

**YÖNLENDİRİLMİŞ ENERJİ GİRDİLİ KATMANLI  
İMALAT UYGULAMASINDAKİ PARAMETRELERİN  
PROSES VE ÜRÜN ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN  
BELİRLENMESİ**

**Merve BIYIKLI**



T.C.  
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÖNLENDİRİLMİŞ ENERJİ GİRDİLİ KATMANLI İMALAT  
UYGULAMASINDAKİ PARAMETRELERİN PROSES VE ÜRÜN  
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ**

Merve BIYIKLI  
0000-0002-5783-6306

Prof. Dr. A. Alper ÖZALP  
(Danışman)

DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2022  
Her Hakkı Saklıdır

## TEZ ONAYI

Merve BIYIKLI tarafından hazırlanan “YÖNLENDİRİLMİŞ ENERJİ GİRDİLİ KATMANLI İMALAT UYGULAMASINDAKİ PARAMETRELERİN PROSES VE ÜRÜN ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. A.Alper ÖZALP

<b>Başkan</b>	:	Prof. Dr. A.Alper ÖZALP 0000-0002-4976-9027 Bursa Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Fakültesi, Termodinamik Anabilim Dalı	İmza
<b>Üye</b>	:	Prof.Dr. M. İhsan KARAMANGİL 0000-0001-5965-0313 Bursa Uludağ Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği Fakültesi, Taşıt Tahrik ve Güç Sistemleri Anabilim Dalı	İmza
<b>Üye</b>	:	Prof.Dr. Erhan PULAT 0000-0003-2866-6093 Bursa Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Fakültesi, Enerji Anabilim Dalı	İmza
<b>Üye</b>	:	Prof. Dr. Almila GÜVENÇ YAZICIOĞLU 0000-0003-1709-6929 Orta Doğu Teknik Üniversitesi , Makina Mühendisliği Fakültesi, Akışkanlar Mekaniği Anabilim Dalı	İmza
<b>Üye</b>	:	Prof . Dr. Hakan ERTÜRK 0000-0001-5564-3845 Boğaziçi Üniversitesi, Makina Mühendisliği Fakültesi , Makina Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN**  
**Enstitü Müdürü**  
.././.....

**B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

.../.../.....

**Merve BIYIKLI**

## TEZ YAYINLANMA FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Prof. Dr. A. Alper ÖZALP  
Tarih

Merve BIYIKLI  
Tarih

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum  
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum  
anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

## ÖZET

Doktora Tezi

### YÖNLENDİRİLMİŞ ENERJİ GİRDİLİ KATMANLI İMALAT UYGULAMASINDAKİ PARAMETRELERİN PROSES VE ÜRÜN ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ

**Merve BIYIKLI**

Bursa Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. A. Alper ÖZALP

Üretilirlik kısıtlarını azaltmak için eklemeli üretim prosesi her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Eklemeli üretim otomotiv, savunma&havacılık, tıp, enerji, ekipmanlar gibi çok farklı alanlarda kullanılmaktadır. Doğrudan Enerji Biriktirme (DED) prosesi ise eklemeli üretim alt dallarından birisidir. DED katmanlı üretim yönteminde nozuldan parça üzerine püskürtülen toz veya beslenen tel aynı zamanda lazer ile ergitilerek malzeme üzerinde katman katman yığılmaktadır. DED prosesi ile farklı topolojik özellikte ürünlerin üretimi, büyük yapıdaki kalıp gibi parçaların onarımları, mevcut parçalara aynı veya farklı malzemelerle yeni fonksiyonlar eklenmesi mümkündür.

Bu çalışmada 316L-Si toz malzemesi kullanılarak lazer gücü (1300-1400-1500 W), lazer tarama hızı (8-9-10 mm/s) ve toz besleme miktarı (5.59-6.52-7.45 g/dk) parametreleri için Taguchi tablosu oluşturulmuştur. Bu deney tablosundaki parametrelerle tek katmanlı tarama için FLOW-3D® yazılımı ile analiz edilmiş, deneysel çalışmalarla üretimleri yapılmış ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla matematiksel modeli oluşturulmuştur. Sanal analiz çalışmaları ve deneysel çalışmalar sonucunda tek katmanlı tarama için genişlik, yükseklik, derinlik, dilution oranları ölçülerek birbirleri ile kıyaslanmıştır. Sanal analiz çalışmalarından elde edilen sonuçlarda parametre değişimlerine bağlı olarak taramalardaki sıcaklık dağılımları kıyaslanmıştır. İki nokta arasındaki soğuma hızları değerlendirilmiştir. Özgül enerji yoğunluğu (SED) ve toz besleme yoğunluğunun (PFD) tarama yüksekliği, genişliği ve derinliği ölçülerindeki etkileri incelenmiştir. Tarama yüksekliği üzerinde en önemli etkiye sahip parametre toz besleme hızı, tarama genişliğinde ise lazer gücüdür. Tarama derinliği için hem lazer gücü hem de toz besleme hızı kritiktir. En yüksek sıcaklık değerleri yüksek lazer gücü, düşük tarama hızı ve yüksek toz besleme miktarında görülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Eklemeli imalat, doğrudan enerji biriktirme (DED) , tek katman tarama proses parametrelerinin etkileri, eriyik havuzu geometrik ölçüleri, dilution oranı, sıcaklık değişimi

**2022, ix + 66 sayfa.**

## ABSTRACT

PhD Thesis

### DETERMINATION THE EFFECTS OF THE PARAMETERS ON PROCESS AND PRODUCT FOR DIRECTED ENERGY DEPOSITION METAL ADDITIVE MANUFACTURING

**Merve BIYIKLI**

Bursa Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Prof. Dr. A. Alper ÖZALP

In order to eliminate the manufacturability constraints, the additive manufacturing process is becoming widespread day by day. Additive manufacturing is used in many different fields such as automotive, defence & aerospace, medicine, energy and equipment. The Direct Energy Deposition (DED) process is one of the additive manufacturing sub-branches. In the DED production method, the sprayed powder or the fed wire from the nozzle on the part is melted with the laser and stacked on the material layer by layer. With the DED process, it is possible to manufacture products with different topological properties, repair parts such as molds in large structures, and add new functions to existing parts with the same or different materials.

In this study, the Taguchi table was created by using 316L-Si powder material for laser power (1300-1400-1500 W), laser scanning speed (8-9-10 mm/s) and powder feed amount (5.59-6.52-7.45 g/min) parameters. The parameters in this table were analyzed with the FLOW-3D® software for single-layer scanning, their production was made with experimental studies, and the mathematical model was created with the results obtained from the experimental studies. As a result of virtual analysis studies and experimental studies, width, height, depth, and dilution ratios for single-layer scanning were measured and compared with each other. In the results obtained from the virtual analysis studies, the temperature distributions in the scans were compared depending on the parameter changes. The cooling rates between two points were evaluated. The effects of specific energy density (SED) and powder feed density (PFD) on scanning height, width and depth were investigated. The parameter that has the most important effect on the scanning height is the powder feed rate and the laser power in the scanning width. Both laser power and powder feed rate are critical for scanning depth. The highest temperature values are seen at high laser power, low scanning speed and high powder feed amount.

**Key words:** Additive manufacturing, directed energy deposition, the effects of process parameters on single track scanning, measures of melt region, dilution, thermal distribution

**2022, ix + 66 pages.**

## ÖNSÖZ ve/veya TEŞEKKÜR

Hayatım boyunca desteklerini eksik etmeyen, benim için her türü fedakarlıkta bulunan, beni yüreklendiren, her daim arkamda duran annem ve babam Emine & Mehmet ÇIBIK'a, her zaman başaracağıma inanan, yüreklendiren eşim Berat BIYIKLI'ya, doktora sürecimin içerisinde doğup büyüyen her anına şahit olan, bana güç veren canım oğlum Halil Erdem BIYIKLI'ya ve maddi manevi desteklerini esirgemeyen tüm aileme teşekkür ederim.

Lisans mezuniyetimden başlayarak doktora sürecimin tamamlanmasına kadar geçen süreçte beni yönlendiren, değerli bilgilerini ve deneyimlerini paylaşan, desteğini esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. A. Alper ÖZALP hocama teşekkürlerimi sunarım.

Tez jürimde yer alan Prof. Dr. M. İhsan KARAMANGİL, Prof. Dr. Erhan PULAT, Prof. Dr. Almıla GÜVENÇ YAZICIOĞLU ve Prof. Dr. Hakan ERTÜRK hocalarıma çalışmaya katkılarından ötürü teşekkür ederim.

119C059 nolu proje ile 2244 Doktora Sanayi Programı vasıtasıyla çalışmalarına katkı sağlayan TÜBİTAK ve COŞKUNÖZ HOLDİNG'e teşekkürlerimi sunarım.

Merve BIYIKLI

.../.../.....



## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ ve/veya TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	2
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	10
3.1. Termal Model.....	10
3.2. Taguchi ve ANOVA.....	12
3.3. Proses Parametreleri.....	13
3.4. 316L Toz Malzemesi ile Tek Katmanlı Sanal Analiz Çalışmaları.....	14
3.5. 316L Toz Malzemesi ile Tek Katmanlı Deneysel Çalışmalar.....	23
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	25
4.1. Sanal Analiz Sonuçlarının Deneysel Çalışmalarla Kıyaslanması.....	29
4.2. Özgül Enerji Yoğunluğu (SED) ve Toz Besleme Yoğunluğunun(PFD) Etkileri..	32
4.3. Matematiksel Model Sonuçlarının Deneysel Çalışmalarla Kıyaslanması.....	37
4.4. Varyans Analizi (ANOVA).....	41
4.5. Tek Katman Taramanın İç Yapısındaki Sıcaklık Değişimleri.....	43
5. SONUÇ.....	60
KAYNAKLAR.....	62
ÖZGEÇMİŞ.....	65

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
P	Basınç (Pa)
$\hat{n}$	Birim normal vektör
$\omega_0$	Buharlaştırma katsayısı
$T_{ext}$	Çıkış sıcaklığı (K)
D	Dilution (Kaynak nüfuziyeti) (%)
$\mu$	Dinamik viskozite (Pa.s)
$\varepsilon$	Yayınım
q	Enerji yoğunluğu
q	Giriş ısı akısı ( $W/m^2$ )
$V_F$	Hacimsel oran ( $mm^3$ )
v	Hız (m/s)
k	Isı iletim katsayısı ( $W/mK$ )
$C_p$	Isı kapasitesi ( $J/gK$ )
$h, h_c$	Isı taşınım katsayısı ( $W/m^2K$ )
$\eta$	Lazer absorpsiyon katsayısı
d, d <sub>L</sub>	Lazer çapı (mm)
p, P, LP	Lazer gücü (W)
Q	Lazer ısı üretimi (J)
$x_0, y_0$	Lazer ışını merkezinin başlangıç konumu (mm)
$R_b$	Lazer spot yarıçapı (mm)
$T_0, T_{amb}$	Oda sıcaklığı (K)
SED	Özgül enerji yoğunluğu ( $J/mm^2$ )
h	Özgül entalpi ( $J/kg$ )
$q_{rad}$	Radyasyon nedeniyle ısı kaybı ( $W/m^2$ )
d	Tarama derinliği (mm)
w	Tarama genişliği (mm)
SS	Tarama hızı (mm/s)
h	Tarama yüksekliği (mm)
$\alpha$	Termal genişleme katsayısı ( $1/K$ )
PF	Toz besleme hızı (g/dk)
A	Toz parçacıkları tarafından lazer ışını absorpsiyon katsayısı
PFD	Toz besleme yoğunluğu ( $g/mm^2$ )
T	Sıcaklık (K)
$\sigma$	Stefan–Boltzmann sabiti ( $W/m^2K^4$ )
g	Yerçekimi ivmesi ( $m/s^2$ )
$\rho$	Yoğunluk ( $kg/m^3$ )

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
AM	Additive manufacturing
DED	Doğrudan enerji deposition (Doğrudan enerji biriktirme)
DOE	Design of experiment
EÜ	Eklemeli üretim
FVM	Finite volume method
GPR	Gaussian process regression
HAZ	Heat affected zone (Isıdan etkilenen bölge)
LMD	Laser metal deposition
MRA	Multiple regression analysis
RSM	Response surface methodology
ANOVA	Varyans analizi
VOF	Volume of fluid

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Çeşitli endüstri sektörlerinin eklemeli üretime hazır olma seviyeleri (EPMA, 2019).....	3
Şekil 2.2. Metal malzemeler için tek adımlı Eklemeli Üretim ilkelerine genel bakış (Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles –Terminology, 2015) .....	4
Şekil 2.3. DED prosesinin şematik gösterimi .....	5
Şekil 3.1. DED prosesinde termal şema.....	10
Şekil 3.2. 316L ve C1050 malzemelerinin ısı iletim katsayılarının 25 °C – 1600 °C aralığında sıcaklığa bağlı değişimi.....	16
Şekil 3.3. 316L ve C1050 malzemelerinin özgül ısılarının 25 °C – 1600 °C aralığında sıcaklığa bağlı değişimi .....	16
Şekil 3.4. 316L ve C1050 malzemelerinin entalpi değerlerinin 25 °C – 1600 °C aralığında sıcaklığa bağlı değişimi .....	16
Şekil 3.5. 316L ve C1050 malzemelerinin yoğunluğunun 25 °C – 1600 °C aralığında sıcaklığa bağlı değişimi .....	17
Şekil 3.6. 316L ve C1050 malzemelerinin viskozitesinin 1000 °C – 1600 °C aralığında sıcaklığa bağlı değişimi .....	17
Şekil 3.7. XZ düzleminde mesh bloğu.....	19
Şekil 3.8. YZ düzleminde mesh bloğu.....	19
Şekil 3.9. Yoğunlaşılın mesh bölgesi .....	20
Şekil 3.10. Lazer demetinin çıkıştaki ve odaktaki yarıçapları .....	20
Şekil 3.11. 3 nozuldan toz parçacıklarının püskürtülmesi .....	21
Şekil 3.12. Sıcaklık değişimini incelemek için x ekseninde ölçüm alınan kesitler ...	22
Şekil 3.13. Sıcaklık değişimini incelemek için z ekseninde ölçüm noktaları .....	22
Şekil 3.14. Deneysel çalışmaların kurulumu .....	23
Şekil 3.15. Tarama kesiti.....	23
Şekil 4.1. 1400 W Lazer gücü, 9 mm/s tarama hızı, 7.45 g/min toz besleme parametreleri ile tek katmanlı tarama simülasyonu .....	25
Şekil 4.2. Taguchi deney tablosuna uygun tek katmanlı tarama çalışmaları .....	28
Şekil 4.3. Tek katman taramaya ait yükseklik değerinin analiz sonuçları ile deneysel çalışma sonuçlarının kıyaslanması.....	30
Şekil 4.4. Tek katman taramaya ait genişlik değerinin analiz sonuçları ile deneysel çalışma sonuçlarının kıyaslanması.....	31
Şekil 4.5. Tek katman taramaya ait derinlik değerinin analiz sonuçları ile deneysel çalışma sonuçlarının kıyaslanması.....	32
Şekil 4.6. SED'in yükseklik üzerindeki etkileri.....	33
Şekil 4.7. SED'in genişlik üzerindeki etkileri.....	33
Şekil 4.8. SED'in derinlik üzerindeki etkileri.....	34
Şekil 4.9. SED'in dilution üzerindeki etkileri.....	34
Şekil 4.10. SED'in genişlik/derinlik oranı üzerindeki etkileri.....	35
Şekil 4.11. PFD'nin yükseklik üzerindeki etkileri .....	35
Şekil 4.12. PFD'nin genişlik üzerindeki etkileri.....	36
Şekil 4.13. PFD'nin derinlik üzerindeki etkileri .....	36
Şekil 4.14. PFD'nin dilution üzerindeki etkileri .....	37
Şekil 4.15. PFD'nin genişlik/derinlik oranı üzerindeki etkileri .....	37

Şekil 4.16.	Tek katman taramaya ait yükseklik değerinin matematiksel regresyon modeli ile deneysel çalışma sonuçlarının kıyaslaması .....	39
Şekil 4.17.	Tek katman taramaya ait genişlik değerinin matematiksel regresyon modeli ile deneysel çalışma sonuçlarının kıyaslaması .....	40
Şekil 4.18.	Tek katman taramaya ait derinlik değerinin matematiksel regresyon modeli ile deneysel çalışma sonuçlarının kıyaslaması .....	41
Şekil 4.19.	x eksenindeki kesitler , $x=-1\text{mm}$ .....	45
Şekil 4.20.	$x = -1\text{mm}$ kesitindeki tüm analizlerin sıcaklık dağılımı .....	46
Şekil 4.21.	$x = -1\text{mm}$ kesitindeki 1300W için sıcaklık dağılımı.....	47
Şekil 4.22.	$x = -1\text{mm}$ kesitindeki 1400W için sıcaklık dağılımı.....	48
Şekil 4.23.	$x = -1\text{mm}$ kesitindeki 1500W için sıcaklık dağılımı.....	49
Şekil 4.24.	x eksenindeki kesitler , $x=-1.2\text{mm}$ .....	49
Şekil 4.25.	$x = -1.2\text{ mm}$ kesitindeki tüm analizlerin sıcaklık dağılımı .....	50
Şekil 4.26.	$x = -1.2\text{ mm}$ kesitindeki 1300W için sıcaklık dağılımı.....	51
Şekil 4.27.	$x = -1.2\text{ mm}$ kesitindeki 1400W için sıcaklık dağılımı.....	52
Şekil 4.28.	$x = -1.2\text{ mm}$ kesitindeki 1500W için sıcaklık dağılımı.....	53
Şekil 4.29.	x eksenindeki kesitler , $x=-1.4\text{mm}$ .....	53
Şekil 4.30.	$x = -1.4\text{ mm}$ kesitindeki tüm analizlerin sıcaklık dağılımı .....	54
Şekil 4.31.	$x = -1.4\text{ mm}$ kesitindeki 1300W için sıcaklık dağılımı.....	55
Şekil 4.32.	$x = -1.4\text{ mm}$ kesitindeki 1400W için sıcaklık dağılımı.....	56
Şekil 4.33.	$x = -1.4\text{ mm}$ kesitindeki 1500W için sıcaklık dağılımı.....	57
Şekil 4.34.	$x=-1.4\text{mm}$ ile $x=-1\text{mm}$ kesitleri arasında soğuma miktarı.....	58
Şekil 4.35.	$z=0.045\text{mm}$ noktasında soğuma miktarı .....	59

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. L9 Taguchi'nin ortogonal dizisi .....	13
Çizelge 3.2. Tek katman tarama çalışmasında kullanılan parametreler ve seviyeleri .....	14
Çizelge 3.3. L9 Taguchi'nin tablosuna parametre ve seviyelerinin yerleştirilmesi .....	14
Çizelge 3.4. 316L toz malzemesinin kimyasal kompozisyonu .....	15
Çizelge 3.5. 316L ve C1050 malzemelerinin sınılaşma ve katılaşma sıcaklıkları.....	17
Çizelge 4.1. Tarama yüksekliği, genişliği ve derinliği için analiz görselleri.....	26
Çizelge 4.2. Deneysel çalışmalardan elde edilen tarama kesitlerinin optik mikroskop altındaki görüntüleri.....	29
Çizelge 4.3. Yükseklik değeri için ANOVA'dan elde edilen sonuçlar .....	42
Çizelge 4.4. Genişlik değeri için ANOVA'dan elde edilen sonuçlar .....	42
Çizelge 4.5. Derinlik değeri için ANOVA'dan elde edilen sonuçlar .....	43
Çizelge 4.6. $y=0$ mm kesitinde taramanın sıcaklık dağılımı.....	44

## 1. GİRİŞ

Teknolojideki gelişim, insanın ihtiyaçlarının karşılanmasındaki beklentilerine paralel olarak hızla artmaktadır. Beklentilerin karşılanmasında, teknolojik gelişimin insanlığa sağladığı imkanlar önemli rol oynamaktadır. Teknolojik gelişmenin temelindeki önemli unsurlarından biri de imalat ve üretilebilirliktir. Bugüne kadar metal parça imalatı üzerine yapılan araştırmalarda, üretilebilirlik kısıtları dahilinde iyileştirme, geliştirme ve yenilik araştırmaları yapılmıştır. Bu alandaki en önemli gelişme, üretilebilirlik kısıtlarının ortadan kaldırılması çabasıdır. Üretilebilirlik kısıtlamalarını ortadan kaldırmak için yapılan çalışmalarda, Eklemeli Üretim (EÜ) yöntemleri öne çıkmaktadır.

Eklemeli Üretim yönteminin temeli, birbiri üzerine kat kat malzeme eklemeye dayanmaktadır. Bu yöntemin amacı, geometrik karmaşıklık nedeniyle geleneksel imalat yöntemleriyle üretilemeyen parçaları üretmek için üretilebilirlik sınırlamalarını ortadan kaldırmaktır. Ayrıca özel amaçlara uygun ürünler geliştirmek, üretim prosesinde tasarım maliyetlerini azaltmak, kendi yöntemleri kapsamında üretim sürelerini nispeten kısaltmak ve bu sayede rekabet gücünü artırmaktır.

Doğrudan enerji biriktirme (DED), EÜ çatısı altında bir eklemeli üretim sürecidir. DED işlemi için, metal tozu hammaddedir ve lazer ışını ısı kaynağıdır. İnert bir koruyucu gaz, toz partiküllerini çoklu toz besleme nozulleri aracılığıyla iletir. Lazer ışınından gelen ısı, alt tabakayı eritir ve bir eriyik havuzu oluşturur. Toz parçacıkları eriyik havuzuna beslenir ve erir. Bazı toz parçacıkları havada lazer ışını ile etkileşir ve faz dönüşümüne uğrar. Lazer ışını ilerledikçe, eriyik havuzu katılaşarak bir metal izi oluşturur. DED işlemindeki birincil işlem parametreleri, lazer gücü, lazer tarama hızı, toz besleme hızı, koruyucu gaz akış hızı ve lazer ışını çapını içerir. Proses parametrelerinin çeşitli kombinasyonları geometriyi, mikro yapıyı, mekanik özellikleri ve kusur oluşumunu etkiler.

Bu tez çalışmasında eklemeli üretim yöntemlerinden doğrudan enerji biriktirme (DED) için tek katmanlı bir tarama yapılması esnasında lazer gücü, tarama hızı ve toz besleme hızları parametrelerinin taramanın geometrik ölçüleri (yükseklik, genişlik, derinlik) sanal analizler yapılarak deneysel çalışmalarla kıyaslanmış ve sanal analiz sonuçlarında elde edilen sıcaklık dağılımları ve soğuma hızları değişen parametreler doğrultusunda incelenmiştir.

## 2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Eklemeli üretim (EÜ) teknolojileri, tasarım özgürlüğü sağlama, komponentleri birleştirme ve özelleştirme, talep üzerine üretim, ağırlık azaltma (Diegel, 2019) ve insan etkileşimini en aza indirme (Zhang, Jarosinski, Jung, & Zhang, 2018) yetenekleri nedeniyle önem kazanmaktadır.

Metal eklemeli üretim teknolojileri birçok fayda sunmaktadır (EPMA, 2019) :

- Konvansiyonel döküm ve makineyle işlemeye karşı daha yüksek tasarım serbestliği
- Kafes yapılı tasarımın kullanılmasıyla hafif yapılar
- Konvansiyonel üretim yöntemlerine göre 25 kata kadar daha az hammadde tüketimi
- Nihai ürünün şekil kabiliyeti, karmaşık parçaların tek bir adımda oluşturulmasına yardımcı olur, böylece kaynak gibi birleştirme işlemlerinin sayısı azalır
- Kalıplar ya da metal şekillendirme ve çıkarma aletleri gerektiren diğer konvansiyonel metalürji proseslerinin aksine alet gerekli değildir.
- Kısa üretim döngüsü süresi: karmaşık parçalar, eklemeli makinelerde birkaç saatte katmanlar halinde üretilebilir. Son işlemler (post-processing) dahil toplam döngü süresi genellikle birkaç gün ya da hafta kadardır ve çoğu kez birkaç aylık üretim süreleri gerektiren konvansiyonel metalürji süreçlerinden genellikle çok daha kısadır.
- Yüksek hassasiyet

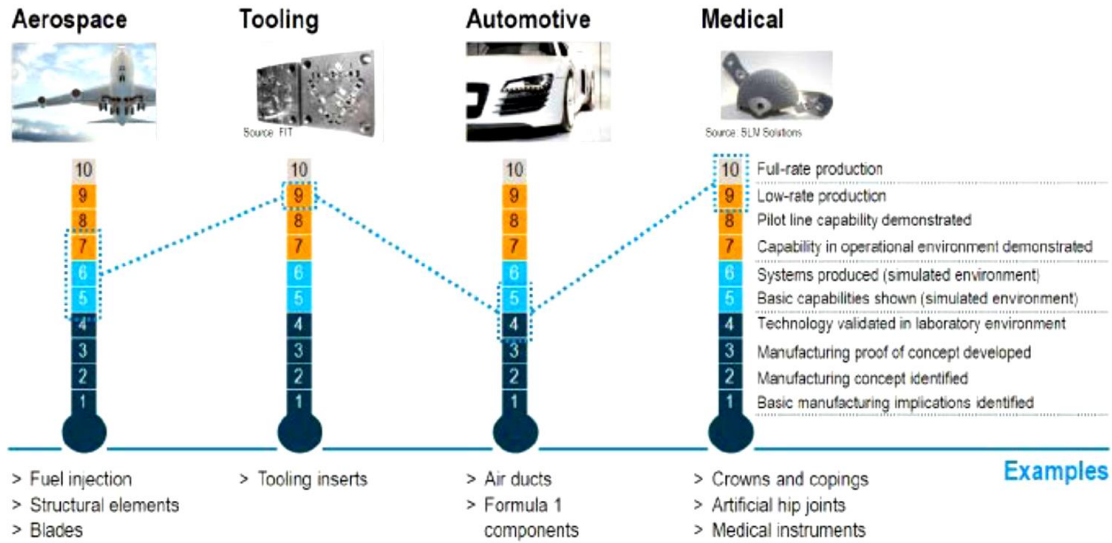
Faydaların yanı sıra eklemeli üretimin bazı kısıtları da mevcuttur. Bu kısıtları da göz önünde bulundurmak gerekir (EPMA, 2019):

- Parça büyüklüğü makine ölçüleri ile kısıtlıdır.
- Seri üretimden ziyade spesifik üretimler için uygundur. Üretim hızının artırılarak parça sayısının arttırılmasına yönelik teknolojik gelişmeler devam etmektedir.
- Kullanılacak üretim yöntemine göre parça tasarımında dikkat edilmesi gereken noktalar vardır.



- Malzeme seçimi konusunda birçok alaşım mevcut olmakla birlikte, kaynaklanabilir olmayan metaller eklemeli imalat ile işlenemez veya kaynaklanabilmesi için özel alaşımlar gerektirir.
- Malzeme özellikleri: eklemeli imalat ile üretilen parçalar, Z ekseninde (yapım yönü) anizotropi gösterme eğilimindedir .
- Bunun yanında, %99.9'a kadar yoğunluklara ulaşılabilir olmakla birlikte, iç yapıda poroziteler (gözenekler) olabilir. Mekanik özellikler döküm parçalara göre genellikle daha üstün nitelikli, ancak dövme parçalara göre genellikle daha düşük niteliklidir.

Eklemeli üretim teknolojilerinin uygulamaları, havacılık ve uzay, enerji, petrol ve gaz, otomotiv, tıp ve dişçilik, alet ve kalıp ve tüketici ürünleri dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde mevcuttur (Milewski, 2017). Özellikle medikal sektörde ve kalıp onarımları ile ilgili çalışmalarda eklemeli üretim çokça karşımıza çıkmaktadır (Şekil 2.1)



**Şekil 2.1.** Çeşitli endüstri sektörlerinin eklemeli üretime hazır olma seviyeleri (EPMA, 2019)

Eklemeli üretim prosesinde metal malzemeler özelinde sınıflandırma Şekil 2.2'de yer almaktadır. Metal malzemelerde eklemeli üretimin çeşidini belirleyen temel kategoriler malzemenin fazı, beslenen malzemenin formu, birleştirme işleminin nasıl yapıldığı, temel

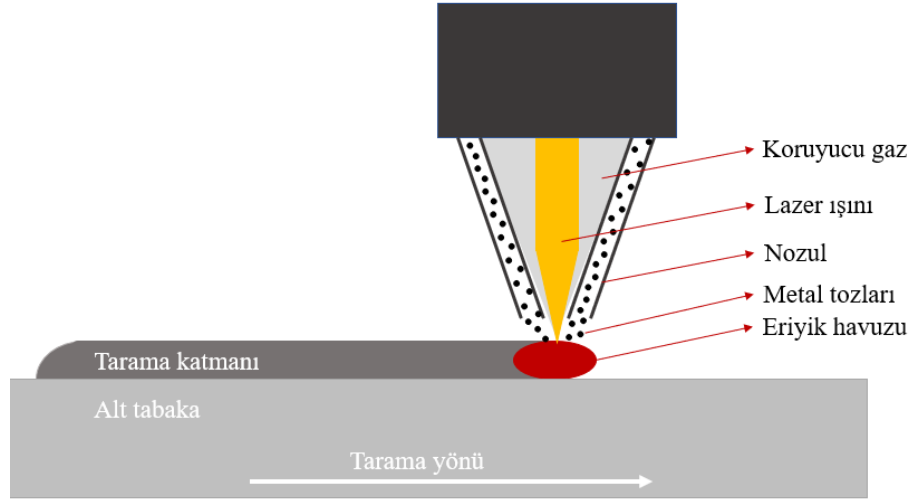
olarak hangi proses ile üretimin gerçekleştiği ve birleştirmede kullanılan kaynağın çeşididir.

Malzeme Türü	Metal				
Kaynağın Durumu	Eriyik durumda	Katı + Eriyik durumda	Katı durumda		
Malzeme Besleme	Filament / tel besleme	Toz besleme		Sac metal	
Malzeme Dağılımı	Nozul ile biriktirme	Toz Yatağı		Sac yığını	
Temel EÜ Prensipleri	Alt taş üzerine seçilmiş biriktirme	Toz yatağında seçilmiş kaynaştırma		Sacları kaynatma	
Kaynak Çeşidi	Elektron ışını	Lazer	Elektron ışını	Lazer	Ultrason
Üretim Yöntemi	<b>Doğrudan enerji biriktirme (DED)</b>		Toz yatağında kaynaştırma		Sac birleştirme

**Şekil 2.2.** Metal malzemeler için tek adımlı Eklemeli Üretim ilkelerine genel bakış (Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology, 2015)

Yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED), EÜ teknolojilerinin alt kategorilerinden biridir. DED süreçleri, hammadde malzemesini biriktirilirken eriterek bileşenleri üretir (Gibson, 2020). DED teknolojileri, net şekilli bileşenler üretmek, yüksek değerli bileşenleri onarmak ve yeniden üretmek, halihazırda mevcut parçalara yeni özellikler eklemek, işlevsel olarak derecelendirilmiş malzemelerde ve yüzey özelliklerini geliştirmek için kaplama uygulamalarında kullanılır.

Doğrudan enerji biriktirme (DED) işlemi için, metal tozu hammaddedir ve lazer ışını ısı kaynağıdır. İnert bir koruyucu gaz, toz partiküllerini çoklu toz besleme nozülleri aracılığıyla iletir (Şekil 2.3). Lazer ışınından gelen ısı, alt tabakayı eritir ve bir eriyik havuzu oluşturur. Toz parçacıkları eriyik havuzuna beslenir ve erir. Bazı toz parçacıkları havada lazer ışını ile etkileşir ve faz dönüşümüne uğrar. Lazer ışını ilerledikçe, eriyik havuzu katılarak bir metal izi oluşturur. DED işlemindeki birincil işlem parametreleri, lazer gücü, lazer tarama hızı, toz besleme hızı, koruyucu gaz akış hızı ve lazer ışını çapını içerir. Proses parametrelerinin çeşitli kombinasyonları geometriyi, mikro yapıyı, mekanik özellikleri ve kusur oluşumunu etkiler.



**Şekil 2.3.** DED prosesinin şematik gösterimi

Doğrudan enerji biriktirme (DED) prosesinin sağladığı faydalar (EPMA, 2019):

- Yeni topolojik özellik olanakları
- Parçaların özellikle büyük kalıpların yıpranan kesimlerinin kolaylıkla onarımları
- Mevcut parçalara aynı ya da farklı bir malzemeyle yeni işlevler eklenmesi
- Boyut sınırı yok (makine boyutu haricinde)
- En az döküm kadar iyi mükemmel metalürjik kalite
- Biriktirilen malzemenin kontrolü
- Eko yenilikçi proses: daha az malzeme kaybı, kalıp prosesi yok

Eklemeli üretim kullanılarak metalik parçaların üretimi, havacılık, savunma ve tıp endüstrilerinde ihtiyaç duyulan gelişmiş mekanik ve malzeme özelliklerine yönelik artan talepleri karşılamak için hızla büyüyor. Döküm ve frezeleme gibi geleneksel üretim süreçleriyle karşılaştırıldığında, EÜ süreçleri daha yüksek tasarım özgürlüğüne ve daha az malzeme israfına sahiptir. Ancak eklemeli imalat ile kaliteli parça üretimi, özellikle lazer tabanlı yöntemlerde farklı ölçeklerde gelişen problemler nedeniyle zor olmaktadır. Proses aşamasında bir lazer, Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) modelinden gelen verileri kullanarak üç boyutlu (3B) bir parça oluşturarak katman katman tozu eritmektedir. Eriyik havuzundaki akış, ısı transferi, Marangoni etkisi, kaynaşmamış parçacıklar vb. faktörlerle karmaşıklığı, nihai üründe kusurların oluşmasına neden olmaktadır. Yüksek enerji yoğunluğu, anahtar deliği gözenekliliği gibi kusurlar

yaratabilir ve tam anlamıyla erimemiş toz boşluklar yaratacaktır . Altta yatan fiziği anlamak, mikro yapı oluşumunun kontrolünü ve parça kusurlarının ortadan kaldırılmasını sağlayacaktır. Yüksek sıcaklıklar, yüksek tarama hızları ve eriyik havuzunun küçük hacmi nedeniyle, deneysel ölçümler güvenilir değildir ve elde edilmesi çok. Ek olarak, eklemeli imalat sırasındaki hızlı katılma oranları, mikro yapıların nicelleştirilmesini son derece zorlaştırmaktadır. Deneysel izlemede araştırmacıların EÜ sırasında termal haritaları analiz etmelerine izin veren bazı teknolojik gelişmeler olmuştur, ancak bunlar çok pahalıdır. EÜ işlemi için bilgisayar ve sayısal simülasyonları, katılma hızı, termal gradyan, soğutma hızı ve nihayetinde eriyik havuzundaki tane yapısını incelemek ve kontrol etmek için uygun bir alternatiftir (Magana, Yoshioka, Eshraghi, & Allu, 2022).

DED prosesinde parametreler iki grupta incelenmektedir (Poyraz & Kuşhan, 2018). Bu gruplar lazer ile ilgili parametreler ve geometri/tarama yolları ile ilgili parametrelerdir. Lazer ile ilgili parametreler arasında; lazer gücü, lazerin odak çapı ve tarama hızı bulunmaktadır. Geometri veya tarama yolları ile ilgili temel parametreler ise; inşa yönü, katman kalınlığı, tarama mesafesi ve lazer ışını ofset değeridir. Sabit lazer çapından çıkan lazer gücünün tarama hızına bağlı olarak tek katmanlı tarama üzerindeki etkisi Özgül Enerji Yoğunluğu (SED) ile hesaplanabilmektedir. Bu denklemde LP lazer gücünü, d lazer çapını ve SS tarama hızını ifade etmektedir:

$$SED = \frac{LP}{d \times SS} \quad (2.1)$$

Denklemden de görüleceği üzere, özgül enerji yoğunluğu, lazer gücü (LP) ile orantılı, tarama hızı (SS) ile ters orantılıdır (Poyraz & Kuşhan, 2018). Buradaki parametreler arasında lazer gücü, kullanılan katmanlı imalat tezgâhının en yüksek gücü ile sınırlıdır ve bu anlamda kısıtlı bir değişiklik imkânına sahiptir. Benzer şekilde tarama mesafesinin değişiklik imkânı da sınırlıdır. Bu durumun temel sebebi ise tarama mesafesinin lazer odak çapından daha büyük olursa arada taranmayan bölgelerin kalması olarak açıklanabilir. Lazer odak çapı da yine tezgâhta kullanılan lazerin cinsi ve dalga boyu ile ilgili olduğu için tezgah üreticileri dışında değiştirilmesi çoğunlukla mümkün değildir. Üç değişkenli özgül enerji yoğunluğu eşitliğinde iki değişkenin sınırlı olarak düzenlenebilmesi, diğer değişkenin de optimum değeri bulunduktan sonra sabit kalmasına yol açmaktadır. Bunlar dışında, birim hacimdeki enerji yoğunluğunun

dördüncü bir değişkeni vardır ve bu katman kalınlığı ( $t$ ) değeridir. Bu değer eşitlikte paydaya eklenmektedir ve bu yönden bakıldığında katman kalınlığının arttığı durumlarda birim hacim için enerji girdisi azalacaktır. Katman kalınlığının belirli bir seviyenin üstünde kullanıldığı durumlarda, üretilen parçaların fiziksel (yoğunluk) ve mekanik (akma-çekme dayanımı, uzama) özelliklerinde düşüş tespit edilmiştir. Bunun ötesinde katman kalınlığının değiştirilmesinin enerji yoğunluğu dışında form hataları ve yüzey kalitesi gibi farklı konuları da etkileyeceği dikkate alındığında, bu parametrenin de proses açısından belirli sınırları geçmeyecek şekilde değiştirilebileceği sonucuna ulaşılmaktadır.

DED yöntemiyle üretilen bir komponentin kalitesi esas olarak proses parametrelerinden etkilenir. Bu nedenle optimum proses parametreleri iyi bir sonucun anahtarıdır. Lazer gücü, tarama hızı ve toz besleme hızı proseste değiştirilebilen temel parametrelerdir ve nihai ürün üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Yapılan araştırmalar neticesinde farklı işlem parametrelerinin etkisi incelendi ve tek katman tarama yüksekliğinin hemen hemen tüm işlem parametrelerinden etkilendiğini göstermiştir. Tarama genişliği esas olarak tarama hızından, lazer gücünden ve spot ölçülerinden etkilenmektedir (Miedzinski, 2017).

Boyut ve geometri (yükseklik, genişlik ve derinlik), tarama yolunun kalitesini belirlemede kritik öneme sahiptir. İstenen geometriyi elde etmek için proses parametrelerini optimize etmek gerekir. Tek katman tarama geometrilerini tahmin etmek için sayısal modeller, regresyon modelleri ve analitik modeller gibi farklı yöntemler kullanılmaktadır.

Bazı araştırmacılar tarama geometrisinin davranışını incelemek için sayısal modellemeler kullanmıştır. (Bayat, 2021), toz parçacıklarının hızlarının eriyik havuzu koşulları ve nihai hat geometrisi üzerindeki etkisini incelemek için DED işlemi için Finite Volume Method'a (FVM) dayalı bir multifizik sayısal model geliştirmiştir, toz parçacık dinamiklerini modellemiştir. Termal kamera ile yerinde izleme gerçekleştirirken, optik mikroskop kullanılarak incelemeler gerçekleştirilmiştir. Modellenen eriyik havuzu gelişimi, termal kamera tarafından görüntülenenele aynı eğilimi takip etmiştir. Simüle edilen tarama morfolojisinin de deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmüştür. (Lee, Nordin, Babu, & Farson, 2014), katılma koşulu ve eriyik havuzu oluşumu üzerindeki konveksiyon akışının etkisini anlamak için bir geçici 3D taşınım modeli kullanmıştır.

Simülasyon, Marangoni taşınımı nedeniyle en derin bölgenin katılma sınırının önünde eriyik havuzunun arkasında olduğunu göstermiştir. Çeşitli parametrelerde tahmin edilen tarama geometrisi deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. (Wang, Zhu, Fuh, Zhang, & Yan, 2020), tarama geometrisini tahmin etmek için FVM uygulayan bir toz ölçekli multifizik modeli kullanmıştır. Bu çalışmada simülasyon sonuçlarına dayanarak Gaussian Process Regression (GPR) modelini geliştirilmiştir. Sonuçlar, taramanın geometrik özellikleri için çoklu fizik simülasyonu ile deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu göstermiştir. (Ur Rehman, ve diğerleri, 2021), AISI 304 paslanmaz çelik malzeme kullanılarak tek katman taramanın DED prosesinde eriyik havuzunun akış davranışını modellemek için volume of fluid (VOF) ve ayrık eleman modelleme tekniklerini hesaba katan bir hesaplama modeli sunmuştur. Çalışmada analiz edilmiş katman geometrisi deneysel sonuçlarla ilişkilendirilmiştir. Deneysel çalışmalar ve simüle edilmiş sonuçlar kıyaslandığında sonuçların sadece %1-3 oranında saptığı görülmüştür. (Zhang, Lim, Tang, & Li, 2021) , DED prosesinde tarama formu ve eriyik havuzu oluşumunu simüle etmek için VOF yöntemini içeren bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği modeli önermiştir. Önerilen model, işlem sırasında eriyik havuzu davranışını ve kütle ilavesini doğru bir şekilde yansıtmıştır. Simüle edilmiş geometri, deneysel ölçümlerle karşılaştırıldığında iyi bir doğruluk göstermiştir.

Yapılan literatür araştırmaları neticesinde tarama geometrisinin davranışını incelemek için istatistikî regresyon analizlerinin yapıldığı görülmüştür. (Lee, Shin, Yoon, & Shim, 2017) , proses parametrelerinin tarama geometrisi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmada Response surface methodology (RSM) kullanılarak tarama geometrisini tahmin etmek için bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen model, tahmin edilen değerler ile deneysel veriler karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Hata payının %10'u geçmediği görülmüştür. (Liu, ve diğerleri, 2019), DED işlem parametrelerini optimize etmek için Taguchi yöntemini kullanmıştır. Çalışmada taramayı etkileyen en önemli parametreleri belirlemek için varyans analizi (ANOVA) gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan regresyon denklemi sonrasında öngörülen ve deneysel değerler arasındaki yüzde hatası %1'den az olduğu saptanmıştır. (Onwubolu, Davim, Oliveira, & Cardoso, 2007), DED prosesinde tarama açısını tahmin etmek üzere eksponansiyel bir model oluşturmak için RSM'yi kullanmıştır. (Davim, Oliveira, & Cardoso, 2008), deneysel sonuçlara dayanarak

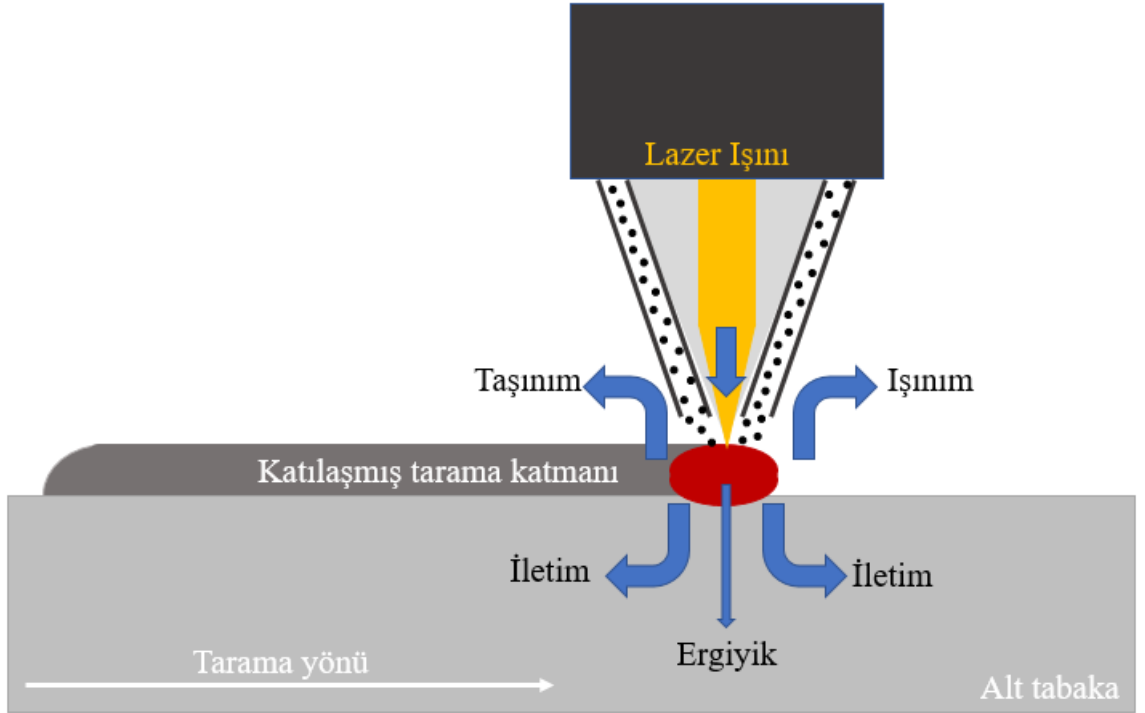
tarama geometrisi üzerindeki proses parametrelerinin etkisini tahmin etmek için Multiple Regression Analysis (MRA) modeli uygulamıştır. Tahmin edilen değerler deneysel olarak doğrulanmış ve doğrulama sonuçlarından tarama derinliği dışında yüksek doğruluk oranları elde edilmiştir.

Fizik tabanlı sayısal simülasyon modelleri, sınır koşullarını kullanır ve sonuçları elde etmek için belirli varsayımlarda bulunmaktadır. Bu modeller, model varsayımları fiziksel sistemle yakından eşleştğinde doğru sonuçlar elde edilmektedir. Tahmin edilen sonuçtaki hata, süreçteki değişkenlik nedeniyle artabilmektedir. Ancak deneysel-istatistiksel modeller, test edilmemiş sonuçları tahmin etmede süreç haritaları oluşturmak için doğrudan ölçümler kullanır. Doğrudan ölçümler için deneysel denemeler maliyetli ve zaman alıcıdır. Prosesin anlaşılmasına ve kontrol edilmesine yardımcı olabilecek fiziksel olgusuyla ilgili hiçbir bilgi mevcut değildir. Bu tez çalışması sayısal ve ampirik (istatistiksel) modeller kullanarak DED prosesinde tek katmanlı tarama geometrisini tahmin etmeyi amaçlamaktadır. Belirlenen parametreler ve seviyelerinin tarama üzerindeki etkilerini görebilmek ve parametre kombinasyonlarını geliştirmek için Taguchi yöntemi kullanılmıştır. DED prosesi için VOF yöntemine dayalı olarak çok fizikli bir sayısal model geliştirilmiştir. Deneysel olarak üretilen tek katmanlı tarama çalışmaları, kesilmiş ve kesitler mikroskop altında analiz edilmiştir. Tarama geometrisini tahmin etmek için matematiksel formüller türetilmiştir. Yüzde hata, multifizik ve istatistiksel modeller için öngörülen geometrilerin deneysel ölçümlerle karşılaştırılmasıyla hesaplanmıştır. ANOVA, en önemli proses parametrelerini ve bunların her bir geometrik değişkene katkısını belirlemek için kullanılmıştır.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Termal Model

Eklemeli üretim proseslerinde ısı kaynağı olarak kullanılan lazer, nozullardan püskürtülen tozu ve alt tablayı ertirir, eriyik havuzu oluşturur ve tablanın eriyen toz parçacıkları ile birleşmesini sağlar (Kundakcıoğlu, Lazoglu, Poyraz, Yasa, & Cizicioğlu, 2018). Bu esnada yüksek sıcaklık karşısında toz parçacıkları ve alt tabla katı halden sıvı faza geçmektedir. Lazerin ilerlemesi sonrasında katılaşma başlar. Isı, iletim ile ısı tranferi sayesinde eriyik bölgeden alt tabla içersine yayılır ve ısıdan etkilenen bölgenin (HAZ) oluşumunu sağlar. Tablanın üst kısmında, tek katman taramanın olduğu yerde taşınım ile ısı tranferi gerçekleştirerek soğuma sağlanır ve eriyik halden katı hale geçiş olur (Şekil 3.1)



Şekil 3.1. DED prosesinde termal şema

Alt tabaka lazer gücüne maruz kaldığında ısınır ve yüzeyden iç kısma doğru iletimle ısı tranferi gerçekleşir. Alt tabakanın sıcaklığı erime noktasından daha yüksek olduğunda, sıvı eriyik havuzu oluşmaya başlar. Eriyik havuzunun yüzeyinde yüksek sıcaklık gradyanı meydana gelir ve ortaya Marangoni kuvveti çıkar. Marangoni kuvveti sıvı metal akışını yönlendirir. Eriyik havuzu lazer noktası ile hareket ederken, erime ve katılaşma



süreçleri sürekli olarak gelişir, bu nedenle katı-sıvı faz bölgesindeki faz değişiminde gizli ısı, ısı transferi ve akış davranışları dikkate alınmalıdır. Üründen çevreye konveksiyon ve radyasyon yoluyla ısı transferi olmaktadır. Malzeme özellikleri (termo-fiziksel özellikler ve mekanik özellikler dahil) sıcaklığa bağlıdır. Eriyik havuzunun içerisinde izleme yapılamadığı için ısı transferi, kütle transferi ve momentum transferine dayanarak, temel bilgileri ortaya çıkarmak için termal modeller geliştirilebilir (Yan, ve diğerleri, 2018).

Hareketli lazer kaynağına sahip eklemeli üretim sistemlerinde ısı transferinin denklemi şu şekilde tanımlanabilir (Kundakcıoğlu, Lazoglu, Poyraz, Yasa, & Cizicioğlu, 2018):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q \quad (3.1)$$

Eklemeli üretimde konveksiyon ve radyasyon ile ısı transferleri için kullanılan denklemler (3.2) ve (3.3)'te yer almaktadır:

$$q_{con} = h(T - T_0) \quad (3.2)$$

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (3.3)$$

Bir malzemenin katı ve sıvı fazları arasındaki faz dönüşümü aşağıdaki denklemlerle elde edilebilir:

$$\rho = \theta \rho_{solid} + (1 - \theta) \rho_{liquid} \quad (3.4)$$

$$C_p = \frac{1}{\rho} (\theta \rho_{solid} C_{p,solid} + (1 - \theta) \rho_{liquid} C_{p,liquid}) + L \frac{da}{dT} \quad (3.5)$$

$$k = \theta k_{solid} + (1 - \theta) k_{liquid} \quad (3.6)$$

$$\alpha = \frac{(1-\theta)\rho_{liquid}-\theta\rho_{solid}}{\theta\rho_{solid}+(1-\theta)\rho_{liquid}} \quad (3.7)$$

Burada  $\theta$  faz değişimidir (katı = 0, sıvı = 1),  $L$  katıdan sıvıya faz değişiminin gizli ısısidir ve  $a$  kütle değişimidir.

Kütle, momentum ve enerji korunumu ifadeleri, Denklemler (3.8-3.10)'de ifade edildiği gibi eriyik havuzu bölgesini ve alt tablayı modellemek için kullanılmaktadır (Ur Rehman, ve diğerleri, 2021).

$$\nabla \vec{v} = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mu \nabla^2 \vec{v} + g [1 - \alpha(T - T_m)] g [1 - \alpha(T - T_m)] \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) h = \frac{1}{\rho} (\nabla \cdot k \nabla T) \quad (3.10)$$

Serbest yüzey üzerinde konveksiyon ve radyasyon ile ısı transferi denklemleri çözülürken erimiş havuzun yüzeyindeki buharlaşma göz ardı edilmemelidir. Sonuç olarak, ergiyik havuzun yüzeyindeki enerji denklemi şu şekilde ifade edilmektedir:

$$k \frac{\partial T}{\partial \bar{n}} + h_c (T - T_0) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4) = q \quad (3.11)$$

### 3.2. Taguchi ve ANOVA

Minimum deneysel denemeler gerçekleştirerek gerekli teknik bilgileri toplamak için deney tasarımı (DOE) gibi istatistiksel araçları kullanılmaktadır. Taguchi yöntemi, mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir DOE tekniğidir (Methods and formulas for Analyze Taguchi Design - Minitab. (n.d.). (C) Minitab, LLC. All Rights Reserved, 2019). Taguchi metodu robust deney tasarımı ile bir prosesin değişkenliğini azaltmayı amaçlamaktadır. Bu metodun genel amacı yüksek kaliteli düşük maliyetli ürünler ortaya çıkarmaktır. Taguchi ile proses performansını etkileyen farklı değişkenlerin ortalama değer (mean) ve varyansını (variance) nasıl değiştirdiği bulunmaktadır. Taguchi metodu “factorial design” daki gibi tüm olası kombinasyonları denemek yerine sadece bazı kombinasyonları deneyerek sonuca ulaşılır. Bu şekilde ürün kalitesini en çok etkileyen data kümesinin hangisi olduğu bulunur ve minimum sayıda deney yapılarak zaman ve kaynak tasarrufu yapılır. Taguchi metodu, değişken sayısı 3-50 arasında, değişkenler arası etkileşim çok az seviyede (ortogonal) ve az sayıda değişken ürün kalitesi üzerinde etkin iken en iyi sonucu verir.

Taguchi yöntemi için faktörler ve seviyeleri tanımlanır, yanıtlar elde edilerek deney tablosuna eklenir. Faktörler, DOE'de analiz edilen herhangi bir değişkendir. Seviyeler, her bir faktör için kullanılacak önceden tanımlanmış değerlerdir. DOE yanıtı, geliştirmekle ilgilendiğimiz ölçülebilir bir sonuçtur. Deneysel denemeleri en aza indirmek için tek katmanlı tarama prosesinde parametrelerin etkilerini görmek için deneysel çalışmalarda değiştirilebilecek 3 farklı faktör; lazer gücü, lazer tarama hızı, toz besleme hızı ve her bir parametre için de 3 farklı seviye belirlenerek 3x3'lük L9 Taguchi'nin ortogonal dizisi kullanılmıştır. (Çizelge 3.1)

**Çizelge 3.1.** L9 Taguchi'nin ortogonal dizisi

Deney Numarası	Faktör Seviyeleri		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Varyans analizi (ANOVA), genellikle bireysel faktörlerin katkı yüzdesini ve yanıt için en önemli faktörleri belirlemek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. ANOVA metodolojisi kullanılarak her bir çıktı için en etkili parametre tespit edilmiştir.

### 3.3. Proses Parametreleri

DED prosesinde, 316L toz malzemenin lazer ile ergitilerek tek katmanlı tarama çalışmasının sonuçlarını inceleyebilmek için proses parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreler deneysel çalışmalarda makine performansı ve özellikleri gözetilerek seçilmiştir. Lazer gücü, tarama hızı, toz besleme miktarı proses parametrelerini

oluşturmaktadır. Bu parametrelerin her biri için üç farklı seviye belirlenmiştir (Çizelge 3.2)

**Çizelge 3.2.** Tek katman tarama çalışmasında kullanılan parametreler ve seviyeleri

Parametreler	Parametre Seviyeleri		
	1	2	3
Lazer Gücü (W)	1300	1400	1500
Tarama Hızı (mm/s)	8	9	10
Toz Besleme Miktarı (g/dk)	5.59	6.52	7.45

Deneysel çalışmaların sayısını minimuma indirgeyerek optimum sonuçları elde etmek için bu üç parametre ve her bir parametre için 3 seviye Taguchi tablosuna yerleştirilmiştir (Çizelge 3.3).

**Çizelge 3.3.** L9 Taguchi'nin tablosuna parametre ve seviyelerinin yerleştirilmesi

Deney No	Faktör Seviyeleri		
	Lazer Gücü LP (W)	Tarama Hızı SS (mm/s)	Toz Besleme Miktarı PF (g/dk)
1	1300	8	5.59
2	1300	9	6.52
3	1300	10	7.45
4	1400	8	6.52
5	1400	9	7.45
6	1400	10	5.59
7	1500	8	7.45
8	1500	9	5.59
9	1500	10	6.52

### 3.4. 316L Toz Malzemesi ile Tek Katmanlı Sanal Analiz Çalışmaları

Doğrudan enerji biriktirme (DED) prosesi üzerine yapılan çalışmada, yığma işlemi sırasında hızlı erime ve katılaşma görülmektedir. DED, toz partikülleri-lazer etkileşimi, eriyik havuzu akışı, ısı transferi vb. gibi aynı anda meydana gelen çoklu fiziksel fenomenlere sahip karmaşık bir süreçtir (Wang, Zhu, Fuh, Zhang, & Yan, 2020). Bu

çalışmada FLOW-3D® yazılımı kullanılarak 316L paslanmaz çelik toz parçacıklarının tek katmanlı tarama yapılarak C1050 çelik tabla üzerinde biriktirme sürecini simule etmek için çok fizikli bir sayısal model geliştirilmiştir. Bu çalışma esnasındaki bazı kabuller:

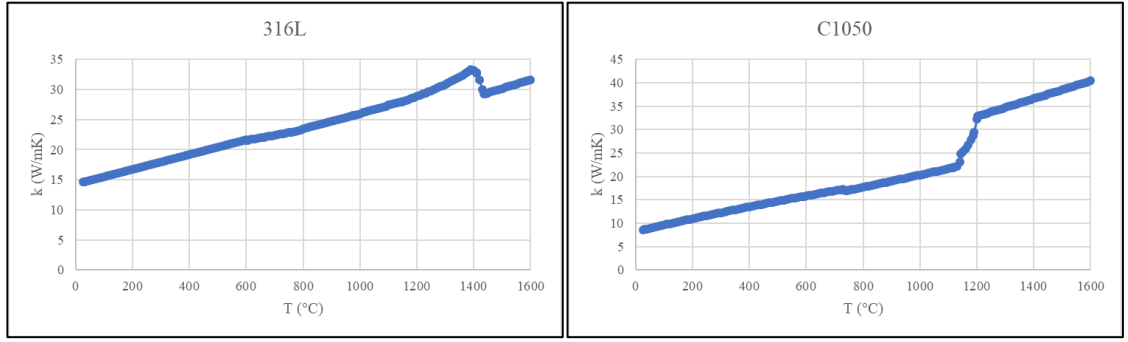
- Eriyik havuzundaki akışın sıkıştırılmaz olduğu varsayılır (Ur Rehman, ve diğerleri, 2021)
- Metal buharlaşması dikkate alınmaz (Ur Rehman, ve diğerleri, 2021)
- Nozullardan gönderilen toz partikül dağılımının Gaussian olduğu varsayılır (Zhang, Lim, Tang, & Li, 2021)
- Başlangıç sıcaklığı 298K ve basınç 1 atm olarak alınmıştır.
- Koruyucu gaz olarak kullanılan Ar gazı durağan olarak modellenmiştir.

Bu çalışmada taban plakası olarak C1050 malzeme, toz malzeme olarak 316L malzeme kullanılmıştır. 316L toz malzeme, östenitik, nikel-krom paslanmaz çeliktir. Yüksek sıcaklıklarda yüksek darbe direnci ve çekme mukavemeti sergilemekte ve mükemmel korozyon ve erozyon koruması sağlamaktadır. Bu malzeme petrol, gaz ve denizcilik endüstrilerindeki uygulamalar için yüksek talep görmektedir. İçeriğinde yüksek oranda silikon içermesi eklemeli imalat prosesinde 316L malzemesini tercih edilir kılmaktadır. 316L toz parçacıklarının çapları 45-106 µm arasında değişmekte olup analiz çalışmalarında ortalama 80 µm olarak alınmıştır. 316L tozunun kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.4'te yer almaktadır.

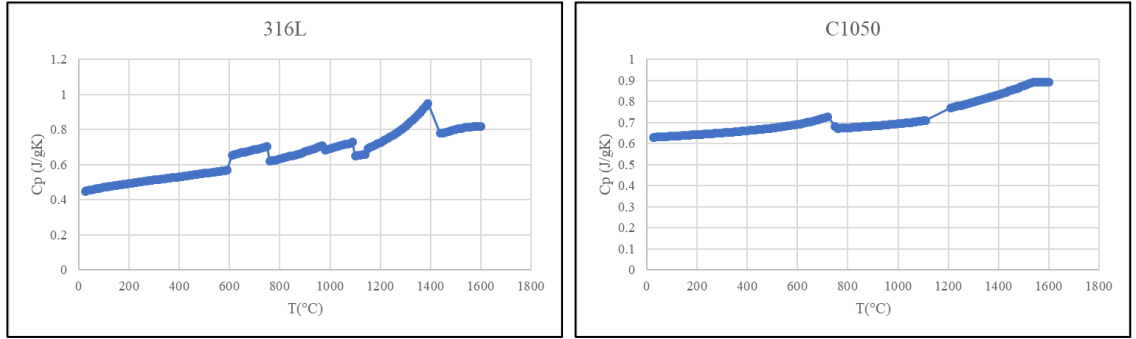
**Çizelge 3.4.** 316L toz malzemesinin kimyasal kompozisyonu

316L	Kimyasal Kompozisyon							
	Fe	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	C	Other
Dengeli		17	12	2,5	2,3	1	0,03	≤0,5

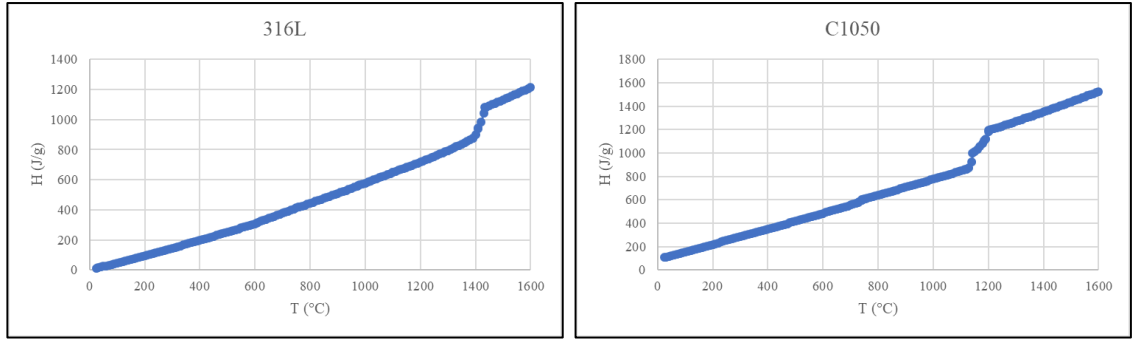
Analiz çalışmalarında püskürtülen 316L toz parçacıkları ve C1050 alt tabla için malzemelerin ısı iletim katsayısı (Şekil 3.2), özgül ısı (Şekil 3.3), özgül entalpi (Şekil 3.4), yoğunluk (Şekil 3.5), viskozite (Şekil 3.6) özellikleri 25 °C – 1600 °C aralığında sıcaklığa bağlı olarak JmatPro yazılımından alınarak FLOW-3D® programında malzeme bilgisi olarak tanımlanmıştır. Koruyucu gaz olarak argon gazı kullanılmıştır.



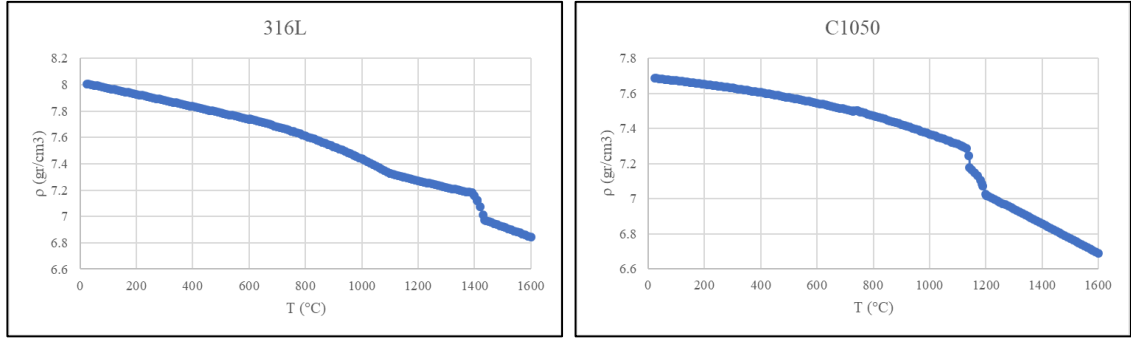
**Şekil 3.2.** 316L ve C1050 malzemelerinin ısı iletim katsayılarının 25 °C – 1600 °C aralığında sıcaklığa bağlı değişimi



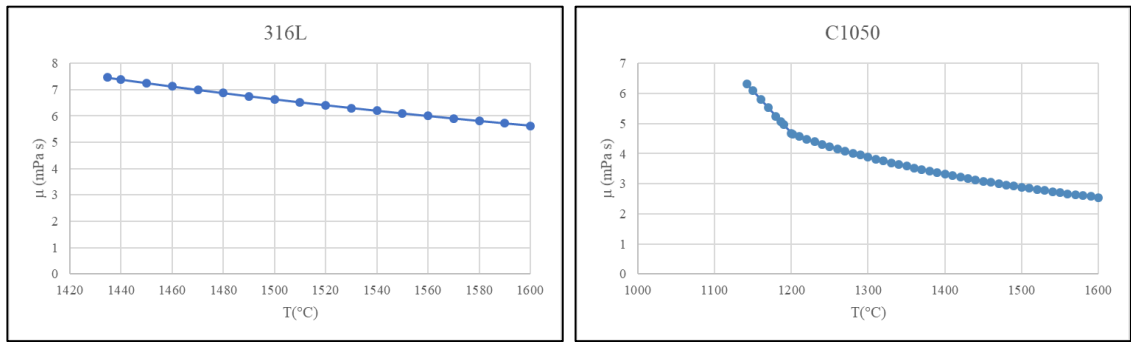
**Şekil 3.3.** 316L ve C1050 malzemelerinin özgül ısılarının 25 °C – 1600 °C aralığında sıcaklığa bağlı değişimi



**Şekil 3.4.** 316L ve C1050 malzemelerinin entalpi değerlerinin 25 °C – 1600 °C aralığında sıcaklığa bağlı değişimi



**Şekil 3.5.** 316L ve C1050 malzemelerinin yoğunluğunun 25 °C – 1600 °C aralığında sıcaklığa bağlı değişimi



**Şekil 3.6.** 316L ve C1050 malzemelerinin viskozitesinin 1000 °C – 1600 °C aralığında sıcaklığa bağlı değişimi

Tam sıvılaşma sıcaklığı bir malzemenin tamamen sıvı olduğu sıcaklığı ve termodinamik dengedeki eriyik ile kristallerin birlikte bulunabileceği maksimum sıcaklığı belirtir. Tam katılaşma sıcaklığı ise bir malzemenin tamamen katı olduğu sıcaklığı ve termodinamik dengede kristallerle bir eriyiğin bir arada bulunabileceği minimum sıcaklığı belirtir. 316L toz malzeme ve C1050 alt tabla çeliği için tam katılaşma ve sıvılaşma sıcaklıkları Çizelge 3.5'te yer almaktadır.

**Çizelge 3.5.** 316L ve C1050 malzemelerinin sıvılaşma ve katılaşma sıcaklıkları

Malzemeler	316L	C1050
Tam sıvılaşma sıcaklığı (°C)	1390.3	1600
Tam katılaşma sıcaklığı (°C)	1099.6	1486.6

Eriyik bölgelerindeki sıvı akışını simüle etmek ve sıcaklık dağılımını belirlemek için korunum denklemlerinin çözülmesi gerekmektedir. Erimiş havuz, Newtonian

sıkıştırılmaz bir sıvı olduğu varsayılan erimiş metal ile FLOW-3D® 'de simüle edilmiştir. Akışın ayrıca laminer ve viskoz olduğu varsayılmıştır. Simülasyon alanı içinde karışmayan iki faz vardır: erimiş metal ve ortam havası. VOF yöntemi, faz arayüzünü izlemek için kullanılır ve iki fazlı bir akış için kütle dengesini ifade etmektedir (Magana, Yoshioka, Eshraghi, & Allu, 2022).

Eriyik havuzu sıcaklığının 1600 °C'yi aştığı çok yüksek enerji yoğunlukları için sayısal simülasyon modelinin doğruluğu düşebileceğinden daha yüksek doğruluk için simülasyon modeline ek bilgiler girilmiştir. Volume of Fluid (VOF) modeli, serbest yüzey aracılığıyla elde edilmiştir (Lee Y. &, 2016). Bu model eriyik havuzu şeklini ve boyutunu simüle etmek için kullanılmaktadır. VOF yöntemi aşağıdaki denklemle ifade edilir:

$$\frac{\partial V_F}{\partial t} + \nabla(\vec{v} \cdot V_F) = 0 \quad (3.12)$$

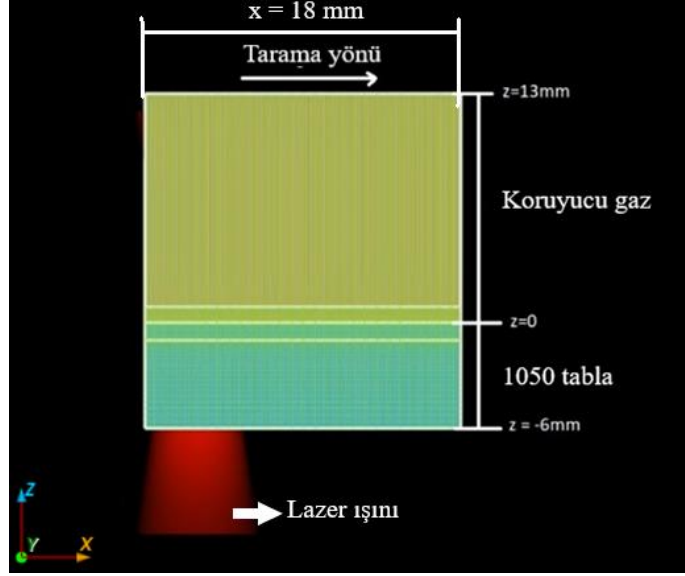
$V_F = 0$ , hücre içerisinde sıvı olmadığını gösterir.  $V_F = 1$ , hücrenin tamamen sıvı ile dolu olduğunu göstermektedir.

Lazer ışını, enerji yoğunluğu için bir "Gauss" dağılımına sahiptir. Sabit tarama hızında enerji yoğunluğu (Ur Rehman, ve diğerleri, 2021):

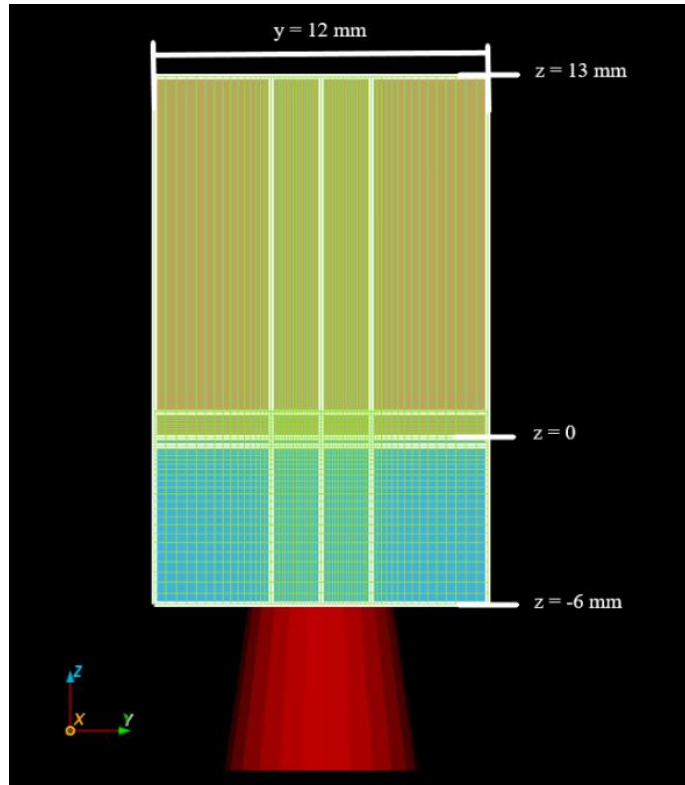
$$q = \frac{2P}{\pi R_b^2} \exp \left[ -2 \frac{(x-vt-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{R_b^2} \right] \quad (3.13)$$

DED prosesi, FLOW-3D® yazılımında üç boyutlu bir kartezyen sistemde simüle edilmiştir. Hesaplama alanının boyutu, Şekil 3.7'de ve Şekil 3.8'de gösterildiği gibi uzunluk x genişlik x yükseklik 18 mm x 12 mm x 19 mm ölçülerinde olacak şekilde modellenmiştir. Mavi ile gösterilen kısım C1050 malzemesinden oluşan alt tablayı, sarı ile gösterilen kısım ise koruyucu gaz tabakasını göstermektedir.





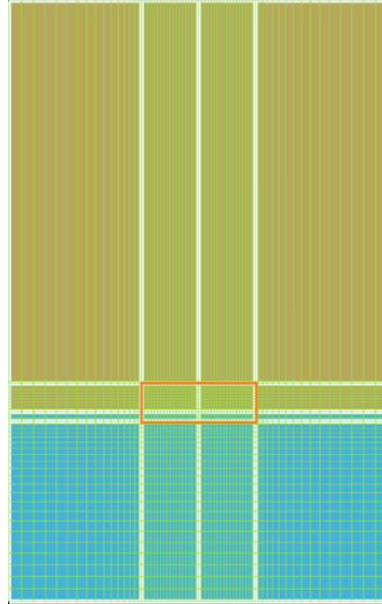
Şekil 3.7. XZ düzleminde mesh bloğu



Şekil 3.8. YZ düzleminde mesh bloğu

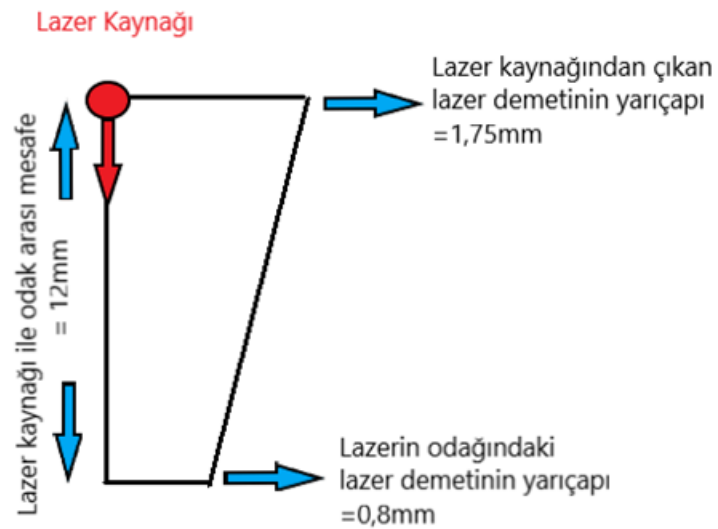
Mesh bloğu oluşturulurken 0.4 mm ölçülerinde mesh atılmıştır. Lazer ışınlarına maruz kalarak yığılan toz partiküllerinin bulunduğu kısma 0.1 mm'lik daha yoğun mesh atarak

toplamda 547822 mesh ile analizler hazırlanmıştır (Şekil 3.9). Odak bölgesine daha sık mesh atılmasının sebebi eriyik havuzunun daha iyi incelenebilmesi içindir.



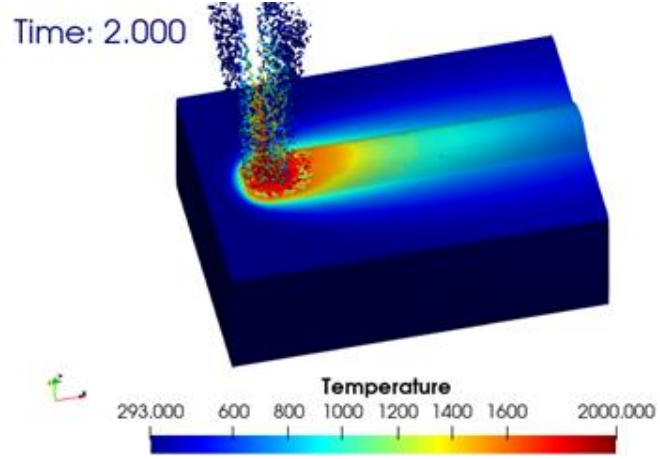
Şekil 3.9. Yoğunlaştırılan mesh bölgesi

Metal tozları lazer kafasının etrafında yer alan 2mm çapındaki çıkış noktalarına sahip 3 nozuldan püskürtülerek lazer ışınına maruz kalmaktadır. Analiz çalışmalarında lazeri simüle edecek temel olarak ölçüler Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



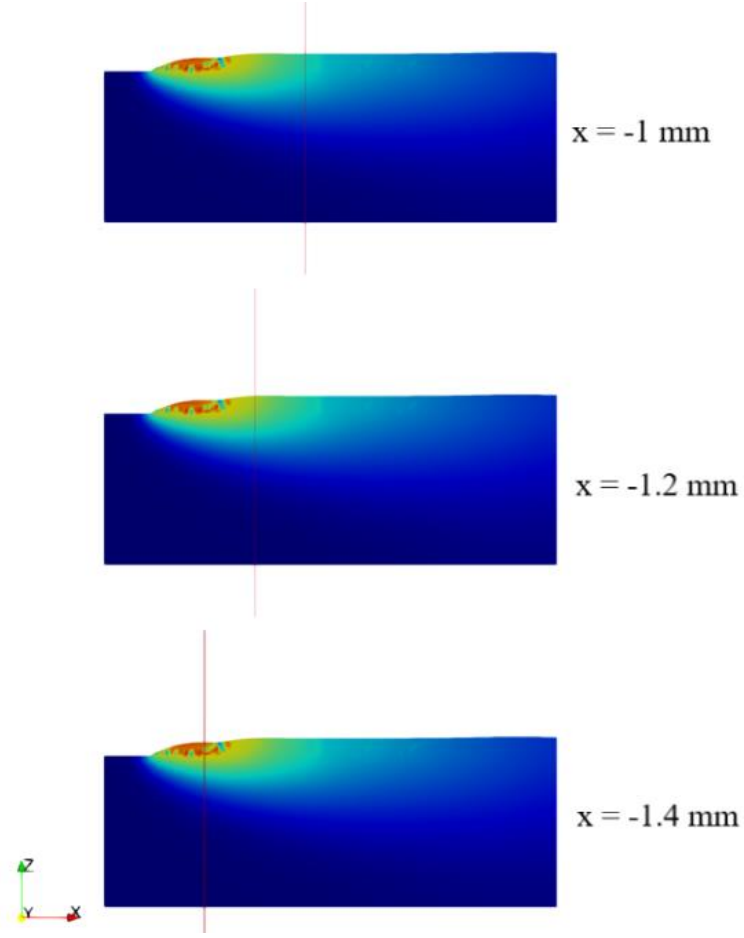
Şekil 3.10. Lazer demetinin çıkıştaki ve odaktaki yarıçapları

Analiz için mesh bloğu oluşturulup, lazer tanımlaması yapılıp, toz partikülleri tanımlandıktan sonra analiz koşturılmaya başlandı. Şekil 3.11 analiz esnasında toz parçacıklarının 3 nozuldan püskürtülmesi esnasında lazer ışını ile ergimesi sonrasında alt taş üzerinde meydana gelen tek katman taramasının 2 sn sonunda sıcaklık dağılımını göstermektedir.



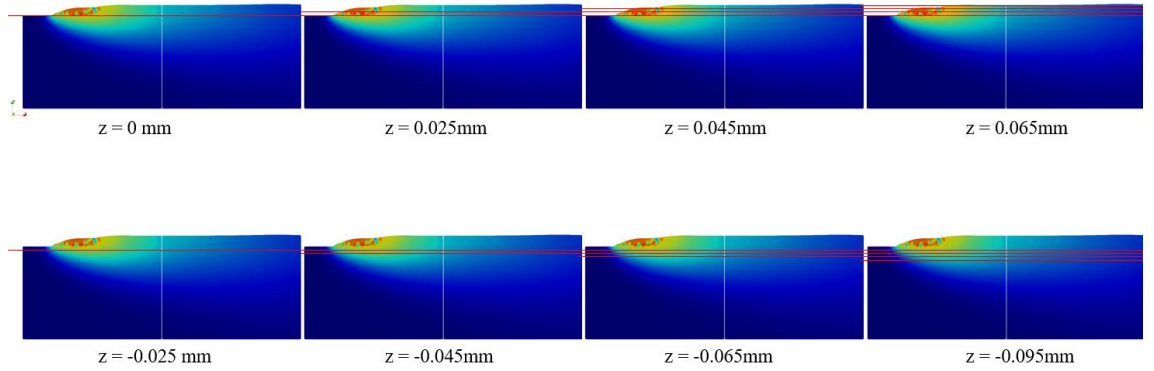
**Şekil 3.11.** 3 nozuldan toz parçacıklarının püskürtülmesi

Sıcaklık değişimlerini inceleyip parametrelerin nasıl etkilediklerini kıyaslayabilmek için elde edilen tarama analizleri x ekseninde -1mm, -1.2mm ve -1.4mm olmak üzere üç farklı kesite bölünmüş ve bu kestilerden ölçümler alınmıştır (Şekil 3.12).



**Şekil 3.12.** Sıcaklık değişimini incelemek için x ekseninde ölçüm alınan kesitler

Taramanın en üst noktasından alt tablanın ısıdan etkilenen bölgesine kadar 8 farklı noktadan ölçümler alınmıştır. Her bir x ekseninden alınan kesit z eksenini doğrultusunda 0.065mm, 0.045mm, 0.025mm, 0mm, -0.025mm, -0.045mm, -0.065mm ve -0.095mm noktalarından sıcaklık ölçümleri alınarak kıyaslamalar yapılmıştır (Şekil 3.13).



**Şekil 3.13.** Sıcaklık değişimini incelemek için z ekseninde ölçüm noktaları

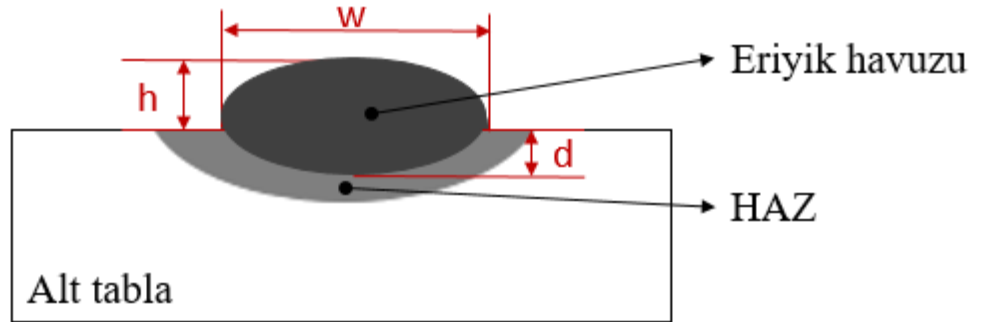
### 3.5. 316L Toz Malzemesi ile Tek Katmanlı Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmalar Coşkunöz Holding bünyesinde yapılmıştır. Bu çalışmalarda Erlas (Almanya) tarafından üretilen ERLASER HARD + CLAD sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Deneysel çalışmaların kurulumu

Taramalardan TS EN ISO 17639 standardına uygun kesitler alınarak optik mikroskop altında incelemeye alınmış, tarama genişliği, yüksekliği ve derinliği TS EN ISO 5817 standardına uygun olarak ölçülmüştür. Koyu gri renkli bölge eriyik havuzunu, açık gri renkli bölge ısıdan etkilenen bölgeyi (HAZ) gösterir (Şekil 3.15).  $w$  tarama genişliğini,  $h$  tarama yüksekliğini,  $d$  tarama derinliğini ifade etmektedir.



Şekil 3.15. Tarama kesiti

Yükseklik (h) ve genişlik (w) ölçüleri maksimum noktalardan alınırken derinlik (d) ölçüsü ise eşit aralıklı 5 farklı noktadan alınıp ortalaması alınmıştır. Tek katmanlı taramanın geometrik özelliklerinin yanı sıra özgül enerji yoğunluğu (SED), toz besleme yoğunluğu (PFD) ve dilution (D) değerleri hesaplanmıştır (Lee, Shin, Yoon, & Shim, 2017). Sabit lazer çapından çıkan lazer gücünün, tarama hızına bağlı olarak tek katmanlı tarama üzerindeki etkisi Özgül Enerji Yoğunluğu (SED) ile hesaplanabilmektedir (3.14). Bu denklemde LP lazer gücünü, d lazer çapını ve SS tarama hızını ifade etmektedir. Toz besleme miktarının tarama hızına bağlı olarak tek katmanlı tarama üzerindeki etkisi Toz Besleme Yoğunluğu (PFD) ile hesaplanabilmektedir (3.15). Bu denklemde PF toz besleme miktarını, d lazer çapını ve SS tarama hızını ifade etmektedir.

$$SED = \frac{LP}{(d \times SS)} \quad (3.14)$$

$$PFD = \frac{PF}{(d \times SS)} \quad (3.15)$$

$$D (\%) = \left( \frac{d}{d+h} \right) \times 100 \quad (3.16)$$

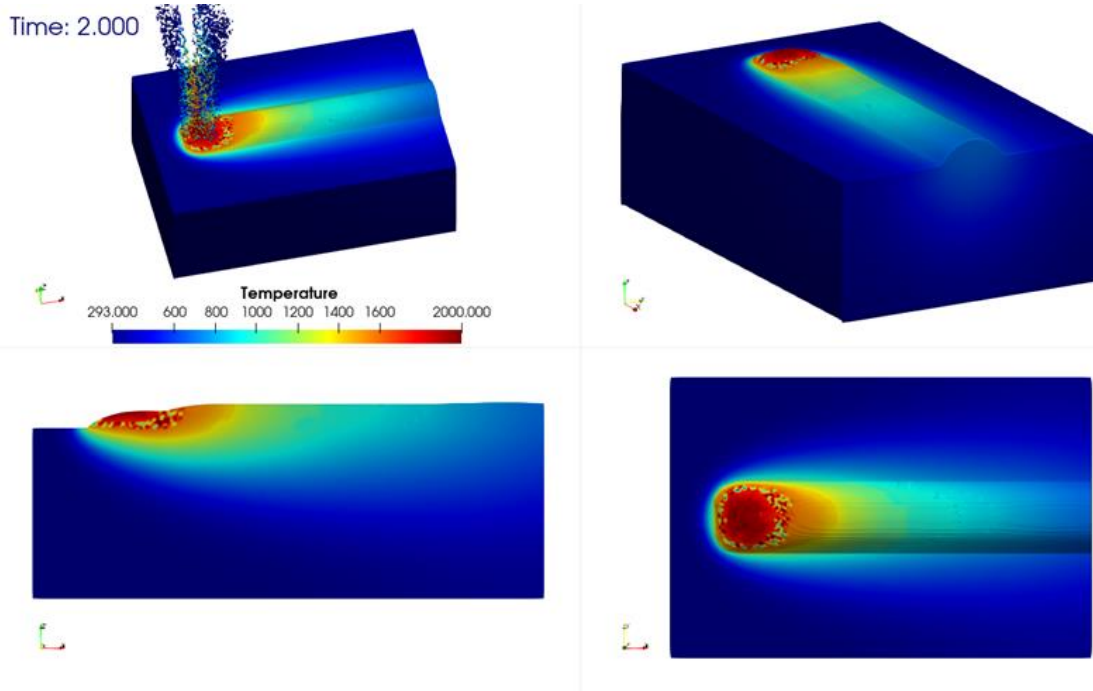
Dilution diğer ismi ile kaynak nüfuziyeti, yapılan taramanın ne kadar alt tablaya nüfus ettiğini belirlemek için kullanılmaktadır (3.16). Dilution değerinin %10-15 aralığında olması uygun kabul edilmektedir.

#### 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Lazer gücü 1300-1400-1500W, tarama hızı 8-9-10 mm/s, toz besleme hızı 5.59-6.52-7.45 g/dk parametreleri ile gerçekleştirilen sanal analizler ve yapılan üretimler birbirleri ile kıyaslanmıştır.

Tarama kesitinin şekli, yüzey geriliminin etkisinden dolayı bir yay şeklindedir (Wang, Zhu, Fuh, Zhang, & Yan, 2020). Analiz sonuçlarında elde edilen kesitte en fazla derinlik ölçümlerinde dalgalanmalar gözlemlenmiştir. Bu dalgalanmalar, termal ve optik kararsızlıklar nedeniyle düzensiz toz akışı veya lazer gücü dalgalanmalarına bağlanabilir (Lee, Shin, Yoon, & Shim, 2017).

FLOW-3D® yazılımı kullanılarak her bir parametre ve seviyeleri için tek katlı tarama analizleri yapılmıştır. Şekil 4.1, yapılan analizlerden bir tanesine ait 2 sn sonunda elde edilen taramanın sıcaklığa bağlı olarak değişimini göstermektedir.



**Şekil 4.1.** 1400 W Lazer gücü, 9 mm/s tarama hızı, 7.45 g/min toz besleme parametreleri ile tek katmanlı tarama simülasyonu

Her bir analiz koşulu ile elde edilen taramalar  $x=0.4\text{mm}$ 'den kesit alınarak tarama yüksekliği, genişliği ve derinliği ölçülmüştür . 9 analiz koşulu için de kesit görüntüleri Çizelge 4.1'de yer almaktadır.

**Çizelge 4.1.** Tarama yüksekliği, genişliği ve derinliği için analiz görselleri

Deneý No	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Toz Besleme Miktarı (g/dk)	Sanal Analiz Görselleri
1	1300	8	5.59	
2	1300	9	6.52	
3	1300	10	7.45	
4	1400	8	6.52	

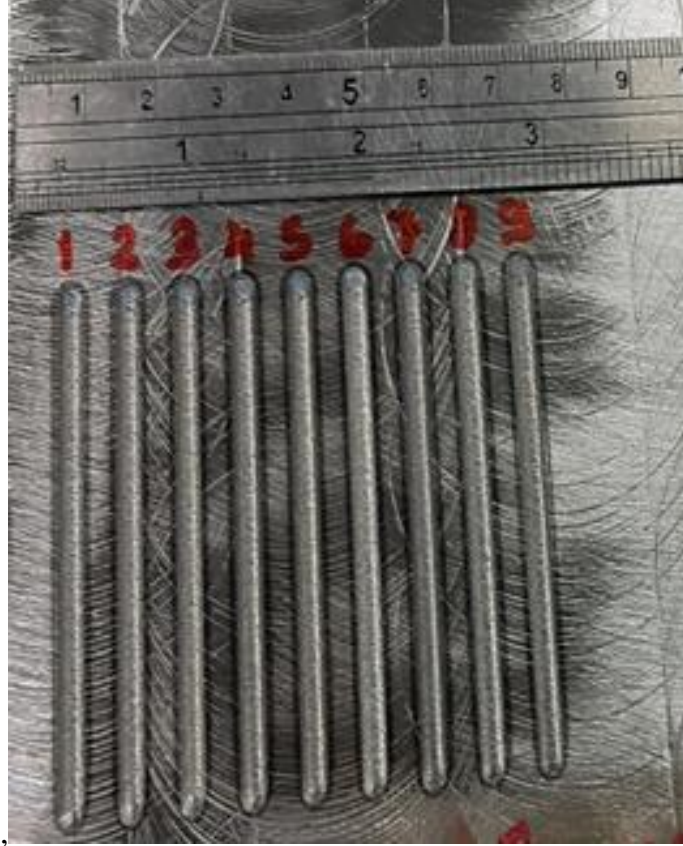


**Çizelge 4.1.** Tarama yüksekliği, genişliği ve derinliği için analiz görselleri (Devamı)

5	1400	9	7.45	
6	1400	10	5.59	
7	1500	8	7.45	
8	1500	9	5.59	
9	1500	10	6.52	

Çizelge 4.1'deki kesitler malzemenin eriyik hal ile katı haldeki durumlarını göstermektedir. Skalanın kırmızı tarafına doğru gidildikçe malzemenin sıvı fazda, mavi tarafa doğru gidildikçe katı fazda olduğunu ifade etmektedir.

Analizlerle paralel olarak aynı deney düzenekleri kullanılarak tek katmanlı üretimler yapılmıştır. 9 adet tek katmanlı üretim sonuçları Şekil 4.2'de yer almaktadır.



**Şekil 4.2.** Taguchi deney tablosuna uygun tek katmanlı tarama çalışmaları

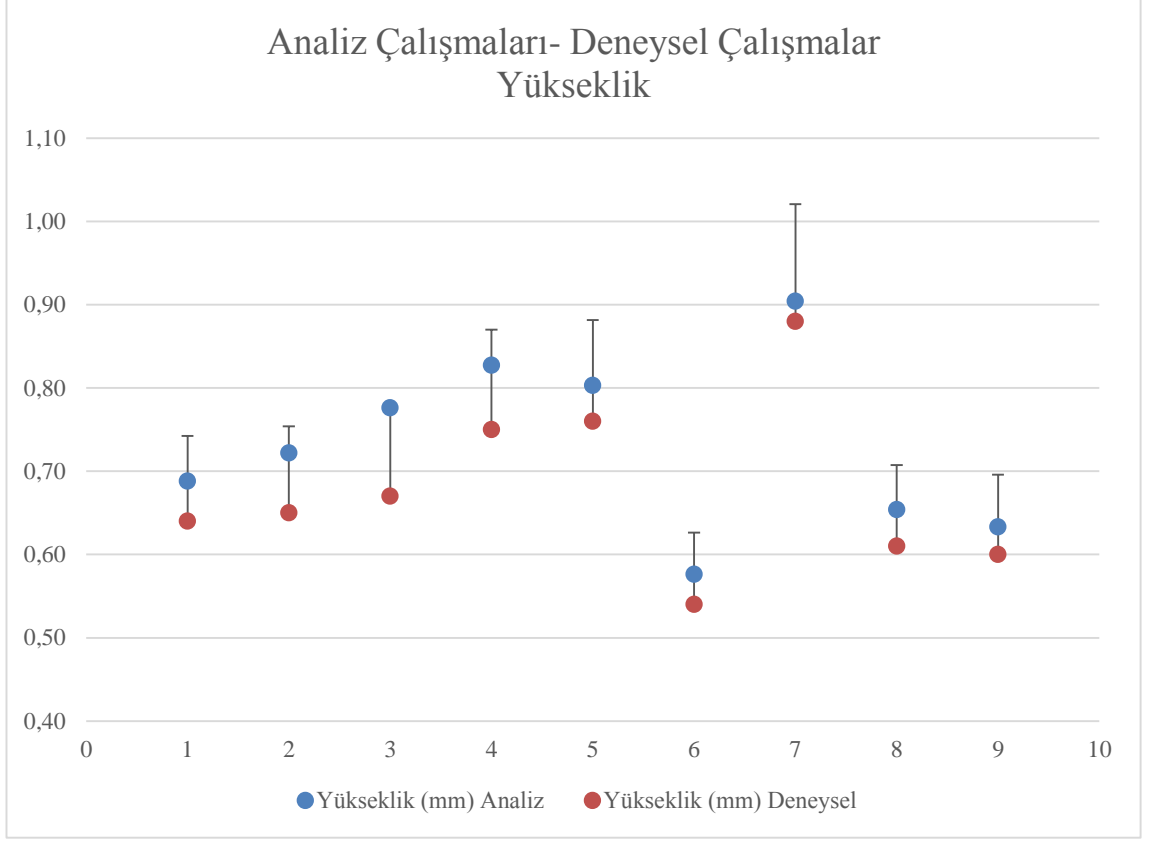
9 adet taramanın her birinden TS EN ISO 17639 standardına uygun kesitler alınarak optik mikroskop altında incelemeye alınmış, tarama genişliği, yüksekliği ve derinliği TS EN ISO 5817 standardına uygun olarak ölçülmüştür (Çizelge 4.2)

**Çizelge 4.2.** Deneysel çalışmalardan elde edilen tarama kesitlerinin optik mikroskop altındaki görüntüleri

	8 mm/s	9 mm/s	10 mm/s
1500 W			
	7.54 g/dk	5.59 g/dk	6.52 g/dk
1400 W			
	6.52 g/dk	7.54 g/dk	5.59 g/dk
1300 W			
	5.59 g/dk	6.52 g/dk	7.54 g/dk

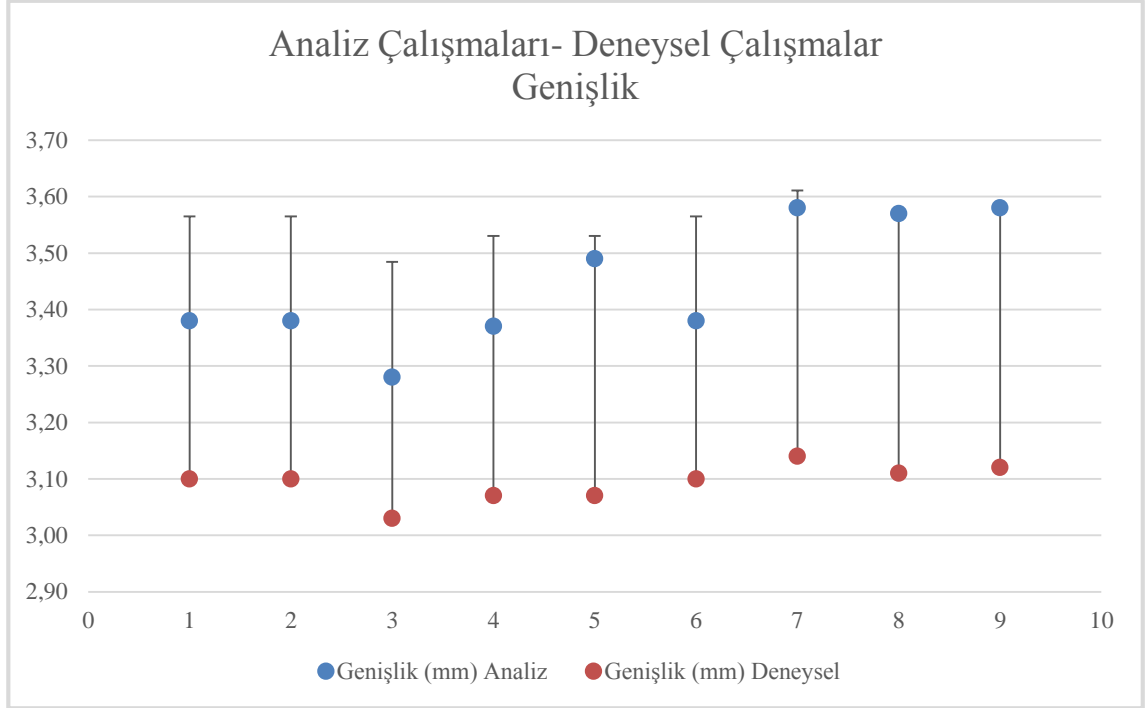
#### 4.1. Sanal Analiz Sonuçlarının Deneysel Çalışmalarla Kıyaslanması

Tarama yüksekliğine ait ölçümlerin analiz sonuçları deneysel çalışmalarla kıyaslandığında, tarama yüksekliğine ait farkın maksimum %15 olarak çıktığı görülmüş, hata oranı ortalama %8 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.3). Bu da analiz sonuçlarının gerçekte uyumlu olduğunu göstermektedir. Analiz çalışmalarından elde edilen yükseklik değerleri 0.58-0.904 mm arasında değişirken deneysel çalışmalarda 0.54-0.88 mm arasında değişmektedir. Hem deneysel çalışmalarda hem de analiz sonuçlarında yükseklik değeri en fazla 1500 W lazer gücü, 8 mm/s lazer tarama hızı ve 7.45 g/dk toz besleme miktarı parametrelerinde en düşük değeri de her iki çalışma için 1400W lazer gücü, 10 mm/s tarama hızı ve 5.59 g/dk toz besleme miktarı parametrelerinde elde edilmiştir.



**Şekil 4.3.** Tek katman taramaya ait yükseklik değerinin analiz sonuçları ile deneysel çalışma sonuçlarının kıyaslanması

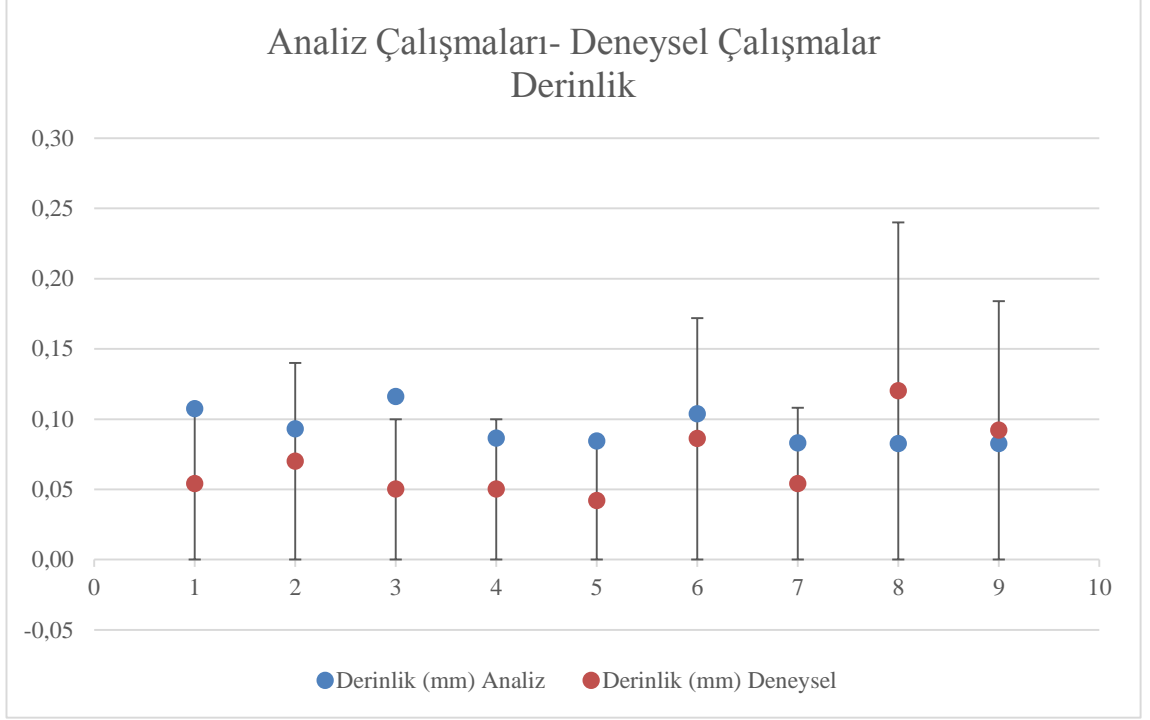
Şekil 4.4 tarama genişliğine ait analiz çalışmaları ile deneysel çalışmalardan elde edilen ölçüm sonuçlarının hata oranlarını göstermektedir. Tarama genişliği için %15'lik fark diliminde deneysel çalışmalar ile sanal analiz sonuçları kıyaslanmıştır. Analiz çalışmalarından elde edilen genişlik değerleri 3.28-3.58 mm arasında değişirken deneysel çalışmalarda 3.03-3.14 mm arasında değişmektedir. Hem deneysel çalışmalarda hem de analiz sonuçlarında genişlik değeri en fazla 1500 W lazer gücü, 8 mm/s lazer tarama hızı ve 7.45 g/dk toz besleme miktarı parametrelerinde en düşük değeri de her iki çalışma için 1300 W lazer gücü, 10 mm/s tarama hızı ve 7.45 g/dk toz besleme miktarı parametrelerinde elde edilmiştir.



**Şekil 4.4.** Tek katman taramaya ait genişlik değerinin analiz sonuçları ile deneysel çalışma sonuçlarının kıyaslanması

Şekil 4.5 tek katmanlı taramaya ait derinlik ölçüsünün analizlerden elde edilen sonuçlarla deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların kıyaslanmasını ve hata oranlarının gösterilmesini ifade etmektedir. Analiz çalışmalarından elde edilen derinlik değerleri 0.08-0.116 mm arasında değişirken deneysel çalışmalarda 0.04-0.12 mm arasında değişmektedir. Deneysel çalışmalarda derinlik değeri en fazla 1500 W lazer gücü, 9 mm/s lazer tarama hızı ve 5.59 g/dk toz besleme miktarı parametrelerinde elde edilirken analiz sonuçlarında derinlik değeri en fazla 1300 W lazer gücü, 10 mm/s lazer tarama hızı ve 7.45 g/dk toz besleme miktarı parametrelerinde elde edilmiştir. En düşük değeri ise her iki çalışma için 1400 W lazer gücü, 9 mm/s tarama hızı ve 7.45 g/dk toz besleme miktarı parametrelerinde elde edilmiştir.

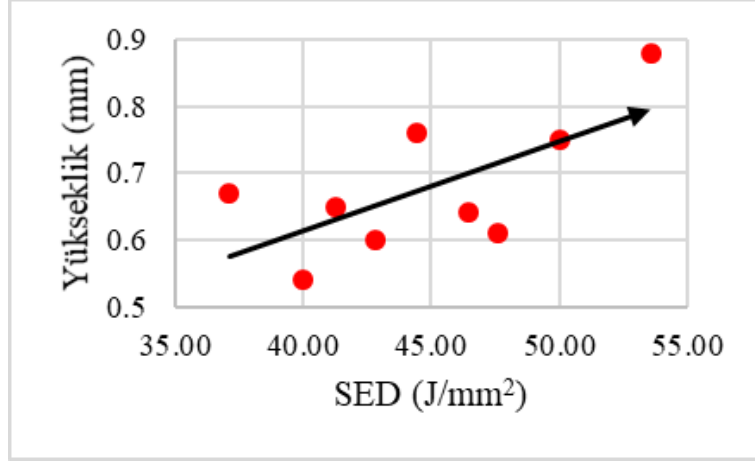
Tarama derinliği açısından, % hata daha yüksektir. Derinlik için yüksek % hatası, tarama derinliği için matematiksel model tahmininin yükseklik veya genişlik kadar iyi olmadığı anlamına gelmez. Yüksek % hatası, eriyik havuzu derinliğinin küçük bir sayısal değer olmasıyla açıklanabilir. Hafif bir sapma, nispeten büyük bir hatayla sonuçlanır. Analiz modelini kurarken özellikle eriyik havuzunun davranışının daha hassasiyetle incelenebilmesi için meshleri iyileştirilerek çalışmaların tekrarlanması hata oranını düşürecektir.



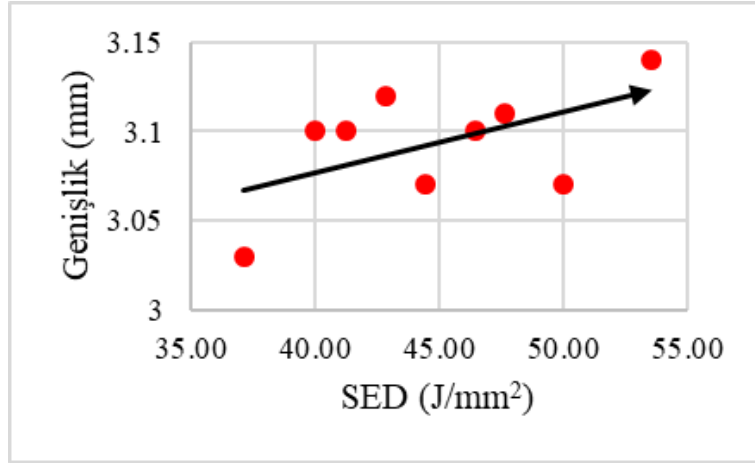
**Şekil 4.5.** Tek katman taramaya ait derinlik değerinin analiz sonuçları ile deneysel çalışma sonuçlarının kıyaslanması

#### **4.2. Özgül Enerji Yoğunluğu (SED) ve Toz Besleme Yoğunluğunun(PFD) Etkileri**

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar özgül enerji yoğunluğuna (SED) bağlı olarak değişimleri incelendiğinde tarama yüksekliği ve genişliği SED artışı ile artmaktadır. Artan ısı girdisi nedeniyle toz biriktirme verimliliği SED ile artar (Lee, Shin, Yoon, & Shim, 2017). Toz biriktirme verimliliğindeki artış, daha fazla tozun erimesine ve dolayısıyla tarama yüksekliklerinin artmasına neden olur. İz yüksekliği 0.54 - ile 0.88 mm arasında değişmektedir (Şekil 4.6). Isı girdisindeki artış, tarama genişliklerini artırarak eriyik havuzunun boyutunu ve şeklini etkiler. Genişlik 3.03 mm – 3.14 mm arasında değişmektedir (Şekil 4.7). Tarama yüksekliğindeki ve genişliğindeki dalgalanmalar, değişen toz akış hızına bağlanabilir.

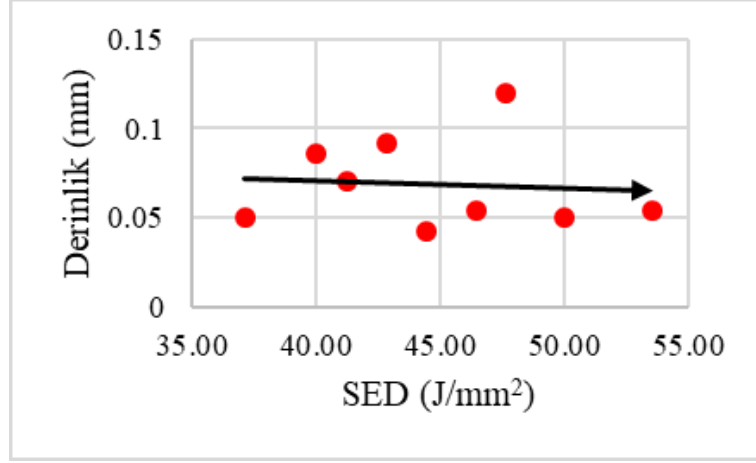


**Şekil 4.6.** SED'in yükseklik üzerindeki etkileri

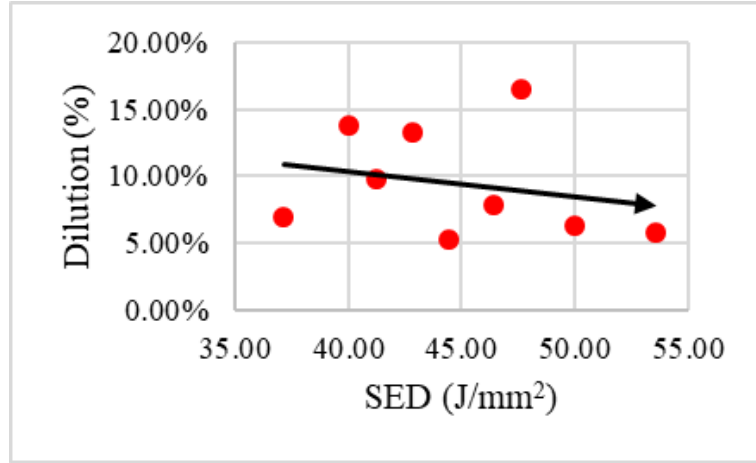


**Şekil 4.7.** SED'in genişlik üzerindeki etkileri

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9, SED'deki artışla birlikte tarama derinliği ve dilution yüzdesinin azaldığını göstermektedir. SED'deki artışla birlikte, altlık yüzeyinden iç kısma artan ısı transferinden dolayı, tarama derinliği ve dilution oranının sabit bir toz akış hızında genellikle artması beklenir. Düşen eğilim, değişken ve artan toz besleme hızına bağlanabilir. Artan toz akışıyla, toz bulutu ve lazer ışını arasındaki ortak hava etkileşimi, alt tabaka üzerindeki SED olayını azaltarak artar. İz derinliği 0.04 mm – 0.12 mm arasında ve dilution yüzdesi %5.24 - %16.44 arasında değişir.



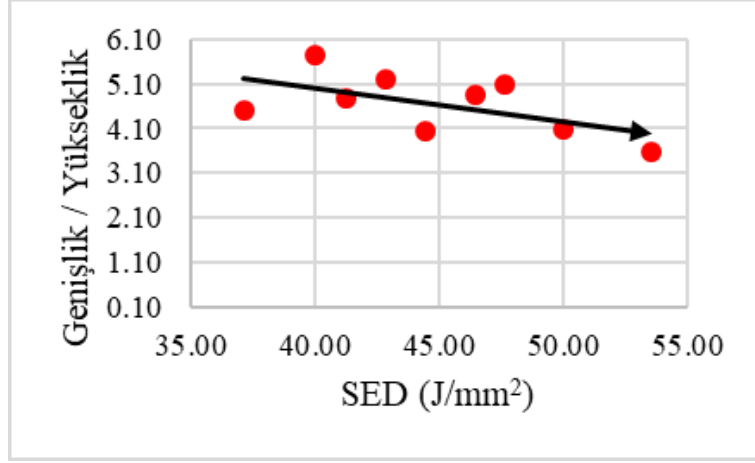
**Şekil 4.8.** SED'in derinlik üzerindeki etkileri



**Şekil 4.9.** SED'in dilution üzerindeki etkileri

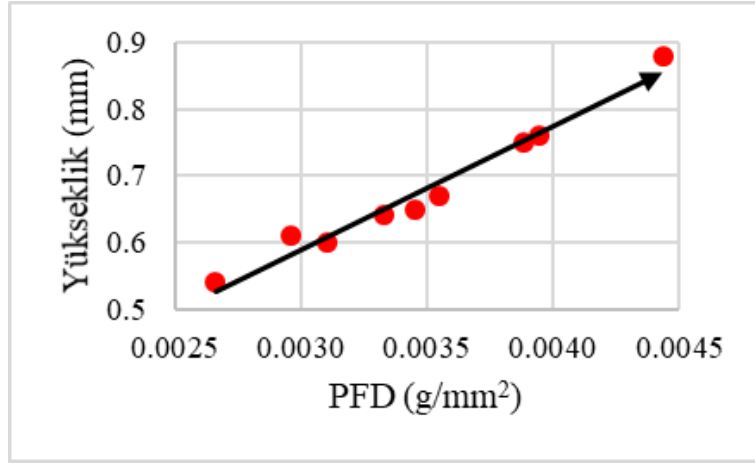
Şekil 4.10, genişlik/yükseklik oranı SED'deki artışla birlikte azalan bir eğilim göstermektedir. Bunun nedeni, yükseklikteki artışın, genişlikteki artıştan nispeten daha yüksek olmasıdır. Genişlik/yükseklik oranı 3.57 - 5.74 arasında değişmektedir.



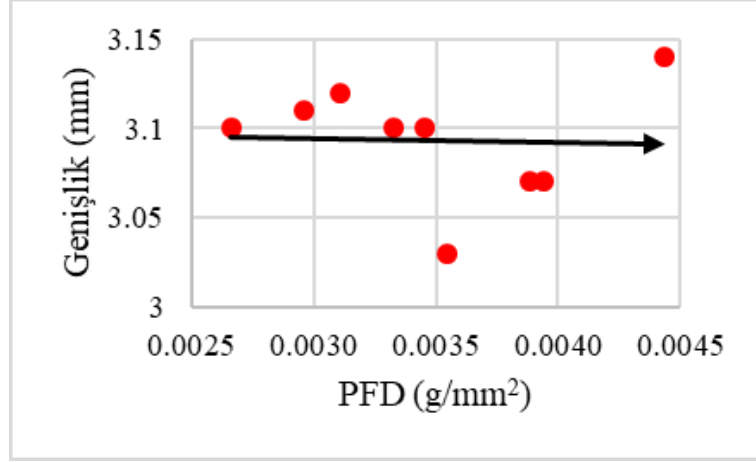


**Şekil 4.10.** SED'in genişlik/derinlik oranı üzerindeki etkileri

Şekil 4.11, tarama yüksekliğinin toz besleme yoğunluğu (PFD) ile birlikte artan bir eğilim gösterdiğini göstermektedir. PFD'deki artışla, eriyik havuzu bölgesinde daha fazla toz gönderilir ve bu da yükseklik artışını açıklamaktadır. Buna karşılık, tarama genişliği önemli bir değişiklik göstermez, ancak Şekil 4.12'de gösterildiği gibi artan PFD ile hafif bir azalma eğilimi gösterir. PFD'deki artış, eriyik havuzu şeklini ve boyutunu etkileyerek iz genişliğini biraz azaltır. Yükseklik ve genişlikteki dalgalanmalar, lazer gücündeki varyasyona bağlanabilir.

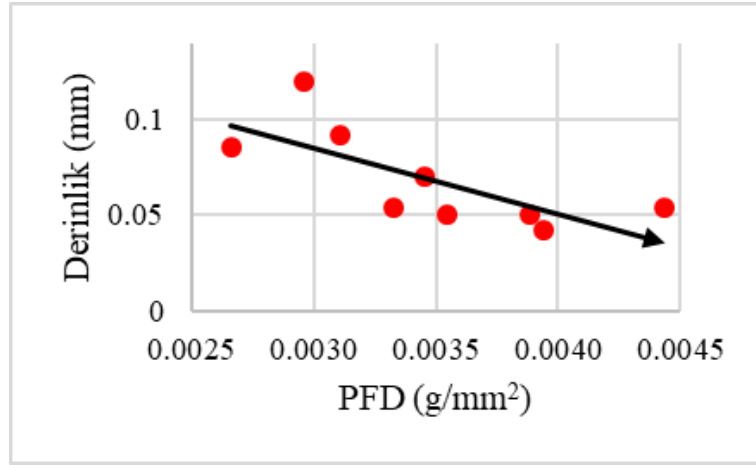


**Şekil 4.11.** PFD'nin yükseklik üzerindeki etkileri

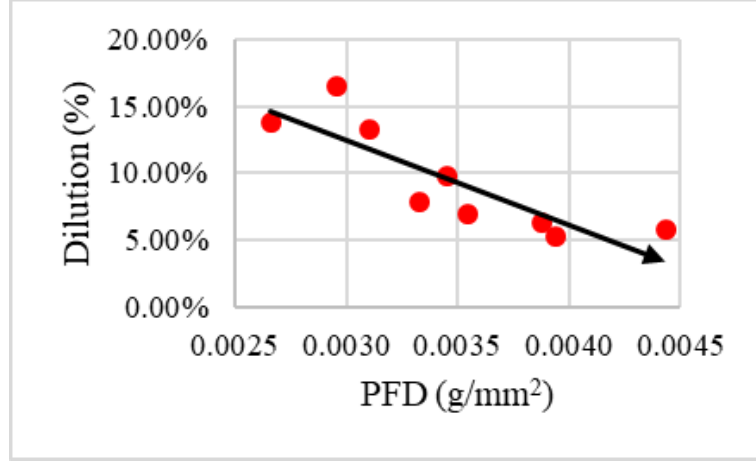


**Şekil 4.12.** PFD'nin genişlik üzerindeki etkileri

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14, tarama derinliğini ve dilution yüzdesi göstermekte ve PFD'deki artışla birlikte azalma eğilimi gösterir. PFD arttıkça, lazer ışını ile daha fazla toz partikülü etkileşime girer ve lazerden gelen ısı alt tabaka ile nispeten daha az etkileşime girer, dolayısıyla derinlik ölçüsünde azalma eğilimi görülmektedir.

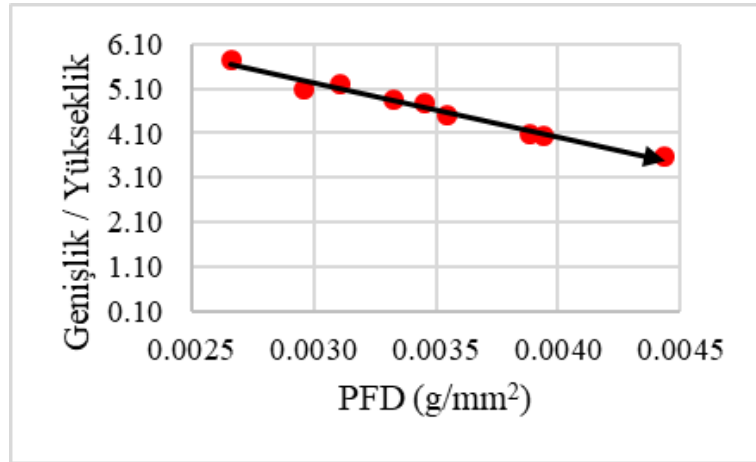


**Şekil 4.13.** PFD'nin derinlik üzerindeki etkileri



**Şekil 4.14.** PFD'nin dilution üzerindeki etkileri

Genişlik/yükseklik oranı da Şekil 4.15'te görüldüğü gibi PFD'deki artışla birlikte azalan bir eğilim göstermektedir. Yükseklikteki artış, artan PFD ile genişlikteki artıştan nispeten daha fazladır, dolayısıyla azalma eğilimi vardır.



**Şekil 4.15.** PFD'nin genişlik/derinlik oranı üzerindeki etkileri

### 4.3. Matematiksel Regresyon Modeli Sonuçlarının Deneysel Çalışmalarla Kıyaslanması

Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler Minitab programında kullanılarak parametrelerin farklı seviyelerinde kullanılmak üzere regresyon analizi yapılmış ve yükseklik, genişlik ve derinlik için lazer gücü, lazer hızı ve toz besleme hızı parametrelerine bağlı olarak matematiksel regresyon modelleri elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Yükseklik}(mm) = & 0,819 + 0,000217 \text{ Lazer gücü } (W) - 0,0767 \text{ Tarama hızı } \left(\frac{mm}{s}\right) + \\ & 0,0700 \text{ Toz besleme hızı } \left(\frac{dev}{dk}\right) \end{aligned} \quad (4.1)$$

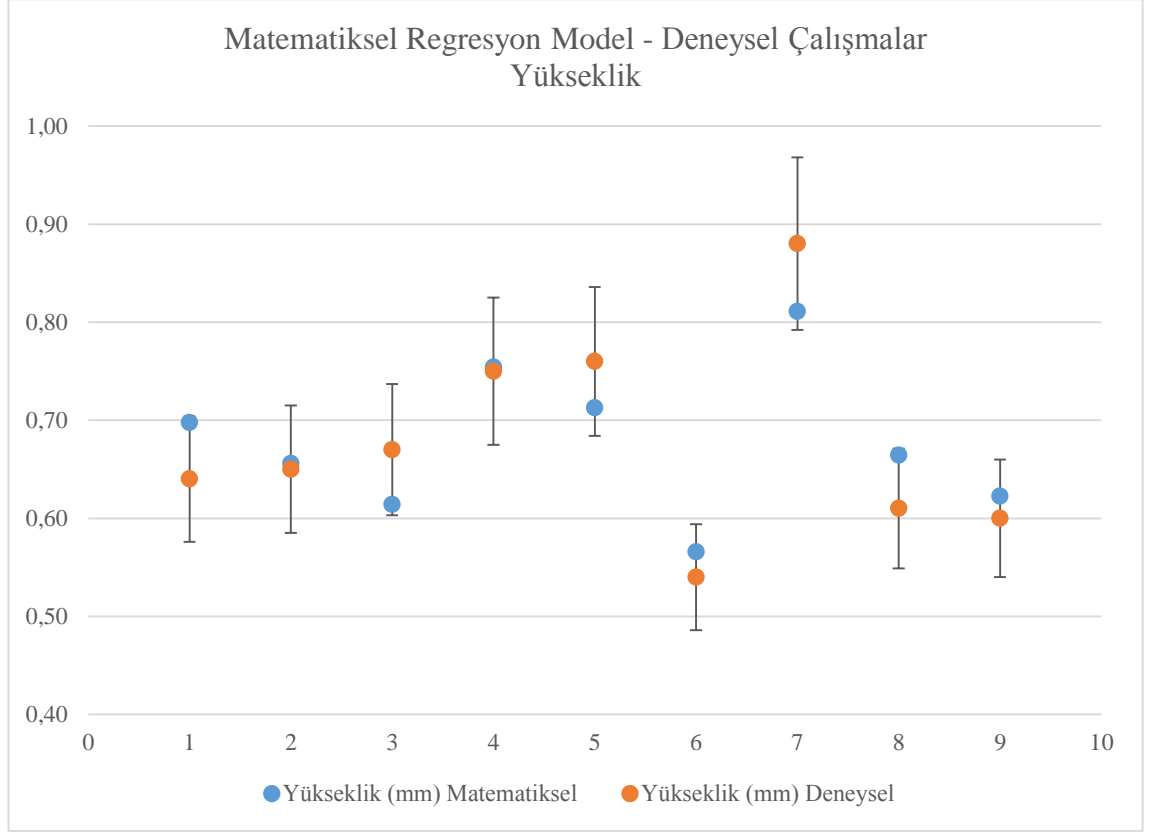
$$\begin{aligned} \text{Genişlik } (mm) = & 2,880 + 0,000233 \text{ Lazer gücü}(W) - 0,0100 \text{ Tarama hızı } \left(\frac{mm}{s}\right) - \\ & 0,0067 \text{ Toz besleme hızı } \left(\frac{dev}{dk}\right) \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \text{Derinlik } (mm) = & -0,195 + 0,000153 \text{ Lazer gücü}(W) + 0,01167 \text{ Tarama hızı } \left(\frac{mm}{s}\right) - \\ & 0,0160 \text{ Toz besleme hızı } \left(\frac{dev}{dk}\right) \end{aligned} \quad (4.3)$$

316L-Si paslanmaz çeliğine yakın kimyasal bileşimlere sahip demir bazlı alaşımlar için, matematiksel regresyon modelin tarama geometrisini nispeten düşük hata ile tahmin edebilmektedir. Titanyum alaşımları gibi diğer alaşımlarda hata artabilir. Bunun nedeni malzemelerin yoğunluklarının farklı olmasıdır. Aynı özgül enerji yoğunluğu için, daha az yoğun malzeme, daha yoğun malzemeye kıyasla daha fazla erir. Modelin tahmin edebileceğinden nispeten daha büyük bir eriyik havuzu oluşturarak hatayı artırır. Kimyasal bileşimde yüzeyi aktive eden bir element olarak işlev gören kükürt ilavesiyle eriyik havuzu içindeki akışlar da etkilenir (Pitscheneder, 1996). Bu, eriyik havuzunun içindeki yüzey gerilimini etkileyerek eriyik havuzunun içindeki akışları etkiler. Radyal olarak dışa doğru akış, eriyik havuzunu daha geniş hale getirirken, radyal olarak içe doğru akış, eriyik havuzunu derinleştirir. Kimyasal bileşimdeki varyasyon, matematiksel regresyon modelinin doğruluğunu azaltabilir. Bununla birlikte ekipmandaki farklılaşma arttıkça matematiksel regresyon modellerindeki hata oranı artabilir. Yine de matematiksel regresyon modeli, farklı malzemeler ve DED ekipmanı için bir başlangıç noktası olarak kullanılabilir. Çalışma yapılabilecek proses parametresi aralıklarında ince ayar yaparak deneysel denemelerin sayısını önemli ölçüde azaltarak zaman ve kaynak tasarrufu sağlanabilmektedir.

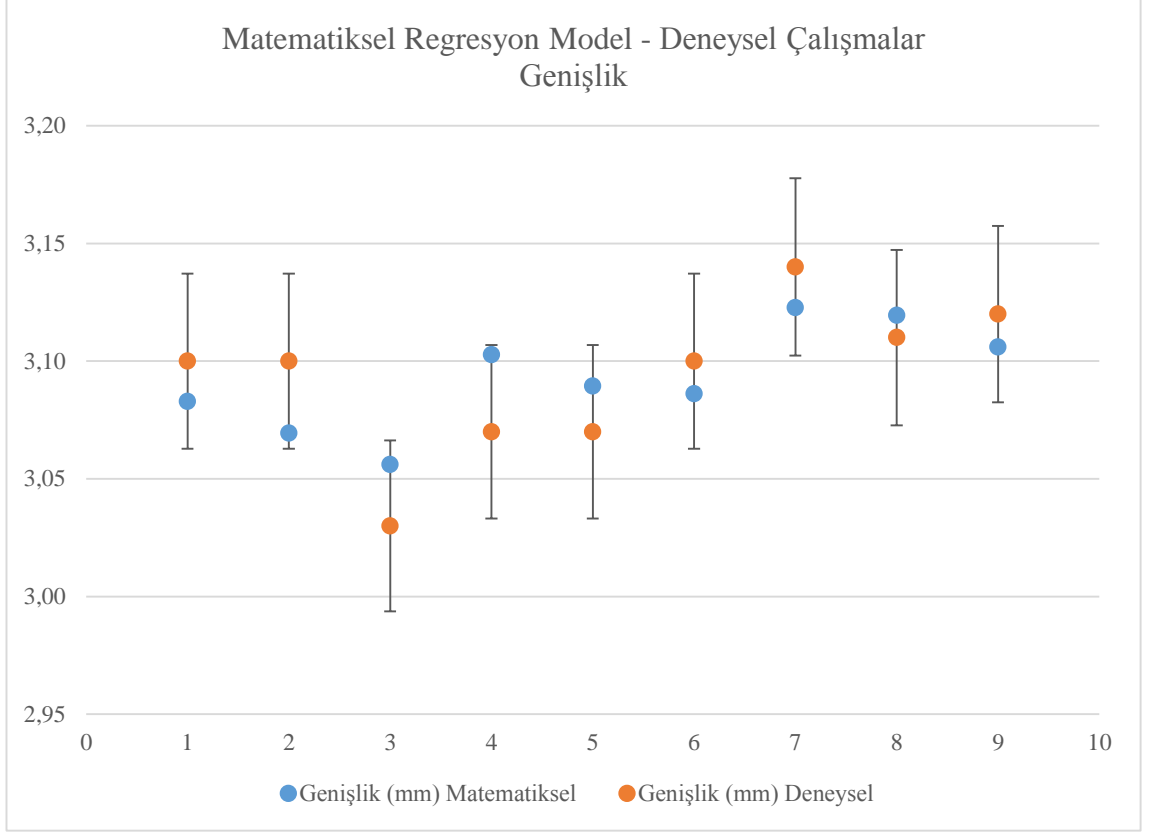
Minitab yazılımı ile elde edilen matematiksel regresyon modellerinin sonuçları ile deneysel çalışmaların kesitleri alınarak elde edilen sonuçları kıyaslanmıştır. Şekil 4.16, yükseklik için çıkan sonuçların kıyaslanmasını göstermektedir. 9 çalışmanın kıyaslama sonuçlarına bakıldığında tüm sonuçların maksimum %10'luk hata diliminin içerisinde olduğu görülmektedir. Yükseklik değeri, matematiksel regresyon modelinden elde edilen

sonuçlarda 0.57-0.81 mm arasında değişirken deneysel çalışmalarda 0.54-0.88 mm arasında değişmektedir.



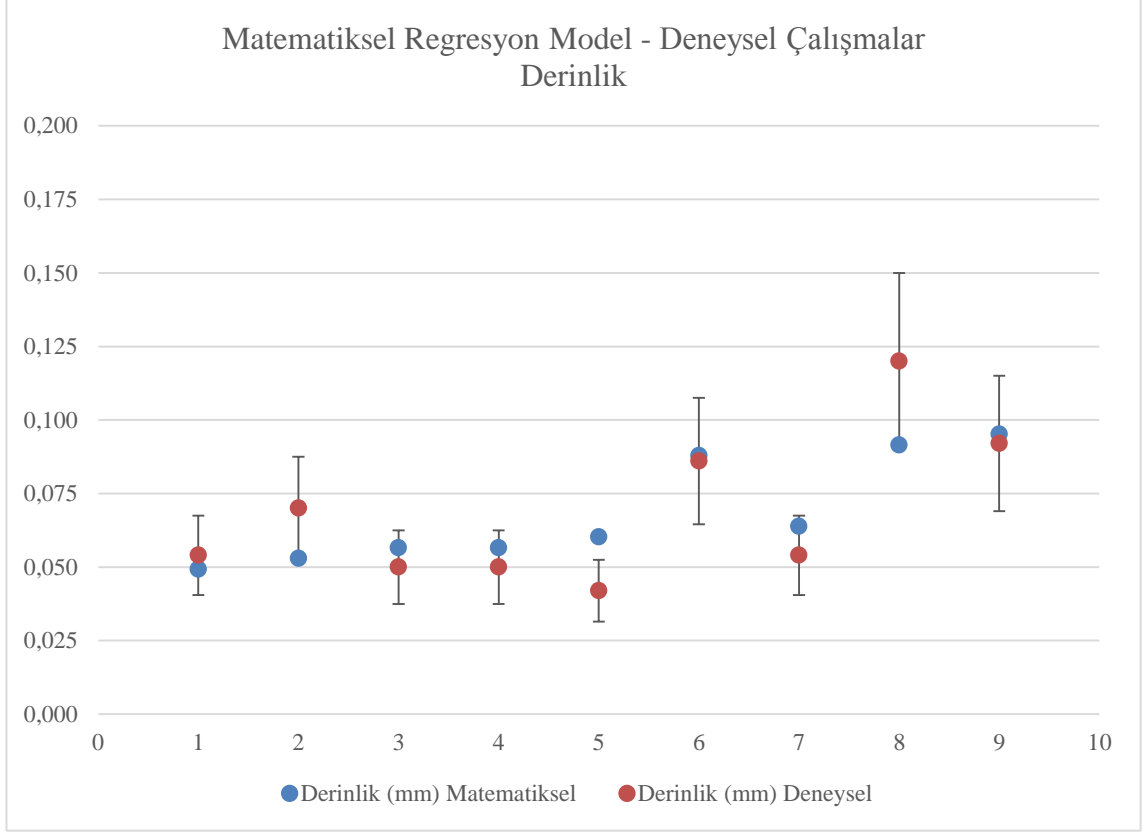
**Şekil 4.16.** Tek katman taramaya ait yükseklik değerinin matematiksel regresyon modeli ile deneysel çalışma sonuçlarının kıyaslaması

Şekil 4.17, matematiksel regresyon modeli ile deneysel çalışmalardan kesitler alınarak elde edilen genişlik ölçüsü kıyaslandığında sonuçların %1.2'lik hata diliminin içerisinde olduğu görülmektedir. Genişlik değeri, matematiksel regresyon modelinden elde edilen sonuçlarda 3.06 – 3.12 mm arasında değişirken deneysel çalışmalarda 3.03 – 3.14 mm arasında değişmektedir.



**Şekil 4.17.** Tek katman taramaya ait genişlik değerinin matematiksel regresyon modeli ile deneysel çalışma sonuçlarının kıyaslaması

Minitab programı kullanılarak oluşturulan matematiksel regresyon modellerinin sonuçları ile deneysel çalışmaların kesitleri alınarak elde edilen sonuçları derinlik açısından kıyaslandığında %25'lik hata diliminin içerisinde olduğu görülmektedir (Şekil 4.18). Derinlik ölçüsü için 1 deney koşulu için görülen maksimum %43'lük fark, proses esnasında lazer gücünün anlık olarak dalgalanması ile açıklanabilir. Derinlik değeri, matematiksel regresyon modelinden elde edilen sonuçlarda 0.05 – 0.1 mm arasında değişirken deneysel çalışmalarda 0.04 – 0.12 mm arasında değişmektedir.



**Şekil 4.18.** Tek katman taramaya ait derinlik değerinin matematiksel regresyon modeli ile deneysel çalışma sonuçlarının kıyaslaması

Matematiksel regresyon modeli kullanılarak lazer gücü, tarama hızı ve toz besleme miktarı parametreleri ile genişlik, yükseklik ve derinlik için elde edilen formülasyonlar tez çalışmasını oluşturan parametreler haricindeki parametrelerle ilerleyen çalışmalarda doğrulanacaktır.

#### **4.4. Varyans Analizi (ANOVA)**

Her parametrenin tarama geometrisinin yüksekliği, genişliği ve derinliği üzerindeki katkısını belirleyebilmek için ANOVA analizi yapılmıştır. Analizde %95 güven düzeyi kullanılmıştır. (Lee H. K., 2008), daha yüksek F değerine sahip parametrenin çıktı üzerinde daha yüksek bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Çizelge 4.3 - 4.4 - 4.5 yükseklik, genişlik ve derinlik için yapılan ANOVA çalışmasını göstermektedir.

Çizelge 4.3, toz besleme hızının tarama yüksekliğini etkileyen en önemli parametre olduğunu göstermektedir. Şekil 4.11, PFD ile birlikte tarama yüksekliğindeki artışı göstermektedir. Hem deneysel çalışmalar hem de ANOVA aynı sonucu vermektedir. Toz

besleme yoğunluğu arttıkça, eriyik havuzu bölgesine daha fazla toz beslenir. Sonuç olarak, daha fazla toz ergimekte ve yükseklik artışına neden olmaktadır.

**Çizelge 4.3.** Yükseklik değeri için ANOVA'dan elde edilen sonuçlar

Kaynak	Serbestlik derecesi	Karelerin Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F istatistiksel test değeri	P istatistiksel değeri	Yüzde Katkı (%)
Lazer Gücü	2	0.002956	0.002956	0.001478	3.59	0.218	3.49
Tarama Hızı	2	0.035356	0.035356	0.017678	43	0.023	41.71
Toz Besleme Hızı	2	0.045622	0.045622	0.022811	55.49	0.018	53.83
Error	2	0.000822	0.000822	0.000411	-	-	0.97
Total	8	0.084756	-	-	-	-	100

Çizelge 4.4, lazer gücünün iz genişliğini etkileyen en önemli parametre olduğunu göstermektedir. Şekil 4.7. ayrıca SED ile birlikte tarama genişliğinde artışı göstermektedir. SED arttıkça, eriyik havuzu boyutu ve genişliği artmaktadır.

**Çizelge 4.4.** Genişlik değeri için ANOVA'dan elde edilen sonuçlar

Kaynak	Serbestlik derecesi	Karelerin Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F istatistiksel test değeri	P istatistiksel değeri	Yüzde Katkı (%)
Lazer Gücü	2	0.004067	0.00407	0.00203	1.42	0.413	48.41
Tarama Hızı	2	0.0006	0.0006	0.0003	0.21	0.827	7.14
Toz Besleme Hızı	2	0.000867	0.00087	0.00043	0.3	0.768	10.32
Error	2	0.002867	0.00287	0.00143	-	-	34.13
Total	8	0.0084	-	-	-	-	100



Çizelge 4.5, lazer gücünün yakından takip ettiği toz besleme hızı iz derinliğini etkileyen en önemli parametre olduğunu göstermektedir. Hem lazer gücü hem de toz besleme hızı, alt tabaka üzerindeki SED’i etkilediği gibi alt tabakanın altındaki iz derinliğini etkilemektedir.

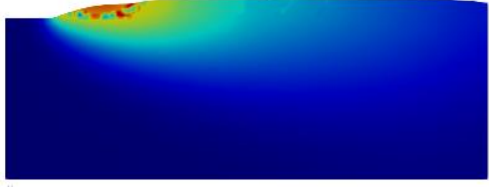
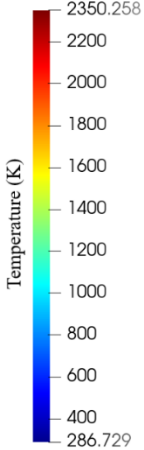
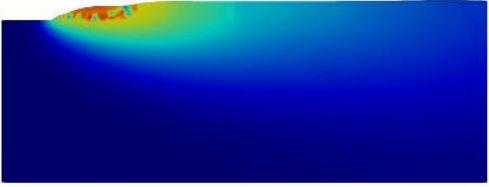
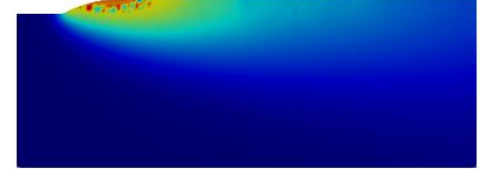
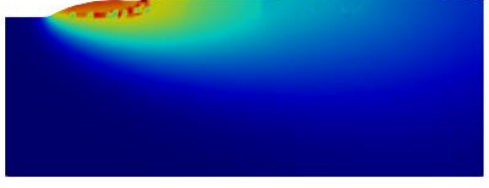
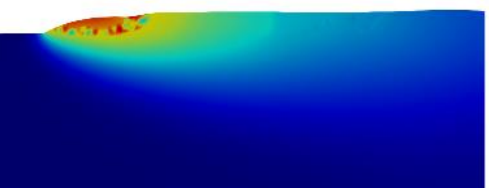
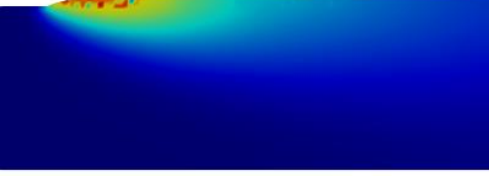
**Çizelge 4.5.** Derinlik değeri için ANOVA'dan elde edilen sonuçlar

Kaynak	Serbestlik derecesi	Karelerin Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Ortalama Kareler	F istatistiksel test değeri	P istatistiksel değeri	Yüzde Katkı (%)
Lazer Gücü	2	0.001803	0.0018	0.0009	10.09	0.09	33.88
Tarama Hızı	2	0.001155	0.00116	0.00058	6.46	0.134	21.7
Toz Besleme Hızı	2	0.002184	0.00218	0.00109	12.22	0.076	41.05
Error	2	0.000179	0.00018	8.9E-05	-	-	3.36
Total	8	0.00532	-	-	-	-	100

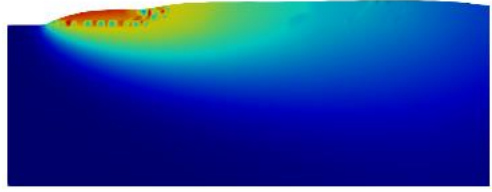
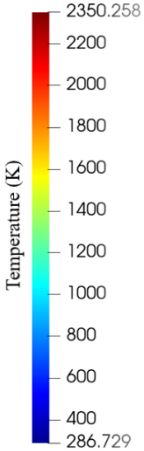
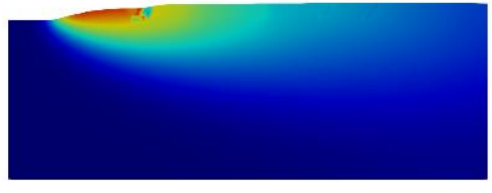
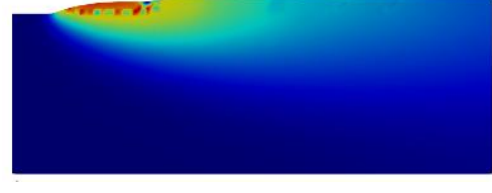
#### 4.5. Tek Katman Taramanın İç Yapısındaki Sıcaklık Değişimleri

FLOW-3D® yazılımı kullanılarak deney düzeneklerindeki parametreler doğrultusunda analizler yapılmıştır. Yapılan analizler y=0mm ekseninden kesitler alınarak eriyik havuzu ve alt tabladaki sıcaklık dağılımı, her bir durum için incelenmiştir (Çizelge 4.6)

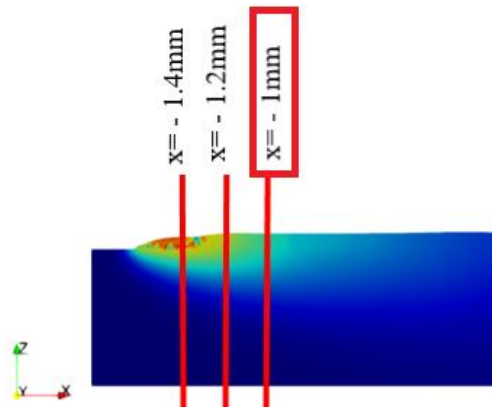
**Çizelge 4.6.**  $y=0$ mm kesitinde taramanın sıcaklık dağılımı

Lazer Gücü	İlerleme Hızı	Toz Besleme Hızı	Sıcaklık Dağılımı Görselleri	Sıcaklık Skalası
1300 W	8 mm/s	5.59 g/dk		 <p>Temperature (K)</p> <p>2350.258</p> <p>2200</p> <p>2000</p> <p>1800</p> <p>1600</p> <p>1400</p> <p>1200</p> <p>1000</p> <p>800</p> <p>600</p> <p>400</p> <p>286.729</p>
	9 mm/s	6.52 g/dk		
	10 mm/s	7.54 g/dk		
1400 W	8 mm/s	6.52 g/dk		
	9 mm/s	7.54 g/dk		
	10 mm/s	5.59 g/dk		

**Çizelge 4.6.**  $y=0$ mm kesitinde taramanın sıcaklık dağılımı (devamı)

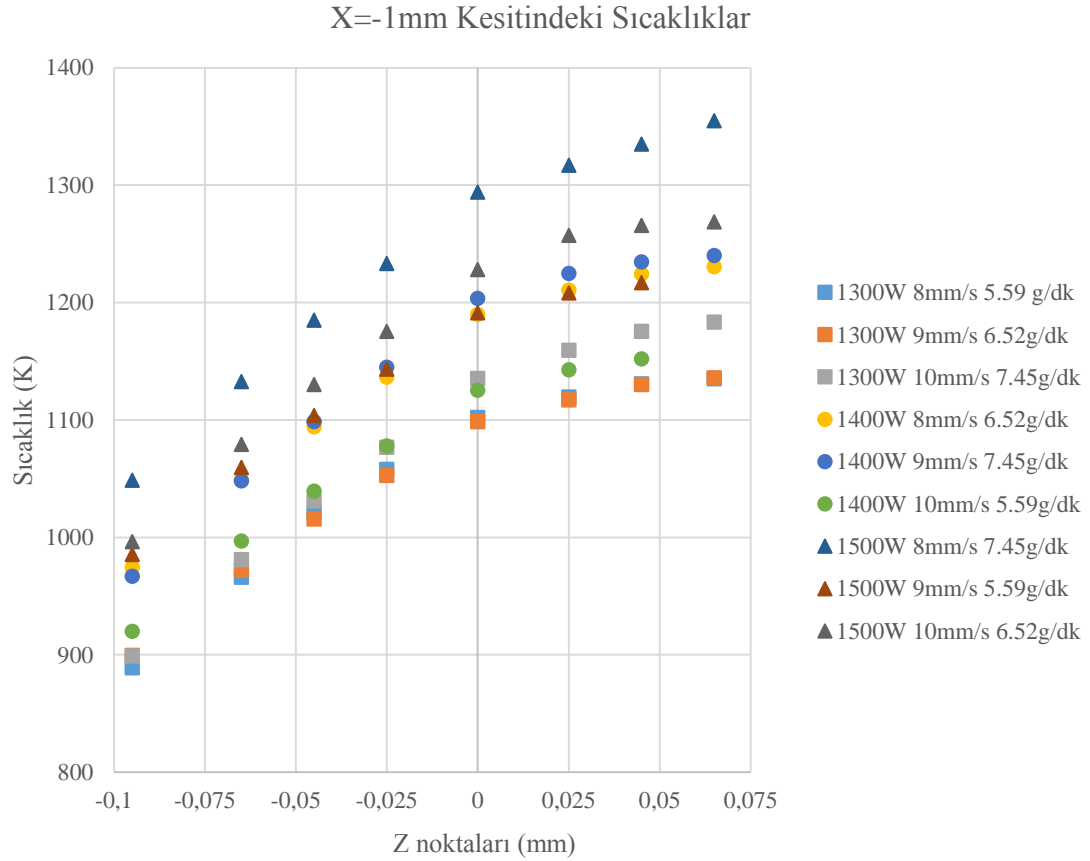
1500 W	8 mm/s	7.54 g/dk		
	9 mm/s	5.59 g/dk		
	10 mm/s	6.52 g/dk		

Taramaların tam ortasından kesit alınarak x ekseninden bakıldığında alt tablanın iç yapısındaki ve katman içerisindeki sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Öncelikli olarak lazer kafasının bulunduğu konuma en uzak nokta olan  $x=-1$ mm'deki sıcaklıklar incelenmiştir (Şekil 4.19)



**Şekil 4.19.** x eksenindeki kesitler ,  $x=-1$ mm

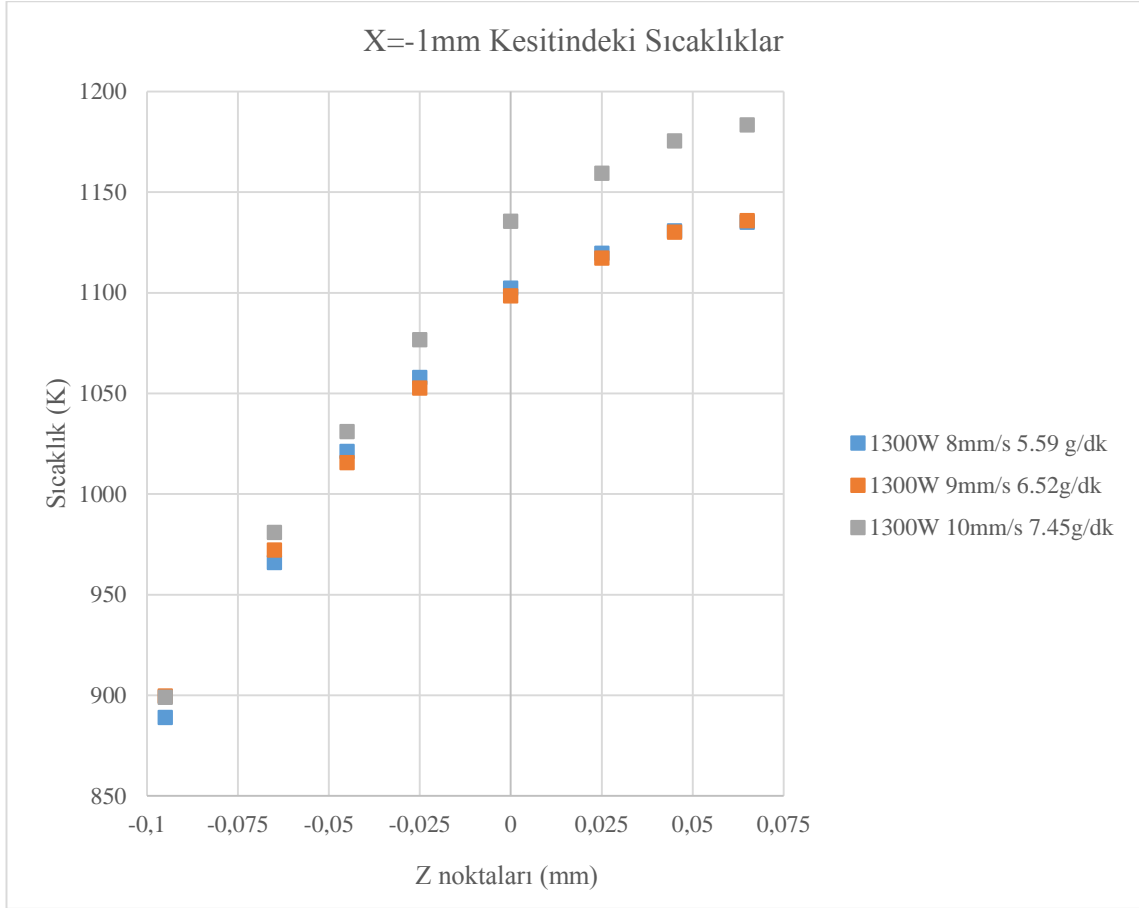
Lazer kaynağından en uzak nokta olan  $x=-1\text{mm}$  kesitindeki sıcaklık  $889-1354\text{ }^\circ\text{C}$  değerleri arasında dağılım göstermektedir (Şekil 4.20). En yüksek sıcaklık değeri maksimum lazer gücünde, tarama hızının en düşük olduğu değerde ve toz besleme miktarının en fazla olduğu,  $1500\text{W}$   $8\text{mm/s}$   $7.45\text{g/dk}$  durumunda ortaya çıkmaktadır. Bu durum lazere daha çok maruz kalmış parçacık sayısının yavaş ilerleme sayesinde yüzeye daha fazla nüfus etmesiyle açıklanmaktadır. Alt tablanın iç kısmındaki sıcaklık değişimine bakıldığında lineer olarak değişim göstermektedir. Bu da henüz iç yapıya dahil olmamış toz partiküllerinin haricinde tablanın kendi malzeme özelliklerinin ısı ile gösterdiği davranışı göstermektedir.



**Şekil 4.20.**  $x = -1\text{mm}$  kesitindeki tüm analizlerin sıcaklık dağılımı

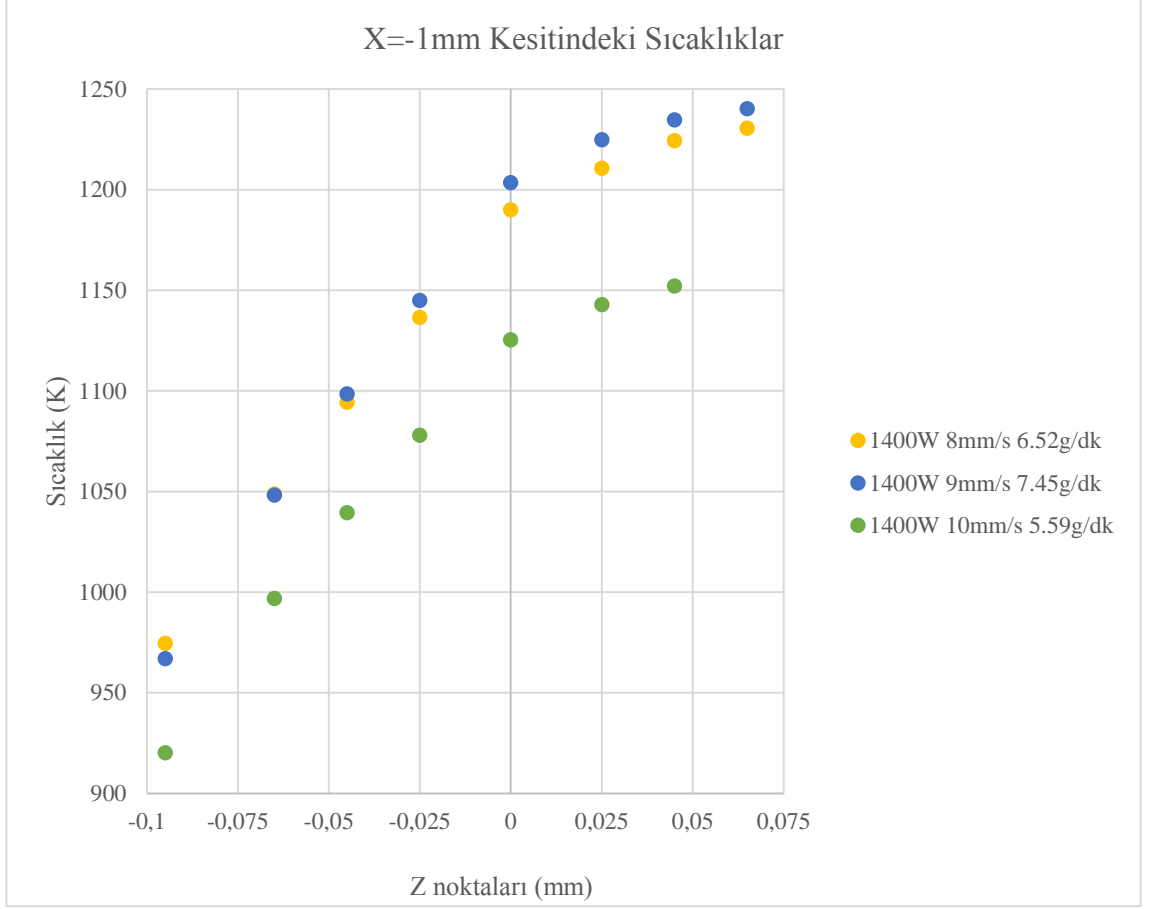
Şekil 4.21,  $x=-1\text{mm}$  mesafesinde sabit  $1300\text{W}$  lazer gücü uygulanması esnasında değişen parametrelerin sıcaklığı nasıl etkilediğini göstermektedir. Sabit  $1300\text{W}$  lazer gücü için özellikle tarama hızı ve toz besleme miktarındaki artış sıcaklığı arttırmaktadır. En yüksek sıcaklık değerlerine  $1300\text{W}$   $10\text{mm/s}$   $7.45\text{g/dk}$  şartlarında ulaşılmaktadır. Alt tablanın iç

yapısındaki sıcaklık dağılımı lineer olarak devam etmektedir. Tablanın üst kısmındaki tarama kesidinde ise sıcaklık özellikle daha fazla lazer gücüne maruz kalan daha fazla parçacığın olduğu durumda daha fazla sıcaklıklar görülmektedir.



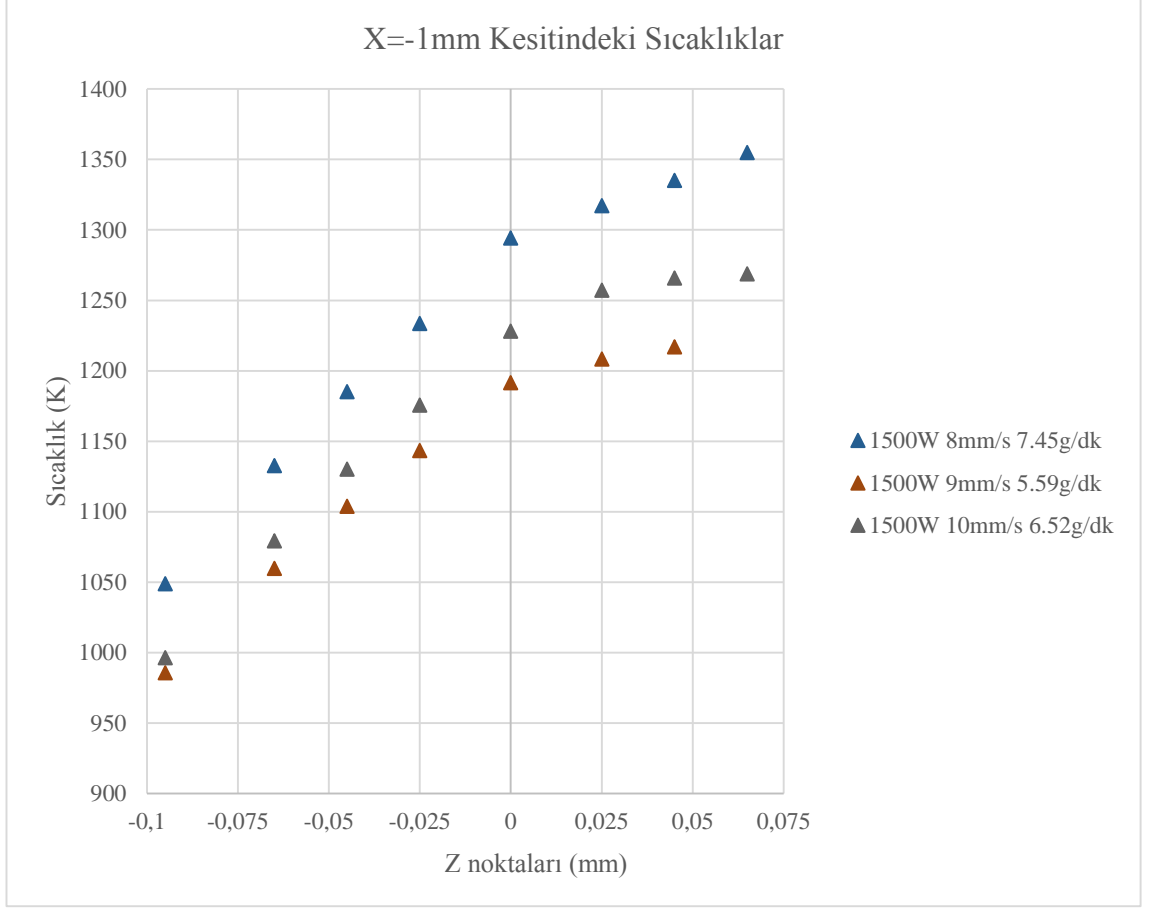
**Şekil 4.21.**  $x = -1\text{mm}$  kesitindeki 1300W için sıcaklık dağılımı

$x=-1\text{mm}$  kesitinde 1400W sabit lazer gücünde sıcaklık dağılımı 920-1240 °C arasındadır (Şekil 4.22). Sıcaklık dağılımı tarama hızının artışıyla artarken toz bezleme miktarının düşmesiyle hız artsa bile sıcaklıkların düştüğü gözlemlenmektedir. Alt tablanın iç yapısındaki sıcaklık dağılımı lineer olarak devam etmektedir.



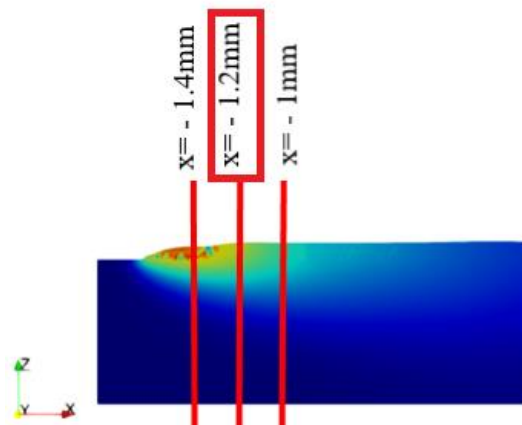
**Şekil 4.22.** x = -1mm kesitindeki 1400W için sıcaklık dağılımı

x=-1mm kesitinde 1500W sabit lazer gücünde sıcaklık 985-1354 °C aralığında, hız ve toz besleme miktarının birlikte artışı sıcaklığı artırmaktadır (Şekil 4.23). Bunlara ilaveten, esas sıcaklık artışını lazer gücüne daha fazla parçacığın maruz kalması sonucunda toz miktarı sağlamaktadır. Alt tablanın iç yapısındaki sıcaklık dağılımı lineer olarak devam etmektedir.



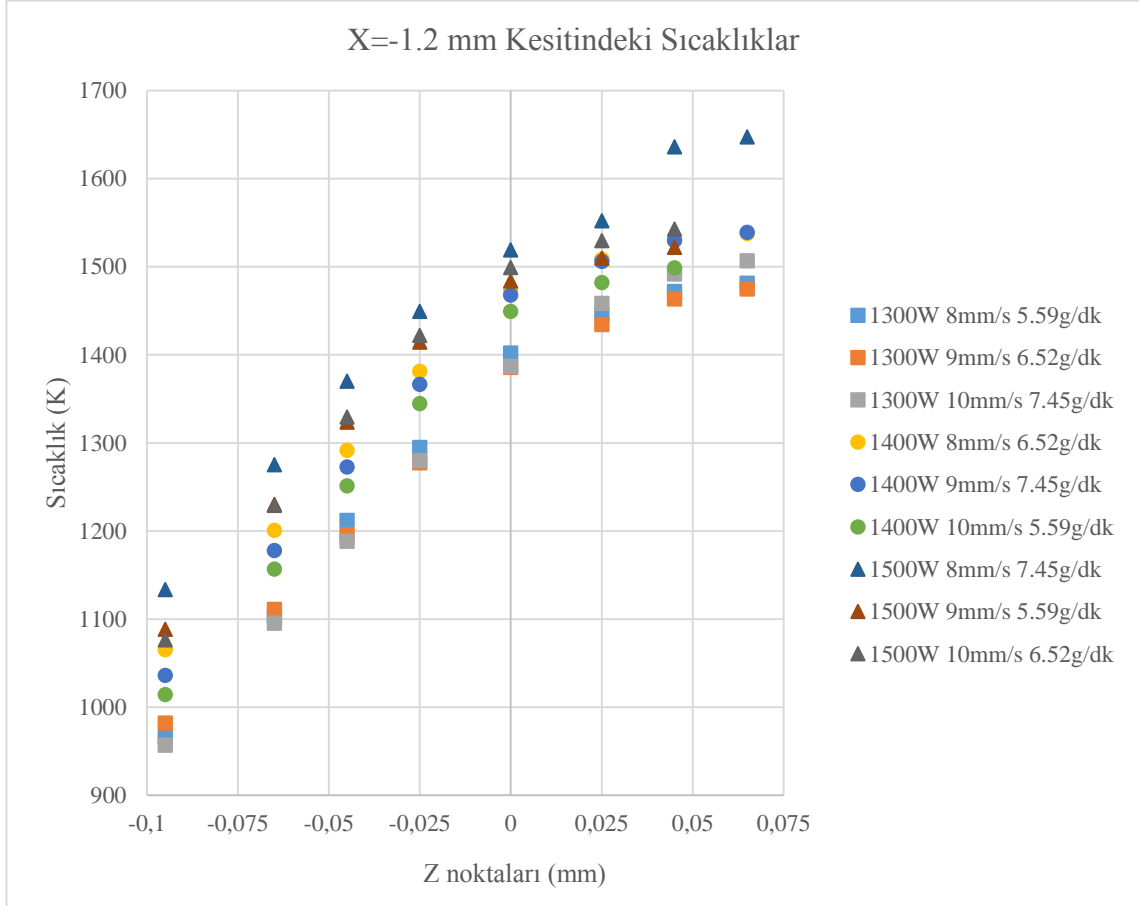
**Şekil 4.23.** x = -1mm kesitindeki 1500W için sıcaklık dağılımı

Sıcaklık dağılımlarının incelenmesine x=-1.2mm noktasında devam edilmiştir (Şekil 4.24).



**Şekil 4.24.** x eksenindeki kesitler , x=-1.2mm

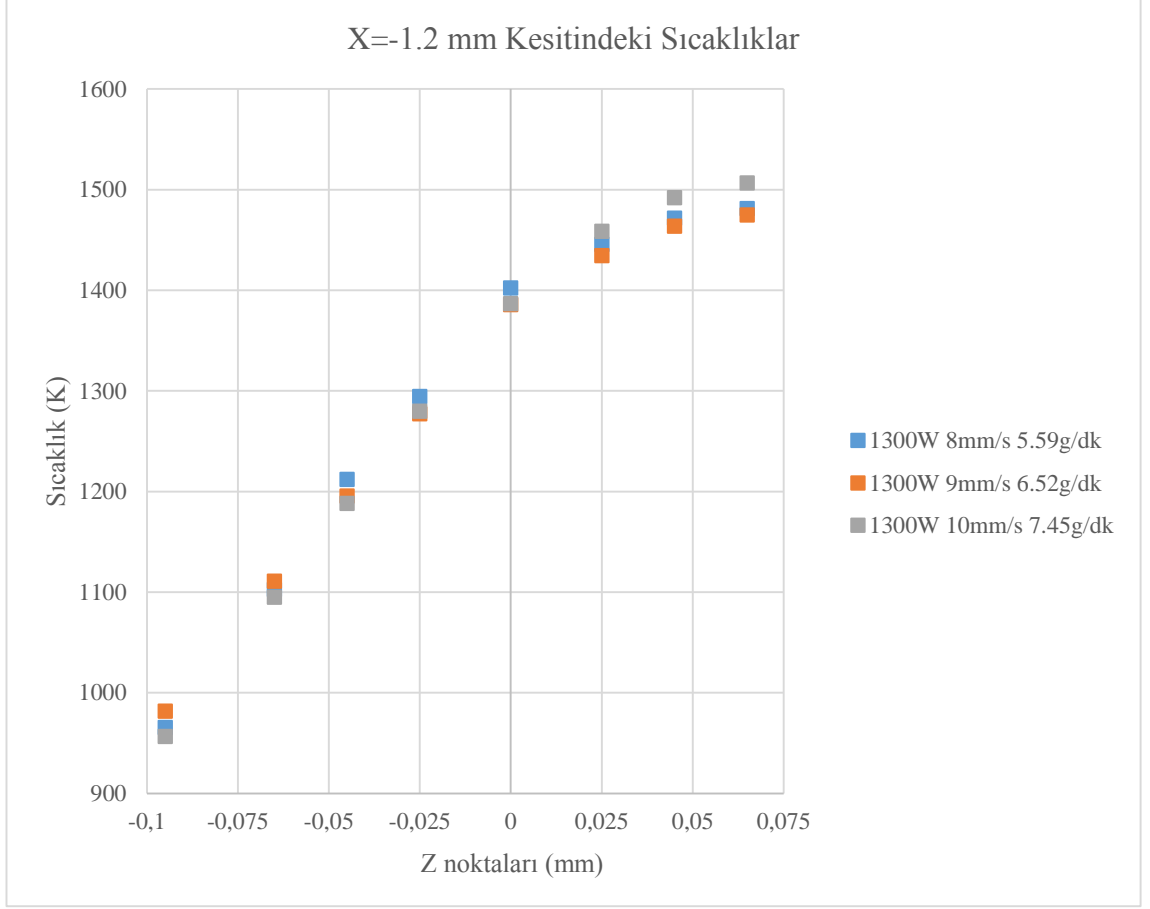
Lazer kaynağına biraz daha yakın bölge olan  $x=-1.2\text{mm}$  kesitindeki sıcaklık  $956-1647\text{ }^\circ\text{C}$  değerleri arasında dağılım göstermektedir (Şekil 4.25). En yüksek sıcaklık değeri ise maksimum lazer gücünde, tarama hızının en düşük olduğu değerde ve toz besleme miktarının en fazla olduğu durumda ortaya çıkmaktadır.



**Şekil 4.25.**  $x = -1.2\text{ mm}$  kesitindeki tüm analizlerin sıcaklık dağılımı

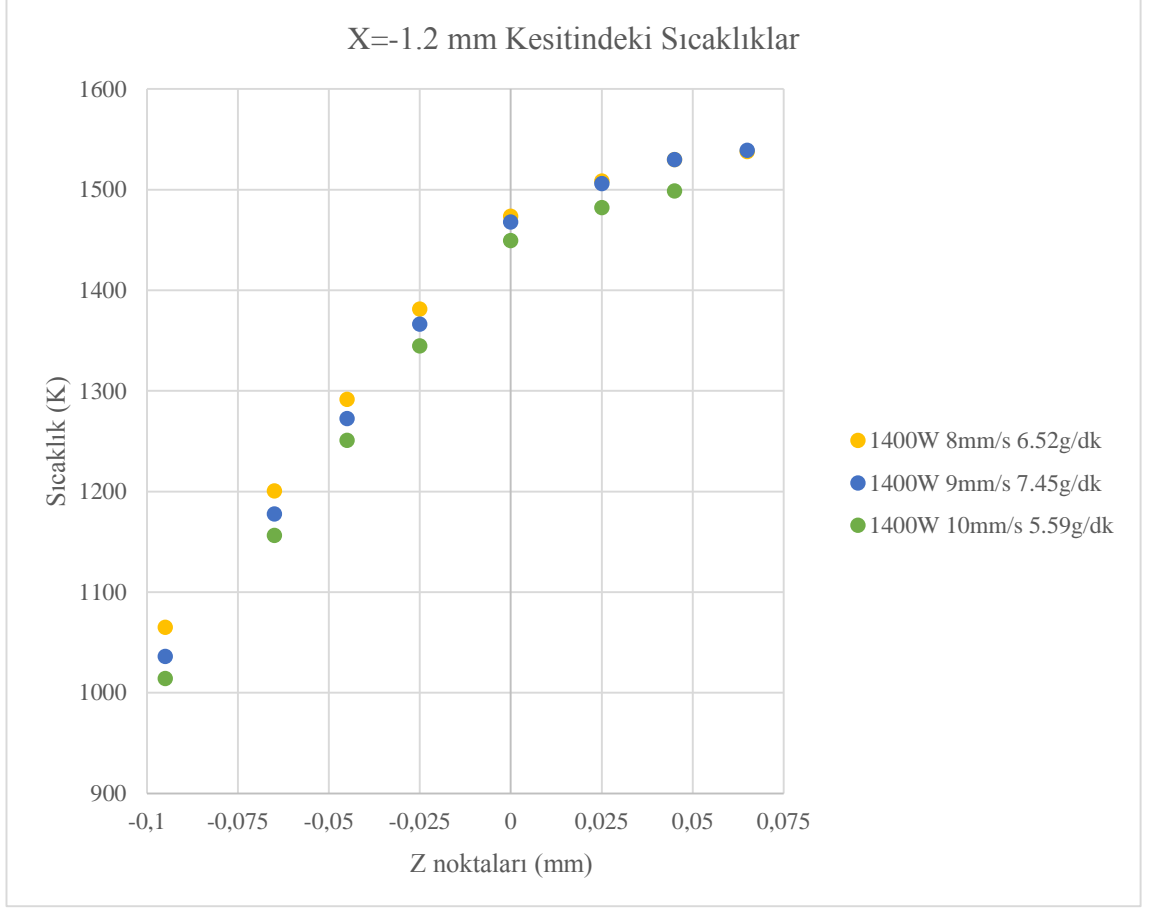
1300W sabit lazer gücünde sıcaklık dağılımı  $956-1506\text{ }^\circ\text{C}$  arasında değişmektedir. Alt tablanın iç yapısındaki sıcaklık dağılımı lineer olarak devam etmektedir. Tablanın üst kısmındaki tarama kesidinde ise sıcaklık özellikle daha fazla lazer gücüne maruz kalan daha fazla parçacığın olduğu durumda sıcaklıklar daha fazla görülmektedir.





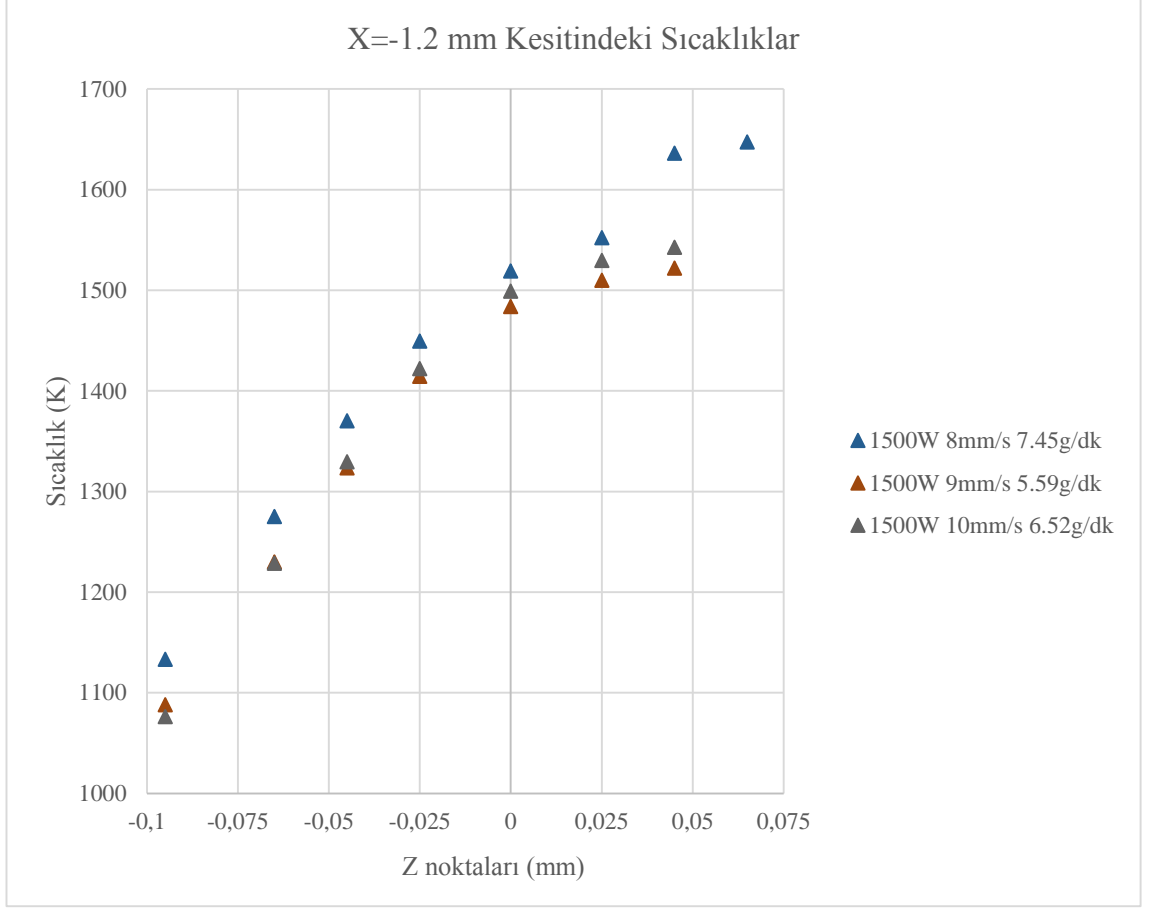
**Şekil 4.26.**  $x = -1.2$  mm kesitindeki 1300W için sıcaklık dağılımı

1400W sabit lazer gücünde  $x=-1.2$ mm kesitinde sıcaklık dağılımı 1014-1539 °C arasında değişmektedir (Şekil 4.27). Alt tablanın iç yapısındaki sıcaklığı tarama hızı belirlerken tablanın üst kısmının sıcaklığını püskürtülen toz miktarı belirlemektedir.



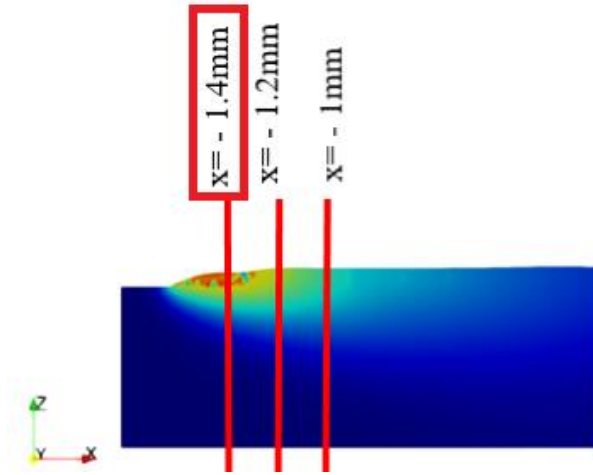
**Şekil 4.27.**  $x = -1.2$  mm kesitindeki 1400W için sıcaklık dağılımı

1500W sabit lazer gücünde sıcaklık dağılımı 1076-1647 °C arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 4.28). Tablanın üst kısmında, yavaş tarama hızı ve püskürtülen fazla toz miktarı sayesinde sıcaklıklar en yüksek seviyededir. Alt tablanın iç yapısındaki sıcaklık dağılımı lineer olarak devam etmektedir.



**Şekil 4.28.**  $x = -1.2$  mm kesitindeki 1500W için sıcaklık dağılımı

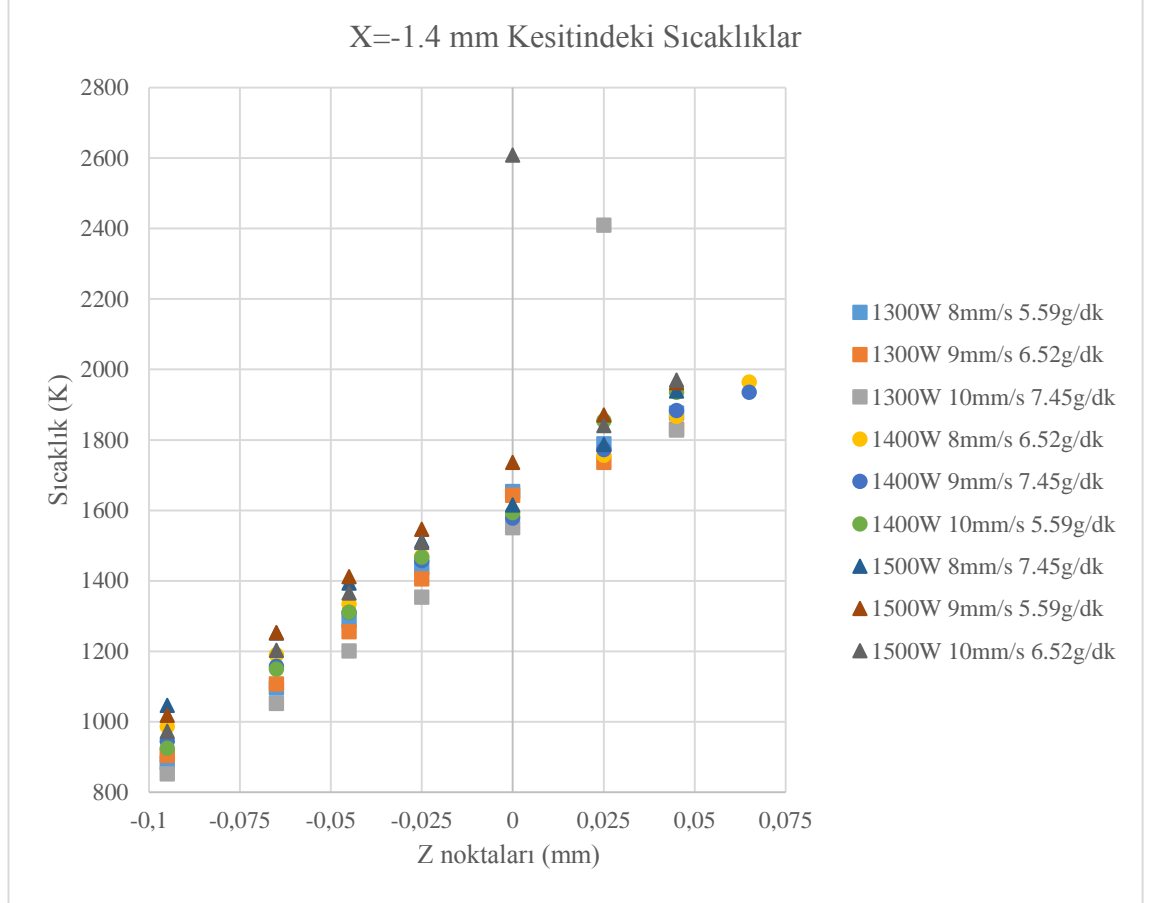
Lazer kaynağının bulunduğu  $x=-1$ .mm'deki sıcaklık dağılımı incelenmiştir (Şekil 4.29)



**Şekil 4.29.**  $x$  eksenindeki kesitler ,  $x=-1.4$ mm

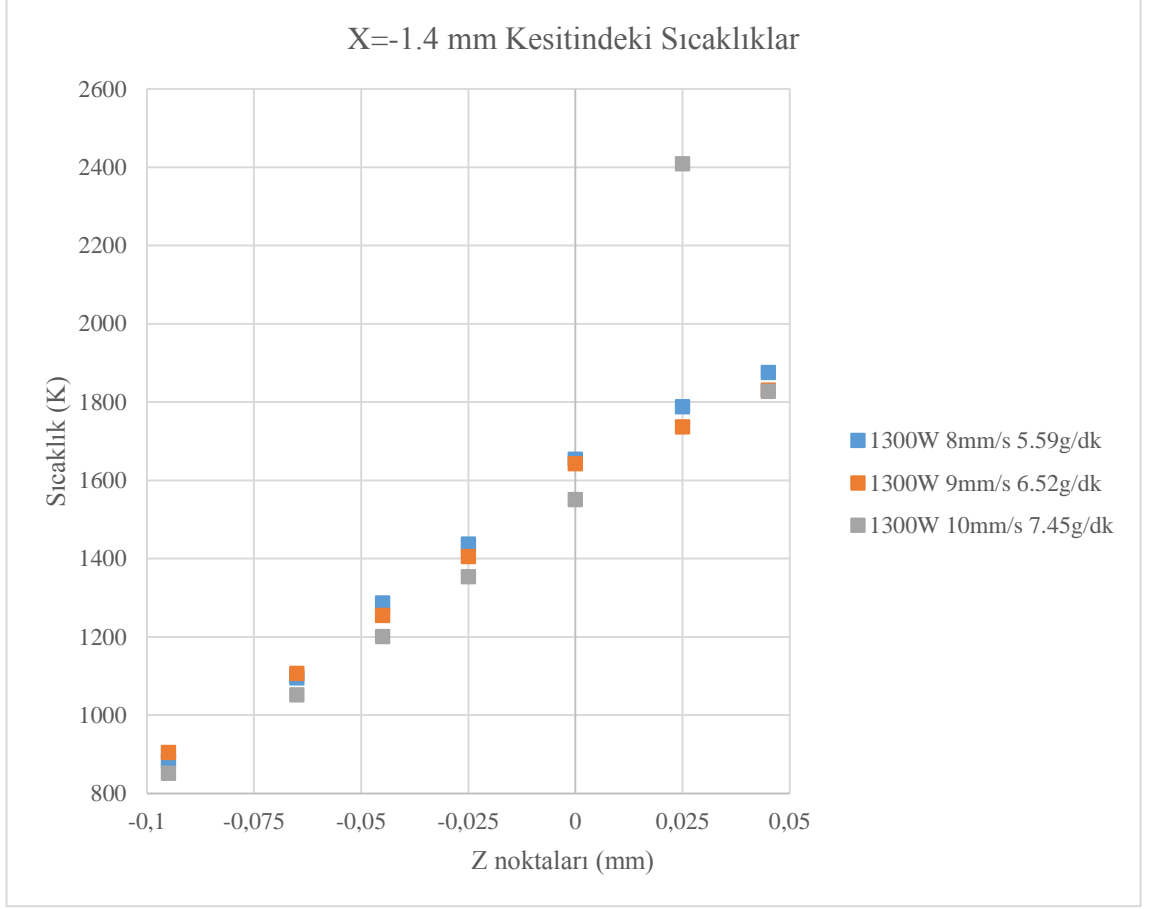
Lazer kaynağından alınan  $x=-1.4$ mm kesitindeki sıcaklık 851-1969 °C değerleri arasında dağılım göstermektedir (Şekil 4.30). İki noktada 2400 °C ve 2600 °C olarak yüksek

sıcaklık değerleri okunmuştur. En yüksek sıcaklık değeri ise maksimum lazer gücünde, tarama hızının en düşük olduğu değerde ve toz besleme miktarının en fazla olduğu durumda ortaya çıkmaktadır. En düşük sıcaklık değerleri ise lazer gücünün en düşük olduğu ve tarama hızının en hızlı olduğu durumda ortaya çıkmaktadır.



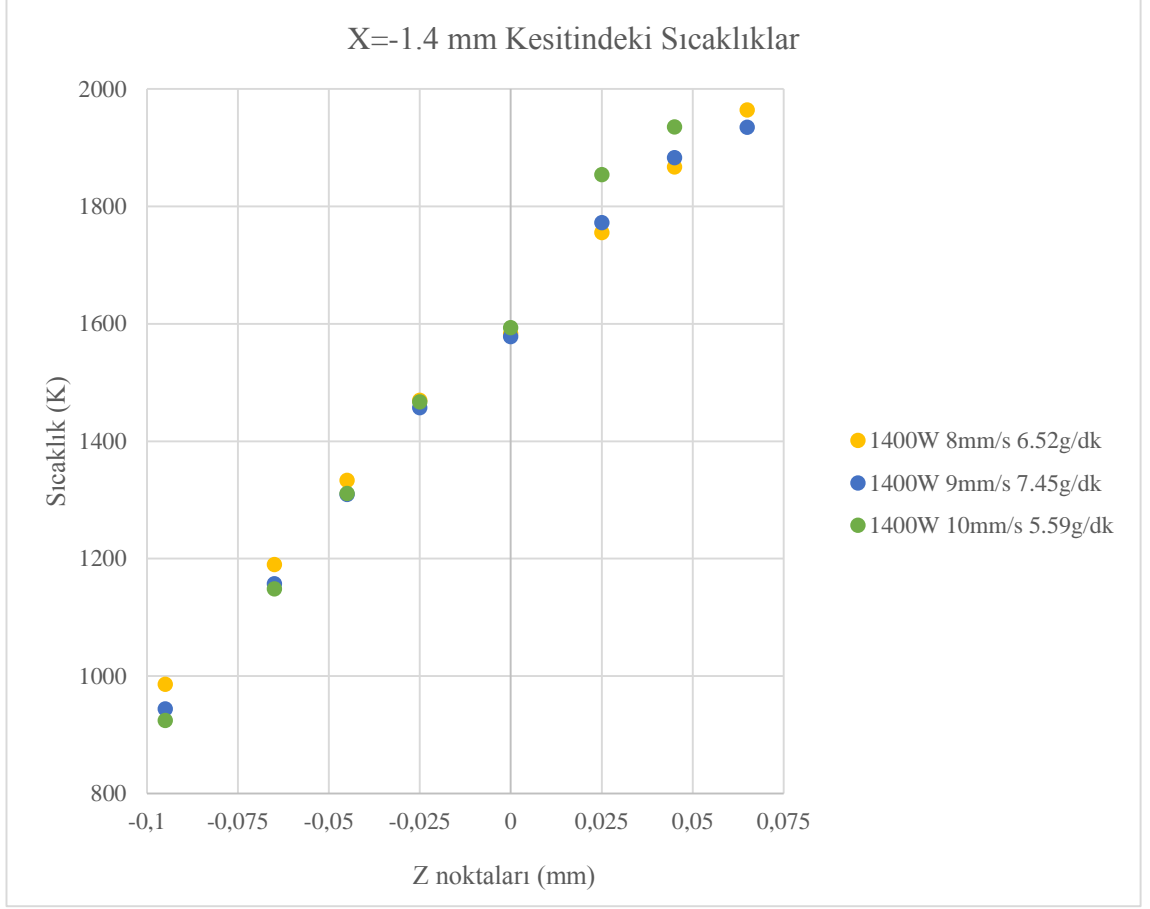
**Şekil 4.30.**  $x = -1.4$  mm kesitindeki tüm analizlerin sıcaklık dağılımı

1300W sabit lazer gücünde  $x=-1.4$ mm kesitinde sıcaklık dağılımı dengeli seyretmektedir (Şekil 4.31). Sıcaklık 851-1875 °C değerleri arasında dağılım göstermektedir.



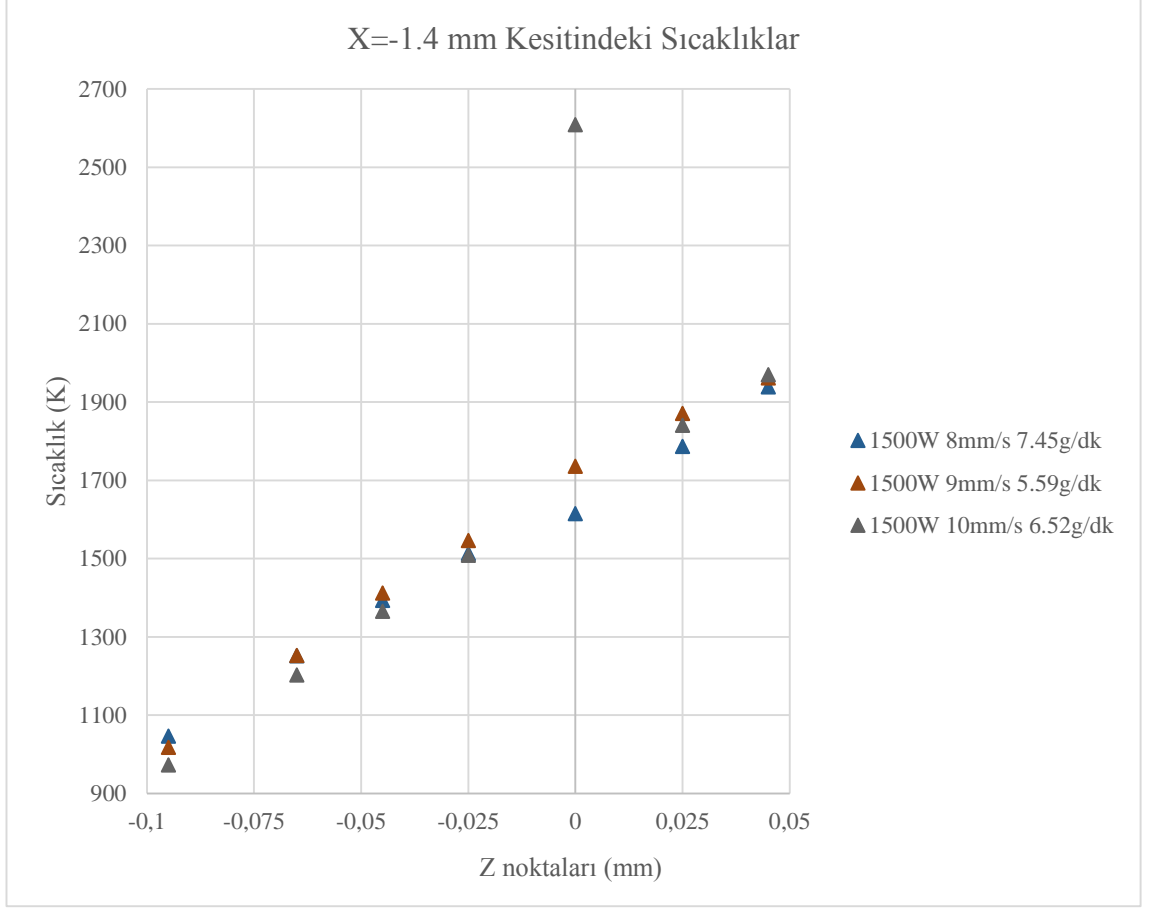
**Şekil 4.31.**  $x = -1.4$  mm kesitindeki 1300W için sıcaklık dağılımı

Lazerin bulunduğu  $x=-1.4$ mm kesitinde 1400W sabit lazer gücü için sıcaklık dağılımı 923-1934 °C arasındadır (Şekil 4.32). Tablanın alt kısmı için sıcaklığı hızın belirlediği görülmektedir. Yüzeyden  $z=-0.1$ mm noktasına inildikçe artan hız ile birlikte daha hızlı lazer gücü geçtiğinden sıcaklıklar düşüktür.



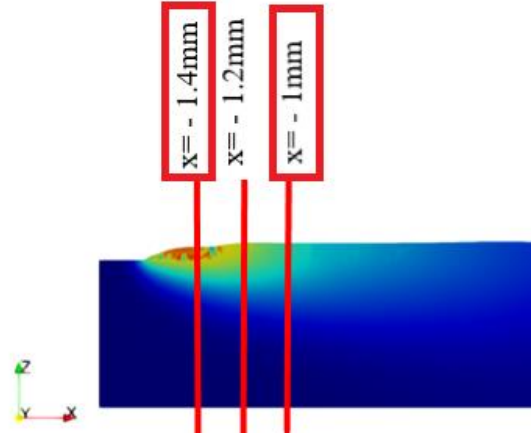
**Şekil 4.32.**  $x = -1.4$  mm kesitindeki 1400W için sıcaklık dağılımı

1500W sabit lazer gücünde  $x=-1.4$ mm kesitinde sıcaklık 972-1969 °C değerleri arasında dağılım göstermektedir (Şekil 4.33). Tablanın iç kısmında artan hız nedeniyle daha az lazere maruz kalacağından sıcaklık en düşük seviyededir. Tablanın üst tarafında ise en yüksek sıcaklık toz miktarının en düşük olduğu durumda ortaya çıkmaktadır.



**Şekil 4.33.**  $x = -1.4$  mm kesitindeki 1500W için sıcaklık dağılımı

Her bir analiz şartı için elde edilen analizlerde  $y=0$ mm'den kesit alınmıştır.  $y$  eksenindeki kesitten bakılarak Şekil 4.34'te görünen  $x=-1.4$ mm ile  $x=-1$ mm ölçüleri arasındaki soğuma miktarları ( $\Delta T$ ) hesaplanmıştır. Burada iki  $x$  noktası arasındaki mesafe bellidir (0.4mm). Her bir analiz şartında tarama hızları bellidir. Buradan da her bir analiz şartı için iki nokta arasında ne kadar zaman geçtiği ve bu geçen zamanda ne kadarlık bir soğumanın olduğu bulunabilmektedir. Soğuma davranışı, tablanın üzerinde biriken tek katmanlı taramanın  $z=0.045$ mm noktasından incelenmiştir.



**Şekil 4.34.**  $x=-1.4\text{mm}$  ile  $x=-1\text{mm}$  kesitleri arasında soğuma miktarı

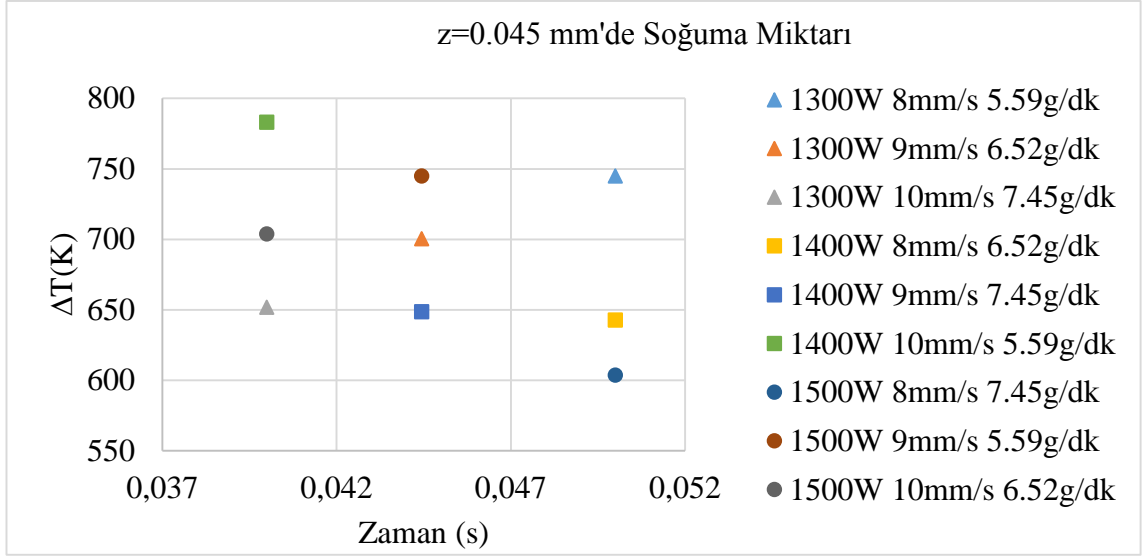
Şekil 4.35 incelendiğinde, tablanın üst kısmında ( $z= 0.045\text{mm}$ ) hızın en fazla ( $10\text{mm/s}$ ) olduğu durumda iki nokta arasındaki soğuma  $0.04\text{ sn}$ 'de en fazla  $1400\text{W}$   $10\text{mm/s}$   $5.59\text{g/dk}$  şartlarında  $783\text{K}$ , en az ise  $1300\text{W}$   $10\text{mm/s}$   $7.45\text{g/dk}$  şartlarında  $651\text{K}$  olarak görülmektedir.

Hızın  $9\text{mm/s}$  olduğu durumda iki nokta arasındaki soğumanın  $0.044\text{ sn}$ 'de en fazla  $1500\text{W}$   $9\text{mm/s}$   $5.59\text{g/dk}$  şartlarında  $745\text{K}$  ve en az ise  $1400\text{W}$   $9\text{mm/s}$   $7.45\text{g/dk}$  şartlarında  $648\text{K}$  olduğu görülmektedir.

Hızın en düşük ( $8\text{mm/s}$ ) olduğu durumda iki nokta arasındaki soğuma  $0.05\text{ sn}$ 'de en fazla  $1300\text{W}$   $8\text{mm/s}$   $5.59\text{g/dk}$  şartlarında  $744\text{K}$  ve en az ise  $1500\text{W}$   $8\text{mm/s}$   $7.45\text{g/dk}$  şartlarında  $603\text{K}$  olarak görülmektedir.

Üç hız değeri için ortak olarak çıkarılabilecek sonuç aynı hız değerinde toz besleme miktarı ne kadar az ise soğuma miktarı o kadar fazla, toz besleme miktarı ne kadar çok ise soğuma miktarı o kadar azdır. Yani soğuma miktarı toz besleme miktarı ile ters orantılıdır. Lazer gücü arttıkça soğuma miktarlarının arttığı gözlemlenmektedir.





**Şekil 4.35.** z=0.045mm noktasında soğuma miktarı

## 5. SONUÇ

Bu çalışmada, DED prosesinde paslanmaz çelik 316L toz malzemesi kullanılarak C1050 malzeme alt tabla üzerine tek katmanlı tarama yapılmıştır. Lazer gücü, tarama hızı ve toz besleme parametrelerinin etkilerini görmek için belirlenen seviyelerde Taguchi metodolojisi kullanılarak deney setleri oluşturulmuştur. Bu deney setleri analiz edilmiş, deneysel çalışmalarla üretimleri yapılmış ve deneysel çalışma sonuçlarına göre matematiksel olarak modellenmiştir. FLOW-3D® yazılımı kullanılarak multi-fizik sayısal modeli geliştirilmiştir. Modelde, gaz ve metal arasındaki arayüzü ayırt etmek için VOF yöntemi dahil edilmiştir. Tek katmanlı taramalar analiz edilmiş ve kesitleri incelenmiştir. Deneysel ölçümlere (yükseklik, genişlik ve derinlik) dayalı olarak, tek katman yolun farklı geometrik yönlerini tahmin etmek için matematiksel formüller türetilmiştir. Multi- fizik modeli ve matematiksel regresyon modeli sonuçları deneysel ölçümlerle karşılaştırıldı. Simülasyon modeli sonuçları deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında tarama yüksekliği için % 2.73-15.82, tarama genişliği için % 8.25-14.79 ve tarama derinliği için % 10.37-131.76 oranlarında sapmaların olduğu görülmüştür. Matematiksel regresyon modeli sonuçları deneysel çalışmalarla kıyaslandığında tarama yüksekliği ve genişliğinde sapmanın %10'u geçmediği ve tarama derinliği için maksimum sapmanın %43.40 olduğu görülmüştür. Malzeme bileşimindeki farklılıklar ve kullanılan makinalardaki farklılıklar matematiksel modeldeki hataları arttırabilmektedir. Ancak yine de elde edilen matematiksel modeller farklı parametre aralıklarında çalışma yapabilmek için başlangıç noktası olarak kabul edilebilir. Bu, gerekli deneysel denemelerin sayısını azaltacak, dolayısıyla zaman ve kaynak tasarrufu sağlayacaktır. ANOVA sonuçlarına göre, tarama yüksekliği üzerinde en önemli etkiye sahip parametre toz besleme hızı ; tarama genişliğinde ise lazer gücüdür. Tarama derinliği için alt tabla üzerindeki spesifik enerji yoğunluğunu etkilediğinden hem lazer gücü hem de toz besleme hızı kritiktir. Bu çalışmanın sonucunda hem sanal analiz hem de matematiksel regresyon modelleri ile tek katmanlı taramaya ait geometriyi (yükseklik, genişlik ve derinlik) belirli oranda doğrulukla tahmin edilebileceği görülmüştür. En yüksek sıcaklık değeri ise maksimum lazer gücünde, tarama hızının en düşük olduğu değerde ve toz besleme miktarının en fazla olduğu durumda ortaya çıkmaktadır. Bu durum lazere daha çok maruz kalmış parçacık sayısının yavaş ilerleme sayesinde yüzeye daha fazla nüfus etmesiyle açıklanmaktadır. Geometrik kıyaslamalarda ortaya çıkan

farklılıkların sebeplerinden birisi koruyucu gaz olan Argonun sabit olarak tanımlanmasıdır. Analizlerde koruyucu gaz durağan olarak modellenmiş ve soğumaya olan etkisi gözardı edilmiştir. Deneysel çalışmalarda sistemde vakum yer almaktadır analizlerde vakum sistemi tanımlanmamıştır bu da ikincil hata sebebi olarak gösterilebilir.

Sıcaklıklarla ilgili olarak çalışmalar incelendiğinde en yüksek sıcaklıkların yüksek lazer güçlerinde, düşük tarama hızlarında ve yüksek toz besleme miktarlarında gözlemlendiği görülmektedir. Alt tablanın iç yapısındaki sıcaklığı tarama hızı belirlerken tablanın üst kısmının sıcaklığını püskürtülen toz miktarı belirlemektedir. Yüksek lazer gücü daha yavaş ilerlerken iç yapıda daha fazla ısınma sağlamaktadır. Alt tablanın iç kısmındaki sıcaklık değişimine bakıldığında lineer olarak değişim göstermektedir. Bu da henüz iç yapıya dahil olmamış toz partiküllerinin haricinde tablanın kendi malzeme özelliklerinin ısı ile gösterdiği davranışı göstermektedir.

Soğuma miktarları ile ilgili çalışmalar göstermiştir ki aynı hız değerinde toz besleme miktarı ne kadar az ise soğuma miktarı o kadar fazla toz besleme miktarı ne kadar çok ise soğuma miktarı o kadar azdır. Lazer gücü arttıkça soğuma miktarlarının arttığı gözlemlenmektedir.

Matematiksel regresyon modelinden genişlik, yükseklik ve derinlik için elde edilen formülasyonlar tez çalışmasını oluşturan parametreler haricindeki parametrelerle ilerleyen çalışmalarda doğrulanacaktır.

Bu tez çalışmasında tek katmanlı bir taramanın farklı parametreler ile alt tablaya ne kadar nüfuz ettiği, elde edilen taramanın geometrik ölçülerinin nasıl etkilendiği incelenmiştir. Çalışmaların devamında malzemenin mukavemetini etkileyecek porozitelerin proses parametrelerindeki değişkenliklerle nasıl değişeceği kesitler alınarak incelenecektir. Tek katmanlı tarama çalışmasının ardından birden fazla katmandan oluşan taramalarda proses parametrelerinin nasıl etkilendiğine yönelik çalışmalara devam edilecektir.

## KAYNAKLAR

- Amine, T., Newkirk, J., & Liou, F. (2014). Investigation of effect of process parameters on multilayer builds by direct metal deposition. *Applied Thermal Engineering*, 500-511. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.005>
- Bayat, M. N. (2021). On the role of the powder stream on the heat and fluid flow conditions during Directed Energy Deposition of maraging steel—Multiphysics modeling and experimental validation. *Additive Manufacturing*, 43. doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102021>
- Beghini, L. L., Stender, M., Moser, D., Trembacki, B. L., & Veilleux, M. G. (2021). A coupled fluid-mechanical workflow to simulate the directed energy deposition additive manufacturing process. *Computational Mechanics*, 1041–1057. doi:<https://doi.org/10.1007/s00466-020-01960-9>
- Bıyıklı, M., Karagöz, T., Çallı, M., Muslim, T., Özalp, A. A., & Bayram, A. (2022). Single track geometry prediction of Laser Metal Deposited 316L-Si via Multi-physics modelling and Regression analysis with experimental validation. *Metals and Materials International*. doi:10.1007/s12540-022-01243-3
- Çallı, M., Onaylı, A., Karagöz, T., & Bıyıklı, M. (2020). An Application Of Directed Energy Deposition Manufacturing Method On An Automotive Component. 5. *International Conference on Material Science and Technology (IMSTEC 2020)*, (s. 175-177).
- Davim, J., Oliveira, C., & Cardoso, A. (2008). Predicting the geometric form of clad in laser cladding by powder using multiple regression analysis (MRA). *Materials & Design*, 554–557. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.023>
- Diegel, O. N. (2019). *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing (Springer Series in Advanced Manufacturing) (1st ed. 2019 ed.)*.
- EPMA. (2019). Introduction to Additive Manufacturing Technology. (3rd). <http://eklemeliimalat.info.tr/> adresinden alındı
- Gibson, I. R. (2020). *Additive Manufacturing Technologies (3rd ed. 2021 ed.)*. Springer.
- Islam, M., Purtonen, T., Piili, H., Salminen, A., & Nyrrhilä, O. (2013). Temperature Profile and Imaging Analysis of Laser Additive Manufacturing of Stainless Steel. *Physics Procedia*, 835-842. doi:<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2013.03.156>

- Kundakcıoğlu, E., Lazoglu, I., Poyraz, Ö., Yasa, E., & Cizicioğlu, N. (2018). Thermal and molten pool model in selective laser melting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi:<https://doi.org/10.1007/s00170-017-1489-1>
- Lee, E., Shin, G., Yoon, H., & Shim, D. (2017). Study of the effects of process parameters on deposited single track of M4 powder based direct energy deposition. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 3411–3418. doi:<https://doi.org/10.1007/s12206-017-0239-5>
- Lee, H. K. (2008). Effects of the cladding parameters on the deposition efficiency in pulsed Nd:YAG laser cladding. *Journal of Materials Processing Technology*, 321–327. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.09.024>
- Lee, Y. &. (2016). Modeling of heat transfer, fluid flow and solidification microstructure of nickel-base superalloy fabricated by laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 178–188. doi:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.05.003>
- Lee, Y., Nordin, M., Babu, S., & Farson, D. (2014). Influence of Fluid Convection on Weld Pool Formation in Laser Cladding. *Welding journal.*, 93.
- Liu, Y., Liu, C., Liu, W., Ma, Y., Tang, S., Liang, C., . . . Zhang, C. (2019). Optimization of parameters in laser powder deposition AlSi10Mg alloy using Taguchi method. *Optics & Laser Technology*, 470–480. doi:<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.10.030>
- Magana, A., Yoshioka, J., Eshraghi, M., & Allu, P. (2022). Multiphysics modeling of thermal behavior, melt pool geometry, and surface topology during laser additive manufacturing. *Materials & Design*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110831>
- Methods and formulas for Analyze Taguchi Design - Minitab. (n.d.). (C) Minitab, LLC. All Rights Reserved.* (2019). <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/how-to/taguchi/analyze-taguchi-design/methods-and-formulas/methods-and-formulas/> adresinden alındı
- Miedzinski, M. (2017). *Materials for Additive Manufacturing by Direct Energy Deposition*. Gothenburg, Sweden.
- Milewski, J. O. (2017). *Additive Manufacturing of Metals: From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewellery*(Springer Series in Materials Science, 258) (1st ed. 2017 ed.). Springer.
- Onwubolu, G., Davim, J., Oliveira, C., & Cardoso, A. (2007). Prediction of clad angle in laser cladding by powder using response surface methodology and scatter search. *Optics & Laser Technology*, 1130–1134. doi:<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2006.09.008>

Piekarska, W., & Kubiak, M. (2012). Theoretical investigations into heat transfer in laser-welded steel sheets. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 159–166. doi:<https://doi.org/10.1007/s10973-012-2486-0>

Pitscheneder, W. &. (1996). Role of sulfur and processing variables on the temporal evolution of weld pool geometry during multikilowatt laser beam welding of steels. 71-80.

Poyraz, Ö., & Kuşhan, M. (2018). Investigation of the effect of different process parameters for laser additive manufacturing of metals. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 729-742. doi:[10.17341/gazimmfd.416479](https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416479)

Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles –Terminology. (2015). ISO/ASTM 52900:2015(E).

Ur Rehman, A., Mahmood, M., Pitir, F., Salamci, M., Popescu, A., & Mihailescu, I. (2021). Mesoscopic Computational Fluid Dynamics Modelling for the Laser-Melting Deposition of AISI 304 Stainless Steel Single Tracks with Experimental Correlation: A Novel Study. *Metals*, 10-11. doi:<https://doi.org/10.3390/met11101569>

Wang, S., Zhu, L., Fuh, J., Zhang, H., & Yan, W. (2020). Multi-physics modeling and Gaussian process regression analysis of cladding track geometry for direct energy deposition. *Optics and Lasers in Engineering*, 127. doi:<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.105950>

Yan, Z., Liu, W., Tang, Z., Liu, X., Zhang, N., Li, M., & Zhang, H. (2018). Review on thermal analysis in laser-based additive manufacturing. *Optics & Laser Technology*, 427-441. doi:<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.04.034>

Zhang, Y., Jarosinski, W., Jung, Y., & Zhang, J. (2018). Additive manufacturing processes and equipment. *Additive Manufacturing*, 39–51. doi:<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812155-9.00002-5>

Zhang, Y., Lim, C., Tang, C., & Li, B. (2021). Numerical investigation on heat transfer of melt pool and clad generation in directed energy deposition of stainless steel. *International Journal of Thermal Sciences*, 165. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106954>

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Merve BIYIKLI  
Doğum Yeri ve Tarihi :  
Yabancı Dil : İngilizce, Almanca, Fransızca

Eğitim Durumu  
Lise : Bilecik R.A.Ö. Fen Lisesi 2004-2008  
Lisans : Bursa Uludağ Üniv. Makine Mühendisliği 2008-2012  
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniv. Makine Mühendisliği 2012-2015

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : TDM Otomotiv San. Tic. Ltd. Şti., 2012-2015  
Coşkunöz Holding, 2015-...

İletişim (e-posta) :

Yayınları :

1. ÇIBIK, M., KARAMANGİL, İ., SÜRMEYEN, A. 2014. Endüstriyel Ocak Bekinin Performans Analizi. OTEKON'14. 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi
2. OTOSEM'15 - Salıncak Kolu ve Yeni Nesil Saclar
3. OTEKON'16 - Ön Süspansiyon Sisteminde Ağırlık Hafifletme Çalışmaları
4. IMSEC'16 – Otomobil Tampon Parçasının Yüksek Mukavemetli Çelik ve Hadde Büküm Prosesi ile Şekillendirilmesi
5. XX. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ - Boron Çeliğinden Üretilmiş Torsiyon Tipi Arka Aks Ara Bağlantı Borusunun Elektrik Direnç Yöntemi İle Isıl İşlemi
6. IMSEC'17- Salıncak Kollarında Alternatif Tasarım Etkilerinin Sonlu Elemanlar Analizleri İle Kıyaslanması
7. IMSEC'17- Alüminyum Malzemelerde Derin Çekme Prosesi Simülasyon Çalışmaları
8. 1st International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech 2018) - Tek katlı salıncak kolu geliştirmede tasarım, analiz ve proses korelasyonları
9. 1st International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech 2018) - Panel radyatörlerde ısı verimi arttırmaya yönelik çalışmalar

10. 1st International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech 2018) -Toz Yatak Teknolojisi ile Üretilmiş Kafes Yapıların Tasarım ve Doğrulama Çalışmaları
11. 5th International Conference On Science And Technology (Imstec 2020) - An Application Of Directed Energy Deposition Manufacturing Method On An Automotive Component
12. 8th International conference on Hot Sheet Metal forming of High Performance - Application Of A Newly Developed Press Hardened Steel For The Automotive Suspension Parts
13. Bıyıklı M., Karagoz T., Çallı M., Muslim T. Ozalp A.A, Bayram A., 2022, Single Track Geometry Prediction Of Laser Metal Deposited 316L-Si Via Multi-Physics Modelling And Regression Analysis With Experimental Validation