



Development of a novel industrial metal laser melting device and its performance investigation

Mehmet Alper Demiray^{1*} , Bahri Şekerci² , Mert Gürgeç¹ , Cengiz Kayacan¹ , Cengiz Baykasoglu³

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Suleyman Demirel University, 32260, Cunur, Isparta, Türkiye

²Innovative Technologies Application and Research Center (YETEM), Suleyman Demirel University, 32260, Isparta, Türkiye

³Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Hitit University, 19030, Corum, Türkiye

Highlights:

- Unique recoater design with preheating and double sided recoater functions
- Double laser power source
- Focal length adjustment mechanism

Keywords:

- Selective laser melting device
- Preheating recoater
- Laser track
- Laser optic

Article Info:

Research Article

Received: 24.01.2024

Accepted: 24.12.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1424568

Correspondence:

Author: Mehmet Alper Demiray

e-mail:

mehmetdemiray@sdu.edu.tr

phone: +90 530 301 2271

Graphical/Tabular Abstract

Purpose: The first purpose of this study is to reveal development process of an industrial type metal laser melting device with unique functions such as preheating/double sided recoater, focal length adjustment mechanism and double laser power source. Latter purpose is to investigate the manufacturing performance of developed device by manufacturing experimental single laser tracks from 316L powder.

Theory and Methods: The development process of metal laser melting device is started with design of the subsystems such as substrate, powder spreading/feeding, laser optic and inert gas systems. Mathematical expressions were used and derived to select and implement laser optic components together. After construction of the device, the focal length was found by conducting single laser track experiments. Latter step was the comparison of experimental and theoretical beam diameter to ensure the quality and accuracy of the practical beam diameter based on mathematical laser-optic equations. During experiments, all possible laser powers were tried from 50 W to 500 W. Figure A gives the summary of the progress.



Figure A. Development process of industrial SLM device

Results: A metal laser melting device was successfully designed, manufactured and controlled. A trial-error focal length experiments were conducted to obtain experimental beam diameter as the same as theoretical one that is based on mathematical laser optic equations. Focal length was found as 465 and at 465 mm, dimension of the fused laser lines was investigated under the microscope and laser track dimensions were revealed for 316L material to provide the performance of device. Theoretical and experimental beam diameters were found consistent between 100 W-200 W.

Conclusion: In this study, an industrial SLM device was developed. As a final step, performance and limits of the device were tested. According to the results above, this development/verification processes can be used and performance of a device can be estimated. On the other hand, unique subsystems proposed in this study can be beneficial to decrease disadvantages of the SLM method. On the other hand, laser optic equipments can be directly selected and implemented to any device by following this study.



Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi

Journal of The Faculty of Engineering
and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Endüstriyel bir metal lazer ergitme cihazının özgün olarak geliştirilmesi ve performansının araştırılması

Mehmet Alper Demiray^{1*}, Bahri Şekerci², Mert Gürgeç¹, Cengiz Kayacan¹, Cengiz Baykasoglu³

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 32260, Çünür, Isparta, Türkiye

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Yenilikçi Teknolojiler Araştırma ve Uygulama Merkezi (YETEM), 32260, Isparta, Türkiye

³Hitit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 19030, Çorum, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Ön ısıtma ve çift taraflı serme fonksiyonuna sahip yeni toz serici tasarımı
- Çift lazer güç kaynağı kullanımı
- Odak uzunluğu ayarlama mekanizması kullanımı

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 24.01.2024

Kabul: 24.12.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1424568

Anahtar Kelimeler:

Seçici lazer ergitme cihazı,
ön ısıtmalı serici,
lazer çizgisi,
lazer optik

ÖZ

Eklemleri imalat (Eİ) teknolojileri 4. endüstri devrimiyle dünyada yaygınlaşmaya başlamıştır. Seçici lazer ergitme yöntemi (SLE) de birçok alanda en çok tercih edilen Eİ yöntemlerindendir. Kullanılan hammadde bakımından az atık, karmaşık geometrilerin nete yakın ölçülerde imalatı, topoloji eniyilemeye uyumluluk gibi avantajlarıyla SLE'ye yönelik yeni cihaz geliştirilmesi çalışmaları günbegün önem kazanmaktadır. Bu çalışmada özgün ön ısıtma ve çift taraflı serme özellikli toz sericisi olan bir seçici lazer ergitme cihazı geliştirilmiş ve tüm mekanik, elektronik ve elektro-optik ekipmanlarıyla imal edilmiştir. Ayrıca cihaz, iki lazer güç kaynağı ve tarayıcı kafaların odak uzunluğunu konumlandırma mekanizması da barındırmaktadır. SLE'de odak uzunluğu, matematiksel ifadelerle göre seçilen lazer optik ekipmanların toz yatağı üzerinde oluşturması istenen lazer ışın çapını (teorik ışın çapı) ve gerçek bir imalat sırasında oluşan değeri (deneysel ışın çapı) doğrudan etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında cihazın kabiliyet ve performansının incelenip test edilmesi için farklı güç değerlerinde lazer çizgileri oluşturulup incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda 100 W ile 200 W aralığı için teorik ve deneysel ışın çapı en yakın olarak elde edilmiş ve diğer parametrelerde de artan güce oranla artan genişlik ve derinlikler literatür verileriyle uyumlu gözlemlenmiştir. Denenen 3 farklı enerji yoğunluğu arasında 60 ve 90 J/mm² değerlerinde ergiyik havuzu derinlik ve genişlik değerleri imalat yapılabilecek şekilde bulunmuştur.

Development of a novel industrial metal laser melting device and its performance investigation

H I G H L I G H T S

- Unique recoater design with preheating and double sided recoater functions
- Double laser power source
- Focal length adjustment mechanism

Article Info

Research Article

Received: 24.01.2024

Accepted: 24.12.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1424568

Keywords:

Selective laser melting
device,
preheating recoater,
laser track,
laser optic

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) began to be used widely with 4th Industrial Revolution. Selective Laser Melting Method (SLM) is one of the most preferred AM methods. Developing SLM devices become importance through advantages such as having the minimum cost of waste material, manufacturability of complex shaped and lattice structured parts, adaptability for topology optimization. In this study, an SLM device which has a unique preheated-double side functioned recoater was designed and manufactured with all its mechanic and electronic/electro-optic equipment. It has also double laser scanning function and positioning mechanism to tune focal length of the scanner heads. In view of SLM devices, focal length directly effects the beam diameter on the powder surface based on mathematical expressions (theoretical beam diameter) and existing beam during manufacturing (experimental beam diameter). To reveal the efficiency of device, single laser track lines with different laser powers was investigated. Test results showed that, experimental beam diameter was found as consistent with the theoretical one between 100 W and 200 W. At other power levels, track widths were found as increasing proportional to increasing power in parallel to literature. Both melt pool depths and widths were obtained effective at 60 ve 90 J/mm² among 3 energy density.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / *Corresponding Author/Authors : *mehmetdemiray@sdu.edu.tr, bahrisekerici@sdu.edu.tr, mertgurgen@sdu.edu.tr, cengizkayacan@sdu.edu.tr, cengizbaykasoglu@hitit.edu.tr / Tel: +90 530 301 2271

1. Giriş (Introduction)

Son yıllarda imalat kabiliyeti savunma, havacılık, biyomedikal gibi alanlarda rekabet gücü açısından kritik bir kavram haline gelmiştir. 4. Sanayi Devrimi sürecinde bilgisayar teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak tüm dünyada geleneksel olmayan imalat yöntemlerinin üretim süreçlerinde kullanım alanını genişlemeye başlamıştır. Bu bağlamda, Eklemeli imalat (Eİ) ve özellikle seçici lazer ergitme (SLE) yöntemi, geleneksel olmayan imalat yöntemleri arasında en yaygın kullanım alanı bulan teknolojilerden biridir. Bu yöntem genel olarak bir tabla üzerine serilmiş metal tozlarının belirlenmiş bir rotada lazer ışını ile ergitilip 3 boyutlu parçaların katman katman üretilmesi esasına dayanmaktadır. Bu sayede bu yöntem ile karmaşık şekilli parçalar kalıp maliyeti olmadan geleneksel yöntemlere kıyasla daha az atık malzeme ile yekpare şekilde üretilbilmektedir [1, 2]. Diğer taraftan, SLE teknolojileri, imalat sürecinde çok sayıda parametrenin eş zamanlı kontrolünü gerektiren geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla çok daha karmaşık teknolojileridir. Bu noktada, bir SLE cihazda etkin şekilde üretim yapılabilmesi için kabin atmosferinin, lazer optik ve toz besleme gibi çeşitli alt sistemlerin davranışlarının çeşitli sensörlerle sürekli olarak kontrol edilmesi gerekli olup, bu beraberinde uygulama açısından çeşitli zorluklar getirmektedir [3]. Ayrıca, bu teknolojiler kullanılarak arzu edilen mekanik ve mikroyapısal özellikli parçaların toleranslara uygun ve hatasız şekilde üretilmeleri noktasında sistem ve imalat süreç parametrelerinin uygun şekilde ayarlanması gerekli olup, bu konuda ortaya çıkan problemlerin minimize edilmesi için halen yoğun şekilde araştırmalar yapılmaktadır [4-6].

SLE konseptinin geliştirilmesi sürecine katkı sağlayan ilk fikirler 1970'li yıllarda ortaya çıkmaya başlamıştır. Ciraud'un [7] patenti, lazer ışını ve ışının ergitmesi için lüleden toz püskürten bir mekanizma ile olarak çalışan ilk hızlı prototipleme cihazı olarak ortaya çıkarken, Hausholder'ın [8] patenti gelecekteki çalışmalar için temel olacak günümüzdeki toz yataklı lazer ergitme sistemlerine benzer bir lazer ergitme mekanizmasını toz lülesi ile ortaya koymuştur. Hull'un [9] 1986 yılındaki patentinde dilimleme, Stereolitografi (STL) formatı, katman katman imalat gibi bazı SLE terimleri açıklanmış ve bunlar literatüre girmiştir. İlk metal lazer sintirleme /ergitme cihazı ise 1994 yılında Fraunhofer Enstitüsü tarafından tanıtılmıştır. Bu cihazda 316L çelik toz hammadde, püskürtmeli bir sistem yardımıyla ve bir lazer ışını ile işlenmiştir [10]. Daha sonra, EOS firması 1995 yılında ilk ticari metal SLE cihazı EOS M250'yi tanıtmıştır. Bu cihaz ile bıçak tipi bir serici tarafından serilen 100 μm katman kalınlığında takım çeliği tozu malzemesinin ergitilmesi için 100 W CO₂ tipi bir lazer güç kaynağı kullanılmış ve % 20-25 gözeneklilikte ve 100 MPa çekme dayanımına sahip parçalar üretilmiştir [11, 12]. Sonraki süreçte, yukarıda bahsi geçen zorlukların üstesinden gelinmesi noktasında, hem SLE cihazlarının hem de SLE süreçlerinin iyileştirilmesine yönelik çok sayıda araştırma yapılmış; toz metal hammadde kalitesinin iyileşmesi, akıllı koruyucu gaz denetim ve filtre sistemleri, sensörlere dayalı geri beslemeli ısıtma/soğutma sistemleri ve yüksek doğruluk ve hassasiyete sahip yüksek güçlü akıllı lazer denetim sistemleri gibi bazı alt sistemlerin kullanımı SLE prosesini daha az sorunlu hale getirmiştir. Bu bağlamda, modern SLE cihazları, toz besleme ve serme sistemi, tabla hareket sistemi, koruyucu gaz filtre sistemi, lazer optik lens ve ışın denetim sistemi gibi daha birçok alt sistemden oluşmakta olup [13-15], günümüzde EOS, SLM, Trumpf ve Renishaw gibi firmaların geliştirdikleri çeşitli ticari cihazlar mevcuttur. Tablo 1'de dünyada yaygın kullanım alanı olan bazı SLE cihazları ve bunların tipik özellikleri gösterilmiştir [16-18].

SLE ile imal edilen bir parçanın her katmanı lazer tarama izlerinden oluşmakta olup, lazer izleri SLE ile imal edilen parçaların oluşturulma

sürecindeki ana bileşendir. Bu bağlamda, lazer izi incelemeleri, ergiyik havuzu şekillerinin ortaya çıkarılması ve katmanların oluşturulması sürecinde oluşan boyutların seçilen süreç parametrelerine göre (lazer gücü, tarama hızı gibi) ortaya konması açısından kritik öneme sahiptir. Bu nedenle, literatürde SLE süreçlerinin performansının test edilmesi noktasında farklı süreç parametreleri dikkate alınıp lazer izleri oluşturularak ergiyik havuzları incelemektedir. Aggarwal vd. [19] tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada 316L tozu ile hesaplamalı ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Gerçekleştirdikleri modelde lazer ışını-malzeme etkileşimi, tozların ergimesi, oluşan kuvvetler ve ergiyik havuzunu analiz etmişlerdir. Yaptıkları tek çizgi deneyleri ile yapılan hesapların doğruluğu tutarlı şekilde bulmuşlardır. Tang vd. [20] 316L tozdan SLE yöntemi ile tek çizgi çalışmayı simüle etmek için üç boyutlu ve yüksek doğruluklu bir model geliştirmişlerdir. Ergime-katılaşma sürecinin altında yatan fiziksel süreçleri ortaya çıkarmak için farklı lazer gücü ve tarama hızında sayısal simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. King vd. [21] 316L tozdan 28 farklı tek çizgi üretmiş ve ergiyik havuz şekillerini parametre seçimine bağlı olan anahtar deliği ve iletim modu terimleriyle ifade etmiştir. Bu çalışma, ergiyik havuzu modları arasında normalize entalpi açısından bir geçiş bölgesi ortaya koymuştur. Benarji vd. [22] 316L tozunun mekanik özelliklerini artırmak için B₄C takviyesi yaptıkları SLE çalışmasında tek çizgi denemeleri yapmışlardır. Lazer iz genişliği ve derinliğinin lazer gücü ile arttığını ortaya koymuşlardır. 300 W lazer gücü ve 0,06 m/dk tarama hızı ile en yüksek sertliğe ve en düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip sonucu elde etmişlerdir. Shi vd. [23] 250 μm gibi yüksek katman kalınlıklarında çalışmak için gerekli parametrelerin bulunması adına 316L tozu ile SLE yöntemiyle tek çizgi çalışması yapmışlardır. Çalışmada % 99,99 bağlı yoğunluğa ulaşılrken, 9 mm³/s en yüksek imalat hızına erişilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün azaltılması için ise yeniden ergitme gibi yardımcı işlemlerin kullanılabileceği tavsiye edilmiştir. Başka bir çalışmada, Mohanty ve Hattel [24] lazer ergitme sırasında fazla ergime ile köpürme ve ergime eksikliği gibi bazı belirsizlikleri ortaya koymak için bir ısı model ve bu modeli doğrulamak için tek çizgi deneyleri yürütmüşlerdir. Kazemi vd. [25] SLE metoduyla 316L toz ile çizgi çalışmaları yapmışlar, SEM ile zaman ve koordinata bağlı sıcaklık değişimleri ile karşılaştırmışlardır. Her bir çizginin ergiyik havuz boyutlarını incelemişler, çizgi sonunda yaşanan duraklama süresinden dolayı enerji yoğunluğunun bu noktalarda arttığı ve anahtar deliklerinin oluşmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Ninpetch vd. [26] SLE yöntemi ve 316L tozu ile yaptıkları tek çizgi çalışmasında düşük lazer güçlerinde tarama hızının lazer izi genişliğine olan etkisinden bahsetmişlerdir. 50 W lazer gücü ile yapılan deneysel çalışmada tarama hızının 5 mm/s'den 15 mm/s'ye çıkarılması durumunda lazer iz genişliğinin 250 μm değerinden 150 μm değerine düştüğünü gözlemlenmişlerdir. 5 mm/s tarama hızında çizgide kesikler ve topaklanmalar olurken, 10 mm/s tarama hızında daha sürekli izler elde etmişlerdir. Hu vd. [29] bir SLE cihazı geliştirerek gaz atomizasyonu ürünü olan 316L metal tozuyla tek çizgi deneyleri yürütmüşlerdir. Bu deneylerde katman kalınlığı sabit tutulurken deneyler sonucunda çizgi üst yüzey morfolojisi ve kesit alanlardaki ergiyik havuz boyutları lazer gücü ve tarama hızına bağlı olarak incelenmiştir. Araştırmacılar bu çalışmada güç ve tarama hızıyla ilişkili iletim durumu, anahtar deliği durumu, geçişli durum ve boşluk oluşumu gibi farklı halleri sınıflandırmıştır.

Yukarıda bahsi geçen bu çalışmalar, 316L malzeme için tek çizgi çalışmalarının incelenmesiyle SLE yönteminin etkin şekilde uygulanabilmesi noktasında gerek sistem bileşenlerinin ve gerekse süreç parametrelerinin uygun şekilde seçilmesinin önemini ortaya koymaktadır. Böylece bu çalışmada da cihaz performansının göstergesi olarak tek çizgi deneyleri gerçekleştirilecektir. Ticari olarak geliştirilmiş çok sayıda sistem hali hazırda kullanılsa da halen,

Tablo 1. Alt sistem detayları ile birlikte ticari SLE cihazlarının Özellikleri
(Specifications of commercial selective laser melting devices with their sub system details) [16-18]

Cihaz	Kabin ve Tarama Özellikleri					Tabla	Serici		Toz Besleyici		Malzeme	Diğer Veriler		
	Lazer Tipi	Güç (W)	Maks. Hız (mm/s)	İmalat Hacmi (mm ³)	Işın Çapı (um)	Katman Kalın. (mm)	Serme Hızı (mm/min)	Serici Tipi	Üstten	Altan		Hacim Oranı (cm ³ /s)	Doğruluk (µm)	Tekrarlanabilirlik (um)
EOS M280	Yb-fiber lazer, 200 W veya 400 W	200-400	7000	250x250x325	100-500	0,02-0,06	40-500	Bıçak		+	Paslanmaz Çelik, Takım Çeliği, Kobalt-Krom, Süper Alaşımlar, Alüminyum, Titanyum	5-14	±50	±50
EOS M400	Yb-fiber lazer; 1,000 W	4x400	7000	400x400x400	90	0,09			+		Paslanmaz Çelik, Takım Çeliği, Kobalt-Krom, Süper Alaşımlar, Alüminyum, Titanyum			
EOS P760	CO ₂ lazer	2x50	10000	700x380x580		0,06-0,18			+		Termoplastikler > Standart (PLA, ABS...)			
SLM (500)	IPG fiber lazer	4x400/4x700	10000	500x280x365	80-115	0,02-0,06	200	Üçgen Bıçak	+		Paslanmaz Çelik, Takım Çeliği, Kobalt-Krom, Süper Alaşımlar, Alüminyum, Titanyum	70	±2	
SLM (280)	IPG fiber lazer	1x400/1x700	1000	280 x 280 x 365	80-115	0,02-0,09			+		Paslanmaz Çelik, Takım Çeliği, Kobalt-Krom, Süper Alaşımlar, Alüminyum, Titanyum	35		
SLM (250)	YLR lazer	400/1000	20000	248x248x280	70-250				+		Paslanmaz Çelik, Takım Çeliği, Kobalt-Krom, Süper Alaşımlar, Alüminyum, Titanyum	20		
Concept Laser (M2)	Fiber lazer	2x200-400	7000	250x250x280	50	0,02	400	3 Bıçak		+	Paslanmaz Çelik, Takım Çeliği, Kobalt-Krom, Süper Alaşımlar, Alüminyum, Titanyum	2-20	20-30	
Renishaw (AM 250)	Fiber lazer	200-400	7000	250x250x360	70	0,02	60	Bıçak	+		Paslanmaz Çelik, Takım Çeliği, Kobalt-Krom, Süper Alaşımlar, Alüminyum, Titanyum	5-20	±20 - ±100	±50
Phenix PXL System	Fiber lazer	500	10000	250x250x300			25	Tambur		+	Paslanmaz Çelik, Takım Çeliği, Kobalt-Krom, Süper Alaşımlar, Alüminyum, Titanyum		±50	±20

bu yöntemin ekonomik ve etkin şekilde kullanımına yönelik yenilikçi bileşenler içeren çözümlerin ortaya konmasına ve cihazların geliştirilmesine ihtiyaç vardır [16-18]. Bu motivasyonla gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında özgün bileşenler içeren bir SLE cihazı tasarlanmış ve sistemin performansı yukarıda bahsi geçen tek çizgi deneyleriyle ortaya konmuştur. Bu bağlamda, geliştirilen sistem, hassas hareketli tabla, çift yönlü ve ön ısıtma fonksiyonlu serme, üstten motor kontrollü besleme, odak ayar mekanizmalı ve çift kafalı lazer optik ergitme ve koruyucu gaz besleme/filtreleme bileşenlerinden oluşmakta olup, bunlar arasında serici sistem ve lazer optik mekanizma, tasarımı bakımından özgün bir tasarımıdır. Bu çalışma, özgün SLE sistemlerinin geliştirilmesi noktasında uygulayıcılar için bir rehber niteliğinde olup, takip eden bölümlerde ilk olarak geliştirilen SLE sisteminin bileşenleri detaylı olarak tartışılmış ve sonrasında 316L Paslanmaz çelik malzeme için farklı süreç parametreleri dikkate alınarak gerçekleştirilen imalat testleriyle sistemin imalat kabiliyeti ortaya konmuştur. Son bölümde ise genel bulgular değerlendirilerek gelecek çalışmalar hakkında bilgiler sunulmuştur.

2. Deneysel Metot (Experimental Method)

Bu bölümde SLE cihazının tasarım aşamaları, serici ve lazer optik sistemleri gibi alt bileşenleri ile prototip imalat süreçleri tartışılmıştır. Son olarak lazer optik sistemin odak uzunluğu ve deneysel ışın çapı doğrulamaları sunulmuştur.

2.1. Özgün SLE Cihazının Geliştirilmesi (Development of Custom Made SLM Device)

Tablo 1'de yaygın örnekleri ve detayları sunulan SLE cihazları incelendiğinde, günümüz cihazlarının bazı alt sistemlerin birleşimi olarak imal edildiği görülmektedir. Bunlar genel olarak tabla hareket sistemi, serici sistemi, besleyici sistemi, lazer optik ışın kontrol sistemi, lens ve lazer güç kaynağı soğutma sistemi ve koruyucu gaz besleme/filtreleme sistemi olarak sınıflandırılabilir. Ayrıca, elektronik sistemler ile veri toplama donanımları, motor sürücüler, kontrolcüler ve sensörler bu sistemlerle birlikte kullanılmaktadır. Diğer taraftan koruyucu gaz besleme ve filtreleme sistemleri genelde ana cihazdan ayrı olmakla beraber, gaz giriş/çıkış boruları ile ana cihaza bağlanmaktadır. Lazer optik lens ve tarama sistemleri ise imalat kabininde imalat tablasının belirli bir mesafede üstüne yerleştirilerek serilen tozun işlenmesi sağlanmaktadır. Ortaya konulan cihazın geliştirme sürecinde takip edilen 4 temel aşama mevcuttur. Bu süreçler, tasarımda optimizasyon, montaj öncesi modüler kalibrasyonlar, montaj halinde cihazın yazılımı üzerinden parametrik ayarlamaları ve çizgi imalat denemeleri şeklindedir.

Tasarım optimizasyonu için,

- Kompakt yapı hedefiyle ana gövde modülü profil ve saç optimum boyutlandırması ve taşıyıcı levha mukavemet analizleri,
- Kabin optimum boyutlandırması ve serme platformu olarak adlandırılan alt levhanın mukavemet analizi ve kabin içi ekipman konumlandırması,
- Toz besleme modülü taşıyıcı mukavemet analizleri ve motor-hareket mekanizması-sensör konumlandırması,
- Farklı serici hazne ve serme mekanizması prototip tasarımları denenmek suretiyle hareketli toz serme modülü ve ısıtmalı hazne optimum boyutlandırması,
- Lazer-optik modül ekipman seçimi ve odak uzunluğu ayarlama mekanizması ile konumlandırılması,
- İmalat tablası modülü için prototip tasarımları denenerek optimum tabla tasarımı adımları takip edilmiştir.

Montaj öncesinde,

- Toz besleme modülü servo motor ve sürücüsü ile toz kapağı kontrol testi, açık ve kapalı durum anahtarlarından geri beslemeli kontrol çevrimi ve toz döküm miktarının belirlenen süre içerisinde serici hazneyi dolduracak şekilde optimizasyonu (anahtar konumlarının ve servo sürücü ayarlamalarının değiştirilmesi ile optimizasyon),
- Toz serme modülü ileri ve geri hareketinin kapasitif sensörlerle sınırlandırılması testi, toz serim kalınlığının optimizasyonu için master ve komparator ile 10-15-20-25-30-35-40 mm/s hızlar için toz serme kalınlık testi ve kararlı kalınlığı sağlayan toz serici hızının böylece optimizasyonu,
- İmalat tablası modülü aşağı ve yukarı manyetik sensör konum bulma testi, tabla hareket hassasiyet optimizasyonu için lazer optik mesafe sensörü ile tabla hareketinin 5 µm ile 100 µm aralığında 5'er µm hassasiyetle ölçümü ve tabla ağırlığı ile birlikte sağlanabilen en kararlı ve en küçük katman kalınlığının optimizasyonu (50 µm değeri kararlı katman kalınlığını veren en küçük değer olarak bulunmuştur),
- Lazer-optik modül odak uzunluğu testi için lazer-optik tarayıcı kafa mekanizması kullanılarak sac levhalarda koruyucu gazsız yakma denemeleri ve mikroskopik incelemelerle odak uzunluğu optimizasyonu,
- Filtreleme, koruyucu gaz ve soğutma modülü dahilinde tasarım bölümünde hazırlanan akışkan diyagramlarına birebir uygun şekilde gaz ve su soğutma tesisatlarının hazırlanması ve su ve gaz sızdırmazlık testi, oksijen sensörleri kullanılarak kabin içi atmosferdeki oksijen miktarının % 0,1 değerine düşürülmesine yönelik sızdırmazlık optimizasyonu kalibrasyonları yapılmıştır.

Yazılım üzerinden ise şunlar yapılmıştır:

- Toz besleme modülü ve serme modülünün müşterek çalışma testi ve serilen toz katman kalınlığına göre serme haznesi bıçak konumlarının ve toz besleme modülü açma kapama anahtar konumlarının optimizasyonu,
- Toz besleme, toz serme ve imalat tablası üçlü modül grubunun müşterek çalışma testi ve montajlı ağırlık hesaba katılarak serme modülü hızının, kararlı bir toz kalınlığı sağlayabilmesi için test edilmesi ve hızın oluşturulan arayüzde girilen katsayı ile optimizasyonu. Buna ek olarak tabla modülünün montajlı ağırlık göz önüne alınarak istenen katman kalınlığını (50 µm) sağladığına dair test edilmesi ve lineer eyleyici sürücü arayüzünden kontrol katsayısının değiştirilmesi ile tabla aşağı hareket optimizasyonu,
- Tüm testler boyunca lazer optik sistem ve tarayıcı sistem soğutma modülünün aktifleştirilerek hem lazer güç kaynakları için, hem de tarayıcı sistemler için istenen sıcaklıklarda sabit kaldığına dair test. Ayrıca soğutma sistemi sızdırmazlık testi,
- Bir katmanlı oluşturan tek çizginin ya da çizgilerin yakınının otomatik olarak yürütülmesi için oluşturulan algoritma ve arayüzden komutların doğrudan verilmesiyle sırasıyla, toz besleme modülü, serme modülü, imalat tabla modülü ve lazer-optik modülün ardışık olarak tüm sensör ve soğutma modülü de sürekli aktif haldeyken çalışma testi

2.1.1. Ana iskelet ile kabin tasarımı ve imalatı (Design and manufacturing of main body and cabinet)

İlk olarak ana cihaz iskeleti tasarlanmış ve bahsedilen tüm alt sistemler bu iskeletin içine ve çevresine konumlandırılmıştır. Şekil 1a'da ana iskelet üst tasarımı ile önemli bileşenleri ve Şekil 1b'de bu bölümün imal edilmiş hali gösterilmektedir. Ana iskelet 6 levha halinde oluşturularak profiller üzerine kurulmuştur. Levhalar profillere menteşelerle sabitlenerek, içerideki elektronik aksam erişim imkanı için levhaların birer kapı gibi açılır kapanır düzende montajı sağlanmıştır. Böylelikle gerekli mekanik, elektronik ve pnömatik bileşenler için yeterli boşluk oluşturulmaya çalışılmıştır.

Aynı zamanda profiller vasıtasıyla imalat kabini duvarlarının, kabin içerisindeki donanımların ve lazer optik sistemin güvenli taşınması amaçlanmıştır. Profil boyutlarının belirlenmesi aşamasında yaklaşık 40 kg'lık ekipman yükü dikkate alınarak yapısal analizler yapılmış ve elde edilen bulgulara göre 20x30 mm boyutlu profiller tasarımı kullanılmıştır.

Ana iskelet için son boyutlara karar verilmesi için 2 kısıt dikkate alınmıştır. Bunların ilki tablanın yukarı ve aşağı hareketini tahrik etmekte kullanılan doğrusal eyleyicinin en büyük ve en küçük uzunluğudur. Bu uzunluk SLE cihazının toplam yüksekliğini etkilemektedir. İkincisi, lazer güç kaynakları ve mekanik-elektronik bileşenlerdir. Bu çerçevede, gerekli tüm bileşenleri doğru bir şekilde bulmak için profiller ve aralarındaki boşluklar hesaplanmıştır. Bu kriter hem tüm genişliği hem de derinliği etkilemektedir. Hesaplamalar sonucunda, tozu sericiye üst kısmından döken bir toz besleme mekanizması, toz haznesine sahip bir serici mekanizması ve doğrusal eyleyici tarafından tahrik edilen bir tabla mekanizması imal edilen ana iskeletin içine yerleştirilmiştir. Hazne detayları Şekil 2 ve Şekil 3'te sunulmuştur.

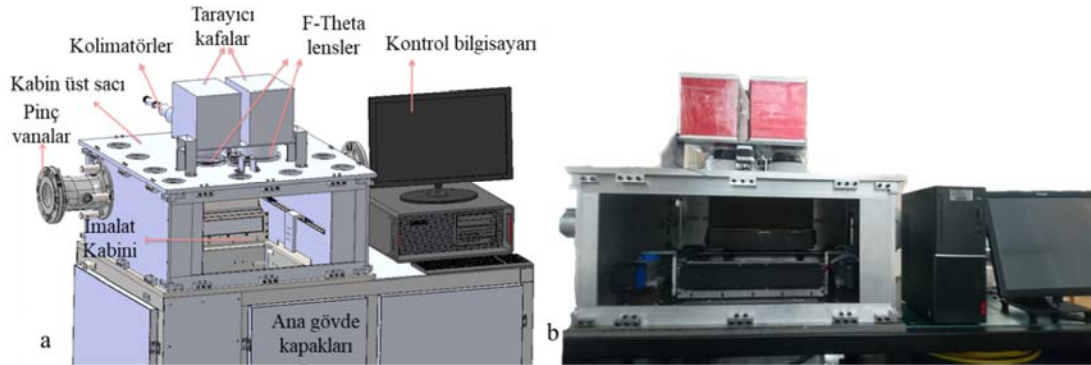
İmalat kabini tüm duvarlarında, hafif bir yapı elde etmek için 7000 serisi alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Toz besleyici, tozu besleme haznesi içinde tutmak veya serici haznesine bırakmak için 316L malzemeden yapılmış servo motor kontrollü bir kapağa sahip olarak tasarlanmıştır. İmalat tablası ve serici duvarları korozyon problemlerini önlemek için 316L malzemeden imal edilmiştir. İmalat alanı bu kriterler altında 400 mm genişlik, 400 mm derinlik, 300 mm yükseklikte olacak şekilde tasarlanmıştır.

İmalat tablasının hassasiyetini ölçmek için ve belirli bir katman kalınlığında tabla inişini ve serme işlemini gerçekleştirebilmek için

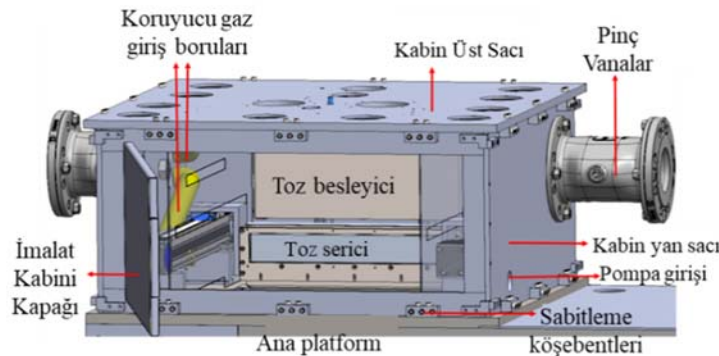
Şekil 3c'de görülen lazerli mesafe sensörü testi gerçekleştirilmiştir. Bu testte tabla üzerine konulan bir cisim tabla servo sürücü üzerinden 5 µm hassasiyetle aşağı indirilerek, tablanın bağlı bulunduğu ekipman ağırlıklarını ve üzerine serilen tozun ağırlığını da aynı hassasiyetle hareket ettirip ettiremeyeceği test edilmiştir. Nitekim kullanılan lineer eyleyici 5 µm hassasiyette olmasına rağmen lazer mesafe ölçümü sonucu optimum serilebilecek ve tabla tarafından belirlenebilecek katman kalınlığının montaj sonrasında en küçük 50 µm olduğu anlaşılmıştır.

Serici alt sistemi ise 2 çift halinde kayış kızak mekanizmasının oluşturduğu doğrusal bir modülün, 90 W gücünde DC motor ile tahrik edilmesi ve bir taşıyıcı L şekilli bağlantı parçasının serici hazneyi taşıması sayesinde oluşturulmuştur. L şekilli parça 2 doğrusal modülün birbiriyle uyumlu çalışması için bağlantı sağlarken aynı zamanda tozu serecek serici hazneyi de taşımaktadır. DC motor ise bu hazneyi doğrusal modüllerin hem ileri hem de geri yönde tahrik edebileceği şekilde seçilmiştir. Böylelikle çift yönlü bir serme işlemiyle imalat süresi kısaltılmaktadır. Şekil 4'te ilgili serici tasarımının imal edilmiş hali görülmektedir.

Serici mekanizmasının toz seriminin optimize edilmesi için hem katman kalınlığı testi, hem de 90 W DC motor tahrikli mekanizmanın hız optimizasyon testi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4b'de dijital komparator yardımıyla katman kalınlığının ölçümü yapılmış örnek bir toz serim testi görülmektedir. Her serim denemesinde 50 µm kararlı kalınlığı verebilecek şekilde serici bıçak vidaları komparator ölçümleriyle sıkılmıştır. Aynı düzeneğe farklı serme hızları (5 mm/s-40 mm/s aralığında 5'er artışla) deneyerek baştan sona 50 µm sabit bir katman kalınlığının serildiği serme hızı testi gerçekleştirilerek, 15 mm/s hız değeri elde edilmiştir.



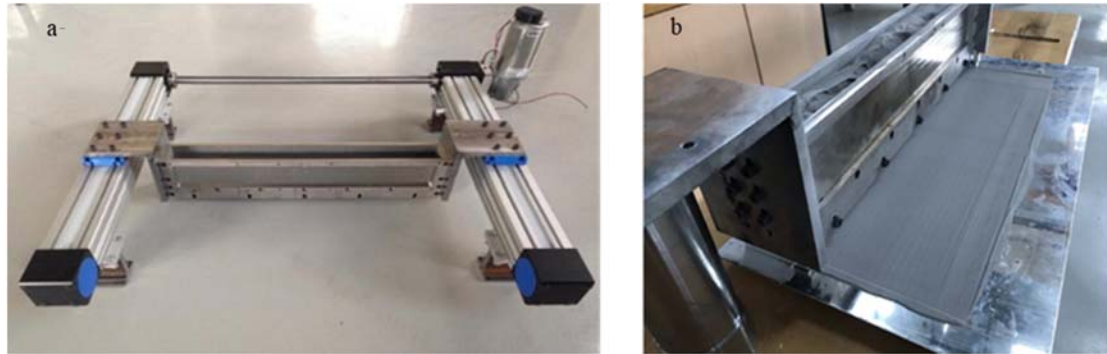
Şekil 1. SLE cihazı üst kısmı a) tasarım bileşenleri ve b) imal edilmiş hali (Top part of SLM device a) design components and b) manufactured state)



Şekil 2. SLE cihazı kabininin tasarımı ve bileşenleri (Design and components of SLM device cabinet)



Şekil 3. SLE cihazı imalat alanı a) toz serici sistem geride ve b) toz serici sistem önde c) imalat tablası ve serici kalınlık optimizasyon testi (SLM manufacturing area a) recoater at front b) recoater at back c) thickness test for substrate and recoater)



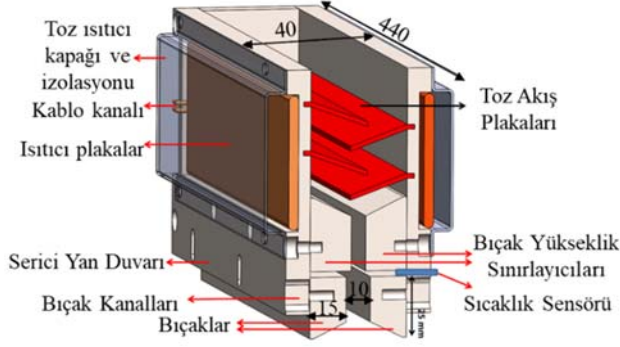
Şekil 4. Serici alt sisteminin imal edilmiş ve montajlı görüntüsü a) dışarda birleştirilmiş görünüm b) dijital komparator kullanılarak dışarda toz serimi testi esnasında bir görünüm
(Manufactured and assembled picture of recoater subsystem a) assembled view from outside b) view at measurement of spreading via comparator)

2.1.2. Ön ısıtmalı ve çift taraflı serme fonksiyonlu serici (Recoater with preheating and double side spreading function)

Serme işlemi öncesinde serici özel tasarımı dahilinde tozun imalat tablasına serilmeden önce ön ısıtma işlemine tabi tutulmasını sağlayan levha tipi ısıtıcılar kullanılmıştır. Literatüre bakıldığında yürütülen sıcaklık ve kalıntı gerilme tahminine yönelik benzetim çalışmalarının tümünde ilk toz sıcaklığının zorunlu bir girdi olduğu anlaşılmaktadır [30-34]. Daha da önemlisi, kabin ortamını ısıtma [35-37], toz serilen tablayı ısıtma [38-40] ve yeniden ergitilen katman [41-43] gibi bir ısıtma işlemi konu edinen ve ortak olarak ön ısıtma fonksiyonunun etkisini

ortaya koyan çok sayıda çalışma mevcuttur. Böylece bu avantajların ve daha fazlasının kolay ve kompakt bir şekilde eldesi serici hazne için 2 adet 700 W gücünde levha tipi ısıtıcı serici hazne yan duvarlarının dış tarafına açılan kanallara yerleştirilerek serme öncesi hazne içindeki tozun temassız bir biçimde istenilen sıcaklığa yükseltilmesi amaçlanmıştır. Haznenin 2 tarafında sıcaklık sensörleri ile toz sıcaklığı ölçülerek bir PID denetim cihazına beslenen bu sıcaklıkların ortalama değeri alınmakta ve böylece sıcaklık serme öncesi istenilen düzeyde kapalı çevrimli şekilde denetlenebilmektedir. 300 °C'ye kadar ön ısıtmadan sonra sıcaklığı yükselen tozun tabla üzerine serilmesi ile sıcaklık gradyanlarında düşürülmesi ve bu sayede

imalat kusurlarının en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. Diğer yandan hem ileri hem geri yönlü serici hareketinde toz serimi yapılabilmesi için 2 adet serici bıçak ters yönlü yerleştirilmiştir. Böylece serici toz besleyiciye doğru geriye gittiğinde toz besleyici kapağı servo kontrolcü ile açılmakta ve 2 serici bıçağın ortasına konumlandırılmış hazne boşluğuna toz dökülmektedir. Ardından serici hazne ileri yönlü harekete geçerek yan duvarlarındaki ısıtıcı-sensör-PID denetleyici mekanizması ile hazne içindeki tozun istenen sıcaklıkta tutulması sağlanmaktadır. Böylelikle hem ileri hem geri yönlü olarak ısıtılmış toz tabla üzerine serilmektedir. Şekil 5'te serici hazne tasarımı ve bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 5. Toz serici iç yapısı (Powder recoater internal design)

Şekil 5'te kırmızı olarak görülen akış levhaları besleyiciden dökülen tozun ön ısıtmalı serici hazne içinde topaklaşma riskini en aza indirerek bıçaklara kadar ulaşmasını kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, bu sistem ısıtıcılardan tozun ısı iletimini artırmaktadır.

2.1.3. Lazer optik ekipmanların seçimi (Selection of laser-optic components)

Geliştirilen cihazın bir diğer önemli kısmı lazer optik kısımdır. Bu çalışmada, lazer optik sistem imalat kabini üzerine konumlandırılmış ve bu sistem iki adet IPG-YLR-500 model lazer güç kaynağı, iki tarama kafası-düzleştirici-F theta lens birleşimine dayalı olarak kurulmuştur. 500 W iki lazer güç kaynağı, tarama kafası diyafram girişinden önce lazer ışığını toplamak için bir düzleştiriciye (kollimatör) giren QBH tipi fiber bağlantı ucuna sahiptir. Düzleştiriciler, lazer ışınını mikro motor tahrikli kafaların aynalarından yansıtmak için tarama kafası açıklıklarına girmektedir.

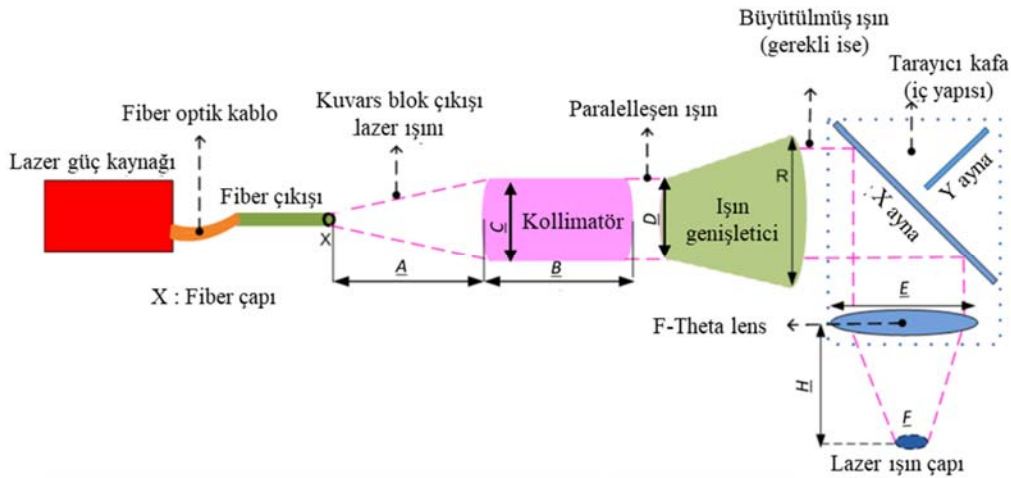
Kafaların ucunda, serilen tozun üzerine belirli bir mesafeden lazer ışınının odaklanması için F-theta lensler kullanılmaktadır. Şekil 6, lazer optik bağlantıları şematik olarak gösterilmiştir.

Bağlantılar yapılmadan önce QBH bağlantı ucu açılmış ve bu ucun kuvars blok olarak adlandırılan prizmatik cam bileşeni % 99,95 saf propilen alkol kullanılarak temizlenmiştir. Buna benzer şekilde, sırasıyla düzleştirici ve tarama kafası F-theta lensleri için vakum atmosferi altında mikroskobik temizleme işlemi takip edilmiştir. Şekil 7 temizleme işlemindeki bileşenleri göstermektedir.

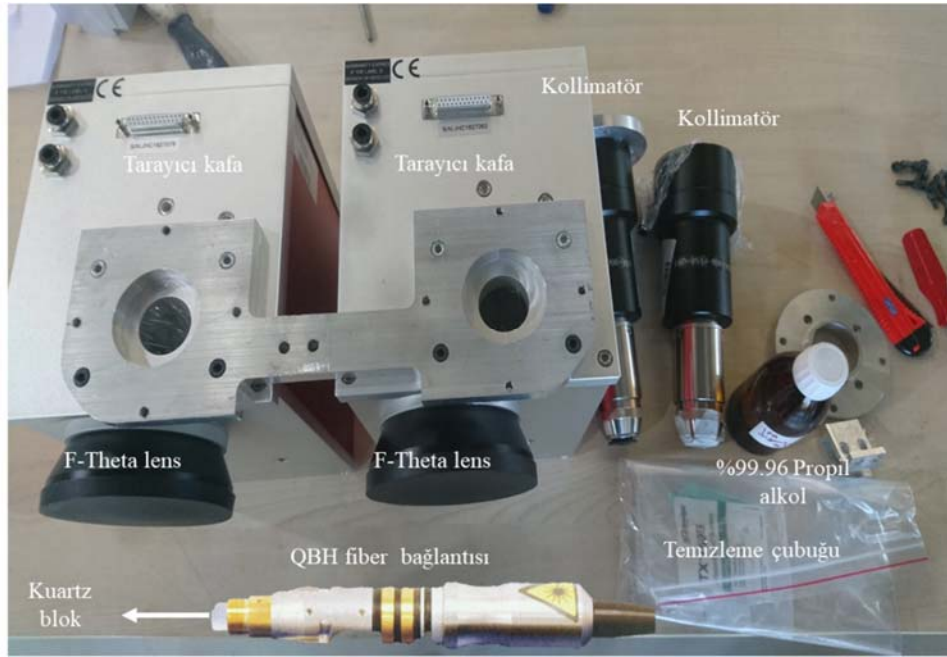
Diğer yandan uygun tarama kafası giriş açıklığını, düzleştirici uzunluğunu ve düzleştirici lens çapını belirlemek için optik hesaplamalar yapılmıştır. Öncelikle, bir lazer ışın çapı belirlenerek bu çapa ulaşmak için gereken F theta lens, düzleştirici ve tarayıcı kafa seçimi yapılmıştır. Literatürde 80-400 μm aralığında ışın çapları kullanan ticari cihazlar ve bu cihazlarla yapılan çalışmalar mevcuttur [16-18]. 70-400 μm aralığında ışın çapları hedef kabul edilerek yapılan hesaplamalar ve ekipman seçimleri sonucunda, Şekil 6'da F olarak gösterilen ışın çapının en küçük değerini en uygun fiyat/performans oranına sahip tarayıcı kafa-düzleştirici-F theta lens bileşimiyle sağlamak için ışın çap değeri seçilmiştir. Sonraki kritik aşamada ise en uygun kafa-düzleştirici-F theta lens bileşiminin seçilmesidir. Bu noktada fiber lazer tiplerinde çekirdek çapını genişleterek daha uygun lazer optik birleşimlere imkan tanıyan ışın genişletici eleman yüksek maliyetleri nedeniyle tercih edilmemiştir. Bu yüzden F theta lens, düzleştirici ve tarayıcı kafa seçimi için farklı bir yöntem izlenmiştir. Buna göre, kullanıcı tarafından belirlenen ve literatürdeki çalışmalarda kullanılan aralıktaki seçilen bir lazer ışın çapına ulaşmak için gereken matematiksel hesaplar tamamlanmış ve bu hesaplarla bulunan sonuçları sağlayan eleman seçilmeye çalışılmıştır [44]. Bu kapsamda ilk adım olarak kullanılan lazer güç kaynağına ait üretici firma tarafından sağlanan özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Lazer Güç Kaynağı Özellikleri
(Properties of laser power supply)

Nominal Güç	500 W
Tip	Sürekli, Çok atımlı
Dalgaboyu	1064 nm
Fiber Çekirdek Çapı, x	50 μm
BPP ve M^2 Değeri	1,4 ve 1,1



Şekil 6. Lazer optik sistem bağlantı şeması (Laser optic system connection schematic)

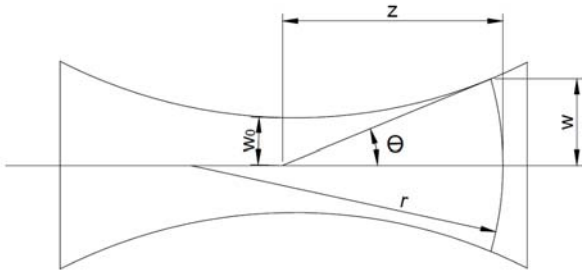


Şekil 7. Mikroskobik ölçekte temizlenen lazer optik bileşenler (Cleaned laser-optic components at microscobic level)

M^2 , 1990'lı yıllarda bulunan ve 2005 yılında ISO11146 kodu ile standartlaşan lazer ışınlarının kalitesini tanımlamak için kullanılan bir faktördür. Hesaplanmasında lazer ışın çapı ve uzak alan sapma açısı kullanılır. Lazer ışın kalitesinin hesaplanması için kullanılan en yaygın parametredir [45]. M^2 hesaplaması için Eş. 1 kullanılmıştır.

$$M^2 = \frac{\theta \pi w_0}{\lambda} \quad (1)$$

λ ışığın dalga boyunu, θ ışın sapması ve w_0 ışın bel yarıçapını göstermektedir. Şekil 8'de bir ışın üzerindeki parametreler gösterilmektedir.



Şekil 8. Theta Açısı ve BPP hesaplaması şeması (Theta angle and BPP calculation schematic)

BPP ışın bel yarıçapı ile uzak alanda ölçülen ışın sapma yarı açısı ile hesaplanır. Düşük BPP değeri daha iyi bir lazer kalitesinin göstergesi olmasıyla birlikte lazer dalga boyuna göre değişkenlik göstermektedir. CO₂ lazerlerin dalga boyu Nd-YAG lazerlere göre daha uzun olduğu için, BPP değerleri daha yüksektir [46]. BPP Eş. 2'deki şekilde ifade edilir [47].

$$BPP = \theta \times w_0 \quad (2)$$

NA değeri, odaklanan bir mercekten oluşturulan lazer konisini ifade eder ve merceğin lazer ışınını toplayabilme kapasitesini tanımlar. [48]

Teorik bir parametre olup, Eş. 3'deki gibi ifade edilir ve lazerin açısal kabulünün bir ölçüsüdür.

$$NA = n \times \sin \theta_{max} \quad (3)$$

Burada hesaplama kırılma indisi (n) ile lazerin eksene karşı oluşturduğu en büyük sapma açısının sinüsü ile hesaplanır [49]. Ek olarak, bir tarama kafası (galvanometre), ışın giriş açıklığına ve kullanılan f-theta lenslerine bağlı olarak belirli tarama alanlarına sahiptir. Bu çalışmada geliştirilen cihaz 400x400x300 mm³ imalat alanına sahip olduğu için her bir tarama kafası imalat alanına göre 400x200 mm² alanda tarama yapmaktadır. Bu şartlar nedeniyle, lazer optik ekipman birleşimini seçerken tarama kafasının en büyük tarama alanı göz önünde bulundurulmuştur. Böylece, fiber çekirdek çapı x ve lazer ışın çapı (nokta boyutu) F iken Şekil 5'teki X fiber çıkış çekirdek çapı 50 mm alınarak Eş. 4-7 ile gerekli büyüklükler hesaplanacaktır.

$$F = \frac{(H \cdot x)}{B} \quad (4)$$

$$r_{düzleştirici} = NA \cdot F \quad (5)$$

$$C = r_{düzleştirici} \cdot 2 \quad (6)$$

$$NA = \frac{(2 \cdot BPP)}{x} \quad (7)$$

Tablo 2'den seçilen BPP ve M^2 terimleri ışın yoğunluk kalitesini ifade etmektedir [49-51]. Bu 2 terimin değerleri birbirine de bağlı olarak değiştiğinden, bu çalışmada kullanılan YLR500 lazer güç kaynağı Yb (YAG Fiber Lazer) tipine göre, BPP değeri ve M^2 değeri de Tablo 2'de belirtildiği gibi üreticiden temin edilmiştir [35]. Ayrıca Eş. 4'teki NA değeri lazer optik uçtan çıkan ışının hiçbir kayıp olmadan tarayıcıya girmesi için gereken açıklıktır. Eş. 6'daki C değeri ise düzleştirici mercek çap değeridir.

Eş. 6'da bulunan C düzleştirici çap değeri de düzleştirici çıkışında 1/e² noktasında oluşan çaptır. Işın Gaussian olarak adlandırılan bir modele uygun varsayıldığı için bu noktadaki çap alınmaktadır [37-39].

Bununla birlikte ekipmanların birleştirilmesi işlemlerinde kullanılan yalıtım ve bağlantı elemanları sebebiyle çıkıştaki ışın çap aralığının küçüldüğü hesaba katılarak gerçek $C_{gerçek}$ çap değeri C değerinin 1,5 katı olarak ifade edilecektir.

Eş. 4-7 doğrultusunda, 70 ile 400 μm aralığında birçok hedef ışın çapı için bu hesaplamalar tekrar edilerek, en ulaşılabilir ve fiyat/performans oranı en yüksek lazer optik ekipman birleşimini elde etmek için 150 μm teorik ışın çapı seçilmiştir. 150 μm ışın çapı ve 50 μm çekirdek çapı verileri kullanılarak ilk önce Eş. 4'ten BPP değerinden sayısal açıklık (NA) değeri 0,056 olarak hesaplanmıştır. Teorik C çapını elde etmek için de NA ve F değerleri Eş. 5 ve 6'da yerine konularak $r_{düzleştirici}$ değeri 8,4 mm, C değeri 16,8 mm ve $C_{gerçek}$ değeri de 1,5 katı olacak şekilde 25,2 mm olarak hesaplanmıştır.

Elde edilen 25,2 mm değeri, hem teorik düzleştirici çapı hem de tarama kafasının giriş ışını açıklık değeri en az 26 mm olması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Bu durumu sağlamak için 30 mm ışın açıklığına sahip bir tarama kafası seçilmiştir. Kafa seçiminden sonra sert silika malzemeden 430 mm odak uzaklığına sahip F-theta lens seçilmiştir. Bu noktada, açıklık alanını küçültebilen somun veya conta gibi olası bağlantı parçalarından sonra açıklıktan en az 30 mm lazer ışığı girişini garanti etmek veya standart olarak daha ucuz bir ürün kullanmak için 50 mm çapında bir düzleştirici seçilmiştir. Son olarak, Eş. 4 yardımıyla düzleştirici uzunluğu B 143,3 mm olarak hesaplanmıştır.

B değeri de yine standart bir düzleştirici temin edebilmek için 150 mm olarak alınmıştır. Tüm hesaplamalar en küçük ışın çapını en uygun lazer optik ekipman birleşimiyle elde etmek üzerine yürütülmüştür.

Şekil 9'da lazer optik ekipman birleşimi tasarımı, tarayıcı kafaların arka kısmındaki düzleştirici-tarayıcı kafa birleşimi ve elektronik ve pnömomatik hatlar gösterilmiştir. Tablo 3'te ise bu birleşimdeki ekipman özellikleri özetlenmiştir.

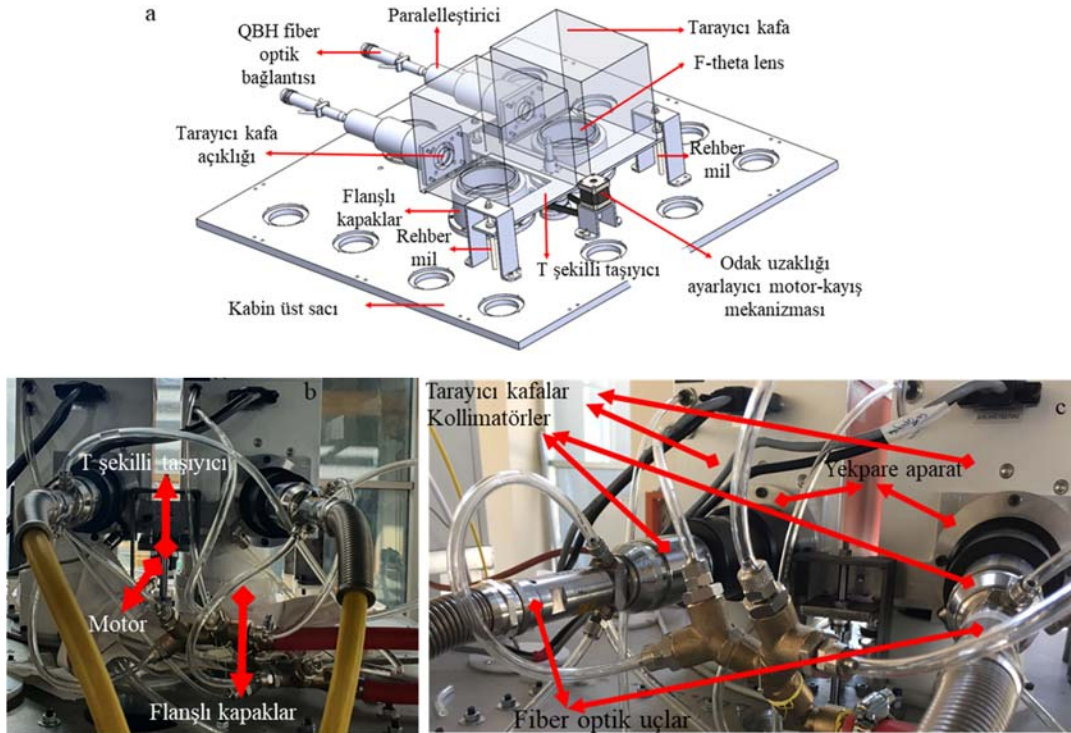
Tablo 3. Lazer optik sistem ekipman özellikleri
(Laser-optic system equipment specifications)

Tarayıcı kafa açıklığı	30 mm
Düzleştirici çapı	50 mm
Düzleştirici uzunluğu	150 mm
Teorik F-theta lens odak uzunluğu	430 mm
Teorik ışın çapı	150 μm

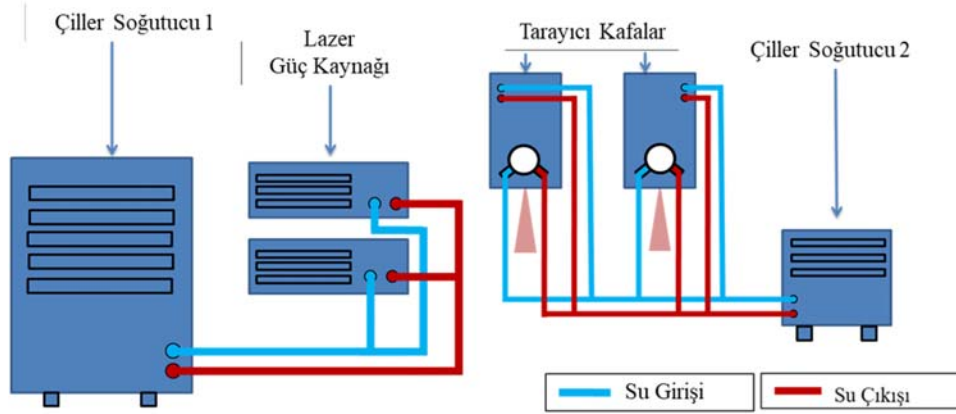
Öte yandan, aşırı ısınmayı önlemek ve her lens ve güç kaynağı için sıcaklıkları sabit tutmak amacıyla hem lensler hem de lazer güç kaynakları için soğutma sistemi tasarlanmıştır. Şekil 10'da soğutma sistemi şematik olarak gösterilmiştir.

Şekil 10'da görülebileceği gibi, lazer optik sistem bileşenlerini soğutmak için kullanılan iki ayrı soğutucu vardır. Çiller 1, su dolu ve 1,25 kW'lık soğutucu bir cihazdır ve her iki lazer güç kaynağının sıcaklığını 23 °C'de tutmak için kullanılmıştır. Çiller 2, galvano tarama kafaları, aynalar, düzleştirici lensler ve sert silika F-theta lensler gibi tüm lenslerin sıcaklıklarını 28 °C'de tutmak için kullanılmıştır. Şekil 11'de üretilen SLE cihazı tüm alt sistemleriyle birlikte önden ve arkadan gösterilmiştir.

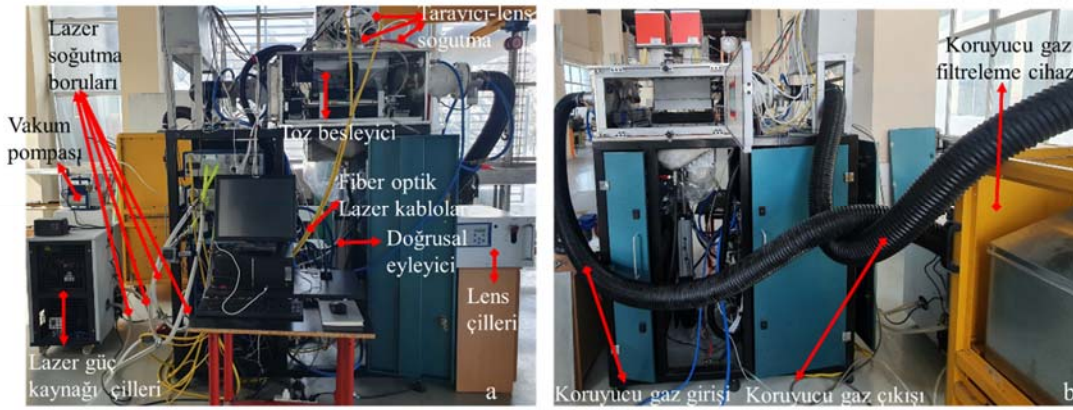
Şekil 11'de ayrıca sarı renkli bir filtre cihazı ve koruyucu gaz giriş/çıkışları görülmektedir. 316L ham alaşım tozu için en büyük 3 bar/min gaz akışı sağlayabilen bir azot jeneratörü kullanılarak koruyucu gaz olarak saf azot üretilmiştir ve kullanılmıştır.



Şekil 9. Lazer optik sistem: a) 2 adet galvano tarayıcı kafa + 2 adet kollimatör + 2 adet F-theta lens montaj tasarımı b) soğutucu borularla birlikte montajlı görünüm (arkadan görünüm) c) odak uzunluğu ayarlayıcı mekanizma görünümü (arkadan görünüm)
(Laser-optic system: a) assembled design of 2 scanner head + 2 collimator + 2 F-theta lens b) assembled real system with cooling pipes (from back) c) focal length mechanism (from back))



Şekil 10. Lazer optik soğutma sistemi şematiği (Laser optic system cooling schematic)



Şekil 11. SLE cihazının tümü a) arkadan görünüm b) önden görünüm (SLM device with all components a) front view b) back view)

Tablo 4. 316L toz ve dövme özellikleri (Powdered and Forged 316L Properties) [32-33]

Malzeme	Ni	Cr	Mo	C	Mn	Si	P	S	N	Fe
316L Toz	11,08	17,36	2,02	0,013	1,19	0,36	0,032	0,002	0,052	Denge.
316L Dövme	11,14	17,25	2,08	0,016	1,23	0,38	0,035	0,003	0,054	Denge.

Tablo 5. Cihaz üretim parametreleri (Device manufacturing parameters)

Lazer gücü (W)	100-115-130-145-160-175-190
Tarama hızı (mm/s)	100-300-500-700-900-1100-1300-1500-1700-1900
Teorik ışın çapı (μm)	150
Katman kalınlığı (μm)	40
Dalgaboyu (μm)	1064
Lazer tipi	Yb:YAG Fiber (nominal 500 Watt)
Malzeme	316L Paslanmaz çelik (20-53 μm çaplı küresel toz)
Toz besleme tipi	Üstten besleyicili
Serme tipi	Çift bıçaklı ve ön ısıtmalı
Ön ısıtma	250 °C

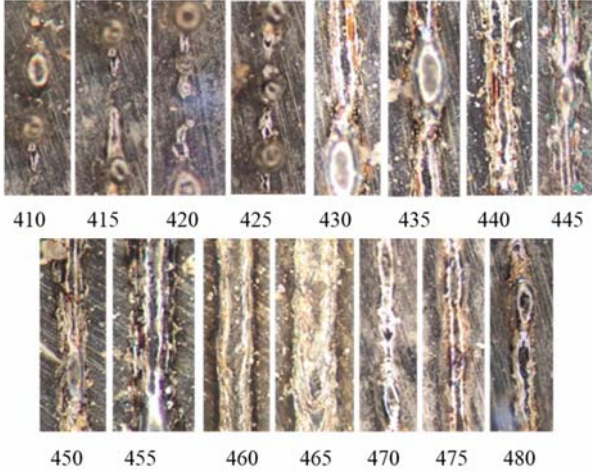
3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Geliştirilen metal lazer ergitme cihazının etkinliğinin incelenmesi amacıyla hem odak uzunluğu hem de teorik ışın çapının deneysel olarak gözlemlenmesi çalışmaları yapılmış, ergiyik havuzu kesitleri incelenerek yeterli derinlik değerlerinde nüfuziyet olup olmadığı gözlemlenmiş ve bu bölümde elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

3.1. Odak uzunluğu belirleme (Determination of focal length)

Ergiyik havuzu boyutları üzerindeki süreç parametrelerin etkileri, farklı güç ve hız bileşimlerinde lazer izi deneyleri ile incelenmiştir. Tablo 5, EOS firmasından tedarik edilen ham toz özellikleri, sabit cihaz parametreleri ve testlerde dikkate alınan güç-hız değerleri verilmiştir. Tablo 4'te de kullanılan 316L tozunun kimyasal özellikleri sunulmuştur.

Parametrik deneysel test çalışmalarına başlamadan önce, odak mesafesini ayarlamak amacıyla ön deneme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu mesafeyi değiştirmek için motor tahrikli kayış kasnak mekanizması kullanılarak sırasıyla 410-480 mm arasında 5 mm'lik artışla 15 farklı odak uzaklığı mesafesi denenmiştir. Şekil 12'de SLE cihazının farklı odak uzaklıklarında yapılan lazer izlerinin optik mikroskop görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 12. Odak uzunluğu denemeleri soldan sağa: 410 mm'den 480 mm'ye 5 mm artışla
(Focal length trials from left to right: from 410 mm to 480 mm with 5 mm increments)

Bu görüntülerin değerlendirilmesi için ise literatürdeki çalışmalarda da gözlemlenmiş olan bazı şartların yerine getirilmesi aranmıştır. Buna göre öncelikle lazer iz kalitesi için iki durumun sağlanması gereklidir: 1) lazer izi sınırlarının ertitilmiş olması ve 2) lazer izi iç kısmında ertitmenin belirtisi olarak ergiyik havuzu at kuyruğu şekillerinin gözlemlenebilmesi. Bu amaçla literatürde 316L için çalışılmış enerji yoğunlukları arasından 200 W gücünde 60 J/mm² güç yoğunluğu 316L için seçilmiş ve Şekil 12'deki lazer çizgi deneyleri gerçekleştirilmiştir [21, 28, 54]. Şekil 12'de görüldüğü üzere f-theta lensin teorik odak uzaklığı olan 430 mm'de etkin bir ertitme yapılarak arzu edilen tarzda bir lazer izi üretilememiştir. 460 mm odak uzunluğunda sürekli bir iz elde edilse de, iç kısımda lazer ertitmesi yeterli olmayıp istenilen tarzda izlerin ortaya çıkmadığı görülmektedir. Öte yandan,

465 mm odak uzaklığında en kaliteli lazer izi elde edilmiş ve bu bağlamda etkin bir üretim için odak uzaklığı 465 mm olarak seçilmiştir. Diğer yandan, bu durum Eş. 1'deki B düzleştirici uzunluğu değerini 155 mm'ye çıkarmaktadır. Bu da standart 150 mm uzunluktaki paralelleştiricinin kullanıma halen uygun olduğunu göstermektedir.

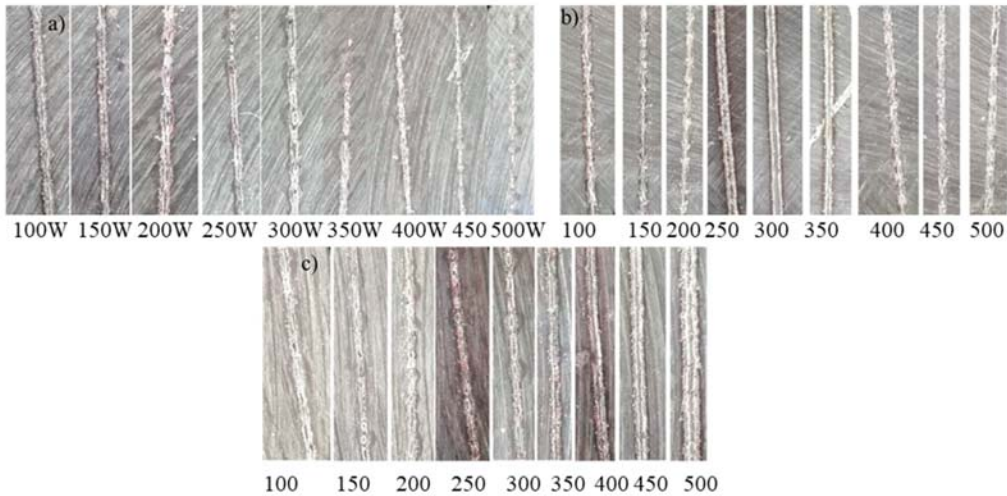
3.2. Teorik ışın çapı doğrulama (Determination of focal length)

Geliştirilen cihazın deneysel ışın çapını incelemek için ayrıca iki farklı enerji yoğunluk değerinde üretimler gerçekleştirilmiş ve bulgular taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Enerji yoğunluğu alan başına Eş. 8 ile ifade edilmektedir.

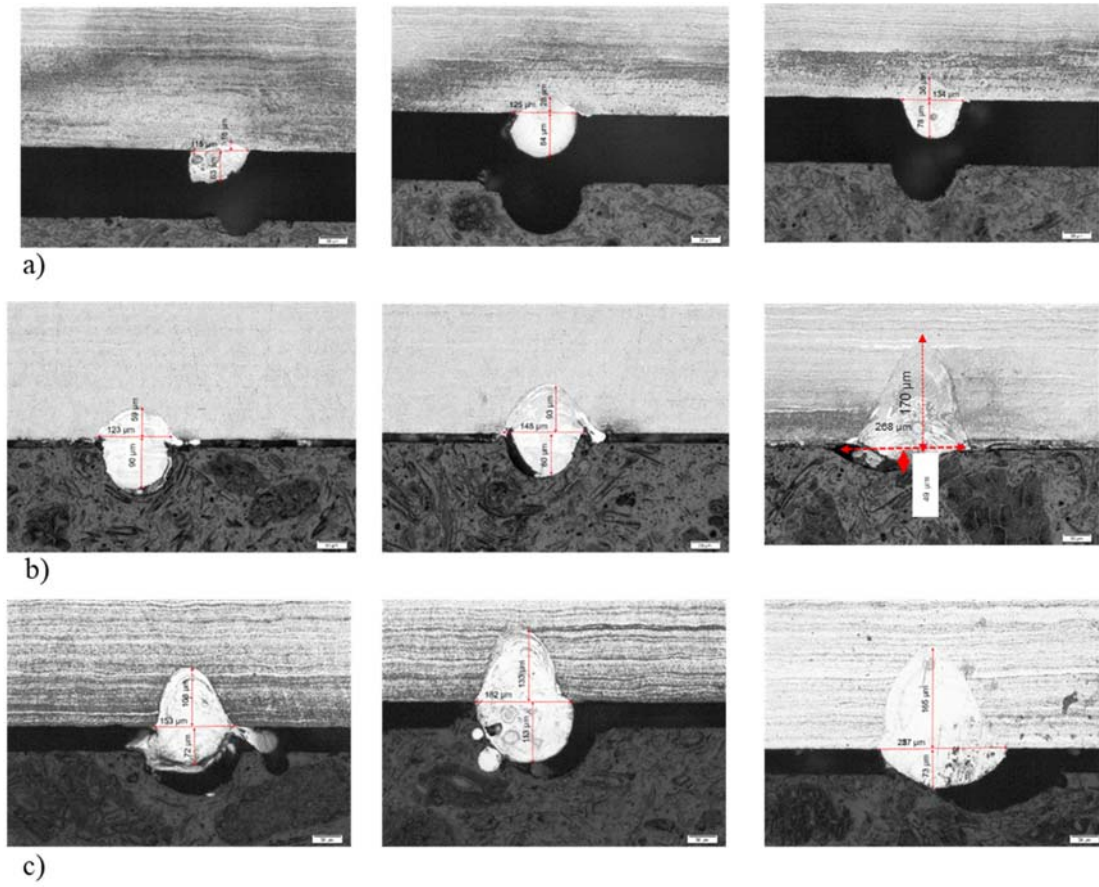
$$E = \frac{P}{v.t} \quad (8)$$

Eş. 8'de P lazer gücü, v mm/s cinsinden tarama hızı ve t mm olarak katman kalınlığı iken E J/mm² cinsinden enerji yoğunluğudur. Literatürde 316L alaşım tozu için 40-125 J/mm² arasında lazer izi çalışmaları bulunmaktadır [52-54]. 44 J/mm² değerinden itibaren etkin iletkenlik katsayısının hızla düştüğü, 92 J/mm² değerine kadar yapılan ölçümlerde ise en yüksek iletkenlik katsayısı değerlerinin gözlemlendiği ortaya konulmuştur [54]. Bu bilgiler doğrultusunda lazer gücü 50 W artışla (50 W'dan 500 W'a), uygun tarama hızında, 40, 60 ve 90 olarak üç set halinde denenmiştir. Her bir seçenek için lazer gücü ve tarama hızı ayrı ayrı değiştirilmiştir. Bunun anlamı ise sabit bir yoğunluk için her bir güç değerinde tarama hızının değiştirilmesidir. Elde edilen çizgilerden öncelikle her bir enerji yoğunluğu için optik mikroskop görüntüleri Şekil 13'te verilmiştir. Elde edilen izlerin Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) görüntüleri Şekil 14'te gösterilmiştir.

Şekil 13a incelendiğinde görüntülerin 13b ve 13c'ye kıyasla dağınık ve yetersiz olduğu ve güç artışına rağmen zayıflamakta olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte 13b ve 13c'de en iyi görüntünün 60 J/mm² enerji yoğunluğu için 250-300 ve 350 W değerlerinde elde edildiği gözlemlense de, tüm enerji yoğunluklarında her bir çizgi optik üst görünüş incelemesiyle anlaşılamayacağı için havuz derinliklerinin incelenmesi gerekliliği anlaşılmaktadır. Bu sebeple Şekil 14'te her bir enerji yoğunluğu için en küçük güç değerinde, orta seviye gücünde ve en büyük güç değerinde (50 W-250 W ve 500 W değerleri için) ergiyik havuzu kesit görüntüleri ve boyutlandırması verilmiş, tüm kombinasyonların boyutları ise açıkça Tablo 6'da verilmiştir.



Şekil 13. Lazer izlerinin optik mikroskop görüntüleri, a) 40 J/mm², b) 60 J/mm² c) 90 J/mm²
(Laser track SEM images a) 40 J/mm², b) 60 J/mm², c) 90 J/mm²)



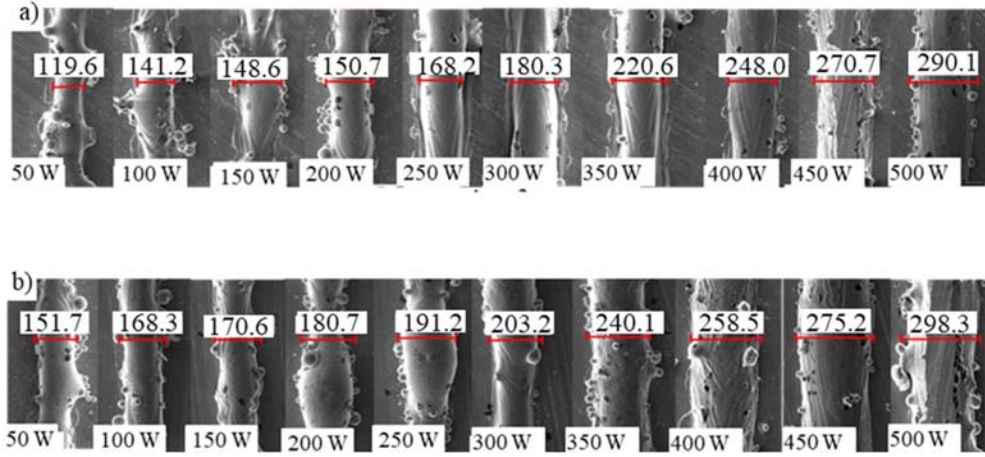
Şekil 14. Lazer izlerinin tam ortalarından alınan kesit görüntülerinde havuz boyutları, a) 40 J/mm^2 yoğunlukta 50 W-250 W ve 500 W için kesitler, b) 60 J/mm^2 yoğunluk c) 90 J/mm^2 yoğunluk
(Laser track SEM images a) Cross sectional areas from right middle of tracks at 40 J/mm^2 density, b) 60 J/mm^2 density, c) 90 J/mm^2 density)

Tablo 6. 3 farklı enerji yoğunluğu için ergiyik havuzu derinlik ve genişlikleri
(Melt pool depth and widths for 3 different energy densities)

Enerji yoğunluğu (J/mm^2)	Güçler (Watt)	Derinlik (μm)	Genişlik (μm)
40	50-100-150-200-250-300-350-400-450-500	16-18-23-26-28-25-28-31-33-36	115-121-114-123-125-121-129-134-131-136
60		59-62-76-84-93-108-123-145-156-170	123-138-143-145-148-160-189-211-237-268
90		108-115-124-129-133-143-151-157-161-165	153-163-172-179-182-201-229-256-273-287

Tablo 6 genişlik değerleri optik mikroskop görüntüleri üzerinden ölçümlerle bulunmuşken, aşağıda Şekil 15'te bulunan TEM görüntüleme sonucu bulunan genişlik değerleri ile birebir aynı olmasa da çok benzer oldukları göze çarpmaktadır. Bu ise optik mikroskop görüntüleri üzerinden sağlanan ölçümlerdeki Kabul edilebilir hata payından kaynaklanmaktadır. Ayrıca Tablo 6'da 40 J/mm^2 yoğunluktaki çizgiler için derinlik değerlerinin ölçümü sonucu yetersiz oldukları anlaşıldığından TEM görüntüsüne ihtiyaç duyulmamıştır. Şekil 15'te görüldüğü üzere 100 W-200 W aralığında

deneysel ışın çapları teorik ışın çapı ile en çok benzeyen değerlerdir. Diğer taraftan, ışın çapı 50 W için teorik değerden daha küçük, 200 W değerinden sonraki güç değerlerinde ise teorik çaptan daha büyüktür. Bu beklenen bir durumdur. Lazer ışın çapı toz üzerinde düştüğü yerde ve çevresinde ergitme işlemi devam ederken hem bir ısıdan etkilenen alan hem de bulanık bölge olarak adlandırılabilen bir katı-sıvı bölgesi oluşturmaktadır. Dolayısıyla ışın çapından daha büyük bir alana yayılan bir ergime havuz genişliği ve artan güç ile birlikte artan bir genişlik oluşmaktadır. 316L ile deneysel olarak



Şekil 15. Lazer izleri (μm) TEM görüntüleri, a) 60 J/mm², b) 90 J/mm² (Laser track SEM images a) 60 J/mm², b) 90 J/mm²)

yürütülen bir başka çalışmada, deneylerde 150 μm ışın çapına sahip bir cihaz ile 3 farklı 50 μm katman kalınlığında sırasıyla 320 W–400 mm/s, 400 W–400 mm/s ve 4 00 W–310 mm/s güç-hız kombinasyonları için 211,225 ve 269 μm genişlik değerleri ve 60, 88, 125 μm derinlikler elde edilmiştir. Bu çalışmada da teorik 150 μm ışın çapına sahip bir cihaz ile 50 μm katman kalınlığında 59 ile 170 μm aralığında değişen ve literatürle oldukça büyük benzerlikler genişlik ve derinlik değerleri elde edilmiştir [28]. Nüfuziyet zamanının denendiği bir başka çalışmada 150–400 W ve 50–4000 mm/s hız değerleri için ergiyik havuz derinliklerinin 168 ile 567 μm aralığında ölçüldüğü ortaya konulmaktadır. 50 μm katman kalınlığı kullanılan bu çalışmada belirgin olarak 150 W–200 mm/s kombinasyonunda 150 μm civarında bir genişlik ve 40 μm civarında bir derinlik görülmektedir [21]. Göreceli olarak daha küçük ışın çap ve katman kalınlığı ile yürütülen bir başka çalışmada (15 μm ışın çapı 10 μm katman) 400–2800 mm/s hız ve 40–100 W güç aralığında kombinasyonlar denenmiştir. 400 mm/s sabit hızda 50 ve 100 W arasında artan güce göre derinlik ve genişlik değerlerinin 16–144 μm ve 60–110 μm sınırları arasında güçle orantılı artışı ortaya konulmuştur. Ok büyük derinliklerde anahtar deliği ve gözeneklilik ihtimali, küçük derinliklerde ise yetersiz yakım olasılığı olduğu ifade edilmiştir. Aynı şekilde, 1200 ve 2800 mm/s sabit hızlar için de artan güç ile birlikte hem derinlik hem genişlik değerlerinin daha daha dar aralıkta arttığı anlaşılmaktadır. Benzer durum sabit güç değerlerinde artan hızla bağlı olarak azalan derinlik ve genişlik halinde sunulmuştur [29]. 200 μm gibi büyük bir katman kalınlığında yapılan bir diğer çalışmada 75 μm ışın çapıyla 400 W sabit güçte 50–350 mm/s hızlar için havuz genişliklerinin 449 ile 591 μm aralığında elde edildiği ifade edilmiştir [27]. Bu değerlerin genelde enerji yoğunluğuna bağlı olarak özde ise artan güç ve azalan hız ile orantılı olarak arttığı, hatta büyüyen katman kalınlığı ile birlikte derinliğe nüfuz edemeyen enerjinin havuz genişliğinde ciddi bir artışa yol açtığı söylenebilir.

4. Simgeler (Symbols)

B	düzleştirici uzunluğu
BPP	ışın üretim parametresi
C	düzleştirici merceği çapı
E	lazer enerji yoğunluğu
F	lazer ışın çapı
J	joule
kg	kilogram
n	kırılma indisi
NA	sayısal açıklık
nm	nanometre

P	lazer gücü
t	katman kalınlığı
TEM	taramalı elektron mikroskobu
v	lazer tarama hızı
W	watt
w ₀	ışın bel yarıçapı
x	fiber çıkış çekirdek çapı
M ²	lazer ışın yayılma oranı
r _{düzleştirici}	düzleştirici merceği yarıçapı
λ	dalga boyu
μm	mikrometre
θ	ışın sapma açısı

5. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Bu çalışmada birçok alt sistemden meydana gelen özgün bir metal SLE cihazı geliştirilmiş ve performansı incelenmiştir. Metal eklemeli imalat sistemlerinin tasarımı konusunda araştırmacılara yol haritası olabilecek bu çalışmada kapsamında, ön ısıtmalı ve çift taraflı serme fonksiyonuna sahip bir serici hazne ile tasarlanan serici alt sistem tasarımı ve imalatı, lazer optik ekipmanların seçimi ve SLE cihazının imalatı sonunda odak uzunluğunun bulunması süreçleri ele alınmıştır. Toz besleme modülü, serme modülü, imalat tablası modülü, lazer-optik modül gibi ayrı alt sistemlerden oluşan modüler cihaz ortaya konurken, toz besleme sistemi için mukavemet hesapları, serme sistemi için katman kalınlığı ve serme hızı optimizasyonu, imalat tablası için tabla hassasiyet testi, lazer-optik ekipmanlara yönelik matematiksel ekipman seçimi yürütülmüştür. Son olarak koruyucu gaz filtreleme ve lazer optik soğutma sistemleri testleri yapılarak devreye alınmıştır. Ayrıca, 316L alaşımı ham madde kullanımıyla üretim kalitesi ve teorik ışın çapının deneysel doğrulanması ile ergiyik havuzu boyut incelemeleri çeşitli süreç parametreleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiş ve geliştirilen cihazın performansı ortaya konmuştur. 50 ile 200 W aralığında teorik ışın çapı ile en benzer ışın genişlikleri elde edilirken, diğer güç değerlerinde ise güç artışı ile orantılı olarak hem genişlik hem de derinlikte bir artış görülmüştür. Böylece elde edilen sonuçlar, hem ışın çapı değerlerine hem de lazer çizgi ergitme verimliliğine göre geliştirilen cihazın literatürdeki enerji yoğunluğu verilerine dayalı olarak seçilen parametrelerde eklemeli imalat gerçekleştirmeye elverişli olduğu göstermiştir.

Şekil 13a ve 14a'da sunulduğu üzere 50–500 W aralığında 40 J/mm² enerji yoğunluğunda etkin bir yakım sağlanamamıştır. 316L ile yapılan çalışmalardan birinde 44 J/mm² altında çok düşük ısı iletim katsayısı değerleri ortaya konulmuştur [54]. Ayrıca çizgi çalışmaları

incelendiğinde 50 J/mm^2 ile 125 J/mm^2 aralığında yoğunluklarda sağlıklı ergiyik havuzu boyutlarının elde edildiği anlaşılmıştır [42, 53, 54]. Bunun yanında Tablo 6'da ölçülmüş havuz derinlikleri incelendiğinde en az 1,5-3 katman aralığında bir derinlik nüfuziyetinin yalnızca 60 ve 90 J/mm^2 değerlerinde yakalanabildiği görülmektedir. Bununla beraber farklı katman kalınlıkları için parametre tayini sürecinin ve performansın tekrar değerlendirilmesi zorunluluğu ortadan kalkmamaktadır. Literatür çalışmaları incelendiğinde katman kalınlığının artışıyla birlikte ciddi bir artış gösteren genişlik değerleri oluşmaktadır. Buna ek olarak daha ince katmanlar için ciddi bir artış gösteren derinlik değerleri anahtar deliği formuna ve dolayısıyla gözenek oluşturmaya uygun hale gelmektedir. Öte yandan artan güç ve azalan hız ile birlikte ışın çapı değerlerinin en az yarısından başlayarak havuz derinliklerinde ve çap değerinden itibaren başlayan havuz genişliklerinde doğru orantılı artışlar görülmektedir [21, 27-29]. Tablo 6 incelendiğinde literatür değerleri ile uyumlu ve de güç-hız kombinasyonuna bağlı olarak doğru orantılı değişen havuz boyutlarının bu çalışmadaki cihaz ile elde edilebildiği anlaşılmaktadır. Bununla beraber yine tek çizgiler yanında yanyana çoklu çizgilerle imalat denemelerinin yapılması, bir lazer ergitme cihazının çizgiler arası girişim performansının da ölçülmesini sağlayabilir ve parça imalatına yönelik daha kapsayıcı parametreler tayin edilebilir.

Gelecekte deneysel ve teorik ışın çapı incelemeleri bağlamında daha kapsamlı, daha çok parametrenin deneneceği deneysel çalışmalar yapılması planlanmaktadır. Lazer gücünün ve tarama hızının çoklu çizgi deneyleri üzerinden etkisinin incelenmesi, çoklu çizgi deneyleri sırasında tarama mesafesinin etkisinin incelenmesi yoluyla da parça imalatına yönelik en iyi parametrelerin bulunması çalışmaları planlanmaktadır.

Kaynaklar (References)

1. Feygin M., Apparatus and method for forming an integral object from laminations, US patent 4,752,352, filed April 17th, 1987, published June 1st, 1988.
2. Drstvensek L., Valentan B., Brajlili T., Strojnik T., Ihan H.N., Direct digital manufacturing as communication and implantation tool in medicine, US-Turkey Workshop On Rapid Technologies, 24, 75-81, 2009.
3. Kamsky G.V., Kolomiets A.A., Popov V.V., Review Of The Main Producers Of 3D-Machines For Metals, Characteristics Of The Machines, And Directions Of Development, *Международный научно-исследовательский журнал*, 8 (50), 48-54, 2015.
4. Hauser, C., Childs, T. H. C., Dalgarno, K. W., Selective Laser Sintering of Stainless Steel 314S HC Processed Using Room Temperature Powder Beds, *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, 273-280, 1999.
5. Mercelis P., Kruth J. P., Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting, *Rapid Prototyping J.*, 12 (5) 254-265, 2006.
6. Pohl H., Simchi A., Issa M., Dias H. C., Thermal stresses in direct metal laser sintering, *Proceedings of the SFF Symposium*, 366-372, 2001.
7. Ciraud, P., Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung beliebiger Gegenstände aus beliebigem schmelzbarem Material, German patent application DE 2263777, priority filed December 28th, 1971, published July 5th, 1973.
8. Housholder, R., Molding Process, US patent 4,247,508, filed December 3rd, 1979, published January 27th, 1981.
9. Hull, C., Method and apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography", US patent 4,575,330, filed Aug. 8th, 1984, publ. March 11th, 1986.
10. Geiger, M. and Vollertsen, F. (Ed.), *Laser Assisted Net Shape Engineering*, *Proceedings of the LANE '94 conference*, Erlangen, October 12-14th, 1994.
11. Nyrhilä, O. and Syrjälä, S., Manufacture of dimensionally precise pieces by sintering, Finnish patent 91725, priority filed April 7th, 1989, published December 5th, 1990.
12. Eureka-Projekt E! 1184, Autosintering, 1994-95.
13. Santos E. C., Shiomi M., Osakada K., Laoui T., Rapid manufacturing of metal components by laser forming, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 46, (12-13), 1459-1468, 2006.
14. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C., Additive manufacturing of metals, *Acta Materialia* 117, 371-392, 2016.
15. Lewandowski J. J., Seifi M., Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties, *Annu. Rev. Mater. Res.*, 46 (1), 151-186, 2016.
16. Kamsky G.V., Kolomiets A.A., Popov V.V., Review Of The Main Producers Of 3d-Machines For Metals, Characteristics Of The Machines, And Directions Of Development, *Cyberleninka*, 8 (50), 48-54, 2016.
17. EOS, Eos-Metal-Systems, <https://www.eos.info/en/additive-manufacturing/3d-printing-metal/eos-metal-systems>, Yayın tarihi Temmuz 10, 2010. Erişim tarihi Ekim 11, 2022.
18. SLM, Products-and-Solutions/Machines, <https://www.slm-solutions.com/products-and-solutions/machines>, Yayın tarihi Ocak 10, 2012. Erişim tarihi Kasım 11, 2022.
19. Aggarwal, A., Patel, S., & Kumar, A., Selective laser melting of 316L stainless steel: physics of melting mode transition and its influence on microstructural and mechanical behavior, *Jom*, 71, 1105-1116, 2019.
20. Tang, C., Tan, J. L., & Wong, C. H., A numerical investigation on the physical mechanisms of single track defects in selective laser melting. In *J. Heat Mass Transfer*, 126, 957-968, 2018.
21. Wayne E. King, Holly D. Barth, Victor M. Castillo, Gilbert F. Gallegos, John W. Gibbs, Douglas E. Hahn, Chandrika Kamath, Alexander M. Rubenchike, Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bedfusion additive manufacturing, *J.Mater.Process. Technol.*, 214, 2915-2925, 2014.
22. Benarji, K., Jinoop, A. N., Ravikumar, Y., & Paul, C. P., Single track analysis of additive manufactured SS 316L based composites using powder bed fusion, *Mater. Today Proc.*, 115, 156-161, 2023.
23. Shi, W., Wang, P., Liu, Y., Hou, Y., & Han, G., Properties of 316L formed by a 400 W power laser Selective Laser Melting with 250 μm layer thickness, *Powder Technol.*, 360, 151-164, 2020.
24. Mohanty, S., & Hattel, J. H., Improving accuracy of overhanging structures for selective laser melting through reliability characterization of single track formation on thick powder beds, *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 9738, 178-191, 2016.
25. Kazemi, Z., Soleimani, M., Rokhgireh, H., & Nayeibi, A., Melting pool simulation of 316L samples manufactured by Selective Laser Melting method, comparison with experimental results, In *J. Therm. Sci.*, 176, 107538, 2022.
26. Ninpetch, P., Teenok, N., Kowitwarangkul, P., Mahathanabodee, S., Tongsri, R., & Ratanadecho, P., The Influence of Laser Parameters on the Melted Track and Microstructure of AISI 316L Fabricated by L-PBF Process, In *Proceedings of the 8th Asia Pacific IIW International Congress*, 39-43, 2019.
27. Liu Y., Zhang M., Shi W., Ma Y., Yang J., Study on performance optimization of 316L stainless steel parts by High-Efficiency Selective Laser Melting, *Opt.Laser Technol.*, 138,106872, 2021.
28. A. Baumard, D. Ayrault, O. Fandeur, C. Bordreuil, F. Deschaux-Beaume, Numericaprediction of grain structure formation during laser powder bed fusion of 316 L stainless steel, *Mater. Des.*, 199, 2021.

29. Hu, Z., Nagarajan, B., Song, X., Huang, R., Zhai, W., & Wei, J., Formation of SS316L Single Tracks in Micro Selective Laser Melting: Surface, Geometry, and Defects, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, Article ID 9451406, 2019.
30. Cheng, C. W., Liou, Y. W., Lee, A. C., & Tsai, M. C., Single Track of Selective Laser Melting Process: Modeling and Experimental Comparison, *J.Laser Micro/Nanoeng.*, 14, 2, 2019.
31. Lampeas G., Selective Laser Melting process simulation of open lattice cellular materials, *MATEC Web of Conferences*, 188, 03019, 2018.
32. Dong, Z., Liu, Y., Wen, W., Ge, J., & Liang, J. Effect of hatch spacing on melt pool and as-built quality during selective laser melting of stainless steel: Modeling and experimental approaches, *Materials*, 12 (1), 50, 2018.
33. Zhuang, J. R., Lee, Y. T., Hsieh, W. H., & Yang, A. S., Determination of melt pool dimensions using DOE-FEM and RSM with process window during SLM of Ti6Al4V powder, *Opt. Laser Technol.*, 103, 59-76, 2018.
34. Du, Y., You, X., Qiao, F., Guo, L., & Liu, Z., A model for predicting the temperature field during selective laser melting, *Results Phys.*, 12, 52-60, 2019.
35. Soundararajan, B., Sofia, D., Barletta, D., & Poletto, M., Review on modeling techniques for powder bed fusion processes based on physical principles, *Addit. Manuf.*, 47, 102336, 2021.
36. Kempen, K., Vrancken, B., Buls, S., Thijs, L., Van Humbeeck, J., & Kruth, J. P., Selective laser melting of crack-free high density M2 high speed steel parts by baseplate preheating, *J. Manuf. Sci. Eng.*, 136 (6), 061026, 2014.
37. Kempen, K., Vrancken, B., Thijs, L., Buls, S., Van Humbeeck, J., & Kruth, J.P., Lowering thermal gradients in selective laser melting by pre-heating the baseplate, *Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings*, 2013.
38. Hagedorn Y., Towards finer structures: state of the art in selective laser melting (SLM), in: *Precision fair*, Veldhoven, Netherlands, 2013.
39. Mertens, R., Vrancken, B., Holmstock, N., Kinds, Y., Kruth, J. P., & Van Humbeeck, J., Influence of powder bed preheating on microstructure and mechanical properties of H13 tool steel SLM parts, *Physics Procedia*, 83, 882-890, 2016.
40. Kishore, V., Ajinjeru, C., Nycz, A., Post, B., Lindahl, J., Kunc, V., & Duty, C., Infrared preheating to improve interlayer strength of big area additive manufacturing (BAAM) components, *Addit. Manuf.*, 14, 7-12, 2017.
41. Vrancken, B., Buls, S., Kruth, J. P., & Humbeeck, J. V., Preheating of selective laser melted Ti6Al4V: microstructure and mechanical properties, In *Proceedings of the 13th World Conference on Titanium*, 1269-1277, 2016.
42. Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Chua, C. K., & Leong, K. F., Crystal structure analysis of M2 high speed steel parts produced by selective laser melting, *Mater. Charact.*, 84, 72-80, 2013.
43. He, K., & Zhao, X., 3D Thermal Finite Element Analysis of the SLM 316L Parts with Microstructural Correlations, *Complexity*, 2018.
44. Zhang, Q., Xie, J., Gao, Z., London, T., Griffiths, D., & Oancea, V., A metallurgical phase transformation framework applied to SLM additive manufacturing processes, *Mater. Des.*, 166, 107618, 2019.
45. Paschotta, R., M2 Factor, *Encycl. Laser Phys. Technol.*, https://www.rp-photonics.com/m2_factor.html , Yayın tarihi Ocak 10 2009, Erişim tarihi Nisan 11 2022.
46. Wen, W., Zhang, X., Laser Beam Quality of Airy Beam in the Jet Engine Exhaust Induced Turbulence, *Atmosphere*, 14 (9), 1374, 2023.
47. Gentec-eo. Quantifying the quality of a laser beam with the Beam Parameter Product and the M2 factor. <https://www.gentec-eo.com/blog/beam-parameter-product-and-the-m2-factor#:~:text=The%20Beam%20Parameter%20Product%20is, but%20BPP%20varies%20with%20wavelength.> Yayın tarihi Eylül 23, 2022. Erişim tarihi Ocak 15, 2024.
48. Glover S. Beam Delivery: M2, BPP, Spot Size & Why You Should Care. <https://www.laserchirp.com/2016/11/beam-delivery-m2-bpp-spot-size-why-you-should-care/>. Yayın tarihi Kasım 8, 2016. Erişim tarihi Ocak 15, 2024
49. Eckop. Numerical Aperture and F-Number. <https://www.eckop.com/resources/optics/numerical-aperture-and-f-number/>. Yayın tarihi Kasım 15, 2019. Erişim Tarihi Ocak 18, 2024
50. Paschotta R. Numerical Aperture. https://www.rp-photonics.com/numerical_aperture.html. Yayın tarihi Mayıs 19, 2006. Erişim Tarihi Ocak 16, 2024.
51. Edmundoptics, Fundamentals of lasers, <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/lasers/fundamentals-of-lasers/> , Yayın tarihi Eylül 10 2015, Erişim tarihi Kasım 11 2022.
52. Thorlabs, laser guide, https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=2400 ,Yayın tarihi Nisan 10 2009, Erişim tarihi Kasım 11 2022.
53. King, W. E., Barth, H. D., Castillo, V. M., Gallegos, G. F., Gibbs, J. W., Hahn, D. E., ... & Rubenchik, A. M., Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing, *J. Mater. Process. Technol.*, 214 (12), 2915-2925, 2014.
54. Metelkova, J., Kinds, Y., Kempen, K., de Formanoir, C., Witvrouw, A., & Van Hooreweder, B., On the influence of laser defocusing in Selective Laser Melting of 316L, *Addit. Manuf.*, 23, 161-169, 2018.
55. Simmons, J. C., Chen, X., Azizi, A., Daeumer, M. A., Zavalij, P. Y., Zhou, G., & Schiffrès, S. N., Influence of processing and microstructure on the local and bulk thermal conductivity of selective laser melted 316L stainless steel, *Addit. Manuf.*, 32, 100996, 2020.