Direkt Metal Lazer Sinterleme Metodu İle Ti-6Al-4V Proses Haritalarının Çıkartılması Ve Geçici Hal Eriyik Havuz Geometrisinin Analizi

Program Kodu: 3001

Proje No: 216M033

Proje Yürütücüsü:

Dr. Öğr. Üyesi Emrecan SÖYLEMEZ

<u>Araştırmacı:</u>

Dr. Öğr. Üyesi Ebubekir KOÇ

Danışman(lar):

Prof. Dr. Arif Nihat GÜLLÜOĞLU

AĞUSTOS 2019

İSTANBUL

Önsöz

Bu rapor TÜBİTAK tarafından desteklenen 216M033 numaralı ve "Direkt Metal Lazer Sinterleme Metodu ile Ti-6AI-4V Proses Haritalarının Çıkartılması Ve Geçici Hal Eriyik Havuz Geometrisinin Analizi" başlıklı araştırma projesinde yapılan çalışmaları ve elde edilen çıktıları içermektedir. Proje kapsamında direkt metal lazer sinterleme metodunda parça kaltiesi için uygun eriyik havuzunu oluşturabilen proses haritaları çıkartılmıştır. Proses sırasında oluşan eriyik havuzun nümerik modelleri oluşturulmuş ve geçici hal analizleri sonuçları ortaya konmuştur.

Proje kapsamındaki çalışmalar yürütücü Dr.Öğr.Üyesi Emrecan SÖYLEMEZ; araştırmacı Dr. Öğr. Üyesi Ebubekir KOÇ ve danışman Prof. Dr. Arif Nihat GÜLLÜOĞLU'ndan oluşan ekip tarafından gerçekleştirilmiştir. Direkt metal lazer sinterleme deneyleri Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi Aluminyum Test, Eğitim ve Araştırma Merkezi'nde proje ekibine ilave olarak Mert Coşkun'un da katkılarıyla idare edilmiştir. Numune metalografik hazırlıkları ise Marmara Üniversitesi metalografi laboratuvarında laboratuvar teknisyeni Semih Güven ve yürütücü tarafından yapılmıştır. Nümerik modelleme çalışmaları yürütücü tarafından Marmara Üniversitesi ve İstanbul Teknik Üniversitesi'nde çalışılmıştır. Nümerik modellemede kullanılan Autodesk Netfabb Local Simulation 2018.2 akademik yazılımı Sualp Özel ve Evren Arın tarafından yürütücünün kullanımını ücretsiz olarak sunulmuştur. Numunelerin incelenmesi de yine Marmara Üniversitesi ve İTÜ laboratuvarlarından faydalanılarak tamamlanmıştır. Numunelerin eriyik havuz resimlerinin analizlerinde Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği lisans öğrencisi Anıl Görkem Yekdeş'in kısmi katkıları olmuştur.

İÇİNDEKİLER:

1.	GİF	RİŞ		1					
2.	LİTI	ERATÜR ÖZETİ4							
2	2.1	ses Parametreleri	4						
2	2.2	Ter	mal Sonlu Eleman Analiz Modelleme	8					
2	2.3	erin Odaktan Saptırılması	9						
2	2.4	Geo	çici Hal Eriyik Havuz Davranışı	.11					
3.	GE	REÇ	VE YÖNTEM	.12					
3	8.1	Pro	ses Haritası Çıkarma için Kararlı Hal Deneyleri	.12					
	3.1.	.1	Tek paso deneyleri	.12					
	3.1.	2	Deney numunelerinin eriyik havuz geometrilerinin ölçülmesi	.15					
3	8.2	Oda	aktan Saptırılmış Lazer Tek Paso Deneyleri	.17					
3	8.3	Sor	nlu Eleman Analiz Modelleme	.19					
	3.3.	.1	lsı transferi mekanizması	.20					
	3.3.	3.2 Malzeme özellikleri							
	3.3.	3	Model konfigürasyonu	.23					
4.	BUI	LGU	LAR	.24					
۷	l.1	Tek	c Paso Çalışmaları	.24					
2	1.2	Oda	aktan Saptırılmış Tek Paso Çalışmaları	.31					
Z	1.3	Geo	çici Hal Çalışmaları	.42					
4.4 İkincil Lazer Işın Etkisi									
5.	5. TARTIŞMA / SONUÇ45								
6.	6. KAYNAKÇA46								

ŞEKİLLER:

Şekil 1. a) DMLS metodunun şematik genel taslağı (Clijsters vd., 2014). b) EIE metodunun
çalışma prensibinin gösterimi (Zäh ve Lutzmann, 2009)2
Şekil 2. a) 316L çelik alaşım tozun çelik alt tabaka üzerinde lazer ile sinterlenmiş izin kuşbakışı
görüntüsü. Lazer gücü 50 W, tarama hızı 0.10 m/s, eklenmiş tozun kalınlığı 40 μm. b) Çelik alt
tabaka üzerinde lazer ile sinterlenmiş pasonun tipik kesit diyagramı. (Yadroitsev vd., 2010)5
Şekil 3. a) DMLS ile Ti-6Al-4V tek katman tozun tek paso yüzey topoljisi. Kırmızı bölge
buharlaşma kaynaklı pürüzlülük, mavi bölge iyi eriyik havuz karakteristiği ve mor bölge kararsız
eriyik havuz karakteristiği gösterir (Gong vd., 2014). DMLS ile Inox 904L tozun tek katman ve
tek paso sonuçları b) 50 W, c) 25 W lazer gücü için (Yadroitsev vd., 2007)6
Şekil 4. a) Elektron ile YEB metodu Ti6-Al-4V için proses haritası (Soylemez vd., 2010). b) EIE
ile Ti6-Al-4V için proses haritası (Beuth vd., 2013)7
Şekil 5. a) Mikroskop altında eriyik havuz kesit alanı ~0.0101 mm² (Montgomery vd., 2015). b)
Tepeden bakış açısıyla mikroskop altında eriyik havuz genişliği (Romano vd., 2015)8
Şekil 6. Mor alan model eriyik havuz genişliğini model sonucuna bağlı olarak çizmiştir. Deneysel
tek paso şekli de alt şekilde gösterilmiştir. Bu örnek için başlangıç parametreleri 3000 W ve 51.5
in/min ve nihai parametreleri 3000 W ve 25.8 in/min olarak tayin edilmiştir (Fox ve Beuth, 2013).
Kırmızı kesikli çizgi ise sistem eğer anlık tepki verebilmesi halinde eriyik havuz genişliği
geometrisi öngörülmüştür11
Şekil 7. Yürütülen grup testleri için 44 farklı hız ve güç kombinasyonları12
Şekil 8. Ti6Al4V deney plakası EOS Aluminyum plakası üzerinde montaj hali
Şekil 9. Tozsuz tek paso deney plakası14
Şekil 10. Tek katman 30 μm ve 60 μm toz deneyleri plakası15
Şekil 11. Farklı karakteristiğe sahip 30 µm kalınlık toz ile tek pasolu dikiş görünümleri. (a) 50 W
& 200 mm/s, (b) 250 W & 1200 mm/s, and (c) 350 W & 2000 mm/s16
Şekil 12. Tek pasolu dikiş kesit alanı ve eriyik havuz geometrisi tanımlamaları16
Şekil 13. 30 μm kalınlık toz ile farklı proses parametre kombinasyonları sonucu oluşmuş eriyik
havuz kesitleri
Şekil 14. Odaktan sapma mesafesine göre ölçülen lazer ışın çapı
Şekil 15. 370 W ve 800 mm/s parametresi ile 30 μm toz katmanı ile 81 μm, 130 μm ve 160 μm
lazer çapı ile taranmış kesit görüntüleri19
Şekil 16. Simülasyon sıcaklık dağılımı görünümleri20

Şekil 17. Sıcaklığa bağlı (a) ısıl iletkenlik, (b) yo icin.	ğunluk ve (c) özgül ısı katsayısı Ti6Al4V alaşım 22
Şekil 18. (a) Üç boyutlu model geometrisi ve ağl	ları. (b) 3B termal analiz <i>x-z</i> düzlemindeki
sıcaklık konturu	
Şekil 19. Lineer enerji yoğunluğuna bağlı derinli	k grafiği26
Şekil 20. Lineer enerji yoğunluğuna bağlı genişli	ik grafiği27
Şekil 21. Eriyik havuz kesit görünümleri (a) 200	W & 400 mm/s ve (b) 250 W & 400 mm/s. Çok
daha düşük eriyik kesit alanine sahip (b) (a)'ya k	ayasla daha düşük enerji yoğunluğunda paso
atıldığını belirtir	
Şekil 22. Lazer gücüne bağlı eriyik havuz kesit a	alanı. Simülasyon ve deney sonuçları farklı
işaretler ile gösterilmiştir	
Şekil 23. Eriyik havuz genişliği (a & b) ve derinli	ği (c & d) lazer gücüne bağlı tozsuz durum için.
Şekil 24. Eriyik havuz genişliği (a & b) ve derinli	ği (c & d) lazer gücüne bağlı 30 µm katman
tozlu durum için	
Şekil 25. Ti6Al4V için tek paso proses parametr	e haritası. Tozsuz durum3 [.]
Şekil 26. Ti6Al4V için tek paso proses parametr	e haritası. 30 µm tozlu durum3′
Şekil 27. Tek paso eriyik havuz kesit alan tasvirl	leyici fotoğrafları. (a) Yüksek hız ve düşük enerji
yoğunluğuyla instabil tek paso damlacık formlara	a dönüşmüştür, (b) iletken mod yarı dairesel
eriyik havuz kesit alanı oluşturmuştur, (c) yüksel	k derinlik genişlik oranına sahip anahtar deliği
formu	
Şekil 28. Farklı proses parametreleri için lazer ç	apına göre değişen eriyik havuz kesit
görüntüleri	
Şekil 29. Ölçülen eriyik havuz (a) derinliği ve (b)	ı genişliği farklı lazer çapına bağlı olarak. Farklı
renk çizgiler farklı proses parametrelerini temsil	etmektedir34
Şekil 30. En-boy oranı artışı hacimsel enerji yoğ	ıunluğuna göre (<i>VED</i>). Yedi farklı renkteki
işaretler farklı lazer çapı verilerini göstermektedi	r. İçi boş işaretler eriyik havuzdaki gözenekleri
simgeler	
Şekil 31. En-boy oranı normzize entalpi ile artışı	ı. Farklı renk işaretler farklı lazer çaplarını
simgeler. İçi boş işaretler eriyik havuzdaki gözer	nekleri simgeler. Dikey kesik çizgi gözenek
kusurlarının başladığı eşik çizgisidir	
Şekil 32. Stabil olmayan ve gözenek kusurları e	şiklerini hesaplanmış normalize entalpi ve VED

çizdirilmiştir. Yuvarlak işaretler anahtar deliği ve kare işaretler stabil olmayan kusurların eşiklerini
simgeler
Şekil 33. Farklı proses parametrelerindeki yığma oranları. Her bar farklı lazer çapını simgeler.
(a) 30 μm derinlik, (b) 60 μm derinlik, ve (c) 100 μm derinlikteki yığma oranı hesaplamaları39
Şekil 34. Yığma oranı hesaplaması tasviri kırmızı alan ile gösterilmiştir. (a) 30 µm derinlik, (b)
60 μm derinlik ve (c) 100 μm derinlikteki yığma oranı40
Şekil 35. Eriyik havuz derinliği deney ve simülasyon sonuçları. Geometrik ve matematiksel
işaretler sırasıyla simülasyon ve deney sonuçlarını temsil eder. Aynı renk işaretler aynı proses
parametresine denk gelir. (a) $D = 100 \ \mu m$, (b) $D = 130 \ \mu m$, (c) $D = 200 \ \mu m$, (d) $D = 260 \ \mu m$ 41
Şekil 36. Eriyik havuz genişliği deney ve simülasyon sonuçları. Geometrik ve matematiksel
işaretler sırasıyla simülasyon ve deney sonuçlarını temsil eder. Aynı renk işaretler aynı proses
parametresine denk gelir. (a) $D = 100 \ \mu m$, (b) $D = 130 \ \mu m$, (c) $D = 200 \ \mu m$, (d) $D = 260 \ \mu m$ 42
Şekil 37. Sonlu eleman analiz geçici hal eriyik havuz genişliği sonuçları43
Şekil 38. Geçici hal tek paso denemesi üstten görünümü43
Şekil 39. İkinci lazer ışınlı ve ışınsız geçici hal eriyik havuz genişliği

TABLOLAR:

Tablo 1 Odaktan saptırılmış lazer tek paso deneyleri parametreleri	18
Tablo 2 Termal model malzeme özellikleri.	22
Tablo 3 Tozsuz tek paso deney ortalama eriyik havuz derinlik değerleri.	24
Tablo 4 Tozsuz tek paso deney ortalama eriyik havuz genişlik değerleri.	24
Tablo 5 30 µm toz katmanlı tek paso deney ortalama eriyik havuz derinlik değerleri	25
Tablo 6 30 µm toz katmanlı tek paso deney ortalama eriyik havuz genişlik değerleri	25
Tablo 7 60 µm toz katmanlı tek paso deney ortalama eriyik havuz derinlik değerleri	25
Tablo 8 60 µm toz katmanlı tek paso deney ortalama eriyik havuz genişlik değerleri	26
Tablo 9 Normalize entalpi hesabında kullanılan sabitler.	35
Tablo 10 Geçici hal tek paso parametreleri	42

ÖZET

Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS) metoduyla proses parametrelerinin tek tek etkilerini incelemek ve bunu parçanın farklı geometrileri için tekrarlamak tasarlanmış parça için parametrelerin bulunması sürecini uzatır ve maliyetleri arttırır. İmalat sırasında ısıl kaynak sebebiyle oluşan eriyik havuz kontrolü parça kalitesinde etkin rol oynamaktadır. Bu geometrinin kontrol edilebilmesi ana proses parametreleri olan ışın gücü ve ışın hızı ile sağlanabilir. Proje kapsamında tek paso eriyik havuz geometri deneyleri ve sonlu eleman analiz (SEA) termal modelleri proses haritalarının oluşturulmasında kullanılmıştır. Proses haritaları sayesinde kompleks parça üretiminde hedeflenen kalitedeki üretime ulaşma süreleri çok daha kısalabilir.

Proses haritaları tek paso deneylerinin kararlı hal durumu için yürütülmesiyle ortaya konmuştur. Elde edilen eriyik havuz geometrileri termal SEA modellerin karşılaştırılmasında ve kalibrasyonunda kullanılmıştır. Oluşturulan SEA modeli lazer absorpsiyon verimliliği değişimini ve 3B ısı kaynağı geometrisini parametrelere göre değiştiren bir model olarak meydana getirilmiştir. Elde edilen güvenilir model kararlı hal dışında ve tek paso koşulları haricinde de kullanılabilir. İmalatın hızını arttırabilmek için farklı lazer çaplarının eriyik havuza etkileri yine tek paso deneyleri ve modelleri ile incelenmiştir. Lazer çapı artışı ve katman kalınlığı artışı ile yığma oranı yaklaşık 3 kat aratabileceği analiz edilmiştir. Eriyik havuz derinlik-genişlik oranı 0.85'den düşük kaldığı durumlarda imalatın hatasız ürünlere imkan tanıdığı ortaya konmuştur. Gözenekli yapı eşik değerleri için hacimsel enerji yoğunluğu ve normalize entalpi lazer çapına bağlı olarak çalışılmıştır. Normalize entalpi değeri lazer çapı etkisinden bağımsız kullanıcıya hatalı üretim hakkında bilgi verebilmektedir. Parametre değişimi sırasında eriyik havuz davranışı incelenmiş ve sitemdeki lazer performansı anlık değişimine karşı veya parametre değişimi sırasındaki eriyik havuz değişimi bölgesini kısaltmaya yönelik ikinci lazer ışın etkileri modellenerek çalışılmıştır.

Bu projenin çıktıları olan proses haritaları konu üzerinde çalışan araştırmacılara deneysel veri sunacaktır ve kullanıcılara da kaliteli parça imalatı için referans olacaktır. Projede sunulan termal modelleme yöntemi de farklı proses ve malzemeler adapte edilebilecek şekilde araştırmacıların faydalanabileceği bir yöntem olarak sunulmuştur. Lazer çap değişimi etkileri de imalat verimliliğini arttırma potansiyeli nedeniyle gelecek daha detaylı çalışmalara açıktır.

Anahtar kelimeler: eklemeli imalat, proses parametre haritası, eriyik havuz geometrisi, termal sonlu eleman analiz, geçici hal eriyik havuz geometrisi, doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS), seçici lazer ergitme

ABSTRACT

Investigating process parameter effects of direct metal laser sintering (DMLS) and repeating the procedure on different geometries of the part extends the procedure duration for finding final process parameters for the designed part and increases the cost. Controlling the melt pool geometry, which is formed due to heat source, plays an important role on part quality. This geometry can be controlled by main process parameters such as beam power and beam speed. Single bead experiments and thermal finite element analysis models for different process parameter were conducted during the project. Developed process maps may help decreasing the preparation stage to find the optimum parameters for complex shaped parts

Process maps for single bead tracks were developed after running the experiments. Melt pool geometry results of the experiments were used to calibrate the thermal models and compare with it. A unique thermal model approach has been developed because it varies the laser absorption efficiency and heat source geometry as a function of the process parameters. This accurate model can also be used for different alloys and geometries. To investigate the potential of higher deposition rates, different beam diameters experiments and models were investigated. Increasing the layer thickness and beam diameter potentially has increased the deposition rate by a factor of three. Melt pool depth over width ratio was found to be less than 0.85 to avoid the porosity defects. To find the thresholds of the void defects, volumetric energy density and normalized enthalpy were utilized. Normalized enthalpy was useful to inform the user about the thresholds independent from the beam diameter variation. Moreover, melt pool for parameter change was modeled during laser single scan, and second laser effects to reduce the transition region was further investigated.

Process maps as a result of this study will provide experimental data to the researchers work on this topic and a reference for the additive manufacturing users for quality part manufacturing. Developed thermal model can be utilized for various alloys and part geometries. Variation of the beam diameter has a potential to increase the manufacturing efficiency.

Keywords: additive manufacturing, process parameter mapping, melt pool geometry, thermal finite element analysis, transient melt pool geometry, direct metal laser sintering (DMLS), selective laser melting

ix

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat (Eİ) geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla belirgin üstünlükleri olan 2015 yılında Dünya Ekonomik Forumu Üst kurulunda işaret edilmiş gelişmekte olan bir teknolojidir (Meta-Council on Emerging Technologies 2015 World Economic Forum, 2015). Eklemeli imalat endüstrisi pazar hacmi 2018 yılında 7.3 milyar dolar olarak ve metal eklemeli imalat endüstrisinde 2013-2018 yılları arasında bileşik yıllık büyüme oranı da %40'dan fazla olarak 2019 Wohlers raporunda açıklanmıştır (Wohlers, 2019). Eklemeli imalat ~12 trilyon dolarlık imalat sanayi pazarının %0.1'lik dilimine sahip ve gelişime açık potansiyeli ile beklentileri büyütmektedir.

Eİ prosesi 3B CAD dosyalarından kalınlığı belirlenmiş kat kat malzemeyi ekleyerek tasarlanmış parçaları üretir (ASTM International, 2013). Kompleks parça üretimi limitleri geleneksel yöntemlere kıyasla asgari seviyededir, tedarik süreleri daha kısa sürebilir ve boşa harcanmış malzemeyi önemli ölçüde azaltır. Bu sebeplerden dolayı, metal imalat endüstrisinden özellikle uçak-uzay, medikal ve imalat alanlarından özel ilgi görmüştür. Uçak-uzay endüstrisi karmaşık parça imalatı sayesinde parça hafifletme avantajlarından yararlanmıştır. Lawrence Livermore Ulusal Laboratuvarı NX-01 prototip roket motorlarını üretmiştir (Lawrence Livermore National Laboratory, 2015). SpaceX Falcon 9'un Inconel motor odasını katmanlı olarak imal etmiştir (SpaceX, 2015). İlk seri imalat ise General Electric (GE) Aviation tarafından planlanmıştır (3D Printing Aircraft Parts | GE Global Research, 2015). Tasarladıkları özgün LEAP motor yakıt püskürtücü 18 ayrı parçanın tek bir gövdede birleşmesini sağlamış, %25 oranında ağırlğı düşürmüş, %15 oranında yakıt verimliliğini arttırmış, ve dayanıklılığını 5 kat arttırmıştır. Bu parça Eİ parçası tasarımı için ideal bir örnektir çünkü parça içindeki ısı transferini optimize etmek için konan karmaşık akış hatları nedeniyle yalnızca Eİ ile üretim mümkündür. Biyomedikal endüstrisi de diz ve kalça implantı (Murr vd., 2012), göğüs kafesi ve kaburga implantı (CSIRO, 2015), omurga implantı (4WEB Medical, 2015), kafatası implantı (EBM for Orthopedic Implants - Additive Manufacturing | Arcam AB, 2015), ve diş implantı üretimini Eİ ile bütünleşmiş hale getirmiştir. Başka bir uygulama alanı ise geleneksel imalat yöntemleri için takım üretimidir. Örneğin enjeksiyon kalıpların hızlı üretim için uygun ve uzun ömürlü olması düzgün dağılmış ve hızlı bir soğutma gerektirmektedir. Kompleks soğutma kanalları tasarımlarıyla Eİ bunu mümkün kılmaktadır (Additive Manufacturing - Linear Mold, 2015, EOS Additive Manufacturing, 2015).

Metal eklemeli imalatın uçak-uzay, otomotiv, medikal, dental ve imalat endüstrileri tarafından yaygınlaşmasının önemli bir sebebi de yüksek doğruluk, hassasiyet ve mekanik özelliklerde

parçaların imalatının toz yatağı füzyon (TYF) prosesleri ile mümkün hale gelmesidir. Doğrudan (direkt) metal lazer sinterleme (DMLS) ve elektron ışınıyla ergitme (EIE) en yaygın olarak kullanılan TYF yöntemleridir. Bu teknik Şekil 1'de şematiği gösterildiği gibi ince bir metal toz katmanının yüzeye yayıldıktan sonra lazer (Şekil 1a) veya elektron (Şekil 1b) ışınının hedeflenen bölgeler üzerinden geçerek tozu eritip alt katman ile bağ kurmasını sağlar. DMLS lazer teknolojisindeki gelişmeler, patent haklarının serbest kalması, daha düşük maliyetli ekipmanlar, parça yüzey hassasiyetlerinin daha iyi olması (Bian, Thompson, & Shamsaei, 2015) gibi sebeplerle en çok tercih edilen yöntem olmuştur. Fakat lazer kaynaklı oluşan fiziksel mekanizmalar DMLS'i limitler.



Şekil 1. a) DMLS metodunun şematik genel taslağı (Clijsters vd., 2014). b) EIE metodunun çalışma prensibinin gösterimi (Zäh ve Lutzmann, 2009).

Bu limitlere dikkat ederek üretim yapmak parçanın nihai kalitesini önemli ölçüde etkiler. Kontrollü üretim DMLS proses parametrelerinin uygun seçimi ile mümkün olur. Etkin olan ana proses parametreleri lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı, lazer çapı, tarama stratejisi, toz özellikleri, sıcaklık ve çevre şartları olarak sıralanabilir. Bu parametrelerin doğru seçilmesi ile istenen mikro yapılar, yüzey pürüzlülüğü, parça yoğunluğu ve mekanik dayanım elde edilebilir. Hedeflenen kaliteye uygun proses parametrelerini kullanıcıya sunan proses parametre haritaları ortaya konmaktadır (J Beuth et al., 2013). Bu proje kapsamında DMLS metodu ile lazer ışın gücü, hızı ve lazer çapı değiştirilerek tek katmanlı üretimin kararlı hal için proses haritası çıkarılacaktır. Bu deney çalışmaları sonucu oluşacak eriyik havuz geometrisine bağlı proses haritası DMLS Ti-6Al-4V süperalaşımı parça üretiminde kullanıcılara rehber olacaktır.

Sonrasında, deney sonuçlarına göre seçilecek parametreler ile sonlu eleman analiz (SEA) simülasyonları koşturulacak ve deney sonuçları ile kıyaslamaları yapılacak. Oluşturulacak model eriyik metal havuzun ısıl mekanizmalarını daha iyi anlamaya yarayacak ve farklı malzeme ve Eİ metotları için proses haritası oluşturmaya araç olacaktır.

Kararlı hal eriyik havuz geometri çalışmalarından sonra, geçici hal çalışmaları da yapılacaktır. Kararlı hal için oluşturulacak proses haritasından elde edilecek parametreler ile eriyik havuz genişlik veya kesit alan değerlerinin mevcut kararlı halden hedeflenen diğer kararlı hale geçişi SEA ile modellenecektir.

Son olarak ise ikinci ısıl ışın kaynağının geçici hal için faydalı olabilecek bir uygulama olabileceği gösterilecektir. İki kararlı hal arasındaki geçiş alanı parça kalitesini etkileyebilir. Bu geçiş alanındaki eriyik havuz geometrisini hedeflenen kararlı haldeki geometriye sistemin tepkisini beklemeden ulaşmak mümkün olabilir. Işını takip eden ikinci ışın kaynağının eriyik havuz katılaşmadan devreye sokulması hedeflenen eriyik havuz geometrisini ikinci aşamaya geçilecek noktada mümkün kılabilecektir. İkinci ışın parametreleri hızı birinci ışın ile aynı olacak şekilde, gücü ise SEA ile yapılacak modellemeler ile çıkarılacaktır.

Projede üzerinde çalışılacak malzeme Ti-6Al-4V; yüksek dayanıklılık, yüksek yorulma direnci, yüksek kırılma direnci, düşük ağırlık oranı, biyo uyumluluğu ve iyi korozyon direnci özellikleri sayesinde hava-uzay, biyomedikal, imalat takım, ve bu özelliklere ihtiyaç duyan endüstri alanları tarafından kullanılmaktadır. Üzerinde yoğun bir şekilde farklı Eİ yöntemleri ile çalışılmış ve çalışılmakta olan bu süperalaşım DMLS metodu ile bu proje kapsamında ele alınacaktır.

Projenin özgün çıktıları ise 50 – 370 W geniş lazer gücü aralığında üretim yapılabilecek proses parametre haritalarını çıkarmak, bu geniş aralıkta yüksek doğruluk ile eriyik havuz geometrilerini tahmin edebilecek sayısal model oluşturmak, lazer çaplarının değişimi ile üretimde kullanılması uygun olmayan parametrelerin kullanımının mümkün olduğunu göstermek, DMLS metodunda geçici hal davranışını modellemek ve ikinci lazer kaynağın parametre değişikliğindeki tepkime süresine olumlu etkisi olarak sırlanabilir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Proses Parametreleri

Lazer ışınıyla indüklenen eritme ısı transferi, faz dönüşümü, ışın demeti-malzeme etkileşimi, yüzey gerilimine bağlı eriyik havuz akışı, malzeme buharlaşması, püskürtülmesi ve kimyasal reaksiyonları içermektedir (Yadroitsev, Gusarov, Yadroitsava, & Smurov, 2010). Bu fiziksel koşulları proses parametreleri ile kontrol edebilmek parça kalitesi için can alıcıdır. Örneğin, eriyik havuzda lazerin odak noktasından etrafına doğru sıcaklık azalmaktadır. Sıvı metaldeki sıcaklık farklılığı yüzey gerilim farklılığına sebep olur ve bu da Marangoni etkisi olarak tanımlanan merkezden çevreye doğru malzeme akışına neden olur (Anthony & Cline, 1977). Bir diğer karmaşık mekanizma ise eriyik havuzda oluşan anahtar deliğidir (İngilizcesi: key holing). Metalin lazer ışını altında ani buharlaşması sonucu oluşan geri tepme basıncı eriyik havuzun alt katmanlara doğru penetrasyonuna neden olur (Katayama, 2013). Bernoulli prensibi, Young-Laplace, kapiler efektler ve aşırı soğutma mekanizmaları da yüzey dalgalanmaları, pürüzlülük, topaklanma ve kamburlaşma gibi kusurlara yol açabilir.

Bu kusurlar lazer izinde düzensizlik, kısmi çarpılmalar, denüdasyon alanları, boşluklar, mikroyapı düzensizlikleri, düşük parça yoğunlukları ve düşük mekanik dayanıma neden olur. Parça kusurlarını kontrol altına almanın bir yolu proses parametrelerini ayarlamaktır (J Beuth et al., 2013). Etkin olan ana proses parametreleri lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı, lazer capı, tarama stratejisi, toz özellikleri, sıcaklık ve çevre şartları olarak sıralanabilir (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015). Üretimin en başında belirlenen bu değişkenler üretim sırasında oluşacak metal eriyik havuzun geometrisini oluşturur, bunu metalin soğuma oranlarına bağlı katılaşması takip eder, katılaşan metal artık gerilme ve gözenekli yapılara sahip olabilir ve bu da mekanik özellikleri etkiler. Mikroyapıların proses esnasında istenen şekilde oluşması için proses parametre etkileri bilinmelidir (Bontha vd., 2009; Gockel vd., 2014; Kobryn ve Semiatin, 2003). Proses parametre değişikliklerinin nasıl yapılması gerektiğinin rehberliğini yapan proses haritaları oluşturulmuştur (Beuth vd., 2013). Proses haritaları sayesinde eriyik metal havuz geometrileri (eriyik metal havuz kesit alanı, eriyik havuz derinliği, eriyik havuz uzunluğu) kontrol edilebilir. Eriyik havuz kesit alanı hıza bağlı olarak ne kadar malzemenin eritileceğini ve böylece üretim hızını belirlemeye yarar. Bu parametrenin kontrolü ile eklenen katman kalınlığına bağlı olarak alt tabaka ile bağın kurulabileceğini anlamaya yarar. Proses parametrelerinin etkin şekilde çalışılıp anlaşılması için tek pasolu dikiş (İngilizcesi: single track) deneyleri yürütülür. Tek pasolu dikiş oluşumları (lazerin doğrusal çizgiyi takip ederek tozu lazer çapı oranında eritmesi sonucu oluşan yapı) proses parametrelerine göre stabil ve instabil form alabilirler (Yadroitsev vd., 2010). Düşük hızlarda

4

çarpıklık ve düzensizlik gözlemlenirken, yüksek hızlarda yumaklanma etkisi görülür (Yadroitsev vd., 2010). Stabil iz proses aralığı yüksek lazer güçlerinde genişler (Yadroitsev vd., 2010). DMLS ile üretim sırasında eriyik havuzda hızlı buharlaşmaya bağlı olarak oluşan basınç farklılıkları, kapileri etkiler, geri tepme basıncı gibi etkiler sebebiyle yüzeydeki toz partikülleri yer değiştirir ve işlem sonucunda eriyik havuzun genişliğinin etrafında toz miktarının azaldığı denüdasyon bölgeleri oluşur (Matthews vd., 2016) şekil 2'de gösterildiği gibi. DMLS sistemlerin çalışma ortamı olan atmosferik basınçta ana etkenin basınç farklılığından kaynaklı partikül yer değişimi olduğu açıklanmıştır (Matthews vd., 2016). Birbirine paralel lazer ile eritilmiş izlerin aralarındaki bağları düzgün yapabilmesi için tarama aralığının denüdasyon bölgelerini hesaba katarak belirlenmesi elzemdir. Proses sırasında fiziksel etkiler ile eriyik havuzdaki oluşumları anlamak önemlidir, fakat farklı etkilerin farklı proses parametre aralıklarında tetiklenmesi optimum proses haritalarını çıkarmayı zorlaştırabilir. Bu nedenle birçok farklı proses parametre kombinasyonu ile deneyler yapılarak, bunların mekanik özelliklerini, malzeme kristal yapılarını, yüzey pürüzlülüğünü, yoğunluğunu vs. inceleyerek istenen kalite için takip edilmesi gereken proses parametre çalışmaları daha yaygındır.



Şekil 2. a) 316L çelik alaşım tozun çelik alt tabaka üzerinde lazer ile sinterlenmiş izin kuşbakışı görüntüsü. Lazer gücü 50 W, tarama hızı 0.10 m/s, eklenmiş tozun kalınlığı 40 µm. **b)** Çelik alt tabaka üzerinde lazer ile sinterlenmiş pasonun tipik kesit diyagramı. (Yadroitsev vd., 2010)

DMLS ile bazı tek paso çalışmaları örnekleri Ti-6Al-4V (Gong vd., 2014) ve Inox 904L (Yadroitsev vd., 2007) için yürütülmüştür. Şekil 3a'da incelenen tek paso yüzey topolojilerine göre bölgeler belirlenmiştir. Yüksek enerji yoğunluğu kırmızı bölgede hızlı buharlaşma sebebiyle düzensizliklere sebep olurken, yeterli enerji aktarılmadığında da yüzey gerilimlerine bağlı düzensizlikler oluşur mor bölgede. Mavi bölgeye denk gelen parametreler stabil tek pasolar oluşturabilirler. Şekil 3b ve c de benzer sonuçları ortaya koymaktadır.

(a)



Şekil 3. a) DMLS ile Ti-6AI-4V tek katman tozun tek paso yüzey topoljisi. Kırmızı bölge buharlaşma kaynaklı pürüzlülük, mavi bölge iyi eriyik havuz karakteristiği ve mor bölge kararsız eriyik havuz karakteristiği gösterir (Gong vd., 2014). DMLS ile Inox 904L tozun tek katman ve tek paso sonuçları **b)** 50 W, **c**) 25 W lazer gücü için (Yadroitsev vd., 2007).

Oluşan topolojik stabil bölgelere ek olarak proses sonucu oluşacak parça kalitesi de tek iz çalışmalarına dayandırılabilir. Üretimin en başında belirlenen proses parametreleri üretim sırasında oluşacak metal eriyik havuzun geometrisini oluşturur, bunu metalin soğuma oranlarına bağlı katılaşması takip eder, katılaşan metal artık gerilme ve gözenekli yapılara sahip olabilir ve bu da mekanik özellikleri etkiler. Mikroyapıların proses esnasında istenen şekilde oluşması için proses parametre etkileri bilinmelidir (Bontha vd., 2009; Gockel vd., 2014; Kobryn ve Semiatin, 2003). Örneğin yüksek tarama hızı ve düşük lazer gücü gelen düşük enerji sebebiyle hızlı soğumaya maruz kalır ve ince (İngilizcesi: finer) mikroyapılar oluşur; tam tersi yüksek lazer gücü ve düşük hızlarda ise yavaşlayan soğuma sütun (İngilizcesi: columnar) mikroyapılar oluşturur (Thompson vd., 2015). Proses parametre değişikliklerinin nasıl yapılması gerektiğinin rehberliğini yapan proses haritaları oluşturulmuştur (Beuth vd., 2013). Proses haritaları sayesinde eriyik metal havuz geometrileri (eriyik metal havuz kesit alanı (A), eriyik havuz derinliği (d), eriyik havuz uzunluğu (L)) kontrol edilebilir. Eriyik havuz kesit alanı hıza bağlı olarak ne kadar malzemenin eritileceğini ve böylece üretim hızını belirlemeye yarar. Bu parametrenin kontrolü ile eklenen katman kalınlığına bağlı olarak alt tabaka ile bağın mümkün olabileceğini anlamaya yarar. Şekil 4'de sabit kesit alanlarını korumak için gerekli güç ve hız parametre doğruları verilmiştir. Doğrular Sekil 4a'da YEB metodu, Sekil 4b'de EIE metodu ile Ti-6AI-4V icin gösterilmistir ve doğruların trendleri lineer olmak ile birlikte eğimleri kesit alanına göre değişmektedir. Eriyik havuz derinliği (*d*) de kesit alan ile doğrudan ilişkilidir. Eriyik havuz uzunluğu/derinlik (*L/d*) oranları Şekil 4'de belirtilmiştir. Bu lineer olmayan eğriler prosesin sonunda istenen mikroyapıları elde etmek için takip edilmesi gereken çizgiler olduğu gösterilmiştir (Gockel vd., 2014). Benzer bir çalışma uzunluğun genişliğe olan oranının sabit tutulması ile de yürütülmüştür (Zäh ve Lutzmann, 2010). Eriyik havuz geometrilerinin mikroyapıya etkileri çalışılmaktadır ve tek katmanlı proses haritalarına dayanarak kompleks parça imalatı proses parametre kullanım stratejileri oluşturulabilir.

Şekil 4'de sabit kesit alanlarını korumak için gerekli güç ve hız parametre doğruları verilmiştir. Doğrular Şekil 4a'da YEB metodu, Şekil 4b'de EIE metodu ile Ti-6Al-4V için gösterilmiştir ve doğruların trendleri lineer olmak ile birlikte eğimleri kesit alanına göre değişmektedir. Eriyik havuz derinliği (*d*) de kesit alan ile doğrudan ilişkilidir. Eriyik havuz uzunluğu/derinlik (*L/d*) oranları Şekil 4'de belirtilmiştir. Bu lineer olmayan eğriler prosesin sonunda istenen mikroyapıları elde etmek için kullanılabileceği gösterilmiştir (Gockel vd., 2014). Eriyik havuz geometrilerinin mikroyapıya etkileri çalışılmaktadır ve tek katmanlı proses haritalarına dayanarak kompleks parça imalatı proses parametreleri oluşturulma süreçleri kısa sürelere çekilebilir. Onaylanmış deneylerle veya proses haritalarıyla (J Beuth et al., 2013) proses parametrelerine karar verilebilir. Bu sayede istenen lazer pasolarındaki stabilizasyon (Gong, Rafi, Gu, Starr, & Stucker, 2014), mikroyapı (Kobryn & Semiatin, 2003), düzgün yüzey topolojisi (Gong, Rafi, et al., 2014) ve hedeflenen mekanik dayanım (Sames, List, Pannala, Dehoff, & Babu, 2016) elde edilebilir. Clymer vd. proses haritalarından gelen yoğunluk, akma dayanımı, yüzey pürüzlülüğü, hassasiyet ve malzeme yığma oranları verilerini kullanarak proses tasarım grafiklerini sunmuştur (Clymer, Cagan, & Beuth, 2017).



Şekil 4. a) Elektron ile YEB metodu Ti6-Al-4V için proses haritası (Soylemez vd., 2010). b) EIE ile Ti6-Al-4V için proses haritası (Beuth vd., 2013).

Deneysel eriyik havuz geometri belirleme ise optik mikroskoplar ile proses sonrası kesilen parçaların kesitlerinin incelenmesi sayesinde Şekil 5a'daki gibi kesit alan ve derinliklerin ölçülmesi

ile olur (Montgomery vd., 2015). Üst yüzeyden de inceleme yapılarak eriyik havuz genişliği Şekil 5b'deki gibi ölçülebilir (Romano vd., 2015). Bu yöntem tahrip edici muayene metodu olarak araştırma çalışmalarında tercih edilir.



Şekil 5. a) Mikroskop altında eriyik havuz kesit alanı ~0.0101 mm² (Montgomery vd., 2015). **b)** Tepeden bakış açısıyla mikroskop altında eriyik havuz genişliği (Romano vd., 2015).

2.2 Termal Sonlu Eleman Analiz Modelleme

Metal eklemeli imalat proses fiziğini daha iyi anlayabilmek için ve proses performansını değerlendiren deneysel çalışmaların maliyetlerini ve harcanan zamanları düşürmek için nümerik simülasyonlar kullanılmaktadır. Detaylı karmaşık modellerin hesaplama zamanları çok uzun olabilir. Bu sebeple proseste ilgili olunan bölgeye göre basitleştirilmiş çeşitli modellemeler yapılmaktadır (Megahed, Mindt, N'Dri, Duan, & Desmaison, 2016; Meier, Penny, Zou, Gibbs, & Hart, 2017). Mikro çözünürlükteki termal modeller eriyik havuz boyutlarını ölçmeye olanak veren sıcaklık dağılımlarını (E. Soylemez, Beuth, & Taminger, 2010) tahmin edebilir ve proses termal çevrimlerine bağlı olarak oluşacak mikroyapı tahminlerinde bulunabilir (Akram, Chalavadi, Pal, & Stucker, 2018). Termal-akış modelleri ise Marangoni etkisi, geri tepme basıncının gözenek oluşumdaki etkisi, malzeme sıçraması ve denüdasyon alanları gibi eriyik havuz ana mekanizmalarını anlamaya odaklanır (Khairallah, Anderson, Rubenchik, & King, 2017). Lazer gücü, hızı ve toz yoğunluğuna bağlı olarak oluşan lazer izi oluşumunun meso ölçekli modeli toz partiküllerini tek tek hesaba katarak modellemiştir (Körner, Attar, & Heinl, 2011). İlave olarak termo-mekanik modeller ile parça distorsiyonları ve artık gerilmeler tahmin edilebilmektedir (Jamshidinia, Kong, & Kovacevic, 2013; Kundakcioglu, Lazoglu, & Rawal, 2015; Parry, Ashcroft, & Wildman, 2016). Eriyik havuz geometrisine odaklanan termal modeller parca boyutu modellerine uyarlanabilen ağ algoritmaları ve çoklu ölçekli modelleme teknikleri ile uygulanabilir.

Bu sebeple doğru eriyik havuz geometrisi tahmini optimum proses parametrelerin belirlenmesinde ve imalat stratejisi geliştirmede kritik öneme sahiptir.

Termal modellerin doğrulukları toz etkileri (Shen & Chou, 2012), eklenen katmanın eleman doğma ve ölmesi tekniği ile modellenmesi (Roberts, Wang, Esterlein, Stanford, & Mynors, 2009), eriyik havuz içindeki konveksiyon etkileri (Jamshidinia et al., 2013), lazer ile etkileşim sırasındaki buharlaşma (Karayagiz et al., 2018) gibi detayların modellere eklenmesi ile artmıştır. Yine de model tahmin sonucunu etkileyen ana parametre lazer absorpsiyon verimliliğidir. Bu değerin seçimine göre eriyik havuz daha büyük veya küçük tahmin edilebilir. Çoğu model lazer absorpsiyon verimliliği değerini farklı proses parametreleri için sabit değer olarak almaktadır. Promoppatum vd. 50–400 W aralığında eriyik havuz geometrilerini 1,357 mm/s lazer hızıyla Ti6Al4V alaşımı için tahmin etmiştir ve deneysel eriyik havuz genişliği ile model sonuçlarının örtüştüğünü göstermiştir (Promoppatum, Onler, & Yao, 2017). Ilin vd. ısı kaynağı modeli olarak Goldak modelini 2B analizinde 316L için kullanmıştır (Ilin et al., 2014). Tahminleri deney sonuçlarına yakınsamıştır ama derinlik/genişlik oranı seçilmiş parametreleri için 1 – 2 aralığında sonuç vermiştir. Bu da ısı kaynağı modelinin sabitlerinin değiştirilmesi ihtiyacını ortadan kaldırabilecek bir sebeptir. Ye vd. deneysel olarak lazer absorpsiyon verimliliğinin lazer gücü, lazer hızı ve lazer capına bağlı olarak değistiğini göstermistir (Ye, Rubenchik, Crumb, Guss, & Matthews, 2018). Deneysel sonuçlar ilave olarak ışın takip simülasyonları ile açıklığa kavuşturulmuştur (Ye et al., 2019). Bu sebeple lazer absorpsiyon verimliliği sabiti modellerde proses parametrelerine bağlı olarak değişen bir değer olmalıdır. Zhang vd. anizotropik iletkenlik tanımlayarak ve absorpsiyonu da değişken olarak tanımlayarak modelleme geliştirmiştir (Zhang, Huang, Kasinathan, Shahabad, & Ali, 2019). Çalışmalarında 100 µm EOS M290 lazer çapını kullanarak 17-PH çeliğinin 170–220 W güç ve 600–1300 mm/s hız aralığında çalışmasını yapmışlardır (Zhang et al., 2019). Deneysel eriyik havuz geometrilerine göre kullanılması gereken lazer absorpsiyon ve anizotropik iletkenlik değerlerini verecek empirik denklemler oluşturmuşlardır.

2.3 Lazerin Odaktan Saptırılması

DMLS prosesinde performansı değerlendirmede kullanılan parametrelerden biri de malzeme yığma oranıdır (Clymer et al., 2017; X. Shi et al., 2016),

$$DR = t \times h \times v . \tag{1}$$

Burada, *t* toz kalınlığını, *h* tarama mesafesini ve *v* lazer tarama hızını temsil eder. Tang vd. yarı dairesel eriyik havuz kesiti için optimum tarama mesafesini $h = 0.7 \times genişlik$ olarak

9

tanımlamıştır (Tang, Pistorius, & Beuth, 2017). Yığma oranı artışı için lazer gücünü arttırmak ve böylece eriyen malzeme hacmini arttırmak ilk akla gelen yöntemlerdendir. Fakat derin eriyik havuz parça kusurlarına sebep olabilir. Bir diğer taraftan tarama pasoları mesafeleri de proses parametrelerine göre değişmesi gereken eriyik havuz genişliği ve toz kalınlığına bağlıdır. Üretim hızını arttırmak için alternatif olarak çoklu lazerli sistemler geliştirilmiş ve aynı anda birden çok parça üretilebilmektedir (Kim, Bae, & Choi, 2007). Bu sistemler de her lazeri tek olarak inceleyince proses parametre limitlerine bağımlıdır. Eriyik havuz kontrolünü yüksek hız ve yüksek güçte arttırmak için lazer ışın şiddeti dağılımını ayarlamak uygun yöntem olabilmektedir.

Koşutlanmış fiber lazer ışın enerji dağılımı Gaussian dağılıma sahiptir. Merkezdeki yüksek enerji eriyik havuzda sıcaklı gradyanlarına neden olurken, ışın kenarlarındaki bölgelerde yetersiz erimeye sebep verir (Brecher, 2012). İlave olarak merkezdeki yüksek enerji yoğunluğu derin eriyik havuzuna ve anahtar deliği kusuruna neden olur. Fraunhofer Institute for Laser Technology'de (ILT), Buchbinder vd. (Buchbinder, Schleifenbaum, Heidrich, Meiners, & Bültmann, 2011) düz başlı 1 mm çaptaki lazer ışınıyla 600 W gücünde 8 mm³/s yığma oranında üretim yapmış ve > %99 yoğunluk değerini elde edebilmiştir. Okunkova vd. tarafından yürütülmüş bir diğer çalışmada Gaussian, düz başlı ve ters Gaussian enerji dağılımlı lazer ışın etkileri 10–100 mm/s ve 30–150 W aralıklarında tek paso deneyleriyle kıyaslanmıştır (Okunkova et al., 2014). Düz başlı lazer deneylerinde daha üniform eriyik havuz kesit derinlikleri ve daha az toz partikül püskürtmesi gözlenmiştir. Her iki çıktıda proses kalitesini olumlu yönde etkiler. Daha sonra Gusarov vd. (Gusarov, Okun'kova, Peretyagin, Zhirnov, & Podrabinnik, 2015) tarafından yapılan 200 W güce kadar denemeler yapan benzer çalışma da benzer çıktıları sunmuştur.

Lazer ışınını odaktan saptırma da benzer olumlu etkilere neden olur. Ayrıca odaktan saptırma ile hassasiyetin önemli olmadığı bölgelerde yüksek yığma oranında ve daha düşük yığma oranında ise daha hassas olan dış yüzey ve iç kanaların katmanları imal edilebilir (Schleifenbaum, Meiners, Wissenbach, & Hinke, 2010). Schleifenbaum vd. 1 mm lazer çaplı 600 W güce sahip DMLS cihazı geliştirip 8 mm³/s yığma oranlarında imalat yapabilmiştir (Schleifenbaum et al., 2010). Buchbinder vd. 200 µm lazer çapı ve 1 kW güç ile yığma oranını AlSi10Mg alaşım için 4 kat arttırılabilmiştir (Buchbinder et al., 2011). Francis tek paso odaktan saptırma deneylerini Ti6Al4V alaşımla DMLS (P = 80-370 W, v = 450-2,550 mm/s) ve EIE (P = 670 W, v = 90-3,700mm/s) prosesleri için çalışmıştır (Francis, 2017). Anahtar deliği oluşumunu önlemek için lazer çapının eriyik havuz genişliğe oranı, D/w, eşikdeğerinin 1.0 olması gerektiğini tavsiye etmiştir. Odaktan saptırma sayesinde %81 oranında yığma oranında artış ve porozitede azalma elde

10

etmiştir (Francis, 2017). Shi vd. lazer çapını 50 μm'den 200 μm'ye çıkartarak P = 400 W ve t = 200 μm için Ti6Al4V alaşımda mekanik dayanımın artışını, yoğunluğun artışını ve tek paso stabilitesinin iyileşmesini iddia etmiştir (W. Shi et al., 2018).

2.4 Geçici Hal Eriyik Havuz Davranışı

Proses parametrelerinin aynı tarama çizgisi üzerinde değişimi sırasında eriyik havuzun derinden anlaşılması prosese hakim olabilmek için kritik öneme sahiptir (Fox & Beuth, 2013). Kararlı halden geçici hale geçiş sadece parametre değişimi ile değil aynı zamanda taramanın başladığı ve bittiği bölgelerde de görülür. DMLS cihaz üreticileri bunu hesaba katarak galvanometre kontrollerini ve lazer güçlerini tarama stratejisine göre ayarlayacak çözümler sunmaktadır. Fakat proses parametre değişimlerindeki davranış literatürde çok fazla çalışılmış bir konu değildir.

Şekil 6'da eriyik havuz genişliğini temsil eden mor alan YEB metodu için koşturulan modelin izinin genişliğini başlangıç parametrelerinden nihai parametrelere geçerken göstermiştir. Alt şekil de mikroskop altındaki numunenin aynı parametreler için eriyik havuz genişliği değişimini göstermektedir. Görüldüğü gibi parametreler anlık değişmesine karşın hedeflenen eriyik havuz genişliğine ulaşmak için belli bir mesafe kat edilmesi gerekmektedir.



Şekil 6. Mor alan model eriyik havuz genişliğini model sonucuna bağlı olarak çizmiştir. Deneysel tek paso şekli de alt şekilde gösterilmiştir. Bu örnek için başlangıç parametreleri 3000 W ve 51.5 in/min ve nihai parametreleri 3000 W ve 25.8 in/min olarak tayin edilmiştir (Fox ve Beuth, 2013). Kırmızı kesikli çizgi ise sistem eğer anlık tepki verebilmesi halinde eriyik havuz genişliği geometrisi öngörülmüştür.

Lazerli yönlendirilmiş enerji yığma proseslerinden biri olan LENS için Aggarangsi vd. geçici hal değişimlerini çalışmış ve proses haritalarını ortaya koymuştur (Aggarangsi, Beuth, & Gill, 2004). Yakin zamanda ise Hooper DMLS için eriyik havuz sıcaklığı ve soğuma oranlarını detaylı şekilde sunmuştur (Hooper, 2018). Termal gradyan 5–20 K/µm ve soğuma gradyanı 1–40 K/µs olarak ölçülmüştür (Hooper, 2018). Bu değerler geçici hal koşulları çalışılırken rehberlik edebilir.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Önerilen projenin amacı DMLS metodu ile üretilecek parçalar için kullanıcılara rehberlik edecek proses haritasını Ti-6AI-4V süperalaşımı için oluşturmak, ve üretim kalitesini arttırmaya yönelik etkenlerin anlaşılmasını sağlamaktır. Proje adımları; DMLS metodu için 0-370 W aralığında proses haritası oluşturmak, bu haritadaki parametrelerdeki eriyik metal havuz geometrilerini incelemek, deneysel sonuçları tahmin edebilecek SEA modelleri oluşturmak, eriyik havuzun parametre değişimine verdiği tepkiyi anlamak, ve son olarak parametre değişimi sırasındaki eriyik havuz geometrisinin istenen eriyik havuz genişliğine veya kesit alanına sahip olmasını sağlayacak ikinci ışının modellenmesidir.

3.1 Proses Haritası Çıkarma için Kararlı Hal Deneyleri

Literatürde rapor edilmiş verileri (Gong vd., 2014) baz alarak daha da kapsamlı deneysel veri ile proses haritası çıkarılması için tek paso deneyleri Şekil 7'deki grafikteki veriler olarak planlanmıştır.



Şekil 7. Yürütülen grup testleri için 44 farklı hız ve güç kombinasyonları.

3.1.1 Tek paso deneyleri

Proje çalışmasında ilk adım olarak 44 farklı proses parametresi ile 4 farklı grup deney planlanmıştır. Bu deneyler tozsuz tek paso dikiş, 30 µm kalınlıkta tek katman toz ile tek paso ve 60 µm kalınlıkta tek katman toz ile tek paso deneyleridir. Bu deneylerin analizleri yapıldıktan sonra 100 µm lazer çapının odaktan saptırılmasıyla 30 µm kalınlıkta tek katman toz ile tek paso olarak 16 farklı proses parametresi ile deneyler yürütülmüştür.

Deneylerin hassas şekilde yürütülebilmesi için Ti6Al4V plakalar 10 µm düzlük toleransının altında kalacak şekilde ürettirilmiştir. Bu sayede 30 µm tozu seren bıçak plaka üstünden geçerken plakaya çarpma gibi bir sorun oluşmamıştır. Plaka boyutları 133 mm x 133 mm x 5 mm olarak ortaya çıkmıştır. Plakalar EOS DMLS cihazının kendi altlığının üzerine vidalar ile

monte edilmiştir Şekil 8'de görüldüğü gibi. Plaka çarpılma kaynaklı düzlük toleransını sağlayabilmesi için taşlandığı vidalanmış halinde deneyler de yürütülmüştür. Deliklerin konumları deneyleri etkilememektedir.



Şekil 8. Ti6Al4V deney plakası EOS Aluminyum plakası üzerinde montaj hali.

Plakalar temin edildikten sonra farklı proses parametreleri ayarlanarak tek paso deneyleri yürütülmüştür. DMLS cihazı EOS M290 1,060 nm sürekli dalga 400 W en tepe lazer gücüne sahiptir. Daha önce planlanan 0-395 W ve 200-3200 mm/s aralığındaki parametrelerde 395 W güçte yürütülecek deney çizgileri 370 W olarak revize edilmiştir. Bunun sebebi EOS cihazının her ne kadar 400 W kapasiteli lazer gücüne sahip olsa da yazılımın maksimum güç olarak 370 W ile sınırlandırma yapmasıdır. Çalışmanın cihazların optimum kullanım şartlarını amaçladığı için biz de cihaz limiti olan 370 W değerine maksimum güç değerlerini revize ettik. Lazer taraması öncesinde cihaz odası ortam sıcaklığı 35 °C'de sabitlenmiştir ve oksijen konsantrasyonu %0.1'in altında tutulmuştur.

İlk deney denemesi tozsuz tek paso için gerçekleştirilmiştir. Şekil 9 tozsuz tek paso deneyi sonrası plaka resmini göstermektedir. Plakada boş alan kalması sebebiyle yuvarlak çizgilerin ne kadar hassas şekilde atıldığını çap boyutuna bağlı olarak gözlemlemek için dairesel lazer çizgileri de denenmiştir. Bu çap boyutlarında herhangi bir ayırt edici farklılığa rastlanmamıştır.



Şekil 9. Tozsuz tek paso deney plakası.

Tozlu deneylerde yine her bir çizginin parametreleri ayrı ayrı tanımlanarak yürütülmüştür. Kullanılan Ti6Al4V metal toz EOS tarafından tedarik edilmiştir. Metal toz gaz atomizasyon yöntemi ile küresel formlar oluşacak şekilde üretilmiştir. Teknik dökümanda Laser Diffraction ISO 13320-1'e göre partikül analiz değerleri D10=25.9 μ m, D50=38.1 μ m ve D90=50.7 μ m olarak gözükmektedir. Kullanılan toz ayrıca partikül analizine sokulmuştur. Shimadzu SALD-2300 cihazı ile Laser Diffraction ISO 13320 metodu ile ölçüm gerçekleştirilmiştir. Modal D=38.8 μ m ve Mean D= 42.3 μ m olarak ölçülmüştür. Değerler D50=42.3 μ m ve D90=62.6 μ m olarak okunmuştur. Ortalama değer iki farklı ölçümde %0.07 fark ile okunmuştur. Tek katman 30 μ m serilerek deneyler yürütülmüştür. Tek katman 60 μ m serilmesi durumu da yürütülmüştür. Bu farklı deneyler ile üretim sırasında katman katman tozların serilmesi ile sabit kalınlıktaki tozun üzerinde proses parametre etkilerinin farklılıkları gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Yürütülmüş deneyler sonucu oluşan plaka görünümleri Şekil 10'da görülebilir.



Şekil 10. Tek katman 30 µm ve 60 µm toz deneyleri plakası.

3.1.2 Deney numunelerinin eriyik havuz geometrilerinin ölçülmesi

Kameralı optik mikroskop altında tek paso çizgileri incelenmiştir. Her çizgi üç farklı bölgede kaydedilmiştir. Daha sonra ImageJ açık kaynak görüntü işleme yazılımıyla çizgi kalınlık ölçüleri hesaplanmış ve alınan değerlerin ortalamaları bulunmuştur. Şekil 11 farklı parametre çiziklerinin görünümlerini sunmaktadır. Şekil 11c'de gözlemlenen eriyik havuz yüzey gerilimi kaynaklı topaklanma oluşumu ve stabil olmayan tek paso dikişlere örnektir. Tek paso çizgi kalınlığı eriyik havuz genişliğine denk gelmektedir.

İncelemeler sonlandıktan sonra plaka tel erezyon ile kesilmiştir. Her çizgi için merkezden 5 mm aralıkla 3 ayrı numune kesilmiştir. Bu sayede eriyik havuz kesit geometri ölçümleri alınabilmesi için bakalit kalıplama ve metalografik işlemler yapılabilmiştir. 240 ve 800-grit silisyum karbür zımpara kağıdı ile bakalit kalıba alınan numuneler zımparalanmıştır, 1-9 µm monokristal elmas solüsyon ile ince zımparalama gerçekleştirilmiştir, 0.03 µm colloidal silica ile son parlatma işlemi uygulanmıştır, ve son olarak Kroll ayıracı ile dağlama yapılmıştır. Kroll dağlama solüsyonu 91 ml su, 6 ml HNO₃ ve 3 ml HF karışımıdır. Karışımda yaklaşık 30 s numuneler tutulmuştur. Sonrasında ethanol uygulanarak kurutma gerçekleştirilmiştir. Elde edilen numuneler tekrar optik mikroskop altında incelenmiş. Eriyik havuz geometrisini tanımlayan parametreler Şekil 12'de sunulmuştur. Kesit alan resimleri her deney grubu için çıkarılmış ve kesit alan görünümlerinden seçilen parametrelerin imalat için uygun olup olmayacağı kararlaştırılmıştır. Şekil 13 30 µm kalınlık toz ile tek pasolu dikiş deneyleri için oluşturulmuş resimleri içermektedir.



Laser Path

200 µm

Şekil 11. Farklı karakteristiğe sahip 30 μ m kalınlık toz ile tek pasolu dikiş görünümleri. (a) 50 W & 200 mm/s, (b) 250 W & 1200 mm/s, and (c) 350 W & 2000 mm/s.







Şekil 13. 30 μm kalınlık toz ile farklı proses parametre kombinasyonları sonucu oluşmuş eriyik havuz kesitleri.

3.2 Odaktan Saptırılmış Lazer Tek Paso Deneyleri

Lazer çapı değişimi deneyleri ile planlanan imalat hızlarını arttırabilmek için daha yüksek güçleri kullanarak daha geniş alanları stabil şekilde eritebilmektir. Bu amaçla farklı lazer odak çapları ile seçilen parametrelerin tek paso deneyleri 3.1.1'deki gibi gerçekleştirilmiştir. Diğer tek paso deneylerindeki plaka kullanılmıştır. Plaka cihazın ayarlarındaki odak düzleminden aşağıya indirilerek lazer ışınının plakaya çarptığı düzleme ıraksayarak gelmesi sağlanmıştır ve bu

şekilde odaktan saptırma pozitif defokus olarak tanımlanmıştır (Bean, Witkin, McLouth, Patel, & Zaldivar, 2018). Metelkova vd. pozitif ve nagatif defokusun eriyik havuz geometrisine etkilerini araştırmış ve 316L için eriyik havuz derinliğinin ıraksayan ışında daha düşük olduğunu saptamışlardır (Metelkova, Kinds, Kempen, Formanoir, & Witvrouw, 2018). İmalatta kullanımı uygun olmayan yüksek ve düşük enerji yoğunluğundaki proses parametreleri elimine edilmiştir. Odaktan sapmaya göre oluşan Gaussian odak çapı değerleri EOS tarafından temin edilen cihazın kalibrasyon verileri incelenerek meydana getirilmiştir. Şekil 14 %95 transmisyon ışın çapı *D* değerlerini odaktan saptırmaya göre çizmiştir. Odak düzleminde ölçülen çap = 100 µm. Lazer odak çapı 260 µm, 242 µm, 220 µm, 200 µm, 160 µm, 130 µm ve 100 µm olan tek paso deneyleri Tablo 1 deki parametreler ile çizilmiş ve numunelerin kesitleri incelenmiştir. Porozitesi olmayan ve anahtar deliği tahribatına sahip olmayan numunelerin üretim hızı kıyaslamaları yapılmıştır.

Güç (W)	100, 150, 200, 250, 370
Hız (mm/s)	200, 400, 800, 1,200, 1,600, 2,000
Odaktan sapma (mm)	0, 3, 5, 7, 8, 9, 11
Işın Çapı (µm)	100, 130, 160, 200, 220, 242, 260

 Tablo 1 Odaktan saptırılmış lazer tek paso deneyleri parametreleri.



Şekil 14. Odaktan sapma mesafesine göre ölçülen lazer ışın çapı.

Şekil 15 aynı proses parametresi 370 W ve 800 mm/s için farklı lazer çaplarındaki kesit diyagram farklarını ortaya koyar. Görüldüğü gibi lazer çapı arttıkça eriyik havuz genişliği artmakta ve derinlik azalmaktadır. Elde edilen değerler ile metal yığma oranları farklı çap üretimler için hesaplanmıştır.



Şekil 15. 370 W ve 800 mm/s parametresi ile 30 μ m toz katmanı ile 81 μ m, 130 μ m ve 160 μ m lazer çapı ile taranmış kesit görüntüleri.

3.3 Sonlu Eleman Analiz Modelleme

Eklemeli imalat için kullanıma sunulan Autodesk firmasının Autodesk Netfabb Local Simulation 2018.2 akademik yazılımı temin edilmiştir. Modeller bu yazılım ile oluşturulmuş ve koşturulmuştur. Model doğruluğu sıcaklığa göre değişmeyen malzeme özellikleri tayin edilerek ve sadece iletkenlik hesaba katılarak analitik çözüm ile kıyaslanmıştır. %5 bir fark olduğu gözlenmiş ve bu değer de analitik çözümün ısıl kaynağı noktasal uygulaması sebebiyle olduğu olarak yorumlanmıştır. Proses modellerinde kondüksiyon, konveksiyon ve ışınım fenomenleri hesaba katılmıştır. Ti6Al4V malzemesi özellikleri ısıya bağlı değişkenlikleri modelde hesaba katılmıştır. Modelde serilen toz katmanı farklı malzeme özellikler atanarak simule edilmiştir. Toz katmanın ısıl iletkenlik katsayısı döküm malzeme katsayısının yüzde biri olarak hesaplanmıştır.

ısıl iletkenlik çok düşüktür. Model toz sıcaklığı erime sıcaklığının üstüne çıktığında toz özelliklerini o eleman için döküm özelliklerine dönüştürmektedir.

Lazer noktasının modellenmesi için ise Goldak double volumetric ellipsoid model kullanılmıştır (Goldak, Chakravarti, & Bibby, 1984). Bu modelleme ile lazerin yüksek enerji parametrelerinde derin eriyik havuz oluşumuna Şekil 16b' de görüldüğü gibi sebep vermesi de modellenebilir. Şekil 16 model sıcaklık dağılımları görünümünü göstermektedir. Birçok farklı parametrede modeller koşturulmaktadır ve erime sıcaklığı sınır çizgileri çizilerek eriyik havuz derinlik ve genişlikleri hesaplanabilmektedir.



Şekil 16. Simülasyon sıcaklık dağılımı görünümleri.

3.3.1 Isı transferi mekanizması

Eklemeli imalatta malzemenin katman olarak eklenebilmesi için ısı kaynağı ışınlama ile malzemeyi eritip katmanın alttaki yüzey ile bağ oluşturmasını sağlar. Isı yayılımı konveksiyon ve ışınım ile serbest yüzeylerden, kondüksiyon ile de alt tabakada gerçekleşir (Schoinochoritis vd., 2015). Kapalı bir sistemde enerji dengesi denklemi:

$$Q_A = Q_{KD} + Q_{KV} + Q_I \tag{2}$$

Burada Q_A ısı akışı, Q_{KD} kondüksiyon ısı transferi değeri, Q_{KV} konveksiyon ısı transferi değeri ve Q_I ışınım ısı transferi değeridir.

Modelde üst yüzeyden ışınım ve konveksiyon ile ısı kayıpları hesaplamalarda dahil edilmiştir. Isı modeli kondüksiyon ve faz dönüşümünü hesaba katan korunum denklemiyle çözdürülmüştür (Hu & Kovacevic, 2003).

$$Q + \nabla (k\nabla T) = \frac{dT}{dt} (\rho c_p T)$$
(3)

Denklemde, Q ısı kaynağı, k ısıl iletkenlik, T sıcaklık, ρ yoğunluk, c_p özgül ısı kapasitesi ve t zamanı sembolize eder.

Isı kaynağı 3B olarak tanımlanmış ve bu sayede gerçekçi eriyik havuz geometri tahminleri sağlanmıştır. Literatürde birçok 3B ısı kaynağı modeli olmasına karşın tahmin değerleri birbirine çok yakındır (Zhang et al., 2019). Bu çalışmada Goldak çift ellipsoid ısı kaynağı modeli kullanılmıştır (Goldak et al., 1984):

$$Q = \frac{6\sqrt{3}P\eta}{abc\pi} e^{-\left[\frac{3x^2}{a^2} + \frac{3y^2}{b^2} + \frac{3(z+vt)^2}{c^2}\right]}$$
(4)

Denklemde, *a, b* ve *c* hacimsel elipsoidi tanımlar. Yerel koordinatlar *x, y* ve *z* ile tanımlanır. *P* lazer gücünü, η absorpsiyon verimliliğini temsil eder. Eriyik havuz modelini en iyi şekilde temsil etmesi için güç yoğunuğu dağılımı lazerin önünde 0.3 ve arkasında 0.7 olacak şekilde dağılmıştır (Goldak et al., 1984). Bu çalışmada *a* ve *b* sabitleri 1 olarak alınmıştır. Bu da *x-y* düzleminde Gaussian dağılıma eşittir. Şiddetin *z* yönündeki şiddeti ise *c* parametresine bağlıdır. Deneysel sonuçlar elde edildikten sonra simülasyonların doğru tahminde bulunabilmesi için *c* parametresinde iterasyonlar uygulanmıştır. Modelin farklı proses parametrelerini de doğru tahmin edebilmesi için elde edilen *c* parametre verileriyle ikinci dereceden parametreyi tayin eden polinom denklemi çıkarılmıştır.

$$c = 0.5597 + 0.05311 P - 0.006504 V - 1.506 \times 10^{-5} P^2 - 2.914 \times 10^{-5} PV + 3.90310^{-6} V^2$$
(5)

3.3.2 Malzeme özellikleri

Ti6Al4V alaşımı için malzeme özellikleri termal modelde tanımlanmıştır. Sabit malzeme özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Sıcaklığa bağlı değişiklik gösteren malzeme özellikleri (Kenneth C., 2002) ise Şekil 17'de sunulmuştur. Toz katman için tanımlanan malzeme özellikleri ise farklılık göstermektedir. Isıl iletkenlik toz katmanda denklem 6'ya (Promoppatum et al., 2017) göre ölçeklendirilmiştir.

$$\frac{k_p}{k_s} = \frac{1-\varphi}{1-11\varphi^2}$$

 φ boşluk oranını, k_p toz termal iletkenliğini ve k_s katı termal iletkenliğini temsil eder. Boşluk oranı 0.52 olarak literatüre uyumlu olarak (Promoppatum et al., 2017) alınmıştır. Bu da ölçeklendirme olarak 0.117 değerini ortay koymuştur.



Tablo 2 Termal model malzeme özellikleri.



Bir diğer kritik parametre ise lazer absorpsiyon verimliliğidir. Absorpsiyon verimliliği toz boyutu, toz yoğunluğu, lazer dalgaboyu ve malzeme kompozisyonuna bağlı olarak değişebilir. Toz katmanda toz yüzeylerden çoklu yansıma sonucu absorpsiyon daha fazla olur (Gusarov, 2010). Boley vd. Ti6Al4V için 0.4 ve 0.74 absorpsiyon verimliğini sırasıyla düz metal plaka ve toz katman için ölçmüştür (Boley, Mitchell, Rubenchik, & Wu, 2016). Yakın zamanda yapılan çalışmalar ise absorpsiyon verimliliğinin lazer gücü (Ye et al., 2018) ve hızına (M. Matthews, Trapp, Guss, & Rubenchik, 2018) bağlı olarak değiştiğini deneysel olarak gözlemlemişlerdir. Absorpsiyon verimliliği genellikle hız düşerken ve güç artarken artar. İlave olarak lazer ışın çapı artarsa da verimlilik artar (Ye et al., 2019, 2018). Dolayısıyla simülasyonlarda lazer çapına, lazer gücüne ve hızına göre değişen lazer absorpsiyon verimliliği değerleri kullanılmıştır. Bu değerler deney sonuçlarına göre simülasyonların itere edilmesiyle elde edilmiştir.

3.3.3 Model konfigürasyonu

Simülasyon altlık boyutu Şekil 18(a)'daki görüldüğü gibi x, y ve z yönünde sırasıyla 4.2 mm x 3.9 mm x 4 mm ölçülerine sahiptir. Ek olarak 30 μ m üst katman metal tozları temsil etmesi için eklenmiştir. Toz katman toz malzeme özellikleriyle tanımlanmıştır. Bu elemanlar eriyik sıcaklığının üzerine çıktıktan sonra soğuduklarında dökme malzeme özellikleri atanır. Modelin alt tabakası ve kenarlarında ağ yoğunluğu düşük tutulup, sonuçların analiz edileceği kararlı hal bölgesi olan dikdörtgenin orta üst bölgelerinde ağ kalitesi yükseltilmiştir. Alt tabaka 35 °C sabit sıcaklıkta tutulmuş ve simülasyon başlangıcında bütün elemanlar da 35 °C sıcaklığa sahiptirler.





4. BULGULAR

4.1 Tek Paso Çalışmaları

44 farklı proses parametresi için tek paso deneyleri incelenmiş ve eriyik havuz geometrisinin en önemli iki parametresi olan eriyik havuz derinliği (*d*) ve genişliği (*w*) değerleri tozsuz tek paso deneyi için Tablo 3 ve 4'de, 30 μ m tozlu tek paso deneyi için Tablo 5 ve 6'da ve 60 μ m tozlu tek paso deneyi için Tablo 7 ve 8'de sunulmuştur.

Hız (mm/s)									
Güç (W)	200	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200
50	32	23							
100	200	110	43						
150	356	225	89	53					
200	501	286	132	83	61				
250	621	389	181	111	79	63			
300	733	466	207	137	101	79	70		
350	405	520	276	174	123	96	79	66	
370	969	613	305	171	130	100	86	70	63

Tablo 3 Tozsuz tek paso deney ortalama eriyik havuz derinlik değerleri.

Tablo 4 Tozsuz tek paso deney ortal	lama eriyik havuz genişlik değerleri.
-------------------------------------	---------------------------------------

Hız (mm/s) Güç (W)	200	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200
50	116	98							
100	222	160	110						
150	274	203	153	112					
200	299	216	189	131	111				
250	326	237	181	142	123	119			
300	345	244	193	146	129	122	119		
350	394	259	166	146	125	121	122	119	
370	385	262	168	146	130	123	124	124	127

Hız (mm/s) Güç (W)	200	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200
50	26	22							
100	210	124	46						
150	338	222	90	58					
200	311	305	140	85	60				
250	671	78	183	85	87	67			
300	481	287	221	139	103	79	73		
350	417	606	275	176	92	97	79	73	
370	981	292	186	190	139	103	101	71	63

Tablo 5 30 µm toz katmanlı tek paso deney ortalama eriyik havuz derinlik değerleri.

Tablo 6 30 µm toz katmanlı tek paso deney ortalama eriyik havuz genişlik değerleri.

Hız (mm/s) Güç (W)	200	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200
50	123	92							
100	246	174	116						
150	292	208	153	116					
200	301	217	180	139	105				
250	341	241	164	156	120	113			
300	405	297	185	160	122	128	117		
350	401	279	180	173	102	122	125	119	
370	384	263	176	163	129	131	127	121	127

Tablo 7 60 µm toz katmanlı tek paso deney ortalama eriyik havuz derinlik değerleri.

Hız (mm/s) Güç (W)	200	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200
50	31	17							
100	154	126	42						
150	364	218	93	54					
200	519	295	134	86	61				
250	636	412	184	111	83	68			
300	828	454	241	144	98	83	69		
350	698	577	296	178	123	95	79	66	
370	1014	512	285	172	125	104	88	70	64

Hız (mm/s)									
Güç (W)	200	400	800	1200	1600	2000	2400	2800	3200
50	134	98							
100	177	162	112						
150	277	206	155	110					
200	303	225	184	137	112				
250	339	234	195	148	123	116			
300	344	272	180	155	132	122	120		
350	278	271	173	169	130	123	121	120	
370	377	309	208	183	130	129	125	128	125

Tablo 8 60 µm toz katmanlı tek paso deney ortalama eriyik havuz genişlik değerleri.

Lazer gücü ve hızına bağlı olarak verilen değerleri tek bir değişkene bağlı olarak sunmak için lineer enerji yoğunluğuna (*LED*) bağlı olarak sonuçlar grafikte kıyaslanmıştır. *LED* gücün hıza oranı ile bulunur (Wang, Wei, Shi, Liu, & He, 2011).

$$LED = \frac{G\ddot{u}c}{H\iota z}$$
(7)

Deney sonuçları derinlik için Şekil 19 ve genişlik için Şekil 20'de grafik olarak çizdirilmiştir. Eriyik havuz derinlik ve genişlik artışı *LED*'e bağlı olarak lineer bir artış göstermektedir. Tozsuz tek paso deneyi ve farklı kalınlıktaki tozlu deneyler arasındaki farklılıklar herhangi bir trend izlememektedir. Oluşan farklılıklar proses değişkenliği ve tek paso çizgisi boyunca meydana gelen eriyik havuz geometrisindeki sapmalar ile açıklanabilir. Dolayısıyla ilerleyen bölümlerde daha çok tercih edilen 30 µm katman kalınlığı analizlerine yoğunlaşılmıştır.



Şekil 19. Lineer enerji yoğunluğuna bağlı derinlik grafiği.



Şekil 20. Lineer enerji yoğunluğuna bağlı genişlik grafiği.

LED'e bağlı olarak genişlik ve derinlik lineer olarak artış trendine sahip gözükmekle beraber, aynı LED değerinde farklı genişlik ve derinlik değerlerine sahip deney sonuçları da gözlenmektedir. Dolayısıyla lazer gücü ve hızına bağlı olan değişimleri de ayrıca incelemek önemlidir.

Deney sonuçları incelenirken karşılaşılan bir durum ise DMLS sisteminin güvenilirliği üzerine olmuştur. Şekil 21(a) 30 µm toz kalınlığı tek paso deneylerindeki 200 W ve 400 mm/s proses parametre çizgisinin kesitini gösterir. Şekil 21(b) ise aynı hızda 250 W güçle taranan pasoyu gösterir ve bu kesit çok daha düşüktür. Bu da cihazda nadir de olsa oluşabilen dengesizliğe işaret eder. Benzer dengesizlik sonucu aynı EOS cihazında Gong vd. tarafından rapor edilmiştir (Gong, Christiansen, et al., 2014). Bu da imalat sırasında proses parametrelerinin doğru tatbik edildiğinin kontrol edilmesi gerekliliğine işaret eder.



Şekil 21. Eriyik havuz kesit görünümleri **(a)** 200 W & 400 mm/s ve **(b)** 250 W & 400 mm/s. Çok daha düşük eriyik kesit alanine sahip (b) (a)'ya kıyasla daha düşük enerji yoğunluğunda paso atıldığını belirtir.

Tek paso deneyleri simülasyon sonuçları tozsuz ve 30 µm katman kalınlığı tozlu hal için sunulmuştur. Simülasyonlarda tozsuz için 0.75 lazer absorpsiyon verimliliği ve tozlu için 0.85 değeri kullanılmıştır. Bu simülasyonlar koşturulurken sadece Goldak ısı kaynağının *c* parametresi itere edilmiştir. Farklı güç seviyelerinde 400 mm/s ve 800 mm/s lazer hız kombinasyonları için eriyik havuzu alan grafiği Şekil 22'de çizilmiştir. Çember ve kare işaretler sırasıyla tozsuz ve tozlu ortalama deney sonuçlarını simgeler. Ortalamadan sapma oranı farklı proses parametreleri için %1 – %36 aralığındadır. Tozlu deney kesit alanı %21'e kadar daha büyüktür. Mavi işaretler grafikte 400 mm/ ve kırmızı olanlar 800 mm/s lazer hızlarını temsil eder. Artan hız ile eğimin azaldığı gözlenmiştir. Aynı trendler simülasyon sonuçlarında da yakalanmıştır.





Eriyik havuz kesit alan verilerine ek olarak eriyik havuz derinliği ve genişliği de tozsuz Şekil 23'de ve tozlu şartlar için Şekil 24'de çizilmiştir. Eriyik havuz genişliği 300 W'a kadar lineer artış göstermiş ve sonrasında ihmal edilebilecek seviyede değişiklik göstermiştir. Eriyik havuz derinliği ise lazer gücüne bağlı olarak lineer bir artış göstermiştir. Artış eğimi lazer hızı artınca düşmüştür. Simülasyon sonuçları deney sonuçlarına yakınsamış ama tahmin edilen değeler deney sonuçlarına göre düşük kalmıştır. Bunun bir sebebi modellemenin eriyik havuz içindeki sıvı kaynaklı konveksiyon etkilerini hesaba katmaması olabilir. Takip eden bölüm 4.2'de geliştirilmiş simülasyon sonuçları sunulacak ve modelin daha iyi tahminde bulunduğu gösterilecektir.



Şekil 23. Eriyik havuz genişliği (a & b) ve derinliği (c & d) lazer gücüne bağlı tozsuz durum için.



Şekil 24. Eriyik havuz genişliği **(a & b)** ve derinliği **(c & d)** lazer gücüne bağlı 30 μm katman tozlu durum için. Deneysel gözlemler 44 ayrı tek paso deneyi için yapılmış ve DMLS için 400 W limitli bir cihaz ile Ti6Al4V için proses parametre haritası çıkarılmıştır. Tozsuz deney için Şekil 25 ve tozlu için Şekil 26 hazırlanmıştır. Kırmızı işaretler eriyik havuzda boşluk olan proses parametrelerine işaret eder. Siyah işaretli veriler zayıf penetrasyonu simgeler. Mavi ile işaretli kombinasyonlar topaklanma olmamış ama distorsiyon gözlemlenen çizgileri temsil eder. Bu literatürde kamburlaşma (humping) olarak da tanımlanır (Katayama, 2013). Yeşil işaretler gözenek içermeyen ve stabil izlere sahip kombinasyonları belirtir. Proses parametre haritasında gri ile taralı bölge imalat için kullanıcıların tercihlerini yapabileceği bölgedir. Kullanıcı bu bölgeden seçtiği proses parametresi ile başlayarak kendi ihtiyacını karşılayacak kombinasyonu fazla iterasyon yapmadan karşılayabilir.



Şekil 25. Ti6Al4V için tek paso proses parametre haritası. Tozsuz durum.



Şekil 26. Ti6Al4V için tek paso proses parametre haritası. 30 µm tozlu durum.

4.2 Odaktan Saptırılmış Tek Paso Çalışmaları

Proses parametrelerine bağlı olarak eriyik havuz alanı farklı şekillerde oluşabilir. Yüksek hızlarda düşük enerji yoğunluğu sebebiyle damlacık oluşumu (Yadroitsev et al., 2010) Şekil 27(a)'daki gibi gözlemlenebilir. Şekil 27(b)'de gözlemlendiği gibi yarı dairesel kesit alanı oluştuğunda iletken mod (conductive mode) durumu meydana gelmiştir. Yüksek enerji yoğunluğunda ise anahtar deliği şeklinde eriyik havuz alanı oluşumu ve soğuma sırasında da gözenek oluşumu Şekil 27(c)'de gözüktüğü gibi genellikle oluşur. Odaktan saptırma stratejisi sayesinde anahtar deliği formundan yarı dairesel forma daha büyük lazer çapı sayesinde kavuşulabilir.



Şekil 27. Tek paso eriyik havuz kesit alan tasvirleyici fotoğrafları. (a) Yüksek hız ve düşük enerji yoğunluğuyla instabil tek paso damlacık formlara dönüşmüştür, (b) iletken mod yarı dairesel eriyik havuz kesit alanı oluşturmuştur, (c) yüksek derinlik genişlik oranına sahip anahtar deliği formu.

Odaktan saptırılmış tek paso deney sonuçları eriyik havuz formlarını açıklamıştır. Tüm farklı ışın çapları (Tablo 1) için dört farklı proses parametresi kesit alanları Şekil 28'de sunulmuştur. Işın çapı arttıkça eriyik havuz derinliği daha yası bir hal almıştır, *derinlik/genişlik* düşmüştür. Lazer gücü 150 W ve hızı 200 mm/s kombinasyonu için anahtar deliği kaynaklı gözenek D = 160 µm'de lazer çapı arttıkça kaybolmuştur. Benzer durum 250 W ve 200 mm/s durumu için de geçerlidir. Bu sefer D = 220 µm'den sonra gözenek kaybolur. D = 160 µm de oluşan yarı dairesel yapı cihazdaki stabilizasyon probleminden dolayı kaynaklanmış olabilir. Bu çizgi daha düşük bir enerji yoğunluğunda taranmış olabilir. Şekil 28'deki üçüncü satırda yüksek enerji yoğunluğu sebebiyle tüm lazer çaplarında anahtar deliği oluşumu gözlenmiştir. Derinliğin daha yüksek lazer çaplarında daha derin olması ise eriyik havuzun anahtar deliği formunda derinliğinin dalgalanmasıyla açıklanabilir (Cunningham et al., 2019). Son satıra ise düşük enerji yoğunluğu yine aynı eriyik havuz derinliği değerleri ile sonuçları vermiştir. Bu sonuçlar ise 200 W ve 800 mm/s düşük enerji yoğunluğunda lazer absorpsiyon verimliliği büyük lazer çapında daha fazla olabileceği (Ye et al., 2019) tahmini ile açıklanabilir.





Şekil 29(a) yedi farklı ışın çapı için derinlik değerlerini sunmaktadır. Grafikteki her bir işaret ölçümü yapılan üç ayrı numunenin ortalama değerine denk gelmektedir. Bağıl standart sapma %1 ve %65 arasında değişmektedir. Anahtar deliği modu genellikle daha geniş sapmalara neden olur. Şekil 29'daki farklı renkteki çizgiler altı farklı proses parametresini temsil etmektedir. Grafikte trendlerin açık şekilde temsili bu parametreler ile yeterlidir. Diğer parametre sonuçları grafiğe bu sebeple eklenmemiştir. Lazer çapı arttıkça ilk aşamada derinlik lineer olarak düşer. Daha sonra düşüş ya durur ya da çok azalır. Yeşil ve turuncu çizgide görülen düşüş sonrası artışlar ise yine anahtar deliği modunun dalgalanmasıyla açıklanabilir. Eriyik havuz genişliği Şekil 29(b)'de incelenebilir. Renkli çizgiler birbirine paralel olarak hizalanmıştır. Yüksek enerji yoğunluğunda daha geniş eriyik havuz değerleri gözlenmiştir. Buna rağmen ışın çapının değişimi eriyik havuz genişliğe etki etmediği başka bir çalışmada da (W. Shi et al., 2018) şahit olunduğu gibi gözlenmiştir. Lazer gücü artarken ve hız düşerken eriyik havuz genişliği ve derinliği artışı da literatür (Kusuma, 2014) ile uyum içindedir.

Stabil proses koşullarını tayin edebilmek için eriyik havuz en-boy oranı (d/w) olarak tanımlanıp kullanılmıştır. Yaklaşık olarak $d/w \ge 0.5$ anahtar deliği moduna geçişe denk gelmektedir (Cunningham et al., 2019; King et al., 2014). Anahtar deliği muhtemel boşluk hatalarına sebep olabileceği için tercih edilmez. Yine de stabil anahtar deliği modu mikroyapıyı ve mekanik özellikleri iletken moda göre iyileştirebilir (Aggarwal, Patel, & Kumar, 2019). İlave olarak yüksek malzeme yığma oranları anahtar deliği modunda mümkündür. Bu sebeple hatalı eriyik havuza kadar olan parametreleri tayin edebilmek önemlidir. Deneysel veri hacimsel enerji yoğunluğunu (*VED*) d/w ile korele etmek için kullanılmıştır.

Hacimsel enerji yoğunluğu stabil sınır şartlarını bulabilmek için kullanılmıştır (Aggarwal et al., 2019; Scipioni Bertoli, Wolfer, Matthews, Delplanque, & Schoenung, 2017).

$$VED = \frac{P}{\nu \times D \times t}$$
(8)

Sonuçlar yedi farklı lazer çapı için 112 veri olarak Şekil 30(a)'da verilmiştir. Her bir işaret grafikteki farklı lazer çapı sonucunu temsil eder ve işi boş işaretler eriyik havuzda gözenekli olduklarını ima etmektedir. *VED* 25'den 600 J/mm³'e kadar artış göstermiştir d/w 0.2'den 2.6'ya kadar artarken. Dağınık veri en-boy oranının farklı çaplar için farklı eğimlere sahip olduğunu tavsiye eder. Eldeki veriye göre d/w = 0.85 gözeneklerin ortaya çıktığı en-boy oranı eşiidir.



Şekil 29. Ölçülen eriyik havuz **(a)** derinliği ve **(b)** genişliği farklı lazer çapına bağlı olarak. Farklı renk çizgiler farklı proses parametrelerini temsil etmektedir.

Mevcut deneysel veriler ile sınır şartları tanımlamak için başka bir şekil daha çizdirilmiştir. Hann vd. tarafından türetilen normalize entalpi (Hann, Iammi, & Folkes, 2011) lazer çapı ile normalize edilmiş derinliğe bağlı olarak grafiği çıkarılmıştır (King et al., 2014). Bu da farklı lazer çapı için anahtar deliği eşiğini tayin etmeye yaramıştır. Metelkova vd. benzer şekilde 316L için grafikler sunmuştur (Metelkova et al., 2018). Normalize entalpi denklemi aşağıdaki gibidir (Hann et al., 2011):

$$\frac{\Delta H}{h_s} = \frac{\eta P}{\pi h_s \sqrt{\alpha \nu D^3}} \,, \tag{9}$$

 h_s erime noktasında entalpiyi simgeler ve α termal yayılırlığı temsil eder. Tablo 9 normalize entalpi hesaplanırken Ti6Al4V için kullanılan sabitleri sunar (Rai, Elmer, Palmer, & Debroy, 2007). Absorpsiyon verimliliği 0.5 sabit olarak kullanılmıştır gerçekte değişken bir parametre olduğu unutulmamalıdır.

Tablo 9 Normalize entalpi hesabında kullanılan sabitler.

Özellik	Değer ve Ünite
η (absorpsiyon verimliliği)	0.5
ρ (yoğunluk)	4,000 (kg/m³)
h _s (erime noktasında entalpi)	1.2×10 ⁶ (J/kg)
α (termal yayılırlık)	1.07×10 ⁻⁵ (m²/s)



Şekil 30. En-boy oranı artışı hacimsel enerji yoğunluğuna göre (*VED*). Yedi farklı renkteki işaretler farklı lazer çapı verilerini göstermektedir. İçi boş işaretler eriyik havuzdaki gözenekleri simgeler.

Şekil 31(a)'da en-boy oranı normalize entalpiye bağlı olarak çizdirilmiştir. *VED*'ye bağlı çizdirilmiş Şekil 30'a kıyasla veri çok daha az dağınıktır. *d/w* 0.35 eğim ile artış göstermektedir. Şekil 31(b) düşük veri bölgesini yakınlaştırır ve normalize entalpi 1'den düşük olan bölgede eğim düşmektedir. Ek olarak Şekil 31 $\Delta H/h_s \cong 2.1$ değerini stabil tarama yapmak için eşik olarak belirler. Buradan sonra gözenekli yapılar oluşmaya başlar.

Şekil 32 açık bir şekilde lazer çapı etkilerinin hatalı yapılara olan etkisini sunar. Normalize entalpi ve hacimsel enerji yoğunluğu hatalı yapı eşik değerleri lazer çapına bağlı çizdirilmiştir. Mavi düz çizgi yuvarlak işaretlerle gözenek oluşan normalize entalpi verilerini çizdirmiştir. Bu çizginin yatay seyretmesi eşik değerin lazer çapından bağımsız olduğuna işaret eder. *VED* ise gözenek kusurları için lazer çapıyla beraber artış gösterir. Tek paso izleri stabilite eşik değerleri ise doğrusal olmayan şekilde lazer çapına bağlı olarak düşüş sergiler. Bu da düşük *VED* ve $\Delta H/h_s$ değerlerinin stabil olmayan taramalara sebebiyet vereceği anlamına gelir.



Şekil 31. En-boy oranı normzize entalpi ile artışı. Farklı renk işaretler farklı lazer çaplarını simgeler. İçi boş işaretler eriyik havuzdaki gözenekleri simgeler. Dikey kesik çizgi gözenek kusurlarının başladığı eşik çizgisidir.



Şekil 32. Stabil olmayan ve gözenek kusurları eşiklerini hesaplanmış normalize entalpi ve *VED* için sunan grafik. Normalize entalpi soldaki *y* ekseninde ve *VED* sağ taraftaki *y* ekseninde çizdirilmiştir. Yuvarlak işaretler anahtar deliği ve kare işaretler stabil olmayan kusurların eşiklerini simgeler.

Kusurlu sonuçlara sebebiyet veren proses parametrelerini dışarda bırakarak odaktan saptırılmış lazer taramalarının malzeme yığma oranı performansları Şekil 33'de çizdirilmiştir. Şekil 33'de a – c şekilleri farklı katman kalınlığı serildiğindeki yığma oranlarını sunmaktadır. Şekil 34 farklı katman kalınlığındaki (30 µm, 60 µm ve 100 µm) yığma oranında hesaplanan alanları tasvir etmektedir. Şekil 33(a) maksimum *DR* değeri 5.4 mm³/s olarak *D* = 160 µm için en yüksek lazer gücünde tespit etmiştir. Eğer kullanılan cihaz 200 W ile limitliyse 3.3 mm³/s odaktan saptırılmamış lazer ile maksimum yığma oranını verir. 60 µm katman kalınlığı için 200 W ve 800 mm/s 5.0 mm³/s ve 370 W ve 1200 mm/s 8.6 mm³/s yığma oranlarını verir. Hatalı imalat lazer çap ayarlamasıyla düzeltilebilirliği grafiklerden anlaşılmaktadır. Katman kalınlığı arttıkça alternatif proses parametre sayısının azaldığı gözlenmektedir Şekil 33(c).



Şekil 33. Farklı proses parametrelerindeki yığma oranları. Her bar farklı lazer çapını simgeler. **(a)** 30 μm derinlik, **(b)** 60 μm derinlik, ve **(c)** 100 μm derinlikteki yığma oranı hesaplamaları.





Odaktan saptırılmış tek paso deneyleri prosesin hatasız işlenebilecek bölgelerinin tanımlanmasına aydınlık getirmiştir. Fakat farklı tarama stratejileri, kenar etkileri ve toz farklılıkları eriyik havuzda farklılıklara neden olabilir. Değişkenleri hesaba katıp doğru tahminler yapabilmek için prosesin nümerik modeli kritik öneme sahiptir. Şekil 35 eriyik havuz derinliğini ve Şekil 36 genişliğini tahminlerini deneyler ile kıyaslamıştır. 6 farklı proses parametresi 100 µm, 130 µm, 200 µm, ve 260 µm lazer çapı için koşturulmuş ve analiz edilmiştir. Simülasyon tahminleri deney sonuçlarına yakın sonuçlar vermiştir. Eriyik havuz ortalama hatası %10.3'dür. 370 W and 400 mm/s gibi yüksek enerji yoğunluğundaki parametreler hatanın artmasına sebep olmaktadır. Yine de simülasyon tahminleri taramanın doğru stratejiye sahip olduğunu ve hatalı olup olmayacağını kullanıcıya bildirecek derecede doğruluğa sahiptir. Eriyik havuz genişliği tahminler ise sadece ortalama %3.8 hatalıdır. Bu sonuçlar da gelişmiş modelin lazer çapını hesaba katarak çok geniş bir proses parametre aralığında doğru modellemeler yapılabileceğini göstermektedir.



Şekil 35. Eriyik havuz derinliği deney ve simülasyon sonuçları. Geometrik ve matematiksel işaretler sırasıyla simülasyon ve deney sonuçlarını temsil eder. Aynı renk işaretler aynı proses parametresine denk gelir. (a) $D = 100 \mu$ m, (b) $D = 130 \mu$ m, (c) $D = 200 \mu$ m, (d) $D = 260 \mu$ m.



Şekil 36. Eriyik havuz genişliği deney ve simülasyon sonuçları. Geometrik ve matematiksel işaretler sırasıyla simülasyon ve deney sonuçlarını temsil eder. Aynı renk işaretler aynı proses parametresine denk gelir. **(a)** $D = 100 \mu$ m, **(b)** $D = 130 \mu$ m, **(c)** $D = 200 \mu$ m, **(d)** $D = 260 \mu$ m.

4.3 Geçici Hal Çalışmaları

Tek paso deneyleri ile doğruluğuna güvenilen sonlu eleman analiz modeli ile geçici hal eriyik havuz detayları çalışılmıştır. Seçilen ilk lazer gücü ve hızı proses parametreleri ile kararlı hale eriyik havuz ulaştıktan sonra parametreler aniden Tablo 10'da verilen 2. Lazer güç ve hız değerlerine dönüştürülmüştür. Yeni kararlı hale dönüşümleri ne kadar bir alanda geçekleştiği çalışılmıştır. Lazer çapı tüm parametreler için 220 µm'dir. Seçilen parametreler hassas imalat veya yüksek yığma oranı parametreleri arasındaki geçişi gözlemlemek için seçilmiştir ve kusurlara sebep olan parametreler seçilmemiştir.

Tablo 10	Geçici hal	tek paso	parametreleri.
----------	------------	----------	----------------

Vaka	1. Lazer Gücü (W)	1. Lazer Hızı (mm/s)	2. Lazer Gücü (W)	2. Lazer Hızı (mm/s)
1	200	400	370	400
2	370	400	200	400
3	250	800	370	400
4	370	400	250	800

Vaka 1 hassas bölgenin taranmasından sonraki yüksek yığma oranı ile üretilebilecek bölge taramasına geçişi simgeler. Tam tersi de vaka 2'de ele alınmıştır. Vaka 3 ve 4'de aynı mantıkla farklı parametreleri çalışılmıştır.

Geçici hal eriyik havuz uzunluğu yaklaşık 250 µm olarak Şekil 37'de görüldüğü gibi ölçülmüştür. Yüksek lazer gücünden düşüğe ve düşükten yükseğe geçiş arasında can alıcı bir fark yoktur.





Simülasyonlara ilave olarak tek paso deneyleri de EOS M290 ile yapılmaya çalışılmıştır. Tek paso çizgisi taranırken parametre değişikliğine sistem izin vermemiştir. İki ayrı çizgi tanımlanıp uç uca ekleme yapılıp taramalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 38 bu denemelerin üstten görünümünü sunmaktadır. Görüldüğü gibi sistem çizgiyi attıktan sonra durup yeniden başlamıştır. Bu davranışta geçici hal denemelerini yapmaya uygun değildir. Geçici hal deneyleri ileride uygun sistemin bulunması ile yapılabilecektir.



Şekil 38. Geçici hal tek paso denemesi üstten görünümü.

4.4 İkincil Lazer Işın Etkisi

Lazer taraması sırasında sistemdeki dengesizlik sonucu anlık lazer gücü düşüşü olabilir veya parametre değişimi düşük enerji yoğunluğundan yükseğe doğru gerçekleşmesi gerekebilir. Bu senaryoları baz alarak ikinci bir lazerin geçici hal dönüşümünü hızlandırmasında yardımcı olacağı düşünülmüştür. Vaka 1 ve vaka 3 parametreleri Şekil 39'da ikinci lazerli ve hariç olarak kıyaslanmıştır. İkinci lazerin sisteme dahil olmasıyla kararlı haller arasındaki dönüşüm mesafesi çok daha kısalmıştır. Vaka 1 için ikinci lazer aynı hızda 370 W olarak simüle edilmiştir. İkinci lazer ışını parametre değiştiği anda aynı noktada aktif edilmiş ve 50 µm boyunca tarama yapıp kapanmıştır. Vaka 3'de ise ikinci lazer 200 W gücünde 400 mm/s hızla dönüşümün 50 µm gerisinden başlamış ve 100 µm tarama yapıp kapanmıştır.



Şekil 39. İkinci lazer ışınlı ve ışınsız geçici hal eriyik havuz genişliği.

Elde edilen sonuçlar DMLS cihaz kontrol sitemlerindeki geri besleme ve ileri beslemelerinde ikinci lazerin faydalı olabileceğini göstermektedir. Daha kapsamlı deneysel çalışmalar gelecek çalışmalara bırakılmıştır.

5. TARTIŞMA / SONUÇ

Proje kapsamında Ti6Al4V alaşımı için DMLS prosesinde ortaya konan sonuçlar:

- Tek paso deneylerine bağlı olarak proses haritası çıkarılmıştır. Kullanıcılara kusurlu sonuç vermeyecek proses parametreleri rehberlik edebilecektir.
- Odaktan saptırma ile farklı lazer çaplarının proses haritalarını genişletmede kullanılabileceği ortaya konmuştur.
- En-boy oranı 0.85'den fazla olduğunda gözenekli yapıların oluşmaya başladığı sonucuna varılmıştır.
- Gözenekli yapı eşik değerleri için VED ve Δ*H*/*h_s* lazer çapına bağlı olarak çalışılmıştır. Normalize entalpi değeri lazer çapı etkisinden bağımsız kullanıcıya hatalı üretim hakkında bilgi verebilmektedir.
- Yüksek malzeme yığma oranları farklı lazer çaplarıyla mümkün hale gelebilir. Fakat 200
 W ile limitli sistemler için 100 µm lazer çapı ideal olarak ortaya çıkmıştır.
- Oluşturulan SEA modeli lazer absorpsiyon verimliliği değişimini ve 3B ısı kaynağı geometrisini parametrelere göre değiştiren bir model olarak meydana getirilmiştir. Yöntem herhangi bir yazılıma entegre edilebilir.
- Geçici hal eriyik havuz geometrileri uygun parametreler ile çalışılmıştır.
- İkinci ışının proses güvenilirliğini arttırmadan kullanılabilirliğinin modelleme ile uygun olduğu gösterilmiştir.

Proje çıktıları aşağıdaki şekilde ortaya çıkmıştır:

- Soylemez, E. "Modeling The Melt Pool Of The Laser Sintered Ti6al4v Layers With Goldak'S Double-Ellipsoidal Heat Source." *Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, USA*. 2018.
- "High Deposition Rate Approach of Selective Laser Melting Through Defocused Single Bead Experiments and Thermal Finite Element Analysis for Ti-6AI-4V" ADDMA_2019_919, Additive Manufacuting, (Under Review)
- Soylemez, E. "TRANSIENT MELT POOL MODELING FOR THE ABRUPT PROCESS PARAMETER CHANGE IN SELECTIVE LASER MELTING PROCESS", AMCTURKEY Conference, 2019 (Accepted)
- Soylemez, E., Koc, E. and Coskun, M., Thermo-Mechanical Simulations of Selective Laser Melting for AlSi10Mg Alloy to Predict the Part Scale Deformations PIAM-D-18-00022R4, Progress in Additive Manufacturing (Under Review)

6. KAYNAKÇA

- 3D Printing Aircraft Parts | GE Global Research. (2015). Retrieved October 10, 2015, from http://www.geglobalresearch.com/innovation/3d-printing-creates-new-parts-aircraft-engines
- 4WEB Medical. (2015). Retrieved October 10, 2015, from http://4webmedical.com/about/

Additive Manufacturing - Linear Mold. (2015). Retrieved October 10, 2015, from http://www.linearmold.com/additive-manufacturing/

- Aggarangsi, P., Beuth, J. L., & Gill, D. D. (2004). Transient Changes in Melt Pool Size in Laser Additive Manufacturing Processes. *Proceedings of the 15th Solid Freeform Fabrication Symposium*, (2000), 163–174.
- Aggarwal, A., Patel, S., & Kumar, A. (2019). Selective Laser Melting of 316L Stainless Steel: Physics of Melting Mode Transition and Its Influence on Microstructural and Mechanical Behavior. *Jom*, *71*(3), 1105–1116. https://doi.org/10.1007/s11837-018-3271-8
- Akram, J., Chalavadi, P., Pal, D., & Stucker, B. (2018). Understanding grain evolution in additive manufacturing through modeling. *Additive Manufacturing*, 21(March), 255–268. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.021
- Anthony, T. R., & Cline, H. E. (1977). Surface rippling induced by surface-tension gradients during laser surface melting and alloying. *Journal of Applied Physics*, *48*(9), 3888–3894. https://doi.org/10.1063/1.324260
- ASTM International. (2013). F2792-12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. *Rapid Manufacturing Association*, 10–12. https://doi.org/10.1520/F2792-12A.2
- Bean, G. E., Witkin, D. B., McLouth, T. D., Patel, D. N., & Zaldivar, R. J. (2018). Effect of laser focus shift on surface quality and density of Inconel 718 parts produced via selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 22(March), 207–215. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.024
- Beuth, J, Fox, J., Gockel, J., Montgomery, C., Yang, R., Qiao, H., ... Klingbeil, N. (2013). Process mapping for qualification across multiple direct metal additive manufacturing processes. In 24th International SFF Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2013. Retrieved from http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84898470851&partnerID=MN8TOARS
- Beuth, Jack, Fox, J., Gockel, J., Montgomery, C., Yang, R., Qiao, H., ... Klingbeil, N. (2013). Process Mapping for Qualification Across Multiple Direct Metal Additive Manufacturing Processes Jack. *Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium*, 655–665. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004
- Bian, L., Thompson, S. M., & Shamsaei, N. (2015). Mechanical Properties and Microstructural Features of Direct Laser-Deposited Ti-6Al-4V. *Jom*, *67*(3), 629–638. https://doi.org/10.1007/s11837-015-1308-9
- Boley, C. D., Mitchell, S. C., Rubenchik, A. M., & Wu, S. S. Q. (2016). Metal powder absorptivity : modeling and experiment. *Applied Optics*, *55*(23), 6496–6500.
- Bontha, S., Klingbeil, N. W., Kobryn, P. A., & Fraser, H. L. (2009). Effects of process variables and sizescale on solidification microstructure in beam-based fabrication of bulky 3D structures. *Materials Science and Engineering A*, 513–514(C), 311–318. https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.02.019

- Brecher, C. (Ed.). (2012). *Integrative Production Technology for High-Wage Countries*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Buchbinder, D., Schleifenbaum, H., Heidrich, S., Meiners, W., & Bültmann, J. (2011). High power Selective Laser Melting (HP SLM) of aluminum parts. *Physics Procedia*, *12*(PART 1), 271–278. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.035
- Clijsters, S., Craeghs, T., Buls, S., Kempen, K., & Kruth, J. P. (2014). In situ quality control of the selective laser melting process using a high-speed, real-time melt pool monitoring system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *75*(5–8), 1089–1101. https://doi.org/10.1007/s00170-014-6214-8
- Clymer, D. R., Cagan, J., & Beuth, J. (2017). Power–Velocity Process Design Charts for Powder Bed Additive Manufacturing. *Journal of Mechanical Design*, *139*(10), 100907. https://doi.org/10.1115/1.4037302
- CSIRO. (2015). Cancer patient receives 3D printed ribs in world first surgery. Retrieved October 10, 2015, from http://www.csiro.au/en/News/News-releases/2015/Cancer-patient-receives-3D-printed-ribs-in-world-first-surgery
- Cunningham, R., Zhao, C., Parab, N., Kantzos, C., Pauza, J., Fezzaa, K., ... Rollett, A. D. (2019). Keyhole threshold and morphology in laser melting revealed by ultrahigh-speed x-ray imaging. *Science*, *363*(6429), 849–852. https://doi.org/10.1126/science.aav4687
- EBM for Orthopedic Implants Additive Manufacturing | Arcam AB. (2015). Retrieved October 10, 2015, from http://www.arcam.com/solutions/orthopedic-implants/
- EOS Additive Manufacturing. (2015). Retrieved October 10, 2015, from http://www.eos.info/industries_markets/tooling/injection_moulding
- Fan, Z., & Liou, F. (2012). Numerical Modeling of the Additive Manufacturing (AM) Processes of Titanium Alloy. In A. K. M. N. Amin (Ed.), *Titanium Alloys Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications* (pp. 135–152). IntechOpen. https://doi.org/10.5772/67458
- Fox, J., & Beuth, J. (2013). Process Mapping of Transient Melt Pool Response in Wire Feed E-Beam Additive Manufacturing of Ti-6AI-4V. *Proceedings 2013 Solid Freeform Fabrication Symposium*, (August), 675–683.
- Francis, Z. (2017). *The Effects of Laser and Electron Beam Spot Size in Additive Manufacturing Processes*. Carnegie Mellon University. https://doi.org/https://doi.org/10.1184/r1/6723563.v1
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer*. https://doi.org/10.1520/F2792-12A.2
- Gockel, J., Beuth, J., & Taminger, K. (2014). Integrated control of solidification microstructure and melt pool dimensions in electron beam wire feed additive manufacturing of ti-6al-4v. *Additive Manufacturing*, 1, 119–126. https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.09.004
- Goldak, J., Chakravarti, A., & Bibby, M. (1984). A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical Transactions B*, *15*(2), 299–305. https://doi.org/10.1007/BF02667333
- Gong, H., Christiansen, D., Beuth, J., & Lewandowski, J. J. (2014). Melt Pool Characterization for Selective Laser Melting of Ti-6Al-4V Pre-alloyed Powder. In *Solid Freeform Fabrication Symposium* (pp. 256–

267).

- Gong, H., Rafi, K., Gu, H., Starr, T., & Stucker, B. (2014). Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes. *Additive Manufacturing*, *1*, 87– 98. https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.002
- Gusarov, A. V., Okun'kova, A. A., Peretyagin, P. Y., Zhirnov, I. V., & Podrabinnik, P. A. (2015). Means of Optical Diagnostics of Selective Laser Melting with Non-Gaussian Beams. *Measurement Techniques*, 58(8), 872–877. https://doi.org/10.1007/s11018-015-0810-3
- Gusarov, A. V. (2010). Radiation transfer in metallic-powder beds during laser forming. *Quantum Electronics*, 40(5), 451. https://doi.org/10.1070/QE2010v040n05ABEH013976
- Hann, D. B., Iammi, J., & Folkes, J. (2011). A simple methodology for predicting laser-weld properties from material and laser parameters. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(44). https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/44/445401
- Hooper, P. A. (2018). Melt pool temperature and cooling rates in laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, 22(May), 548–559. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.05.032
- Hu, D., & Kovacevic, R. (2003). Modelling and measuring the thermal behaviour of the molten pool in closed-loop controlled laser-based additive manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 217*(4), 441–452. https://doi.org/10.1243/095440503321628125
- Ilin, A., Logvinov, R., Kulikov, A., Prihodovsky, A., Xu, H., Ploshikhin, V., ... Bechmann, F. (2014). Computer aided optimisation of the thermal management during laser beam melting process. *Physics Procedia*, 56(C), 390–399. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.142
- Jamshidinia, M., Kong, F., & Kovacevic, R. (2013). Numerical Modeling of Heat Distribution in the Electron Beam Melting [®] of Ti-6AI-4V. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135(6), 061010. https://doi.org/10.1115/1.4025746
- Karayagiz, K., Elwany, A., Tapia, G., Franco, B., Johnson, L., Ma, J., ... Arroyave, R. (2018). Numerical and Experimental Analysis of Heat Distribution in the Laser Powder Bed Fusion of Ti-6 Al-4 V. IISE Transactions, 5854, 1–44. https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1461964
- Katayama, S. (Ed.). (2013). Handbook of laser welding technologies (1st ed.).
- Kenneth C., M. (2002). *Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys*. Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-1-84569-990-1.50021-1
- Khairallah, S. A., Anderson, A. T., Rubenchik, A. M., & King, W. E. (2017). Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. Additive Manufacturing Handbook: Product Development for the Defense Industry, 108, 613–628. https://doi.org/10.1201/9781315119106
- Kim, D. S., Bae, S. W., & Choi, K. H. (2007). Development of industrial SFF system using dual laser and optimal process. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(6), 659–666. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2007.02.007
- King, W. E., Barth, H. D., Castillo, V. M., Gallegos, G. F., Gibbs, J. W., Hahn, D. E., ... Rubenchik, A. M. (2014). Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive

manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, *214*(12), 2915–2925. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.06.005

- Kobryn, P. A., & Semiatin, S. L. (2003). Microstructure and texture evolution during solidification processing of Ti–6Al–4V. *Journal of Materials Processing Technology*, *135*(2–3), 330–339. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00865-8
- Körner, C., Attar, E., & Heinl, P. (2011). Mesoscopic simulation of selective beam melting processes. Journal of Materials Processing Technology, 211(6), 978–987. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.12.016
- Kundakcioglu, E., Lazoglu, I., & Rawal, S. (2015). Transient thermal modeling of laser-based additive manufacturing for 3D freeform structures. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1–9. https://doi.org/10.1007/s00170-015-7932-2
- Kusuma, C. (2014). The Effect of Laser Power and Scan Speed on Melt Pool Characteristics of Pure Titanium and Ti-6Al-4V Alloy for Selective Laser Melting The Effect of Laser Power and Scan Speed on Melt Pool Characteristics of Pure Titanium and Ti-6Al-4V alloy for Selective. Wright State University. https://doi.org/10.1007/s10704-016-0096-8
- Lawrence Livermore National Laboratory. (2015). Additive Manufacturing. Retrieved October 10, 2015, from https://manufacturing.llnl.gov/additive-manufacturing/metal-additive-manufacturing
- Masoomi, M., Thompson, S. M., & Shamsaei, N. (2017). Laser powder bed fusion of Ti-6Al-4V parts: Thermal modeling and mechanical implications. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, *118–119*, 73–90. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.04.007
- Matthews, M. J., Guss, G., Khairallah, S. A., Rubenchik, A. M., Depond, P. J., & King, W. E. (2016).
 Denudation of metal powder layers in laser powder bed fusion processes. *Acta Materialia*, 114, 33–42. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.05.017
- Matthews, M., Trapp, J., Guss, G., & Rubenchik, A. (2018). Direct measurements of laser absorptivity during metal melt pool formation associated with powder bed fusion additive manufacturing processes. *Journal of Laser Applications*, *30*(3), 032302. https://doi.org/10.2351/1.5040636
- Megahed, M., Mindt, H.-W., N'Dri, N., Duan, H., & Desmaison, O. (2016). Metal additive-manufacturing process and residual stress modeling. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 5(1), 4. https://doi.org/10.1186/s40192-016-0047-2
- Meier, C., Penny, R. W., Zou, Y., Gibbs, J. S., & Hart, A. J. (2017). Thermophysical Phenomena in Metal Additive Manufacturing by Selective Laser Melting: Fundamentals, Modeling, Simulation and Experimentation. *Arxiv.Org*. Retrieved from http://arxiv.org/abs/1709.09510
- Meta-Council on Emerging Technologies 2015 World Economic Forum. (2015). Retrieved October 10, 2015, from http://www.weforum.org/agenda/2015/03/emerging-tech-2015-additive-manufacturing
- Metelkova, J., Kinds, Y., Kempen, K., Formanoir, C. De, & Witvrouw, A. (2018). On the in fl uence of laser defocusing in Selective Laser Melting of 316L. *Additive Manufacturing*, *23*(August), 161–169. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.006

Montgomery, C., Beuth, J., Sheridan, L., & Klingbeil, N. (2015). Process Mapping of Inconel 625 in Laser

Powder Bed Additive Manufacturing. Proceedings of SFF Symposium, 1195–1204.

- Murr, L. E., Gaytan, S. M., Martinez, E., Medina, F., & Wicker, R. B. (2012). Next Generation Orthopaedic Implants by Additive Manufacturing Using Electron Beam Melting. *International Journal of Biomaterials, 2012*. https://doi.org/10.1155/2012/245727
- Okunkova, A., Volosova, M., Peretyagin, P., Vladimirov, Y., Zhirnov, I., & Gusarov, A. V. (2014). Experimental approbation of selective laser melting of powders by the use of non-Gaussian power density distributions. *Physics Procedia*, *56*(C), 48–57. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.095
- Parry, L., Ashcroft, I. A., & Wildman, R. D. (2016). Understanding the effect of laser scan strategy on residual stress in selective laser melting through thermo-mechanical simulation. *Additive Manufacturing*, 12, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.05.014
- Promoppatum, P., Onler, R., & Yao, S. C. (2017). Numerical and experimental investigations of micro and macro characteristics of direct metal laser sintered Ti-6Al-4V products. *Journal of Materials Processing Technology*, *240*, 262–273. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.10.005
- Rai, R., Elmer, J. W., Palmer, T. A., & Debroy, T. (2007). Heat transfer and fluid flow during keyhole mode laser welding of tantalum, Ti-6Al-4V, 304L stainless steel and vanadium. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(18), 5753–5766. https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/18/037
- Roberts, I. A., Wang, C. J., Esterlein, R., Stanford, M., & Mynors, D. J. (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 and Manufacture*, *49*(12–13), 916–923. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.07.004
- Romano, J., Ladani, L., & Sadowski, M. (2016). Laser additive melting and solidification of Inconel 718: finite element simulation and experiment. *Journal of Metals*, 1–11. https://doi.org/10.1007/s11837-015-1765-1
- Sames, W. J., List, F. A., Pannala, S., Dehoff, R. R., & Babu, S. S. (2016). The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*, 6608(March), 1–46. https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649
- Schleifenbaum, H., Meiners, W., Wissenbach, K., & Hinke, C. (2010). Individualized production by means of high power Selective Laser Melting. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(3), 161–169. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.03.005
- Schoinochoritis, B., Chantzis, D., & Salonitis, K. (2015). Simulation of metallic powder bed additive manufacturing processes with the finite element method: A critical review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. https://doi.org/10.1177/0954405414567522
- Scipioni Bertoli, U., Wolfer, A. J., Matthews, M. J., Delplanque, J. P. R., & Schoenung, J. M. (2017). On the limitations of Volumetric Energy Density as a design parameter for Selective Laser Melting. *Materials and Design*, 113, 331–340. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.10.037
- Shen, N., & Chou, K. (2012). Thermal Modeling of Electron Beam Additive Manufacturing Process– Powder Sintering Effects. Proceedings of the ASME 2012 International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC2012, 287–295. https://doi.org/10.1115/MSEC2012-7253

- Shi, W., Liu, Y., Shi, X., Hou, Y., Wang, P., & Song, G. (2018). Beam diameter dependence of performance in thick-layer and high-power selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Materials*, 11(7). https://doi.org/10.3390/ma11071237
- Shi, X., Ma, S., Liu, C., Chen, C., Wu, Q., Chen, X., & Lu, J. (2016). Performance of high layer thickness in selective laser melting of Ti6Al4V. *Materials*, *9*(12). https://doi.org/10.3390/ma9120975
- Soylemez, E., Beuth, J. L., & Taminger, K. (2010). Controlling melt pool dimensions over a wide range of material deposition rates in electron beam additive manufacturing. In *21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium An Additive Manufacturing Conference, SFF 2010*.
- Soylemez, Emrecan, Beuth, J. L., & Taminger, K. (2010). Controlling Melt Pool Dimensions over a Wide Range of Material Deposition Rates in Electron Beam Additive Manufacturing. *Proceedings 2010 Solid Freeform Fabrication Symposium*, (August), 571–582. Retrieved from http://utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedingsArchive/pubs/Manuscripts/2010/2010-48-Soylemez.pdf
- SpaceX. (2015). SpaceX Launches 3D-Printed Part to Space, Creates Printed Engine Chamber. Retrieved October 10, 2015, from http://www.spacex.com/news/2014/07/31/spacex-launches-3d-printedpart-space-creates-printed-engine-chamber-crewed
- Tang, M., Pistorius, P. C., & Beuth, J. L. (2017). Prediction of lack-of-fusion porosity for powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, *14*, 39–48. https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.12.001
- Thompson, S. M., Bian, L., Shamsaei, N., & Yadollahi, A. (2015). An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics. *Additive Manufacturing*, *8*, 36–62. https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.07.001
- Wang, L., Wei, Q., Shi, Y., Liu, J., & He, W. (2011). Experimental investigation into the single-track of selective laser melting of IN625. Advanced Materials Research, 233–235, 2844–2848. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.233-235.2844
- Wohlers, T. (2019). *Wohlers report 2019 : 3D printing and additive manufacturing state of the industry.* Retrieved from https://wohlersassociates.com/2019report.htm
- Yadroitsev, I., Bertrand, P., & Smurov, I. (2007). Parametric analysis of the selective laser melting process. *Applied Surface Science*, 253(19), 8064–8069. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.02.088
- Yadroitsev, I., Gusarov, A., Yadroitsava, I., & Smurov, I. (2010). Single track formation in selective laser melting of metal powders. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(12), 1624–1631. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.05.010
- Ye, J., Khairallah, S. A., Rubenchik, A. M., Crumb, M. F., Guss, G., Belak, J., & Matthews, M. J. (2019). Energy Coupling Mechanisms and Scaling Behavior Associated with Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing, *1900185*, 1–9. https://doi.org/10.1002/adem.201900185
- Ye, J., Rubenchik, A. M., Crumb, M. F., Guss, G., & Matthews, M. J. (2018). Laser Absorption and Scaling Behavior in Powder Bed Fusion Additive Manufacturing of Metals, 625(C), JW2A.117. https://doi.org/10.1364/cleo_at.2018.jw2a.117
- Zäh, M. F., & Lutzmann, S. (2010). Modelling and simulation of electron beam melting. Production

Engineering, 4(1), 15–23. https://doi.org/10.1007/s11740-009-0197-6

Zhang, Z., Huang, Y., Kasinathan, A. R., Shahabad, S. I., & Ali, U. (2019). 3-Dimensional heat transfer modeling for laser powder-bed fusion additive manufacturing with volumetric heat sources based on varied thermal conductivity and absorptivity. *Optics and Laser Technology*, 109(May 2018), 297– 312. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.08.012

TÜBİTAK PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Dr. Öğr. Üvesi EMRECAN SÖYLEMEZ		
Proje No:	216M033		
Proje Başlığı:	Direkt Metal Lazer Sinterleme Metodu Ile Ti-6al-4v Proses Haritalarının Çıkartılması Ve Geçici Hal Eriyik Havuz Geometrisinin Analizi		
Proje Türü:	3001 - Başlangıç AR-GE		
Proje Süresi:	24		
Araştırmacılar:	EBUBEKİR KOÇ		
Danışmanlar:	ARIF NIHAT GÜLLÜOĞLU		
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İSTANBUL TEKNİK Ü.		
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/07/2017 - 01/07/2019		
Onaylanan Bütçe:	91500.0		
Harcanan Bütçe:	59686.16		
Öz: Anahtar Kelimeler:	Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS) metoduyla proses parametrelerinin tek tek etkilerini incelemek ve bunu parçanın farklı geometrileri için tekrarlamak tasarlanmış parça için parametrelerin bulunması sürecini uzatır ve maliyetleri arttırır. Imalat sırasında ısıl kaynak sebebiyle oluşan eriyik havuz kontrolü parça kalitesinde etkin rol oynamaktadır. Bu geometrinin kontrol edilebilmesi ana proses parametreleri olan ışın gücü ve ışın hızı ile sağlanabilir. Proje kapsamında tek paso eriyik havuz geometri deneyleri ve sonlu eleman analiz (SEA) termal modelleri proses haritalarının oluşturulmasında kullanılmıştır. Proses haritaları sayesinde kompleks parça üretiminde hedeflenen kalitedeki üretime ulaşma süreleri çok daha kısalabilir. Proses haritaları tek paso deneylerinin kararlı hal durumu için yürütülmesiyle ortaya konmuştur. Elde edilen eriyik havuz geometrileri termal SEA modellerin karşılaştırılmasında ve kalibrasyonunda kullanılmıştır. Oluşturulan SEA modeli lazer absorpsiyon verimliliği değişimini ve 3B ısı kaynağı geometrisini parametrelere göre değiştiren bir model olarak meydana getirilmiştir. Elde edilen güvenilir model kararlı hal dışında ve tek paso koşulları haricinde de kullanılabilir. İmalatın hızını arttırabilmek için farklı lazer çapı artışı ve katıman kalınlığı artışı ile yığına oranı yaklaşık 3 kat aratabileceği analiz edilmiştir. Eriyik havuz derinlik-genişlik oranı 0.85?den düşük kaldığı durumlarda imalatın hatasız ürünlere imkan tanıdığı ortaya konmuştur. Gözenekli yapı eşik değerleri için hacimsel enerji yoğunluğu ve normalize entalpi lazer çapına bağlı olarak çalışılmıştır. Normalize entalpi değeri lazer çapı etkisinden bağımsız kullanıcıya hatalı üretim hakkında bilgi verebilmektedir. Parametre değişimi sırasında eriyik havuz davranışı incelenmiş ve sitemdeki lazer performansı anlık değişimi şirasında eriyik havuz davranışı incelenmiş ve sitemdeki lazer performansı anlık değişimin çıktıları olan proses haritaları konu üzerinde çalışan araştırmacılara deneysel veri sunacaktır ve kullanıcıl		
Anahtar Kelimeler:	eklemeli imalat, proses parametre haritası, eriyik havuz geometrisi		
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır		
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Modelling the Melt Pool of the Laser Sintered Ti6Al4V Layers with Goldak?S Double- Ellipsoidal Heat Source (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),		