



Investigation of the effect of different process parameters for laser additive manufacturing of metals

Özgür Poyraz¹, Melih Cemal Kuşhan²

¹TEI Tusaş Engine Industries., Esentepe Mahallesi Çevreyolu Bulvarı No:356, 26003, Eskişehir, Turkey

²Eskişehir Osmangazi University, Faculty of Engineering and Architecture, Department of Mechanical Engineering, Meşelik Campus, 26480, Eskişehir, Turkey

Highlights:

- Functional part production with additive manufacturing
- Critical process parameters and effects in additive manufacturing
- Systematical literature review

Keywords:

- Additive manufacturing
- Laser additive manufacturing
- Metallic materials
- Process parameters
- Challenges

Article Info:

Received: 22.05.2017

Accepted: 15.11.2017

DOI:

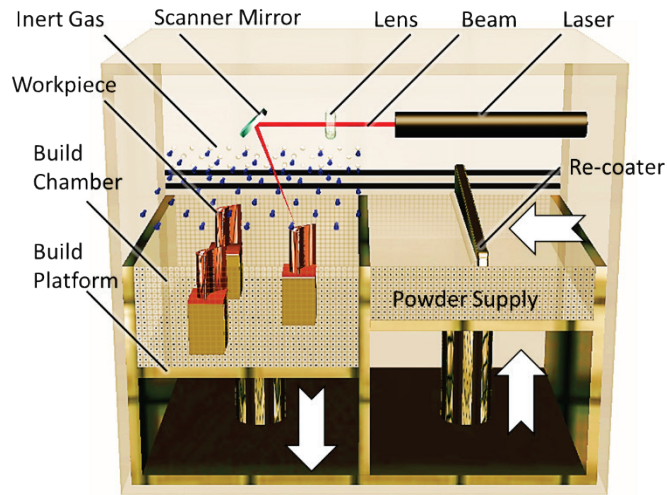
10.17341/gazimmfd.416479

Acknowledgement:

Correspondence:

Author: Özgür Poyraz
e-mail:
ozgur.poyraz@tei.om.tr
phone:
+90 222 211 2351

Graphical/Tabular Abstract



Purpose: The purpose of the presented paper is to generate a systematically established knowledge base on the effect of different process parameters for laser additive manufacturing of metals.

Theory and Methods:

A systematical literature review for laser additive manufacturing has been conducted based on academic and peer reviewed publications. In this regard an overview is given for metal additive manufacturing. Among this overview, characteristics of different metal additive manufacturing technologies (SLS, SLM, DMLS, EBM, DMD, LMD, LENS) were compared. Following to comparison a detailed review is presented for laser powder bed fusion processes. Considered parameters are laser power, scanning speed, layer thickness, hatch distance, scanning strategy, support structures and build direction.

Results:

The evaluated parameters are found to be significant in terms of additive manufacturing of a metallic part with high quality and integrity. The improvement potential is emphasized for build direction, scanning strategy and support structures. As for the result of the improvements on these parameters, form errors, surface quality, temperature distribution, residual stresses and distortions can be enhanced.

Conclusion:

The challenges still exist for the emerging additive manufacturing technologies and these can be overcome by utilization of optimum process parameters. Besides developing these process parameters by manufacturing and testing, other technologies may also be applied such as monitoring and modeling.



Metallerin lazer katmanlı imalatında farklı proses parametrelerinin etkisinin incelenmesi

Özgür Poyraz^{1*}, Melih Cemal Kuşhan²

¹TEI Tusaş Motor Sanayii A.Ş., Esentepe Mahallesi Çevreyolu Bulvarı No:356, 26003, Eskişehir, Türkiye

²Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Meşelik Yerleşkesi, 26480, Eskişehir, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Fonksiyonel metal parçaların üretiminde katmanlı imalat uygulamaları
- Katmanlı imalatta kritik proses parametreleri ve etkileri
- Literatürdeki çalışmaların sistematik olarak irdelenmesi

Makale Bilgileri

Geliş: 22.05.2017

Kabul: 15.11.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416479

Anahtar Kelimeler:

Katmanlı imalat,
lazerle metal toz ergitme,
metalik malzemeler,
proses parametreleri

ÖZET

Katmanlı imalat teknolojileri için metal malzemeden fonksiyonel parça üretimi amaçlı araştırmalar artarak devam etmektedir. Söz konusu katmanlı imalat teknolojileri; kullanılan malzeme formu, malzeme ekleme tekniği, enerji girdisi çeşidi ve proses konfigürasyonu gibi pek çok konuda farklılıklar göstermektedir. Bunlar arasından lazerle metal toz ergitme yöntemi, yeni malzeme çeşitleri açısından sunduğu esneklik, ince geometrik unsurların üretilebilmesi ve yüzey kalitesinin diğer yöntemlere kıyasla iyi olması sebebi ile çeşitli endüstri kolları tarafından tercih edilmektedir. Bununla beraber söz konusu yöntemin doğası gereği meydana gelen, metal tozunun hızlı ergime ve katılaşma süreçleri sebebi ile iç (artık) gerilmeler oluşmakta, bu gerilmelere bağlı olarak parçada deformasyonlar meydana gelebilmekte ve dolayısıyla, parça geometrisi veya malzemesine bağlı olarak hedeflenen kalitede üretimler elde edilememektedir. Söz konusu zorlukların üstesinden gelmek, ancak lazerle metal toz ergitme yönteminin imalat/proses parametreleri açısından optimize edilmesi ile mümkün olmaktadır. Bununla beraber ilgili proseste yer alan onlarca farklı parametrenin etkisinin tek bir araştırmacı veya kurum tarafından anlaşılması, zaman ve maliyet açısından uygulanabilir değildir. Bu sebeple bu çalışmada literatürde geçen farklı araştırmalar sistematik olarak gözden geçirilmiş, proseste kullanılan parametreler açıklanmış, farklı durumlarda karşılaşılan zorluklara dikkat çekilmiş ve bu zorlukların üstesinden gelebilmek için proses parametrelerinde yapılan geliştirmeler ortaya konmuştur.

Investigation of the effect of different process parameters for laser additive manufacturing of metals

H I G H L I G H T S

- Additive manufacturing applications for the production of functional metallic parts
- Critical process parameters and effects for additive manufacturing
- Systematic review of studies in the literature

Article Info

Received: 22.05.2017

Accepted: 15.11.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416479

Keywords:

Additive manufacturing,
laser additive manufacturing,
metallic materials,
process parameters

ABSTRACT

Many research projects are being conducted regarding additive manufacturing technologies, which help widen their application field for the manufacturing of functional metallic parts. Additive manufacturing technologies differ in many ways, such as the form of the material used, the material addition technique employed, the type of the energy input and the process configuration. Among these, laser additive manufacturing is preferred by industry due to their flexibility for new material types, the ability to produce small geometrical features and better surface quality compared to the other methods. However, due to the rapid melting and solidification processes inherent in this method, the internal stresses increase, deformations occur, and therefore, high quality products cannot be obtained depending on the geometry and the material selection. It is only possible to overcome these challenges by optimizing the process in terms of different parameters. However, it is not feasible in terms of time and cost to understand the effects of dozens of different parameters on the relevant process by a single investigator or an institution. For this reason, in this paper different studies in the literature have been systematically reviewed, the parameters used in the process have been explained, the challenges encountered in different cases have been pointed out, and the improvements made in the process parameters have been revealed.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: ozgur.poyraz@tei.com.tr / Tel: +90 222 211 2351

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Katmanlı imalat; konvansiyonel imalata göre oldukça yeni teknolojilerden oluşmasından dolayı, bu konuda ortaya koyulan ilk standartlar temel terminoloji üzerindedir [1]. Bunlardan biri olan ASTM F2792.429494 -1 standardına göre katmanlı imalat; nesnelere 3B (3 boyutlu) model verisinden, genelde üst üste dizilen katmanlar halinde malzemelerin birleştirilerek oluşturulduğu bir imalat yöntemidir [2]. Benzer şekilde, VDI-3404 Katmanlı İmalat Terminolojisi Standardında tanımlandığı haliyle, iş parçasının birbirini takip eden katmanlar veya birimlerle inşa edildiği üretim prosesine katmanlı imalat denilmektedir [3]. Günümüzde katmanlı imalat üzerine yürütülen çalışmaların yoğunlaşmasının temel nedeni, katmanlı imalat teknolojilerinin sunduğu avantajlardır ve bu avantajlar yalnızca imalatı değil aynı zamanda tasarımı da etkilemektedir. Bu avantajlar arasında;

- Konvansiyonel döküm ve talaşlı imalat yöntemlerine kıyasla daha fazla tasarım serbestliği,
- Hücreli yapılar [4] veya optimize tasarımlar sayesinde hafif ürünler ortaya konulması,
- İç soğutma kanalları gibi önemli fonksiyonel unsurların üretimine izin vermesi,
- Daha az talaş kaldırma [5] ve bu sayede daha az malzeme harcama gereksinimi,
- Döküm veya deformasyon prosesleri için gerekli olan kalıplara [6] ihtiyaç duymaması,
- Kullanıcıya özel ürünler tasarlanıp imal edilebilmesi,
- Tasarımdan imalata geçiş sürelerini kısaltarak piyasa daha hızlı ürünler sunulması,

gibi pek çok avantaj sayılabilir [7, 8]. Sıralanan avantajlar sayesinde yaygınlaşan katmanlı imalat teknolojileri, geçmişte görsellik sağlayan modeller, parçaların yerine uyduğunu ve düzgün çalıştığını görme amaçlı prototipler ve takım-kalıp yapmak için kullanılırken, artık havacılık ve uzay sanayi gibi birçok sektördeki çalışmalar, doğrudan parça imalatı üstünde yoğunlaşmaktadır.

Katmanlı imalat, temel terminoloji standartlarında tanımlandığı haline kıyasla çok daha fazla detay içermektedir. Farklı katmanlı imalat teknolojilerinde farklı ilkeler doğrultusunda parça inşa edilmekte ve çalışılması hedeflenen proses seçildikten sonra, proses ile ilgili kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla beraber farklı katmanlı imalat teknolojilerinin [7] büyük çoğunluğu için geçerli olan bazı ortak aşamalar mevcuttur [8, 9]. Bu aşamalar sırası ile Şekil 1’de özetlenmektedir. Katmanlı imalatın gelişimini yaklaşık son 30 yıldır takip ederek raporlayan Wohlers Raporu’na göre; doğrudan parça imalatı, toplam katmanlı imalat içinde 2000’li yıllardan bu yana oldukça hızlı bir değişim göstermiş olmakla birlikte, 2003’te %4’ten küçük olan bu performans indeksi 2013’te yaklaşık %30’lara ulaşmış durumdadır [10]. Doğrudan parça imalatı, katmanlı imalat teknolojileri ile üretilen parçaların son ürünlerde kullanılmasını tanımlamaktadır ve daha önce

sadece görsel prototipler, döküm modelleri veya montaj denemeleri için kullanılan ürünlere kıyasla daha yüksek isteklerin karşılanması gerekmektedir. Katmanlı imalat ile doğrudan üretilen ve metal malzemeden oluşan son ürünlerde kullanılması hedeflenen parçalar için, gerek mekanik özellikleri gerekse dayanım gereksinimleri sebebi ile, kullanılacak katmanlı imalat teknolojisinin detaylı bir şekilde irdelenmesi gerekmektedir. Katmanlı imalat teknolojilerine yönelik tezgah geliştiren kurumlar, seçili malzemeler için farklı özelliklere yönelik optimizasyon yapmakta ve fakat bu durum son kullanıcıların imalat süreçleri açısından yeterli olmamaktadır. Bunun temel sebebi parça imalatı yapan son kullanıcıların tezgâh veya malzemenin yanında farklı parça geometrileri açısından da değişkenlerin etkilerine ait bilgilere ihtiyaç duymasındadır.

Katmanlı imalat uygulamalarının artışı ve araştırmaların gelişimi göz önüne alınarak gerçekleştirilmiş bu kapsamlı literatür araştırmasında, metallere lazer katmanlı imalatında farklı proses parametrelerinin etkisinin incelenmesi aktarılmaktadır. Takip eden bölümde metallere katmanlı imalatı için kullanılan teknolojiler genel hatları ile aktarılmış ve daha sonra çalışma odağını oluşturan toz yatağında lazer katmanlı imalatın seçilmesinin sebepleri açıklanmıştır. Sonraki bölümlerde yöntemin kullanılmasındaki zorluklar, kısıtlar ve geliştirmeye açık alanlara vurgu yapılarak mevcut dönemdeki araştırmacıların önerdiği çözümler ve gelecek dönemler için araştırma ihtiyaçları ortaya konmuştur. Sunulan bu çalışma, söz konusu prosesler için önemli olan sorunları ve farklı araştırmacılar tarafından peyderpey olarak yapılan detay çalışmaları bir araya toplaması ve özetlemesi ile bu konudaki bilgi birikimine katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

2. METALLERİN KATMANLI İMALATI (ADDITIVE MANUFACTURING OF METALLIC PARTS)

Metallerin katmanlı imalatı için kullanılan teknolojiler kendi içlerinde farklı çeşitlere ayrılmakta, özelleşmekte ve farklı çeşitler farklı ilkeler doğrultusunda ürünleri inşa etmektedir. Metal malzemeler için kullanılan katmanlı imalat teknolojileri kullanılan malzeme formu, malzeme ekleme tekniği, enerji girdisi ve bunların kombinasyonu açısından önemli farklılıklar göstermektedir. Metallerin katmanlı imalatında üç farklı malzeme formu kullanılabilir ve bunlar sırası ile toz [11], tel [12] ve sac [13] formundaki metal malzemelerdir. Aktarılan formlar arasında tel ve sac malzemeler, kullanan proseslerin hızlı imalat zamanları gibi avantajları olmakla beraber, bazı durumlarda proses sonrası ortaya çıkan geometrik ve metalürjik problemler sebebi ile günümüzdeki doğrudan parça imalatı uygulamalarında toz malzemeler kadar yaygınlaşmamıştır [14]. Bununla beraber; tel ve sac malzeme formunun kullanıldığı katmanlı imalat teknolojilerindeki tasarım serbestliğinin düşük olması da ayrı bir dezavantajdır [15]. Bunun temel sebebi tel ve sac formundaki malzemelerin tozlara kıyasla daha kalın olması ve kalın malzemelerin katman katman eklenmesi sonucunda ince geometrik unsurların imal edilememesidir.



Şekil 1. Katmanlı imalatta temel aşamalar (Basic stages in additive manufacturing)

Parçaların doğrudan imalatında daha yaygın uygulama alanı bulan ve toz formunda malzeme kullanarak direk ergitme yapan teknolojiler de kendi aralarında malzeme ekleme tekniği ve enerji girdisi açısından farklılık göstermektedir. Malzeme ekleme tekniği açısından yapılan sınıflandırmada, toz yatağında bir toz serici tarafından katman katman ekleme yapan lazerle metal toz ergitme ve elektron ışını ile ergitme prosesleri bulunmaktadır. Lazerle metal toz ergitme prosesi farklı tezgâh sağlayıcılarına sahiptir ve bu sebeple literatürde farklı kısaltmalar ve ticari isimler ile yer almaktadır. Bu kısaltmalar ve ticari isimler arasında SLM (Selective Laser Melting), DMLS (Direct Metal Laser Sintering) ve Laser Cusing bulunmaktadır [16]. Toz yatağında gerçekleştirilen bir diğer proses ise elektron ışını ile ergitme prosesidir ve bu prosesin lazerle metal toz ergitme prosesinden temel farkı enerji girdisinin lazer yerine elektron ışını ile sağlanmasıdır. Bu prosesin tek bir tezgâh sağlayıcısı olması sebebi ile literatürde sadece EBM (Electron Beam Melting) ismi ile geçmektedir. Toz yatağında gerçekleştirilen ve metal malzemeler için kullanılan katmanlı imalat teknolojileri arasında sayılabilecek son proses SLS (Selective Laser Sintering) prosesidir. Dilimizde Seçici Lazer ile Sinterleme şeklinde kullanılan bu proses malzeme ekleme tekniği ve kullandığı enerji girdisi açısından SLM prosesi ile benzerlik göstermektedir. SLS prosesinin SLM prosesine göre en temel farkı toz malzemenin tam ergime yerine sinterlenmesidir. Bu proses için kullanılan metal tozları polimer bağlayıcılar ile kaplı haldedir ve prosesin ilk tamamlandığı anda parçayı terk etmezler. Bu sebeple katmanlı imal edilmiş parçanın ilk haline Yeşil Parça (Green Part) adı verilir. Katmanlı imalat sonrası bağlayıcılar sebebi ile iç boşluklu olan parçalar fırınlara atılarak bağlayıcılarından çözündürülürler [7]. Malzeme eklemenin bir toz yatağında toz serici yerine, lazerle hareket eden bir nozul tarafından yapıldığı doğrudan imalat prosesleri de bulunmaktadır ve bunlara lazer biriktirme veya lazer yığma adı verilmektedir. Lazer yığma prosesinin de farklı tezgâh

sağlayıcıları olmasından dolayı, literatürde farklı kısaltmalar ve ticari isimler ile yer almaktadır. Bu kısaltmalar ve ticari isimler arasında Laser Cladding, DMD (Direct Metal Deposition), LMD (Laser Metal Deposition), LENS (Laser Engineered Net Shaping) ve DMT (Direct Metal Tooling) bulunmaktadır.

Metal parçaların katmanlı imalatında yaygın olarak kullanılan dört temel proses, proseslerde kullanılan malzeme ekleme tekniği, enerji girdisi, parça inşa hızları, boyutsal doğruluk, yüzey kalitesi ve malzeme çeşitliliği Tablo 1'de örnek veriler üzerinden karşılaştırılmaktadır. Tablodan görüldüğü üzere, dört temel proses arasından seçici lazerle metal toz ergitme ve lazer yığma prosesleri uygulanabilir malzemeler açısından en yüksek çeşitliliği sunmaktadır. Bununla beraber lazerle metal toz ergitme prosesinin daha iyi boyutsal doğruluk ve daha hassas yüzey kalitesi sunması, proses sonrası ikincil işlemler ve ek maliyetleri azaltma yönünde daha avantajlıdır. Gerek malzeme çeşitliliği ve gerekse boyutsal doğruluk ve yüzey hassasiyeti dikkate alınarak; bu çalışma, lazerle metal toz ergitme prosesi ve ilgili proses açısından farklı parametrelerin etkisinin incelenmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır.

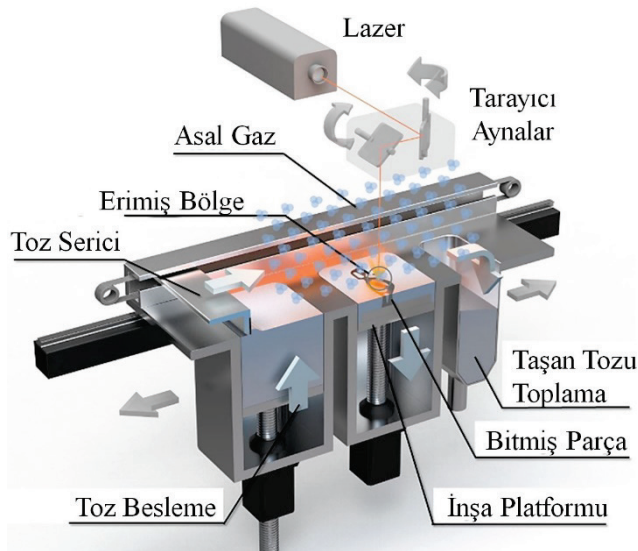
3. SEÇİCİ LAZERLE METAL TOZ ERGİTME (SELECTIVE LASER MELTING)

Seçici lazerle metal toz ergitme (Selective Laser Melting) prosesi toz yatağı içerisinde gerçekleştirilen ve enerji girdisinin lazer ışını ile yapılması temeline dayanan bir katmanlı imalat teknolojisidir (Şekil 2). Bu teknolojiye bir inşa platformu üzerine toz serici vasıtası ile serilen metal tozları, tarayıcı aynalar tarafından yönlendirilmiş lazer ışını ile olması gereken kesit geometrisinde taranır. Taranan bölgedeki metal tozları önce eriyip sonra katılarak parçanın ilgili katmanını oluşturur. Daha sonra inşa platformu bir katman kalınlığı kadar aşağı yönde hareket

Tablo 1. Metallerin katmanlı imalatında kullanılan temel prosesler ve özellikleri
(Basic processes and their properties used for metal additive manufacturing)

PROSES	Malzeme Ekleme	Enerji Girdisi	İnşa Hızı (cm ³ /saat)	Boyutsal Doğruluk (mm)	Yüzey Kalitesi (µm)	Uygun Malzemeler
SLM	Toz yatağı	Lazer ışını	7-70 [17]	0,1 – 0,2 [17]	Ra 11 [17]	Al, Co, Fe, Ni, Ti [18]
SLS	Toz yatağı	Lazer ışını	10-100 [17]	0,2 [17]	Ra 2 [17]	Polimer kaplı metal toz [17]
EBM	Toz yatağı	Elektron ışını	55-80 [17]	0,4 [17]	Ra 25-35 [17]	Fe, Ni, Ti [18]
LMD	Biriktirme	Lazer ışını	10-70 [17]	0,3 [17]	Ra 10-25 [17]	Al, Co, Fe, Ni, Ti [18]

eder ve bir önceki adımda yapılan işlemler tekrarlanır. Bütün döngü, imalat sonunda parçanın sahip olması gereken toplam yüksekliği elde edilene kadar yinelenir ve bu sayede parça inşa platformu üzerine birleşik halde imal edilmiş olur.



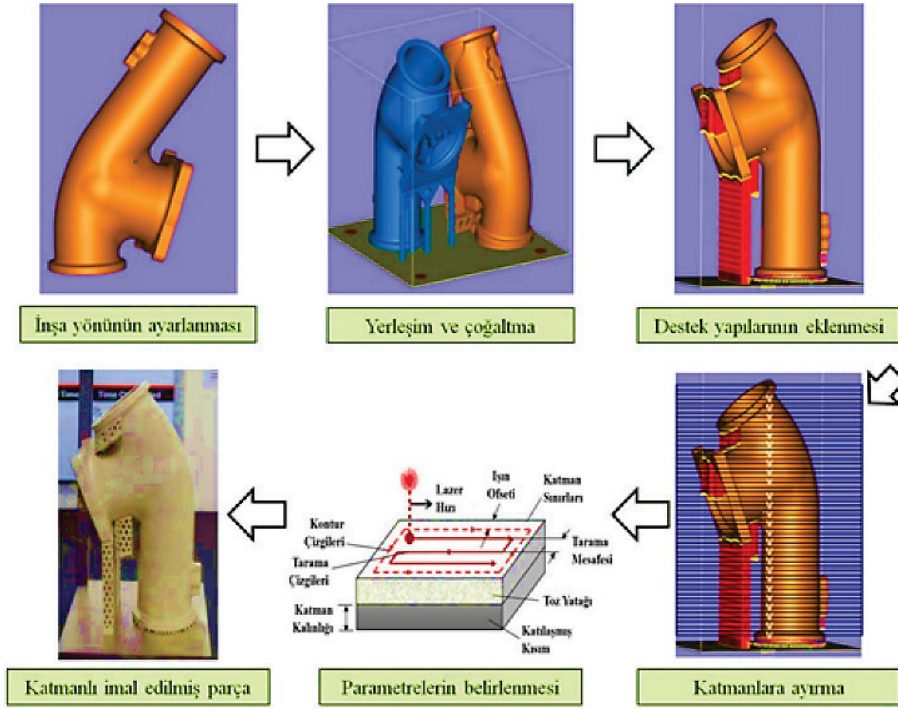
Şekil 2. Lazerle metal toz ergitme prosesi
(Laser additive manufacturing) [19]

Lazerle metal toz ergitme prosesinin gerçekleştirilmesi öncesinde, farklı yazılımlar [20, 21] vasıtası ile iş hazırlıklarının yapılması ve kullanılacak tezgâha hazırlanan iş dosyasının yüklenmesi gerekmektedir. Lazerle metal toz ergitme prosesi için iş hazırlıklarının ilk aşaması diğer katmanlı imalat prosesleri ile aynıdır ve bu kapsamda parçanın üç boyutlu geometrisini temsil eden model verisi, STL (Stereolithography file format) dosyası formatında iş hazırlama yazılımı içerisine alınır. Geometrinin üçgen şeklinde ağlara bölündüğü STL formatına çevrim aşamasında yüzeyleri oluşturan üçgenlerin birbirleri ile kesişmesi, farklı üçgen geometri gruplarının birbirleri üstüne binmesi veya üçgenlere ait yüzey normallerinin ters doğrultularda çıkması gibi bazı problemler olabilir. Bu sebeple dosyanın iş hazırlama yazılımına alınması sonrasında ilk işlem geometrinin tamir edilmesidir. Tamir edilen geometri için inşa yönü seçilir ve geometri seçilen yönde olacak şekilde döndürülür. İnşa yönünün seçiminde

dikkate alınacak hususlar yayının ileriki bölümlerinde aktarılacaktır. İnşa yönüne göre döndürülen geometri için yerleşim ayarlanır veya aynı platform üzerinde birden fazla parça üretilecekse çoğaltma ve kopyalama operasyonları gerçekleştirilir. İmalat için gerekli olan destek yapıları (Support Structures) bu aşamada oluşturulur. Söz konusu destek yapıları, geometrinin yüzey normalleri inşa yönü ile ters doğrultuda olan ve sarkan yüzey olarak adlandırılan yüzeylerden aşağıya doğru uzanır [22]. Bu yapılar seçici lazerle metal toz ergitme prosesinde sarkan yüzeylerin eritime sonrası toz üzerine çökmemesi (desteklik görevi), ısı iletimi ve artık gerilmeleri en aza indirmek için kullanılır. Sonraki adımda seçilen katman kalınlığı için katmanlara ayırma yapılır. Bunun üzerine farklı proses değişkenlerinin atanabilmesi için geometri bölgeleri belirlenir [23]. Bu bölgeler kapsamında öz (Core / In-skin), üst yüzey (Up-skin) ve alt yüzey (Down-skin) gibi ayrımlar yapılabilmektedir [24]. Üst yüzey kendisinden daha üstte malzeme olmayan ve alt yüzey de kendisinden daha altta malzeme olmayan bölgelere verilen isimlerdir. Bunlara ek olarak üst yüzey ve alt yüzey arasında kalan bölge öz olarak adlandırılır. Bu ayrıma gidilmesinin temel sebebi komşu bölgeleri taranmayan ve bu nedenle katı yerine toz çevresinde malzeme olmayan üst yüzey ve alt yüzey gibi bölgelere farklı proses parametreleri atayabilmektir. Bölgelerin belirlenmesi sonrasında seçilen bölgelere özel proses değişkenleri atanır. Proses değişkenleri arasında lazer gücü, tarama hızı, tarama stratejisi ve tarama mesafesi gibi pek çok parametre bulunmaktadır [25]. Şekil 3'te hazırlık aşamaları gösterilmektedir.

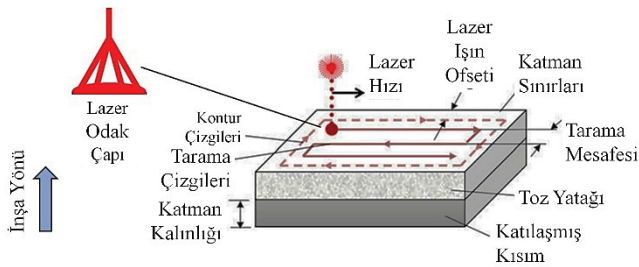
4. SEÇİCİ LAZERLE METAL TOZ ERGİTME İÇİN PROSES PARAMETRELERİ (PROCESS PARAMETERS FOR SELECTIVE LASER MELTING)

Seçici lazerle metal toz ergitme için proses parametreleri iki grupta incelenmektedir. Bu gruplar lazer ile ilgili parametreler ve geometri/tarama yolları ile ilgili parametrelerdir [27]. Lazer ile ilgili parametreler arasında; lazer gücü, lazerin odak çapı ve tarama hızı bulunmaktadır. Geometri veya tarama yolları ile ilgili temel parametreler ise; inşa yönü, katman kalınlığı, tarama mesafesi ve lazer ışını ofset değeridir. Bunlara ek olarak bant tarama, satranç tarama, iç-dış tarama gibi tarama stratejileri de parametreler arasında bulunmaktadır. Söz konusu parametrelerin doğru



Şekil 3. Lazerle metal toz ergitme için iş hazırlık aşamaları (Job preparation steps for laser additive manufacturing) [26]

seçimi başarılı bir imalat prosesi için büyük önem teşkil etmektedir ve parçanın mikro yapı, mekanik özellikleri, deformasyon, geometrik doğruluk ve yüzey kalitesi, kullanılan parametrelere göre değişiklik göstermektedir [28]. Bu parametrelerin büyük çoğunluğu Şekil 4'te gösterilmektedir. Bu parametreler ile birlikte, gerek üretim ve gerekse ürün kalitesini etkileyen diğer bir temel parametre destek yapılarıdır [28]. Bu yapılar bir katmanı yerinde tutmasının dışında ısı iletim ve termal gerilmelere dayanım fonksiyonlarını yerine getirirler [29].



Şekil 4. Seçici Lazerle metal toz ergitme için proses parametreleri

(Process parameters for selective laser melting) [28]

Seçici lazerle metal toz ergitme prosesinde gerek geometrik, gerek malzeme ve gerekse mekanik etkiye sahip temel parametrelerin iyi anlaşılması, üretim verimliliği ve ürün kalitesi açısından büyük fayda sağlamaktadır.

4.1. İnşa Yönü (Build Direction)

İnşa yönü, lazerle metal toz ergitme prosesi planlaması açısından değerlendirilmesi gereken ilk adımdır. Bu adımda

parçaların hangi yönde inşa edileceği belirlenir [30]. İnşa yönü belirlenmesi sırasında tezgâh inşa hacmi ölçülerine boyutsal olarak uyan parçalar için farklı özellikler dikkate alınmaktadır. Bu kapsamda ilk olarak, parçanın ikincil işlemlerinin ihmal edildiği çalışmalarda parçanın en kısa dış geometrik ölçüsü inşa yönüne paralel seçilebilir. Bu seçim, tozun serileceği katman sayısını azaltacaktır ve bu sayede kullanılacak toz miktarı ve malzeme maliyetleri de azalır [31]. Bununla beraber, ikincil işlemler ihmal edilse bile dikkate alınması gereken başka hususlar bulunmaktadır. Bunlar arasında en önemlisi, parçanın inşa yönüne dik kesitlerin alanlarının toplamıdır. Bu toplam alan, aynı malzemeden aynı tezgâhta işlem yapıldığı kabul edildiğinde, lazer parametreleri eşdeğer durumlar için toplam tarama zamanını doğrudan etkilemektedir [32]. Bununla beraber tarama zamanı da tezgâhın harcadığı enerjiyi etkilemektedir. Literatürde yapılan farklı çalışmalar, aynı geometri ve aynı katman kalınlığı için inşa yönü değişiminin toplam kesit alanını büyük ölçüde etkilediğini göstermektedir [33].

Pek çok parça için ikincil işlemler de gözetilmelidir ve bu sebeple her zaman parçanın en kısa ölçüsünün inşa yönüne paralel seçilmesi veya dik kesit alanlarının dikkate alınması yeterli olmaz. İkincil işlemleri en çok etkileyen değişkenlerden bir tanesi, kullanılan destek yapılarıdır [30]. İlerleyen bölümlerde detayları ayrıca irdelenecek olan destek yapıları, sarkan yüzey olarak adlandırılan ve parçanın aşağı yönde bakan yüzeylerini desteklemek için kullanılır [34] ve katmanlı imalatın tamamlanmasından sonra bu yapıların parçadan uzaklaştırılması gerekir. Bu sebeplerden dolayı parçanın inşa yönünün seçilmesi aşamasında çalışılan konuların içerisinde, sarkan yüzeylerin en aza indirgenmesi de yer almaktadır. Yapılan araştırmalar eğer parça

geometrisi elverişli ise, inşa yönünü değiştirmenin başvurulacak ilk iyileştirme olduğunu ortaya koymaktadır [35, 36]. İnşa yönünün seçimi için kullanılan son kriter ise form hataları ve yüzey kalitesidir. Bu kriterlere dikkat edilmesinin temel sebepleri arasında, fonksiyonel yüzeylerin imal edildiği şekli ile doğrudan kullanılmasını sağlamak veya düşük maliyetli ikincil işlemler (örneğin kumlama, el ile parlatma... vb.) ile parça yüzeylerine son halini verme bulunmaktadır. Katmanlı imalat sonucu oluşan form hataları ve yüzey kalitesinin temel sebebi merdiven etkisi (Stair Effect) adı verilen durumdur [37]. Katmanlı imalatın doğası sebebi ile inşa edilen yüzeylerde katman yapısına bağlı ortaya çıkan merdiven etkisi, ardışık gelen iki katmanın formu veya eğrisel yüzeylerde oluşturduğu atlamalar sebebi ile ortaya çıkmaktadır. Şekil 5'te söz konusu durumu temsil eden bir görsel verilmiştir. Merdiven etkisinin öngörülmesi için geometrik proses modellerinin oluşturulduğu ve deneysel verilerle doğrulandığı çalışmalarda [39, 40] merdiven etkisinin inşa yönü ile değiştiği, ve parça yüzeylerinin inşa yönü ile yaptığı açıların artması ile arttığı görülmektedir.

İnşa yönü seçiminde aktarılan farklı kriterlerin teker teker ele alınması, kritik olarak değerlendirilen değişkenler açısından faydalı olmakla beraber proses açısından en iyi çözümü vermeyebilir. Bu gibi durumlar hedeflenerek yapılan çalışma ve araştırmalarda, çok amaçlı optimizasyonlar üzerinde durulmaktadır [41]. Bu optimizasyon çalışmalarında geliştirilen algoritmalar doğrultusunda hesaplamalar gerçekleştirilmekte ve değişkenlerin önem sıralamasına göre en iyi inşa yönü tespit edilmektedir. İnşa yönünün değişken olarak ele alındığı çok amaçlı optimizasyon işlemlerinde belirlenecek inşa yönü ile elde edilmek istenen sonuçlar arasında en düşük imalat zamanı, en az destek yapısı gereksinimi, en yüksek boyutsal hassasiyet, en az merdiven etkisi ve buna bağlı ikincil işlem gereksinimi gibi hedefler bulunmaktadır[42].

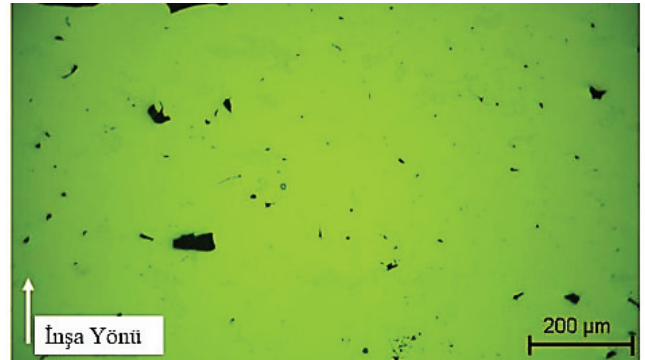
Bu çalışmalardan bazılarında işlevsellik de dikkate alınmaktadır [36]. Bununla beraber inşa yönü optimizasyonunda enerji girdisi, sıcaklık değişimi, artık gerilmeler ve deformasyonların da dikkate alınması gerekmekte ve bu yöndeki çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 5. Katmanlı imalatta merdiven etkisi (Stair effect in additive manufacturing) [38, 39]

4.2. Enerji Yoğunluğu ve Katman Kalınlığı (Energy Input and Layer Thickness)

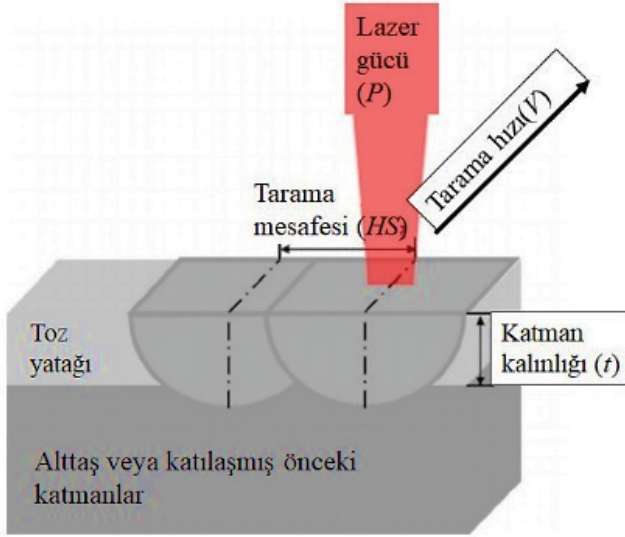
Metallerin katmanlı imalat ile üretilmesi aşamasında, proses parametrelerinin yanlış seçimi sonucu ortaya çıkabilecek iç boşluklar, parça bütünlüğü için tehlike oluşturmakta ve mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemektedir. Etkilenen fiziksel ve mekanik özellikler arasında parça yoğunluğu, elastisite modülü, akma dayanımı, çekme dayanımı ve yorulma gibi pek çok değer bulunmaktadır [42, 43]. Boşlukların oluşmasının pek çok sebebi olmakla beraber, temel nedenler arasında kalıpla üretim proseslerindeki gibi basınç olmaması, yer çekimi ve kapiler kuvvetler ile ergimiş malzemede görülen hareketler, katılma sırasında ortaya çıkan hava kabarcıkları sıralanmaktadır [44]. Şekil 6'da verilen içyapı fotoğrafında, AISI 316L malzemeden lazer katmanlı imalat ile üretilmiş bir parça kesitindeki iç boşluklar görülmektedir.



Şekil 6. Katmanlı imalatta iç boşluklar
(Porosities in additive manufacturing) [44]

İç boşlukların engellenmesi ve bu sayede parçaların bağlı yoğunluğunun, konvansiyonel yöntemlerle üretilen muadillerine göre yüksek seviyelere çıkartılması akademik çalışmaların yoğunlaştığı konulardandır ve her yeni katmanlı imalat malzeme uygulamasında yeni çalışmalar yapılmaktadır [44, 47]. Yapılan deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre, iç boşlukların birim hacimdeki enerji yoğunluğu ile bağlantılı olduğu ve yeterli girdi olduğunda ve tam ergime sağlandığında bu boşlukların oluşmadığı yorumlarına ulaşılmaktadır [45, 46]. Bu kapsamda önemli

olarak değerlendirilen enerji yoğunluğu, belirli proses parametrelerinin sonucu olarak değişmektedir ve literatürde birim alana [48, 49] ve birim hacme [50] olacak şekilde incelenmektedir. Söz konusu enerji yoğunluğunu birim alan için sağlayan ana parametreler arasında lazer gücü (P), tarama mesafesi (HS) ve tarama hızı (V) bulunmaktadır. Birim hacimdeki enerji yoğunluğu için bunlara bir de katman kalınlığı (t) eklenmektedir. Bu parametreler Şekil 7’de gösterilmektedir. Bununla beraber bu parametrelerden türetilen ve literatürde [48] “Andrew Numarası” olarak anılan ampirik enerji yoğunluğu eşitliği Eş. 1’de verilmektedir.



Şekil 7. Enerji yoğunluğu parametreleri (Parameters for energy input) [51]

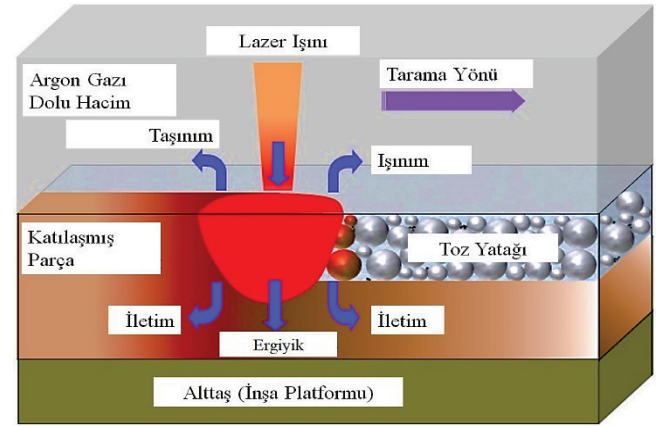
$$A_N = \frac{P}{HS \times V} \quad (1)$$

Denklemden de görüleceği üzere; enerji yoğunluğu lazer gücü arttıkça artmakta, tarama mesafesi ve/veya tarama hızı arttıkça azalmaktadır. Buradaki parametreler arasında lazer gücü, kullanılan katmanlı imalat tezgâhının en yüksek gücü ile sınırlıdır ve bu anlamda kısıtlı bir değişiklik imkânına sahiptir. Benzer şekilde tarama mesafesinin değişiklik imkânı da sınırlıdır. Bu durumun temel sebebi ise tarama mesafesinin lazer odak çapından daha büyük olursa arada taranmayan bölgelerin kalması olarak açıklanabilir. Lazer odak çapı da yine tezgâhta kullanılan lazerin cinsi ve dalga boyu ile ilgili olduğu için tezgâh üreticileri dışında değiştirilmesi çoğunlukla mümkün değildir. Üç değişkenli enerji yoğunluğu eşitliğinde iki değişkenin sınırlı olarak düzenlenebilmesi, diğer değişkenin de optimum değeri bulduktan sonra sabit kalmasına yol açmaktadır. Bunlar dışında, birim hacimdeki enerji yoğunluğunun dördüncü bir değişkeni vardır ve bu katman kalınlığı (t) değeridir. Bu değer eşitlikte paydaya eklenmektedir ve bu yönden bakıldığında katman kalınlığının arttığı durumlarda birim hacim için enerji girdisi azalacaktır [50]. Katman kalınlığının belirli bir seviyenin üstünde kullanıldığı durumlarda, üretilen parçaların fiziksel (yoğunluk) ve

mekanik (akma-çekme dayanımı, uzama) özelliklerinde düşüş tespit edilmiştir [52]. Bunun ötesinde katman kalınlığının değiştirilmesinin enerji yoğunluğu dışında form hataları ve yüzey kalitesi [40] gibi farklı konuları da etkileyeceği dikkate alındığında, bu parametrenin de proses açısından belirli sınırları geçmeyecek şekilde değiştirilebileceği sonucuna ulaşılmaktadır.

4.3 Tarama Stratejisi (Scanning Strategy)

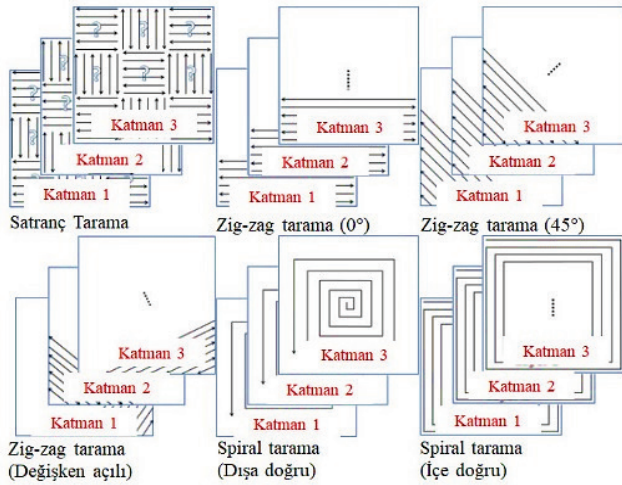
Bir önceki bölümde de aktarıldığı üzere, parçaya yapılacak enerji girdisi için önemli parametrelerin tamamının serbestçe değiştirilmesi mümkün olmamaktadır. Bununla beraber bu parametreler neticesinde oluşan enerji girdisi sayesinde metal tozları ergime sıcaklığının üzerine çıkmakta ve yeterli ergime gizli ısısı ile eriyerek katılaşmaktadır. Çok yüksek ergime ve katılaşma hızlarının olduğu lazer katmanlı imalat prosesinde, bu hızlar ile paralel yaşanan yüksek sıcaklık değişimleri termal genişlemelere yol açmakta ve alttaş üzerinde sabit olarak inşa edilen parçanın genişlememesi sebebi ile yüksek artık gerilmeler [53] ve deformasyonlar meydana gelmektedir [54, 55]. Şekil 8’de lazer katmanlı imalat sırasında meydana gelen fiziksel olaylar ve ısı ilişkileri gösterilmektedir.



Şekil 8. Lazer katmanlı imalatta fiziksel olaylar ve ısı ilişkileri (Physical phenomena and thermal relations in laser additive manufacturing) [56].

Bunların engellenmesine yönelik enerji girdisinin değiştirilemediği düşünüldüğü takdirde, enerji girdisinin olduğu bölgenin ve zamana göre sıralamasının değiştirilmesi üzerinde durulabilir. Bilimsel araştırmalarda sıklıkla incelenen bu konu için yaygın olarak uygulanan yöntem, farklı tarama stratejilerinin denenmesidir. Tarama stratejileri, işlem yapılan katman üzerindeki sıcaklık dağılımını değiştirmekte ve sıcaklık farkları sebebi ile katılaşmış parçada görülen termal genişleme, deformasyon ve artık gerilmeleri doğrudan etkilemektedir [25]. Lazerin tarama yaptığı yolun deseni olarak tanımlanabilecek tarama stratejileri arasından literatürde uygulama alanı bulanlar sırası ile; bant tarama, zig-zag tarama, spiral tarama ve satranç taramadır [58, 59], [60, 61]. Bant tarama, parça katmanının birbirine paralel vektörler halinde taranmasına denmektedir. Bu tür taramada vektörler için kullanılan açı

her katmanda aynı olabileceği gibi, her bir katmanda belirli bir derece (örneğin 45° , 67°) farkı kadar değişerek devam edebilir [57]. Zig-zag tarama da bant taramaya benzer bir stratejidir ve bant taramadan tek farkı iki ardışık tarama çizgisinin birbiri ile zıt yönde olacak şekilde düzenlenmesidir. Spiral tarama yönteminde taranan katmanın dış konturu tarama mesafesi kadar ötelenerek lazer deseni oluşturulur. Bu yöntemde, işlem içten başlayıp dışa doğru olabileceği gibi, dıştan içe doğru da yapılabilir. Satranç taramada ise, parçanın ilgili katmanı birim alanlara bölünerek bu alanlar kendi içinde bant veya zig-zag şekilde taranır. Şekil 9’da farklı tarama stratejilerinin örnek bir kare kesitli parçanın üç ardışık katmanı için olan hali gösterilmektedir.



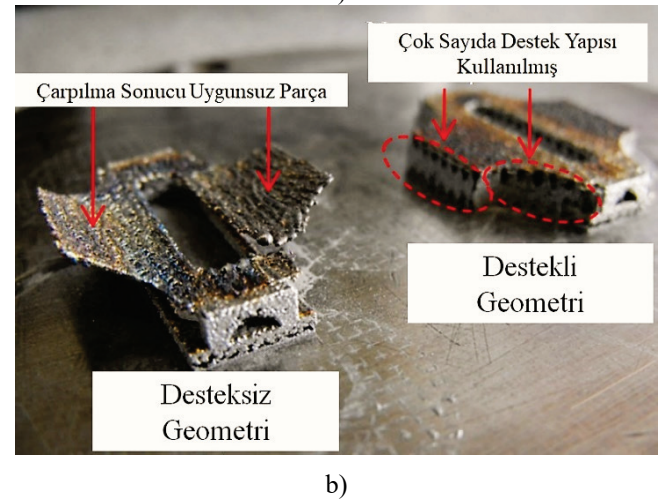
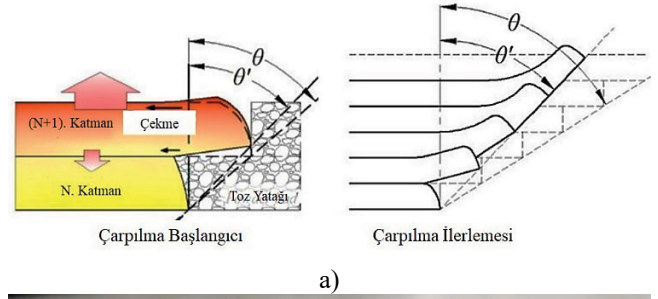
Şekil 9. Lazer katmanlı imalatta farklı tarama stratejileri (Different scanning strategies in laser additive manufacturing) [57]

Aktarılan tarama stratejilerinin deneysel ve hesaplamalı olarak ele alındığı çalışmalarda, özellikle sabit açıdaki bant tarama stratejisinde sıcaklık farklarının aynı anda aynı bölgede yoğunlaştığı ve bu sebeple ergimiş metal havuzlarının boyutlarının büyük olduğu ortaya konmuştur [25]. Bu durum konsolidasyon problemlerini ortaya çıkardığı için önerilmemiş ve spiral taramanın bant taramaya kıyasla daha iyi sonuç verdiği raporlanmıştır. Bununla beraber, spiral taramanın tüm geometrilere uygulanamaması bir dezavantaj olarak aktarılmaktadır. Diğer ilginç bir yöntem olan satranç taramada sıcaklık farkını tüm katman boyunca dengelemenin daha kolay olduğu aktarılmaktadır [25]. Bu durumun artık gerilmeler ve deformasyonlar açısından faydalı olduğu, hem daha düşük artık gerilme oluşturduğu hem de oluşan artık gerilmelerin X ve Y yönleri arasındaki farkı azalttığı literatürde raporlanmaktadır [34, 59].

4.4 Destek Yapıları (Support Structures)

Destek yapıları, inşa yönü ile ilgili bölümde de aktarıldığı üzere sarkan yüzey olarak adlandırılan ve imalatı yapılan parçanın aşağı yönde bakan yüzeylerini desteklemek için kullanılır [33]. Literatürde, “sarkan yüzey” terimi ile beraber, “aşağı bakan yüzey” terimi de kullanılmaktadır [62, 63]. Bu yüzeylerin eğimleri, yatay düzlem ile yaptıkları açı

ile tanımlanır ve kritik seviyenin üzerindeki açı değerlerine sahip olan yüzeyler kendi kendini destekleyen yüzeyler olarak adlandırılır [35]. Bu değerden daha az açığa sahip yüzeylerde çarpılma ve alt kısımlarda cüruf oluşumu gözlemlenebileceği gibi, daha kötü durumlarda toz serici ile çarpışması sonucu proses yarıda kalabilmektedir. Şekil 10’da bir sarkan yüzeydeki çarpılma başlangıcı ve ilerlemesi ile birlikte, çarpılma sonucu uygunsuz olarak katmanlı imal edilmiş parçalar görülmektedir.

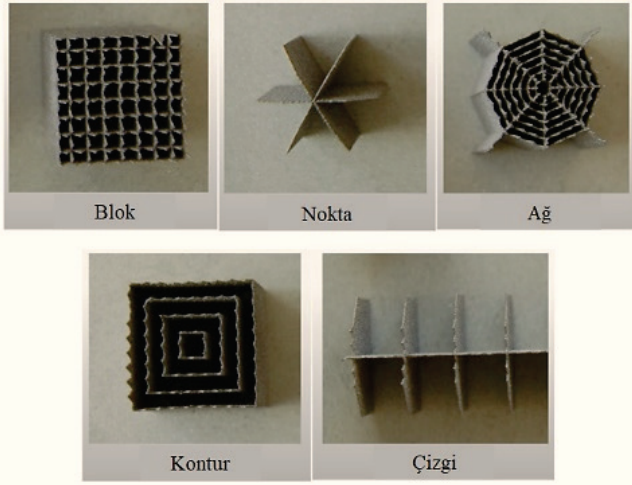


Şekil 10. Sarkan yüzeylerde çarpılma oluşumu a) örnek parça b)

(Warpage in overhanging surface a) sample part b)) [35, 64]

Sarkan yüzeylerdeki çarpılma probleminin destek yapıları artırılarak çözülmesi olası görülmekle beraber, imalat sürecinin tamamlanmasından sonra bu yapıların parçadan uzaklaştırılması gereksinimi ortaya çıkmaktadır [62]. Destek yapılarının parçadan uzaklaştırılması ikincil işlem gerekliliği oluşturacağı için, bu yapılara ihtiyacın azaltılması veya yenilikçi ve kolay uzaklaştırılabilen destek yapılarının geliştirilmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmalar arasında en yaygın olanları, ticari katmanlı imalat yazılımları tarafından kullanılan farklı destek yapılarına ait deneysel incelemelerdir. Söz konusu destek yapıları arasında blok, çizgi, nokta, ağ ve kontur şeklinde farklı yapılar bulunmaktadır (Şekil 11). Bu yapıların seçimi ile ilgili sistematik çalışmalar bulunmamaktadır ve günümüzde çoğunlukla sarkan yüzey geometrilerine göre seçimler gerçekleştirilmektedir. Bu duruma örnek vermek gerekirse nokta destekler çok küçük bölgelerde, ağ destekler dairesel çıkıntılar altında, çizgi destekler ince uzun bölgelerin tutulmasında kullanılırlar [65,

66]. Söz konusu yapılar arasından blok tipi destek yapılar parçaların fazla kütleyle sahip bölgelerinin altını ve kontur tipi destek yapılar ise parçalara ait çıkıntı şeklindeki dış kontur geometrilerinin altını desteklemektedir [67].



Şekil 11. Literatürde kullanılan farklı destek yapıları
(Various types of support structures studied in literature) [65].

Kullanılacak destek yapısının seçiminde destek yapısının türüne ek olarak, söz konusu tür içindeki geometrik unsurların, bu unsurların ölçülerinin ve yerleşiminin de önemi büyüktür. Blok tipi destek yapıları için Inconel 625 malzemeden yapılan bir çalışmada bloklar arasındaki mesafenin, sarkan yüzeylerin deformasyonu açısından en önemli parametrelerden bir tanesi olduğu ortaya konmuştur [62]. Bununla beraber destek yapılarının parça alt yüzeyleri ile temasta olan dişler ile ilgili parametrelerin ise destek yapısının ikincil işlemler sırasında ayrılmasını kolaylaştırdığı, fakat ayrılması kolay olan destek yapılarının ayrıldıkları yüzeylerden mikro düzeyde malzeme kopardığı görülmüştür [63]. Ticari yazılımlar ile oluşturulan destek yapıları ile ilgili yürütülen deneysel çalışmaların ötesinde yenilikçi çalışmalar devam etmektedir. Bu kapsamda farklı araştırmacılar farklı konulara yoğunlaşmaktadır. Yenilikçi çalışmalara verilebilecek örnekler arasında; temassız destek yapıları [67], içi boş destek yapıları [68], inşa platformundan genişleyerek yükselen destek yapıları [69], hücresel veya doğadan esinlenilmiş destek yapıları [70] bulunmaktadır. Pek çok geometrik unsura ve bunların kombinasyonuna sahip destek yapılarının denenmesi zaman ve maliyet açısından yüksek olduğu için simülasyon konusunda da çalışmalar başlatılmış, fakat mevcut durumda proses etkilerinin göz ardı edildiği hali ile literatürde yer almıştır [71]. Destek yapıları hakkında daha detaylı çalışma ihtiyacı sürmekte ve bu konu özellikle ürün geliştirme süreçleri açısından kritik önem teşkil etmektedir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Metallerin lazer katmanlı imalatı için kullanılan farklı proses parametreleri için literatürde sunulan çeşitli araştırmalar

mevcuttur, fakat konvansiyonel proseslere kıyasla nispeten yeni olan katmanlı imalat için daha fazla çalışma yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla beraber mevcut dönemde yayınlanmış çalışmaların sunduğu bulguların da doğru şekilde değerlendirilmesi ve proses parametrelerinin bilinen etkileri için kök neden analizleri yapılması gerekmektedir. Söz konusu kök neden analizleri, yeni çalışmalara başlarken konu ile ilgili araştırmacılar ve mühendisler bir başlangıç bilgisi verecek ve zaman - maliyetten tasarruf edilmesini sağlayarak konunun daha hızlı geliştirilmesine katkıda bulunacaktır.

Yapılan bu çalışmada, söz konusu faydaların sağlanması amaçlanmış ve yayının farklı bölümlerinde detayları aktarılan farklı proses parametreleri ve bunların etkisi ile ilgili neden sonuç analizi gerçekleştirilmiştir. Ulaşılan sonuçlar Tablo 2’de özetlenmektedir. Tabloda sonuçlar ile beraber ilgili parametreler için geliştirilme imkânları konusundaki yorumlar da aktarılmaktadır. Tablodan da görüleceği üzere, parametrelerin uygunsuz seçimi kimi zaman ürün, kimi zaman üretim, kimi zaman da her ikisi açısından sonuçları etkilemektedir. Bununla beraber, bazı parametrelerin geliştirilme imkânları düşük ve bazılarının ise yüksektir. Bu durumun temel sebebi, söz konusu parametrelere ait kısıtlar ve belirleyicilerdir. Bunlar arasından geliştirilme imkânı yüksek olan parametre ve belirleyicilerin kombinasyonları hesaplandığında onlarca olasılık göze çarpmaktadır. Bu da, farklı geometri ve farklı malzemeden fonksiyonel parçalar için çok sayıda deneye ihtiyaç duyulmasına sebep olmaktadır. İhtiyaç duyulan bu deney sayısı, gerek araştırma ve gerekse endüstriyel faaliyetler düşünüldüğünde zaman ve maliyet açısından uygun değildir.

Deney sayılarının düşürülmesi için literatürde, günümüze gelene kadar yapılan çalışmalar arasında; deney tasarımı [72] ve/veya katmanlı imalata yönelik tasarım kurallarının çıkartılması ve proses limitlerinin belirlenmesi bulunmaktadır [73, 74]. Bu kapsamda yapılan çalışmalar her ne kadar deneme yanılma sayılarını azaltsa, üretim süre ve maliyetlerinin düşüşünde olumlu etki yaratsa da yeni geometri ve farklı malzemeden ürünlere geçişte sundukları avantajlar kısıtlıdır. Bu durumda modelleme ve/veya eş zamanlı proses izleme ve kontrol üzerinde araştırmalar gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Mevcut dönemde yapılan modelleme çalışmaları sayesinde malzeme [75], mikro yapı [76], termal [77] ve mekanik [78] değişimlerin öngörülmesi mümkün olmaktadır. Bununla beraber modelleme için kullanılan araçların geliştirilmesi, yaygınlaştırılması ve simülasyon sürelerinin düşürülmesi gibi pek çok araştırma ihtiyacı bu konuda devam etmektedir [79, 80]. Proses izleme ve kontrol çalışmalarının yoğunlaştığı alanlar arasında serilmiş olan toz yatağının görüntülenmesi [81], oluşan ergi havuzunun genişliğinin görüntülenmesi [82] ve termal görüntüleme ile sıcaklık değişiminin izlenmesi [83] bulunmaktadır. Bu alanlarda yapılan çalışmaların da sadece izlemenin ötesinde geri besleme ve kapalı devre kontrole izin verme gibi yönlerinin geliştirilmesi konusunda araştırmalar devam etmektedir ve ticari olarak sunulan ürünler arasında

Tablo 2. Lazer katmanlı imalatta proses parametreleri ve etkileri (Process parameters and their effects in laser additive manufacturing)

Parametre	Kısıtlar ve Belirleyiciler	Üretime Etkisi	Ürün Kalitesine Etkisi	Olası Sonuçlar	Geliştirilme İmkânı
İnşa yönü	- Tezgâh ölçüleri	- Katman sayısı - Toz sarfiyatı - Tarama zamanı - Tarama enerjisi - Destek yapıları	- Form hataları - Yüzey kalitesi	- Uzun üretim süreleri - Uygunsuz geometrik özellikler	Yüksek
Enerji yoğunluğu	- Lazer gücü - Tarama mesafesi - Tarama hızı	- Tarama zamanı	- İç boşluklar - Parça yoğunluğu	- Uzun üretim süreleri - Uygunsuz mekanik özellikler	Düşük
Katman kalınlığı	- Toz malzeme çapı - Makine Z eksenine için hareket çözünürlüğü	- Katman sayısı	- Parça yoğunluğu - Form hataları - Yüzey kalitesi	- Uzun üretim süreleri - Uygunsuz geometrik özellikler - Uygunsuz mekanik özellikler	Düşük
Tarama stratejisi	- Parça geometrisi - Kontrol yazılımı	- Tarama zamanı	- Sıcaklık dağılımı - Artık gerilmeler - Deformasyonlar	- Uygunsuz geometrik özellikler - Uygunsuz mekanik özellikler	Yüksek
Destek yapıları	- Destek tipi - Kesit unsurları ve ölçüleri - Birleşim unsurları ve ölçüleri	- Toz serici çarpışması - Toz sarfiyatı - Tarama zamanı - İkincil işlemler	- Sıcaklık dağılımı - Artık gerilmeler - Deformasyonlar - Yüzey kalitesi	- Uzun üretim süreleri - Uygunsuz geometrik özellikler - Uygunsuz mekanik özellikler	Yüksek

adaptif kontrol özelliği ile birlikte gelen toz yatağında katmanlı imalat tezgâhi henüz bulunmamaktadır. Bu noktada geri besleme ve kapalı devre kontrol sistemleri malzeme eklemenin biriktirme ile yapıldığı tezgahlarda bulunmaktadır ve yapılan izleme ve kontrol sayesinde oluşan katılaşmış metal birikintisinin fiziksel ölçüleri tespit edilmektedir. Daha sonra, kontrol sistemi nominal ölçüde tutulmak istenen katılaşmış birikinti için proses parametrelerini otomatik olarak değiştirmektedir [84, 85].

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada metallerin lazer katmanlı imalatında farklı proses parametrelerinin etkisinin incelenmesi üzerine bir derleme yapılmış ve literatürde geçen farklı araştırmalar sistematik olarak gözden geçirilmiştir. Bu kapsamda proses ve proste kullanılan parametreler açıklanmış, farklı durumlarda karşılaşılan zorluklara dikkat çekilmiş ve bu zorlukların üstesinden gelebilmek için proses parametrelerinde yapılan geliştirmeler ortaya konmuştur. Üzerinde durulan parametreler arasında inşa yönü, enerji yoğunluğu, katman kalınlığı, tarama stratejileri ve destek yapıları bulunmaktadır. İrdeme yapılan parametrelerin detaylı anlatımı yanında bir özet de sunulmuş ve söz konusu parametrelerin geliştirmeye açık olanları vurgulanmıştır. Bunlarla beraber, gelişmekte olan proses ile ilgili araştırma ihtiyacı konusunda da yorumlar aktarılmış ve deneysel çalışmaların zaman – maliyet yönünden dezavantajlı olduğu

durumlar için, proses modelleme ve proses izleme gibi değerlendirilebilecek diğer alternatifler de aktarılmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Poyraz Ö., Yasa E., Pilatin S., Katmanlı İmalat Ve Talaşlı İmalatın Birlikte Uygulandığı Melez Üretim Sistemleri Üzerine, 6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, İstanbul - Türkiye, 103-115, 5-7 Kasım, 2015.
2. ASTM F2792-12a, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, ASTM International, 2012.
3. VDI 3404, Additive Manufacturing: Basics, Definitions, Processes, VDI, 2014.
4. Kayacan M.C., Delikanlı Y.E., Duman B., Özsoy K., Examining of mechanical properties of transitive (variable) porous specimens produced by SLS using Ti6Al4v alloy powder, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33 (1), 127-143, 2018.
5. Yaman K., Başaltın M., Investigations on the cutting parameters and the tool wear of SAE 1030 forged steel material by acoustic emission in turning operation, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (4), 1077-1088, 2017.
6. Özek C., Taşdemir V., Experimental investigation of the effects of blank holder force and die surface angle on the warm deep drawing of AA5754-O alloy, Journal of the

- Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 32 (1), 171-179, 2017.
7. Gibson I., Rosen D.W., Stucker, B., Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, Springer, New York, ABD, 2014.
 8. Aktimur B., Gökpinar, E.S., Katmanlı Üretim Havaçılıktaki Uygulamaları, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji, 3 (2), 463-469, 2015.
 9. Çelik İ., Karakoç F., Çakır M.C., Duysak A., Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları, Journal of the Institute of Science & Technology of Dumlupınar University, (031), 53-70, 2013.
 10. Wohlers T., Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry, Wohlers Report, ISBN 0-9754429-9-6, 2013.
 11. Kruth J.P., Wang X., Laoui T., Froyen L., Lasers and materials in selective laser sintering, Assembly Automation, 23 (4), 357-371, 2003.
 12. Yılmaz O., Uğla A.A., Microstructure characterization of SS308LSi components manufactured by GTAW-based additive manufacturing: shaped metal deposition using pulsed current arc, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 89 (1), 13-25, 2016.
 13. Chartoff R.P., Priore B., Klosterman D.A., Pak S.S., Composite tooling via laminated object manufacturing- A rapid and affordable method, Technology transfer in a global community, 1048-1059, 1996.
 14. Gao W., Zhang Y., Ramanujan D., Ramani K., Chen Y., Williams C.B., Zavattieri P.D., The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering, Computer-Aided Design, 69, 65-89, 2015.
 15. Herderick E., Additive manufacturing of metals: A review, Materials Science & Technology Conference, Ohio, ABD, 1413-1425, 16-20 October, 2011.
 16. Levy G.N., Schindel R., Kruth J.P., Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 52 (2), 589-609, 2003.
 17. Vayre B., Vignat F., Villeneuve F., Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects, Mechanics & Industry, 13 (2), 89-96, 2012.
 18. LPW Technology. Powder Range. http://www.lpwtechnology.com/wp-content/uploads/2016/11/LPW_Powders_Brochure-Nov-2016.pdf. Yayın tarihi Kasım 2016, Erişim tarihi Mayıs 2017.
 19. Concept Laser. The Technology. <https://www.concept-laser.de/en/technology.html>. Yayın tarihi Aralık 2015. Erişim tarihi Mayıs 2017. <https://www.concept-laser.de/en/technology/lasercusingr.html>
 20. Materialise. Materialise Magics. http://www.materialise.com/en/software/materialise-magics_ Yayın tarihi Ocak 2017. Erişim tarihi Mayıs 2017.
 21. EOS. EOS Print 2.0. https://www.eos.info/systems_solutions/software/eosprint. Yayın tarihi Ocak 2017. Erişim tarihi Mayıs 2017.
 22. Allen S., Dutta D., On the computation of part orientation using support structures in layered manufacturing, Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, ABD, 259-269, 8-10 August, 1994.
 23. Chua C.K., Leong K.F., Lim C.S., Rapid Prototyping: Principles and Applications 2nd Edition, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 2003.
 24. Manfredi D., Calignano F., Krishnan M., Canali R., Ambrosio E.P., Biamino S., Fino P., Additive manufacturing of Al alloys and aluminium matrix composites (AMCs), Light Metal Alloys Applications, 11, 3-34, 2014.
 25. Jhabvala J., Study of the consolidation process under macro-and microscopic thermal effects in selective laser sintering and selective laser melting, Doktora Tezi, École Polytechnique Fédérale De Lausanne, Lausanne, İsviçre, 2010.
 26. Godfrey D., Advancing Aerospace Production with Arcam Electron Beam Melting Technology. <http://www.arcamgroup.com/files/arcam-investor-day-march-9-2016-honeywell.pdf>. Yayın tarihi Mart 2016. Erişim tarihi Mayıs 2017.
 27. Zeng K., Optimization of support structures for selective laser melting, Doktora Tezi, University of Louisville, Louisville, ABD, 2015.
 28. Gong H., Generation and detection of defects in metallic parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting and their effects on mechanical properties, Doktora Tezi, University of Louisville, Louisville, ABD, 2013.
 29. Pohl H., Simchi A., Issa M., Dias H.C., Thermal stresses in direct metal laser sintering, Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, ABD, 366-372, 6-8 August, 2001.
 30. Frank D., Fadel G., Expert system-based selection of the preferred direction of build for rapid prototyping processes, Journal of Intelligent Manufacturing, 6 (5), 339-345, 1995.
 31. Thomas D.S., Gilbert S.W., Costs and cost effectiveness of additive manufacturing, NIST Special Publication, 1176, 12, 2014.
 32. Amini M., Time Estimation for Additive Manufacturing, Doktora Tezi, Texas State University, Texas, ABD, 2014.
 33. Paul R., Anand S., Process energy analysis and optimization in selective laser sintering, Journal of Manufacturing Systems, 31 (4), 429-437, 2012.
 34. Mercelis P., Control of selective laser sintering and selective laser melting processes, Doktora Tezi, Catholic University of Leuven, Leuven, Belçika, 2007.
 35. Wang D., Yang Y., Yi Z., Su X., Research on the fabricating quality optimization of the overhanging surface in SLM process, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 65 (9-12), 1471-1484, 2013.
 36. Moroni G., Syam W.P., Petró S., Functionality-based part orientation for additive manufacturing, Procedia CIRP, 36, 217-222, 2015.

37. Hague R., Campbell I., Dickens P., Implications on design of rapid manufacturing, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 217 (1), 25-30, 2003.
38. Ibrahim D., Ding S., Sun S., Roughness Prediction for FDM Produced Surfaces, In International Conference Recent Trends in Engineering and Technology, Batam, Indonesia, 70-75, 13-14 February, 2014.
39. Yasa E., Kruth J.P., Application of laser re-melting on selective laser melting parts, Advances in Production Engineering and Management, 6 (4), 259-270, 2011.
40. Yasa E., Poyraz O., Solakoglu E.U., Akbulut G., Oren S., A Study on the Stair Stepping Effect in Direct Metal Laser Sintering of a Nickel-based Superalloy, Procedia CIRP, 45, 175-178, 2016.
41. Cheng W., Fuh J.Y.H., Nee A.Y.C., Wong Y.S., Loh H.T., Miyazawa T., Multi-objective optimization of part-building orientation in stereolithography, Rapid Prototyping Journal, 1 (4), 12-23, 1995.
42. Luo Z., Yang F., Dong G., Tang Y., Zhao Y.F., Orientation Optimization in Layer-Based Additive Manufacturing Process, In ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers, Charlotte, North Carolina, ABD, 21-24 August, 2016.
43. Kobryn P.A., Semiatin S.L., Mechanical properties of laser-deposited Ti-6Al-4V, Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, ABD, 179-186, 6-8 August, 2001.
44. Leuders S., Thöne M., Riemer A., Niendorf T., Tröster T., Richard H.A., Maier H.J., On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance, International Journal of Fatigue, 48, 300-307, 2013.
45. Kruth J.P., Badrossamay M., Yasa E., Deckers J., Thijs L., Van Humbeeck J., Part and material properties in selective laser melting of metals, Proceedings of the 16th international symposium on electromachining, Shanghai, Çin, 1-12, 19-23 April, 2010.
46. Kruth J.P., Levy G., Klocke F., Childs T.H.C., Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 56 (2), 730-759, 2007.
47. Morgan R.H., Papworth A.J., Sutcliffe C., Fox P., O'Neill W., High density net shape components by direct laser re-melting of single-phase powders, Journal of Materials Science, 37 (15), 3093-3100, 2002.
48. Simchi A., Pohl H., Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder, Materials Science and Engineering: A, 359 (1), 119-128, 2003.
49. Nelson J.C., Selective laser sintering: a definition of the process and an empirical sintering model, Doktora Tezi, University of Texas at Austin, Texas, ABD, 1993.
50. Williams J., Miller D., Deckard C., Selective Laser Sintering Part Strength as Function of Andrew Number, Scan Rate and Spot Size, Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, ABD, 549-557, 12-14 August, 1996.
51. Chalancon A., Bourell D., Measured Energy Densities For Polyamide 12 And Comparison Of Values Calculated For Laser Sintering, Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, ABD, 2217-2223, 8-10 August, 2016.
52. Yap C.Y., Chua C.K., Dong Z.L., Liu Z.H., Zhang D.Q., Loh L.E., Sing S.L., Review of selective laser melting: Materials and applications, Applied Physics Reviews, 2 (4), 041101, 2015.
53. Sufiiarov V.S., Popovich A.A., Borisov E.V., Polozov I.A., Masaylo D.V., Orlov A.V., The Effect of Layer Thickness at Selective Laser Melting, Procedia Engineering, 174, 126-134, 2017.
54. Zaeh M.F., Branner G., Investigations on residual stresses and deformations in selective laser melting, Production Engineering, 4 (1), 35-45, 2010.
55. Van Belle L., Vansteenkiste G., Boyer J.C., Comparisons of numerical modelling of the Selective Laser Melting, In Key Engineering Materials, 504, 1067-1072, 2012.
56. Papadakis L., Branner G., Schober A., Richter K.H., Uihlein T., Numerical modeling of heat effects during thermal manufacturing of aero engine components, In World Congress on Engineering, London, İngiltere, 4-6 July, 2012.
57. Yuan P., Gu D., Molten pool behaviour and its physical mechanism during selective laser melting of TiC/AlSi10Mg nanocomposites: simulation and experiments, Journal of Physics D: Applied Physics, 48 (3), 1-16, 2015.
58. Cheng B., Shrestha S., Chou K., Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting, Additive Manufacturing, 12, 240-251, 2016.
59. Stamp R., Fox P., O'Neill W., Jones E., Sutcliffe C., The development of a scanning strategy for the manufacture of porous biomaterials by selective laser melting, Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 20 (9), 1839 -1848, 2009.
60. Mercelis P., Kruth J.P., Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting, Rapid Prototyping Journal, 12 (5), 254-265, 2006.
61. Yadroitsev I., Bertrand P., Smurov I., Parametric analysis of the selective laser melting process, Applied surface science, 253 (19), 8064-8069, 2007.
62. Mertens R., Clijsters S., Kempen K., Kruth J.P., Optimization of scan strategies in selective laser melting of aluminum parts with downfacing areas, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 136 (6), 061012 1-7, 2014.
63. Poyraz Ö., Yasa E., Akbulut G., Orhangül A., Pilatin, S., Investigation of Support Structures for Direct Metal Laser Sintering (DMLS) of In625 Parts, Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, ABD, 560-574, 7-9 August, 2015.
64. Mullen L., Stamp R.C., Brooks W.K., Jones E., Sutcliffe C.J., Selective Laser Melting: A regular unit cell approach for the manufacture of porous, titanium, bone

- in-growth constructs, suitable for orthopedic applications, *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 89 (2), 325-334, 2009.
65. Mumtaz K.A., Vora P., Hopkinson N., A method to eliminate anchors/supports from directly laser melted metal powder bed processes, *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas, ABD, 55-64, 8-10 August, 2011
 66. Krol T.A., Zäh M.F., Seidel C., Optimization of supports in metal-based additive manufacturing by means of finite element models, *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas, ABD, 707-718, 6-8 August, 2012.
 67. Calignano F., Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting, *Materials & Design*, 64, 203-213, 2014.
 68. Cooper K., Steele P., Cheng B., Chou K., Contact-Free Support Structures for Part Overhangs in Powder-Bed Metal Additive Manufacturing, *Proceedings of SME RAPID Conference*, Orlando, Florida, ABD, 1-12, May 16-19, 2016.
 69. Cloots M., Spierings A.B., Wegener K., Assessing new support minimizing strategies for the additive manufacturing technology SLM, *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas, ABD, 631-643, 12-14 August, 2013.
 70. Gan M.X., Wong C.H., Practical support structures for selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 474-484, 2016.
 71. Hussein A., Hao L., Yan C., Everson R., Young P., Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing, *Journal of Materials Processing Technology*, 213 (7), 1019-1026, 2013.
 72. Krol T.A., Seidel C., Schilp J., Hofmann M., Gan W., Zaeh M.F., Verification of structural simulation results of metal-based additive manufacturing by means of neutron diffraction, *Physics Procedia*, 41, 849-857, 2013.
 73. Brandl E., Heckenberger U., Holzinger V., Buchbinder D., Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behaviour. *Materials & Design*, 34, 159-169, 2012.
 74. Thomas D., The development of design rules for selective laser melting, *Doktora Tezi*, University of Wales, Cardiff, İngiltere, 2009.
 75. Solakoğlu E.U., Yılmaz R., Ören S., Akbulut G., Poyraz Ö., Yasa E., Process Limits of DMLS in Terms of Minimum Hole and Boss Diameters with Varying Aspect Ratios, *International Conference On Machine Design And Production*, Bursa, Türkiye, 12-15 Temmuz, 2016.
 76. Sih S.S., Barlow J.W., The prediction of the emissivity and thermal conductivity of powder beds, *Particulate Science and Technology*, 22 (4), 427-440, 2004.
 77. Attar E., Simulation of selective electron beam melting processes, *Doktra Tezi*, University of Erlangen-Nurnberg, Almanya, 2011.
 78. Kundakcioglu E., Lazoglu I., Rawal S., Transient thermal modeling of laser-based additive manufacturing for 3D freeform structures, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85 (1-4), 493-501, 2016.
 79. Ding J., Colegrove P., Mehnen J., Ganguly S., Almeida P.S., Wang F., Williams S., Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive layer manufacturing process on large multi-layer parts, *Computational Materials Science*, 50 (12), 3315-3322, 2011.
 80. Zeng K., Pal D., Stucker B., A review of thermal analysis methods in Laser Sintering and Selective Laser Melting, *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas, ABD, 796-814, 6-8 August, 2012.
 81. Patil N., Pal D., Stucker B.E., A new finite element solver using numerical Eigen modes for fast simulation of additive manufacturing processes, *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas, ABD, 12-14, 12-14 August, 2013.
 82. Craeghs T., Clijsters S., Yasa E., Kruth J.P., Online quality control of selective laser melting *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas, ABD, 212-226, 8-10 August, 2011.
 83. Hofman J.T., Development of an observation and control system for industrial laser cladding, *Doktora Tezi*, University of Twente, Hollanda, 2009.
 84. Islam M., Purtonen T., Piili H., Salminen A., Nyrrhilä O., Temperature profile and imaging analysis of laser additive manufacturing of stainless steel, *Physics Procedia*, 41, 835-842, 2013.
 85. DMT 3D Metal Printing Technology, [http://www.intermoldkorea.com:8080/data/att/company_ad/1414720424_InssTek%20Catalog\(2014_Eng%20version\).pdf](http://www.intermoldkorea.com:8080/data/att/company_ad/1414720424_InssTek%20Catalog(2014_Eng%20version).pdf) Yayın tarihi 2014, Erişim tarihi Ekim 2017.

