^2 \Theta_i(y) \cos(\lambda_i x) \quad (3.19)$$

Elde edilen ifadeler Eş. 3.11' de yerine yazılırsa öz-fonksiyonlara bağlı diferansiyel denklem aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\sum_i \Theta''_i(y) \cos(\lambda_i x) - \lambda_i^2 \Theta_i(y) \cos(\lambda_i x) = \sum_i -\frac{1}{k} \phi(y) \cos(\lambda_i x) \quad (3.20)$$

Sadeleştirme sonucu aşağıdaki form elde edilir.

$$\Theta''_i(y) - \lambda_i^2 \Theta_i(y) = -\frac{\phi(y)}{k} \quad (3.21)$$

Eş. 3.21' in çözümü $\Theta_i(y)$ ifadesini verecektir. Ele alınan diferansiyel eşitliğin homojen kısmı $\Theta''_i(y) - \lambda_i^2 \Theta_i(y) = 0$ ' dır. Bu homojen diferansiyel eşitliğin çözümü $\Theta_{h,i}(y) = e^{my}$ şeklinde aranır, Karakteristik eşitlik ve kökleri $m^2 - \lambda_i^2 = 0$ ve $m_{1,2} = \pm \lambda_i$ şeklinde olur. Dolayısı ile eşitliğin homojen kısmının çözümü Eş. 3.22' de görüldüğü gibi olacaktır.

$$\Theta_{h,i}(y) = C_1 e^{\lambda_i y} + C_2 e^{-\lambda_i y} \quad (3.22)$$

Eşitliğin non-homojen kısmının, $\Theta_{i,i}(y)$ çözümü için parametrelerin değişimi metodu kullanılmıştır. Parametrelerin değişimi metodundaki ana fıkirden, C_1 ve C_2 sabitleri $u(y)$ ve $v(y)$ ile değiştirilirse, özel çözüm Eş. 3.23 vasıtasıyla bulunur. Burada $u(y)$ ve $v(y)$ aranan fonksiyonlardır.

$$\Theta_{i,i}(y) = u(y) e^{\lambda_i y} + v(y) e^{-\lambda_i y} \quad (3.23)$$

Metot gereği, $u(y)$ ve $v(y)$ ifadelerinin bulunabilmesi için Eş. 3.23' ün türevi aşağıda görüldüğü gibi alınmıştır.

$$\Theta'_{i,i}(y) = u'(y)e^{\lambda_i y} + \lambda e^{\lambda_i y} u(y) + v'(y)e^{-\lambda_i y} - \lambda e^{\lambda_i y} v(y) \quad (3.24)$$

Eş. 3.24' teki türevli ifadeler sıfıra eşitlenerek çözüm için birinci eşitlik elde edilmiştir.

$$u'(y)e^{\lambda_i y} + v'(y)e^{-\lambda_i y} = 0 \quad (3.25)$$

Eş. 3.24' ün kalan kısmının (türevli ifadeler dışında kalan kısım) türevi alınarak Eş. 3.26 elde edilir.

$$\Theta''_{i,i}(y) = u'(y)\lambda_i e^{\lambda_i y} + \lambda_i^2 e^{\lambda_i y} u(y) - v'(y)\lambda_i e^{-\lambda_i y} + \lambda^2 e^{\lambda_i y} v(y) \quad (3.26)$$

Eş. 3.26' nın türevli kısımları alınarak ve $-\frac{\phi_i}{k}$ non-homojen kısma eşitlenerek, çözüm için ikinci eşitlik aşağıda görüldüğü gibi elde edilmiş olur.

$$u'(y)\lambda e^{\lambda_i y} - v'(y)\lambda e^{-\lambda_i y} = -\frac{\phi_i}{k} \quad (3.27)$$

Yukarıda bulunan Eş. 3.25 ve Eş. 3.27 ifadeleri aşağıda görülen eşitlik sistemi şeklinde yazıldığında Eş. 3.28 elde edilir.

$$\begin{cases} u'(y)\lambda e^{\lambda_i y} - v'(y)\lambda e^{-\lambda_i y} = -\frac{\phi_i}{k} \\ u'(y)e^{\lambda_i y} + v'(y)e^{-\lambda_i y} = 0 \end{cases} \quad (3.28)$$

Bu eşitlik sistemi Cramer metodu ile çözülrse $u'(y)$ ve $v'(y)$ aşağıdaki gibi elde edilir.

$$u'(y) = \frac{\begin{vmatrix} 0 & e^{-\lambda y} \\ -\phi_i/k & -\lambda e^{-\lambda y} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} e^{\lambda y} & e^{-\lambda y} \\ \lambda e^{\lambda y} & -\lambda e^{-\lambda y} \end{vmatrix}} \quad (3.29)$$

$$v'(y) = \frac{\begin{vmatrix} 0 & e^{-\lambda y} \\ -\phi_i/k & -\lambda e^{-\lambda y} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} e^{\lambda y} & e^{-\lambda y} \\ \lambda e^{\lambda y} & -\lambda e^{-\lambda y} \end{vmatrix}} \quad (3.30)$$

Yukarıdaki $u'(y)$ ve $v'(y)$ eşitliklerinin integralleri alınarak;

$$u(y) = \int \frac{-\phi_i(y)e^{-\lambda_i y}}{2\lambda_i k} dy \quad (3.31)$$

$$v(y) = \int \frac{\phi_i(y)e^{\lambda_i y}}{2\lambda_i k} dy \quad (3.32)$$

Çözüm kapalı fonksiyon şeklinde ifade edilir. Eş. 3.31 ve Eş. 3.32 ifadelerinin değerlerinin bulunabilmesi için öncelikle $\phi_i(y)$ ifadesinin bulunması gerekmektedir. $\phi_i(y)$ fonksiyonunun bulunabilmesi için Eş. 3.14' e Fourier dönüşümü uygulanmıştır.

$$\phi_i(y) = \frac{2}{L_x} \int_0^{L_x} q(x, y) X_i(x) dx \quad (3.33)$$

Eş. 3.33, Eş. 3.31 ve Eş. 3.32' de yerine yazılarak $u(y)$ ve $v(y)$ ifadeleri elde edilir. Buradan $\Theta_i(y)$ ifadesi, genel ve özel çözümün toplanmasıyla aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\Theta_i(y) = C_1 e^{\lambda_i y} + C_2 e^{-\lambda_i y} + u(y) e^{\lambda_i y} + v(y) e^{-\lambda_i y} \quad (3.34)$$

$\theta_o(x, y)$ sıcaklık alanının bulunabilmesi için Eş. 3.34, Eş. 3.13' te yerine yazılarak çözüm aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\theta_o(x, y) = \sum_i (C_1 e^{\lambda_i y} + C_2 e^{-\lambda_i y} + u(y) e^{\lambda_i y} + v(y) e^{-\lambda_i y}) \cos(\lambda_i x) \quad (3.35)$$

Eş. 3.35' te görülen C_1 ve C_2 katsayıları, sınır koşulları yerine (Eş 3.11c, Eş 3.11d) yazılarak, her iki yüzey sınır şartı için aşağıdaki gibi bulunmuştur.

Durum 1 için;

$$C_1 = \frac{w(x, y) + z_1 e^{-\lambda_i L_y}}{e^{-\lambda_i L_y} + e^{\lambda_i L_y}} \quad (3.36)$$

ve

$$C_2 = \frac{w(x, y) - z_1 e^{\lambda_i L_y}}{e^{-\lambda_i L_y} + e^{\lambda_i L_y}} \quad (3.37)$$

Eş. 3.36 ve Eş. 3.37' de görülen $w(x, y)$ ve z_1 ifadesi aşağıdaki gibidir,

$$w(x, y) = \frac{2\theta_p \sin(\lambda_i L_x)}{\lambda L_x} - \left[u(L_y) e^{\lambda_i L_y} + v(L_y) e^{-\lambda_i L_y} \right] \quad (3.38)$$

$$z_1 = v(0) - u(0) \quad (3.39)$$

Durum 2 için;

$$C_1 = \frac{z_2 e^{-\lambda_i L_y} - w(x, y) \left(\frac{h_c}{k} - \lambda_i \right)}{e^{-\lambda_i L_y} \left(\frac{h_c}{k} + \lambda_i \right) - e^{\lambda_i L_y} \left(\frac{h_c}{k} - \lambda_i \right)} \quad (3.40)$$

$$C_2 = \frac{w(x, y) \left(\frac{h_c}{k} - \lambda_i \right) - z_2 e^{\lambda_i L_y}}{e^{-\lambda_i L_y} \left(\frac{h_c}{k} + \lambda_i \right) - e^{\lambda_i L_y} \left(\frac{h_c}{k} - \lambda_i \right)} \quad (3.41)$$

Eş. 3.40 ve Eş. 3.41’ de görülen $w(x, y)$ ve z_1 ifadesi aşağıdaki gibidir,

$$w(x, y) = \frac{2\theta_p \sin(\lambda_i L_x)}{\lambda_i L_x} - \left[u(L_y) e^{\lambda_i L_y} + v(L_y) e^{-\lambda_i L_y} \right] \quad (3.42)$$

$$z_2 = u(0) \left(\frac{h_c}{k} + \lambda_i \right) - u(0) \left(\frac{h_c}{k} - \lambda_i \right) \quad (3.43)$$

Yukarıda yapılan çözümleme ile birlikte $t=0$ anında x ve y koordinatlarına bağlı sıcaklık dağılımını veren ifade Eş. 3.35’ te elde edilmiştir. Eşitlikte görülen C_1 ve C_2 ifadeleri, Durum 1 ve Durum 2 olarak ifade edilen sınır şartları ile saptanmış ve Eş. 3.35’ te yerine yazılarak çözüm $\theta_o(x, y)$ ifadesi elde edilmiştir.

Adım—2: 2-B homojen zamana bağlı ısı denkleminin analitik çözümü

2-B homojen zamana bağlı ısı denkleminin çözümü için “Değişkenlerin Ayırıştırılması” metodu kullanılmıştır.

2-B homojen zamana bağlı ısı denklemi homojen olmasına karşın sınır koşullarından iki tanesi (3.44b, 3.44d) ve başlangıç koşulu (3.44e) non-homojendir. Ayırıştırma yöntemi gereği sınır ve başlangıç koşullarının homojenleştirilmesi için $\theta_t = T_t - T_a$ dönüşümü uygulanmıştır.

Çizelge 3.5. Adım 2 için korunum denklemleri, sınır ve başlangıç koşulları

Korunum Denklemi	$\frac{\partial^2 T_t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_t}{\partial y^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T_t}{\partial t} \quad (3.44)$	$\frac{\partial^2 \theta_t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_t}{\partial y^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial \theta_t}{\partial t} \quad (3.45)$
x – yönü Sınır Şartı	$\left(\frac{\partial T_t}{\partial x} \right)_{x=0} = 0 \quad (3.44a)$	$\left(\frac{\partial \theta_t}{\partial x} \right)_{x=0} = 0 \quad (3.45a)$
	$T_{t,x=L_x} = T_a \quad (3.44b)$	$\theta_{t,x=L_x} = 0 \quad (3.45b)$
y – yönü Sınır Şartı	$\left(\frac{\partial T_t}{\partial y} \right)_{y=0} = 0 \quad (3.44c)$	$\left(\frac{\partial \theta_t}{\partial y} \right)_{y=0} = 0 \quad (3.45c)$
	$T_{t,y=L_y} = T_a \quad (3.44d)$	$\theta_{t,y=L_y} = 0 \quad (3.45d)$
Başlangıç Şartı	$T_{t,t=0} = T_o(x, y) \quad (3.44e)$	$\theta_{t,t=0} = T_o(x, y) - T_a \quad (3.45e)$

Çözüm için Eş. 3.45 ve sınır koşullarına bakıldığında, homojen bir diferansiyel eşitlik, dört adet homojen sınır koşulu ve bir adet homojen olmayan başlangıç koşulu görülmektedir. Dolayısıyla eşitlik çözümü için yaygın olarak kullanılan ayrıklaştırma yöntemi kullanılmıştır. Eş. 3.45' e aşağıda görüldüğü gibi ayrıklaştırma işlemi uygulanmıştır.

$$\theta_t = \kappa(x)\varphi(y)\tau(t) \quad (3.46)$$

Eş. 3.46' da görülen ifade Eş. 3.45' te yerine yazılırsa x, y ve t' ye bağlı ifadeler birbirinden ayrılır ve kısmi diferansiyel eşitlik, adi diferansiyel eşitliğe aşağıdaki gibi dönüştürülmüş olur.

$$\frac{\kappa''}{\kappa} + \frac{\varphi''}{\varphi} = \frac{1}{a} \frac{\tau'}{\tau} \quad (3.47)$$

Eşitliğin çözümü için öz-değer ve öz-vektörlerin bulunması gerekmektedir. Dolayısıyla ilk olarak Eş. 3.48' de görülen tanımlama yapılarak x' e bağlı öz-değer ve öz-vektörler bulunacaktır.

$$\frac{\kappa''}{\kappa} = \frac{1}{a} \frac{\tau'}{\tau} - \frac{\varphi''}{\varphi} = -\beta^2 \rightarrow \kappa'' = -\beta^2 \kappa \quad (3.48)$$

$\kappa(x)$ fonksiyonu, Eş. 3.48' den aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\kappa'' + \kappa\beta^2 = 0 \quad (3.49)$$

Eş. 3.49 ifadesi $\beta > 0$ ($\beta < 0$ ve $\beta = 0$ için çözüm aşıkardır) için çözüldü ve öz-değer ve öz-fonksiyonları Eş. 3.45a ve Eş. 3.45b'de görülen sınır koşulları kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\kappa_j(x) = \cos(\beta_j x), \quad \beta_j = \left(\frac{2j+1}{2} \right) \frac{\pi}{L_x}, \quad j = 0, 1 \dots n \quad (3.50)$$

Benzer şekilde $\varphi(y)$ fonksiyonunun öz-değer ve öz-fonksiyonlarının bulunabilmesi için Eş. 3.51 tanımlanmıştır.

$$\frac{1}{a} \frac{\tau'}{t} + \beta^2 = \frac{\varphi''}{\varphi} = -\nu^2 \rightarrow \varphi'' = -\nu^2 \varphi \quad (3.51)$$

$\varphi(y)$ fonksiyonu, Eş. 3.51' den aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\varphi'' + \varphi\nu^2 = 0 \quad (3.52)$$

Eş. 3.52 ifadesi $\nu > 0$ ($\nu < 0$ ve $\nu = 0$ için çözüm aşıkardır) için çözüldü ve öz-değer ve öz-fonksiyonları Eş. 3.45c ve Eş. 3.45d' de görülen sınır koşulları kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\varphi_k(y) = \cos(\nu_k y), \quad \nu_k = \left(\frac{2k+1}{2} \right) \frac{\pi}{L_y}, \quad k = 0, 1 \dots n \quad (3.53)$$

x ve y yönlerindeki öz-değer ve öz-fonksiyonların elde edilmesinin ardından Eş. 3.54' te görülen $\tau(t)$ fonksiyonunun çözümü elde edilecektir. Bu çözümleme için elde edilen öz-değerler yerine yazılarak aşağıda görülen ifade elde edilir.

$$\frac{1}{a} \frac{\tau'}{t} + \beta^2 + \nu^2 = 0 \quad (3.54)$$

Eş. 3.54' te görülen $\beta^2 + \nu^2$ ifadesi çözümü basitleştirmek için χ^2 ifadesi ile tanımlanıp sadeleştirilirse Eş. 3.55 elde edilir.

$$\frac{\tau'(t)}{t} = -a\chi^2 \quad (3.55)$$

Eş. 3.55' te görülen ifade adi diferansiyel denklem olup integrali alınırsa $\tau(t)$ zamana bağlı olarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\tau(t) = C_3 e^{-at\chi^2} \quad (3.56)$$

Ayrıklaştırma ile alt problemlerin çözümlemesi sonucu elde edilen $\tau(t)$ (Eş. 3.56), $\varphi_k(y)$ (Eş. 3.53) ve $\kappa_j(x)$ (Eş. 3.50) ifadeleri Eş. 3.46' da yerine yazılırsa, orijinal problemin çözümü Eş. 3.57' de görüldüğü gibi elde edilir.

$$\theta_t = \sum_j \sum_k C_3 \cos(\beta_j x) \cos(\nu_k y) e^{-at\chi^2} \quad (3.57)$$

Eşitlikte görülen C_3 katsayısının bulunabilmesi için, Eş 3.57' ye başlangıç koşulu olan Eş. 3.45e uygulanıp Fourier dönüşümü yapılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$C_3 = \frac{4}{L_x L_y \beta \nu} \theta_{t,o}(x, y) (\sin(\beta_j L_x) \sin(\nu_k L_y)) \quad (3.58)$$

Adım—3: z yönünde 1-B zamana bağlı ısı denkleminin analitik çözümü

Lazer kaynağının z yönlü ilerlemesine bağlı olarak oluşan sıcaklık dağılımını incelemek için oluşturulan z yönlü zamana bağlı homojen ısı denklemi ve sınır koşulları Çizelge 3.6' da verilmiştir. Denklemin çözümü için önerilen sınır koşulları non-homojen olduğundan

çözümün ayrıklaştırma yöntemi ile gerçekleştirilmesi mümkün değildir. Bu yüzden çözüm için Paul J. Schneider' ın [49] önermiş olduğu değişken değiştirme yöntemi kullanılmıştır.

Bu yöntem denklemin değişkenleri olan z ve t ifadelerine değişken atanmasına ve korunum denkleminin ve sınır koşullarının yeni atanan değişkenlerle türetilmesine dayanmaktadır. Böylece kısmi diferansiyel denklemi adi diferansiyel denkleme dönüştürülmüştür. Çözümün ayrıntıları aşağıda verilmiştir.

Çizelge 3.6. Adım 3 için korunum denklemleri, sınır ve başlangıç koşulları

Korunum Denklemi	$\frac{\partial^2 T_z}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T_z}{\partial t}$ (3.59)
z yönlü sınır koşulları	$T_{z,z=z_c} = T_i(x, y, t = 0)$ (3.59a)
	$T_{z,z=L_z} = T_a$ (3.59b)

Problemin çözümü için z ve t değişkenlerine Eş. 3.60' ta görülen dönüşümler uygulanmıştır.

$$\begin{aligned} \xi &= z - Ut \\ t_1 &= t \end{aligned} \quad (3.60)$$

Burada görülen U , lazer kaynağı hızıdır. Bu dönüşümden yararlanılarak Eş. 3.59' un ξ cinsinden yazılabilmesi için aşağıdaki tanımlamalar yapılmıştır.

$$\frac{\partial \xi}{\partial z} = 1 \quad (3.61)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -U \quad (3.62)$$

$$\frac{\partial t_1}{\partial z} = 0 \quad (3.63)$$

$$\frac{\partial t_1}{\partial t} = 1 \quad (3.64)$$

Yukarıdaki tanımlamalar aracılığı ile $\frac{\partial T_z}{\partial z}$ ifadesi ξ değişkeni cinsinden aşağıdaki gibi yazılır.

$$\frac{\partial T_z}{\partial z} = \frac{\partial T_z}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial z} + \frac{\partial T_z}{\partial t_1} \frac{\partial t_1}{\partial z} = \frac{\partial T_z}{\partial \xi} \quad (3.65)$$

Aynı şekilde $\frac{\partial T_z}{\partial t}$ ifadesi ξ değişkeni cinsinden aşağıdaki gibi yazılır.

$$\frac{\partial T_z}{\partial t} = \frac{\partial T_z}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial T_z}{\partial t_1} \frac{\partial t_1}{\partial t} = -U \frac{\partial T_z}{\partial \xi} + \frac{\partial T_z}{\partial t_1} \quad (3.66)$$

Eş. 3.66' da görülen $\frac{\partial T_z}{\partial t_1}$ ifadesi hareketli koordinat sistemi olması sebebiyle sıfır alınır.

Bu tanımlamaların ardından Eş. 3.59 aşağıdaki şekli alır.

$$\frac{d^2 T_z}{d\xi^2} = -\frac{U}{a} \frac{dT_z}{d\xi} \quad (3.67)$$

Eş. 3.59, yapılan dönüşüm ile birlikte adi diferansiyel eşitlik haline dönüşmüştür. Eşitliğin

kökleri ise $-\frac{U}{a}$ ve 0' dır. Dolayısı ile eşitliğin çözümü aşağıdaki gibi olacaktır.

$$T_z(\xi) = C_4 e^{-\frac{U}{a}\xi} + C_5 \quad (3.68)$$

Çözümün elde edilmesinin ardından katsayıların bulunabilmesi için sınır koşulları ξ cinsinden tanımlanmalıdır. Dolayısı ile Eş. 3.59a ve 3.59b' ye de dönüşüm yapılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$T_{z,\xi=0} = T_s, \quad 0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y \quad (3.69)$$

$$T_{z,\xi=L_z-Ut} = T_a, \quad 0 \leq x \leq L_x, 0 \leq y \leq L_y \quad (3.70)$$

Eş. 3.69 ve Eş. 3.70, Eş. 3.68' de yerine yazılırsa C_4 ve C_5 katsayıları aşağıda görüldüğü gibi elde edilir.

$$C_4 = \frac{T_a - T_s}{\left(e^{\frac{U}{a}(L_z - Ut)} - 1 \right)} \quad (3.71)$$

$$C_5 = T_s - \frac{T_a - T_s}{\left(e^{\frac{U}{a}(L_z - Ut)} - 1 \right)} \quad (3.72)$$

Çözümün elde edilmesiyle birlikte artık belirli zamanda ve belirli bir noktada sıcaklık değerleri bulunabilmektedir. Buna bağlı olarak sıcaklık gradyanları ve eriyik fazı belirlenebilmektedir.

3.6. Analitik Çözümün Sayısal Hesabı

Bölüm 3' te fiziksel model ve analitik model ayrıntılı olarak verilmiştir. Analitik modelin çözümünden elde edilen fonksiyonel ifadelerin sayısal değerlerinin hesaplanabilmesi ve sıcaklığa bağlı bileşik ısı transfer katsayısının belirlenmesinde iteratif metotların kullanımının gerekli olması, ilave yazılım kullanılmasını gerektirmiştir. Bu amaca yönelik olarak, analitik çözümden elde edilen fonksiyonlar MATLAB yazılımına aktarılmış ve parametrik çalışma gerçekleştirilmiştir.

MATLAB kullanılarak çözüm bölgesi içerisindeki sıcaklığın hesaplanması için bir program yazılmıştır. "Sıcaklık Yazılımı" olarak adlandırılan bu yazılıma ait akış diyagramı Şekil 3.3' te sunulmuştur. Sıcaklığın tespitinde kullanılan akış diyagramında, öncelikle fiziksel büyüklükler (L_x , L_y , L_z), konum (x , y , z) ve işletim parametreleri (P , R , S), işlenen malzeme özellikleri (r_0 , epsilon, ergime sıcaklığı, katılaşma sıcaklığı, çevre sıcaklığı, T_a ,

ısı iletkenliğin hesaplanmasında kullanılan sıcaklıklar, 1923, 1268) ve zaman (t) değerleri programa girdi olarak verilmiştir. Sıcaklığa bağlı h_c , k ve c ifadelerinin bulunabilmesi için başlangıç sıcaklık tahmini (T_t) yapılır. Analitik çözümden elde edilen sıcaklık fonksiyonları (T_t , T_z) kullanılarak istenilen noktanın sıcaklık değeri hesaplanır. Başlangıç sıcaklık tahmini ile hesaplama sonucu elde edilen sıcaklık değeri farklı çıkarsa başlangıç sıcaklık tahmini için fonksiyondan hesaplanan sıcaklık değeri güncellenerek tüm işlemler tekrar hesaplanır. Bu işlem tahmin edilen sıcaklık ile fonksiyon kullanılarak hesaplanan sıcaklık değeri eşitlenene kadar devam eder ve istenilen noktanın sıcaklık değeri bulunur. Bu işlem farklı x , y ve z noktaları için tekrarlanarak çözüm bölgesi içerisindeki sıcaklık dağılımı elde edilir.

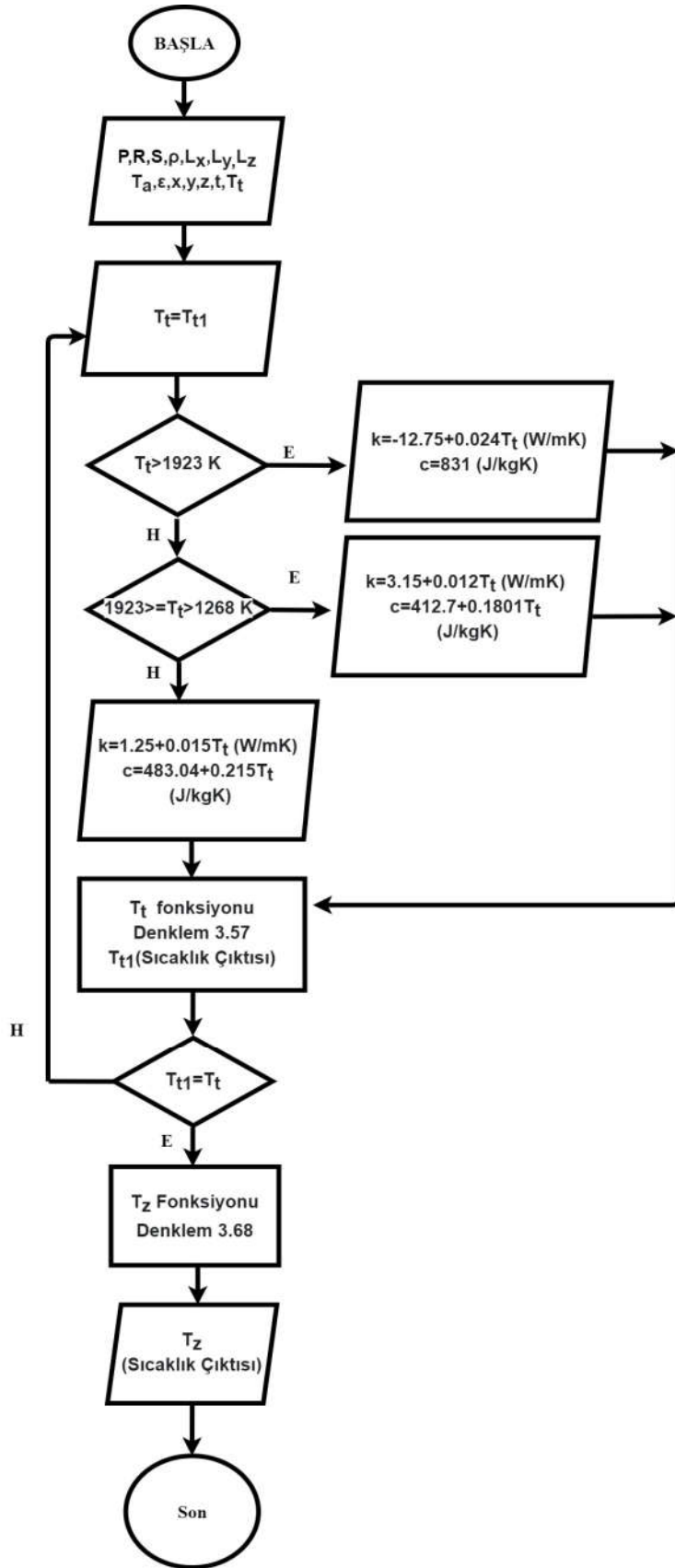
MATLAB kullanılarak çözüm bölgesi içerisindeki oluşan eriyik havuzu geometrisinin belirlenmesi için bir program yazılmıştır. “Eriyik Geometri Yazılımı” olarak adlandırılan bu yazılıma ait akış diyagramı Şekil 3.4’te sunulmuştur. Eriyik havuzu geometrisinin tespitinde kullanılan akış diyagramında, öncelikle fiziksel büyüklükler (L_x , L_y , L_z), işletim parametreleri (P , R , S), işlenen malzeme özellikleri (r_o , epsilon, ergime sıcaklığı, katılaşma sıcaklığı, çevre sıcaklığı, T_a , ısı iletkenliğin hesaplanmasında kullanılan sıcaklıklar, 1923, 1268) ve zaman (t) değerleri programa girdi olarak verilmiştir. Sıcaklığa bağlı h_c , k ve c ifadelerinin bulunabilmesi için prosesin başlangıç noktası ($x=0$, $y=0$)’na ait başlangıç sıcaklık tahmini (T_t) yapılır.

Analitik çözümden elde edilen sıcaklık fonksiyonu (T_t) kullanılarak istenilen noktanın sıcaklık değeri hesaplanır. Başlangıç sıcaklık tahmini ($T_t=0$) ile hesaplama sonucu elde edilen sıcaklık (T_t) değeri farklı çıkarsa başlangıç sıcaklık tahmini için fonksiyondan hesaplanan sıcaklık değeri güncellenerek tüm işlemler tekrar hesaplanır. Bu işlem tahmin edilen sıcaklık ile fonksiyon kullanılarak hesaplanan sıcaklık değeri eşitlenene kadar devam eder ve istenilen noktanın sıcaklık değeri bulunur.

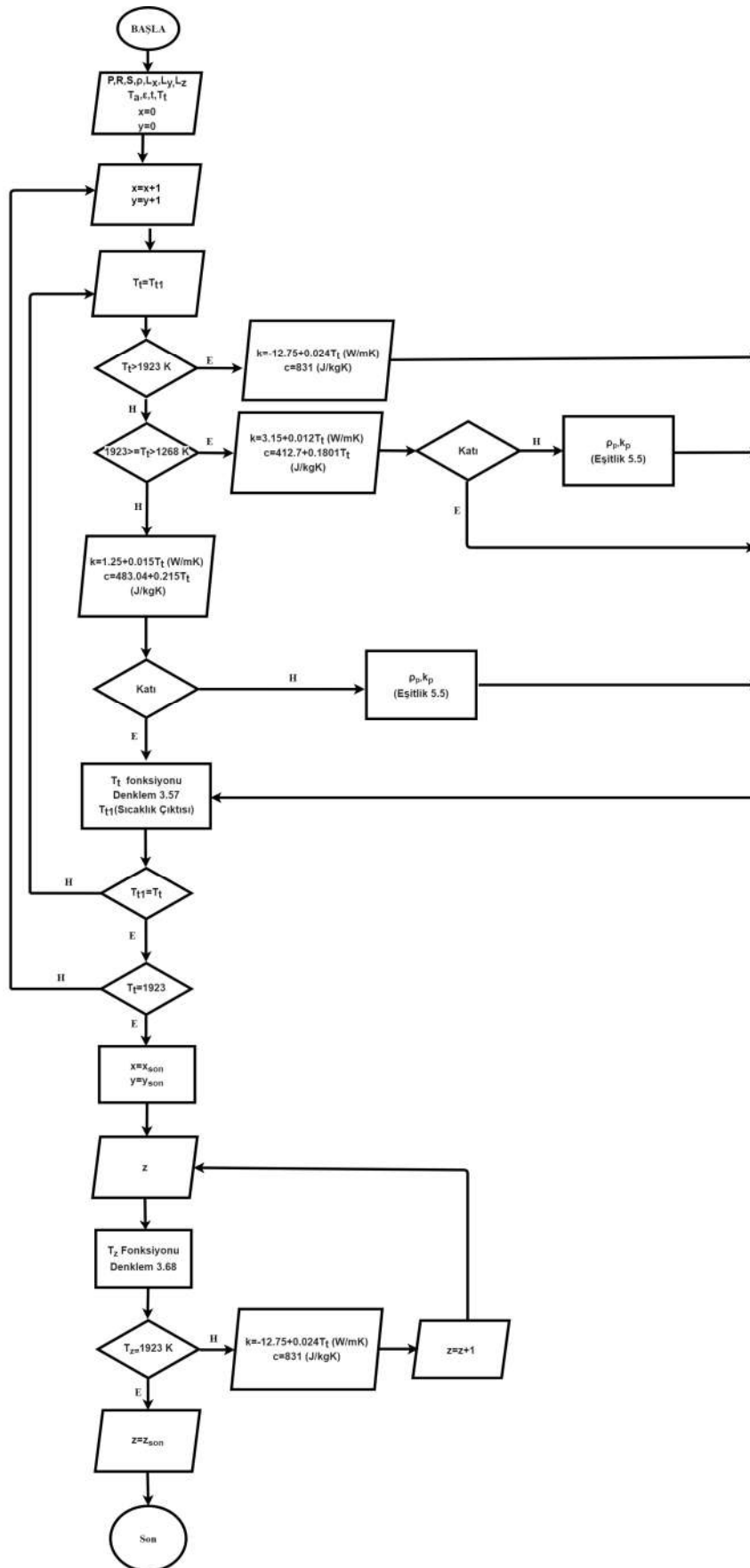
Hesaplanan sıcaklık değeri ergime sıcaklığından farklı ise (x , y) konum bilgisi güncellenerek tüm hesaplamalar eriyik sıcaklığına ulaşılan tüm (x , y) konumları belirlenene kadar tekrarlanır. $z=0$ konumu için z -doğrultusundaki sıcaklık, T_z fonksiyonu kullanılarak hesaplanır. Hesaplanan sıcaklık değeri erime sıcaklığından farklı ise konum bilgisi güncellenerek tüm z -doğrultusundaki sıcaklık değerleri kontrol edilir. Sıcaklık

değeri erime sıcaklığına eşit ise bu konum eriyik havuz geometrisinin oluşturulması için kaydedilir ve yazılım sonlandırılır.

Şekil 3.3’ te akış diyagramı sunulan “Sıcaklık Yazılımı” ile çözüm bölgesi içerisindeki herhangi bir noktadaki (eriyik havuzu, katı ve toz katmanlar boyunca) sıcaklık dağılımlarının tespiti mümkün olmaktadır. “Sıcaklık Yazılımı” eriyik havuzu geometrisinden bağımsız olarak hesaplandığı için hesaplama süresi “Eriyik Geometri Yazılımı” hesap süresinden daha hızlı sonuç vermektedir. Buna göre herhangi bir bölgedeki eş sıcaklık eğrilerinin bulunması “Sıcaklık Yazılımı” ile yaklaşık 50 dakika civarında bir süre alırken eriyik havuzu geometrisi hesaplamak “Eriyik Geometri Yazılımı” ile yaklaşık 100 dakika süre almaktadır.



Şekil 3.3.“ Sıcaklık Yazılımı” akış diyagramı





4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmanın sonuçları, yakınsak çözüm, analitik model doğrulaması ve parametrik çalışma olmak üzere üç ana gurup altında toplanmıştır.

4.1. Yakınsak Çözüm

Analitik modelin x ve y – yönlerinde öz-değer problemi içermesi sebebiyle, çözümün yakınsaklığının kontrol edilmesi gerekmektedir. Analitik model, 2B non-homojen kararlı ısı denkleminin ayrıklaştırılması sonucu x – yönünde ve 2B homojen zamana bağlı ısı denkleminin ayrıklaştırılması sonucu x ve y – yönlerinde olmak üzere toplam 3 adet öz-değer ve karşılık gelen öz-fonksiyonlara sahiptir.

x - y düzleminde 2-B non-homojen kararlı ısı denkleminin ayrıklaştırılması sonucunda x – yönünde oluşan öz-değer problemi, Eş. 3.16’ da sunulmuştur. Bu problemin homojen sınır şartlarının uygulanması ile çözümü, Eş. 3.17’ de sunulan öz-değer (λ_i) ve öz-fonksiyonların (X_i) elde edilmesini mümkün kılmıştır.

x - y düzleminde 2-B homojen zamana bağlı ısı denkleminin ayrıklaştırılması sonucunda x – yönünde oluşan öz-değer problemi, Eş. 3.49’ da sunulmuştur. Bu problemin homojen sınır şartlarının uygulanması ile çözümü, Eş. 3.50’ de sunulan öz-değer (β_j) ve öz-fonksiyonların (κ_j) elde edilmesini mümkün kılmıştır.

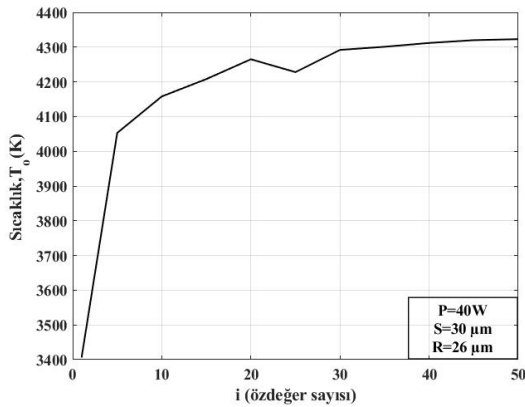
x - y düzleminde 2-B homojen zamana bağlı ısı denkleminin ayrıklaştırılması sonucunda y – yönünde oluşan öz-değer problemi, Eş. 3.52’ de sunulmuştur. Bu problemin homojen sınır şartlarının uygulanması ile çözümü, Eş. 3.53’ de sunulan öz-değer (ν_k) ve öz-fonksiyonların (φ_k) elde edilmesini mümkün kılmıştır.

Öz-değer sayısının çözüme etkisini izlemek ve en uygun öz-değer sayısının tespitine yönelik düşük güçleri temsilen (40W) ve yüksek güçleri temsilen (250W) için her öz-değer için adet test vakası oluşturulmuştur. Dolayısıyla, düşük gücü temsilen 3, yüksek gücü

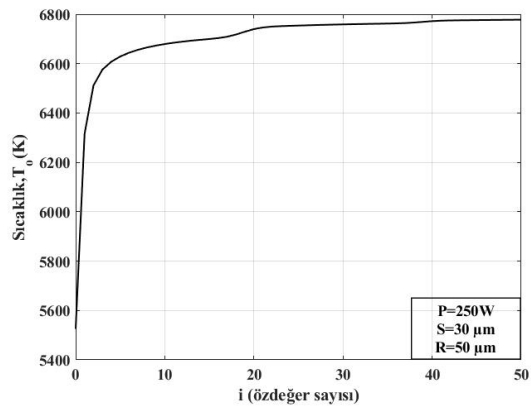
temsilen 3 olmak üzere toplam 6 test vakası analiz edilmiş ve sonuçlar Şekil 4.1-4.3 arasında sunulmuştur.

λ_i öz-değerinin T_o sıcaklığına etkisi, düşük güçte $P=40$ W toz yatak kalınlığı $S=30$ mikrometre ve lazer çapı $R=26$ mikrometre için MATLAB kodu üzerinde “Sıcaklık Yazılımı” çalıştırılarak elde edilmiştir. Çözüm sonucu, öz-değere göre $T_o(0,0)$ noktasının sıcaklık değişimi grafik olarak Şekil 4.1a’da, öz-değerler ve hesaplama süreleri ise Çizelge 4.1’ de sunulmuştur. Yakınsama kriteri olarak sıcaklık değerindeki değişimin % 1,1 den az olduğu durum seçilmiştir. Bu kritere göre λ_i için minimum öz-değer sayısı 35 olarak tespit edilmiştir.

λ_i öz-değerinin T_o sıcaklığına etkisi, $P=250$ W, toz yatak kalınlığı $S=30$ mikrometre ve lazer çapı $R=50$ mikrometre için MATLAB kodu üzerinde “Sıcaklık Yazılımı” çalıştırılarak elde edilmiştir. Çözüm sonucu, öz-değere göre $T_o(0,0)$ noktasının sıcaklık değişimi grafik olarak Şekil 4.1b’de, öz-değerler ve hesaplama süreleri ise Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Yakınsama kriteri olarak sıcaklık değerindeki değişimin %0,9’ dan az olduğu durum seçilmiştir. Bu kritere göre λ_i için minimum öz-değer sayısı 45 olarak tespit edilmiştir.



(a)



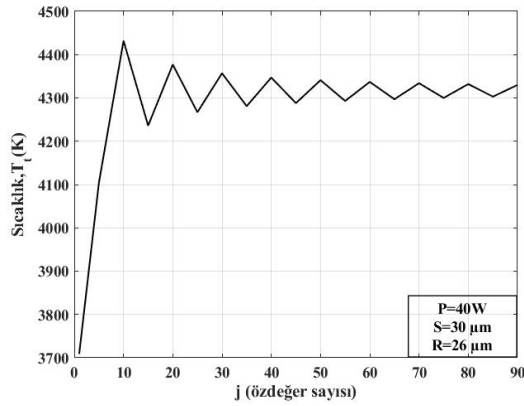
(b)

Şekil 4.1. (a) $P=40$ W b) $P=250$ W için λ_i öz-değerlere karşı $T_o(0,0)$ sıcaklığının değişimi

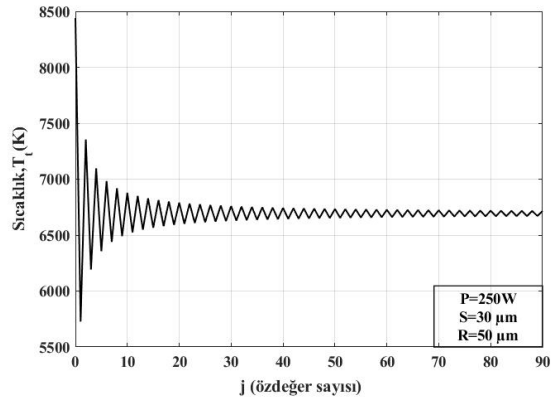
Seçilen λ_i öz-değer sayıları için çözüm bölgesinde eş sıcaklığa sahip bölgeleri saptamak $P=40$ W için 120 dakika $P=250$ W için 140 dakika sürmektedir.

β_j öz-değerinin $T_t(0,0,0)$ noktasının sıcaklığına etkisi, düşük güçte $P=40$ W toz yatak kalınlığı $S=30$ mikrometre ve lazer çapı $R=50$ mikrometre için MATLAB kodu üzerinde “Sıcaklık Yazılımı” çalıştırılarak elde edilmiştir. Çözüm sonucu, öz-değere göre $T_t(0,0,0)$ noktasının sıcaklık değişimi grafik olarak Şekil 4.2a’da, öz-değerler ve hesaplama süreleri ise Çizelge 4.1’ de sunulmuştur. Yakınsama kriteri olarak sıcaklık değerindeki değişimin %3’ den az olduğu durum seçilmiştir. Bu kritere göre β_j için minimum öz-değer sayısı 70 olarak tespit edilmiştir.

β_j öz-değerinin $T_t(0,0,0)$ noktasının sıcaklığına etkisi, $P=250$ W, toz yatak kalınlığı $S=30$ mikrometre ve lazer çapı $R=50$ mikrometre için MATLAB kodu üzerinde “Sıcaklık Yazılımı” çalıştırılarak elde edilmiştir. Çözüm sonucu, öz-değere göre $T_t(0,0,0)$ noktasının sıcaklık değişimi grafik olarak Şekil 4.2b’ de, öz-değerler ve hesaplama süreleri ise Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Yakınsama kriteri olarak sıcaklık değerindeki değişimin %2’den az olduğu durum seçilmiştir. Bu kritere göre β_j için minimum öz-değer sayısı 50 olarak tespit edilmiştir.



(a)



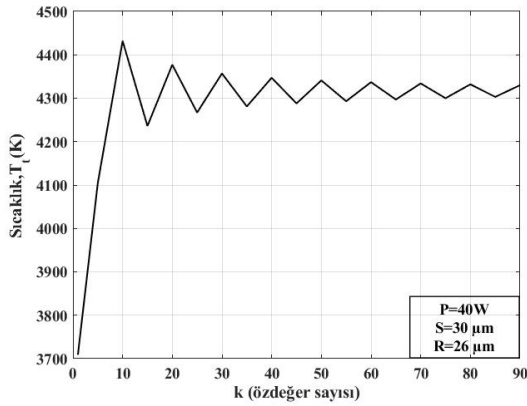
(b)

Şekil 4.2. (a) $P=40$ W b) $P=250$ W için β_j öz-değerlere karşı $T_t(0,0,0)$ sıcaklığının değişimi

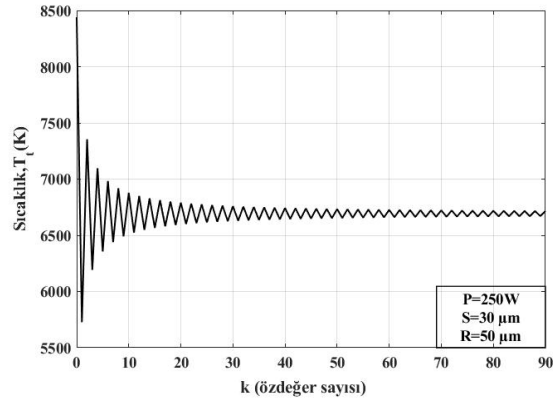
Seçilen β_j öz-değer sayıları için çözüm bölgesinde eş sıcaklığa sahip bölgeleri saptamak $P=40$ W için 150 dakika $P=250$ W için 120 dakika sürmektedir.

ν_k öz-değerinin $T_t(0,0,0)$ noktasının sıcaklığına etkisi, düşük güçte $P=40$ W toz yatak kalınlığı $S=30$ mikrometre ve lazer çapı $R=50$ mikrometre için MATLAB kodu üzerinde “Sıcaklık Yazılımı” çalıştırılarak elde edilmiştir. Çözüm sonucu, öz-değere göre $T_t(0,0,0)$ noktasının sıcaklık değişimi grafik olarak Şekil 4.3a’da, öz-değerler ve hesaplama süreleri ise Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Yakınsama kriteri olarak sıcaklık değerindeki değişimin %3’ den az olduğu durum seçilmiştir. Bu kriter gere ν_k için minimum öz-değer sayısı 70 olarak tespit edilmiştir.

ν_k öz-değerinin $T_t(0,0,0)$ noktasının sıcaklığına etkisi, $P=250$ W, toz yatak kalınlığı $S=30$ mikrometre ve lazer çapı $R=50$ mikrometre için MATLAB kodu üzerinde “Sıcaklık Yazılımı” çalıştırılarak elde edilmiştir. Çözüm sonucu, öz-değere göre $T_t(0,0,0)$ noktasının sıcaklık değişimi grafik olarak Şekil 4.3b’de, öz değerler ve hesaplama süreleri ise Çizelge 4.2’de sunulmuştur. Yakınsama kriteri olarak sıcaklık değerindeki değişimin % 2’ den az olduğu durum seçilmiştir. Bu kriter gere ν_k için minimum öz-değer sayısı 50 olarak tespit edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.3. (a) $P=40$ W b) $P=250$ W için ν_k öz-değerlere karşı $T_t(0,0,0)$ sıcaklığının değişimi

Seçilen ν_k öz-değer sayıları için çözüm bölgesinde eş sıcaklığa sahip bölgeleri saptamak $P=40$ W için 150 dakika $P=250$ W için 110 dakika sürmektedir.

Çizelge 4.1. Düşük güç uygulamaları: P=40 W temsili güç için öz-değer sayılarına karşılık gelen hesaplama süreleri

i öz-değer sayısı (adet)	Hesaplama süresi (s)	j öz-değer sayısı (adet)	Hesaplama süresi (s)	k öz-değer sayısı (adet)	Hesaplama süresi (s)
10	0,887	10	1,356	10	1,356
20	1,190	20	1,419	20	1,419
30	1,600	30	1,500	30	1,500
40	1,948	40	1,637	40	1,637
50	2,227	50	1,742	50	1,742
		60	1,811	60	1,811
		70	1,948	70	1,948
		80	2,074	80	2,074
		90	2,243	90	2,243

Çizelge 4.2. Yüksek güç uygulamaları: P=250 W temsili güç için öz-değer sayılarının karşılık gelen hesaplama süreleri

i öz-değer sayısı (adet)	Hesaplama süresi (s)	j öz-değer sayısı (adet)	Hesaplama süresi (s)	k öz-değer sayısı (adet)	Hesaplama süresi (s)
10	1,165	10	1,332	10	1,332
20	1,199	20	1,412	20	1,412
30	1,557	30	1,540	30	1,540
40	1,990	40	1,604	40	1,604
50	2,238	50	1,853	50	1,853
		60	1,946	60	1,946
		70	2,012	70	2,012
		80	2,131	80	2,131
		90	2,218	90	2,218

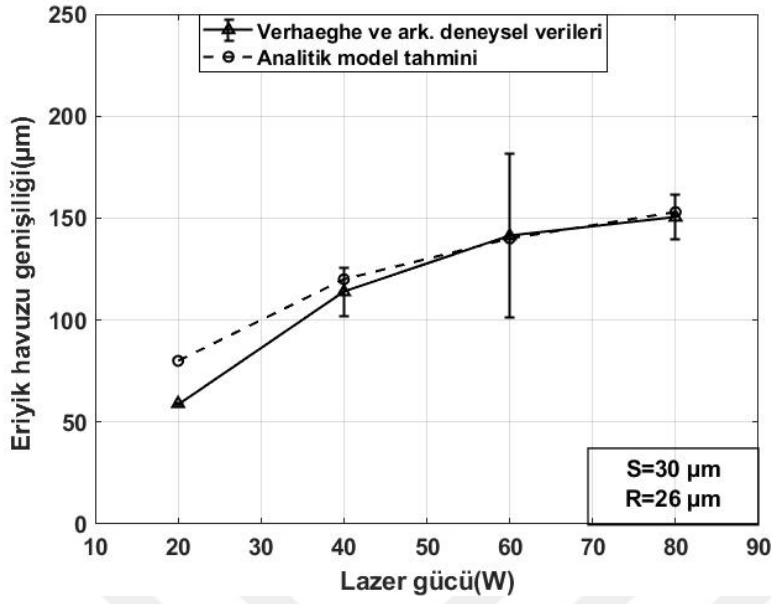
4.2. Analitik Model Doğrulaması

Optimum öz değer sayılarının belirlenmesinin ardından oluşturulan analitik modelin doğruluğunun saptanabilmesi için literatürde gerçekleştirilmiş deneysel ve nümerik çalışmalar ile kıyaslama yapılmıştır. Analitik modelin doğrulanması için iki farklı malzeme kullanılmıştır. İlk olarak Ti64 malzemesi kullanılarak SLE prosesinin düşük ve yüksek güç değerleri için iki farklı doğrulama yapılmıştır. İkinci olarak ise h13 çeliği için doğrulamalar yapılmıştır.

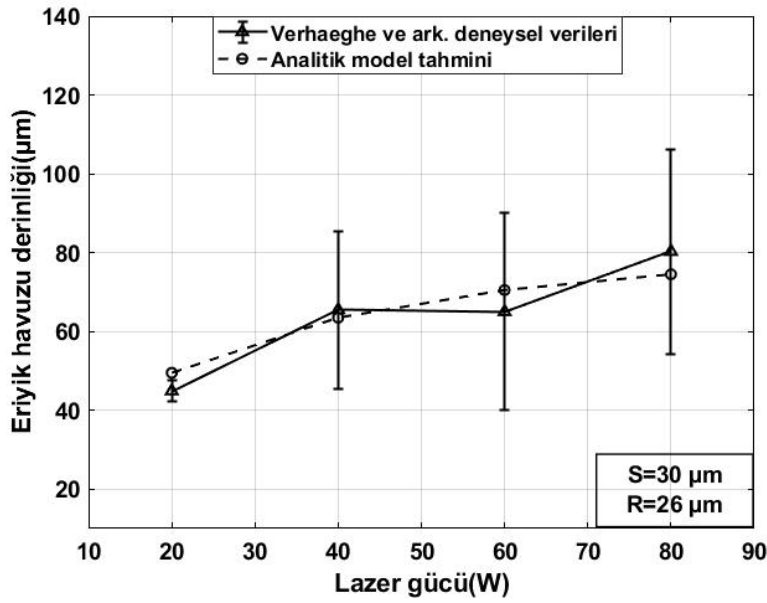
İlk olarak Şekil 4.4 ile Şekil 4.5’ de görülen Ti64 malzemesinin kullanıldığı ve SLE prosesinin düşük lazer güçlerinde gerçekleştiği durum için doğrulama yapılmıştır. Kıyaslama için iki deneysel ve bir nümerik çalışma kullanılmıştır. Bu çalışmalardan ilki Verhaeghe ve ark. [10] tarafından yapılan deneysel çalışma olup, Şekil 4.4a ve Şekil 4.4b’ de görüldüğü gibi eriyik havuzu derinliği ve genişliği için kıyaslamalar gerçekleştirilmiştir. İkincisi ise Fu ve Guo [13] tarafından gerçekleştirilen Şekil 4.4c’de görülen eriyik havuzu uzunluğunun kıyaslandığı nümerik çalışmadır. Üçüncü doğrulama ise eriyik havuzu içerisinde oluşan maksimum sıcaklıkların kıyaslandığı Yadroidsev ve ark. [27] yapmış olduğu deneysel çalışmadır (Şekil 4.5).

Literatürde yapılan teorik çalışmalar incelendiğinde deneysel çalışmalarla kıyaslama parametreleri cinsinden önemli farklar olduğu görülmektedir. Bu durumun temel sebebi SLE işleminin kompleks olması ve dolayısı ile teorik çalışmaların çözüm için basitleştirici kabuller içermesidir [50]. Bu çalışmadaki sonuçlar incelendiğinde ise eriyik havuzu derinliği ve genişliği parametrelerinin genel olarak uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 4.4a’da analitik ve deneysel sonuçlar arasındaki kıyaslamada eriyik havuzu genişlik parametresi için 0-15 mikrometre hata miktarı olduğu ve Şekil 4.4b’de eriyik havuzu derinlik parametresi için ise 5-15 mikrometre fark olduğu görülmektedir.

Eriyik havuz uzunluğu Şekil 4.4c’de görüldüğü gibi nümerik bir çalışma olan Fu ve Guo’nun [13] verileri ile doğrulanmıştır. Yaygın olan, teorik modellerin deneysel modellerle doğrulanmasıdır. Ancak literatüre bakıldığında teorik modeller ile deneysel modeller, eriyik havuzu genişliği ve derinliği cinsinden kıyaslanmaktadır. Benzer şekilde Fu ve Guo [13] yaptıkları çalışmada bir teorik model oluşturmuşlar ve sonuçları eriyik havuzu derinliği ve genişliği cinsinden Verhaeghe ve ark.’nın [10] yapmış oldukları çalışma ile doğrulamışlardır. Fu ve Guo’ nun yaptığı bu nümerik çalışma ile mevcut çalışma eriyik havuz uzunluğu parametresi bakımından karşılaştırılmış ve. sonuçlarda 20 W güç değeri için yaklaşık 7 mikrometre fark olduğunu gözlemlenmiştir. 40 W için değerler arasındaki fark oldukça küçük iken 60 W ve 80 W değerlerinde nümerik çalışmanın hata oranları da göz önüne alınarak farkın 8-10 mikrometre seviyesinde olduğu görülmektedir.

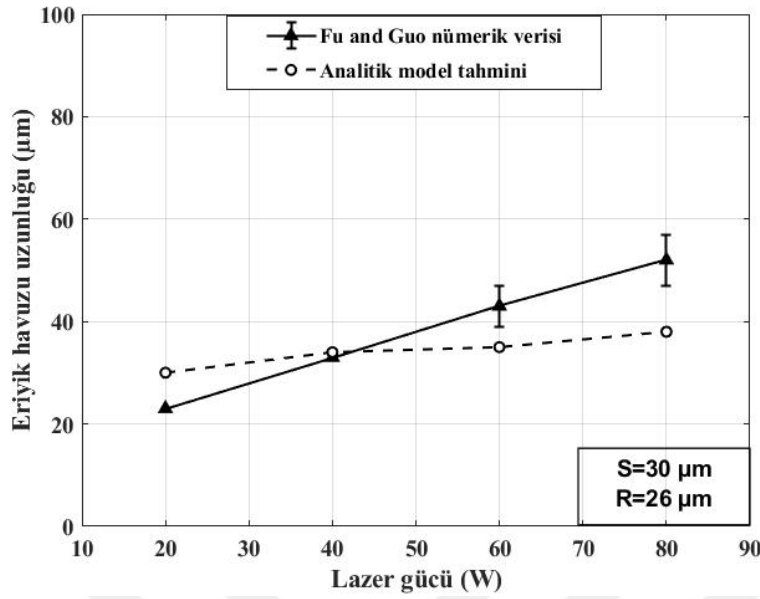


a)



b)

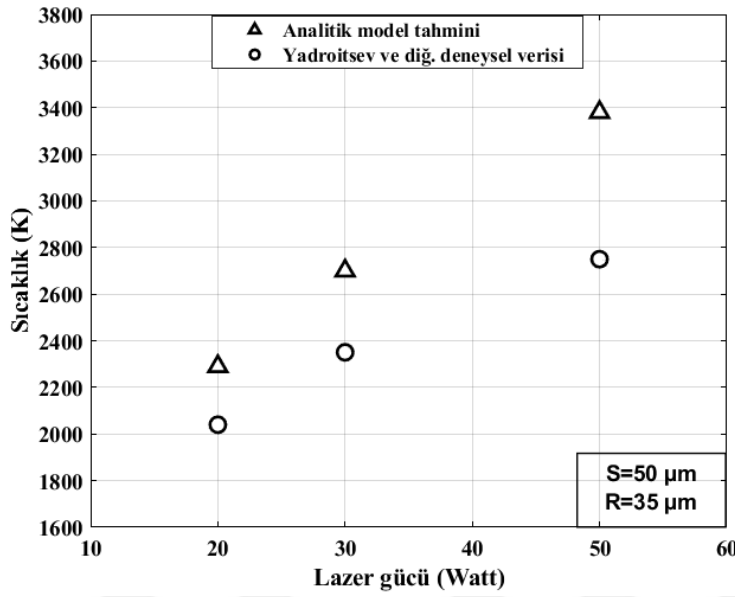
Şekil 4.4. Farklı lazer güçlerinde, analitik model ile deneysel çalışma sonuçlarının a) Eriyik havuzu genişliği b) Eriyik havuzu derinliği c) Eriyik havuzu uzunluğu cinsinden kıyaslanması



c)

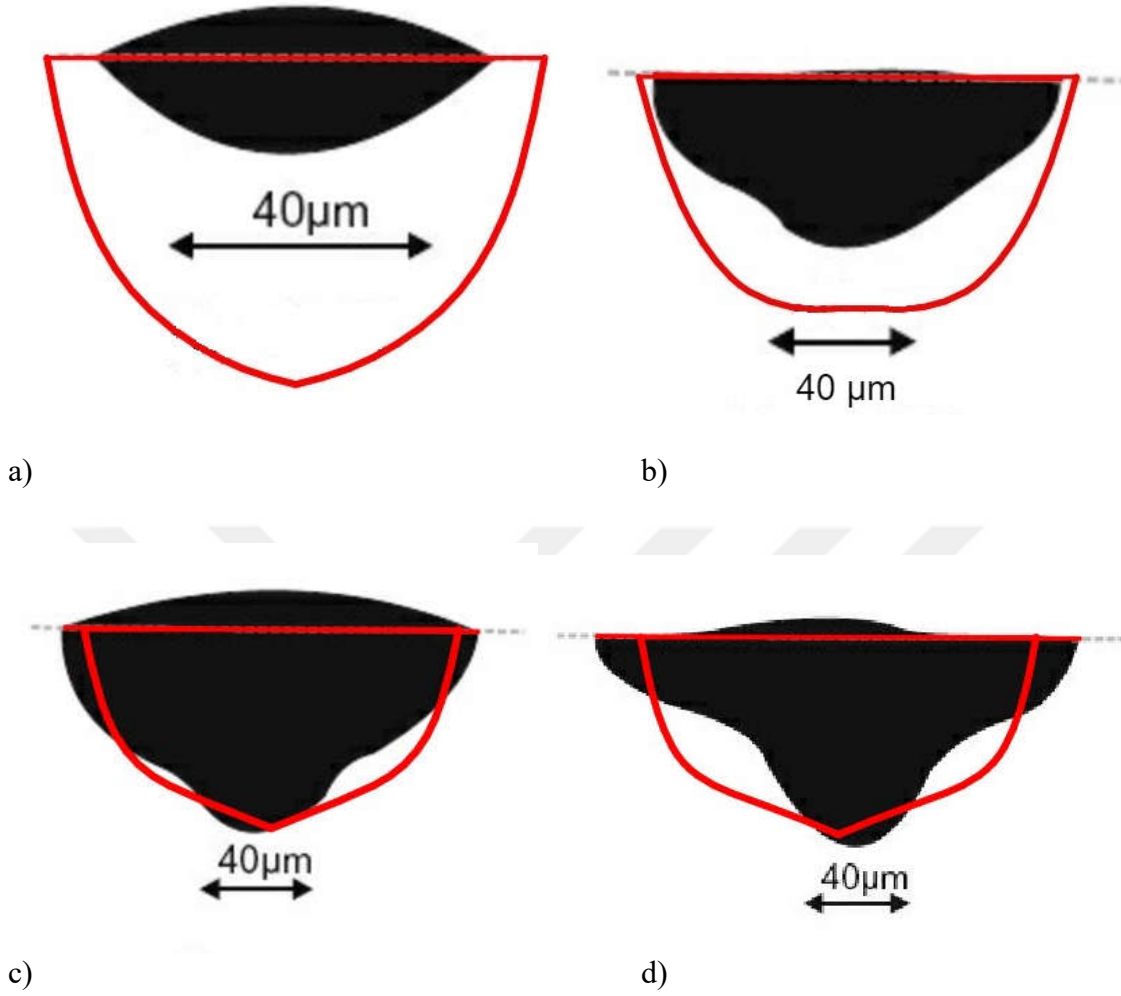
Şekil 4.4. (Devamı) Farklı lazer güçlerinde, analitik model ile deneysel çalışma sonuçlarının a) Eriyik havuzu genişliği b) Eriyik havuzu derinliği c) Eriyik havuzu uzunluğu cinsinden kıyaslanması

Bir diğer kıyaslama ise mevcut analitik model, Yadroidsev ve ark. [27] tarafından yapılan deneysel çalışma ile eriyik havuzu maksimum sıcaklıkları cinsinden Şekil 4.5' te görüldüğü gibi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarda analitik model sonucu elde edilen verilerin deneysel verilerden daha yüksek olduğu ve lazer gücüne bağlı olarak hata oranlarının arttığı görülmüştür. Hata oranları 20 W ve 30 W için %10 seviyesinde iken 50 W için %17 olarak belirlenmiştir.



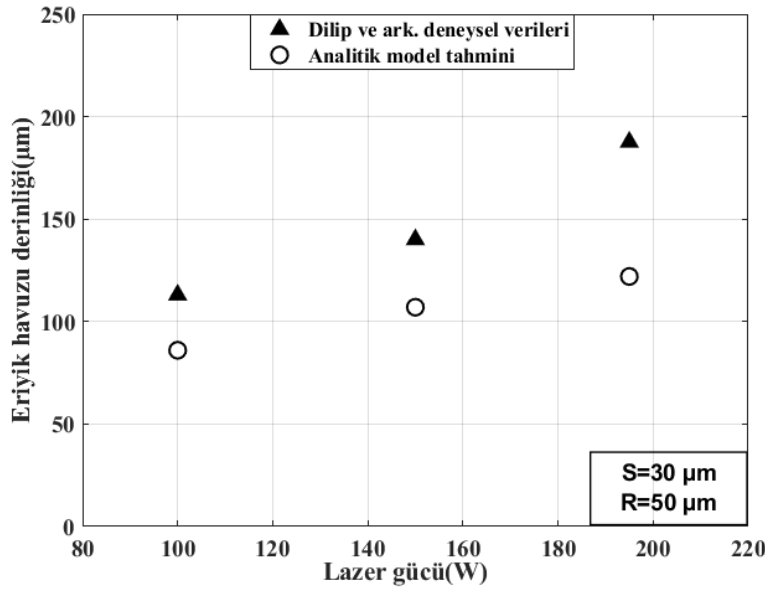
Şekil 4.5. Farklı lazer güçleri için analitik model ve deneysel çalışma sonuçlarının maksimum eriyik havuzu sıcaklığı cinsinden kıyaslanması

Yukarıda eriyik havuzu geometrisi derinliğine, genişliğine, uzunluğuna ve maksimum sıcaklığına bağlı olarak doğrulamalar gerçekleştirilmiştir. Son olarak Şekil 4.6 'da x-y düzleminde eriyik havuzu davranışı kıyaslanmıştır. Bu kıyaslama için Verhaeghe ve ark.'nın [10] optik lazer mikroskobu ile almış oldukları görüntüler kullanılmıştır. Şekil 4.6' da görülen kırımızı renkli eğriler, mevcut analitik model ile elde ettiğimiz eriyik geometrisini temsil etmektedir. Sonuçlar incelendiğinde lazer gücü artışına bağlı olarak analitik model doğruluğunun arttığı saptanmıştır. Özellikle 60 W ve 80 W değerleri için eriyik havuzu derinliğindeki sapma miktarının 10 mikrometrenin altına düştüğü görülmüştür. Eriyik havuzu genişliği incelendiğinde ise 40 W için yaklaşık 5 mikrometrelik bir fark varken, 60 W için 8 mikrometre, 80 W için ise bu fark 18 mikrometre seviyesine çıkmaktadır.

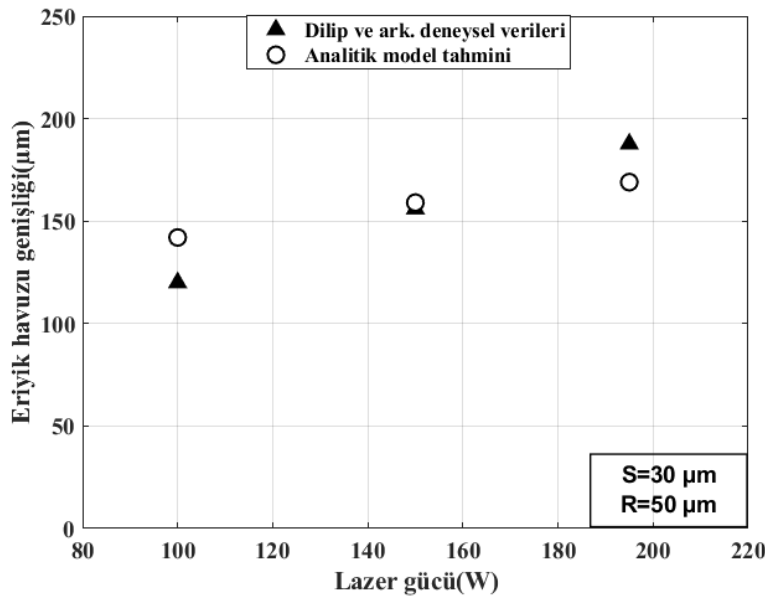


Şekil 4.6. Mevcut analitik çalışma ve deneysel çalışma sonucu elde edilen eriyik havuz geometrisinin a) 20 W, b) 40 W, c) 60 W, d) 80 W değerleri için kıyaslanması

Yukarıda yapılan doğrulamalar küçük lazer güçleri ve küçük lazer çapları için gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.7' de ise daha yüksek lazer güçleri ve daha yüksek lazer çapı için bir doğrulama gerçekleştirilmiştir. Kıyaslama için lazer güçleri 100 W, 150 W ve 195 W olarak seçilmiştir. Ayrıca lazer çapı 100 μm ve toz katman kalınlığı 30 μm seçilmiştir. Doğrulama Dilip ve ark. [51] yapmış oldukları deneysel çalışma için gerçekleştirilmiştir. Yaptıkları çalışmada EOS M270 kodlu tezgâh kullanılmıştır. Eriyik havuzu derinliği incelendiğinde lazer gücüne bağlı olarak deneysel verilerden 100 W için %22, 150 W için %21 ve 195 W için %33 oranında sapma elde edilmiştir. Eriyik havuzu genişliği incelendiğinde ise 100 W için %17, 150 W için %1,2 ve 195 W için %9 oranında deneysel verilerden sapma gerçekleşmiştir.



a)



b)

Şekil 4.7. Farklı lazer güçleri için analitik model ve deneysel çalışma sonuçlarının a) Eriyik havuzu derinliği ve b) Eriyik havuzu genişliği cinsinden kıyaslanması

Son olarak uygulanan modelin başka malzemeler içinde doğru sonuçlar verdiğini gösterebilmek için yine yaygın olarak h13 takım çeliği kullanılmıştır. Deneysel veriler Wu ve ark. yapmış oldukları çalışmadan alınmıştır [52]. Doğrulama için kullanılan parametreler ve h13 malzemesine ait termo-fiziksel özellikler Çizelge 4.3' te verilmiştir.

Çizelge 4.3. h13 takım çeliği termo-fiziksel özellikleri ve doğrulama parametreleri

Parametre	Değer
Emicilik	0,1
Sıvı faz yoğunluğu (kg/m ³)	6518,5
Sıvılaşma Sıcaklığı (K)	1773
Sıvı faz özgül ısısı (J/kg K)	804,4
Sıvı faz ısı iletkenliği (W/kg K)	43,99
Lazer gücü (W)	200
Lazer çapı (μm)	52

Yukarıda görülen parametreler modelde kullanılmış, eriyik havuzu derinliği genişliği ve maksimum sıcaklıklar cinsinden kıyaslama gerçekleştirilmiştir (Çizelge 4.4). Deneysel çalışmadan sapma, eriyik havuzu derinliği için %5,8, eriyik havuzu genişliği için %14,3 ve eriyik havuzu maksimum sıcaklığı için %13,6 tespit edilmiştir. Bu sapmaların genel literatürde yapılan teorik çalışmalarla kıyaslandığında makul seviyede olduğu görülmüştür [52].

Çizelge 4.4. Mevcut analitik model ve deneysel verilerin kıyaslanması

	Deneysel Sonuç	Mevcut modelden elde edilen sonuç	Sapma (%)
Eriyik havuzu derinliği (μm)	68	64	5,8
Eriyik havuzu genişliği (μm)	146	125	14,3
Maksimum sıcaklık (μm)	3000	3410	13,6

Erimiş alanın büyüklüğünü ve sıcaklığını tahmin etmek amacıyla geliştirilen analitik modelin doğruluğu, uygulayıcının lazer gücünü ve hızını belirlemesinde yardımcı olması açısından önemlidir. Çizelge 4.5’ te literatürde yapılan teorik modeller ve deneysel çalışmalar arasındaki kıyaslama sonucu elde edilen hata oranları görülmektedir. Böylece yapılan modelin kabul edilebilirliğinin saptanması amaçlanmıştır. Çizelge incelendiğinde literatürdeki çalışmalarda sapma miktarlarının eriyik havuzu genişliği için %1-28, derinlik için %3-95 ve maksimum sıcaklık için %11-17 aralığında değiştiği görülmektedir. Elde edilen analitik sonuçlar incelendiğinde düşük lazer güçleri için eriyik havuzu genişliğinde maksimum sapma 20 W için yaklaşık %27 seviyesinde ve eriyik havuzu derinliğinde

maksimum sapma yine 20 W için yaklaşık %9 seviyesindedir. Yüksek lazer güçlerine bakıldığında ise eriyik havuzu genişliğindeki maksimum sapma 100 W için %17 seviyesinde, eriyik havuzu derinliği incelendiğinde ise maksimum sapma %33 seviyesindedir. Dolayısı ile mevcut analitik modelin kabul edilebilir olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, oluşturulan bu modelin eriyik havuzu boyutlarını ve maksimum sıcaklığı tahmin etmek için kullanılabileceği görülmektedir. Bununla birlikte, bu çalışmada 20 W için elde edilen havuz genişliği tahmininin deneysel sonuçtan sapmasının %27 olduğu ve 195 W için eriyik havuzu derinliğindeki sapmanın %33 olduğu not edilmelidir. Ayrıca, çok hızlı işlem ve ölçüm yöntemlerinin uygunluğu göz önüne alındığında, deneylerden elde edilen verilerin doğruluğunun sorgulanması gereken başka bir konu olduğu düşünülmektedir.

Yukarıda bahsedilen hata oranlarına sebep olan durum, oluşturulan modelde yapılan kabuller ve sınır koşullarıdır. Çizelge 4.6' da literatürde yapılan çalışmalarda kullanılan başlangıç ve sınır koşulları ve kabuller görülmektedir. Modelde kullanılan lazer kaynağı türünün sonuçlar üzerinde çok etkili olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, SLE işleminde kullanılan lazer kaynağı tarafından üretilen ısı dağılımının modele doğru yansıtılması gerekir. Gauss dağılımı, lazer kaynak terimi için kullanıldığında yüksek genliğin eriyik havuz genişliğini ve SLE işleminin tarama hızını artıracakları düşünülmektedir.

Çizelge 4.5. Literatürdeki model tahminlerinin ve deneysel verilerden sapma miktarlarının karşılaştırılması

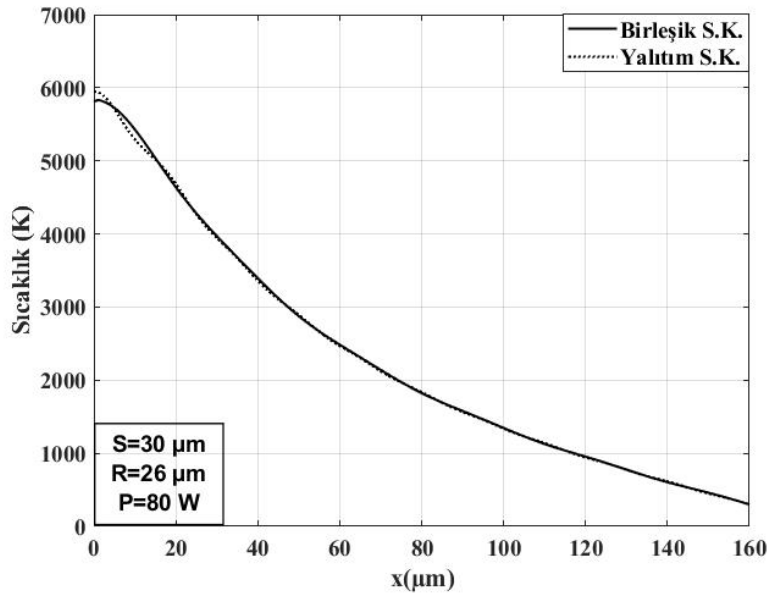
Parametreler	Kıyaslanan Çalışmalar								Sapma Miktarı [%]			
	Analitik Model [32]				Deneysel Veri [53]							
Lazer Gücü (W)	20	40	60	80	20	40	60	80	20	40	60	80
Genişlik (µm)	148,6	126	100	66	151,42	141,3	112,25	59,53	2,1	12,1	12,5	10,1
Derinlik (µm)	74	63	50	33	79,72	64,83	65,93	45,1	7,7	2,9	31,86	36,6
	Nümerik Model [53]				Deneysel Veri [53]							
Lazer Gücü (W)	20	40	60	80	20	40	60	80	20	40	60	80
Genişlik (µm)	66	88,71	108	125	59	110	139	150	12	24	28	20
Derinlik (µm)	22	34	44	52	80	64,6	64,2	45	95	90	45	53,8
	Nümerik Model [15]				Deneysel Veri [10,54]							
Lazer Gücü (W)	20	40	60	80	20	40	60	80	20	40	60	80
Genişlik (µm)	54	94	130	163	58	108	141	151	7,4	12,7	16,1	7,3
Derinlik (µm)	-	52	38,7	21,2	-	51,08	34,8	35,8	-	5,7	10	68
Tarama Hızı	100	200	300		100	200	300		100	200	300	
Maksimum Sıcaklık (K)	2441	2351	2294		2139	2082	2000		12,3	11,44	13	
	Nümerik Model[55]				Deneysel Veri [10]							
Lazer Gücü (W)	20	40	60	80	20	40	60	80	20	40	60	80
Genişlik (µm)	52	87	114	136	59	109	140	150	13,4	25,2	22,8	10,2
Derinlik (µm)	7,5	26,4	43,5	58,4	14,6	34,6	34,5	49	95	31	20,6	17,1
	Yarı Analitik Model [36]				Deneysel Veri [56]							
Lazer Gücü (W)	50	200	400		50	200	400		50	200	400	
Genişlik (µm)	204	311	321		179	331	274		12,2	6,4	14,6	
	Yarı Analitik Model [31]				Deneysel Veri [57]							
Lazer Gücü (W)	150	200	300		150	200	300		150	200	300	
Tarama Hızı (m/s)	0,8	1,2	1,8		0,8	1,2	1,8		0,8	1,2	1,8	
	112	106	106		109	104	94		2,6	1,8	11,3	
	Mevcut Analitik Model				Deneysel Veri [27]							
Lazer Gücü (W)	20	30	50		20	30	50		20	30	50	
Maksimum Sıcaklık (K)	2283	2682	3367		2043	2363	2780		17,4	11,8	10,5	
	Mevcut Analitik Model				Deneysel Veri [51]							
Lazer Gücü (W)	100	150	195		100	150	195		100	150	195	
Genişlik (µm)	141,7	156	186,7		120,9	156	187,6		17	1,2	9	
Derinlik (µm)	87	110,4	123,4		112	139	186,5		22	20,8	33	
	Mevcut Analitik Model				Deneysel Veri [13]							
Lazer Gücü (W)	20	40	60	80	20	40	60	80	20	40	60	80
Genişlik (µm)	79,6	120	140	153	58,1	113,86	141,3	150,43	27	6	1	2
Derinlik (µm)	49,5	63,5	70,5	74,5	44,9	65,5	65	80,3	9,2	3,1	7,1	8

Çizelge 4.6. Seçilmiş modeller için kabuller ve başlangıç / sınır koşullarının karşılaştırılması

Model	Kabuller	Sınır/Başlangıç Koşulları
Analitik Ning et al. (2019) [32]	- Sabit metal tozu havuzu termal iletkenliği 200 ve 300 mm/s tarama hızı - Kararlı durum için 3D konveksiyon difüzyon Eşt. - Faz geçiş enerjisi ihmalı - Toz yatağı büzülmesi ihmalı 3-B yarı sonsuz katı 1-B Gaussian lazer kaynağı	- Üst yüzey konveksiyon ve radyasyon - Metal tozu yatağına iletim - İş tablasına iletim - Simetri - Başlangıç sıcaklığı $T_c=453K$ (ortam sıcaklığı)
Nümerik Huang & Zhang (2019) [55]	- Sabit metal tozu havuzu özellikleri 500 mm/s tarama hızı - Zamana bağlı 3-B ısı iletim Eşt. - Faz değiştirme enerjisi dahil edilmiş - Eriyik havuzu büzülmesi ihmalı - Düz eriyik havuzu üst yüzeyi kabulü 2-B hacimsel ısı kaynağı - SEM	25oC Başlangıç sıcaklığı - Üst yüzeyde radyasyon yok - Simetri - Çevreye konveksiyonla ısı kaybı
Nümerik Fu et al. (2014) [53]	- Sabit metal toz havuzu termal iletkenliği 200 mm/s mm/s tarama hızı - Zamana bağlı 3-B ısı iletim Eşt. - Faz değiştirme enerjisi dahil edilmiş - Eriyik havuzu büzülmesi ihmalı - Düz eriyik havuzu üst yüzeyi kabulü 2-B yüzeysel ısı kaynağı - SEM	20oC Başlangıç sıcaklığı - Yüzeyden ısı girdisi - Simetri - Çevreye konveksiyonla ısı kaybı
Nümerik Mishra et al. (2018) [15]	- Homojen metal toz havuzu - Sabit malzeme özellikleri 200 mm/s tarama hızı - Zamana bağlı 3-B ısı iletim Eşt. - Faz değiştirme enerjisi dahil edilmiş - Eriyik havuzu büzülmesi dahili (Eriyik havuzunda laminar akış) - Buharlaşma ihmalı 3-B Gaussian hacimsel ısı kaynağı - SEM	- Çevreye konveksiyon ve radyasyon ile ısı kaybı - Adiyabatik yüzeyler (üst yüzey hariç) - Simetri
Yarı analitik Yang et al. (2018) [36]	- Sabit metal toz havuzu termal iletkenliği - Sabit fiziksel ve termodinamik özellikler 300 mm/s tarama hızı - Zamana bağlı 3-B ısı iletim Eşt. - Faz değiştirme enerjisi ihmalı - Yüzeyden konveksiyon ve radyasyonla ısı kaybı ihmalı - Eriyik havuzu büzülmesi ihmalı 3-B Gaussian hacimsel ısı kaynağı - Yarı analitik model	- Başlangıç sıcaklığı $T_c=453K$ (çevre sıcaklığı) - Alt yüzey sıcaklığı $T_c=453K$ (plaka sıcaklığı) - Tüm yüzeyler yalıtımlı
Yarı analitik Yang et al. (2020) [58]	- Sabit metal toz havuzu termal iletkenliği - Sabit fiziksel ve termodinamik özellikler 200 mm/s tarama hızı - Zamana bağlı 3-B ısı iletim Eşt. - Faz değiştirme enerjisi ihmalı - Yüzeyden konveksiyon ve radyasyonla ısı kaybı ihmalı - Eriyik havuzu büzülmesi ihmalı 3-B Gaussian hacimsel ısı kaynağı - Yarı analitik model	- Başlangıç sıcaklığı $T_c=453K$ (çevre sıcaklığı) - Alt yüzey sıcaklığı $T_c=453K$ (plaka sıcaklığı) - Tüm yüzeyler yalıtımlı

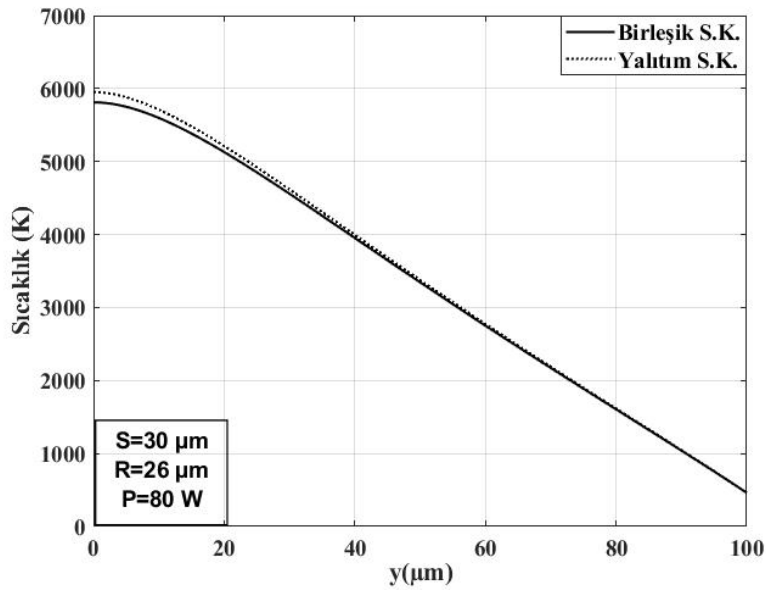
Prosesin 100-500 mm/s tarama hızı için eriyik havuzu genişliğinin anlık olarak 160 mikrometre değerine ulaştığı bilindiği için yüzeyden çevreye ısı transferinin ihmal edilebileceği düşünülmüştür. Bu düşünceyi desteklemek için yüzeyde iki farklı sınır koşulu için çözümler elde edilmiştir. Bu koşulların ilki yalıtım sınır şartı, ikincisi ise yüzeyden konveksiyon ve radyasyonla çevreye ısı kaybı sınır şartıdır.

Şekil 4.8’ de derinlik ve genişliğe bağlı olarak sıcaklık dağılımları görülmektedir. Sonuçlar yüzeyde her iki sınır koşulu için farkın %3 mertebesinde olduğunu göstermiştir.



a)

Şekil 4.8. Çözüm bölgesi üst yüzeyi için yalıtım ve birleşik sınır koşullarının a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca sıcaklık dağılımı ve b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca sıcaklık dağılımı cinsinden kıyaslanması



b)

Şekil 4.8. (Devamı) Çözüm bölgesi üst yüzeyi için yalıtım ve birleşik sınır koşullarının a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca sıcaklık dağılımı ve b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca sıcaklık dağılımı cinsinden kıyaslanması

Çizelge 4.7’ de lazer gücüne bağlı olarak her iki sınır koşulu için eriyik havuzu genişliği, derinliği ve maksimum sıcaklıklar verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında ise her iki sınır koşulu için ve farklı lazer güçleri için değerlerin önemli ölçüde değişmediği gözlemlenmiştir. Bu durum her iki sınır koşulunun da model için kullanılabilir olduğunu ortaya koymuştur. Bu bölümden sonra yapılacak olan incelemelerde yüzey sınır koşulu olarak konveksiyon ve radyasyonla ısı kaybı durumu için çözümler yapılmıştır.

Çizelge 4.7. Farklı lazer güçleri ve yüzey sınır koşulu için eriyik havuzu genişliği, derinliği

Eriyik Havuzu Geometrisi		Yalıtım SK				Birleşik SK			
Lazer Gücü (W)		20	40	60	80	20	40	60	80
Genişlik [μm]		79	120	138	153	79	119	140	154
Derinlik [μm]		49,5	64	69,5	75,5	49,5	63,5	69	75
Sıcaklık [K]		3215	4391	5218	5950	3144	4248	5096	5810

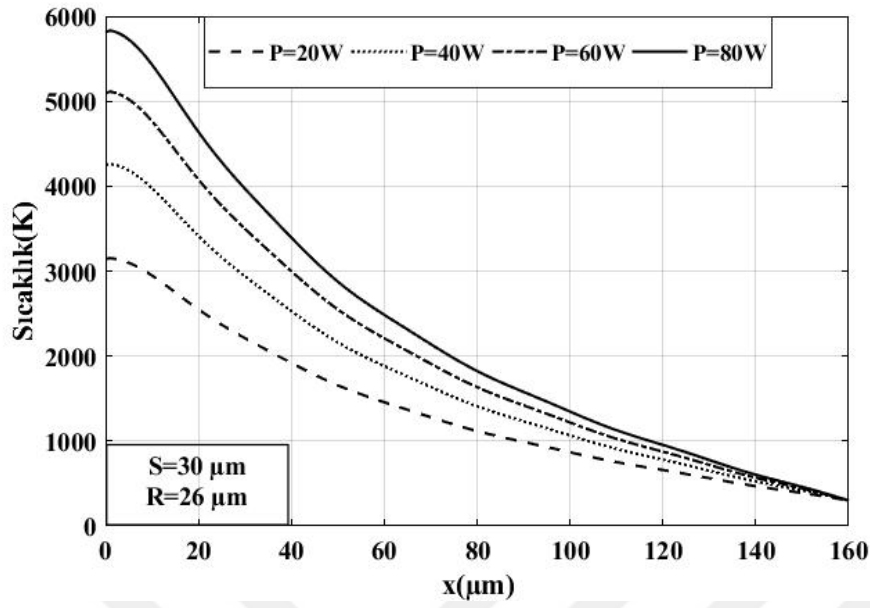
4.3. Parametrik Çalışma

Parametrik çalışma, düşük ve yüksek güç uygulamalar olmak üzere iki ana başlık altında incelenmiştir. Ana başlıklar ise durağan durum ve zamana bağlı durum olmak üzere iki alt başlık altında toplanmıştır. Her durum için işletim parametrelerinin sıcaklık dağılımına ve eriyik havuzu oluşumuna etkileri incelenerek, SLE prosesi için en uygun parametrelerin seçiminde izlenmesi gereken yaklaşım ortaya konmuştur.

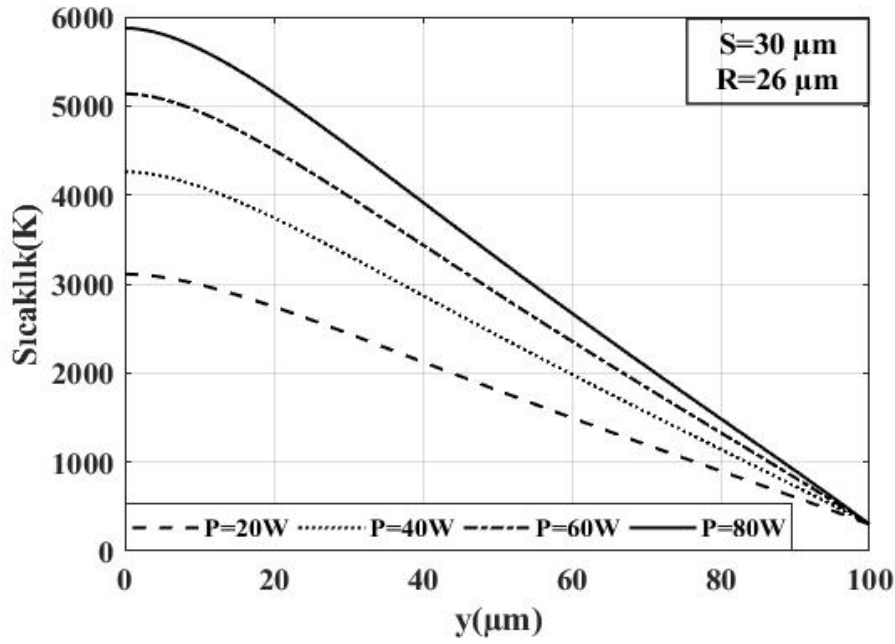
4.3.1. Düşük güç uygulamaları: Durağan durum

Öncelikli olarak düşük lazer güçleri için parametrik çalışma gerçekleştirilecektir. Buna göre Şekil 4.9’ da farklı lazer güçleri için 26 mikrometre lazer çapı ve 30 mikrometre metal tozu kalınlığında, derinlik, genişlik ve uzunluğa bağlı sıcaklık dağılımları görülmektedir. Şekil 4.9a’ da görüldüğü gibi x eksenini doğrultusundaki sıcaklık dağılımlarının lazer kaynağının formuyla orantılı olarak Gauss formunda meydana geldiği gözlemlenmiştir. y eksenini doğrultusunda ise toz katmanının bitimine kadar sıcaklık parabolik olarak azalırken katı katman içerisinde lineer olarak azaldığı ve z ekseninde ise lazerin merkezinde sıcaklık maksimum olurken lazer çapına bağlı ani bir düşüş meydana geldiği belirlenmiştir. Şekil 4.9a, Şekil 4.9b ve Şekil 4.9c’ de görüldüğü gibi, çözelti bölgesindeki maksimum sıcaklık, lazerin yüzey üzerinde etki ettiği noktada (0, 0, 0) meydana gelmektedir.

Uygulanan dört farklı lazer gücüne yanıt olarak elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları 20 W için 3100 K, 40 W için 4200 K, 60 W için 5050 K ve 80 W için 5900 K idi. Bu nedenle, ardışık üç lazer gücü aralığı, örneğin, 80-60 W, 60-40 W ve 40-20 W için, maksimum yüzey sıcaklıklarındaki farklar sırasıyla 1100 K, 850 K ve 750 K olarak elde edildi.

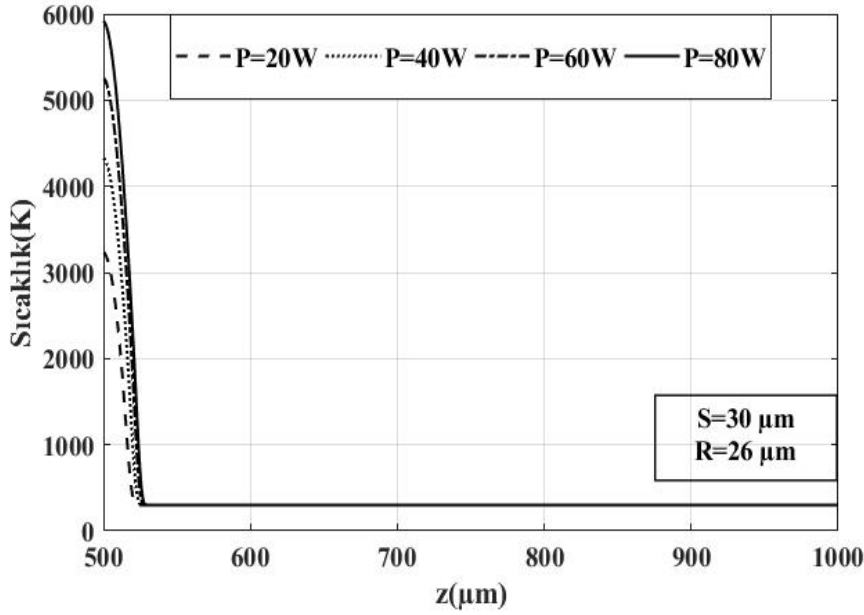


a)



b)

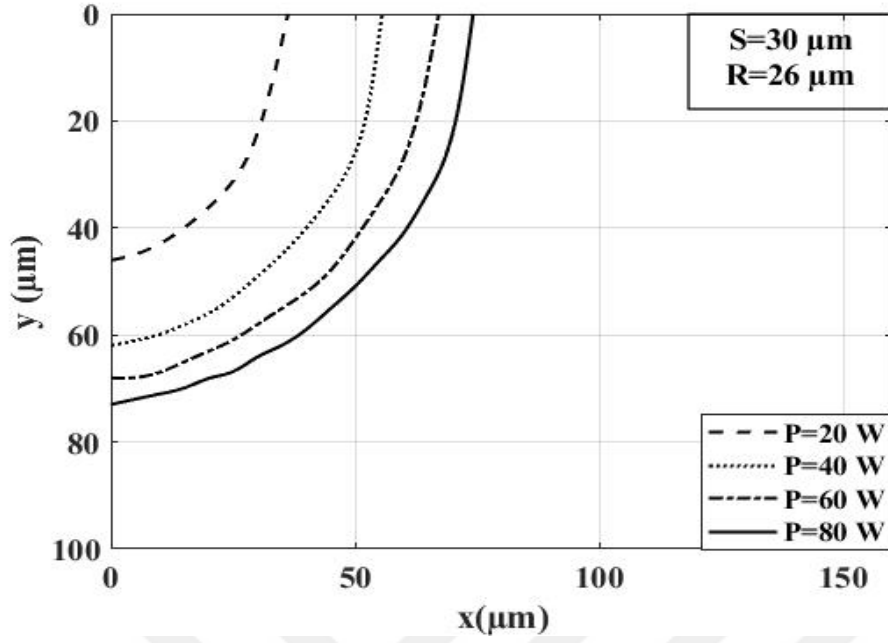
Şekil 4.9. Farklı güç değerlerine bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca sıcaklık dağılımı b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca sıcaklık dağılımı c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımı kıyaslanması



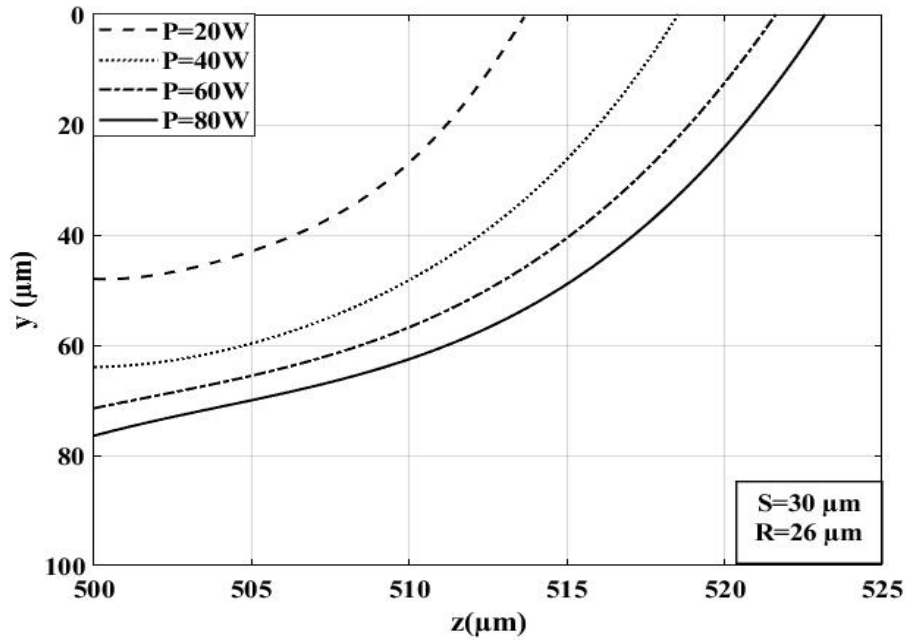
c)

Şekil 4.9. (Devamı) Farklı güç değerlerine bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca sıcaklık dağılımı b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca sıcaklık dağılımı c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımı kıyaslanması

Şekil 4.10' da simetrik olarak lazer gücüne bağlı eriyik havuzunun x-y, y-z ve x-z yönlü geometrisi görülmektedir. Her üç grafikte de lazer gücünün artışına bağlı olarak eriyik havuzu azalan yönde artış göstermektedir. Şekil 4.10a incelendiğinde, sıvı faz bölgesinin y yönünde 20 W lazer gücünde x eksenine göre daha hızlı hareket ettiği görülmüş, ancak lazer gücü 40 W' a yükseldikçe fazlar arası eğri x yönünde daha hızlı ilerlemiş ve yaklaşık 60 W' da y yönünde aynı değere eşit olduğu görülmüştür. 80 W değerinde ise her iki yönde aynı oranda ilerleyerek yarım daire şeklinde bir geometri oluşturmuştur. Sayısal olarak incelenecek olunursa güce bağlı olarak x yönlü eriyik havuzu yaklaşık 38 mikrometre değerinden 70 mikrometre değerine yükselirken y yönlü eriyik geometrisi yaklaşık 45 mikrometreden 72 mikrometre değerine yükselmiştir. Lazerin z yönündeki eriyik geometrisine bakıldığında ise lazer gücüne bağlı eriyik havuzu uzunluğu artışı oldukça küçüktür. En büyük artış 20 W ve 40 W arasında yaklaşık 7 mikrometre olarak saptanmıştır. En küçük artış ise 60 W ve 80 W arasında yalnızca 2 mikrometre olarak saptanmıştır.

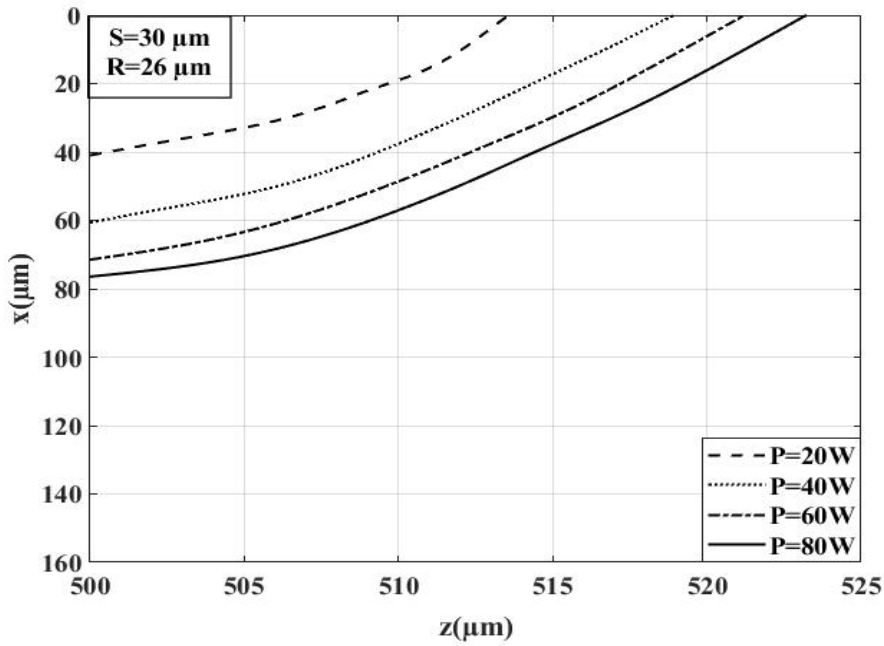


a)



b)

Şekil 4.10. Farklı lazer güçleri için . a) x-y yönlü eriyik havuzu geometrisi b) z-y yönlü eriyik havuzu geometrisi) z-x yönlü eriyik havuzu geometrisi değişimi

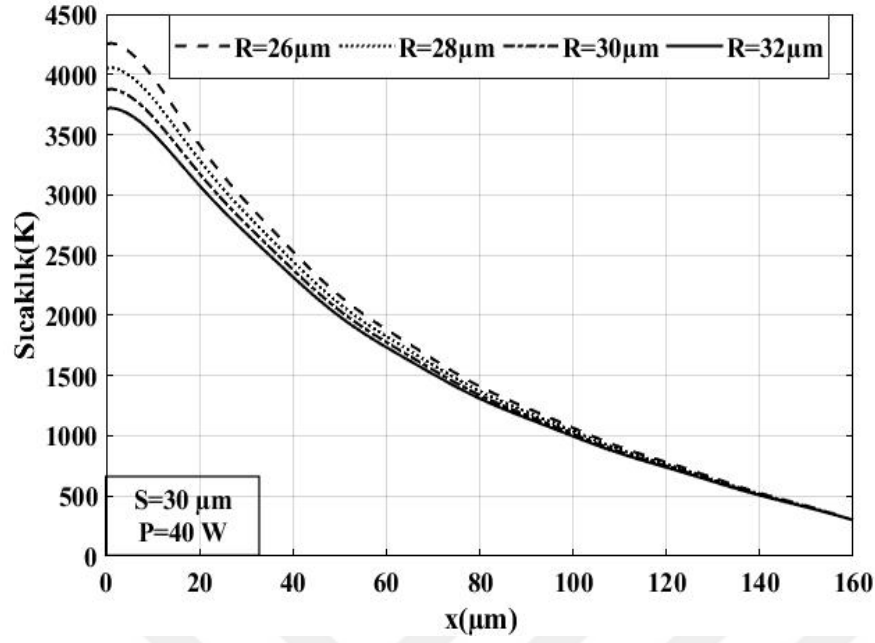


c)

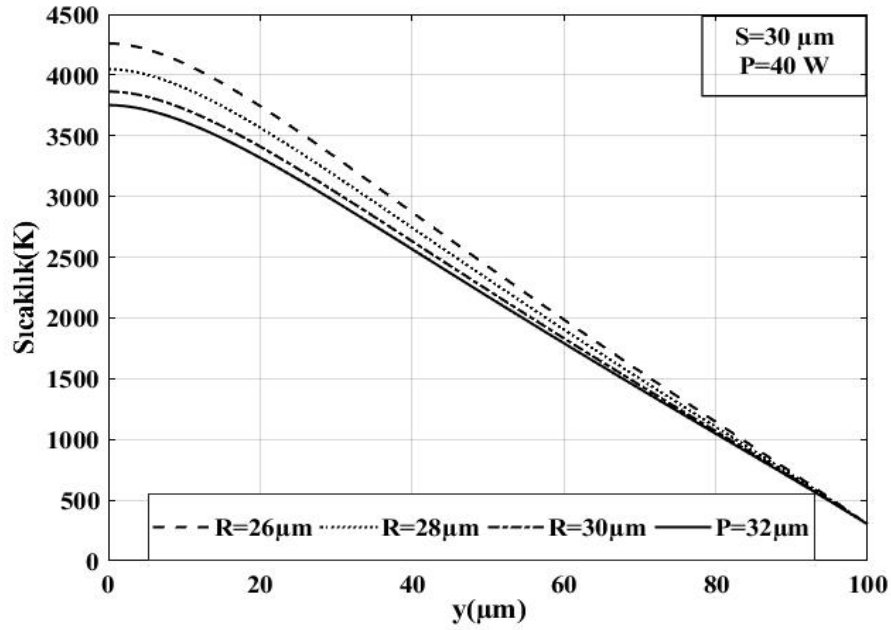
Şekil 4.10. (Devamı) Farklı lazer güçleri için . a) x-y yönlü eriyik havuzu geometrisi b) z-y yönlü eriyik havuzu geometrisi) z-x yönlü eriyik havuzu geometrisi değişimi

Şekil 4.11' de, lazer çapının çözüm bölgesi içindeki sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi, 40 W lazer gücü ve 30 mikrometre toz yatak kalınlığı için x-y, y-z ve x-z koordinatları boyunca sunulmaktadır. Dört farklı lazer nokta boyutu (26 μm , 28 μm , 30 μm ve 32 μm) için yapılan analiz sonuçlarına göre maksimum sıcaklık, (0,0,0) noktasında en küçük lazer çapı olan 26 mikrometre lazer çapında yaklaşık 4200 K olarak elde edilmiştir. Lazer nokta çapının artmasıyla, lazer çapının her seviyesinde maksimum sıcaklık yaklaşık 180 K azalmış ve 32 mikrometre nokta çapında 3700 K değerine ulaşmıştır. z yönünde lazer merkezinde (0,0,0) sıcaklık maksimum değere ulaşırken z yönüne bağlı hızlı bir şekilde soğuma meydana gelmektedir. Ayrıca lazer çapına bağlı olarak z yönlü sıcaklıklar arası fark çok küçük olmakla beraber sıcaklık dağılımları da oldukça benzerlik göstermektedir.

Toz tabakasının genişliği ve derinliği boyunca sıcaklık dağılımının davranışı Şekil 4.9 ve Şekil 4.13 ile benzerlik göstermektedir. Bu nedenle sıcaklık dağılımı toz tabakası boyunca x yönünde Gauss formundadır ve parabolik form, toz tabakası boyunca y ve z yönünde gözlenir ve katı tabakada çevre sıcaklığına kadar doğrusal düşüş meydana gelir.

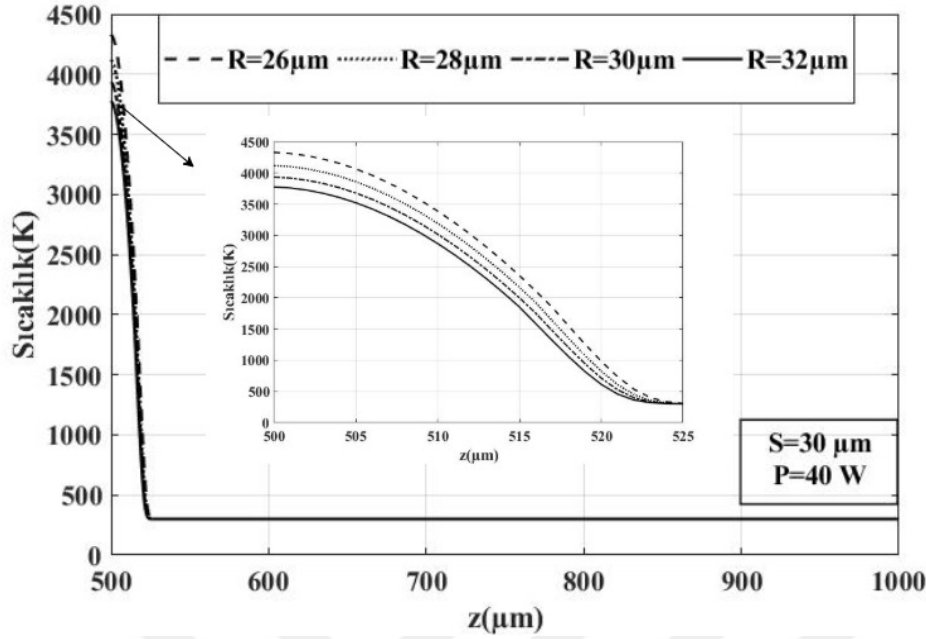


a)



b)

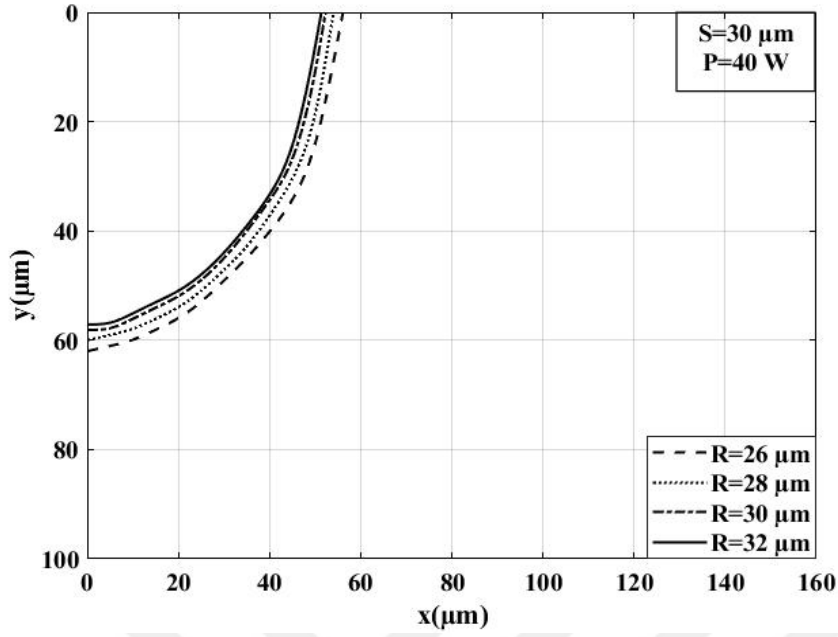
Şekil 4.11. Farklı lazer çapı değerlerine bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımı kıyaslanması



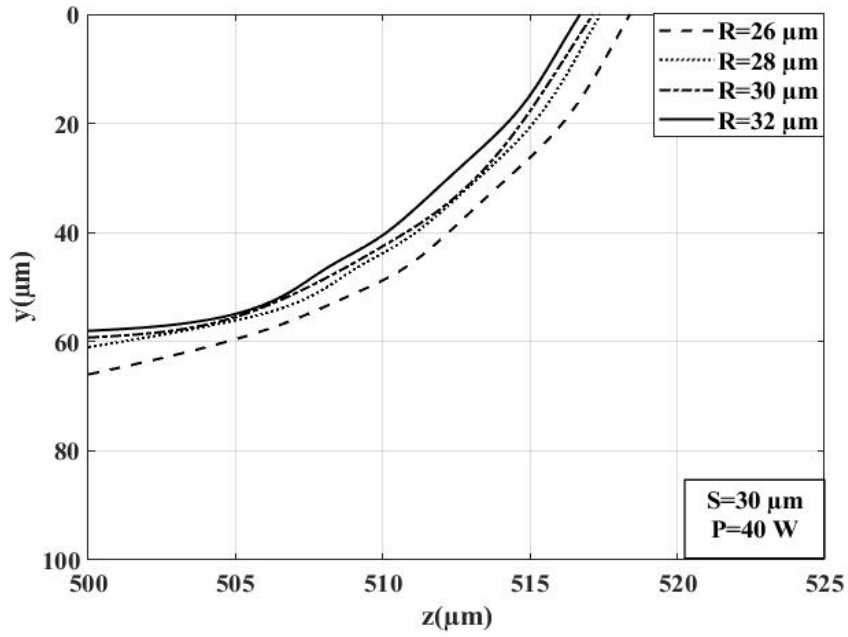
c)

Şekil 4.11. (Devamı) Farklı lazer çapı değerlerine bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımı kıyaslanması

Şekil 4.12, 40 W'lık lazer gücünde ve 30 mikrometrelik toz yatağı kalınlığında lazer nokta boyutunun eriyik havuzu geometrisi üzerindeki etkisini göstermektedir. Lazer çapı arttıkça, eriyik havuzunun küçüldüğü gözlemlenmiştir. Sıvı faz bölgesi, her bir lazer çapı için x ve y yönlü neredeyse eşit bir düşüş göstererek bir yarım daire çizmiştir. Şekil 4.12, Şekil 4.14 ile karşılaştırıldığında lazer gücünün fazlar arası geometrinin ilerlemesinde lazer çapı büyüklüğünden daha etkili olduğu söylenebilir. Lazer çapı 26 mikrometre olarak seçildiğinde, eriyik havuzu genişliği ve derinliği sırasıyla 57 mikrometre ve 62 mikrometre civarındadır. Lazer nokta boyutu arttıkça, eriyik havuzu genişliği 57 mikrometreden 50 mikrometreye düşerken, derinliğin 56-60 mikrometre seviyesinde kaldığı gözlemlenmiştir. z yönlü değişimine bakıldığında ise benzer şekilde lazer gücüne bağlı değişime oranla lazer çapı değişimi eriyik havuzu uzunluğunu oldukça küçük miktarda değiştirmektedir. Şekil 4.12b ve Şekil 4.12c incelendiğinde maksimum değişimin 60-80W değerlerinde olduğu ve yaklaşık 1 mikrometre seviyesinde olduğu görülmüştür. Bu nedenle, SLM işlemi sırasında lazer nokta boyutu yerine lazer gücünün kullanılmasının sıvı havuzu boyutlarının ayarlanmasında daha etkili olduğu anlaşılmıştır.

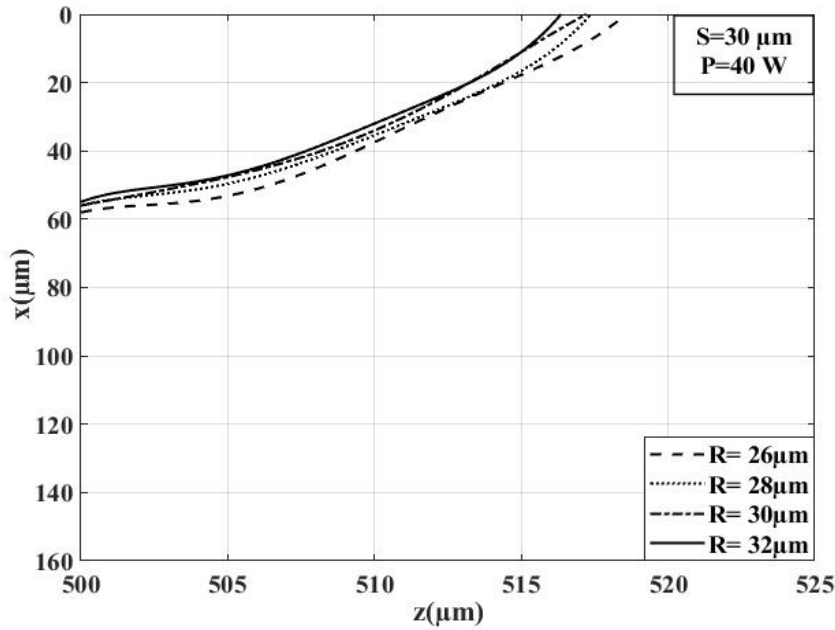


a)



.b)

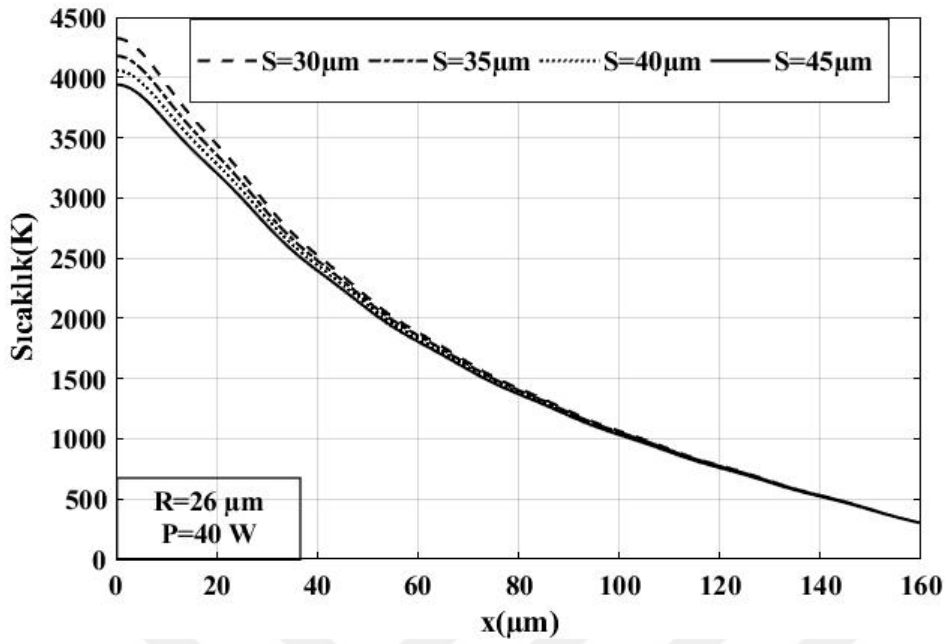
Şekil 4.12. Farklı lazer çapları için a) x-y yönlü eriyik havuzu geometrisi b) y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi c) x-z yönlü eriyik havuzu geometrisi değişimi



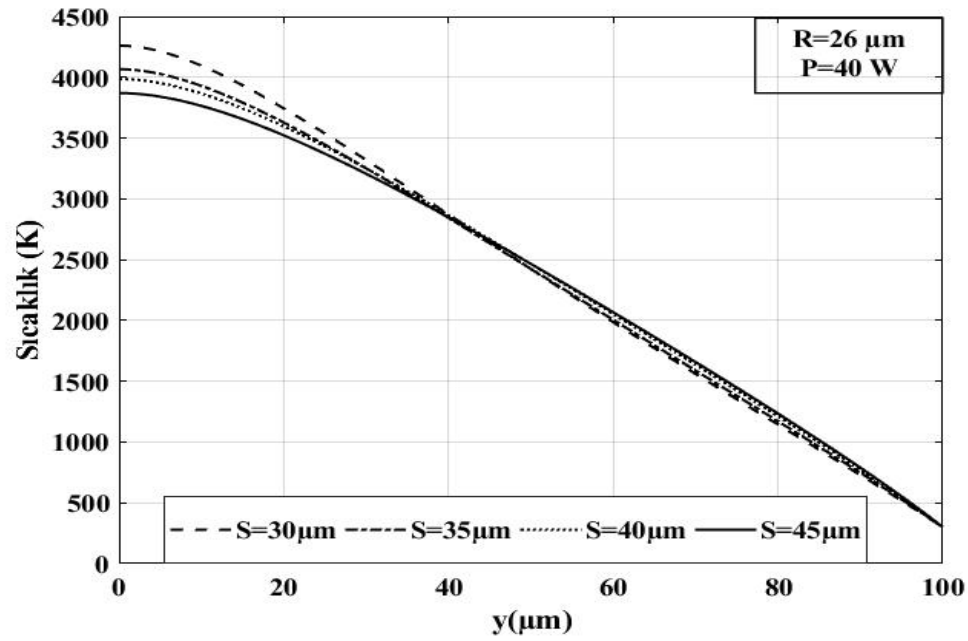
c)

Şekil 4.12. (Devamı) Farklı lazer çapları için a) x-y yönlü eriyik havuzu geometrisi b) y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi c) x-z yönlü eriyik havuzu geometrisi değişimi

Şekil 4.13' te toz yatağı kalınlığının çözelti alanı içindeki sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi, 40 W lazer gücü ve 26 mikrometre lazer nokta boyutu için x-y, y-z ve x-z koordinatları boyunca sunulmaktadır. Farklı toz yatağı kalınlığı (30 μm , 35 μm , 40 μm ve 45 μm) için yapılan analiz sonuçlarına göre, (0,0,0) noktasındaki 30 mikrometre toz yatağı kalınlığında maksimum sıcaklık yaklaşık 4200 K olarak elde edilmiştir. Toz yatağı kalınlığının artmasıyla, maksimum sıcaklığın toz yatağı kalınlığının her seviyesinde yaklaşık 125 K azaldığı ve 45 mikrometre toz yatağı kalınlığında 3875 K' e ulaştığı görülmüştür. Sıcaklık dağılımlarına bakıldığında ise x ve y yönlü sıcaklık dağılımları, x yönünde Gaussian ve y yönünde parabolik olarak azalarak çözüm bölgesi sonunda çevre sıcaklığına ulaşmaktadır. z yönlü sıcaklık dağılımı incelendiğinde ise maksimum sıcaklık değerinden hızlı bir şekilde çevre sıcaklığına düşmekte ve z koordinatının sonuna kadar sabit çevre sıcaklığında ilerlemektedir.

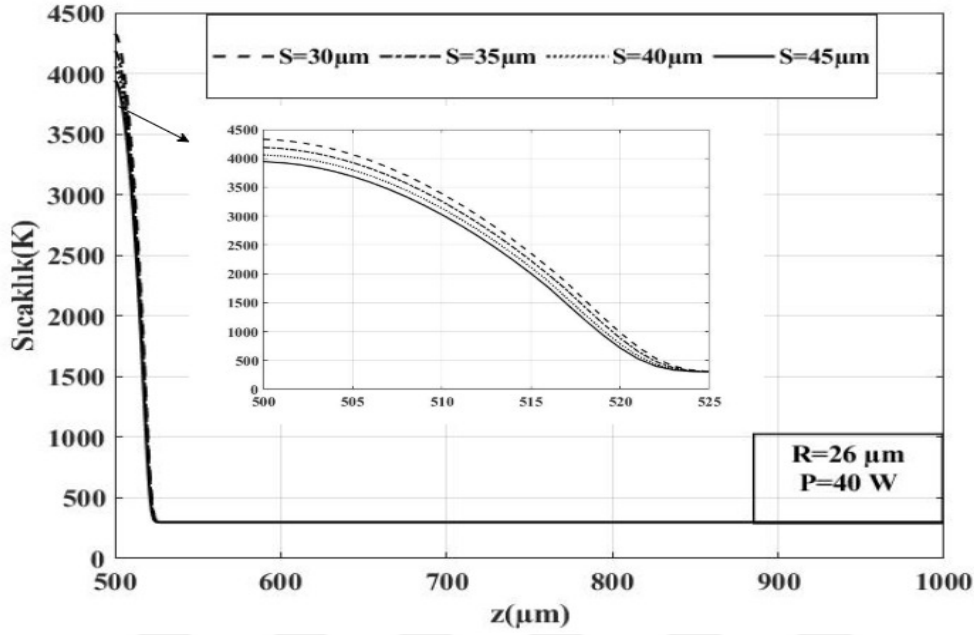


a)



b)

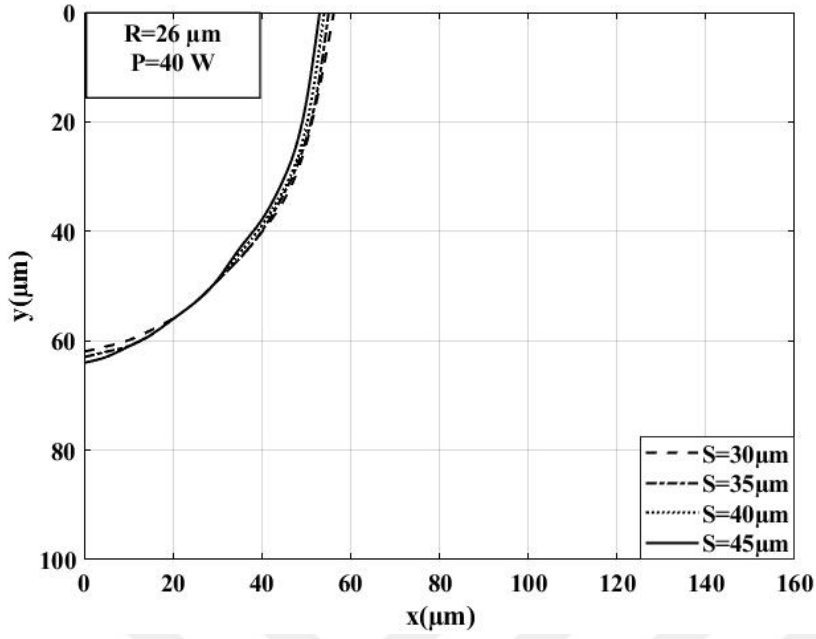
Şekil 4.13. Farklı toz yatağı kalınlığı değerlerine bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca sıcaklık dağılımı b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca sıcaklık dağılımı c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımı kıyaslanması



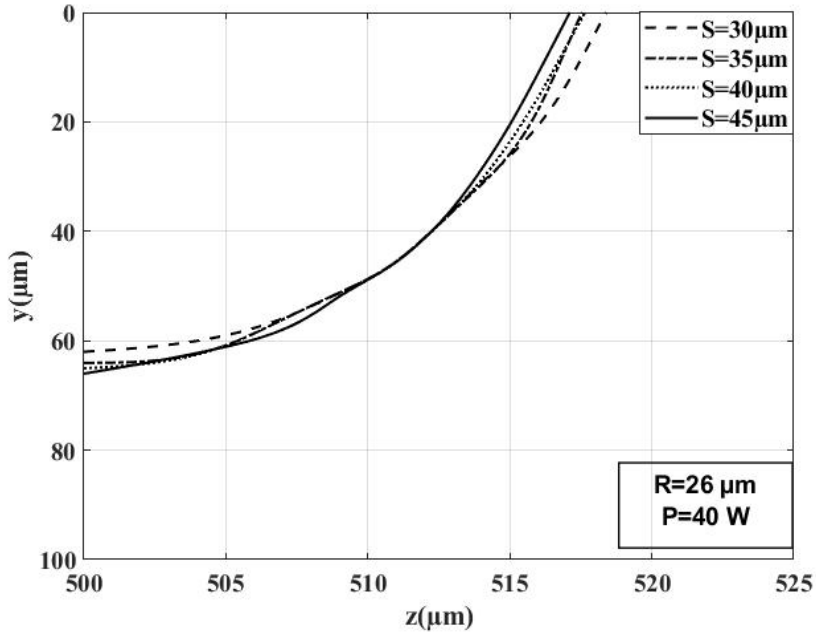
c)

Şekil 4.13. (Devamı) Farklı toz yatağı kalınlığı değerlerine bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca sıcaklık dağılımı b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca sıcaklık dağılımı c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımı kıyaslanması

Şekil 4.14, 40 W'lık lazer gücünde ve 26 mikrometrelik lazer nokta yarıçapında toz yatağı kalınlığının eriyik havuzu geometrisi üzerindeki etkisini göstermektedir. Toz yatağı kalınlığı arttıkça, eriyik havuzu bölgesinin daha küçük bir bölgeye daraldığı söylenebilir. Sıvı faz bölgesinin x-yönünde küçülmesine rağmen y-yönünde önemli miktarda değişmediği görülmektedir. Toz yatağı kalınlığı 30 mikrometre olarak seçildiğinde, havuz genişliği ve derinliği sırasıyla 55 mikrometre ve 62,5 mikrometre mertebesinde oluşur. Toz yatağı kalınlığı arttıkça, sıvı havuz genişliği 55 mikrometreden 50 mikrometreye düşerken, derinliğin 63 mikrometre civarında sabit kaldığı gözlemlenmiştir. z yönündeki ilerleme incelendiğinde ise her bir toz katman kalınlığı değeri için önemli ölçüde değişmediği ve yaklaşık 518 mikrometre civarında olduğu saptanmıştır.

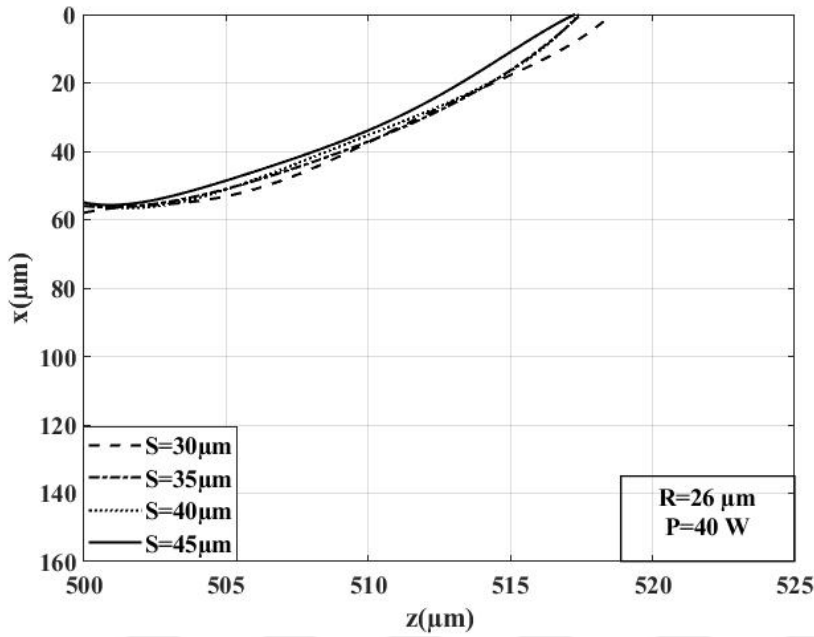


a)



b)

Şekil 4.14. Farklı toz yatağı kalınlıkları için a) x-y yönlü eriyik havuzu geometrisi b) y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi c) x-z yönlü eriyik havuzu geometrisi değişimi



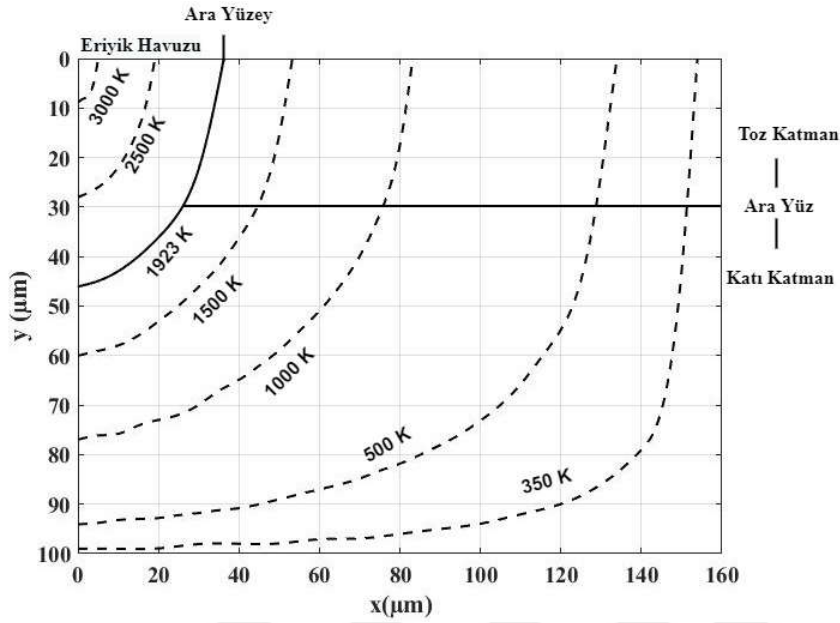
c)

Şekil 4.14. (Devamı) Farklı toz yatağı kalınlıkları için a) x-y yönlü eriyik havuzu geometrisi b) y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi c) x-z yönlü eriyik havuzu geometrisi değişimi

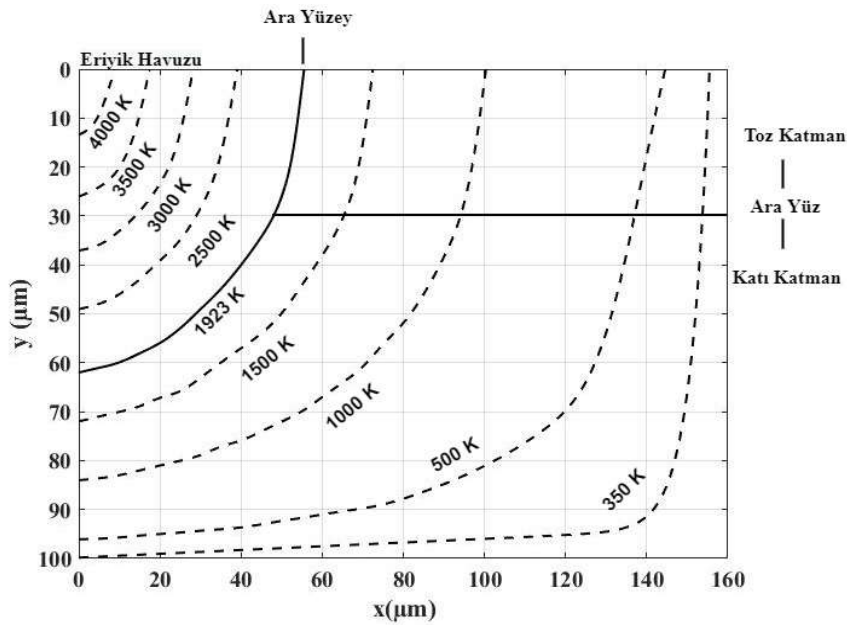
Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde eriyik havuzu hacmini en fazla lazer gücü ve daha sonra lazer yarıçapı etkilemektedir. Toz katman kalınlığı ise eriyik havuzu hacmini en az etkileyen parametredir. Dolayısı ile lazer gücünün seçimi oldukça önem arz etmektedir. Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’ de 26 mikrometre lazer yarıçapı ve 30 mikrometre toz yatak kalınlığı için, x-y, x-z ve y-z yönlü izo-sıcaklık dağılımlarının oluşumu ve faz geçiş hatlarının ilerlemesi dört farklı lazer gücü için sunulmuştur. Burada görülen kesikli çizgiler izo-sıcaklık eğrilerini, düz çizgiler ise katı sıvı eriyik sınırını göstermektedir.

Şekil 4.15 incelendiğinde, lazer gücü 20 W’ dan 40 W’ a yükseltildiğinde, sıvı faz bölgesi genişliğinin 38 mikrometreden 57 mikrometreye, sıvı faz bölgesi derinliğinin 46 mikrometreden 62 mikrometreye ulaştığı ve maksimum havuz sıcaklığı değerinin 3160 K’ den 4250 K’ e yükseldiği görülmüştür. Lazer gücü 40 W’ dan 60 W’ a yükseltildiğinde, sıvı faz bölgesi genişliğinin 57 mikrometreden 65 mikrometreye, sıvı faz bölgesi derinliğinin 62 mikrometreden 68 mikrometreye ulaştığı ve maksimum havuz sıcaklığı değerinin 4250 K’ den 5120 K’ e yükseldiği görülmüştür. Lazer gücü 60 W’ dan 80 W’ a yükseltildiğinde, sıvı faz bölgesi genişliğinin 68 mikrometreden 75 mikrometreye ulaştığı, sıvı faz bölgesi derinliğinin 68 mikrometreden 72 mikrometreye ulaştığı ve maksimum

havuz sıcaklığının 5900 K' e ulaştığı görülmüştür. Genel sıcaklık dağılımlarına bakıldığında x yönlü ilerlemenin y yönüne göre daha hızlı hareket ettiği saptanan bir diğer olgudur.

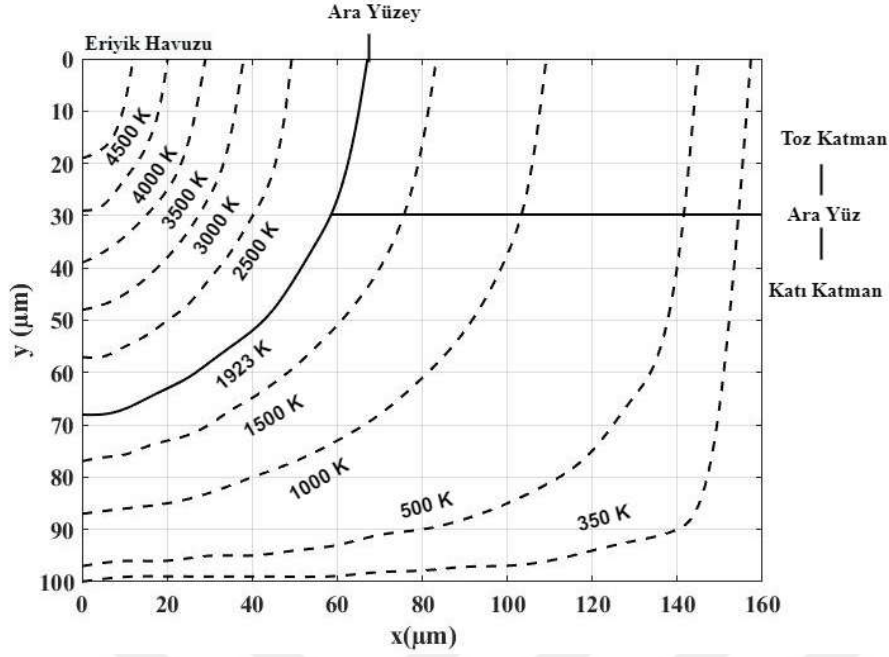


a)

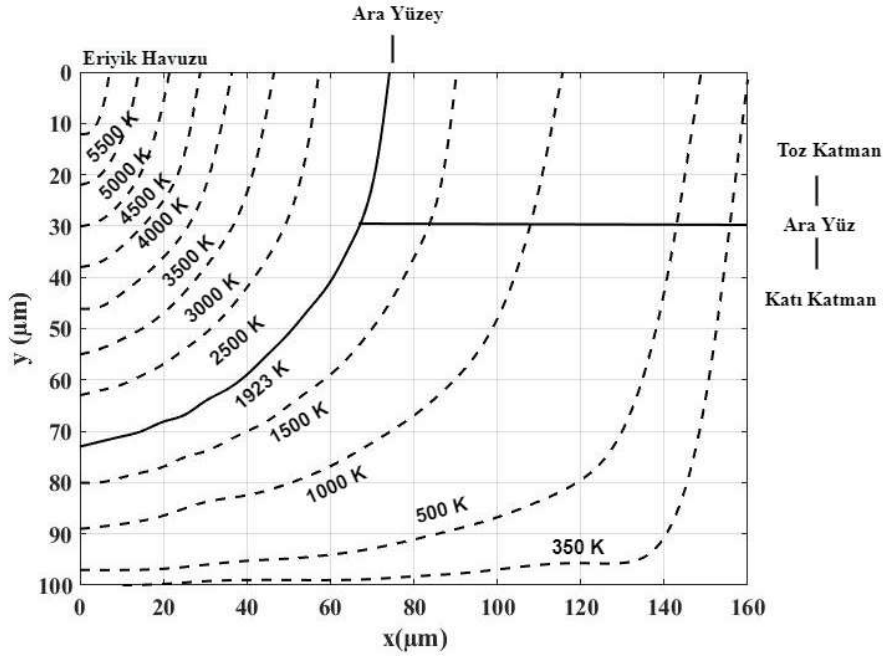


b)

Şekil 4.15. 26 μm lazer çapı büyüklüğü ve 30 μm toz yatak kalınlığı için (a) 20, (b) 40, (c) 60 ve (d) 80W lazer gücü altında çözüm alanı boyunca x-y yönlü iso-sıcaklık haritası ve fazlar arası geçiş



c)

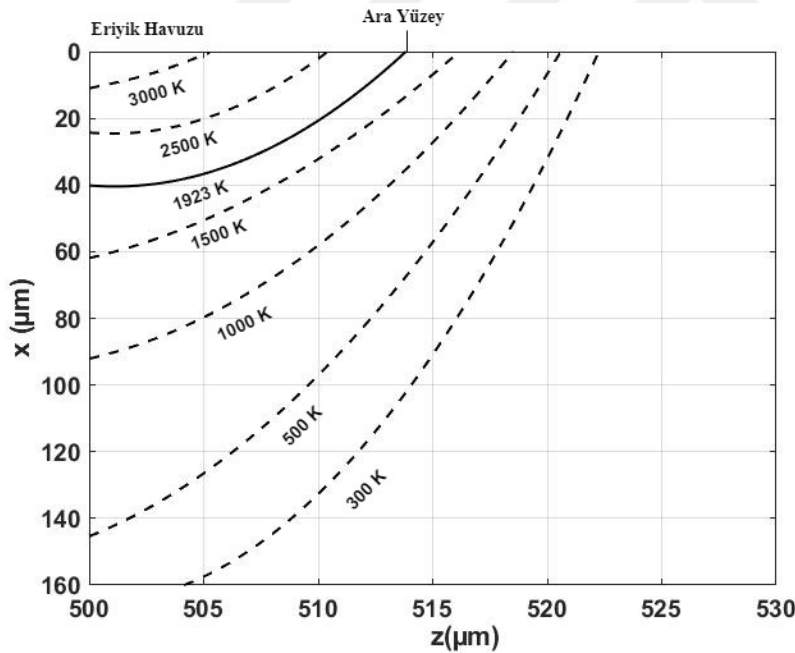


d)

Şekil 4.15. (Devamı) 26 μm lazer çapı büyüklüğü ve 30 μm toz yatak kalınlığı için (a) 20, (b) 40, (c) 60 ve (d) 80W lazer gücü altında çözüm alanı boyunca x-y yönlü ize-sıcaklık haritası ve fazlar arası geçiş

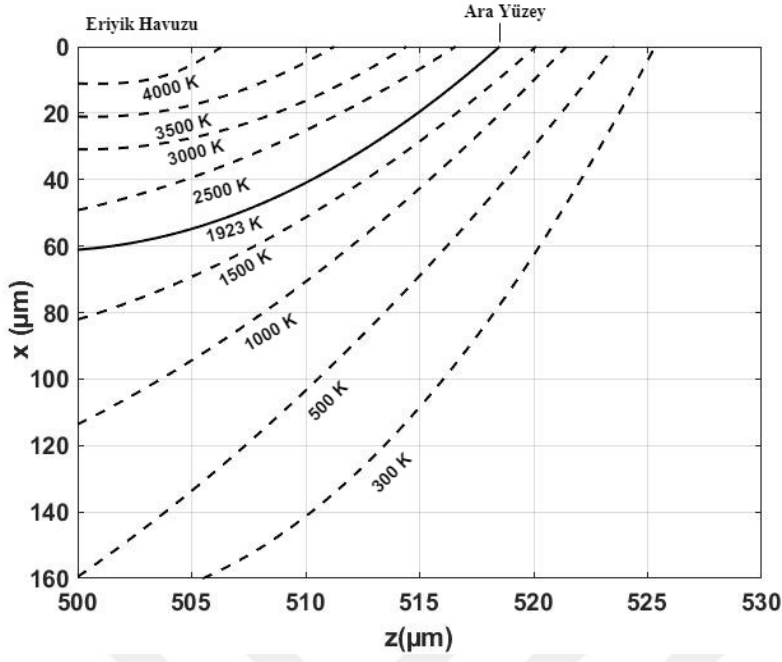
Şekil 4.16' da x-z yönlü izo-sıcaklık eğrileri ve eriyik bölgesi ara yüzeyi görülmektedir. Maksimum sıcaklıklar incelendiğinde 20 W için yaklaşık 3160 K, 40 W için 4250 K, 60 W için 5120 K ve 80 W için 5900 K olarak elde edilmiştir. x-z yönlü sıcaklık dağılımları ve faz geçişi incelendiğinde ise sıcaklık gradyanlarının z yönünde küçük bir alana sıkıştığı görülmektedir. Sayılarla ifade edecek olursak, 20 W için 500-523 mikrometre, 40 W için 500-525 mikrometre, 60 W için 500-528 mikrometre ve 80 W için 500-530 mikrometre arasına sıkışan bir sıcaklık gradyanı görülmektedir.

Eriyik havuzu incelendiğinde ise x yönlü ilerleme z yönüne kıyasla oldukça hızlı bir artış göstermiştir. Lazer gücüne bağlı olarak eriyik havuzu genişliği 20 W için yaklaşık 40 mikrometre, 40 W için 60 mikrometre, 60 W için 70 mikrometre ve 80 W için 75 mikrometre olarak elde edilmiştir. Eriyik havuzu uzunluğu 20 W için 513 mikrometre, 40 W için 517 mikrometre, 60 W için 521 mikrometre ve 80 W için 523 mikrometre olarak saptanmıştır.

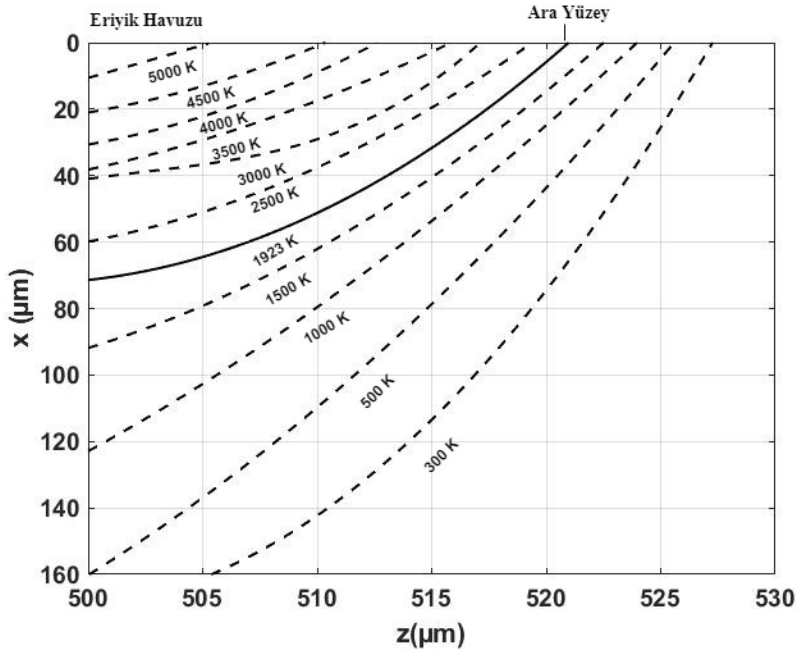


a)

Şekil 4.16. 26 μm lazer çapı ve 30 μm toz yatak kalınlığı için (a) 20, (b) 40, (c) 60 ve (d) 80W lazer gücü altında çözüm alanı boyunca x-z yönlü izo-sıcaklık haritası ve fazlar arası geçiş

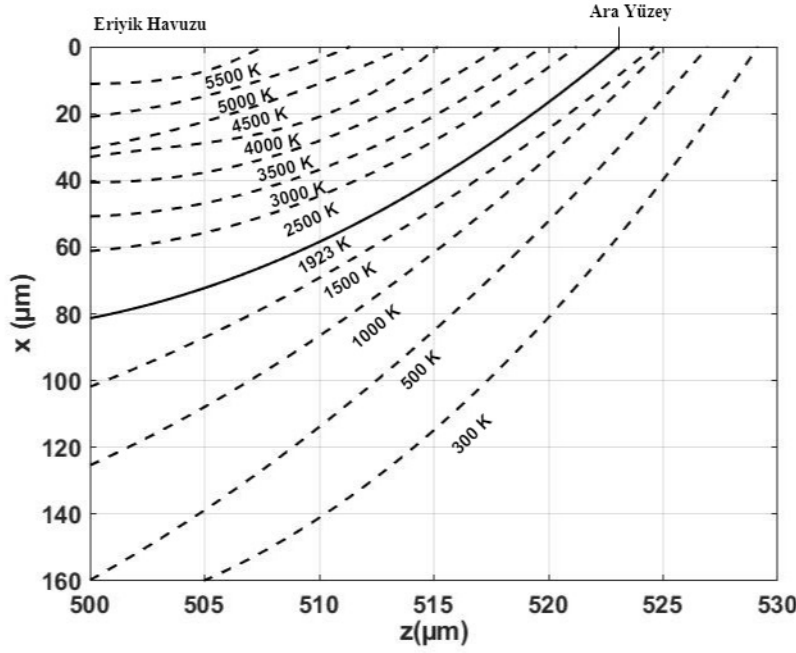


b)



c)

Şekil 4.16. (Devamı) 26 μm lazer çapı ve 30 μm toz yatak kalınlığı için (a) 20, (b) 40, (c) 60 ve (d) 80W lazer gücü altında çözüm alanı boyunca x-z yönlü izo-sıcaklık haritası ve fazlar arası geçiş

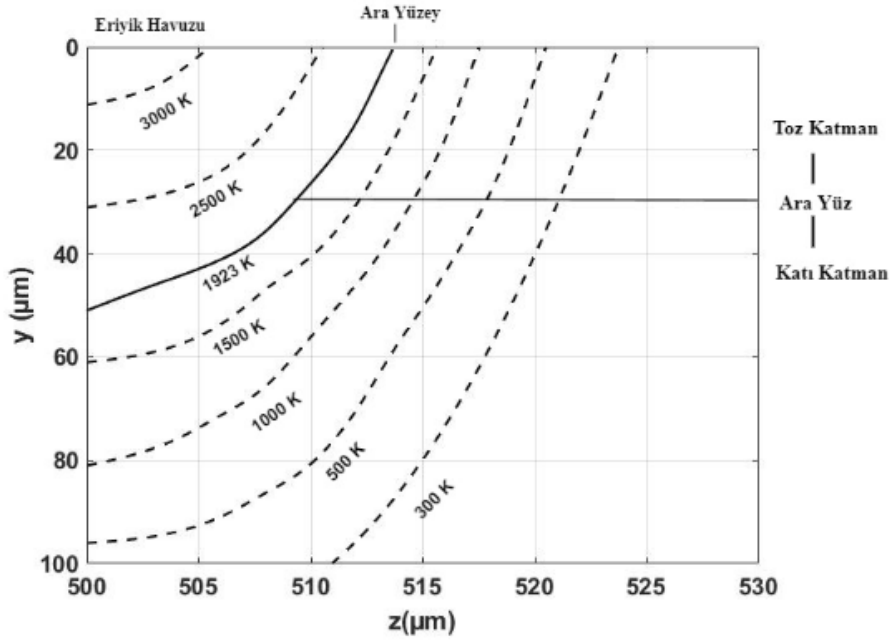


d)

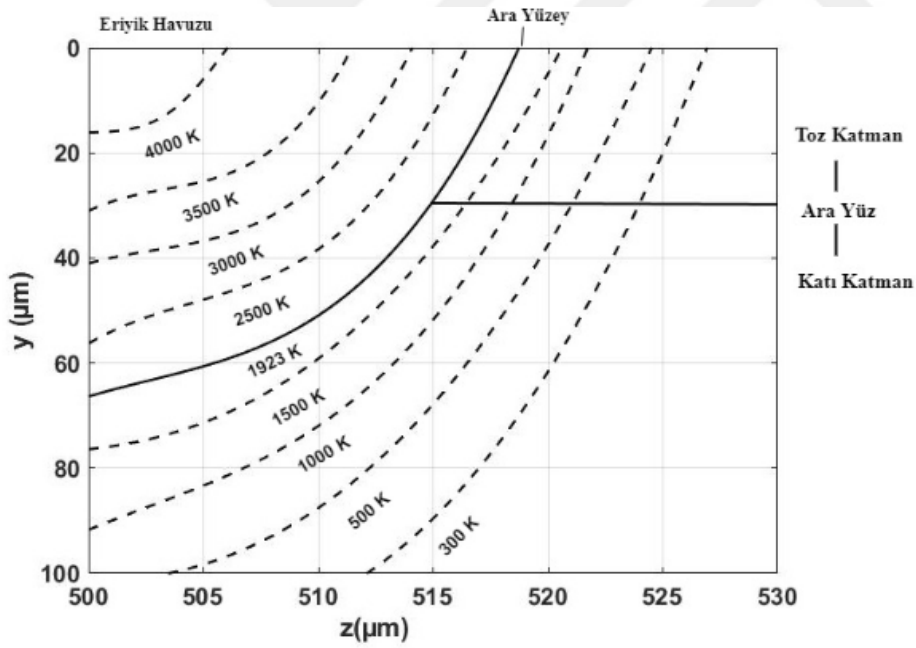
Şekil 4.16. (Devamı) 26 μm lazer çapı ve 30 μm toz yatak kalınlığı için (a) 20, (b) 40, (c) 60 ve (d) 80W lazer gücü altında çözüm alanı boyunca x-z yönlü izo-sıcaklık haritası ve fazlar arası geçiş

Şekil 4.17' de y-z yönlü güce bağlı izo-sıcaklık eğrileri ve eriyik havuzu geometrileri görülmektedir. Maksimum sıcaklık değerleri 20 W için yaklaşık 3160 K, 40W için 4250 K, 60W için 5120 K ve 80 W için 5900 K olarak elde edilmiştir. y-z yönlü sıcaklık dağılımları ve faz geçişi incelendiğinde ise Şekil 4.14 ile paralel olarak sıcaklık gradyanlarının z yönünde küçük bir alana sıkıştığı görülmektedir. 20 W için 500-523 mikrometre, 40 W için 500-527 mikrometre 60 W için 500-528 mikrometre ve 80 W için 500-532 mikrometre arasına sıkışan bir sıcaklık gradyanı olduğu gözlemlenmiştir.

Eriyik havuzu incelendiğinde ise y yönlü ilerleme z yönüne kıyasla oldukça hızlı bir artış göstermiştir. Lazer gücüne bağlı olarak y yönlü eriyik havuzu 20 W için yaklaşık 50 mikrometre, 40 W için 63 mikrometre, 60 W için 77 mikrometre ve 80 W için 72 mikrometre olarak elde edilmiştir. Eriyik havuzu uzunluğu 20 W için 513 mikrometre, 40 W için 519 mikrometre, 60 W için 522 mikrometre ve 80 W için 523 mikrometre olarak saptanmıştır.

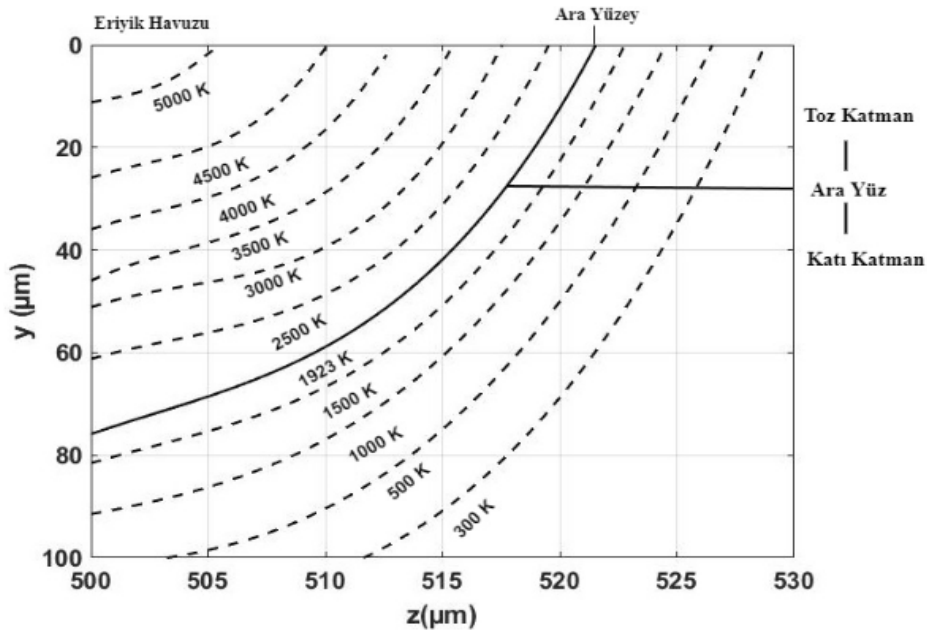


a)

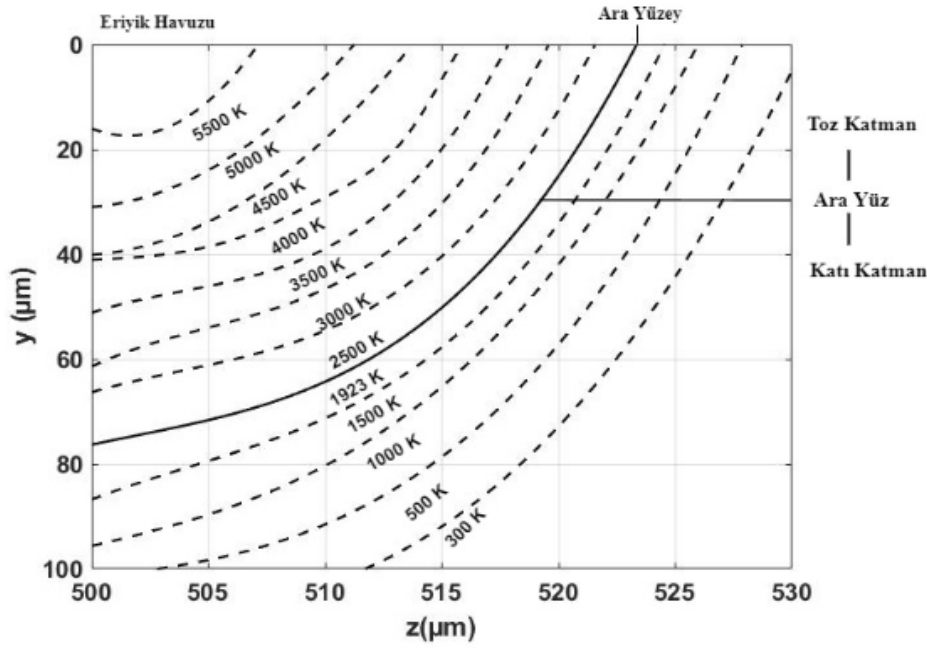


b)

Şekil 4.17. 26 μm lazer çapı büyüklüğü ve 30 μm toz yatak kalınlığı için (a) 20, (b) 40, (c) 60 ve (d) 80W lazer gücü altında çözüm alanı boyunca y-z yönlü izo-sıcaklık haritası ve fazlar arası geçiş



c)

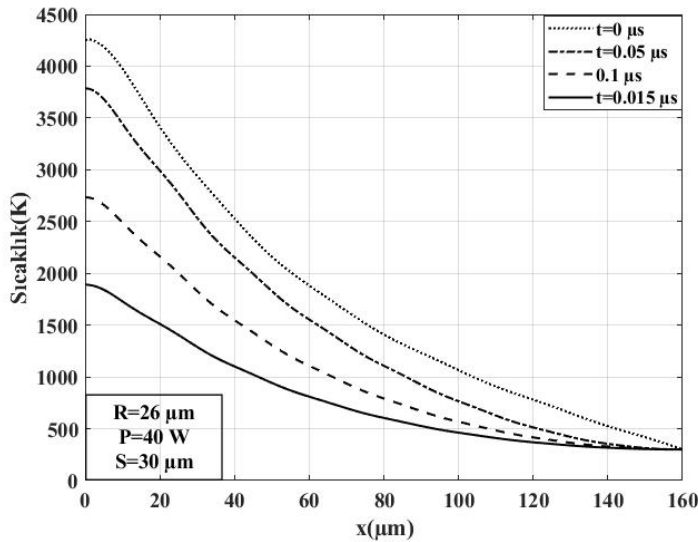


d)

Şekil 4.17. (Devamı) 26 μm lazer çapı büyüklüğü ve 30 μm toz yatak kalınlığı için (a) 20, (b) 40, (c) 60 ve (d) 80W lazer gücü altında çözüm alanı boyunca y-z yönlü ize-sıcaklık haritası ve fazlar arası geçiş

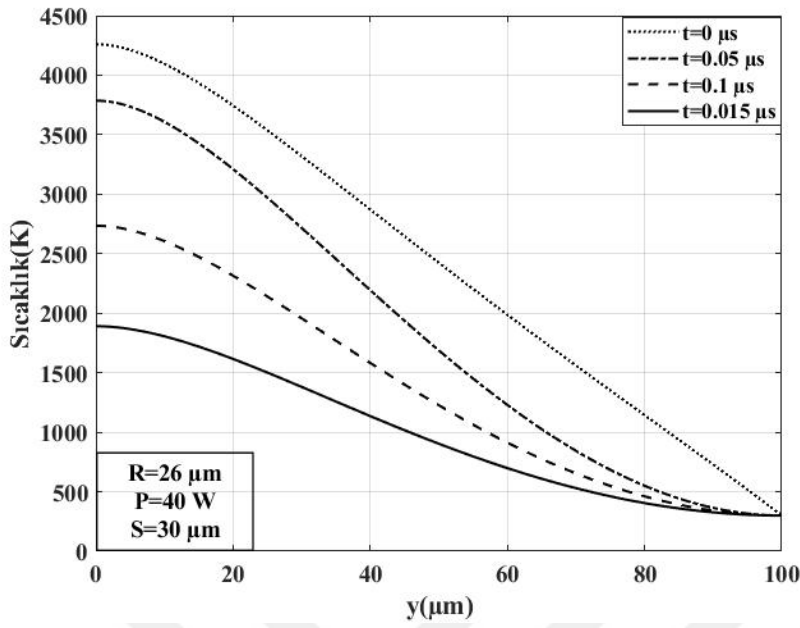
4.3.2. Düşük güç uygulamaları: Zamana bağlı durum

Bu bölüme kadar incelenen grafiklerde $t=0$ anında sıcaklık dağılımları ve eriyik geometrisi incelenmiştir. Bu bölümde ise sıcaklık ve faz geçişinin zamana bağlı değişimi incelenecektir. Bu incelemeler lazer hızının 200 mm/s değeri için gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.18' de çözüm bölgesi boyunca zamana bağlı sıcaklık değerleri incelenmiştir. Sıcaklık dağılımları $t=0-0.15$ milisaniye aralığındaki değerleri için gözlemlenmiştir. Bunun sebebi 0,15 milisaniye değerinden sonra çözüm bölgesi sıcaklığı katılaşma sıcaklığının altına düşmekte ve çözüm bölgesi tamamıyla katıya dönüşmektedir. Şekil 6.16 incelendiğinde, $t=0$ ' da 4250 K, $t=0,05$ milisaniyede 3750 K, $t=0,1$ milisaniyede 2735 K ve son olarak $t=0,15$ milisaniyede ise 1875 K olan maksimum sıcaklık gözlemlenmiştir. Maksimum sıcaklık değerleri x ve y yönünde düşüş göstererek çevre sıcaklığı olan 300 K değerine gelmiştir. Şekil 4.18c' de ise lazer kaynağının ilerleme yönünde zamana bağlı sıcaklık dağılımları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi lazer kaynağının merkezinde $t=0$ anında 4250 K olmakta ve hızlı bir şekilde çevre sıcaklığına düşmektedir. Lazer kaynağı ilerledikçe, yani 0,05, 0,1 ve 0,15 milisaniye sonra sırasıyla sıcaklık 3750 K, 2735 K ve 1875 K değerinden lazer kaynağı merkezinde 4250 K değerine ulaşmakta ve yine hızlı bir şekilde çevre sıcaklığına düşmektedir.

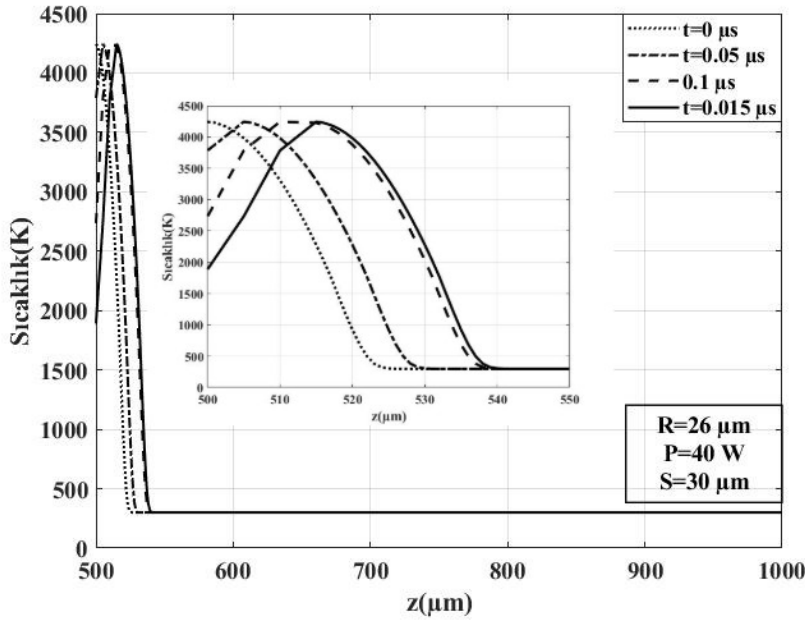


a)

Şekil 4.18. Zaman bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımlarının incelenmesi



b)

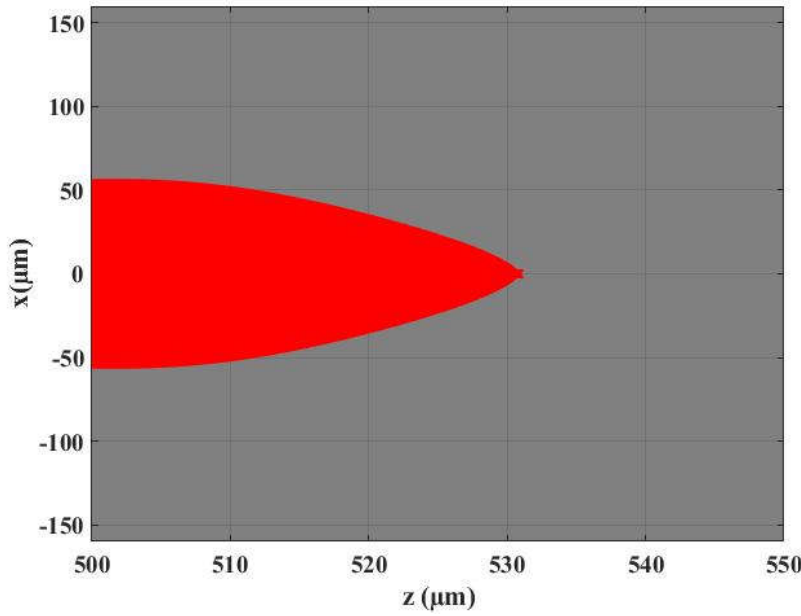


c)

Şekil 4.18. (Devamı) Zaman bağı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımlarının incelenmesi

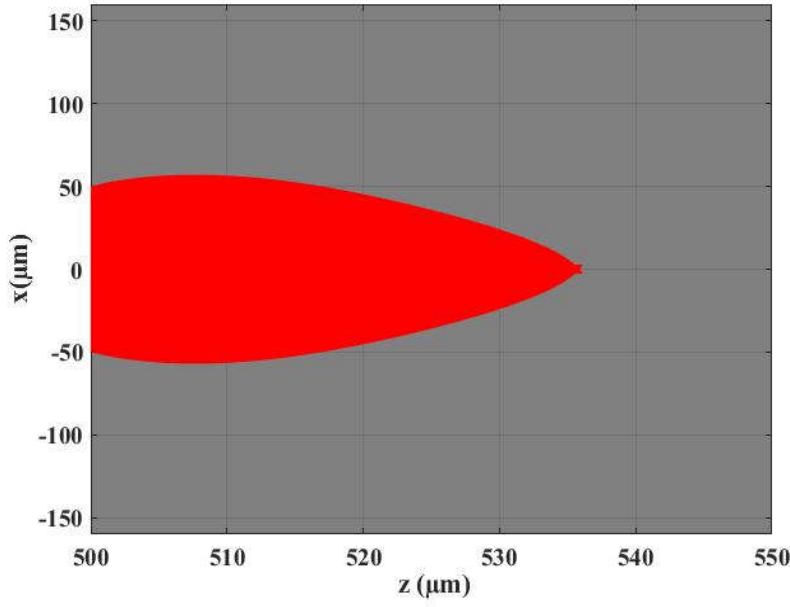
Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21' de zamana bağlı x-z, y-z ve x-y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi görülmektedir. İncelemeler 40 W lazer gücü, 30 μm toz katman kalınlığı ve 26 μm lazer yarıçapı için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, lazer merkezi ($z=500 \mu\text{m}$) ile L_z

aralığında eriyik havuzu geometrisinin fiziksel problemin doğasına paralel olarak oluştuğunu göstermektedir. Burada asıl incelenmesi gereken nokta, lazer kaynağı ile $z=500$ μm olan bölge arasındaki zamana bağlı geometrinin değişimidir. Şekil 4.17' ye bakıldığında $t=0$ ve $z=500$ μm anında eriyik havuzu genişliği 108 μm ' den zamana bağlı küçülerek sırasıyla 100 μm , 50 μm ve son olarak 0 μm değerine yaklaşarak eriyik geometrisini tamamlamaktadır. Eriyik havuzu uzunluğu ise aynı şekilde 532 μm ' den 547 μm uzunluğuna gelişerek eriyik havuzu geometrisini oluşturmaktadır.

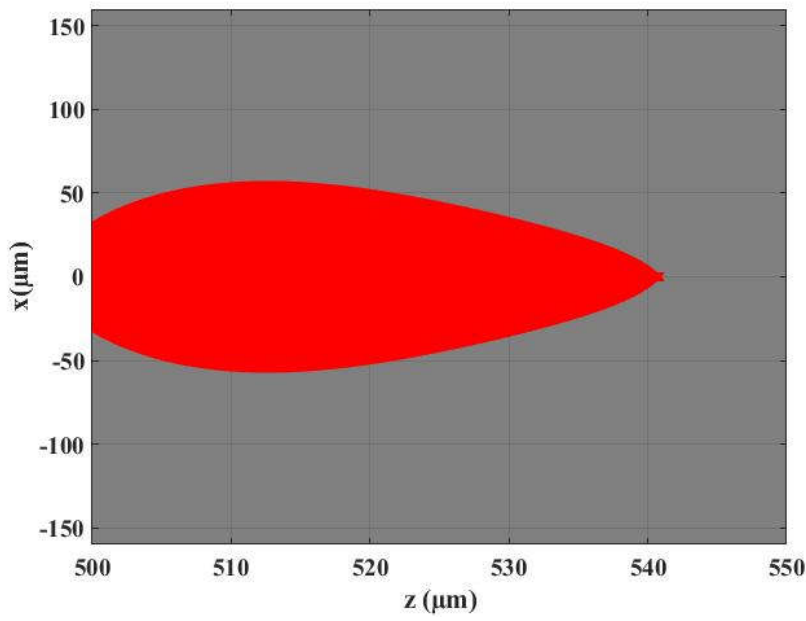


a)

Şekil 4.19. Zaman bağlı x-z yönlü eriyik havuzu a) $t=0$ μs b) $t=0.05$ μs c) $t=0.1$ μs d) $t=0.15$ μs anındaki geometrisi

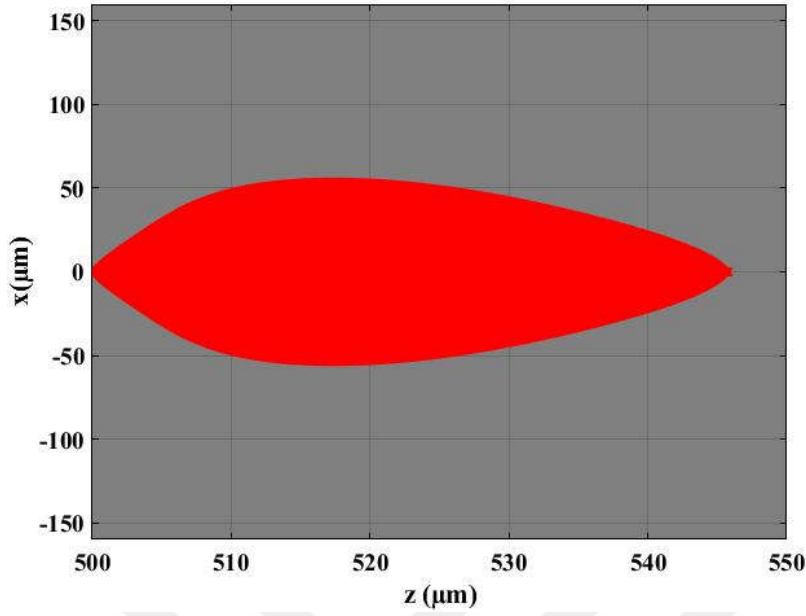


b)



c)

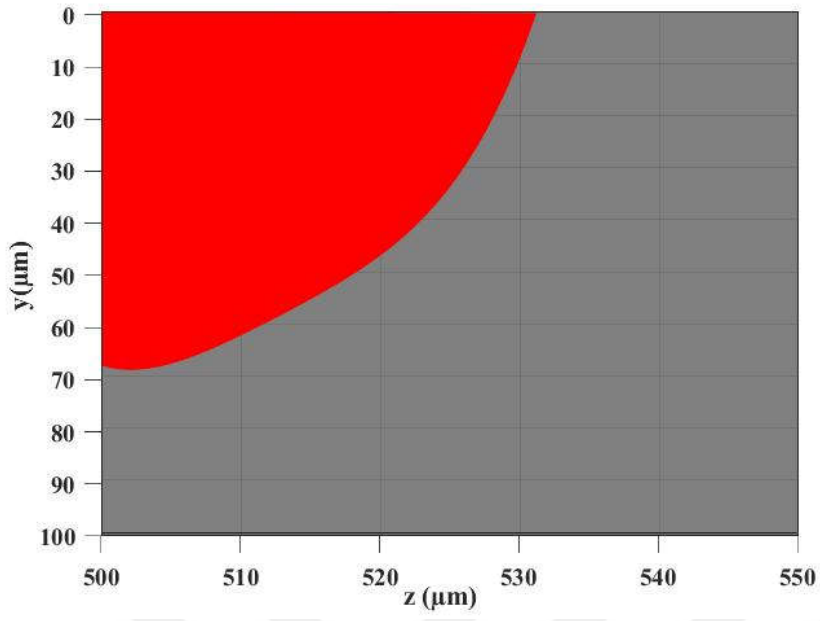
Şekil 4.19. (Devamı) Zaman bağlı x-z yönlü eriyik havuzu a) $t=0 \mu s$ b) $t=0.05 \mu s$ c) $t=0.1 \mu s$ d) $t=0.15 \mu s$ anındaki geometrisi



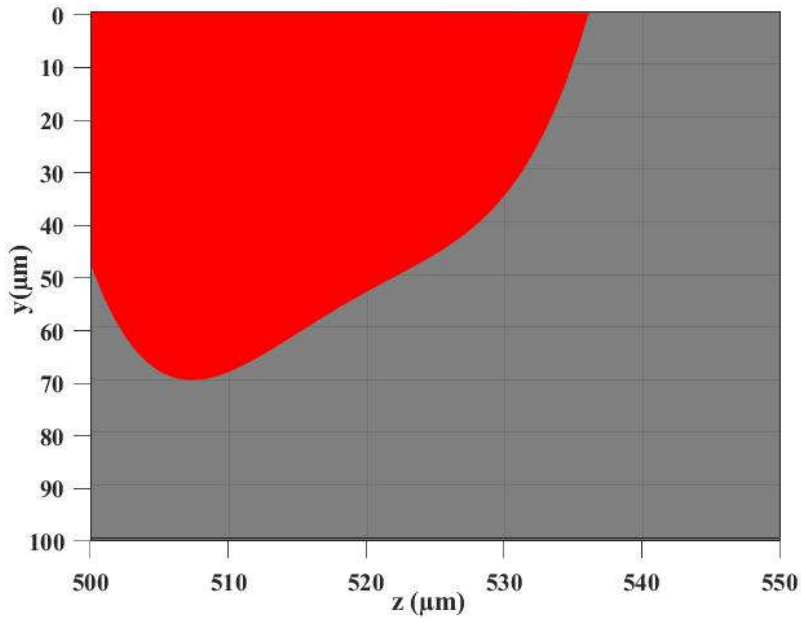
d)

Şekil 4.19. (Devamı) Zaman bağı x-z yönlü eriyik havuzu a) $t=0 \mu s$ b) $t=0.05 \mu s$ c) $t=0.1 \mu s$ d) $t=0.15 \mu s$ anındaki geometrisi

Şekil 4.20 eriyik havuzu geometrisinin zamana bağlı y-z yönlü değişimini göstermektedir. $t=0$ anında ve $z=500$ mikrometrede eriyik havuzu derinliği yaklaşık 68 mikrometre iken, $t=0.05$ milisaniyede yaklaşık 50 mikrometre, 0,1 milisaniyede 38 mikrometre ve son olarak 0,15 milisaniye için derinlik yaklaşık 0 mikrometre değerine ulaşır ve eriyik havuzu oluşmuş olur. $t=0,05$ için $z=508$ mikrometre civarında eriyik geometrisinde oluşan keskin geometrilerin zaman ilerledikçe daha stabil bir hale gelmesi saptanan bir diğer husustur.

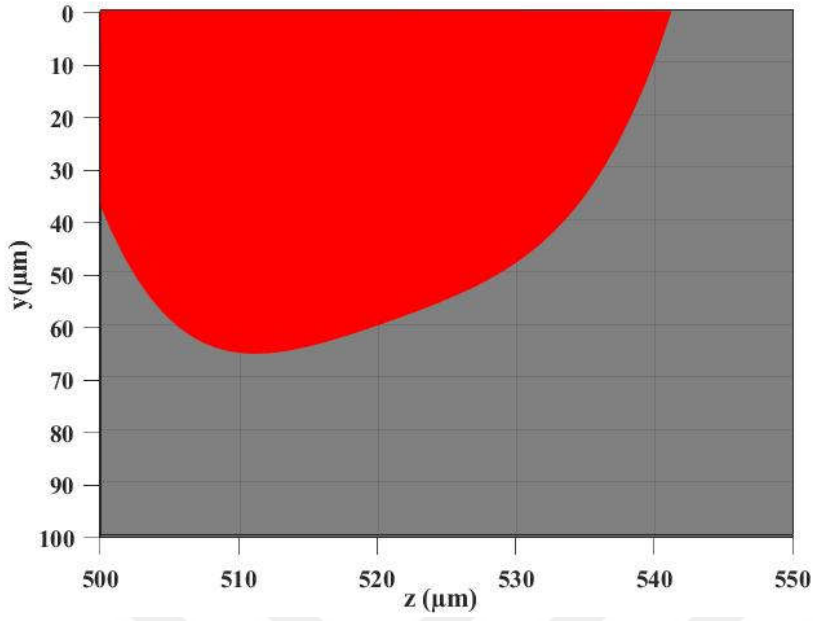


a)

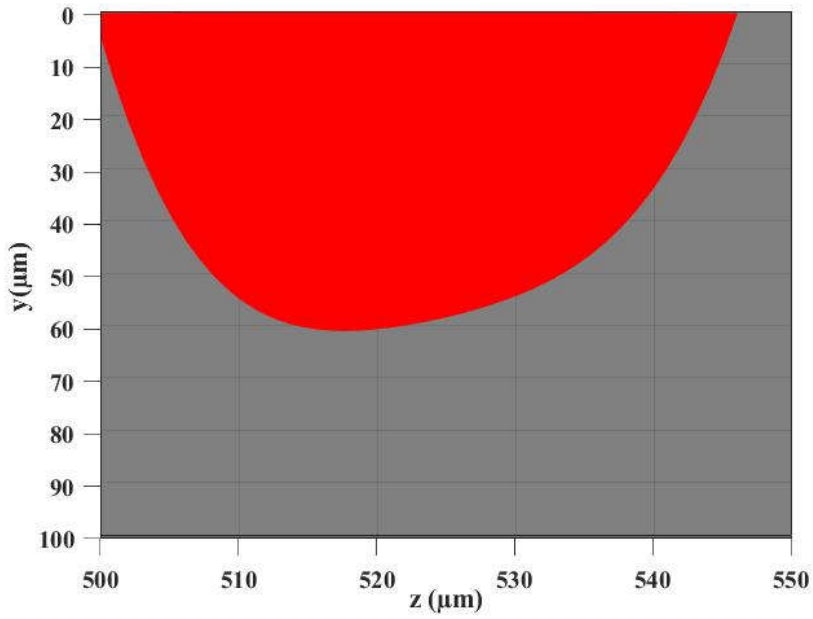


b)

Şekil 4.20. Zaman bağlı y-z yönlü eriyik havuzu a) $t=0 \mu s$ b) $t=0.05 \mu s$ c) $t=0.1 \mu s$ d) $t=0.15 \mu s$ anındaki geometrisi



c)

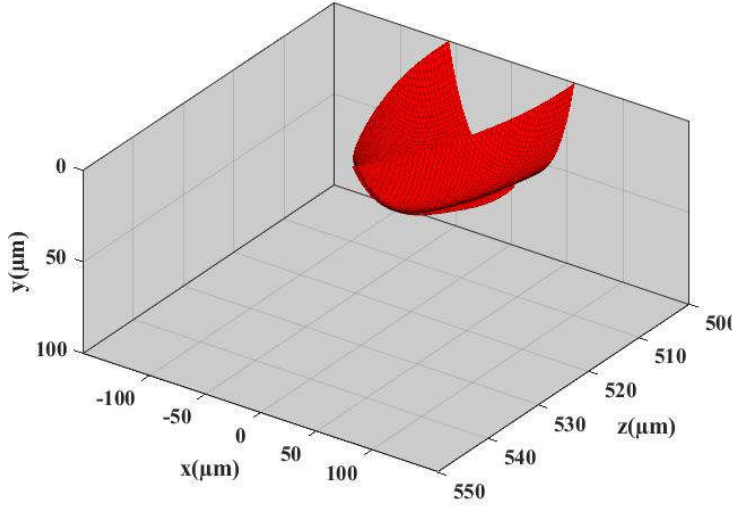


d)

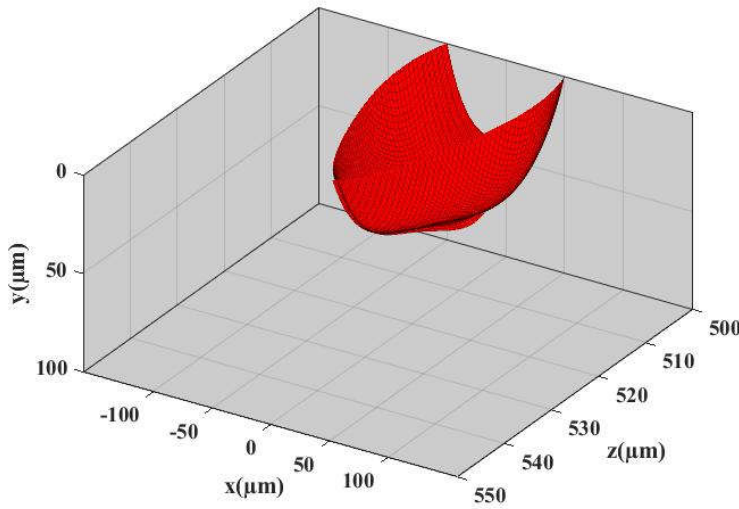
Şekil 4.20. (Devamı) Zaman bağı y-z yönlü eriyik havuzu a) $t=0 \mu s$ b) $t=0.05 \mu s$ c) $t=0.1 \mu s$ d) $t=0.15 \mu s$ anındaki geometrisi

Son olarak Şekil 4.21' de eriyik havuzunun 3-B geometrisi görülmektedir. Burada 500 mikrometre sınır alınmıştır. Lazer kaynağı, $t=0$ ' da $z=500$ mikrometre, $t=0,05$ milisaniyede $z=505$ mikrometre, $t=0.1$ milisaniyede $z=510$ mikrometre ve $t=0,15$ milisaniyede $z=515$

mikrometre noktasında bulunmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi en büyük eriyik hacmi, problemin fiziksel doğasıyla paralel olarak lazer kaynağı etki noktasının çevresinde oluşmaktadır. Lazer merkezinden uzaklaştıkça eriyik havuzu küçülme ve 0,15 milisaniye sonunda eriyik havuzu tamamı ile oluşmaktadır. 0,15 milisaniyeden sonra ise Şekil 4.21d' de görülen geometri z yönünde ilerleyerek prosesi tamamlayacaktır.

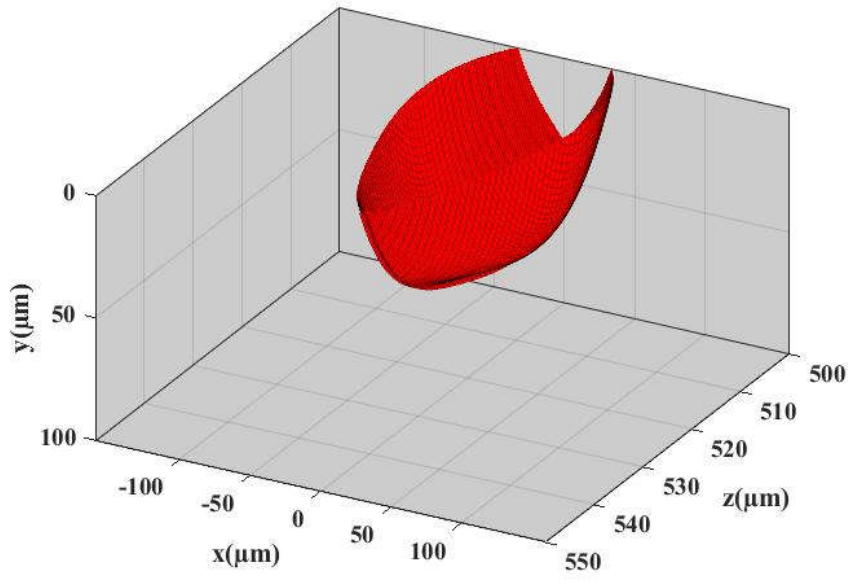


a)

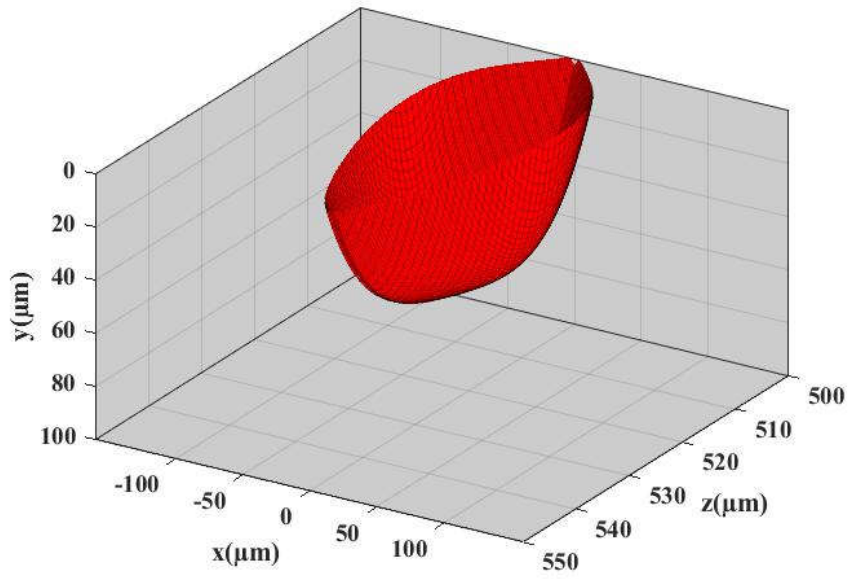


b)

Şekil 4.21. Zamana bağlı 3-B eriyik havuzu a) $t=0 \mu s$ b) $t=0.05 \mu s$ c) $t=0.1 \mu s$ d) $t=0.15 \mu s$ anındaki geometrisi



c)



d)

Şekil 4.21. (Devamı) Zamana bağlı 3-B eriyik havuzu a) $t=0 \mu s$ b) $t=0.05 \mu s$ c) $t=0.1 \mu s$ d) $t=0.15 \mu s$ anındaki geometrisi

Bu bölümde SLE prosesi işlemi sırasında oluşan eriyik havuzu geometrisi ve sıcaklık dağılımı 3-B olarak zamana bağlı incelenmiştir. Öncelikli olarak oluşturulan modelin doğruluğu literatürde bulunan deneysel ve nümerik çalışmalar ile doğrulanmıştır.

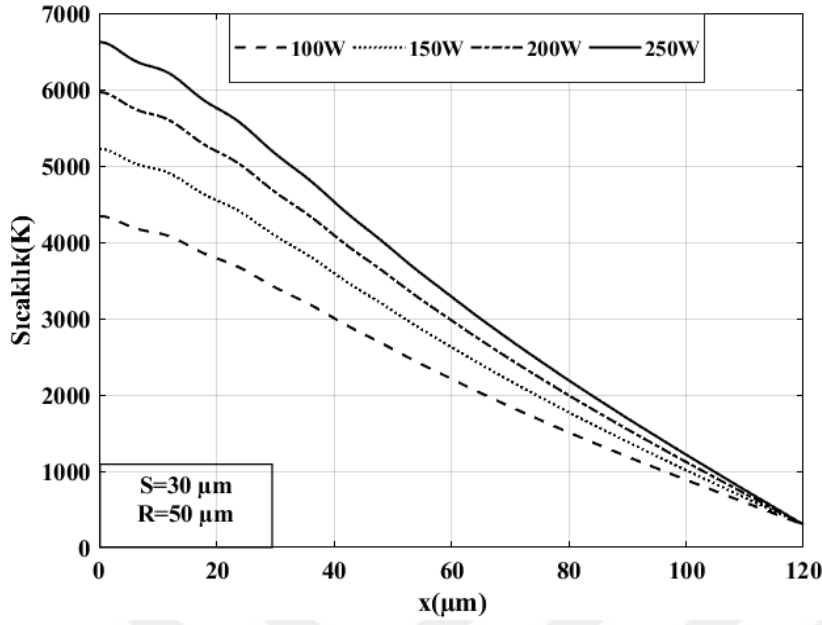
Sonrasında üst yüzeyde yalıtımlı, radyasyon ve konveksiyonla ısı kaybı olduğu düşünülmüş ve bu iki sınır koşuluna bağlı sonuçlar kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamaların ardından x,y ve z yönlü sıcaklık dağılımları ve eriyik havuzu geometrileri, farklı lazer güçleri, lazer çapı ve toz katman kalınlığı cinsinden kıyaslanmıştır. Son olarak zamana bağlı sıcaklık dağılımları ve eriyik geometrisi 2-B ve 3-B olarak paylaşılmıştır.

4.3.3. Yüksek güç uygulamaları: Durağan durum

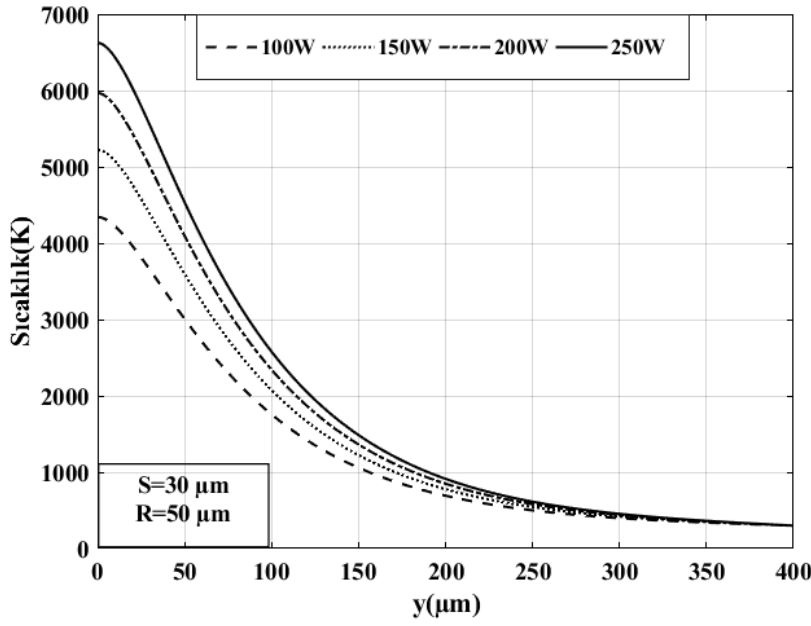
Yukarıda bahsi geçen parametrik çalışmada lazer gücü değerleri 20 W, 40 W, 60 W ve 80 W seçilmiştir. Bu güç değerleri daha küçük SLE işlemleri için uygundur. Daha büyük SLE işlemleri için aşağıda görülen grafiklerde lazer gücü değerleri 100 W, 150 W, 200 W ve 250 W olarak seçilmiştir. Bu güç değerleri için metal tozu katman kalınlığı değerleri 30 μm , 50 μm , 70 μm , 90 μm olarak ve lazer yarıçapı değerleri 50 μm , 70 μm , 90 μm , 110 μm olarak seçilmiştir.

Şekil 4.22’de farklı lazer güçleri için 50 mikrometre lazer çapı ve 30 mikrometre metal tozu kalınlığında, derinlik, genişlik ve uzunluğa bağlı sıcaklık dağılımları görülmektedir. Şekil 4.22a’ da görüldüğü gibi x eksenini doğrultusundaki sıcaklık dağılımlarının toz katmanının bitimine kadar parabolik olarak, toz katmanının başlangıcıyla birlikte lineer olarak azaldığı görülmektedir. y eksenini boyunca sıcaklık dağılımları Gauss formunda meydana geldiği gözlemlenmektedir ve z ekseninde ise lazerin merkezinde sıcaklık maksimum olurken lazer çapına bağlı ani bir düşüş meydana geldiği belirlenmiştir. Şekil 4.22a, Şekil 4.22b ve Şekil 4.22c’ de görüldüğü gibi çözelti bölgesindeki maksimum sıcaklık lazerin yüzey üzerinde etki ettiği noktada (0, 0, 0) meydana gelmektedir.

Uygulanan dört farklı lazer gücüne yanıt olarak elde edilen maksimum yüzey sıcaklıkları, 100 W için 4342 K, 150 W için 5224 K, 200 W için 5967 K ve 250 W için 6627 K’ dir. Bu nedenle, ardışık üç lazer gücü aralığı, 150-100 W, 200-150 W ve 250-200 W için maksimum yüzey sıcaklıklarındaki farklar sırasıyla 882 K, 743 K ve 660 K olarak elde edilmiştir.

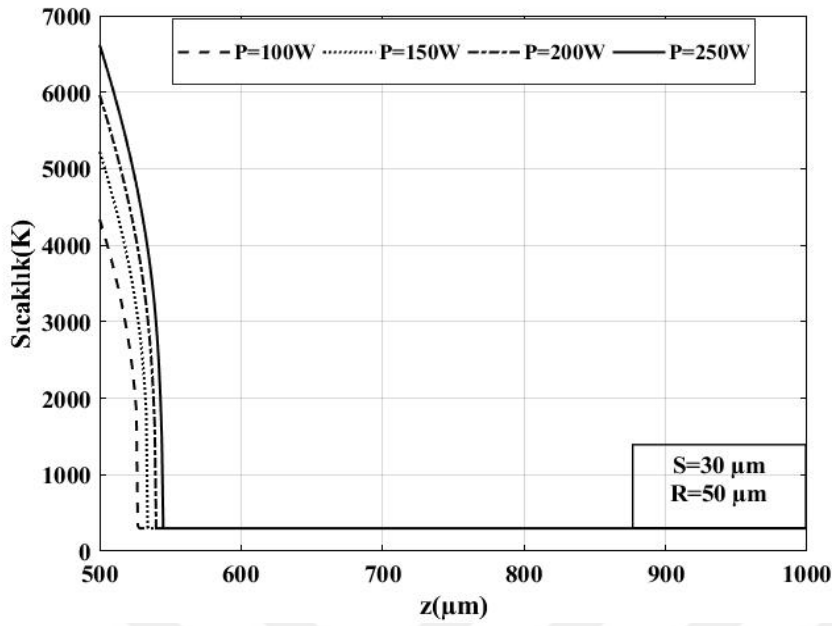


a)



b)

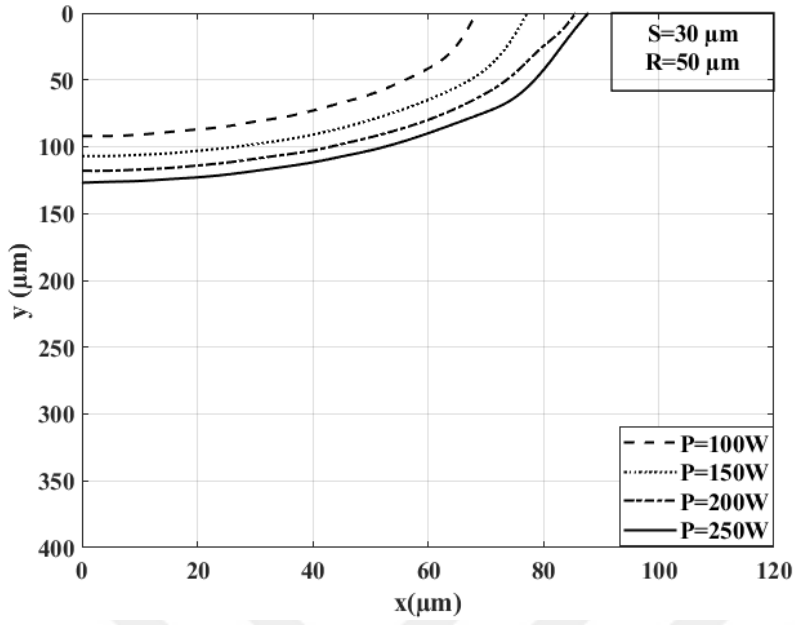
Şekil 4.22. Farklı güç değerlerine bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımlarının kıyaslanması



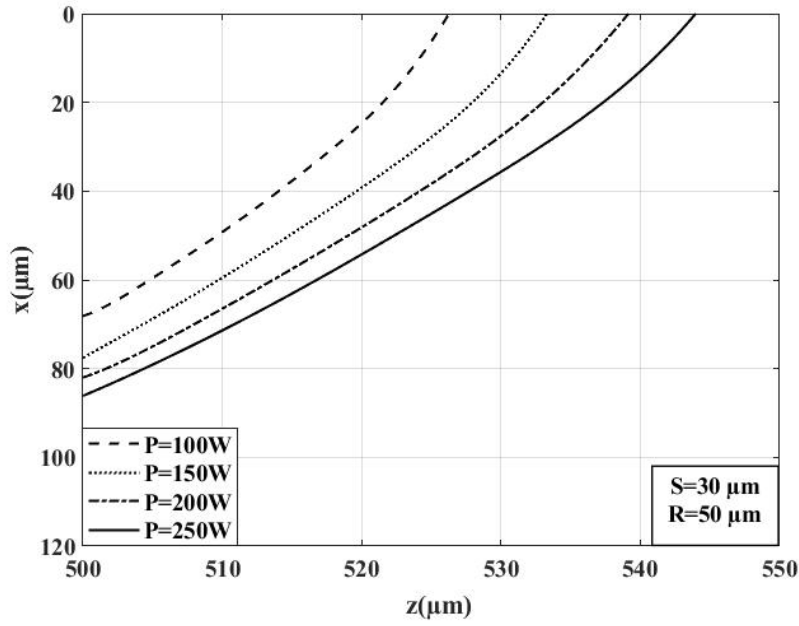
c)

Şekil 4.22. (Devamı) Farklı güç değerlerine bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımlarının kıyaslanması

Şekil 4.23' de simetrik olarak lazer gücüne bağlı eriyik havuzunun x-y, y-z ve x-z yönlü geometrisi görülmektedir. Her üç grafikte de lazer gücünün artışına bağlı olarak eriyik havuzu azalan yönde artış göstermektedir. Şekil 4.23a incelendiğinde sıvı faz bölgesinin y yönünde x yönüne göre her dört lazer gücü içinde daha hızlı ilerlediği görülmektedir. Ancak lazer gücü artışına bağlı olarak x ve y yönündeki eriyik havuzu uzunlukları arasındaki fark azalan yöndedir. Sayısal olarak incelenecek olursa güce bağlı olarak x yönlü eriyik havuzu yaklaşık 68 mikrometre değerinden 86 mikrometre değerine yükselirken, y yönlü eriyik havuzu yaklaşık 95 mikrometreden 125 mikrometre değerine yükselmiştir. Lazerin z yönündeki eriyik geometrisine bakıldığında ise lazer gücüne bağlı eriyik havuzu uzunluğu artışı oldukça küçüktür. Lazer gücünün artışına bağlı olarak z yönlü eriyik geometrisi 526 mikrometreden 544 mikrometre değerine yükselmiştir

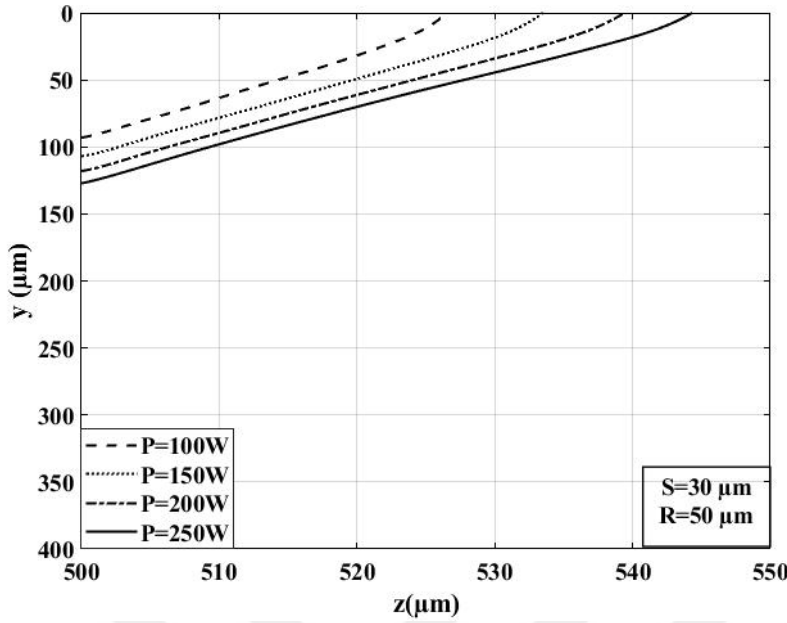


a)



b)

Şekil 4.23. Farklı lazer güçleri için a) x-y yönlü eriyik havuzu geometrisi eriyik havuzu geometrisi b) x-z yönlü eriyik havuzu geometrisi c) y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi değişimi

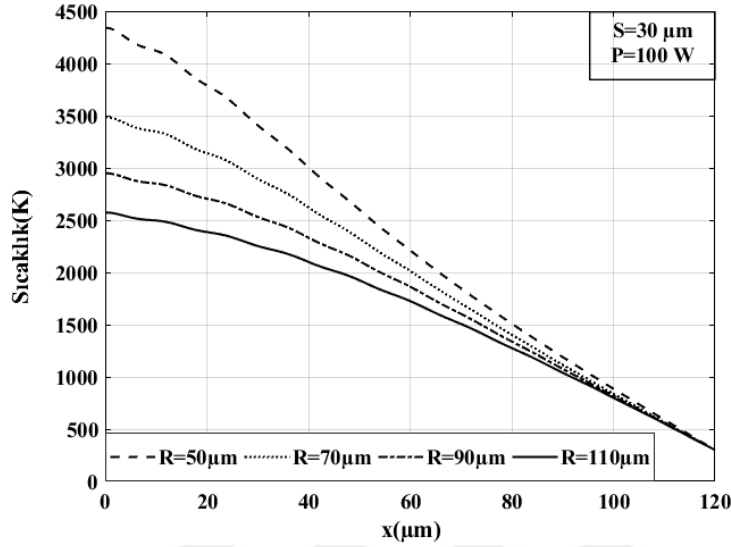


c)

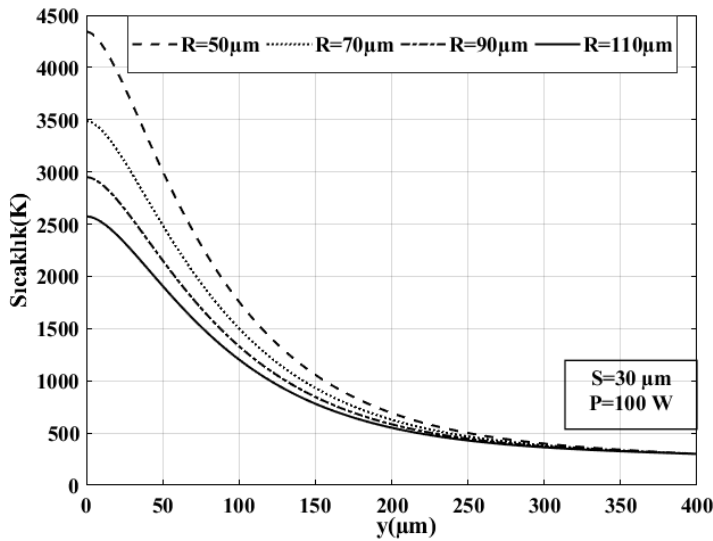
Şekil 4.23. (Devamı) Farklı lazer güçleri için a) x-y yönlü eriyik havuzu geometrisi eriyik havuzu geometrisi b) x-z yönlü eriyik havuzu geometrisi c) y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi değişimi

Şekil 4.24' te, lazer çapının çözüm bölgesi içindeki sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi 100 W lazer gücü ve 30 mikrometre toz yatak kalınlığı için x-y, y-z ve x-z koordinatları boyunca sunulmaktadır. Dört farklı lazer nokta boyutu (50 μm , 70 μm , 90 μm ve 110 μm) için yapılan analiz sonuçlarına göre, maksimum sıcaklık (0,0,0) noktasında en küçük lazer yarıçapı olan 50 mikrometre lazer yarıçapında yaklaşık 4342 K olarak elde edilmiştir. Lazer nokta yarıçapının artmasıyla, lazer yarıçapının her seviyesinde maksimum sıcaklık düşmüş ve 70 mikrometre için bu değer 3485 K, 90 mikrometre için 2949 K ve 110 mikrometre için 2573 K olarak elde edilmiştir. Maksimum sıcaklıklar arasındaki farklar ise 50-70 mikrometre arasında 859 K, 70-90 mikrometre arasında 536 K ve 90-110 mikrometre arasında 376 K olarak elde edilmiştir. Bu farklar, lazer gücüne bağlı maksimum sıcaklık farkları ile kıyaslandığında, lazer yarıçapının da lazer gücü kadar önemli bir parametre olduğu görülmüştür. z yönlü sıcaklık dağılımına bakıldığında ise lazer merkezinden uzaklaştıkça yüzey sıcaklığı hızlı bir düşüş göstermekte, çevre sıcaklığına düşmekte ve sabit kalmaktadır. Ayrıca lazer çapına bağlı olarak z yönlü sıcaklıklar arası fark çok küçük olmakla beraber sıcaklık dağılımları da oldukça benzerlik göstermektedir.

Toz tabakasının genişliği ve derinliği boyunca sıcaklık dağılımının davranışı Şekil 4.22 ve Şekil 4.26 ile benzerlik göstermektedir. Bu nedenle sıcaklık dağılımı, toz tabakası boyunca y yönünde Gauss formundadır ve parabolik form, toz tabakası boyunca x ve z yönünde gözlemlenmektedir ve metal tozu tabakasında, çevre sıcaklığına kadar doğrusal düşüş meydana gelmektedir.

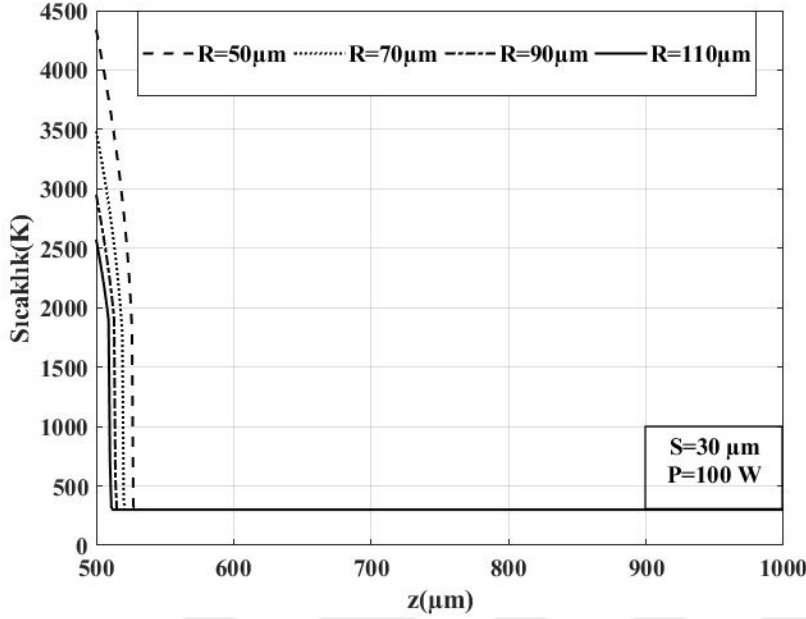


a)



b)

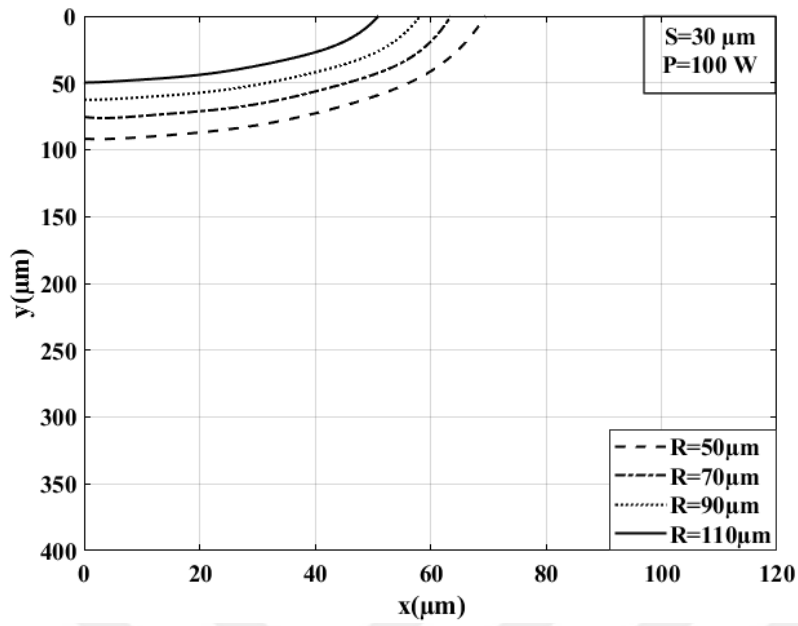
Şekil 4.24. Farklı lazer çapı değerlerine bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımlarının kıyaslanması



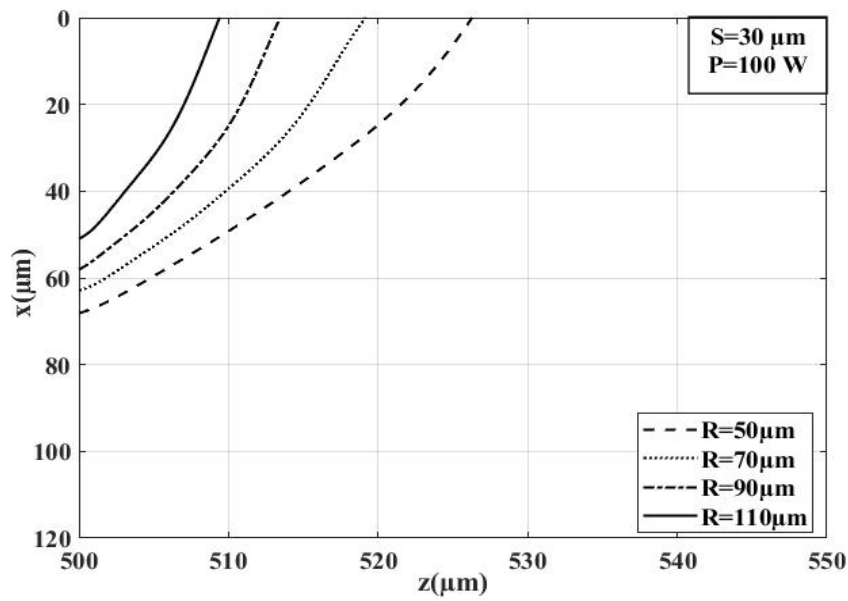
c)

Şekil 4.24. (Devamı) Farklı lazer çapı değerlerine bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımlarının kıyaslanması

Şekil 4.25' te, 100 W' lık lazer gücünde ve 30 mikrometrelik toz yatağı kalınlığında, lazer nokta boyutunun eriyik havuzu geometrisi üzerindeki etkisini göstermektedir. Şekil 4.25' te çözelti alanı simetrik yarım bölgesindeki lazer nokta boyutuna göre fazlar arası eğrinin ilerlemesi sunulmaktadır. Lazer çapı arttıkça, eriyik havuzunun küçüldüğü gözlemlenmiştir. Sıvı faz bölgesinin, 50 mikrometrelik lazer çapı için x eksenine kıyasla y yönünde daha hızlı hareket ettiği görülmektedir. Lazer çapının artışıyla bağlı olarak eriyik havuzunun x ve y yönlü uzunlukları birbirine yaklaşarak 110 mikrometre değerine ulaştığında neredeyse yarım daire şeklini almıştır. Lazer çapının artışıyla bağlı olarak eriyik havuzu derinliği 50 mikrometreden 90 mikrometreye ve eriyik havuzu genişliği 50 mikrometreden 68 mikrometreye yükselmiştir. Eriyik havuzu uzunluğu ise lazer çapına bağlı olarak küçük bir değişim göstermiş ve 509 mikrometreden 526 mikrometreye yükselmiştir. Şekil 4.23 ile kıyaslandığında lazer çapının da lazer gücü kadar etkili bir parametre olduğu görülmüştür.

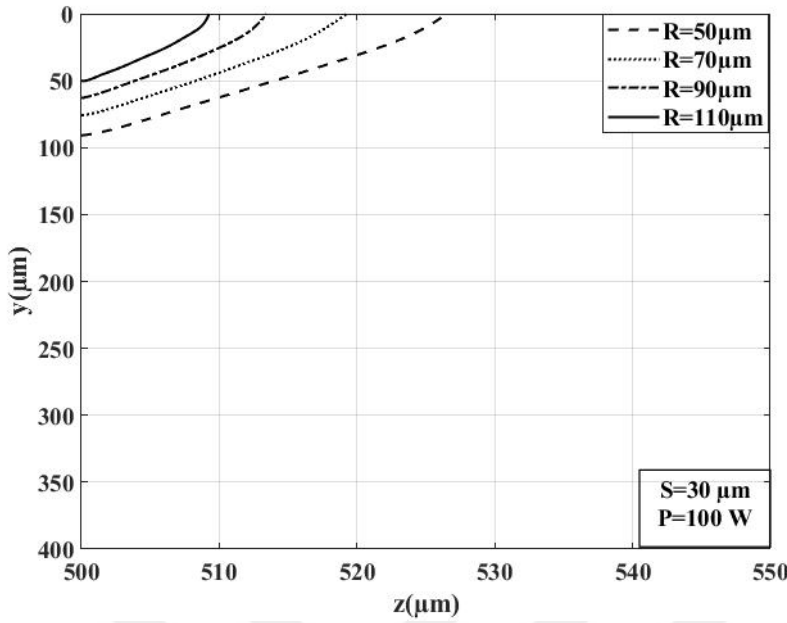


a)



b)

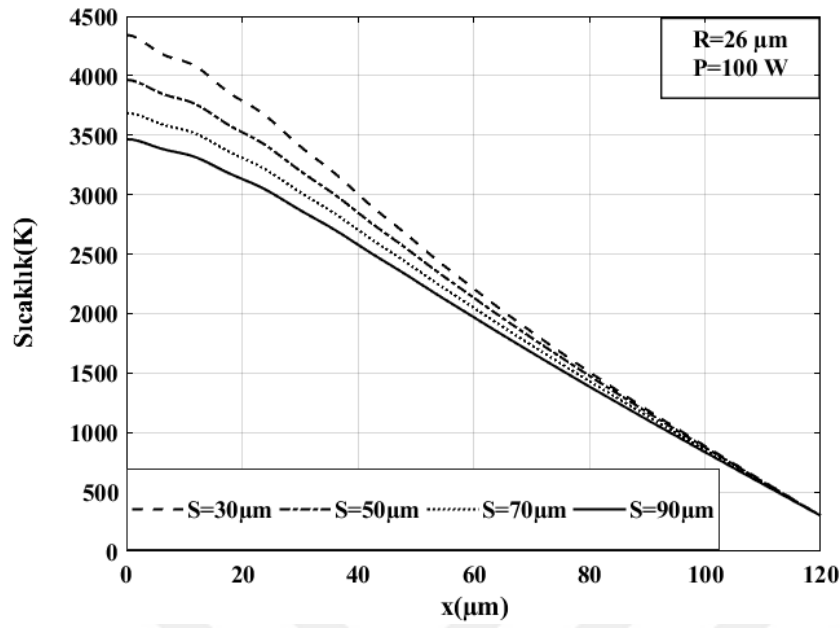
Şekil 4.25. Farklı lazer çapları için .a) x-y yönlü eriyik havuzu geometrisi b) x-z yönlü eriyik havuzu geometrisi c) y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi değişimi



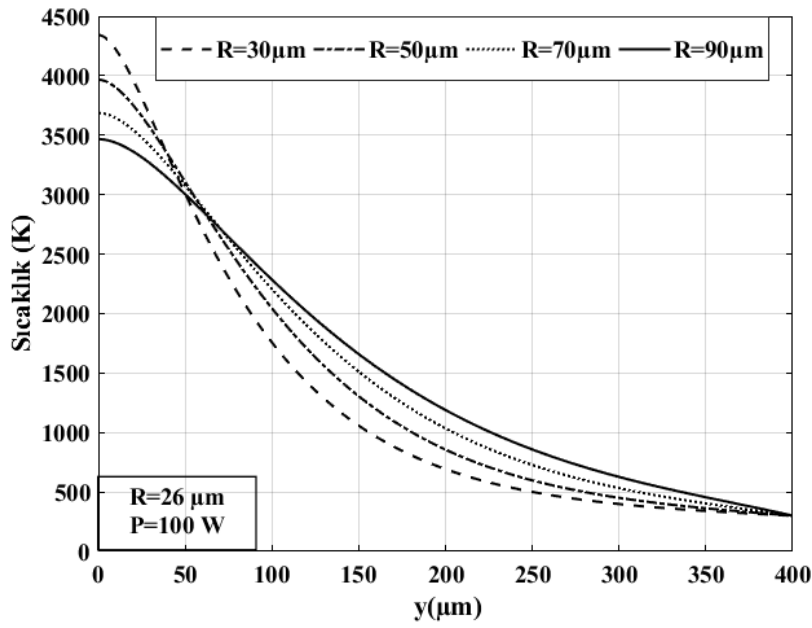
c)

Şekil 4.25. (Devamı) Farklı lazer çapları için a) x-y yönlü eriyik havuzu geometrisi b) x-z yönlü eriyik havuzu geometrisi c) y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi değişimi

Şekil 4.26' da toz yatağı kalınlığının, çözelti alanı içindeki sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi, 100 W lazer gücü ve 50 mikrometre lazer nokta boyutu için x-y, y-z ve x-z koordinatları boyunca sunulmaktadır. Farklı toz yatağı kalınlığı (30 μm , 50 μm , 70 μm ve 90 μm) için yapılan analiz sonuçlarına göre (0,0,0) noktasında 30 mikrometre toz yatağı kalınlığında maksimum sıcaklık yaklaşık 4342 K olarak elde edilmiştir. Toz yatağı kalınlığının artmasıyla maksimum sıcaklık, 30-50 mikrometre arasında 379 K, 50-70 mikrometre arasında 278 K ve 70-90 mikrometre arasında 218 K düşerek en düşük değerine 90 mikrometre için 3467 K olarak ulaşır. x yönlü sıcaklık değerlerine bakıldığında yaklaşık katman kalınlığına kadar parabolik ve sonrasında lineer olarak bir düşüş olduğu görülmüştür. y yönünde sıcaklık değerlerine bakıldığında ise Gaussian bir dağılım görülmektedir. Ayrıca toz katmanı boyunca katman kalınlığı artışının sıcaklık değerlerini düşürdüğü, sonrasında ise yüksek katman kalınlıklarında daha yüksek sıcaklıklar olduğu görülmüştür. z yönlü sıcaklık dağılımı incelendiğinde ise maksimum sıcaklık değerinden hızlı bir şekilde çevre sıcaklığına düştüğü ve z koordinatının sonuna kadar sabit kaldığı görülmüştür.

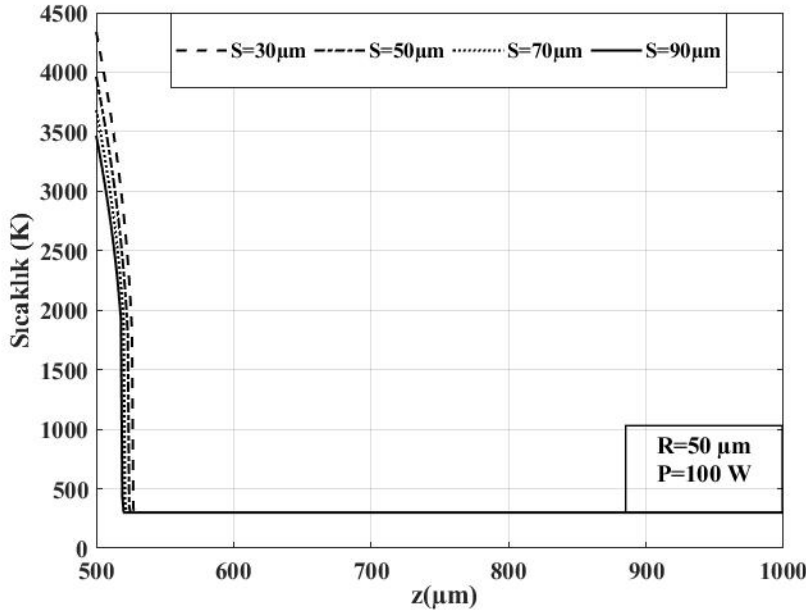


a)



b)

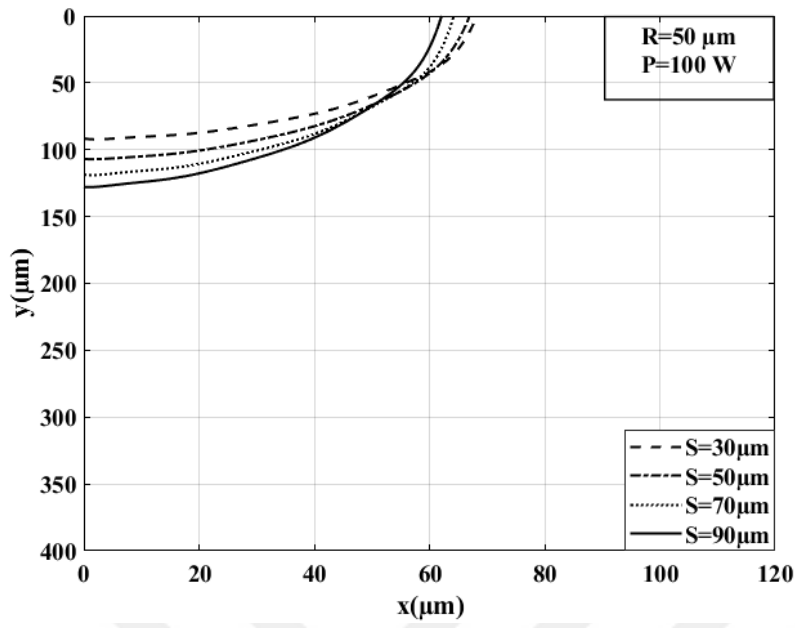
Şekil 4.26. Farklı toz yatağı kalınlığı değerlerine bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımlarının kıyaslanması



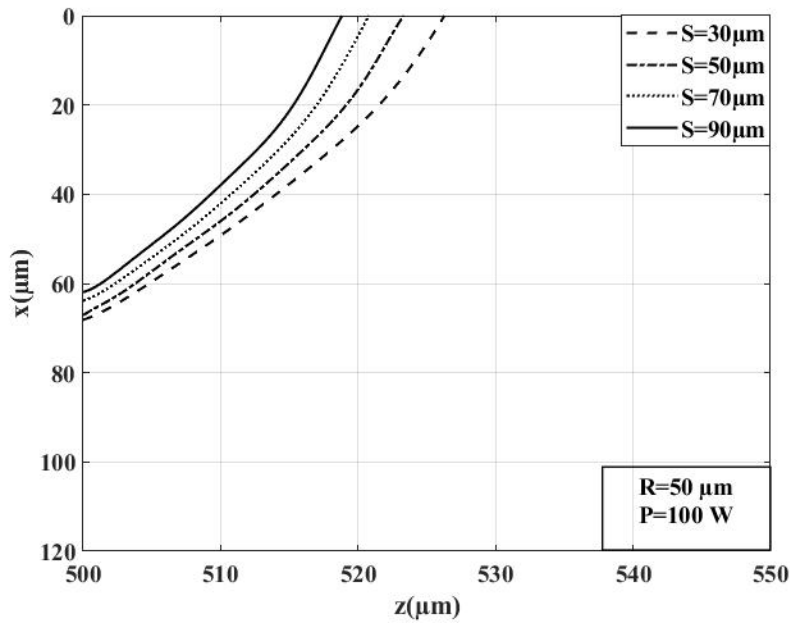
c)

Şekil 4.26. (Devamı) Farklı toz yatağı kalınlığı değerlerine bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımlarının kıyaslanması

Şekil 4.27, 100 W'lık lazer gücünde ve 50 mikrometrelik lazer nokta yarıçapında toz yatağı kalınlığının eriyik havuzu geometrisi üzerindeki etkisini göstermektedir. Toz katman kalınlığı artışına bağlı olarak eriyik havuzu genişliği küçük bir miktar azalmakta ancak derinliği artmaktadır. Bir başka deyişle toz yatağı kalınlığı azaldıkça, eriyik havuzu bölgesinin daha küçük bir bölgeye daraldığı söylenebilir. Toz yatağı kalınlığı 30 mikrometre olarak seçildiğinde, havuz genişliği ve derinliği sırasıyla 64 mikrometre ve 95 mikrometre mertebesinde oluşur. Toz yatağı kalınlığı arttıkça, sıvı havuz genişliği 64 mikrometreden 61 mikrometreye düşerken, derinliğinin 95 mikrometreden 130 mikrometre seviyesine çıktığı gözlemlenmiştir. z yönünde ise eriyik geometrisinin her bir toz katman kalınlığı değeri için önemli ölçüde değişmediği ve yaklaşık 526 mikrometreden 518 mikrometre değerine düştüğü saptanmıştır.

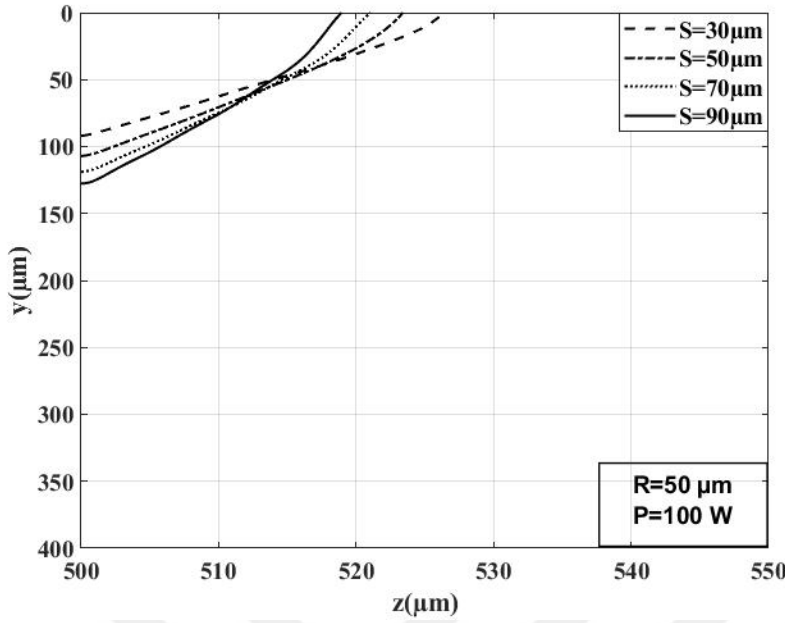


a)



b)

Şekil 4.27. Farklı toz yatağı kalınlıkları için a) x-y yönlü eriyik havuzu geometrisi b) y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi c) y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi değişimi



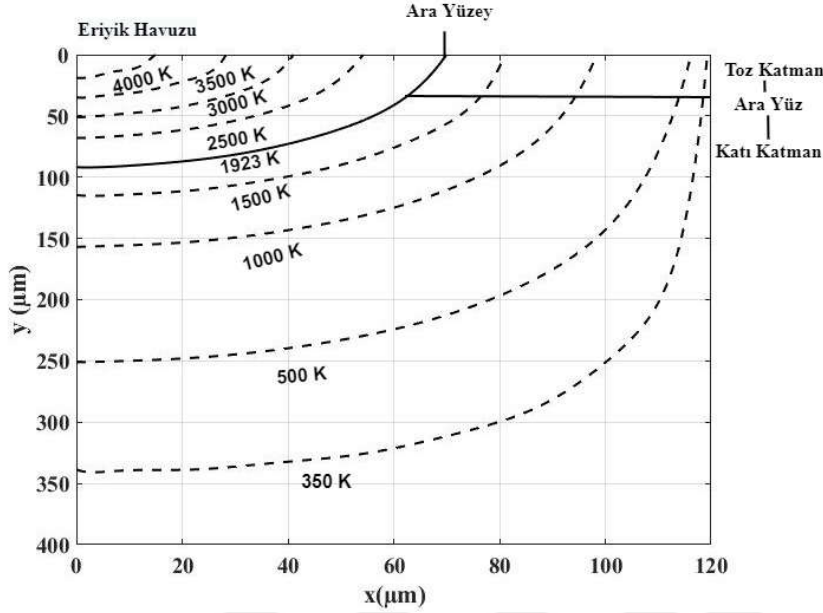
c)

Şekil 4.27. (Devamı) Farklı toz yatağı kalınlıkları için a) x-y yönlü eriyik havuzu geometrisi b) y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi c) y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi değişimi

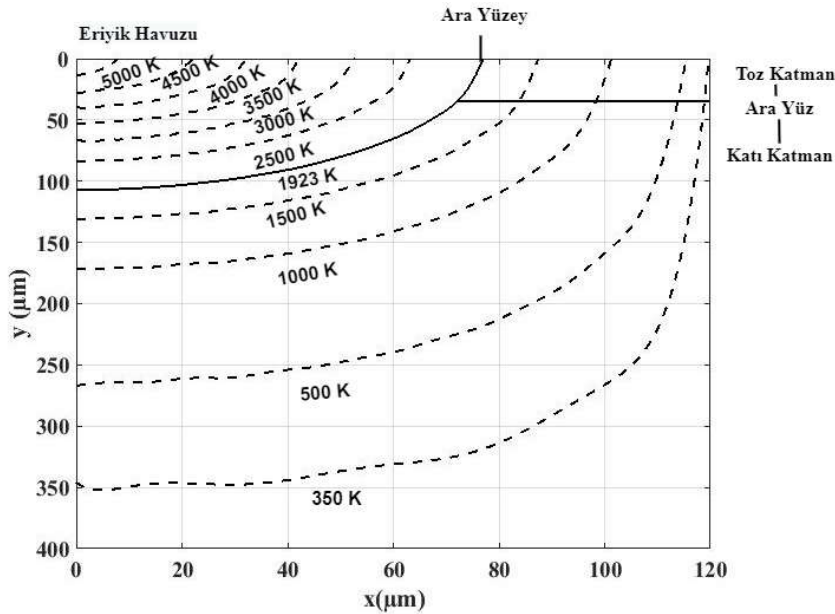
Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde eriyik havuzu hacmini en fazla lazer gücü ve daha sonra lazer çapının etkilediği görülmektedir. Toz katman kalınlığı ise eriyik havuzu hacmini en az etkileyen parametredir. Dolayısı ile lazer gücünün seçimi oldukça önem arz etmektedir. Şekil 4.28, Şekil 4.29 ve Şekil 4.30’ da 50 mikrometre lazer yarıçapı ve 30 mikrometre toz yatak kalınlığı için, x-y, x-z ve y-z yönlü izo-sıcaklık dağılımlarının oluşumu ve faz geçiş hatlarının ilerlemesi dört farklı lazer gücü için sunulmuştur. Burada görülen kesikli çizgiler izo-sıcaklık eğrilerini, düz çizgiler ise katı-sıvı eriyik sınırını göstermektedir.

Şekil 4.28 incelendiğinde, lazer gücü 100 W’ dan 150 W’ a yükseltildiğinde, sıvı faz bölgesinin genişliğinin 64 mikrometreden 76 mikrometreye, sıvı faz bölge derinliğinin 95 mikrometreden 105 mikrometreye ulaştığı ve maksimum havuz sıcaklığı değeri 4340 K’ den 5224 K’ e yükseldiği görülmüştür. Lazer gücü 150 W’ dan 200 W’ a yükseltildiğinde, sıvı faz bölgesinin genişliğinin 76 mikrometreden 82 mikrometreye, sıvı faz bölge derinliğinin 105 mikrometreden 125 mikrometreye ulaştığı ve maksimum havuz sıcaklığı değeri 5224 K’ den 5967 K’ e yükseldiği görülmüştür. Lazer gücü 200 W’ dan 250 W’ a yükseltildiğinde, sıvı faz bölgesinin genişliğinin 82 mikrometreden 85 mikrometreye

ulaştığı, sıvı faz bölgesinin derinliğinin 125 mikrometreden 130 mikrometreye ulaştığı ve maksimum havuz sıcaklığı 6622 K' e ulaşmıştır. Genel sıcaklık dağılımlarına bakıldığında y yönlü ilerlemenin x yönüne göre daha hızlı hareket ettiği saptanan bir diğer olgudur.

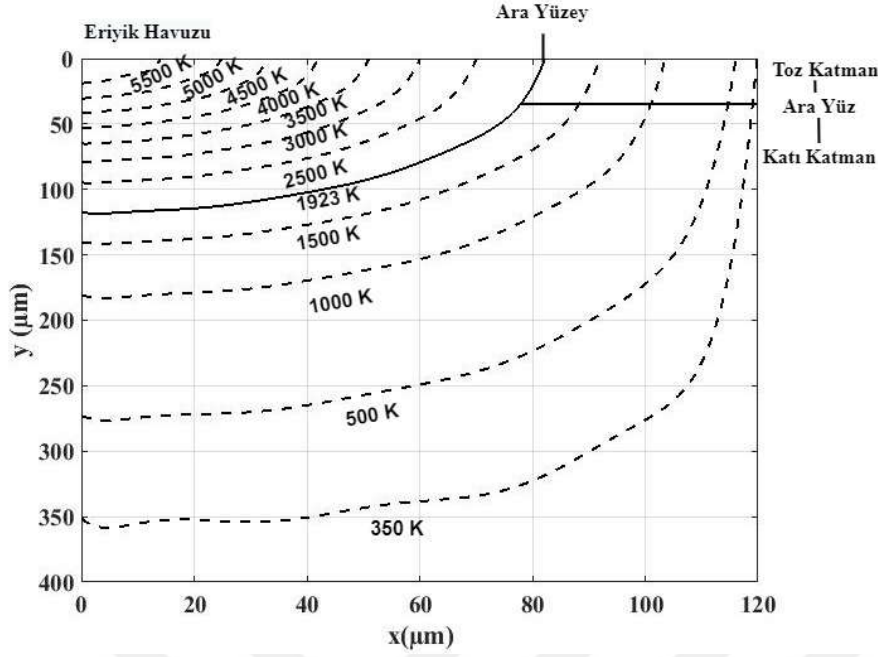


a)

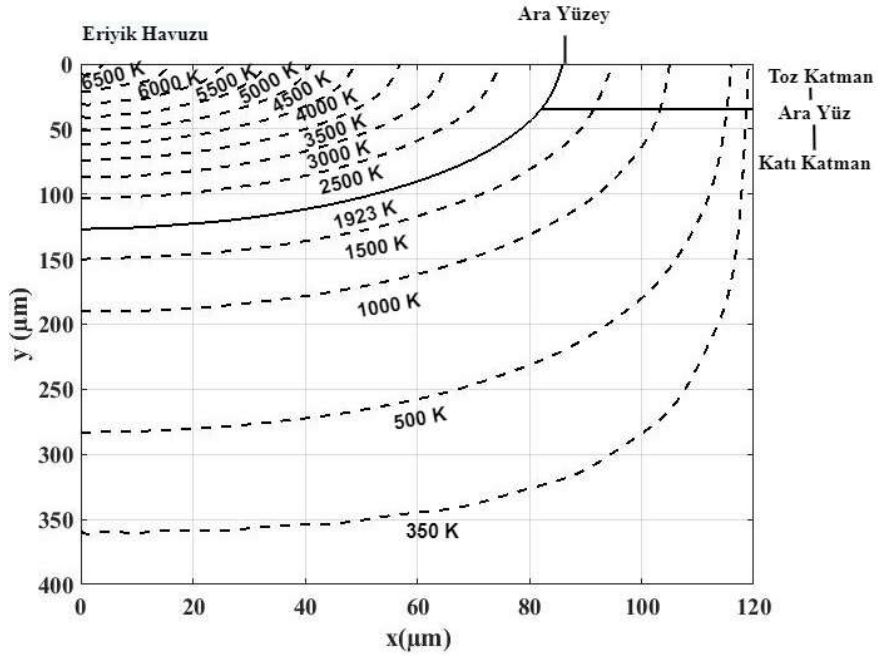


b)

Şekil 4.28. 50 μm lazer çapı büyüklüğü ve 30 μm toz yatak kalınlığı için (a) 100, (b) 150, (c) 200 ve (d) 250 W lazer gücü altında çözüm alanı boyunca x-y yönlü ize-sıcaklık haritası ve fazlar arası geçiş



c)



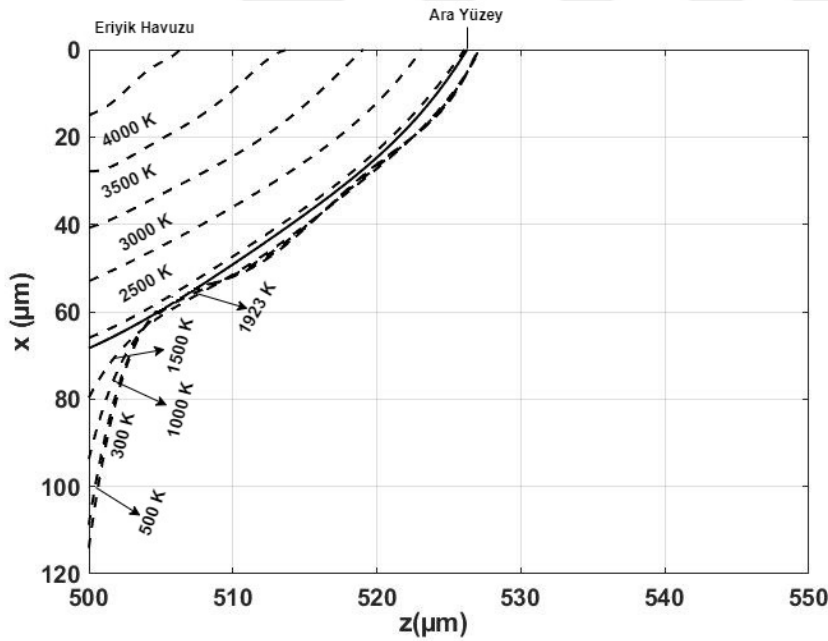
d)

Şekil 4.28. (Devamı) 50 μm lazer çapı büyüklüğü ve 30 μm toz yatak kalınlığı için (a) 100, (b) 150, (c) 200 ve (d) 250 W lazer gücü altında çözüm alanı boyunca x-y yönlü izo-sıcaklık haritası ve fazlar arası geçiş

Şekil 4.29' da x-z yönlü izo-sıcaklık eğrileri görülmektedir. Maksimum sıcaklıklar incelendiğinde 100 W için yaklaşık 4342 K, 150W için 5224 K, 200W için 5967 K ve 250 W için 6622 K olarak elde edilmiştir. Tüm güç değerleri için özellikle 1923 K değerinin

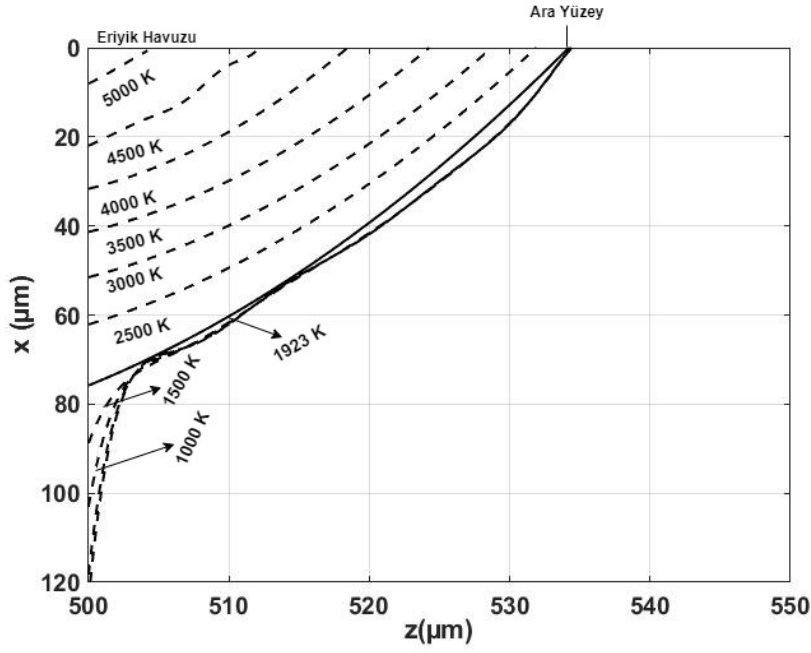
altındaki sıcaklık değerlerinde izo-sıcaklık eğrilerinin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Bir başka deyişle, eriyik havuzunun dışında çözüm bölgesinde hızlı bir soğuma meydana gelmektedir. İzo-sıcaklık eğrilerinin z yönlü dağılımına bakıldığında ise sıcaklık gradyanlarının çok küçük bir noktaya sıkıştığı görülmektedir. 100 W için 500-526 mikrometre, 150 W için 500-534 mikrometre 200 W için 500-540 mikrometre ve 250 W için 500-544 mikrometre arasına sıkışan bir sıcaklık gradyanı görülmektedir.

Eriyik havuzu incelendiğinde ise x yönlü ilerleme z yönüne kıyasla oldukça hızlı bir artış göstermiştir. Lazer gücüne bağlı olarak x yönlü eriyik havuzu 100 W için yaklaşık 68 mikrometre, 150W için 75 mikrometre, 200 W için 82 mikrometre ve 250 W için 85 mikrometre olarak elde edilmiştir. Eriyik havuzu uzunluğu 100 W için 526 mikrometre, 150 W için 534 mikrometre, 200 W için 538 mikrometre ve 250 W için 543 mikrometre olarak saptanmıştır.

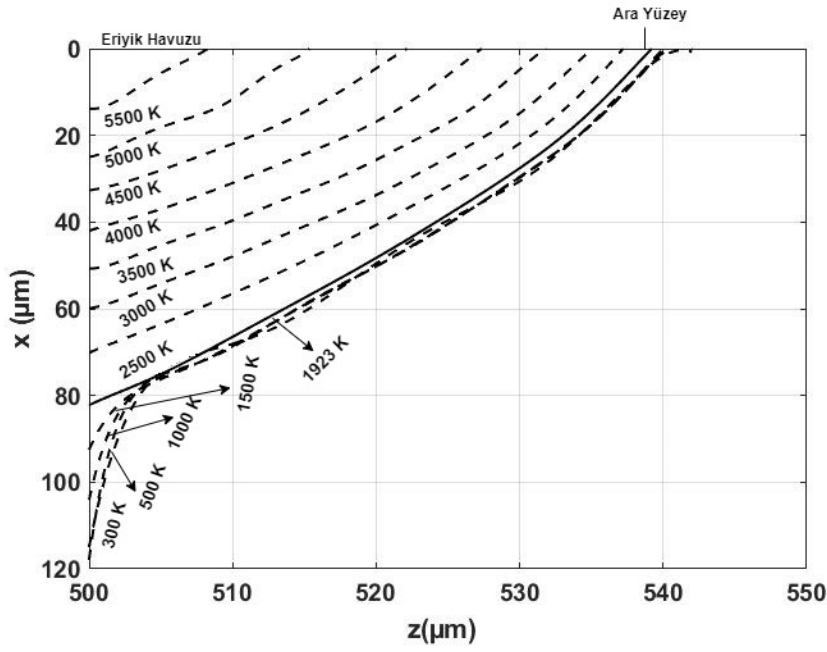


a)

Şekil 4.29. 50 μm lazer çapı ve 30 μm toz yatak kalınlığı için (a) 100, (b) 150, (c) 200 ve (d) 250W lazer gücü altında çözüm alanı boyunca x-z yönlü izo-sıcaklık haritası ve fazlar arası geçiş

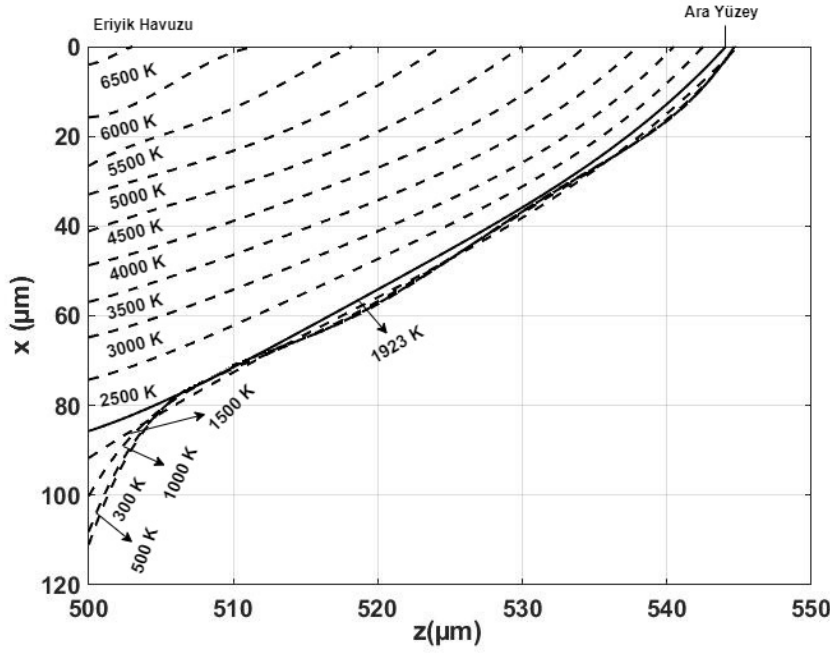


b)



c)

Şekil 4.29. (Devamı) 50 μm lazer çapı ve 30 μm toz yatak kalınlığı için (a) 100, (b) 150, (c) 200 ve (d) 250W lazer gücü altında çözüm alanı boyunca x - z yönlü izo-sıcaklık haritası ve fazlar arası geçiş

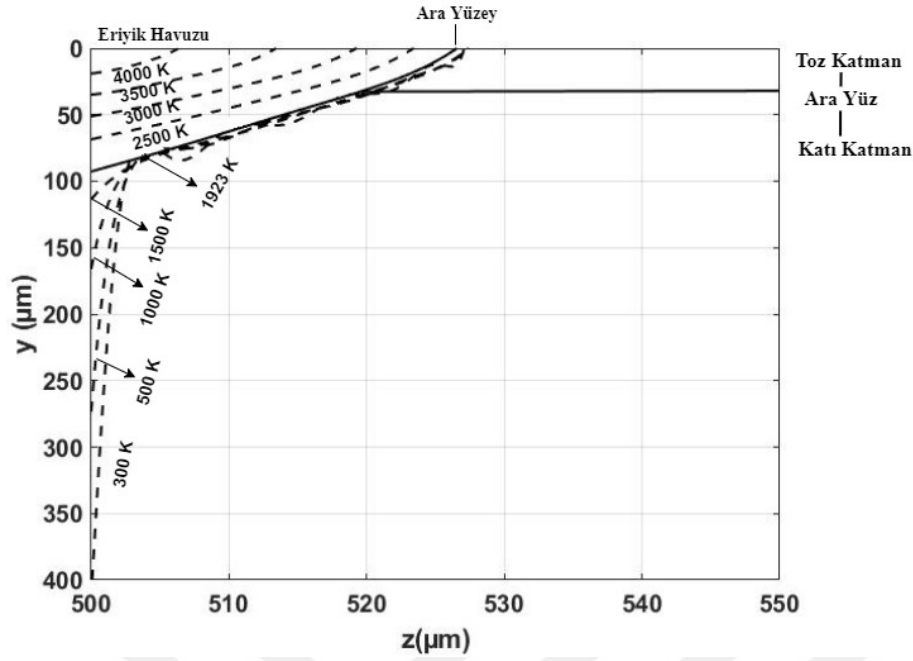


d)

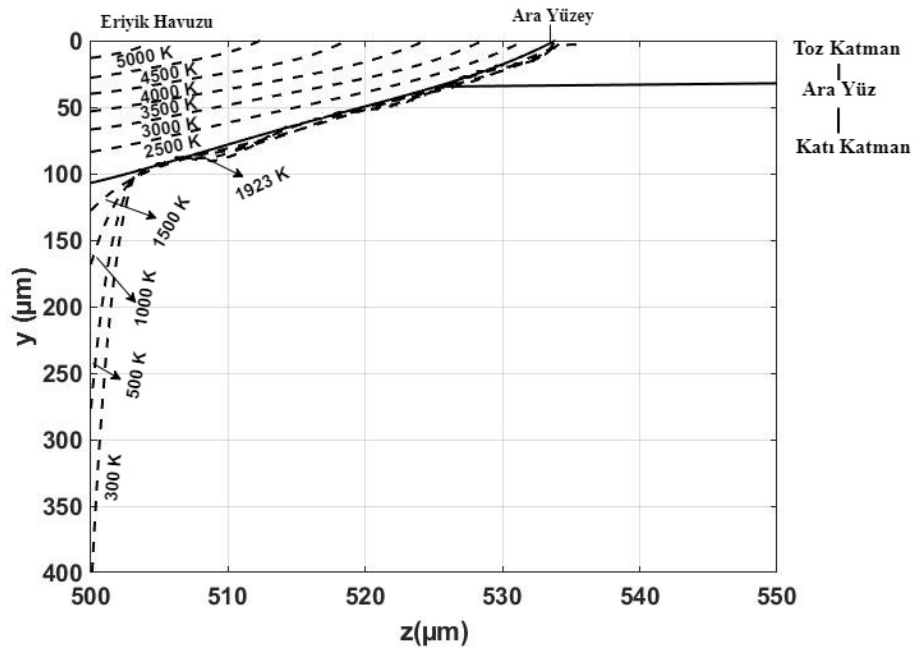
Şekil 4.29. (Devamı) 50 μm lazer çapı ve 30 μm toz yatak kalınlığı için (a) 100, (b) 150, (c) 200 ve (d) 250W lazer gücü altında çözüm alanı boyunca x-z yönlü ize-sıcaklık haritası ve fazlar arası geçiş

Şekil 4.30' da y-z yönlü ize-sıcaklık eğrileri görölmektedir. Maksimum sıcaklıklar incelendiğinde 100 W için yaklaşık 4342 K, 150W için 5224 K, 200 W için 5967 K ve 250 W için 6622 K olarak elde edilmiştir. y-z yönlü ize-sıcaklık eğrileri x-z yönlü eğrilere benzer şekilde özellikle erime sıcaklığı altındaki sıcaklıklarda birbirine çok yakındır. Bu durum eriyik havuzu dışındaki bölgelerde hızlı bir soğuma olduğunu göstermektedir. Yine x-z yönünde göröldüğü gibi y-z yönünde de sıcaklık gradyanı küçük bir alana sıkışmıştır. 100 W için 500-526 mikrometre, 150 W için 500-534 mikrometre 200 W için 500-540 mikrometre ve 250 W için 500-544 mikrometre arasına sıkışan bir sıcaklık gradyanı görölmektedir.

Eriyik havuzu incelendiğinde ise y yönlü ilerleme z yönüne kıyasla oldukça hızlı bir artış göstermiştir. Lazer gücüne bağılı olarak y yönlü eriyik havuzu derinliği 100 W için yaklaşık 98 mikrometre, 150 W için 105 mikrometre, 200 W için 120 mikrometre ve 80 W için 130 mikrometre olarak elde edilmiştir. Eriyik havuzu uzunluğu 20 W için 526 mikrometre, 40 W için 534 mikrometre, 60 W için 538 mikrometre ve 80 W için 543 mikrometre olarak saptanmıştır.

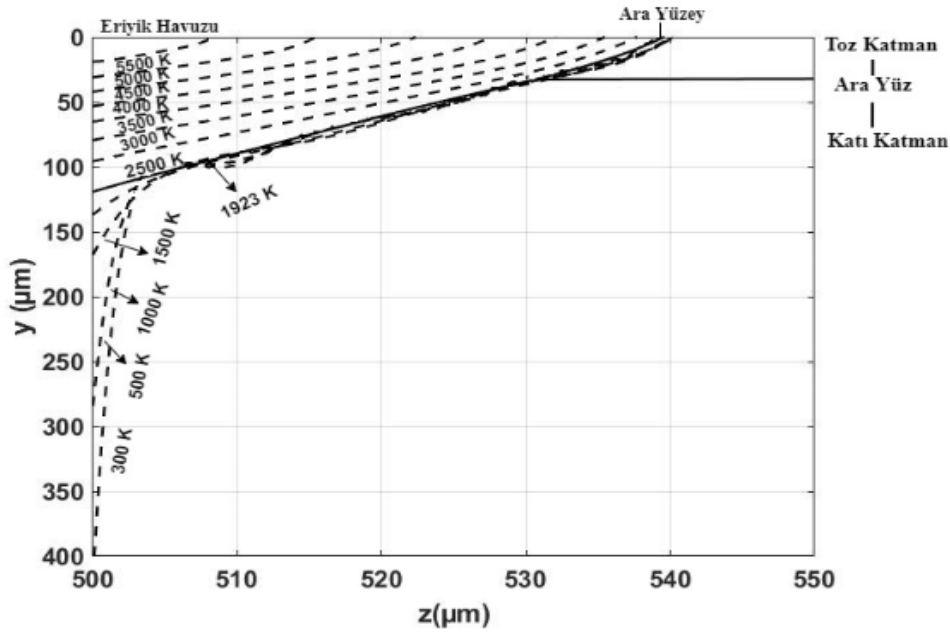


a)

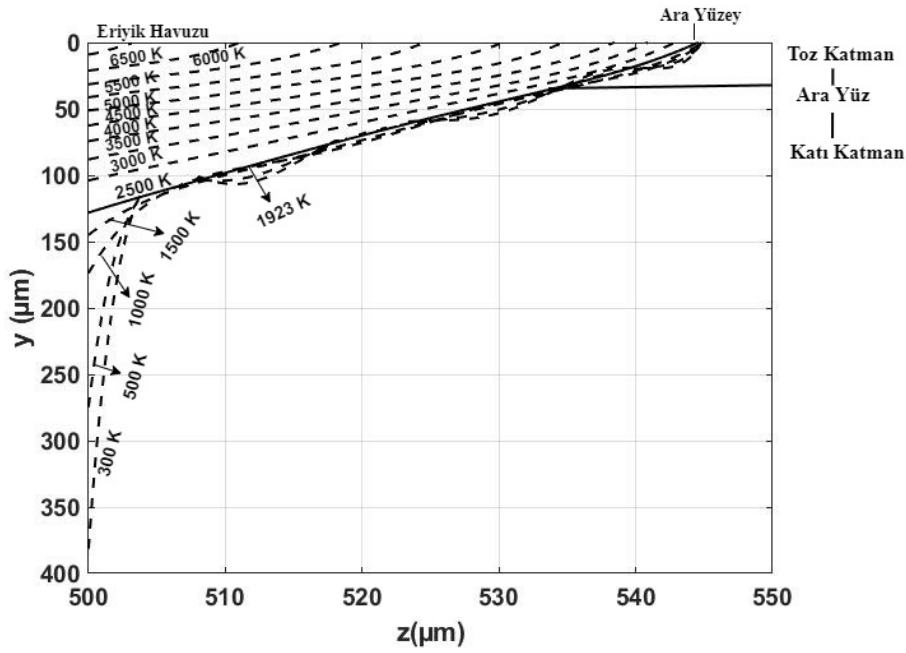


b)

Şekil 4.30. 50 μm lazer çapı büyüklüğü ve 30 μm toz yatak kalınlığı için (a) 100, (b) 150, (c) 200 ve (d) 250W lazer gücü altında çözüm alanı boyunca y-z yönlü ızo-sıcaklık haritası ve fazlar arası geçiş



c)

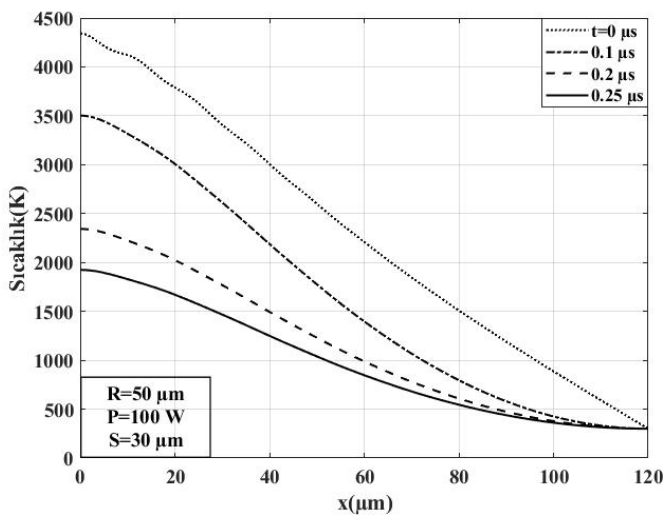


d)

Şekil 4.30. (Devamı) 50 μm lazer çapı büyüklüğü ve 30 μm toz yatak kalınlığı için (a) 100, (b) 150, (c) 200 ve (d) 250W lazer gücü altında çözüm alanı boyunca y-z yönlü izo-sıcaklık haritası ve fazlar arası geçiş

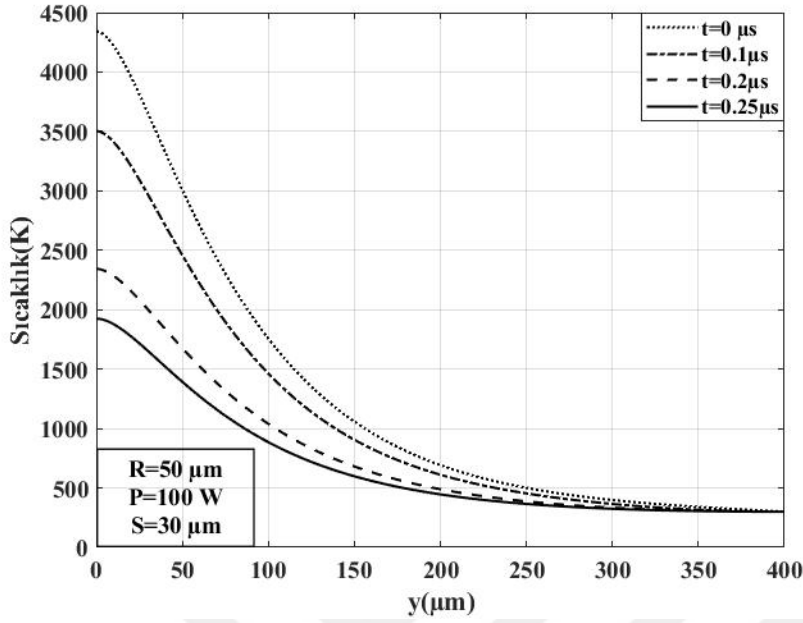
4.3.4. Yüksek güç uygulamaları: Zamana bağlı durum

Bu bölüme kadar incelenen grafiklerde $t=0$ anında sıcaklık dağılımları ve eriyik geometrisi incelenmiştir. Bu bölümde ise sıcaklık ve faz geçişinin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Bu incelemeler lazer hızının 400 mm/s değeri için gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.31' de çözüm bölgesi boyunca zamana bağlı sıcaklık değerleri incelenmiştir. Sıcaklık dağılımları $t=0-0,25$ milisaniye aralığındaki değerleri incelenmiştir. Bunun sebebi 0,25 milisaniye değerinden sonra çözüm bölgesi sıcaklığı katılaşma sıcaklığının altına düşer ve çözüm bölgesi tamamıyla katıya dönüşür. Şekil 4.31 incelendiğinde $t=0$ anında 4342 K, $t=0,1$ milisaniye sonra 3502 K, $t=0,2$ milisaniye sonra 2343 K ve son olarak $t=0,25$ milisaniyede ise 1924 K maksimum sıcaklık gözlenmiştir. Maksimum sıcaklık değerleri x ve y yönünde düşüş göstererek çevre sıcaklığı olan 300 K değerine gelmiştir. Şekil 4.31c' de ise lazer kaynağının ilerleme yönünde zamana bağlı sıcaklık dağılımları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi lazer kaynağının merkezinde $t=0$ anında sıcaklık değeri 4250 K olmakta ve hızlı bir şekilde çevre sıcaklığına düşmektedir. Lazer kaynağı ilerledikçe yani 0,1, 0,2 ve 0,25 milisaniye sonra sırasıyla sıcaklık 3750 K, 2735 K ve 1875 K değerlerine ulaşmakta, z yönlü sıcaklık dağılımına bakıldığında zamana bağlı olarak sıcaklık değeri lazer kaynağı merkezinde 4250 K değerine ulaşmakta ve yine hızlı bir şekilde çevre sıcaklığına düşmektedir.

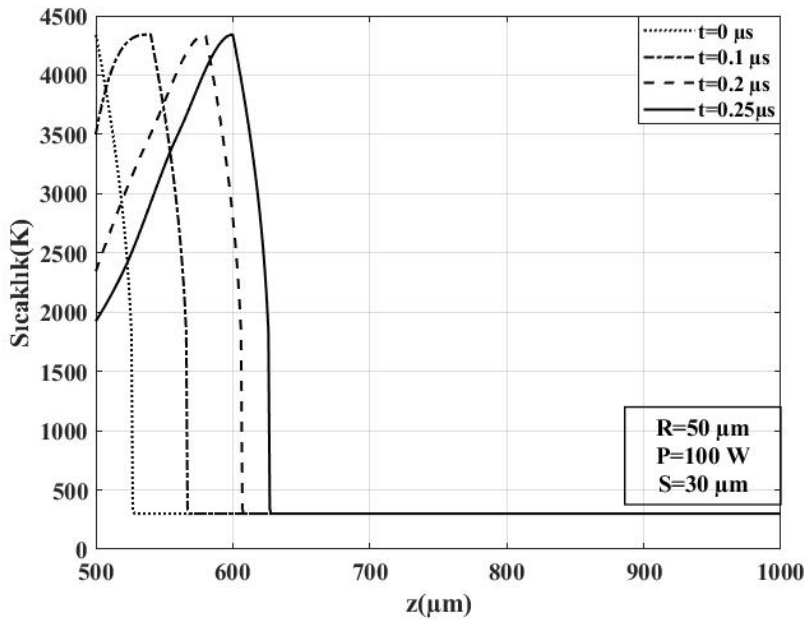


a)

Şekil 4.31. Zaman bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımlarının incelenmesi



b)

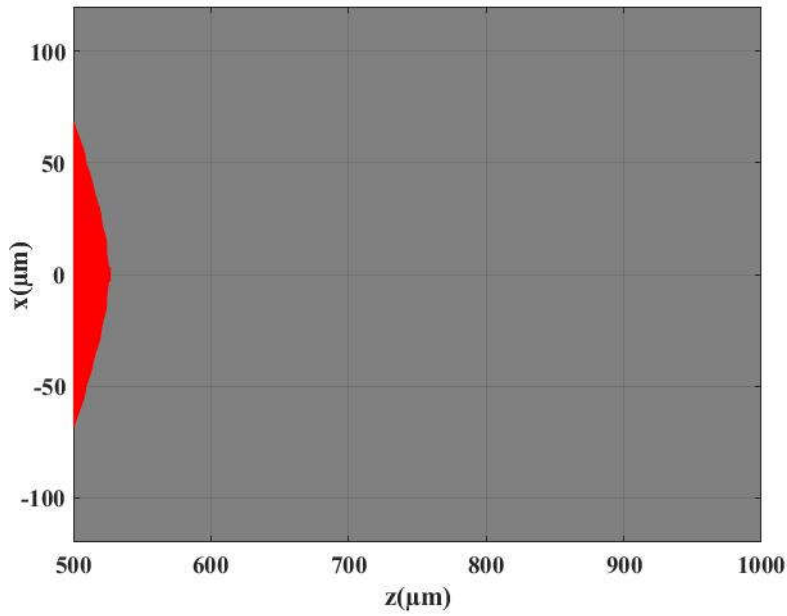


c)

Şekil 4.31. (Devamı) Zaman bağlı olarak a) Çözüm bölgesinin genişliği boyunca b) Çözüm bölgesinin derinliği boyunca c) Çözüm bölgesinin uzunluğu boyunca sıcaklık dağılımlarının incelenmesi

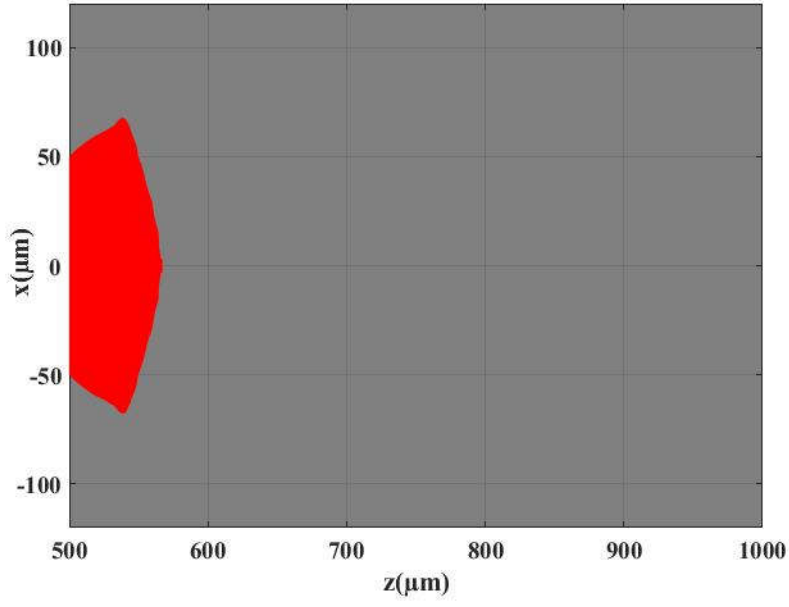
Şekil 4.32, Şekil 4.33 ve Şekil 4.34' de zamana bağlı x-z, y-z ve x-y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi görülmektedir. İncelemeler 100 W lazer gücü, 30 μm toz katman kalınlığı ve 50

μm lazer çapı kalınlığı için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarda lazer merkezi ile L_z aralığında eriyik havuzunun, fiziksel problemin doğasına paralel olarak değiştiği görülmektedir. Burada asıl incelenmesi gereken nokta, lazer kaynağı ile $z=500 \mu\text{m}$ olan bölge arasındaki zamana bağlı geometrinin değişimidir. Şekil 4.30' e bakıldığında $t=0$ ve $z=500 \mu\text{m}$ anında eriyik havuzu genişliği $108 \mu\text{m}$ ' den zamana bağlı küçülerek sırasıyla $100 \mu\text{m}$, $60 \mu\text{m}$ ve son olarak $0 \mu\text{m}$ ' ye yaklaşarak eriyik geometrisini tamamlamaktadır. Eriyik havuzu uzunluğu da aynı şekilde $527 \mu\text{m}$ ' den $632 \mu\text{m}$ uzunluğuna gelişerek eriyik havuzu geometrisini oluşturmaktadır.

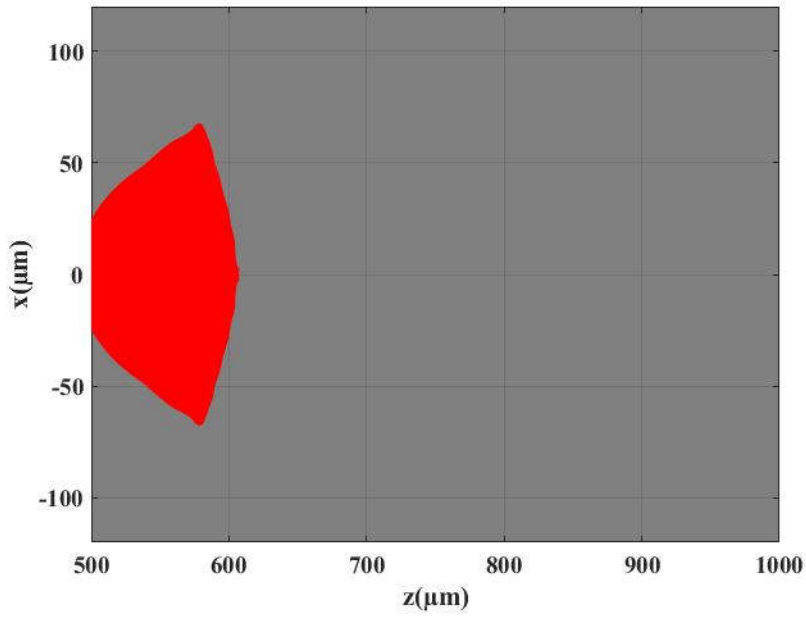


a)

Şekil 4.32. Zaman bağlı a) $t=0 \mu\text{s}$ b) $t=0.1 \mu\text{s}$ c) $t=0.2 \mu\text{s}$ d) $t=0.25 \mu\text{s}$ anındaki x-z yönlü eriyik havuzu geometrisi

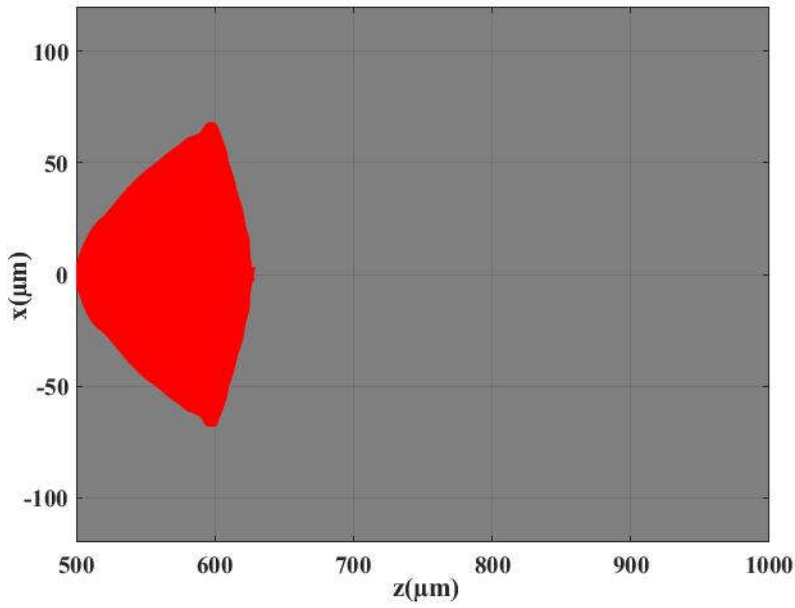


b)



c)

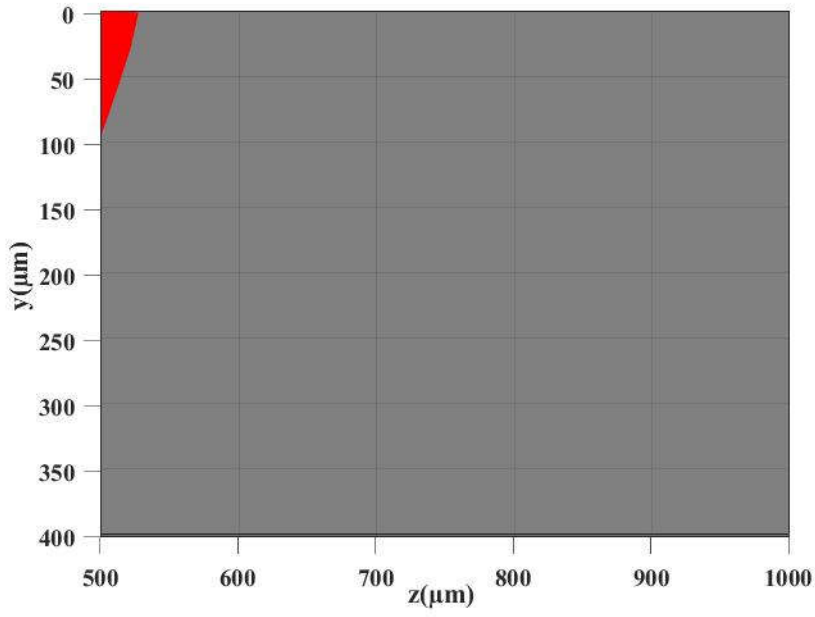
Şekil 4.32. (Devamı) Zaman bağlı a) $t=0 \mu s$ b) $t=0.1 \mu s$ c) $t=0.2 \mu s$ d) $t=0.25 \mu s$ anındaki x-z yönlü eriyik havuzu geometrisi



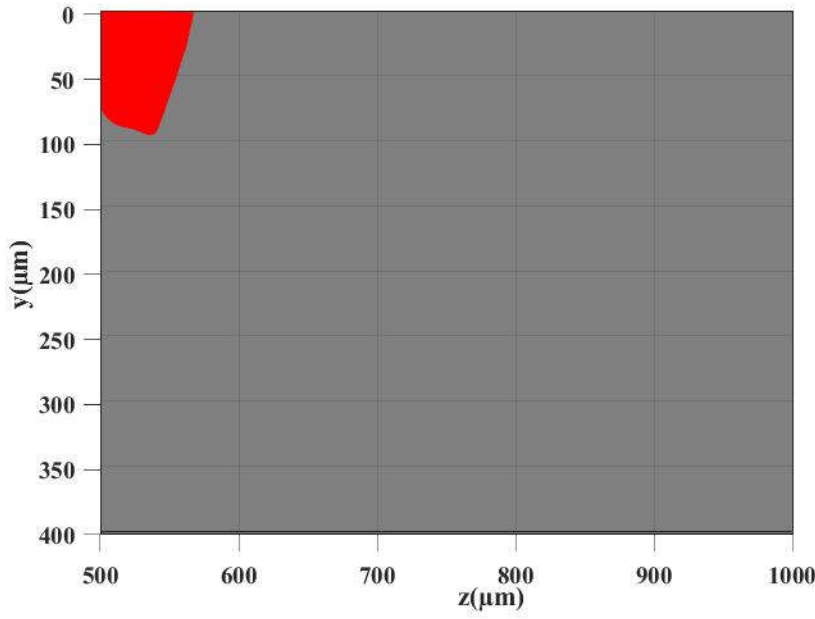
d)

Şekil 4.32. (Devamı) Zaman bağlı a) $t=0 \mu s$ b) $t=0.1 \mu s$ c) $t=0.2 \mu s$ d) $t=0.25 \mu s$ anındaki x-z yönlü eriyik havuzu geometrisi

Şekil 4.33' te eriyik havuzu geometrisinin zamana bağlı y-z yönlü değişimini göstermektedir. $t=0$ anında ve $z=500$ mikrometrede eriyik havuzu derinliği yaklaşık 90 mikrometre iken $t=0,1$ milisaniyede yaklaşık 75 mikrometre, 0,2 milisaniyede 40 mikrometre ve son olarak 0,25 milisaniye için derinlik yaklaşık 0 mikrometre değerine ulaşır ve eriyik havuzu oluşmuş olur.

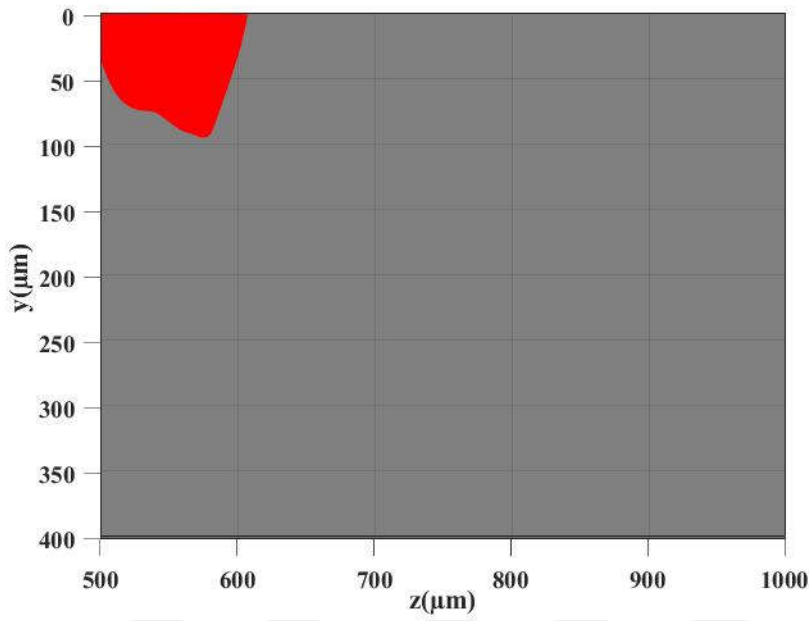


a)

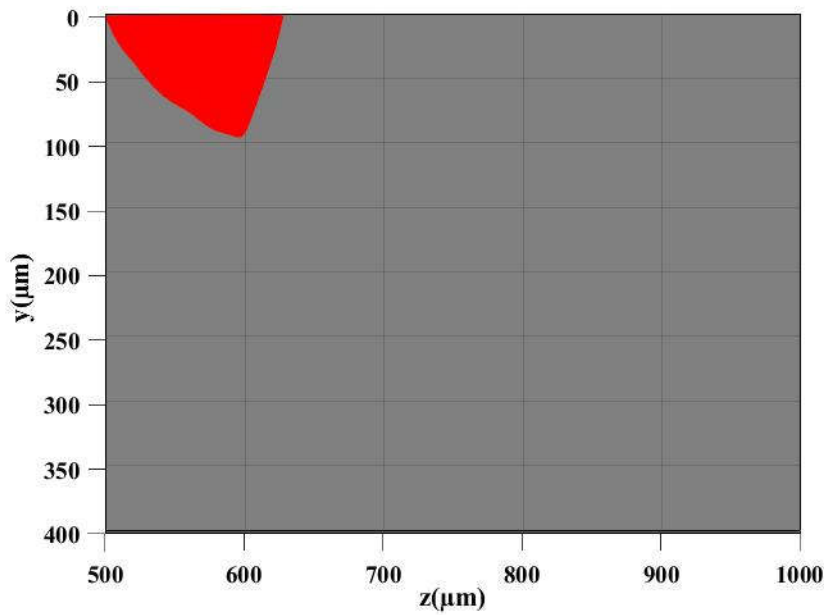


b)

Şekil 4.33. Zaman bağlı a) $t=0 \mu s$ b) $t=0.1 \mu s$ c) $t=0.2 \mu s$ d) $t=0.25 \mu s$ anındaki y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi



c)

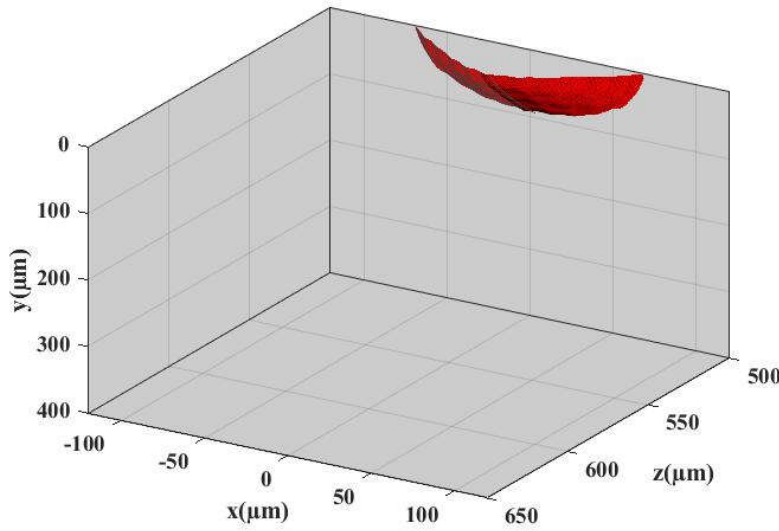


d)

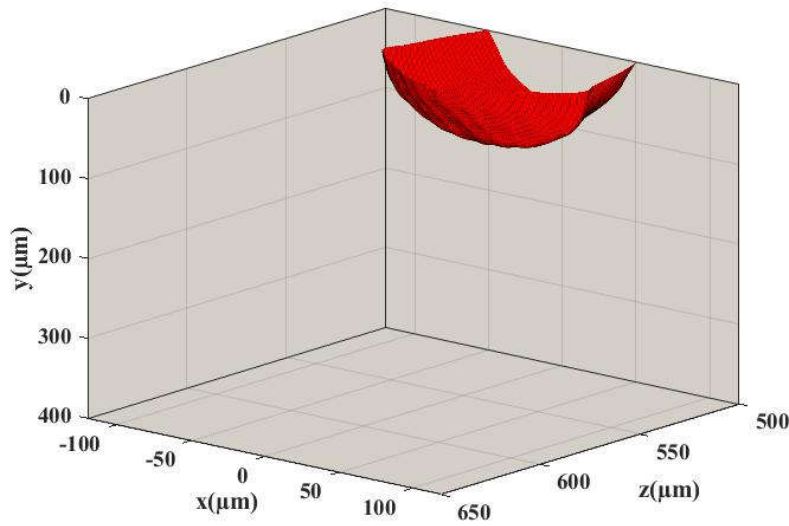
Şekil 4.33. (Devamı) Zaman bağlı a) $t=0$ μs b) $t=0.1$ μs c) $t=0.2$ μs d) $t=0.25$ μs anındaki y-z yönlü eriyik havuzu geometrisi

Son olarak Şekil 4.34' de eriyik havuzunun 3-B geometrisi görülmektedir. Burada 500 mikrometre sınır alınmıştır. Lazer kaynağı, $t=0$ ' da $z=500$ mikrometre, $t=0,1$ milisaniyede $z=540$ mikrometre, $t=0,2$ milisaniyede $z=580$ mikrometre ve $t=0.25$ milisaniyede $z=5600$ mikrometre noktasında bulunmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi en büyük eriyik hacmi,

problemin fiziksel doğasıyla paralel olarak lazer kaynağı etki noktasının çevresinde oluşmaktadır. Lazer merkezinden uzaklaştıkça eriyik havuzu küçülmekte ve 0,25 milisaniye sonunda eriyik havuzu tamamı ile oluşmaktadır. 0,25 milisaniye' den sonra ise Şekil 4.32d' de görülen geometri z yönünde ilerleyerek prosesi tamamlayacaktır.

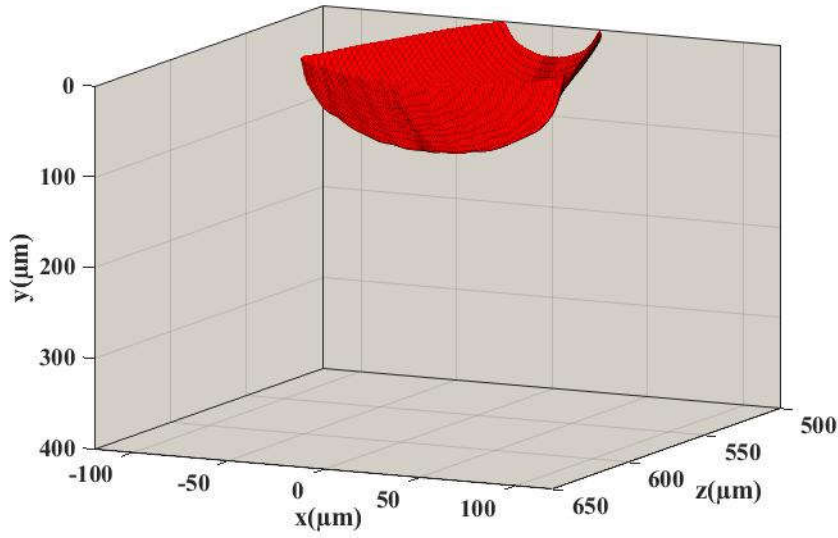


a)

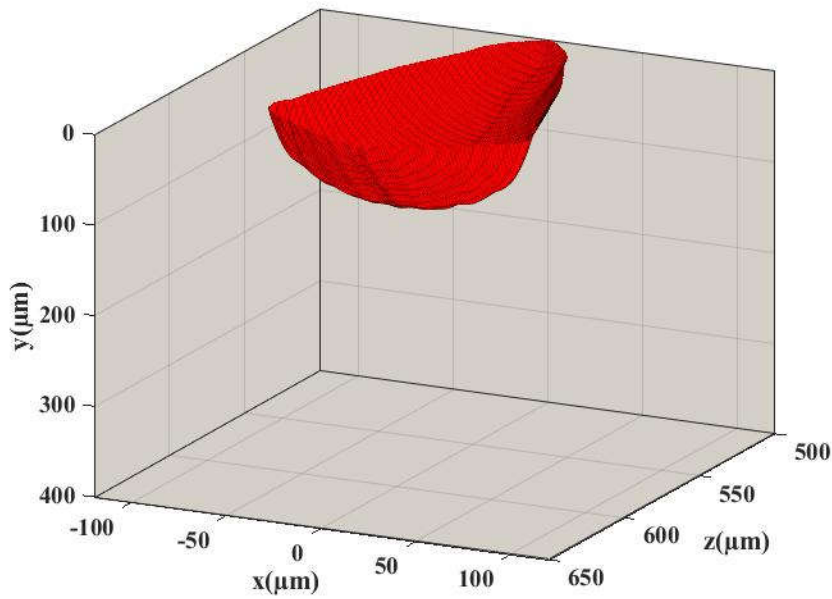


b)

Şekil 4.34. Zamana bağlı a) $t=0 \mu s$ b) $t=0.1 \mu s$ c) $t=0.2 \mu s$ d) $t=0.25 \mu s$ anındaki 3-B eriyik havuzu geometrisi



c)



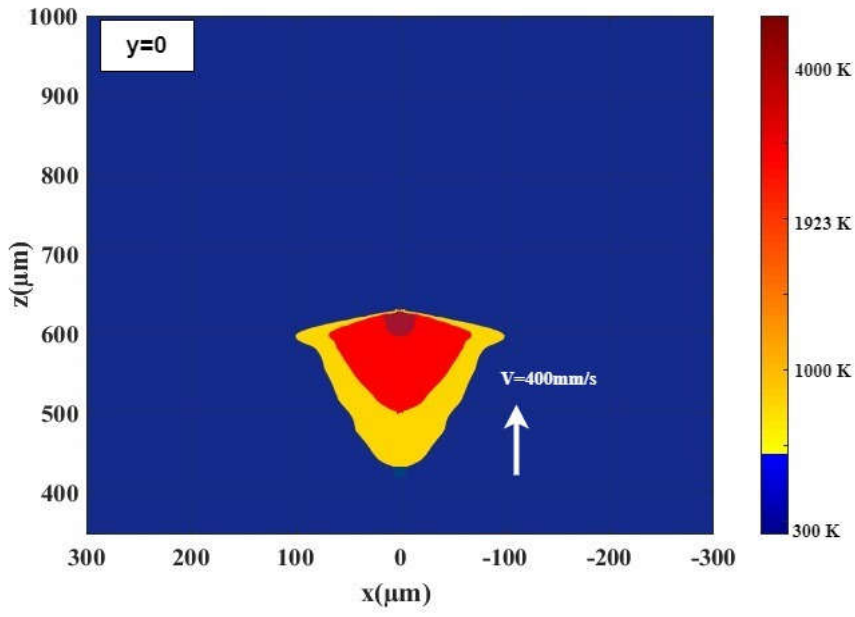
d)

Şekil 4.34. (Devamı) Zamana bağlı a) $t=0 \mu s$ b) $t=0.1 \mu s$ c) $t=0.2 \mu s$ d) $t=0.25 \mu s$ anındaki 3-B eriyik havuzu geometrisi

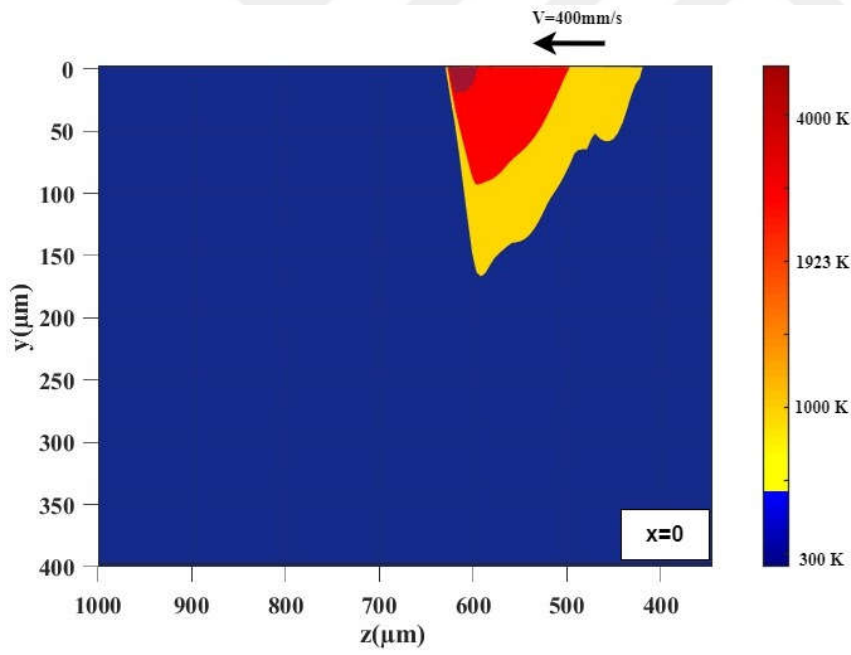
Şekil 4.35' te x-z ve y-z yönlü eriyik geometrisi ve sıcaklık dağılımı görülmektedir. Sonuçlar, 100 W lazer gücü, 100 mikrometre lazer çapı ve 30 mikrometre lazer katman kalınlığı için elde edilmiştir. Şekil 4.35a ve Şekil 4.35b incelendiğinde lazer merkezinde

maksimum sıcaklık oluşurken lazer ilerleme yönünde hızlı bir soğuma meydana gelmektedir. Bunun aksine lazer etkisinden çıkan noktalarda, kıyasla daha yavaş soğuma olduğu görülmüştür.

Sıcaklık dağılımları incelendiğinde ise $z=600$ mikrometre noktasında (Lazer merkezinde) sıcaklık, maksimum değer olan 4000 K değerinin üzerine çıkmıştır. 650 mikrometre ve 500 mikrometre arasında 4000 K seviyesinden 1900 K seviyesine düşmektedir. Sonrasında 500 mikrometreden 420 mikrometre arasında ise sıcaklık 1900 K seviyesinden 1000 K seviyesine düşmektedir. Mavi renkte görülen bölgelerde ise sıcaklık, 1000 K ve çevre sıcaklığı olan 300 K aralığındadır. x yönlü değişime bakıldığında sıcaklık dağılımının simetrik olduğu görülmektedir. Maksimum sıcaklık değeri 0-20 mikrometre arasında görülmektedir. Bunun yanında 4000-1900 K aralığı 20-70 mikrometre noktaları arasında, 1900-1000 K aralığı 70-100 mikrometre arasında görülmektedir. Son olarak y yönlü sıcaklık dağılımı incelenirse 4000-1900 K aralığı 0-20 mikrometre noktaları arasında, 4000-1900 K aralığı 20-100 mikrometre arasında, 1900-1000 K aralığı ise 100-170 mikrometre noktaları arasında görülmektedir.



a)



b)

Şekil 4.35. a) x-z yönlü b) y-z yönlü çözüm bölgesi sıcaklık dağılımı



5. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

SLE prosesi son yıllarda dünyada oldukça yaygın olarak kullanılan katmanlı imalat yöntemlerinden biridir. Ülkemizde ise yeni kullanılmaya başlanılan bir prosestir. SLE prosesi oldukça kompleks ve çözümlenmesi zor olduğundan literatürde birçok çalışma gerçekleştirilmiş ve değişken işlem parametrelerinden prosesin nasıl etkileneceği deneysel, nümerik ve analitik olarak incelenmiştir. Ancak yapılan analitik çalışmalar SLE işlemi sonuçlarını yansıtmakta yeterli olmamıştır.

Bu çalışmada ise SLE işlemi sırasında değişen parametrelere bağlı, seçilen çözüm bölgesindeki 3-B ve zamana bağlı sıcaklık dağılımı ve eriyik havuzu oluşumu, geliştirilen bir analitik model yardımı ile incelenmiştir. Değişken parametreler olarak lazer gücü, lazer çapı ve toz katman kalınlığı seçilmiştir.

Geliştirilen analitik model üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan ilki $t=0$ anında, lazer kaynağının her üç eksenin kesiştiği 0 noktasında olduğu düşünülmüş ve buna bağlı sıcaklık dağılımını belirleyebilmek için 2-B non-homojen ısı iletim denklemi kullanılmıştır. Bu denklemi non-homojen yapan 2-B Gaussian hacimsel ısı kaynağı ifadesidir. Çözüm için “Eigen fonksiyon açılım” çözümü kullanılmıştır. Böylece $t=0$ anında, x-y ekseninde oluşan sıcaklık dağılımları belirlenmiştir. Ayrıca bu denklemin çözümü için iki farklı yüzey sınır şartı kullanılmıştır. Bunlardan ilkinde yüzey tamamen yalıtımlı kabul edilmiştir. İkincisinde ise yüzeyden çevreye taşınım ve ışınlam ile ısı kaybı olduğu düşünülmüştür. Analitik modelin ikinci kısmı için seçilen çözüm bölgesinin zamana bağlı soğuması ve buna bağlı olarak eriyik havuzunun büzülmesini incelemek amaçlı 2-B ve zamana bağlı homojen ısı iletim denklemi kullanılmıştır. Bu denklemin çözümü için ayrıklaştırma yöntemi kullanılmıştır. Buradaki önemli husus ise denklemin çözümünde başlangıç şartı olarak ilk denklemin çözümünden elde edilen çözüm kullanılmıştır. Böylece ilk ve ikinci çözümler birbirlerine bağlanmış olmuştur. Son olarak lazerin ilerleme yönündeki sıcaklık ve eriyik geometrisini belirleyebilmek için ilerleme yönü (z) ve zamana bağlı ısı iletim denklemi kullanılmıştır. Çözüm için kullanılan sınır şartları homojenleştirilemediğinden değişken değiştirme işlemi yapılarak kısmi diferansiyel denklem, adi diferansiyel denkleme dönüştürülerek çözüm fonksiyonu elde edilmiştir. Burada sınır şartı olarak ikinci denklemde herhangi bir zamandaki sıcaklık dağılımını veren fonksiyon kullanılarak çözüm

için oluşturulan 3 analitik denklem birbirine bağlanmıştır. Böylece herhangi bir zamanda istenilen noktadaki sıcaklık bulunabilmektedir.

Burada sonuçlar iki farklı senaryo için değerlendirilmiştir. İlki daha küçük boyutlu üretim için kullanılan; düşük güç, lazer çapı ve katman kalınlıkları için gerçekleştirilen senaryo ve ikincisi ise daha büyük boyutlu üretim için kullanılan; nispeten daha büyük lazer gücü, lazer çapı ve katman kalınlıklarının kullanıldığı senaryodur. Bu iki durum içinde doğrulamalar yapılarak değişen parametrelere bağlı sonuçlar paylaşılmıştır.

Elde edilen çözümün doğruluğunu incelemek için literatürde yapılan deneysel ve nümerik çalışmalardan yararlanılmıştır. Doğrulama her iki senaryo için de gerçekleştirilmiş olup, daha küçük parametre değerlerine sahip durum için doğrulama parametreleri olarak eriyik havuzu genişliği, derinliği, uzunluğu ve eriyik havuzunda oluşan maksimum sıcaklık değerlerinden yararlanılmıştır. Ayrıca son bir doğrulama olarak deneysel çalışmadan alınan lazer mikroskobu görüntüleri ile model sonucu elde edilen eriyik geometrisi kıyaslanmıştır. Nispeten daha büyük güç değerlerine sahip olan durum için ise doğrulama parametreleri olarak eriyik havuzu derinliği ve genişliği kullanılmıştır. Son olarak yapılan modelin diğer malzemeler üzerinde de etkili olduğunu göstermek amaçlı h13 çeliği kullanılarak bir doğrulama daha gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarda, literatürde mevcut olan teorik modellerin doğruluğu da incelenirse, analitik modelin özellikle orta ve yüksek lazer güçleri için kabul edilebilir bir doğruluğa sahip olduğu görülmüştür.

Öncelikle daha küçük üretim parametrelerine sahip durum için sonuçlar incelenecek olursa; parametrelerin değişimine bağlı olarak eriyik geometrisi ve sıcaklık dağılımları incelendiğinde lazer gücüne bağlı olarak maksimum sıcaklık, 80 W için yaklaşık 5900 K iken 20 W için 3100 K seviyesindedir. Eriyik havuzu geometrisine bakıldığında ise lazer gücünün artışına bağlı olarak x yönlü, 38 mikrometreden 70 mikrometre değerine, y yönlü 40 mikrometreden 72 mikrometre değerine yükseldiği görülmektedir. z yönlü ise lazer gücüne bağlı olarak daha düşük bir geometri artışı oluşur ve yaklaşık 514 mikrometre' den 523 mikrometre' ye yükselir. Lazer çapına bağlı olarak sıcaklık dağılımı incelendiğinde ise çözüm bölgesinde oluşan maksimum sıcaklık değeri, lazer çapı 26 mikrometre için 4200 K değerinde iken 32 mikrometre için 3700 K değerine ulaşmıştır. Eriyik geometrisi incelendiğinde ise x yönlü değişim, lazer çapı artışına bağlı olarak 57 mikrometre' den 50 mikrometre' ye, y yönlü değişim 60 mikrometre' den 56 mikrometre' ye düşmüştür. z

yönlü değişim ise sadece 2 mikron seviyesindedir. Son olarak toz katman kalınlığına bakıldığında çözüm bölgesi maksimum sıcaklığı katman kalınlığının artışına bağlı olarak 4200 K değerinden 3785 K değerine düşmüştür. Eriyik havuzu geometrisi x yönünde 55 mikrometre değerinden 50 mikrometre değerine düştüğü ve y, z yönünde önemli bir değişime uğramadığı gözlemlenmiştir. Tüm bu veriler ışığında SLE işlemini en çok etkileyen parametrenin lazer gücü, ikincil parametrenin lazer çapı ve üçüncül parametrenin ise toz katman kalınlığı olduğu belirlenmiştir.

Yukarıda da belirtildiği gibi çözüm bölgesindeki sıcaklık dağılımı ve eriyik geometrisini etkileyen en önemli parametrenin lazer gücü olduğu saptanmıştır. SLE işleminde incelenmesi gereken bir diğer husus ısıdan etkilenen bölgenin belirlenmesidir. Lazer gücüne bağlı olarak ısıdan etkilenen bölgenin belirlenebilmesi için izo-sıcaklık eğrileri çizilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde güce bağlı olarak sıcaklıktan etkilenen bölge x yönlü 100 mikrometre, y yönlü 150 mikrometre ve z yönlü 15-30 mikrometre arasında oluşmuştur. Güç değerinin artışına bağlı olarak sıcaklık gradyanı artmıştır.

Zamana bağlı sıcaklık dağılımları ve 3-B eriyik geometrisi incelendiğinde ise $t=0$ anında maksimum sıcaklıkta olan bölge zamana bağlı olarak soğumaktadır. Sıcaklıklar incelendiğinde $t=0$ anında 40 W lazer gücü için 4250 K iken 0,05 milisaniye aralıklarla sırasıyla 3750 K, 2735 K ve 1875 K olarak belirlenmiştir. Toplamda 0,15 milisaniye' nin sonunda sıcaklık, katılma sıcaklığının altına düşerek eriyik havuzu oluşacaktır. Eriyik havuzu geometrisine bakıldığında ise eriyik havuzu genişliği başlangıçta 100 mikrometre ve zamana bağlı olarak 50 mikrometre ve 0 mikrometre, eriyik havuzu derinliği başlangıçta 50 mikrometre ve zamana bağlı 38 mikrometre ve 0 mikrometre olacak ve katılacaktır. Lazer kaynağı ilerleme yönünde ise eriyik havuzu uzunluğu zamana bağlı olarak 532 mikrometre' den 547 mikrometre değerine ulaşacak ve eriyik havuzu geometrisini oluşturacaktır. Başlangıç noktasının 500 mikrometre noktası olduğu düşünülürse eriyik havuzu uzunluğu 47 mikrometre seviyesinde olacaktır.

Nispeten daha büyük parametrelere sahip durum için sonuçlar incelenecek olursa; güce bağlı olarak sıcaklık değeri 250 W için 6627 K seviyesinde iken 100 W için 4342 K seviyesindedir. Ayrıca güce bağlı olarak eriyik havuzu genişliği 68 mikrometre' den 86 mikrometre değerine, eriyik havuzu derinliği 95 mikrometre' den 125 mikrometre değerine ve eriyik havuzu uzunluğuna bakıldığında ise 526 mikrometre değerinden 544 mikrometre

değerine yükseldiği görülmüştür. Lazer yarıçapına bağlı olarak sıcaklık değişimleri incelendiğinde ise 50 mikrometre lazer yarıçapı için 4342 K iken 110 mikrometre lazer yarıçapı için 2573 K değerine ulaşmıştır. Lazer yarıçapına bağlı eriyik havuzu genişliği 50 mikrometre değerinden 68 mikrometre değerine, eriyik havuzu derinliği 50 mikrometreden 90 mikrometre değerine ve son olarak eriyik havuzu uzunluğu 509 mikrometreden 526 mikrometre değerine yükselmiştir. Son olarak metal tozu katman kalınlığına bağlı olarak maksimum sıcaklık değerleri 30 mikrometre için 4342 K ve 90 mikrometre için 3467 K olarak elde edilmiştir. Eriyik havuzu genişliği katman kalınlığının artışına bağlı olarak 64 mikrometreden 61 mikrometreye ve eriyik havuzu derinliği 95 mikrometreden 130 mikrometre değerine ulaşmıştır. Bunun yanında eriyik havuzu uzunluğu değişimi oldukça küçüktür. Bu sayısal değerlerden hareket ile prosesi en çok etkileyen parametre lazer gücü, ikinci olarak lazer çapı ve son olarak metal tozu katman kalınlığı olduğu saptanmıştır.

Zamana bağlı maksimum sıcaklıklar incelendiğinde ise; $t=0$ anında 4342 K, $t=0.1$ milisaniye sonra 3502 K, $t=0.2$ milisaniye sonra 2343 K ve son olarak $t=0.25$ milisaniye' de ise 1924 K sıcaklık değeri gözlemlenmiştir. Zamana bağlı eriyik havuzu geometrisi incelendiğinde $t=0$ anında eriyik havuzu genişliği 108 mikrometre, $t=0,1$ milisaniye için 100 mikrometre, $t=0,2$ milisaniye için 60 mikrometre olmakta ve $t=0,25$ milisaniye olduğunda eriyik havuzu genişliği 0 olur ve eriyik geometrisi tamamlanmış olur. Benzer şekilde eriyik havuzu derinliği $t=0$ anında 90 mikrometre, $t=0,1$ anında 75 mikrometre ve $t=0,2$ anında 40 mikrometre değerine ulaşır. $t=0,25$ değerine ulaştığında derinlik 0 mikrometre olur ve eriyik havuzu geometrisi oluşmuş olur.

Bilindiği üzere analitik modeller, nümerik ve deneysel modellere göre çözümlenmesi zor ve içerisinde birçok kabulü barındırsa da maliyetsiz ve kısa sürede sonuç verebilir olmasından dolayı oldukça önem arz etmektedir. Bu çalışmada da deneysel doğruluğu kabul edilebilir bir analitik model oluşturularak farklı parametreler için çözüm bölgesi ve eriyik havuzu geometrisi belirlenmiştir. Ayrıca SLE prosesini değerlendirmek amacıyla Ti64 malzemesi kullanılmıştır. Ancak h13 takım çeliği içinde mevcut modelin doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

Tüm bu sonuçlar ışığında SLE prosesi sırasında çözüm alanında oluşan sıcaklık dağılımı ve eriyik havuzunun geometrisi üzerine, lazer gücü, lazer çapı ve metal tozu katman kalınlığı parametreleri etkileri ortaya konmuştur. Bununla birlikte, lazer gücü ve lazer

apının, eriyik havuzu oluşumunda ve sıcaklık dağılımında baskın etkiye sahip olduğu ve metal tozu katman kalınlığının nispeten daha az etkisinin olduğu belirlenmiştir. SLE prosesinde bir diğer olgu ise yüksek sıcaklık gradyanlarının m alanı içerisinde termal gerilmeleri artırdığıdır. Bu sonuçlar ışığında, yüksek lazer güçleri için büyük lazer çapları seçilmesi, m alanı içerisinde daha düşük sıcaklık gradyanları oluşması açısından tercih edilmelidir. Benzer şekilde, küçük lazer çapı uygulamalarında, lazer glerinin düşük seviyede tutulması, daha düşük sıcaklık gradyanları oluşması açısından tercih edilmelidir.

Yapılan çalışmada kurgulanan analitik model ile Ti64 malzemesi için, farklı işleme parametrelerinde sıcaklık dağılımı ve faz geometrileri elde edilmiştir. Bu çalışmanın, analitik model kurgusu açısından, ileride yapılacak çalışmalara temel teşkil edeceği umulmaktadır. Ayrıca, oklu tarama işlemi ya da farklı açılardaki lazer ışınlarının parametreler üzerindeki etkilerini incelemek için önerilen modelin geliştirilmesinin literatürdeki mevcut diğer analitik modellere nazaran daha kolay ve uygun olduğu düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

1. Duman, B. ve Kayacan, M. C. (2017). Doğrudan metal lazer sinterleme/ergitme yöntemi ile imal edilecek parçanın mekanik özelliklerinin tahmini. *Teknik Bilimler Dergisi*, 7(1), 12-28.
2. Yarkınoğlu, O. (2007). *Computer aided manufacturing (CAM) data generation for solid freeform fabrication*. Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Ankara”.
3. Kochan, D., Kai, C. C. and Zhaohui, D. (1999). Rapid prototyping issues in the 21st century. *Computers in industry*, 39(1), 3-10.
4. Srinivas, M. and Babu, B. S. (2017). A critical review on recent research methodologies in additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 9049-9059.
5. Ian Gibson, I. G. (2015). *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. (Birinci baskı) New York, Springer, 20-40.
6. Thijs, L., Verhaeghe, F., Craeghs, T., Van Humbeeck, J. and Kruth, J. P. (2010). A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Acta materialia*, 58(9), 3303-3312.
7. Vrancken, B., Thijs, L., Kruth, J. P. and Van Humbeeck, J. (2012). Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 541, 177-185.
8. Parry, L., Ashcroft, I. A. and Wildman, R. D. (2016). Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation. *Additive Manufacturing*, 12, 1-15.
9. Gusarov, A. V., Yadroitsev, I., Bertrand, P. and Smurov, I. (2009). Model of radiation and heat transfer in laser-powder interaction zone at selective laser melting. *Journal of heat transfer*, 131(7),1-10.
10. Verhaeghe, F., Craeghs, T., Heulens, J. and Pandelaers, L. (2009). A pragmatic model for selective laser melting with evaporation. *Acta Materialia*, 57(20), 6006-6012.
11. Loh, L. E., Chua, C. K., Yeong, W. Y., Song, J., Mapar, M., Sing, S. L., and Zhang, D. Q. (2015). Numerical investigation and an effective modelling on the Selective Laser Melting (SLM) process with aluminium alloy 6061. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 80, 288-300.
12. Li, Y., Zhou, K., Tor, S. B., Chua, C. K., and Leong, K. F. (2017). Heat transfer and phase transition in the selective laser melting process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 2408-2416.
13. Fu, C. H. and Guo, Y. B. (2014). Three-dimensional temperature gradient mechanism in selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(6),1-7.

14. Fathi, A., Toyserkani, E., Khajepour, A., and Durali, M. (2006). Prediction of melt pool depth and dilution in laser powder deposition. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(12), 2613-2623.
15. Mishra, A. K., Aggarwal, A., Kumar, A., and Sinha, N. (2018). Identification of a suitable volumetric heat source for modelling of selective laser melting of Ti6Al4V powder using numerical and experimental validation approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99(9), 2257-2270.
16. Hussein, A., Hao, L., Yan, C., and Everson, R. (2013). Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-support in selective laser melting. *Materials & Design*, 52, 638-647.
17. Zhang, T., Li, H., Liu, S., Shen, S., Xie, H., Shi, W., and Wei, M. (2018). Evolution of molten pool during selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52(5), 1-17.
18. Song, B., Dong, S., Liao, H., and Coddet, C. (2012). Process parameter selection for selective laser melting of Ti6Al4V based on temperature distribution simulation and experimental sintering. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61(9), 967-974.
19. Waqar, S., Sun, Q., Liu, J., Guo, K., and Sun, J. (2021). Numerical investigation of thermal behavior and melt pool morphology in multi-track multi-layer selective laser melting of the 316L steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(3), 879-895.
20. Contuzzi, N., Campanelli, S. L. and Ludovico, A. D. (2011). 3-D finite element analysis in the selective laser melting process. *International Journal of Simulation Modelling*, 10(3), 113-121.
21. Hodge, N. E., Ferencz, R. M. and Solberg, J. M. (2014). Implementation of a thermomechanical model for the simulation of selective laser melting. *Computational Mechanics*, 54(1), 33-51.
22. Manvatkar, V., De, A. and DebRoy, T. (2015). Spatial variation of melt pool geometry, peak temperature and solidification parameters during laser assisted additive manufacturing process. *Materials Science and Technology*, 31(8), 924-930.
23. Ilin, A., Logvinov, R., Kulikov, A., Prihodovsky, A., Xu, H., Ploshikhin, V. and Bechmann, F. (2014). Computer aided optimisation of the thermal management during laser beam melting process. *Physics Procedia*, 56(1), 390-399.
24. Zeng, K., Pal, D., Gong, H. J., Patil, N. and Stucker, B. (2015). Comparison of 3DSIM thermal modelling of selective laser melting using new dynamic meshing method to ANSYS. *Materials Science and Technology*, 31(8), 945-956.
25. Yuan, P. and Gu, D. (2015). Molten pool behaviour and its physical mechanism during selective laser melting of TiC/AlSi10Mg nanocomposites: simulation and experiments. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 48(3), 1-16.

26. Körner, C., Bauereiß, A. and Attar, E. (2013). Fundamental consolidation mechanisms during selective beam melting of powders. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 21(8), 1-18.
27. Yadroitsev, I., Krakhmalev, P. and Yadroitsava, I. (2014). Selective laser melting of Ti6Al4V alloy for biomedical applications: Temperature monitoring and microstructural evolution. *Journal of Alloys and Compounds*, 583, 404-409.
28. Cheng, B., Price, S., Lydon, J., Cooper, K. and Chou, K. (2014). On process temperature in powder-bed electron beam additive manufacturing: model development and validation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(6), 1-12.
29. Antony, K., Arivazhagan, N. and Senthilkumaran, K. (2014). Numerical and experimental investigations on laser melting of stainless steel 316L metal powders. *Journal of Manufacturing Processes*, 16(3), 345-355.
30. Li, Y. and Gu, D. (2014). Parametric analysis of thermal behavior during selective laser melting additive manufacturing of aluminum alloy powder. *Materials & Design*, 63, 856-867.
31. Li, Y. and Gu, D. (2014). Thermal behavior during selective laser melting of commercially pure titanium powder: Numerical simulation and experimental study. *Additive Manufacturing*, 1, 99-109.
32. Ning, J., Mirkoohi, E., Dong, Y., Sievers, D. E., Garmestani, H. and Liang, S. Y. (2019). Analytical modeling of 3D temperature distribution in selective laser melting of Ti-6Al-4V considering part boundary conditions. *Journal of Manufacturing Processes*, 44, 319-326.
33. Carslaw, H. S., and Jaeger, J. C. (1992). *Conduction of heat in solids* (İkinci Baskı). İngiltere, Oxford Science Publications, 100-150.
34. Ning, J., Wang, W., Ning, X., Sievers, D. E., Garmestani, H. and Liang, S. Y. (2020). Analytical thermal modeling of powder bed metal additive manufacturing considering powder size variation and packing. *Materials*, 13(8), 1-15.
35. Fathi, A., Toyserkani, E., Khajepour, A. and Durali, M. (2006). Prediction of melt pool depth and dilution in laser powder deposition. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(12), 2613-2623.
36. Yang, Y., Knol, M. F., Van Keulen, F., and Ayas, C. (2018). A semi-analytical thermal modelling approach for selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 21, 284-297.
37. Araya, G. and Gutierrez, G. (2006). Analytical solution for a transient, three-dimensional temperature distribution due to a moving laser beam. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(21-22), 4124-4131.
38. Cui, C., Hu, B., Zhao, L., and Liu, S. (2011). Titanium alloy production technology, market prospects and industry development. *Materials & Design*, 32(3), 1684-1691.
39. Boyer, R. R. (1996). An overview on the use of titanium in the aerospace industry. *Materials Science and Engineering: A*, 213(1-2), 103-114.

40. Singh, P., Pungotra, H., and Kalsi, N. S. (2017). On the characteristics of titanium alloys for the aircraft applications. *Materials today: proceedings*, 4(8), 8971-8982.
41. Uhlmann, E., Kersting, R., Klein, T. B., Cruz, M. F., and Borille, A. V. (2015). Additive manufacturing of titanium alloy for aircraft components. *Procedia Cirp*, 35, 55-60.
42. Emmelmann, C., Scheinemann, P., Munsch, M. and Seyda, V. (2011). Laser additive manufacturing of modified implant surfaces with osseointegrative characteristics. *Physics Procedia*, 12, 375-384.
43. Gurrappa, I. (2003). Characterization of titanium alloy Ti-6Al-4V for chemical, marine and industrial applications. *Materials Characterization*, 51(2-3), 131-139.
44. Liu, S., and Shin, Y. C. (2019). Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Materials & Design*, 164, 1-23.
45. Galarraga, H., Warren, R. J., Lados, D. A., Dehoff, R. R., Kirka, M. M. and Nandwana, P. (2017). Effects of heat treatments on microstructure and properties of Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM). *Materials Science and Engineering: A*, 685, 417-428.
46. Shipley, H., McDonnell, D., Culleton, M., Coull, R., Lupoi, R., O'Donnell, G. and Trimble, D. (2018). Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 128, 1-20.
47. Li, J. F., Li, L. and Stott, F. H. (2004). Comparison of volumetric and surface heating sources in the modeling of laser melting of ceramic materials. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(6-7), 1159-1174.
48. Singh, S. and Jain, P. K. (2008). Analytical solution to transient heat conduction in polar coordinates with multiple layers in radial direction. *International Journal of Thermal Sciences*, 47(3), 261-273.
49. Schneider, P. J. (1955). *Conduction heat transfer* (1. Baskı). İngiltere: Addison-Wesley Publishing Company, 284-286.
50. Kou, S. (2003). *Welding metallurgy* (2. Baskı). New Jersey, USA, 431-446.
51. Dilip, J. J. S., Zhang, S., Teng, C., Zeng, K., Robinson, C., Pal, D. and Stucker, B. (2017). Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting. *Progress in Additive Manufacturing*, 2(3), 157-167.
52. Wu, Y. C., San, C. H., Chang, C. H., Lin, H. J., Marwan, R., Baba, S. and 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, 72-78.

53. Fu, C. H. and Guo, Y. B. (2014). Three-dimensional temperature gradient mechanism in selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(6),1-7.
54. 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), 1-18.
55. Huang, W. and Zhang, Y. (2019). Finite element simulation of thermal behavior in single-track multiple-layers thin wall without-support during selective laser melting. *Journal of Manufacturing Processes*, 42, 139-148.
56. Wits, W. W., Bruins, R., Terpstra, L., Huls, R. A. and Geijselaers, H. J. (2016). Single scan vector prediction in selective laser melting. *Additive manufacturing*, 9, 1-6.
57. Khairallah, S. A., Anderson, A. T., Rubenchik, A. and King, W. E. (2016). Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. *Acta Materialia*, 108, 36-45.
58. Yang, Y., Van Keulen, F., and Ayas, C. (2020). A computationally efficient thermal model for selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 31, 1-16.



GAZİ GELECEKTİR..