

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

METAL LAZER ERGİTME MODELLEMESİ VE DOĞRULAMASI

Mehmet Alper DEMİRAY

**Danışman
Prof. Dr. M. Cengiz KAYACAN**

**II. Danışman
Prof. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU**

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA – 2023**



© 2023 [Mehmet Alper DEMİRAY]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	6
2.1. Lazer Ergitme Yöntemi.....	6
2.2. Metal Lazer Ergitme Cihazları Alt Sistemleri	9
2.2.1. Toz besleme sistemi.....	9
2.2.2. Toz serme sistemi.....	10
2.2.3. Tabla sistemi.....	11
2.2.4. Lazer-optik sistem.....	13
2.3. Metal Lazer Ergitmede Karşılaşılan Sorunlar, Modelleme İhtiyacı	18
2.4. Isıl Modelleme Nümerik Analiz Literatür Özeti.....	21
3. METAL LAZER ERGİTMEDE ISI TRANSFERİ VE MATEMATİK MODELEME	36
3.1. Zamana ve Konuma bağlı Isı Transferi.....	37
3.2. Varsayımlar.....	40
3.3. Lazer Enerji Kaynağı.....	42
3.3.1. Ti6Al4V ve 316L Malzeme için gaussian konik yüzeysel ışın dağılımı.....	42
3.3.2. Ti6Al4V ve 316L Malzeme için Goldak çift eliptik ışın dağılımı.....	47
3.4. Ti6Al4V ve 316L Malzeme İçin İletimle Isı Transferi.....	49
3.4.1 Ti6Al4V ve 316L Malzeme için teorik yoğunluk ve gözeneklilik	49
3.4.2 Ti6Al4V ve 316L malzeme için deneysel yoğunluk ve gözeneklilik	55
3.4.3 Ti6Al4V ve 316L Malzeme için iletim katsayısı	57
3.5. Ti6Al4V ve 316L Malzeme İçin Gizli Isı ve Isıl Kapasite	60
3.6. Ti6Al4V ve 316L Malzeme İçin Taşınım ve Işınım ile Isı Transferi.....	65
3.7. Başlangıç ve Sınır Şartları	73
4. METAL LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İÇİN SONLU ELEMANLAR MODELİ.....	74
4.1. Sonlu Elemanlar Metodu.....	74
4.2. Sonlu Elemanlar Modelinde Tanımlamalar	77
4.3. Sonlu Farklar Temelinde İntegrasyon ve Sonlu Elemanlar Eşitliği	80
4.4. Metal Lazer Ergitme 3 Boyutlu Sonlu Eleman Modeli.....	85
4.5. Ti6Al4V ABAQUS ile Metal Lazer Ergitme Modelinin Kurulması	92
4.6. 316L İçin ABAQUS Yazılımında Metal Lazer Ergitme Modeli	98
5. LAZER ERGİTME CİHAZININ GELİŞTİRİLMESİ	100
5.1. Lazer Ergitme Cihazı Tasarımı	100
5.1.1. Ana gövde tasarımı.....	100
5.1.2. Toz besleme sistemi tasarımı.....	107
5.1.3. Toz serme sistemi tasarımı.....	108
5.1.4. İmalat tablası sistemi tasarımı	113
5.2. Arge Amaçlı Lazer Ergitme Cihazının Alt Sistemleri İmalatı	116
5.2.1. Ana gövdenin ve serici alt sistemin imalatı	116
5.2.2. İmalat tabla sistemi tasarımı	117
5.3. Mekanik Alt Sistemlerin Montajının Tamamlanması.....	118
5.3.1. İmalat tablası alt sistemi montajı.....	118

5.3.2. Toz besleme alt sistemi montajı	121
5.3.3. Toz serme alt sistemi ve kabin mekanik montajı.....	123
5.3.4. Lazeroptik alt sistemin oluşturulması	124
5.4. Koruyucu Gaz Filtrasyon Sistemi Tasarımı ve İmalatı	134
5.4.1. Pnömatik tesisat şemasının tasarımı ve montajı	134
5.4.2. Filtre sisteminin tasarımı ve imalatı	136
5.4.3. Gaz ve filtrasyon sisteminin montajı	136
5.5. Lazer Ergitme Cihazında Odak Belirleme- Işın Çapı Doğrulama.....	141
5.5.1. Odak belirleme	141
5.5.2. Işın çapı doğrulama.....	143
6. GRAFİK TEORİSİ (GT) İLE PARÇA ÖLÇEKLİ BENZETİM VE DOĞRULAMA...145	
6.1. GT Yönteminin Geliştirilmesi	145
6.1.1. Parça ölçekli literatür çalışmaları.....	146
6.1.2. Grafik teorisi matematiksel temeli.....	148
6.1.2.1. Isıl iletim modeli	148
6.1.2.2. Taşınım ile ısı kaybı modeli.....	156
6.1.2.3. Isı girdi modeli.....	157
6.1.3. GT matlab kodlama süreci.....	158
6.2. Parça Tasarımı	161
6.3. GT Benzetim Çalışması.....	164
6.4. Deneysel Çalışma ve Gözlem	166
6.5. Benzetim ve Deney Sonucu Oluşan Sıcaklıklar	170
6.5.1. Benzetim tahminleri	170
6.5.2. Deneysel imalat.....	177
7. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	181
7.1. 316L Malzeme İçin Sıcaklık ve Havuz Boyutlarının Kıyaslanması.....	181
7.1.1. Sıcaklık dağılımı ve maksimum sıcaklıklar (316L, tek çizgi)	182
7.1.2. Deneysel ölçüm (316L, tek çizgi)	184
7.1.3. Ergiyik havuzu boyutları (316L, tek çizgi).....	189
7.2. Ti6Al4V Tek Çizgi İçin ABAQUS Benzetimi İle Elde Edilen Sonuçlar	198
7.2.1. Sıcaklık dağılımı ve maksimum sıcaklıklar (Ti6Al4V, tek çizgi)	199
7.2.2. Deneysel ölçüm (Ti6Al4V, tek çizgi)	200
7.2.3. Ergiyik havuzu boyutları (Ti6Al4V, tek çizgi)	202
7.4. GT Modeli Kalibrasyonlu Benzetim ve Ölçüm Sonuçları Kıyaslaması	213
8. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	223
9. GELECEKTE PLANLANAN ÇALIŞMALAR.....	224
KAYNAKLAR	225

ÖZET

Doktora Tezi

METAL LAZER ERGİTME MODELLEMESİ VE DOĞRULANMASI

Mehmet Alper DEMİRAY

**Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. M. Cengiz KAYACAN

II. Danışman: Prof. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU

Bu tez çalışmasında bir eklemeli imalat yöntemi olan metal lazer ergitme yöntemi için hem mikro hem de makro ölçekli ısı benzetim modelleri geliştirilmiş ve bu modeller deneysel ölçümlerle doğrulanmıştır. Isıl modellemede malzeme özellikleri için literatür verilerinden yararlanılmış; lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi ve katman kalınlığı gibi değişken parametreler kullanılıp bu değişkenlerin metal lazer ergitme sürecine etkileri de parametrik halde ve detaylı şekilde incelenmiştir.

Isıl benzetim modelleri ve analizi işlemleri mikro modeller için ABAQUS arayüzünde Fortran ve Python dillerinde, makro model içinse MATLAB yazılımında C++ dilinde kaynak kodlar geliştirilmek suretiyle gerçekleştirilmiştir. Öncelikle hareketli ısı kaynağı problemi için Goldak ısı modeli uygulanmış, iletim, taşınım ve ışınlama ısı transferi türleri modellerde dikkate alınmıştır. İki farklı malzeme türüne yönelik (316L ve Ti6Al4V) geliştirilen mikro modellerde malzeme özellikleri sıcaklık ve gözenekliliğe bağlı alınırken, Grafik Teorisine dayalı makro model ise IN718 malzemeye yönelik sabit ortalama malzeme özellikleri dikkate alınarak geliştirilmiştir.

316L malzeme için geliştirilen mikro modelin doğrulanması için özel bir seçici lazer ergitme (SLE) cihazı tasarlanmış, imalatı ve kontrolü tamamlanmıştır. Bu cihaz üzerinde gerekli imalatlar yapılırken, cihaza bağlanan bir pirometre sensörü ile sıcaklıklar ölçülerek modeller doğrulanmıştır. Ayrıca Ti6Al4V toz hammadde için aynı mikro modelin doğrulama çalışması ticari bir SLE cihazında yürütülmüştür. Elde edilen bulgulara dayanarak mikro ölçekli modellerin gerçekte oluşan ergiyik havuz ölçülerini ortalama $\pm$ % 10 oranında bir hata ile sıcaklıkları ise ortalama $\pm$ 15 hata ile tahmin edebildiği görülmüştür. Makro modelin doğrulanması için ise yine farklı bir ticari SLE cihazında imalatlar yapılırken, imalatlar sırasında yüksek hızlı ısı görüntüleyici kamera kurulumu ile sıcaklıklar ölçülmüştür. Grafik Teorisi ile benzetim sonucunda da, çeşitli endüstriyel geometriye parçalarda oluşan sıcaklıklar da $\pm$ % 3 hata ile tahmin edilmiştir.

Sonuç olarak, geliştirilen modellerin seçmeli lazer ergitme yöntemini modellemede yüksek tahmin kabiliyetine sahip olduğu ve ısı değişimlerinin üzerindeki etkisi gözlemlenerek bu değişimlerin kontrolünde kullanılabileceği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, metal lazer ergitme, ısı modelleme, mikro model

2023,246 sayfa

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

MODELLING OF METAL LASER MELTING AND VERIFICATION

Mehmet Alper DEMİRAY

**Suleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. M. Cengiz KAYACAN

Co-Supervisor: Prof. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU

In this thesis, thermal modelling of metal laser melting method has been done with both in micro and macro scale. Verification study of the predicted thermal model temperatures has been also conducted by experimental measurements. To set up thermal model, material properties have been used from the literature. laser melting parameters have been used such as laser power, scanning speed, hatching distance.

Analysis and simulation studies have been calculated by writing source codes containing Fortran and Python languages in ABAQUS for micro models and MATLAB software interface containing C++ language for macro model. At the first step, Goldak Heat Model is applied for moving heat source problem. For conduction, convection and radiation heat transfer types, related mathematical expressions is taken into account. While material properties is taken as temperature dependent for micro models that is developed for two types of raw material (316L ve Ti6Al4V), material properties is taken as constant for macro model which is based on Graph Theory.

To validate micro model simulation results for 316L material, special metal laser melting powder bed device was designed and manufactured. During laser track manufacturings on this device, temperatures was measured by using pyrometer sensor. Temperature measurements were conducted on a commercial laser melting device and the same model was adopted by using another raw material (Ti6Al4V) at this device. Based on findings in this thesis, real temperatures predicted by micro thermal model with % 15 mean error and melt pool dimensions were predicted with % 10 mean error. In-situ temperature measurements were conducted during the manufacturing of a different another substrate by using different raw material (IN718) on a different laser melting device to validate Graph Theory based simulation results. By using Graph Theory which is newly promising modelling method in the literature, end of cycle temperatures of industrial purposed geometries were predicted with % 3 mean error successfully.

As a result, it was revealed that both developed micro and macro models have the ability of prediction of parameter effects on heat variations. It was also claimed that those effects can be observed and can be used to control heat accumulation or variation.

Keywords: Additive manufacturing, metal laser melting, thermal model, micro model

2023, 246 pages

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli danışman hocam Prof. Dr. M. Cengiz KAYACAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Araştırmam süresince sabırla sorularımı cevaplayan, bilgi ve tecrübesinden faydalanmamıza müsaade eden değerli ikinci danışman hocam Prof. Dr. Cengiz BAYKASOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Literatür araştırmalarım ve proje işlerimde yardımcı olan, herşeyi birlikte planladığım ve uyguladığımız değerli çalışma arkadaşım ve dostum Bahri ŞEKERCİ'ye, bölümdeki en büyük yardımcım olan dostum Arş. Gör. Mert GÜRGEN'e, maddi ve manevi olarak desteklerini daima hissettiğim dostum öğretim görevlisi Osman SALTİK'a ve yardımlarından dolayı çalışma arkadaşım Arş. Gör. Fehmi MUTLU'ya, teşekkürlerimi sunarım.

FDK-2019-7319 No'lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Tezimin gerçekleşmesinde 217M499 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Tezimin gerçekleşmesinde 2214A doktora sırası yurtdışı burs programı ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında beni daima destekleyen öncelikle anneme, babama ve ağabeylerime sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Varlığıyla bana güç katan biricik eşim, can yoldaşım Münevver SELCEN DEMİRAY'a sonsuz sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Mehmet Alper DEMİRAY
ISPARTA, 2023

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Eklemeli imalat işlem basamakları	1
Şekil 1.2. Tipik lazer ergitme yöntemi çalışma prensibi.....	3
Şekil 1.3. Metal lazer sinterleme sırasında bağlanan 2 çelik toz tanesi	4
Şekil 2.1. Metal lazer eklemeli imalatın temelini oluşturan çalışmalar a) toz püskürtmeli lazerli patent b) Toz yataklı günümüz metal lazer cihazlarına oldukça benzeyen patent.....	7
Şekil 2.2. Üstten toz besleme mekanizmaları a) Çift taraflı b) Tek taraflı	10
Şekil 2.3. Serme mekanizmalarında farklı serici elemanlar a) Bıçak b) Tambur c) Hazneli.....	11
Şekil 2.4. a) Örnek bir lazer ergitme cihazı imalat tablası b) Isıtma donanımı c) Örnek bir ısıtıcı eleman patenti d) Rezistanslı tabla patenti.....	12
Şekil 2.5. Lazer iç yapıları a) İlk yakut lazer b) Yaygın kullanılan Nd YAG Lazer c) CO2 lazer yapısı d) Ticari bir CO2 akım tüpü.....	14
Şekil 2.6. Lazer tiplerine bağlı olarak oluşan dalga boyları	15
Şekil 2.7. Gerçek bir fiberoptik kablo ucu.....	16
Şekil 2.8. Fiber lazer sinyalinin kablo ve uç aparatından geçtiği durumlar.....	16
Şekil 2.9. Fiber optik kablo ve konektör çıkışındaki fiber ışının paralleleştirilerek büyütülmesi ve tarayıcıya girişi.....	16
Şekil 2.10. a) Isıl kalıntı gerilme şematik oluşumu(Lazer yakarken uzama, yakma sonrası büzülme oluşur) b) Kalıntı gerilmenin neden olduğu çarpıklık ve mikro çatlaklar	18
Şekil 2.11. Kalıntı ısı gerilme oluşumu	19
Şekil 2.12. Isıl yönden ısı gradyan temelli kalıntı gerilme mekanizması	19
Şekil 2.13. Isıl gradyan temelli kalıntı gerilme mekanizması gerçek görüntüsü.19	
Şekil 2.14. Metal lazer ergitme cihazında etkili imalat parametreleri	20
Şekil 2.15. Kolossov vd.'nin termal kamera ölçüm sonucu a) X b) Y yönlü.....	25
Şekil 2.16. a) Tarama çizgileri b) kesitler c) havuz boyut tahminleri d) sıcaklık tahminleri	27
Şekil 2.17. Zeng vd.'nin ağ eleman sayısı hassaslık analizi sonuçları	30
Şekil 2.18. a) Farklı parametrelerle imal edilen çizgiler b) tam orta kesitleri	32
Şekil 2.19. Model: sol) ağ atanmış model sağ) lazer ışını ağ elemanı kıyası.....	33
Şekil 2.20. Tez/Proje Çalışması Akış Diyagramı	35
Şekil 2.21. Matematiksel modelin eldesi	35
Şekil 3.1. Metal lazer ergitme sırasında lazer enerjisi ısı enerjisi dönüşümü ve ısı transferi mekanizmaları	36
Şekil 3.2. 2 Nokta arasındaki ısı transferi	38
Şekil 3.3. Isı transferi vektörleri.....	38
Şekil 3.4. Gaussian dağılımlı aksisimetrik lazer modelleri.....	43
Şekil 3.5. Sıcaklığa bağlı soğurganlık değerleri.....	46
Şekil 3.6. Goldak vd., tarafından ortaya konulan çift etkili elipsoid ışın dağılımı modeli.....	47
Şekil 3.7. Gözenekliliğin sıcaklığa bağlı değişimi [Denklem 3.18'e Göre]	52
Şekil 3.8. Yoğunluğun sıcaklığa bağlı değişimi [Denklem 3.18'e Göre]	52
Şekil 3.9. Argon gazının 1 atm basınçta sıcaklığa bağlı yoğunluk değerleri.....	53
Şekil 3.10. Denklem 3.18 ve 3.17 arasındaki gözeneklilik ve yoğunluk farkları..54	
Şekil 3.10-2. 316L malzeme toz ve katı sıcaklığa bağlı yoğunluk değerleri.....	55
Şekil 3.11. Toz yoğunluk ölçüm cihazı ve kalibrasyon numunesi.....	56

Şekil 3.12. Sıcaklığa bağlı argon ısı iletkenlik değerleri	59
Şekil 3.13. Ti6Al4V katı ve toz iletkenlik değerleri.....	59
Şekil 3.13-2. 316L için katı ve toz iletkenlik değerleri.....	60
Şekil 3.14. Koruyucu gazın etkin olduğu hesaplanan toz özgül ısı değerleri.....	63
Şekil 3.15. Paralel silindir yöntemiyle bulunan özgül ısı değerleri.....	63
Şekil 3.16. Özgül ısı farklarının değerleri.....	64
Şekil 3.17. 2 Farklı gizli ısı kaynaklı özgül ısı hesabının karşılaştırılması	64
Şekil 3.18. Koruyucu gazın etkin olduğu hesaplanan toz özgül ısı değerleri.....	65
Şekil 3.19. İmalat tablası üzerinde oluşturulmuş lazer tarama çizgileri	67
Şekil 3.20. Katı ve toz Ti6Al4V emissivite değerleri.....	71
Şekil 3.21. Literatürdeki emissivite değerlerinin kıyası	71
Şekil 3.22. Literatürden derlenen emissivite değerleri.....	72
Şekil 4.1. Sonlu elemanlar çözümü akış diyagramı.....	75
Şekil 4.2. ABAQUS yazılımı dahilinde sonlu eleman çözümü yapılan bölge a) üst görünüş b) yan görünüş c) perspektif görünüş d) örnek bir ağ elemanı atanmış durum.....	78
Şekil 4.3. a) 3 boyutlu birinci mertebe, 8 düğüm noktalı, dc3d8 6 yüzlü eleman b) çözümlerin integrasyon noktaları	79
Şekil 4.4. 2 boyutta ısı transferi ve örnek düğüm noktaları	81
Şekil 4.5. a) 3 boyutlu hacim elemanı ve b) eleman üzerinde düğüm noktaları.....	82
Şekil 4.6. 3 boyutlu izoparametrik eleman (DC3D8)	86
Şekil 4.7. ABAQUS karşılama penceresi.....	93
Şekil 4.8. Zaman adımı ayarlamaları pencereleri.....	94
Şekil 4.9. Lazer ışını ağ eleman boyutu ilişkisi a) birim lazer çapı başına eleman boyutu b) ışın ilerleme hareketinde elemanlar.....	96
Şekil 4.10. Ağ Elemanı Analizi Sonucu Isı Akısının Eleman Sayısıyla Değişimi	97
Şekil 4.11. Ağ yapıları : 4 çizgi taramalı benzetim	97
Şekil 5.1. Lazer optik sistemin ana gövde tasarımı üzerindeki pozisyonu.....	102
Şekil 5.2. Lazer optik sistem odak uzunluğu ayarlama mekanizması a) önden görünüş b) arkadan görünüş c) taşıyıcı parçanın gösterilmesi.....	102
Şekil 5.3. Lazer optik bileşenler a)tarayıcı kafalar ve f-theta lens b) yb fiber güç kaynağı ve QBH-8 konektörü c) paralelleştirici.....	103
Şekil 5.4. Ana gövde tasarımı ara profil kafesleri ve ekipmanların pozisyonlarının Sol) ön görüntüsü Sağ) arkadan görüntüsü.....	105
Şekil 5.5. Ana gövde ile beraber imalat kabini.....	106
Şekil 5.6. İmalat alt sistemleri ile birlikte tasarım görüntüsü içerisinde bulunan diğer alt sistemlerle birlikte kabin tasarımı	106
Şekil 5.8. Sol) Lazer ergitme cihazı toz besleme sistemi katı modeli sağ) üst kabin sacı ve serme platformu arasında besleyici sistem duruşu	107
Şekil 5.9. Besleyici sistemi motor kontrollü kapak mekanizması detayı	108
Şekil 5.10. Serme mekanizması için düşünülen ve imal edilecek tasarım.....	109
Şekil 5.11. Seçilen lineer modüller	110
Şekil 5.12. Serici hazne tasarımı ve ölçüleri	111
Şekil 5.13. Ön ısıtma donanımlı hareketli serici toz haznesinin planlanan düzenek çeşitleri a) plaka ısıtıcı b) boru tipi ısıtıcı.....	112
Şekil 5.14. Plaka tipi ısıtıcıların gerçek resmi (2 adet 5mm kalınlıkta ısıtıcı)	112
Şekil 5.15. Serici hazne kesit resmi 3 boyutlu görünüşü	113
Şekil 5.16. Tabla yan duvarlarının prototip tasarımı	114

Şekil 5.17. İmalat tablası x ve y eksen kalibrasyon mekanizması ve lineer motor ile bağlantısı prototip tasarımı.....	115
Şekil 5.18. Ana gövde imal edilmiş gerçek resmi a) izometrik bakış b) dimetrik bakış c) ana gövde önden bakış (lineer eyleyici monteli durum) d) en dış sac kapaklar kapatılmış durum	117
Şekil 5.19. Gerçek Resim: sol) lazer optik sistemi taşıyıcı kabin üst levhasının gerçek imalatı sağ) lineer modül ve serici haznesinin montaj resmi.....	117
Şekil 5.20. Gerçek Resimler: sol) imalat zarf mekanizmasının gerçek resmi sağ) toz yatağı ve gövde kısmının imal edilmiş görüntüsü.....	118
Şekil 5.21. a) İmalat tablası yan duvarları ve orta tabla bölümü genel montaj gerçek görünümü.....	119
Şekil 5.22. İmalat tablasını tahrik eden z-motor gövdesine bağlı a) en üst sınır ve b) en alt sınır sensörleri	120
Şekil 5.23. İmalat tablasının toz serildikten sonra a) üst ve b) alt konum örnekleri (kabin önünden görünüş)	121
Şekil 5.24. Tabla hareket hassasiyeti kalibrasyonu test düzeneği (kabin önünden görünüş).....	121
Şekil 5.25. Toz besleyici a) açık ve b) kapalı konumları(kabin arka görünüşü).....	122
Şekil 5.26. Toz besleyici detayları (kabin arkasından görünüş).....	123
Şekil 5.27. Toz serici a) ileri konum b) geri konum (2 görünüşte de kabin önünde görünüş).....	123
Şekil 5.28. Serici sınır optik sensörleri a) ileri b) geri (kabinin arkasından)	124
Şekil 5.29. Kollimatör-tarayıcı kafa olmaksızın lazer optik montaj.....	125
Şekil 5.30. Sol) Kollimatör - tarayıcı kafa - t bağlantı mekanizmasını sağlayan 2 parça Sağ) montaj.....	126
Şekil 5.31. Lazer optik alt sistemi genel montajı a) kolimatör ve galvano kafalar olmadan b) galvano kafalar ve kolimatör ile arkadan görünüş c) kabin üzerinde lazer optik sistem genel gerçek montajı	126
Şekil 5.32. AR-GE amaçlı lazer ergitme cihazı mekanik genel montaj görünümü a) arka görünüş b) ön görünüş.....	127
Şekil 5.33. QBH uç-kollimatör-tarayıcı kafa bağlantısı.....	128
Şekil 5.34. Lazer optik bağlantı şeması	128
Şekil 5.35. Lazer güç kaynaklarının ve tarayıcı kafaların soğutma şeması.....	129
Şekil 5.36. Soğutma bağlantıları a) lazerler b) tarayıcı kafalar	129
Şekil 5.37. Lazer güç kaynakları ve tarayıcı kafaların soğutma sisteminin gerçek görüntüsü a) lazer güç kaynağı soğutma bağlantıları b) tarayıcı galvo kafaların soğutma bağlantıları c) soğutucu çillerlerle ve tüm bağlantılarla genel görünüm.....	130
Şekil 5.38. Pnömatik koruyucu gaz filtrasyon ve besleme devresi	135
Şekil 5.39. Harici filtre cihazı a) fan ve pompa b) filtrelerin pozisyonu.....	136
Şekil 5.40. Oksijen sensörlerinin konumu a) giriş ve b) çıkış bölgeleri.....	137
Şekil 5.41. Giriş ve çıkış bölgelerindeki oksijen sensörlerinin iç görünümü	137
Şekil 5.42. Kabin içi kaba ve hassas oksijen sensörleri	138
Şekil 5.43. (pinch) vanaların montajlı hali a) giriş b) çıkış	138
Şekil 5.44. Filtre sistemi montajı sol) ön çapraz görünüş sağ) ön görünüş.....	138
Şekil 5.45. Sol: ana giriş çıkış gaz terminalleri (arkadan) sağ: röle bölgesi	139

Şekil 5.46. Azot üflecinin kabin arka konumu (arka kapak içi görünüm).....	139
Şekil 5.47. Kabin içi gaz bağlantıları ve üfleç ızgaraları a) kabin sol kısmı üfleme b) kabin sağ kısmı çekme	140
Şekil 5.48. Sol: her iki tarayıcı kafa f-theta lensi için mercek koruyucu lüle, sağ: lüle besleyici t aparat.....	140
Şekil 5.49. Motorlu tarayıcı kafa ve f-theta lens odak ayar mekanizması.....	141
Şekil 5.50. Odak bulma çalışması ile elde edilen tek çizgi görüntüleri a) yakma sırasında görünüm b) toz serdikten sonra yakılmış çizgiler c) tozu temizlenmiş çizgiler d) maksimum güçte odak deneme çizgileri e) en iyi 465 mm odak örneği.....	142
Şekil 5.51. Işın genişliği a) optik mikroskop b) sem a) 60 j/mm ² , b) 90 j/mm ²	144
Şekil 6.1. Diğer özelliklerin fonksiyonu olarak sıcaklık geçmişi	149
Şekil 6.2. Ayrıklaştırma varsayımları	150
Şekil 6.3. Düğüm grafiği ve ağ atama	152
Şekil 6.4. Dijital veri için düğüm çözümü.....	152
Şekil 6.5. Diferansiyel bir düğüm elemanı içerisindeki düğüm bağlantıları	153
Şekil 6.6. Bitişik matris ve komşuluk derecesi.....	154
Şekil 6.7. Parça içerisinde sıcaklık geçmişi	155
Şekil 6.8. Taşınım ile ısı kaybı için ısı direnç varsayımı	156
Şekil 6.9. Grafik teorisi benzetimi için geliştirilen kullanıcı arayüzü	159
Şekil 6.10. Benzetim sekmesi	159
Şekil 6.11. Açılı parmak parça tasarımları	163
Şekil 6.12. İnce duvarlı bir parça olarak delikli trompet ve katı trompet.....	164
Şekil 6.13. Türbin çarkı tasarımları ve ilgili parametreler	164
Şekil 6.14. İmalat tablası.....	165
Şekil 6.15. İmalat tablasındaki tüm parçalar için soğuma eğrisi.....	165
Şekil 6.16. EOS M290 açık mimari TLYE cihazı	167
Şekil 6.17. Isıl görüntüleyicinin konumlandırılması	167
Şekil 6.18. (a) Toz kalibrasyon eğrisi (b) katı metal için kalibrasyon eğrisi	168
Şekil 6.19. İmalat öncesi imalat tablasının üstten görünümü	169
Şekil 6.20. Anlık sıcaklık ölçümünden görüntü(türbin çarklarından birinin ilgili kesiti lazerle yakılmaktadır)	169
Şekil 6.21. 15° parmak geometri için GT benzetimi a) tüm güçler b) ısı birikimini engellemek amacıyla kontrollü parametre	171
Şekil 6.22. 20° parmak geometri için GT benzetimi a) tüm güçler b) ısı birikimini engellemek amacıyla kontrollü parametre	172
Şekil 6.23. 25° parmak geometri için GT benzetimi a) tüm güçler b) ısı birikimini engellemek amacıyla kontrollü parametre	173
Şekil 6.24. 30° parmak geometri için GT benzetimi a) tüm güçler b) ısı birikimini engellemek amacıyla kontrollü parametre	174
Şekil 6.25. Delikli trompet geometride GT benzetimi a) tüm güçler b) ısı birikimini engellemek için kontrollü parametre.....	175
Şekil 6.26. Katı trompet geometri için GT benzetimi a) tüm güçler b) ısı birikimini engellemek amacıyla kontrollü parametre.....	176
Şekil 6.27. 50° türbin çarkı geometri GT benzetimi a) tüm güçler b) ısı birikimini engellemek amacıyla kontrollü parametre	176
Şekil 6.28. 35° türbin çarkı geometri GT benzetimi a) tüm güçler b) ısı birikimini engellemek amacıyla kontrollü parametre	177

Şekil 6.29. EOS M290 cihazıyla imal edilen tüm imalat tablası	178
Şekil 6.30. Parça kıyas diyagramı	178
Şekil 6.31. Katmanlar arası soğuma verisinin büyütülmüş hali.....	179
Şekil 6.32. Sıcaklık ölçümü sırasında türbin çarkı kanat kesiti son katmanları	180
Şekil 6.33. Sıcaklık ölçümünde nominal ve kontrollü parçalar da renk farkları.....	180
Şekil 7.1. 3 boyutlu benzetim modeli a) 0.004. saniyede 190 W ve 100 mm/s için ergiyik havuzu oluşumu a) izometrik görünüm b) çizgi orta kesiti	183
Şekil 7.2. Sınır kombinasyonlara dair sıcaklık geçmişi tahminleri a) 100 W-100 mm/s b) 100 W-1900 mm/s c) 190 W-100 mm/s d) 190 W-1900 mm/s	184
Şekil 7.3. Pirometre ile çizgi yakma üzerinden sıcaklık ölçüm ilkesel şematığı	184
Şekil 7.4. Pirometre ölçümünde deney kurulumu: a) kabin üst görünümü b) kabin üst levhasının iç görünümü c) serilmiş toz üzerinden pirometre ölçüm işleyişi.....	185
Şekil 7.5. Pirometre ile ölçüm denemelerinden bir kare a) yakım sonrası b) yakım öncesi.....	185
Şekil 7.6. Koruyucu gazlı sıcaklık değişim grafiği	186
Şekil 7.7. Koruyucu gazsız sıcaklık değişim grafiği.....	186
Şekil 7.8. Örnek olarak 100 W-100 mm/s parametreleri için pirometre ölçüm sonucu.....	187
Şekil 7.9. Farklı DEY değerlerindeki maksimum sıcaklıklar ve deneysel ölçümlerle kıyaslanması.....	188
Şekil 7.10. 190W-300 mm/s için kesit alan ergiyik havuz boyut ölçümü	189
Şekil 7.11. ABAQUS arayüzünde ergiyik havuz boyut tahmini hesaplaması (190W-300 mm/s).....	189
Şekil 7.12. Farklı parametrelerde tek çizgilerdeki havuzu kesitlerinin mikroskop görüntüleri.....	190
Şekil 7.13. Ergiyik havuzu DEY ilişkisi (300 ve 500 mm/s İçin)	191
Şekil 7.14. Ergiyik havuzu DEY ilişkisi (700 ve 900 mm/s İçin)	191
Şekil 7.15. 100 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hızı ve DEY'e bağlı eğrisi..	193
Şekil 7.16. 115 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hız ve DEY'e bağlı eğrisi...	193
Şekil 7.17. 130 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hız ve DEY'e bağlı eğrisi...	194
Şekil 7.18. 145 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hız ve DEY'e bağlı eğrisi...	194
Şekil 7.19. 160 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hız ve DEY'e bağlı eğrisi...	195
Şekil 7.20. 175 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hız ve DEY'e bağlı eğrisi...	195
Şekil 7.21. 190 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hız ve DEY'e bağlı eğrisi...	196
Şekil 7.22. ABAQUS benzetiminde tek çizgide ergiyik havuzu kesiti	199
Şekil 7.23. ABAQUS benzetiminde 4 çizgide ergiyik havuzu kesiti	199
Şekil 7.24. Sınır kombinasyonlara dair sıcaklık geçmişi tahminleri a) 100 W-100 mm/s b) 190 W-100 mm/s c) 100 W-1900 mm/s d) 190 W-1900 mm/s.....	200
Şekil 7.25. İthal EOS M280 ticari cihazında pirometre deney kurulumu	201
Şekil 7.26. Farklı DEY'lerde maksimum sıcaklıklar ve ölçümlerle kıyası.....	201
Şekil 7.24. a) Tek çizgi deneyi b) havuz ilerlemesi c) benzetimde katılan alanlar	202
Şekil 7.25. 130W-900 mm/s için ergiyik havuz boyut ölçümü	203

Şekil 7.26.ABAQUS arayüzünde ergiyik havuzu boyut tahmini (130W-900 mm/s).....	204
Şekil 7.27. Farklı parametrelerle imal edilen Ti6Al4V malzeme tek çizgilerindeki ergiyik havuzu kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri.....	205
Şekil 7.28. DEY oranına bağlı olarak farklı hızlarda ergiyik havuzu boyutları a) 300 mm/s b) 500 mm/s c) 700 mm/s d) 900 mm/s e)1000 mm/s f) 1300 mm/s g) 1500 mm/s h) 1700 mm/s ı)100 mm/s j) 1900 mm/s	206
Şekil 7.29. 100 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hızı ve DEY'e bağlı eğrisi..	208
Şekil 7.30. 115 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hızı ve DEY'e bağlı eğrisi..	208
Şekil 7.31. 130 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hızı ve DEY'e bağlı eğrisi..	209
Şekil 7.32. 145 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hızı ve DEY'e bağlı eğrisi..	209
Şekil 7.33. 160 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hızı ve DEY'e bağlı eğrisi..	210
Şekil 7.34. 175 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hızı ve DEY'e bağlı eğrisi..	210
Şekil 7.35. 190 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hızı ve DEY'e bağlı eğrisi..	211
Şekil 7.26. 15° parmak geometrisi için ölçüm ve gt modeli tahmini a) nominal parametrelili parça b) kontrollü parametrelili parça.....	214
Şekil 7.27. 20° parmak geometrisi için ölçüm ve gt modeli tahmini a)nominal parametrelili parça b) kontrollü parametrelili parça.....	215
Şekil 7.28. 25° parmak geometrisi için ölçüm ve gt modeli tahmini a) nominal parametrelili parça b) kontrollü parametrelili parça.....	215
Şekil 7.29. 30° parmak geometrisi için ölçüm ve gt modeli tahmini a) nominal parametrelili parça b) kontrollü parametrelili parça.....	216
Şekil 7.30. 15° parmak parçada hasar a) başlangıç anı b) bittikten sonra.....	217
Şekil 7.31. Delikli trompet geometrisi ölçü ve gt tahminleri a) nominal parametre b) kontrollü parametre.....	218
Şekil 7.32. Kontrollü delikli trompet geometrinin yüzey çizgilerinin oluşması.....	219
Şekil 7.33. Katı trompet geometrisi ölçü ve gt tahminleri a) nominal parametre b) kontrollü parametre.....	220
Şekil 7.34. Katı trompet geometrisi ölçü ve gt tahminleri a) nominal parametre b) kontrollü parametre	221

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. İlk ticari lazer tabanlı plastik eklemeli imalat cihazları özellikleri	8
Çizelge 2.2. Günümüzdeki metal lazer ergitme cihazları	17
Çizelge 2.3. Serici ve tabla özellikleri	17
Çizelge 2.4. İmalat özellikleri	17
Çizelge 3.1. Helyum piknometresi ile Ti6Al4V yoğunluk ölçüm sonuçları	57
Çizelge 3.2. 316L için He piknometresi ile yoğunluk ölçüm sonuçları	57
Çizelge 3.3. Ti6Al4V doğal taşınım katsayısı değerleri	68
Çizelge 3.3. 2. 316L doğal taşınım katsayısı hesaplama sonucu	73
Çizelge 4.1. Ti6Al4V malzeme için sonlu eleman çözümü parametreleri	98
Çizelge 4.2. 316L malzeme için sonlu eleman çözümü parametreleri	99
Çizelge 5.1. Lazer-optik ekipman özellikleri	133
Çizelge 5.2. Lazer güç kaynağı özellikleri	133
Çizelge 6.1. TYLE süreciyle imalat ve anlık sıcaklık ölçümü planı	162
Çizelge 6.2. Proses parametrelerinin gözlenmesi için belirlenen güç-hızlar	166
Çizelge 6.3. Inconel 718 malzemedeki GT çözümünde kullanılan parametreler	170
Çizelge 7.1. 316L malzeme özellikleri	181
Çizelge 7.2. Cihaz imalat parametreleri	182
Çizelge 7.3. Ergiyik havuzu boyutları	197
Çizelge 7.4. Ti6Al4V cihaz imalat parametreleri	198
Çizelge 7.5. Ti6Al4V Tek çizgi ergiyik havuzu boyutları	212

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	Kesit Alanı
c	Özgöl Isı
d	Çap
f_f	Y Eksenli Doğrultusunda Ön Goldak Parametresi
f_r	Y Eksenli Doğrultusunda Arka Goldak Parametresi
g	Ağırlık Faktörü
Gr	Grashow Katsayısı
H	Entalpi
h	Taşınım Katsayısı
k	Isı İletkenlik Katsayısı
L	Laplas Fonksiyonu
Nu	Nusselt Katsayısı
Pr	Prandtl Katsayısı
P	Lazer Gücü
r	Yarıçap
T	Sıcaklık
q	Isı Akısı
ε	Emissivite
φ	Gözeneklilik
α	Absorbtivite
ρ	Yoğunluk
a_f	X Eksenli Doğrultusunda Ön Goldak Parametresi
a_r	X Eksenli Doğrultusunda Arka Goldak Parametresi
$\frac{\partial T}{\partial n}$	Isıl Gradyan
ϕ	Özvektör
Λ	Özdeğer
σ	Standart Sapma

1. GİRİŞ

Dördüncü dijital dönüşümün başlaması ve bu yöndeki teknolojik gelişmelerle birlikte imalat alanında büyük değişim ve gelişimler ortaya konulmaktadır. İmalat alanındaki gelişmelerin en önemlisi ise eklemeli imalat yöntemlerinin ortaya çıkması ve yaygınlaşması olmuştur. Eklemeli imalat yöntemi, toz, ergiyik, filament, sac gibi çeşitli formlardaki metal, seramik, polimer ve kompozit hammaddelerden, malzemeye göre yine farklı birleştirme yöntemleriyle parça imalatı yapılan yöntemlerin genel adıdır. Polimer ve kompozitler için ısıtıcı kafa ile ergiyik halde biriktirerek imalat ve fotopolimer ilavesi veya ışın aktivasyonu ile imalat, seramik ve metal malzemeler için ise elektron ışını veya lazer ışını ile ergiterek imalat yöntemleri geliştirilmiştir. Eklemeli imalatın avantajları düşünüldüğünde, tasarım sürecinde imal edilebilirlik kısıtının olmaması başta olmak üzere, kesme kuvvetleri, kesici takım, kalıp, malzeme sarfiyatı gibi geleneksel imalat yöntemlerindeki ciddi dezavantajların ve gerekliliklerin ortadan kalktığı görülmektedir [Feygin , M., 1988; *Electronic Engineering Times* 1987 ; Bakshi ve Mulay, 2016]. Bu çerçevede günlük kullanımdan ağır sanayiye, savunma veya havacılık gibi stratejik sektörlere kadar, metallerin şekillendirilmesi için eklemeli imalat önem kazanmaktadır.

Metal lazer ergitme yöntemi ve cihazları da dahil olmak üzere eklemeli imalat yöntemlerinin tümünde takip edilen basamaklar temel olarak değişmemektedir. Şekil 1.1’de metal lazer ergitmede de olduğu gibi toz metal hammadde kullanan yöntemlere dair genel işlem basamakları görülmektedir [Sturm vd., 2017].



Şekil 1.1. Eklemeli imalat işlem basamakları [Sturm vd., 2017]

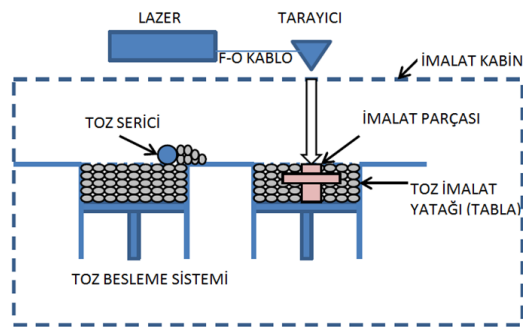
Öncelikle imal edilmesi istenen parçanın 3 boyutlu katı modeli uygun bilgisayar programı (Solidworks, Catia, Autocad, Proengineer, 3Dmax vb.) kullanımıyla geliştirilmektedir. Bu çizim dosyası, geometrisinin sadece yüzey kısımları üçgenlerle ağ yapısı haline çevrilecek biçimde uygun formatlardan birine, en yaygın olarak da .STL formatına dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm işlemi ile eklemeli imalat cihazının ihtiyaç duyduğu dijital dosya oluşturulmuş olmaktadır. Bu işlem katı modelin hazırlandığı programlar tarafından katı modelin farklı bir formatta kaydedilmesi yoluyla da yapılmaktadır. Ancak, format dönüşümü ve yüzeysel ağ yapısı oluşturulması işlemi sırasında özellikle ince ve eğrisel yüzeyler söz konusu olduğunda geometrik hatalar oluşabilmektedir [Ito ve Nakahashi, 2002; Lai ve Lai, 2006]. Bu yüzden, genel olarak .STL dönüşümü yapılan dosyalar farklı programlar kullanımıyla (3matic, Magics, Materialise, Netfabb vb.) ağ yapıları (üçgenlerin birleşimleri) düzeltildikten sonra eklemeli imalat cihazına aktarılmaktadır.

.STL formatına çevrilmiş ve gerekli tamirati görmüş dijital çizim verisi eklemeli imalat cihazının yazılımına aktarılarak burada cihaz boyutlarına ve imalat kabini yapısına göre imalat tablası yerleşimi, destek yapıları gibi ayarlamalar yapılmaktadır. Bunu takiben eklemeli imalat cihazı yazılımı parça imalatını sağlayacak takım yolu kodlarının çıkarılması için, .STL dosyası üzerinden dilimleme işlemi gerçekleştirmektedir. Buna göre yüzeyleri üçgenlerle ağ yapısı halinde modellenmiş dijital tasarım verisinde, yani katı modelde, imal edilmek istenen katman kalınlığına göre katı model yükseklik boyunca dilimlere ayrılmaktadır. Her bir dilim, katı modelin en alt kısmından itibaren katman kalınlığı kadar aralıklarla en yüksek noktasına kadar katı modelin düzlemlerle kesilmesi şeklinde oluşturulmaktadır. Bu sayede, üçgenlerin köşe noktaları ve katı model yüksekliğince oluşturulan her bir düzlemin kesiştiği noktalar, takım yolu için gereken kodları (koordinatları) teşkil etmektedir.

Bir sonraki aşamada eklemeli imalat cihazına malzeme yüklemesi yapılmakta ve dijital veriye göre imalat için cihaz parametreleri ayarlanmaktadır. Bu parametreler, hammadde tane boyutuna, hammadde türüne, imal edilecek parça kesit kalınlığına ve geometrik boyutlarına göre değişmektedir. Lazer

ergitme/sinterleme cihazları için, lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi, katman kalınlığı gibi parametreler bulunmaktadır. Son aşamada parça imalatı gerçekleştirilmektedir. İmalat sonrası kalan tozlar arasından parça alınmakta, metal parçalar için imal edilen ilk katman imalatın yapıldığı tabla üzerine ergitildiği için tabla ile beraber parça alınmakta ve kalan tozlardan temizlenerek, tabladan ayrılma işlemine (en yaygın haliyle tel erozyon tezgahına) götürülmektedir. Gerekli görülmesi halinde gerilim giderme tavlaması veya yüzey iyileştirme işlemleri uygulanabilmektedir.

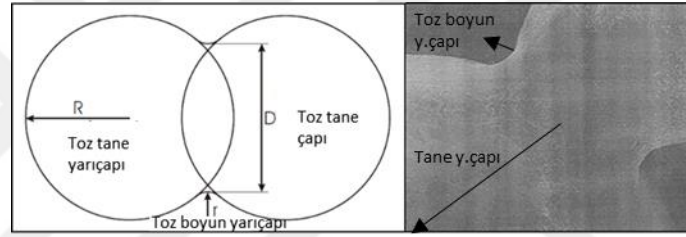
Metal eklemeli imalat yöntemleri arasında en yaygın kullanım lazer sinterleme/ergitme cihazlarına aittir. Bu yöntemde toz metalürjisi yöntemleriyle elde edilen metal tozları hammadde olarak kullanılmaktadır. Şekil 1.2’de günümüzde yaygınlaşmış olan metal lazer ergitme cihazlarının çalışma prensibi verilmektedir [Frazier, 2014]. Teknolojik olarak lazer kaynağının metal işlemek için kullanılmasıyla birlikte, ilk metal lazer eklemeli imalat cihazlarında toz metal hammaddeler ergime sıcaklığına ulaşmadan belirli bağları boyun vererek oluşturacak şekilde ısıtılmıştır. Gerek lazer, gerek bilgisayarlı kontrol, gerekse kabin veya tabla ısıtma soğutma teknolojilerinin, hatta toz metal hammaddelerin yetersiz kalitede oluşu sebebiyle ergime noktasına çıkmadan katı faz sinterleme tabanlı imalat denemeleri yapılmıştır.



Şekil 1.2. Tipik lazer ergitme yöntemi çalışma prensibi [Frazier, 2014]

Tozlardan nihai ürün oluşurken; öncelikle kullanılan lazer ışını çapına ve ışın yoğunluğuna göre ışının düştüğü noktalar iç içe geçen çemberler şeklinde birbiriyle kaynaşmaktadır. Oluşturulan bu girişimler katmanı oluşturan tozların sağlamca birleşmesini sağlamaktadır. Bu işlem sinterleme olarak literatüre

geçmiştir [Deckard, 1989; Feygin, 1988]. Bu durum çoğunlukla ergime sıcaklığı ile ergime sıcaklığının yarısı arasında bir sıcaklıkta gerçekleşmektedir. Şekil 1.3'te sinterlenme mekanizması 2 toz tanesi için görülmektedir [Kruth vd., 2005]. Tam bir ergime gerçekleştirmediği için tanecik yapısının bozulması da gerçekleşmemektedir. Böylece seçilmiş toz hammadde özellikleri büyük oranda imalat parametreleriyle bağlantılı oluşmaktadır. İlk katmandaki toz taneleri bu şekilde sinterlendikten sonra imalat tablası katman kalınlığı kadar aşağı indirilir ve bu katman üzerine yeni bir toz katmanı serici mekanizma tarafından serilir. Bu kez katmanlar lazer ışınıyla sinterlenir ve birbirine kaynar. Böylece 2 boyutlu kesit alanlara yani katmanlara dilimlenmiş parça tasarımı imalat tablasının aşağı (z eksenini boyunca) inme hareketiyle 3 boyutlu nitelik kazanmış ve böyle imal edilmiş olmaktadır [Deckard, 1989; Partee vd., 2006; King ve Tansey, 2002].



Şekil 1.3. Metal lazer sinterleme sırasında bağlanan 2 çelik toz tanesi [Kruth vd., 2005]

Genel hatlarıyla eklemeli imalatın bir çeşidi olan metal lazer sinterleme yönteminin genel avantajları;

- Karmaşık ve stratejik geometrili parçaların kolayca imal edilebilmesi
- Prototip üretim yanında doğrudan kullanıma hazır parçaların imal edilebilmesi ve bu amaç için özel bir takım gerektirmemesi
- Metal parça mekanik özelliklerinin geleneksel imal usulleri sonuçlarına yakın veya aynı seviyede olması ve en az atık maliyeti
- İmal edilen parçanın kütesel olarak daha kontrol edilebilir olması ve kompakt imalat (gözenekli/boşluklu imal imkânı) olarak sıralanabilmektedir [Feygin, 1988; Drstvensek vd., 2009].

Tüm bu avantajlara rağmen literatür kısmında da görüleceği üzere, hammaddeden doğrudan fonksiyonel parça imalatı fikri, belirli sorunları ve

özüm girişimlerini de beraberinde getirmiştir. En önemli sorun metal lazer ergitme sırasında meydana gelen çok büyük soğuma hızları ve bunlara bağlı kalıntı gerilme sorunlarıdır. Böylece ısı kalıntı gerilme sebebiyle ya mekanik özellikler istenen seviyede oluşmamakta, ya doğrudan yüksek yoğunluk oranları elde edilememekte, ya da çarpılma, boyutsal hatalar, çatlaklar gibi mekanik hasarlar yine doğrudan oluşabilmektedir.

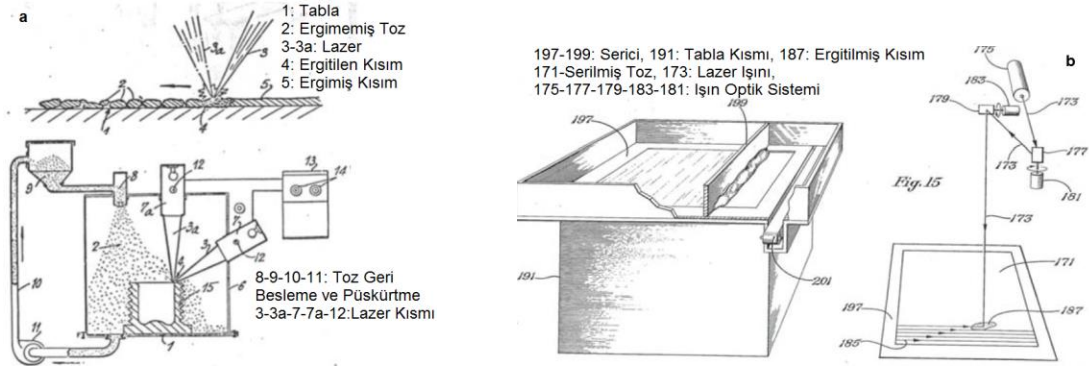
Bu sorunların önlenmesi için mevcut durumda uzun yıllar boyu her geometri ve malzeme için günlerce süren parametre deneme imalatları yapılmıştır. Büyük ticari firmalar ve üniversite laboratuvarlarındaki araştırmacılar belirli geometri ve malzemeler için en iyi mekanik özellikleri veren lazer ergitme parametrelerini bulmak için birçok numune imal etmiş, birçok yöntemi de bu imalatlar sırasında denemiş, uygulamışlardır [Kamsky vd., 2015]. Son 10 yılda çalışmaların yoğunlaştığı alanların başında ise bu denemelerin ortadan kaldırılmasını amaçlayan, ergitme sıcaklıklarının veya kalıntı gerilmelerin bilgisayar teknolojileri kullanılarak modellenmesi ve benzetimi alanı gelmektedir. Sonlu elemanlar, farklar veya hacimler gibi katı mekaniği veya akışkanlar mekaniği matematiksel ifadeleri baz alınarak veya tanecik temelli modeller esas alınarak lazer ergitme sırasında oluşan sıcaklıklar, buna bağlı ergiyik havuzu ölçüleri ve nihayetinde en iyi mekanik özellikleri veren imalat parametreleri analiz programları kullanılarak tahmin edilmeye çalışılmaktadır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Tez çalışmasının bu kısmında mikro ölçekli benzetim ve doğrulama çalışmasına ve bu amaçla tez kapsamında geliştirilmiş olan metal lazer ergitme cihazına yönelik olarak hem metal lazer ergitme cihazı literatür taraması, hem mikro ölçekli benzetim literatür taraması, hem de benzetim çalışmalarını doğrulama literatür taraması yapılmıştır. Sonraki kısımda ise Grafik Teorisi ile geliştirilen parça ölçekli benzetim çalışması ve bunun doğrulanmasına yönelik literatür taraması sunulmuştur.

2.1. Lazer Ergitme Yöntemi

Metal eklemeli imalat cihazlarının ticarileşme süreci, ilk metal eklemeli imalat cihazlarının ortaya çıkması için lazer teknolojisinin gelişimini beklemiştir. Lazer güç kaynağı kullanımının eklemeli imalat temeli, 1971 yılında alınan bir patentle hızlı prototipleme kavramının ortaya çıkmasıyla başlamaktadır. Bu patentte lazer ışını, düz bir zemine püskürtülen toz hammaddeye (metal, seramik, plastik vb.) lazer ışını uygulanarak tozların ergitilmesi ve istenen geometrinin kalıp gerekmeden imalatı ifade edilmektedir [Ciraud, 1973]. Bu patent her ne kadar günümüzdeki lazer tabanlı püskürtmeli metal eklemeli imalat cihazlarına benzese de 1970'lerin bilgisayar ve lazer teknolojilerinin yetersiz kalışı ticarileşmesini engellemiştir. 1979 yılında "kalıplama süreci" adıyla alınan başka bir patent metal eklemeli imalata giden yolda daha fazla detay sunmaya ve uygulamaya başlamıştır. Bu buluşta, belirli bir ısı kaynağı ile kalıp ve döküm malzemeleri kısım kısım ergitilerek istenen geometride parçanın matris formunda tabla üzerinde bulunan karelendirilmiş kısımda elde edilebileceği öne sürülmüştür. Serme işlemi manuel olarak yapılarak katman katman imalat imkanı olduğu ifade edilmiştir [Hausholder, 1981]. Şekil 2.1a'da ilk patent b'de daha detaylı olan sonraki patent görülmektedir. Şekil 2.1b'de görülen patent DTM firmasınınca daha sonraki yıllarda kullanılarak ticarileşme çalışmalarının temelini oluşturmuştur.



Şekil 2.1. Metal lazer eklemeli imalatın temelini oluşturan çalışmalar a) toz püskürtmeli lazerli patent [Ciraud, 1973] b) Toz yataklı günümüz metal lazer cihazlarına oldukça benzeyen patent [Hausholder, 1981]

İlk defa lazer kullanımının ticarileştirilmesi ise 1984 yılında alınan bir patentle gerçekleştirilmiştir. Metal kullanımı olmasa da “Steriolitografi” kavramının literatüre girmesini sağlayan bu buluş ile birlikte ilk kez metal lazer eklemeli imalat cihazlarının da çalışma prensibini ve ekipmanlarını oluşturan katman katman imalat, tarama mesafesi, dilimleme, STL dosya formatı gibi temeller açıklanmıştır [Hull, 1986]. Bu patentte ışın ile kürlenebilecek malzeme olarak polimer reçine öne sürülmüş olmasına rağmen, katılaşabilen her malzemenin bu teknoloji ile imal edilebileceği şeklinde patent sınıflandırması genişletilmiş, ilerleyen süreçte ise buluş sahibi tarafından 3D Systems firması kurularak ticarileşme süreci başlamıştır. Bu patentte toz hammadde kullanılmamasına rağmen lazer eklemeli imalat temeli sunulmuştur. 1986 yılında ise toz malzeme ve lazer ışınının nihayet kullanıldığı ilk sistem gerçek deneysel sonuçlarla Texas Üniversitesi’nde yayınlanan patentle başlamıştır [Deckard, 1989]. 100 W gücünde sürekli modlu Nd YAG lazer kullanımıyla ABS polimer malzemelerden parça imalatı denemiştir. Söz konusu patentte metal malzemelerin de kullanılabileceği söylenmiş olsa da, mali sebepler nedeniyle metal malzemeler denenmemiştir. Yine de lazer güç kaynağı, buradan çıkan ışının galvanometre denen tarayıcı kafalarla yansıtılması, bilgisayar destekli olarak bu işlemlerin gerçekleştirilmesi gibi adımlar açıklanmıştır. Bu buluşu takiben 1987 yılında kağıt kesme ve üç boyutlu olarak birleştirme amaçlı olan çok benzer bir patent öncelikle kağıt hammadde ile çalışır halde ortaya konulmuştur [Feygin, 1988]. 50-500 μm aralığındaki metal tozlarının da belirli bir basınç altında ısıtılmış bir tambur tipi

serici vasıtasıyla kısmen birleştirilmesi ve ardından lazer ışını ile istenen geometrinin tam birleştirilmesi işleminin de söz konusu patent raporunda uygulanabilir olduğu belirtilmiştir. Toz metal hammadde ile lazer eklemeli imalata dair kayda değer veriler ortaya konulmuştur. 1987'den itibaren bu gelişmeler ışığında plastikten, toz metale uzanan geniş bir malzeme yelpazesini hammadde olarak kullanabilen, değişik imalat türleri geliştirilmiştir. Bu türler, hızlı prototipleme cihazı, 3 boyutlu yazıcı (3D Printer), 3 boyutlu üretim gibi isimler almış, hızlı prototipleme amacıyla kullanılmıştır.

Ticari olarak bu patentleri takiben satışa çıkarılan ilk cihazlar plastik tabanlı hammadde cihazlarıdır. DTM firması ve 1994 yılında 3DSystems isimli firmanın patent haklarını satın alarak bu sektörde ilerleme amacı güden EOS firması tarafından Amerika ve Almanya merkezli olarak profesyonelleştirilmiş cihazlar ortaya konulmuştur. Çizelge 2.1'de ilk plastik tabanlı cihazların genel özellikleri görülmektedir.

Çizelge 2.1. İlk ticari lazer tabanlı plastik eklemeli imalat cihazlarının özellikleri [Shellabear ve Nyrhilä, 2004]

Özellikler	Sinterstation 2000	EOSINT (P) 350
Lazer	CO ₂ , 50 Watt	CO ₂ , 50 Watt
İmalat Hacmi	350mmx305mmx410mm= 30 Lt	350mmx305mmx600mm=73.5 Lt
Toz Serme Şekli	Alttan	Üstten
Katman Oluşturma	Tambur Tipi Serici	Titreşim Kanallı Sistem
Lazer Tarama Şekli	Izgara	Vektörel
Malzemeler	Mum ve Polikarbonat	Polisitren ve Naylon Karışımı

Bu metal olmayan cihazlarla birlikte, 1994 yılında Fraunhofer Enstitüsünde 316L paslanmak çelik malzeme lazer teknolojisiyle işlenebilmiştir [Geiger ve Vollertsen, 1994]. Aynı zamanda ERD firması tarafından 1989 yılında alınmış olan, toz metalürjisinde basınçsız sinterleme ile büzülme miktarını minimuma çeken bir patent ticarileştirilerek yine 1994 yılında EOS ve ERD firmalarınca bir patent ortaklığı sağlanmıştır [Nyrhilä ve Syrjälä, 1990; Eureka-Projekt, 1994]. İlk profesyonel ticari metal lazer ergitme cihazı ise EOS firması tarafından 1995 yılında sunulmuştur. EOSINT M250 modeli ile bilinen bu cihaz 100 Watt gücünde

CO2 tipinde bir lazer ile çalışmaktadır. 100 µm katman kalınlığında parçalar imal edebilen bu cihazda alttan toz besleme sistemi ve bıçak tipi bir serici kullanılmıştır. Takım çeliği kullanımı ve hızlı takım imalatı amacıyla kullanılan bu cihazla imalat sonucunda 100 MPa çekme dayanımı ve %20-25 oranında gözenekli parçalar imal edilebilmiştir. Günümüzdeki metal lazer ergitme cihazlarıyla %99'a varan yoğunluk değerleri ve döküm sonucu elde edilene yakın dayanım değerleri elde edilebildiği düşünüldüğünde prototip sayılabilecek bu cihazların günümüze kadar hızlı bir gelişme gösterdiği anlaşılabilecektir [*Santos vd., 2006; Herzog vd., 2016; Lewandowski ve Seifi, 2016*]. Bu amaçlarla 1980'lerin sonlarından itibaren ilk makinelerden günümüze, literatür araştırmaları sonucu bu makineler artık, lazer kaynağı, toz besleme, toz serme, tabla, filtrasyon, egzoz atım, kontrol ara yüzü sistemleri gibi farklı kısımların bir araya gelmesiyle oluşmaktadır.

2.2. Metal Lazer Ergitme Cihazları Alt Sistemleri

Metal lazer ergitme cihazı bu tez kapsamında sınıflandırılarak alt bölümler halinde geliştirilmiştir. Buna uygun olarak literatür bilgileri de alt sistemlerin başlıkları altında verilmiştir.

2.2.1. Toz besleme sistemi

İlk çıktıkları yıllardan günümüze kadar bu cihazlar geliştirilerek, artık Şekil 1.3'te de görüleceği gibi alt mekanizmaların birleşimiyle ortaya çıkmaktadır. Bu mekanizmalar ortak olarak, toz serici, toz depolayıcı, imalat tablası, lazer optik sistem ve koruyucu gaz sistemleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Şekil 1.3'te görüldüğü üzere, genelde 30-100 µm aralığında tane çapına sahip toz formundaki metal hammadde toz depolayıcı kısma yüklenmektedir [*Santos vd., 2006; Venkatesh ve Nandini, 2013*]. Bu toz depolayıcı kısım mevcut metal tozunu yukarıya doğru bir doğrusal motor, piston veya eyleyici yardımıyla toz serici mekanizmanın önüne bırakmaktadır. Bu mekanizma, toz depolayıcı haznenin cihazın üst kısmında olabileceği şekilde, yani yerçekimi etkisi ile ve bir kontrollü kapak yardımıyla serici mekanizmaya aktarılabilirdiği gibi de düzenlenebilmektedir [*Cox, 2011; Kruth vd., 2003*]. Buna benzer şematik örnekler

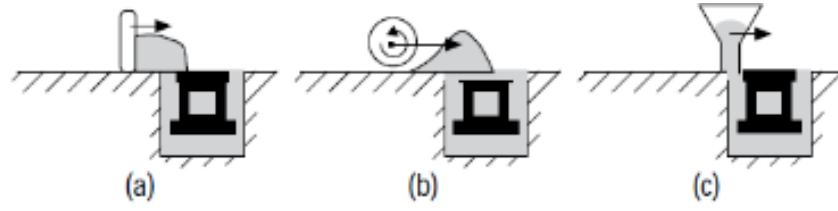
Şekil 2.2’de verilmektedir. Yerçekimi kuvvetinin de avantaj olarak kullanıldığı üstten beslemeli sistemler diğer sistemlere göre motorlu kapak kontrolü dışında oldukça avantajlı durumdadır.



Şekil 2.2. Üstten toz besleme mekanizmaları a) Çift taraflı b) Tek taraflı [Baumers vd., 2011; Tilmann vd., 2017]

2.2.2. Toz serme sistemi

Serici mekanizma, toz metal hammaddeyi imalatın yapılacağı düz tabla üzerine pürüzsüz bir şekilde serme işini gerçekleştirmektedir. Serme sistemleri de toz metalin düz tabla üzerinde sürüklenerek serilmesi temelinde çalışmakta olup, yuvarlak bir tambur ile veya düz sivri uçlu ve bıçak adı verilen levhalar ile serme işlemi yapılmaktadır. Diğer bir serici sistem, belirli miktarda toz alabilecek kapasiteye sahip bir hazne barındıran, bu haznenin alt kısmında ise belirli değerlerde bir aralıktan tozu tabla üzerine ileri geri hareketi esnasında bırakarak serme işlemi yapan besleme kanallı mekanizmalardır. Bütün bu mekanizmaların kullanılan toz tane boyutu, toz metal türü, cihaz kapasitesi gibi parametrelere bağlı olarak birbirilerine karşı üstünlükleri ve eksikleri bulunmaktadır. Tambur tipi sericiler hem toz sıkıştırma hem de ters yöne dönerek serme işlemi gerçekleştirebilirken, mekanizmaya toz sıkışma riski barındırmaktadır. Hafif keskin uçlu serici bıçaklar ise sıkıştırma yapmamakla birlikte, toz sıkışma riski barındırmamaktadır. Besleme kanallı bileşen ise bu iki mekanizmaya ait çeşitli avantajları birleştirerek birden çok katmanlık tozu barındırdığı için zaman tasarrufu da sağlamaktadır. Şekil 2.3’te bu mekanizmaların şematik görünümü verilmektedir [Schueren ve Kruth, 1995]. Genellikle +x doğrultusunda serme yapıp -x doğrultusunda boşta çalışan sericiler yaygın olsa da +x ve -x yönlerinde serme yapabilen (çift taraflı) mekanizmalar da mevcuttur.



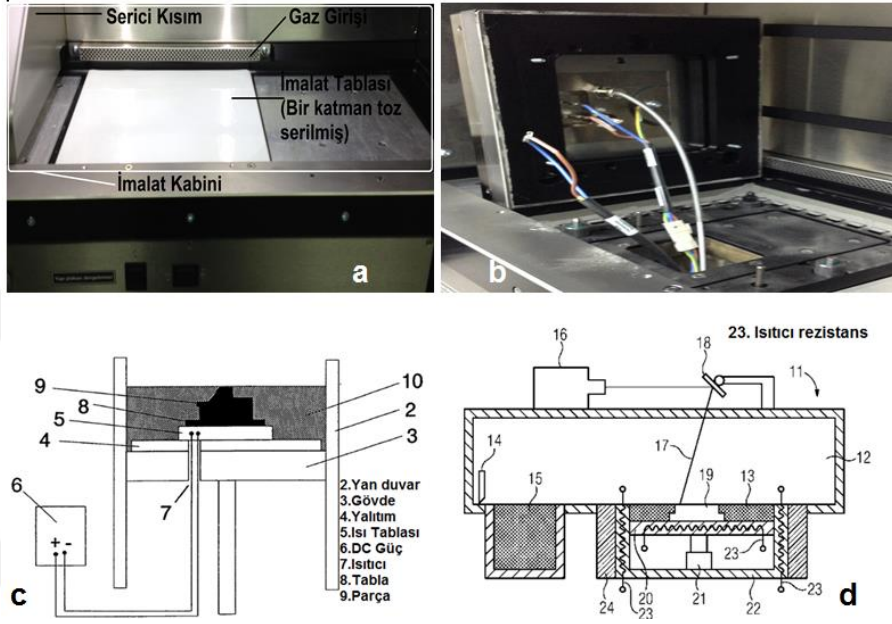
Şekil 2.3. Serme mekanizmalarında farklı serici elemanlar a) Bıçak b) Tambur c) Hazneli [Schuereen ve Kruth, 1995]

Toz depolayıcı haznedan toz serici bileşene aktarılan toz metal hammadde, bu aşamada imalat tablası denilen, rijit ve yüzeyi pürüzsüz bir levha üzerine istenen katman kalınlığında serilmektedir. Bir katman, serici tarafından imalat tablası üzerine serildikten sonra, lazer ışını bu toz katmanı üzerinde tarama gerçekleştirerek dijital verideki geometriye göre ilgili toz bölgelerini ergitmektedir. Ardından imalat tablası ayarlanmış katman kalınlığı kadar aşağı indirilmekte, serici sistem tarafından tekrar bir toz katmanı, bazı kısımları ergitilmiş önceki toz katmanı üzerine serilmektedir. Bu toz katmanı da ilgili geometriye göre lazer ışını taraması ile ergitilerek hem kendi arasında hem de önceki toz katmanı ile birleştirilmiş olmaktadır. Bu şekilde imalat tablası, parça yüksekliği kadar kademeli olarak (her iniş bir katman kalınlığı kadar) aşağı inerek, tabla üzerinde parçanın 3 boyutlu imalatı gerçekleştirilmektedir.

2.2.3. Tabla sistemi

İmalat tablası sistemleri, toz metalin serildiği ve yüzeyi taşlanmış, imal edilecek parçanın ilk katmanının ergitilerek bu yüzeye kaynaştırıldığı metal parça ve bu parçanın hareketini sağlayan eyleyici/hareket iletim elemanlarından oluşmaktadır. İmalat öncesi X-Y eksenleri boyunca var olabilecek dengesizliklerin giderilmesi için bazı cihazların imalat tablalarında X-Y eksenleri boyunca tablanın hareket serbestliğini sağlayan motorlar bulunmakta, böylece bu eksenler doğrultusunda düzgünlük ayarı yapılabilmektedir. Bunun yanı sıra son yıllarda yapılan araştırmalar sonucunda, imalat tablasının alt kısmına ısıtıcı elemanlar konumlandırılarak, her bir katmanın lazer ergitme işleminden sonraki ani soğuması sonucu meydana gelebilen ısıl kalıntı gerilme kaynaklı sorunların ön ısıtma ile önüne geçilmeye çalışılmaktadır [Shiomi vd., 2004; Brandl vd., 2012;

Kempen vd., 2014; Mertensa vd., 2016; Sander vd., 2016; Vrancken vd., 2016; Liu vd., 2013]. Ticari olarak sunulan lazer ergitme cihazlarında da tabla ön ısıtma sistemleri kullanılmaktadır [Uhlmann vd., 2016; Aniwaa, 2019; Multistation, 2019; Trumpf, 2019; EOS, 2019]. Şekil 2.4'te a ve b'de örnek imalat tablası ve imalat tablası ısıtma mekanizmaları görülmektedir [US Patent, 2004; Germany Patent, 2016].



Şekil 2.4. a) Örnek bir lazer ergitme cihazı imalat tablası [EOS M280] b) Isıtma donanımı [EOS M280] c) Örnek bir ısıtıcı eleman patenti [US Patent, 2004] d) Örnek bir rezistanslı tabla patenti [Germany Patent, 2016]

İmalat tablası, toz kendi üzerine serildiği için çeşitli toz sızdırmazlık elemanları ile emniyete alınmak zorundadır. Bununla birlikte Z eksenı boyunca hareketini sağlamak için de, en alt kısmında doğrusal eyleyici, piston veya motor-vidalı mil kombinasyonu gibi tahrik elemanları kullanılmaktadır. Olası sorunlara karşı farklı ısıtma yöntemleri de araştırılmakta ve uygulanmaktadır. Bunlar lazer güç kaynağı ile katmanı düşük güçte tekrar ısıtma, imalat kabınının sıcaklığını yükseltme veya kızılötesi, radyo frekanslı ısıtma ile toz katmanını yüzeyinden ısıtma gibi yöntemlerdir [Kellens vd., 2014; Khan, 2010; US Patent A1].

2.2.4. Lazer-optik sistem

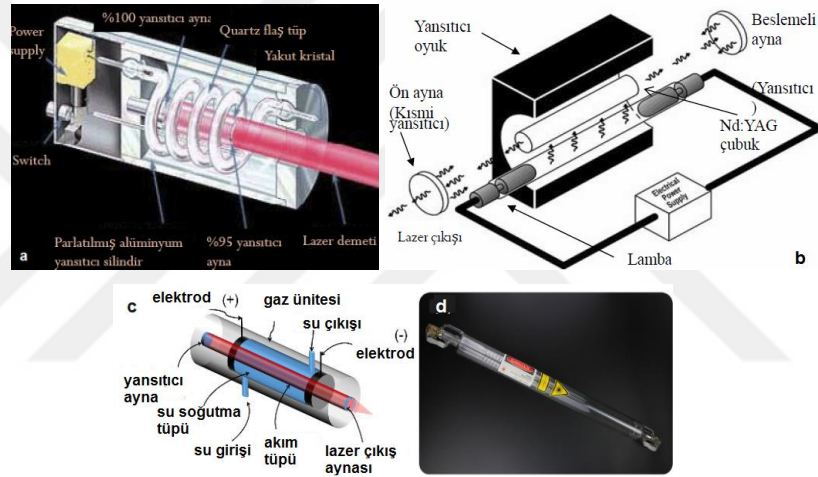
Bir metal lazer ergitme cihazını oluşturan diğer alt sistemlerden biri lazer optik kısmıdır. Ergitici güç kaynağı olarak değişik güçlerde lazer güç kaynakları, bu ışını toz serilen tabla üzerinde X-Y yönlerinde, dijital tasarım verisine uygun olarak hızlı bir şekilde yansıtabilmek için çeşitli optik, tarayıcı aynalı kafalar ve lenslerle birlikte çalışmaktadır. Lazer ışını barındırdığı özellikler itibariyle hem tehlikeli hem de güçlü bir fiziksel kavramdır. Lazer ışını diğer ışın türlerinden yönelimli ve tek renkli oluşuyla ayrılmaktadır. Normal bir ışık kaynağına göre;

- Dar bir frekans dağılımı ve daha yüksek şiddet
- Çok büyük paralelleştirme (yönlendirme) derecesi ve çok kısa atım süresi

Lazer ışın kaynaklarının çalışma temelinde bir atom çekirdeğinin çevresindeki elektronların enerji seviyelerinin değiştirilmesi yatmaktadır. Genelde elektriksel veya foton halinde bir dış etki ile önceden belirlenmiş madde ortamında atom çekirdeği çevresinde belirli yörüngelerde dolanan elektronlar bulundukları olağan enerji seviyesini, uyarıldıklarında terkederek yüksek enerji seviyesinde dolanmaya başlamaktadır. Uyarılma sonrası olağan yani her zamanki enerji seviyelerine geri dönen elektronlar tam bu sırada foton denilen ışık parçacıkları yaymaktadır. Bu yayılan fotonlar normal bir ışık kaynağındaki gibi dağınık ve farklı dalga boylarında değil, bütünleşik bir halde ve aynı dalga boyunda yayılmaktadır [KACAR, 2015; *lasers.llnl.gov*, 2019]. Lazer ışınının bu özelliği dolayısıyla odaklanması, yüksek enerjili olarak kullanılması mümkün olmaktadır. Şekil 2.5'te yaygın kullanıma sahip bir Nd YAG lazerin içyapısı ile ilk yakut lazerin içyapısı ve CO2 lazer yapısı görülmektedir. Yaygın olarak lazer kaynakları Şekil 2.5'te görüldüğü üzere bir kazanç ortamı, bir enerji pompalama kaynağı ve bir optik rezonatörden meydana gelmektedir. Optik rezonatör içerisine yerleştirilmiş olan kazanç ortamı, ihtiva ettiği madde dolayısıyla, enerji pompalama kaynağı tarafından uyarılarak salınması sağlanan ışın demetini yükseltme görevini üstlenmektedir.

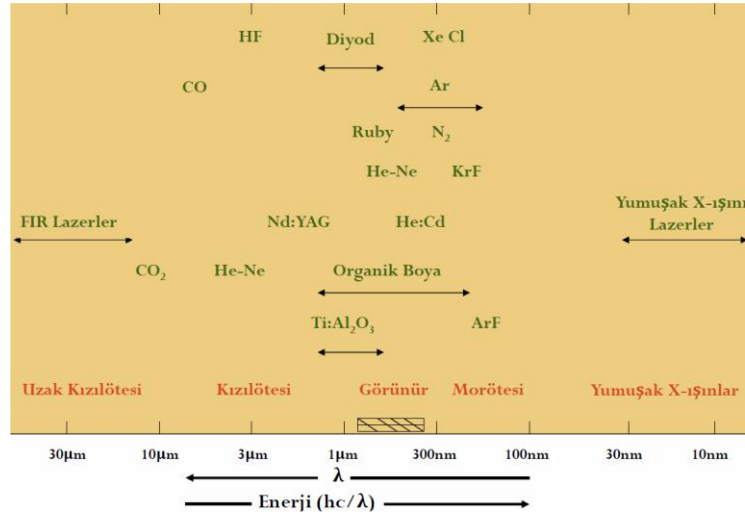
Çok çeşitli ortamlar barındıran veya ışın çıkış şekline göre sınıflandırıldığında türleri artan lazer kaynakları bulunmaktadır. Kullanılan kazanç ortamına göre sınıflandırıldığında;

1. Gaz Lazerler: Helyum-Neon Lazeri, CO₂ Lazeri, Nitrojen Lazeri, İyon Lazerleri vb.
2. Sıvı Lazerler: Boya Lazerleri
3. Katı Hal Lazerleri: Yakut Lazeri, Nd-YAG Lazer, Ti-Safir Lazeri
4. Yarı İletken Lazerler: Diyot Lazerleri
5. Diğer Türde Lazerler: X-Işını Lazerler, Serbest Elektron Lazerleri, Fiber Lazerler olarak lazer kaynakları değerlendirilmiştir.



Şekil 2.5. Lazer iç yapıları a) İlk yakut lazer b) Yaygın kullanılan Nd YAG Lazer c) CO₂ lazer yapısı d) Ticari bir CO₂ akım tüpü (MASTERLASER izniyle) [lasers.llnl.gov, 2019; hydrogeneurope.eu, 2019; Hyub vd., 2017]

Bu lazer türleri fotonun yayıldığı ortam, elektronların uyarılış biçimi gibi farklılıklar arzetymekte, bu farklılıklar dolayısıyla, dalga boyu, güç gibi çıkış parametreleri değişmektedir. Güç aralığı lazer kaynağı türüne göre 0.003 ile 15000 W aralığında olabilmektedir. Şekil 2.6'da ilgili türlerin dalga boyu aralıkları görölmektedir [KACAR, 2015; lasers.llnl.gov, 2019].



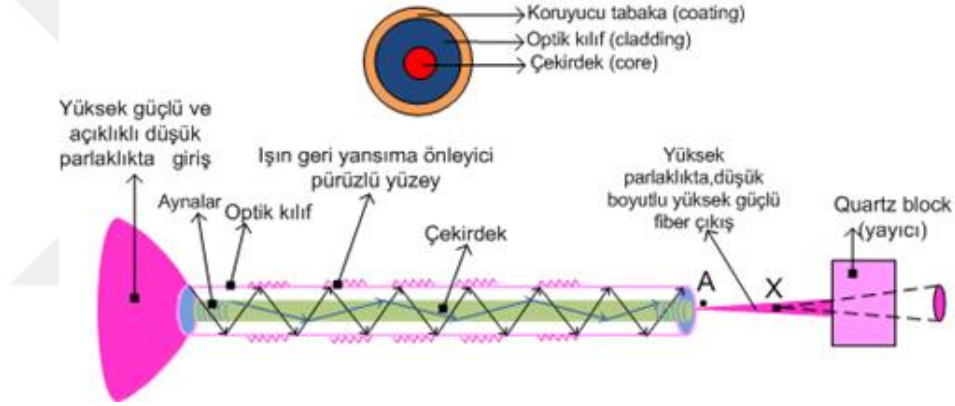
Şekil 2.6. Lazer tiplerine bağlı olarak oluşan dalga boyları [KACAR, 2015; www.lasers.llnl.gov, 2019]

Lazer türleri arasında belirgin ayrımı sağlayan bir başka konu da ışın kalitesi ve odaklanmış ışın boyutudur. Işın kalitesi BPP (Beam Production Parameter) adı verilen ve ışın yarıçapı ile ışın ıraksama açısı terimlerinden oluşan kavramdır. BPP kavramı imalat çözünürlüğünü etkileyen ve güç yoğunluğundan etkilenen bir parametredir. Özellikle lazer dalga boyu, BPP en az değerini λ/π bağımlılığı ile belirlemekte ve buna difraksiyon limiti adı verilmektedir. BPP değerinin az olması daha yüksek güçlerin belirli alanda tutulmasını sağlamaktadır. BPP değerini en az seviyede tutabilmek için ışının tam Gaussian dağılımı adı verilen bir şekle sahip olması gerekmektedir. Fakat gerçekte bu imkansız olduğu için, ışın kalitesi de M^2 ile ifade edilen ve BPP değerinin λ/π 'ye bölünmesiyle ortaya çıkan, dalga boyundan bağımsız ışın kalite faktörü ile tanımlanmaktadır. Şekil 2.12'de bazı lazer türlerinin ışın kaliteleri görülmektedir [Paschotta,2016]. Tez kapsamında kullanılacak Yb fiber lazer güç kaynağına dair BPP değeri 1.4'tür ve birimsizdir. Bu değerin teorik olarak Gaussian ışın dağılımında 1 olan değere yakın olmasıyla kullanılacak lazerin kaliteli bir ışın çıkışı verdiği anlaşılmaktadır. Bu kombinasyonların doğru bir şekilde uygulanabilmesi ise seçilen lazer güç kaynağının tarayıcı kafa, ara elemanlar olan paralelleştirici, genişletici ve ışının son çıkış noktası olan F-theta lens ile uyumlu olmasına bağlı durumdadır. Buna dair Şekil 2.8'de Yb fiber lazerlerde lazer güç kaynağı çıkışında kullanılan konektörün içyapısı ve gerçek görüntüsü verilmektedir. Şekil 2.9'da ise bu konektörden ışın çıktıktan sonra içerisinden geçtiği elemanlar hesaplamalarda

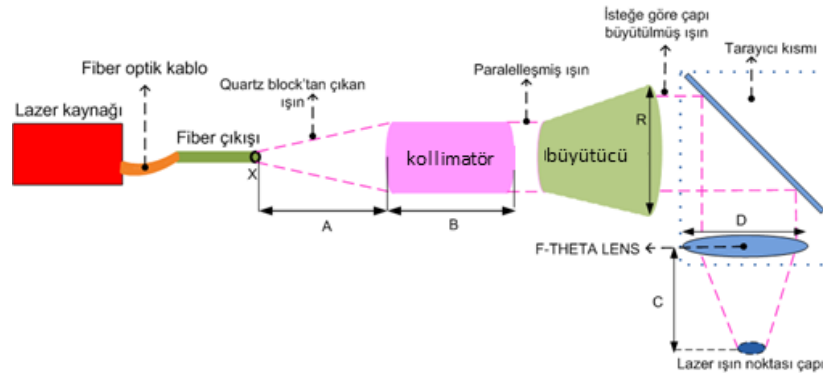
kullanılan önemli ölçülerle birlikte kullanılan uç gösterilmektedir. Devamında verilen Çizelge 2.2-4 ise bu cihazların belli başlı özelliklerini vermektedir.



Şekil 2.7. Gerçek bir fiberoptik kablo ucu



Şekil 2.8. Fiber lazer sinyalinin kablo ve uç aparatından geçtiği durumlar



Şekil 2.9. Fiber optik kablo ve konektör çıkışındaki fiber ışının paralelleştirilerek büyütülmesi ve tarayıcıya girişi

Çizelge 2.2. Günümüzdeki metal lazer ergitme cihazları [Kamsky vd., 2015]

Firma Adı	Katman kal.	İmalat Süresi	Parça Yüksek. (mm)	Serme Süresi	Yazdırma Süresi
EOS	60 um	23s 36 dk	200.04	007:48.05	015:48:05
SLM	50 um	69s 36 dk	200		
Concept Laser	50 um	51s 13 dk	200	19s 16 dk	31s 55 dk

Çizelge 2.3. Serici ve tabla özellikleri [Kamsky vd., 2015]

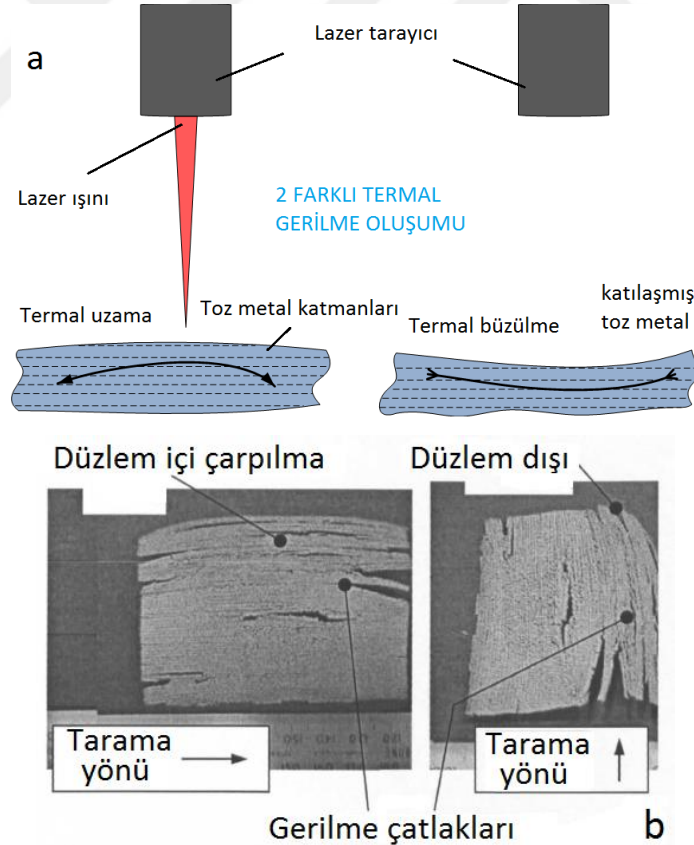
Firma	Serici Özelliği		İmalat Tablası özelliği	
	Hız (mm/s)	Tip	Sıcaklık (T)	Z X eksenı boyunca doğruluk (um)
Renishaw	60	Bıçak	200	±2
EOS	40-500	Bıçak	40-100	±5
Phenix	25	Tambur		± 1
Concept Laser	400	3 Bıçak		±3-5
SLM (500)	200	Üçgen	200	±2
SLM (280)				
SLM(250)				

Çizelge 2.4. İmalat özellikleri [Kamsky vd., 2015]

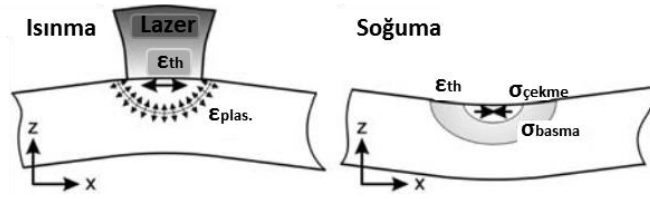
Firma	İmalat oranı cm ³ /h	Doğruluk (um)	Tekrarlanabilirlik (um)	XY Bitirme Yüzeyi (Ra)	Z Bitirme Yüzeyi	Et Kalınlığı (mm)	Detay Boyutu (um)	Maks. Tarama Hızı (mm/s)
Renishaw	5 - 20	±20	±50	10- 40	10- 80	0.2	±150	2000
EOS	5 - 14	±50	±50	9 - 12	40 - 80	0,3-	±100	7000
Phenix		±50	±20	5 - 8	8 - 10	03	±100	10000
Concept	2 - 20	20-30		20-30	20-30	0.5		7000
SLM(500)	70	±2		12 - 17	28 - 38	03	±100	15000
SLM(280)	35					0.18		15000
SLM(250)	20					0.16		20000

2.3. Metal Lazer Ergitmede Karşılaşılan Sorunlar, Modelleme İhtiyacı

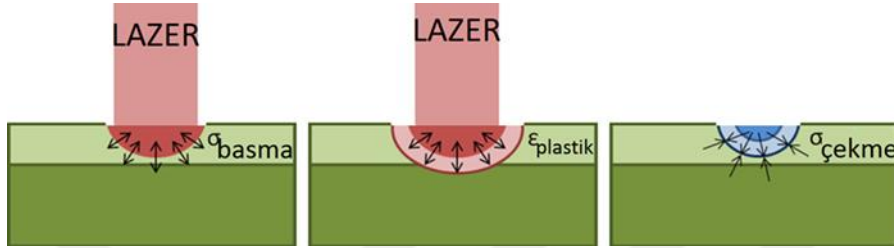
Metal lazer sinterleme veya günümüzdeki haliyle metal lazer ergitme cihazlarında buraya kadar bahsedilen işlemlerle birlikte imalat esnasında ve imal edilmiş parçada ani soğumalardan (yüksek soğuma oranı kaynaklı) dolayı kalıntı gerilmeler, istenmeyen şekil ve değer de deformasyonlar oluşabilmektedir. Metal lazer ergitme süreci boyunca ortaya çıkan ve kalıntı gerilme olarak bahsedilen istenmeyen bu durum, çoğu zaman imal edilen parçanın hasara uğramasına yol açabilen sıcaklık farkları kaynaklı türeyen iç gerilmelerdir. Çok sayıda değişken parametre olmasına da bağlı olarak metal lazer sinterleme işleminde karşılaşılan en ciddi sorunlardan biri olan ısı kalıntı gerilmeler büyük ısıl gradyanlar sonucu oluşarak büyüyen ısıl çatlak ve çarpılmalara yol açabilmektedir. Şekil 2.10a ve b’de şematik gerilme oluşumu ve mikroskobik çatlaklar olarak, Şekil 2.11 ve 2.12’de de gerimeler noktasında oluşum süreci olarak görülebilmektedir.



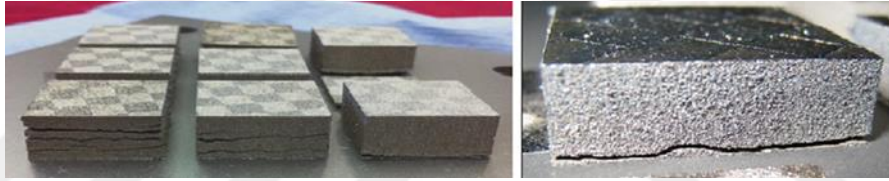
Şekil 2.10. a) Isıl kalıntı gerilme şematik oluşumu(Lazer yakarken uzama, yakma sonrası büzülme oluşur) b) Kalıntı gerilmenin neden olduğu çarpıklık ve mikro çatlaklar [Hauser vd, 1999]



Şekil 2.11. Kalıntı ısı gerilme oluşumu [Mercelis ve Kruth, 2006]



Şekil 2.12. Isıl yönden ısıl gradyan temelli kalıntı gerilme mekanizması şematiği [Kempen vd., 2013, Pohl vd., 2001]



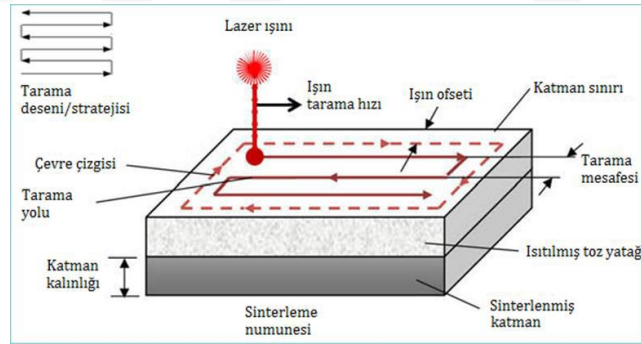
Şekil 2.13. Isıl yönden ısıl gradyan temelli kalıntı gerilme mekanizması gerçek görüntüsü [Kempen vd., 2013, Pohl vd., 2001]

Metal lazer ergitme sürecini etkileyen çok sayıda parametre mevcut olduğu için bu parametrelerin en iyi değerlerinde imalat yapılmaması halinde parçada sorun oluşması kaçınılmaz hale gelmektedir. Temel olarak lazer gücünün toz yatağı üzerindeki etkisi olan güç yoğunluğu ile ilişkisi Denklem 2.1 ile verilmektedir. Ergitilecek toz hacmi için gerekli lazer enerji yoğunluğu, tarama hızına, tarama deseni boşluğunun değerine ve katman kalınlığına bağlı olarak;

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad (2.1)$$

formülüyle, $\frac{J}{mm^3}$ biriminde hacim başına enerji olarak ifade edilmektedir [Gu vd., 2013; Thijs vd., 2010]. E= birim hacimdeki enerji yoğunluğu(hacimsel enerji yoğunluğu-VED) v =tarama hızı (mm/s), h = tarama boşluk mesafesi (μm), t =

katman kalınlığıdır (μm). Burada oluşan sinterleme/ergitme hacmi bulunurken, ışının düştüğü katman kalınlığı ve hemen altındaki katmanın yarı kalınlığı toplanarak t değeri bulunmaktadır. Böylece tozun en az $\frac{3}{2}$ katmanlı hacim olarak değerlendirilerek lazer ışını, enerjisini tam olarak bu hacme verebilmiş olmaktadır. Bunu belirleyen ise ergiyik havuzu boyutudur. Hacimsel enerji yoğunluğu olarak literatürde yer bulan bu değer, parça yoğunlaşmasının artırılması üzerinde büyük etki olduğu bir Titanyum-Alüminyum karışım tozu kullanılarak ortaya konulmuştur [Vandenbroucke ve Kruth, 2007]. Bazı çalışmalarda yine hacimsel enerji yoğunluğu 0.1 ila 0.8 kJ/mm^3 aralığındaki değişen değerlerde kullanılacak şekilde oluşturulan imalat parametrelerinin iyi sonuçlar verdiği ortaya konulmaktadır [Gu vd., 2006; Sander vd., 2016]. Bu formüldeki bir diğer terim v =tarama hızı değeri de önem arz etmektedir. Tarayıcı galvanometre cihazının bir özelliği olan bu değer genel metal sinterleme/ergitme işlemlerinde kullanılan tarayıcı kataloglarında en fazla 7 ila $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ aralığında bulunmaktadır. Bu denklem çerçevesinde diğer etkenlerle birlikte metal lazer ergitme sürecini etkileyen parametreler Şekil 2.14'te verilmektedir.



Şekil 2.14. Metal lazer ergitme cihazında etkili imalat parametreleri [Duman ve Kayacan, 2017]

Bu parametrelerin uyumlu olmaması halinde ısı kalıntı gerilmeler yanında, topaklaşma veya fazla ergitme sonucu buharlaşma sorunları veya yoğunluk yetersizliği sorunu da oluşabilmektedir [Gong vd., 2014; Tolochko vd., 2004; Kruth vd., 2004; Gu vd., 2006; Thijs vd., 2010; Li vd., 2012]. Bütün bu sorunlar mekanik özelliklerin arzu edilen değerde olmaması sonucunu doğurmaktadır. Böylece imalat parametrelerinin en iyi hale getirilmesi problemi yalnızca ısı kalıntı

gerilme sorunu dolayısıyla değil, topaklaşma, buharlaşma, yüzey pürüzlülüğü, mekanik özellikler gibi yönlerden de arzu edilen değerlere ulaşmak için bir zorunluluk olmaktadır[Gong vd., 2014].

Günümüzde halen devam eden istenmeyen boyutta kalıntı gerilme ve deformasyon oluşumunu engelleme çalışmalarının da aslında temel olarak amaçladığı olgu geometriye, boyutlara ve malzeme türüne uygun en iyi imalat parametrelerine karar verebilmektir. İmalat parametrelerinin eniyilenmesi, metal lazer ergitme sorunlarının önüne doğrudan geçebilmek için en büyük gerekliliktir.

2.4. Mikro Ölçekli Isıl Modelleme Nümerik Analiz Literatür Özeti

En iyi imalat parametrelerinin gerçekçi ölçüde tahmin edilmesi ve deneme imalatları gibi pahalı ve zaman alıcı yöntemlerden kurtulmak amacıyla takip edilen en önemli ve en verimli yöntem ısıl modelleme çalışmalarıdır. Günümüz teknolojisinde bilgisayarların, yazılım paket programlarının ve sensör teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte matematiksel model çıkarılması ve bu model temelinde bilgisayar destekli iteratif nümerik analiz yöntemleri kullanılarak toz yatağı üzerindeki sıcaklık dağılımının, dolayısıyla oluşacak ergiyik havuzu boyutlarının tahmin edilmesi son yıllarda yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. Özel havacılık ve savunma teknolojilerinde gerekli parçalarda yine bu yöntemler kullanılamamasına rağmen, bu analiz programlarından bazıları oldukça büyük fiyatlarla ticari olarak satışa çıkarılmış durumdadır. Ansys, Abaqus, COMSOL, 3DSIM, LSIM, RadTherm, NetFabb gibi metal lazer ergitme sürecinin modellenmesi, analizi ve benzetimi için kullanılan programlar, hem ticari anlamda hem de akademik çalışmalarda oldukça yoğun kullanılmaktadır.

Bu konuda gösterilebilecek ilk çalışma 1998 yılında *Williams ve Deckard* tarafından yapılmıştır. Toz ortamına aktarılan enerji yöntemi belirlenerek lazer gücü, tarama hızı, mesafesi gibi seçilmiş birincil ve gecikme süresi, ışın çapı gibi ikincil olarak nitelendirilmiş bazı SLS/SLE parametrelerinin bu imalat süreci sonuçlarına etkisi incelenmiştir. Isıl malzeme parametreleri sıcaklık, zaman ve

yoğunluk bağımlı olduğundan tam çözümün mümkün olmayıp nümerik yaklaşımın etkili olacağı belirtilmiştir. Bu öncü çalışmada benzetim çalışması sonucunda sıcaklık ve diğer parametrelerin tahmini etkileri ortaya konulmuştur. Doğrulama yani deneysel çalışma açısından ise polikarbonat malzemeler imal edilerek, yoğunluk ve mekanik özelliklerin nasıl etkilendiği incelenmiştir. Benzetim ise 1 boyutta, ileri beslemeli temel sonlu farklar yöntemi ile yapılmıştır. Çalışmada proses sırasında bir ölçüm işlemi söz konusu olmamıştır [Williams ve Deckard, 1998].

Shiaomi vd. 1999 yılında mikroskobik yaklaşımla bir benzetim çalışması gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada Cu tozları hem benzetim ile hem deneysel olarak lazer sinterlenmiş, katılaştıran kütlelerin miktarı bulunmuş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Çalışmada özgün olarak sonlu eleman model nümerik çözümünde 2 aşamalı yeniden ağ atama tekniği kullanılmış ve iletim katsayısı deneysel ölçülerek gözenekliliğe bağlı bir toz iletimi denklemi uygulanmıştır. Modele başlama noktası; aksisimetrik olarak $\lambda = k$ ısı iletim katsayısı r ve z koordinatlar, $q = A(x, y, z, t)$ hacim başına iç ısı kaynağı iken şöyle verilmiştir;

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \left(\left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \right) \cdot \left(r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q \quad (2.2)$$

Yüzeyde sabit ısı akısı oranı ise şöyle ifade edilmiştir;

$$\left(\left(I_r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + I_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_s = 0 \quad (2.3)$$

Takip eden hesaplamalar, katlaşıp küreleşen ve ergiyik havuzu oluşumu sırasında yüzeylere bölünen havuz çevresinde sınır şartları yazılmasıyla sağlanmıştır. Bu 3 boyutlu benzetim çalışmasında en büyük lazer gücünün ve yakma süresinin artmasıyla katılaştıran kütlelerin artışı gözlemlenmiştir. Lazer gücü daha çok etkilemekle birlikte, başlangıç yoğunluğunun artışı ters oranlı etkilemiştir. Sebep olarak yoğunluk artışıyla iletim katsayısının artışı ve katlaşmanın artması gösterilmiştir. Çoklu lazer atımları deneyinde ise benzer sonuçlar yanında lazerin her atımdaki ilerleme mesafesinin ergiyip katılaştıran ve

küre olan şeklin çapından kısa olması gerektiği (iyi bağlanma için) belirtilmiştir [*Shiaomi vd., 1999*].

Bugeda vd., çalışmalarında 3 boyutlu tek çizgi tarama benzetimi yaparak sıcaklık ve yoğunluk dağılımlarını araştırmışlardır. Denklem 2 ile başlayan araştırmacılar, bu terimleri görünür yoğunluk, katı özgül ısı ve toz yatak etkin iletkenliği olarak almışlardır. Toz yatağının her noktasında değişen gerçek iletimin hesabı için, mikro taşınım ve ısıtım etkileri için literatürde tanımlı etkin iletkenlik kullanılmıştır;

$$k_e = \mu \cdot \frac{k_s}{1 + \Phi(k_s/k_g)} \quad (2.4)$$

k_s katı iletim katsayısı, k_g koruyucu gaz olan havanın, μ katılık oranı olarak toz yatağı yoğunluğunun katıninkine oranıdır. Φ ise $0.02 \cdot 10^{2(0.7-\mu)}$ olan bir sabittir. Simetri kullanılarak 0.2x1.6x0.2 mm boyutlarında bir alanda 116 bin düğüm ve 113 bin 8 düğümlü hekzahedral ağ elemanı kullanıldığı belirtilmiştir. Çalışma çok daha eski başka bir çalışmanın deneysel sonuçlarıyla doğrulanmıştır [*Bugeda vd., 1999*].

Matsumoto vd. tarafından ortaya konulan 2002 yılındaki bir çalışmada da tek bir katman için benzetim yürütülmüştür. Bu çalışmada ısı hem gerilim odaklı 2 boyutlu FEA yürütülmüştür. Sıcaklığa bağlı termomekanik ve mekanik özellikler modellenmiştir Oluşturulan ısı iletim modeli kullanılarak katılaştıran kütle bulunmuştur. Fourier iletim kanunu ile modelleme başlatılmıştır. Geri farklar şeması ile Galerkin metodu kullanılarak bu modele dayalı FEA çözümlenmiştir.

Ada tarama deseni ile kısa vektör taramalar sayesinde sol ve sağ uçta biriken komşu katılaştırmış çizgiler arası çekme ve orta kısma yayılan basma gerilmelerinin azaltılabileceği öngörülmüştür. Bu çalışmada da başka çalışmaların deneysel sonuçları model tahminlerini doğrulamakta kullanılmıştır [*Matsumoto vd., 2002*].

Dai vd., 2004 yılındaki çalışmalarında oldukça önemli gelişmeleri 3 boyutlu model olarak dental porselen malzeme için uygulamışlardır; Çalışmada iletim, taşınım ve ısıtım ayrı ayrı incelenmiştir. Buna göre iletim için Denklem 2.5'teki eşitlik öne sürülmüştür;

$$\frac{K}{K_f} = 1 - \sqrt{1 - \varphi} \left(1 + \varphi \cdot \frac{K_r}{K_f} \right) + \sqrt{1 - \varphi} \cdot \left(\frac{2}{1 - \frac{K_f}{K_s}} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 - \frac{K_f}{K_s}} \right) \cdot \left(1 - \frac{K_f}{K_s} \right) \cdot \ln \left(\frac{K_s}{K_f} \right) + \left(\frac{K_r}{K_f} \right) \quad (2.5)$$

φ gözeneklilik oranı (varsayımdaki gibi başlangıçtaki 0.4 değeri alınıyor), K_f havanın iletim kats. K_s katı için katsayı, Φ düz toz tane yüzey oranı, B deformasyon oranı, ve

$$K_r = 4 \cdot F \cdot \sigma \cdot (T_p)^3 \cdot D_p \quad (2.6)$$

radyasyon ısı iletim katsayısıdır. Burada da D_p ortalama tane çapı, $F = 1/3$ olan literatürden bir sabit, T_p tane sıcaklığıdır.

Radyasyonla ısı kaybı için ve katıdan yüksek olması beklenen toz ışı absorpsiyonu için;

$$q_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{yüzey}^4 - T_{çevre}^4) \quad \text{ve} \quad \varepsilon = A_h \cdot \varepsilon_h + (1 - A_h) \cdot \varepsilon_s \quad (2.7)$$

A_h için 0.4 gözeneklilik değerine bağlı denklemler kullanılmaktadır. Toz çevresiyle doğal taşınım içinse yine h_c için teorik belirli formüller kullanılmak üzere;

$$q_c = h_c \cdot (T - T_{çevre}) \quad (2.8)$$

kullanılmıştır. Taşınım için ise Gr ve Pr Sayıları kullanılarak Nu sayısının hesabı yapılmaktadır. Isı kaynağı olarak ise Gaussian dağılımlı ısı akısı ele alınmıştır;

$$q = \frac{(2Q_1 \cdot 2\alpha_a)}{\pi R_1^2} \cdot e^{(2R^2 / R_1^2)} \quad (2.9)$$

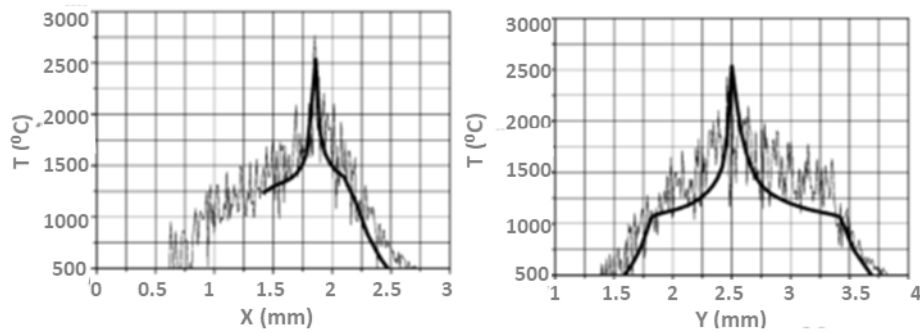
α_a toz tablası absorptesi, ısı akısı değerinin ışı merkezindeki e^{-2} katı olduğu yerdeki yarıçap R_1 , R herhangi bir toz yatağı noktasının ışı merkezine mesafesidir. Bu mesafe için lazer ışıını, tozu x yönünde tararken ;

$$R^2 = (Z - Z_0 - V \cdot t)^2 + (X - X_0)^2 \quad (2.10)$$

Bu çalışmalarında araştırmacılar bu kriterlerin ortalama sıcaklık temelli olanının daha yüksek merkez sıcaklığı ve sıcaklık gradyanları tahmin ettiğini ortaya koymuş, ayrıca hacimsel büzülmenin ihmal edilmesinin büyük bir etkisi olmadığını kanıtlamışlardır[Dai ve Shaw, 2005].

Model çalışmaları arasında ilk ölçümle doğrulama işlemi gerçekleştiren çalışma ise Kolosov vd.'nin 2004 yılında yürüttükleri çalışmadır. 5x5x2 mm bölgede 2x2x0.05 mm ince ağılı alana ait titanyum tozunun 0.1 mm mesafeyle üst yüzeyindeki sıcaklık dağılımı deneyle ortaya konmuştur. Isı iletim katsayısının sıcaklığa bağlı gelişiminin ısı dağılımı etkilediği sonucuna varılmıştır. Sıcaklık geçmiş verilerinin kullanılmasıyla iletim katsayısı ayarlaması gerekliliği anlaşılmıştır. Üst yüzeyden kızılötesi kamera ölçümleriyle model doğrulanmıştır. Şekil 2.15'te ilgili termal kamera ölçüm sonucu (ince gürültülü sinyal) ve modelde elde edilen sıcaklık profili görülmektedir.

İmalat sırasında yapılacak ölçüm ve/veya ölçümlerin literatür anlamında ilk örneği olan bu çalışma sonrası ısı iletim kavramının daha çok üzerinde durulmaya başlanmıştır. Isıl iletkenlik 0.2 ve $22 \frac{W}{mK}$ olan toz ve katı iletkenlik değerlerinin ortalaması olarak alındığında tahminlerin tutmadığı kamera ölçümleriyle gösterilmiştir[Kolosov vd., 2004].



Şekil 2.15. Kolosov vd.'nin termal kamera ölçüm sonucu a) X yönlü b) Y yönlü [Kolosov vd., 2004]

Bir başka benzetim çalışmasında Patil ve Yadava, 2007 yılında tek bir metal katmanını incelemişlerdir. Katı iletkenlik ve özgül ısı sıcaklık bağımlı değerleri

için *Kolossov vd., 2004*'teki değerler kullanılmıştır. Katı sıvı faz değişimi ve gizli ısı için literatürdeki modifiye edilmiş bir özgül ısı denklemi kullanılırken ısı tipi Gaussian, yoğunluk katının belirli bir oranında sabit alınmıştır. Bu modellemenin FEA ortamındaki karşılığı için Galerkin formülasyonu kullanılmıştır. Buna göre;

$$[C]^e = \int_{De} \rho_{yatak} \cdot C \cdot \{N\}^e \{N\}^{eT} \cdot dxdy \quad (2.11)$$

$$[K]^e = \int_{De} k_{etkin} \cdot C \cdot [B]^e [B]^eT \cdot dxdy \quad (2.12)$$

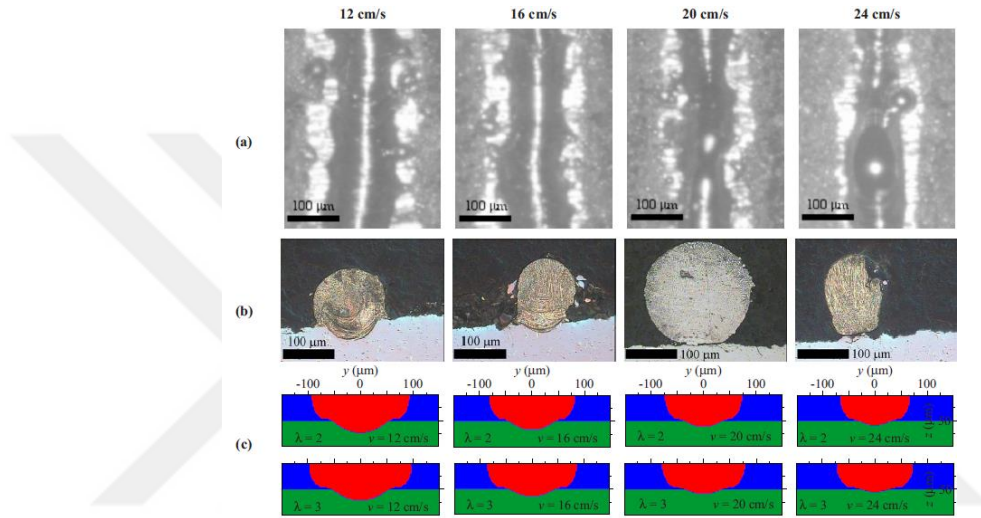
$$\{f\}^e = \int_{De} C \cdot \{N\}^e \{N\}^{eT} \cdot \{q_g\}^e dxdy \quad (2.13)$$

Denklem 2.11-13'te $[C]^e$ elemental kapasitans matrisi, $[K]^e$ iletkenlik matrisi, $\{f\}^e$ sınır akı vektörüdür. $\{N\}^e$ düğüm durum fonksiyonu vektörü, $[B]^e$ sıcaklığın düğüm değeri ve türevini ilişkilendiren matris ve $\{q_g\}^e$ düğüm ısı kaynağı vektörüdür. İntegralleri de nümerik olarak her yönde 3 noktayla Gaussian kuadraturü kullanılarak hesaplanmıştır. Model kapsamında yapılan FEA analizi neticesinde tahmin edilen sonuçlar *Kolossov vd. 2004* çalışmasının ve *Fischer vd., 2003* çalışmasının deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır [*Fischer vd., 2003*]. Tahmin sonuçları başka bir deneysel çalışma ile doğrulanmış olması, modelin çok yönlü kullanılamamasına sebep olmakta ve kullanım alanını yalnızca ilgili çalışma şartlarıyla kısıtlamaktadır. Ayrıca sonuçlarda uyumsuzluklar yüksek oranlarda mevcuttur.

Gusarov vd., yaptıkları çalışmada ısıyım ve iletimi modellemeye ve ergiyik havuzuna hızın etkisini göstermeye çalışmıştır. Bu amaçla toz içerisindeki yansımalarla beraber ısıyım denklemleri türetilmiştir. İkinci adımda iletim için 3 boyutlu Fourier denklemi hacimsel entalpi ile ilişkilendirilmiştir. Lazer gücü yoğunluğu zil şeklinin benzeri olarak tanımlanmış, katı iletimi tozun 100 katı varsayılmıştır. Buna göre de katı için 1, sıvı için 0 değeri olan bir faz terimi tanımlanmıştır. Son olarak sonlu elemanlar çözümünde kullanılan açık çözüm şeması şartı gereği zaman adımı en küçük eleman boyu ve ısı yayınıma bağlı hesaplanarak eleman başına yaklaşık $10^{-7}s$ bulunmuştur. Çalışmada 316L için gizli ısı, sıvı/katı özgül ısı, ergime noktası için tekil değerler alınmıştır. Ergime

noktası üzerinde iletim ekstrapolasyonla $20 \frac{W}{mK}$, gevşek tozun etkin iletimi için ise hesaplanan $0.3 \frac{W}{mK}$ değeri çok küçük bulunduğundan 20 değeri alınmıştır.

Deneysel tarafta ise önce tabla, 1075 nm dalgaboylu 70 μm ışın çaplı 50 W fakat emicilikle 45 W lazer taramalarla yakılarak model tahminleriyle karşılaştırma yapılmıştır. Böylece ihmal edilen Marangoni etkisi ve emiciliğin sıcaklıkla artışının büyük bir etkisinin olmadığı denk düşen tahminlerle ortaya konulmuştur. Şekil 2.16'daki gibi model tahminleri (sıcaklık ve havuz boyutu) ve imalat kesitlerindeki boyutların uyumlu olduğu belirtilmiştir [Gusarov vd., 2009].



Şekil 2.16. a) Tarama çizgileri b) kesitler c) havuz boyut tahminleri d) sıcaklık tahminleri [Gusarov vd. 2009]

Roberts vd. 2009 yılındaki çalışmalarında benzetim yürütmüşlerdir. Termodinamik genel denge denklemiyle modelleme başlatılırken, lazer ışını 3 farklı moddan T00 modunda ele alınarak Gaussian simetride alınmaktadır. Protasov ve Gusarov 2017 yılındaki çalışmalarında TEM00 ve TEM01 arasında hangi modun kullanışlı olduğunu ifade etmişlerdir [Protasov ve Gusarov, 2017]. Bunun yanında Metel S. Alexander vd., 2018 çalışmalarında 3 farklı lazer modu geometrisinin etkilerini incelemişlerdir [Metel vd., 2018]. Ayrıca Tseng ve Aoh, 2014'te, Han ve Liou 2004'te mod türleri için deneysel sonuçlar ortaya koymuşlardır [Han ve Liou, 2004; Tseng ve Aoh, 2014]. Burada absorbtans yine Dai ve Shaw 2005'teki gibi ısı akısı ile çarpılarak dikkate alınmaktadır. Sıcaklık problemi ele alındığında ışın merkezi referans koordinatta; Fourier ve entalpi değişimi ilişkisiyle başlanmıştır. Benzetim aşamasında çoklu katmanlı element

ölüm-doğum tekniği kullanılmıştır. İletim, özgül ısı ve entalpi için literatürden grafikler alınmıştır. Benzetim çalışması Ansys Multiphysics FEA paketinde, 8 düğümlü lazer çapının $\frac{1}{4}$ ' ü olan 0.025 mm uzunluğunda tuğla elementler kullanarak, 1x1x0.15 mm toz yatağı 3x3x3 mm tabla üzerinde modellenmiştir. Tahmin edilen sıcaklık alanları Kolossov vd. tarafından bulunan deneysel sonuçlarla kıyaslanarak modelin tahminlerinin hata payının çok az olduğu belirtilmektedir. Deneysel bir ölçüm çalışmasının yok olması modelin güvenilirliği ve çok yönlü uygulanabilirliğinin kısıtlı olduğunu izlenimi uyandırmaktadır.

Li vd.'nin 2009 yılındaki çalışmalarında 316L paslanmaz çelik malzeme üzerine 3 boyutlu bir FEA modeli oluşturmuşlardır. 3x1.8x0.4 mm tabla ve 2.2x1.1x0.1 mm toz katmanı 0.1mm³ boyutlu SOLID70 elemanlarla (kalan kısımlar SOLID90) oluşturulmuştur. Sınır şartları iletim, taşınım ışıyım denklemleriyle literatürden alınmıştır. Işın kaynağı olarak Gaussian dağılımlı ışıdır. 316L için iletim ve özgül ısı Ansys içerisinde sıcaklığa bağlı Çizelge değerleri olarak alınmıştır. Toz etkin iletkenliği için ise Denklem 2.5 ve 2.6 kullanılmıştır. Gözeneklilik 0.5 ve absorbtivite 0.35 alınmıştır. Faz dönüşümü için entalpi integrali kullanılmıştır. Çalışmada lazer gücü hızı ve mesafenin ayrı ayrı etkileri ortaya konulmuş, tek çizgilerle imalat yapılarak çizgi durumlarına bakılmıştır. En iyi olarak seçilen parametrelerle bir türbin %95 başarılı dolulukta imal edilmiştir [Li vd., 2009].

Yine 2011 yılında Conduzzi vd. tarafından AISI 316L malzeme için düğüm sıcaklıkları kontrolüyle toz katı sıvı faz değişimleri temelinde sıcaklık dağılımı 3 boyutlu FEA benzetimi yapılmıştır. Çalışmada öncelikle belirlenmiş imalat parametrelerinde imalatlar yapılarak kesit görüntülerin imalat sonrası mikroskopta incelenmesiyle ergiyik havuzu boyutları optimum olarak ölçülmüş ve model sıcaklık sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. 6x9x0.3 mm ve 6x9x1 mm geniş katman olarak 2 boyut 0.056 mm en ince ağ boyutundaki elemanlarla modellenmiştir. Lazer girişi Kolossov vd., 2004'teki gibi ve ışıyın 5 elemanı etkiler biçimde modellenmiştir. 3 çizgiden oluşan katmanlar, iletim, yoğunluk ve özgül ısı toz ve katı için sabit tek değerler, ergiyik havuzu için özgül ısı literatürden

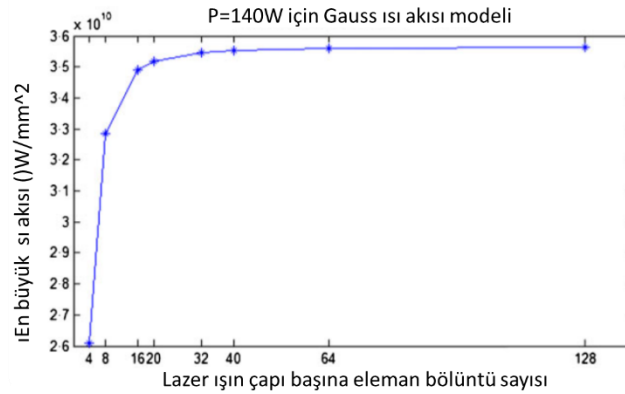
grafik alınarak modellenmiştir. Çok yönlülük ve imalat sırasında sıcaklık ve/veya ergiyik havuzu boyut ölçümü ile ilgili burada da bir uygulama olmamıştır.

Bu çalışmaları takip eden çalışmalar arasında Hussein vd.'nin 2013 yılında yaptıkları bir başka çalışmada 3 boyutlu bir FEA yürütürken etkin iletkenlik kavramını ve sıcaklık bağımlı malzeme toz katı değerlerini kullanmış ve Von Mises Gerilme değerlerine model üzerinden, deneysel çalışma olmaksızın geçiş yapmıştır. Öncelikle lazer ışını birkaç elemana etki ederken eleman boyutu 75 μm ayarlanmıştır. Zaman adımı tayini için eleman boyutu ve tarama hızı oranı kullanılmıştır. İletim denklemi 3 boyutta Fourier, gözeneklilik için başlangıçtaki değer 0.4 varsayılarak alınmıştır. Toz ve katının sıcaklığa bağlı iletim ve özgül ısı değerleri grafikler olarak literatürden kullanılmıştır. Isı kaynağı olarak Gaussian dağılımlı Denklem 2.9'a benzer alınmıştır. Sonuçta lazer tarama çizgileri mesafeleri dolayısıyla ilk çizgiden sonraki taramada ilk çizgi tekrar sıcaklığı yükselen bir alan ihtiva etmekte, bu sıcaklık ergime noktasını geçebilmektedir. Sonraki çizgilerde ise sıcaklık daha düşük seyretmektedir. Uzun çizgiler sıcaklık birikmesine yol açarken kısa çizgiler homojen ısı dağılımı sağlayıp havuz derinliği artmaktadır [Hussein A. vd., 2013].

Papadakis vd. tarafından 2014 yılında yapılan bir diğer çalışmada model indirme yaklaşımlarına odaklanılarak, ısı girdisi, katman kalınlığı, faz değişimi, sıcaklık bağımlı özellikler, taşınım etkileri farklı ısı kaynağı modelleri için dikkate alınmıştır ve imal edilen numunelerin kesit alanlarında SEM görüntüleri ile yetinilmiştir. Bu en üst katman ergiyik havuzu ölçülerine göre model düzeltme yapıldığı belirtilmektedir. 3 farklı ısı girdisi türü denenirken, tarama deseni ihmal edilmektedir. Kullanılan ısı modelleri ise 10 mm^3 boyutlu IN718 küpler imal edilirken modelde $0.5 \times 2.5 \times 2\text{ mm}$ boyut kullanılmıştır. Toz ve katının belirli sıcaklıktaki iletim ve özgül ısı değerleri literatürden alınmıştır. Hareketli ısı kaynağı Gauss dağılımlı konik alınmıştır. Soğuma için 10 s alınmıştır. Elde edilen değerler $6 \times 5 \times 45\text{ mm}$ 'lik geniş parça (destek yapılı bir kiriş) etkilerini tahmin için zamanın fonksiyonu olan sıcaklık değerleri olarak girilmiştir. Zaman tasarrufu için gerçekte imalat 30 μm iken katman kalınlığı 90 μm alınmıştır. 5 katman imalatı ve modellemesi yapılmıştır.

Antony vd. 2014 yılı çalışmalarında da FEA modeli sonucu elde edilen sıcaklık alanları ve havuz boyutları, deneme imalatı yapılan parçaların kesit alanlarında görüntüleri analiz edilerek proses esnasında herhangi bir ölçüm olmadan doğrulanmaya çalışılmıştır. İletim için Fourier Denklemi kullanılmıştır. Deneysel aşamada 50x40x3mm 316L tabla üzerine, 100 um katman kalınlığında 15-20 um boyutlu 316L tozu, belirli güç, hız ve ışın çap değerleri kombinasyonları denenerek tek çizgi taramaları yapmak amacıyla serilmiştir. Modelin deneysel imalatlardaki yapıları ergiyik havuzu boyutlarını tahmin edebildiği ortaya konulmuştur[Antony vd., 2014].

Zeng vd., 2014 çalışmalarında iş yükünü azaltıcı bir dinamik ağ metodu algoritması uygulamıştır. İletim, özgül ısı, yoğunluk değerleri doğrudan literatürden alınmıştır. İlk gözeneklilik yine literatürden 0.602 olarak alınmıştır. Absorbtivite de literatürden 0.36 alınmıştır. Çalışmada ağ eleman sayısı için hassaslık analizi yapılarak maksimum sıcaklık yakınsamasının sabitlendiği alandaki eleman sayısı (16x16) alınmıştır. Şekil 2.17'de ilgili sonuçlar görülmektedir.



Şekil 2.17. Zeng vd.'nin ağ eleman sayısı hassaslık analizi sonuçları [Zeng vd., 2014]

1 mm³ toz yatağında 100 um ışın gezdirilmiştir. Deneysel kısımda 100 um mesafeli tek tarama çizgileri imal edilmiştir. EOS M270'te Ti6Al4V tozu ile imal edilen 10 mm³ numunelerin yüzeyleri ergiyik havuz kalınlığı için incelenmiştir[Zeng vd., 2014].

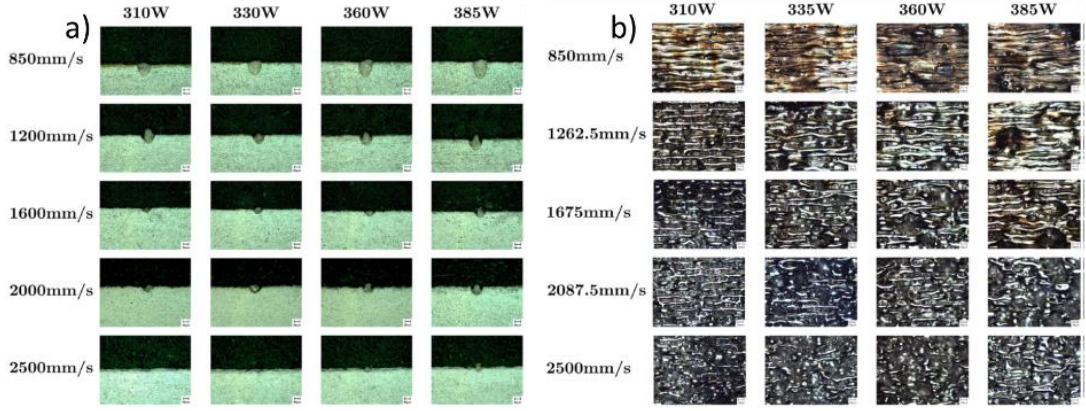
Romano vd. 2015 tarihli çalışmalarında literatürden mikroskobik ısı iletimi dikkate alınmıştır. Çalışmada $h_{taş}$ ihmal edilmiştir. Ansys APDL hacimsel özgül entalpi istediğinden bulunan sıcaklık bağımlı özgül ısılar bu terime çevrilmiştir. Modelde toz katmanı katı katmanı ve AISI 4130 çeliği tabla oluşturulmuştur. Toz boyutları 5x2.5x0.1 mm iken katı ve tabla için kalınlık 1 mm alınmıştır. Lazer gücü, hızı, ışın çapı, nüfuziyet derinliği sabit alınmıştır. Aynı parametrelerde bu 3 malzemenin sıcaklık dağılımı ve ergiyik havuz ölçüsü kıyaslanmıştır. En iyi ölçüler için parametrelerin bu 3 malzemede ne olması gerektiği belirlenmiştir.

Huang vd.'nin 2016'da yaptığı bir diğer benzetim çalışmasında Ti6Al4V tozu için FEA analizi sonucunda sıcaklık dağılımı ve ergiyik havuzu ölçü tahmini ortaya konulmuştur. Deneysel kısımda ise, Kolosov vd., 2004 ve Fischer vd., 2004 çalışmalarının sonuçlarıyla kıyaslama yapılmış ve hacimsel büzülme etkilerinin dikkate alınmasının önemli olmadığını ortaya koymuşlardır.

Faroozmehr vd. yaptıkları çalışmada optik nüfuziyet derinliğinin etkisini incelemiştir. Bu amaçla kurulan modelde hareketli ısı kaynağının geçtiği düşüm ergime noktasını aşınca tozdan katı özelliklerine sahip olmaktadır. Bu kriter solidüs sıcaklığı ile yapılmıştır. Tek bir ışın maruziyetinde 64 element (8x8) etkilenmektedir. İlgilenilen alan ise toz katmanı ve tabla olmak üzere toz katmanı 66 μm 'luk Solid70 elementlerle ince ağ yapısında tabla ise kaba ağ yapısındadır. Toplam alan ise 7x4x1 mm iken katman alanı 2.115x5.28mm alınmıştır. Taşınım katsayısı literatürden $h=10 \text{ W/mK}$ alınmakta, buharlaşma ve Marangoni etkisi de ihmal edilmektedir. 6 tarama çizgisi ve güç hız değerleriyle deneylerden sonra 3. çizgiden sonra ergiyik havuzunun kararlılaştığı, optik nüfuziyet derinliğinin deneysel çalışmalarla eniyilendiği ve böylece modelin doğru tahminlerinin sağlandığı ortaya konulmuştur. [*Faroozmehr vd., 2016*].

Teng vd., 2016 ve 2017'deki çalışmalarında 3DSIM programı ile Ti6Al4V malzeme için EOS cihazında, CoCr malzeme için SLM cihazında imalatla doğrulanan bir model geliştirmiştir. Ti için 30 μm , CoCr için 50 μm 'luk 3 katman, 1'er mm uzunlukta 0.1 mm mesafeli çizgilerle, 4. Katman 2 mm uzunlukta modellenmiştir. Işın çapı, spektrumun 4 katı olarak literatürden 70 μm alınmıştır. Toz ve katı

iletkenliği, yoğunluk ve özgül ısı yanında, likidüs sıcaklığının da büyük bir etkisi olduğu anlaşılmıştır [Teng vd. 2016; Teng vd. 2017].



Şekil 2.18. a) Farklı parametrelerle imal edilen çizgiler vb.) tam orta kesitleri [Teng vd., 2017]

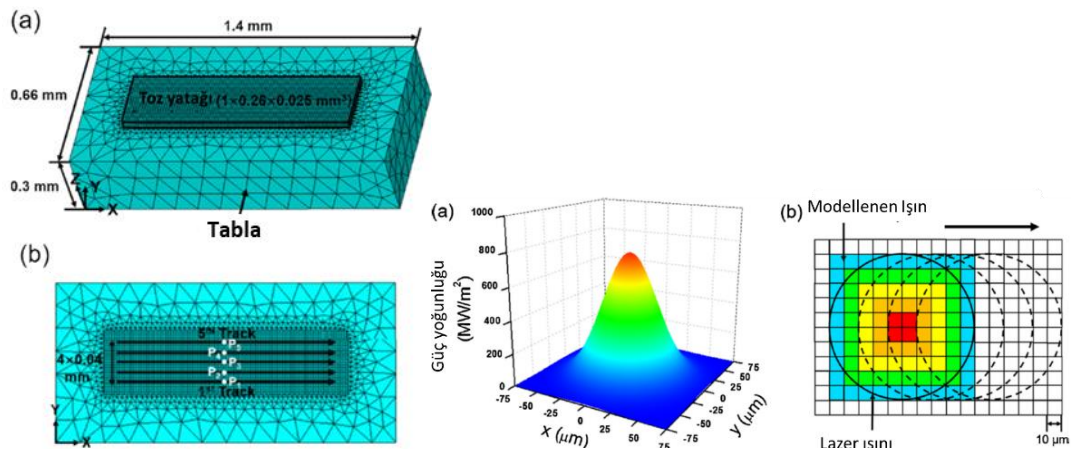
Yang ve Ayaş'ın çalışmalarında ise lazer ışını nokta, yüzey ve hacimsel kaynak olarak değerlendirilerek bu 3 yaklaşım kıyaslanmıştır. Yüzey ısı kaynağında nüfuziyet derinliği, nokta ısı kaynağında lazer ışın çapı ihmal edilmektedir. Bu çalışmada sonuçta nüfuziyet derinliği 100 μm 'dan küçük ve ışın çapı 35 μm 'dan küçük iken nokta ısı kaynağı kullanımının daha doğru sonuçlar verebileceği ifade edilmiştir [Yang ve Ayaş, 2017].

Li vd., 2017 çalışmalarında 1x1.4x0.35 mm tabla ve 1x1.4x0.05 mm toz yatağı modelleyerek 3 boyutlu 304 çeliği için benzetim ve deneysel imalat ile nüfuziyet derinliği ve iletim katsayısı ayarlarını yapmışlardır. Ergime noktası üstündeki iletkenlik ergiyik havuzu deneysel-analiz tutarlılığını sağlayan katı iletkenliğinin 10 katı alınmıştır. İletim modellerinde ergiyik taşınımı etkisi nedeniyle böyle bir seçimin uygunluğu literatürde ortaya konulmuştur. Son olarak faz değişimi için entalpi denklemi uygulanmıştır. Benzetimin doğrulanması amacıyla 5'er güç, hız ve mesafe seçilerek 125 adet 5x5x10 mm boyutlarında numune imalatı gerçekleştirilmiş ve dentritik yapı tahminleri yapıldığı belirtilmiştir. Bunun yanında ergiyik havuz ölçülerini parametrelerin etkileme türü grafikler halinde verilmiştir [Li vd., 2017].

Conti vd., 2018 yılındaki çalışmalarında, termomekanik model, malzeme özelliği hassasiyet analizi ve parametre etkileri olarak 3 aşamalı bir modelleme yürütmüştür. Bu çalışmada toz ve katı absorbtansı sabit, termal özellikler kısmen sıcaklıkla lineer, toz özellikleri gözenekle lineer bağlı, AISI316L malzeme ve gizli ısı için özgül ısıda aşırı bir artış varsayılmıştır. (Hussein vd. 2013'teki gibi) Fourier iletim denkleminin yanısıra Gaussian ısı akısı denklemi kullanılmıştır.

He ve Zhao 2018 yılındaki çalışmalarında 316L tozu üzerine modelleme ve mikro yapı korelasyonu yürütmüştür. Git gel ve ada taramalarla, ergiyik boyutları ve sıcaklık alanları üzerine çoklu çizgi ve çoklu katman deney sonuçları ve modeli kıyaslanmıştır. Sıcaklık bağımlı değerler tanımlanarak 5 çizgiden oluşan 5 katman modellenmiştir. Özgül ısı gizli ısı ile birlikte hesaba katılmaktadır. Analizlerle çizgiler üzerinde işaretli 5 noktanın sıcaklık alanları grafikleştirilmiştir. Model boyutu 10x3x0.1 mm olmuştur [He ve Zhao, 2018].

Luo vd., 2018 tarihli çalışmalarında birleştirilmiş termomekanik bir model SnTe malzeme için ortaya koymuştur. Toz yatağı sürekli homojen ortam ve küresel üniform, tozlardan temas deformasyonsuz, geri tepme basıncı ve akış ihmal edilerek varsayılmıştır. Ansys APDL 'de 1x0.26x0.025 mm toz yatağı ve 1x0.66x0.3 mm tabla; yatak için 8 düğümlü hekzahedral 0.01x0.01x0.0125 mm elemanlarla, tabla için tetrahedral kaba elemanlarla modellenmiştir. Şekil 2.19'da model görülmektedir.



Şekil 2.19. Model: sol) ağ atanmış model sağ) lazer ısıyı ağ elemanı kıyası [Luo vd., 2018]

Soylemez E.'nin 2018 yılındaki çalışmasında da Goldak'ın ortaya koyduğu çift elipsoid ısı kaynağı temelinde (c parametresi 24 farklı güç-hız kombinasyonları sonucunda toz olmayan durum için denenerek bulunmuştur ve güç yoğunluğu ışının ön ve arkasında literatürden 0.3 ve 0.7 alınarak, anahtar deliği şeklinin oluşumu hem tabla ergitme ve kesit alanlara bakma hem toz ergitme ve kesit alanlara bakma ile sağlanmıştır. Netfabb ile uygulanan benzetimde ergiyik boyutları ve anahtar deliği şekli tahminleri doğrulanmıştır. Kullanılan model elipsoid Goldak modelidir ve hareketli halde uygulanmıştır. Deneysel tarafta EOSM290 ile Ti6Al4V toz için 132 mm boyda 55 kalınlıklı tabla üzerine toz var ve toz yok durumları için 7 farklı güç ve 9 farklı hız için 44 tek çizgi 40 mm uzunluğunda yapılmıştır. Benzetimdeki model ise 4.2x3.9x4 mm ayarlanarak katman kalınlığı 30 um olarak toz serilmiştir. Ergiyik havuzu derinlik/genişlik oranı ≥ 1.2 için anahtar deliği riski olduğu bu oranın ≤ 0.5 olması gerektiği ortaya konulmuştur[*Soylemez E., 2018*].

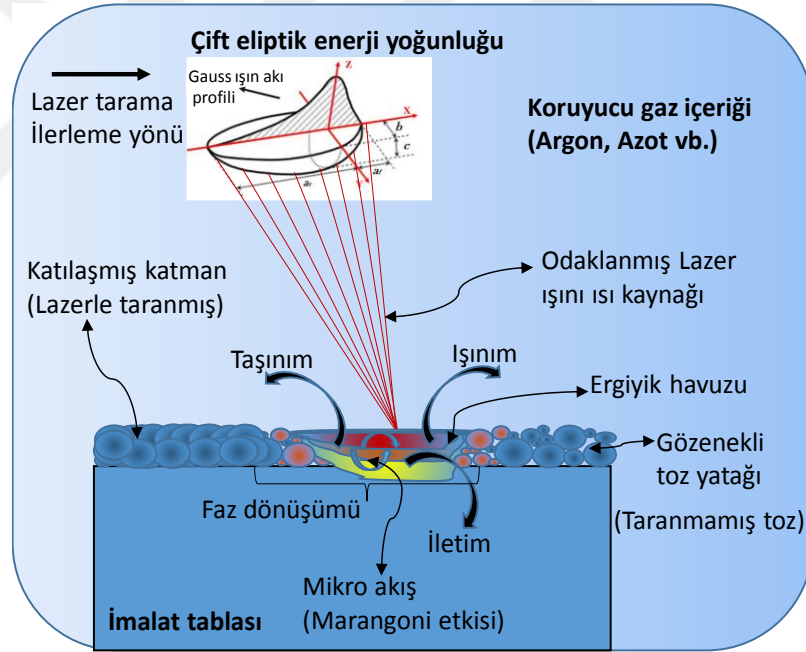
Hajializadeh ve Ince 2018 yılındaki çalışmalarında ısı alanlar ve kalıntı gerilmeleri modellemiştir. ABAQUS/STANDARD arayüzünde, sıcaklık bağımlı özellikler UMATHT alt programına tanıtılmış ve yalnızca ilgili elemanların aktifleştirilmesi için ısı kaynağı ile temaslı veya kaynağın üzerinden geçtiği elemanların iletimi=0 tanımlanarak birleşik element aktivasyonu sağlanmıştır. Işın kaynağı olarak DFLUX alt programında Goldak çift elipsoid Denklem 2.27'deki gibi tanımlanmıştır. Işınım ihmal ve taşınım katsayı 10 alınmıştır. Özgül ısı, iletim, ısıl genleşme, akma, elastisite sıcaklık bağımlı değerleri literatürden alınmıştır[*Hajializadeh ve Ince, 2018*].

Literatüre uygun olarak tez planı da aşamalar halinde Şekil 2.20-21'deki gibi planlanmıştır.

3. METAL LAZER ERGİTMEDE ISI TRANSFERİ VE MATEMATİK MODELLEME

Tez çalışmasının bu bölümünde metal lazer ergitme yöntemiyle imalat sırasında oluşan sıcaklık dağılımının ve lazer ışınının ergime sağladığı alanda oluşan metal ergiyik havuzu boyutlarının tahmini için kurulacak sonlu elemanlar modeli ve ısı transferi ilişkileri matematiksel olarak açıklanmaktadır.

Metal lazer ergitme sürecinde lazer güç kaynağı ve optik elemanlara bağlı olarak 40-400 um aralığında çapa sahip bir ışın, düz bir yüzeye serilmiş metal tozu üzerinde yakarak gezinmektedir. Lazer ışınının sahip olduğu enerji toz metal üzerinde ısı tesirine dönüşmektedir. Böylece doğada bilinen 3 farklı ısı transferi mekanizması ile ışın enerjisi ısı enerjisine dönüşmektedir. Şekil 3.1’de bu dönüşüm açıkça verilmiştir.



Şekil 3.1. Metal lazer ergitme sırasında lazer enerjisi ısı enerjisine dönüşümü ve ısı transferi mekanizmaları

Şekil 3.1’de görüldüğü üzere belirli bir matematiksel modelle ifade edilebilen lazer ışını, düz tabla yüzeyine serilmiş ve belli bir katman kalınlığında olan toz yatağı üzerinde dolaşırken enerjisi

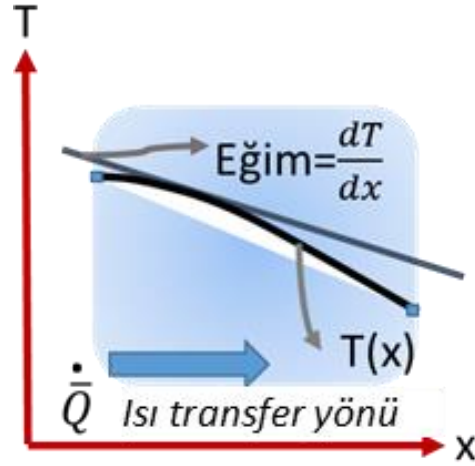
- Tabla ve çevre toz taneleriyle iletim,

- Ortam akışkanı ile doğal taşınım ve ergimiş havuz içerisindeki mikro ölçekli akışlardan kaynaklanan zorlanmış taşınım
- Çevre ortam ile olan ışınlım

mekanizmalarıyla ısı haline dönüşmektedir. Bu dönüşüm sırasında lazer ışını etkili olduğu zaman müddetince toz yatağında tamamen sıvı fazda olan ergimiş bir havuz oluşturmakta, ışın taramaya devam ederek ilerlediğinde bu sıvı havuz çok hızlı bir soğuma oranı ile katılaşmaktadır. İşte bu anda toz yatağının toz halden sıvı ve bu kez tam dolu katı olarak yaşadığı faz dönüşümünün de ısı transferinde etkisi mevcuttur. Çünkü faz dönüşümü sırasında her faza ait entalpi değeri farklı olduğu için bir entalpi farkı meydana gelmekte, buna sebep olan ise bu esnada enerji olarak ortaya çıkan gizli ısı değeri olmaktadır. Şekil 3.1’de faz dönüşümü ile kastedilen budur. Tüm bu bahsedilen ısı transferi durumları tek tek matematiksel olarak incelenecektir.

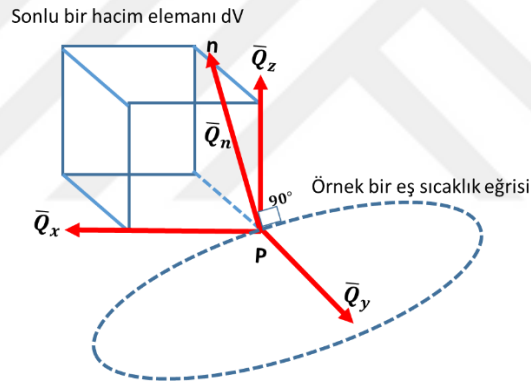
3.1. Zamana ve Konuma bağlı Isı Transferi

Lazer ergitme sırasında toz yatağı ve çevresiyle oluşan ısı transferinde literatürde de detaylandırıldığı üzere en önemli mekanizma iletim mekanizmasıdır. Gerek katılaşan tozlarla, gerek tabla ile bir iletim yoluyla ısı transferi mevcuttur. Taşınım ve ışınlım ile ısı transferi ise çok daha az etkili bulunmaktadır. Şekil 3.2’ye de ısı transferi sırasında bir eleman içindeki 2 nokta arasındaki sıcaklık ilişkisi temel olarak görülmektedir. Görüldüğü üzere ısı azalan sıcaklık yönünde iletilmekteyken zamanla değişen sıcaklık eğrisinin eğimi sıcaklık gradyanını oluşturmaktadır. Bu noktada ise ısı transferinin kapalı bir hacimde daha net anlatılabilmesi için birim alan başına ısı transfer miktarı ısı akısı olarak ifade edilmektedir.



Şekil 3.2. 2 Nokta arasındaki ısı transferi

Şekil 3.3 incelendiğinde 3 boyutta bir eleman üzerinden ısı transferinin nasıl gerçekleştiği görülebilecektir.



Şekil 3.3. Isı transferi vektörleri

Şekil 3.2'ye bakarak yüzeye her zaman dik olarak gerçekleşecek ısı transferi için Fourier ısı iletimi kanunu gereği bir eleman içerisindeki iletimle ısı transferi miktarı ve ısı akısı;

$$Q = -kA \frac{\partial T}{\partial n} \quad , \quad \dot{q} = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3.1)$$

Q yüzeye dik ısı iletim miktarı ve $\dot{q}$ ısı akısı iken, k ısı iletim katsayısı, A ısı transferine dik yüzey alanı, $\frac{\partial T}{\partial n}$ terimi ise konuma bağlı değişen sıcaklık

gradyanıdır. Şekil 3.3'te görüldüğü üzere ısı iletimi söz konusu iken $\frac{\partial T}{\partial n}$ ifadesi 3 kartezyen koordinat eksenine bileşenine sahip olarak ayrılabilir.

Tüm bu sürecin ısı transferi bakımından matematiksel ifadesi için Termodinamiğin birinci yasası ile yani enerjinin korunumu, ve lazer enerjisinin dengesi ile başlanabilir [Çengel ve Boles, 2010; Roberts vd., 2009; Parry vd., 2016; Zhao vd., 2017];

$$E_{giren} - E_{çıkan} = \Delta E_{sistem} \quad (3.2)$$

$$\bar{Q}_{La} = \bar{Q}_{il} + \bar{Q}_{ta} + \bar{Q}_{ış} \quad , \quad \bar{q}_{La} = \bar{q}_{il} + \bar{q}_{ta} + \bar{q}_{ış} \quad (3.2-1)$$

Lazer ışını tarafından oluşturulan ısı vektörü $\bar{Q}_{La}$ veya ısı akısı vektörü $\bar{q}_{La}$ toz yatağında depolanarak, iletim, taşınım ve ışıyım yoluyla transfer edilmektedir. Böylece $\bar{q}_{La}$ birim hacim başına ısı üretimi olarak değerlendirilebilecektir. Burada lazer ergitme toz yatağı bir kontrol hacmi olarak alınabilir ve bu kontrol hacmine sürekli bir ısı yüklemesi yapıldığı ve bu ısının transferinin gerçekleştiği, ayrıca katılaşmanın ve ısı transferinin yani entalpi değişiminin olduğu göz önüne alındığında bu denge denklemi toz yatağının her konumunda farklı sıcaklık dağılımlarını farklı zaman anlarında temsil edebilmek için depolanan enerjinin 3 boyutlu ifadesi olarak Fourier'in iletim kanununun boyutlu ifadesine yüzeysel ışıyım ve taşınım etkilerinin eklenmiş hali olan genel ısı yayılım formülasyonu ile şöyle yazılabilir [Bejan ve Kraus, 2003];

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \nabla(k(T)\nabla T) + \bar{q}_{La} + \bar{q}_{yüzeysel} \quad (3.3)$$

Skaler T sıcaklığının 3 boyutlu sürekli ortamda gradyanı ve yüzeysel ısı transferi teriminin karşılığı da şöyle tanımlıdır;

$$\text{Gradyan } T = \nabla T = \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \quad , \quad \bar{q}_{yüzeysel} = \bar{q}_{taş} + \bar{q}_{ışıl} \quad (3.4)$$

Bununla beraber sistemin entalpisi;

$$H = \int_{T_{ref}}^T \rho_{toz}(T) \cdot C_p(T) \cdot dT \quad (3.5)$$

Böylece Denklem 3.4 ve 3.5 Denklem 3.3'te yerine konulduğunda;

$$\rho(T) \cdot C_p(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = k(T) \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{x^2} + \frac{\partial^2 T}{y^2} + \frac{\partial^2 T}{z^2} \right) + \bar{q}_{La} + \bar{q}_{ta} + \bar{q}_{tş} \quad (3.6)$$

bulunmuştur. Denklem 3.6'ya ulaşırken toz yatağı;

➤ Homojen, sürekli ve izotropik bir ortam olarak varsayılmaktadır.

Denklem 3.6'da entalpide bir değişime yol açan lazer ışın enerjisi, toz yatağı üzerinde depolanan bir ısı enerjisine dönüşmekte ve bu ısı enerjisi x, y ve z kartezyen koordinat sisteminde 3 doğrultuda da iletim mekanizmasıyla transfer olmaktadır. Buna ek olarak denklemin sağ kısmındaki $\bar{q}_{ta}$ ortam akışkanı ile olan taşınım mekanizmasını, $\bar{q}_{tş}$ ışıyım mekanizmasını ifade etmektedir. Denklemde ρ toz yatağı yoğunluğu, C_p toz yatağı özgül ısı, k toz yatağı ısı iletim katsayısı, H toz yatağı entalpisidir (burada entalpide oluşan fark anlamlı olmaktadır). Söz konusu terimlerin tamamı sıcaklığa ve hatta toz yatağı gözenekliliği olan θ terimine bağlıdır. Ayrıca kontrol hacmi içerisinde bir entalpi değişiminden bahsedildiği için sabit basınçta özgül ısı anlamına gelen C_p terimi kullanılmaktadır. Denklem 3.2 aslen Fourier ısı iletim denkleminin taşınım ve ışıyım terimleri eklenmiş halidir[Çengel Y. A., 2010].

3.2. Varsayımlar

Metal lazer ergitme sürecinde malzeme özelliklerinin sıcaklığa, hatta bazılarının gözeneğe de bağlı olması, faz dönüşümü, ergiyik havuzu dinamiği gibi etmenler oluştukları için doğrusal olmayan çok parametrelili birçok fiziksel durum ifade edilmek zorundadır. Bu ifadenin matematiksel karşılığı ise, çok yakınsak sonuçları daha az iş yükü ve daha az karmaşıklıkla verebilecek doğrusallaştırılmış formüllerle sağlanabilmektedir. Bu açıdan bu tez çalışmasında literatür kısmında detaylandırılan çalışmaların varsayımlarından, ısı transferi ve parçacık kinematiği çalışmalarından ve akışkanlar mekaniği/dinamiği ile ilgili bir hesaplama yerine termomekanik bir çalışma hedeflenmesinden yola çıkılarak bazı varsayımlar yapılmıştır[Matsumoto vd., 2002; Dai vd., 2004; Wang vd., 2018; Parry vd., 2016; Roberts, 2012].

- ❖ Toz yatağını oluşturan tüm toz taneleri küreseldir ve birbirleriyle çapı aynıdır. Böylece toz sağlayıcı firmanın verdiği ortalama tane çapı bilgisi kullanılabilir.
- ❖ Toz yatağı sürekli, üst yüzeyi düz ve homojen bir ortam olup serici veya başka bir dış kuvvete maruz değildir, yalnızca yerçekimi kuvveti dikkate alınmaktadır.
- ❖ Tabla ön ısıtma sıcaklığı bu tez çalışmasının deneysel kısmındaki olanaklar göz önüne tutularak 60 °C alınmaktadır. Dolayısıyla tabla ile birleşik ilk katmanın yüzey sıcaklığı da 60 °C'dir.
- ❖ Toz metal, sıvı metal ve katı metal olmak üzere 3 durum dikkate alınacak, tümü için ısıtım ve taşınım katsayılarının sıcaklığa bağlı değerleri ilgili durum için alınacaktır.
- ❖ Buharlaşıma ve ergiyik havuzu içerisinde zorlanmış taşınım yoluyla gerçekleşmesi ihtimali olan ısı transferi ele alınan ısı transferi mekanizmaları yanında zayıf etkili olarak, ısıl iletkenlik ve özgül ısı değerlerinin ergime noktası ve biraz üzerindeki değerleri dikkate alınarak ihmal edilebilmiştir.
- ❖ Toz metalin yoğunluk, gözeneklilik, özgül ısı, absorbtivite, emissivite özellikleri sıcaklıkla değişen katı malzeme özelliklerine bağlı olarak alınmış, ısıl iletkenlik katsayısı ise hem gözenek, hem katı ısıl iletkenlik katsayısına bağlı, sıcaklıkla da değişir halde alınmıştır.
- ❖ Malzeme durumuna dair toz, sıvı ve katı durumlar tanımlanmıştır.
- ❖ Modelleme ve benzetim çalışmasının başından sonuna tüm malzeme özellikleri solidus sıcaklığı ile oda sıcaklığı, solidus ve likidus sıcaklık aralığı ve likidus sıcaklığı üzeri olmak üzere 3 sıcaklık aralığında tanımlanmıştır.
- ❖ Ergiyik havuzu içerisindeki marangoni akımlarından kaynaklandığı bilinen ısı transferinin modellenmesi için model kalibrasyonu amacıyla ilk hedef ergime noktası sonrasındaki iletkenlik öncesi katı iletkenliğinin literatüre dayalı olarak 2.5 katı alınması olacaktır.
- ❖ Ti6Al4V malzeme literatürde daha önce birçok kez kullanılmış olan EOS firmasının ticari olarak cihazlarında kullanılan 20-53 µm aralığında bir tane çapına sahip olan malzemedir. Tane ortalama dağılımı için SEM

fotoğraflama yahut analizine bu yüzden gerek görülmemiştir. Aynı şekilde özgün olarak tasarlanıp imal edilen ve 316L modelinin doğrulanmasında kullanılan lazer ergitme cihazı için de 15-45 µm aralığında tane çapına sahip yine EOS firmasının toz malzemesi kullanılmıştır.

3.3. Lazer Enerji Kaynağı

Lazer enerjisi toz yatağına belirli bir foton enerjisi yüklü olarak gelmekte ve toz yatağı tarafından soğurulmaktadır. Lazer ışınının aslen bir ışıyım mekanizmasıyla toz yatağına etki ettiği düşünöldüğünde şu denkleme uymaktadır:

$$\bar{q}_{la} \cdot \alpha = \bar{q}_{soğurulan} \quad (3.7)$$

α toz yatağının soğurma katsayısı olmak üzere, bu tez çalışması dahilinde Ti6Al4V malzemenin α katsayısını da barındıran 2 ana lazer ışın dağılımı modeli üzerinde durulacaktır. Ayrıca Lazer enerji kaynağı bir nokta ısı kaynağı olarak ele alındığında en anlamlı sonuçlar ortaya çıkmakta olduğundan bu hareketli nokta ısı kaynağı hem zamana hem konuma bağılı olarak toz yatağı üst yüzeyi ile de, küçük bir toz yatağı hacmiyle ilişkili de değeriendirilebilmektedir. Lazer nüfuziyet derinliği, kullanılan ağ eleman boyutundan küçükse ve lazer güçleri düşük seviyelerde ise yüzeyle ilişkili Gaussian konik dağılım kullanılmaktayken, tam tersi durumda yani daha yüksek enerji ve hacimle ilişkili, nüfuziyetin ağ eleman boyutundan büyük olduğu çalışmalarda Goldak çift eliptik modeli kullanılmaktadır [Luo ve Zhao, 2019; Luo ve Zhao, 2018]. Ayrıca Yang ve Ulaş, 35 µm'dan büyük ışın çaplarında ve 100 µm'dan büyük nüfuziyet derinliğinde hacimsel ısı kaynağının çok fark olmasa da daha uygun olduğunu ortaya koymaktadır [Yang ve Ulaş, 2017].

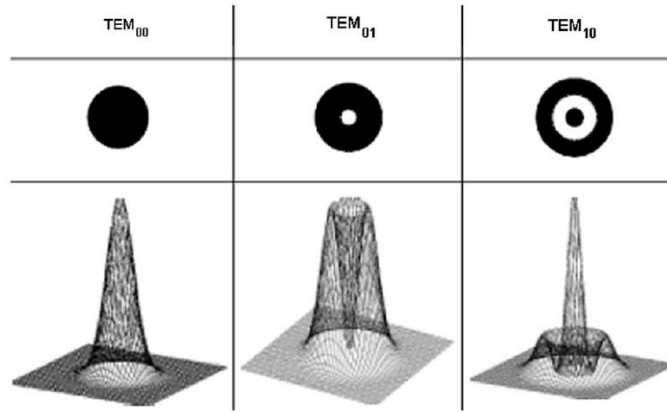
3.3.1. Ti6Al4V ve 316L Malzeme için gaussian konik yüzeyssel ışın dağılımı

Literatür kısmında göröleceğı üzere, lazer güç kaynağının eşlik ettiğı imalat sistemlerinde Şekil 3.4'te verildiğı üzere TEM00 modunda uygulanan ışının metal lazer ergitmede kullanılan NdYAG Fiber lazer kaynağı türünün sahip olduğu 50-

1000 Watt civarlarındaki güçlerde en iyi sonucu verdiği ortaya konulmuştur. Bu sonuçlara ulaşırken ışın akı yoğunluğu bazı çalışmalarda lazer ışın çapı çevresi boyunca, bazı çalışmalarda ise tarama çizgisi boyunca çizgi integrali alınarak ısı akısı cinsinden bulunmaya çalışılmıştır. En genel ve yakınsak uygulama için TEM00 modunda bir Guassian dağılımlı lazer ışınından kaynaklanan skaler ısı akısı[Dai vd., 2004; Patil ve Yadava, 2007; Gusarov vd. 2009; Zhuang vd., 2018];

$$q(r) = \frac{2\alpha P}{\pi r_0^2} \cdot e^{-2\left(\frac{r^2}{r_0^2}\right)} \quad (3.8)$$

olarak seçilmiştir. P lazer gücü, r_0 ısı akısı değerinin ışın merkezindeki e^{-2} katı olduğu yerdeki yarıçap, yani kullanılan ışın yarıçapı, r herhangi bir toz yatağı noktasının ışın merkezine mesafesidir. Bu denklem lazer ışının Gaussian dağılımı esas alınırken ışının merkezinden geçen eksene göre simetrik bir dağılımda, merkezinde ise en yüksek yoğunluğa sahip olduğu varsayımlarına dayanarak ortaya konulmaktadır. Şekil 3.4'te bu varsayımlar görülebilmektedir.



Şekil 3.4. Gaussian dağılımlı aksisimetrik lazer modelleri[Roberts vd., 2009]

Denklem 3.8'de r terimi lazer ışını, belirli bir hızda toz yatağı üzerinde gezdirilirken Kartezyen koordinatlara ve hıza bağlı olarak artan zaman adımları boyunca aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$r^2 = (X - X_0 - V \cdot t)^2 + (Z - Z_0)^2 \quad (3.9)$$

Denklem 3.9'da tek bir çizgi taraması söz konusu olduğunda katman kalınlığı arttıkça lazer ışınının bu çizgi taramayı gerçekleştirmesi mümkün olmaktadır. Çok çizgi tarama gerçekleştirilecek ise X_0, Y_0, Z_0 başlangıç noktası iken Y parametresinin de Denklem 3.9 içinde bulunması veya belirli Y değerleri için bir döngü oluşturulması gerekecektir. Bunun anlamı çok sayıda (4 veya 5) çizgiden oluşacak bir katman taramak için lazer ışınının gezdirilmesi demektir.

Bir diğer terim ise soğurma katsayısıdır (absorbtivite). Bu katsayı literatürden anlaşılacağı üzere lazer ışını dalga boyuna bağlı olarak malzemenin, yani burada toz yatağının ışını soğurabilme, emebilme oranıdır. Araştırmaların çoğu bu katsayıyı örneğin Ti6Al4V malzeme toz yatağı için birbirine yakın bazı değerlerde (0.6-0.8) sabit olarak almaktayken 0.3 değerini katı için kullanan çalışmalar da mevcuttur [Tolochko vd., 2000; Fischer vd., 2003; Romano vd., 2015; Roberts vd., 2009; Teng vd., 2016; Yang vd., 2017; Parry vd., 2016; Zhuang vd., 2018; Ning ve Liang, 2018; Zhao vd., 2017; Akbari vd., 2014; Jiawen Xie, 2017; Zhang vd., 2019].

1 μ m dalga boyunda Katı Ti6Al4V için düz yüzeyde analizler ile 0.39 ve bimodal toz için 0.66, ve ölçüm sonuçlarıyla ise toz için 0.74 bulunmuştur [Boley C., D., vd., 2016]. Bu ölçüm sonuçlarından yola çıkılarak In625 için 500 °C'ye kadar sıcaklıkla çok bir fark olmadığı sunulmuştur.

Aynı çalışmada toz ve katı düz yüzey absorbtiviteeleri arasında Ti alaşımı açısından 1.5-2 kat fark olduğu belirtilmektedir. Gusarov ve Smurov çalışmalarında absorbtivite toz ve katı ilişkisini ortaya koymaktadır [Gusarov ve Smurov, 2010]. Bir başka ilişkili çalışmada 1 μ m dalga boyunda Ti6Al4V toz için de 500 °C'ye kadar 0.70 ortalama değeri elde edilmiştir [Rubenchik vd., 2015; King vd., 2015]. CO₂ Lazer ile 10.6 μ m dalga boyunda, katı için yaklaşık 0.12 sıvı için ışıyım kayıpları dahil iken 0.55, hariç iken 0.4 ortalama olarak bulunmuştur [Keller vd., 2006]. Tolochko vd., 2000 çalışmalarında saf Ti toz için Co₂ lazerle 0.59 ve Nd YAG lazerle 0.77 bulmaktadır [Tolochko vd., 2000]. Yang vd., 2010 yılındaki çalışmalarında katı Ti6Al4V levha için 1400 °C'ye kadar Nd YAG lazerle ortalama 0.34 değerinde absorbtivite hesaplamıştır [Yang vd., 2010]. Bunun yanında AlSi10Mg malzeme için uygulanmış fakat toz metal yatakları için araştırılmış sıcaklığa bağlı soğurma katsayısı denklemlerinden örneğin Denklem

3.8-9'daki Hagen Rubens modeli Nd YAG lazer ve Ti6Al4V malzeme için uygulanabilir değildir çünkü bu model kızılötesi ve mikrodalga boylarından CO₂ lazer gibi oldukça uzak dalga boylarında geçerlidir [Du vd., 2019; Indhu vd., 2018].

$$A_{katı} = 365.15 \left(\frac{\beta}{\lambda}\right)^{0.5} \quad \beta = \begin{cases} 10^{-8}(-1 + 0.0125T), T \leq T_{Ergime} \\ 10^{-8}(10.7 + 0.0145T), T \geq T_{Ergime} \end{cases} \quad (3.10)$$

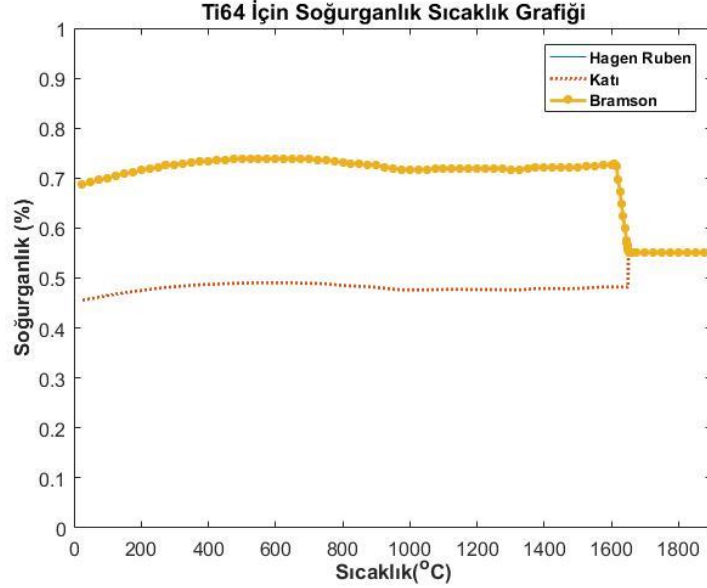
$$A_{toz} = \begin{cases} \frac{1.5A_{katı}, T \leq T_{solidus}}{\frac{(A_{katı}(T_l) - A_{toz}(T_s))}{(T_l - T_s)} \cdot T + \frac{(A_{toz}(T_s) \cdot T_l - A_{katı}(T_l) \cdot T_s)}{(T_l - T_s)}}, T_s < T < T_l \\ A_{katı}, T \geq T_l \end{cases} \quad (3.11)$$

Bunun yanında Bramson İlişkisi oksit katmanı oluşturmeyen ısıtmalar için kullanılabilir olarak verilmiştir;

$$A_{katı} = 0.36515 \left(\frac{\beta}{\lambda}\right)^{0.5} + 0.000667 \left(\frac{\beta}{\lambda}\right) - 0.000006 \left(\frac{\beta}{\lambda}\right)^{1.5} \quad (3.12)$$

Denklem 3.10 ve 3.11'deki $A_{katı}$ terimi katı Ti6Al4V için α katsayısıdır. β elektriksel direnç, λ ise ışın dalga boyudur. Ergime noktasından sonra ise yani sıvı faz için de Boivineau vd., 2006 hacimsel düzeltme göz önüne alındığında elektriksel direncin biraz arttığını, dikkate alınmadığında ise daha meyilli olarak azaldığını ortaya koymuştur. David Bergström 2008 yılında doktora çalışmasında ise Prokhorov vd., 2000 kitabında düşük ergime noktalı metaller için bu noktada bir yukarı sıçrama olarak tekrar lineer artışın devam ettiğini, Tungsten için ise polinom şeklinde bir artışın sürdüğünü belirtmektedir [Boivineau vd., 2006; Bergström, 2008]. Boutalbi vd., çalışmasında da Bramson ilişkisinin Nd YAG lazer için de iyi bir uyum içinde tahminler verdiği görülmüştür. Bu durumda, elektriksel direnç değerleri Belskaya 2012 ve Basak vd., 2003 ve Milosević ve Aleksić, 2012 çalışmasından alınarak Denklem 3.12'deki Bramson ilişkisi kullanımıyla katı absorbtivite değerlerine ulaşılmıştır. Kullanılan direnç değerlerin Ti6Al4V plaka için çok yakın değerleri başka çalışmalarda da belirtilmiştir [Boivineau vd., 2006]. Toz absorbtivite değerlerine ulaşmak için ise Denklem 3.11 kullanılmıştır. Buna göre solidus sıcaklığına kadar toz absorbtivite değerleri King vd., 2015 çalışmasında 500 °C'ye kadar 0.7 ortalama değere uygun düşecek şekilde, katı absorbtivite değerlerinin 1.5 katı olarak varsayılmıştır. Bu

varsayım, literatürde katı ve toz absorbtivite değerleri arasında 1.5-2 kat fark olduğu gerçeğine de uygundur. Ayrıca sıvı absorbtivite değerlerinin katı değerlerinden biraz daha yüksek olduğu çeşitli çalışmalarda bildirilmiştir[*Trapp vd., 2017; Keller vd., 2006; Comins vd., 1972*] Şekil 3.5'te sıcaklığa bağlı absorbtivite oranları çizilmiştir.



Şekil 3.5. Sıcaklığa bağlı soğurganlık değerleri

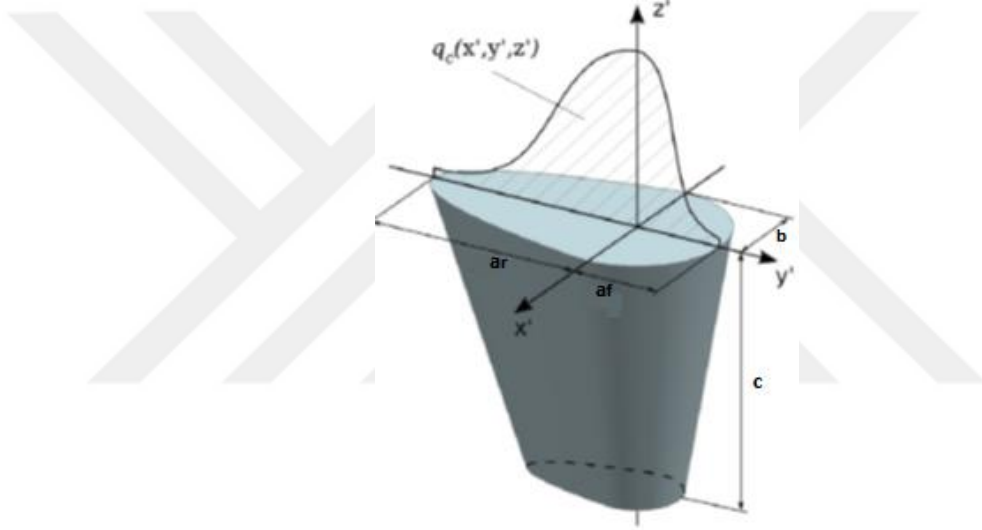
316L toz ve katı absorbtivite değerleri için literatürde birçok çalışmada benzer sabit varsayımlar bulunmuştur. Örneğin, Ketai He vd. emissiviteyi 0.25 ve absorbtiviteyi 0.2 olarak değerlendirmiştir[*Ketai He vd., 2018*]. Liu vd. absorbtiviteyi 0.25 olarak değerlendirirken Dong vd. ve Conti vd. ayrı çalışmalarda 0.3 ve 0.33 değerlerini kullanmıştır. Bunun yanında Faroozmehr vd., absorbtivite değerini nispeten yüksek bir değer olarak 0.52 büyüklüğünde seçmektedir. Tüm araştırmacılar sonuçlarının tahmin değerlerini deneysel değerlere uygun olarak nitelendirmektedir.

Bir yandan Ti6Al4V için Şekil 3.5'te bulunan değerlerin literatürde varsayılan değerler ile benzerliği göz önüne alındığında, diğer taraftan 316L tozu imalatlarının tamamıyla sıfırdan tasarlanan ve imal edilen bir lazer ergitme cihazında yürütüleceği düşünüldüğünde, doğrudan literatürde birbirine çok yakın değerlerden birinin seçilmesinin daha doğru sonuçlar vereceği

düşünülerek, böylelikle toz absorbtivite değeri 0.5 alınarak toz için Ti6Al4V için kullanılan Bramson ilişkisine paralel olarak 1.5 kat daha küçük 0.33 alınmıştır.

3.3.2. Ti6Al4V ve 316L Malzeme için Goldak çift eliptik ışın dağılımı

Toz yatağı üzerinde Gaussian bir dağılımda lakin hacimsel bir ısı akısı etkisi bırakan bir model Goldak vd. tarafından sunulan çift elipsoid Isı Akısı Modelidir[Goldak vd., 1984]. Elipsoid şeklinin bir atkuyruğu izi bıraktığı bu modelde, 3 boyutlu elipsoidin ön ve arka tarafına dair 2 farklı formül bulunmaktadır. Şekil 3.6'da 3 boyutlu çift elipsoid gerekli değişken ölçüleriyle birlikte görülmektedir.



Şekil 3.6. Goldak vd., tarafından ortaya konulan çift etkili elipsoid ışın dağılımı modeli [Lindgren vd., 2016]

Bu modele göre Denklem 3.13 yazılmaktadır:

$$\begin{cases} Q_f(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}\cdot f_f \cdot \eta_{abs} \cdot P}{\pi \cdot \sqrt{\pi} \cdot a_f \cdot b \cdot c} e^{-\left(\frac{3x^2}{a_f^2} + \frac{3y^2}{b^2} + \frac{3z^2}{c^2}\right)} \\ Q_r(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}\cdot f_r \cdot \eta_{abs} \cdot P}{\pi \cdot \sqrt{\pi} \cdot a_r \cdot b \cdot c} e^{-\left(\frac{3x^2}{a_r^2} + \frac{3y^2}{b^2} + \frac{3z^2}{c^2}\right)} \end{cases} \quad (3.13)$$

f_f ve f_r değerleri sırasıyla elipsoidin ön ve arkasında biriken ısı oranlarıdır ve literatürden 0.6 ile 1.4 değerleri uygulanmaktadır. Diğer parametreler ise elipsoidin boyutlarını ilgilendiren koordinat değerleridir. Literatüre göre x ve y

eksenlerinde a_f ve a_r ve b parametreleri 1 alınarak c parametresi ergiyik havuzu derinliğine göre belirlenirken, bazı çalışmalarda bu değerler farklı şekillerde değer alabilmektedir [Denlinger vd., 2014-2016; Malmelöv ve Czelanski, 2018; Soylemez, 2019]. Örneğin Luo ve Zhao a, b ve c 'yi 100, 55, ve 55 μm almıştır [Luo ve Zhao, 2019]. Soylemez 2019 çalışmasında şu denklem Ti6Al4V için oluşturulmuştur;

$$c = 0.5597 + 0.5311P - 0.006504V - 1.506 \times 10^{-5}P^2 - 2.914 \times 10^{-5}PV + 3.90310 \times 10^{-6}V^2 \quad (3.14)$$

Goldak modelini uygulamak için bu tez kapsamında deneysel açıdan güvenilir çok az veri bulunduğu için a_f ve b parametreleri 40 μm olarak lazer ışın yarıçapı değerinde alınmıştır [Hocine vd., 2021]. Literatürde Ti6Al4V malzemeler için en fazla nüfuziyet derinliği olarak belirlenen 65 μm ise c parametresi için seçilmiştir [Zhang vd., 2019]. Akabinde a_r değerinin hesaplanması için ise yukarıda 0.6 ve 1.4 olarak belirlenen ön-arka ısı akısı oranlarından $\frac{f_f}{f_r} = \frac{a_f}{a_r}$ yaklaşımıyla yararlanılmıştır [Goldak vd., 1984].

316L malzeme için de benzer yaklaşım tasarlanıp imal edilen özgün lazer ergitme cihazı ışın çapı parametresine göre şekillenmiştir. Buna göre a_f ve b parametreleri lazer ergitme cihazının teorik ışın yarıçapı olan 75 μm değerinde seçilmiştir. 316L ye dair c parametresi için ise literatürde herhangi bir maksimum nüfuziyet derinliği veya ergiyik havuzu derinliği için sabit bir değer bulunamadığı, yeterli deneysel veri olmadığı için, özgün lazer ergitme cihazıyla yapılan 15 farklı kombinasyonlu yakma denemesi sonrasında verimli sonuçlar veren sonuçlar içinde maksimum nüfuziyet derinliği olarak kararlaştırılan 95 μm değeri kullanılmıştır. 316L malzeme için a_r değerinin bulunması amacıyla Ti6Al4V malzeme ile aynı yöntem ön-arka ısı akısı oranlarından $\frac{f_f}{f_r} = \frac{a_f}{a_r}$ yaklaşımıyla kullanılmıştır.

3.4. Ti6Al4V ve 316L

Lazer metal ergitme yönteminde sıcaklık dağılımını etkileyen en önemli parametreler yoğunluk, (bir diğer anlamda gözeneklilik), ısı kapasite (veya özgül ısı) ve ısı iletim katsayısıdır. Bu parametreler artan sıcaklıkla birlikte farklı değerler almakta, ergime noktasından sonra ise farklı eğilimlerle çokyüksek veya çok düşük değerlerde bulunmaktadır. Bu açıdan bu kısımda yoğunluk, özgül ısı ve iletim katsayılarının sıcaklıkla bağlantıları ortaya konularak bu parametrelere dair modeller sunulacaktır.

3.4.1 Ti6Al4V ve 316L malzeme için teorik yoğunluk ve gözeneklilik

Metal Lazer Ergitme Cihazı yüzeyi düz tabla üzerine serici mekanizma ile toz serdikten sonra toz yatağı oluşmaktadır. Bu toz yatağının ise lazer ışını ergitme işlemi gerçekleşmeden önce sahip olduğu bir gözeneklilik oranı mevcuttur. Bu ilk gözeneklilik oranı, sıcaklık arttıkça, yani çizgiler ve çizgilerden oluşan katmanlar ergitildikçe artan sıcaklıkla beraber farklı değerler almaktadır.

Denklem 3.12’de ise toz taneleri arası gaz yoğunluğunun etkisi de gözeneklilik yine bir başlangıç değerinde sabit alınarak hesaplanmaktadır. Bu iki denklemdeki değerlerin de Ti6Al4V solidus ve likidus sıcaklıkları arasında bulunan ve katı sıvı arasında bir faz başlangıcını barındıran bölge (mushy zone) için özel olarak bir interpolasyonla hesaplanacak değerlerde olması hassasiyeti artıracaktır [Mills vd., 2002; Yin vd., 2012; Du vd., 2019]. Bu nedenle Denklem 3.15’teki tanımlama kullanılmaktadır:

$$\left\{ \begin{aligned} & \rho_{toz}(T) , T_0 \leq T \leq T_s \\ & \left(\frac{\rho_{katı}(T_l) - \rho_{toz}(T_s)}{(T_l - T_s)} \cdot (T - T_s) + \rho_{toz}(T_s) \right) , T_s < T < T_l \\ & \rho_{katı} , T \geq T_l \end{aligned} \right. \quad (3.15)$$

Yang du vd., 2019 çalışmalarında ise hem yoğunluk hem iletkenlik için şöyle bir tanımlama kullanmıştır:

$$\rho_{toz} = \begin{cases} \rho_{toz}(T) , & T_0 \leq T \leq T_s \\ \frac{\rho_{katı}(T_l) - \rho_{toz}(T_s)}{(T_l - T_s)} \cdot T + \frac{(\rho_{toz}(T_s) \cdot T_l - \rho_{katı}(T_l) \cdot T_s)}{(T_l - T_s)} , & T_s < T < T_l \\ \rho_{katı} , & T \geq T_l \end{cases} \quad (3.16)$$

Denklem 3.15 ve 3.16 solidus ve likidus arasında basit bir interpolasyon yöntemi uygulamasıdır ve ikisi de aynı sonuçları üretmektedir. Gözeneklilikler ise bu noktada bulunan toz yoğunluk değerleri ve sıcaklık bağımlı katı yoğunluk değerleri formülde girilerek çekilebilmektedir.

Şimdi ise gözeneklilik ve yoğunlukların bulunmasına dair ilk olarak gözeneklilik miktarı ve buna bağlı toz yatağı yoğunluğu şöyle ifade edilebilir[Zhuang vd., 2018];

$$\rho_{toz}(T) = \phi \rho_{katı}(T) - \rho_{katı}(T) \quad (3.17)$$

ϕ % olarak gözeneklilik, $\rho_{katı}$ ve ρ_{toz} ise kg/m^3 olarak katı ve toz yatağı Ti6Al4V yoğunluğudur. Bir diğer yaklaşım toz yatağının hava veya koruyucu gaz karışımından oluştuğunu varsayan yaklaşımdır[Faroozmehr vd, 2016, Bejan ve Kraus ; Mills vd., 2002]:

$$\rho_{toz}(T) = \rho_g(T)\phi + (1 - \phi) \rho_s(T) \quad (3.18)$$

Burada Denklem 3.18-2'nin uygulanması daha doğru olmakla beraber bulunan yoğunluk değerleri Denklem 3.15 veya 3.16'nın Denklem 3.17'ye uygulanmasıyla aynı oluşmaktadır;

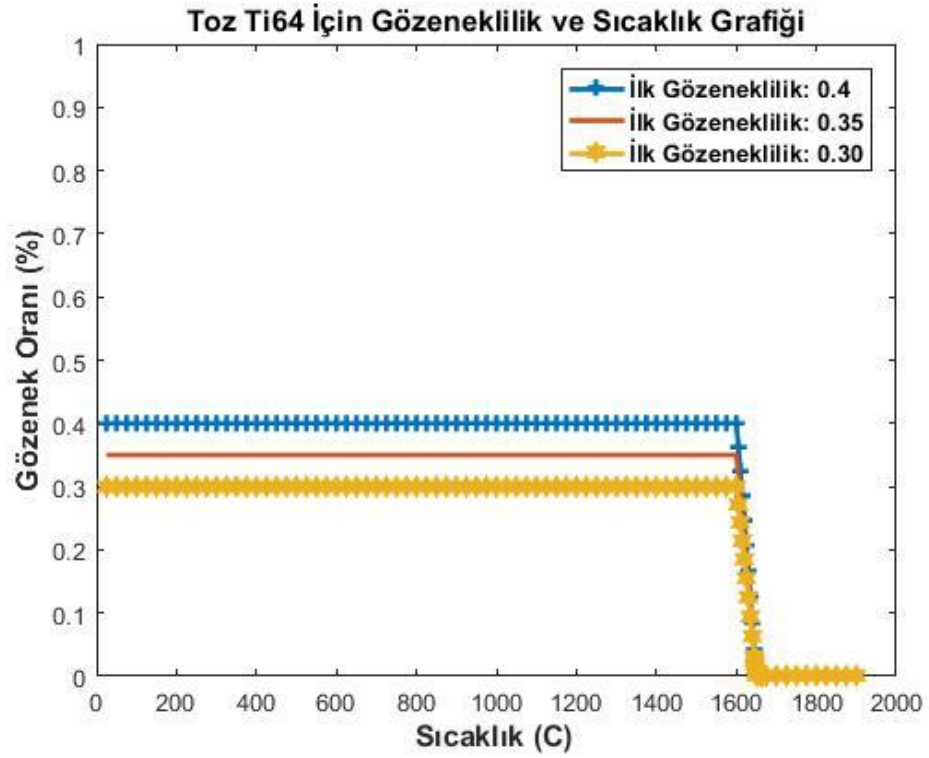
$$\rho_{toz} = \begin{cases} \rho_{toz}(T) , & T_0 \leq T \leq T_s \\ \frac{\rho_{katı}(T_l) - \rho_{toz}(T_s) - \rho_{gaz}(T_s)}{(T_l - T_s)} \cdot (T - T_s) + \rho_{toz}(T_s) + \rho_{gaz}(T_s) , & T_s < T < T_l \\ \rho_{katı} , & T \geq T_l \end{cases} \quad (3.18-2)$$

Denklem 3.17'de başlangıçta serilen toz için bir gözeneklilik miktarı seçilerek bu değerdeki toz yoğunlukları sıcaklıkla değişen katı yoğunluklarına göre bulunmaktadır. Buradaki varsayım katı ve toz yoğunluklarının sıcaklıkla azalması ve gözenekliliğin katı gözeneklilik miktarı olan 0 değerine doğru azalışının önemsiz değerlerde oluşudur.

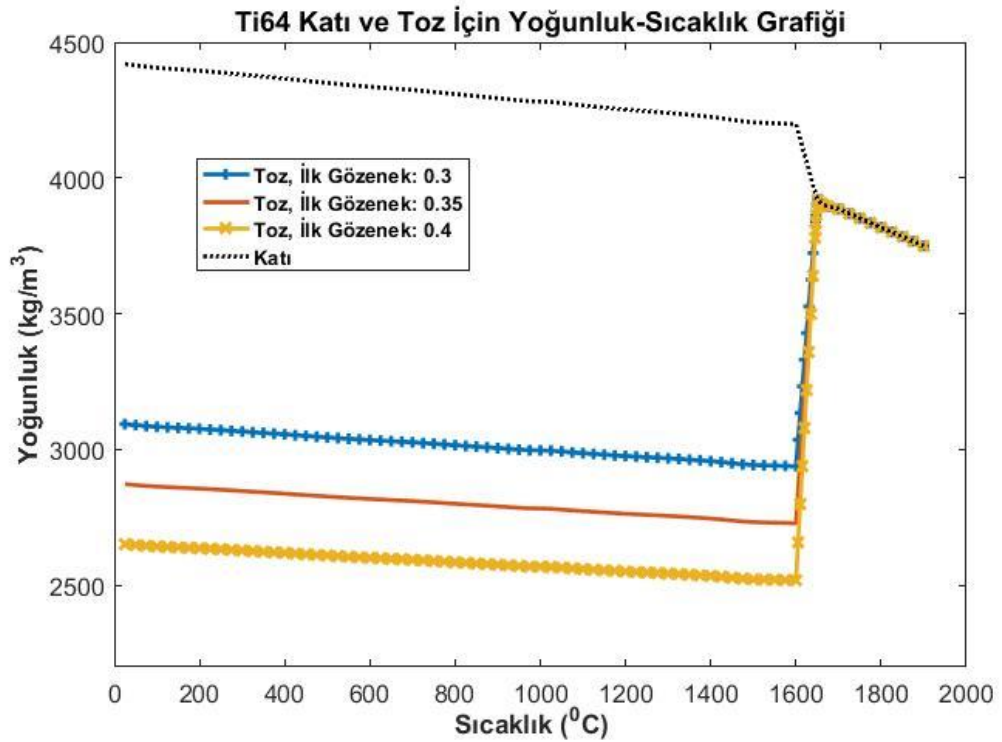
Ergime noktasına kadar sıcaklığa bağımlı katı yoğunluk değerleri literatürden alınarak buna göre toz yoğunluk değerleri bulunarak elde edilmiştir[Mills vd., 2002]. Denklem 3.10 ile bulunacak olan gözeneklilik için değeri için 0.4, 0.35 ve 0.3 gözeneklilik değerleri denenmiştir. Bu değerlere bağlı iletim katsayısı sonuçları farkı toz yoğunluk değerleri farkı oluşmaktadır. Literatürde 0.4 civarı değerler baz alınmaktadır [Huang vd., 2016; Parry vd., 2016; Teng vd., 2016]. Zhuang vd., gözenekliliği 0.646, katı yoğunluğunu ise 4420 kg/m^3 değerinde almaktadır[Zhuang vd., 2018].

Denklem 3.18 ise toz yoğunluğunda koruyucu gaz atmosferinin de kullanıldığı formüldür ve toz yoğunluğu için bu formül sonuçları Denklem 3.17 sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Buna göre Argon yoğunluk değerleri ve iletim katsayısında kullanılmak üzere iletim katsayısı sıcaklık bağımlı değerleri literatürden alınarak grafik haline getirilmiştir. [Engineeringtoolbox, 2020]. Bu grafik de Şekil 3.7’de çizilmiştir.

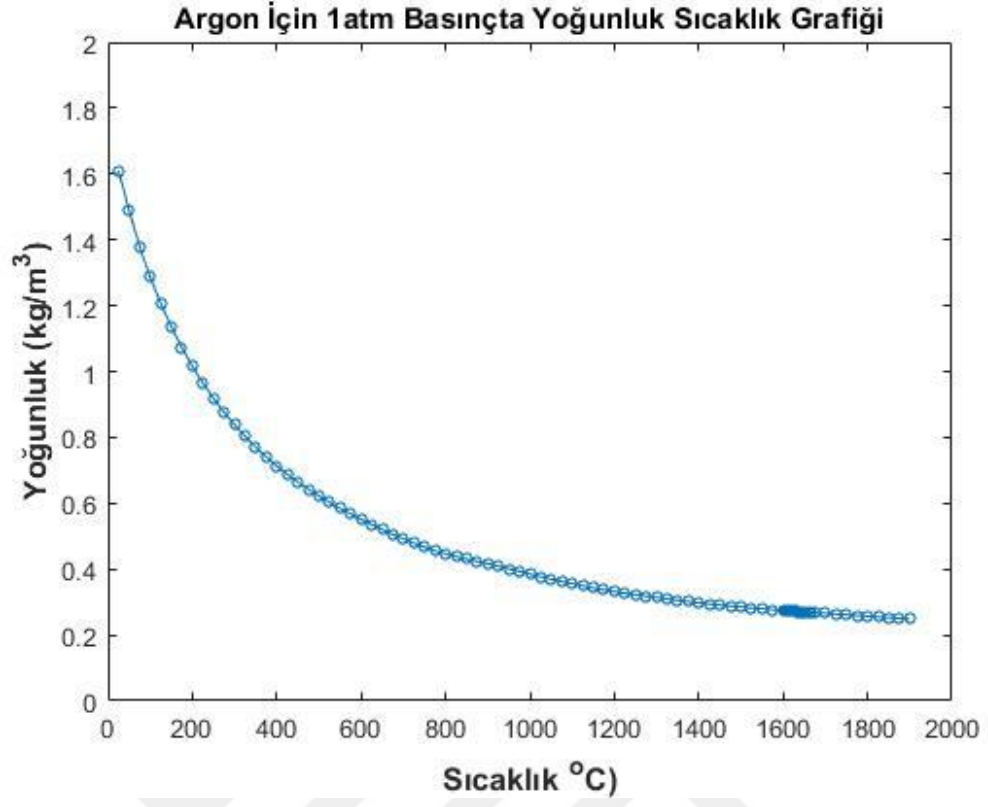
Denklem 3.16 ile benzer tanımlama argonlu formül için de kullanılarak gözeneklilik değerleri çekildiğinde aynı sonuçlar elde edilmiştir. Dolayısıyla Denklem 3.17 ve 3.18 de benzer sonuçları vermektedir. Bunun normal olmasına gösterilebilecek sebep argon yoğunluğunun sıcaklık arttıkça çok küçülmesi ve en başta bile etkisi çok küçükken etkisini yitiriyor olmasıdır. Denklem 3.18 ile bulunan toz yoğunlukları ve ilgili gözenek değerleri 3 farklı başlangıç gözenek değeri için çizilmiştir. Denklem 3.17 ile de benzer toz yoğunluk ve gözenek değerleri 3 farklı başlangıç gözenek değeri için bulunmuş Şekil 3.10’da aradaki ihmal edilen hata çizilmiştir.



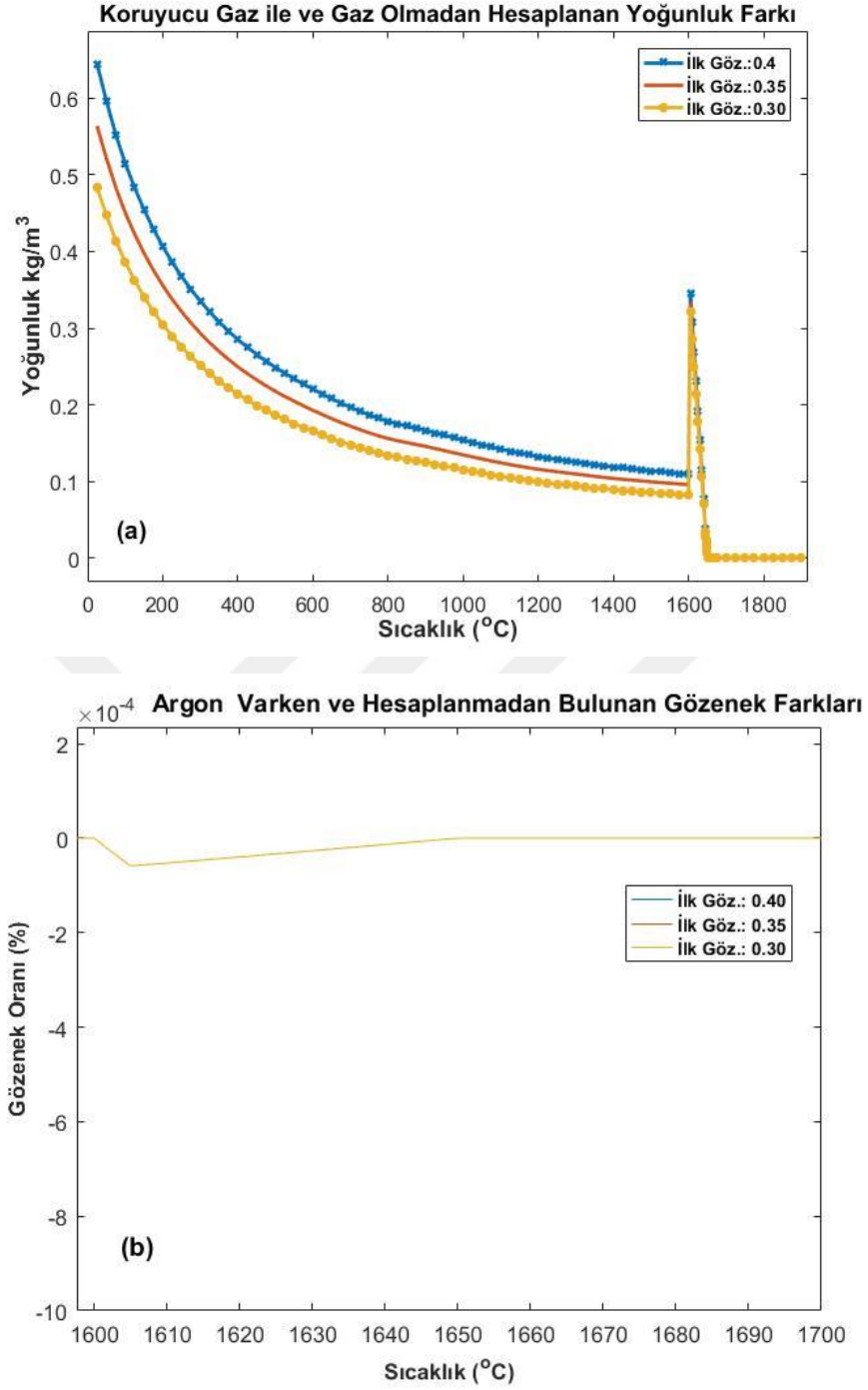
Şekil 3.7. Gözenekliliğin sıcaklığa bağlı değişimi [Denklem 3.18'e Göre]



Şekil 3.8. Yoğunluğun sıcaklığa bağlı değişimi [Denklem 3.18'e Göre]



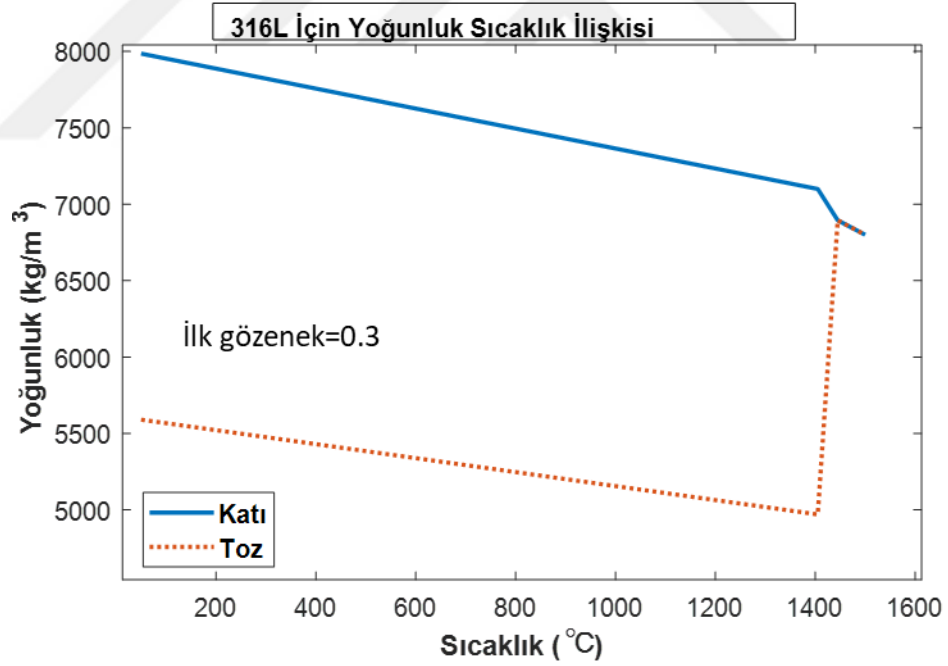
Şekil 3.9. Argon gazının 1 atm basınçta sıcaklığa bağlı yoğunluk değerleri



Şekil 3.10. Denklem 3.18 ve 3.17 arasındaki gözeneklilik ve yoğunluk farkları

Şekil 3.7-3.10 arasında görülen tüm şekillerden anlaşılacağı üzere, değişik ilk gözeneklilik değerlerinde farklı eğriler ortaya çıkmasına rağmen bu 3 farklı yoğunluk değerinin etkisini incelemek için yapılan deneme benzetimleriyle bu küçük yoğunluk farklılıklarının, bir başka deyişle ilk gözenek farklılıklarının benzetim sonuçlarında sıcaklıklar açısından yalnızca minimum 4°C ve

maksimum 17 °C kadar farklılık oluşturduğu, ergiyik havuzu derinlik ve genişlikleri açısından ise 1 µm'dan daha az ölçü farklılıkları oluşturduğu anlaşıldığından ilk gözeneklilik değeri 0.3 olarak seçilmiştir. Diğer yandan Argon değerlerinin Şekil 3.9'daki gibi küçük değerlerdeki değişimleri sonucunda yoğunluk hesaplamalarında bir değişim gözlemlenmediği için Argon değerleri de sıcaklığa bağlı ve sabit ortalama değerde denedikten sonra sabit bir ortalama değerde alınmıştır. Böylelikle benzetim iş yükünün azaltılması da amaçlanmıştır. Diğer taraftan 316L yoğunluk ve başlangıç gözenekliliği değerleri için de denklem 3.15-18 formülleri kullanılmıştır. Literatürdeki çoğu 316L çalışmasında toz yataklı ergitme için ilk gözenekliliğin 0.3 ve 0.4 aralığında seçildiği anlaşılmıştır[Hussein vd., 2013; Faroozmehr vd., 2016; Conti vd., 2018; Dong vd., 2018]. Bu çalışmada da 0.4 değeri seçilmiştir. Ti6Al4V malzeme ile aynı varsayımlarla yalnızca koruyucu gaz olarak azot özellikleri kullanılarak (azot gazı özellikleri ortalama değerde sabit alınarak) Şekil 3.10-2 elde edilmiştir.



Şekil 3.10-2. 316L malzeme toz ve katı sıcaklığa bağlı yoğunluk değerleri

3.4.2 Ti6Al4V ve 316L malzeme için deneysel yoğunluk ve gözeneklilik

Kullanılacak olan EOS Ti6Al4V tozu için DEYMAM bünyesinde Helyum Piknometresi ile yoğunluk ölçümü gerçekleştirilmiştir. 10 cm³ hacimde silindir içine yerleştirilen toz Ti6Al4V hammadde için aşağıdaki değerler elde edilmiştir.

Kalibrasyon numunesi ve cihaz Şekil 3.11’de verilmektedir. Sonuçlar Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

Kullanılan katı yoğunluğu ile bulunan sonuçlar arasında oda sıcaklığı için ortalama 0.02 fark bulunmaktadır. Bu değerin ise ihmal edilebileceği düşünülerek literatürdeki değerler kullanılmıştır. Böylelikle;

- Serme esnasında oluşan sıkışma da %10 ölçüsünde dikkate alınarak,
- Literatürde de benzer değerler yaygın olarak kullanıldığından,
- Farklı gözeneklilik değerlerinin deneme benzetimleri sonucunda maksimum sıcaklıkları 5 °C’den az etkilediği ve yukarıdaki Şekil 3.8 ve 3.10’a bakarak yoğunluk değerlerinde kayda değer bir fark oluşturmadığı gözlemlenerek,

Ti6Al4V malzeme için başlangıç gözeneklilik değeri 0.3 olarak seçilmiştir.



Şekil 3.11. Toz yoğunluk ölçüm cihazı ve kalibrasyon numunesi

Çizelge 3.1. Helyum piknometresi ile Ti6Al4V yoğunluk ölçüm sonuçları

Yoğunluk g/cm ³	Hata	Yoğunluk g/cm ³	Hata	Yoğunluk g/cm ³	Hata
4,3963	0,0003	4,3947	-0,0004	4,3942	0
4,3955	-0,0004	4,3951	0	4,3952	0,001
4,397	0,0011	4,3958	0,0007	4,3944	0,0001
4,3969	0,001	4,3964	0,0013	4,3952	0,001
4,3944	-0,0015	4,3952	0,0001	4,3928	-0,0015
4,3954	-0,0006	4,3946	-0,0005	4,3951	0,0009
4,3974	0,0015	4,3956	0,0005	4,3948	0,0005
4,3966	0,0007	4,3955	0,0004	4,3947	0,0005
4,3959	0,0006	4,3942	-0,0009	4,3935	-0,0007
4,3939	-0,0021	4,3939	-0,0012	4,3922	-0,002
Ortalamalar	4,39593	4,3951		4,39421	Toplam 4,39508

Çizelge 3.2. 316L için He piknometresi ile yoğunluk ölçüm sonuçları

Yoğunluk g/cm ³	Hata	Yoğunluk g/cm ³	Hata	Yoğunluk g/cm ³	Hata
7,8637	-0,0003	7,8634	-0,0001	7,8635	0
7,8648	-0,0002	7,8646	-0,0001	7,8647	0,001
7,8656	-0,0011	7,8645	-0,0005	7,8650	0,0001
7,8678	-0,0023	7,8655	0,0007	7,8662	0,001
7,8646	-0,0015	7,8633	0,0001	7,8638	-0,0015
7,8655	-0,0006	7,8667	-0,0005	7,8660	0,0009
7,8652	0,0015	7,8656	0,0005	7,8653	0,0005
7,8649	0,0007	7,8652	0,0004	7,8650	0,0005
7,8670	0,001	7,8669	-0,0009	7,8669	-0,0007
7,8698	-0,0021	7,8687	-0,0012	7,8690	-0,002
Ortalamalar	7,8615	7,8642		7,8648	Toplam 7,8635

3.4.3. Ti6Al4V ve 316L Malzeme için iletim katsayısı

Metal toz yatağının iletim katsayısının belirlenmesi dair literatürde farklı yaklaşımlar yani farklı formüller mevcuttur. Her şeyden önce yaklaşık ısıl gradyanlar tahmin edebilmek için, toz tanelerinin arasındaki mikro ölçekli iletim, taşınım ve ışıma etkileri, bu aralardaki boşluklarda bulunan gazı dikkate alarak hesaplanmalıdır. Bu açıdan literatürdeki farklı yaklaşımlar arasında çoğunlukla uygulanmakta olan ve doğru sonuçları en yaklaşık şekilde verdiği birçok çalışmada ortaya konulan toz iletim modeli uygulanabilir [Moraes ve Czekański, 2018; Dai ve Shaw, 2004; Sih ve Barlow, 2004]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{K_{toz}}{K_f} = 1 - \sqrt{1-\varphi} \left(1 + \varphi \cdot \frac{Kr}{K_f} \right) + \sqrt{1-\varphi} \cdot (1-\Lambda) \left(\frac{2}{1-B \cdot \frac{K_f}{K_s}} \right) \cdot \left(\frac{B}{\left(1 - \frac{K_f}{K_s} \right)^2} \right) \\ \text{serbest akışkan} \quad \text{Temel ısı transferi} \\ \left(1 - \frac{K_f}{K_s} \right) \ln \left(\frac{K_s}{B \cdot K_f} \right) - \frac{B+1}{2} - \frac{B-1}{\left(1 - B \cdot \frac{K_f}{K_s} \right)} + \left(\frac{Kr}{K_f} \right) + \frac{\Lambda K_{temas}}{K_{katı}} \\ \text{Katı teması} \\ B \cong \left(\frac{1.25 (1-\varphi)}{\varphi} \right)^{\frac{10}{9}}, \quad \Lambda = \frac{\Lambda_{temas}}{\Lambda_{kesit}} \\ Kr = \frac{4\varepsilon_{toz} \sigma T^3 X_R}{1-0.132\varepsilon_{toz}}, \quad K_{temas} = \begin{cases} 18\Lambda K_{katı}, & \Lambda < 3 \times 10^{-4} \\ K_{katı}, & \Lambda > 1 \times 10^{-2} \end{cases} \end{array} \right. \quad (3.19)$$

Denklem 3.19’da B küresel toz taneleri için 1 alınmakta Λ temas katsayısı tam temasta=1 temassızlıkta=0 alınmaktadır [Moraes ve Czeknski, 2018]. Böylece Denklem 3.20 oluşmaktadır;

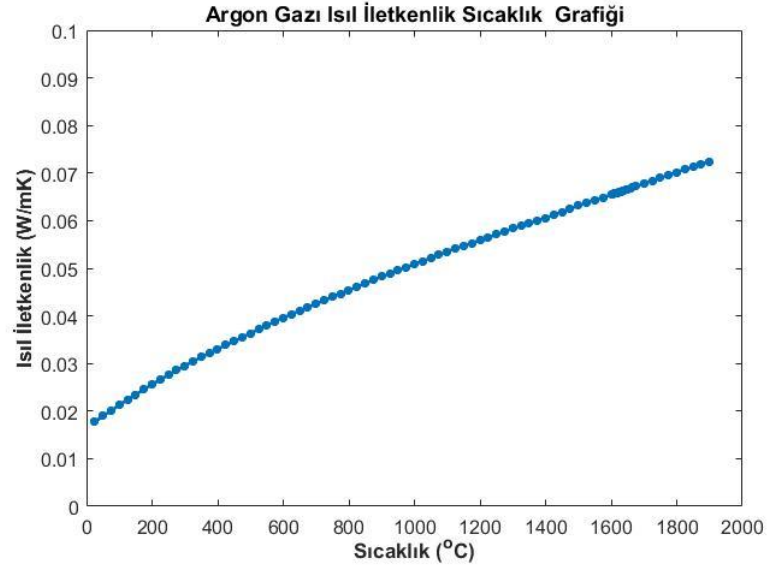
$$\frac{K}{K_f} = 1 - \sqrt{1-\varphi} \left(1 + \varphi \cdot \frac{Kr}{K_f} \right) + \sqrt{1-\varphi} \cdot \left(\frac{2}{1-\frac{K_f}{K_s}} \right) \cdot \left(\frac{1}{1-\frac{K_f}{K_s}} \right) \cdot \left(1 - \frac{K_f}{K_s} \right) \cdot \ln \left(\frac{K_s}{K_f} \right) + \left(\frac{Kr}{K_f} \right)$$

$$Kr = 4 \cdot F \cdot \sigma \cdot (Tp)^3 \cdot Dp \quad (3.20)$$

$$k_{etkin} = \begin{cases} k_{toz} & , \quad T_0 \leq T \leq T_s \\ ((k_{katı}(T_l) - k_{toz}(T_s))/(T_l - T_s)) + k_{toz}(T_s) & , \quad T_s < T < T_l \\ k_{katı} & , \quad T \geq T_l \end{cases} \quad (3.21)$$

Denklem 3.20’de K_f akışkanın iletim katsayısı φ gözenekliliktir. Bu modelde F sayısının deneysel değeriyle ilgili en iyi yaklaşımın 1/3 olarak değil başka bir yöntemle belirlendiği de ortaya konulmaktadır[Sih ve Barlow 2004].

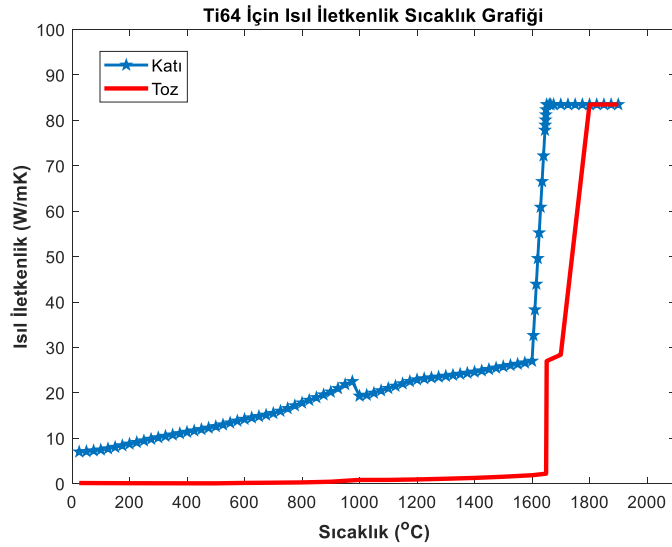
Bu ise Kr değerinin hesaplanabilmesi için yukarıda görüldüğü üzere 3.20’deki tanımlamanın daha doğru sonuçlar verdiği literatürde anlaşılarak kullanılacaktır[Arce vd., 2012; Sih ve Barlow 2004]. Diğer yandan örneğin Zhuang 2018 Ar için K_f değerini 0.0016 olarak vermektedir[Zhuang vd., 2018]. Ayrıca akışkan iletim katsayısı için Argon’un sıcaklık bağımlı iletim katsayı değerleri literatürden alınarak her sıcaklık için yerine konulacaktır[Chen vd., 1975; Hoshino vd., 1986]. Şekil 3.12’de argonun sıcaklığa bağlı iletkenlik değerleri verilmiştir.



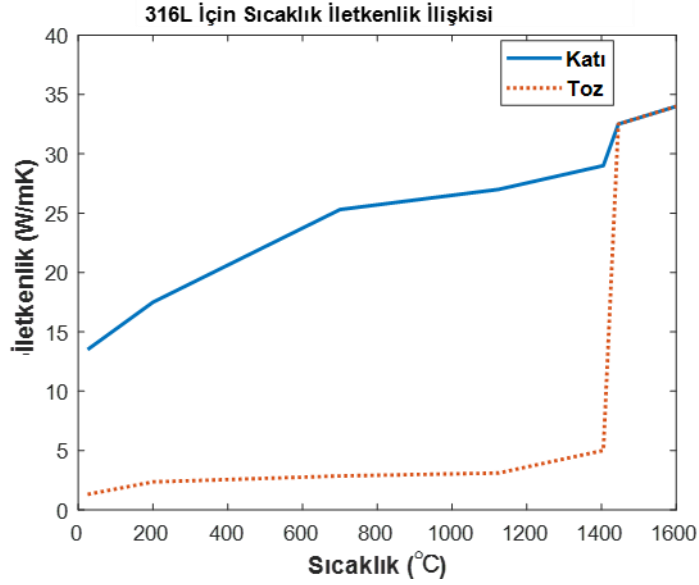
Şekil 3.12. Sıcaklığa bağlı argon ısı iletkenlik değ erleri

Argon yoğunluğ unda oldu ğ u gibi argon ısı iletkenlik değ erinde de benzetim sonuçlarını etkileyici kayda değ er bir değ iş im olmadı ğ ı için ortalama değ erde sabit bir argon ısı iletkenlik değ eri baz alınmı ş tır.

Bu bilgiler ış ığ ında Denklem 3.20 ve 3.21 kullanılarak, baş langıç gözenekliliğ i 0.3 ve buna bağı lı yoğunluklar da 0.3 gözeneklilik oranı seç ilerek, katı ve toz Ti6Al4V malzeme ısı iletkenliğ in sıcaklı ğ a bağı lı değ erleri Ş ekil 3.13'teki gibi ve benzer bir iş lem ile 316L için sonuç Ş ekil 3.13-2'de elde edilmi ş tir.



Ş ekil 3.13. Ti6Al4V katı ve toz iletkenlik değ erleri



Şekil 3.13-2. 316L için katı ve toz iletkenlik değerleri

316L koruyucu gaz atmosferi olarak kullanılan azot iletkenlik değerleri için de argon iletkenlik değerlerine benzer biçimde sabit bir ortalama iletkenlik değeri baz alınmıştır.

3.5. Ti6Al4V ve 316L Malzeme İçin Gizli Isı ve Isıl Kapasite

Toz yatağı üzerinde elektromanyetik ışınlama ile toz yatağına etkiyen lazer ışını etki ettiği bölgede ısı depolamasına yol açmaktadır. Bu depolama ise Denklem 3.3'teki gibi toz yatağı yoğunluğu, özgül ısı ve faz değişiminin olduğu da düşünüldüğünde entalpi değişimi (gizli ısı değeri) parametreleri kullanılarak ifade edilmektedir. Bu amaçlarla toz yatağına ait özgül ısı değerinin ve gizli ısı kaynaklı entalpi değişiminin sıcaklık ve gözeneğe bağlı olarak modellenmesi gerekmektedir. Bu konudaki çalışmaların bazıları özgül ısı değerini sabit almaktadır. Bazı çalışmalar ise katı malzeme özgül ısısından yola çıkarak gözeneğe bağlı orantısal bir toz özgül ısısı hesaplamaktadır. Araştırma sonucunda özgül ısı değerlerinin oda sıcaklığından ergime noktasına kadar literatürde katı ve toz için mevcut olduğu anlaşılmıştır.

Zhao vd., 2017 çalışmasında Boyer vd., 1994 kitabına bağlı olarak Quian vd., 2005 çalışmasında kullanılan ergime noktasına kadar verilmiş sıcaklık bağımlı yoğunluk, iletim ve özgül ısı katı değerlerini kullanmışlardır [Zhao vd., 2017]. Bu

değerlerin sürekli fonksiyon olarak yoğunluk ve gözeneklilikte olduğu gibi ifade edilmesi mümkündür;

$$cp_{toz} = \begin{cases} cp_{toz}(T) , & T_0 \leq T \leq T_s \\ \left(\frac{cp_{kati}(T_l) - cp_{toz}(T_s)}{(T_l - T_s)} \cdot (T - T_s) + cp_{toz}(T_s) \right) , & T_s < T < T_l \\ cp_{kati} , & T \geq T_l \end{cases} \quad (3.22)$$

Bu noktada faz değişiminin başladığı ve bittiği solidus ve likidus sıcaklıkları arasındaki özgül ısı değeri Denklem 3.22 ile hesaplandığında faz değişimi gizli ısı hesapta katılmamış ve bu aralıktaki entalpi değişimi ihmal edilmiş olmaktadır. Tüm bu yaklaşımlar çerçevesinde özgül ısının solidus ve likidus sıcaklıkları arasında gizli ısı etkisiyle oldukça büyük değerlere çıktığı varsayımı uygulanmıştır [Lan li vd., 2017; Safdar vd., 2013; Zhao vd., 2017]. Modellemenin gerçeğe yakın olması için gizli ısının yol açtığı özgül ısıdaki ani artış da hesaplanmalıdır. Bu açıdan Denklem 3.22 Denklem 3.23 halini alır;

$$cp_{toz} = \begin{cases} cp_{toz}(T) , & T_0 \leq T \leq T_s \\ \left(\frac{cp(T_l) - cp(T_s)}{2} + \frac{L}{(T_l - T_s)} \right) , & T_s < T < T_l \\ cp_{sivi} , & T \geq T_l \end{cases} \quad (3.23)$$

Denklem 3.23 ile faz değişimi sırasında oluşan $L=370$ kJ/kg değerindeki gizli ısı hesaba katılmış olmaktadır [Zhao vd., 2017]. Boivenieu vd., 2006 çalışmasında ve Valencia J.J., vd., 2008 çalışmasında ise gizli ısı değeri ölçümlerle ve doğrulanmış teorik veri ile yaklaşık 290 kJ/kg verilmektedir [Boivenieu vd., 2006; Valencia J.J. vd., 2008]. Ayrıca ilgili çalışmalarda solidus ve likidus sıcaklıkları ve bu sıcaklıklardaki özgül ısı değerleri ile oda sıcaklığındaki özgül ısı değeri de bu tez/proje çalışmasında alınan özgül ısı değerleri ile aynıdır, uyumludur. Benzer değerler Jiawen Xie, 2017 çalışmasında da mevcuttur. Aynı çalışmada özgül ısı ve iletim katsayıları da ve yoğunluk da bu tezdekine oldukça yakındır [Jiawen Xie, 2017].

Teng vd., 2016 yılındaki çalışmalarında her bir malzeme ve lazer parametresinin dalgalanan değerlerinin en yüksek sıcaklıkları nasıl etkilediğini araştırmış ve likidus sıcaklığı ile iletkenlik katsayısının etkili olduğunu ortaya koymuştur [Teng

vd., 2016]. Buradan hareketle bu kısımda da 3 farklı likidus sıcaklığı denenecektir. Teng vd., 2017 çalışmalarında ise birçok gizli ısı hesap yöntemi olduğunu ifade ederek şu denklemi uygulamıştır [Teng vd., 2017];

$$c = c_s + \frac{L_f(\{T-T_s\})}{\Delta T_f^2} + \frac{L_v(\{T-T_l\})}{\Delta T_v^2} \quad (3.24)$$

S, f ve v indisleri solidus, ergime ve buharlaşma noktalarıdır. Süslü parantezler ise parantez içi negatifken =0 yapar fakat negatif değilken değerini korur. Matlab arayüzünde sıcaklığın solidus ve likidus arasındaki değerleri için bu tanımlama ayarlanmıştır. Sonuçlara göre de Denklem 3.24'ün daha hassas ve gerçeğe uyumlu değerler verdiği anlaşılarak bu denklem uygulanmıştır. Değerler literatürden elde edilmiştir [Zhuqiang Fan ve Frank liou, 2012]. Toz yoğunluk ve özgül ısı ise gözeneğe bağlı olarak paralel silindir modeli olarak tanımlanan orantı ile bulunmuştur [Zhao vd., 2017]:

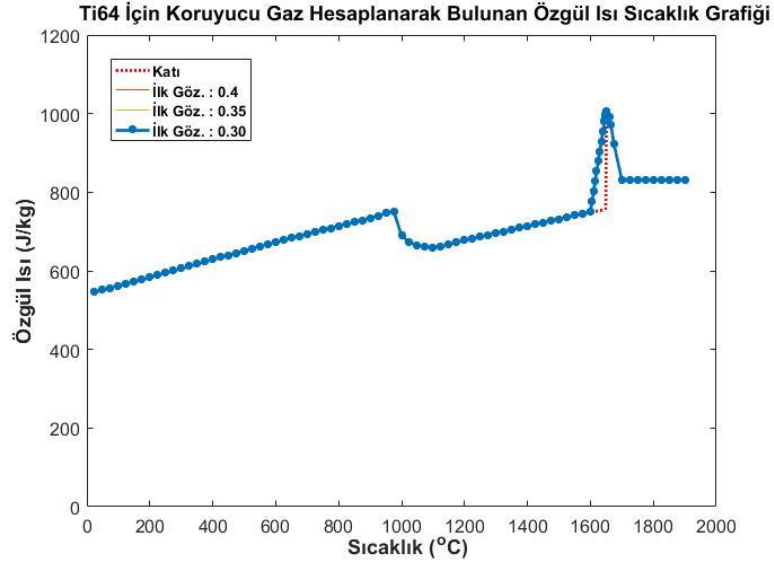
$$C_{toz} = (1 - \varphi)C_{katı} \quad (3.25)$$

Katı ısı kapasitesinden yola çıkılarak Denklem 3.22 ve 3.23/3.24'te uygulanacak toz ısı kapasitesinin hesaplanması için ise Denklem 3.25 veya 3.26 3 farklı başlangıç gözenek değeri için çözülür (Dong vd., 2018 ; Zhao vd., 2017; Faroozmehr vd., 2016; Chuang Luo vd., 2018);

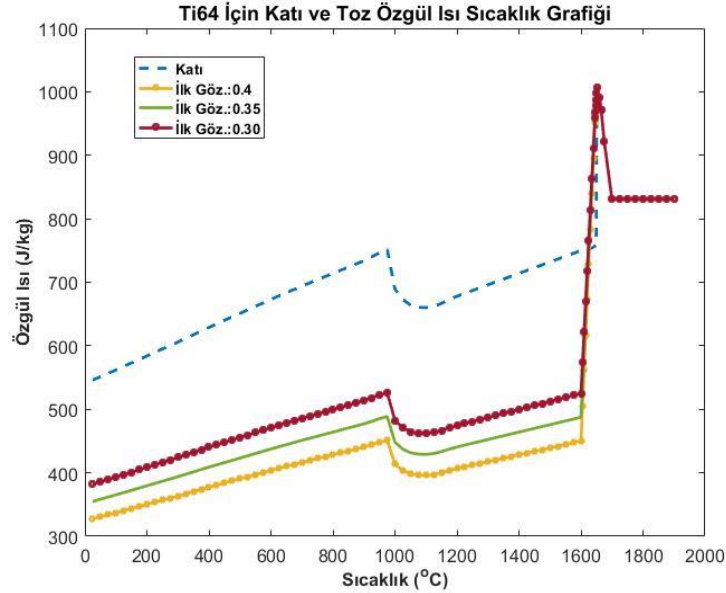
$$C_{toz} = ((1 - \varphi)\rho_{katı}C_{katı} + \varphi \cdot \rho_{gaz}C_{gaz})/\rho_{toz} \quad (3.26)$$

Böylece literatürden alınan veriler sıcaklık aralıkları için ayrı ayrı kullanılarak hem sıcaklığa bağlı toz ve katı özgül ısı değerleri uygulanmakta, hem de faz değişimi gizli ısı göz önüne alınabilmektedir. Denklem 3.25 ile hesaplanan özgül ısı değerleri katı özgül ısı değerlerinden gözenek miktarı azaldıkça artacak şekilde daha düşük sonuçlar vermektedir. Denklem 3.26 ile bulunan sonuçlar ise katı özgül ısı değerleriyle aynı sonuçları vermektedir. Bu durumda Argon özgül ısı değerinin sabit ve oldukça küçük bir değer olduğu göz önüne alınınca (0.00052 J/kgK) ve Denklem 3.26'da hem yoğunlukların hem akışkan özgül ısının etkisi dikkate alındığı için ve literatürde de katı ve toz özgül ısı değerleri çoğunlukla

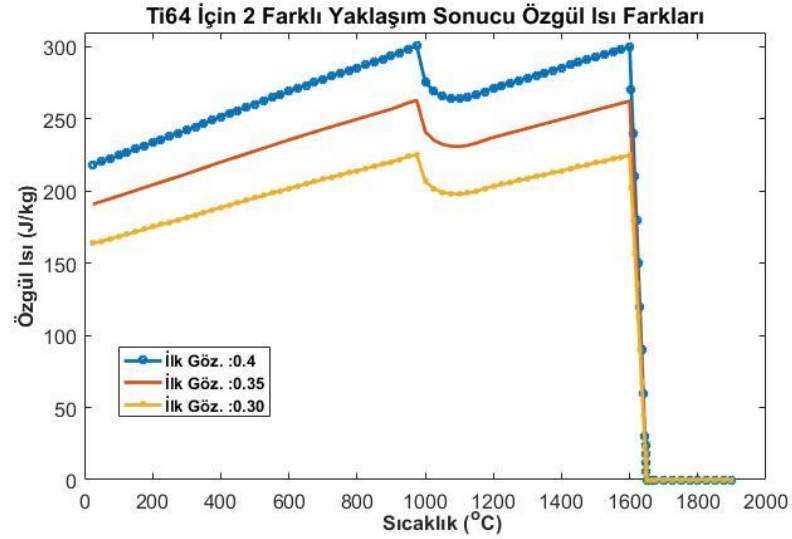
aynı kabul edilebildiği için Denklem 3.26 sonuçları dikkate alınmıştır [Faroozmehr vd., 2016; Teng vd., 2016; www.webbook.nist.gov, 2020]. Gizli ısı için ise Denklem 3.24 dikkate alınarak daha hassas sonuçlar her sıcaklık değerine karşılık elde edilmiş ve çizdirilmiştir. Şekil 3.14-17’de ilgili özgül ısı ve gizli ısı değerleri görülmektedir.



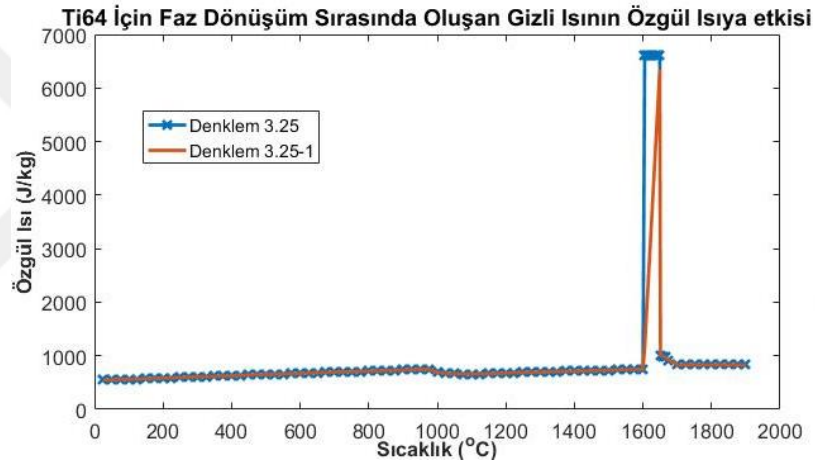
Şekil 3.14. Koruyucu gazın etkin olduğu hesaplanan toz özgül ısı değerleri



Şekil 3.15. Paralel silindir yöntemiyle bulunan özgül ısı değerleri

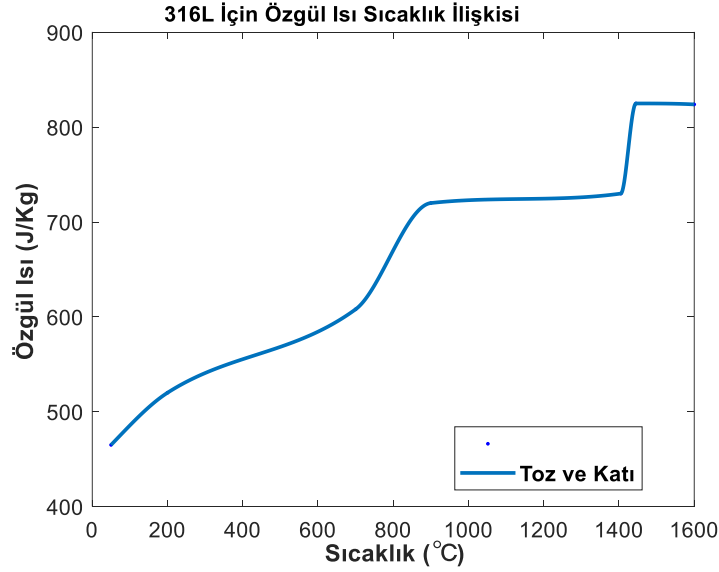


Şekil 3.16. Özgül ısı farklarının değerleri



Şekil 3.17. 2 Farklı gizli ısı kaynaklı özgül ısı hesabının karşılaştırılması

Böylelikle özgül ısılar için de gözenekliliğin kayda değer bir fark oluşturmadığı görülerek, 0.3 gözenekliliğe denk gelen özgül ısı değerleri dikkate alınmıştır. Yine 316L özgül ısı değerlerinin hesaplanması için aynı denklem takımı kullanılmıştır. Şekil 3.14-2’de toz ve katı malzeme için özgül ısı değerleri verilmektedir. Şekil 3.14-16 arasına bakıldığında 2 noktada değişim dikkat çekmektedir. İlk değişim 1000 °C civarında faz değişimi kaynaklı iken diğer değişim ergime noktası civarındakidir.



Şekil 3.18. Koruyucu gazın etkin olduğu hesaplanan toz özgül ısı değerleri

3.6. Ti6Al4V ve 316L Malzeme İçin Taşınım ve Işınlımla Isı Transferi

Temel ısı transferi denklemleri taşınım ve ışınlımla ısı transferi için yoğun şekilde kullanılmaktadır. Fakat metal lazer ergitme sürecinde iletme göre oldukça zayıf etkileri bulunan ışınlım ve taşınım ile çevreye ısı transferi bazı çalışmalarda ihmal edilirken bazı çalışmalar doğal taşınım katsayısını $10\text{-}14\text{ W/m}^2\text{K}$ arasında almıştır. Bazı çalışmalarda sonlu elemanlar modelinin doğrusallığının bozulmaması için (özellikle ışınlım formülündeki 4. mertebe sıcaklık farklarından) ortak katsayı olarak değerlendirilmiştir [Akbari vd., 2014; Moraes ve Czarkinski, 2018];

$$h_{ortak} = h_c + \varepsilon\sigma(T^2 + T_0^2)(T + T_0) \cong 2.43 \times 10^{-3} \varepsilon_p T^{1.61} \quad (3.27)$$

Bazı çalışmalarda ise standart taşınım ve ışınlım denklemleri kullanılmıştır [Dai ve Shaw, 2004; Masoomi vd., 2015; Teng vd., 2016-2017; Shi vd., 2016] ;

$$q_c = h_c \cdot (T_{\text{yüzey}} - T_{\text{çevre}}) \quad , \quad q_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{\text{yüzey}}^4 - T_{\text{çevre}}^4) \quad (3.28)$$

Denklem 3.28 sonlu elemanlar analizi zaman ve iş yükü açısından bazı çalışmalarda doğrusallaştırılmıştır [Zhao vd., 2017];

$$\begin{cases} q_r = h_{i\text{şı}}(T_{yüzey} - T_{çevre}) \\ h_{i\text{şı}} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{yüzey}^2 - T_{çevre}^2)(T_{yüzey} - T_{çevre}) \end{cases} \quad (3.29)$$

Taşınm katsayısı için ise doğal taşınm varsayımı yapıldığında şöyle tanımlamalar yapılmaktadır;

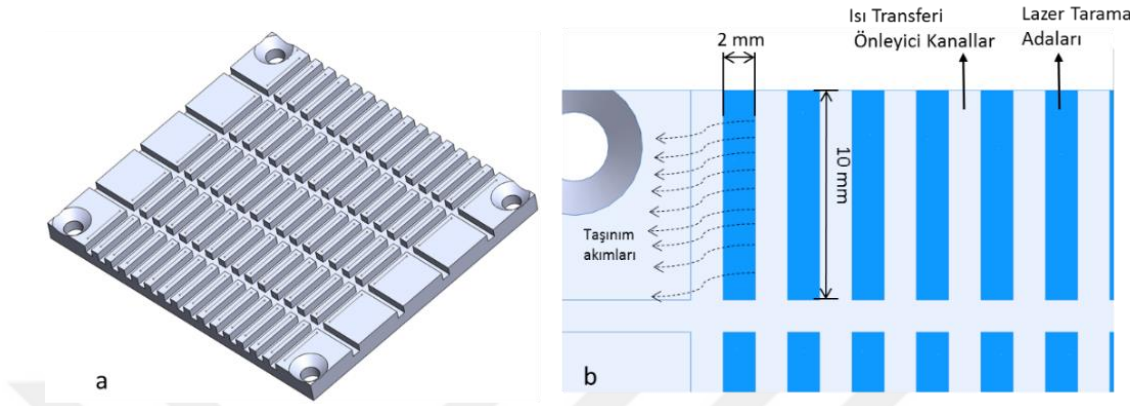
$$h_c = \frac{Nu k_f}{L}, \quad Gr = \frac{g(L^3 \rho_f^2 \beta_f (T - T_{çevre}))}{\eta_f^2}, \quad Pr = \frac{\eta_f C_f}{k_f}$$

$$\sqrt{Nu} = \sqrt{Nu_0} + \left(\frac{\frac{Gr Pr}{300}}{\left(1 + \left(\frac{0.5}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{16}{9}}} \right)^{\frac{1}{6}}, \quad L = \text{Yüzey alanı/çevre} \quad (3.30)$$

Masoomi vd., 2015 çalışması taşınm katsayısını $14 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ olarak verirken ilgili Nu, Gr ve Pr sayılarının örnek değerlerini de vermiştir. Zhuang vd., 2018'deki çalışmalarında Nu sayısı için düz sıcak levha varsayımı ile biraz daha farklı bir formül kullanmaktadır ve ortak ısı transfer katsayısı $80 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ değerinde bulunmuştur [Zhuang vd., 2018]. Bahsedilen çalışmalardan çoğu basitleştirme amacı güderek doğal taşınm formülünü uygulamakta iken, bazı çalışmalar zorlanmış taşınm formüllerini uygulamışlardır. Bununla beraber çalışmaların çoğunda taşınm katsayısı sabit alınmaktadır. Prandtl ve Nusselt sayılarının hesaplamasında kullanılan Argon gazına dair sıcaklıkla değişen kinematik viskozite değerleri literatürden alınmıştır. [Macrossan ve Lilley, 2003]. Argon gazı özgül ısı değeri ve iletim katsayısı Bölüm 3.4 Şekil 3.12'deki gibi ve Bölüm 3.5'te verildiği üzere (0.00052 J/kgK) alınmıştır.

Bu tez/proje kapsamında incelenen problemin fiziksel şartlarına bakıldığında deneysel imalatlar için planlanmış boyutlara göre imalattaki her bir adanın boyutları $10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ halindedir. Denklem 3.30'un düzlemi ısı akışının gerçekleştiği 2 mm 'lik kısa kenara paralel bir düzlem olarak kabul edilmiştir. Şekil 3.19'da imalatların üzerinde yapıldığı ve deneysel çalışma bölümünde detayları verilmiş olan imalat tablası tasarımı görülmektedir. Tabla üzerinde her

bir lazer taramasının yapılacağı ada, sonlu elemanlar benzetim çalışmasında bir tabla olarak modellenerek, iş yükünün azaltılması ve gerçek deneysel çalışma ile boyutsal tutarlık sağlanmaya çalışılmıştır.



Şekil 3.19. İmalat tablası üzerinde oluşturulmuş lazer tarama çizgileri

Taşınım ve ısıtım katsayılarının hesaplanmasında EES (Engineering Equation Solver) programı kullanılmıştır. EOS M280 cihazında hava dolaşımının 3m/s hızla yaptırıldığı belirlenmiştir. Buna rağmen, hava dolaşımı imalat tablasının hemen üzerinden değil, tozların uçmayacağı ve imalatın sekteye uğratılmayacağı uygun bir yükseklikten gerçekleştirilmektedir. Dolayısı ile taşınım ile ısı kayıplarının doğal taşınım uygulama olarak varsayılması gerçeğe en yakın varsayım olmaktadır. Bu çerçevede, Çizelge 3.3'te Denklem 3.30 ile elde edilen doğal taşınım katsayısı değerleri, görülmektedir. Çizelgeden görüleceği üzere doğal taşınım katsayısı değişimi başlangıç haricinde çok küçük aralıklarda gerçekleşmektedir. Bu nedenle doğal taşınım katsayısı analizde iş yükü azaltımı sağlayacağı da hesaba katılarak $20 \text{ W/m}^2\text{K}$ değerinde sabit alınmıştır.

Çizelge 3.3. Ti6Al4V doğal taşınım katsayısı değerleri

Sıcaklık (K)	Taş. kats. (W/m ² K)	Sıcaklık (K)	Taş. kats. (W/m ² K)	Sıcaklık (K)	Taş. kats. (W/m ² K)	Sıcaklık (K)	Taş. kats. (W/m ² K)
		623	21,12	973	22,05	1323	21,46
298	9,584	648	21,29	998	22,04	1348	21,39
323	13,5	673	21,44	1023	22,02	1373	21,32
348	15,36	698	21,57	1048	22	1398	21,25
373	16,61	723	21,67	1073	21,97	1423	21,18
398	17,54	748	21,76	1098	21,93	1448	21,1
423	18,27	773	21,84	1123	21,89	1473	21,03
448	18,86	798	21,9	1148	21,85	1498	20,96
473	19,36	823	21,95	1173	21,8	1523	20,88
498	19,78	848	21,99	1198	21,75	1548	20,8
523	20,13	873	22,02	1223	21,7	1573	20,73
548	20,44	898	22,04	1248	21,64	1598	20,65
573	20,7	923	22,05	1273	21,58	1623	20,57
1623	20,57	1648	20,5				
1648	20,5	1898	19,79	1973	19,62		
1673	20,42	1903	19,78	1998	19,57		
1698	20,35	1908	19,77	2023	19,52		
1723	20,27	1913	19,76	2048	19,47		
1773	20,13	1918	19,74	2073	19,43		
1798	20,06	1919	19,74	2098	19,39		
1823	19,99	1920	19,74	2123	19,35		
1848	19,92	1921	19,74	2148	19,32		
1873	19,86	1922	19,74	2173	19,29		
1878	19,84	1924	19,73				
1883	19,83	1933	19,71				
1888	19,82	1938	19,7				
1893	19,81	1948	19,67				

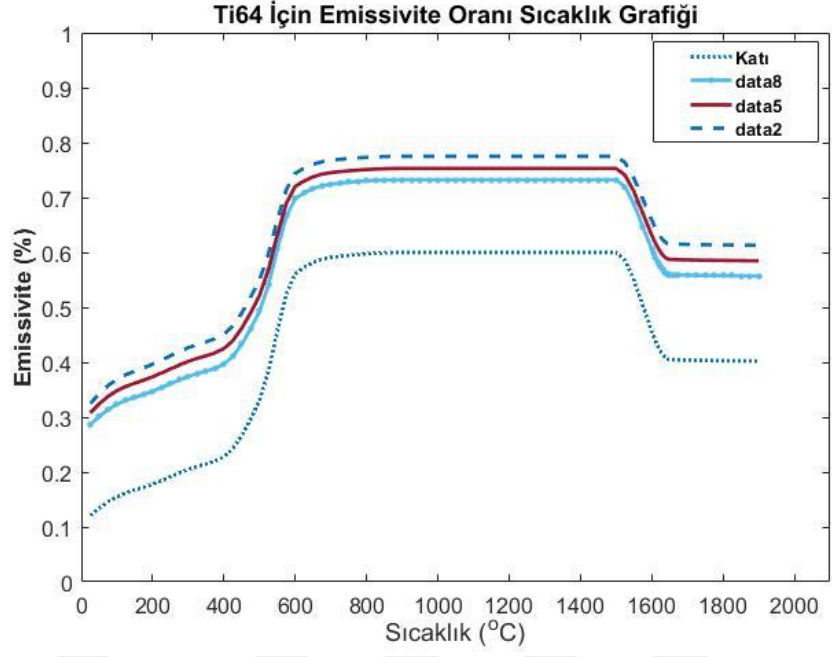
Işınım katsayısının bulunması için ise toz yatağı emissivite değerleri ayrıca değerlendirilmektedir. Bu amaçla farklı modellerden çoğunlukla uygulanan formül, delik ve katı emissivitesinden yola çıkılan ve sadeleştirilmiş modeldir (Zhao vd., 2017; Shi vd., 2016; Sih ve Barlow 2004) ;

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{toz} = A_{delik} \varepsilon_{delik} + (1 - A_{delik}) \varepsilon_{katı} \\ A_{delik} = \frac{0.908 \varnothing^2}{1.908 \varnothing^2 - 2\varnothing + 1} \\ \varepsilon_{delik} = \frac{\varepsilon_{katı} \left(\left(2 + 3.082 \left(\frac{1-\varnothing}{\varnothing} \right)^2 \right) \right)}{\varepsilon_{katı} \left(2 + 3.082 \left(\frac{1-\varnothing}{\varnothing} \right)^2 \right) + 1} \end{array} \right. \quad (3.31)$$

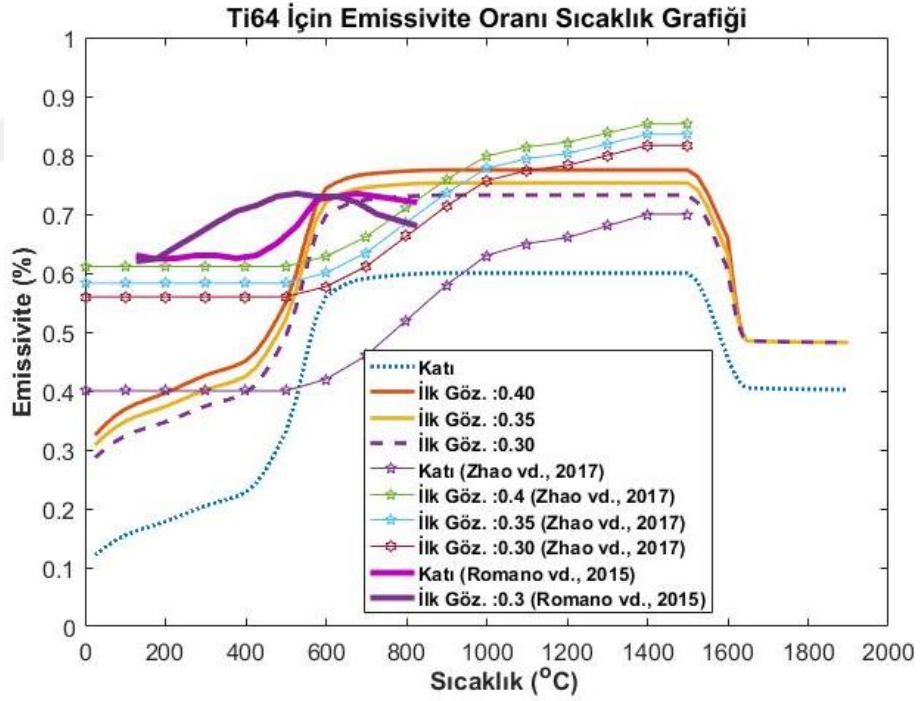
Bu model 45 μm 'a kadar demir, daha küçük alüminyum oksit ve silikon karbür tozları için denenmiş ve % 10'a kadar yakın sonuçlar alındığı ortaya konulmuştur[Sih ve Barlow 2004]. Denklem 3.31'de A_{delik} deliklerin kapladığı alan, $\varepsilon_{\text{katı}}$ katı emissivite değerleri, ϕ gözeneklilik değerleri, ε_{toz} ise sonuçta ulaşılan toz yatağı emissivite değerleridir. Jiawen Xie, 2017 çalışmasında h taşınım katsayısı 18 bulunmuştur. Moraes Diego, 2018 yüksek lisans çalışmasında emissivite, gözeneğe bağlı çizdirilmiştir[Moraes, 2018; Xie vd., 2017]. Boivineau 2006 yılında Ti6Al4V için malzeme bağımlı özellikleri katı ve sıvı fazlar için ölçerek vermiştir. Bu özellikler arasında emissivite değerleri katı ve sıvı faz için ortaya konulmuştur. Ergime noktasına doğru, yüksek sıcaklıklarda 1400 °C'den 2600'e doğru 0.6 değerlerinden 0.3 değerlerine kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Parry vd., 2016 çalışmasında bu sonuçlar katı ve sıvı faz için derlenmiş, hem katı hem toz için kullanılmıştır. B. A. Belskaya da 2012 yılındaki çalışmasında elektriksel direnç ve emissiviteye kompozisyonun az bir etkisi olduğunu ortaya koyarken, katı Ti6Al4V için 827 ve 1027 °C arası emissiviteler 0.25-0.30 aralığında yarıküresel emissiviteler olarak ortaya konulmuştur. Bu çalışmadaki elektriksel direnç değerleri %10 bandında Boyer vd. kitabındaki değerlerle uyumludur[Boyer vd., 1994,Zhao vd., 2017] Wood RA, vd., 1972 çalışmasında ise düşük sıcaklıklardaki emissiviteler verilmiştir. Ayrıca Arce doktora çalışmasında elektron ışın yöntemiyle imal edilmiş Ti6Al4V katı ve ham toz için emissivite değerlerinin ölçümünü gerçekleştirmiştir. Buna göre modelleme çalışmasında 0.6 değerini sabit olarak tercih etmiştir. Yang vd., 2010 çalışmasında emissivite değerlerini 943 °C'de 0.7 civarında olmak üzere 0.25 ortalama değerinde bulmuştur. 705 °C sonrası Ti6Al4V levhanın oksidize oluşuyla ani artış gözlemlenmiş ve literatür referans değeriyle uyumlu bulunmuştur[Yang vd., 2010].Zhao vd., 2017 çalışmasında emissivite ve absorbtivite değerlerinin çok yüksek sıcaklıklarda aynı değere ulaştıkları Touloukian ve DeWitt 1972'de bildirilmekte ve Denklem 3.31'e göre Ti6Al4V için yapılan hesaplamalarla 0.7 değerinin uygun olduğu, bu değer ticari tozlardaki özelliklere de uyduğu bildirilmektedir[Shen ve Chou, 2012, Yang vd., 2010; Zhao vd., 2017]. Çalışmada 0.3 gözeneklilik için değerler katı emissiviteleri 0.4 ve 0.6 aralığında, toz emissiviteleri 0.6 ve 0.8 aralığında çizilmiştir. Zhuang vd., 2018 yılında ışıyım emissivite değeri 0.7 alınmıştır[Zhuang vd., 2018]. Quian vd. 2005

çalışması absorbtivite için katı Ti6Al4V'te 0.13 ve 0.23 arası değerleri CO₂ lazerle bildirmekte, emissivite için ortalama 0.35 değerini katı Ti6Al4V için 500-800 °C arası ölçtüğünü ortaya koymaktadır[Quian vd. 2005]. Coppa vd., 2005 çalışmasında Ti6Al4V katı için 940-950 °C arası 0.8 ve 1.1 µm dalga boyu aralığında pirometre ölçümüyle 0.69 değeri ifade edilmektedir. Milosevic ve Alesiç 2012 çalışmalarında karşılaştırmalı olarak 527 -1377 °C arasında toplam yarıküresel emissiviteyi (ki ortalama değer olarak bu kullanılmaktadır), 527 °C de 0.7 değerinden 877 °C'de 0.75 değerine ve sonra 1377 °C'de 0.4 değerine kadar düşen bir eğimde 900 nm dalga boyunda bulunmaktadır[Miloseviç vd Alesiç, 2012]. Diğer çalışmalar da ergime noktasına kadar 0.4 civarı değerler baz almaktadır. Li vd., 2016 çalışmasında emissivitenin dalga boyu arttıkça azaldığı ortaya konulmaktadır. Aynı çalışmada oksidasyon olmadan 1.5 µm dalga boyu için 527-677 °C aralığında spektral emissivitenin 0.27'ye yakın değerlerden 0.42'ye yakın değerlere çıktığı belirtilmektedir[Li vd.,2016].

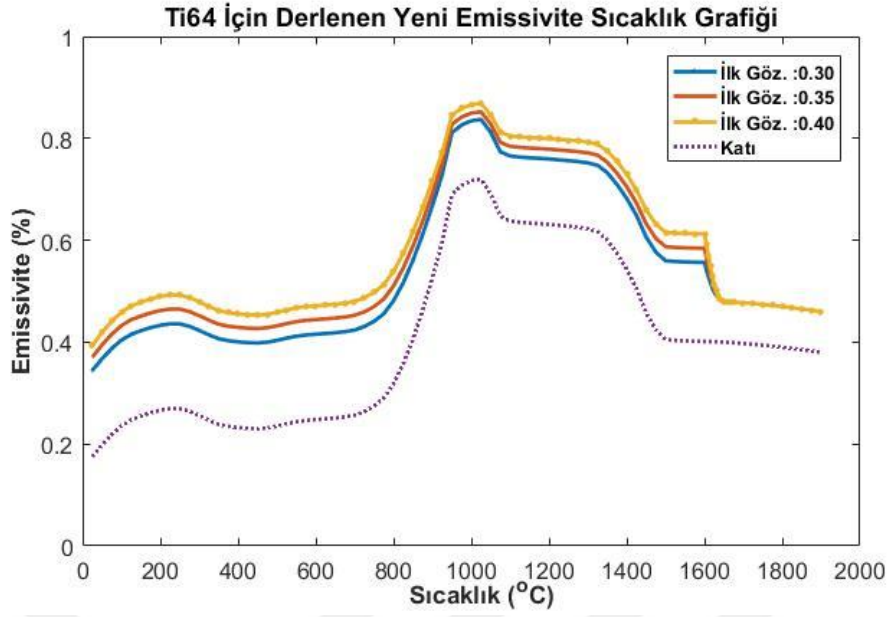
Tüm bu çalışmalardan varılan sonuçta Denklem 3.31'in deneysel olarak bulunan katı emissivite değerlerini belirli bir değerde yukarı ölçeklediği anlaşılmıştır. Şekil 3.20'de kullanılan emissivite değerlerinin dağılımı görülmektedir. Bu durumda toz etkin emissivite değeri bu tez/proje çalışmasında Yang vd., 2010 değerleriyle uyumlu olarak aynen, 900-1500 °C arasında ise Miloseviç ve Aleksic 2012 çalışmasındaki 900 nm deneylerindeki değerler ve Sıvı Ti6Al4V değerleri alınarak Denklem 3.31 kullanımıyla toz değerleri yaklaşık olarak bulunarak kullanılmıştır. Bu değerler ise 3 farklı başlangıç gözenek değerinin hem sabit hem sıcaklığa bağlı 2 farklı gözenek formülü ile hesaplandığı haller için çizdirilmiştir. Fakat 2 formülde de gözenekler aynı çıktığından bu önemini yitirmektedir. Bunun yanında Romano vd., 2015 ve Zhao vd., 2017'de çizilmiş Ti6Al4V emissivite değerleri de çizdirilerek karşılaştırma yapılmıştır. Literatürdeki çeşitli değerlerin kıyası ise Şekil 3.21'de verilmiştir. Şekil 3.22'de ise literatürden bu tez/proje kapsamında derlenen yeni emissivite değerleri verilmektedir. Parry vd., 2016 çalışmasındaki değerler ile oldukça benzer olup yalnızca düşük sıcaklıklardaki değerler Yang vds.,2010'dan, ergime noktasına kadarki değerler Miloseviç ve Aleksic 2012'den ve sıvı faz için değerler Parry vd., 2016 çalışmasının yararlandığı Boiniveinu vd., 2006 çalışmasından alınmıştır.



Şekil 3.20. Katı ve toz Ti6Al4V emissivite değerleri



Şekil 3.21. Literatürdeki emissivite değerlerinin kıyası



Şekil 3.22. Literatürden derlenen emissivite değerleri

Bu bilgiler ışığında ışınlama ısı transferi için 3.22’de verilen, emissivite değerleri ABAQUS arayüzünde kullanılmak üzere seçilmiştir.

316L malzemeye dair benzer özelliklerin belirlenmesi için literatürdeki taşınım katsayı ve emissivite değerleri incelendiğinde, taşınım katsayısı için 10-15 aralığında [Bejan ve Kraus, 2003; Conti vd. 2018; Romano vd, 2015] ve emissivite değeri için 0.2-0.4 aralığında seçimler olduğu anlaşılmıştır [Zhao vd, 2017; He vd, 2018; Zhang vd; 2019; Yang vd, 2018; Pitchler vd, 2020]. Taşınım katsayısı için EES programında Ti6Al4V malzeme için uygulanan hesaplama doğal taşınım şartları ve Denklem 3.27-3.30 kullanılarak Çizelge 3.3-2 deki gibi hesaplanmıştır. Böylelikle katsayı değeri ortalama 13 ve 0.3 emissivite seçilmiştir.

Çizelge 3.3. 2. 316L doğal taşınım katsayısı hesaplama sonucu

Sıcaklık (K)	Taş. kats. (W/m ² K)	Sıcaklık (K)	Taş. kats. (W/m ² K)	Sıcaklık (K)	Taş. kats. (W/m ² K)	Sıcaklık (K)	Taş. kats. (W/m ² K)
		623	12,68	973	13,66	1323	13,7
298	7,943	648	12,73	998	13,77	1348	13,73
323	9,4	673	12,77	1023	13,83	1373	13,76
348	10,51	698	12,78	1048	13,86	1398	13,72
373	10,71	723	12,82	1073	13,88	1423	12,8
398	11,54	748	12,93	1098	13,9	1448	13,12
423	11,83	773	12,96	1123	13,95	1473	12,99
448	12,3	798	12,99	1148	13,88	1498	13,45
473	12,43	823	13,07	1173	13,91	1523	13,56
498	12,45	848	13,16	1198	13,94	1548	13,29
523	12,55	873	13,25	1223	13,92	1573	13,03
548	12,59	898	13,48	1248	13,98	1598	13,15
573	12,64	923	12,98	1273	13,96	1623	13,24
1623	13,28	1648	13,64	1773	13,34	1798	12,12
1673	13,37			1723	14,03	1698	13,67

3.7. Başlangıç ve Sınır Şartları

Sonlu eleman modelinin hareketli bir ısı kaynağı problemi olduğu göz önüne alındığında öncelikle başlangıç ve varsa sınır şartlarının tüm model boyunca sabit bir halde uygulanmak üzere tanımlanması kolaylaştırıcı olacaktır. Bu amaçla aşağıdaki tanımlamalar tüm çözüm boyunca geçerli alınmıştır:

- $T(x, y, z, t)_{t=0} = 293 \text{ Kelvin}$, $(x, y, z \in M)$ $M = \text{Toz Yatağı bölgesi}$
- $k \frac{dT}{dn} - q_{la} + q_{ta} + q_{is} = 0$; $k \frac{dT}{dn_{z=0}} = q_{ta}$, $k \frac{dT}{dn_{z=0}} = q_{is}$

Başlangıç şartları arasında sayılabilecek, malzeme özellikleri, hareketli lazer ışın kaynağı tanımı , taşınım ve ışıınım katsayıları gibi parametreler hem sıcaklığa hem de gözenekliliğe, ayrıca toz ve katı malzeme durumuna göre değiştiği için, bu parametrelerin modellenmesi gerekmiştir. Bu açıdan tüm bu parametreler tez çalışmasının modelleme kısmında açıkça belirtilmiştir.

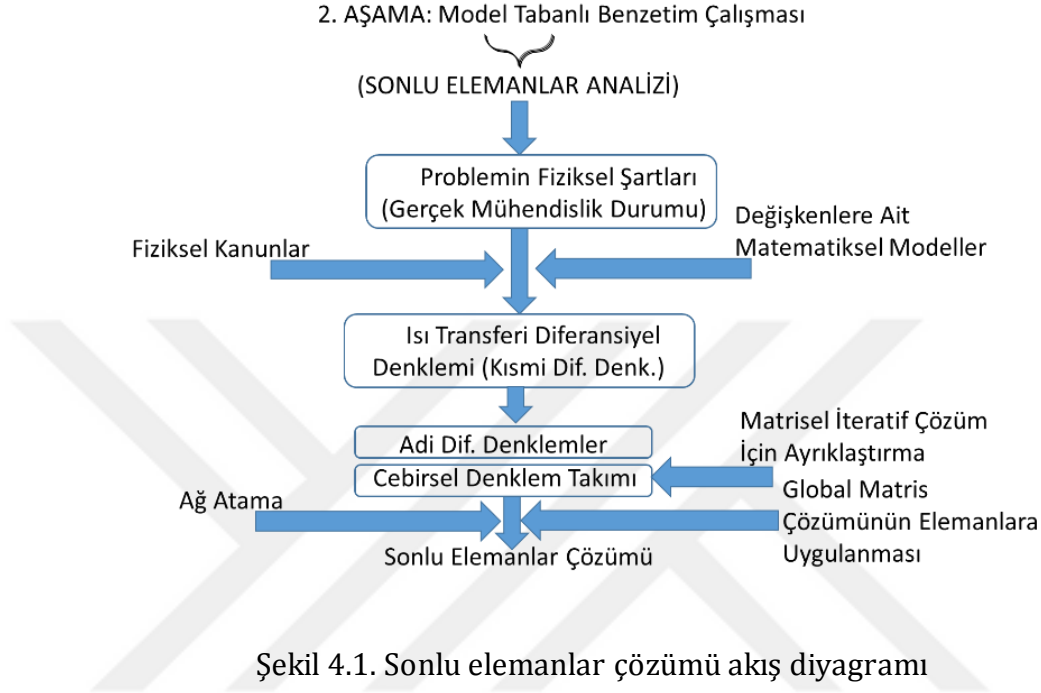
4. METAL LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İÇİN SONLU ELEMANLAR MODELİ

Metal lazer ergitme modelleme sürecinde önemli olan ilk konu sıcaklık dağılımının doğru bir şekilde tahmin edilebilmesidir. Bu bölümde bir 3 boyutlu ısı transferi problemi olarak yaklaşlan bu konuya dair kısmi diferansiyel denklemler, sınır ve başlangıç şartları, imalata dair sabit parametreler kullanılarak matris çözücülerle çözülmek üzere sonlu elemanlar modeli elde edilmiştir.

4.1. Sonlu Elemanlar Metodu

Kirişlerde kolonlarda, çerçevelerde gerilmeler ve deformasyonlar, yüzeyden ısı transferi, hacimden ısı transferi, kütle ve ısı akışı gibi mühendislik problemlerinde homojen çözümlere ve başlangıç sınır değer problemi haline dönüşen bu tez kapsamındaki çalışmalar gibi çalışmalar için özel çözümlere analitik yöntemlerle ulaşamadığında, veya mevcut problem için deneysel çalışma koşulları sağlanamadığında sayısal (nümerik analiz) çözüm yöntemleri, bilgisayarlar yardımıyla yaklaşık çözümler sunmaktadır. Bilgisayar ve sanal ortamda tasarım/modelleme/analiz teknolojilerinin çok hızlı gelişmesi ile birlikte gerçek fiziki şartların ve gerçek geometrilerin çok iyi modellenmesi şartıyla sayısal yöntemler çok yakın sonuçlar vermektedir. Bunun yanında ısı transferi problemlerinde analitik çözümler için değişken iletkenlik, 3boyutlu geometri, sınır şartlarının sıcaklığa bağlı değişkenliği gibi kısıtlar imkansızlık sebebi olabilmektedir. Bu yöntemlerin en yaygın kullanılanı sonlu elemanlar yöntemidir. 1943 yılında Courant R. tarafından yapılan çalışmada burulma problemleri üçgen alt bölgelere ayrılarak bu bölgelerde parçalı polinom interpolasyonları kullanılmıştır. Sonraki çalışmalarda da endüstriyel anlamda uygulamalarda bu yöntem gittikçe gelişmeye başlamış, kitaplar ortaya konulmuştur. Denklem 3.6'da görüldüğü üzere lazer ergitme yöntemi, zamana ve konuma bağlı olarak değişen sıcaklıkların etkin rol aldığı diferansiyel bir ısı transferi denklemi şeklinde çözülmesi gereken, bir başlangıç-sınır değer problemi olarak ele alınabilmektedir. Denklem 3.6'daki hemen tüm parametreler sıcaklığa bağlı farklı değerler almaktadır (Bölüm 3.4-3.6). Böylece bu tez çalışmasında her bir pozisyonun (düğümün) her bir andaki sıcaklık değerinin

belirlenmesi için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmasına karar verilmiştir. Bu tez çalışmasında ele alınan probleme dair Bölüm 2'nin sonunda Şekil 2.25 ve 26'da verilmiş olan planda görülebilen 2. Aşamanın detaylarına dair akış diyagramı, Şekil 4.1'de görülmektedir.



Bu yöntemler arasında problemin fiziksel özelliklerinin veya elde edilen diferansiyel denklemlerin sonlu elemanlar çözümü için formülasyona dair minimum enerji ve ağırlıklı kalıntılar yöntemi ön plana çıkmaktadır.

Minimum Potansiyel Enerji Formülasyonu: Bu yöntemde dış yükler tarafından cisme uygulanan kuvvetlerin oluşturduğu cisim deformasyonları sürecince, kuvvetler tarafından cisim üzerinde yapılan işin cismin içinde birim şekil değişimi (elastik) enerjisi olarak depolandığı varsayımına dayanmaktadır. Dengedeki bir cismin oluşacak deformasyonlarının toplam potansiyel enerjisi minimum olacak şekilde gerçekleşeceği ilkesini baz alarak Denklem 4.1'in uygulanmasını sağlamaktadır;

$$\Pi = \sum_{e=1}^n \Lambda^e + \sum_{i=1}^m F_i u_i \quad (4.1)$$

Denklem 4.1'de eşitliğin solundaki terim toplam potansiyel enerji, sağdaki ilk terim birim şekil değişim enerjisi, ikinci sol terim ise dış kuvvetlerce yapılan iştir.

u yer değişimi, F kuvvet, m düğüm noktası numarası, n eleman numarasıdır. Isıl analiz dışında mekanik özelliklerin incelenmesi durumunda kullanılması kolaylık ve az yük gerektiren bu yöntemin detaylarına bu tez kapsamında ilgilenilen probleme dair kullanılmaması açısından burada değinilmemiştir.

Ağırlıklı Kalıntı Yöntemleri: Bu yöntem, genel olarak problemin temel diferansiyel denklemine yaklaşık bir çözümle karşılık vermektedir. Bu noktadaki kısıt, varsayılan bu herhangi yaklaşık çözümün problemin başlangıç ve sınır şartlarını sağlaması zorunluluğudur. Bu çözüm analitik olarak elde edilen tam bir çözüm olmayıp diferansiyel denklemde konulunca doğal olarak bazı kalıntılar (hatalar) oluşmaktadır. Bu yöntemin tüm uygulama türleri, bu hataların ya bazı noktalarda ya da aralıklarda sıfırlanmasını içermektedir. Eşdizim yöntemi,, alt bölgeler yöntemi, en küçük kareler yöntemi ve Galerkin yöntemi ağırlıklı kalıntı yöntemi uygulama türleridir.

- **Eşdizim:** Problem diferansiyel denklemine öngörülen çözümde mertebeye ise yani bilinmeyen katsayı sayısı kaç ise o kadar noktada kalıntı fonksiyonunun sıfır olması bu uygulama türünün temel ilkesidir. Böylece bilinmeyen katsayılar çözülerek öngörülen çözümde konulunca çözüme açık halde ulaşılmış olmaktadır.
- **Alt Bölgeler:** Eşdizim yöntemi ile farkı, kalıntı fonksiyonunun bilinmeyen katsayı sayısı kadar aralıkta integrasyonunun sıfırlanmasıdır.
- **En Küçük Kareler:** Bu uygulama türünde hata fonksiyonunun karesi integrasyona tabii tutularak varsayılan çözümdeki bilinmeyen katsayılarla göre hata minimize edilmektedir. Şöyle ki hata Θ ve varsayılan çözüm fonksiyonu c_1, c_2 ve c_3 katsayılarını barındırıyor iken minimum hata;

$$\text{Minimum} \int_a^b \Theta^2 dt \rightarrow \begin{cases} \int_a^b \Theta \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial c_1} dt = 0 \\ \int_a^b \Theta \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial c_2} dt = 0 \\ \int_a^b \Theta \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial c_3} dt = 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu integrasyonu takiben bulunan 3 denklemden bilinmeyen katsayılar bulunup çözüm fonksiyonunda yerine konulmaktadır.

Galerkin Ağırlıklı Kalıntıları:

Problemin yaklaşık çözümü olarak varsayılan bağıntı, tipik elemanlara ayrıştırılarak bu elemanlar ağırlık fonksiyonları (Φ_i) diye adlandırılmaktadır.

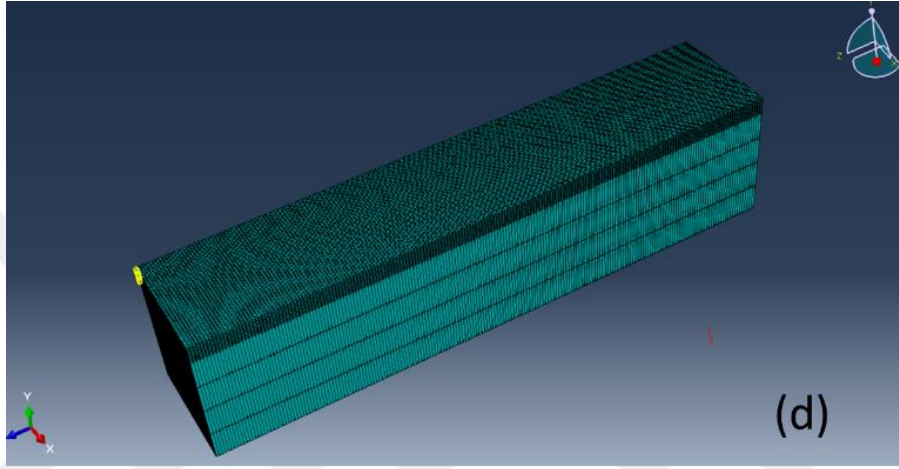
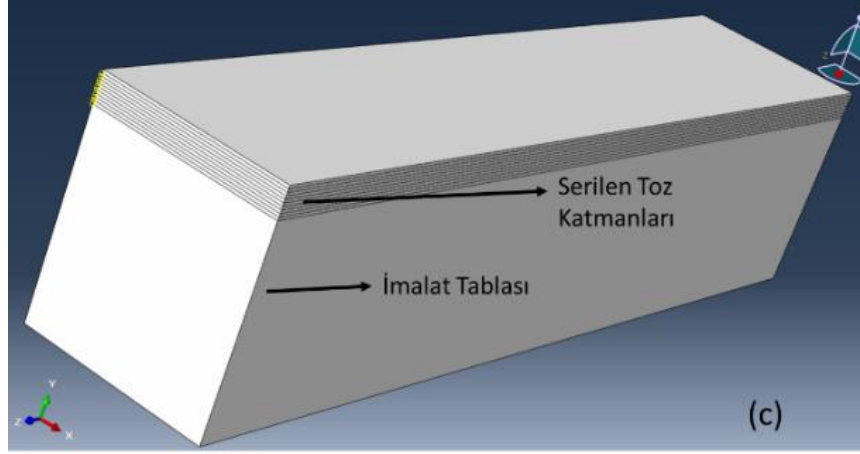
Ağırlık fonksiyonları varsayılan yaklaşık çözümdeki bilinmeyen katsayı sayısı kadar oluşturulmaktadır. Son olarak Galerkin yönteminde Denklem 4.3'ün temsil ettiği gibi, hata fonksiyonunun (Θ) bu ağırlık fonksiyonlarına dik olduğu kabulü yapılmaktadır;

$$\int_a^b \Phi_i \Theta dt = 0 \quad i=[1,N] \quad (4.3)$$

Denklem 4.3 her bir ağırlık fonksiyonu için uygulanarak varsayılan yaklaşık çözümdeki bilinmeyen her bir katsayı için birer denklem elde edilmekte, bu bilinmeyen katsayılar bu denklem takımının eşzamanlı çözülmesiyle bulunmakta ve varsayılan yaklaşık çözümde yerine konularak çözüme ulaşılmaktadır. Bu tez çalışması yapılırken literatür çerçevesinde bu yöntemler arasında zamana ve konuma bağlı ısı transferi probleminin çözümü için ağırlıklı kalıntı formülasyonlarından Galerkin ağırlıklı kalıntılar yöntemi uygulanmak üzere seçilmiştir[Moaveni S.,2015].

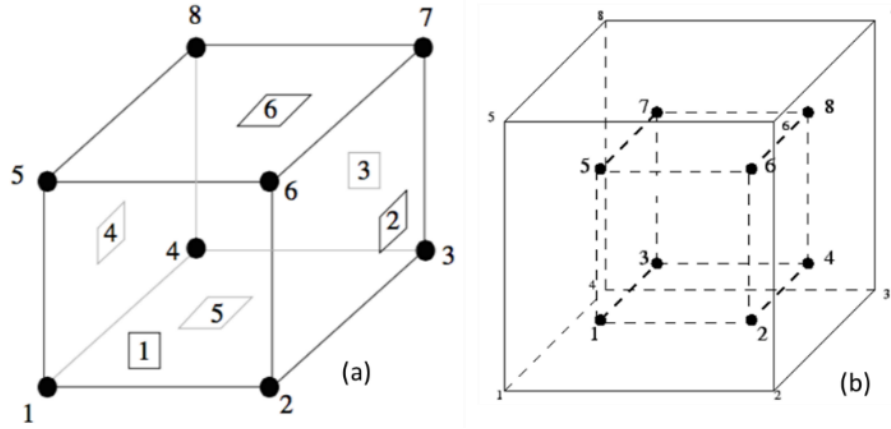
4.2. Sonlu Elemanlar Modelinde Tanımlamalar

Bölüm 3'te matematiksel ifadeleri ve temel diferansiyel denklemi oluşturulan metal lazer ergitme ısı transferi problemi bu kısımda seri lineer fonksiyon takımına ayrıştırılarak, sınır şartları ve başlangıç şartları kullanımıyla sonlu elemanlar çözümüne ulaşılmaktadır. Bu çözüm için ABAQUS sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Şekil 4.2'de Sonlu Eleman Çözümü için tasarlanmış bölge görülmektedir. Bu bölge içerisinde eleman bölüntüleme ağ yapısı oluşturma ve sonlu eleman çözümü yürütülmüştür.



Şekil 4.2. ABAQUS yazılımı dahilinde sonlu eleman çözümü yapılan bölge a) üst görünüş b) yan görünüş c) perspektif görünüş d) örnek bir ağ elemanı atanmış durum

Şekil 4.2d’de verilen örnek durumda olduğu gibi ağ yapısı oluşturulurken, ABAQUS yazılımı dahilinde izoparametrik özellikte 8 düğüm noktasına sahip DC3D8 lineer 3 boyutlu hegzagonal eleman kullanılmıştır. Şekil 4.3’te bu elemanın görülmektedir. Isı transferi analizinde her düğüm noktası sıcaklık olarak tek bir serbestlik derecesine sahiptir.



Şekil 4.3. a) 3 boyutlu birinci merteye, 8 düğüm noktalı, dc3d8 6 yüzlü eleman b) çözümlerin integrasyon noktaları

İzoparametrik bir elemanda geometrinin tanımlanması için sonraki bölümde incelendiği üzere koordinatları barındıran şekil fonksiyonları kullanılırken, T değişkeni de aynı şekil fonksiyonları cinsinden tanımlanmaktadır. Böylelikle oluşturulan şekil fonksiyonlarının ve türevlerinin düğüm noktalarında kendiliğinden sahip oldukları kolaylaştırıcı özellikler formülasyonu basitleştirmektedir. Sonlu elemanlar ile çözüm yapılırken Şekil 4.3'te ilkesel olarak gösterildiği üzere seçilen eleman içerisindeki integrasyon noktaları arasında, noktalar arası mesafe doğrultusunda düğüm noktalarına interpolasyon işlemi ve sayısal integrasyon işlemi gerçekleştirilerek (DC3D8 eleman için lineer doğrultular), kısmi diferansiyel denklemlerin adi diferansiyel denklemler ve bir dizi cebirsel denklem takımı haline dönüşmesi ve bu denklemlerin matris çözücü yardımıyla çözülmesi işlemleri yürütülmektedir. Bu işlem ayrıklaştırma ve integrasyon olarak bilinmektedir. DC3D8 elemanına dair, ABAQUS yazılımında Euler geri farklar yöntemi olarak bilinen integrasyon yöntemi ile zaman integrasyonu alınarak lineer denklem serileri elde edilmekte, Newton Raphson iteratif yöntemi ile iterasyonlar gerçekleştirilmektedir. Bu işlemler yapılırken kullanılan şekil fonksiyonları, interpolasyon ve sayısal integrasyon bileşenleri, eksenel simetrik, üçgensel ve kuadratik – kübik mertebeden elemanlar için farklılaşmaktadır. Bu tez kapsamında izoparametrik bir eleman ile işlem yapıldığı için eleman kısaca tanıtılmıştır. Sonraki kısımlarda ise matematiksel temel bu eleman bazında anlatılmıştır.

4.3. Sonlu Farklar Temelinde Zaman İntegrasyonu ve Lineer Sonlu Elemanlar Eşitliği

Zamana bağlı ısı transfer problemlerinde sıcaklık hem zamana hem de kontrol hacmi içerisindeki konuma bağlı olarak değişmektedir. Bu tezde incelenen konu da böyle bir duruma sahiptir. Kısım 4.1’de bahsedilmiş sebepler dolayısıyla tercih edilen sayısal yöntemlerden biri de sonlu farklar yöntemidir. Sonlu elemanlar yöntemi lineer formülasyonu ve zaman integrasyonunun daha net anlaşılması için sonlu farklar kısaca açıklanacaktır.

Bir diferansiyel denklemdaki diferansiyel değerlerin oldukça küçük farklar olarak yazılması sonlu farklar teorisidir. Bu yazımın temelinde ise teğetin eğimi anlamı taşıyan türev teriminin aslında farklar olarak yazılabilmesi yatmaktadır;

$$\left(\begin{array}{l} \frac{df(x)}{dx} \cong \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x} \\ f(x+\Delta x) = f(x) + \Delta x \frac{df(x)}{dx} + \frac{1}{2} \Delta x^2 \frac{d^2 f(x)}{dx^2} + \dots \end{array} \right) \quad (4.4)$$

Denklem 4.4 alttaki terimde Taylor serisi açılımının ilk 2 terimiyle üsttekinin elde edilebildiğini göstermektedir. Buradan çıkarılacak sonuç ise ihmal edilen ilk terim Δx^2 ile orantılı olduğundan sonlu farkların ilk adımı olan bölüntüleme sırasında toplam düğüm sayısı D ve toplam uzunluk d iken Denklem 4.5 geçerli olduğundan her düğüm ilerleyişinde hata Δx ile orantılı olacağı için eleman boyutunun küçülmesi (farkların küçük tutulması), hatanın azalıp yaklaşıklığın artırılmasını sağlayacaktır;

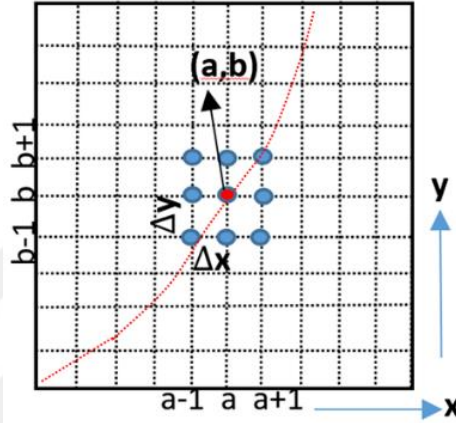
$$D\Delta x^2 = d\Delta x \quad (4.5)$$

İkinci ve daha yüksek mertebe türevler için de sonlu farklara çevrilmiş birinci türevlerin farkdenklemleri yazılarak ikinci türev sonlu fark denklemleri elde edilebilir. Bölüntüleme esnasında elde edilen düğüm noktalarında ısı transferi problemi diferansiyel biçimde kontrol hacminin her noktasında çözülebilir halden, ayrıklaştırılmış noktalarda çözülen bir problem haline geçmektedir. Bu ayrıklaştırma çok doğrultulu ve zamana bağlı metal lazer ergitme gibi bir problem ele alınırken, hem zamana hem konuma göre ayrıklaştırma gerektirmektedir. Bu durum, Şekil 4.4’te görülen D toplam düğüm sayısından b,b-

1 ve b+1 komşu düğümlerinin durumuna göre sürekli 2 boyutlu bir iletim denkleminde yola çıkılarak açıklanabilir [Cengel,2009];

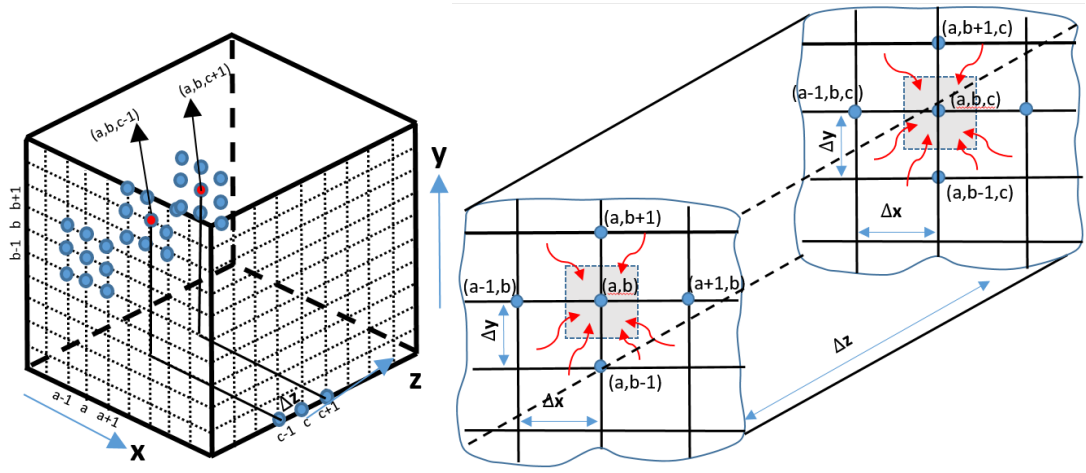
$$\begin{aligned} \text{birinci türev} \rightarrow (a-\frac{1}{2}).\text{düğüm} &\rightarrow \frac{dT}{dx} + \frac{dT}{dy} = \frac{T_a - T_{a-1}}{\Delta x} + \frac{T_b - T_{b-1}}{\Delta y} \\ \text{birinci türev} \rightarrow (a+\frac{1}{2}).\text{düğüm} &\rightarrow \frac{dT}{dx} + \frac{dT}{dy} = \frac{T_{a+1} - T_a}{\Delta x} + \frac{T_{b+1} - T_b}{\Delta y} \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\text{ikinci türev} \rightarrow (a, b). \text{düğüm} \rightarrow \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} = \frac{T_{(a-1,b)} - 2T_{(a,b)} + T_{(a+1,b)}}{\Delta x^2} + \frac{T_{(b-1,a)} - 2T_{(a,b)} + T_{(b+1,a)}}{\Delta y^2} \quad (4.6-1)$$



Şekil 4.4. 2 boyutta ısı transferi ve örnek düğüm noktaları

Denklem 4.6'da verilen durumun 2 boyutlu ve zamana bağlı olduğu varsayıldığında lazer ergitme probleminin 2 boyutlu halinin sonlu fark denklemi elde edilebilir ve zaman konum bağlı, Şekil 4.5'teki düğüm noktalarına uygulanabilir.



Şekil 4.5. a) 3 boyutlu hacim elemanı ve b) eleman üzerinde düğüm noktaları

Bu amaçla Bölüm 3'teki Denklem 3.6, ısıtım ve taşınım ile ısı kayıpları sınır şartları kullanılarak hesap edilecek şekilde düzenlendiğinde;

$$\rho(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} = k(T)\left(\frac{\partial^2 T}{x^2} + \frac{\partial^2 T}{y^2} + \frac{\partial^2 T}{z^2}\right) + q_{la} \quad (4.7)$$

elde edilir. Denklem 4.7 Şekil 4.5b'deki gibi bir hacim elemanı tarafından sarılmış ve hem üstten-alttan, hem de sağ ve soldan ısı transferine maruz bir düğüm baz alındığında sonlu farklar cinsinden yazılabilir:

$$\rho(T)C_p(T)\left(\frac{T_{a,b,c}^{t+1} - T_{a,b,c}^t}{\Delta t}\right) = k(T)\left(\frac{T_{a+1,b,c}^t - 2T_{a,b,c}^t + T_{a-1,b,c}^t}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{a,b+1,c}^t - 2T_{a,b,c}^t + T_{a,b-1,c}^t}{(\Delta y)^2} + \frac{T_{a,b,c+1}^t - 2T_{a,b,c}^t + T_{a,b,c-1}^t}{(\Delta z)^2}\right) + q_{la} \quad (4.8)$$

Denklem 4.8'de i. zamanda bilinen düğüm sıcaklıklarından i+1. zamandaki sıcaklık değerinin hesaplanması işlemi yürütülmektedir. i+1 ve i zamanları arasında zaman adımı denilen ve Δt ile ifade edilen bir an kadar fark mevcuttur. Zaman adımının küçük olması problem çözümünde yakınsama miktarını tıpkı Denklem 4.5'te değinildiği gibi artırmakta fakat sürekli bir probleme göre katkı hesaplama zamanını artırmaktadır.

Denklem 4.8 farklı bir formda da yazılabilmektedir [Ulutan vd., 2009];

$$\rho(T)C_p(T)\left(\frac{T_{a,b,c}^{t+1}-T_{a,b,c}^t}{\Delta t}\right)=k(T)\left(\frac{T_{a+1,b,c}^{t+1}-2T_{a,b,c}^{t+1}+T_{a-1,b,c}^{t+1}}{(\Delta x)^2}+\frac{T_{a,b+1,c}^{t+1}-2T_{a,b,c}^{t+1}+T_{a,b-1,c}^{t+1}}{(\Delta y)^2}+\frac{T_{a,b,c+1}^{t+1}-2T_{a,b,c}^{t+1}+T_{a,b,c-1}^{t+1}}{(\Delta z)^2}\right)+q_{la} \quad (4.9)$$

Dikkat edildiğinde Denklem 4.8’de eşitliğin sağ kısmında 3 boyutta koordinata sahip (a,b,c) bir düğümün sonraki zaman adımındaki sıcaklığı olan $T_{a,b,c}^{i+1}$ terimi, eşitliğin sağ kısmında bilinen zaman adımıyla da bilinen sıcaklık olan T^i terimi kullanılarak çözülmektedir. Böylece her zaman adımı bir önceki zaman adımındaki komşu düğüm sıcaklıkları ve ilgilenilen düğüm sıcaklığı kullanılarak ilgilenilen düğümün sonraki zaman adımı sıcaklığı bulunmaktadır. Bu işlem metal lazer ergitme sürecindeki gibi çok küçük zaman adımı ve çok fazla düğüm sayısı gerektiren problemler için iteratif yöntemlerle çözdürülmektedir. Bunun bir diğer adı eksplisit (açık) yani ileri farklar çözümüdür. Bu yöntem uygulaması kolay fakat zaman adımının değerinin belirli bir değerden küçük olması gereken, aksi halde mantıksız sonuçlara sebebiyet veren bir yöntemdir. Denklem 4.8 açık yöntemi temsil etmektedir.

Öte yandan Denklem 4.9 ise kapalı (implisit) yani geri farklar yöntemini temsil etmektedir. Geri farklar ile çözümde i+1. zaman adımı bilinemeyen sıcaklık bulunurken ilgilenilen düğümün ve komşu düğümleri yine o zaman adımındaki sıcaklıkları eş zamanlı bir denklem takımı ile çözümlenmektedir. Bu çözüm hesaplama yükü olarak daha zordur, daha zaman alıcıdır fakat zaman adımının belirlenmesinde bir sınır yoktur. Her iki yöntem arasında kullanılan yönteme göre zaman adımı ve ağ elemanı boyutu, yakınsama açısından en önemli 2 kavramdır. Açık çözümde zaman adımı kararlılığına dair Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) durumunun sağlanması yakınsayan sonuçların eldesi için gerekmektedir. Buna göre;

$$\frac{c\Delta t}{\Delta x} \leq 1, \quad t+1 = t + \Delta t \quad (4.10)$$

C_{max} Courant sayısı olup açık çözümde en fazla 1 değerini almaktadır. Bunun anlamı zaman adımının zaman integrasyonunda her bir zaman adımı fiziken gerçekleşen örneğin sıcaklık değişimini yakalayabilmek için mümkün olan bir

değerden küçük olması gerektiğidir. 1'den büyük Courant sayısı, parametredeki değişimin o anki zaman adımında bölüntülemenin yapıldığı eleman boyutundan daha fazla bir mesafe alıyor oluşudur ki bu da bir zaman adımında birden çok elemanda sıcaklık değişiminin anlaşılmaya çalışılması gibi mantıksız bir çözümün denenmesidir. Sonlu elemanlar yönteminde ise, zamana bağlı bir problemin kararlı ve yakınsayan çözümleri adına zaman integrasyonu için şu genelleştirilmiş denkleme uyulmaktadır;

$$\{T^{t+1}\} = \{T^t\} + (1 - \tau)\Delta t\{\dot{T}^t\} + \tau\Delta t\{\dot{T}^{t+1}\} \quad (4.11)$$

Denklem 4.11'de τ Euler parametresi, $\dot{T}$ ise sıcaklığın hem konuma hem zamana bağlı kısmi türev sembolüdür. Euler parametresinin şartsız halde kararlı olan kapalı çözüm için aralığı $\frac{1}{2} \leq \tau \leq 1$ olarak belirlenmiş vaziyettedir. $\tau = 1$ değeri Geriye Doğru Euler yönteminin uygulaması iken $\tau = 0.5$ değeri yarı kapalı, bir diğer adıyla Crank Nicholson yönteminin uygulanması anlamına gelmektedir.

Sonlu elemanlar yöntemi uygulaması için matrisel çözüme giden süreçte sürekli bir problemin ve zaman bağlı bir probleme dair (Denklem 3.6'nın), ısı transferinin ilgilendiği bölgede bölüntüleme sonucu oluşan tüm elemanlar için de matris şeklinde sonlu eleman formülasyonu da şöyle oluşmaktadır;

$$\begin{aligned} [K]\{T\} &= \{Q(T)\} & , & \quad \text{Sürekli durum} \\ [C(T)]\{\dot{T}\} + [K(T)]\{T\} &= \{Q(T)\} & , & \quad (\text{Denklem 3.6 için}) \end{aligned} \quad (4.12)$$

Denklem 4.12'de K terimi global iletim matrisini, C terimi global kapasitans matrisini belirtmektedir. İletim katsayısı ve özgül ısı sıcaklığın fonksiyonu olarak belirtilmiştir. Bununla birlikte ağ atama (eleman bölüntüleme) işlemi ile oluşan tüm düğüm noktalarına bu formülasyonun uygulanması ile her bir oluşan elemanın kendine ait iletim ve kapasitans matrisleri bulunarak birleştirilmiş olmaktadır. Global matriste uygun pozisyonuna yazılmasıyla global matris tamamlanmaktadır.

ABAQUS Standard/İmplicit Modülünde Geriye Doğru Euler yöntemi ile 8 düğüm noktalı izoparametrik eleman işlemi gerçekleştirilmektedir. Bunun için Denklem 4.11, Denklem 4.12’de $\tau = 1$ alınarak konulduğunda eşdeğer K matrisi ve eşdeğer Q matrisi formunda yazılabilir [Moaveni, 2015];

$$\left(\frac{1}{\tau\Delta t}[C(T)] + [K(T)]\right)\{T^{t+1}\} = \{Q(T)\} + [C(T)]\left(\frac{1}{\tau\Delta t}\right)\{T^t\} + (1 - \tau)\{T^t\} \quad (4.13)$$

Denklem 4.13 C ve K matrisleri ayrı ayrı incelenerek şöyle ifade edilebilir [Arisoy vd. 2019];

$$[C(T)]\left(\frac{T^{t+1}-T^t}{\Delta t}\right) + [K(T)](\tau T^{t+1} + (1 - \tau)T^t) = \{Q(T)\} \quad (4.14)$$

Kapalı çözümde kararlılık kriteri bulunmuyor olsa da hiçbir elemanın sıcaklık değişiminin atlanmaması adına ağ örgüsü atamayı takiben atanan en küçük elemanın uzunluğunun hıza oranı zaman adımı için belirlenecek en büyük değeri vermektedir. Buna göre hegzagonal ağ yapısında 8 düğümlü izoparametrik elemanla ağ ataması yapıldığından $\Delta x = \Delta y$ eleman boyutu ve v lazer tarama hızı iken aşağıdaki Denklem 4.15 uygulanmıştır;

$$\text{Maks } \Delta t = \frac{\Delta x}{v} \quad (4.15)$$

4.4. Metal Lazer Ergitme 3 Boyutlu Sonlu Eleman Modeli

Bu kısımda 3 boyutlu izoparametrik DC3D8 elemanı baz alınarak sonlu eleman formülasyonu ortaya konulacaktır. Şekil 4.6’da koordinat sistemiyle birlikte 3 boyutlu izoparametrik DC3D8 elemanı ve Fourier kanunu gereği dışa doğru yönelen yüzey normali ile alanlar ve ısı akısı bileşenleri görülmektedir.

$$S_k(y) = \prod_{j=1}^R \frac{y-y_j}{y_k-y_j} = \frac{(y-y_1)(y-y_2) \dots (y-y_R)}{(y_k-y_1)(y_k-y_2) \dots (y_k-y_R)} \quad (4.18b)$$

$$S_k(z) = \prod_{v=1}^W \frac{z-z_v}{z_k-z_v} = \frac{(z-z_1)(z-z_2) \dots (z-z_W)}{(z_k-z_1)(z_k-z_2) \dots (z_k-z_W)} \quad (4.18c)$$

$$L = S_k(x) S_k(y) S_k(z) \quad (4.19a)$$

$$M = \sum_i^P \sum_j^R \sum_v^W S_k(x) S_k(y) S_k(z) f(x, y, z) \quad (4.19b)$$

*i.düğümde=1 ve j,k,l,m,n,o,p.düğümde=0 veren çarpım;
j.düğümde=1 ve i,k,l,m,n,o,p.düğümde=0 veren çarpım;
k.düğümde=1 ve i,j,l,m,n,o,p.düğümde=0 veren çarpım;
l.düğümde=1 ve i,k,j,m,n,o,p.düğümde=0 veren çarpım;
m.düğümde=1 ve i,k,j,l,n,o,p.düğümde=0 veren çarpım;
n.düğümde=1 ve i,k,j,m,l,o,p.düğümde=0 veren çarpım;
o.düğümde=1 ve i,k,j,m,n,l,p.düğümde=0 veren çarpım;
p.düğümde=1 ve i,k,j,m,n,o,l.düğümde=0 veren çarpım;*

$$(4.20)$$

Denklem 4.20'deki şartlara uyan çarpım fonksiyonları, Şekil 4.6'da elemanın orta kısmına yerleştirilmiş doğal koordinatların tanımı üzerinden kolaylıkla bulunmaktadır. Buna göre şekil fonksiyonları aşağıdaki gibi oluşur:

$$\begin{aligned} S_i &= a_1(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta) , \quad S_i(x)=(1-\xi) \text{ ve } S_j(y)=(1-\eta) \text{ ve } S_j(z)=(1-\zeta) \\ S_j &= a_2(1+\xi)(1-\eta)(1-\zeta) , \quad S_i(x)=(1+\xi) \text{ ve } S_j(y)=(1-\eta) \text{ ve } S_j(z)=(1-\zeta) \\ S_k &= a_3(1+\xi)(1+\eta)(1-\zeta) , \quad S_i(x)=(1+\xi) \text{ ve } S_j(y)=(1+\eta) \text{ ve } S_j(z)=(1-\zeta) \\ S_l &= a_4(1-\xi)(1+\eta)(1-\zeta) , \quad S_i(x)=(1-\xi) \text{ ve } S_j(y)=(1+\eta) \text{ ve } S_j(z)=(1-\zeta) \\ S_m &= a_5(1-\xi)(1-\eta)(1+\zeta) , \quad S_i(x)=(1-\xi) \text{ ve } S_j(y)=(1-\eta) \text{ ve } S_j(z)=(1+\zeta) \\ S_n &= a_6(1+\xi)(1-\eta)(1+\zeta) , \quad S_i(x)=(1+\xi) \text{ ve } S_j(y)=(1-\eta) \text{ ve } S_j(z)=(1+\zeta) \\ S_o &= a_7(1+\xi)(1+\eta)(1+\zeta) , \quad S_i(x)=(1+\xi) \text{ ve } S_j(y)=(1+\eta) \text{ ve } S_j(z)=(1+\zeta) \\ S_p &= a_8(1-\xi)(1+\eta)(1+\zeta) , \quad S_i(x)=(1-\xi) \text{ ve } S_j(y)=(1-\eta) \text{ ve } S_j(z)=(1-\zeta) \end{aligned} \quad (4.21)$$

Denklem 4.21'deki herhangi bir eşitlik kullanılarak örneğin i. düğümdeki değerler yerine konularak a katsayılarına erişilebilir;

$$1 = a_1(1 - (-1))(1 - (-1))(1 - (-1)) \rightarrow a_1 = \frac{1}{8} \quad (4.22)$$

Bu yöntem takip edildiğinde tüm a katsayılarının birbirine eşit olduğu ortaya çıkmaktadır. Böylece DC3D8 eleman için sıcaklık bağıntısı her bir şekil fonksiyonu 4.22'deki gibi olmak üzere aşağıdaki gibi elde edilmektedir:

$$T^e = [S_i \ S_j \ S_k \ S_l \ S_m \ S_n \ S_o \ S_p] \begin{bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \\ T_l \\ T_m \\ T_n \\ T_o \\ T_p \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Denklem 4.23 aslında varsayılan yaklaşık çözüm olan Denklem 4.16'nın şekil fonksiyonu cinsinden ifadesidir ve bu ifade 3 boyutlu halde şu şekilde de genelleştirilebilmektedir;

$$T_{yaklaşık}(x,y,z) = \sum_{i=1}^n T_i S_i(x,y,z) \quad (4.24)$$

Sonlu eleman çözümünde Galerkin ağırlıklı kalıntı yöntemi kullanılırken, belirli ağırlık fonksiyonları gerekmekte olduğu hatırlanırsa, bu ağırlık fonksiyonlarının da varsayılan 4.16 çözümünün bileşeni olması gerektiği hatırlanırsa, şekil fonksiyonlarının çok isabetli ağırlık fonksiyonları olacağı anlaşılmaktadır. Bu aşamadan sonra şekil fonksiyonlarının türevli terimlerinin izoparametrik eleman için çözümlenmesi ileride kullanılmaları öncesi hazırlanmış olduğu için burada verilmiştir. Bu amaçla türev zincir kuralı 3 boyutlu olarak uygulanabilir ve matris Jakobiyen kullanılarak transformasyon matrisi olarak yazılabilir;

$$\begin{aligned} \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial \xi} &= \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \xi} + \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial \eta} &= \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta} + \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial \zeta} &= \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \zeta} + \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \zeta} + \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{aligned} \quad (4.25)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial \xi} \\ \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial \eta} \\ \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial \zeta} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix}}_{Jacobian} \begin{pmatrix} \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial x} \\ \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial y} \\ \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (4.26)$$

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial x} \\ \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial y} \\ \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial z} \end{Bmatrix} = J^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial \xi} \\ \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial \eta} \\ \frac{\partial S(x,y,z)}{\partial \zeta} \end{Bmatrix} = TR \quad (4.27)$$

Şekil fonksiyonlarının türevli ifadeleri de böylece elde edilmiş olmaktadır. Burada önemli olan konu Jacobian matrisleri kullanımıyla, şekil fonksiyonlarının türevlerinin eldesinin amacının lokal ve doğal koordinat sistemleri dönüşümün sağlanması olduğudur. Bu ise Gauss Kuadratörleri yöntemiyle DC3D8 eleman için sayısal integrasyonun daha önce belirtildiği üzere -1,1 aralığında alınmasını sağlamaktadır. Bu noktadan itibaren Galerkin Ağırlıklı Kalıntı Yöntemi herhangi bir 8 düğümlü 6 yüzlü DC3D8 elemanın her düğümü için uygulanmaya başlanabilir;

$$\begin{Bmatrix} R_i^e = \int_V \phi_i \left(\rho(T) C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} - k(T) \left(\frac{\partial^2 T}{x^2} + \frac{\partial^2 T}{y^2} + \frac{\partial^2 T}{z^2} \right) - \dot{q} \right) dV \\ R_j^e = \int_V \phi_j \left(\rho(T) C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} - k(T) \left(\frac{\partial^2 T}{x^2} + \frac{\partial^2 T}{y^2} + \frac{\partial^2 T}{z^2} \right) - \dot{q} \right) dV \\ R_k^e = \int_V \phi_k \left(\rho(T) C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} - k(T) \left(\frac{\partial^2 T}{x^2} + \frac{\partial^2 T}{y^2} + \frac{\partial^2 T}{z^2} \right) - \dot{q} \right) dV \\ R_l^e = \int_V \phi_l \left(\rho(T) C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} - k(T) \left(\frac{\partial^2 T}{x^2} + \frac{\partial^2 T}{y^2} + \frac{\partial^2 T}{z^2} \right) - \dot{q} \right) dV \\ R_m^e = \int_V \phi_m \left(\rho(T) C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} - k(T) \left(\frac{\partial^2 T}{x^2} + \frac{\partial^2 T}{y^2} + \frac{\partial^2 T}{z^2} \right) - \dot{q} \right) dV \\ R_n^e = \int_V \phi_n \left(\rho(T) C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} - k(T) \left(\frac{\partial^2 T}{x^2} + \frac{\partial^2 T}{y^2} + \frac{\partial^2 T}{z^2} \right) - \dot{q} \right) dV \\ R_o^e = \int_V \phi_o \left(\rho(T) C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} - k(T) \left(\frac{\partial^2 T}{x^2} + \frac{\partial^2 T}{y^2} + \frac{\partial^2 T}{z^2} \right) - \dot{q} \right) dV \\ R_p^e = \int_V \phi_p \left(\rho(T) C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} - k(T) \left(\frac{\partial^2 T}{x^2} + \frac{\partial^2 T}{y^2} + \frac{\partial^2 T}{z^2} \right) - \dot{q} \right) dV \end{Bmatrix} \quad (4.28)$$

Denklem 4.28'de ϕ ağırlık fonksiyonları yerine yaklaşık çözümün bileşeni olması itibariyle ve daha önce bahsedilen işlem kolaylığı sağlayıcı özellikleri sebebiyle şekil fonksiyonları yazılarak eleman bazında Denklem 4.28 kısa matrisel formda yazılabilmektedir;

$$\{R^e\} = \int_V [S]^T \left(\rho(T) C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} - k(T) \left(\frac{\partial^2 T}{x^2} + \frac{\partial^2 T}{y^2} + \frac{\partial^2 T}{z^2} \right) - \dot{q} \right) dV \quad (4.29)$$

Denklem 4.49 temel olarak 5 integral teriminden oluşmaktadır;

$$\begin{aligned}
 & - \int_V k(T) [S]^T \frac{\partial^2 T}{x^2} dV \quad , \quad - \int_V k(T) [S]^T \frac{\partial^2 T}{y^2} dV \quad , \quad - \int_V k(T) [S]^T \frac{\partial^2 T}{z^2} dV \\
 & \quad \overbrace{\hspace{1.5cm}}^{\text{integral 1}} \quad \overbrace{\hspace{1.5cm}}^{\text{integral 2}} \quad \overbrace{\hspace{1.5cm}}^{\text{integral 3}} \quad (4.30) \\
 & \int_V \rho(T) C_p(T) [S]^T \frac{\partial T}{\partial t} dV \quad , \quad - \int_V \dot{q} [S]^T dV \\
 & \quad \overbrace{\hspace{1.5cm}}^{\text{integral 4}} \quad \overbrace{\hspace{1.5cm}}^{\text{integral 5}}
 \end{aligned}$$

Öncelikle $k(T) = K$, $C_p(T) = C$, $\rho(T) = \rho$ tanımlamaları geçerli varsayılmıştır. Denklem 4.30'da ilk 3 integral teriminde diferansiyel mertebenin düşürülmesi işlemi için Denklem 4.31'deki türev zincir kuralı gereği Denklem 4.52 elde edilir [Moaveni, 2015];

$$\left\{ \begin{aligned} -K[S]^T \frac{\partial^2 T}{x^2} &= K \frac{\delta}{\delta x} \left([S]^T \frac{\delta T}{\delta x} \right) - \left(K \frac{\delta [S]^T}{\delta x} \frac{\delta T}{\delta x} \right) \\ -K[S]^T \frac{\partial^2 T}{y^2} &= K \frac{\delta}{\delta y} \left([S]^T \frac{\delta T}{\delta y} \right) - \left(K \frac{\delta [S]^T}{\delta y} \frac{\delta T}{\delta y} \right) \\ -K[S]^T \frac{\partial^2 T}{z^2} &= K \frac{\delta}{\delta z} \left([S]^T \frac{\delta T}{\delta z} \right) - \left(K \frac{\delta [S]^T}{\delta z} \frac{\delta T}{\delta z} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4.31)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \text{Birinci integral} &\rightarrow - \int_V K \frac{\delta}{\delta x} \left([S]^T \frac{\delta T}{\delta x} \right) dV + \int_V \left(K \frac{\delta [S]^T}{\delta x} \frac{\delta T}{\delta x} \right) dV \\ \text{İkinci integral} &\rightarrow - \int_V K \frac{\delta}{\delta y} \left([S]^T \frac{\delta T}{\delta y} \right) dV + \int_V \left(K \frac{\delta [S]^T}{\delta y} \frac{\delta T}{\delta y} \right) dV \\ \text{Üçüncü integral} &\rightarrow - \int_V K \frac{\delta}{\delta z} \left([S]^T \frac{\delta T}{\delta z} \right) dV + \int_V \left(K \frac{\delta [S]^T}{\delta z} \frac{\delta T}{\delta z} \right) dV \end{aligned} \right\} \quad (4.32)$$

$\overbrace{\hspace{1.5cm}}^{\text{birinci terimler}} \quad \overbrace{\hspace{1.5cm}}^{\text{ikinci terimler}}$

$\dot{q}$ terimi birim hacim eleman başına ısı akısıdır. 3 boyutlu bir eleman olarak ve Denklem 3.6'nın enerji dengesinden çıkarıldığı hatırlanarak, birim hacim elemanına enerji dengesi uygulanmasıyla q_{lazer} terimi birim hacim başına ısı akısını ifade eden $\dot{q}$ terimine dönüşmektedir. Denklem 4.32'de 3 integralin de birinci terimleri elemanın yüzey sınırları boyunca alınan alan integralleri cinsinden yazılarak, sınır şartlarının uygulanmasına hazır hale getirilmelidir. Green Teoremi bu amaçla kullanılmaktadır. İkinci terimleri ise sıcaklığın türevi

de şekil fonksiyonlarının türevi anlamına geldiğinden kolaylıkla açılabilir. İkinci terimleri açmak için sıcaklığın şekil fonksiyonunun türevi açılır [Muaveni, 2015];

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\delta T}{\delta x} = \frac{\delta}{\delta x} [S_i \ S_j \ S_k \ S_l \ S_m \ S_n \ S_o \ S_p] \begin{bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \\ T_l \\ T_m \\ T_n \\ T_o \\ T_p \end{bmatrix} \\ \frac{\delta T}{\delta y} = \frac{\delta}{\delta y} [S_i \ S_j \ S_k \ S_l \ S_m \ S_n \ S_o \ S_p] \begin{bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \\ T_l \\ T_m \\ T_n \\ T_o \\ T_p \end{bmatrix} \\ \frac{\delta T}{\delta z} = \frac{\delta}{\delta z} [S_i \ S_j \ S_k \ S_l \ S_m \ S_n \ S_o \ S_p] \begin{bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \\ T_l \\ T_m \\ T_n \\ T_o \\ T_p \end{bmatrix} \\ \frac{\delta [S]^T}{\delta x} = \frac{\delta}{\delta x} \begin{bmatrix} S_i \\ S_j \\ S_k \\ S_l \\ S_m \\ S_n \\ S_o \\ S_p \end{bmatrix} \\ \frac{\delta [S]^T}{\delta y} = \frac{\delta}{\delta y} \begin{bmatrix} S_i \\ S_j \\ S_k \\ S_l \\ S_m \\ S_n \\ S_o \\ S_p \end{bmatrix} \\ \frac{\delta [S]^T}{\delta z} = \frac{\delta}{\delta z} \begin{bmatrix} S_i \\ S_j \\ S_k \\ S_l \\ S_m \\ S_n \\ S_o \\ S_p \end{bmatrix} \end{array} \right\} \quad (4.33)$$

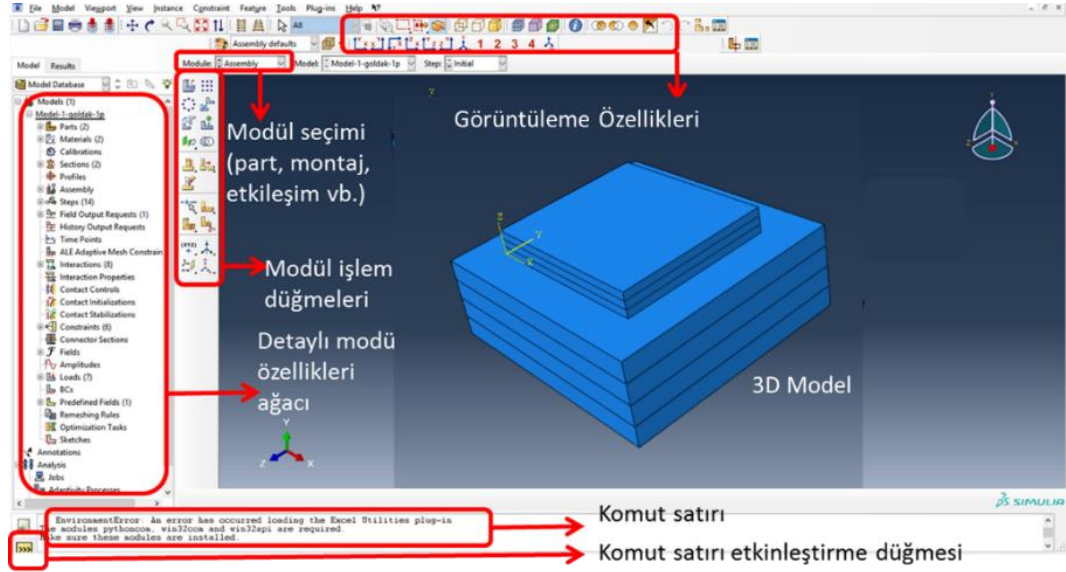
Denklem 4.33'teki şekil fonksiyonları Denklem 4.21 ve 4.22'den elde edilmiştir. Elde edilen şekil fonksiyonları doğal koordinatlar cinsinden iken Denklem 4.33'te

lokal koordinatlar cinsinden yazılan ilişkide bir dönüşüm gerektiği açıktır. Bu dönüşümün yapılması için Denklem 4.27'deki TR dönüşüm matrisi bir çarpan olarak kullanılmaktadır. ABAQUS sonlu elemanlar arayüzünde Gauss Kuadratürü cinsinden bu integrallerin nümerik hesaplamaları 3 boyutlu yapılarak (3 boyutlu Gauss Kuadratürü hesaplaması yapılırken Bölüm 3.7'deki başlangıç ve sınır şartları geometri üzerinde tanımlanmak suretiyle dikkate alınarak) sonuçlar elde edilmektedir.

4.5. Ti6Al4V Malzeme İçin ABAQUS Yazılımı Arayüzünde Metal Lazer Ergitme Modelinin Kurulması

ABAQUS bir sonlu elemanlar yazılımı olup, çeşitli mühendislik problemlerinin sonlu elemanlar temelinde çözümüne olanak tanımaktadır. Bu problem çeşitleri arasında mekanik ve ısı problem çeşitlerinden; zamana bağlı veya statik ısı transferi problemleri, dinamik problemler, gerilme ve gerinme analizi, talaş kaldırma modellemeleri ve kuvvet analizi gibi daha birçok mühendislik problemi ABAQUS yazılımının sahip olduğu modüller sayesinde modellenabilmektedir. Oluşturulan modeller alt yordam adı verilen (subroutine) alt kodlar hazırlanıp sonlu eleman çözümü sırasında çağırılarak özel çözümler de uygulanabilmektedir. Bu tez/proje kapsamında ele alınan metal lazer ergitme sırasındaki sıcaklık dağılımları ve ergiyik havuzu ölçülerinin belirlenmesi için 3 boyutlu zamana bağlı ısı transferi problemi çözümü ABAQUS ortamında problem 3 boyutlu halde modellenerek yapılmıştır. Bu çözüm yapılırken DFLUX, USDFLD alt yordam kodları hazırlanarak hareketli 3 boyutlu ısı kaynağı ve faz değişimi modellenmiştir. Bu kısımda da ABAQUS yazılımında yapılan işlemler anlatılmaktadır.

Şekil 4.7'de ABAQUS programı açıldığında karşılaşılan arayüz görülmektedir. İlk açılışta bu tezin konu edindiği problem için Standard/Explicit Modülü seçilmiştir.

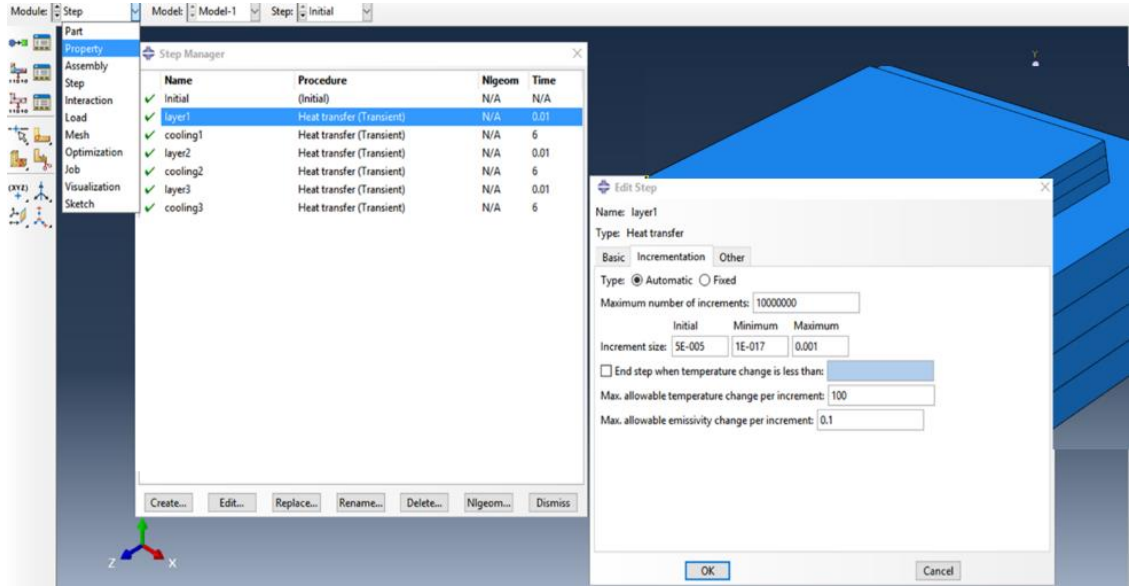


Şekil 4.7. ABAQUS karşılama penceresi

Modelin tabla kısmı $10 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ ve katman 0.03 mm olarak oluşturulduktan sonra malzeme özellikleri kısmına Ti6Al4V için Bölüm 3'te ele alınmış malzeme özellikleri girilmiştir. İletkenlik, yoğunluk, özgül ısı ve gizli ısı değerleri hem katı hem toz için girilmiştir. Akabinde toz ve sıvı katmanını için 0 girilmiş olup, katılaşmış elementleri temsil için 1 rakamı girilmektedir. Ergime noktası sonrasında özellikler birebir aynı (sıvı faz) girilmektedir.

Sonraki adımda oluşturulmuş tabla ve katman montajlanmıştır. Montajlama sırasında 1 kere oluşturulmuş katman parçası çoğaltılarak üst üste montajlama ile tabla üzerinde 10 katman elde edilmiş ve orijin noktası oluşturulacak DFLUX alt yordamına uygun bir noktaya konumlandırılmıştır.

Montaj işlemi tamamlandıktan sonra zaman adımları modülüne geçilebilmektedir. Bu modülde lazer ışınının bir çizgi veya 4 çizgiyi tamamlayacağı süre ve bu sürenin alt adımlarının en büyük en küçük değerleri belirlenmiştir. Şekil 4.8'de ilgili ayarlar görülmektedir.



Şekil 4.8. Zaman adımı ayarlamaları pencereleri

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi 10 adet katman oluşturmada kullanılan 0.01 saniyelik adım ve 10 adet sericinin toz serme zamanının modellenmesi için oluşturulan 6’şar saniyelik adım görülmektedir. Zaman adımı belirlenirken atanan ağ eleman boyutunu lazer ışınının belirli bir zamanda geçmesi ve hiçbir elemanın atlanılmamasına dikkat edilmiştir. Literatür bölümünde örnekleri belirtilmiş bu yöntemle göre örneğin imalat tablası uzunluğu 0.001 mm ve tarama hızı 1 m/s iken ;

$$\Delta t = \frac{L}{v} = \frac{0.01}{1} = 0.01 \text{ s} \quad (4.34)$$

olarak gerçekleşmektedir. Hassas bir sıcaklık tahmini açısından ağ atama için belirlenen eleman sayısı 80 μm lazer ışın çapı 10 elemanı kapsayacak şekilde ayarlandığında her eleman için zaman adımı;

$$\Delta t_{\text{eleman}} = \frac{0.000008}{1} = 8e - 6 \text{ s} \quad (4.35)$$

olarak literatürde belirlenmiş soğuma oranları ve zaman adımları (bölüm 3) dikkate alındığında her bir elemanın 1 saniye içindeki soğuma miktarını hesaplayabilecek bir rakam olarak oluşmaktadır. Zaman adımı oluşturulduktan

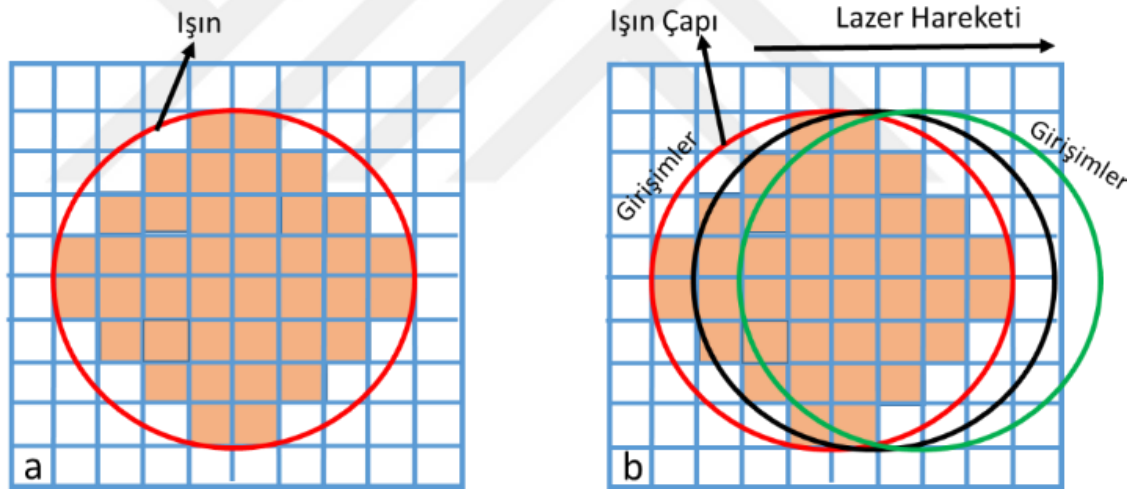
sonra elemanların doğumu ve taşınım/ışınım şartlarının belirlenmesi adımı için interaction modülüne girilmiştir.

Daha sonra taşınım katsayısı olarak Bölüm 3'te belirlenmiş ortalama $20 \text{ W/m}^2\text{K}$, ortam sıcaklığı olarak 360 K (tabla ısıtma etkin olarak) her katmanın en üst yüzeyinden taşınım olacak şekilde girilmiştir. Işınım için de benzer pencereden emissivite değeri için sıcaklığa bağlı ilgili denklem $f(x)$ düğmesine tıklanarak açılan pencerede girilerek sıcaklığa bağlı ışıınım etkisi uygulanmıştır.

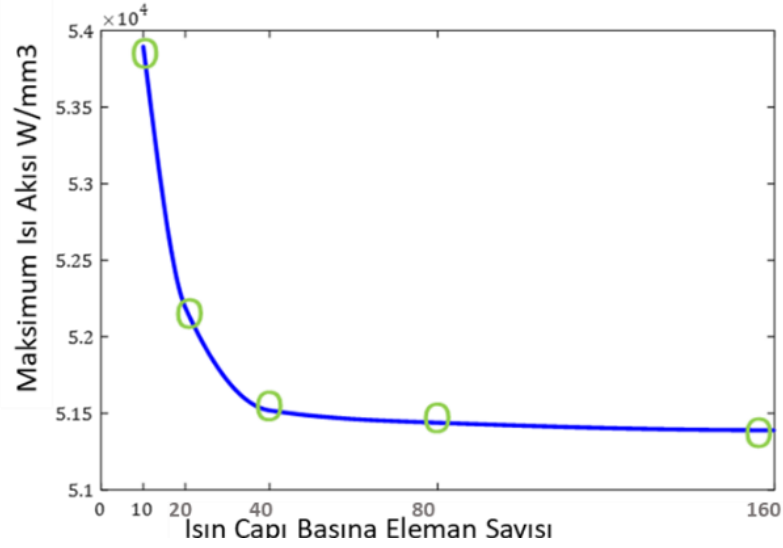
ABAQUS yazılımı dahilinde element doğum/ölüm (birth/death) tekniği ile eklemeli imalat modellenenbilmektedir. Bu teknikte, tüm katmanlar öncelikle modellenerek oluşturulmuştur. Ardından, istenilen zaman adımıında ilk katman aktif et düğmesine tıklanarak aktif edilmektedir. Böylelikle katmana property modülünde atanmış malzeme özellikleri kazandırılmaktadır. Bunu takiben bu eleman zaman adımı sonunda deaktif olmakta, 2. katman bu sırada deaktifken, 1. zaman adımı sonunda yani ilk katman oluşmunun sonunda aktif edilerek malzeme özellikleri bu kez 2. katmana kazandırılmaktadır.

Gaussian ve Goldak Hacimsel ısı akısı uygulamaları için Load modülü kullanılmıştır. Buna göre Gaussian ısı akısı için her bir katmanın üst yüzeyi, Goldak ısı akısı için her bir katman hacmi seçilerek aşağıya doğru ısı akısı üniform dağılımlı fakat DFLUX alt yordamıyla kararlaştırılan değerde uygulanmıştır. Diğer katmanlar için de seçimler yapılarak ilgili katmanın yüzeyi ve Goldak hacimsel yükü için hacmi seçilerek ilgili katmanın kalan adımlarında inaktive düğmesine tıklanarak aktif sadece o zaman adımıında lazer ışıının DFLUX alt yordamı ile gezdirilmesi sağlanmıştır. Bu noktada model ağ yapısı atamaya hazır hale gelmiştir. Mesh isimli modül içerisinde çoklu çizgi içeren modeller için ağ ataması gerçekleştirilmiştir. Eleman boyutu bir lazer ışıın çapı içerisinde 8 eleman gelecek şekilde $0.001 \times 0.001 \times 0.001 \text{ mm}$ olarak belirlenmiştir. Şekil 4.9'da lazer ışıın çapı eleman ilişkisi görülmektedir. Tek çizgi benzetiminde lazer ışıının gezdirileceği bölgede bahsedilen boyutlarda eleman atanırken dış sınırlara doğru benzetim zamanı ve iş yükünün azaltılması için kabalaştırılmış ağ eleman yapısı en kaba eleman 0.1 mm olacak şekilde kullanılmıştır. 4 çizgi benzetimlerinde ise

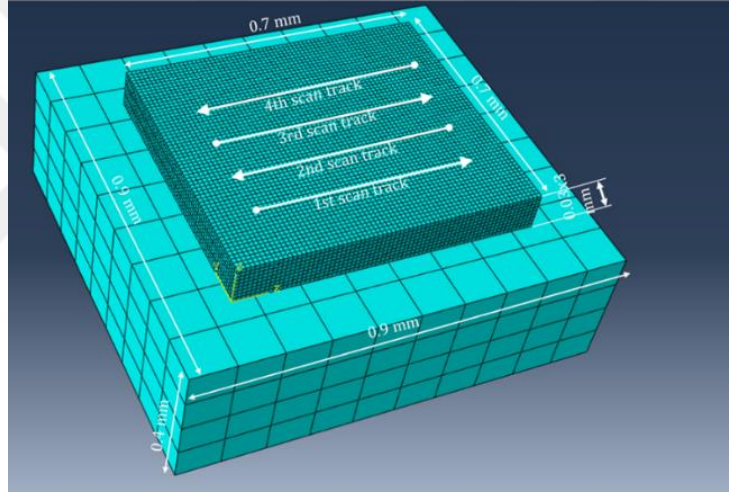
katman yüzeyinin tamamı lazer ışınının gezdiği çekirdek bölge ve ısıdan etkilenen alanlar tarafından kullanıldığı için $0.001 \times 0.001 \times 0.001$ mm elemanlarla atanmıştır. İmalat tablasında ise tablanın yüzeyinden tabanına doğru 0.03 mm'den 0.5 mm'ye kadar kabalaşan ağ yapısı kullanılmıştır. Tablanın yalnızca 0.2-0.3 mm derinlikteki kısmı ergiyik havuzu ve ısıdan etkilenen bölge barındırdığı için kabalaştırma yapılmıştır. Bu ağ eleman boyutu belirlenme sürecinde ağ boyut analizi yöntemi takip edilerek, iş yükünü azaltmak, benzetim süresini en aza indirmek amacıyla $40 \times 40 \times 10$ μ m boyutlu elemanlardan başlanarak $\frac{1}{2}$ oranla ilerlenip $5 \times 5 \times 10$ μ m boyutlu ağ elemanına kadar deneme benzetimleri yürütülmüş ve sonuçta Şekil 4.10 grafiği elde edilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere, en fazla ısı akısı değeri ışın çapı başına 8 tam eleman konfigürasyonundan itibaren sabitlenmeye yakın bir davranış sergilemektedir. Bu yüzden eleman boyutu $10 \times 10 \times 10$ μ m olarak seçilmiştir. Şekil 4.11'de ise ağ yapısı atanmış model verilmektedir.



Şekil 4.9. Lazer ışını ağ eleman boyutu ilişkisi a) birim lazer çapı başına eleman boyutu b) ışın ilerleme hareketinde elemanlar



Şekil 4.10. Ağ elemanı analizi sonucu ısı akısının eleman sayısı ile değişimi



Şekil 4.11. Ağ yapıları : 4 çizgi taramalı benzetim

Ağ yapısı sonrasında son olarak iş oluşturma modülünde ilgili alt yordam seçilerek iş oluşturmak gerekmektedir. Bu amaçla Job modülünde DFLUX ve USDFLD kodlarını içeren alt yordam. for uzantılı olarak çağırılmıştır. ABAQUS yazılımı python kodlama sistemi tabanında oluşturulmuş ve kurulan modelleri de bu sistemde oluşturmaya imkan sağlamaktadır. Fakat özel mühendislik problemlerinde ve bu tez çalışmasında incelenen hareketli ısı kaynağı ve çevresiyle ısı transferi etkileşimi probleminde, FORTRAN altyapısında hazırlanan alt yordamlar kullanılarak problem çözümü yaklaşımı uygulanmaktadır. Bu alt yordamlar FORTRAN dilinde hazırlanarak Job modülünden. for uzantılı bir dosya

olarak çağırılmaktadır. Bu çalışmada hareketli ısı akısı kaynağı olan lazer ışınının tek bir çizgide ve 4 yan yana çizgide gezdirilmesi için 2 ayrı DFLUX alt yordamı hazırlanmıştır. Ayrıca lazer ışınının her geçtiği eleman soğuduktan sonra ergiyik havuzu fazından sonra katı faza dönüşmektedir. Üstelik bu sıvı-katı faz dönüşüm başlamadan önce de toz fazı özelliklerindedir. Bu faz dönüşümü durumunu modelleyebilmek için de USDFLD alt yordamı hazırlanmıştır. Altyordamların içerisine kullanılan Goldak hacimsel ısı akısı denkleminin yanısıra denenecek parametreler ve absorbtivite değeri girilmektedir. Çizelge 4.1’de bu çözümünde Ti6Al4V malzeme için kullanılan parametreler Çizelge halinde sunulmaktadır.

Çizelge 4.1. Ti6Al4V malzeme için kullanılan parametreler

Lazer Gücü (W)	130-150-170 - 190	Solidus-Likidus Noktaları (°C)	1600, 1650,
Tarama Hızı (m/s)	0.75 - 1 - 1.25 - 1.5	Buharlaşma Noktası (°C)	2860
Çizgiler Arası Mesafe (mm)	0.08 - 0.1 - 0.12	Yanma ve Buhar Gizli Isısı (J/kg)	295000, 9860000
Işın Çapı (mm)	0.08	Gözeneklilik (%)	30
Katman Kalınlığı (mm)	0.03	Ortalama Absorptivite (%)	70
Metal Toz Hammadde	Ti6Al4V	Emissivite (%)	70

4.6. 316L İçin ABAQUS Yazılımında Metal Lazer Ergitme Modeli

316L modelinin tüm süreçleri yukarıda Ti6Al4V malzeme için anlatılan süreçlerle birebir aynı olup, tek farklı nokta Goldak Çift Eliptik hareketli ısı kaynağı modelinin parametreleri ve malzeme özellikleridir. Çizelge 4.2’de 316L için uygulanmış özellikler verilmiştir. Diğer bütün süreçler yukarıda anlatıldığı gibi yürütülmüştür.

Çizelge 4.2. 316L malzeme için kullanılan parametreler

Lazer Gücü (W)	130-150-170 - 190	Solidus-Likidus Noktaları (°C)	1397, 1450,
Tarama Hızı (m/s)	0.75 - 1 - 1.25 - 1.5	Buharlaşma Noktası (°C)	2527[Pitchler vd, 2020]
Çizgiler Arası Mesafe (mm)	0.06-0.08 - 0.1 - 0.12	Yanma ve Buhar Gizli Isısı (J/kg)	273000-6150000 [Mills , 2002;Wood vd., 1964]
Işın Çapı (mm)	0.15	Gözeneklilik (%)	40
Katman Kalınlığı (mm)	0.05	Ortalama Absorptivite (%)	50
Metal Toz Hammadde	316L	Emissivite (%)	60

Ti6Al4V malzemeye benzer şekilde uygun bir zaman adımı seçilmesi için Denklem 4.36 uygulanmıştır;

$$\min \Delta t = \frac{\Delta x}{v} = \frac{0.01 \text{ mm}}{1900 \text{ mm/s}} = 5 \times 10^{-6} \text{ s} \quad (4.36)$$

5. LAZER ERGİTME CİHAZININ GELİŞTİRİLMESİ

Bu tez çalışması kapsamında deneysel çalışmalar için kurulan sonlu eleman modelinin doğrulanmasına yönelik 2 yöntem takip edilmiştir. İlk yöntem, EOS M280 metal lazer ergitme cihazı ile argon koruyucu gaz atmosferinde Ti6Al4V tozlarından çizgi deneysel imalatlarının yapılması düşünülmüştür. Diğer planlanan yöntemde ise toz ön ısıtma özelliğine sahip, bu sıcaklığın kapalı çevrimli halde kontrol edilebildiği, bir metal lazer ergitme cihazı imalatı ve kontrolüdür. TÜBİTAK 1001 Projesi kapsamında geliştirilen ve tasarımı, montajı, imalatı ve kontrolü yapılan bir metal lazer ergitme cihazı ile 316L paslanmaz çelik tozlarının azot koruyucu gaz atmosferinde imal edilmesi planlanmıştır. Proje ekibi tarafından geliştirilen bu cihaz 316L tozu kullanımı için tercih edilmiştir. Dolayısıyla tezin bu bölümünde ilk olarak metal lazer ergitme cihazı tasarımı ve cihazın imalatına ve bu cihazla 316L tozları kullanılarak yapılan imalatlara, sonrasında ise Ti6Al4V tozlarından EOS M280 ticari ithal cihazıyla yapılan imalat detaylarına, dair detaylara yer verilmiştir. Bunları takiben son kısımda ise parça ölçekli benzetim ve doğrulama amaçlı özel bir geliştirme sürecine sahip Grafik Teorisi ve sonuçları açıklanmıştır.

5.1. Lazer Ergitme Cihazı Tasarımı

Bu mekanik sistemler ise tez planına uygun olarak;

- ❖ Ana gövde, besleyici, serici, imalat tablası alt sistem tasarımları
- ❖ Lazer optik sistem-soğutma sistemi-koruyucu gaz sistemi tasarımı

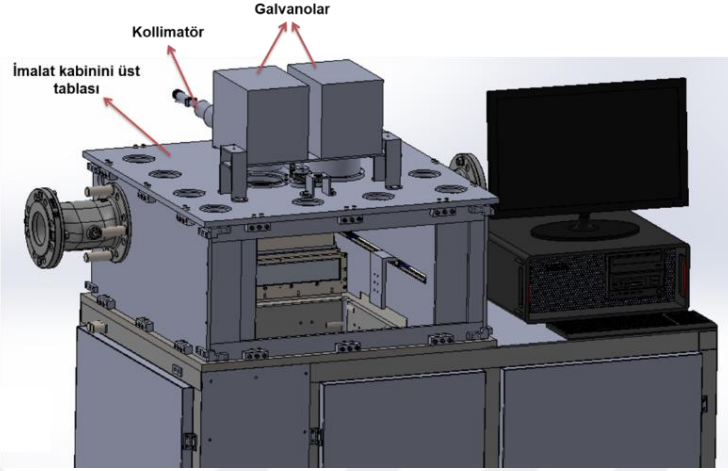
şeklinde yürütülmüştür. Bunu takiben her alt sistemin imalat detayları da bu sıra ile montaj başlığında tamamlanmıştır.

5.1.1. Ana gövde tasarımı

Ana gövde tasarımı yapılırken profil malzeme ve saclarla ana şasi oluşturulmuştur. Kullanılan profil malzemesi bu bölümün devamında sunulacak olan statik analizlerin sonuçlarına göre 50x50x3 mm'lik standart profil olarak seçilmiştir. Seçilen profillerin ana gövde tasarımı için nasıl konumlandırılacağı kullanılacak olan ekipmanların pozisyonlarına ve en ergonomik tasarıma (hafiflik

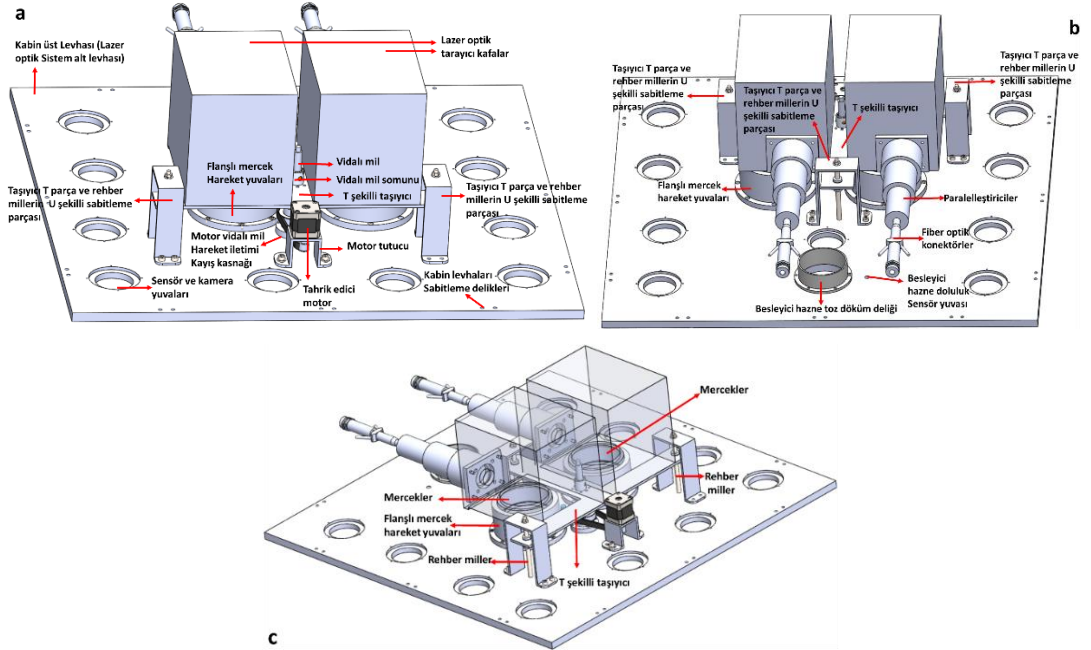
ve boyutsal büyüklük) göre kararlaştırılmıştır. Bu kriterler doğrultusunda ana gövde tasarımını şekillendiren ekipmanlardan ilki galvano tarayıcı kafalar, lazer ışınının toz yatağındaki kontrolünü sağlayan hareketli mercekler ve ana lazer kaynağından gelen lazer ışınlarını paralelleştiren kollimatör bileşenlerinden oluşan lazer optik sistemdir. Tez kapsamında çift lazerli bir çalışma yapılacağından iki adet lazer optik sistem yan yana yerleştirilmiştir. Yan yana yerleştirilen lazer optik sistem, imalat tablasını tam ortalayacak şekilde imalat kabininin üst levhasına pozisyonlandırılmıştır. Bununla birlikte lazerler, imalat tablası yüzeyinde düşey olarak z ekseninde çalışacaklarından dolayı ana gövde tasarımının en üst kısmına yerleştirilmiştir. Orta kısımlarına ise toz besleme alt sistemi tasarımında da değinileceği üzere toz döküm (haznesi) ile doluluk sensörü konumlandırılmıştır. Şekil 5.1’de Lazer optik sistemin imalat kabininin üst tablasına yerleştirilmiş şekli gösterilmiştir. Seçilen 2 adet Yb Fiber türde 500 W değerinde nominal güce sahip 2 adet lazer güç kaynağının çizimi Şekil 5.2’de ana gövde içerisindeki konumunda görülmektedir. Bu güç kaynaklarından fiber optik kablo ile tarayıcı kafalara iletilen lazer ışını, Şekil 5.2b’de görüleceği üzere öncelikle QBH-8 tipinde bir konektör ile paralelleştirici ekipmana iletilmektedir. Kollimatör adı verilen ve aynı şekil üzerinde katı modeli görülebilecek bu eleman 150 mm odak uzunluğunda 50 mm mercek çapında seçilerek gerekli lazer hesaplamalarında ışının kırılmamasını ve düz bir çizgi halinde dağılmadan tarayıcı kafaya ulaştırılmasını sağlayacaktır. Bağlantı ve paralelleştirici konumları ve montaj hali Şekil 5.2b’de verilmektedir. Bu noktadan sonra paralelleştirici doğrudan tarayıcı kafalara montajlanarak ışın, tarayıcı kafa içerisindeki motorlu aynalara çizilen katı model geometrisine göre toz üzerine yansıtılmak üzere iletilmektedir. Galvanometre adı verilen tarayıcı kafaların her biri 30 mm ışın giriş çapında, en fazla 300 Hz çalışma frekansında, 24 V DC girişli 2.5 A akım oranında çalışabilen, 15° tarama açı aralığında ve su soğutma imkanına sahip olarak seçilmiştir. Tarayıcı kafaların ucunda ise son odaklamayı sağlayacak olan F-theta lensler kabin ve içerisindeki serici besleyici alt sistemlerin boyutları göz önünde bulundurularak 430 mm odak uzunluğunda seçilmiştir. Bu lensler Şekil 5.2c’de hareketli mercek yuvaları içerisinde hareket edecek durumda tasarlanmış mercekler olarak verilmektedir. Şekil 5.3 a, b ve

c’de seçilen ve temin edilen tarayıcı kafalar, lazer güç kaynağı ile konektörü ve paralelleştiricilerin, F-theta lenslerin gerçek görüntüleri görülmektedir.

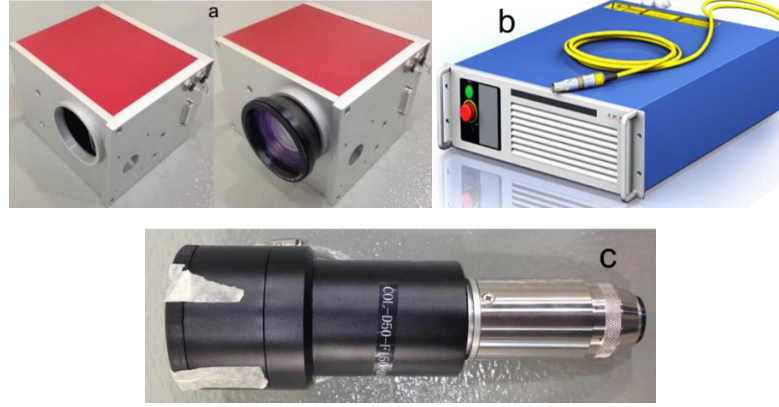


Şekil 5.1. Lazer optik sistemin ana gövde tasarımı üzerindeki pozisyonu

Galvano adı verilen tarayıcı kafalar ve kullanılan merceklerin oluşturduğu lazer optik sistemin serilecek toz üzerine lazer ışınımı belirli bir mesafeden düşürmesi gerekmektedir. Bu nedenle odak uzunluğu adı verilen bu uzunluğun tam olarak ayarlanabilmesi zorunludur. Odak uzunluğu ayarlama mekanizması Şekil 5.2 a, b ve c’de verilmektedir.



Şekil 5.2. Lazer optik sistem odak uzunluğu ayarlama mekanizması a) önden görünüş b) arkadan görünüş c) taşıyıcı parçanın gösterilmesi



Şekil 5.3. Lazer optik bileşenler a)tarayıcı kafalar ve f-theta lens b) yb fiber güç kaynağı ve QBH-8 konektörü c) paralelleştirici

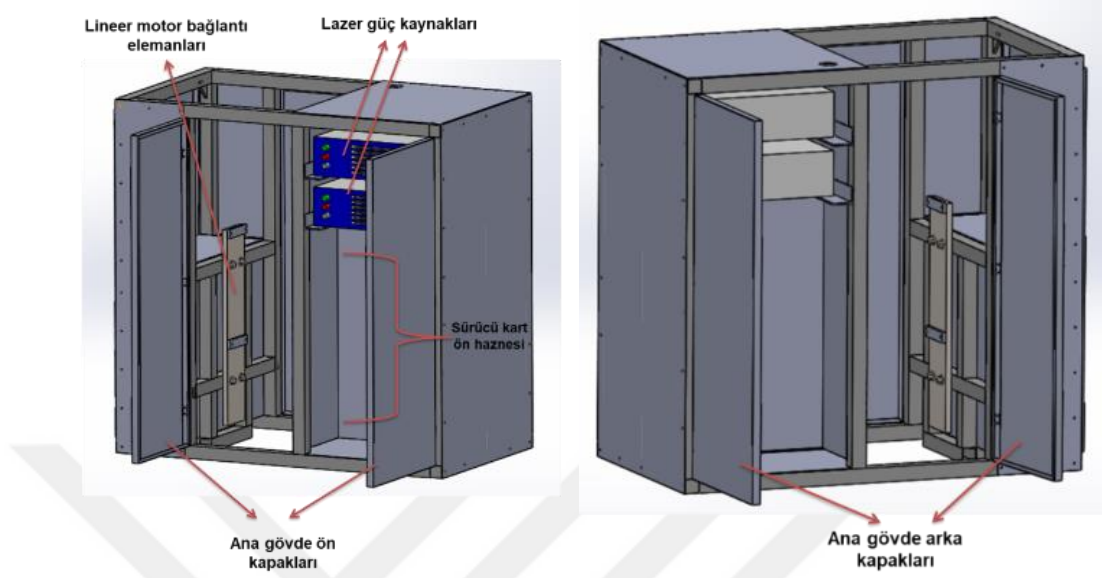
Öncelikle lazer güç kaynağından gelen fiber optik konektör paralelleştiriciye takılarak, paralelleştirici vasıtasıyla bu konektörün tarayıcı kafalara takıldığı bir tasarım yapılmıştır. Yan yana durmakta olan 2 adet tarayıcı ayna kafaların alt kısımlarına takılan yansıtıcı merceklerin (F-theta lenslerin), hareket esnasında ortama açık olmaması için flanşlı mercek hareket yuvaları tasarlanmıştır. Bu parçalar kabin üst levhasına flanşlarından montajlanacak şekilde planlanmıştır. Hareket için ise step motor-kayış kasnak iletim sistemi-vidalı mil mekanizması şeklinde bir kombinasyon tasarlanarak katı model halinde montajlanmıştır. Bu sistemde öncelikle motor döndürüldüğünde kayış kasnak iletimiyle bu dönüş hareketi vidalı mile aktarılmaktadır. Vidalı milin üzerinde takılı bulunan lineer bilyalı somun, T şekil verilmiş bir saca sabitlenmiştir. Bu sac 2 tarayıcı kafanın da altından geçerek tarayıcı kafaları, dolayısıyla bu tarayıcılara takılı lensleri hareket sırasında taşıma görevini yapacaktır. T şekli verilmesinin sebebi, yukarı aşağı hareket esnasında 3 noktadan hareketin desteklenmesi ve rehber millerle 3 noktadan harekete yataklık edilmesi gerekliliğidir. Böylece kesin olarak belirlenemeyen toplam yükün ağırlık merkezi 3 noktalı bir yataklama ile muhtemel kasıntılardan uzak tutulmaktadır. Şekil 5.1’de de görüldüğü gibi ana gövde tasarımının en üst kısmına, lazer optik bileşenlerin altına denk gelecek durumda imalat kabini yerleştirilmiştir. Bu imalat kabininin alt tablası da mekanik olarak imalat tablası, tabla zarfı, serici grubu ve besleyici grubu bileşenlerini taşımaktadır. Bu yüzden bu bileşenleri üzerinde taşıyan serme platformu doğrudan ana gövde profillerinin üzerine yerleştirilmiştir. Bununla

birlikte hemen yan tarafına St37 4 mm kalınlıkta tasarlanan sac malzeme üzerine tüm sistemi kontrol edebilmek amaçlı bilgisayar yerleştirilmiştir. Bu veriler doğrultusunda ana gövde tasarımının genişlik ve uzunluk ölçüleri 783x1390 mm olarak belirlenmiştir. Bir diğer ölçüsü olan yükseklik ise imalat tablasının z eksenindeki düşey hareket mesafesi, tablayı hareket ettiren z eksenli lineer motorunun yüksekliği ve kullanılacak olan sürücü kartların boyutlarına göre 1374 mm olarak belirlenmiştir. Ana gövde profil tasarımının en genel ölçülerinin belirlenmesiyle birlikte içine yerleştirilecek olan ekipmanlar için de ayrıca profil bloklar ve kafes yapıları ölçülendirilmiştir.

Ana gövde tasarımında üst bölüm, lazer optik sistem bu şekilde tasarlanarak kararlaştırıldıktan sonra serme platformunun yerleştirilmesiyle birlikte imalat tablasını tahrik edecek olan lineer motorun bağlantısı için gerekli alan ve ara elemanlar belirlenmiştir. Dik bir pozisyonda yerleştirilecek olan lineer motor için motor boyu kadar bir bağlantı aparatı tasarlanmıştır ve vidalar vasıtasıyla lineer motor için oluşturulmuş olan profil kafesine sabitlenmiştir. Öte yandan sürücü kartlar için de ayrıca bir profil kafesi oluşturularak standart bir sac malzemesi ile bu bölme ön ve arka olmak üzere ikiye bölünerek hem ön hem de arka kısımda efektif bir alan sağlanmıştır. Son olarak da bu iki profil kafesi standart sac malzemedan şekillendirilmiş kapaklarla kapatılmıştır. Şekil 5.4a'da ve b'de ana gövde tasarımının iki kafese ayrılmış ön görüntüsü ve aynı tasarımın arkadan görüntüsü verilmiştir.

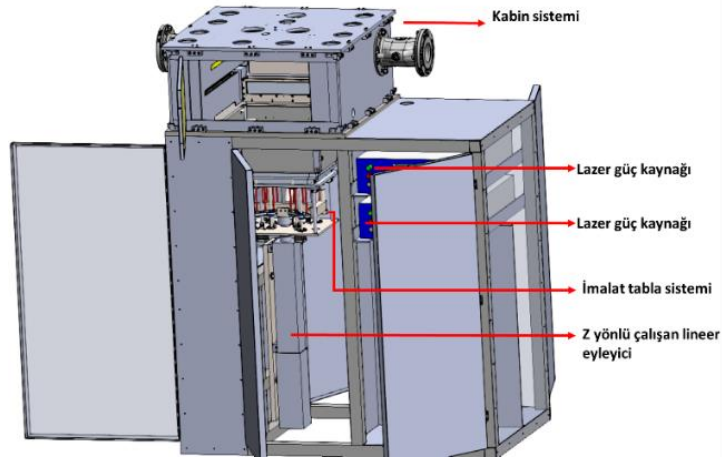
Ana gövde üzerindeki lazer optik sistem tasarımının ayrılmış ve detaylandırılmış (patlatılmış) katı modeli Şekil 5.5'te verilmiştir. Görülen montajı oluşturan her parça kendi montaj grubunun ismini ve kodunu alarak teknik resimleri ayrıntılı olarak hazırlanmıştır. Ana gövde alt kısmı da bu şekilde tasarlandıktan sonra serme sistemini ve besleyici hazneyi de içinde barındıracak olan kabin sistemi ana gövde dahilinde tasarlanmıştır. Böylece ana gövde boyutları kabin kısmını kapsayacak şekilde tam olarak belirlenebilmiş olmaktadır. İmalat kabini tasarımı 4 kabin duvarından ve imalat ortamını incelemeye elverişli, kilit mekanizmalı bir açılır kapanır kabin kapağından oluşmaktadır. İmalat kabininden gerek imal edilen parçanın alınabilmesi gerekse dışardan izlenerek anında müdahale

edilebilmesi için açılır kapanır bir kapak ve üzerine de lazer ışınıni filtreleyen bir cam tasarlanmıştır.



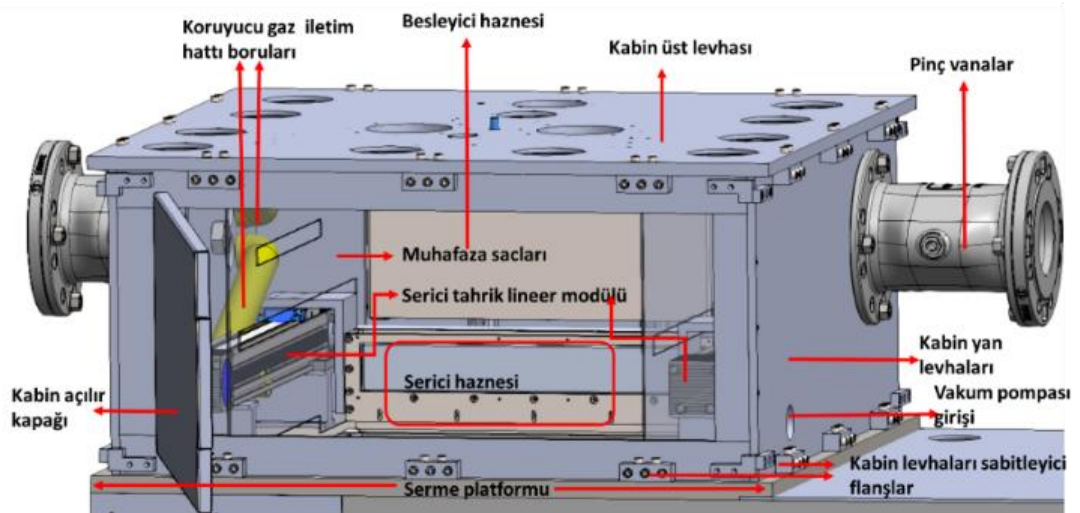
Şekil 5.4. Ana gövde tasarımı ara profil kafesleri ve ekipmanların pozisyonlarının (Sol) ön görüntüsü (Sağ) arkadan görüntüsü

400x300 mm olan tablanın 400 mm'lik kısmı dışardan daha geniş bir açıyla izlenebilmesi için açılır kapanır kabin kapağına paralel olarak yerleştirilmiştir. Şekil 5.5'te kabin tasarımı geniş bir çerçevede gösterilmektedir. Kabinin ana gövdeye yerleşimi ana gövde profilleri üzerine yerleştirilen serme platformunun kabin alt levhası olarak görev yapması ve kabin yan ve arka levhalarının serme platformuna flanşlarla bağlanması esasına dayalı olarak tasarlanmıştır. Kabin üst levhası da aynı flanşlarla yan levhalara ve arka levhaya sabitlenmektedir. Kabini oluşturan bu 4 levhanın montajı uçlarından civatalarla yapılmakta, sabitleme flanşları yalnızca dengeli bir montajı emniyete almaktadır.



Şekil 5.5. Ana gövde ile beraber imalat kabini

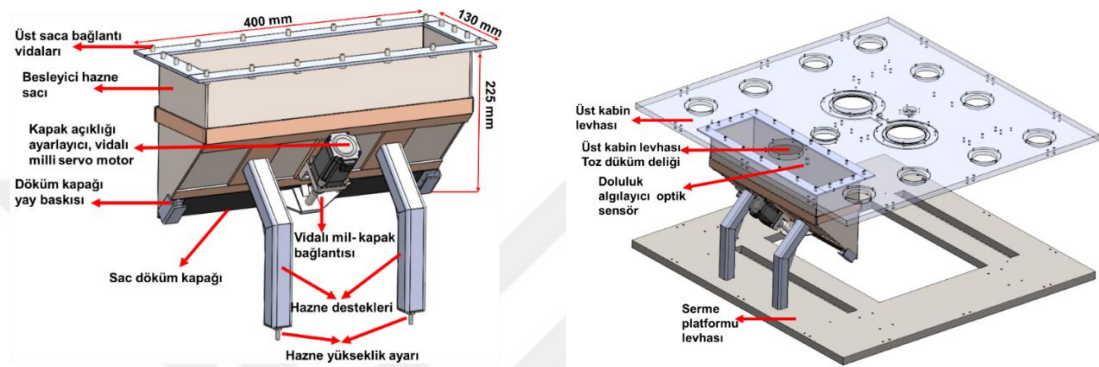
Şekil 5.6'da ise kabin içi ile birlikte detaylıca gösterilmektedir. Şekilden anlaşılacağı üzere, serici hazne, serme tahrik mekanizması, koruyucu gaz hortumları, vanalar ve besleyici hazne kabin içerisinde bulunmaktadır. Şekilde vakum pompası girişine bağlanacak bir vakum pompası ile imalat öncesi %0.1 oksijen oranı gerekliliğinin çok az bir zaman beklenerek gerçekleştirilmesi sağlanabilecektir. Koruyucu gaz hacmini de oluşturan kabin hacmi en küçük boyutlarda tutulmaya çalışılmıştır. Serme mekanizması, besleme mekanizması ve haznesi, hortumların kabin içinde tutulmasıyla gövde kompaktlaşmıştır.



Şekil 5.6. İmalat hacmin alt sistemler ile birlikte tasarım görüntüsü içerisinde bulunan diğer alt sistemlerle birlikte kabin tasarımı

5.1.2. Toz besleme sistemi tasarımı

Ana gövde içerisinde kullanılacak toz besleme sistemi; toz besleme haznesi, tozun döküleceği ve gerekli açıklığın otomatik ayarlanacağı motor kontrollü kapak mekanizması, hazne destekleri ve hazneye toz girişinin sağlanacağı flanşlı üst kapak kısımlarından oluşmaktadır. Şekil 5.8’de 3 boyutlu katı model olarak besleme sistemi görülmektedir.

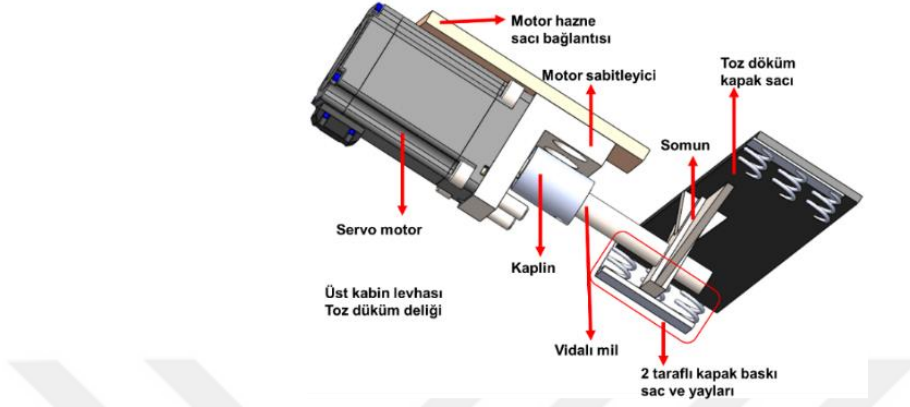


Şekil 5.8. Sol) Lazer ergitme cihazı toz besleme sistemi katı modeli sağ) üst kabin sacı ve serme platformu arasında besleyici sistem duruşu

Toz besleme haznesi lazer ergitme cihazının serici mekanizmasının tozu temin edeceği ana haznedir. Bu hazne 3 mm kalınlığında paslanmaz çelik sac malzemeden imal edilmek üzere tasarlanmıştır. Hazne şekilde görüldüğü üzere üstten vidalarla üst kabin sacına tutturulacak ve alttan profil destekleri ile serme platformuna oturtulacaktır. Ayrıca U şeklinde lama destekler hazne sacının ortasından hazneyi kuşatacak şekilde yerleştirilmiştir. Hazne yükseklik ayarı vidaları ile ana gövde içerisinde hazne yüksekliği sabitlenmeden önce ayarlanacak, daha sonra besleyici sabitlenmiş olacaktır. Montaj esnasındaki uyumsuzluk ihtimalleri bu şekilde aşılabacaktır. Üst kabin sacı ve serme platformu ile birlikte besleyicinin katı modeli Şekil 5.8’de görülmektedir.

Kabin üst sacına bağlantı vidaları ile bağlandıktan sonra, hazne üst saca açılan ve bu haznenin üst açıklığının tam ortasına rastgelen döküm deliğinden 316L malzeme ile doldurulacaktır. Bunu takiben hazne içindeki tozun doluluk oranı üst saca konumlandırılacak optik sensör vasıtasıyla algılanacaktır. Aynı şekilde toz haznesinin alt kısmına yan hazne sacına, döküm kapağının üst seviyesinde

yerleştirilecek lazer optik sensör ile toz bitiş i de takip edilecek ve bu sensörlerden geri beslemeler uyarı şeklinde yazılım üzerinden alınacaktır. Motor kontrollü kapak mekanizmasının detayları ise Şekil 5.9'da verilmektedir.



Şekil 5.9. Besleyici sistemi motor kontrollü kapak mekanizması detayı

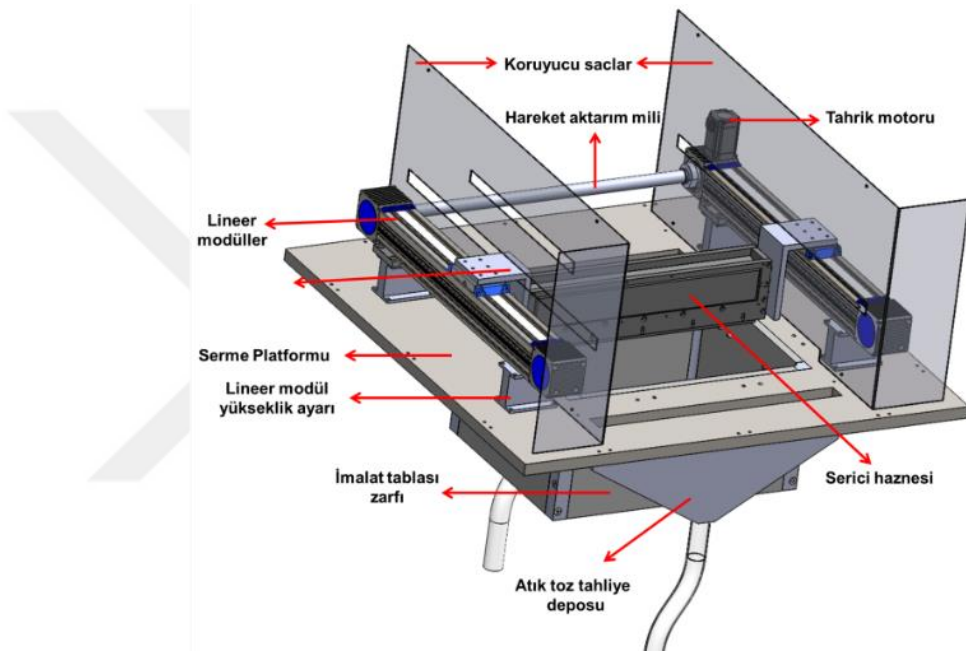
Servo motor dönüş hareketinin kaplin ve vidalı mil ile ilerleme hareketine çevrildiği bir tasarım yapılmıştır. Bu ilerleme hareketinde vidalı mile somun olarak görev yapacak olan parça toz döküm kapağına kaynatılacak şekilde tasarlanmıştır ve bu kapağın aşağı yukarı hareketini sağlayan bir mekanizma oluşturulmuştur. Kapağın kapanışı sağlandığında kapağın iki ucuna kaynakla montaj olacak şekilde tasarlanan yarım U şekilli parçalar ve içerisine aynı yöntemle montajlanacak halde tasarlanan 3'erli yay grubu ise kapak ve hazne sacının ucu arasında boşluk oluşmasını engelleyen ve toz kaçırma riskini önleyen baskı parçaları olarak tasarlanmıştır. Besleyici haznenin içerisine alabileceği toz miktarı, toz yoğunluğu katı 316L yoğunluğu olan 7.86 g/cm^3 'ün literatüre dayanarak %40'ı dikkate alınarak hesaplanmıştır. Besleyici saclarının analizi sonucunda da sac kalınlıkları belirlenmiştir.

5.1.3. Toz serme sistemi tasarımı

Toz serme sistemi; serici hazne, serici hazneyi tahrik eden ve hareketini sağlayan lineer modül-motor kombinasyonu (kızak ray sistemi de denebilir), bu modül ve serici hazne bağlantısını sağlayan L şekilli parça, hareket aktarım mili, serici platformu, atık toz tahliye bölümü gibi alt kısımlardan oluşmaktadır. Hassas bir

hareket özelliğine ve dinamik bir karakteristiğe sahip olan toz serme sistemi için imalata hazır tasarıma ulaşırken farklı varyasyonlar denenmiştir.

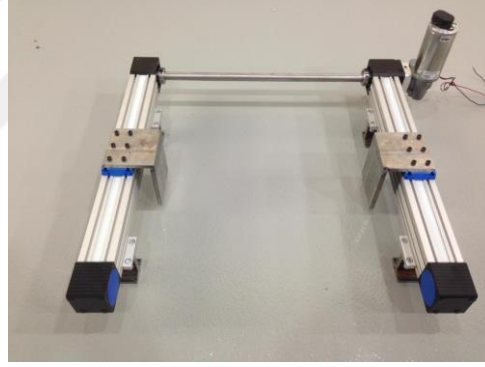
Serme sistemi için araştırmalara devam edilerek hazır olarak temin edilebilen kayış ve kasnak mekanizmaları gizli halde çalışan ve tahrik eyleyicisi montajlanmış lineer modüller olduğu anlaşılmıştır. Buna bağlı olarak serici hazne tahrik mekanizması 2 adet hazır lineer modül ve hareket mili ile tasarlanmıştır. Bu tasarım Şekil 5.10'da katı model olarak görülmektedir.



Şekil 5.10. Serme mekanizması için düşünülen ve imalatı yapılacak olan tasarım

Tasarım dahilinde kullanılan lineer modüller kompakt bir yapıdadır. İletim elemanları olan kayış kasnak ve rulmanlar bu modüllerin içerisinde gizlenmiş bir halde çalışmaktadır. Tahrik motoru 90° hareket çevirimi sağlayan bir dişli kutusunu montajlandığı yerde tahrik etmekte, bu dişli kutusu çıkışı ise aktarım milini döndürmektedir. Böylece tek bir taraftan verilen hareket bir modülden diğerine senkron bir durumda aktarılacak ileri geri serme hareketi sırasında oluşabilecek kasıntı ve takılmalara karşı bir önlem oluşturulmuştur. Modül kısıtlı boyutları 630x60 olup hareketli araba dahil modül yüksekliği 74mm'dir. Aktarım milinin uzunluğu serici hazne boyutlarına göre 500 mm ve çapı 20 mm seçilmiştir. Lineer modüller üzerindeki hareketli arabaların tahriki ise bu

arabaların modül içindeki kayışa sabitlenmesi sayesinde olmaktadır. L şekilli bağlantı parçası ise civatalarla serici hazne ve arabayı birbirine tutturmaktadır. Serici haznenin imalat tablası zarfı içinde Z doğrultusunda hareket edecek olan imalat tablasına toz metali istenen katman kalınlığında serebilmesi için gereken yükseklik farkı hesaplanarak modül yükseklik ayarı sağlayan ayaklar 4 adet olmak üzere hem yüksekliği sağlamakta, hem modül yükünü karşılamaktadır. Koruyucu muhafaza sacların ortasındaki kanallar imalat ortamındaki tozumanın, dişli ve motor gibi bozulabilecek kısımlara gitmesini önlemek için kullanılacak toz koruyucu kayış için bırakılmıştır. Teknik detaylar sonraki kısımda serici haznesi ve iç tasarımının anlatıldığı başlık altında verilmektedir. Serici hazne için de prototip tasarım varyasyonları arasından en uygun tasarım seçilerek gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.11’de kullanılmak üzere seçilen ve temin edilen lineer modüllerin gerçek resmi verilmektedir.

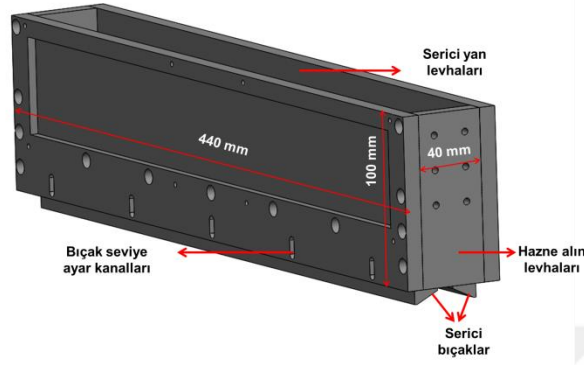


Şekil 5.11. Seçilen lineer modüller

➤ *Serici Hazne Prototip 1 ve Prototip 2*

Tez kapsamında planlanan durumlara uygun olarak, kanallı-sıyrıcı bıçaklı tip toz serme sistemi ile hem besleme kanallı hem bıçaklı tipin fonksiyonları birlikte kullanılacak şekilde bir serici tasarımı yapılmıştır. Bu sayede sıkıştırarak ve pürüzsüz toz serme imkanı hedeflenmiştir. Ayrıca toz serme sisteminde herhangi bir toz sıkışma ihtimali ortadan kaldırılmış olabilecektir. Bu amaçla öncelikle serici hazneyi oluşturan alın ve yan duvarlar tasarlanmıştır. Öncelikle serici hazne hacmi, uzman görüşü ile en az 100 katmanlık metal tozunu alabilecek kadar büyük bir değerle sınırlandırılmıştır. Hem çok ağır olmaması hem de yeterli °C’de tozu barındırabilmesi amacıyla bu seçim yapılmıştır. Çok ağır bir

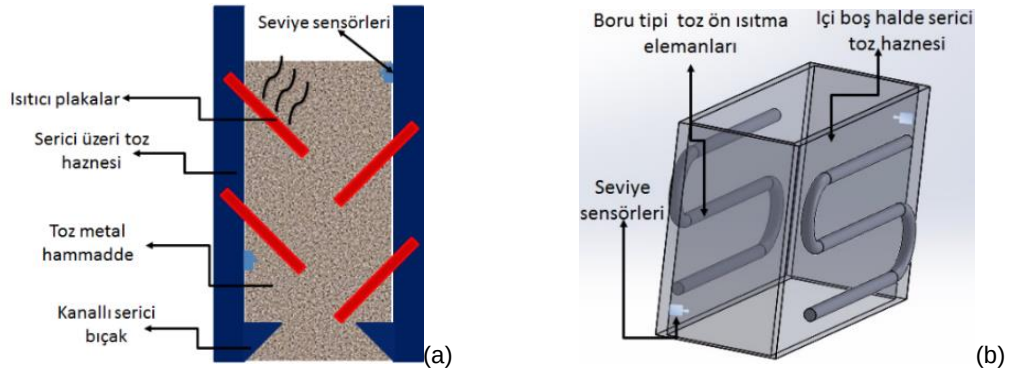
serici haznesi olması durumunda, tahrik mekanizması boyutları ve motor gücü artırılmak zorunda olacaktır. Böylece en uygun çözüm için hacim 100 katmanlık toz hacmi ile sınırlandırılmıştır. Serici hazne, gerekli ölçüleri ile beraber Şekil 5.12’de görülmektedir.



Şekil 5.12. Serici hazne tasarımı ve ölçüleri

Serici haznenin önemli bir özelliği de tezin özgün yönlerinden birini oluşturan toz ön ısıtma mekanizmasıdır. Bu amaçla ilk düşünülen yöntem Şekil 5.13a’da görülen ısıtıcı plakalarla içerden ısıtma yöntemidir. Plaka tipi ısıtıcıların belirli açısı ve uzunlukta serici hazne duvarlarına açılan kanallar vasıtasıyla yerleştirilmesi düşünülmüştür. Böylece metal tozunun doğrudan temaslı ısıtılması için bu tasarım geliştirilmiştir.

Satıcı firmalarla görüşmeler ve serme haznesi ısıtılma yöntemiyle ilgili yapılan araştırmalar, öğrenilen uygulama tecrübeleri sonucunda toz metalin doğrudan temas halinde çok küçük tane yapısı itibarıyla anlık sıcaklık yükselmelerine maruz kalabileceği, ayrıca ısıtıcı plakaların tıkanma problemi yaşayabileceği, toz akışının olumsuz etkileneceği anlaşılarak bu tasarımdan vazgeçilmiştir.



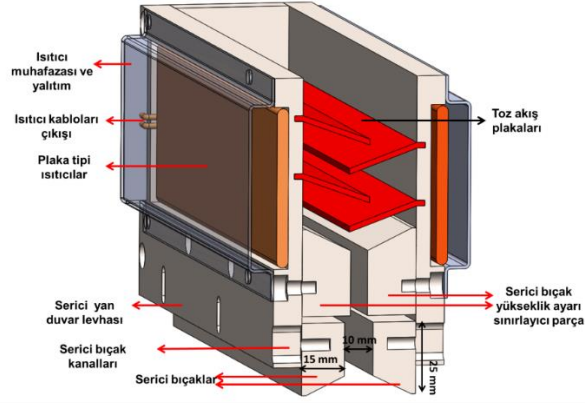
Şekil 5.13. Ön ısıtma donanımlı hareketli serici toz haznesinin planlanan düzenek çeşitleri a) plaka ısıtıcı b) boru tipi ısıtıcı

Boru tipi ısıtıcıların yan duvarlara gömülmesiyle birlikte toza doğrudan temas etmeyen böylece ilk tasarımdaki problemleri barındırmayan bir tasarım yapılmıştır. Fakat bu tasarımda da boru tipi bir ısıtıcının karakteristik özelliği gereği yerel ısınma sağlayarak homojen bir sıcaklık dağılımını çok geciktireceği düşünülmüştür. Bu sebeplerle yan duvarlar boyunca ısıtıcı eleman gereksinimi anlaşılmış ve plaka tipi en fazla 5 mm kalınlığında ve yan duvarlara en fazla kanal derinliği açılarak gömülebilen plaka tipi ısıtıcıların kullanılmasına karar verilmiştir. Bu plaka tipi seramik rezistanslı ısıtıcı plakalar 700W gücünde planlanmıştır. Serici hazne içerisinde ise standart sac malzemeden belirli boyut ve açıda toz akışını kolaylaştırıcı plakalar tasarlanmıştır.

Isıtıcı mekanizmasına karara verildikten sonra projede planlanan özgün yönlerden bir diğeri olan çift taraflı toz serebilme özelliği için serme haznesi alt kısmına 2 taraflı serici bıçak konumlandırılmıştır. Böylece ileri harekette ve geri harekette geometrisi uygun bıçakların her biri serme görevini üstlenmek üzere tasarlanmıştır. Şekil 5.14'te seçilen ve temin edilen plaka tipi ısıtıcıların gerçek resmi verilmektedir. Şekil 5.15'te serici haznesinin kesiti görülmektedir.



Şekil 5.14. Plaka tipi ısıtıcıların gerçek resmi (2 adet 5mm kalınlıkta ısıtıcı)

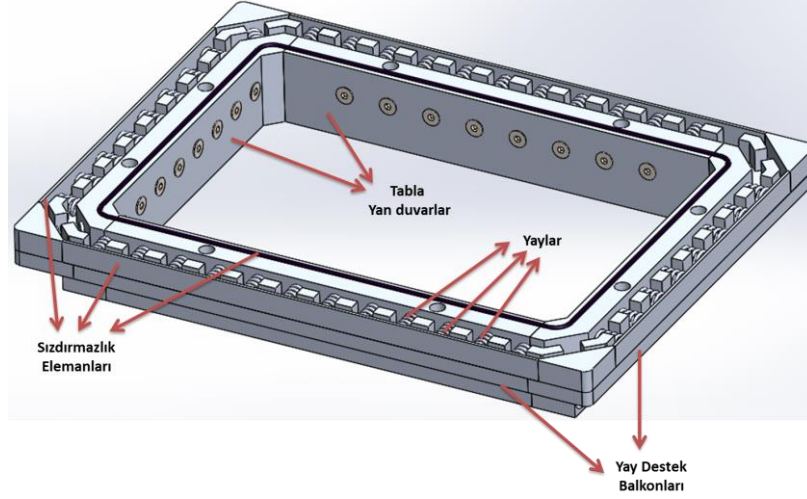


Şekil 5.15. Serici hazne kesit resmi 3 boyutlu görünüşü

5.1.4. İmalat tablası sistemi tasarımı

Genellikle tabla ön ısıtma mekanizması, tablanın hemen altına yerleştirilen elektrikli ısıtıcılar (levha tipi, rezistans tipi vb.) ile imalat öncesi tablayı ısıtabilmektedir. Bu kompakt ısıtıcılardan dolayı imalat tabla sisteminin hemen altından bir flanş vasıtasıyla z eksenli lineer motor bağlantısı yapılmaktadır. Bu da imalat tabla sisteminin basit ve kolayca z eksenli lineer eyleyicisine bağlanabileceğini ifade etmektedir. Bununla birlikte tabla boyutları da imalat esnasında daha geniş bir izleme alanı sağlanabilmesi için 400x300 mm olarak revize edilmiştir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen diğer değişiklik ise imalat tablasının z ekseninde lineer hareketi sağlayan motor ile bağlantısıdır. Toz serilen imalat tablasının tablayı tahrik eden lineer motora bağlantısı doğrudan gerçekleştirilememektedir. Bu yüzden yan duvarlar tasarlanmıştır. Bu tasarımda üst imalat tablası ve yan duvarlar, ilk prototip tasarım ile kıyaslandığında toz yatağı imalat tablasına ve diğer sızdırmazlık elemanlarına karşılık geldiği görülebilmektedir. Şekil 5.16'da tabla yan duvarları ve bu duvarlar üzerinde bulunan sızdırmazlık elemanlarının prototip tasarımı gösterilmiştir.



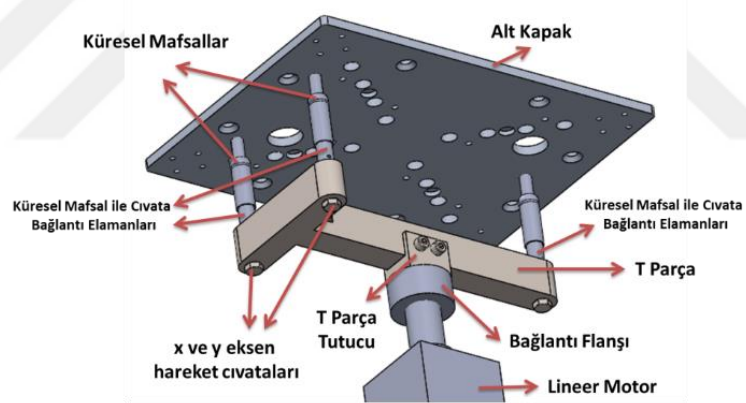
Şekil 5.16. Tabla yan duvarlarının prototip tasarımı

Şekil 5.16’da gösterilen tabla yan duvarlarının tamamlayıcısı olan alt kapak ise imalat toz yatağı tablası ile aynı boyutlarda olup bu kapağa ekstra delikler açılmıştır. Sızdırmazlık kanalı alt kapağa ergonomik şekilde yerleştirilmiştir. Böylece z eksenli lineer motoru ile flanşlı bağlantı alt kapak sayesinde sağlanabilmektedir. Bununla birlikte toz yatağı imalat tablası, yan duvarlar ve alt kapak, rijit bir kafes mekanizması sağlayarak hem z eksenli motoru ile tabla bağlantısını hem de imalat tabla sisteminin mukavemetini sağlamıştır. İlk prototip tasarımında gerçekleştirilmiş olan bir diğer değişiklik, imalat tablası x ve y eksen kalibrasyon mekanizmasıdır. Bu mekanizma hem imal edilebilirlik açısından hem de tasarım karmaşıklığı açısından olabildiğince ergonomik ve tamamen mekanik güvenilirlikte olarak tasarlanmıştır. Bu kalibrasyon mekanizması alt kapak ile lineer z eksenli motoru arasında yer almaktadır. Bu bağlantı, lineer motordan gelen itme kuvveti alt kapağın tam ortasına gelecek şekilde üç farklı noktadan küresel mafsallarla gerçekleştirilmiştir. Bu üç noktadan biri sabit tutulup diğer iki nokta ile x ve y ekseninin kalibrasyonunun yapılabilmesi amaçlanmıştır. Küresel mafsallar hem üç eksenli hareket serbestliği sağlamasıyla hem de iki ucunun birbirini ile eksenel olarak bağımsız dönebilmesiyle efektif bir hareket mekanizması sunmuştur. X ve Y kalibrasyonu, hareket cıvatalarından birinin sabit tutulup diğer ikisinin bir anahtar vasıtasıyla el ve göz koordinasyonu ile gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Böylece hem karmaşık bir tasarım olmayıp tabla sistemini kalabalıklaştırmamış hem de ısılıft hareket mekanizmasının tabla sistemine dahil edilebilmesi için uygun alan

sağlanabilmiştir. Bahsedilen üç ayar cıvatası, T parça olarak isimlendirilen ve tüm tabla yükünü taşıyabilecek parçaya monte edilmiştir. Bu T parça ise silindirik lineer motor flanşına, T parça tutucu olarak isimlendirilen ara bir aparat ile bağlanmıştır. Böylece alt kapak ile lineer motor milinin bağlantısı sağlanarak tabla x ve y eksen kalibrasyon mekanizmasının prototip tasarımı tamamlanmıştır. Şekil 5.17’de imalat tablası x ve y eksen kalibrasyon mekanizması ve lineer motor mili ile bağlantısının prototip tasarımı gösterilmiştir.

Toz sızdırmazlığının yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve yapısında dairesel tel barındıran silindirik keçeler vasıtasıyla sağlanması amaçlanmaktadır.

Sonuç olarak tez kapsamında ilk imalat tabla prototip tasarımı göz önünde bulundurulduğunda gözle görülür bir değişikliğe gidilmiş ve imalat tabla mekanizması daha nitelikli hale getirilmiştir.



Şekil 5.17. İmalat tablası x ve y eksen kalibrasyon mekanizması ve lineer motor ile bağlantısı prototip tasarımı

Tasarlanan bu imalat tabla prototip tasarımının Metal Lazer Ergitme cihazına dahil edilebilmesi için ana gövde sistemi, toz besleme sistemi ve toz serme sistemi montajlarının yapılması gerekmektedir. Böylece son bileşen olan tabla imalat sisteminin de Metal Lazer Ergitme cihazına montajı gerçekleştirilmiştir.

5.2. Arge Amaçlı Lazer Sinterleme/Ergitme Cihazının Alt Sistemleri İmalatı

Tasarlanan mekanik alt sistemlerden planlanan alt sistemlerin imalat detayları verilmiştir.

5.2.1. Ana gövdenin ve serici alt sistemin imalatı

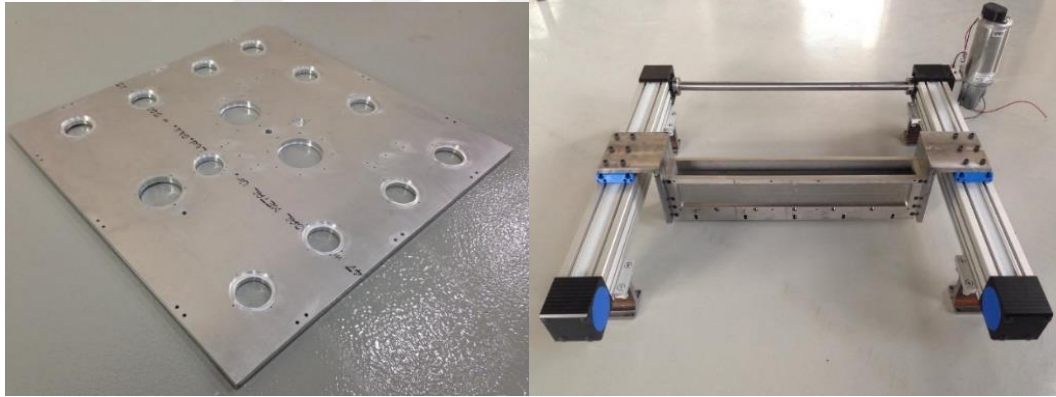
Tez iş planında imalatının tamamlanması öngörülen ana gövde imalatı tamamlanmıştır. Metal lazer ergitme cihazının tasarımı modüler olarak gerçekleşmektedir. Buna göre her basamakta planlanan alt sistemlerin tümünün kompakt ve montaj-demontaj işlemlerine elverişli bir şase içinde bütünleşik çalışması gerektiğinden, alt sistemlere göre tasarlanan profil-sac malzeme-metal levha kombinasyonu ile imalatı bu tasarıma göre planlanmış ana gövdenin imal edilmiş hali Şekil 5.18'de görülmektedir. 50x50x3 mm boyutlarında St37 çeliğinden ve boyanmış olarak kullanılan profiller birbirlerine oksiasetlen yöntemi ile kaynatılmıştır. Görüleceği üzere alt sistemlerin oluşturduğu yükler profiller tarafından karşılanmak üzere tasarım gerçekleştirilmiş, elektronik ve pnömatik elemanların taşınması ve barındırılması, ayrıca kabin içerisinde ve vana girişlerinde oksijen sensörü, basınç sensörü, gövde içerisinde mekanik emniyet ve sınır anahtarları gibi algılayıcıların konumlandırılması da sac malzemeler üzerine planlanmıştır. Kullanılan sac malzemeler 2mm kalınlığında çelik olarak seçilmiştir. Kapak menteşeleri ve kapak açma kolları alüminyumdur. Ana gövde her biri en fazla 100 kg yük taşıyabilen 6 adet vidalı ayar ayağının üzerinde durmaktadır.





Şekil 5.18. Ana gövde imal edilmiş gerçek resmi a) izometrik bakış b) dimetrik bakış c) ana gövde önden bakış (lineer eyleyici monteli durum) d) en dış sac kapaklar kapatılmış durum

Gerçek resimlerdeki imal edilmiş ana gövde incelendiğinde Şekil 5.4'te verilen 3 boyutlu katı modeller ile örtüştüğü görülecektir. Bununla birlikte lazer optik sistemi taşıyacak olan kabin üst levhasının gerçek imalatı daha önce prototip tasarım ve yapılan statik analizler sonucunda en uygun tasarım elde edilerek Şekil 5.19'da gerçek imalat resmi gösterilmiştir.

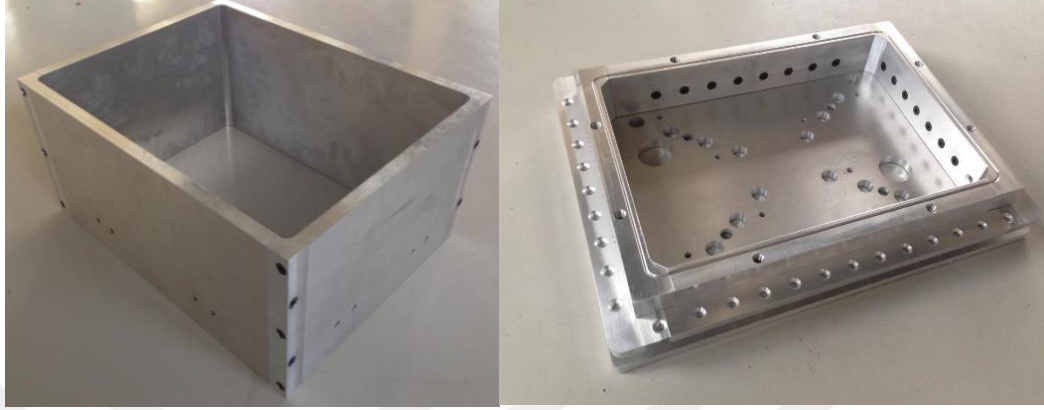


Şekil 5.19. Gerçek Resim: sol) lazer optik sistemi taşıyıcı kabin üst levhasının gerçek imalatı sağ) lineer modül ve serici haznesinin montaj resmi

5.2.2. İmalat tabla sistemi tasarımı

Lineer modül ve serme sisteminin montajının ardından sericinin hareket skalası göz önünde bulundurularak imalat tabla zarflarının imalatı gerçekleştirilmiştir. İmalat tablasının hareketine hem kılavuzluk hem de sızdırmazlığını sağlayacak olan zarf grubu serme platformuna alt tarafına köşe flanşları ile montajının gerçekleştirilmesi ön görülmüştür. Ana gövde tasarımının imalatı başlığı altında

serme platformu ve pozisyonlaması gösterilmiştir. Bu başlık altında ise serme platformuna bağlantısı yapılacak olan zarf grubunun gerçek imalat resmi ile toz yatağı ve gövde kısmının imal edilmiş görüntüsü Şekil 5.20’de gösterilmiştir.



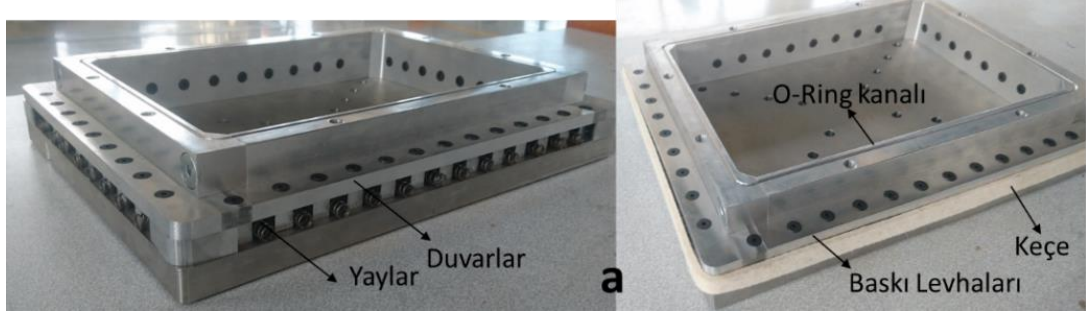
Şekil 5.20. Gerçek Resimler: sol) imalat zarf mekanizmasının gerçek resmi sağ) toz yatağı ve gövde kısmının imal edilmiş görüntüsü

5.3. Mekanik Alt Sistemlerin Montajının Tamamlanması

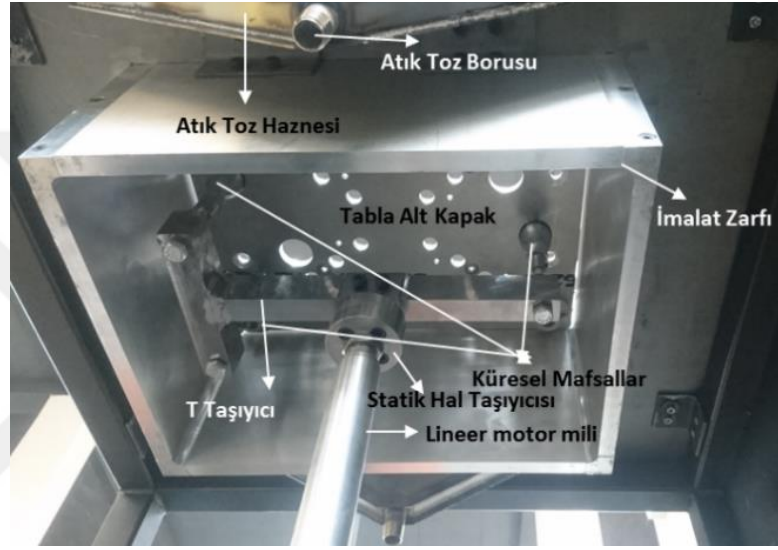
AR-GE amaçlı lazer ergitme cihazının genel mekanik montajının tamamlanması için önceki rapor döneminde tasarımı ve bazılarının imalatı tamamlanmış alt sistemlerden lazer optik alt montaj, toz serme alt sistemi ve toz besleme alt sistemi montajlanmıştır.

5.3.1. İmalat tablası alt sistemi montajı

İmalat tablasının, 3 ayrı alt tabla sisteminden oluşturulduğu önceki kısımda belirtilmiştir. Bu 3 ayrı tabla ayrı ayrı montajlanmış ve birleştirilerek imalat tablası son halini almıştır. Tablayı oluşturan yan duvar kısmı sızdırmazlık keçesi, keçe baskı yayları ve plakalarına uygun olarak modifiye edilmiş, bu elemanlar yan duvar kısmına eklenerek yan duvar montajı tamamlanmıştır. Son olarak tüm bu alt montajlar toz yatağı olarak kullanılacak tabla da eklenerek, imalat tablası alt sistemi olarak tamamlanmıştır. Buna göre Şekil 5.21a’da görülen kısımda önceki dönemde imal edilmiş olan imalat tablasının kalibrasyon mekanizması-lineer motor bağlantısına montajlanan alt kapak kısmı kurulumu verilmektedir.



Şekil 5.21. a) İmalat tablası yan duvarları ve orta tabla bölümü genel montaj gerçek görünümü



Şekil 5.22. İmalat tablası alt kapak lineer motor-mafsallı bağlantısı montajı

İmalat tablasının yan duvarları (sızdırmazlık keçesi keçe plakaları, baskı yayları eklenmiş olarak) da bu montaja eklenerek tüm alt montajlar ve nihayet imalat tablası sistemi tasarıma birebir uyumlu olarak birleştirilmiştir. Şekil 5.21a'da imalat tablası yan duvarlarının montajı verilmektedir. İmalat zarfı içerisinde yukarı aşağı hareket edecek olan tablanın toz sızdırmazlığını Şekil 5.21a'da görülen plakalara giydirilmiş ve bu plakaları bastıran yaylarla sıkılığı sağlanan keçeler olacaktır.

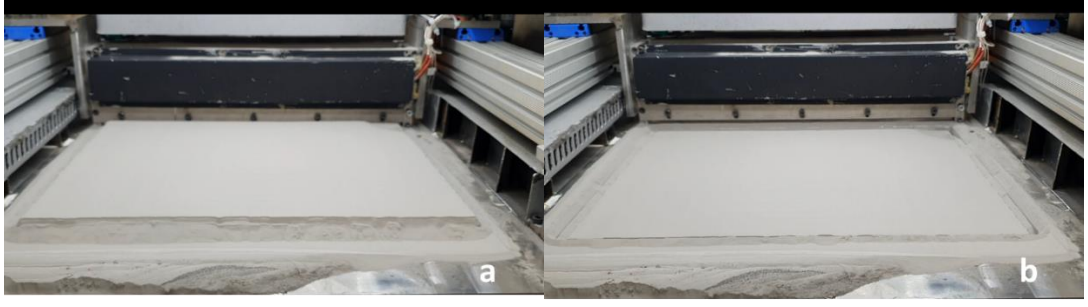
Bu noktadan sonra ise imalat zarfı ana gövdeye montajlanarak imalat tablası en alt tabladan başlamak suretiyle orta ve üst tabla sırası takip edilerek ana gövde içinde zarfın ortasına gelecek şekilde hassas ayarlamalar yapılarak

montajlanmıştır. İmalat tablası sisteminin son montajından sonra test edilmesi öncelikle en üst ve en alt sınır sensörlerinin yerleştirilmesiyle başlatılmıştır. Şekil 5.22’de manyetik alan ilkesine bağlı çalışan en üst ve en alt sınır sensörleri görülmektedir. Tabla yukarı veya aşağı hareketiyle birlikte, Z-motor milinin hareketi, sensörlerin manyetik alanına girdiğinde sensörlerin herhangi birinden gelen sinyal veri toplama kartı yardımıyla yorumlanarak oluşturulan arayüzdeki tabla aşağı veya yukarı butonunun arka planındaki koda aktarılmaktadır.



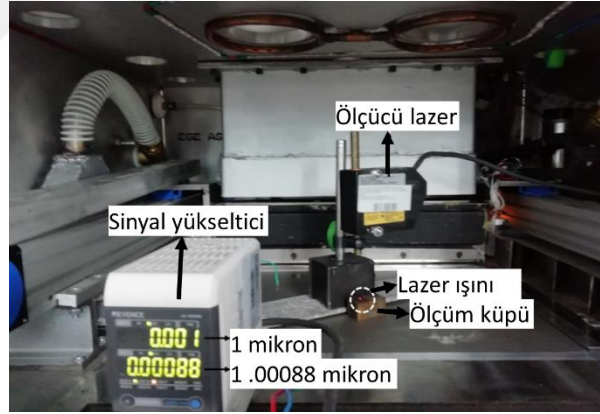
Şekil 5.22. İmalat tablasını tahrik eden z-motor gövdesine bağlı a) en üst sınır ve b) en alt sınır sensörleri

Şekil 5.23’te gerçek bir imalata uygunluğu ve gerçek imalattaki çalışma verimini daha net test etmek açısından imalat tablası en üst konumu ve herhangi bir alt konumu örnek bir toz serimi yapıldıktan sonraki halde verilmektedir.



Şekil 5.23. İmalat tablasının toz serildikten sonra a) üst ve b) alt konum örnekleri (kabin önünden görünüş)

Adım adım tabla hareket kontrolü amacıyla lazer destekli mesafe sensörü yardımıyla Z-motorunun tablayı her sinyalde kaç μm hareket ettirdiği tabla üzerine konulan bir ölçüm küpünün lazer ışını çıkış noktası ile arasındaki mesafe ölçülerek her harekette 50 μm 'luk bir mesafe sağlanacak şekilde tabla hareket kodu güncellenmiştir. Şekil 5.24'te söz konusu mesafe ölçüm düzeneği tabla montaj edildikten sonra ölçülmüş ve gösterilmiştir. Böylelikle İmalat tablası alt sistemi kalibrasyonu da tamamlanarak gerçek imalata uygun hale getirilmiştir.



Şekil 5.24. Tabla hareket hassasiyeti kalibrasyonu test düzeneği (kabin önünden görünüş)

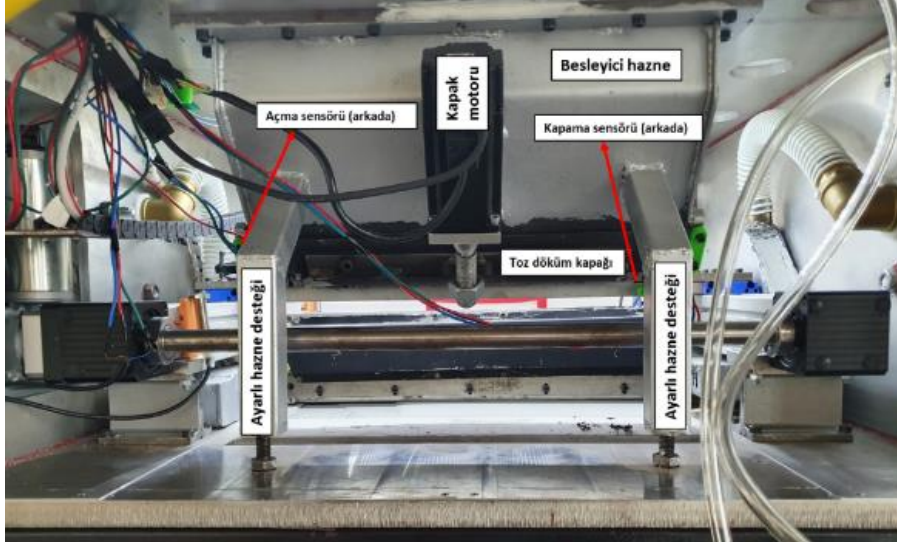
5.3.2.Toz besleme alt sistemi montajı

AR-GE amaçlı lazer ergitme cihazının genel mekanik montajının tamamlanması için tasarımı ve bazılarının imalatı tamamlanmış alt sistemlerden lazer optik alt montaj, toz serme alt sistemi ve toz besleme alt sistemi montajlanmıştır. Toz besleyici sistem, daha önce açıklandığı üzere yukarıdan motor kontrollü bir

kapağına sahip olarak toz besleyecek şekilde çalışmaktadır. Şekil 5.25a ve b'de besleyici kapağını kontrol eden motorun kapak açıkken ve kapalı iken konumları görülmektedir. Şekil 5.25'te görülen konumlarda motorun durdurulması işlemi yine aynı görüntüde görülecek 2 farklı sınır sensörü (switch) ile gerçekleştirilmektedir. DC tahrik motoru bağlı olduğu vidalı mili sabit kaynaklanmış somun içinde döndürerek mile bağlı kapatıcı levha kapağı yukarı aşağı hareket ettirmektedir. Arayüzden kapalı butonuna basıldığında levha kapak kapanmakta ve soldaki sensöre ucundan temas ederek anahtarını aktifleştirmekte ve motor durmaktadır. Açık butonuna basıldığında ise levha kapak yukarı doğru geri çekilmekte ve soldaki sensörün anahtarını attırarak onu aktifleştirip motor yine durmaktadır. Bu arada ise besleyici altına sürülmüş toz hazneli sericiye toz dolmaktadır. Besleyici hazneye ise toz en başta üst kısımdan elle boşaltılmaktadır. Şekil 5.26 ise arkadan detaylandırmaktadır.



Şekil 5.25. Toz besleyici a) açık ve b) kapalı konumları (kabin arka görünüşü)



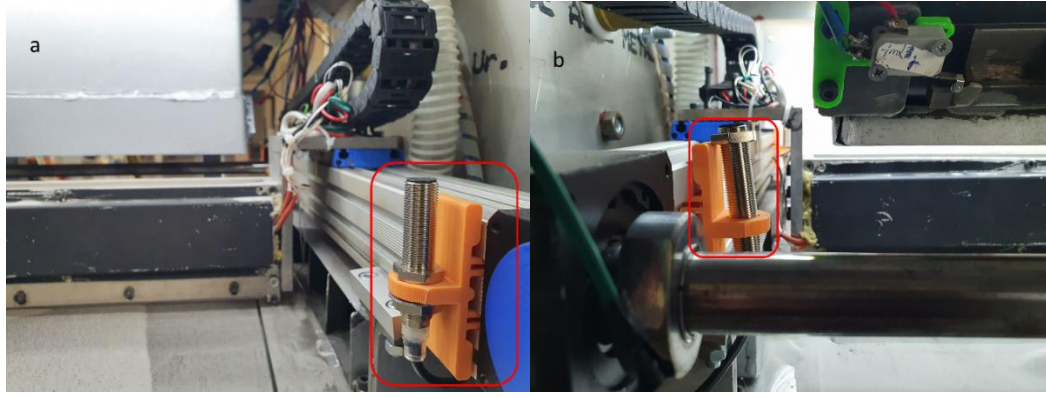
Şekil 5.26. Toz besleyici detayları (kabin arkasından görünüş)

5.3.3. Toz serme alt sistemi ve kabin mekanik montajı

Toz serme alt sistemi, hem ön ısıtma mekanizması yönüyle, hem serme kabiliyeti yönüyle, hem de ayarlanabilir hız açısından test edilmiştir. Şekil 5.27a ve b'de oluşturulan arayüzdeki serici ileri ve geri komutlarıyla hareket ettirilmiş olan toz sericinin en ileri ve en gerideki konumlanışı görülmektedir. Bu ileri serme ve geri serme hareketi sırasında durdurulma komutları yine Şekil 5.28a ve b'deki optik mesafe sensörlerinden gelmektedir.



Şekil 5.27. Toz serici a) ileri konum b) geri konum (2 görünüşte de kabin önünde görünüş)



Şekil 5.28. Serici sınır optik sensörleri a) ileri b) geri (kabinin arkasından)

Hem ileri hem geri serme hareketi en son sınır mesafeye geldiğinde, buna uygun montajlanmış optik sensörler, serici hazneyi taşıyan L şekilli levhanın altına girmekte ve böylece metal L şekilli levha optik sensörlerce ileri ve geri sınır mesafelerde algılanarak, serici tahrik motoruna durma komutu arayüz üzerinden verilmektedir. Bununla birlikte serici geri hareketinin sınır mesafesi, serici haznenin tam besleyici kapağı altına hizalandığı kısma gelmekte ve otomatik besleyici toz besleme sistemi devreye girebilmektedir.

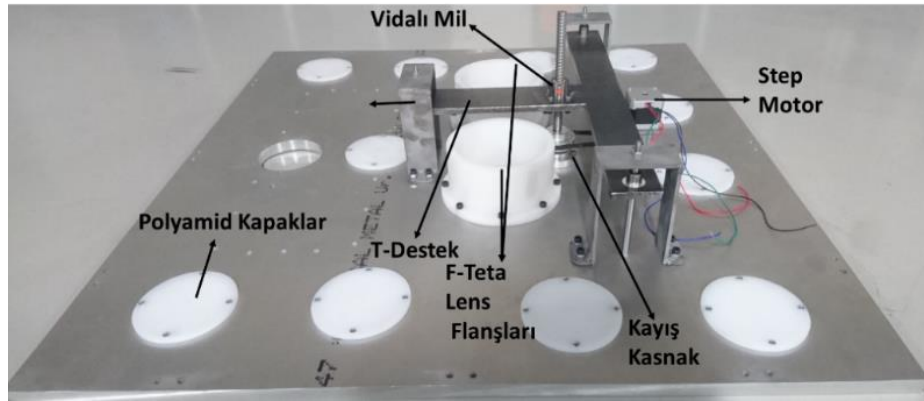
Bıçaklar tabla üzerine toz sereceği için bu ayarlama, Şekil 5.24'teki lazer mesafe ölçerli tabla hassasiyet testi ile bağıntılı olarak gerçekleştirilmiştir. Böylelikle imalat tablası, toz besleme ve toz serme alt sistemlerini hem tek tek hem de birlikte çalışma testleri, hem imalat yapılacak metal tozu olmadan hem toz kullanılarak başarıyla test edilmiş ve eksiksiz çalıştırılmıştır. Çift taraflı serme amaçlı ileri ve geri serici hareketleri, toz ön ısıtma fonksiyonu için serici üzerindeki ısıtma plakalarının çalışarak ısıtma kabiliyeti sağlayıp sağlamadığı, ısıtmanın hazır temin edilen PID kontrollü PID Sıcaklık kontrol cihazıyla denetimi, tablanın hassasiyetli aşağı yönlü hareketi, besleyicinin tam açılma ve tam kapanma denemeleri başarıyla gerçekleştirilmiştir.

5.3.4. Lazeroptik alt sistemin oluşturulması

İmalat kabininin 4 levhasından üst levhası olan alüminyum geniş levha aynı zamanda lazer optik elemanların taşınacağı levha olarak görev yapmaktadır. Ayrıca lazer optik tarayıcı kafa, paralelleştirici kollimatör, F-teta lens gibi

elemanların pahalı ve darbe/toz vs. şartlarına oldukça hassas oluşu nedeniyle de öncelikle lazer optik elemanların montajının eldiven, gözlük ve önlük eşliğinde yapılmasına karar verilmiştir.

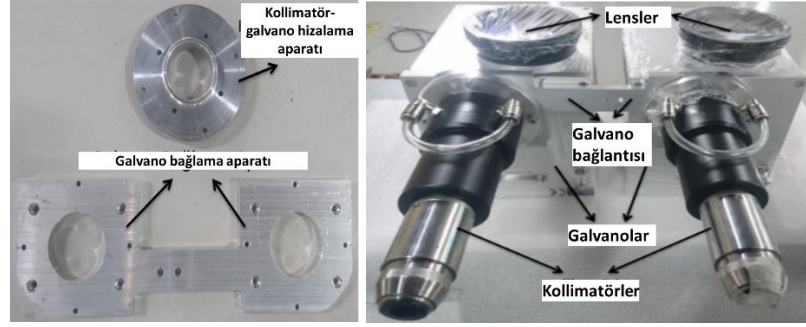
Lazer optik sistem elemanlarının montajı, bu sistem odak uzunluğunun hassas ayarı amaçlı yukarı-aşağı hareket edebilir olduğu için, imalat tablası montajından sonra en hassas ayarlamaları gerektiren alt montaj olmuştur. Kollimatör- galvano tarayıcı kafa bağlantısı ve bu iki elemanın birbirinden başka imalat kabini üst levhasının üzerinde destek vasıtasıyla durabilmesi için biri silindirik ve biri dikdörtgensel olmak üzere 2 parça imal edilmiştir. Bu parçalar kollimatör- galvano kafa, taşıyıcı T parça bağlantılarının güvenle yapılması için kullanılmıştır. Şekil 5.29'da sensör/kamera kapakları polyamid hafif malzemeden imal edildikten sonra kabin üst levhası üzerindeyken, galvano kafa sisteminin taşıyıcı T parçası, hareket sırasında tahrik iletimi elemanı olan vidalı mil, bu mile rehberlik eden lineer rulmana dayalı çalışan ve T parçaya gömülü kılavuz miller, tahrik elemanı olan motor ve kayış kasnak iletim mekanizması, lazer optik sistemin altyapısı olarak görülmektedir.



Şekil 5.29. Kollimatör-tarayıcı kafa olmaksızın lazer optik montaj

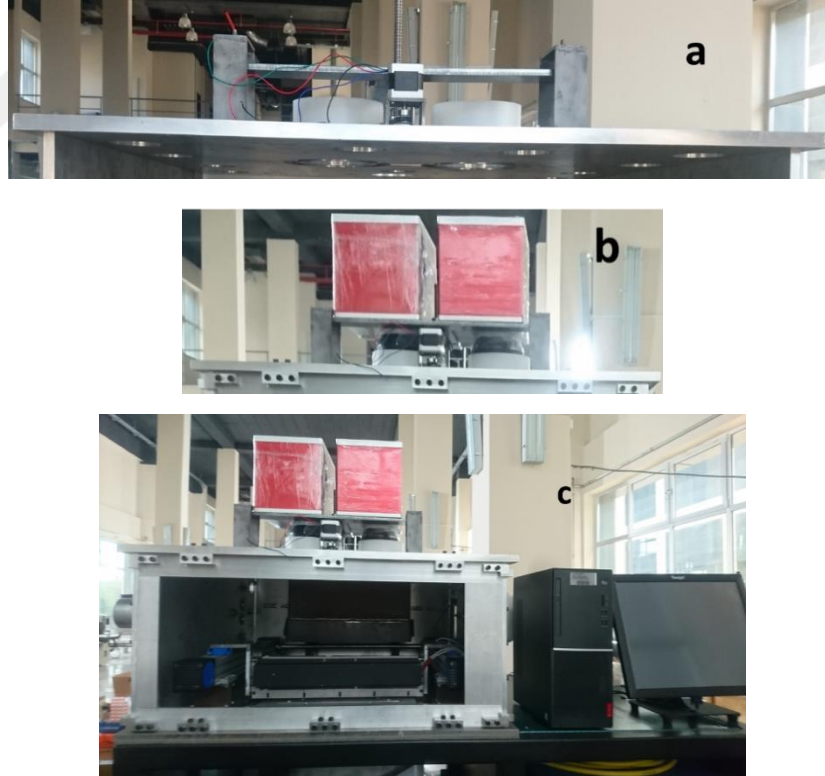
Kabin içerisinde kalan besleyici kapak mekanizma kontrolcüsü servo motorun, serme haznesinin hem önünde hem arkasında bulunan ısıtıcı plakaların ve serme haznesi hareketini sağlayan DC motorun bağlantıları Şekil 3'te görülen polyamid kapaklardan uygun konumda olanlarına açılan ve sızdırmazlığı sağlanan deliklerden çıkarılacaktır. Şekil 5.30'da kollimatör-tarayıcı kafa-T bağlantı sacı

bağlantılarının oluşmasını sağlayacak 2 parça ve bu iki parçanın ve kollimatör ile tarayıcı kafanın da eklendiği montaj gerçek görünümü verilmektedir.



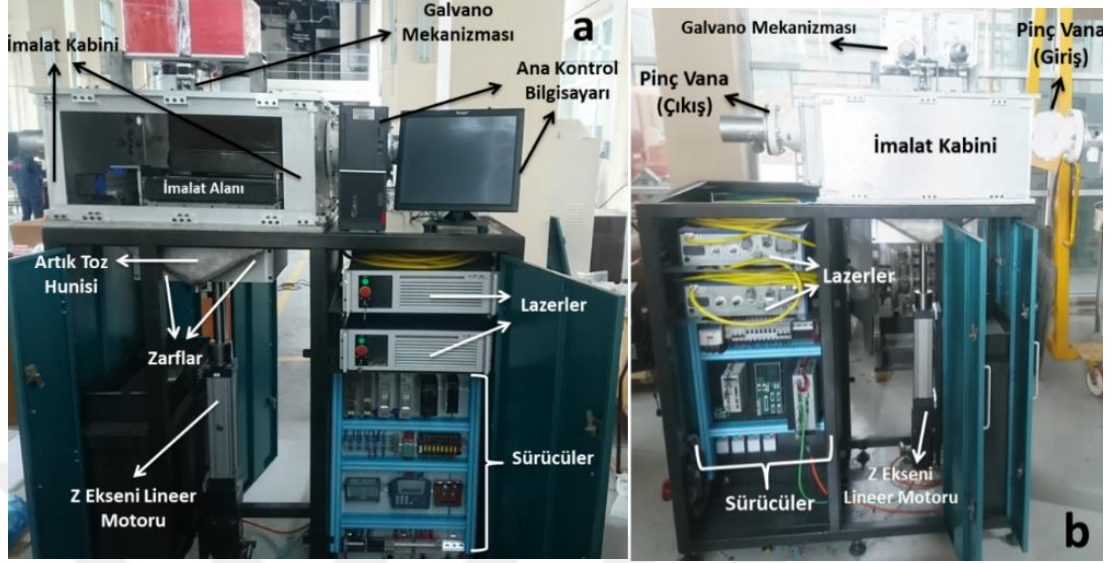
Şekil 5.30. Sol) Kollimatör - tarayıcı kafa - t bağlantı mekanizmasını sağlayan 2 parça Sağ) montaj

Şekil 5.31’de ise lazer optik sistem genel montajı lazer tarayıcı galvano kafalar ve kollimatörler takılmadan ve takıldıktan sonra görülmektedir.



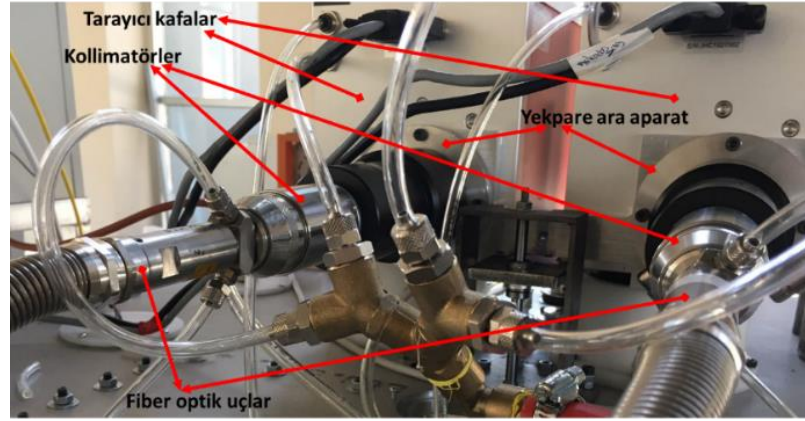
Şekil 5.31. Lazer optik alt sistemi genel montajı a) kolimatör ve galvano kafalar olmadan b) galvano kafalar ve kolimatör ile arkadan görünüş c) kabin üzerinde lazer optik sistem genel gerçek montajı

Şekil 5.32’de ise tüm alt sistemler sonrası genel mekanik montaj halindeki cihaz gerçek görünümü verilmektedir.

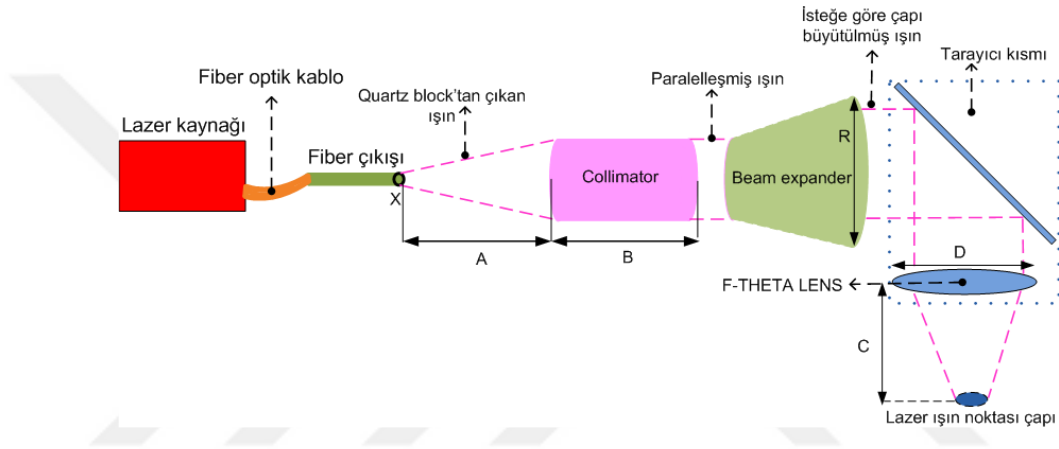


Şekil 5.32. AR-GE amaçlı lazer ergitme cihazı mekanik genel montaj görünümü a) arka görünüş b) ön görünüş

Lazer güç kaynakları ve optik ekipmanlar için bağlantı öncelikle kolimatör olarak ifade edilen ve fiber optik kablo içerisinde nispeten gürültülü halde aktarılan lazer ışınının düzeltilmesi için kullanılan bileşenle aktarılmaktadır. Bu yüzden QBH bağlantı ile lazer ışını kollimatöre aktarılmalıdır. Akabinde kollimatörden 30 mm olarak daha önce seçilmiş olan lazer ışını tarayıcı galvanometre diye tabir edilen tarayıcı kafalara bağlantı sağlanmalıdır. Şekil 5.33’te fiber optik QBH uç, kollimatör ve tarayıcı kafa bağlantısı ve Şekil 5.34’te çalışma diyagramı görülmektedir. Burada bağlantılı fotoğrafın önce verilmesindeki amaç, görüldüğü üzere uçtan itibaren lazer ışınının tüm merceklerden geçtiğinin anlatılmasıdır.



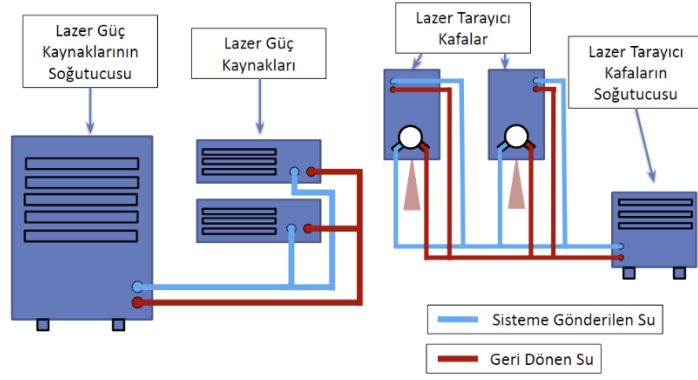
Şekil 5.33. QBH uç-kollimatör-tarayıcı kafa bağlantısı



Şekil 5.34. Lazer optik bağlantı şeması

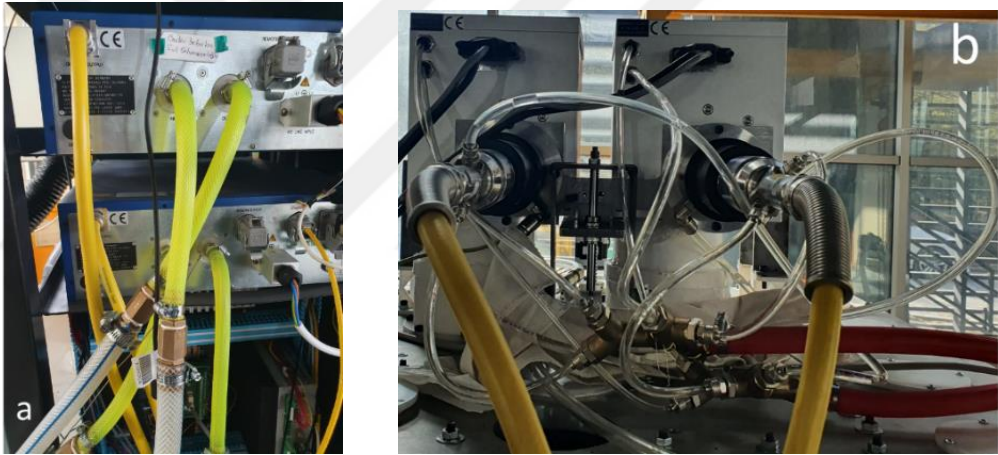
➤ Lazer-optik Sistem Kurulumu (Soğutma Sistemi Aşaması)

Lazer optik sistemin temizliği ve mekanik montajının başarıyla yapılmasından sonra hidrolik lazer güç kaynağı soğutma sistemi ve tarayıcı kafa soğutma sisteminin montajı yürütülmüştür. Lazer güç kaynaklarının soğutma sistemini tahrik edici eleman olarak 1.2 kW gücünde bir çiller soğutucu proje kapsamında temin edilmiş ve kullanılmıştır. Tarayıcı kafalar için de proje ekibi kendi bünyesinde bir çiller temin etmiştir ve bu çiller de aktive edilerek kullanılmıştır. Şekil 5.35'te lazer güç kaynaklarının ve tarayıcı kafaların soğutma diyagramı ve bağlantılar ilkesel olarak gösterilmiştir.



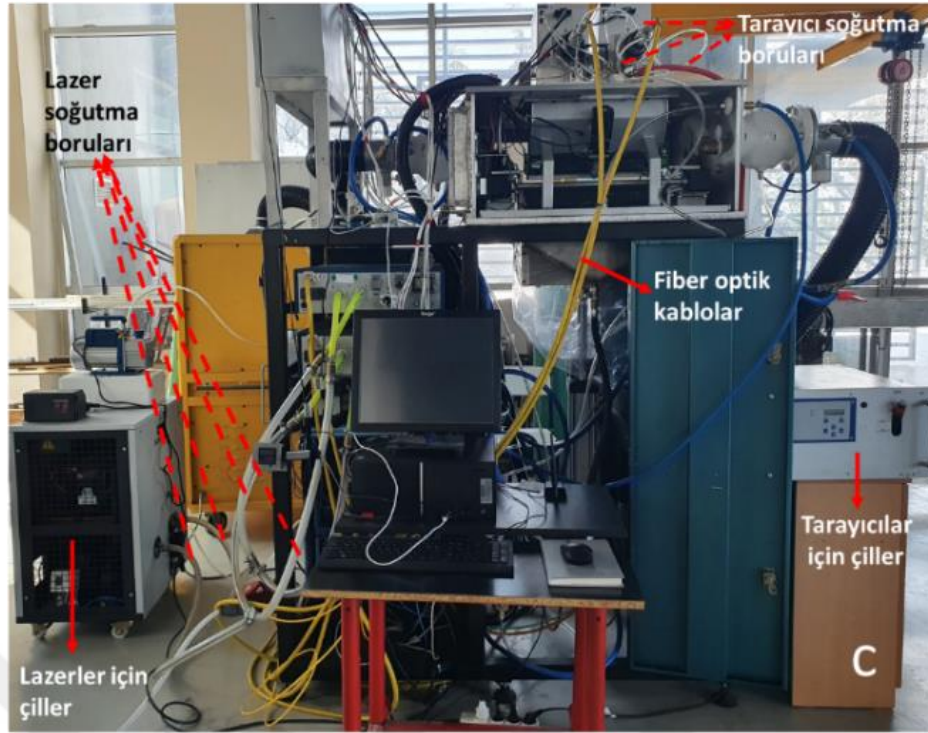
Şekil 5.35. Lazer güç kaynaklarının ve tarayıcı kafaların soğutma şeması

Bu çizilen şema/ diyagrama bağlı olarak gerekli boyutta hortumlar-ara rekorlar-somunlar-kelepçeler vb. temin edilerek bağlantıların gerçekleştirilmiş hali Şekil 5.36'da görülmektedir.



Şekil 5.36. Soğutma bağlantıları a) lazerler b) tarayıcı kafalar

Şekil 5.36'da görülen soğutma sisteminin çalışabilirliği 2 kez test edilmiştir. Soğutma suyu olarak çillerler saf su ile doldurulmuş ve sızma görülen yerlere anında müdahale ile sağlıklı bir sistemin oluşturulması sağlanmıştır. Şekil 5.37 ise tüm montajı göstermektedir.



Şekil 5.37. Lazer güç kaynaklarının ve tarayıcı kafaların soğutma sisteminin gerçek görüntüsü a) lazer güç kaynağı soğutma bağlantıları b) tarayıcı galvo kafaların soğutma bağlantıları c) soğutucu çillerle ve tüm bağlantılarla genel görünüm

➤ Minimum Işın Çapı İçin Gerekli Ekipmanların Tayini Aşaması

Bu noktada lazer optik sistem kurulumuyla elde edilen lazer ışın çapından bahsetmek yerinde olacaktır. Lazer sürücüleri dışında bu ekipmanlar proje takvimine uygun olarak temin edilmiştir. Bu dönem içinde bu hesaplamalardan bahsetmenin sebebi ise lazer optik sistemin bu dönem içerisinde faaliyete alınabilmiş olmasıdır ve tüm ekipmanların hangi matematiksel gerekliliklere uygun olarak seçildiği ışın çapı birincil etmen olarak düşünülerek seçildiği için bu bölümde bahsedilmektedir.

Öncelikle kullanılan IPG YLR500 sürekli ve modüler atımlı (multimode) lazer güç kaynaklarının ürettiği fiber çapı 50 μm 'dur. Bağlantılar sonrasında F-Theta lenslerden çıkacak ışın çapı teorik olarak 150 μm uygulamada ise önceki bölümde anlatıldığı üzere 143-170 μm aralığında olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar yapılırken öncelikle kullanılan lazer güç kaynakları nominal $P=500\text{ W}$ güce çıkabilen ve $f=50\text{ }\mu\text{m}$ fiber ışın ve 1064 nm dalga boyuna sahip olarak güç kaynağı veri detaylarından elde edilmiştir. Yine aynı verilerden single mode olarak tekli

modda çalışan lazer güç kaynakları için 0.35 civarında ve bizim cihazımızda kullanıldığı gibi multimode çoklu modda çalışan lazer güç kaynaklarında 1-1.5 aralığında olan BPP=1.4 değeri de IPG YLR500 modeli için veri detaylarından belirlenmiştir. BPP değerinin çoklu modda çalışan bir lazer güç kaynağı çerçevesinde 1.5 değerinden büyük olmasının firmalarla bilgi alışverişi sonucunda paralelleştirmeye engel olabileceği belirlenmiş ve bu değerlerin imalat için kullanılabilir değerler olduğu sonucuna varılmıştır. Profesyonel cihazlarda ve literatürde kullanılan ışın çaparı genel olarak literatür kısmında detaylıca önceki gelişme raporlarında ifade edildiği üzere 80 um-400 um aralığındadır ve minimum ışın çapı maksimum kaliteli imalat anlamına gelmektedir. Sonraki aşamada ise minimum ışın çapı için gerekli tarayıcı kafaların ve F-Theta lenslerin belirlenmesi gerekmiştir. Bu noktada öncelikle uygulayıcı firma uygulamalarının araştırılması sonucu eldeki lazer güç kaynaklarıyla minimum ışın çapı için sistemin kollimatör- tarayıcı kafa ve F-Theta lens ile kurulması kararlaştırılmıştır. Bu kombinasyona beam expander adı verilen ışın genişletici donanım çok maliyetli olduğu için eklenmemiş ve farklı çözüm olarak bu kombinasyonda karar kılınmıştır.

Bir sonraki aşamada 500 W gücündeki bir lazer gücünün su soğutma ile soğutulabileceği aynalara sahip ve aynı sebepten dolayı sertleştirilmiş silikadan F-Theta lens temin edilmesi gerekliliği belirlenmiştir. Aynı zamanda genişletici modül kullanılmayacağı için paralelleştirici kollimatör ekipmanının kullanılması gerekliliği de bu sebeple belirlenmiştir. Buna ek olarak tarayıcı kafaların tarama alanının 2 tarayıcı kafanın 400x400 mm'lik bir tablayı tarayabilmesi düşünüldüğü için en az 200x200 mm olması gereklidir. Böylelikle donanım gereklilikleri belirlenmiş ve hesaplama denemelerine geçiş için hazırlıklar tamamlanmıştır. Aşağıda hesaplamalar verilmektedir. Bu hesaplamalarda daha önce bahsedildiği üzere birincil etmen ve varsayılan (olması istenen) tek değer ışın çapıdır. Işın çapına göre ekipmanların odak uzunluğu ve çapları oluşmaktadır. Çekirdek çapı f , ışın çapı ss iken;

$$f = D_c = 50 \text{ um} \quad (5.1)$$

$$BPP = \frac{NA \cdot D_c}{2} = 1.4 \quad (5.2)$$

$$SS = \frac{(f_{fokal} \cdot D_c)}{f_{kollimatör}} \quad (5.3)$$

$$r_{kollimatör} = NA \cdot SS \quad (5.4)$$

$$D_{kollimatör} = r_{kollimatör} \cdot 2 \quad (5.5)$$

$$M^2 = 1,1 \quad (5.6)$$

Denklem 5.5'teki kollimatör çap değeri $D_{kollimatör}$ mercek optiğinde $\frac{1}{e2}$ noktasındaki değer olduğundan ve kollimatör bağlantılarındaki olası somun, conta vb. araçlarla çapın kapanabileceği, daralabileceği ihtimalinden dolayı bu değer 1,5 katsayısı ile genellikle çarpıldığı anlaşılmıştır. Yani;

$$D_{gerçek} = D_{kollimatör} \cdot 1,5 \quad (5.7)$$

Denklem 5.1-5.7 arasındaki ifadelerle göre ışın çapı 70 µm'dan başlanıp değişik rakamlar seçilerek en ucuz, en bulunabilir, kullanımı en kolay tarayıcı kafalar, kollimatör ve F-Theta lens temini sağlanmıştır. 150 µm'luk ışın çapı için;

$$NA = \frac{(2 \cdot BPP)}{D_c} = \frac{2 \cdot 1,4}{50} = 0.056 \quad (5.8)$$

$$r_{kollimatör} = 0.056 \cdot 150 = 8,4 \text{ mm} ; D_{kollimatör} = 2 \cdot 8,4 = 16,8 \text{ mm} ; D_{gerçek} = 16,8 \cdot 1,5 = \mathbf{25,2 \text{ mm}}$$

Temin edilen kafa apertür açıklığı, yani kollimatörün bağlandığı açıklık en az 26 mm olmalıdır. Böylece Tarayıcı kafalar arasında 30 mm açıklıktaki kafa temin edilmiştir. Bu tarayıcı kafa için uygun F-Theta lens ise 430 mm odak uzunluğunda ($f_{fokal}=430 \text{ mm}$) 30 mm açıklıkta bir kafaya uygun kollimatör ise en az 50 mm

mercek çapında temin edilmiştir. Kollimatör boyunun belirlenmesi için ise Denklem 5.9 kullanılmıştır;

$$f_{kollimatör} = \frac{(430 \cdot 50)}{150} = 143.3 \quad (5.9)$$

Böylelikle kollimatör uzunluğu da standart haliyle bulunan 150 mm olarak temin edilmiştir. Tüm lazer optik ekipmanlar böylelikle literatüre ve matematiksel temellere dayalı olarak temin edilmiştir. Bu işlemler sırasında en az maliyet ve en yüksek kalite hedeflenerek bu aşama başarıyla tamamlanmıştır. Çizelge 5.1, ve 5.2’de tüm cihaz özellikleri özetlenmektedir.

Çizelge 5.1. Lazer-optik ekipman özellikleri

Tarayıcı Kafa Açıklığı	30 mm
Kollimatör Çapı	50 mm
Kollimatör Uzunluğu	150 mm
Teorik F-theta Lens Odak uzunluğu	430 mm
Teorik Işın Çapı	150 µm

Çizelge 5.2. Lazer güç kaynağı özellikleri

Ölçülen Güç	500 Watt
Atım Modu	Sürekli; Çoklu mod
Dalga boyu	1064 nm
Fiber Çekirdek Çapı	50 µm
BPP ve M²	1.4 ve 1.1

Dikkat edilebilecek bir husus; çok detaylı denklemlerin de bulunmasıdır. Fakat temin edilen ekipmanlar kendi içinde bu denklemler kapsamında üretildiklerinden yani baştan tasarlanmayıp hazır olarak temin edildikleri için çok daha karmaşık denklemlere ihtiyaç kalmamaktadır. Örneğin ışın genişletici ekipman baştan tasarlanarak çok büyük maliyetlere rağmen ürettirilebilir ve kullanılabilir konumdadır. Fakat bu denklemlerle bu ekipmanlar elde bulunan

lazer güç kaynaklarının türüne çok uygun bir şekilde sağlam temellerde montajlanabilmiştir.

5.4. Koruyucu Gaz Filtrasyon Sistemi Tasarımı ve İmalatı

Bu kısımda filtre mekanizması atık gaz filtrelemesi için gereken araç gereçlerle birlikte tasarlanmaya ve imal edilmeye başlanmıştır. Bu çerçevede hem koruyucu gazın hem de atık gazın dolaşacağı bir sistem olarak harici bir filtreleme ekipmanı oluşturulmuştur. 10 kW gücünde bir motor ve 40 cm çapında bir fan dan oluşturulan bu sistem için öncelikle motor ve fan a karar verilerek, bu elemanlar bir filtreleme cihaz gövdesi olarak oluşturulan sac gövde içerisine yerleştirilmiştir. Bu konuda öncelikle açıklanması gereken konu şudur; koruyucu gaz imalat kabinine basılmaya başlandıktan sonra kabin içerisinde oksijen oranının %0.1 seviyesine düşmesi beklenecektir. Bu sürecin hızlandırılması amacı ile serilen tozun uçuşmasına sebep olmayacak debide çalışabilen vakum pompası kullanılarak kabindeki oksijen miktarı zorlanmış emiş ile hızlandırılmış ve yalnızca koruyucu gazın kabin ve filtre sistemi girişine kadarki borular içerisine dolması (yaklaşık 2.5 saat) beklenmiştir.

5.4.1. Pnömatik tesisat şemasının tasarımı ve montajı

Tez kapsamında yapılması planlanan gaz ve filtrasyon tesisatının şeması Şekil 5.38’de görülmektedir. Bu devrenin çalışma prensibi iki ana çıkış noktasından başlamaktadır. İlki koruyucu gazın sisteme basılması, sirkülasyonun sağlanması ve gaz sarfiyatını azaltmak için filtrelenerek geri dönüştürülmesidir. Bu aşamada koruyucu gaz tankından manuel vana vasıtasıyla basınç göstergelerinden sisteme gönderilecek gaz basıncı gözlemlenerek ilk gaz salımı gerçekleştirilmiştir. İmalat kabini en başta hava ile dolu olduğundan dolayı vakum pompasıyla belli bir miktar hava çekilip koruyucu gaz da sisteme dahil edilerek oksijen oranı %2 ‘ye düşünceye kadar direkt olarak enjekte edilecektir.

kabin girişindeki (pinch) vanaya pompa vasıtasıyla beslenecektir. Bu işlemlerle birlikte eş zamanlı olarak 5 adet selenoid valf de PC portundan gelen tetiklemelerle birlikte on/off modunda çalışarak tüm gaz ve filtrasyon sistemini dinamik olarak çalıştıracaktır.

5.4.2. Filtre sisteminin tasarımı ve imalatı

Bu konu açıklandıktan sonra, motor ve fanla ilk önce oluşturulmaya başlanan harici filtre sisteminin ve ana lazer ergitme cihazı içerisindeki bağlantılı olduğu kısımların yapılabilmesi için tasarlanan filtre ekipmanlarının gerçek görünümü Şekil 5.39'da verilmiştir. Bu ekipmanların imalatı Şekil 5.38'deki devreye göre yürütülmüştür. Bu oluşturulan çizime kaba, ince, karbon ve hepa filtreler kullanılmaktadır. Bu amaçla öncelikle harici filtre cihazı oluşturulmuştur. Bu filtre cihazı üzerinde koruyucu gaz giriş deliği, koruyucu gaz dönüş deliği ve atık gaz atım deliği bulunmaktadır. İçerisinde ise yukarıda bahsedildiği üzere motor-fan kombinasyonu ve filtreler bulunmaktadır.

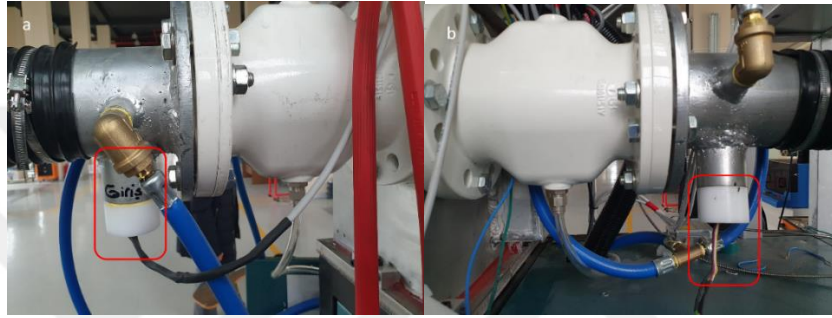


Şekil 5.39. Harici filtre cihazı a) fan ve pompa pozisyonu b) filtrelerin pozisyonu

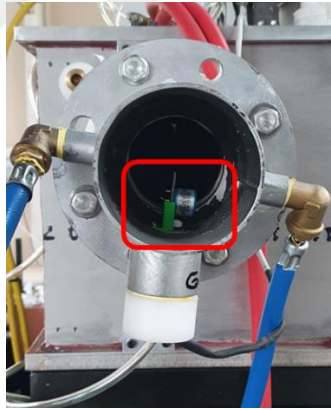
5.4.3. Gaz ve filtrasyon sisteminin montajı

Bu kısımda filtre ve gaz sistemi sonuç rapor döneminde cihaz ile bütünleştirilmiş, gereken azot besleme hatları, ölçüm için oksijen sensörleri ve basınç göstergeleri, ana (pinch) vana boru hatlarının montajı tamamlanmıştır. Kabin çevresinin

sızdırmazlığı sağlanmıştır. Şekil 5.40'ta sırasıyla giriş ve çıkış (pinch) vana bölgelerindeki oksijen sensörleri görülmektedir. Bu sensörler sürücüleri ile gömme usulünde montajlı olduğu için (pinch) vana içerisinde bulunmaktadır. Sökülmüş halde giriş ve çıkış (pinch) vana bölgelerinde kullanılan sensörlerin tipi görülmektedir. Hem giriş hattında hem çıkış hattında oksijen sensörü bulunmasının amacı, koruyucu gaz olan azot gazının, kabin için oksijen oranı % 0.1 değerine düşürülene dek hem kabin içine hem de boru hatları ve filtrenin kendi içine beslenmesidir.

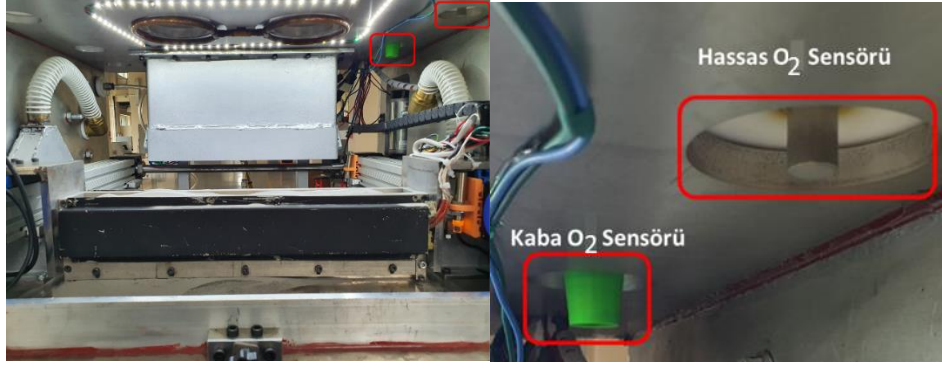


Şekil 5.40. Oksijen sensörlerinin konumu a) giriş ve b) çıkış bölgeleri



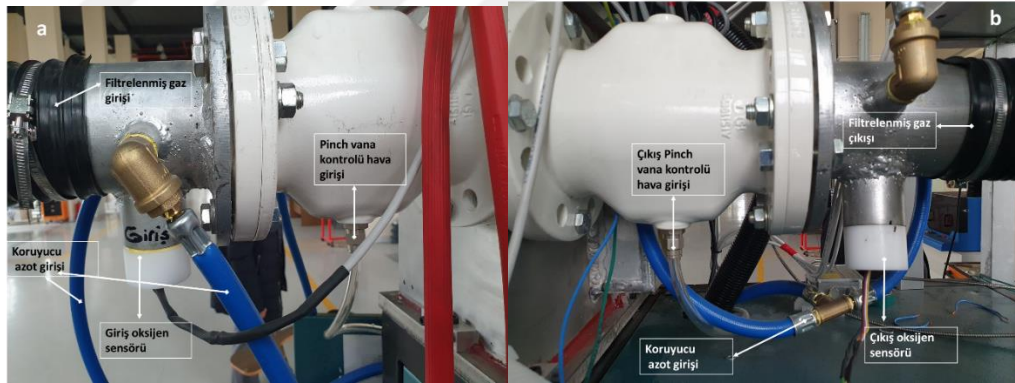
Şekil 5.41. Giriş ve çıkış bölgelerindeki oksijen sensörlerinin iç görünümü

Bunun akabinde kabinin filtre sistemi ile bağlantısı (pinch) vanalar arayüzdeki butonlar kullanılarak kapatılmakta ve kabin içinde oksijen oranının % 0.1'e düşürülmesi aşaması başlatılmaktadır. Bu değer ölçümü için ise Şekil 5.42'de görüleceği üzere kaba ve hassas türde 2 farklı oksijen sensörü kabin tavanına monte edilerek kullanılmıştır.

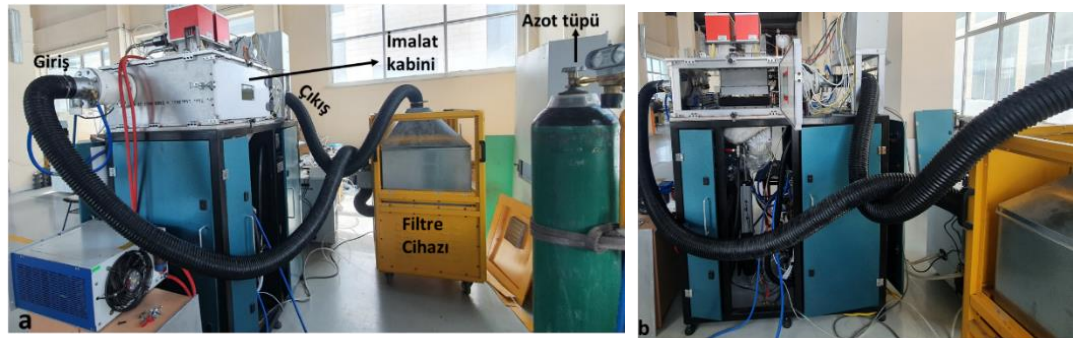


Şekil 5.42. Kabin içi kaba ve hassas oksijen sensörleri

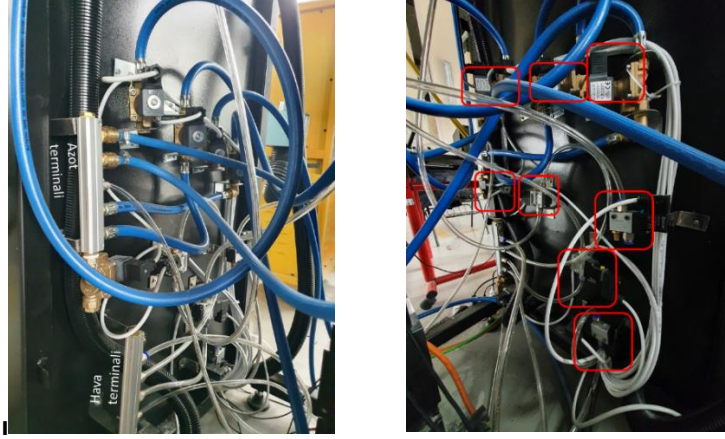
Ölçüm testleri havadaki oksijen oranı %21 olarak varsayıldığında doğru olarak başarılmış ve bu değer tüm sensörlerden görülmüştür. Şekil 5.43a ve b'de (pinch) vanaların montajlı hali, Şekil 5.44'te filtre sisteminin montajlı hali, Şekil 5.45'te ana giriş çıkış terminalleri ve gaz boruları ile terminaller ve gaz borularının arka kısmına konumlandırılmış röle bölgesi görülmektedir. Tüm açma kapama işlemleri oluşturulan arayüzdeki butonlarla yapılmıştır.



Şekil 5.43. (pinch) vanaların montajlı hali a) giriş b) çıkış

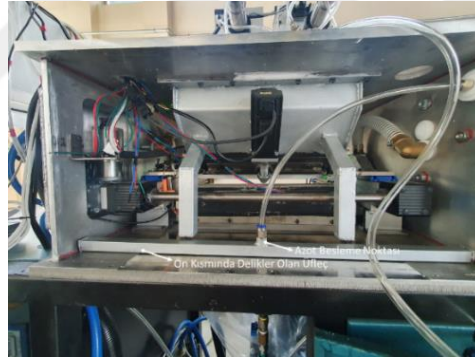


Şekil 5.44. Filtre sistemi montajı sol) ön çapraz görünüş sağ) ön görünüş



Şekil 5.45. Sol: ana giriş çıkış gaz terminalleri (arkadan bakış) sağ: röle bölgesi

Kabin içerisindeki gaz sistemi aktarımına değinilecek olursa kabinin arka kısmından azot beslemesi kabin genişliği boyunca bir ızgara üfleçten sağlanmaktadır. Şekil 5.46’da bu üfleç konumu verilmektedir.



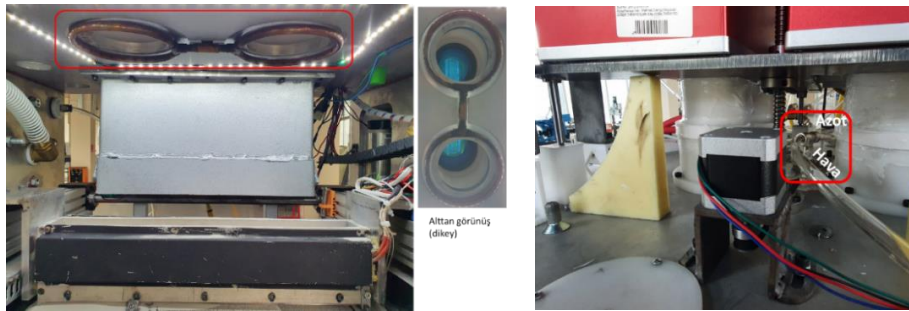
Şekil 5.46. Azot üflecinin kabin arkasındaki konumu (arka kapak içi görünüm)

Ayrıca kabin içerisinde hortum bağlantıları Şekil 5.47’de görülmektedir. Sol kısımdaki hortum bağlı bulunduğu üçgensel ızgara ile serilen toz katmanının yaklaşık 5-7 cm üzerine koruyucu gaz üflenmektedir. Sağ tarafta görülen kademeli kare kesit ızgara ile bu üflenmiş gaz kapalı devre filtre sistemi yardımıyla vakum oluşturularak filtreye doğru çekilmektedir. Böylece serilen katmanın en az 5-7 cm üzerinde akış sağlanmıştır. Böylece akış doğal taşınım varsayılmıştır.



Şekil 5.47. Kabin içi gaz bağlantıları ve üfleç ızgaraları a) kabin sol kısmı üfleme
b) kabin sağ kısmı çekme

Son olarak Şekil 5.48’de tarayıcı kafaların herhangi bir zarar görmesini engelleyici mercek önü hava yastığı oluşturan lüle sistemi görülmektedir. İmalat boyunca bu lüle bölgesinden merceklerin önüne azot gazı beslenirken, imalat sonrası bu bölgeden hava beslenerek mercek temizliği kolaylaştırılmaktadır. Bu ikili besleme sistemi için ise bir T şekilli besleme aparatı kullanılmaktadır. Böylelikle Koruyucu gaz ve hava besleme ve filtrasyon sistemi montajı başarıyla tamamlanmış ve testleri, denetimi oluşturulan arayüzdeki röle butonları kullanılarak başarıyla gerçekleştirilerek metal lazer ergitme cihazıyla 316L metal tozundan çizgi deneylerini gerçekleştirmek için gereken tüm alt sistem tasarım-imalat-montaj işlemleri, çalışma testleri ve elektronik-elektrik bağlantılar dahil tamamıyla bitirilmiş ve cihaz ortaya konulmuştur.



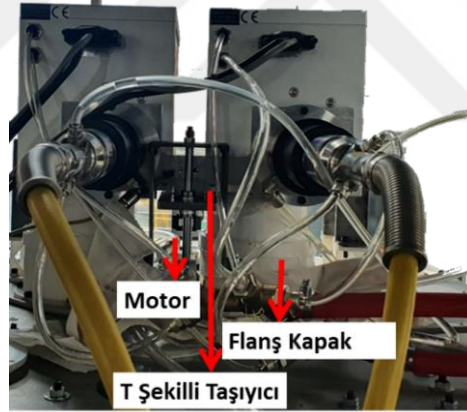
Şekil 5.48. Sol: her iki tarayıcı kafa f-theta lensi için mercek koruyucu lüle, sağ: lüle besleyici t aparat

5.5. Lazer Ergitme Cihazında Odak Belirleme- Işın Çapı Doğrulama

Deneysel doğrulama çalışması öncesinde öncelikle odak uzunluğunun belirlenmesi/doğrulanması gerekmiş olup, ardından teorik olarak hesaplanan ışın çapının pratik uygulamadaki büyüklüğünün belirlenmesi gerekmiştir. Akabinde ise ön parametre deneyleri vasıtasıyla lazer gücü, tarama mesafesi, tarama hızı verilerinin doğru bir şekilde değiştirilebilmesi denenmiştir.

5.5.1. Odak belirleme

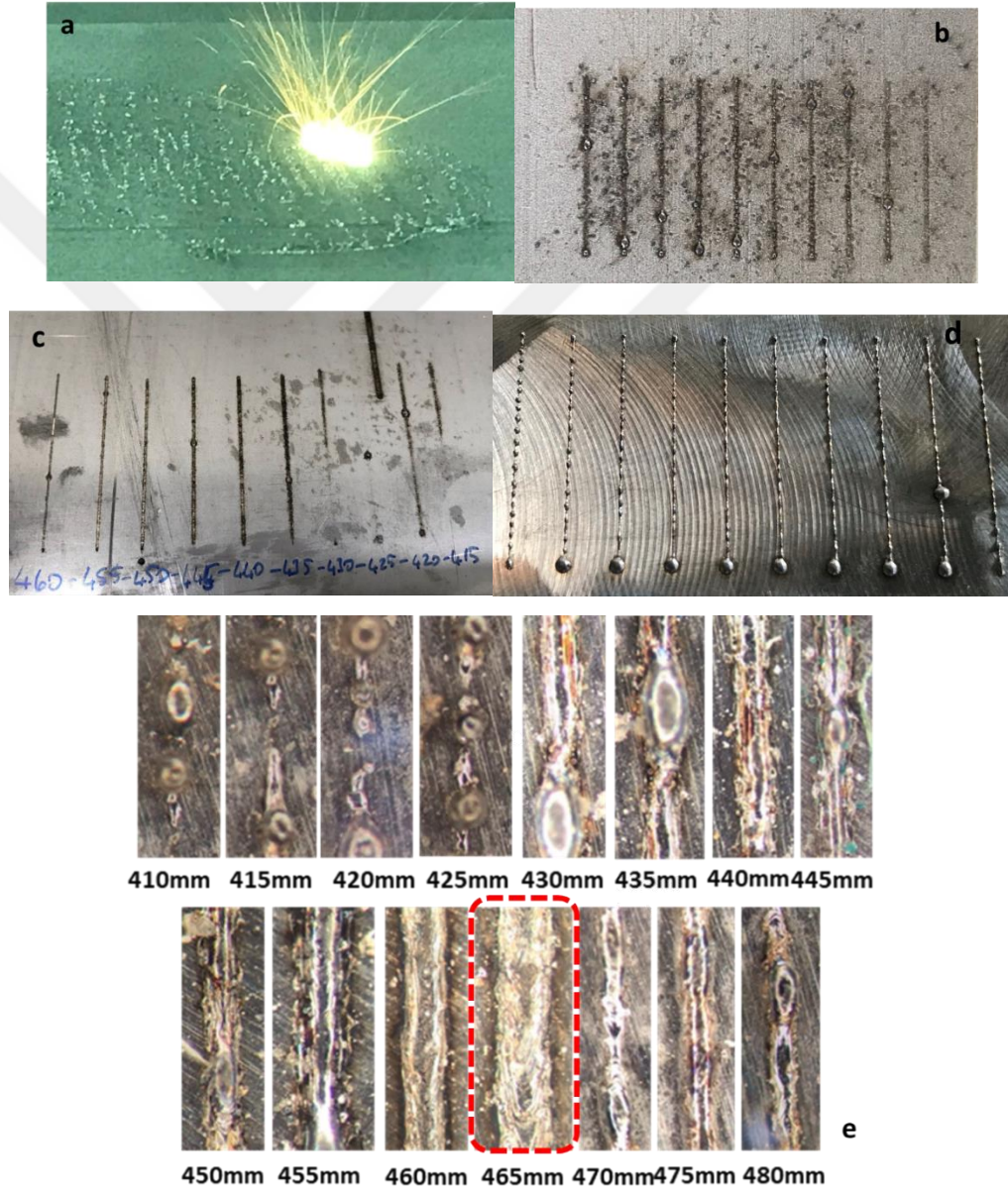
316L tozu ile kullanılan özgün lazer ergitme cihazının imalatları öncesi, ilk olarak bu cihazın odak uzunluğunun belirlenmesi çalışması gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.49'da görüldüğü üzere lazer tarayıcı kafa ve uç kısmına takılan F-theta lens, lazer ışınının yansıtılması ve belirli bir mesafede küçük bir alanda odaklanması görevlerini gerçekleştirmektedir.



Şekil 5.49. Motor tahrikli tarayıcı kafa ve f-theta lens odak ayar mekanizması

F-theta lens denilen bu silika bazlı merceklerin odak uzunluğunun tam ayarlanması, hem mercek ısınma etkisini, hem de imalat lazer ışın çapını ve kalitesini doğrudan etkileyen birincil etkidir. Kullanılan F-theta lensin odak uzunluğu teorik olarak 430 mm'dir. Bu tez kapsamında kabin ve lazer optik sistem imalatı bu odak uzunluğuna göre yükseklikler belirlenerek imal edilmiştir. Buna rağmen, çeşitli üreticilerin ve tedarikçi firmanın da araştırmalar neticesinde pratik ve teorik odak uzunluklarının aynı olmadığı sonucu na ulaştığı belirlenmiştir. Bu açıdan 430 mm'de doğrudan deneylere başlanmamış, çeşitli

çizgi atım kaliteleri incelenerek deneysel odak uzunluğu belirleme çalışması yapılmıştır. Böylece 415 mm'den 485 mm'ye kadar çeşitli odak uzunlukları, lazer optik sistemin içerisinde en başta tasarlanmış ve başarıyla imal edilmiş olan step motor kontrollü dinamik odak uzunluk ayarlayıcı mekanizmamız sayesinde denenmiştir. Aşağıda Şekil 5.50'de deneme sonuçlarının mikroskobik görüntüleri görülmektedir. Bu aşamadan sonra daha hassas bir deneme de gerçekleştirilmiş ve sonuç olarak 465 mm'nin gerçek odak uzunluğu olduğu anlaşılmıştır. Bu teorik ve deneysel odak uzunluğunun farkı, üretici firma yetkilileriyle doğrulanmıştır.

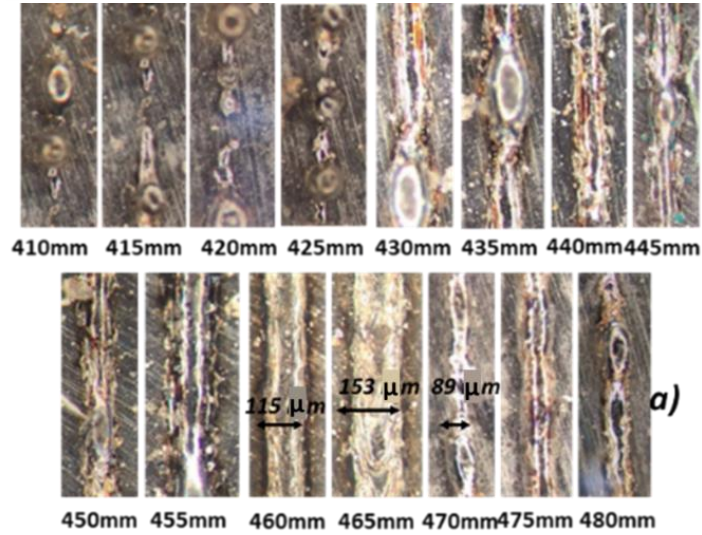


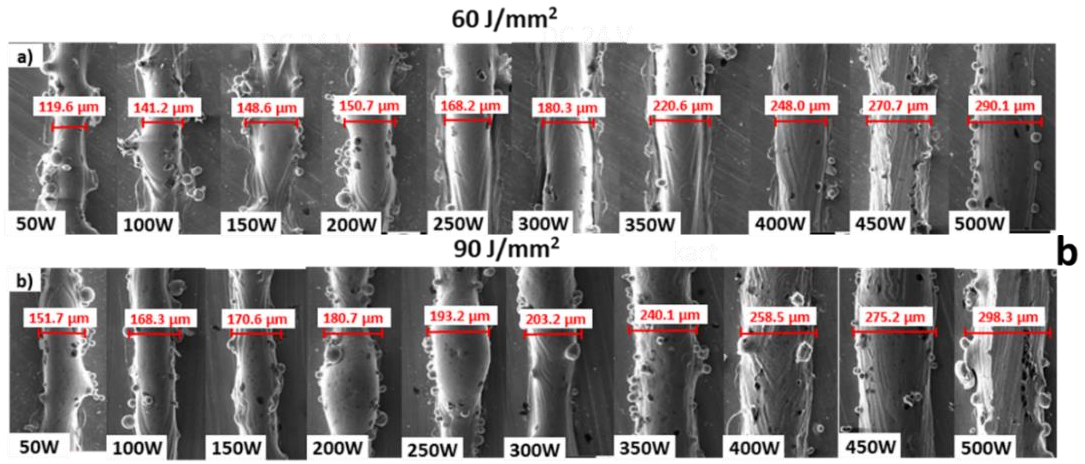
Şekil 5.50. Odak bulma çalışması sonucu elde edilen tek çizgi görüntüleri a) yakma sırasından bir görünüm b) toz serdikten sonra yakılmış çizgiler c) tozu temizlenmiş çizgiler d) maksimum güçte odak mesafesi deneme çizgileri e) en iyi 465 mm odak örneği

F-Theta lens için fabrikasyon olarak belirlenmiş odak uzunluğu olan 430 mm'deki lazer çizgi kalitesine bakıldığında yetersiz yakma olduğu anlaşılmaktadır. Dikkatli incelenerek benzer çizgilerin orta kısımlarında, havuz uzunluklarının ayırt edilebildiği atkuyruğu şekillerinin olmaması sebebiyle hem de 440 mm'deki düzensiz görünümünden dolayı 465 mm seçilebilmektedir. F-theta lens için 465 mm'nin ayarlanması amacıyla Bölüm 5.3.4'te tanıtılmış olan tarayıcı galvano kafa kayış kassak mekanizması kullanılmıştır. Ayarlanan odak uzunluğu ile birlikte Denklem 5.9'da bu pratik odak uzunluğu girildiğinde oluşan kollimatör uzunluğu 155 mm'ye çıkmasına karşılık kayda değer bir ışın çapı değişikliği oluşmayacağı varsayımıyla 150 mm'lik kollimatör kullanılmıştır.

5.5.2. Işın çapı doğrulama

Işın çapının teorik değeri ile pratik yakma sırasındaki değerinin kıyası ve teorik ışın çapının doğrulanması amacıyla bir takım tek çizgi testine de devam edilmiştir. Bu amaçla yürütülmüş optik ve SEM test sonuçları Şekil 5.51'de görülmektedir. belirlenmesinde kullanılmıştır.





Şekil 5.51. Işın genişliği a) optik mikroskop b) sem a) 60 j/mm², b) 90 j/mm²

Literatür çalışmalarına göre 316L tozu kullanılarak yapılan tek çizgi çalışmalarında uygun görülen enerji yoğunlukları 40 J/ mm² ve 100 J/ mm² arasındadır . Böylece ışın çapı doğrulama amacıyla 50 Watt artışlarla (50'den 500 Watt'a kadar) 60 $\frac{J}{mm^2}$ ve 90 $\frac{J}{mm^2}$ olarak seçilen enerji yoğunluklarını sağlayan hızlarda denemeler yapılmıştır. Şekil 5.78'a bakıldığında, 50 W, 450 W, 500 W değerleri dışında tüm değerlerdeki pratik ışın genişliklerinin teorik değer olan 143 mm'ye yakın olduğu anlaşılmaktadır. Pratik ışın çapı 50 W için teorik değerden oldukça küçük iken 400 W için oldukça büyük çıkmıştır.

6. GRAFİK TEORİSİ (GT) İLE PARÇA ÖLÇEKLİ BENZETİM VE DOĞRULAMA

Tez çalışmasının bu kısmı tezin ilk kısmındaki ergiyik havuzu boyutlu modelleme ve model doğrulama çalışmasından bağımsız olarak parça ölçekli ısı modelleme, anlık sıcaklık ölçümü ile model sonuçlarının doğrulanması ve kalibrasyonu süreçlerini içermektedir.

6.1. GT Yönteminin Geliştirilmesi

Bu kısmı geliştirmek için tezin ilk kısmında türetilmiş ısı transferi denklem ve matris formüllerine dayalı olarak Grafik Teorisi (GT) tabanlı bir çözümle çalışan bir model türetilmiştir. GT laplasyan çarpıma dayanan bir algoritmadır ve bu algoritma için geometri içerisindeki farklı parça kısımlarını benzetimle çözebilmek için çeşitli düğüm noktalarının komşuluk ilişkilerini kullanmaktadır. Geleneksel sonlu eleman yöntemiyle kıyaslandığında GT parça ölçekli çözümde aynı ısı transferi denklemlerini sonlu elemanlar ile kullanmasına rağmen ağ atamasız çözüm temeli sayesinde çok yüksek hızlara sahip olmaktadır. Böylelikle parça ölçekli olarak parçada her katman yakımından sonra biriken sıcaklıklar yakma döngüsü sonu sıcaklıklar olarak adlandırılarak ısı birikimi halinde tahmin edilebilmektedir.

Tez çalışmasının bu kısmının ilk adımı GT matematiksel temelinin ortaya konulmasıdır. Tezin ilk kısmındaki ısı transferi denklemleri ve laplasyan denklemlerin hazırlanması ilk adımın içeriğini oluşturmaktadır. Bu oluşturulan denklemlerin uygulanması için ise MATLAB ve Phyton arayüzleri kullanılarak Matlab arayüzünde C++ dili tabanında kodlar ve fonksiyonlar hazırlanmıştır.

2. adımda benzetim çalışması için endüstriyel amaçlı gerçek ve büyük ölçekli parça tasarımları yapılmıştır. Parça tasarımları sırasında parçaların ısı birikimine ve kalıntı gerilmeye maruz kalmaları kasıtlı olarak niyetlenmiş ve buna göre farklı parametreler denenmek üzere tasarımlar yapılmıştır.

Sonraki adım, yapılan tasarımlar için geliştirilen kodlar kullanılarak Grafik Teorisi benzetimlerinin yürütülmesi ve ardından parça imalatları sırasında uzun

dalga boyunda yüksek hızlı ve kızılötesi ölçüm yapabilen birden çok sensörün özelliğini taşıyan ısı görüntüleyici ile anlık sıcaklıkların ölçülmesi, GT tahminlerinin doğrulanmasıdır. Kıyaslamaya göre de GT sonuçları kalibre edilmiştir.

6.1.1. Parça ölçekli literatür çalışmaları

Toz yataklı lazer ergitme (TYLE) yönteminde kalıntı gerilmeleri, ısı birikimlerini ve nihayet mikroyapıyı tahmin etmek için ısı model kurma ihtiyacı bulunmaktadır. [Wei vd., 2020; Martin vd.,2019; Gatsos vd., 2020]. Bununla beraber ısı model kurma ve benzetim yürütme işlemleri tüm TYLE süresince mikrometreden milimetre boyutlarına kadar bir ısı transferi problemi barındırdığı için aynı ölçüde zorlaşmaktadır. Böylece değişik geometrilerin modellerinde hatalar sürekli değişmektedir. Hata payının küçük tutulması gerekliliğinin yanında karmaşık geometrilerin imal edilebildiği TYLE yönteminde çözümün hızı da çok önem arz etmektedir. Çözüm hızı olarak TYLE imalat süresinden daha kısa bir sürede parçanın ısı analizinin yapılabilmesi ideal bir hız olarak ortaya atılabilir ve bu yüzden çalışmalar ya tek çizgi ya da tek katman boyutunda planlanmaktadır [Wei vd., 2020; Polonsky, A., 2020]. Literatürde iç kanallara, ince duvarlı kısımlara veya açılı kesitlere sahip parçaların imalat kaliteleri ile geometriler arasında ısı modeller kullanılarak ilişkiler araştırılmaktadır [Fox vd., 2016]. Bununla beraber var olan ticari TYLE benzetim yazılımları ise istisnasız sonlu elemanlar yöntemiyle (SEY) çözüm yapmaktadır. TYLE SEY çözümündeki en önemli sorun parça geometrisinin her bir katmanda değişebilmesi ve bu yüzde her yeniden serilen katman için ağ yapısının tekrar yeniden atanması gerekliliğidir. Bu ise SEY çözümünde en çok zaman alan kısımdır ve üstelik parça hacmiyle birlikte üstel olarak artmaktadır. Bu hesaplama yükünün azaltılması için kullanılan temel 2 yöntemden biri sade karmaşık olmayan elemanlar ile ağ ataması yapmak ve diğeri eleman doğum ve ölüm yöntemi kullanılmasıdır ki ticari yazılımlar bu 2 temelin birleşimi şeklinde çözüm sunmaktadır [Schoinochoritis vd., 2015]. Bu tez çalışmasının ilk kısmında yürütülen mikro ölçekli benzetimlerde de hibrit yöntem kullanılmıştır. Şekil 4.10'da 3 boyutlu DC3D8 isimli 8 düğümlü basit yapılu tuğla tip olarak literatürde

anılan parça sade elemanı temsil ederken, Şekil 4.16 ve 4.17’de görülebileceği üzere ABAQUS yazılımı içerisinde katman serimi benzetimi için de element ölüm doğum yöntemi uygulanmıştır.

Bazı çalışmalar ise adaptif ağ atamam adıyla bilinen yöntemle hızlanma sağlamaktadır [*Hajializadeh vd., 2019; Gouge vd., 2019*]. Bu yöntemde sabit bir ağ eleman boyutu değil imal edilen katmanın durumuna göre uğraşılan alanda küçük fakat uzaklaştıkça büyüyen ağ eleman boyutu kullanılmaktadır [*Michaleris, P., 2014; Denlinger vd., 2017; Denlinger vd., 2014; Gouge vd., 2018; Pal vd., 2014; Zeng vd., 2015; Fischer vd., 2018*]. Bu yöntemle hızlı çözüm sunmaya çalışan ticari yazılımlar yine de düğüm mertebesinde sıcaklık verememektedir [*Zeng vd., 2015;*]. Ayrıca belirli bir alandaki sıcaklık dağılımının belirlenmesi için değişken ağ boyutu tutarsızlık oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra sıcaklık ve dolayısıyla kalıntı gerilme tahminlerinin nitelendirilmesi değişken ağ yapısı yüzünden zorlaşmaktadır [*DebRoy vd., 2018*]. Bazen saatlerden de uzun olarak birkaç katmanın modellenmesi günler sürebilmektedir [*Markl vd., 2016*]. Kundakcioglu vd. yalnızca dakikalık bir TYLE imalatının benzetim çalışmasının sonlu eleman çözümüyle 1.9 mm × 0.29 mm boyutlu bir çark için 21 saat sürdüğünü ortaya koymaktadır [*Kundakcioglu vd., 2016*]. Öte yandan bu tez çalışmasının ilk aşamasında yürütülen mikro ölçekli ergiyik havuzu benzetimleri de tek çizgi için 5 saat ve 4 çizgi 3 katmanlık bir imalat için ortalama olarak 1 m/s tarama hızında 28 saat sürmüştür. Bu yüzden araştırmacılar ağdan bağımsız ısı model yöntemlerini araştırmaya başlamışlardır. Buna bir örnek Hoelzle vd. tarafından elektriksel ağ tabanında çözüm sunan ısı modelidir [*Peng vd., 2018*]. Ayrıca tez çalışmasının bu kısmının yürütüldüğü ABD ülkesinde Virginia Polytechnic Institute And State University Industrial And System Engineering kurumunda görevli sayın yurtdışı danışman Prahadaha K. Rao ve ekibi tarafından daha önce öncü ve ilkesel olarak ortaya konan ve literatür kısmında detaylandırılmış ilk GT tabanlı çalışmalar da ağ yapısından bağımsız prototip çalışmalara örnektir.

6.1.2. Grafik teorisi matematiksel temeli

Teorik detayların net olarak ortaya konulması için GT denklemleri iletim modeli, ısı kayıpları ve ısı girdisi olarak 3 ayrı başlıkta incelenmiştir. Sonlu eleman ile kıyaslandığında Grafik Teorisi ağsız olarak grafiksel bir Laplas terimi (L) için özdeğer (ϕ) ve özvektörlerin (Λ) bulunmasını matris çarpımı kullanarak gerçekleştirmektedir. Yüksek hızlı bir ısı model ve benzetim çalışması daha da ötesinde makine öğrenmesi veya farklı algoritmaların da uygulanmasını kolaylaştırmaktadır.

6.1.2.1. Isıl iletim modeli

Bu kısımdaki başlangıç formülasyonları tez çalışmasının ilk kısmındaki gibi tekrar edilerek tutarlılığın korunması amaçlanmıştır. Bu çerçevede ilk olarak ısı transferi denklemleri termodinamiğin 1. Yasası çerçevesinde lazer enerjisi ve hareketli ısı problemi dikkate alınarak şöyle değerlendirilebilir [*Cengel ve Boles, 2001*];

$$E_{giriş} - E_{çıkış} = \Delta E_{sistem} \quad (6.1)$$

$$\bar{Q}_{La} = \bar{Q}_{il} + \bar{Q}_{ta} + \bar{Q}_{ış} \quad (6.2)$$

$$\bar{q}_{La} = \bar{q}_{il} + \bar{q}_{ta} + \bar{q}_{ış} \quad (6.3)$$

$\bar{Q}_{La}$ lazer ısı akısı, $\bar{q}_{il} + \bar{q}_{ta} + \bar{q}_{ış}$ terimleri ise sırasıyla iletim, taşınım, ışıınım temsil etmektedir. Toz yatağının her noktasının zamana bağımlı sıcaklığını temsil etmek için Fourier 3 boyutlu iletim kanununu ve yüzey tabanlı taşınım ışıınım terimlerini kullanarak denklem 6.2 veya 6.3 genel ısı yayılım formülü şeklinde yazılabilir [*Bejan ve Kraus, 2003*];

$$\partial H / \partial t = \nabla(k(T)\nabla T) + \bar{q}_{La} + \bar{q}_{yüzey} \quad (6.4)$$

Skalar 3 boyutlu T sıcaklık terimi ve yüzeye ilişkin terimler de ayrıca tanımlanabilir;

$$\text{Gradyan } T = \nabla T = \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial T}{\partial z} \quad , \quad \bar{q}_{yüzey} = \bar{q}_{ta} + \bar{q}_{ış} \quad (6.5)$$

Entalpi terimi de dikkate alındığında;

$$H = \int_{T_{ref}}^T \rho_{toz}(T) \cdot C_p(T) \cdot dT \quad (6.6)$$

Denklem 6.5 ve 6.6 Denklem 6.4'te yerine konularak;

$$\rho(T) \cdot C_p(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = k(T) \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q \quad (6.7)$$

Denklem 6.7'de, ρ yoğunluk, C_p özgül ısı, k iletkenlik Q ise yüzeysel ve ısı kaynağı terimlerini temsil eden terimdir. Denklem 6.7 düzenlenerek;

$$\rho C_p \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial n} - k \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) T(x,y,z,t) = Q \quad (6.8)$$

Elde edilir. Denklem 6.8 sıcaklık geçmişi imalat parametreleri, parça şekli ve malzeme özelliklerinin bir fonksiyonu olarak düşünüldüğünde çözülebilir. Bu durum Şekil 6.1'de görülmektedir.

$T(x, y, z, t)$'e göre çözüm		
Malzeme özellikleri ρC_p	Laplasyan parça şekli $\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial n} - k \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) T(x, y, z, t) =$	İmalat parametreleri $\frac{\overline{P}}{v \times h \times d \times \tau}$
k = Isıl iletkenlik katsayısı ρ = Yoğunluk C_p = Özgül ısı		$\overline{P}$ Lazer gücü (P) Hız (v) Mesafe (h) Katman kal. (d) Katman zamanı (τ)

Şekil 6.1. Diğer özelliklerin fonksiyonu olarak sıcaklık geçmişi

Denklem 6.8'deki 2. Terim ve Şekil 6.1'deki parça şekli genelde ∇^2 ile temsil edilerek Denklem 6.8 basitleştirilebilir;

$$\rho c_p \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial n} - k(\nabla^2) T(x,y,z,t) = E = \frac{P}{v.h.d.t} \quad (6.9)$$

Denklem 6.9'un çözümü anlık bir t anında $t \{x,y,z\}$ konumundaki anlık $T(x,y,z,t)$ sıcaklığını verir ve böylece, $\{x,y,z\}$ konumundaki sıcaklıkların zamanla toplamı toplam sıcaklık geçmişini vermektedir.

TYLE süreci boyunca lazer ışını toz yatağında serilmiş ve dijital model verisine göre belirlenen her katmanı yakmakta ve ardından tozun üzerine serildiği tabla 1 katman kalınlığınca aşağı inmektedir. Böylece yeni serilen katman için önceki katmanın son sıcaklığı başlangıç sıcaklığı olmaktadır. Son parça yüksekliğine ulaşıncaya kadar bu tekrar etmektedir. Grafik Teorisi Denklem 6.9'un sağ kısmını bu sürece uygun olarak başlangıç sıcaklığı gibi almaktadır. T anlık sıcaklık iken, T için çok küçük zaman aralıklarındaki çözüm tüm parça geometrisi alanında örneğin bir M düğüm nokta sayısınca ayrıklaştırma olarak adlandırılmaktadır. Bir sonraki adım bu noktada başlangıç sıcaklığı gibi sınır şartları olarak gereken varsayımları Şekil 6.2'deki gibi yapmaktır.

Varsayımlar $\frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial n} = 0 \quad (\text{Sınırdaki ısı kaybı yok})$ $T(x,y,z,t=0) = T_0(x,y,z) \quad (\text{Başlangıç sıcaklığı})$ $Q = 0 \quad (\text{Enerji girişi yok})$ $\alpha = \frac{k}{\rho c_p} = (\text{Isıl yayılım katsayısı})$
--

Şekil 6.2. Ayrıklaştırma varsayımları

Bu sayede sürekli Laplas operatörü (∇^2) yerine ayırık Laplas matrisi (L) konulabilir;

$$\frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} = \alpha L T(x,y,z,t) \quad (6.10)$$

Denklem 6.10'da T her n düğümü için parça alanındaki sıcaklık kolon vektörü ve $L [n \times n]$ boyutlu Laplas matrisidir. Dirichlet, Neumann, ve Robin tipi (tip 1, 2,

ve 3 sınır şartları) için Saito vd. çalışmasında belirtildiği gibi laplas alanı sınırlandırılmış bağlantılı varsayıldığında ayrık laplas operatörünün özdeğerleri (Λ) ayrık ve pozitif iken, özvektörler ise, ortagonal yani $\langle \phi_i, \phi_j \rangle = 0$ şartına uygun gerçekleşmektedir ve alan boyunca devam etmektedir [Saito, 2013; Chung, 1997]. Standart matris işlemleri ile bulunabilen bu özdeğer ve özvektörler, $L\phi = \phi\Lambda$ şartını da sağlamaktadır. Burada $\phi^{-1} = \phi'$, $\phi\phi' = I$, kuralı gereği bir ortogonal bir matrisin transpozu tersine eşit olduğu için ϕ matrisi her kolonu n sayıda özvektör barındıran temel matris ve Λ matrisi de 1. satırdan en büyük satıra kadar küçükten büyüğe (M) sıralanmış özdeğerleri içeren köşegen matrisidir. Bundan sonra üstteki matrise ϕ' ile sondan çarpım uygulatılırsa $L = \phi\Lambda\phi'$ elde edilebilmektedir [Bai vd., 2004]. Böylece Denklem 6.11 şöyle yazılır:

$$\frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} = \alpha(\phi\Lambda\phi')T(x,y,z,t) \quad (6.11)$$

Buraya kadarki teorik altyapıyı özetlemek adına Denklem 6.11'in 1. mertebe bir diferansiyel denklem olduğu ve çözümünün Denklem 6.12 gibi olduğu ifade edilebilir;

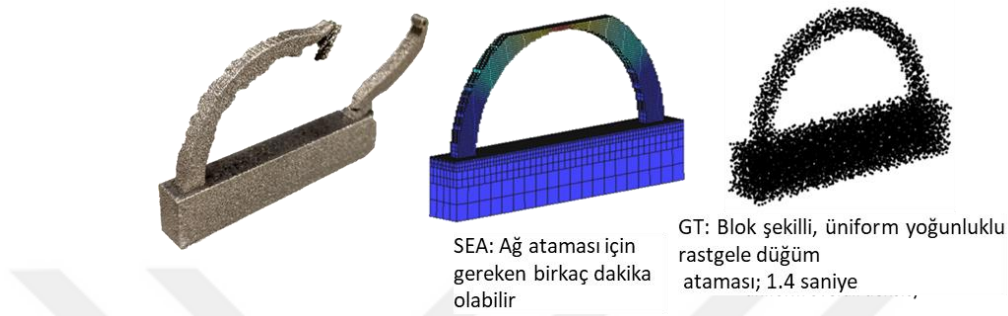
$$T(x,y,z,t) = e^{(-\alpha\phi\Lambda\phi' t)} T_0 \quad (6.12)$$

$\phi\phi' = I$ tanımı Denklem 12 ile birlikte Taylor serisi açılımında daha az iş yükü için kullanılırsa, Taylor açılımının ilk 2 teriminin de yardımıyla çok iş yükü gerektiren bir matris tersi alma işlemi yerine sadece tek bir matris çarpımı içeren Denklem 6.13 elde edilmektedir [Bai vd., 2004;

$$T(x,y,z,t) = (\phi e^{-\alpha\Lambda t} \phi') T_0(x,y,z,t) \quad (6.13)$$

Grafik Teorisinin tam tersine matris tersi hesaplamaları gerektiren ve böylece oldukça büyük bir sarfiyata sebep olan sonlu fark (SFY) veya sonlu elemanlar yöntemlerinden SEY, SFY ve Grafik Teorisi (GT) yöntemleri aslında benzer yöntemlerdir. İlk fark sonlu farklarda düğüm uzaklığı yaklaşımının sıfıra yakınsanması ile birlikte çözüm avantajının sınırlandırılıyor olması-verimin düşmesi- ve diğer fark GT'de sadece özdeğer ve özvektör hesaplanarak verimli bir hesaplama yapılıyor olmasıdır.

Denklem 6.13'ün çözümüyle toz yatağındaki herhangi bir noktanın herhangi bir an ve konumdaki ısı kaybı yayılımı bulunabilmektedir. Bu çözümün uygulanabilmesi için ise dijital bir model geometri verisi ve bu geometriye göre bir düğüm ataması yapılmış olması gerekmektedir. Şekil 6.3'te ağ ataması ve düğüm temsiliinin farkları ortaya konulmaktadır.

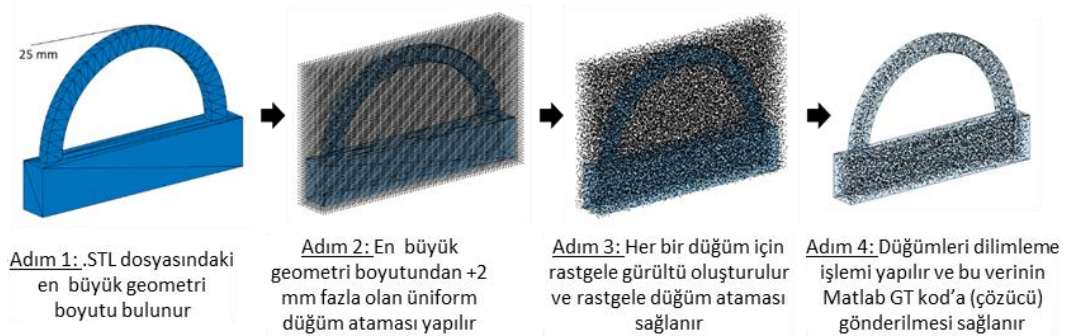


Şekil 6.3. Düğüm grafiği ve ağ atama (Rienchie, A'nın izniyle, 2022)

Şekil 6.4'te ise dijital tasarım verisinden düğüm çözümüne ulaşım yolu belirtilmektedir. Burada önem arzeden 2 noktadan ilki düğüm yoğunluğunun ayarlanması ve diğeri düğümler arası mesafenin ayarlanabilmesidir. Düğüm yoğunluğu mm^3 başına düğüm olarak tanımlandığında Denklem 6.14 ve 6.15 ile düğümler arası mesafe veya bir diğer adıyla komşuluk yarıçapı veya çapı V hacmi ifade ederken bulunacaktır;

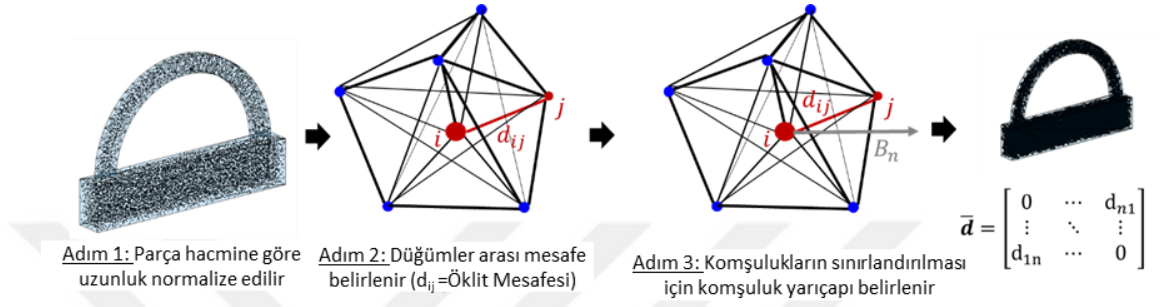
$$\text{Düğüm Mesafesi} = \sqrt[3]{\frac{1}{n_d}}, n_d = \frac{\text{düğüm sayısı}}{mm^3} \quad (6.14)$$

$$d_{av} = \sqrt[3]{\frac{V_{parça}}{n^2}} = \sqrt[3]{\frac{V_{parça}}{V_{parça} n_d}} = \sqrt[3]{\frac{1}{n_d}}, nn = V_{parça} n_d \quad (6.15)$$



Şekil 6.4. Dijital veri için düğüm çözümü (Rienchie, A'nın izniyle, 2022)

Bu noktada tıpkı bir metal kafesin içindeki gibi L global matrisi dahilinde düğüm komşuluklarını ve bu komşuluğun şiddetinin belirlenmesi gerekliliğini açıklamak isabetli olacaktır. Matris uzunluğu nxn ve toplam düğüm sayısı da n iken düğümler arası bağlantılar ısı akış yollarını ifade etmektedir. Şekil 6.5'te bir düğüm bulutu içindeki diferansiyel bir düğüm elemanı üzerinden bu ifadeler açıklanmaktadır. Öncelikle uzunluk Denklem 6.16'daki gibi normalize edilebilir;



Şekil 6.5. Diferansiyel bir düğüm elemanı içerisindeki düğüm bağlantıları

$$x_n, y_n, z_n = \frac{x, y, z (mm)}{L_s} \quad , \quad L_s (mm) = \sqrt[3]{V} \quad (6.16)$$

Bağlantıları sınırlandırabilmek için Şekil 6.5'teki adım 3'te tanımlamalar yapılmalıdır;

$$B_n = d_{av} r_f \quad , \quad d_{av} = \frac{\sqrt[3]{v}}{L_s} \quad , \quad r_f = \text{yarıçap faktörü} \quad , \quad v = \text{düğüm hacmi} = \frac{V}{n} \quad (6.17)$$

Sonraki adım bir ağırlık matrisi ve katsayısı tanımıyla bağlantıların şiddetini tanımlayabilmektir;

$$a_{ij} = -e^{\frac{d_{av}^2 - d_{ij}^2}{\sigma^2}} * \frac{g}{d_{av}^2} \quad (6.18)$$

$$\sigma = d_{av}^2 - d_{ij}^2 \text{ için standard sapma} \quad (6.19)$$

$$g = \text{kazanç (uygunluk) faktörü} \quad (6.20)$$

6.18-20 Denklemlerinde a_{ij} 2 farklı düğümün bağlantı şiddeti iken $d_i = (x_i, y_i, z_i)$ ve $d_j = (x_j, y_j, z_j)$ çerçevesinde belirli bir yarıçap içindeki bir düğümün konumu d_{ij} olmaktadır. g İse tam analitik çözümle karşılaştırma sonrası model sonuçlarının kalibrasyonu için tanımlanmış bir sabittir Gauss radyal dağılımı yönteminin kullanılmasıyla bitişik komşu A matrisinin kenar bağlantı şiddeti hesaplanacaktır;

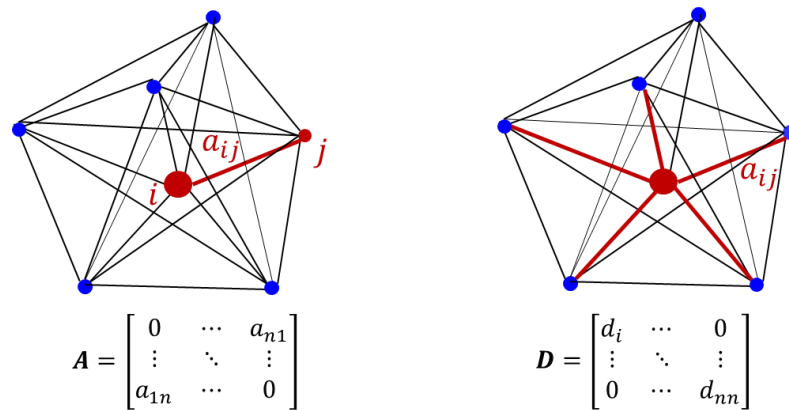
$$A = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & a_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1n} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (6.21)$$

Düğümün birbirene yaklaşması ile a_{ij} terimi 1'den 0'a doğru azalmakta ve düğümler arası bağlantı daha kuvvetli olmaktadır. Her bir ağırlıklı matris elemanının komşuluk derecesi (kuvvetli bir bağlantısı olup olmadığı ve kuvvet derecesi) böylece bir D köşegen matrisi tanımla bulunabilir;

$$D_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad (6.22)$$

$$D = \begin{bmatrix} d_i & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

Denklem 6.21-6.23 Şekil 6.6'dan anlaşılabilir.



Şekil 6.6. Bitişik matris ve komşuluk derecesi (Rienchie, A'nın izniyle, 2022)

A ve D matrislerinin toplamıyla laplas matrisi L bulunabilir;

$$L = A + D = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & a_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1n} & \cdots & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_i & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix} = L = \begin{bmatrix} L_{l-1} & \cdots \\ \vdots & L_l \end{bmatrix} \quad (6.24)$$

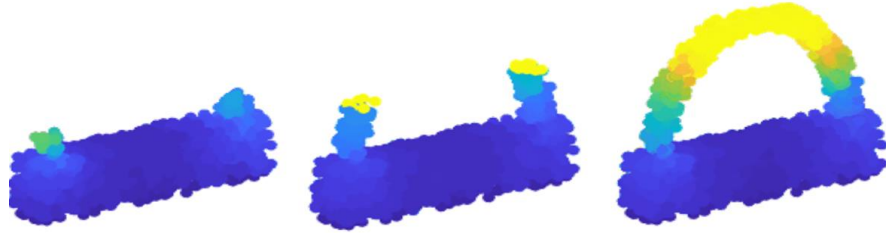
T sıcaklık vektörü de Denklem 6.25'teki gibi normalize edilebilir;

$$T_n = \frac{T\alpha L_s^2}{\alpha} \quad (6.25)$$

Denklem 6.11'den önce verilen $L = \phi\Lambda\phi'$ eşitliği göz önünde bulundurulursa L matrisinin çözümü için ϕ özdeğerler ve Λ özvektörlerin hesaplanması gerekliliği Denklem 6.26'daki gibi ortaya çıkmaktadır;

$$\phi = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \cdots & \phi_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_{n1} & \cdots & \phi_{nn} \end{bmatrix}, \quad \Lambda = \begin{bmatrix} \Lambda_{11} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \Lambda_{nn} \end{bmatrix} \quad (6.26)$$

Denklem 6.26'nın hesaplanarak Denklem 6.11'de yerine konulmasıyla Şekil 6.7'deki gibi ifade edilebilecek sıcaklık geçmişi elde edilmektedir.



Şekil 6.7. Parça içerisinde sıcaklık geçmişi (Rienchie, A'nın izniyle, 2022)

Sıcaklık matrisindeki satırlar düğümleri, sütunlar ise zaman adımlarını ifade etmektedir;

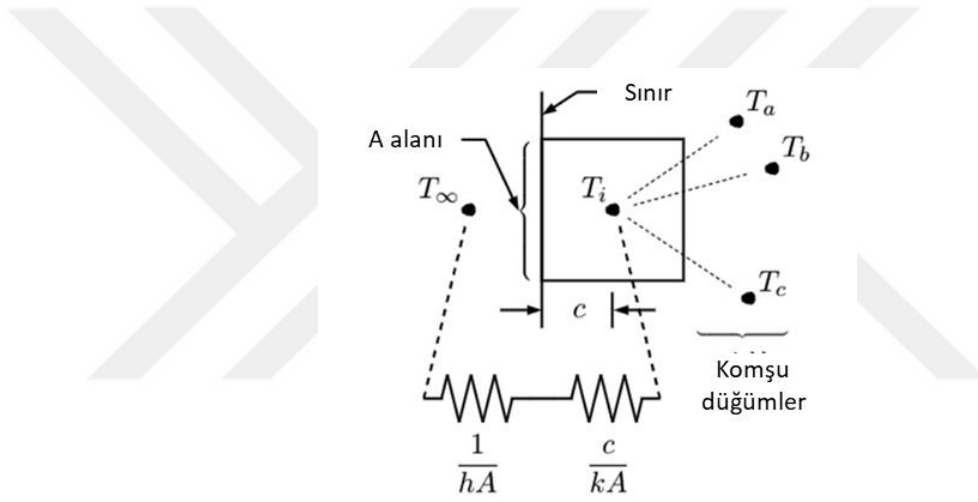
$$T_{hist} = \left\{ \overbrace{\begin{bmatrix} T_{11} & \cdots & T_{1s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{n1} & \cdots & T_{ns} \end{bmatrix}}^{s \text{ zaman adımı}} \right\} n \text{ düğüm} \quad (6.27)$$

Bu noktadan sonra düğümler 1.'den sonuncuya kadar sıralandığında TYLE yöntemi benzetilmiş olacaktır; ABAQUS veya Ansys arayüzlerindeki element

doğum ölüm tekniğinin kullanımına benzer şekilde konumları bilenen düğümlerin aktifleştirilmesi veya pasif hale getirilmesiyle lazerin ergiteceği katmanların serimi ve yakımı benzetilebilir.

6.1.2.2. Taşınım ile ısı kaybı modeli

Grafik Teorisinin ilk uygulamalarında taşınım Newton'un soğuma kanununa dayalı geliştirilmiş olsa da sınırlardaki düğüm yüzeylerinin dikkate alınamıyor oluşu ve zaman adımına bağlı kalınması gerekliliğinin sınırlandırıcı bir etkisi olması dolayısıyla herhangi bir i. düğüm açısından Şekil 6.8'de belirtildiği gibi ısı direnç modeli geliştirilerek uygulanmıştır [Yavari vd., 2020].



Şekil 6.8. Taşınım ile ısı kaybı için ısı direnç varsayımı [Cole vd., 2022]

Şekil 6.8'de, A_i taşınım ile ısı transferi için yüzey alanı, c_i düğüm ile parça dış yüzey mesafesi (metre), h_i düğüm taşınım katsayısıdır. $Q = c_p v_i \frac{\partial T_i}{\partial t}$ enerji denge denkleminde dayanarak direnç formülü yazılabilir;

$$Q = \frac{T_{\infty} - T_i}{R_i} = , \quad R_i = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{c_i}{k A_i} \quad (6.28)$$

Bu noktada önceki Grafik Teorisi çözümüne uygulanabilmesi amacıyla Denklem 6.28'in boyutsuzlaştırılması gerekmektedir. Bu amaçla Denklem 6.29'daki normalize tanımlamalar yapılmıştır;

$$\bar{T} = \frac{T-T_{\infty}}{T_1-T_{\infty}}; \bar{t} = \frac{kt}{CL_s^2}; (\widetilde{w_{ij}}) = \frac{w_{ij}L_s^2}{kV_i}; \bar{A}_i = \frac{A_i}{L_s^2}; \bar{V}_i = \frac{V_i}{L_s^3}; \bar{c}_i = \frac{c_i}{L_s}; B_i = \frac{h_iL_s}{k} \quad (6.29)$$

Green Fonksiyonuna dayalı daha detaylı analitik çözüm daha önceki çalışmalarda mevcuttur [Cole vd., 2022]. Boyutsuzlaştırma ve ayırıklaştırma sonucunda L matrisi köşegenine hacimsel ısı kaybı terimi eklenmektedir;

$$L_{ij} = \begin{cases} -\widetilde{a_{ij}}, & i \neq j \\ \sum_{j=1}^n \widetilde{a_{ij}} + \bar{E}_i, & i = j \end{cases} \rightarrow \mathbf{L} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & L_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n1} & \cdots & L_{nn} \end{bmatrix} \quad (6.30)$$

6.1.2.3. Isı girdi modeli

Giren enerji olarak fiziksel denklemler temelinde başlangıç sıcaklığı T_0 Denklem 6.12'den her bir yeni serilen katman için (Şekil 6.7'deki sarı kısımlar) tanımlanabilir. Diğer yandan enerji gidisi denkleminde imalat parametreleri olan tarama uzunluğu, tarama hızı, lazer gücü, toz yatağı absorbtivitesi, malzeme özgül ısı ve yoğunluğu gibi özelliklerin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu amaçla Denklem 6.7'de eşitliğin sol tarafı diferansiyel sıcaklık farkına eşitlenerek Denklem 6.31 elde edilmiştir;

$$dT = \Delta T = \frac{Qdt}{mC_p} \quad (6.31)$$

$m = \rho v$, $\Delta T = T_0 - T_{\text{önceki}}$, $Q = A_e P \left(\frac{S_l}{V} \right)$ gibi temel ısı transferi eşitlikleri dikkate alındığında Denklem 6.32 elde edilir;

$$\frac{A_e P \left(\frac{S_l}{V} \right)}{\rho v C_p} + T_{\text{önceki}} = T_0 \quad (6.32)$$

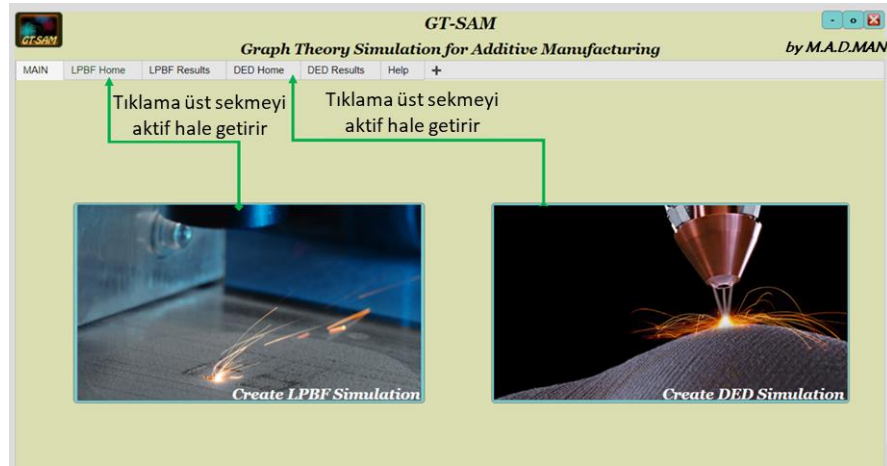
A_e absorptivite , P lazer gücü, S_l tarama uzunluğu, V tarama hızı, ρ yoğunluk, v ergimiş hacim ve C_p özgül ısıdır.

Her bir dijital parça geometrisi için sıcaklık geçmişinin elde edilmesi amacıyla Denklem 6.13, Denklem 6.30 ve Denklem 6.32 Matlab ortamında kodlama yardımıyla bir benzetimde uygulanmıştır.

6.1.3. GT matlab kodlama süreci

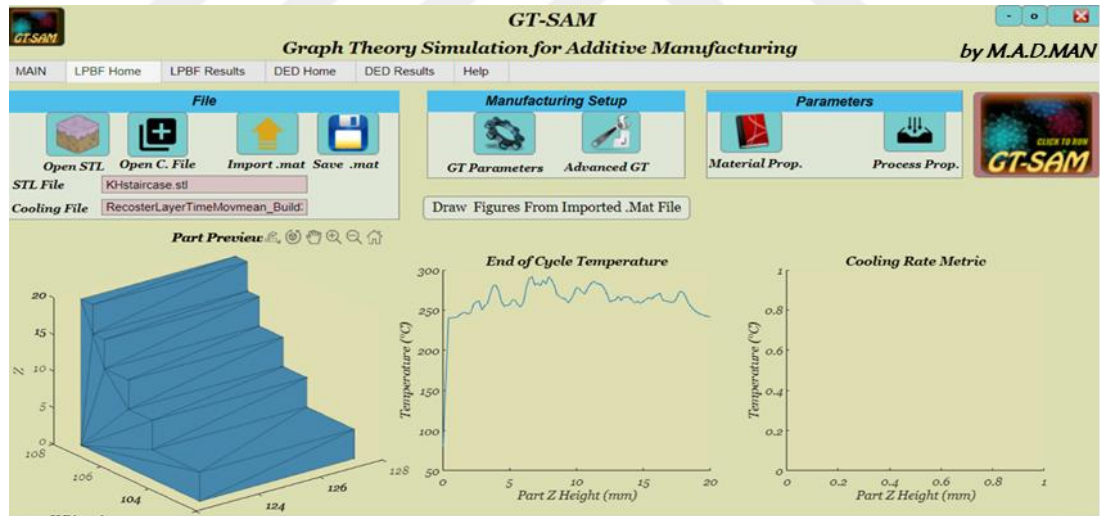
Kısım 6.1.2’de geliştirilen bütün matematiksel temel Matlab arayüzünde kodlar ile uygulanmıştır. Bu amaç için, 30 adet .m uzantılı dosya bir diğer adıyla Matlab fonksiyonu yaklaşık 30000 kod satırından oluşan bir ana. m uzantılı dosya üzerinden çalıştırılmıştır. Benzetimin verimliliği ve standardizasyonu açısından fonksiyonların ilk kısmı. STL uzantılı dijital geometri verisinin ve benzetimi çalıştırmak için zorunlu olan ve tüm imalatın zamanla değişimini ifade eden katmanlar arası soğuma diyagramı dosyasının (.TXT veya .CSV formatında) tanımlanması için çalıştırılmaktadır. Bu yüzden her Grafik Teorisi benzetimi. STL dosyasını ve .TXT veya .CSV uzantılı soğuma verisini gerektirmektedir. Kalan fonksiyonların da bir kısmı. STL verisindeki üçgensel alanların, bu alan yüzeyleri ile kenarlarının ve birleşimlerinin koordinatlarının tanımlanması için çalıştırılmaktadır. Sonraki fonksiyonlar $Z=0$ yüksekliğinden parçanın en yüksek kısmının yükseklik değerine kadar belirlenmiş katman kalınlığında üst görünüş kesit alanlarının çıkarılması, bir başka deyişle dilimleme için çalıştırılmaktadır. Son olarak kalan fonksiyonlar ile boyutsuzlaştırma tanımlamaları, malzeme özellikleri tanımlamaları, düğüm yoğunluğu, komşuluk yarıçapı ve kazanç faktörü gibi katsayıların tanımlamaları yapılmaktadır.

Tüm bu fonksiyon ve kodları barındıran Matlab dosyalarının düzenli ve açık kaynaklı bir biçimde kullanımı amacıyla bu tez kapsamında özel bir kullanıcı arayüzü geliştirilmiştir. Şekil 6.9’da ilgili anasayfa ve sekmeler gösterilmektedir.

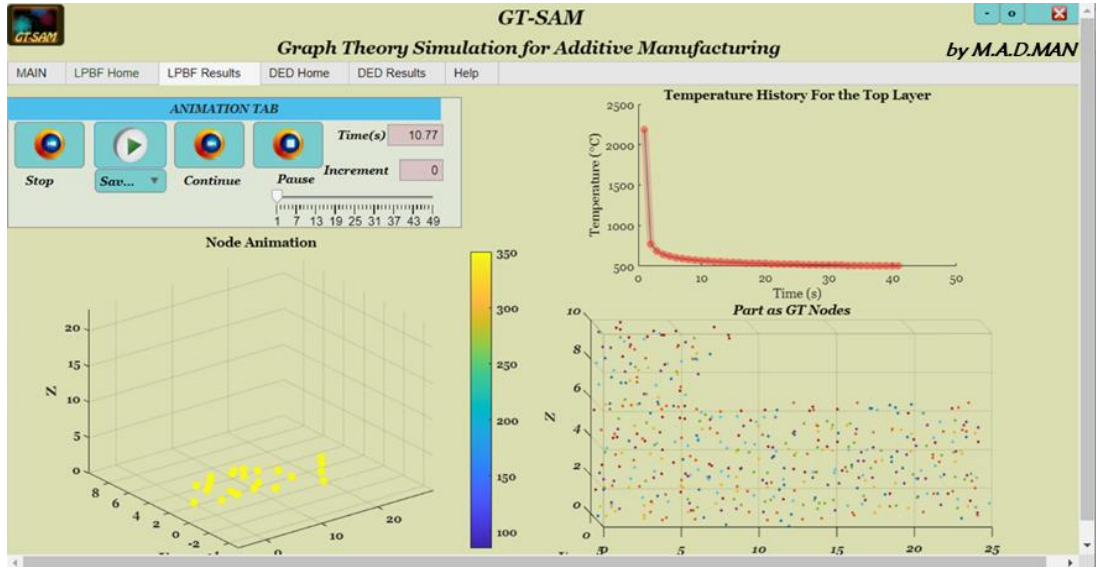


Şekil 6.9. Grafik teorisi benzetimi için geliştirilen kullanıcı arayüzü

Yazılım yurtdışındaki çalışma kapsamında TYLE yöntemine ek olarak doğrudan metal ergitme (DME) yöntemine yönelik de kodlar barındırması planlanarak oluşturulduğu için ana pencerede buna yönelik detaylar da mevcuttur. Benzetim penceresi Şekil 6.10 ve 6.11’de örnek bir merdiven basamağı geometrili parça için sonuçları alınmış halde de verilmektedir.

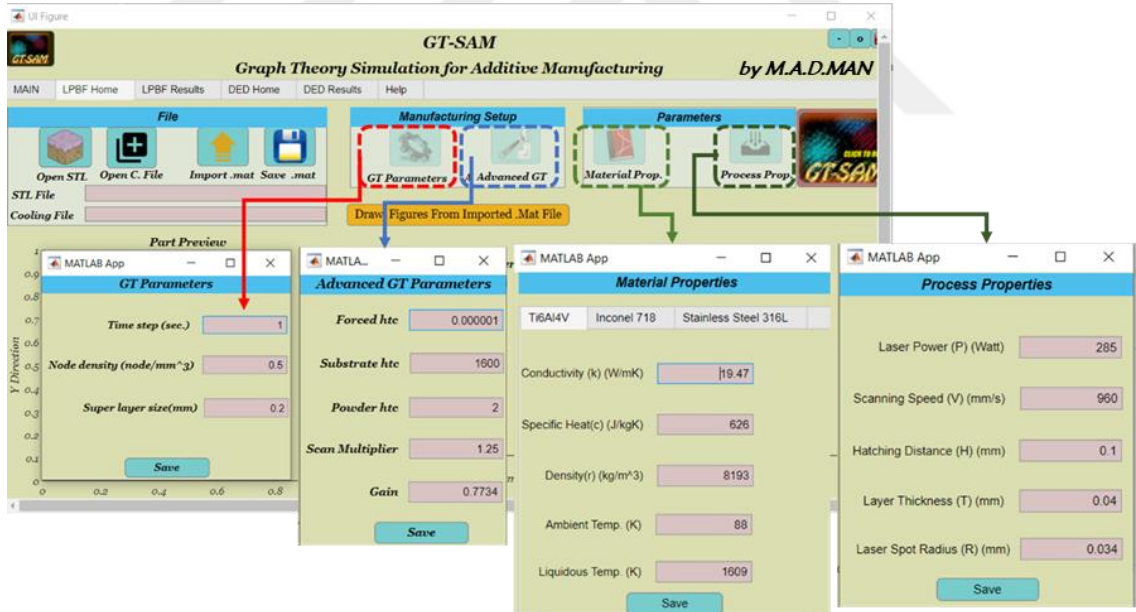


Şekil 6.10. Benzetim sekmesi



Şekil 6.11. Sonuçlar sekmesi

Şekil 6.12’de ise malzeme özellikleri, imalat parametreleri ve Grafik Teorisi katsayılarının girilebilmesi için hazırlanan yan pencereler görülmektedir.



Şekil 6.12. Özellik girme pencereleri

Şekil 6.12’deki bazı terimlerin açıklanması gerekmektedir. Aşağıda bu terimler açıklanmıştır:

- Powder htc: Tozlar arasındaki ısı transferini temsil eden ısı transfer katsayısıdır.

- Substrate htc: Toz ve imalat tablası arasındaki ısı transferini temsil etmektedir.
- Forced htc: Bütün bir katmanın üst yüzeyi ile çevre koruyucu gaz arasındaki ısı transferini temsil eden katsayıdır. Her bir katman yakımından sonra o katman en üst katman konumunda olduğu için her bir katmanın üst yüzeyi ile çevre gaz arası ısı transferinin ayarlanmasını sağlamaktadır.
- Scan multiplier: GT kodunun geliştirilmesi esnasında bazı analitik çözümlerle karşılaştırılan GT laplasyan çözümünün tam çözümle üst üste bindirilebildiği katsayı olarak kullanılmaktadır. Değiştirilmemektedir.
- Super layer size: Normal bir TYLE imalatında belirlenen katman kalınlığının 5 katı, 10 katı gibi değerlerde bir değeri olan süper katman boyutu, birkaç katmanın birden paketlenmiş bir halde işleme alınması için oluşturulmuş bir katsayıdır ve çözümün daha hızlı fakat aynı zamanda tutarlılığını kaybetmeden yapılmasını sağlamaktadır.
- Node density: mm^3 cinsinden parça hacmi başına düşen düğüm sayısıdır ve artırılması çözümü yavaşlatarak tahminin sıcaklık eğrisinin çözünürlüğünü artırmaktadır.

6.2. Parça Tasarımı

Benzetim sonuçlarının alınmasını takiben tutarlı bir deneysel doğrulama süreci yürütmek amacıyla öncelikle imalatı ve imalat sırasında anlı sıcaklık ölçümü yapılması planlanan parçaların tasarlanmasıyla deneysel sürece hazırlık başlatılmıştır. Tezin ilk kısmındaki mikro benzetim ve doğrulama çalışmasından farklı olarak parça ölçekli bir benzetim, parça ölçekli bir imalat gerektirdiği için aşağıdaki yaklaşımlar çerçevesinde tasarımlar endüstriyel parça geometrilerine dayalı olarak planlanmıştır:

- Grafik Teorisi, matematiksel açıdan hacimsel ısı kaybı, hacimsel ısı girdisi gibi varsayımlara dayandırıldığı için çizgi benzetimleri gibi mikro ölçekli benzetimlere uygun düşmemektedir.

- Endüstriyel seviyede verimli bir şekilde uygulanabilir sonuçlar almak için endüstride kullanılan gerçek geometriler seçilmiştir. Bu sayede bu geometrilerin sıcaklık birikimleri ölçülebilmektedir.
- Savunma, havacılık biyomekanik ve tıp gibi farklı ve stratejik alanlarda kullanılan parçaların neredeyse tamamının karmaşık ve değişken kesitli geometriler taşıdığı düşünüldüğünde gelecekteki olası parça gerilme tahminlerine, yapay zeka ve makine öğrenmesi algoritmalarının uygulanmasına elverişli olması için endüstriyel veri setlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçlarla deneysel planlama için Çizelge 6.1 oluşturulmuştur. Çizelge 6.1 incelendiğinde bazı parçaların geometrik zorluklarına göre yüksekliklerinin farklı planlandığı görülebilir.

Çizelge 6.1. TYLE süreciyle imalat ve imalat sırasında anlık sıcaklık ölçümü planı

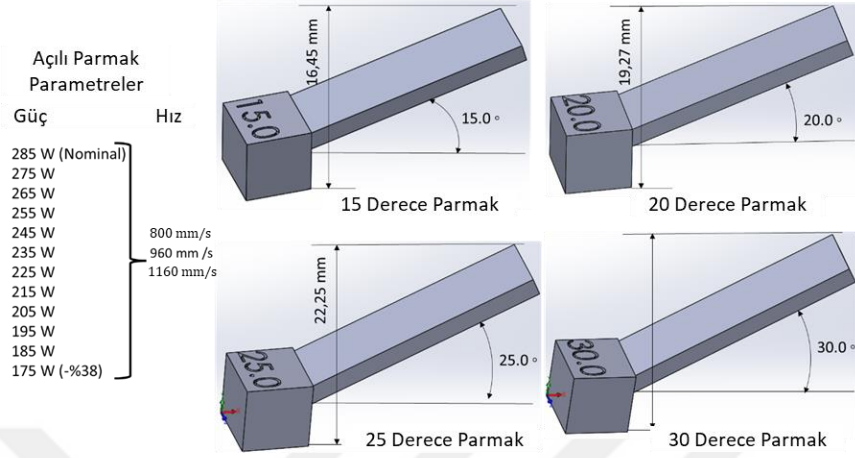
Geometri Adı	Maks. Boyutlar (x,y,z) (mm)	Standart Parametrelili Parça Sayısı	Kontrollü Parametrelili Parça Sayısı
Açılı Parmak	10 x 10 x 35	4	4
Trompet	10X10X100	2	2
Türbin Çarkı	50X50X20	2	2

Bu deney kapsamında denenecek parametreler için en alt ve en üst gibi sınırlar daha önce Grafik Teorisi prototip benzetim çalışmalarıyla ortaya konulan ve EOS M290 cihazının kapasitesine bağlı olarak ortaya çıkan parametrik sınırlar çerçevesinde oluşturulmuştur. Buna göre;

- ❖ Güç değerlerinin üst değeri nominal değer olan 285 W değerinin yaklaşık $\pm\%30$ 'unu aşmayacak şekilde belirlenmiştir. Böylece üst değer 345 W alt değer 200 W olarak belirlenmiştir.
- ❖ Hız değerleri için 960 mm/s değerinin $\pm\%20$ 'sini aşmayacak şekilde alt değer olarak 800 mm/s, üst değer olarak 1160 mm/s belirlenmiştir.

Açılı parmak geometrileri 15°, 20°, 25° ve 30° olmak üzere 4 çeşit farklı açıya sahip olarak tasarlanmıştır. Böylece parametre değişimleriyle açılı kısımda

birikecek ısının miktarına göre geometri kontrolü amaçlanmıştır. Şekil 6.11’de açılı sırasına göre bu tasarımlar verilmektedir.



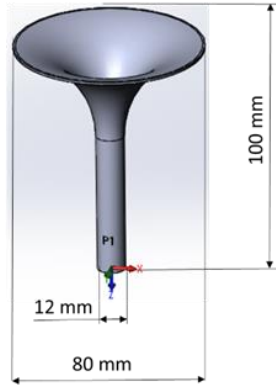
Şekil 6.11. Açılı parmak parça tasarımları

Şekil 6.11’de görülen parametrelere göre 2 takım imalat planlanmıştır. İlk takım imal edilecek cihaz olan EOS M290 cihazının nominal parametrelerine göre, diğer takım benzetim sonuçlarına göre kontrollü güç-hız parametrelerine göre incelenmiştir.

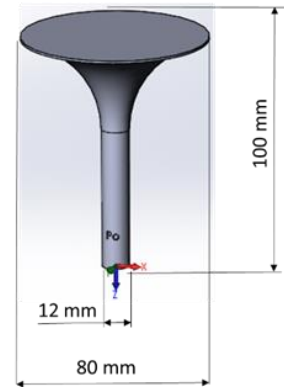
Bir sonraki adımda ortasında bir delik bulunan trompet çalgı aletine benzer ve çapına göre yüksekliği oldukça büyük olan bir tasarım ve bunun deliksiz hali yapılmıştır. Şekil 6.12’de görülen tasarım ile belirli bir katman sonrası oluşabilecek çarpılma veya yüksek ısı birikimi sonucu yüzeyde/şekilde değişiklik gözlemlenmesi ve benzetim sonuçlarına göre kontrol edilecek güç-hız parametresi ile bu denli büyük bir parçada bunun önlenmesi ve delikli tasarımda ise ince duvarlı bir parça gibi düşünüldüğünde ısı birikiminin bu denli büyük bir parçada önlenip önlenemeyeceğinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Trompet Parametreleri

Güç	Hız
225 W (+%20)	800 mm/s 960 mm /s 1160 mm/s
235 W	
245 W	
255 W	
265 W	
275 W	
285 W (Nominal)	
295 W	
305 W	
315 W	
325 W	
335 W	
345 W (+%20)	



Delikli Trompet



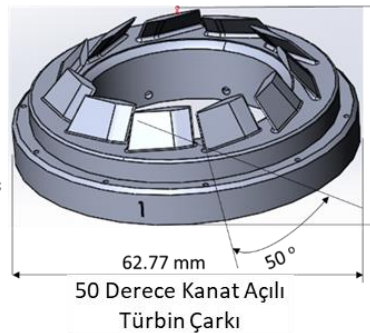
İçi Dolu Trompet

Şekil 6.12. İnce duvarlı bir parça olarak delikli trompet ve katı trompet

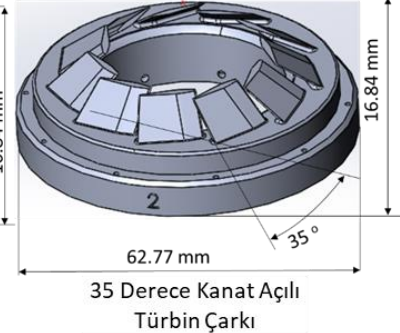
Endüstriyel amaçlı son geometrik tasarım yüksekliğine oranla çapı büyük olan bir türbin çarkı olmuştur. 2 farklı türbin çarkı üst kısmında 2 farklı kanat açısında tasarlanmıştır. Bu tasarımda da büyük sıcaklık düşüş ve yükselişlerinin gözlemlenebilmesi ve benzetim ile tahmin düzeyi araştırılmak istenmiştir. Kanatlı kesitler yine hacimli bir parçadan ince duvarlı bir parçaya geçişi temsil etmektedir. İlgili tasarımlar Şekil 6.13'te verilmiştir.

Türbin Çarkı Parametreleri

Güç	Hız
225 W (+%20)	800 mm/s 960 mm/s 1160 mm/s
235 W	
245 W	
255 W	
265 W	
275 W	
285 W (Nominal)	
295 W	
305 W	
315 W	
325 W	
335 W	
345 W (+%20)	



50 Derece Kanat Açılı
Türbin Çarkı



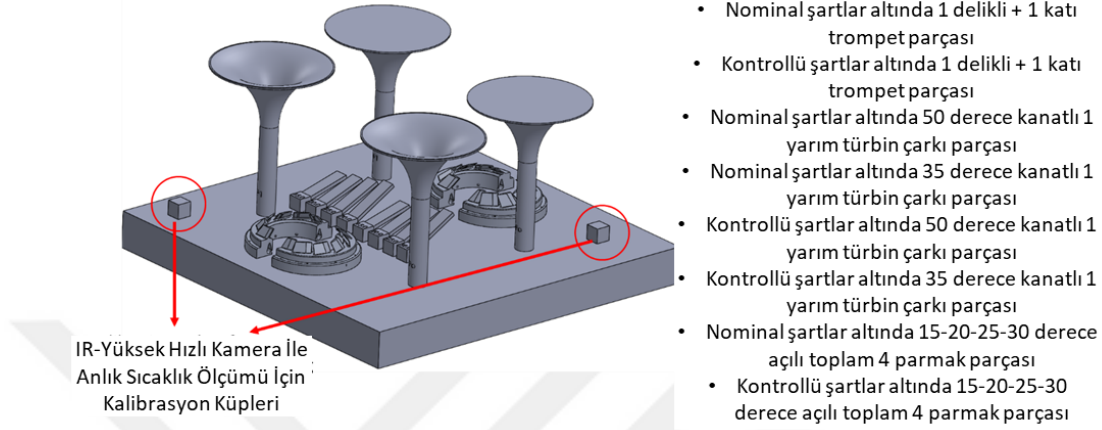
35 Derece Kanat Açılı
Türbin Çarkı

Şekil 6.13. Türbin çarkı tasarımları ve ilgili parametreler

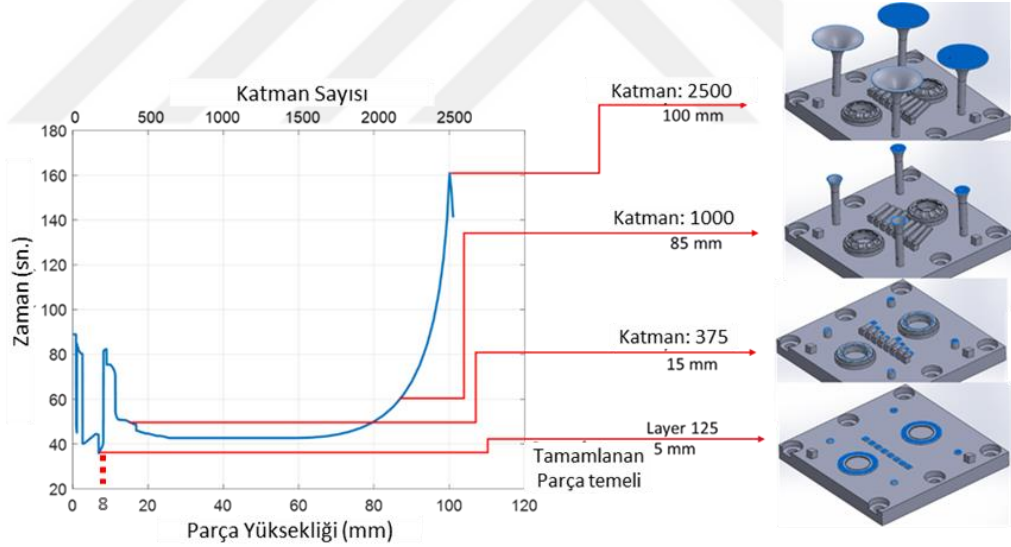
6.3. GT Benzetim Çalışması

Grafik Teorisi bazlı benzetim için .STL dijital model dosyası .TXT or .CSV formatlı katmanlar arası soğuma veri dosyasının elde edilmesi zorunludur. Şekil 6.14 bu iki dosyadan ilki olan tüm parçalara ait imalat tablasının tek bir .STL dosyasına çevrilmiş halini, imalat sırasında sıcaklık ölçüm kalibrasyonu için

kullanılmak üzere eklenmiş kalibrasyon küp tasarımlarıyla birlikte ortaya koymaktadır. Şekil 6.15'te ise tüm bu parçaların imalatları boyunca geçen sürenin parça yüksekliği cinsinden ifade edildiği katmanlar arası soğuma verisi görülmektedir.



Şekil 6.14. İmalat tablası



Şekil 6.15. İmalat tablasındaki tüm parçalar için imalat-süre eğrisi

Bu noktaya kadar, GT temelli benzetim çalışması, belirli Matlab fonksiyonları, döngüler ve özel kodlar kullanımıyla laplasyan ayrık çözümü önceki kısımda geliştirilen matematiksel manipülasyonlara göre yapmak için özel olarak geliştirilen arayüzü kullanmaktadır. Öncelikle açılı parmak parçaların benzetimi tamamlanmıştır. Bu benzetimler sonucunda her bir açılı parmak parça için 2 adet şekil elde edilmiştir. İlk şekilde ilk katmandan son katmana kadar ısı birikiminin

tahmini olarak her katmandaki sıcaklıkların üst üste birikmesi neticesinde parçada imalat sonrası oluşan ısı her bir parametre için modellenmektedir. İlgili katmandaki ani sıcaklık sıçrayışı o katmanda oluşma ihtimali olan kalıntı gerilme veya hasar anlamına gelmektedir. Böylece Şekil 6.11-13 arasında sırayla açılı parmak, trompet ve türbin çarkı parçaları için türetilen farklı parametrelerin parçanın her bir katmanında oluşturabileceği sıcaklık sıçramaları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Grafiksel sonuçlar, deneysel ölçüm ve karşılaştırma ise sonuçlar kısmında verilmektedir. Güç-hız parametrelerine Grafik Teorisi prototipine dayalı olarak yapılan önceki gözeneklilik ve yakma eksikliği deneysel sonuçlarına bakılarak karar verilmiştir. Bu şekilde nominal gücün $\% \pm 20$ aralığında güçler ve nominal hızın $\% \pm 15$ aralığındaki hızlar Çizelge 6.2’de verildiği gibi kullanılmıştır.

Çizelge 6.2. Proses parametrelerinin gözlemlenmesi için belirlenen güç-hızlar

Parça Yüksekliği=100 mm		Parça Yüksekliği=16.84 mm		Parça Yüksekliği=Her parmak için farklı	
Trompetler		Türbin Çarkı		Açılı Parmak	
Güç	Hız	Güç	Hız	Güç	Hız
225 W (-%21)	800 mm/s (-%15)	225 W (-%21)	800 mm/s (-%15)	285 W (NOMINAL)	800 mm/s (-%15)
235 W		235 W		275 W	
245 W		245 W		265 W	
255 W		255 W		255 W	
265 W		265 W		245 W	
275 W		275 W		235 W	
285 W	960 mm/s	285 W	960 mm/s	225 W	960 mm/s
295 W		295 W		215 W	
305 W		305 W		205 W	
315 W		315 W		195 W	
325 W		325 W		185 W	
335 W		335 W		175 W (-%38)	1160 mm/s (+%15)
345 W (+%21)	1160 mm/s (+%15)	345 W (+%21)	1160 mm/s (+%15)		

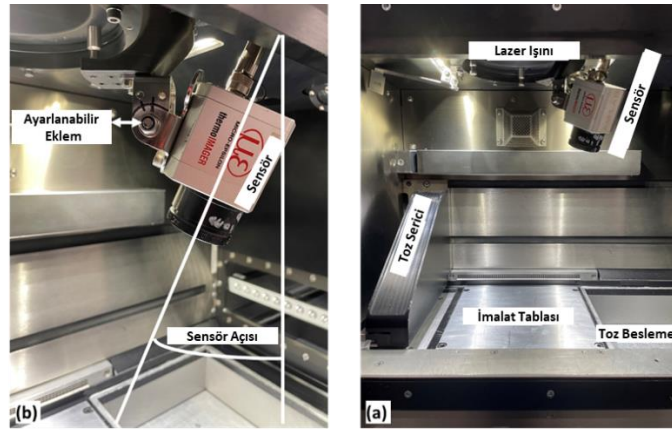
6.4. Deneysel Çalışma ve Gözlem

Tasarlanan endüstriyel amaçlı parçaların hem nominal hem de kontrollü olarak planlanan parametrelerde imalatlarını ve bu imalatlar sırasında anlık sıcaklık ölçüm çalışmalarını içeren deneysel süreç Edison Welding Institute (EWI) olarak bilinen kurumda Ohio’da ticari bir EOS M290 açık mimariye sahip cihazda gerçekleştirilmiştir. Daha önceki çalışmalarda da farklı imalatlar için söz konusu cihaz GT bazlı benzetimlerin ilk prototiplerinin doğrulanmasında kullanılmıştır. Şekil 6.16’da tüm parametrelerine erişimin açık olduğu ve farklı sensör yerleşimlerine göre kurgulanmış cihaz görülmektedir.



Şekil 6.16. EOS M290 açık mimari TLYE cihazı

Bu çalışma kapsamında yürütülen anlık sıcaklık ölçümü için hem kızılötesi (IR), hem uzun dalga boyu özellikli hem de 30 fps (saniyedeki kaydedilen kare sayısı) kayıt özelliği ile nispeten hızlı bir ısı görüntüleyici kullanılmıştır. Söz konusu sensör uygun açıda kullanıldığında tüm M290 cihaz tablasını kaydedebilmekte ve 0-250 veya 150-900 C° olarak 2 farklı sıcaklık aralığında ölçüm alabilmektedir. Şekil 6.17a ve b sensör yerleşiminin cihaz kabini içinden görünümünü vermektedir.



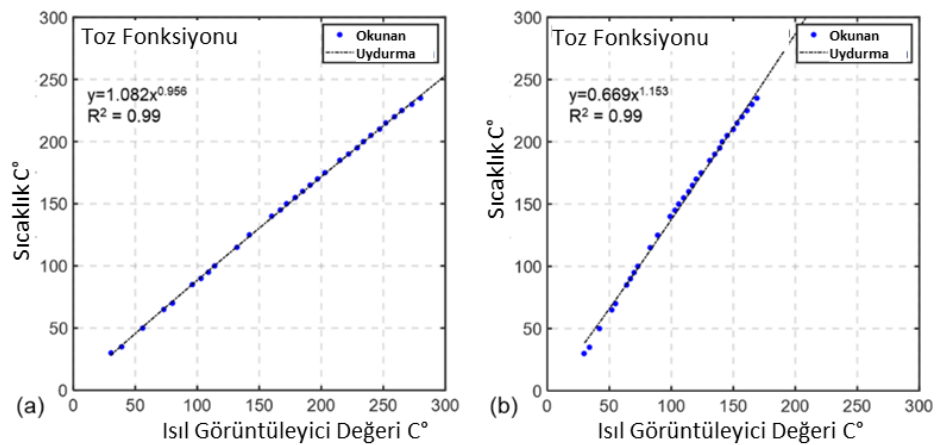
Şekil 6.17. Isıl görüntüleyicinin konumlandırılması

Ölçüm öncesinde sensörün kalibrasyonu gerekmektedir. Bu amaçla ölçüm sırasında siyah blok yöntemi kullanılan ısılıçiftlerin yardımıyla uygulanmıştır. Bu kalibrasyon çalışmasının başlıca sebebi ölçülecek sıcaklıkların göreceli sıcaklıklar olmasıdır. İmalat sonrası yarı statik bir teknik kullanımı anlamına gelen kalibrasyon işleminde sıcaklığı bilinen bir ısıl kütlenin temaslı ısılıçift

yardımıyla sıcaklığı ölçülmektedir. Daha sonra elde edilen verilerden oluşturulan sıcaklık eğrisi ısı görüntüleyicinin kalibrasyonunda referans olarak kullanılmaktadır. Isılçiftlerin bu sıcaklığı bilinen kütle olan Şekil 6.14'te de verilen kalibrasyon küplerine kaynatılması vasıtasıyla küp sıcaklık tam ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

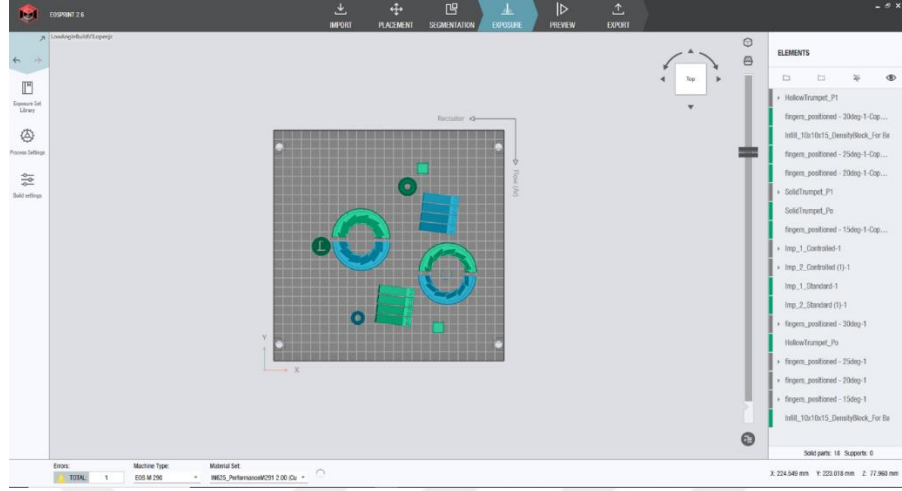
Bu küp şekilli parçalar ısılciftlerle nokta kaynağı ile kaynatılmış olup 10x10x10 mm ölçülerde imal edildikten sonra tabladan kesilmiştir. Ayrıca bu küpler tabla üzerinde bir ısıtıcı kartuş üzerine yerleştirilmiştir. Akabinde ise diğer parçalarla aynı seviyede olacak şekilde ayarlanmışlardır. Isıtıcının sıcaklığı yavaş yavaş artırıldıkça, kaynaklı K tipi ısılciftin ölçtüğü kesin sıcaklık ve ısı görüntüleyicinin ölçtüğü sıcaklıklar kaydedilmiştir. Toz metal ve katıl metal emissivite farklılıklarının hesaba katılması için de, küplerden birinin üzerine toz serilerek aynı ölçüm işlemi tekrarlanmıştır. Böylelikle parçaların toz serilme sonrası veya serilmeden önce ulaştıkları sıcaklıklar elde edilebilmektedir.

Bu noktada ısı görüntüleyicinin sıcaklıkları ısılcift sıcaklıklarıyla eşleştirilerek kalibrasyon tamamlanmaktadır. Eşleştirme işlemi için ise doğrusal regresyon yöntemiyle kaydedilen verilerin birbiri üzerine uydurulması uygulanmaktadır. Şekil 6.18'de elde edilen kalibrasyon eğrileri görülmektedir.



Şekil 6.18. (a) Toz için kalibrasyon eğrisi (b) katı metal için kalibrasyon eğrisi

Şekil 6.19’da ise EOS cihazının yazılımı EOSPrint arayüzünde ayarlamaları yapılmış imalat tablasının üstten görünüşü gösterilmektedir.



Şekil 6.19. İmalat öncesi imalat tablasının üstten görünümü

Son olarak anlık sıcaklık ölçümü sırasında türbin çarkı kesitinin sıcaklığı ölçülürken kaydedilen ve büyütülmüş ölçüm ekran çıktısı Şekil 6.20’de verilmiştir.



Şekil 6.20. Anlık sıcaklık ölçüm işlemi sırasında alınan görüntü (türbin çarklarından birinin ilgili kesiti lazer tarafından yakılmaktadır)

Son olarak tüm imalar süresince kullanılan sabit imalat parametreleri ve malzeme özellikleri Grafik Teorisi varsayımları çerçevesinde Çizelge 6.3’te verilmektedir.

Çizelge 6.3. Inconel 718 malzeme için GT çözümünde kullanılan parametreler

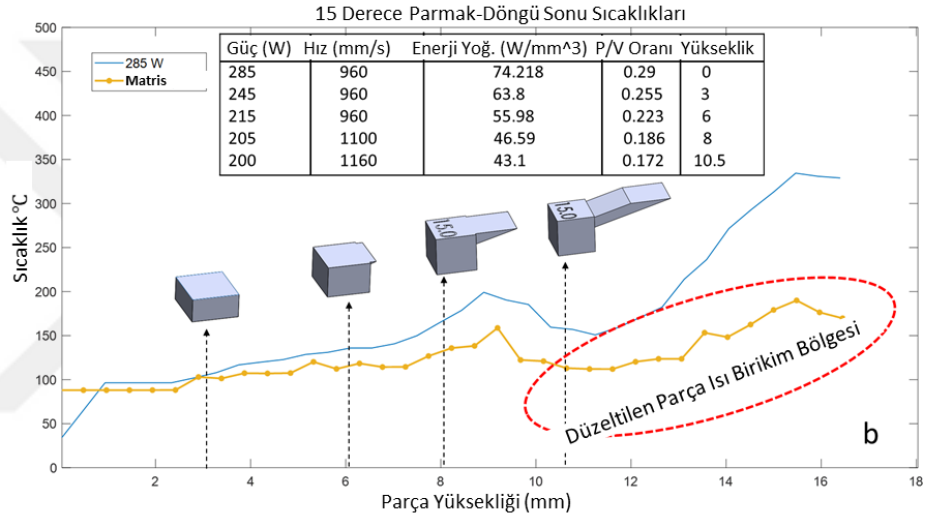
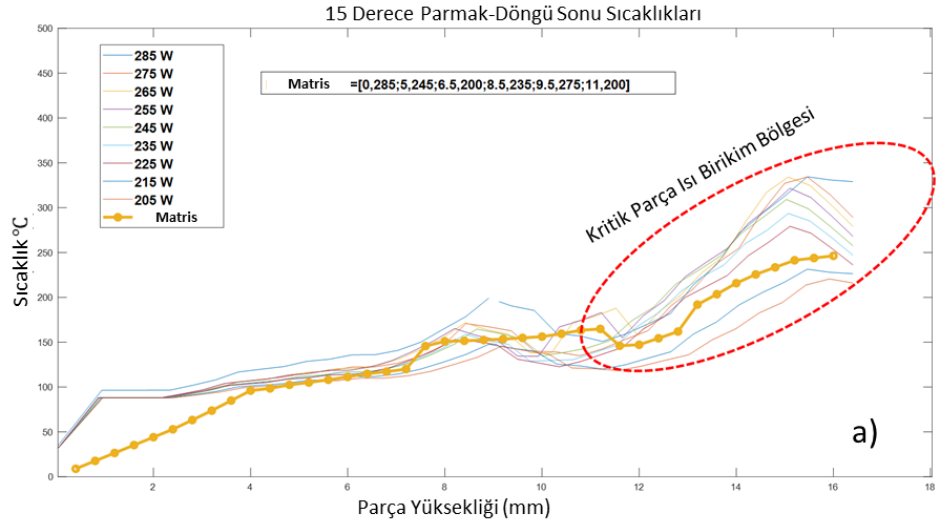
<u>BENZETİM</u> <u>PARAMETRELERİ</u>		<u>İMALAT & MALZEME</u> <u>PARAMETRELERİ</u>	
GT kazanç Faktörü	0.77	Likidus Noktası (°C)	1336
Super katman kalınlığı (mm)	0.4	İletkenlik ($\frac{W}{mK}$)	19
Düğüm Yoğunluğu	1	Çizgiler Arası Mesafe (mm)	0.1
Işın Çapı (mm)	0.034	Işın Çapı (mm)	0.034
Katman Kalınlığı (mm)	0.04	Min. Absorptivite (%)	28
Metal Toz Hammadde	IN718	Özgül Isı ($\frac{J}{kgK}$)	70
		Yoğunluk ($\frac{kg}{m^3}$)	8193

6.5. Benzetim ve Deney Sonucu Oluşan Sıcaklıklar

İmalat öncesi ve sonrasında ayrı ayrı benzetim çalışmaları yürütülerek sıcaklık tahminleri elde edilmiştir.

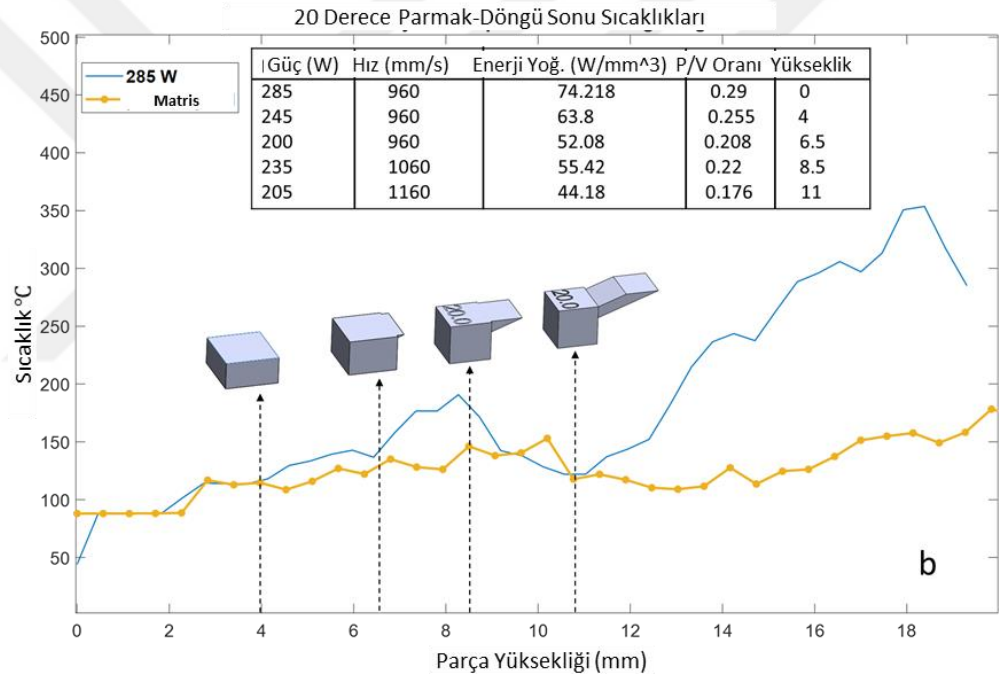
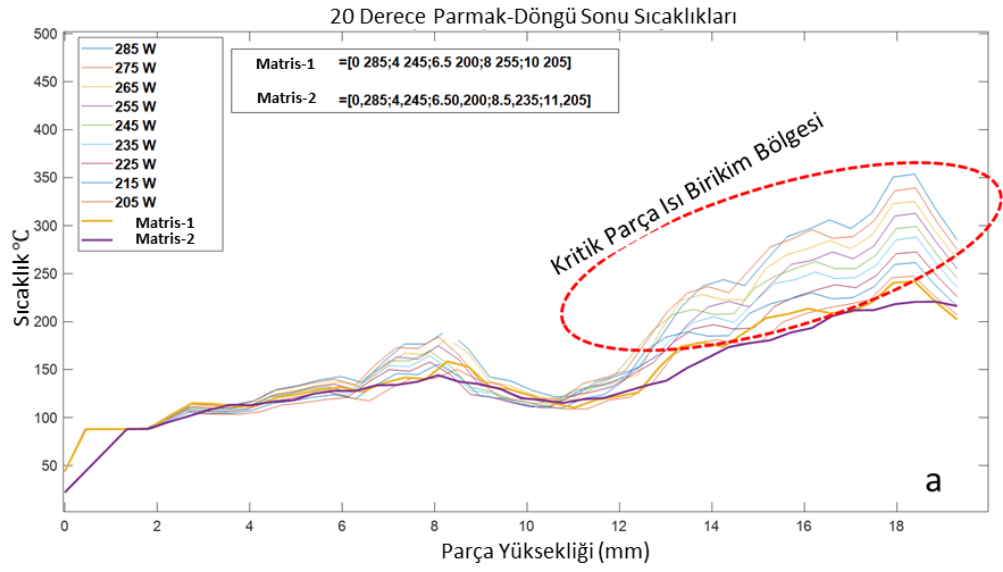
6.5.1. Benzetim tahminleri

Çalışmanın tutarlılığını korumak adına öncelikle imalat öncesi benzetim sonuçları değerlendirilmiştir. Şekil 6.21a ve b’de 15° parmak parça için sonuçlar görülmektedir. Şekilde görülen tüm lazer güçleri sonucu oluşan sıcaklıklar nominal hız için tahmin edilmiştir. Bunu takiben sıcaklık sıçrayışının olduğu görülen 12. mm’den itibaren de nispeten düz bir sıcaklık grafiği elde edebilmek için hız-güç kombinasyonları denenerek en iyi kombinasyon bulunmuştur. Bu kombinasyon denenirken en büyük ve en küçük enerji yoğunluklarının dikkate alındığı Şekil 6.21a’da görülmektedir.

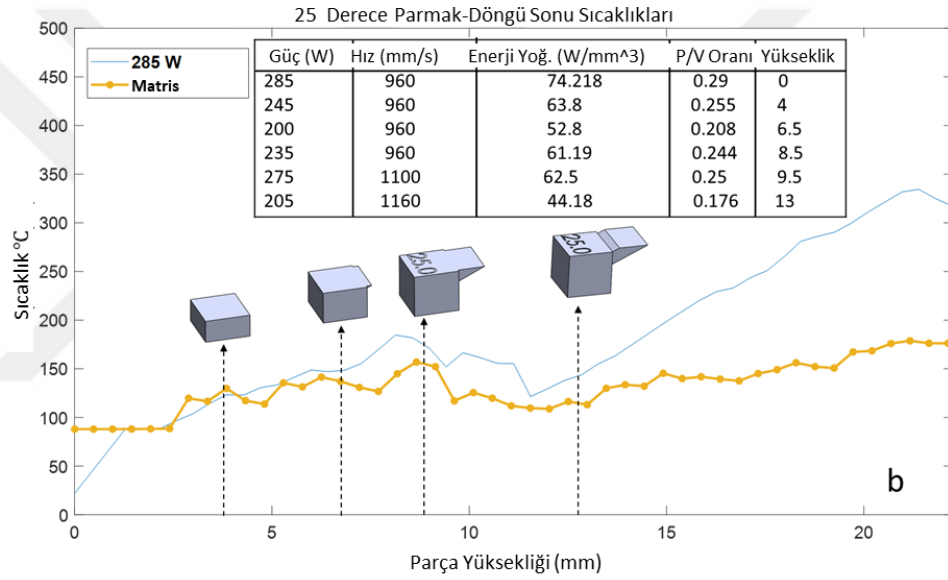
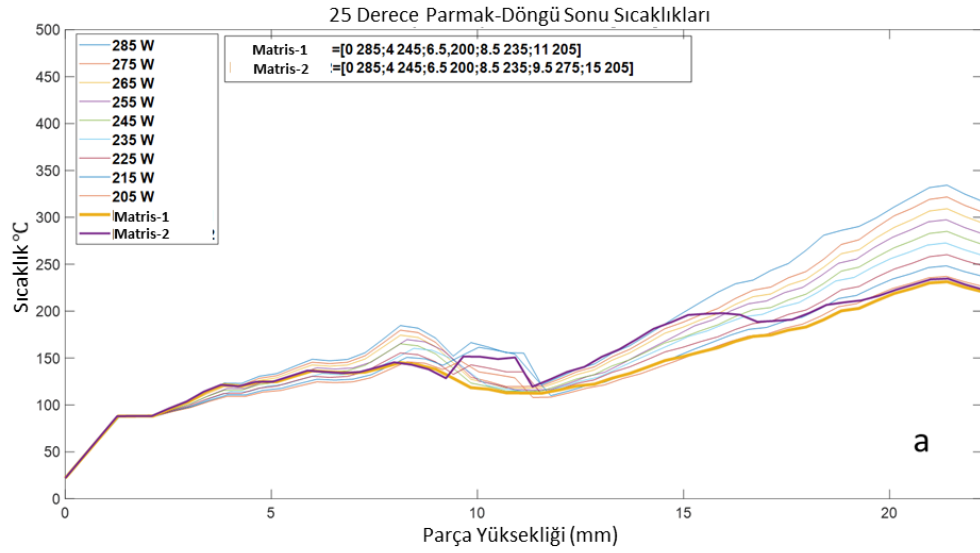


Şekil 6.21. 15° parmak geometri için GT benzetimi a) tüm güçler b) ısı birikimini engellemek amacıyla kontrollü parametre

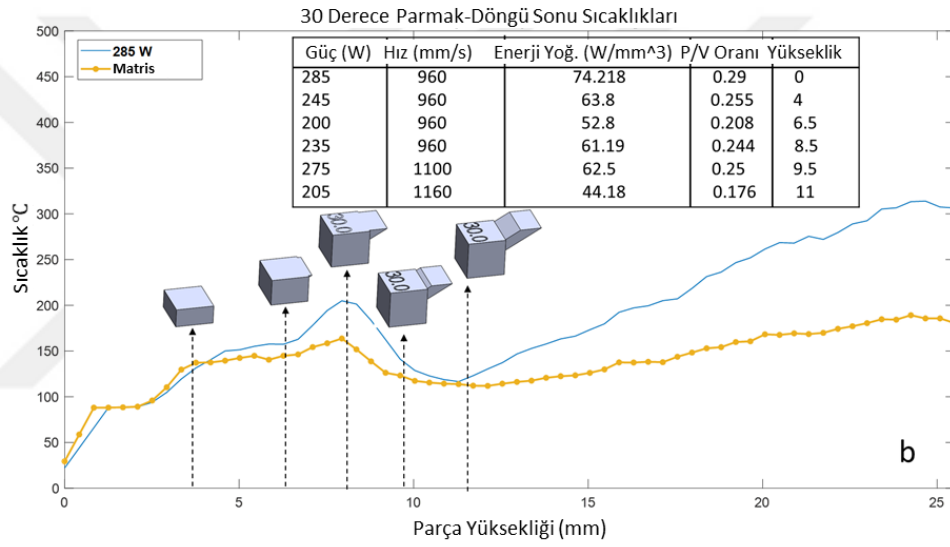
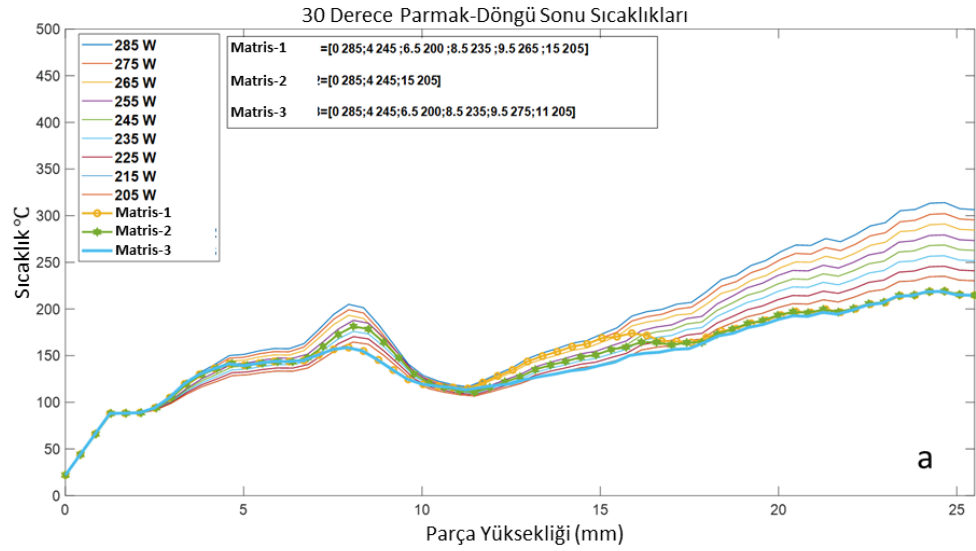
Şekil 6.22-24 ise benzer sonuçları 20, 25 ve 30° açılı parmak geometriler için vermektedir. Şekillerin tümüne bakıldığında parametre ayarlamalarının sıcaklık yükseliş ve düşüş trendleri üzerinde oldukça etkili olduğu ve sıcaklığın parçanın tüm yüksekliği boyunca yönlendirilebileceği anlaşılmaktadır.



Şekil 6.22. 20° parmak geometri için GT benzetimi a) tüm güçler b) ısı birikimini engellemek amacıyla kontrollü parametre

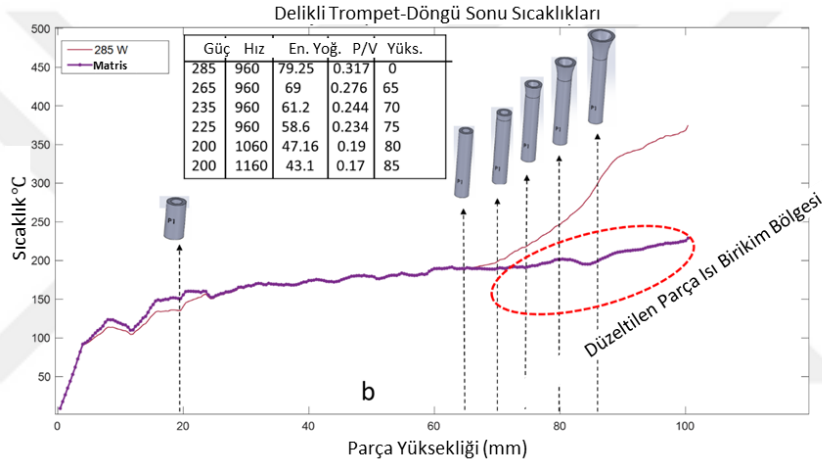
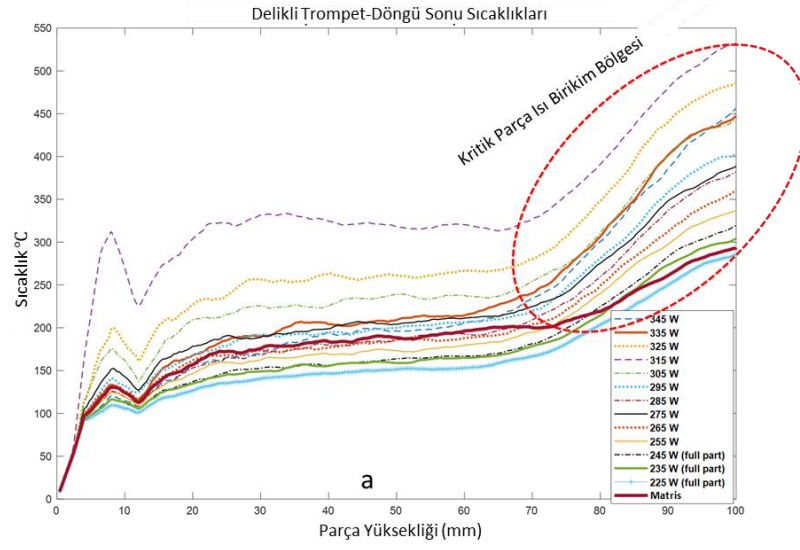


Şekil 6.23. 25° parmak geometri için GT benzetimi a) tüm güçler b) ısı birikimini engellemek amacıyla kontrollü parametre

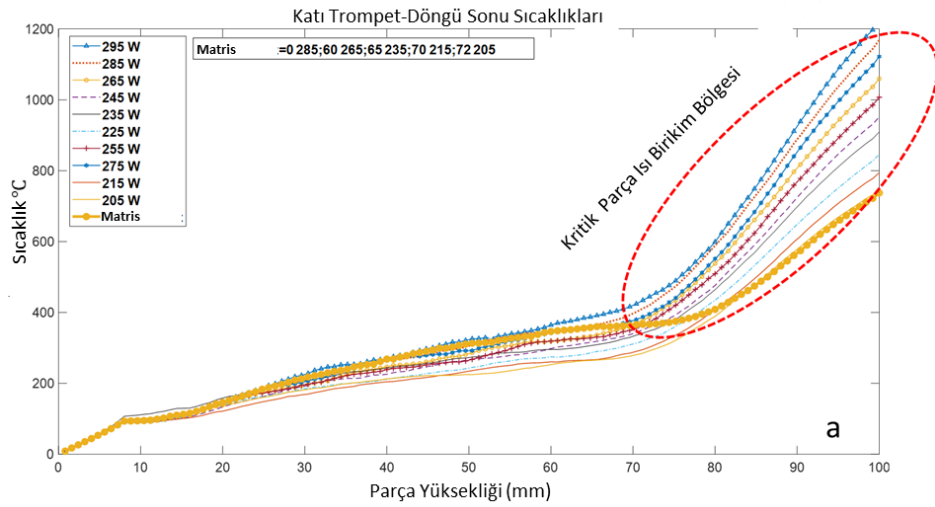


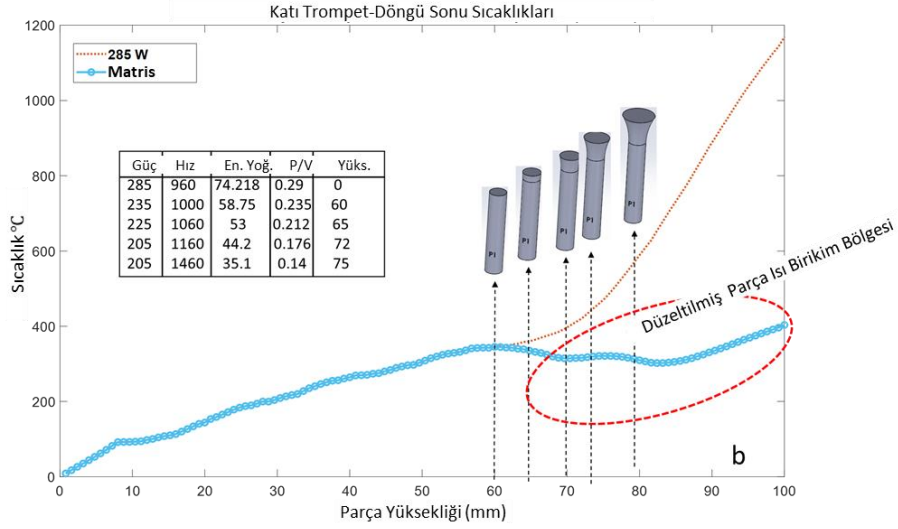
Şekil 6.24. 30° parmak geometri için GT benzetimi a) tüm güçler b) ısı birikimini engellemek amacıyla kontrollü parametre

Benzer sonuçlar delikli ve katı trompet geometriler için de Şekil 6.25-26'daki gibi elde edilmiştir.



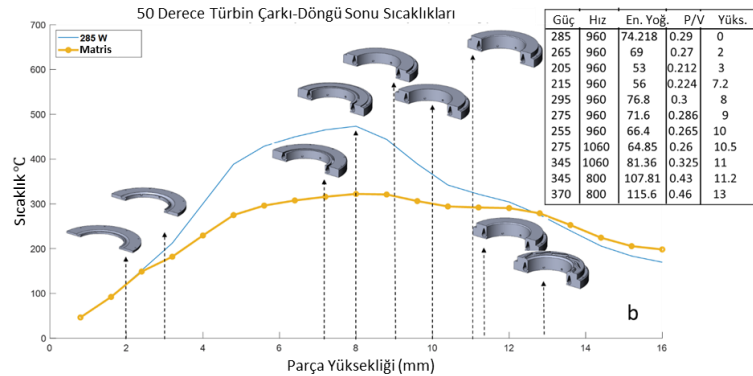
Şekil 6.25. Delikli trompet geometri için GT benzetimi a) tüm güçler b) ısı birikimini engellemek amacıyla kontrollü parametre



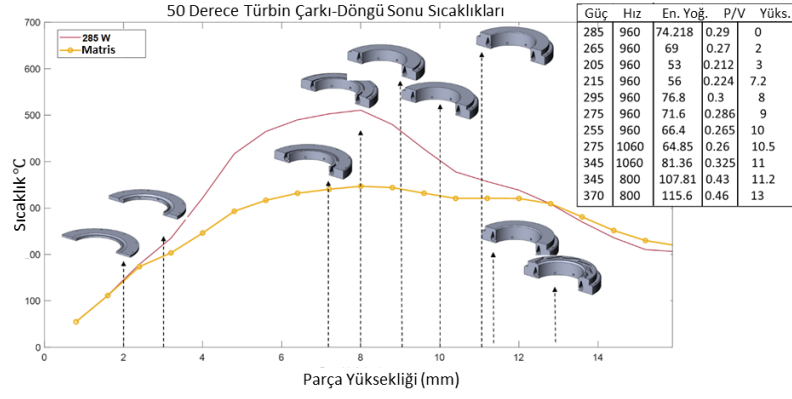


Şekil 6.26. Katı trompet geometri için GT benzetimi a) tüm güçler b) ısı birikimini engellemek amacıyla kontrollü parametre

Şekil 6.26'ya bakıldığında katı trompet geometri için özel bir güç-hız birleşimi kullanıldığı görülecektir. Şekil 6.26'da mavi eğriden görüleceği üzere ani sıcaklık sıçramasını engelleyebilmek için nominal hız değerlerinin %20'sinin de altına düşülmek zorunda kalınmıştır. Bu durum Şekil 6.26'da 205 W güç ile 1460'a kadar çıkan hız (mm/s) birleşiminden görülmektedir. Sınırların aşılmasının bir diğer sebebi de Şekil 6.26'da görüleceği üzere sınırlar içerisinde kalındığında rekristalizasyon sıcaklığına kadar yükselen ve sonuçları muhtemel bir hasar olan bir ısı birikiminin söz konusu olmasıdır. Türbin çarkları için elde edilen ilk tahminler de Şekil 6.27-28'de görülmektedir.



Şekil 6.27. 50° türbin çarkı geometri için GT benzetimi a) tüm güçler b) ısı birikimini engellemek amacıyla kontrollü parametre

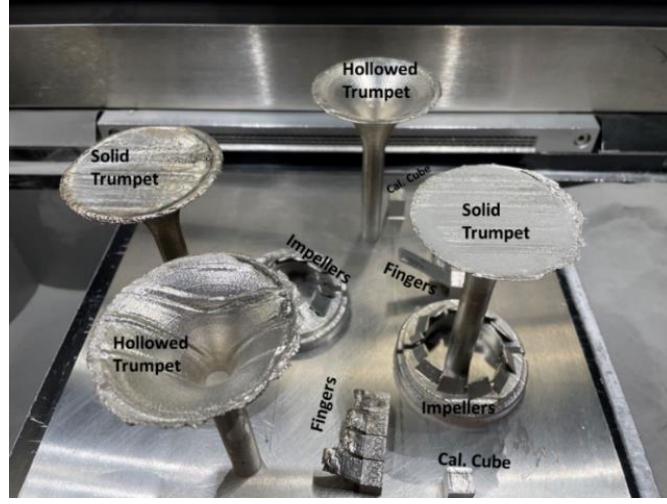


Şekil 6.28. 35° türbin çarkı geometri için GT benzetimi a) tüm güçler b) ısı birikimini engellemek amacıyla kontrollü parametre

Bir diğer özel durum türbin çarkı sıcaklık tahminlerinde görülmektedir. Kanat kesitlerinin başladığı katman olan yaklaşık 10mm civarından itibaren parça sonu yüksekliğine kadar ani bir sıcaklık düşüşü gözlemlenmektedir. Bunun sebebi kanat yapısının ince duvar olarak davranması ve ısının birikmemesidir. Bu noktada seçilen güç-hız kombinasyonu, sıcaklık düşüşü öncesindeki maksimum sıcaklık noktasından itibaren kanat haricindeki türbin çark gövdesinde biriken sıcaklığın kanat imalatı sırasında da korunmasına yani sıcaklık birikim eğrisinin yine diğer parçalardaki gibi yatay sabit bir eğriye benzetilmesine yönelik uygulanmıştır.

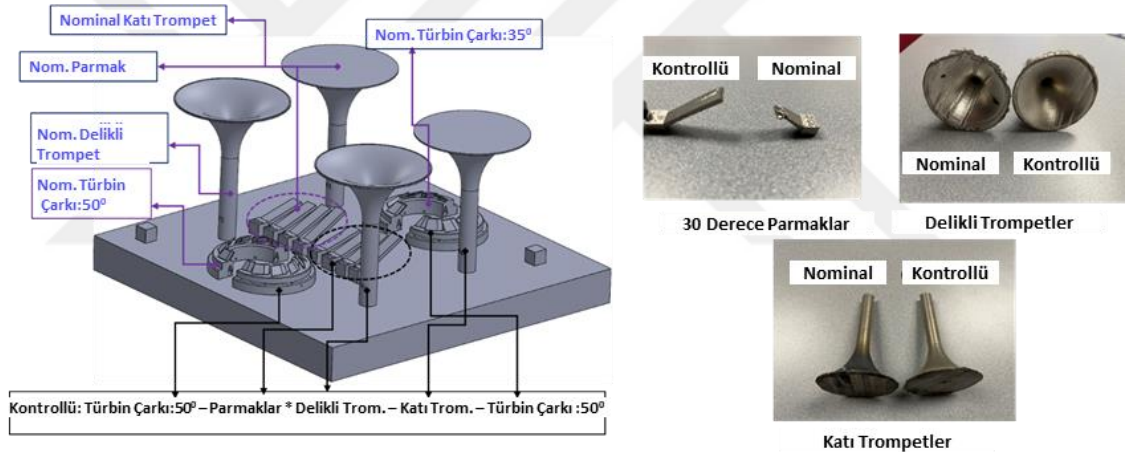
6.5.2. Deneysel imalat

Şekil 6.29'da önceki kısımda bahsedilen parametreler sonucu kararlaştırılan haliyle yapılan imalatlar görülmektedir.



Şekil 6.29. EOS M290 cihazıyla imal edilen tüm imalat tablası

Böylece aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:



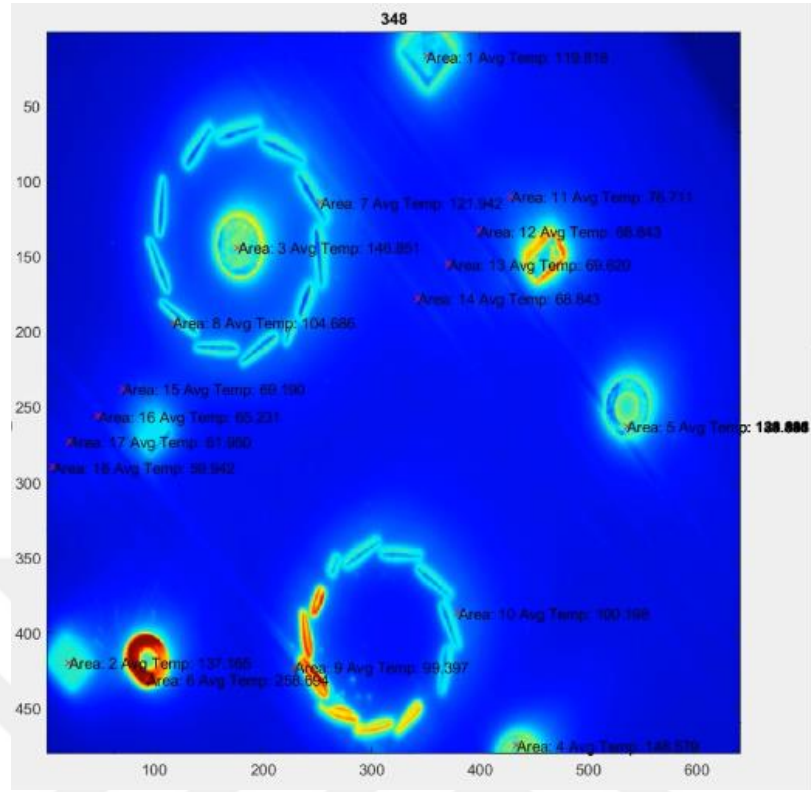
Şekil 6.30. Parça kıyas diyagramı

- ❖ 30° parmak geometrili parçanın kontrollü versiyonu haricinde tüm parmak geometrileri hasara uğramıştır. Böylece yerçekimi yüzünden 30°'ye kadar hiçbir geometrinin nominal parametre olan 285 W-960 mm/s ile imal edilemeyeceği, 30°'den küçük açılı bir geometrinin de hiçbir şekilde yine imal edilemeyeceği, yalnızca 30° ve muhtemelen daha büyük açılı parmak geometrilerinin belki yalnızca kontrollü parametrelerle imal edilebileceği anlaşılmaktadır.
- ❖ Delikli trompet parçalarından kontrollü versiyonun yüzey pürüzlülüğü bariz olarak daha iyidir. Bununla beraber hem nominal, hem de kontrollü

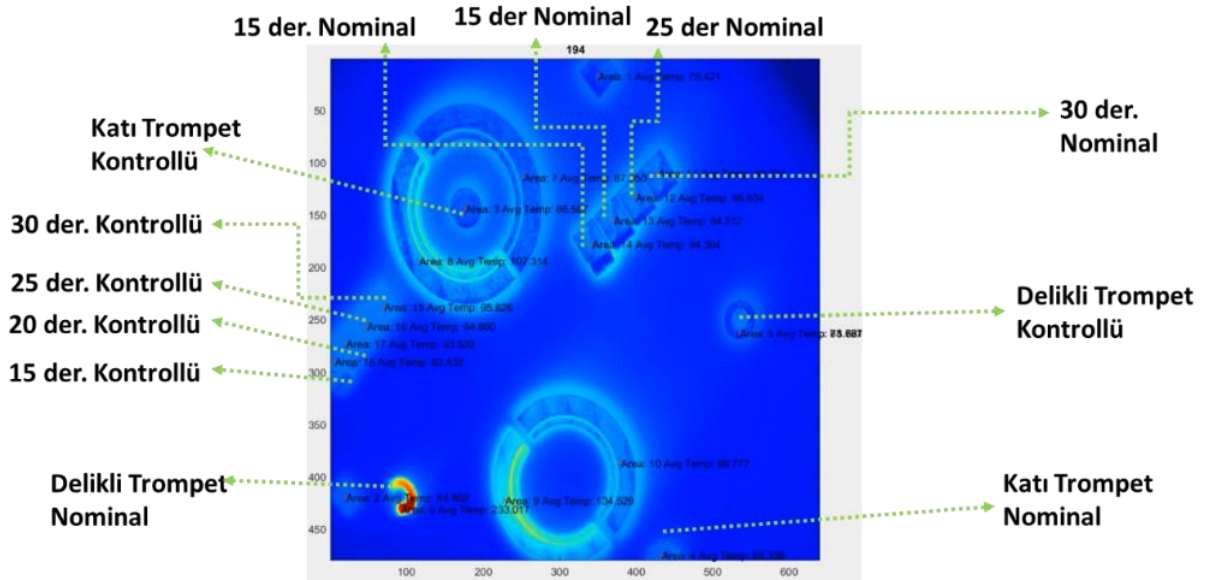
- ❖ Türbin çarklarında gözle görülebilen bir farklılık gözlemlenmemiştir.
- ❖ Katı trompet geometrilerden nominal parametrelili geometri bariz bir şekilde yanarak karbonize siyah renge bürünmüş durumdadır. Kontrollü parametrelili katı trompet geometrisi ise olağan görünmektedir. Bu durumun anlık sıcaklık ölçümünde de görüldüğü anlaşılmaktadır.

The figure consists of two line graphs. The left graph shows a blue line representing the relationship between Part Height (mm) on the x-axis and Time (sec) on the y-axis. The y-axis ranges from 20 to 80, and the x-axis ranges from 0 to 20. A red dashed vertical line is drawn at approximately 7.5 mm. The right graph shows the same data over a larger range. The y-axis ranges from 20 to 180, and the x-axis ranges from 0 to 120. A red box highlights the initial part of the curve, which is magnified in the left graph. The curve shows a sharp increase in time as part height increases, starting around 100 mm.

Ayrıca Şekil 6.32’de sıcaklık ölçümü sırasında elde edilen bir kare verilmiştir. Dikkatle incelendiğinde ortalama sıcaklıkların parmak parçalar, türbin çarkları ve trompet geometriler için nominal olanlar da daha yüksek (kırmızıya yakın renkler) olduğu anlaşılabacaktır. Üst başlıktaki rakam o anki katman sayısını ifade etmektedir. Yine 6.33’te türbin çarklarındaki kanat kesitinin son katmanlarının yakıldığı bir an görülmektedir.



Şekil 6.32. Sıcaklık ölçümü sırasında türbin çarklarının kanat kesitlerinin son katmanları



Şekil 6.33. Sıcaklık ölçümünde nominal ve kontrollü parçalar arası renk farkları

7. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu kısımda sırasıyla 316L tozu için, Ti6Al4V tozu için ve IN718 tozu için deneysel veriler, ilgili malzemelere ait benzetim çalışma sonuçlarıyla birlikte kıyaslanarak verilmektedir. 316L tozuna ait deneysel veriler, yine benzetim sonuçlarıyla kıyaslama halinde verilmektedir. Takiben Ti6Al4V kullanılarak ticari EOS M280 cihazında gerçekleştirilen çizgi tek çizgi ve çok çizgi imalatları, kesitlerinin incelenmesi, sıcaklık ölçümü sonucu elde edilen sıcaklıklar bu deneylerle ilgili benzetim sonuçlarıyla birlikte verilmektedir.

Son olarak grafik teorisi kullanımıyla parça ölçekli olarak ve IN718 tozu kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar da benzetim sonuçlarıyla verilmektedir.

7.1. 316L Malzeme İçin Sıcaklık ve Havuz Boyutlarının Kıyaslanması

Bölüm 5.5'te pratik ışın çapı ve odak uzunluğuna dair teorik değerlerle tutarlı sonuçlar alınarak özgün lazer ergitme cihazının kullanımıyla ilgili testler tamamlandıktan sonra kurulan benzetim modelinin doğrulanmasına yönelik 100-190 Watt arası ve 100-1900 mm/s tarama hızı arasında değişen kombinasyonlarda güç ve hızlarda tek çizgi imalatları gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler yapılırken aynı zamanda pirometre sensörü ile maksimum sıcaklıklar gözlenmiştir. Çizelge 7.1'de kullanılan 316L toz malzemenin kıyaslamalı özellikleri ve Çizelge 7.2'te geliştirilmiş cihazla kullanılan parametreler verilmektedir.

Çizelge 7.1. 316L toz ve dövme özellikleri [He ve Zhao, 2018; Zhang vd., 2019]

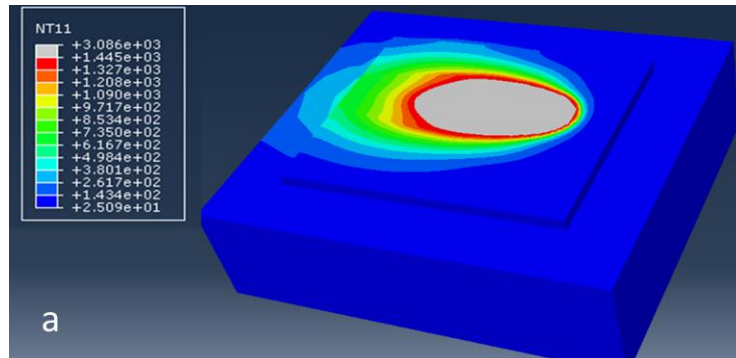
Malzeme	Ni	Cr	Mo	C	Mn	Si	P	S	N	Fe
316L Toz	11.08	17.36	2.02	0.013	1.19	0.36	0.032	0.002	0.052	Denge.
316L Dövme	11.14	17.25	2.08	0.016	1.23	0.38	0.035	0.003	0.054	Denge.

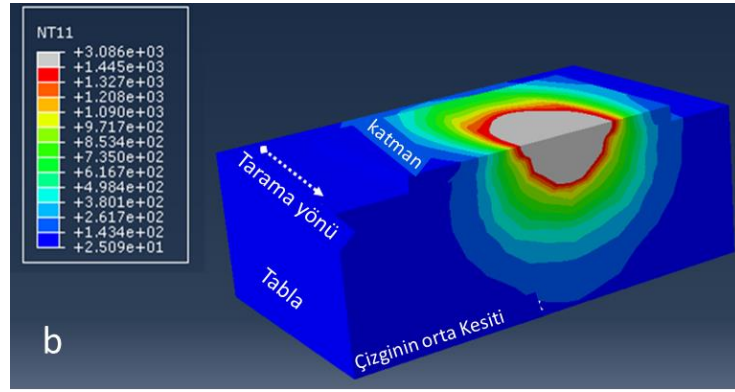
Çizelge 7.2. Cihaz imalat parametreleri

Lazer Gücü (Watt)	100-115-130-145-160-175-190
Tarama Hızı (mm/s)	100-300-500-700-900-1100-1300-1500-1700-1900
Teorik ve Pratik Işın Çapı (um)	150 ve 143-170 arası
Katman Kalınlığı (um)	50
Lazer Dalga boyu (um)	1064
Lazer Tipi	Yb:YAG Fiber (Nominal 500 Watt)
Malzeme	316L Paslanmaz Çelik (20-53 um çaplı toz)
Toz Besleme Yöntemi	Üstten Dökme Mekanizmalı
Serme yöntemi	Çift Bıçaklı ve Önısıtma Fonksiyonlu

7.1.1. Sıcaklık dağılımı ve maksimum sıcaklıklar (316L, tek çizgi)

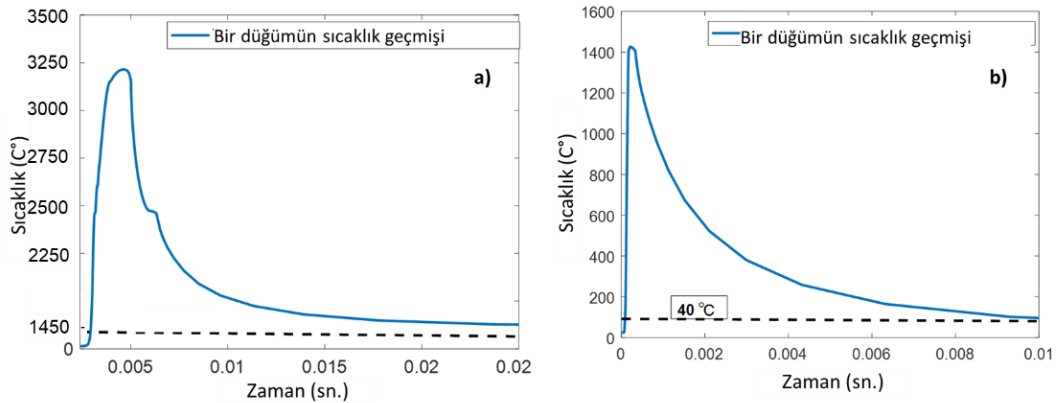
Benzetim sonuçları Şekil 7.1’de gösterildiği üzere renklendirilmiş sıcaklık dağılımları olarak elde edilmiştir. Şekil 7.1a’da oluşan ergiyik havuzu tahminini gösterebilmek için benzetim çalışmasına dair izometrik katı modeli, ergiyik havuzu uzunluğu görünür bir halde verilmektedir. Şekil 7.1b’de ise ergiyik havuzunun incelendiği orta kesitte havuz derinlik ve genişlikleri verilmiştir. Şekildeki gri bölgeler 316L malzeme için ergime noktası olan 1445 °C ‘den büyük sıcaklık bölgelerini göstermekte ve böylece ergiyik havuz sınırları ayrıştırılabilmektedir. Gri bölge çevresinde oluşan renkli bölge ise ısıdan etkilenen alan olup lazer gücü ve tarama hızına bağlı olarak değişken boyutlara sahiptir.

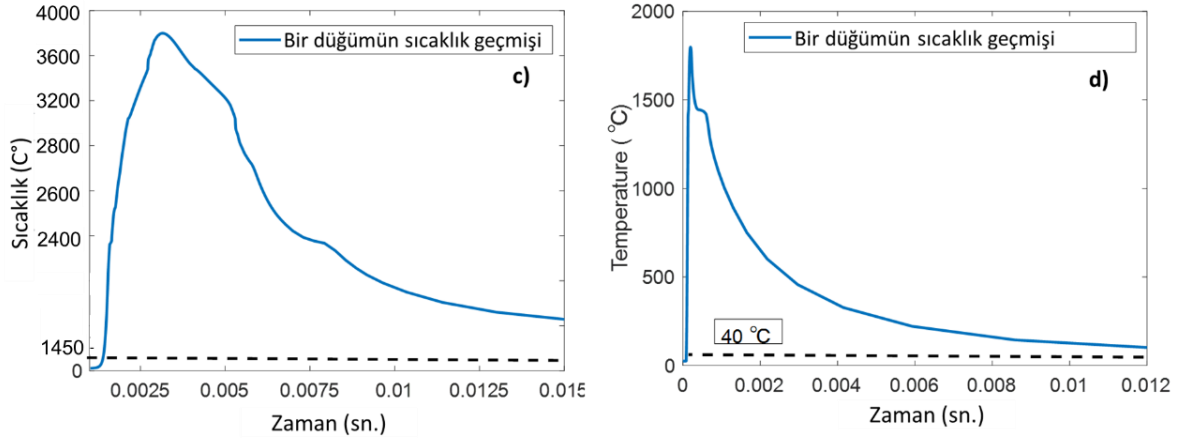




Şekil 7.1. 3 boyutlu benzetim modeli a) 0.004. saniyede 190 W ve 100 mm/s için ergiyik havuzu oluşumu a) izometrik görünüm b) çizgi orta kesiti

Şekil 7.2’de 4 limit güç-hız kombinasyonuna sahip olan orta kesitteki bir düğümün komşu düğümlerinin de etkisin barındıran 10x10 düğümlük bir alandaki ortalama sıcaklık geçimi verilmektedir. Söz konusu sıcaklık grafikleri çizginin yakılmaya başlamasından bitişine kadar belirli bir düğüm ve komşuluklarından oluşan düğümlere ait sıcaklık geçmişi ortalamasını göstermektedir. Maksimum sıcaklıklar lazer gücü ile orantılı olarak değişmektedir. Yani yükselen lazer gücü ve düşen tarama hızlarında maksimum sıcaklığın arttığı gözlemlenmektedir. Pratikte de gerçekleşen bu durumun benzetimde görülmesi imalatların doğru modellenebildiğini göstermektedir.

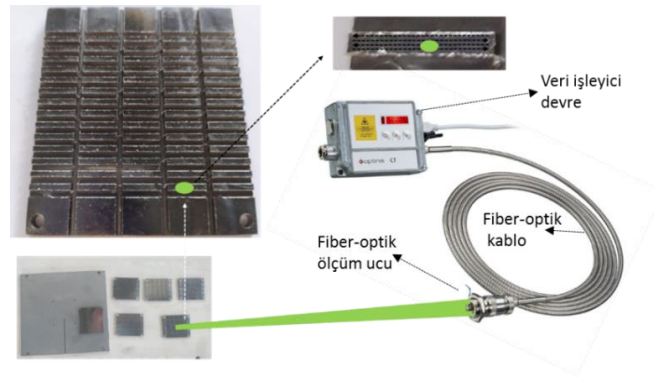




Şekil 7.2. Sınır kombinasyonlara dair sıcaklık geçmişi tahminleri a) 100 W-100 mm/s b) 100 W-1900 mm/s c) 190 W-100 mm/s d) 190 W-1900 mm/s

7.1.2. Deneysel ölçüm (316L, tek çizgi)

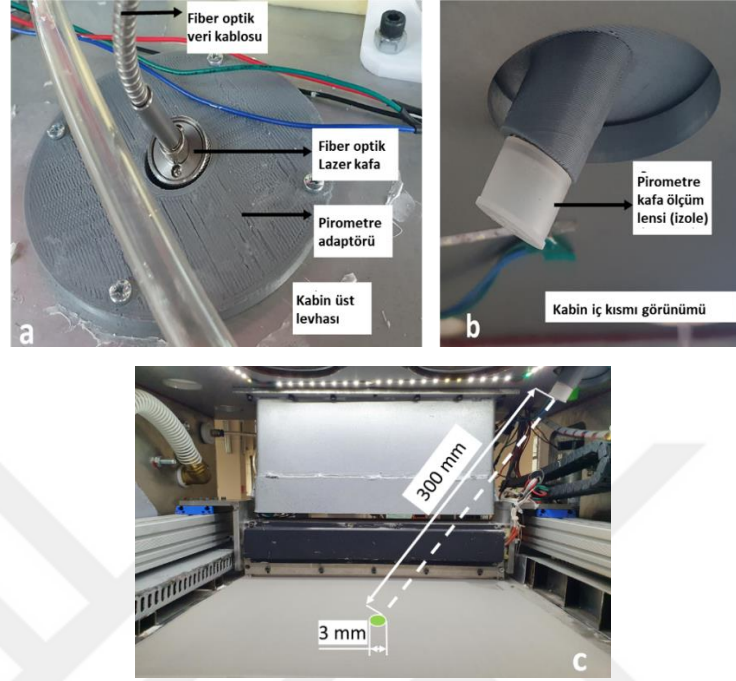
K tipi ısılıçiftlerin hiçbirisi lazerle yakma sırasında veri toplama imkanına sahip olmamıştır. Bunun üzerine literatürdeki son araştırmalar takip edilerek sıcaklık ölçümünün pirometre isimli temassız sıcaklık ölçer sensörlerle yapılabileceği anlaşılmıştır. Optris 2HM1 Ct-ratio Modeli lazer optik temassız sıcaklık ölçer pirometre sensörü kullanılarak sıcaklık ölçümü alınmıştır. Şekil 7.3'te kullanılan pirometre ve kullanılmasına dair prensip diyagramı görülmektedir.



Şekil 7.3. Pirometre ile çizgi yakma üzerinden sıcaklık ölçüm ilkesel şematığı

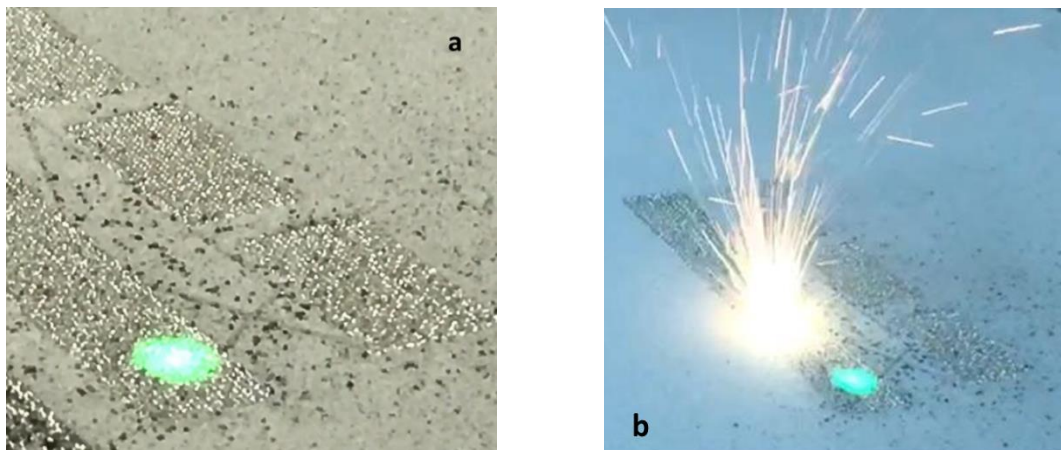
Şekil 7.4'te deneysel kurulumuna dair detayların görülebileceği deneyde, 1kHz cevap zamanına ve 300 mm odak uzunluğundan minimum 3 mm ölçüm çapına sahip 2 farklı dalga boyunda ölçüm yapıp bu ölçümlerin oranını alarak emissivite

bağımlılığını ortadan kaldıran bir sensör kullanılmıştır. Böylece ölçüm çapının %15'i kadar küçüklükte noktanın maksimum sıcaklığını ölçebilmektedir.

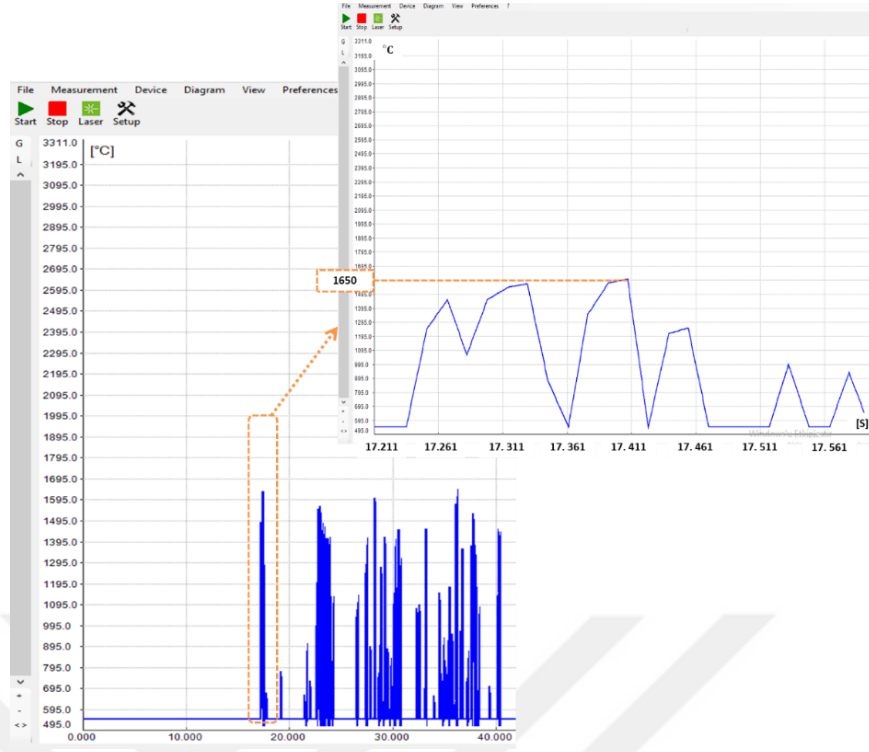


Şekil 7.4. Pirometre ölçümünde deney kurulumu: a) kabin üst görünümü b) kabin üst levhasının iç görünümü c) serilmiş toz üzerinden pirometre ölçüm işleyişi

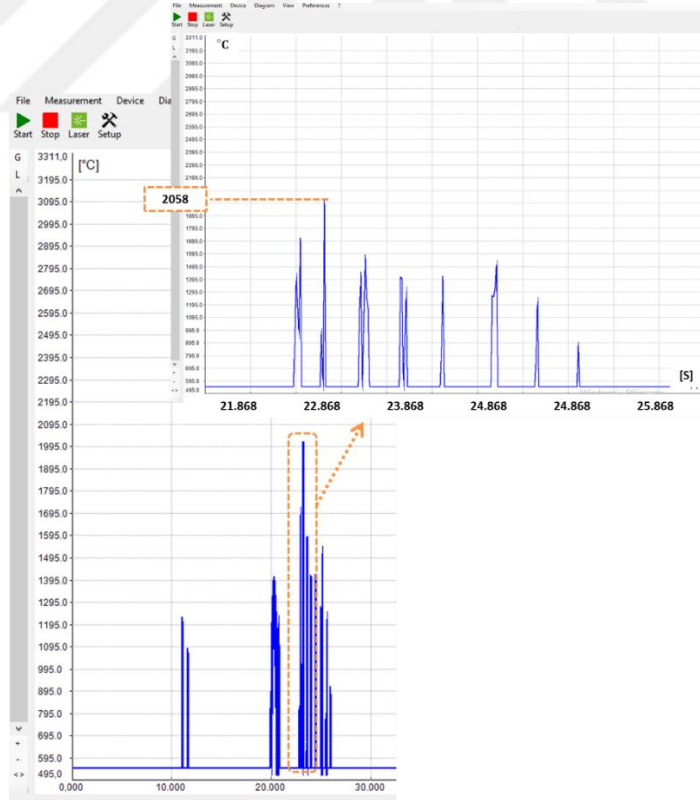
Şekil 7.5 'te pirometre ölçüm denemelerinden bir görüntü verilmektedir.



Şekil 7.5. Pirometre ile ölçüm denemelerinden bir kare a) yakım sonrası b) yakım öncesi

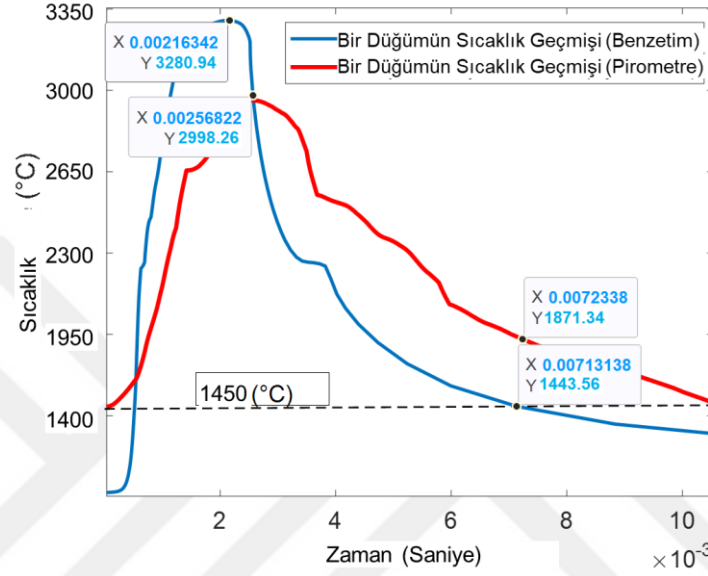


Şekil 7.6. Koruyucu gazlı sıcaklık değişim grafiği



Şekil 7.7. Koruyucu gazsız sıcaklık değişim grafiği

Şekil 7.6-7’den anlaşılacağı üzere, koruyucu gazın ölçülen maksimum sıcaklıklar üzerinde indirgeyici bir etkisi olduğu açıktır. Benzetim sonuçlarıyla kıyaslamak için tüm parametrelere dair pirometre ile çizgi imalatları sırasında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Maksimum sıcaklıklar dışında ölçümlerden elde edilen eğrilerin karakteristikleri benzer olduğundan, Şekil 7.8’de tüm parametreleri temsil edebilecek şekilde en düşük güçte yapılan ölçüm sonucu verilmektedir.



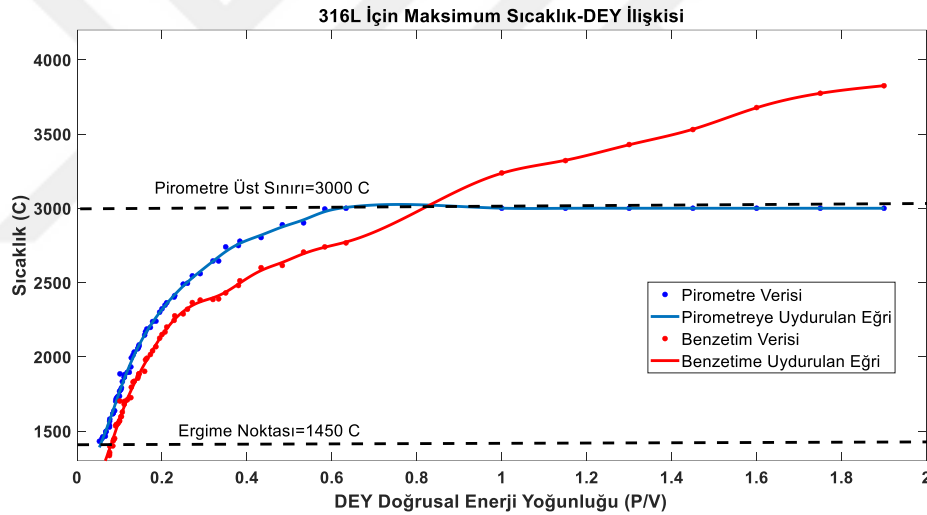
Şekil 7.8. Örnek olarak 100 W-100 mm/s parametreleri için pirometre ölçüm sonucu

Şekil 7.8 incelendiğinde pirometrenin ani sıcaklık yükselişini yakalayamadığı, bununla beraber ortalama 350 °C fark ile soğuma hızını yaklaşık olarak tahmin edebildiği görülmektedir. Bunun sebebi pirometrenin pratik soğuma oranına göre daha yavaş kalan cevap zamanı ve modelleme kısmında ihmal edilmesi gereken fakat pratik bir imalatla önemli etkisi olan, Şekil 7.6-7’de de görülen koruyucu gazın soğutma etkisidir.

Isı transfer modeline dayanarak, sıcaklık dağılımlarının toplanabilmesinin ergiyik havuzu boyutlarının oluşumunu anlamak için elzem olduğu anlaşılmaktadır. Benzetim modeliyle maksimum düğüm sıcaklıkları ortaya koyulmasına rağmen, farklı parametrelerdeki sıcaklık dalgalanmalarını daha iyi takip edebilmek için öncelikle Denklem 7.1’deki gibi bir doğrusal enerji yoğunluğu (DEY) tanımlanmıştır [Casalino vd., 2015; Zhiheng vd., 2019];

$$DEY = P/V \quad (7.1)$$

Böylece Denklem 7.1'deki güç/hız oranları DEY adı altında kullanılarak aynı DEY sayısına sahip kombinasyonlar vakit kaybetmemek için elimine edilmektedir. Şekil 7.9'da DEY değerlerine oranla maksimum sıcaklıkların değerleri verilmektedir. Eğrilerin elde edilmesi için hem benzetim sıcaklıkları, hem de ölçüm sıcaklıkları düzenlenmiştir. Maksimum sıcaklık artışı DEY= 0.7 değerine kadar devam etmekte, sonrasında ise sabitlenmeye eğilim göstermektedir. Bu sabitlenme ergiyik havuzu açısından havuz derinliğinin daha fazla artmasına sınır koymakta ve aynı zamanda artan havuz derinliğinden artan havuz genişliğine bir kayma oluşturmaktadır. Söz konusu değerler Bölüm 7.1.3'te verilmektedir.



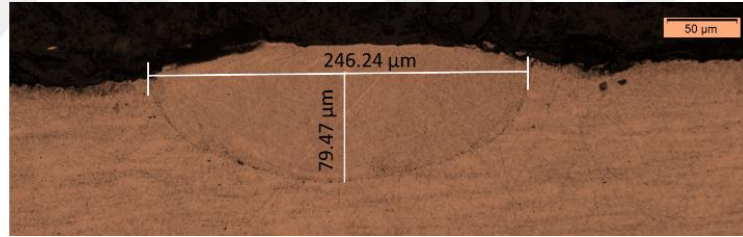
Şekil 7.9. Farklı DEY değerlerindeki maksimum sıcaklıklar ve deneysel ölçümlerle kıyaslanması

Hem benzetim hem ölçüm için maksimum sıcaklık değeri 2750°C 'yi geçmekte, benzetimde ise 3000 değerine ulaşmaktadır. Bu sıcaklığın oluştuğu DEY değeri ise 0.6 ve 0.7 arasındadır. Romano vd. çalışmalarında 0.3 ve 0.4 DEY değeri için maksimum sıcaklığı 1600 ve 2200 °C olarak bulmaktadır [Romano vd., 2015]. Bir diğer çalışmada 150 W ve 900 mm/s hız değerinde 50 µm ışın çapı değerinde sıcaklığın 2750 °C 'ye ulaştığı ortaya konulmaktadır. Bu çalışmada DEY değeri 0.17 olarak hesaplanmasına rağmen, lazer ışın çapının küçük değerinin sıcaklık

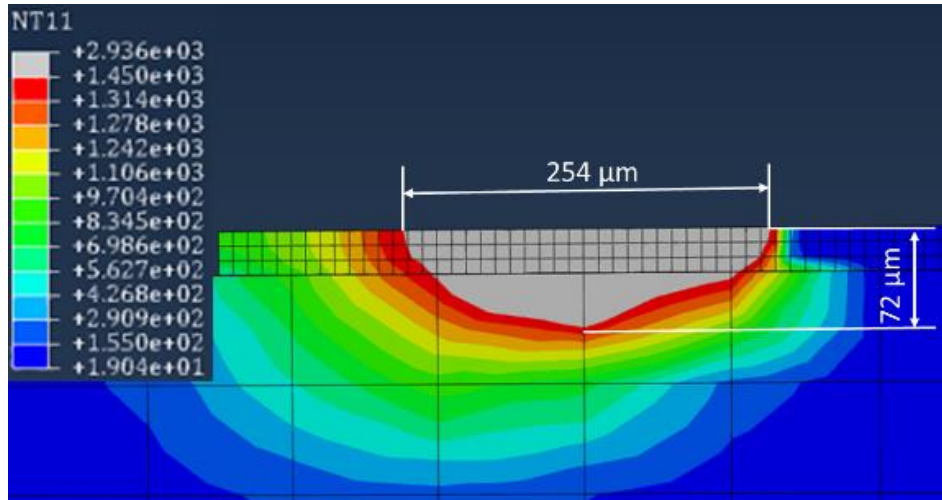
artışına sebep olduğu söylenebilir [Ansari vd., 2019]. Yine bir diğer çalışmada [56] 150W ve 1000 mm/s tarama hızında yani 0.15 DEY değerinde maksimum sıcaklık 2800 °C yakınlarında bulunmuştur. Bu çalışmada da ışın çapı 70 µm olarak ifade edilmektedir.

7.1.3. Ergiyik havuzu boyutları(316L, tek çizgi)

Sıcaklık kıyaslamalarını takiben, ergiyik havuzu boyutlarından genişlik ve derinliğin belirlenebilmesi için, mikroskobik ergiyik havuzu kesit görüntüleri incelenerek benzetim sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Şekil 7.10'da havuz boyutlarının nasıl belirlendiğine dair ölçüm örneği verilirken, Şekil 7.11'de ise ABAQUS SEY çözümü sonucu elde edilen bir çizginin orta kesitindeki ergiyik havuzu kesit görüntüsü verilmektedir. Şekil 7.11'de her bir eleman boyutu toz katmanı için 10 µm ve tabla için 70 µm olarak belirlenmiştir. Tek çizgi deneylerinde lazer ışınının 1.5 katmanlık bir kalınlığa nüfuz ederek en az bu kalınlıkta bir derinlik oluşturması başarılı bir yakma olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 7.10. 190W-300 mm/s için örnek kesit alan ergiyik havuz boyut ölçümü

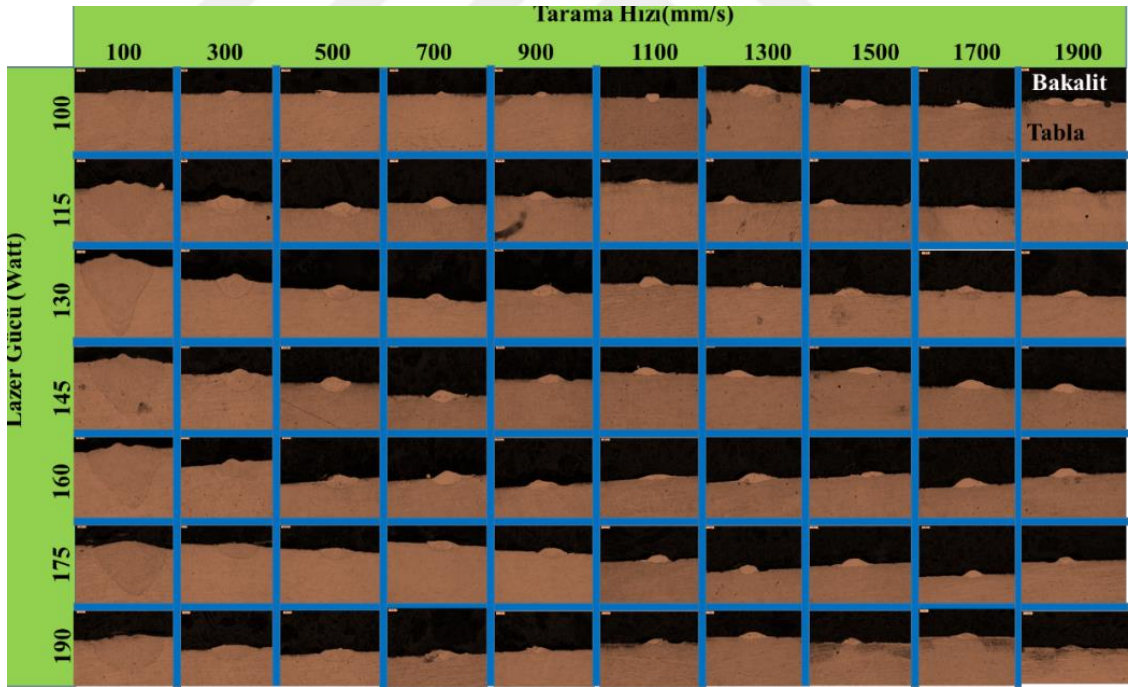


Şekil 7.11. ABAQUS arayüzünde kesit alan ergiyik havuzu boyut tahmini hesaplaması (190W-300 mm/s)

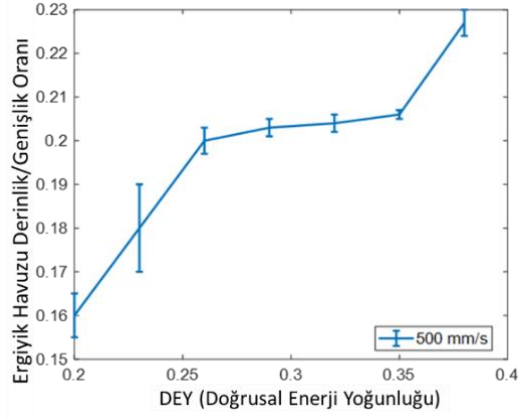
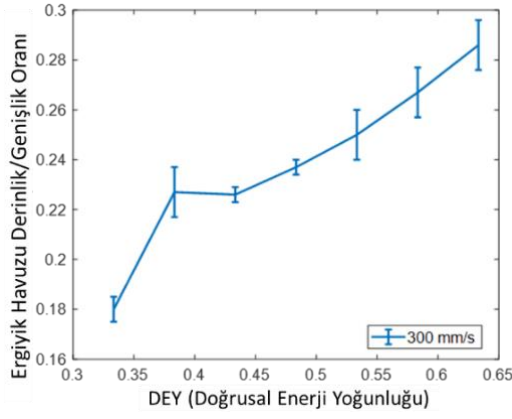
Her bir çizginin orta kesiti tel erozyon cihazı kullanılarak çizgi doğrultusuna dik şekilde kesilmiştir. Kesilen ergiyik havuzu kesiti numuneleri aşağıdaki metalografik işlemler ile optik mikroskop altında incelemeye hazırlanmıştır;

- Bakalite alma, Kaba zımparalama, İnce zımparalama, Parlatma, Dağlama

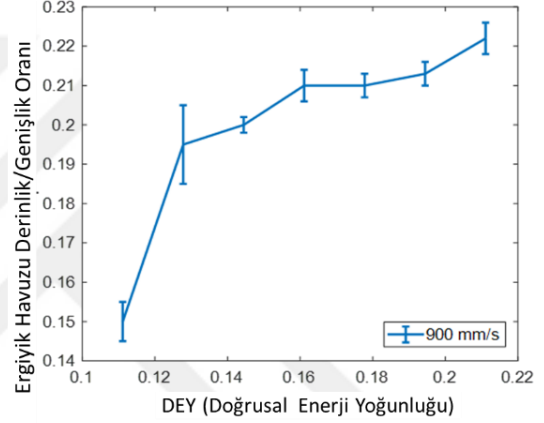
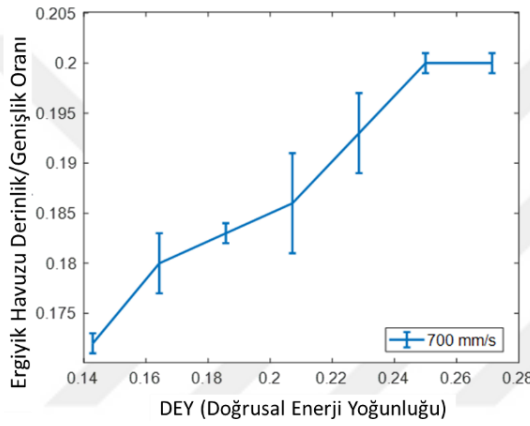
Deneme yanılma yöntemiyle 3 adet parlatılmış numune dağlama süresine karar vermek için denenerek mikroskopta incelendikten sonra, tüm parlatma işlemi tamamlanan 316L numuneleri el ile 40 saniye boyunca HF: HNO₃:H₂O çözeltisi içerisine daldırılmıştır. Ardından saf su çözeltisine daldırılarak yüzeyi temizlenen numunelerin yüzeyleri kısıklı basıncı hava ile temizlenmiştir. Son olarak mikroskop altında inceleme yapılarak ergiyik havuzu genişlik ve derinlikleri ölçülmüştür. İlgili görüntüler Şekil 7.12’de toplu halde verilmektedir. Şekil 7.12’de gösterilen tüm güç-hız kombinasyonlarında ki ergiyik havuzu genişlik ve derinlik ölçülerinin Şekil 7.13’te ve 7.14’te DEY sayısına oranla davranışları eğriler olarak verilmektedir.



Şekil 7.12. Farklı parametrelerle imal edilen tek çizgilerdeki ergiyik havuzu kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri



Şekil 7.13. Ergiyik havuzu DEY ilişkisi (300 ve 500 mm/s İçin)



Şekil 7.14. Ergiyik havuzu DEY ilişkisi (700 ve 900 mm/s İçin)

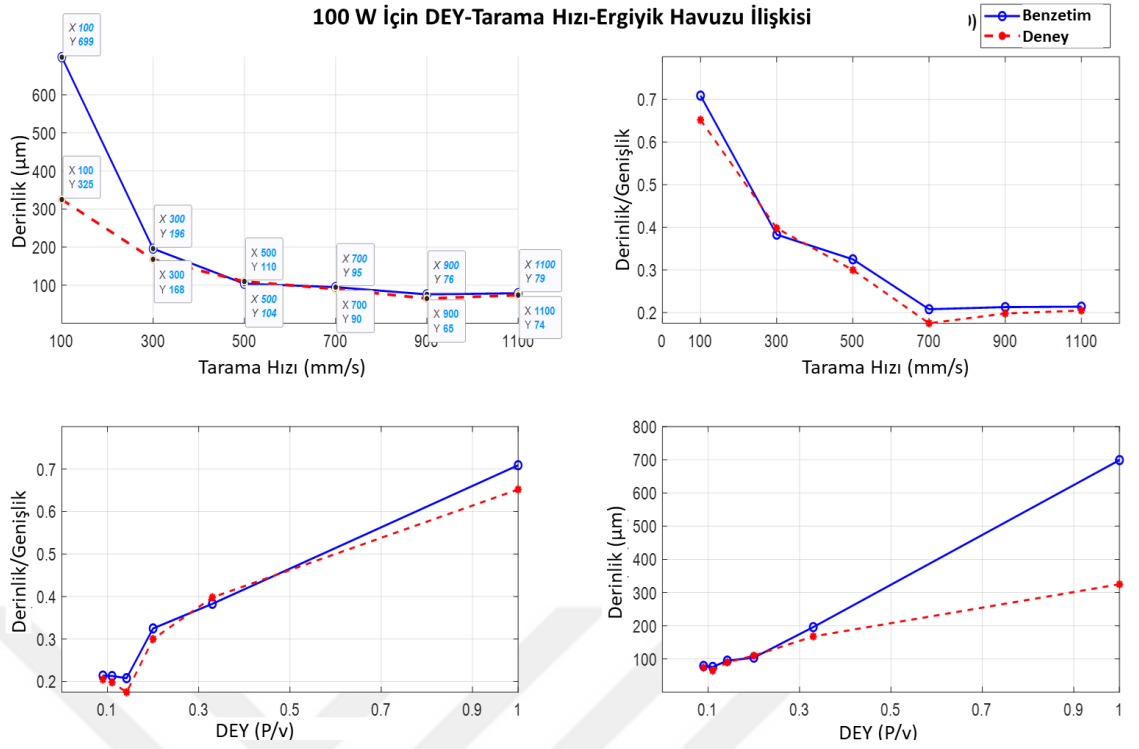
Yeterli bir yakmanın olması için 2 şart mevcuttur; ilki yeterli bir ergiyik havuzu derinliğinin oluşması (yukarıda bahsedilen ve hem katmanlar arası hem katman için bağlar için en az 1.5 katmanlık bir nüfuziyet), ikincisi ise belirli bir ergiyik havuzu derinlik/genişlik oranıdır. Şekil 7.13 ve 14'e bakıldığında yalnızca 4 farklı hız için 4 farklı grafik olduğu görülmektedir. Bunun sebebi 900 mm/s hızdan daha büyük hızlarda yetersiz ergiyik havuzu derinliklerini oluştuğunun gözlenmiş olmasıdır. Diğer taraftan, literatürle uyumlu olarak tüm parametreler için ve Şekil 7.13-14'ten de görüleceği üzere azalan güçler azalan derinlik/genişlik oranına yol açmaktadır. Şekil 7.15-21 'de artan lazer gücüne göre daha detaylı bir parametre(DEY)-ergiyik havuzu boyutu ilişkisi sunulmaktadır. Tüm şekillerde hızların yalnızca 1100 mm/s'ye kadar alınmasının sebebi, bu hızdan yüksek hızlarda yetersiz ve sunulmaya elverişli

olmayan havuz boyutlarının oluşmuş olmasıdır. Tüm grafiklerin değerleri ise Çizelge 7.2’de sıralanmıştır.

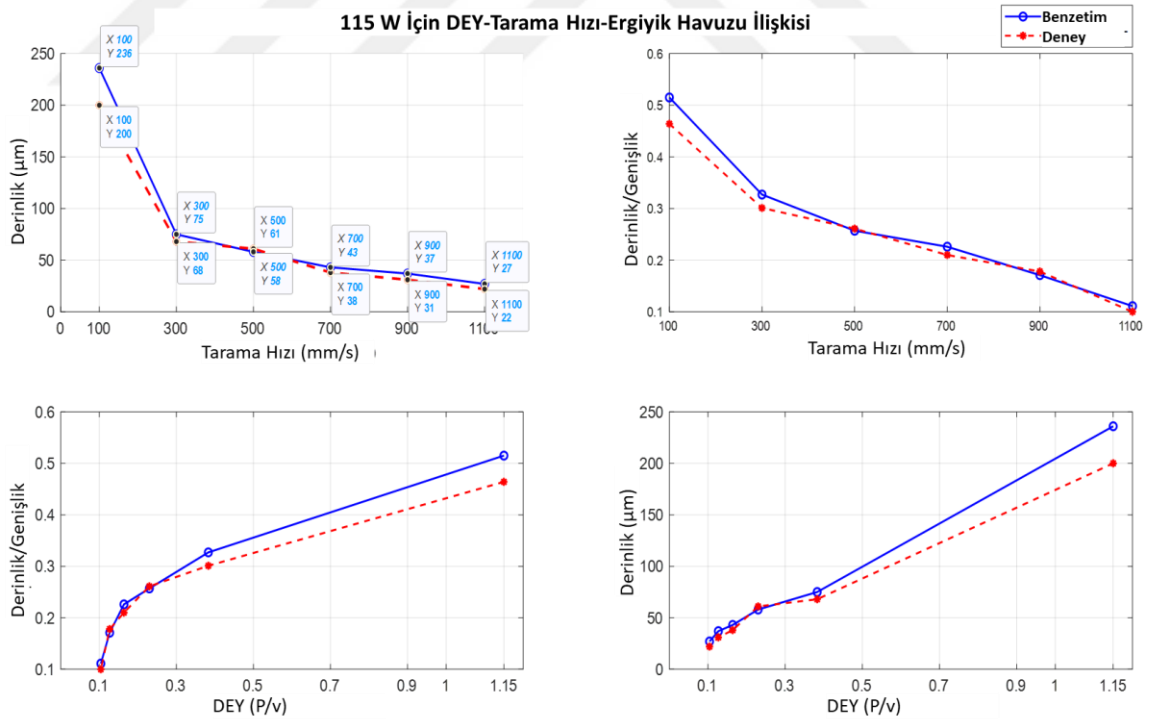
Tüm güç kombinasyonları için kritik derinlik olan 1.5 veya 2 katman kalınlığı yani 60-80 μ m aralığındaki bir değere yaklaştıkça ergiyik havuzu derinlik tahminlerindeki hatanın azaldığı belirlenmiştir. Bir diğer sonuç, DEY=1 değerinden sonra ve bu değerdeki havuz derinliklerinin oldukça farklı olması, DEY=1 değerinden sonra hızlı bir derinlik düşüşü gözlenmesidir. Bölüm 7.2’deki ticari bir TYLE cihazıyla yapılan çizgi denemelerinde de Ti6Al4V malzeme için benzer sonuçlar elde edildiğinden, geliştirilen cihazın başarılı yakımlar yaptığı iddia edilebilir.

Çizelge 7.2 incelendiğinde öncelikle şu tanımlamalar yapılarak Çizelge 7.3 oluşturulmuştur;

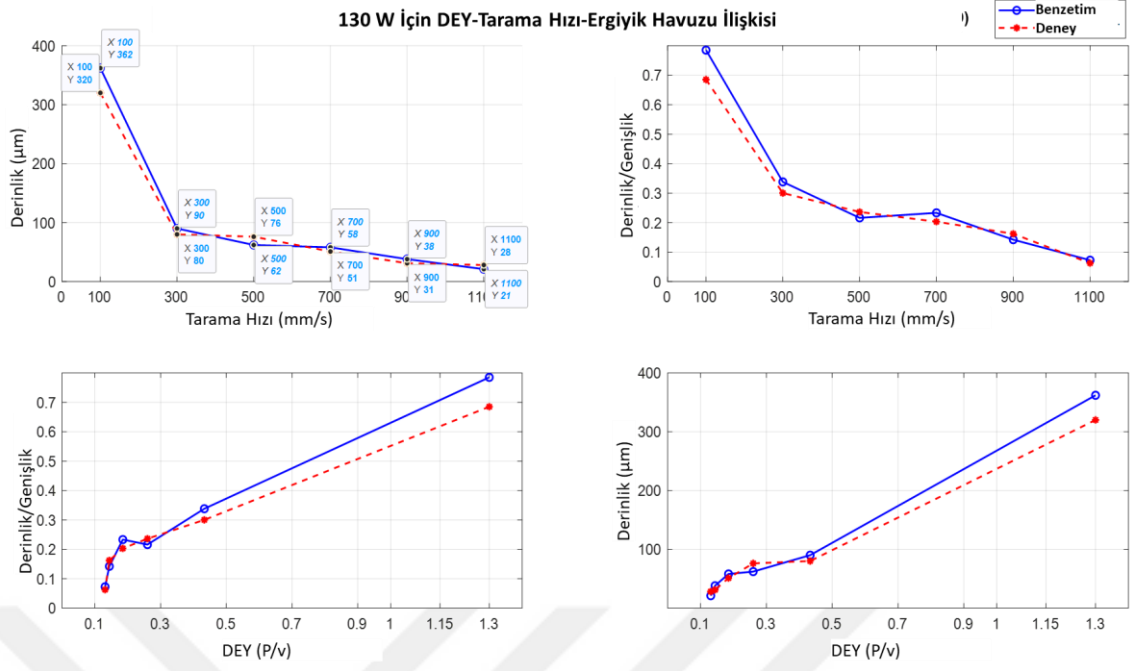
- Mavi: Hem derinlik/genişlik oranı, hem derinlik, hem de DEY oranı uygun kombinasyonlardır. D/G oranı 0.2’den büyük, derinlik değeri 1.5 katmanlık 60 μ m’den büyük, DEY oranı ise yine 0.2’den büyük olan kombinasyonlardır.
- Yeşil: DEY oranı uygun olmayan, fakat derinlik ve derinlik/genişlik oranı uygun kombinasyonlardır.
- Sarı: Hiçbir oranı uygun olmayan kullanılamayacak kombinasyonlardır.



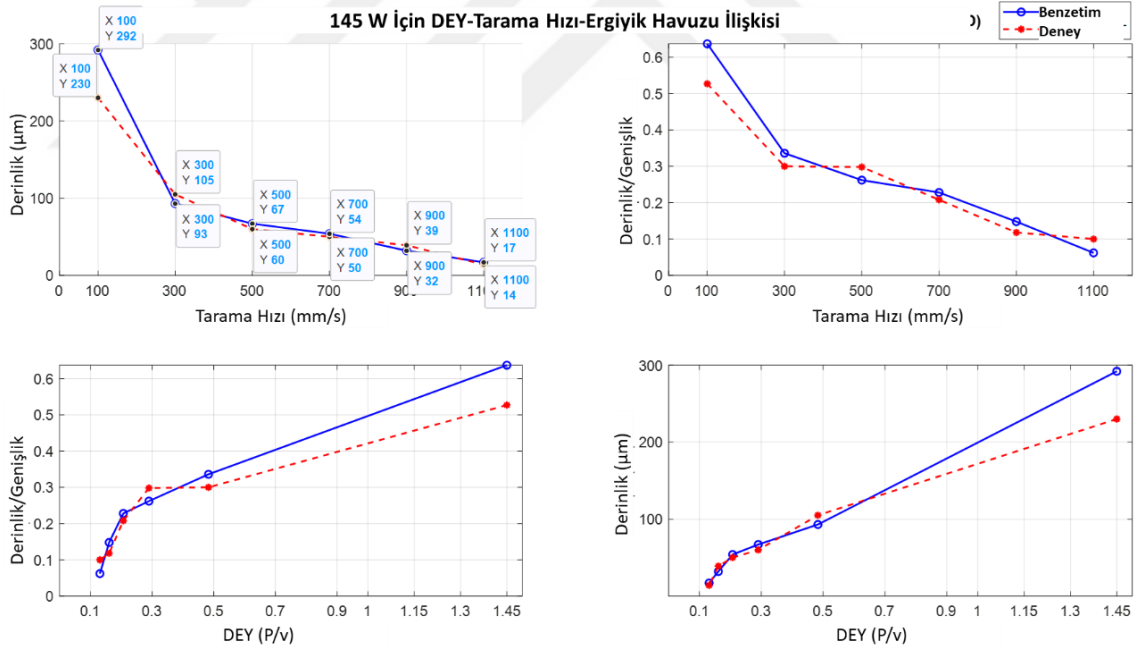
Şekil 7.15. 100 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hızı ve DEY'e bağlı eğrisi



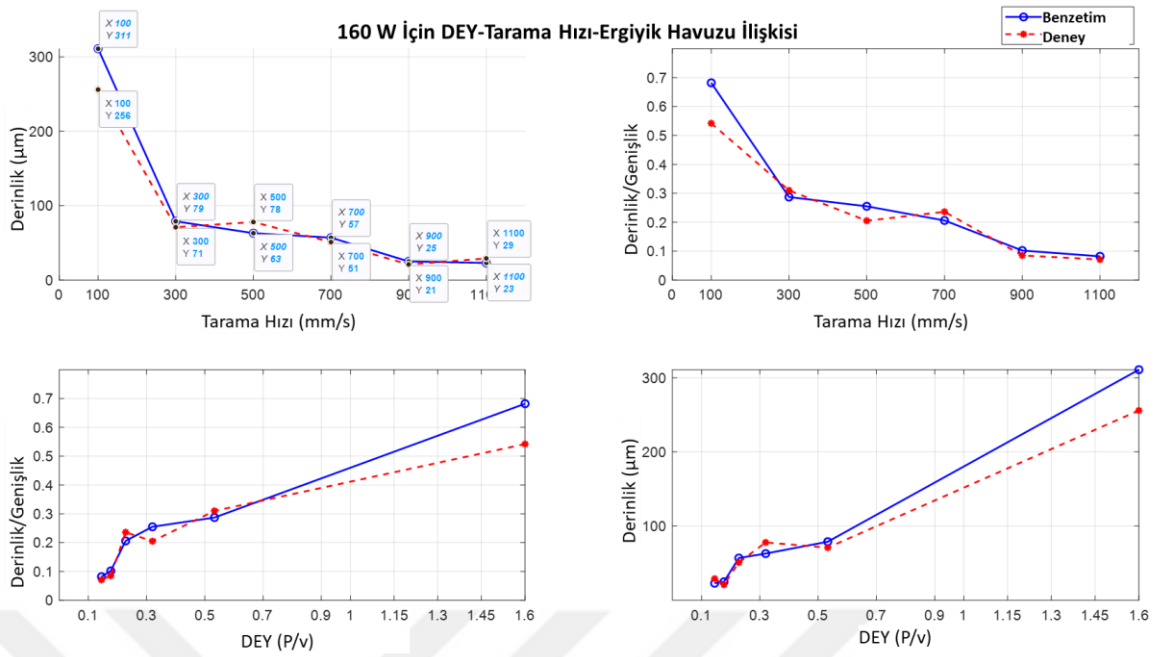
Şekil 7.16. 115 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hız ve DEY'e bağlı eğrisi



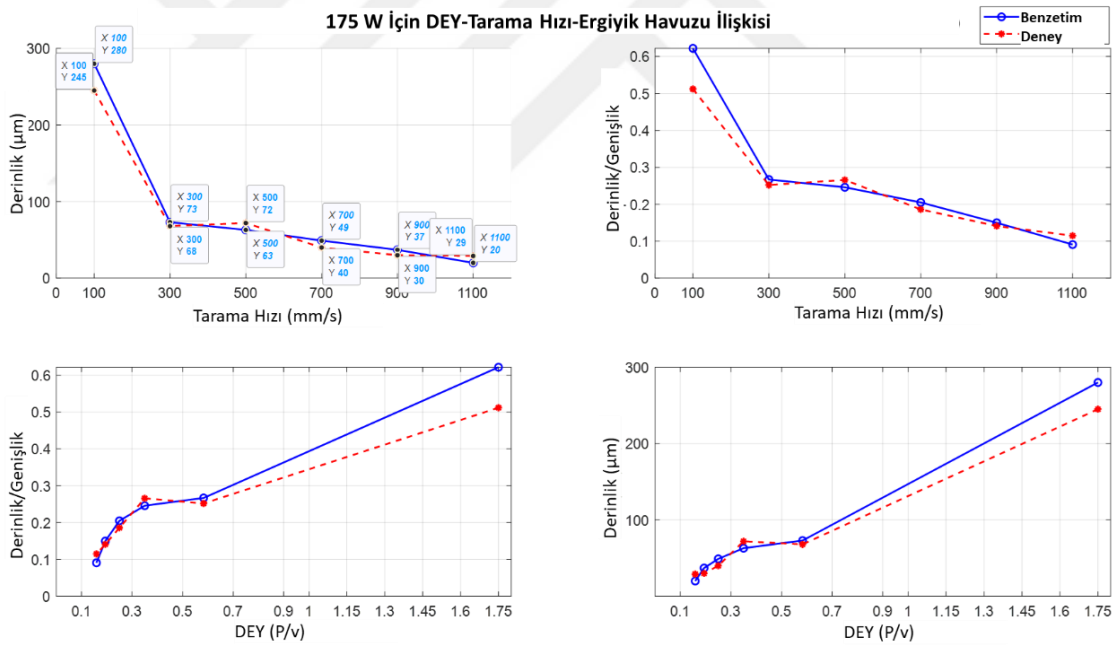
Şekil 7.17. 130 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hız ve DEY'e bağlı eğrisi



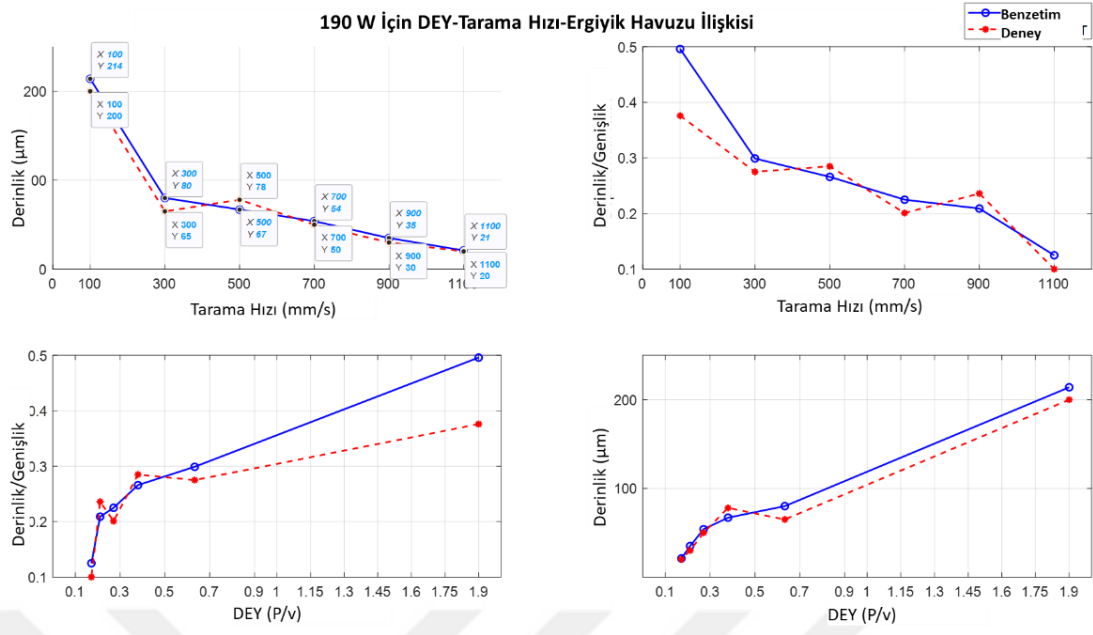
Şekil 7.18. 145 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hız ve DEY'e bağlı eğrisi



Şekil 7.19. 160 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hız ve DEY'e bağlı eğrisi



Şekil 7.20. 175 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hız ve DEY'e bağlı eğrisi



Şekil 7.21. 190 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hız ve DEY'e bağlı eğrisi

Çizelge 7.3.Deneysel ergiyik havuzu boyutları

100mm/s	D/G			300 mm/s	D/G			500mm/s	D/G		
	Derin.	Geniş.	oranı		Derin.	Geniş.	oranı		Derin.	Geniş.	oranı
1	699	985	0,7096	0,33	196	511	0,383	0,2	104	525	0,198
1,15	336	458	0,7336	0,383	75	330	0,227	0,23	61	225	0,2578
1,3	362	461	0,785	0,433	90	266	0,338	0,26	65	287	0,2168
1,45	292	458	0,637	0,483	93	276	0,336	0,29	67	255	0,2625
1,6	311	456	0,682	0,533	79	275	0,287	0,32	63	247	0,2551
1,75	280	450	0,622	0,583	73	273	0,267	0,35	63	256	0,246
1,9	214	431	0,496	0,633	80	267	0,299	0,38	67	251	0,266

1100mm/s	D/G			1300mm/s	D/G			1500mm/s	D/G		
	Derin.	Geniş.	oranı		Derin.	Geniş.	oranı		Derin.	Geniş.	oranı
0,09	79	369	0,214	0,076	26	244	0,106	0,066	23	223	0,103
0,104	17	253	0,067	0,088	13	167	0,077	0,076	18	212	0,084
0,118	21	290	0,072	0,1	19	194	0,097	0,086	17	207	0,082
0,131	17	273	0,062	0,111	18	207	0,086	0,096	15	191	0,078
0,145	23	278	0,082	0,123	28	270	0,103	0,106	19	188	0,101
0,159	20	218	0,091	0,134	27	235	0,114	0,116	22	177	0,124
0,172	21	167	0,125	0,146	21	193	0,108	0,126	20	154	0,129

700mm/s	D/G		
	Derin.	Geniş.	oranı
0,142	95	455	0,208
0,164	43	290	0,148
0,185	61	248	0,245
0,207	58	236	0,245
0,228	62	186	0,333
0,25	49	239	0,205
0,271	54	240	0,225

1700mm/s	D/G		
	Derin.	Geniş.	oranı
0,058	-	216	-
0,067	-	173	-
0,076	-	165	-
0,085	-	153	-
0,094	-	148	-
0,103	-	145	-
0,111	-	137	-

900mm/s	D/G		
	Derin.	Geniş.	oranı
0,11	76	356	0,213
0,127	17	237	0,071
0,144	38	267	0,142
0,161	32	215	0,148
0,177	25	244	0,102
0,194	37	246	0,150
0,211	35	167	0,209

1900mm/s	D/G		
	Derin.	Geniş.	oranı
0,0052	-	176	-
0,06	-	167	-
0,068	-	171	-
0,076	-	159	-
0,084	-	162	-
0,092	-	144	-
0,1	-	135	-

7.2. Ti6Al4V Tek Çizgi İçin ABAQUS Benzetimi İle Elde Edilen Sonuçlar

Bu kısımda öncelikle Ti6Al4V malzemeye ve ithal ticari EOS M280 lazer ergitme cihazına dayalı yapılan 4 çizgili ve tek katmanlı benzetim üzerinden bir baska benzetim doğrulama çalışması verilmektedir. Daha sonra sırasıyla aşağıdaki adımlar açıklanmıştır:

- 316L çalışmasıyla birebir aynı parametrelerde uygulanan (100-190 W güç ve 100-1900 mm/s hız aralığı için) Ti6Al4V malzeme için benzetim ve deneysel çizgi imalat sonuçları ve kıyaslanması
- EOS M280 cihazında uygulanabilir parametreler olarak belirlenmiş 4 adet güç, 4 adet tarama hızı ve 4 adet tarama mesafelesi için 4 çizgili ve tek katmanlık deneylerin ve bununla ilişkili benzetimlerin kıyaslanması

Bu kısımda daha önce açıklanan benzetim yöntemi ile bulunan sıcaklık sonuçları ve ölçümlerle kıyaslanması, ardından ergiyik havuzu tahminleri ve ölçümlerle kıyaslanması süreçleri verilmektedir.

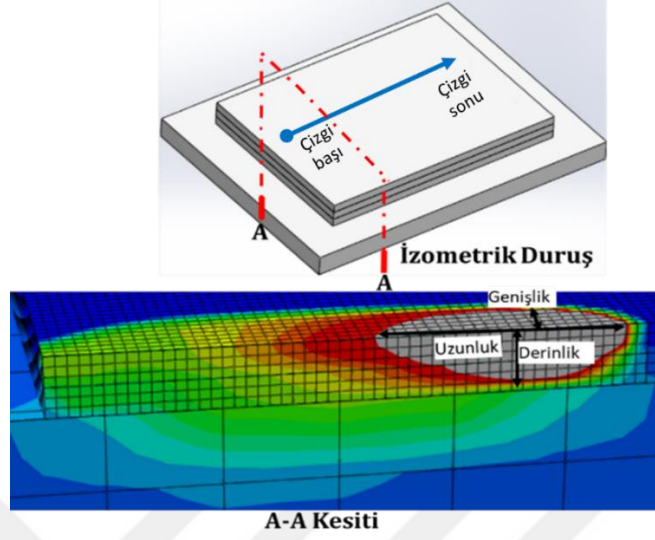
Çizelge 7.4’de Ti6Al4V için EOS M280 cihazı imalat parametreleri verilmektedir.

Çizelge 7.4. Ti6Al4V cihaz imalat parametreleri

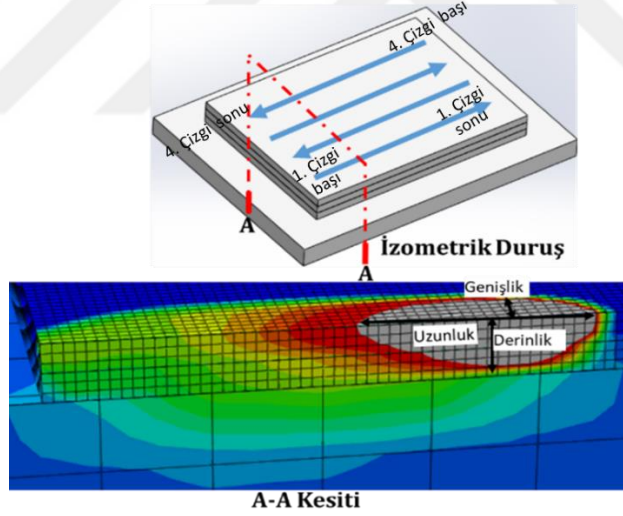
Lazer Gücü (Watt)	100-115-130-145-160-175-190
Tarama Hızı (mm/s)	100-300-500-700-900-1100-1300-1500-1700-1900
Teorik ve Pratik Işın Çapı (um)	80
Katman Kalınlığı (um)	30
Lazer Dalga boyu (um)	1064
Lazer Tipi	Yb:YAG Fiber (Nominal 200 Watt)
Malzeme	Ti6Al4V Titanyum (20-53 um çaplı toz)
Toz Besleme Yöntemi	Alttan Besleme Mekanizmalı
Serme yöntemi	Tek Bıçaklı ve Tabla Isıtmalı (60 C°)

Şekil 7.22’de ve Şekil 7.23’te de benzetim çalışmasında hem sıcaklık haritası olarak çizgi imalatının modellenmesi, hem de ergiyik havuzu kesit alma işlemiyle

kıyaslama yapılırken tahmin edilen ergiyik havuzu boyut ölçümünün prensibi tek çizgili ve 4 çizgili çalışma için verilmektedir.



Şekil 7.22. ABAQUS benzetiminde tek çizgide ergiyik havuzu kesiti

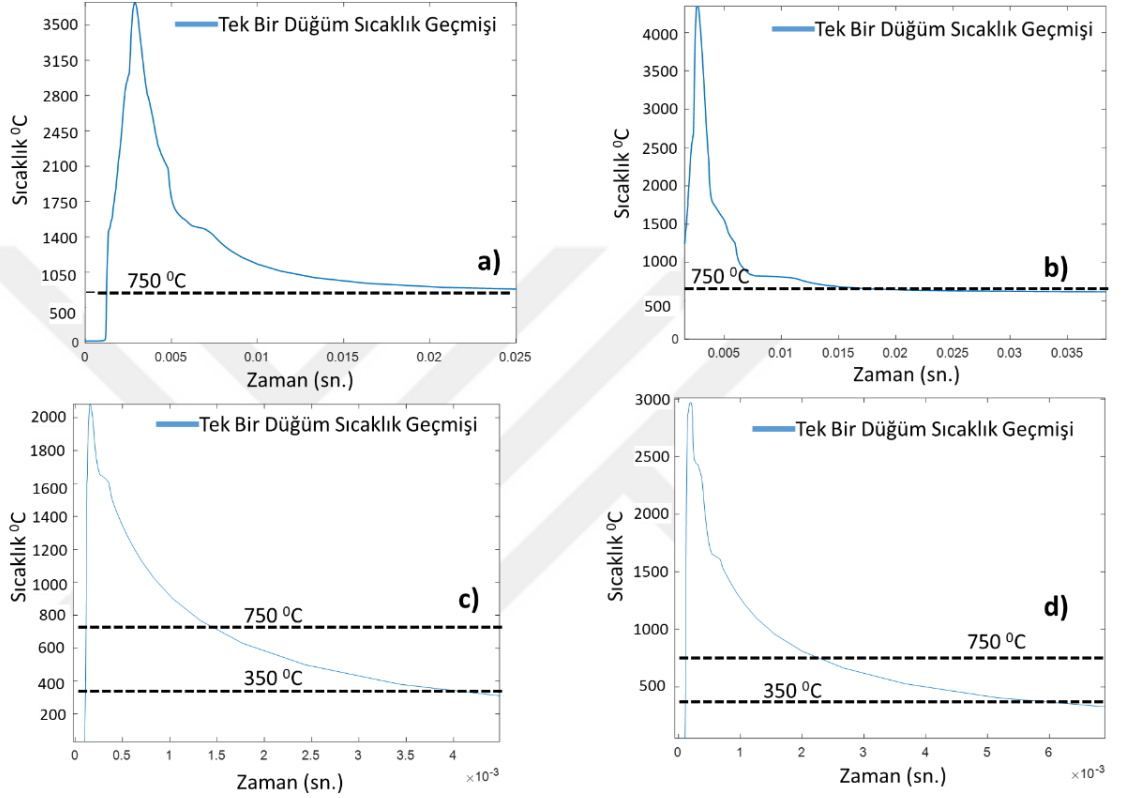


Şekil 7.23. ABAQUS benzetiminde 4 çizgide ergiyik havuzu kesiti

7.2.1. Sıcaklık dağılımı ve maksimum sıcaklıklar (Ti6Al4V, tek çizgi)

Şekil 7.24'te 4 limit güç-hız kombinasyonuna sahip olan orta kesitteki bir düğümün komşu düğümlerinin de etkisin barındıran 10x10 düğümlük bir alandaki ortalama sıcaklık geçimi verilmektedir. Söz konusu sıcaklık grafikleri çizginin yakılmaya başlamasından bitişine kadar belirli bir düğüm ve

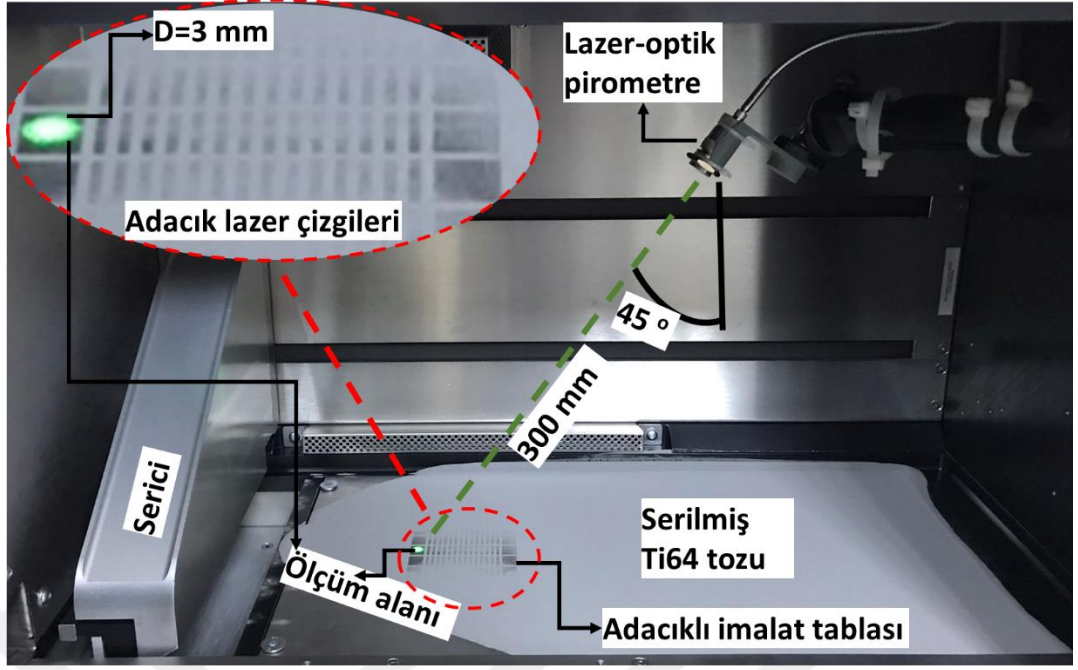
komşuluklarından oluşan düğümlere ait sıcaklık geçmişi ortalamasını göstermektedir. Maksimum sıcaklıklar lazer gücü ile orantılı olarak değişmektedir. Yani yükselen lazer gücü ve düşen tarama hızlarında maksimum sıcaklığın arttığı gözlemlenmektedir. Pratikte de gerçekleşen bu durumun benzetimde görülmesi imalatların doğru modellenebildiğini göstermektedir.



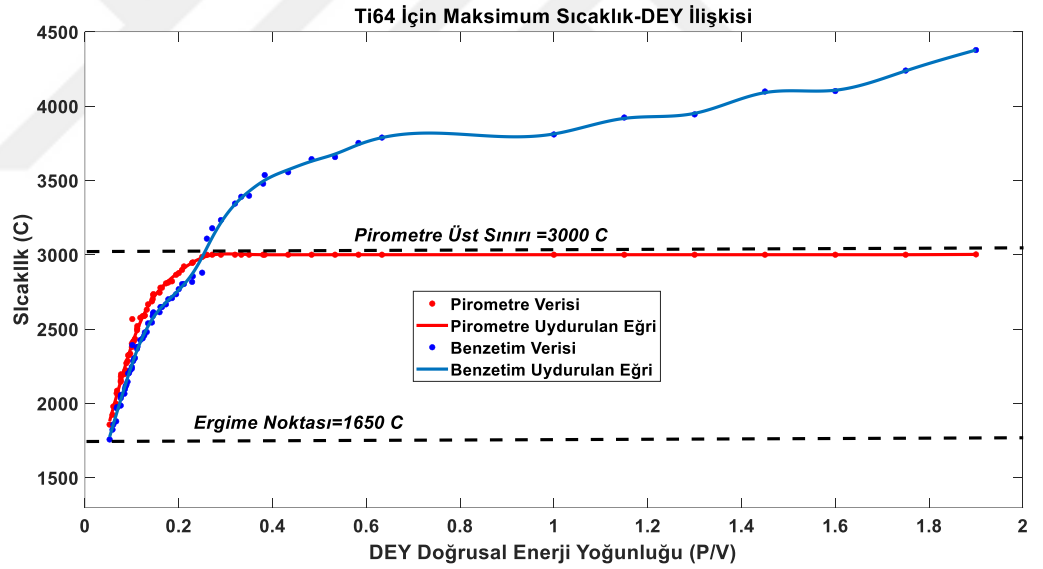
Şekil 7.24. Sınır kombinasyonlara dair sıcaklık geçmişi tahminleri a) 100 W-100 mm/s b) 190 W-100 mm/s c) 100 W-1900 mm/s d) 190 W-1900 mm/s

7.2.2. Deneysel ölçüm (Ti6Al4V, tek çizgi)

Optris 2HM1 Ct-ratio Modeli lazer optik temassız sıcaklık ölçer pirometre sensörü 316L mazleme ölçümleri gibi Ti6Al4V ölçümleri için de kullanılmıştır. Şekil 7.3'teki çalışma şeması aynen kullanılmıştır. Şekil 7.25'te ise Ti6Al4V için deneysel kurulumla dair detaylar verilmektedir.



Şekil 7.25. İthal EOS M280 ticari cihazında pirometre ölçüm deney kurulumu

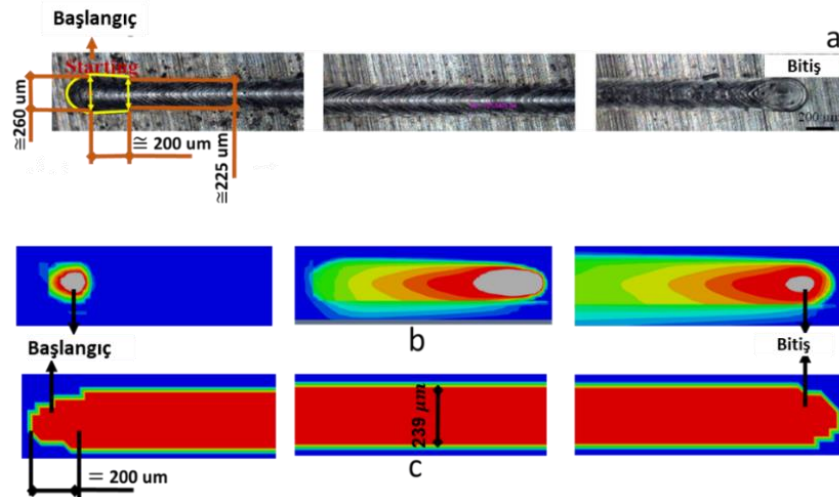


Şekil 7.26. Farklı DEY değerlerindeki maksimum sıcaklıklar ve deneysel ölçümlerle kıyaslanması

Pirometre üst sınır olan 3000 °C'ye kadar benzetim ve ölçülen maksimum çizgi sıcaklıklarının % 5'ten daha az bir hata ile tahmin edilebildiği görülmüştür.

7.2.3. Ergiyik havuzu boyutları (Ti6Al4V, tek çizgi)

Bu çalışmadaki modelde çizgi başlangıcı ile bitişinde herhangi bir ivmelenme etkisi dikkate alınmamaktadır. Lazer başlangıçta ivmesiz başlamakta bitişte ise ani olarak güç kesilmekte ve ivmelenme etkisi ihmal edilmektedir. Pratik bir imalatla ise lazer ışının yansıtan tarayıcı kafaların motor tahrikli aynalarının ivmelenme etkileri mevcut olup başlangıç ve bitişteki ergiyik havuzu boyutları teorik hesaplardan daha büyük oluşmaktadır. Şekil 7.24'te literatürdeki bir çizgi deneyi ile bu tez çalışmasının bir çizgi sonucu kıyaslanmaktadır. Söz konusu çalışmada ivmelenme bölgesi için verilen görüntüler incelenerek başlangıç noktasından yaklaşık 215-220 μm mesafede bulunduğu anlaşılmaktadır [Gong vd., 2014]. Benzetim çalışmamızda da başlangıç noktasından 200 μm mesafede ergiyik havuzunun kararlı olmaya başladığı Şekil 7.24'te verildiği gibi gözlemlenmiştir. Bu kıyaslamadaki tutarlılık, söz konusu literatür çalışmasının bu tez çalışmadaki güç ve hızlarla, ayrıca katman kalınlığı ile aynı aralıktaki parametrelerde yürütülmüş olduğu dikkate alındığında ergiyik havuzu ölçülerine dair tahminlerdeki doğruluk için güvenilirliği artırıcı bir gösterge olmaktadır. Böylece başlangıçtan 400 μm mesafeden havuz boyutları toplanmıştır.

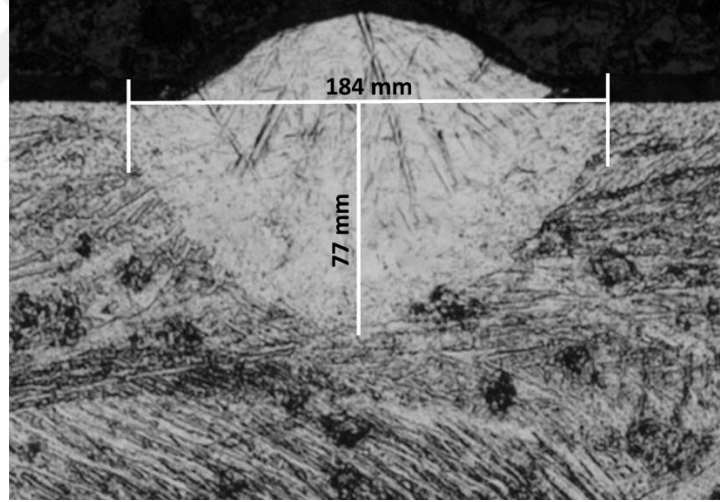


Şekil 7.24. a) Tek çizgi deneyi [Gong vd.,2014], b) benzetim ergiyik havuz ilerlemesi c) benzetimde katlaşılan alanlar

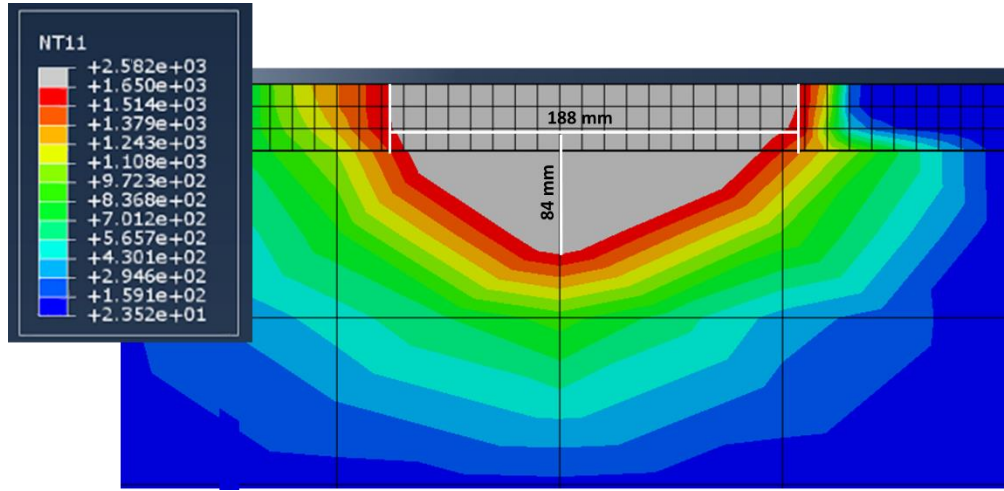
Ergiyik havuz ölçü tahminleri için öncelikle her çizgiye ait maksimum derinlik (D) ve maksimum genişlik (W) değerleri ile bu değerlerin oranı $\frac{D}{W}$ anahtar deliği

kusurunun oluşup oluşmadığının belirlenmesi için hesaplanmıştır. Soylemez'in çalışmasına göre $\frac{D}{W} > 0.5$ şartı anahtar deliği ve dolayısıyla gözenekli ve mekanik özellikleri düşük ergiyik havuzu ihtimali taşıırken, $\frac{D}{W} > 1.2$ şartı sonucu bu kusur kaçınılmaz hale gelmektedir [Soylemez, 2018]. Böylece maksimum ergiyik havuz derinlikleri için kritik derinlik (CD) tanımlanmıştır.

Benzetim çalışması sonucu ergiyik havuzu derinliği ve genişliği boyutları, lazer gücü, tarama hızı parametrelerine bağlı olarak tahmin edilmiştir. Tahminler ve parametrelerle ilişkileri ortaya konularak nihayet deneysel incelemelerde bulunan havuz boyutları ile kıyaslama gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.25'te optik mikroskop incelemesiyle elde edilen ergiyik havuzu kesiti, ölçülmüş boyutlarıyla birlikte görülmektedir. Şekil 7.26'da ise benzetim çalışmasından bir ergiyik havuz boyut tahmin örneği görülmektedir.

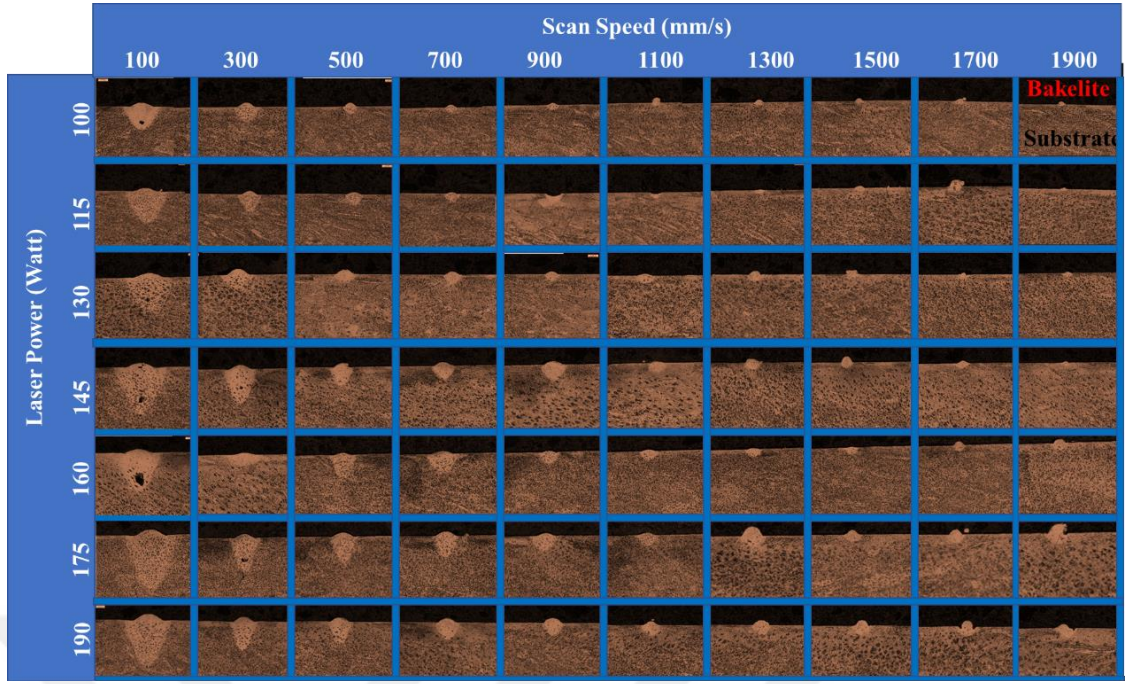


Şekil 7.25. 130W-900 mm/s için örnek kesit alan ergiyik havuz boyut ölçümü



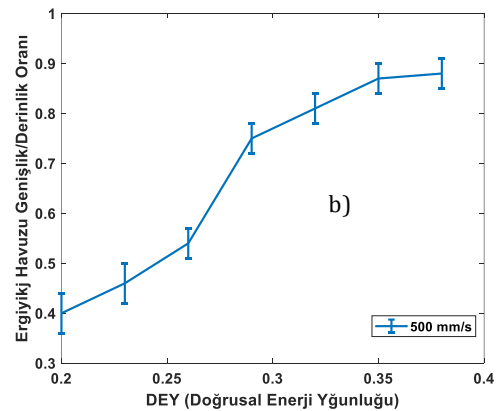
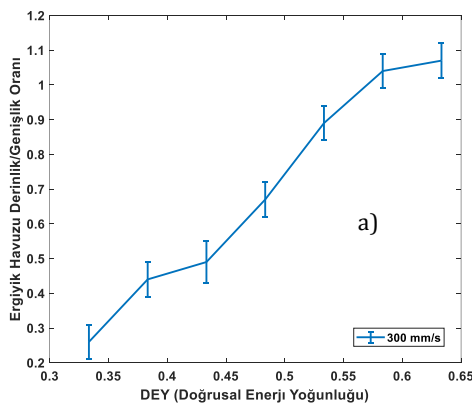
Şekil 7.26. ABAQUS arayüzünde kesit alan ergiyik havuzu boyut tahmini hesaplaması (130W-900 mm/s)

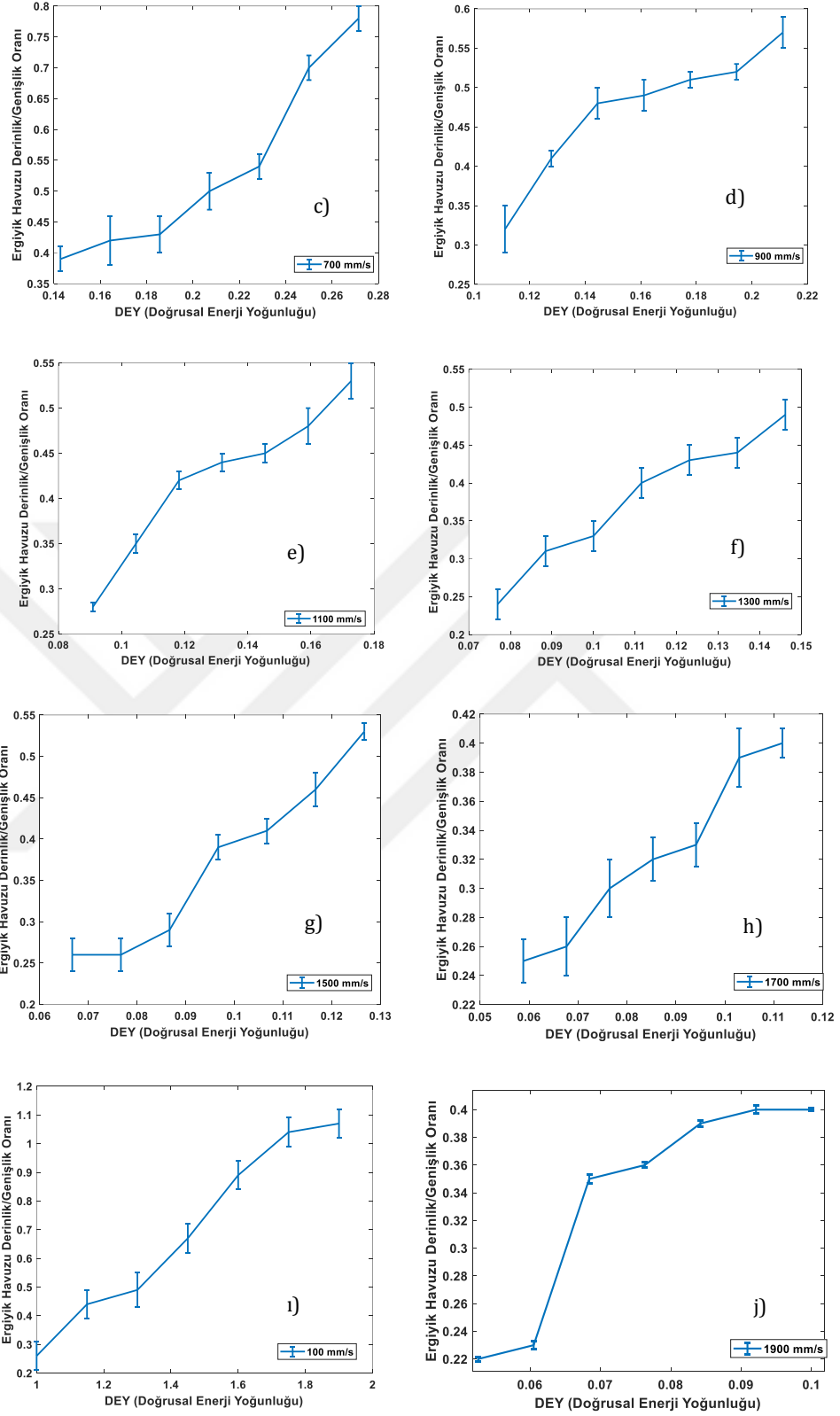
316L incelemelerine benzer şekilde her bir çizginin orta kesiti tel erozyon cihazı kullanılarak çizgi doğrultusuna dik şekilde kesilmiştir. Kesilen ergiyik havuzu kesiti numuneleri yine optik mikroskop ile incelenmiştir. Deneme yanılma yöntemiyle 3 adet parlatılmış numune dağlama süresine karar vermek için denenerek mikroskopta incelendikten sonra, tüm parlatma işlemi tamamlanan Ti6Al4V numuneleri el ile 75 saniye boyunca Kroll çözeltisi içerisine daldırılmıştır. Ardından saf su çözeltisine daldırılarak yüzeyi temizlenen numunelerin yüzeyleri kısıklı basınçlı hava ile temizlenmiştir. Son olarak mikroskop altında inceleme yapılarak ergiyik havuzu genişlik ve derinlikleri ölçülmüştür. Şekil 7.27’de toplu olarak tüm ergiyik havuzu kesitleri verilmektedir.



Şekil 7.27. Farklı parametrelerle imal edilen Ti6Al4V malzeme tek çizgilerindeki ergiyik havuzu kesitlerinin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 7.27 incelendiğinde, tarama hızının artmasıyla birlikte ergiyik havuzu derinliğinde ve genişliğinde azalma, aynı zamanda lazer gücünün artmasıyla derinlik ve genişlikte artma gözlemlenmektedir. 1100-1300 mm/s tarama hızı aralığından sonra oluşan azalmanın farkedilir ölçekte olmadığı, 175-190 Watt aralığından sonra da ergiyik havuzu ölçülerindeki artışın çok azaldığı gözlemlenmiştir. Böylece, hem güce hem hıza bağlı havuz ölçü değişikliklerinin gözlemlenmesi için doğrusal enerji yoğunluğu tanımı (DEY) kullanılarak Şekil 7.28'deki eğriler elde edilmiştir.





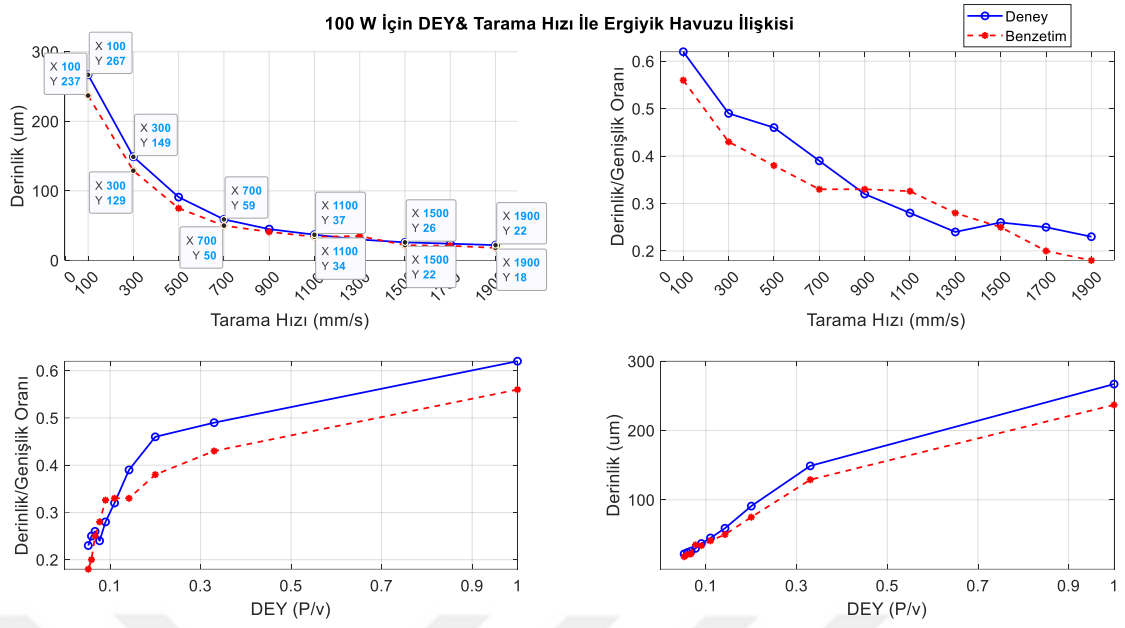
Şekil 7.28. DEY oranına bağlı olarak farklı hızlarda ergiyik havuzu boyutları a) 300 mm/s b) 500 mm/s c) 700 mm/s d) 900 mm/s e) 1000 mm/s f) 1300 mm/s g) 1500 mm/s h) 1700 mm/s i) 100 mm/s j) 1900 mm/s

Şekil 7.28 genel olarak değerlendirildiğinde lazer gücünün artmasıyla derinlik genişlik oranlarında artış belirli bir seviyeye kadar devam etmektedir. Bu artış lazer gücünün derinlik üzerinde daha fazla etkiye sahip oluşu şeklinde değerlendirilebilir. Bununla birlikte derinlik genişlik oranı ve doğrusal enerji yoğunluğu arasında bütün hız değerlerinde doğrusala yakın bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Bu durum da doğrusal enerji yoğunluğu olarak tanımlanan güö/hız oranının parametrele etkisinin incelenmesinde önemli bir terim olduğunu göstermektedir.

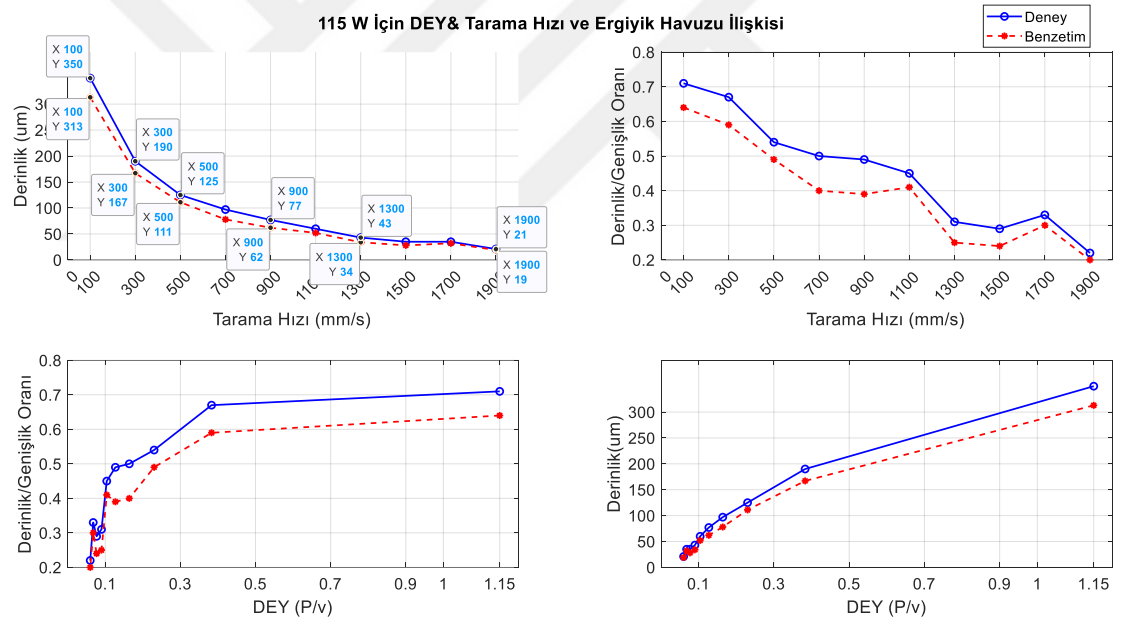
Diğer taraftan verimli bir çizgi yakımı dolayısıyla parça imalatı için bölüm 7.1.3'te 316L malzemeye dair yapılan 2 tanımlama Ti6Al4V malzeme için de geçerlidir. Bunların ilki belirli bir havuz derinliğine (en az 1.5 katmanlık) ulaşılabilmesi, diğeri ise belirli bir aralıkta derinlik genişlik oranının eldesi olarak tanımlanmıştı.

Bu durumun incelenmesi için Şekil 7.29-7.35'te havuz derinlikleri ve derinlik genişlik oranları her bir denenen güç için hem tarama hızına hem doğrusal enerji yoğunluğuna bağlı olarak grafikleştirilmiştir. Çizelge 7.5'te ise aşağıdaki kıstaslar dikkate alınarak tüm havuz boyutları verilmektedir:

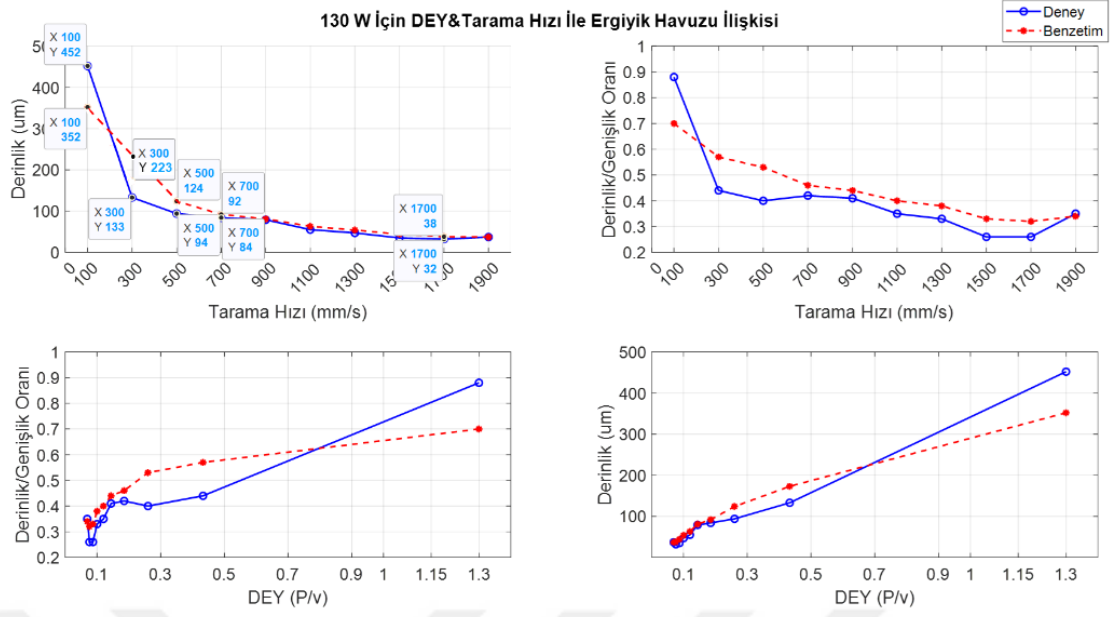
- 1- Derinlik 45 μ m'dan küçük ise renk kırmızı, 45-50 μ m arasında ise renk turuncu ve 50 μ m'dan büyük ise renk yeşildir. Buradaki kıstas 1.5 kat katman kalınlığından bir derinlik oluşup oluşmamasıdır.
- 2- Derinlik/ genişlik oranı 0.2'den küçük ise ve 0.5'ten büyük ise kırmızı, 0.2 ve 0.5 arasında yeşil, 0.48-0.51 arasında turuncudur. Buradaki kısıt ise literatüre dayalı olarak derinlik genişlik oranının yetersiz derinlik oluşturacak 0.2'den küçük değerler alıp almadığı, ya da keskin gerilimli köşelere veya anahtar deliği / diğer tür bir gözenekliliğe sebep olacak değerler alıp almadığıdır.



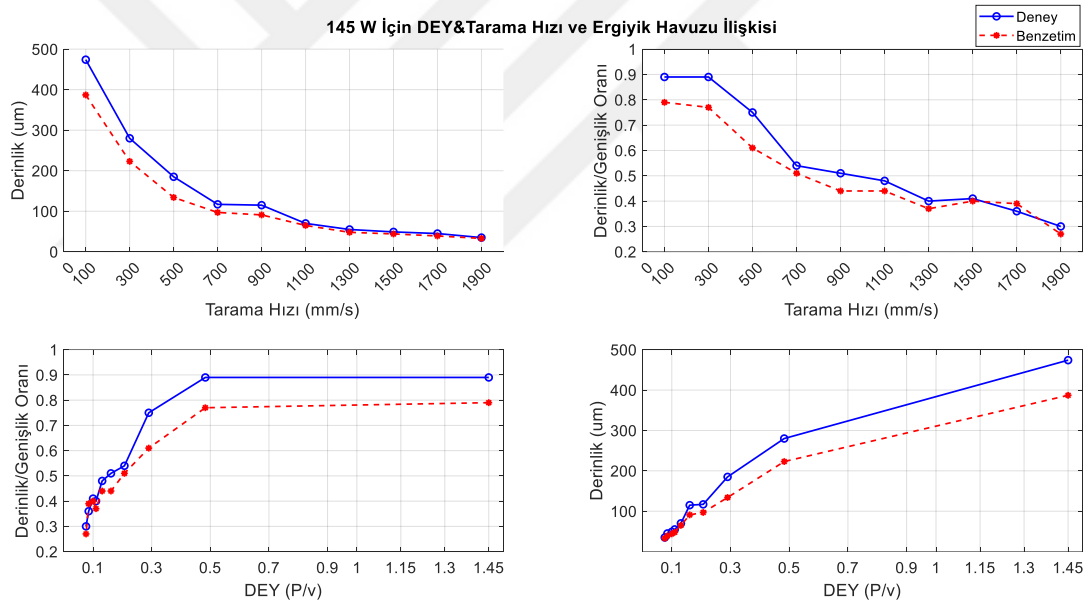
Şekil 7.29. 100 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hızı ve DEY'e bağlı eğrisi



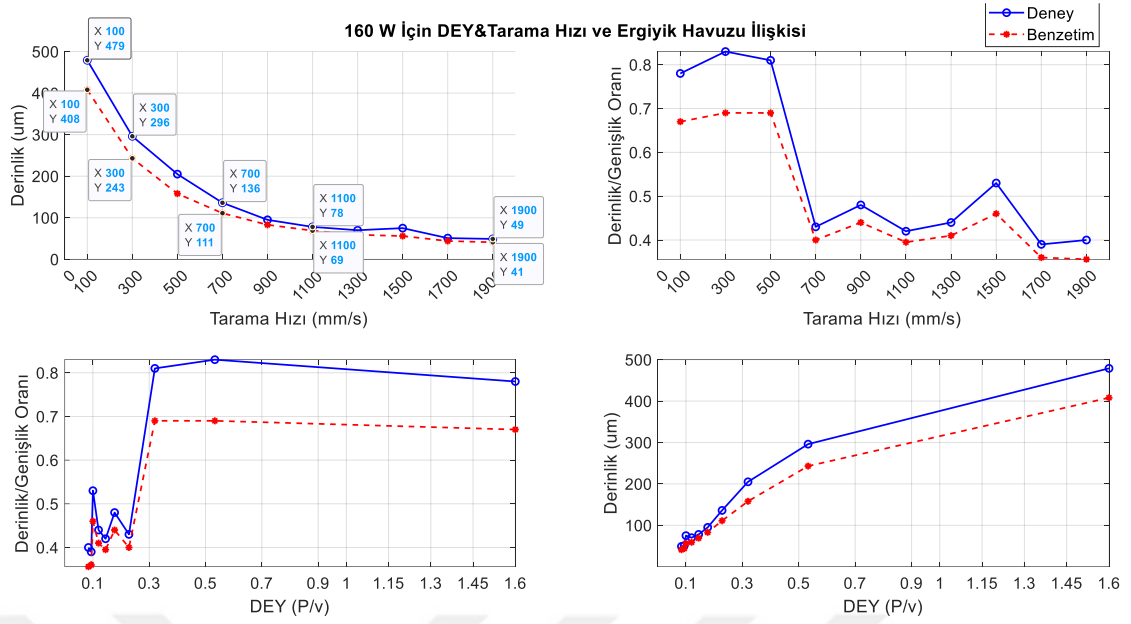
Şekil 7.30. 115 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hızı ve DEY'e bağlı eğrisi



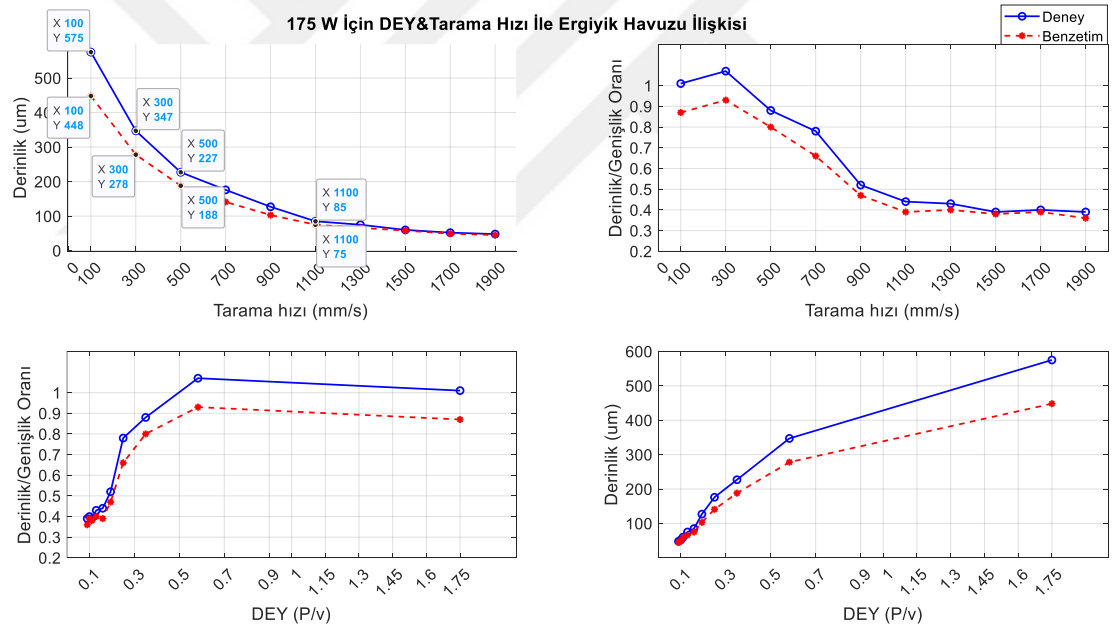
Şekil 7.31. 130 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hızı ve DEY'e bağlı eğrisi



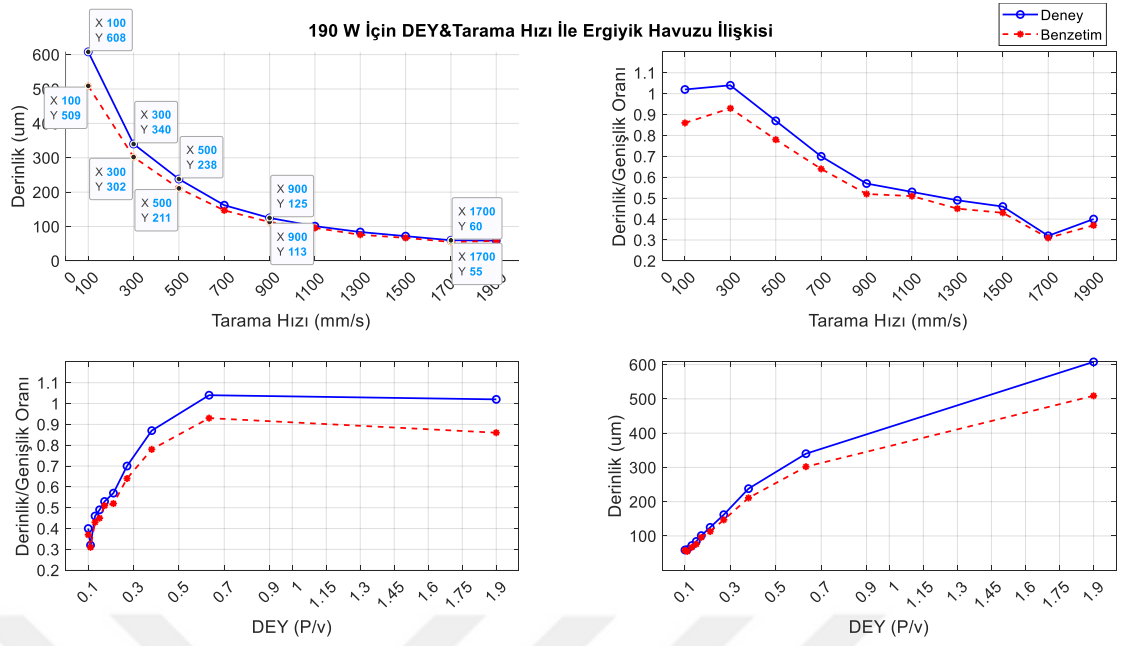
Şekil 7.32. 145 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hızı ve DEY'e bağlı eğrisi



Şekil 7.33. 160 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hızı ve DEY'e bağlı eğrisi



Şekil 7.34. 175 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hızı ve DEY'e bağlı eğrisi



Şekil 7.35. 190 W için; ergiyik havuzu boyutlarının hızı ve DEY'e bağlı eğrisi

Çizelge 7.5. Ti6Al4V Tek çizgi ergiyik havuzu boyutları

100 W						115 W					
Güç	Hız	Derin.	Geniş.	D./G. Oran	DEY	Güç	Hız	Derin.	Geniş.	D./G. Oran	DEY
100	100	267	424	0.630	1	115	100	350	490	0.714	1.15
100	300	149	300	0.497	0.333333	115	300	190	281	0.676	0.383333
100	500	91	197	0.462	0.2	115	500	125	228	0.548	0.23
100	700	59	151	0.391	0.142857	115	700	97	192	0.505	0.164286
100	900	45	137	0.328	0.111111	115	900	77	157	0.490	0.127778
100	1100	30	105	0.286	0.090909	115	1100	60	132	0.455	0.104545
100	1300	26	106	0.245	0.076923	115	1300	43	137	0.314	0.088462
100	1500	24	89	0.270	0.066667	115	1500	35	120	0.292	0.076667
100	1700	27	105	0.257	0.058824	115	1700	35	105	0.333	0.067647
100	1900	22	96	0.229	0.052632	115	1900	21	95	0.221	0.060526

130 W						145 W					
Güç	Hız	Derin.	Geniş.	D./G. Oran	DEY	Güç	Hız	Derin.	Geniş.	D./G. Oran	DEY
130	100	452	510	0.886	1.3	145	100	474	531	0.893	1.45
130	300	133	301	0.442	0.433333	145	300	280	313	0.895	0.483333
130	500	94	231	0.407	0.26	145	500	185	245	0.755	0.29
130	700	84	200	0.420	0.185714	145	700	117	215	0.544	0.207143
130	900	79	184	0.429	0.144444	145	900	115	225	0.511	0.161111
130	1100	55	155	0.355	0.118182	145	1100	70	145	0.483	0.131818
130	1300	47	142	0.331	0.1	145	1300	55	135	0.407	0.111538
130	1500	35	132	0.265	0.086667	145	1500	49	117	0.419	0.096667
130	1700	32	121	0.264	0.076471	145	1700	45	150	0.300	0.085294
130	1900	37	105	0.352	0.068421	145	1900	35	96	0.365	0.076316

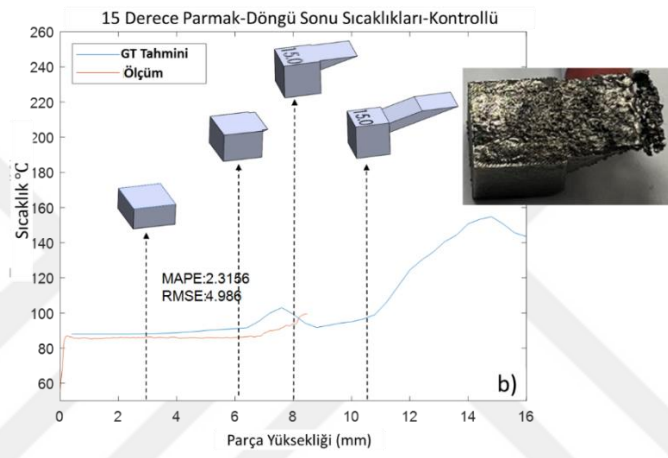
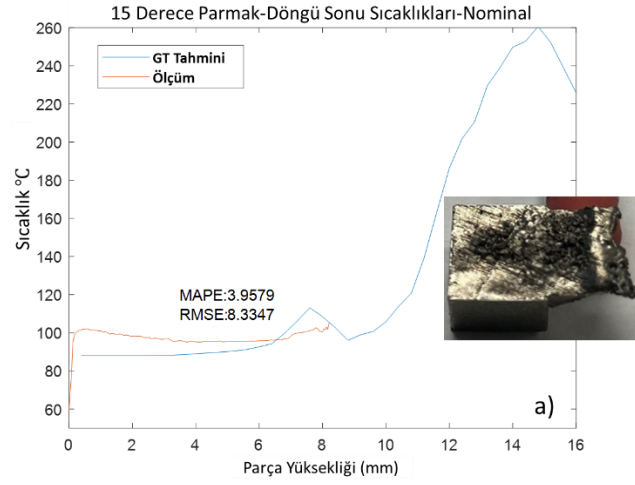
160 W						175 W					
Güç	Hız	Derin.	Geniş.	D./G. Oran	DEY	Güç	Hız	Derin.	Geniş.	D./G. Oran	DEY
160	100	479	612	0.783	1.6	175	100	575	565	1.018	1.75
160	300	296	356	0.831	0.533333	175	300	347	322	1.078	0.583333
160	500	205	251	0.817	0.32	175	500	227	257	0.883	0.35
160	700	136	315	0.432	0.228571	175	700	176	225	0.782	0.25
160	900	95	197	0.482	0.177778	175	900	127	243	0.523	0.194444
160	1100	78	185	0.422	0.145455	175	1100	85	192	0.443	0.159091
160	1300	70	157	0.446	0.123077	175	1300	75	164	0.457	0.134615
160	1500	75	141	0.532	0.106667	175	1500	60	151	0.397	0.116667
160	1700	51	130	0.392	0.094118	175	1700	51	126	0.405	0.102941
160	1900	49	121	0.405	0.084211	175	1900	48	123	0.390	0.092105

190 W					
Güç	Hız	Derin.	Geniş.	D./G. Oran	DEY
190	100	608	595	1.022	1.9
190	300	340	326	1.043	0.633333
190	500	238	272	0.875	0.38
190	700	162	230	0.704	0.271429
190	900	125	217	0.576	0.211111
190	1100	101	189	0.534	0.172727
190	1300	84	170	0.494	0.146154
190	1500	72	154	0.468	0.126667
190	1700	60	186	0.323	0.111765
190	1900	59	148	0.399	0.1

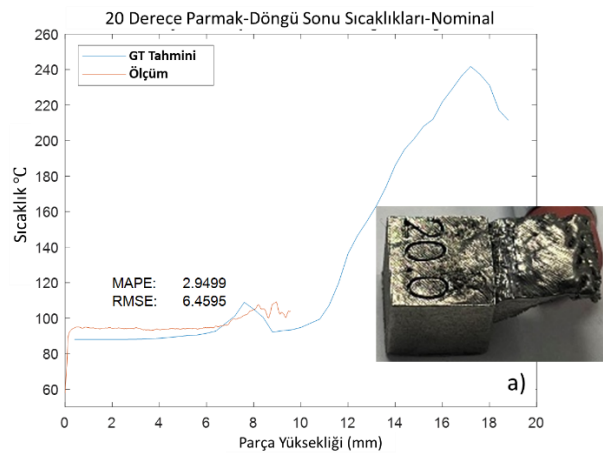
7.4. GT Modeli Kalibrasyon Sonucu Benzetim ve Ölçüm Sonuçlarının Kıyaslaması

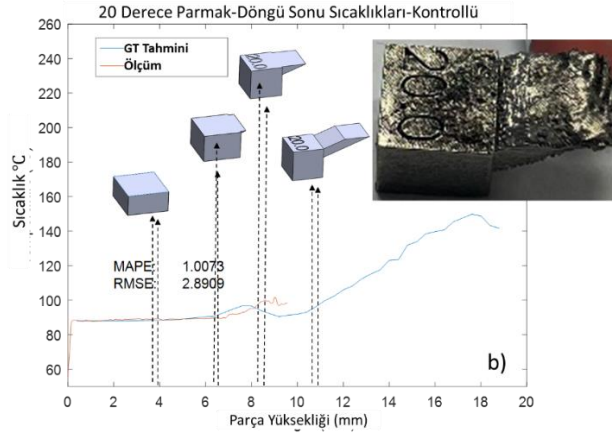
Bölüm 6.5.2'deki ölçüm sonuçlarına göre Grafik Teorisi'nde kalibrasyon sağlanmıştır. Bu kalibrasyon sürecinde GT benzetimi geliştirilirken kullanılan ısı transfer katsayıları ölçüm sonuçlarına göre denenmiştir. Sırasıyla aşağıdaki terimler kalibrasyona tabii tutularak ölçüm sonuçları ve benzetim sonuçları eşleştirilmiştir. Böylece belirli bir TYLE cihazı ve malzemesi için GT benzetiminde sabit olarak kullanılabilecek katsayılara karar verilmektedir;

Toz-toz etkileşimi ile gerçekleşen ısı transfer katsayısı: Bu ısı transfer katsayısı için GT arayüzü olarak kullanılan yazılım içerisinde Şekil 6.12'de belirtilmiş "advanced GT parameters" alt penceresinde -powder htc- isimli katsayı ayarlanmaktadır. Genellikle 2 ile 5 arasında bir değer almaktadır. Bu katsayı geometriye ve malzeme cinsine de bağlı olmakla birlikte genellikle ölçüm verisi ile bir ofsetin kapanmasını sağlamaktadır. Toz-tabla etkileşimi ile gerçekleşen ısı transfer katsayısı: Bu ısı transfer katsayısı için GT arayüzü olarak kullanılan yazılım içerisinde Şekil 6.12'de belirtilmiş "advanced GT parameters" alt penceresinde -substrate htc- isimli katsayı ayarlanmaktadır. Genellikle 1'den 250'ye kadar herhangi bir değer alabilmektedir. Ölçüm verisinin orta kısmı ile yani parçanın tam orta kesitlerinde birikmeye başlayan sıcaklık ile GT tahmini sıcaklığı arasındaki fark üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Toz üst katmanı-çevre koruyucu gaz etkileşimi ile gerçekleşen ısı transfer katsayısı: Her bir katman yakımdan önce en üst katman rolünü almaktadır. Bu katsayının ayarlanması ile her katman yakımı esnasında her katmanın en geniş yüzeyi olan üst yüzeylerinden kaybedilen sıcaklığın da modellenenebilmesi sağlanmaktadır. 10-6 değerinden 10+6 değerine kadar geniş bir aralıkta değer alabilmektedir. Bu 3 katsayının ölçüm sonucu elde edilen parça yüksekliği-sıcaklık eğrisine uyudurulması ile birlikte imalat yapılan cihaz için sabit bir GT sıcaklık benzetimi tamamıyla elde edilmiş olmaktadır. Şekil 7.26-32 tüm parçalar için hem ölçüm verilerini hem de kalibrasyonu yapılmış GT tahminlerini ortaya koymaktadır.

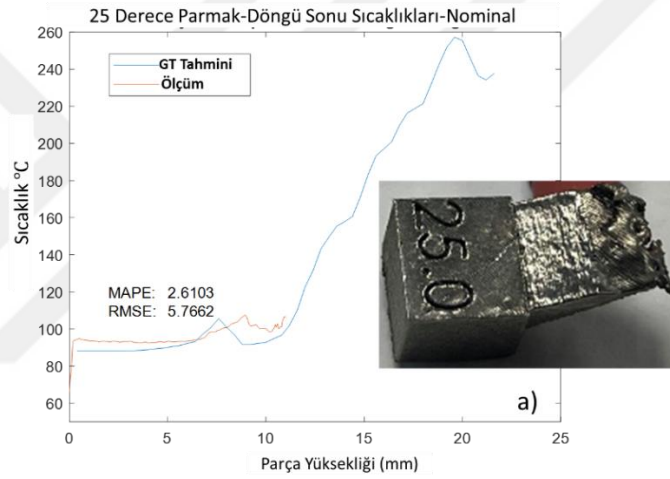


Şekil 7.26. 15° parmak geometrisi için ölçüm ve gt modeli tahmini a) nominal parametrelili parça b) kontrollü parametrelili parça

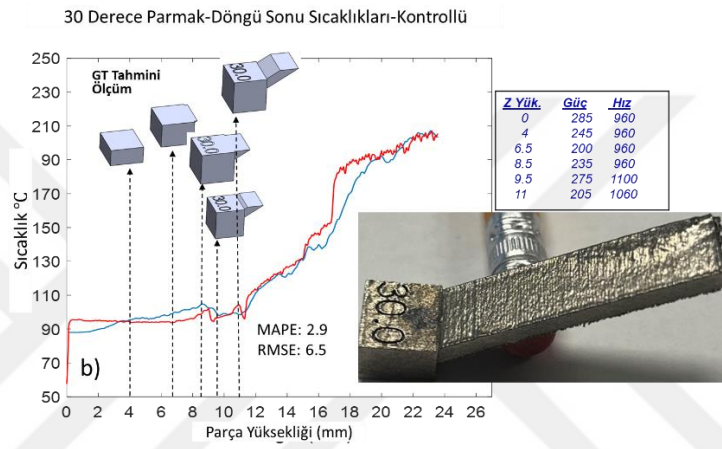
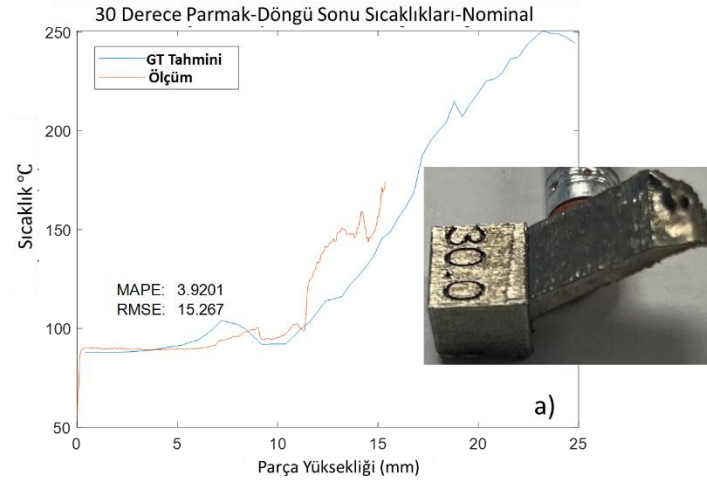




Şekil 7.27. 20° parmak geometrisi için ölçüm ve gt modeli tahmini a) nominal parametrelili parça b) kontrollü parametrelili parça

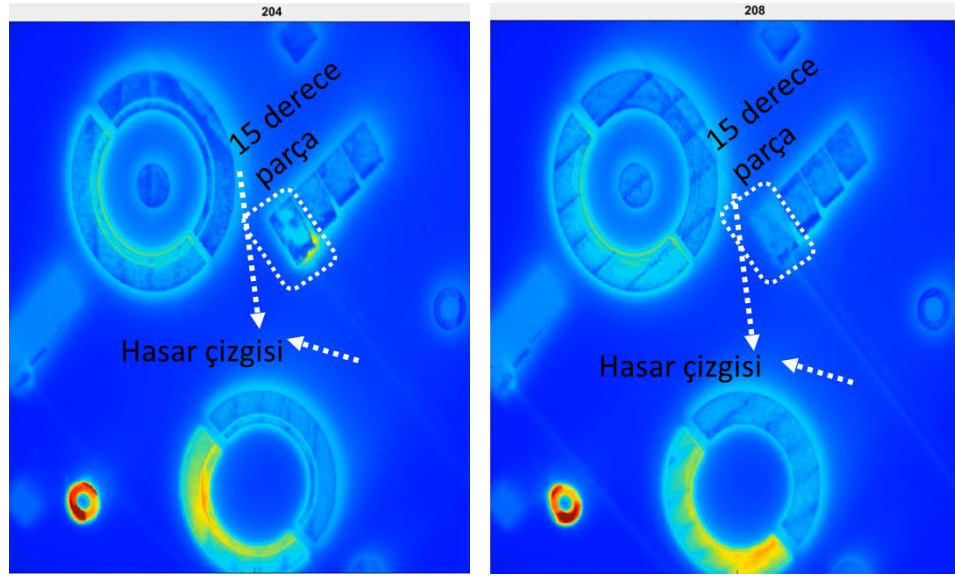


Şekil 7.28. 25° parmak geometrisi için ölçüm ve gt modeli tahmini a) nominal parametrelili parça b) kontrollü parametrelili parça



Şekil 7.29. 30° parmak geometrisi için ölçüm ve gt modeli tahmini a) nominal parametrelili parça b) kontrollü parametrelili parça

Açılı parmak geometrili parçaların hem ölçüm hem de tahminleri incelendiğinde, açılı kısmın başlamasıyla birlikte açık bir halde sıcaklık sıçraması meydana gelmektedir. Bu beklenen bir durumdur zira açılı kesit öncesindeki gibi sıcaklığın rahat aktarılabilceği bir yüzey açılı kesitin alt kısmı boş olduğundan bulunmamaktadır. 15-20 ve 25°'li geometri için bu sıçrama ölçümler esnasında gözlemlenemeden parçalar hasara uğramaktadır. 15° 8.8 mm'de, 20° 9.6 mm'de 25° 10.8 mm'de hasara uğramaktadır. Şekil 7.30'da örnek teşkil etmesi açısından 15° parmak parçanın hasara başladığı katman ve hasar bittikten sonra parçanın iptal edildiği katman görülmektedir. Şekilde ilgili parçanın hizasında oluşan sıradışı çizgi diğer parçaların da o konumda iseler etkileneceklerini işaret etmektedir.

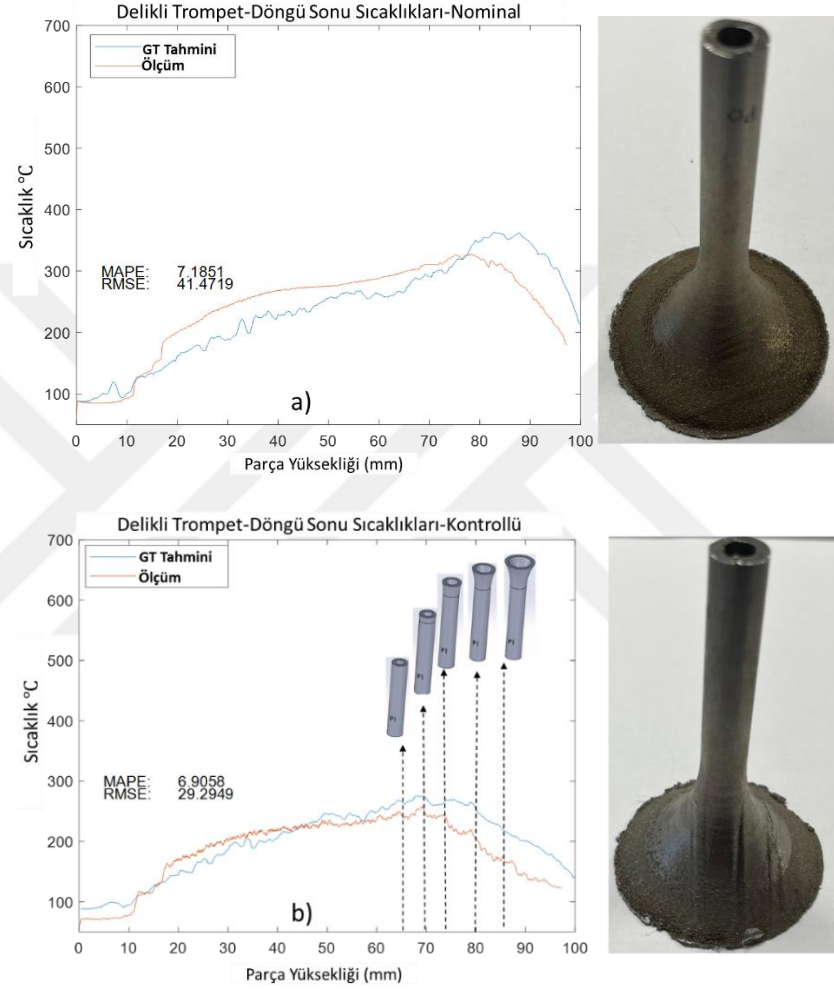


Şekil 7.30. 15° parmak parçada hasar a) başlangıç anı b) bittikten sonra

15-20 ve 25° geometrili parçaların GT tahminlerine bakıldığında ise hasara uğranan noktaya kadar oldukça küçük hata paylarıyla sıcaklığın tam olarak tahmin edildiği, hatta küçük sıcaklık değişim eğilimlerinin de önceden belirlenebileceği anlaşılmaktadır. 30° parmak geometrili parça için ise daha farklı bir durum söz konusu olmuştur. Nominal parametre ile imal edilen parmak parça Şekil 7.29a'da görüleceği üzere 15.9 mm'de hasara uğramıştır. Böylece diğer açılarla karşılaştırıldığında oldukça iyi bir açı olduğu söylenebilir de parça başarısız olduğu için seçilmesi uygun bir açı olarak görülmemektedir. Fakat 30 °C geometrili parçanın kontrollü parametre ile imal edilen örneğinin tamamen başarıyla imal edildiği görülmektedir. Ayrıca 7.29b incelendiğinde yüzeyin herhangi bir kusurunun da bulunmadığı anlaşılmaktadır. Bu durum ise açılı geometrideki parçaların imalatında en az 30°'lik bir açının ancak kontrollü parametreler kullanılırsa imal edilebileceğini göstermektedir.

Daha da ötesinde yine 7.30b'ye bakıldığında GT sıcaklık tahmininin ölçüm sıcaklığını çok az bir ortalama yüzde hata (MAPE=Mean Average Percentage Error) ile takip ettiği görülmektedir. Yalnızca türbin çarkı parçalarının tam olarak kanat kesitlerinin başladığı katmanda başlayan 30° parmak parçadaki sıcaklık yükselişinin GT tarafından en çok hata ile takip edildiği görülebilir. Bunun sebebi, kanat kesitleri başladığı anda 30° parmak parçanın her katman yakımından sonra

soğumak için artık türbin çarkı geniş gövde kısımlarının yakılmasını beklemek gibi bir olanağının kalmamış olmasıdır. Çünkü kanat kısımlarının tüm türbin çarkları dikkate alınsa bile çok hızlı tamamlandığı açıktır. Şekil 7.31’de a ve b’de delikli trompet geometrili parça için ölçüm ve kalibre edilmiş tahmin sonucu verilmektedir.

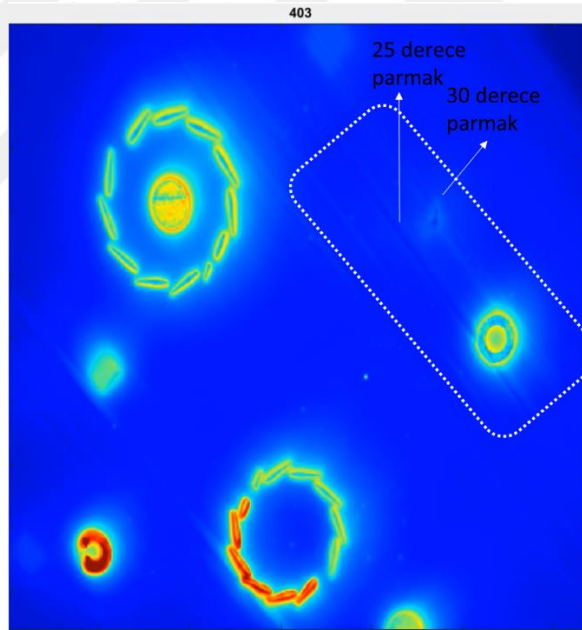


Şekil 7.31. Delikli trompet geometrisi ölçü ve GT tahminleri a) nominal parametre b) kontrollü parametre

Delikli trompet parçaları incelendiğinde ilk göze çarpan durum GT sıcaklık tahminlerinin eğilimler dahil ölçüm sonuçlarını iyi takip ediyor olmasıdır. Bunun yanında güç-hız kombinasyonlarının genel bir etkiye sahip olduğu keskin etkilerde bulunmadığı ve sıcaklık düşüşü için etkin bir biçimde kullanılabileceği görülmektedir. Çünkü 7.31a’daki nominal parametrelili delikli trompette elde

edilen sıcaklıklar açık bir şekilde kontrollü parametrelerle imal edilen delikli trompetten yüksektir ki bu beklenen ve istenen bir durumdur.

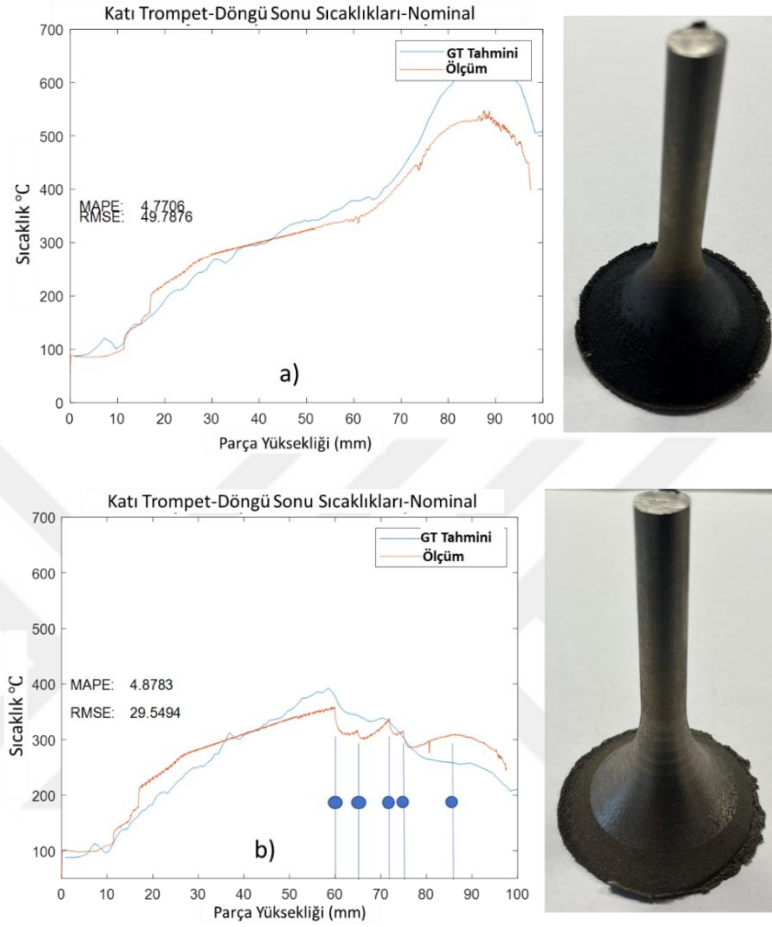
Özellikle delikli trompet geometrisindeki sıcaklık düşüşünden bahsetmek yerinde olacaktır. Bu geometrinin amacı ısı birikiminin engellenip engellenemeyeceğini delikli ve aynı zamanda ince duvar gibi davranabilecek yani ısıyı kenar kısımlarında biriktirecek ve daha da ötesi oldukça yüksek bir parçada denemek olmuştur. Şekil 7.31’den görüldüğü üzere de sıcaklık 85. mm’ye kadar birikmekte ve ardından arkasında artık yeterince ısı transferi yapılabilecek bir malzeme yığını biriktirdiği için tekrar düşmektedir. Bir diğer husus kontrollü delikli trompet geometrisinin dış yüzeyinde pürüzler bulunurken nominal parçada daha temiz bir yüzeyin elde edilmiş olmasıdır. Bunun sebebi Şekil 640’ta verilen ölçüm görüntüsüyle anlaşılmaktadır.



Şekil 7.32. Kontrollü delikli trompet geometrinin yüzey çizgilerinin oluşması

Şekil 7.32’de 403. katman sırasında alınan görüntüde 30° parmak nominal parametrelili parçak parçanın hasara uğradığı an ve bu yüzden de hizasında oluşturduğu hasar etki çizgileri görülmektedir. Aynı hasara bu parçanın hemen yanındaki 25° nominal parmak da uğrarken yine halen görülebilen hasar etki çizgilerini oluşturmuştur. Bu çizgilerin hizasında ise kontrollü delikli trompet parçanın bulunuyor olması dış yüzey düzgünlüğünü doğrudan etkilemiştir. Şekil

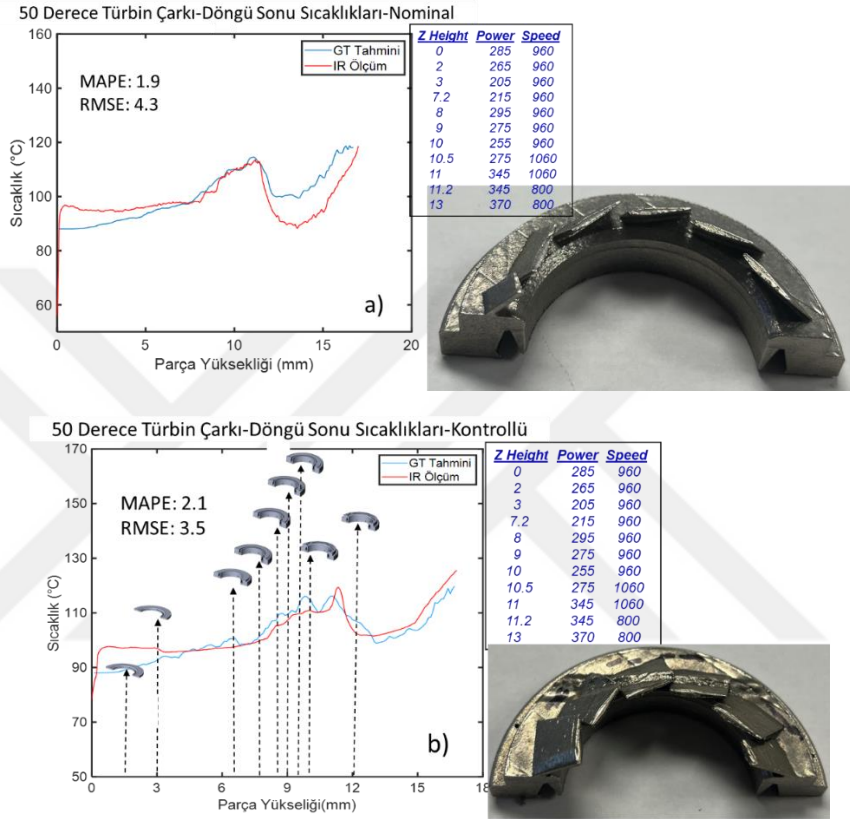
7.33'te ise katı trompet geometrisine dair ölçüm ve tahmin karşılaştırmaları verilmektedir.



Şekil 7.33. Katı trompet geometrisi ölçü ve gt tahminleri a) nominal parametre b) kontrollü parametre

Katı trompet geometri de incelendiğinde, nominal parametrelili geometrinin ölçüm sıcaklıklarının Şekil 7.33a'daki gibi rekristalizasyon sıcaklığının bile üzerine çıkabildiği görülmektedir. Bunun yanı sıra böylesine hacimli bir parçadaki bu sıcaklık sıçramasının GT benzetimiyle oldukça yakın tahmin edildiği anlaşılmaktadır. Sıcaklıkların birebir takibinden daha çok sıcaklık yükseliş ve düşüş eğilimlerinin tahmin edilebilmesi GT modelini uygulanabilir hale getirmektedir. Bir diğer husus Şekil 7.33b'deki kontrollü katı trompet parçası ile kıyas sonucu anlaşılmaktadır. Nominal parametredeki geometrinin imal edilmiş haline dikkat edilirse aşırı ısı birikmesiyle karbürize olacak kadar karardığı görülebilir. Buna karşılık kontrollü parametredeki katı trompet parçasının rengi

normal görünmektedir. Bu farkın mikroyapıyı etkilediği şüphe götürmez bir gerçektir. Dolayısıyla mekanik özelliklerin etkilenme oranı ve hangi kısımda etkilendiği gibi konularda sıcaklık tahminiyle bir noktaya ulaşmak GT benzetimi sayesinde mümkün olmaktadır. Şekil 7.34a ve b’de de 50° kanatlı türbin çarkı geometrisinin nominal ve kontrollü sonuçları karşılaştırılmaktadır.



Şekil 7.34. Katı trompet geometrisi ölçü ve GT tahminleri a) nominal parametre b) kontrollü parametre

35° kanatlı türbin çarkı sonuçları 50°'li gözle görülemeyecek kadar aynı olduğu için değinilmemektedir. Şekil 7.34'te kanatlı yapı itibariyle sıcaklığın tam olarak kanatlı yapının başladığı 11 mm civarında düştüğü, bu düşüşün ardından tıpkı trompet parçalarına benzer şekilde alt kısmında ısı transferi için yeterince kanat hacmi oluştuğunda ise tekrar ısının birikmeye başladığı görülmektedir. Ayrıca kontrollü türbin çarkı için çok büyük bir sıcaklık düşüşü göze çarpmamakla birlikte sıcaklık değerlerinin nominal versiyona göre biraz daha (ortalama 10 °C) düşük seyrettiği fakat kanat kesitinden itibaren güç artırılarak hız azaltıldığı için sıcaklıkta artış görüldüğü anlaşılmıştır. Beklenen bu durumun benzetimde

tahmin edilebildiği nominal parça eğrisiyle kıyaslandığında anlaşılmaktadır. GT model tahminlerinin de hata payı oldukça makul olmakla birlikte en büyük hata türbin çarkı geometrisinde oluşmuştur. Şekil 7.34 incelendiğinde türbin çarkı geometrisinde iç kanal açılmış olduğu görülecektir. Bu kanalın bittiği nokta tam olarak 8. mm'ye denk gelmektedir. Böylece Şekil 7.34'te GT sıcaklık tahmininde ölçüm verisine göre 8. mm'de başlayan sıcaklığın ani düşüş davranışı en büyük hatanın oluşmasına sebep olmaktadır. Bu durumun çözülmesi için yazılım ile oluşturulan katmanlararası soğuma diyagramının geliştirilmesi ve daha etkin, karmaşık parçalara daha uygun olacak şekilde üretilmesi gerektiği sonucu çıkarılmıştır. Çünkü yine Şekil 6.17'deki diyagram incelendiğinde gerek parmak parçalarının açılı kısımlarının başlıyor oluşu, gerekse söz konusu türbin çarkı kanalının bitişi sebebiyle olduğu tahmin edilen bir zaman artışı 8. mm'de gerçekleşmektedir. Diğer yandan bu kanat yapısının yani bir diğer adıyla ince duvarlı yapının sıcaklık düşüşünün ve ardından yükseliş noktasının ya da nereye kadar düştüğü veya yükseldiği konusunun gerçek anlık ölçümlere uygun olarak net biçimde ortaya konulması, kalıntı gerilmeye yol açacak sıcaklık gradyanlarının belirlenmesine katkı sunmaktadır.

8. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu kısımda elde edilen sonuçlar toplu bir şekilde özetlenerek değerlendirilmektedir. Şekil 7.17-7.25 eğrilerinde hem DEY değerlerinin derinlik ve D/G oranına göre değişimine, hem de hız ve güç değerleri ile derinlik ve D/G oranlarının değişimine bakıldığında öncelikle geliştirilen cihazda teorik ışın çapı değerine (143) yakın pratik ışın çapları (ortalama 160) doğrulanmıştır. Bu ışın çaplarının doğrulandığı parametreler olan 100-200 W güçler arasında çizgi denemeleri yürütülmüştür. Geliştirilen cihazın odak uzunluğu ayarlı mekanizma ile 465 mm olarak bulunmuş ve doğrulanmıştır. Geliştirilen cihaz ile yapılan tek çizgi incelemeleri sonucunda cihaz için 316L malzeme ile en iyi parametreler 100 mm/s, 300 mm/s ve 500 m/s hızlar için tüm güçler (100'den 190 W'a kadar), 700 mm/s için sınırda bulunan tüm güçler olarak bulunmuştur.

Yapılan benzetim tahminleri ile geliştirilen cihaz için sıcaklıklar % 15 hata ile, ergiyik havuz boyutları % 10 ortalama hata ile tahmin edilebilmiştir. Literatür ile kıyaslandığında ergiyik havuzu boyutları için imal edilebilecek parametrelerle elde edilmesi gereken oranlar şöyle hesaplanmıştır; derinlik için en az 1.5 katman kalınlığı, derinlik/genişlik oranı için 0.2'den büyük değerler ve DEY değerleri için 0.2 veya 0.25'ten büyük değerlerdir. Ayrıca ergiyik havuzu değerinin tahmininde hem 64 hem 316L malzeme için 100 mm/s hız değerinde yapılan tahminlerdeki hata oranı en büyük hata oranı olarak artan hız değerlerinde bu oran 300 ve 500 mm/s'den itibaren tutarlı bir seviyeye gelmektedir.

Bir sonraki aşamada geliştirilen Grafik Teorisi ile öncelikle parça ölçekli kalıntı gerilme kaynağı olan biriken döngü sonu sıcaklıkları tahmin edilmeye çalışılmıştır. Ölçümlerle ortaya konulan bu sıcaklıklar GT tahminleriyle %3 ortalama hata ile doğru tahmin edilmiştir. Böylece Grafik Teorisi ile deneme imalatları yapılmadan parametreler ayarlanarak imalat öncesi sıcaklık birikim miktarı ve dolayısıyla hasar ihtimali tahmin edilebilmektedir. Ayrıca yapılan imalat ile birlikte 30° altında bir açılı kısma sahip parçaların parametre ayarlanmasına rağmen fiziken imal edilemeyeceği anlaşılmıştır.

9. GELECEKTE PLANLANAN ÇALIŞMALAR

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar, ilk kısımda benzetimden ve sonraki kısımda ise hem ticari bir lazer ergitme cihazında, hem de özgün olarak geliştirilen, tüm aşamaları anlatılan lazer ergitme cihazı kullanılarak mikro ölçekli çizgi imalatlarıyla benzetim sonuçlarının ve kullanılan parametrelerin ilişkilendirilmesinden, benzetim tahminlerinin deneylerle doğrulanmasından ve bu süreçlerden bağımsız bir yöntem kullanımıyla geliştirilerek yine anlık sıcaklık ölçümleriyle doğrulanan parça ölçekli benzetimden oluşmaktadır. ABAQUS yazılımı python dili tabanlı çalıştığı için arayüz kullanılarak yapılan her işlem kodlama olarak görülebilmekte ve kodlar ile işlemler daha karmaşık halde yapılabilmektedir. Öte yandan Matlab ortamında geliştirilerek yine aynı ortamda özel bir yazılımla arayüzleştirilen parça ölçekli benzetimde de her işlem kodlarla ifade edilmiştir.

Gelecekte planlanan ilk çalışma, mikroyapı tahmini için bu tezin son kısmında parça ölçekli yürütülen Grafik Teorisi tabanlı benzetim ile tezin ilk kısmında mikro ölçekli yürütülen ABAQUS benzetim sonuçlarının birlikte değerlendirilmesidir. Hem ergiyik havuzu boyutunda yapılan tahminler, hem parça ölçekli döngü sonu sıcaklık tahminleri mikroyapı tahmini için bir makine öğrenmesi-derin öğrenme algoritması ile birlikte değerlendirilecektir.

Bir diğer hedef Grafik Teorisinin sıcaklık bağımlı malzeme özellikleri ve geometri kesiti bağımlı düğüm yoğunluğu kullanabilen bir başka sürümünün geliştirilmesi olarak planlanmaktadır.

Son olarak, hem sıcaklık bağımlı malzeme özellikleri, hem de kesite göre değişebilir düğüm yoğunluğu kullanabilme özelliklerini kullanarak sadece sıcaklık değil distorsiyon tahmini de yapabilen birleş algoritmaya sahip bir Grafik Teorisi parça ölçekli modelinin ortaya konulmasıdır.

KAYNAKLAR

- Alderson N. A., 2012. Thermal Modeling and Simulation of Electron Beam Melting for Rapid Prototyping on Ti6Al4V Alloys, PhD Thesis, Raleigh, North Carolina, ABD.
- Aggarangsi P, Beuth J., 2006. Localized preheating approaches for reducing residual stress in additive manufacturing, In: Proceedings of SFF symposium, Austin, TX, 709–720. Austin, TX: The University of Texas at Austin.
- Agarwala, M., Bourell, D., Beaman, J., Marcus, H. And Barlow, J., 1995. Direct selective laser sintering of metals, *Rapid Prototyping Journal*, 1-1, 26-36.
- Akbari Saedodin S., Toghraie D., Razavi R., S., Kowsari F., 2014. Experimental and numerical investigation of temperature distribution and melt pool geometry during pulsed laser welding of Ti6Al4V alloy, *Optics & Laser Technology* 59(2014), 52–59.
- Ali H. Ghadbeigi H., Mumtaz K., 2018. Residual stress development in selective laser-melted Ti6Al4V: a parametric thermal modelling approach, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97, 2621–2633.
- Ansari P., Rehman, A. U., Pitir, F., Veziroglu, S., Mishra, Y. K., Aktas, O. C., & Salamci, M. U. 2021. Selective laser melting of 316L austenitic stainless steel: Detailed process understanding using multiphysics simulation and experimentation, *Metals*, 11(7), 1076.
- Antony K., N. Arivazhagan, Senthilkumaran K., 2014. Numerical and experimental investigations on laser melting of stainless steel 316L metal powders, *Journal of Manufacturing Processes*, 16, 345–355.
- Arısoy Y. M., Criales L., Ozel T., 2019. Modeling and simulation of thermal field and solidification in laser powder bed fusion of nickel alloy IN625, *Optics & Laser Technology* 109:278-292.
- ASM Handbook Committee, 468-481 , DOI: 10.1361/asmhba0005240
- Badrossamay M., Childs THC, 2007. Further studies in selective laser melting of stainless and tool steel powders, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47 (5), 779-784.
- Bai X., and Hancock, E. R., Heat Kernels, 2004. Manifolds and Graph Embedding, Springer, Berlin Heidelberg, pp. 198–206.
- Bakshi K.R., Mulay A. V., 2016. A Review on Selective Laser Sintering: A Rapid Prototyping Technology, *Journal of Mechanical & Civil Engineering*, 53-57.

- Baumers M., Tuck C., Bourell D.L., Sreenivasan R., Hague R., 2011. Sustainability of additive manufacturing: Measuring the energy consumption of the laser sintering process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 225. 2228-2239.
- Bayle F., Doubenskaia M. 2007. Selective laser melting process monitoring with high speed infra-red camera and pyrometer, Proceedings Volume 6985, Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies; 698505, St Petersburg, Russian Federation.
- Bejan A., & Kraus, A. D. 2003. Heat transfer handbook. New York: J. Wiley.
- Berger J., Hoffman, N. J., Smith, J. J., Welch, D. F., Streifer, W., 1988. Fiber-bundle Coupled, Diode End-pumped Nd:YAG Laser, Optics Letters, 13,4, 306-308, 1988.
- Bergström D.C., 2008. The Absorption of Laser Light by Rough Metal Surfaces, PhD Thesis, Luleå University of Technology, Sweden.
- Boivineau M., Cagran C., Doytier D., Eyraud V., Nadal M.-H., Wilthan B., and Pottlacher G., 2006. Thermophysical Properties of Solid and Liquid Ti-6Al-4V (TA6V) Alloy, International Journal of Thermophysics, 27, 2.
- Bozorgmanesh A. R., Otadi M., Safe Kordi A. A., Zabihi F., Barkhordari Ahmadi M., 2009. Lagrange Two-Dimensional Interpolation Method for Modeling Nanoparticle Formation During RESS Process, International Journal of Industrial Mathematics. 1, 2175-181.
- Brandl E., Heckenberger U., Holzinger V., Buchbinder D., 2012. Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior, Materials & Design, 34, 159-169.
- Brignon A., 2013. "Coherent Laser Beam Combining," Weinheim, Germany : Wiley-VCH.
- Boley C. D., S. C. Mitchell, A. M. Rubenchik, and S. S. Q. Wu, 2016. Metal powder absorptivity: modeling and experiment, Applied Optics, 55, 23 / August 10 2016.
- Casalino G., Campanelli S. L., Contuzzi N., and Ludovico A. D., 2015. Experimental investigation and statistical optimisation of the selective laser melting process of a maraging steel, Optics & Laser Technology, 65, 151– 158, 2015.
- Comins N. R., 1972. The optical properties of liquid metals, Philosophical Magazine, 25:4, 817-831.

- Carslow HS, Jaeger JC, Morral JE.1992. Conduction of heat in solids, second edition. Journal of Engineering and Material Technology 108(4):378.
- Ciraud P., 1971. Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung beliebiger Gegenstände aus beliebigem schmelzbarem Material, German patent application DE 2263777, priority filed December 28th, 1971.
- Cheng B., James I., , Kenneth C., , James C., Paul N., Kevin C., 2017. Melt Pool Dimension Measurement In Selective Laser Melting Using Thermal Imaging, 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference At: Austin, TX, USA.
- Chen S.H.P. & Saxena S.C., 1975. Thermal conductivity of argon in the temperature range 350 to 2500 K, Molecular Physics: An International Journal at the Interface Between Chemistry and Physics, 29:2, 455-466.
- Chuang Luo, Junhao Qiu, Yonggao Yan,, Jihui Yang, Ctirad Uher, Xinfeng Tang, 2018. Finite element analysis of temperature and stress fields during the selective laser melting process of thermoelectric SnTe, Journal of Materials Processing Tech. 261, 74–85.
- Chung F. R. K., 1997. Spectral Graph Theory, American Mathematical Society, Providence, RI.
- Cole K, Riensche A, Rao P. K., 2022. Discrete Green’s functions and spectral graph theory for computationally efficient thermal modeling”, International Journal of Heat and Mass Transfer, 183, 122112.
- Conduzzi N., Campanelli S. L. Ludovico L. D., 2011. 3D Finite Element Analysis In The Selective Laser Melting Process, International Journal of Simulation And Modelling, 10 (3), 113-121.
- Conti P. Cianetti F. Pileri P., 2018. Parametric Finite Elements Model Of SLM Additive Manufacturing Process, AIAS 2017 International Conference on Stress Analysis, AIAS 2017, 6-9 September 2017, Pisa, Italy.
- Cox B. D., 2011. Selective Laser Sintering Powder Recycle System, US Patent no: 20090169664 A13.
- Çengel Y. A., and Boles M. A. 2001. Thermodynamics: an engineering approach, Boston, McGraw-Hill Series.
- Çengel Y., 2009. Heat and Mass Transfer, A Practical Approach, McGrawHill.
- Dai K., Li, X. Shaw L. 2004. Thermal Analysis of Laser-Densified Dental Porcelain Bodies: Modeling and Experiments. Journal of Heat Transfer-transactions of The Asme - J HEAT TRANSFER. 126. 10.1115/1.1795812.

- Dai K., Shaw L., 2005. Finite element analysis of the effect of volume shrinkage during laser densification, *Acta Materialia* 53 ,4743–4754
- DebRoy T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De, A., and Zhang, W., 2018, Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties, *Progress in Materials Science*, 92, 112-224.
- Deckard C., 1989. Method And Apparatus For Producing Parts By Selective Sintering, US Patent 4,863,538, filed 17 October 1986.
- Denlinger E. R., Gouge, M., Irwin, J., and Michaleris, P., 2017, Thermomechanical model development and in situ experimental validation of the Laser Powder-Bed Fusion process," *Additive Manufacturing*, 16, 73-80.
- Denlinger E. R., Irwin, J., and Michaleris, P., 2014, Thermomechanical modeling of additive manufacturing large parts," *Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(6),061007.
- Denlinger E.R., Irwin, J.,Tahany El-Wardanyd and Michaleris, P., 2016. Thermal modeling of Inconel 718 processed with powder bed fusionand experimental validation using in situ measurements, *Additive Manufacturing*, 11 7–15.
- Dong Z., Yabo L. Bin W. W., , Jingran G., Jun L., 2018. Effect of Hatch Spacing on Melt Pool and As-built Quality During Selective Laser Melting of Stainless Steel: Modeling and Experimental Approaches, *Materials*, 12. 50.
- Drstvensek I., Valentan B., Brajlilh T., Strojnik T., Ihan H.N., 2009. Direct digital manufacturing as communication and implantation tool in medicin", *US-TURKEY Workshop On Rapid Technologies*, September 24, 75-81.
- Du Y., You X., Qiao F., Guo L., Liu Z., 2019. model for predicting the temperature field during selective laser melting, *Results in Physics* 12 (2019) 52–60.
- Duman B., Kayacan M. C., 2017. Doğrudan Metal Lazer Sinterleme/Ergitme Yöntemi ile İmal Edilecek Parçanın Mekanik Özelliklerinin Tahmini,Süleyman Demirel üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi, 7(1),12-28.
- Dunbar, A. J., Denlinger, E. R., Heigel, J., Michaleris, P., Guerrier, P., Martukanitz, R., and Simpson, T. W., 2016, Development of experimental method for in situ distortion and temperature measurements during the laser powder bed fusion additive manufacturing process, *Additive Manufacturing*, 12, 25-30.
- Dutta N. K., 2014. *Fiber Amplifiers and Fiber Lasers*, World Scientific.
- EOS Technical Datasheets, 2016.

- Eureka-Projekt E! 1184, 1994. Autosintering, 1994-95.
- Feygin M., 1987. Apparatus and method for forming an integral object from laminations, US patent 4,752,352, filed April 17th, 1987.
- Fischer P., Locher M., Romano V., Weber H.P., Kolossov S., Glardo R., 2004. Temperature measurements during selective laser sintering of titanium powder, *International. Journal of Machine Tools Manufacturing*, 44, 1293–1296.
- Fisher C. R., and Vail, C. E., 2018. Computational Simulation of an Additively Manufactured Marine Component, *Journal of Materials Engineering and Performance*.
- Fallah V., Alimardani M., Corbin S. F., Khajepour A., 2011. Temporal development of melt-pool morphology and clad geometry in laser powder deposition, *Computational Materials Science*, 50, 2124–2134.
- Foroozmehr A., Badrossamay M., Foroozmehr E., Golabi S., 2016. Finite element simulation of selective laser melting process considering optical penetration depth of laser in powder bed, *Materials & Design*, 89, 5 January 2016, 255-263.
- Fox J. C., Moylan, S. P., and Lane, B. M., 2016. Effect of process parameters on the surface roughness of overhanging structures in laser powder bed fusion additive manufacturing, *Procedia CIRP*, 45, 131-134.
- Frazier W.E., 2014. Metal Additive Manufacturing: A Review, *Journal of Material Engineering and Performance* 23, 1917–1928.
- Gatsos, T., Elsayed, K. A., Zhai, Y., and Lados, D. A., 2020. Review on Computational Modeling of Process–Microstructure–Property Relationships in Metal Additive Manufacturing, *JOM*, 72(1), 403-419.
- Gaikwad A.C., Yavari R., Montazeri M., Cole K., Bian L., Rao P., 2019. Toward the Digital Twin in Metal Additive Manufacturing – Integrating Thermal Simulations, Sensing, and Analytics to Detect Process Faults, *IISE Transactions*.
- Gaikwad A.C., Imani F., Yang H., Reutzel E. and, Rao P., 2019. Prediction of Build Quality in Laser Powder Bed Fusion using Deep Learning of In-Situ Images, *ASTM Journal of Smart and Sustainable Manufacturing System*, 3 (1), 98-121.
- Geiger, M. and Vollertsen, F. (Ed.), 1994. Laser Assisted Net Shape Engineering, *Proceedings of the LANE '94 conference*, Erlangen, October 12-14th.
- German Patent, 2016. Verfahren zum Erzeugen eines Bauteiles aus einer Superlegierung mit einem pulverbettbasierten additiven

- Goldak J., Chakravarti A., and Bibby M., 1984. A New Finite Element Model for Welding Heat Sources, *Metallurgical Transactions B*, 15, 299–305.
- Gong H., Gu H., Zeng K., Dilip J.J.S., Pal D., Stucker B., 2014. Melt Pool Characterization for Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V Pre-alloyed Powder, 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium Conference.
- Gouge M., Denlinger, E., Irwin, J., Li, C., and Michaleris, P., 2019. Experimental validation of thermo-mechanical part-scale modeling for laser powder bed fusion processes, *Additive Manufacturing*, 29, 100771
- Gouge M., and Michaleris, P., 2018. *Thermo-Mechanical Modeling of Additive Manufacturing*, Elsevier, Cambridge, MA.
- Gu D.D. and Shen, Y.F. 2009. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder metallurgical mechanisms and control methods, *Materials & Design*, 30, 8.
- Gu D. D., Shen Y. F., Yang J. L. and Wang Y., 2006. Effects of processing parameters on direct laser sintering of multicomponent Cu based metal powder *Material Science and Technology*, 22, 1449–1455.
- Gu D., He B., 2016. Finite element simulation and experimental investigation of residual stresses in selective laser melted Ti–Ni shape memory alloy, *Computational Materials Science*, 117, 221–232.
- Gu H., Gong H., Pal D., Rafi K., Starr T., Stucker B., 2013. Influences of Energy Density on Porosity and Microstructure of Selective Laser Melted 17-4PH Stainless Steel, 24th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium Conference.
- Gusarov A.V. and Smurov I., 2010. Modeling the interaction of laser radiation with powder bed at selective laser melting, *Physics Procedia* 5, 381–394.
- Gusarov A. V., Yadroitsev I., Ph. Bertrand Ph., Smurov I., 2009. Model of Radiation and Heat Transfer in Laser-Powder Interaction Zone at Selective Laser Melting, *Journal of Heat Transfer* 131(7):072101 .
- Hajializadeh F., Ince A., 2019. Finite element-based numerical modeling framework for additive manufacturing process, *Special Issue Article*, Volume-1, Issue1, February 2019, e28.
- Han Liou F.W., 2004. Numerical investigation of the influence of laser beam mode on melt pool, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47, 4385–4402

- Hao L., Dadbakhsh S., Seaman O. and Felstead M., 2009. Selective laser melting of a stainless steel and hydroxyapatite composite for load-bearing implant development, *Journal of Material Processing Technology*, 209, 5793–5801.
- Hauser C., Childs, T. H. C., Dalgarno, K. W. 1999. Selective Laser Sintering of Stainless Steel 314S HC Processed Using Room Temperature Powder Beds", *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium 1999*, University of Texas, Austin, Texas, USA, 273-280.
- Hayes O., 2012. Marking with Fiber Lasers, *Industrial Laser International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing–Green Technology*, 27, No. 5.
- He K., Zhao X., 2018. 3D Thermal Finite Element Analysis of the SLM 316L Parts with Microstructural Correlations, *Hindawi/Complexity*.
- Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C., 2016. Additive manufacturing of metals, *Acta Materialia*, 2016, 371-392
- Hirvimäki M., Matti M., Antti L., Ari H., Antti S., Olli N., 2013. Evaluation of Different Monitoring Methods of Laser Additive Manufacturing of Stainless Steel, *Advanced Materials Researching* 651. 812-819.
- Hocine S., Swygenhoven H. V., Petegem S. V., 2021. Verification of selective laser melting heat source models with operando X-ray diffraction data, *Additive Manufacturing*, 37 , 101747.
- Hoshino T., Mito K., Nagashima A. And Miyata M., 1986. Determination of the Thermal Conductivity of Argon and Nitrogen over a Wide Temperature Range Through Data Evaluation and Shock-Tube Experiments, *International Journal of Thermophysics*, 7, 3.
- Housholder, R., 1981. Molding Process, US patent 4,247,508, filed December 3rd, 1979.
- Huang Y., L.J. Yang*, X.Z. Du, Y.P. Yang, 2016. Finite element analysis of thermal behavior of metal powder during selective laser melting, *International Journal of Thermal Sciences* 104 146 e 157
- Huang H., Chen I., , Feng Z., 2018. STRESS AND DISTORTION SIMULATION OF ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS BY HIGH PERFORMANCE COMPUTING, *Proceedings of the ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2018 July 15-20, 2018, Prague, Czech Republic*.
- Hull C., Method and apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography, US patent 4,575,330, filed Aug. 8th, 1984, publ. March 11th, 1986.

- Hussein A., Hao L., Yan C., Everson R., 2013. Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-support in selective laser melting, *Materials and Design* 52 (2013) 638–647
- Hyub L., C. H. J. Lim, M. J. Low, & Tham N., 2017. Lasers in additive manufacturing: A review, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 4. 307-322.
- Ito Y., Nakahashi, K., 2002. "Surface Triangulation For Polygonal Models Based On CAD Data". *International Journal For Numerical Methods In Fluids*. 39, 75-96.
- Jiawen Xie, V. Oancea, Juan A Hurtado, 2017. Phase Transformations in Metals during Additive Manufacturing Processes, NAFEMS World Congress 2017At: Stockholm.
- Juan J. Valencia, Peter N. Quested, 2008. *Thermophysical Properties*, ASM Handbook, 15: Casting
- KAÇAR E. 2015. Sanayide Lazer Uygulamaları ve Güvenliği, II. İş Sağlığı ve Güvenliği Sempozyumu, 05.11.2015, ANKARA.
- Karayagiz K., Elwany, A., Tapia, G., Franco B., Johnson L., Ma, J., Karaman, I., Arróyave R., 2018. Numerical and Experimental Analysis of Heat Distribution in the Laser Powder Bed Fusion of Ti-6 Al-4 V, *IISE Transactions*. 51. 1-44.
- Kamsky G.V., Kolomiets A.A., Popov V.V., 2015. REVIEW OF THE MAIN PRODUCERS OF 3D-MACHINES FOR METALS, CHARACTERISTICS OF THE MACHINES, AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT, *Международный научно-исследовательский журнал* ▪ № 8 (50), Часть 3 , Август.
- Kempen K., Vrancken B., Thijs L., Buls S., Van Humbeeck J., Kruth J.-P., 2013. Lowering Thermal Gradients In Selective Laser Melting By Pre-Heating The Baseplate" in *Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings*, Austin, TX, USA (The University of Texas at Austin).
- Kempen K, Vrancken B, Buls S, Thijs L, Van Humbeeck J, Kruth J., 2014. Selective Laser Melting of Crack-Free High Density M2 High Speed Steel Parts by Baseplate Preheating. *ASME. Journal of Manufacturing, Science ad Engineering*, 136(6) 061026-061026-6.
- Kellens K., Renaldi R., Dewulf W., Kruth J, Duflou JR., 2014. "Environmental impact modeling of selective laser sintering processes. *Rapid Prototyp J* 20:459–470.
- Keller, N., and Ploshikhin, V., 2014. New method for fast predictions of residual stress and distortion of AM parts, In *Proceedings of the solid freeform fabrication symposium* 1229-1237.

- Keller M., Chaudhary A., Kelly S., and Medieros S., 2006. Absorption coefficient characterization in Ti-6Al-4V laser additive manufacturing, ICALEO 2006, 1204.
- King D., Tansey, T., 2002. Alternative materials for rapid tooling, Journal of Materials Processing Technology, 121, 313–317.
- Kishore V., Ajinjeru C., Nycz A., Post B., Lindahl J., Kunc V., Duty C., 2017. “ Infrared preheating to improve interlayer strength of big area additive manufacturing (BAAM) components, Additive Manufacturing, 14:7– 12.
- Khan M., “Selective laser melting (SLM) of gold (Au)”, 2010. Loughborough University.
- Kolossov S., Boillat E., Glardon R., Fischer P., Locher M., 2004 . “3D FE simulation for temperature evolution in the selective laser sintering process”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 44 117–123.
- Kruth J.P., Wang X., Laoui T., Froyen L., 2003. "Lasers and materials in selective laser sintering", Assembly Automation, 23 (4), 357-371.
- Kruth J-P., Mercelis P., Vaerenbergh J. V., Froyen L., Rombouts M., 2005. "Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting", Rapid Prototyping Journal, 11(1), 26-36.
- Kruth, J.P., Froyen, L., Van Vaerenbergh, J., Mercelis, P., Rombouts, M. and Lauwers, B. (2004), “Selective laser melting of iron-based powder”, Journal of Materials Processing Technology, 149 1/3, 616-622.
- Kruth J. P., Levy G., Klocke F. and Childs T. H. C., 2007. “Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing” CIRP Annual Manufacturing, Technology., 56, 730–759
- Kundakcioglu, E., Lazoglu, I., and Rawal, S., 2016, "Transient thermal modeling of laser-based additive manufacturing for 3D freeform structures," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 85(1), pp. 493-501.
- Lai, J.Y., Lai, H.C., 2006. “Repairing Triangular Meshes For Reverse Engineering Applications”. Advances in Engineering Software, 37, 667-683.
- Lampeas G., 2018. “Selective Laser Melting process simulation of open lattice cellular materials”, MATEC Web of Conferences 188, 03019.
- Lampa C., Kaplan F. H. A., Powell J., Magnusson C., 1997. An analytical thermodynamic model of laser welding, Journal of Physics D Applied Physics 30(9):1293.

- Lewandowski J. J., Seifi M., 2016. "Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties", *Annual Review of Materials Research*, 46:14.1–14.36.
- Li C., Liu J.F., Guo Y.B., Li Z.Y., 2015. "A Temperature-Thread Multiscale Modeling Approach for Efficient Prediction of Part Distortion by Selective Laser Melting", Conference: The 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium At: Austin, TX.
- Li Lan., Lough C., Replogle A., Bristow D., Landers R., and Kinzel E., "THERMAL MODELING OF 304L STAINLESS STEEL SELECTIVE LASER MELTING", *Solid Freeform Fabrication 2017: Proceedings of the 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*.
- Li R., Liu, J., Shi, Y., Wang, L., & Jiang, W. 2012. Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(9-12), 1025-1035.
- Li R., Shi, Y., Liu, J. Yao H., Zhang W., 2009. "EFFECTS OF PROCESSING PARAMETERS ON THE TEMPERATURE FIELD OF SELECTIVE LASER MELTING METAL POWDER" *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 48: 186.
- Liu Z.H., Zhang D.Q., Chua C.K., Leong K.F., 2013. "Crystal structure analysis of M2 high speed steel parts produced by selective laser melting", *Materials Characterization*, 84, 72-80.
- Li Y., Gu D., 2014. "Parametric analysis of thermal behavior during selective laser melting additive manufacturing of aluminum alloy powder", *Materials and Design*, 63 (2014) 856–867.
- Lindgren L. E., Andreas Lundbäck, Martin Fisk, Robert Pederson, Joel Andersson, 2016. "Simulation of additive manufacturing using coupled constitutive and microstructure models", *Additive Manufacturing* 12 (2016) 144–158.
- Loh L.E., Chua C. K., Yeong W. Y., Song J., Mapar M., Sing S. L., Liu Z. H., Zhang D. Q., 2015. "Numerical investigation and an effective modelling on the Selective Laser Melting (SLM) process with aluminium alloy 6061", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 80 (2015) 288–300.
- Longfei Li, Kun Yu, Kaihua Zhang, Yufang Liu, 2016. "Study of Ti–6Al–4V alloy spectral emissivity characteristics during thermal oxidation process", *International Journal of Heat and Mass Transfer* 101 (2016) 699–706.
- Luo C., Qiu J., , Yonggao Yana,* , Jihui Yangb, Ctirad Uherc, Xinfeng Tang, 2018, "Finite element analysis of temperature and stress fields during the

- selective laser melting process of thermoelectric SnTe”, *Journal of Materials Processing Technology*, 261, November 2018, 74-85.
- Luo Z., Zhao y., 2019. Efficient thermal finite element modeling of selective laser melting of Inconel 718, *Computational Mechanics* 65(Supplement C):1-25
- Majumdar, J. D. and Manna, I., *Laser-Assisted Fabrication of Materials*, Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- Markl M., and Körner, C., 2016, Multiscale Modeling of Powder Bed-Based Additive Manufacturing, *Annual Review of Materials Research*, 46(1), 93-123.
- Martin B. W., Ales, T. K., Rolchigo, M. R., and Collins, P. C., 2019, 17 - Developing and applying ICME + modeling tools to predict performance of additively manufactured aerospace parts, *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, F. Froes, and R. Boyer, eds., Elsevier, 375-400.
- Martins I., Esperto, L. and Santos, M. 2006. Materials science forum, *Advanced Materials Forum III*, 514/ 516, 1506-1510.
- Masoomi M., Scott T., Nima S., Elwany, A., Linkan B., 2015. An Experimental-Numerical Investigation of Heat Transfer during Selective Laser Melting, *26th International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference At: Austin, Texas, USA*, 229.
- Matsumoto M., Shiomi M., Osakada K., Abe F. , 2002. Finite element analysis of single layer forming on metallic powder bed in rapid prototyping by selective laser processing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42 1, 61-67.
- Mertensa R., Vrancken B., Holmstocka N., Kindsa Y., Kruth J-P., Humbeeck J. V., 2016. Influence of Powder Bed Preheating on Microstructure and Mechanical Properties of H13 Tool Steel SLM Parts, *Physics Procedia*, 83, 882-890.
- Méndez A. and Morse, T. F., 2011. *Specialty Optical Fibers Handbook*, Academic Press.
- Mercelis P, Kruth J. P., 2006. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting, *Rapid Prototyping Journal*, 12(5) 254-265,
- Metel Alexander S., Stebulyanin Michael M., Fedorov Sergey V. Okunkova Anna A., 2019. Power Density Distribution for Laser Additive Manufacturing (SLM): Potential, Fundamentals and Advanced Applications, *Technologies*, 7(1), 5;

- Michael N. Macrossan and Charles R. Lilley, 2003. Viscosity of argon at temperatures ≤ 2000 K from measured shock thickness, *PHYSICS OF FLUIDS*, 15, NUMBER 11.
- Michaleris, P., 2014, Modeling metal deposition in heat transfer analyses of additive manufacturing processes, *Finite Elements in Analysis and Design*, 86, 51-60.
- Milosevic N., Aleksic I., 2012. Thermophysical properties of solid phase Ti-6Al-4V alloy over a wide temperature range, *International Journal of Materials Research (formerly Zeitschrift fuer Metallkunde)* 103(6):707-714.
- Morgan R., Sutcliffe, C.J. and O'Neill, W. 2001. *Rapid Prototyping Journal*, 7, 159-172.
- Moraes D.A and Czekanski A., 2018. Parametric Thermal FE Analysis on the Laser Power Input and Powder Effective Thermal Conductivity during Selective Laser Melting of SS304L, *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2(3): 47.
- Moaveni S., 2015. *Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS*, Pearson; 4th edition.
- Montazeri M., Nassar A., Dunbar A., Rao P., 2019. In-Process Monitoring of Porosity in Additive Manufacturing Using In-Process Optical Emission Spectroscopy Signals, *IISE Transactions (Manufacturing and Design)*.
- Moraes D. A. and Aleksander Czekanski, 2018. "Parametric Thermal FE Analysis on the Laser Power Input and Powder Effective Thermal Conductivity during Selective Laser Melting of SS304L", *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2(3): 47.
- Ning J. and Steven Y. Liang, 2018. Analytical Modeling of Three-Dimensional Temperature Distribution of Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V, Preprints.
- Nyrhilä O. and Syrjälä, S., "Manufacture of dimensionally precise pieces by sintering" Finnish patent 91725, priority filed April 7th, 1989, published December 5th, 1990.
- Pal D., Patil, N., Zeng, K., and Stucker, B., 2014, "An Integrated Approach to Additive Manufacturing Simulations Using Physics Based, Coupled Multiscale Process Modeling," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(6).
- Patil R. B., Yadava, V., 2007 "Finite element analysis of temperature distribution in single metallic powder layer during metal laser sintering", *International Journal of Machines, Tools and Manufacturing*. 47(7–8), 1069–1080.

- Partee B., Hollister, S.J., Das, S., 2006. "Selective Laser Sintering Process Optimization for Layered Manufacturing of CAPA® 6501 Polycaprolactone Bone Tissue Engineering Scaffolds", *Journal of Manufacturing Science and Engineering (ASME)*, 128, 531-540.
- Papadakis L, Andreas L. Bremen R., Schrage., 2014. "A computational reduction model for appraising structural effects in selective laser melting manufacturing", *Virtual and Physical Prototyping*.
- Parry L., Ashcroft I. A., Wildman R., "Understanding the Effect of Laser Scan Strategy on Residual Stress in Selective Laser Melting through Thermo-Mechanical Simulation" , *Additive Manufacturing*, 12, Part A, October 2016, 1-15.
- Patel C. K. N., "Continuous-Wave Laser Action on Vibrational-Rotational Transitions of CO₂," *Physical Review*, 136, 5A, A1187-A1193, 1964.
- Paschotta R., "M2 Factor," *Encycl. Laser Phys. Technol.* https://www.rp-photonics.com/m2_factor.html. Accessed 12 Sep., 2016.
- Peng H., Ghasri-Khouzani, M., Gong, S., Attardo, R., Ostiguy, P., Gatrell, B. A., Budzinski, J., Tomonto, C., Neidig, J., Shankar, M. R., Billo, R., Go, D. B., and Hoelzle, D., 2018, "Fast prediction of thermal distortion in metal powder bed fusion additive manufacturing: Part 1, a thermal circuit network model," *Additive Manufacturing*, 22, pp. 852-868.
- Peter N., Pitts, Z., Thompson, S., and Saharan, A., 2020, "Benchmarking build simulation software for laser powder bed fusion of metals," *Additive Manufacturing*, p. 101531.
- Polonsky A., 2020, "Three-Dimensional Characterization of Additively Manufactured Metals," Ph.D. Dissertation, UC Santa Barbara.
- Pitassi D., Savoia E., Fontanari E., Molinari E., Luchin V., Zappini G. Benedetti M., 2017. "Finite Element Thermal Analysis of Metal Parts Additively Manufactured via Selective Laser Melting" In book: *Finite Element Method - Simulation, Numerical Analysis and Solution Techniques*, February, 2018.
- Pohl H., Simchi A., Issa M., Dias H. C., 2001. "Thermal stresses in direct metal laser sintering" *Proceedings of the SFF Symposium*, 366–372.
- PROJECT LASER-CELL: "Innovative cell and stack design for stationary industrial applications using Novel laser processing techniques", *Delivery Report: Laser Source Selection*, 2012. website: <https://hydrogeneurope.eu/project/laser-cell>
- Protasov C.E., Gusarov A.V., 2017. "Modeling the Effect of Beam Shaping at Selective Laser Melting, *Procedia IUTAM*, 23, 147-154.

- Qi Zhang Jiawen Xie, Zhenyuan Gao, Tyler London, David Griffiths , Victor Oancea, 2019. "A metallurgical phase transformation framework applied to SLM additive manufacturing processes", *Materials and Design* 166 (2019) 107618.
- Qian L., Mei J., Liang J. & Wu X., 2005. Influence of position and laser power on thermal history and microstructure of direct laser fabricated Ti-6Al-4V samples, *Materials Science and Technology* , 21,5, 597-605.
- Qimin Shi, DongdongGu, MujianXia, SainanCao, TingRong, 2016. Effects of laser processing parameters on thermal behavior and melting/solidification mechanism during selective laser melting of TiC/Inconel718 composites, *Optics & Laser Technology*, 84,(2016),9-22.
- Roberts I. A., C. J. Wang, R. Esterlein, M. Stanford, D. J. Mynors, 2009. "A three-dimensional finite element analysis of the temperature field during laser melting of metal powders in additive layer manufacturing", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49, 916-923.
- Romano J., Ladani L., Sadowski M., 2015." Thermal Modeling of Laser Based Additive Manufacturing Processes within Common Materials", *Procedia Manufacturing*, 1, 238-250.
- Rubenchik A., Wu S., Mitchell S., Golosker I., Leblanc M., And Peterson N., 2015. Direct measurements of temperature-dependent laser absorptivity of metal powders, *Applied Optics* , 54, 24.
- Saito N., 2013, Tutorial: Laplacian Eigenfunctions—Foundations and Applications, University of California, Davis, Graduate University for Advanced Studies, National Institute of Fusion Science, Japan.
- Sih S. S., & Barlow J. B., 2004. The Prediction of the Emissivity and Thermal Conductivity of Powder Beds, *Particulate Science and Technology: An International Journal*, 22:3, 291-304.
- Santos E. C., Shiomi M., Osakada K., Laoui T., 2006. Rapid manufacturing of metal components by laser forming", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 12-13, 2006, 1459-1468.
- Sander J., Hufenbach J., Giebeler L., Wendrock H., Kühn U., Eckert J., 2016. "Microstructure and properties of FeCrMoVC tool steel produced by selective laser melting", *Materials & Design*, 89, 335-341
- Santos E. C., Shiomi M., Osakada K., Laoui T., 2006. "Rapid manufacturing of metal components by laser forming", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 12-13, 2006, 1459-1468.

- Safdar S., Pinkerton A., J., Li L., Sheikh M., A., Withers P., J., 2013. An anisotropic enhanced thermal conductivity approach for modelling laser melt pools for Ni-base super alloys, *Applied Mathematical Modelling*, 37,1187–1195.
- Sani Isebella, 2015. Selective Laser Melting process simulation advancements towards acost-effective model, PhD Thesis, Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia, Italy.
- Schueren B., V., Kruth J.P., 1995. "Powder deposition in selective metal powder sintering", *Rapid Prototyping Journal*, 1 , 3, 23-31.
- Schoinochoritis B., Chantzis D., Salonitis K., 2015. Simulation of metallic powder bed additive manufacturing processes with the finite element method: A critical review, *Proc IMechE Part B: Journal of Engineering Manufacture* 1–22 IMechE 2015.
- Simmons JC, Chen X, Azizi A, Daeumer MA, Zavaliy PY, Zhou G, Schiffres SN, 2020. Influence of Processing and Microstructure on the Local and Bulk Thermal Conductivity of Selective Laser Melted 316L Stainless Steel, *Additive Manufacturing*,32, March 2020, 100996.
- Simchi, A. (2004), "The role of particle size on the laser sintering of iron powder", *Metallurgical and Materials Transactions B*, 35. 5, 937-948.
- Simchi A. and Pohl H., 2003. "Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder", *Material Science and Engineering. A*, A359, 119–128.
- Shellabear M., Nyrhilä O., 2004. DMLS – DEVELOPMENT HISTORY AND STATE OF THE ART, Presentation at LANE 2004 conference, Erlangen, Germany, Sept. 21-24, 2004.
- Shiomi M., Osakada K., Nakamura K., Abe F., 2004. Residual Stress within Metallic Model Made by Selective Laser Melting Process, *CIRP Annals*, 53,1,195-198.
- Shiomi M., Yoshidome A., Abe F., Osakada K., 1999. Finite element analysis of melting and solidifying processes in laser rapid prototyping of metallic powders, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39, 2, 237-252.
- Soylomez E., 2019. MODELING THE MELT POOL OF THE LASER SINTERED Ti6Al4V LAYERS WITH GOLDAK'S DOUBLE-ELLIPSOIDAL HEAT SOURCE, *Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*.
- Sturm L., D., Williams C., B., Camelio J., A., White J., Parker R., 2017. Cyber-physical vulnerabilities in additive manufacturing systems: A case study attack on

- the .STL file with human subjects”, *Journal of Manufacturing Systems*, 44, 1, 154-164,
- Tillmann W., Schaak C., Nellesen J., Schaper M., Aydinöz M.E., Hoyer K.-P., 2017. Hot isostatic pressing of IN718 components manufactured by selective laser melting, *Additive Manufacturing*, 13, 2017, 93-102.
- Thijs L., Verhaeghe F., Craeghs T., Humbeeck J.V., Kruth J.P. 2010. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V, *Acta Materialia* 58: 3303- 3312.
- Tolochko N.K., Khlopkov Y.V., Mozzharov S.E., Ignatiev M.B., Laoui T., Titov V.I., 2000. Absorptance of powder materials suitable for laser sintering, *Rapid Prototyping Journal* 6 (3), 155–160.
- Teng C., Ashby K., Phan N, Pal D., Stucker B., 2016. The effects of material property assumptions on predicted meltpool shape for laser powder bed fusion based additive manufacturing, *Measurement Science and Technology*, 27, 085602, 8pp.
- Teng, C., Gong H., Szabo A., Dilip J.j.s., Ashby K., Zhang S., Patil N., Pal D., Stucker B. 2017. Simulating Melt Pool Shape and Lack of Fusion Porosity for Selective Laser Melting of Cobalt Chromium Components, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139, 10.1115/1.4034137
- Tseng W.C., Aoh J.N., 2014. Experimental Validation of a Laser Heat Source Model for Laser Melting and Laser Cladding Processes, *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2014, 8, 370-381
- Tolochko N. K., Mozzharov S. E., Yadroitsev I. A., Laoui T., Froyen L., Titov V. I., Ignatiev M.B., 2004. “Balling processes during selective laser treatment of powders”. *Rapid Prototyping Journal*, 10, 78-87.
- Tolochko N.K., Khlopkov Y.V., Mozzharov S.E., Ignatiev M.B., Laoui T., Titov V.I., “Absorptance of powder materials suitable for laser sintering”, *Rapid Prototyping Journal* 6 (3) (2000) 155–160.
- Uhlmann, E., Tekkaya, A., Reimann, R., John, P., 2016. “Qualification of CuCr1Zr for the SLM Process”. Doi:10.17877/DE290R-16984.
- U.S. Patent, “METHOD AND DEVICE FOR THE SELECTIVE LASER SINTERING OF METALLIC SUBSTANCES”, 2004. U.S. PATENT NO: 2004.0056022A1
- Ulutan D., Lazoglu I., Dinc C., 2009. Three-dimensional temperature predictions in machining processes using finite difference method, *Journal of materials processing technology*, 209, (2009) 1111–1121.

- Venkatesh K., V., Nandini V., V., 2013." Direct Metal Laser Sintering: A Digitised Metal Casting Technology", The Journal of Indian Prosthodontic Society 13(4), 389-392.
- Vrancken, B., Buls, S., Kruth, J. and Humbeeck, J. V. 2016. "Preheating of Selective Laser Melted Ti6Al4V: Microstructure and Mechanical Properties". In Proceedings of the 13th World Conference on Titanium.
- Vandenbroucke B. and Kruth J. P., 2007. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts, Rapid Prototyping Journal, 13,196–203.
- Verhaeghe, G. and Hilton, P., 2005. Battle of the Sources - Using a High-power Yb-fibre Laser for Welding Steel and Aluminium," Proceedings of the IIW Conference on Benefits of New Methods and Trends in Welding to Economy, Productivity and Quality, 10, 15.
- Wei, H. L., Mukherjee, T., Zhang, W., Zuback, J. S., Knapp, G. L., De, A., and DebRoy, T., 2020, "Mechanistic models for additive manufacturing of metallic components," Progress in Materials Science, p. 100703.
- Wood, N., Mendoza, H., Boulware, P., and Hoelzle, D. J., "Interrogation of mid-build internal temperature distributions within parts being manufactured via the powder bed fusion process," Proc. Proceedings of the 2019 Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium.
- W. E. King, , A. T. Anderson, R. M. Ferencz, N. E. Hodge, C. Kamath, S. A. Khairallah, and A. M. Rubenchik, 2015. "Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals; physics, computational, and materials challenges", Appl. Phys. Rev. 2, 041304.
- Weber R., Neuenschwander, B. and Weber, H. P., 1999. Thermal Effects in Solid-state Laser Materials, Optical Materials, 11,2, 245-254, 1999.
- Withers, P. and Bhadeshia, H., 2001, Residual stress, part 2 -nature and origin, Materials Science and Technology, 17,366-75.
- Williams J.D., Deckard C.R., 1998, Advances in modeling the effects of selected parameters on the SLS process, Rapid Prototyping Journal, 4,2,90-100
- Wang, D.; Yang, Y.; Su, X.; Chen, Y. Study on energy input and its influences on single track, multi-track and multi-layer in SLM. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2012, 58, 1189–1199.
- Wang L., Jiang X., Zhu Y., Zhu X., Sun J., Yan B., 2018. "An approach to predict the residual stress and distortion during the selective laser melting of AlSi10Mg parts", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2018) 97:3535–3546.

- Yadroitsava, I., Yadroitsev, I., 2013. "Residual stress in metal specimens produced by direct metal laser sintering" *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Yadroitseva I., Krakhmalev P., Yadroitsava I., 2014. "Selective laser melting of Ti6Al4V alloy for biomedical applications: Temperature monitoring and microstructural evolution", *Journal of Alloys and Compounds* Volume 583, 15 January 14, Pages 404-409.
- Yadroitsev, I.; Krakhmalev, P.; Yadroitsava, I.; Johansson, S.; Smurov, I. Energy input effect on morphology and microstructure of selective laser melting single track from metallic powder. *J. Mater. Process. Technol.* 2013, 213, 606–613.
- Yin J., Zhu H., Ke L., Lei W., Dai C., Zuo D., 2012. "Simulation of temperature distribution in single metallic powder layer for laser micro-sintering", *Computational Materials Science* 53 (2012) 333–339.
- Yang Y., Ayas C., 2017. "Point, surface and volumetric heat sources in the thermal modelling of selective laser melting", In *AIP Conference Proceedings* 1896(1):040006 · October 2017.
- Yavari R., Williams R. J., Cole K. D., Hooper P. A., Rao P., 2020. Thermal Modeling in Metal Additive Manufacturing Using Graph Theory: Experimental Validation With Laser Powder Bed Fusion Using In Situ Infrared Thermography Data, *Journal of Manufacturing, Science and Engineering*, Dec 2020, 142(12): 121005.
- Yavari R., K. Cole, P. Rao, Thermal Modeling in Metal Additive Manufacturing using Graph Theory. *ASME Transactions, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2019, 141, 0710071-20.
- Zeng, K., Pal, D., Gong, H. J., Patil, N., and Stucker, B., 2015. Comparison of 3DSIM thermal modelling of selective laser melting using new dynamic meshing method to ANSYS, *Materials Science and Technology*, 31(8), 945-956.
- Zhang Q., Xie J., Gao Z., London T., Griffiths D., Oancea V., 2019. A metallurgical phase transformation framework applied to SLM additive manufacturing processes", *Materials & Design*, 166, 15 March 2019, 107618.
- Zhang W., Mingming Tong, Noel M. Harrison, 2019. Resolution, energy and time dependency on layer scaling in finite element modelling of laser beam powder bed fusion additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, 28 (2019) 610–620
- Zhao X., Iyer A., Promoppatum P., Yao Department S. C., 2017. "Numerical modeling of the thermal behavior and residual stress in the direct metal laser sintering process of titanium alloy products", *Additive Manufacturing*, 14, March, 126-136.

Zhibo Luo, Yaoyao Fiona Zhao, "Numerical simulation of part-level temperature fields during selective laser melting of stainless steel 316L", International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, 10, 5, 1615-1635, 2019.

Zhiheng Hu, Balasubramanian Nagarajan, Xu Song, Rui Huang, Wei Zhai, and Jun Wei, 2019. "Formation of SS316L Single Tracks in Micro Selective Laser Melting: Surface, Geometry, and Defects", Advances in Materials Science and Engineering 2019, 9451406, 9.

Zhiqiang F. and Frank Liou, 2012. Numerical Modeling of the Additive Manufacturing (AM) Processes of Titanium Alloy, Chapter 1 In book: Titanium Alloys - Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications.

Zhou B., Kane, T. J., Dixon, G. J. and Byer, R. L., 1985. Efficient, Frequency-stable Laser-diode-pumped Nd:YAG Laser, Optics Letters, 10, 2, 62-64, 1985.

Zhonghua L. Baoqiang L, Peikang B., Bin L., , Yu W.. 2018. Research on the Thermal Behaviour of a Selectively Laser Melted Aluminium Alloy: Simulation and Experiment, Materials.

Zhuang J. R., Wen T. L., An H. H., Yang S., 2018. Determination of melt pool dimensions using DOE-FEM and RSM with process window during SLM of Ti6Al4V powder, Optics and Laser Technology 103,59-76.

3-D system uses lasers to make models from metal", Electronic Engineering Times, April 20, 1987.

https://lasers.llnl.gov/education/how_lasers_work ERIŞİM TARİHİ : 07.2023

https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7440371&Mask=1&Type=JANAF_G&Table=on, ERIŞİM TARİHİ : 07.2023

<https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/slm-solutions-slm-125-hl/>
ERİŞİM TARİHİ : 07.2023

<https://www.multistation.com> ERIŞİM TARİHİ : 07.2023

https://www.trumpf.com/tr_TR/ueruenler/makinasistemleri/eklemeli-ueretim-sistemleri _ ERIŞİM TARİHİ : 07.2023

<https://www.eos.info/eos-m290> ERIŞİM TARİHİ : 07.2023

<https://slm-solutions.com/en/products/machines/slmr280-production-series/>
ERİŞİM TARİHİ : 07.2023

<https://www.youtube.com/watch?v=ecqeAXJnMz8> ERIŞİM TARİHİ : 07.2023

https://www.engineeringtoolbox.com/argon-density-specific-weight-temperature-pressure-d_2089.html ERIŞİM TARİHİ : 07.2023