



DMLS ile Eklemeli İmalatta Dengesiz Sıcaklık Dağılımı ve Parçaya Etkilerinin Araştırılması

*¹Mevlüt Yunus Kayacan, ²Nihat Yılmaz

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniv., Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği, Isparta/Türkiye
mevlutkayacan@isparta.edu.tr 

² Isparta Uygulamalı Bilimler Üniv., Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği, Isparta/Türkiye
nihatyilmaz@isparta.edu.tr 

Araştırma Makalesi

Geliş Tarihi: 22.03.2018

Kabul Tarihi: 06.11.2018

Öz

Bu Çalışma, eklemeli imalatın en önemli problemlerinden bir tanesi olan dengesiz sıcaklık dağılımı üzerine yapılan çalışmaların araştırılmasını konu almaktadır. İmalat esnasında meydana gelen hatalara etki eden önemli parametrelerden olan heterojen sıcaklık dağılımı, kalıntı gerilemeler ve boyutsal değişimler araştırılmıştır. Farklı tip metal malzemelerin doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) yöntemi ile imalatı esnasında parça üzerinde meydana gelen sorunlar incelenmiştir. İmalat parametrelerinin meydana gelen hatalara olan etkisi incelenmiştir. Sonlu elemanlar analizleri ile imalat öncesi sıcaklık ve hata tahmini konusunda gerçekleştirilmiş farklı yaklaşımlar da ele alınmıştır. Sonuç olarak hataların giderilmesi konusunda yapılması gerekenler, mevcut bilgiler ışığında ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: DMLS, sinterleme, parametre, termal etki, kalıntı gerilmeler, toz yatak eklemeli imalat

The Investigation of Temperature Distribution and Thermal Problems in DMLS Additive Manufacturing

Abstract

In this study, studies on unstable temperature distribution, one of the biggest problems of joint manufacturing, have been evaluated. Heterogeneous temperature distributions, residual stresses and dimensional changes were investigated, which are the most important factors in manufacturing faults. The problems that arise during manufacturing in different types of metal materials have been evaluated in terms of direct metal laser sintering (DMLS) and manufacturing method. The faulty effect of manufacturing parameters has been investigated. Different approaches on pre-manufacturing temperature and error estimation were also discussed with finite element analysis. As a result, what needs to be done to rectify the mistakes is revealed in the light of the available information.

Keywords: DMLS, sintering, parameter, thermal effect, residual stresses, powder bed fusion

1. GİRİŞ

Eklemeli imalat 1980'li yılların başından itibaren gelişim göstermeye başlayan modern bir imalat metodudur. Zaman içerisinde uygulama alanları ve malzeme çeşitliliği açısından bu gelişim süregelmiştir. Günümüzde eklemeli imalat metotları geniş malzeme yelpazesi ve imalat metoduna göre değişiklik göstermektedir. Eklemeli imalat bir parçanın katmanlara bölünerek her katmanın birbiri ardına imal edilmesi işlemidir. Bu yöntemlerle yeni bir

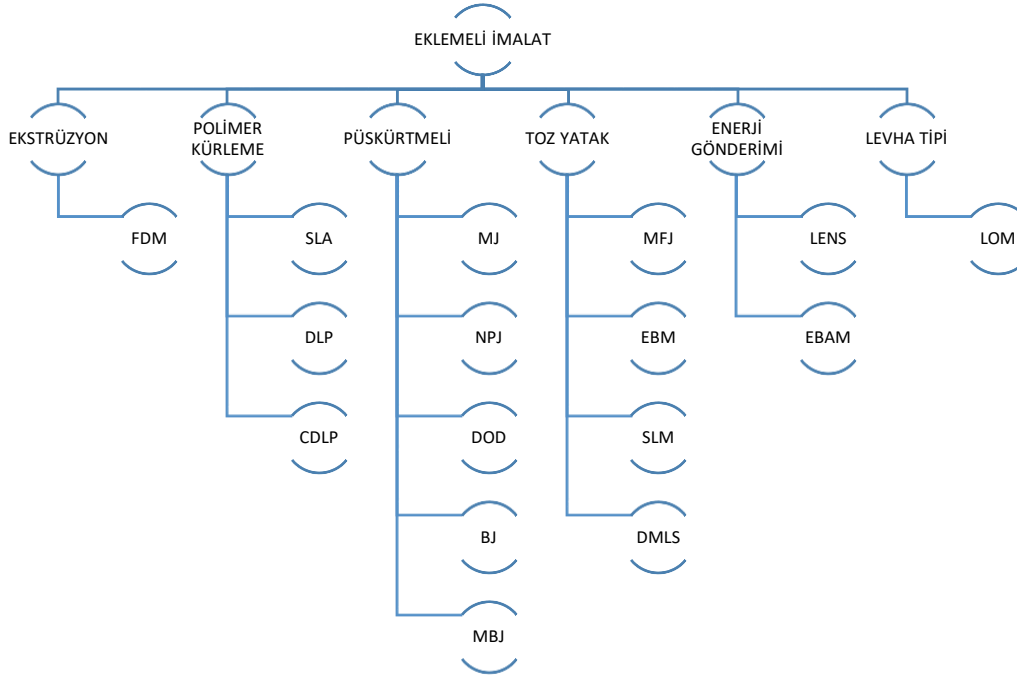
parçanın imalatı yapılabilirken aynı zamanda hasar meydana gelmiş bir parçanın tamirati da yapılabilmektedir. Havacılık, sağlık, dişçilik, mücevherat, kalıpsız imalat, kalıp yapımı, denizcilik ve enerji materyalleri gibi önemli endüstri alanlarında etkin kullanımları ile önem kazanmaya başlamıştır. Eklemeli imalat yöntemleri; polimerler, metaller, kompozitler, seramikler gibi çok çeşitli malzemeleri kapsamaktadır. Eklemeli imalat teknolojileri temelde geleneksel imalat metotlarından beslenmektedirler. Yaygın olarak plastik ekstrüzyon, kaynak, ergitme, sinterleme, kaplama, toz metalürjisi gibi geleneksel

*¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniv., Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği, Isparta/Türkiye, mevlutkayacan@isparta.edu.tr, +902462111463

metotları temel almaktadır. Ancak bazı noktalardan yeni bir imalat metodu olarak incelenmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Eklemeli imalat parçaların karakterizasyonu, verimlilik, parametrik optimizasyonlar ve süreç içi ve dışı kontrollerin eklemeli imalata özel olarak geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Eklemeli imalat parçalarının imalat süreçleri, mikro içyapı ve mekanik özellikleri hakkında çeşitli yayın çalışmaları literatürde mevcuttur [2-11]. Eklemeli imalat ilk kullanılmaya başlandığı yıllardan itibaren sürekli olarak bir değişim ve gelişim göstermektedir. Bu değişim sırasıyla; hızlı prototipleme, eklemeli imalat ve seri imalat anlayışı

olarak süregelmiştir. Bu nedenle eklemeli imalata olan bakışın da sürekli olarak eleştirel biçimde değerlendirmesine ihtiyaç olmaktadır. Yapılan çalışma, bu ihtiyacı karşılamaya yönelik olarak ele alınmıştır [1-5].

İmalat metoduna bağlı olarak ise birçok farklılık karşımıza çıkmaktadır. Genel olarak ekstrüzyon, polimer kütleme, püskürtmeli, toz yatak, enerji gönderimi ve levha tipi metotların olduğu söylenebilir. Şekil 1’de eklemeli imalat metotlarının sınıflandırılması gösterilmiştir [6].



Şekil 1. İmalat metotlarının sınıflandırılması [6]

Toz yatak teknolojisinde bir tabla üzerine katman katman toz serme ve serilen tozların uygun bir yöntem vasıtasıyla birleştirilmesidir. Birleştirme işleminde en çok lazer ve elektron ışınları tercih edilmektedir. Burada lazer ve elektron ışınlarının amacı ortamdaki tozlara enerji göndererek tozların birleşmesini sağlamaktır. Ayrıca gönderilen enerji miktarına bağlı olarak eritme veya

sinterleme mekanizması oluşmaktadır. Her bir yöntem, malzeme, enerji kaynağı ve birleştirme mekanizması imal edilen parça özelliklerini tamamı ile değiştirmektedir. Metal eklemeli imalat sistemleri aynı zamanda metallerin birleştirilme metoduna ve enerji kaynağına bağlı olarak da sınıflandırılmıştır. Tablo 1’de bu sınıflandırma ticari unsurlarıyla birlikte yer almaktadır [7-9].

Tablo 1. Metal eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması [7-9]

Tezgâh İmalatçısı	İmalat Yöntemi	İmalat Hacmi (mm)	Enerji Kaynağı
Toz Yatağı			
ARCAM (A2)(a)	EBM	200 × 200 × 350	7 kW elektron ışını
EOS (M280)(b)	DMLS	250 × 250 × 325	200-400 W Yb-fiber lazer
Concept laser cusing (M3)(b)	SLM	300 × 350 × 300	200 W fiber lazer
MTT (SLM 250)(b)	SLM	250 × 250 × 300	100-400 W Yb-fiber lazer
Phoenix system group (PXL)(c)	SLM	250 × 250 × 300	500 W fiber lazer
Renishaw (AM 250)(d)	SLM	245 × 245 × 360	200 veya 400 W lazer
Realizer (SLM 250)(b)	SLM	250 × 250 × 220	100, 200veya 400 W lazer
Matsuura (Lumex Advanced 25)(e)	SLM	250 × 250 çap	400 W Yb fiber lazer; hibrit eklemeli/çıkarmalı sistem

Toz Beslemeli

Optomec (LENS 850-R)(f)	LENS	900 × 1500 × 900	1 veya 2 kW IPG fiber lazer
POM DMD (66R)(f)	DMD	3,200° × 3°,670° × 360°	1-5 kW fiber diyot veya disk lazer
Accufusion consolidation(g)	laser LC	1,000 × 1,000 × 1,000	Nd:YAG lazer
Irepa lazer (LF 6000)(c)	LD		Lazer kaplama
Trumpf(b)	LD	600 × 1,000 uzunluk	
Huffman (HC-205)(f)	LD		CO2 Lazer kaplama

Tel beslemeli

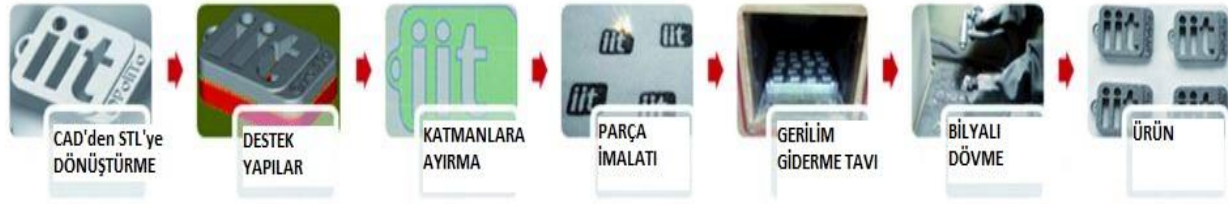
Sciaky (NG1) EBFFF(f)	EBDM	762 × 483 × 508	>40 kW @ 60 kV kaynaklayıcı
MER plazma transferred arc selected FFF(f)	PTAS FFF	610 × 610 × 5,182	Çift 350A DC güç kaynağı kullanarak ark kaynağı
Honeywell ion fusion formation(f)	IFF		Plazma ark kaynağı

İmalatçı Ülkeler: (a) İsveç, (b) Almanya, (c) Fransa, (d) İngiltere, (e) Japonya, (f) ABD, ve (g) Kanada

1.2. DMLS Yöntemi

Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) yöntemi metal toz yatak eklemeli imalat yöntemlerinden bir tanesidir. Bu yöntemde toz metal teknolojisi kullanılır. Çalışması

esnasında metal tozların bilgisayardan alınan verilere göre bir lazer aracılığıyla sinterlenmesi işlemi yapılır. DMLS ile imalatın adımları şekil 2’de gösterilmiştir [10,11].

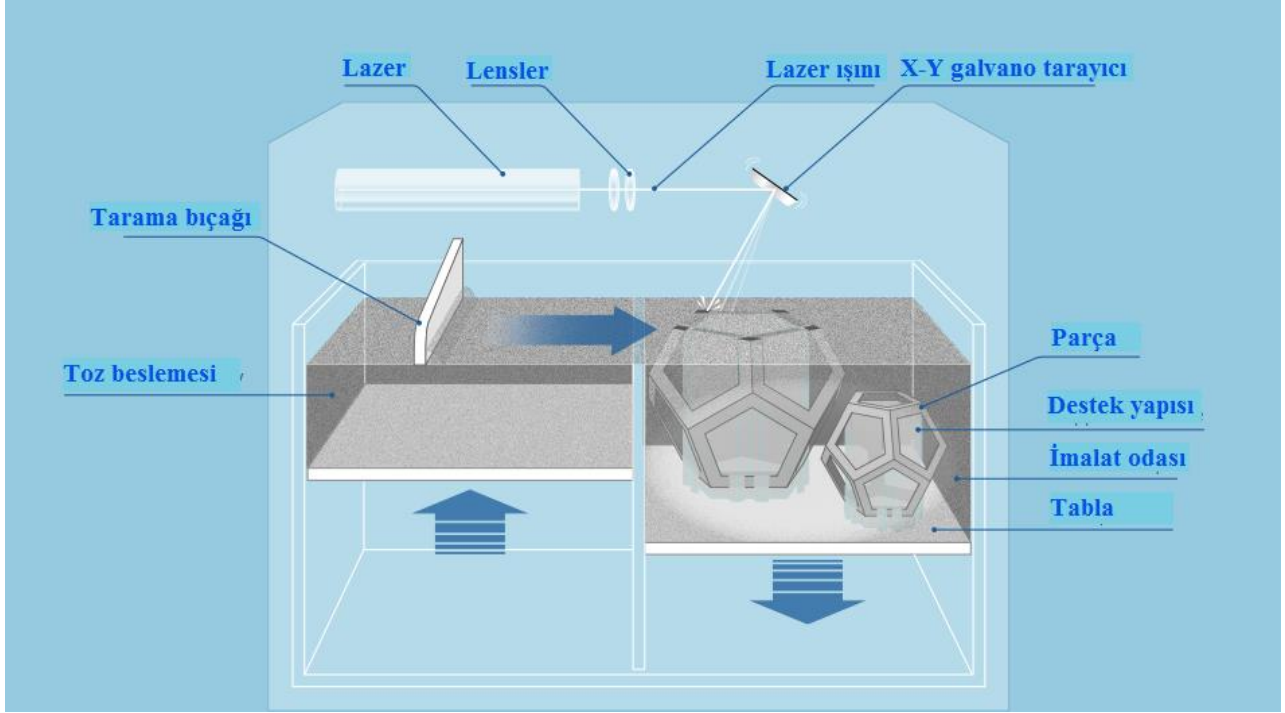


Şekil 2. Eklemeli imalatın aşamaları [10,11]

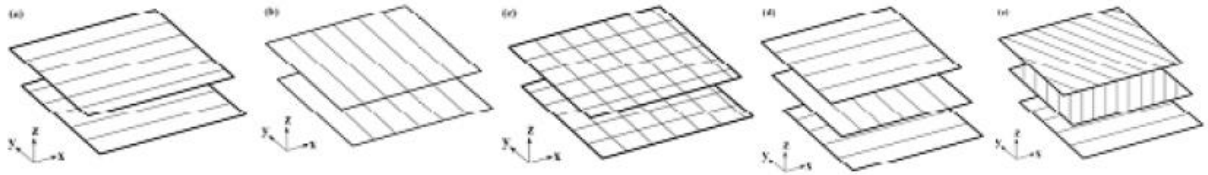
Sinterleme, işlemi metal tozların ana malzemeyi eritmede difüzyon mekanizmaları vasıtasıyla birleşmesi prensibine dayanır. İmalat esnasında bir toz havuzundan toz serici merdane veya serme bıçakları aracılığıyla imalat bölgesine uygun kalınlıkta toz serilir. Toz serme kalınlığı (katman kalınlığı), eriyik nüfuziyeti, toz boyutları ve imalat parametrelerine bağlı olarak tespit edilmelidir. Serilen toz lazerin ortama verdiği enerjiyle sinterlenir. Tüm katmanlar ardı ardına sinterlendikten sonra ürün ortaya çıkmış olur. Şekil 3’de DMLS imalat yönteminin çalışma prensibi gösterilmiştir. [12,13]

Sinterleme mekanizması yaygın olarak sıvı faz sinterlemesi olarak karşımıza çıkar. Çünkü fazlardan en az bir tanesi ergiyik konuma geçmiş ve ana faz katı halde bulunmaktadır. Farklı malzemeler için farklı enerjiler gönderilerek, sıcaklık

artışı sağlanmakta ve sinterleme mekanizmasının gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Ancak temelde gerçekleşen sinterleme mekanizması farklılık göstermemektedir [13–19]. İmal edilen parçalarda makine parametrelerinden, ortam şartlarından ve malzeme özelliklerinden kaynaklı bazı kısıtlamaları bulunmaktadır. Bu nedenle her parçanın istenen özelliklerde imal edilmesi mümkün değildir. DMLS yöntemi ile imalat yapabilen çeşitli makineler kullanılmaktadır. En bilinenleri ise EOS M270, M280 ve M400 olarak karşımıza çıkmıştır [21]. Makineye bağlı parametreler; tarama stratejileri X veya Y çizgisel tarama, ada tarama, hem X hem Y tarama, açılı tarama, katman katman farklı açılı tarama, spiral tarama şeklinde özetlenebilir. Şekil 4’te yaygın tarama stratejilerinin gösterilmiştir [22].



Şekil 3. DMLS imalatta çalışma prensibi[12,13]

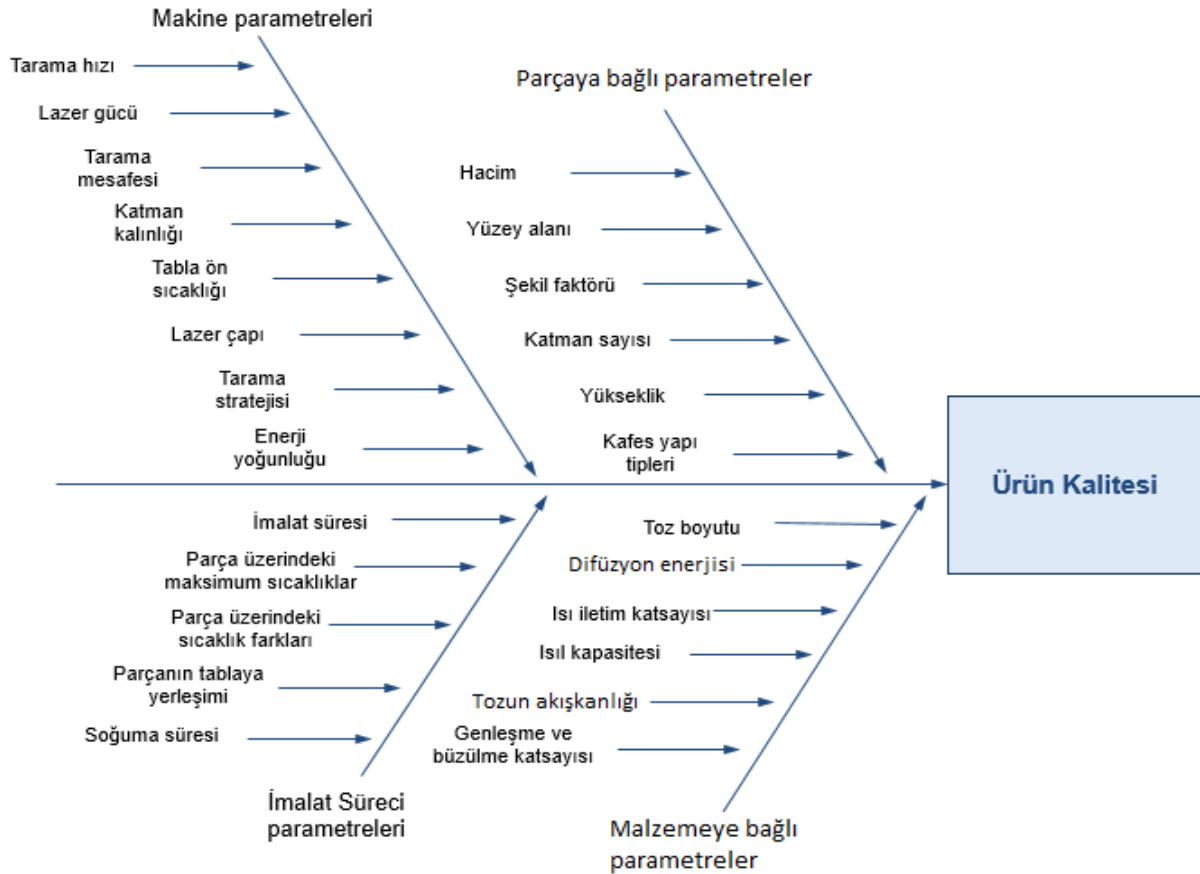


Şekil 4. Yaygın tarama stratejileri; sırasıyla X veya Y çizgisel tarama, ada tarama, hem X hem Y tarama, açılı tarama [21]

1.3. İmalata Etki Eden Parametreler

DMLS ile imalatta parça karakteristiklerini ve kaliteyi belirleyen birçok faktör bulunmaktadır. Yapılan çalışmalarda, bu faktörler 4 farklı temel başlık altında değerlendirilmiştir [11,22–38]. İncelemeler sonucunda ilgili parametreler; makine, malzeme, imalat süreci ve

parça olarak ele alınmıştır. Her bir parametre imal edilen parçaların üzerinde farklı etkiler meydana getirmektedir. Parametrelerin kaynağını ve etkilerini tespit etmek amacıyla sınıflandırmalar yapmak DMLS ile imalatı anlamak açısından kolaylık sağlayacaktır. Şekil 5’de DMLS ile imalatta ürün kalitesini etkileyen parametreleri sınıflandırılmıştır.



Şekil 5. DMLS imalatta girdi parametrelerinin sınıflandırılması

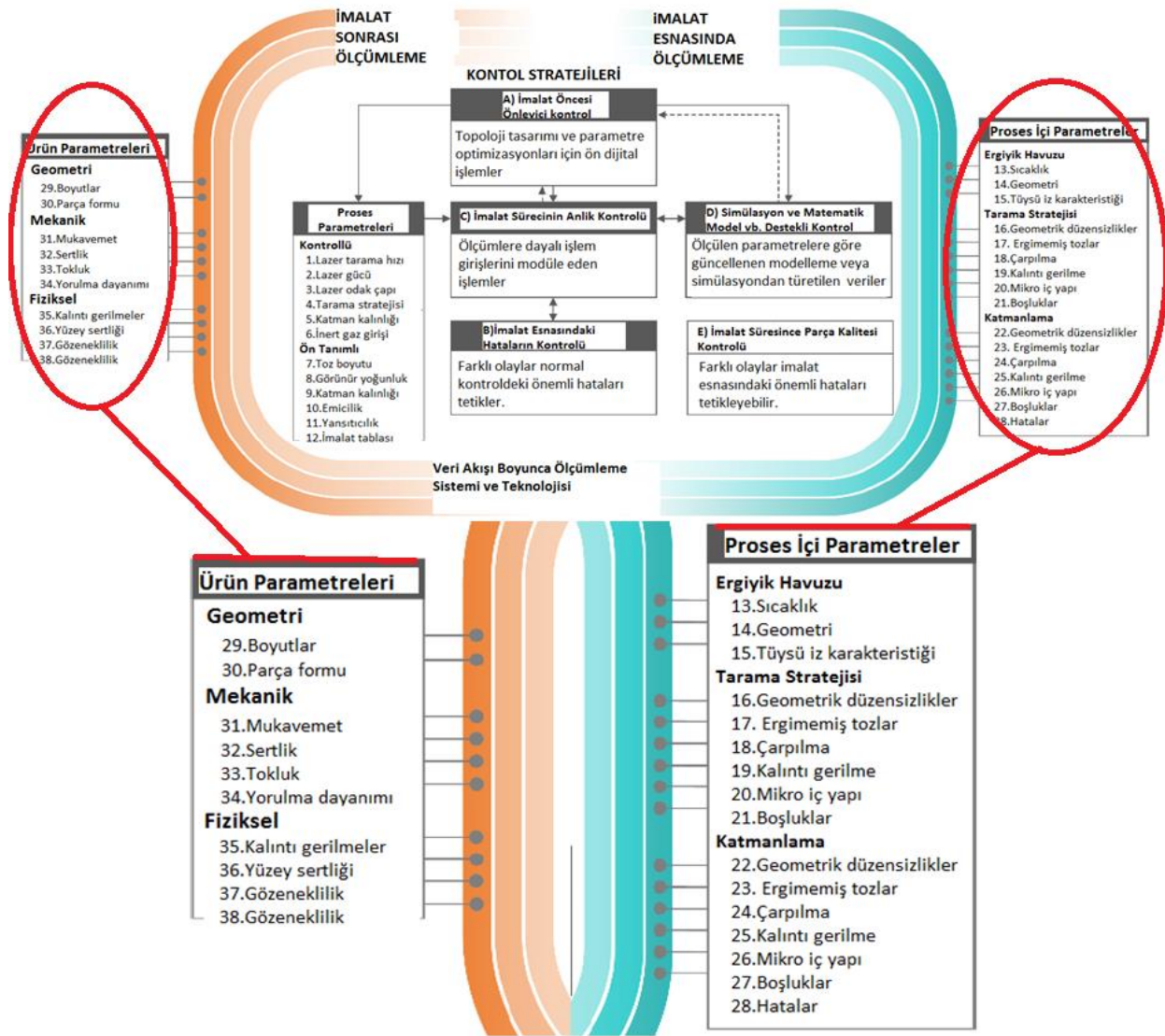
Şekil 5’de belirtilen parametreler parça karakteristiklerinde ve kalitesinde bazı değişiklikler meydana getirecektir. Bu değişiklikler parçanın mekanik özelliklerinde olabileceği gibi fiziksel ve dinamik özellikleri de içerisine alabilir. Bazı çalışmalarda yalnızca kalıntı gerilmelere ve yüzey pürüzlülüğüne odaklanılmışken bazı çalışmalarda ise mekanik özellikler ve dinamik özellikler ön planda tutulmuştur [22, 39–42].

Tüm parametrelerin parça karakteristikleri üzerinde ciddi etkileri olmaktadır. Çalışmalarda; etkilenen parça özellikleri: yüzey pürüzlülüğü, mekanik dayanım, gözeneklilik, sertlik, kalıntı gerilmeler, yorulma dayanımı, boyutsal toleranslar, yüzey ve geometri tamlığı olarak yaygın olarak ifade edilmiş ve üzerinde durulmuştur.

Deneysel çalışmaların yanı sıra, olası hataları önleme amacıyla çeşitli sonlu elemanlar modelleri de yapılmıştır. Modeller daha çok termal etkilerin anlaşılması amacıyla yapılmış olsa da mukavemet üzerine olan etkileri de araştırılmıştır. NIST (Ulusal standartlar ve Teknoloji Enstitüsü, ABD) tarafından lazer toz yatak

eklemeli imalat sistemlerindeki hataları en aza indirmek için tezgâh özelindeki çözümleri ve optimizasyonları ortaya koyan bir çalışma yapılmıştır. Temelde odaklanılan problem kalıntı gerilmeler sebebiyle oluşan imalat hatalarıdır. Elde edilen bulgulara göre girdi ve çıktı parametreleri başlıkları altında, bir tezgâhta olması gereken sistemler yer almaktadır. Bu parametreler çalışma içinde ergiyik havuzu, tarama işlemi ve katmanlar arası geçiş etkileri ana başlığı altında açıklanmıştır. Şekil 6’da lazer toz yataklı eklemeli imalat sistemleri için genel bir analiz ve kontrol diyagramı gösterilmiştir. [44].

Yapılan çalışmalarda imalattan ve diğer faktörlerden kaynaklanan sorunlar ve zorluklar; imalatın uzun sürmesi, post proseslerin gerekliliği, boyutsal toleranslar, yüzey pürüzlülüğü, kalıntı gerilmeler, ürün özelliklerinin öngörülebilmesi, toz maliyeti ve seri imalat maliyetleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışma kapsamında sıcaklık değişimleri, şekil hataları, kalıntı gerilmeler ve boyutsal toleranslar konularına irdelenecektir. Kalıntı gerilmeler ve boyutsal değişimler, sıcaklık dağılımının doğrudan bir sonucu olarak gözlenecektir [19,22,33,35-41].



Şekil 6. Lazer toz yataklı imalat sistemleri kontrol ve analiz sistemi elemanları [44]

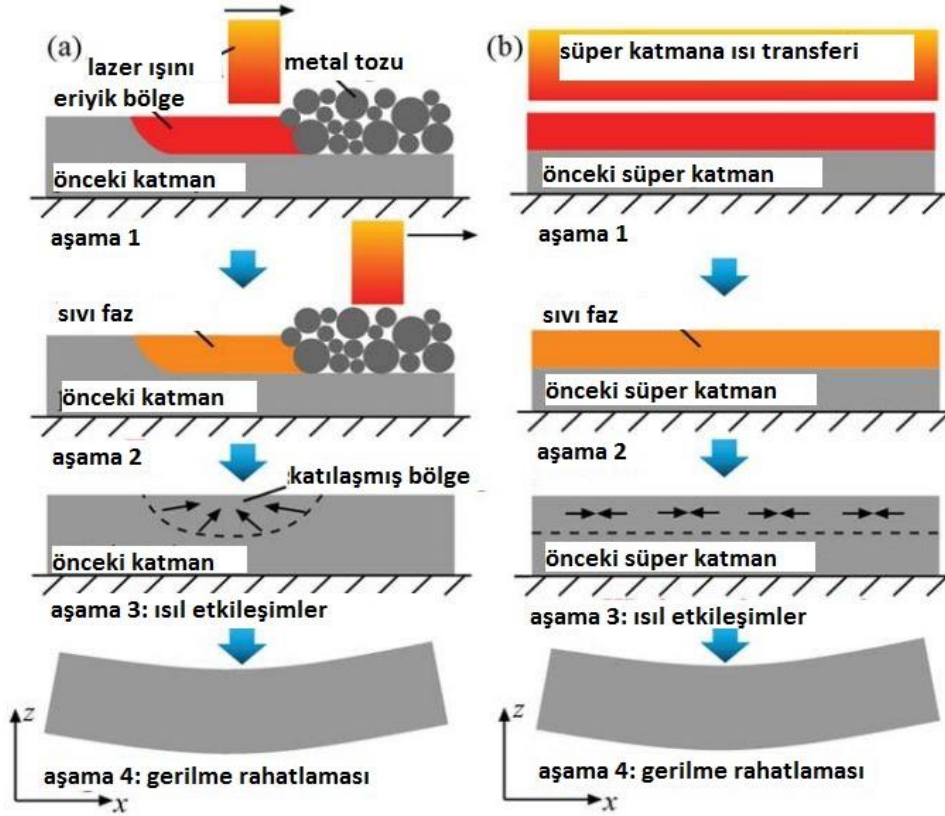
2. İmalat süreci ve Oluşan Hatalar

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde eklemeli imalatın temel sorunları birkaç başlık altında toplanmaktadır. Meydana Gelen hataların temelinde imalat esnasındaki sıcaklık dağılımının dengesizlikleri ortaya çıkmaktadır. Dengesiz sıcaklık dağılımı ilk olarak parçanın farklı oranlarda genleşme ve büzülmesine neden olmaktadır. Bu durum parça üzerinde gerilmelerin oluşmasına sebep olmaktadır. Bu gerilmeler akma dayanımının üzerine çıkılması durumunda gevşeyerek şekil değişimi kusuruna sebebiyet vermektedir. Gerilim gevşemesinin olmadığı durumlarda ise kalıntı gerilme durumları meydana gelmekte ve ürünün yaşam döngüsünü

(ömrünü) kısaltmaktadır. Aynı zamanda çok hızlı ısınıp soğuyan parça sürekli ısıl şoklara maruz kalmaktadır [51–55]. Bundan sonraki kısımda sıcaklık değişimleri, şekil değişimleri ve kalıntı gerilmeler üzerine yapılan çalışmalar incelenecektir.

2.1. Sıcaklık Değişimleri

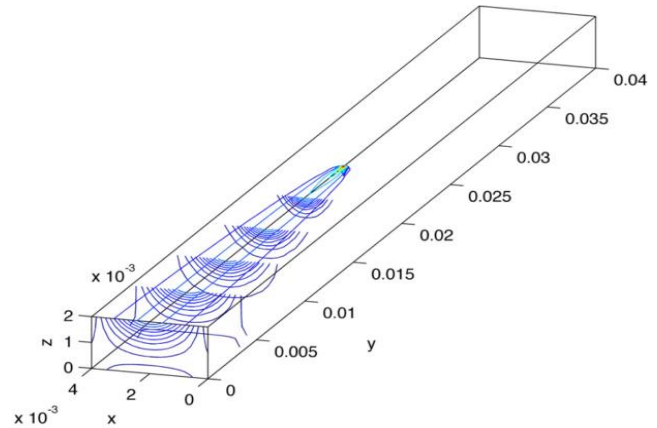
Bu yöntemde ısının ortama girişini ve ortamdan transfer olmasını inceleyen çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Ortama ısı girişinin lazer vasıtasıyla çeşitli mekanizmalar aracılığıyla yapılacağı düşünülmüştür. Şekil 7’te ısı giriş mekanizması verilmiştir. Burada süper katman, birkaç katmanın bir arada olmasını ifade etmektedir [51,52]



Şekil 9. Termomekanik olaylar a: gerçek katmanlı analiz, b: süper katman modellenli analiz [58]

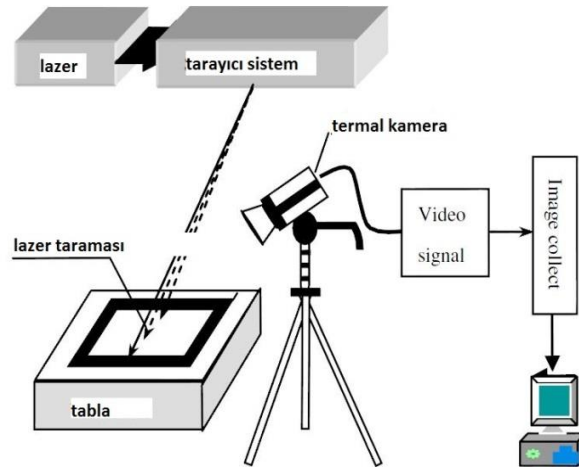
Titanyum esaslı malzemeler ve 316L malzemelerle ilgili yapılan çalışmalar incelenmiştir. İki farklı materyalin aynı kısımda verilmesinin sebebi, çalışmaların birçoğunda konunun bu şekilde ele alınıyor olmasıdır. Yapılan çalışmalarda kalıntı gerilmelere sebep olan en önemli etken olarak sıcaklık gradyanı belirlenmiştir. Çalışmalar daha çok sonlu elemanlar modeli olarak karşımıza çıkmaktadır. Çalışmalarda titanyum için parametreler, $19,1 \text{ kW/mm}^2$, tarama hızı $1,2 \text{ m/s}$, 150 W lazer gücü, $30 \text{ }\mu\text{m}$ katman kalınlığı olacak şekilde belirlenmiştir. 316L için parametreler, 50 W lazer gücü, $0,1 \text{ mm/s}$ tarama hızı, $40 \text{ }\mu\text{m}$ katman kalınlığı, 13 kW/mm^2 olacak şekilde ayarlanmıştır.

Ayrıca yalnızca tek yönlü lazer tarama tercih edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda kalıntı gerilmelerin, zaman, sıcaklık, deformasyonlar ve mikro yapıya bağlı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca alt parametre olarak da ısıl iletkenlik, ısıl kapasite, genleşme katsayısı, elastik modül, poisson oranı ve plastisite belirtilmiştir. Çalışmalarda lazer taramanın nasıl bir sıcaklık dağılımına sebep olacağı da incelenmeye çalışılmıştır. Sıcaklıklarla ilgili çalışmaların büyük çoğunluğu sonlu elemanlar modelleri sonucu elde edilmiştir. Şekil 10'de ısıl davranışların modellenmesi gösterilmiştir [59].

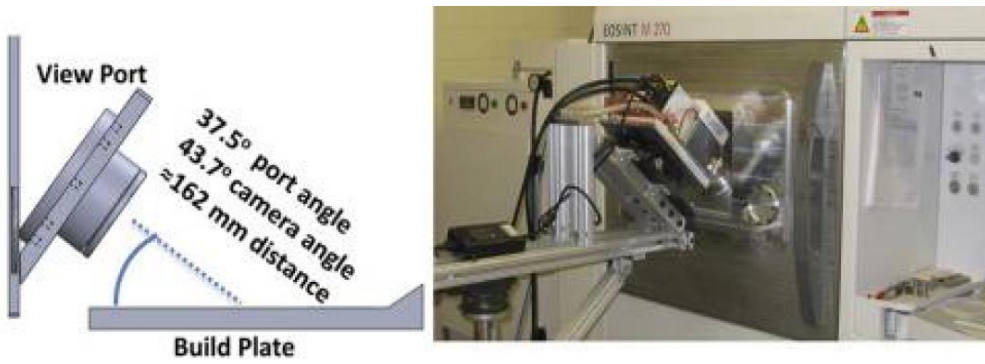


Şekil 10. DMLS ile imalatta tek bir katmanın sinterlenmesinde 3 boyutlu ısıl haritalama [58]

Sıcaklık değişimlerinin tespitine yönelik olarak yapılan bir çalışma ile DMLS ile imalatta nasıl sıcaklık gözlemi yapılacağı aktarılmıştır. [59]. 550 ile 1100°C sıcaklıklar arasında ölçüm yapabilen bir termal kamera kullanılarak ergiyik havuzunun sıcaklık ve çapsal ölçüm analizlerini yapmaya yarayan sistem tasarımı anlatılmıştır. Gerekli ölçümleme çalışmaları da yapılarak elde edilen sonuçlar doğrultusunda uygun kamera bağlantı şartları şekilde gösterilmiştir [61]. Şekil 11 ve 12'de deney düzeneği tasarımı gösterilmiştir.



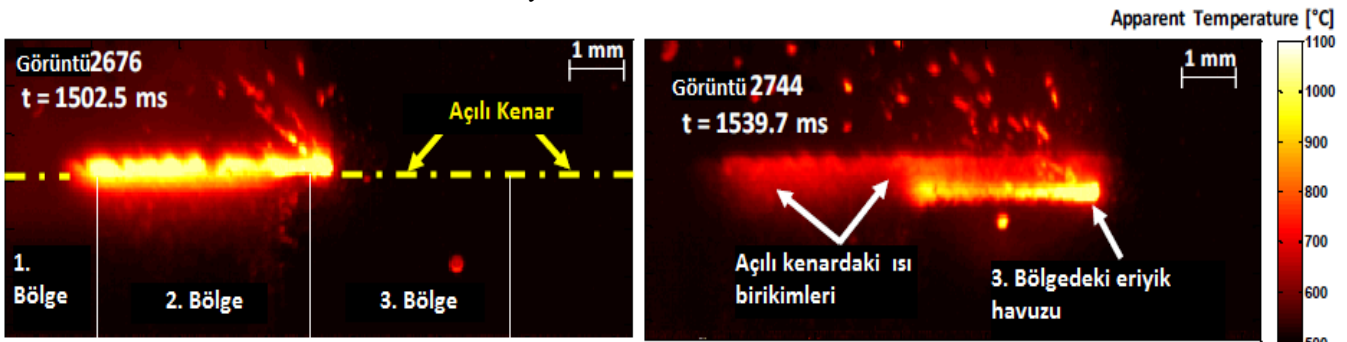
Şekil 11. Termal kamera genel deney düzeneği [59]



Şekil 12. Termal kamera ile gözlem deney düzeneği [61]

Bir çalışmada termal kamera ve hızlı çekim kamerası birlikte kullanılarak, Inconel 625 malzemenin imalat esnasındaki çarpılma vb. etkileri gözlemlenmeyi amaçlamıştır. Bunun yanında imalat esnasındaki lazer sıçrantılarını da görmeyi hedeflemiştir. Şekil 13'de 40,5° açıyla imal edilen bir parçanın ilk katmanı ve 68 kare sonraki durumları göstermektedir. Aynı katman için alınan ölçümlerdir. Daha önce yapılan çalışmaların aksine bu çalışmada lazer temas noktasındaki sıcaklıklar maksimum 1100°C seviyelerinde

gözlenmiştir. Ancak burada elde edilen veriler doğrudur denemeyebilir çünkü kameranın veri kaydının milisaniye mertebelerinde olması beklenemez. Ancak önceki çalışmalarda sıcaklıklar sonlu elemanlar analizi ile çok küçük ölçüm aralıklarında verilmişti. Yapılan çalışma önemli iki bilgiyi barındırmaktadır. İlki imalat esnasında kalıntı ısı adı verilen ısı yoğunlaşmış bölgelerin bulunması, ikincisi ise lazerin metal sıçrantılarına sebep olmasıdır. [62]



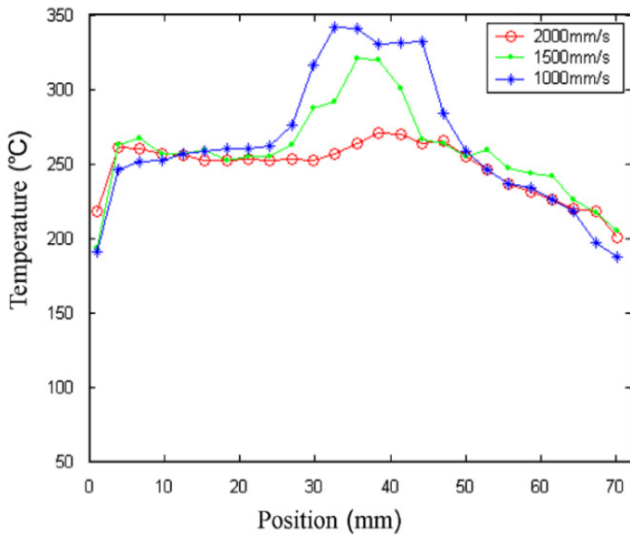
Şekil 13. Çıktıdan hemen sonra termal kameranın görünen sıcaklık verilerinden iki çerçeve: çıkıntı başlangıcında (solda) ve 68 kare sonra (sağda) ortaya çıkar. Çıktı, oluşumdan 37 ms sonra hala yükseltilmiş sıcaklıkta (termal kamera ölçülebilir aralıkta) [62]

Bir diğer çalışmada 7 farklı imalat parametresi ile çizgisel bir hat üzerinde ilerleyen lazer ışınlarının sıcaklık değişimlerine etkisi termal kamera ile fotoğraflanmıştır. Inconel 625 metali için çalışmalar tamamlanmıştır. 200, 500 ve 800 mm/s

tarama hızlarında ve 49, 122 ve 195 W lazer gücü ile deneyler tasarlanmıştır. Lazer gücü artıp tarama hızı azalırken eriyik havuzu genişliği 0,2 mm'den 0,8 mm'ye kadar ulaşmaktadır. Lazer temas anındaki sıcaklıklar

ortalama olarak 940°C seviyesinde olmaktadır. Çalışma ile tezgâh parametrelerinin lazer ergiyik çapının tayini yapılmış dolayısıyla da nüfuziyet oranları anlaşılmıştır [63].

Ayrıca yapılmış olan çalışma ile lazerin farklı parametreleri için 72*72*72 mm boyutlarında bir küpün imalatı gerçekleştirilmiştir. Bu esnada İnfrared kamera ile ortam sıcaklığı da incelenmiştir. İncelemelerde nokta, çizgi ve yüzey boyunca sıcaklık değişimleri ele alınmıştır. İnceleme tek bir katmanın sinterlenmesini ifade etmektedir. Yapılan incelemeler sonucunda lazer gücündeki artışın sıcaklıkları artırdığı, tarama hızındaki artışın ise sıcaklığı azalttığı tespit edilmiştir. Şekil 14 ve 15’de deney sonuçları gösterilmiştir [60]. Noktasal sıcaklık dağılımında; numunenin bir noktası için sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Grafikte maksimum sıcaklığın olduğu an lazerin o noktaya temas anını ifade etmektedir.

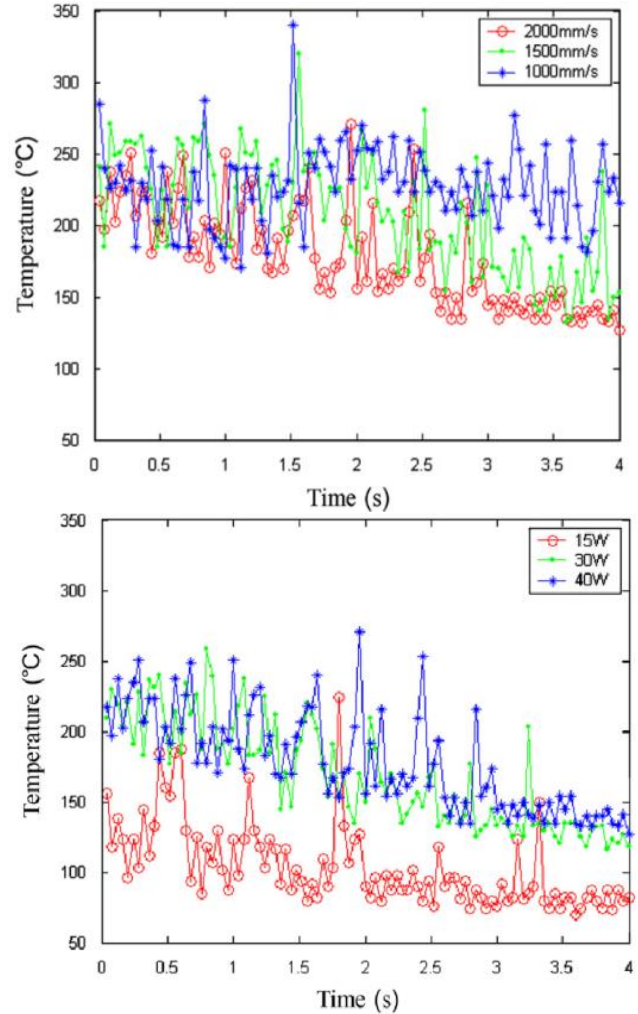


Şekil 14. Lazerin bir çizgi boyunca taramasının sıcaklığı (40 W) [60]

Bunların yanında DMLS ile imalatın ilk anlarında (10sn’de) tabla sıcaklığının aniden artış gösterdiği tespit edilmiştir. Sonrasındaki artışların ise daha dengeli olarak devam ettiği görülmüştür. Tablanın kalınlığı arttıkça sıcaklığın daha da yükseldiği tespit edilmiştir. Aynı zamanda tabla kalınlığı arttıkça şekil değişiminde azalmalar gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak ise ince tablanın ısıyı daha kolay işletmesi ve böylece sıcaklığa bağlı genişleme ve büzülmenin sınırlandırıldığı söylenebilir [64].

Inconel625 metallerin EOS M280 lazer eklemeli imalat tezgâhında imalatını konusunda çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma ile sonlu elemanlar analizi ve gerçek deney sonuçları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Malzemenin imalat anı ve hızlı soğuma sonrasındaki mikro içyapı analizleri yapılmıştır. İmalat sonrasında XRD ile yapılan analizlere göre malzeme yüzdesi incelemeleri yapılmıştır. Soğuma hızına bağlı olarak içyapıdaki dentritik yapılarındaki değişimler incelenmiştir. Çalışma ile yalnızca tek bir doğru boyunca lazer ile işlem yaparak sıcaklık

değişimleri incelenmiştir. Gerçek ölçümler yapılmamıştır. Sonuçlara göre lazer temas anında 3328 °K sıcaklıklardan hızlı bir şekilde 1000 °K sıcaklıklara düşüş olduğu tespiti yapılmıştır. Bunun yanında soğuma hızı arttıkça dentritik kol aralıkları da uzamıştır [65].



Şekil 15. Noktasal sıcaklık dağılımı üst: değişken tarama hızlarında sıcaklıklar alt: değişken lazer gücünde sıcaklıklar(2000 mm/s) [60]

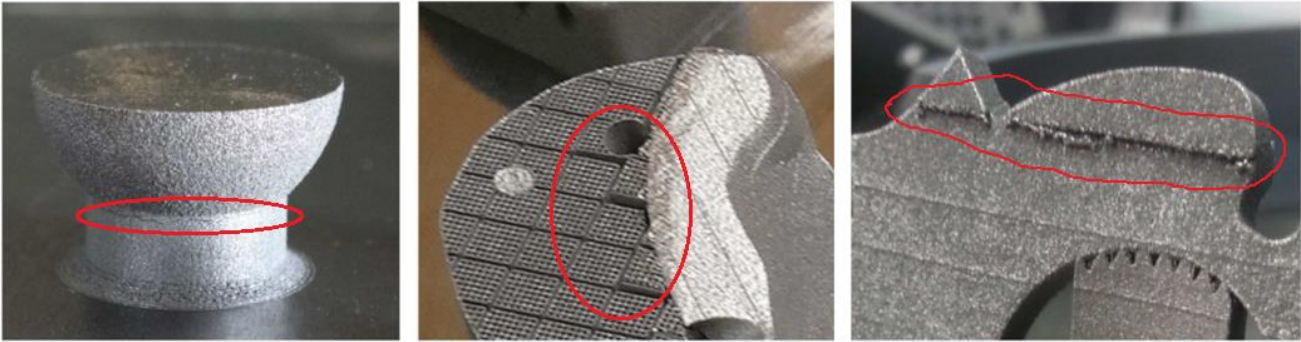
Benzer şekilde yine Inconel 625 metal tozlarının lazer eklemeli imalatında lazer eriyik oluşturma aşamalarını anlamak ve parametrelerin yoğunluğa (gözeneklilik) etkilerini incelemek amacıyla sonlu elemanlar analizi üzerine yapılan bir çalışmada; gerçek deney sonuçları ile ergiyik havuzu boyutları açısından kıyaslamalar da yer almaktadır. Ergime sıcaklığının üzerindeki maksimum sıcaklıklar ve işlem süreleri en etkili parametreler olarak tanımlanmıştır. Bu çalışma aynı zamanda maksimum çıkılan sıcaklığı düşürmek ve yoğunluğu artırmak üzerine kurulmuş bir optimizasyon setini de kapsamıştır. Elde edilen verilere göre eriyik havuzu boyutu ve şekilleri, ısı tesiri altında kalan bölgeler nedeniyle tarama stratejisinden etkilenmektedir. Çalışmadan edilen başka verilere göre de maksimum sıcaklık ve yoğunluk tarama mesafesinin ve tarama hızının artması

ile azalmıştır. Optimum sonuçlar 825 mm/s tarama hızı ve 0,093 mm tarama mesafesi için elde edilmiştir [66].

Bir başka çalışmada; tabla üzerinde imal edilmeye başlanan bir parçanın termal modeli üzerine sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Model kurulurken deney tasarımı yapılarak deney sayısı azaltılmıştır. Inconel 625 malzemenin 16 farklı parametre seti imalatı düşünülmüştür. İmalat kalitesine etki eden parametrelerin önemi anlaşılmaya çalışılmıştır. Lazerin temas ettiği noktada anlık olarak 2500 °K sıcaklık oluştuğu hızlı bir biçimde (yaklaşık 1 sn) 1000 °K sıcaklığa hızlı bir soğuma olduğu da tespit edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda en etkin parametreler sırasıyla lazer gücü, metalin öz ısısı, tarama hızı olarak tespit edilmiştir [67].

2.2. Kalıntı Gerilmeler

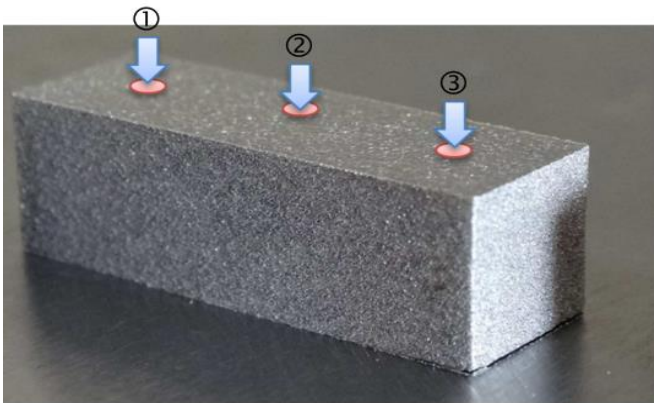
Kalıntı gerilmeler DMLS imalat yönteminde olduğu gibi diğer toz eklemeli imalat yöntemlerinde de en hassas konulardan bir tanesidir. Çünkü kalıntı gerilmeler imalat esnasında sıcaklık ve boyutsal değişimlerin etkisiyle ortaya çıkıp başta mekanik özellikler olmak üzere parçaya ait birçok özelliğe tesir edecektir. Bu bölümde kalıntı gerilmeler üzerine yapılmış olan çalışmalar aktarılacaktır. Aynı zamanda termal durumlar da değerlendirilecektir. Tablo 3’de ilgili parametreler önem sırasına göre aktarılmıştır. Şekil 16’de DMLS ile Ti6Al4V malzeme imalatında karşılaşılan kalıntı gerilme ve termal genleşme kaynaklı hatalar gösterilmiştir [68].



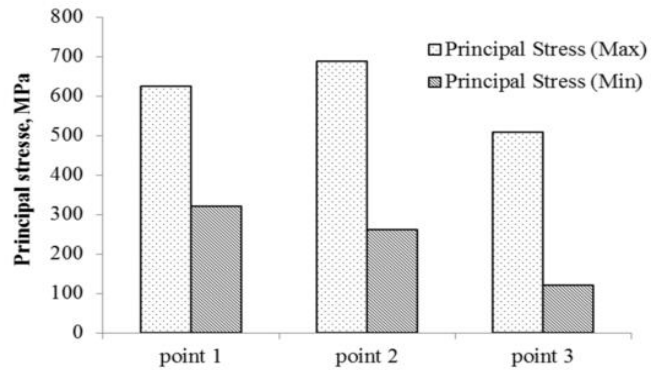
Şekil 16. Ti6Al4V ile DMLS imalatında ortaya çıkan kalıntı gerilme ve termal genleşme kaynaklı deformasyonlar [68]

İmalat esnasında üst katmanlar sinterlendikçe kalıntı gerilmeler artış göstermiştir. Maksimum gerilmeler yüzey kısımlarında ortaya çıkmıştır. Tarama stratejilerine bağlı bir kalıntı gerilme gözlenmiştir. Çalışmalarda ortaya çıkan bir diğer durum da, gerilme ve genleşmelerden dolayı plastik deformasyona uğramış bölgelerde kalıntı gerilmeler çok düşük olarak ortaya çıkmıştır. Bunun nedeni olarak

deformasyonların gerilme altındaki bölgelerin gerilmelerini giderdiği düşünülmüştür. Ayrıca kalıntı gerilmeleri etkileyen parametrelere ek olarak support şekilleri, geometriler, malzeme özellikleri, proses parametreleri, katman kalınlığı ve ön ısıtma durumları da belirtilmelidir. Şekil 17’de malzemede geometrisi üzerinde imalat esnasında meydana gelen kalıntı gerilmeler gösterilmiştir [67,68].



(a)



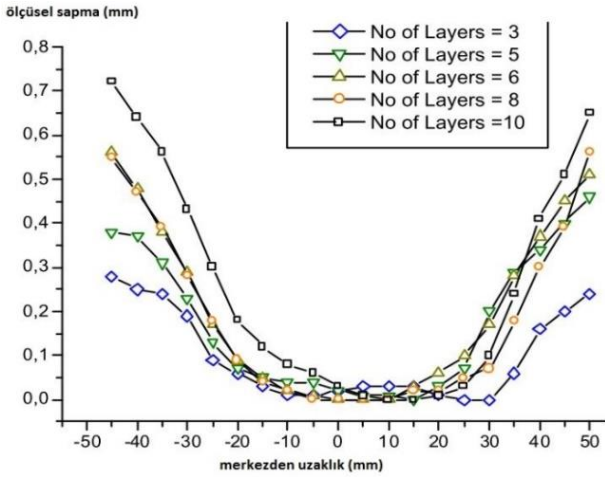
(b)

Şekil 17. Ti6Al4V (ELI) malzemede geometri üzerinde imalat esnasında meydana gelen kalıntı gerilmeler [67],[68]

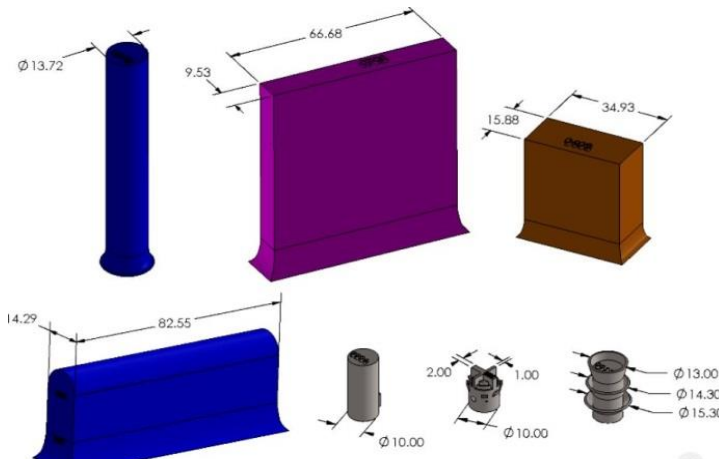
Demir esaslı malzemelerle yapılan çalışmalarda katman kalınlığı 0,05-0,3 mm, 200-215W lazer gücü, 50-175 mm/s tarama hızı, 80°C tabla ön ısıtması, 0,1-0,3 mm tarama mesafesi ve 35 µm toz boyutu tercih edilmiştir. Ayrıca faklı

tarama stratejileri de değerlendirilmiştir. Spiral tarama, çizgisel tarama, kareli tarama ve x-y tarama stratejileri belirlenmiştir. Çalışmalar sonucunda, tarama mesafesi arttıkça kalıntı gerilmeler azalmıştır. Parçaların merkezinde

kalıntı gerilmeler minimum seviyededir. Boyutsal bozulma oranı kalıntı gerilmelere paralel bir eğilim göstermektedir. Kareli tarama ve çizgisel tarama ile minimum kalıntı gerilmeler elde edilmiştir. Spiral taramada ise maksimum kalıntı gerilme ortaya çıkmıştır. Bu durum spiral taramanın dıştan içe doğru tarama yapmasına bağlanabilir. Çünkü ısı verilmesi işlemi dıştan içe doğru yapılarak parçada ısı birikim meydana gelmektedir. Şekil 18'de üst yüzeyde parça merkezinden uzaklaştıkça oluşan ölçüsel sapma miktarları gösterilmiştir.



Şekil 18. DMLS ile imalat esnasında sıcaklık ve kalıntı gerilmelerin etkisiyle meydana gelen boyutsal sapsmalar [26]



Şekil 19. İmal edilen bazı temel geometriler DMLS ile imalat esnasında sıcaklık ve kalıntı gerilmelerin etkisiyle meydana gelen boyutsal sapsmalar [71]

EOS ve Renishaw firmalarının muadil tezgâhları kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada Ti6Al4V ve Inconel 718 malzemenin imalat esnasında parametrelere ve tabla kalınlığına bağlı olarak nasıl şekil değişimi gösterdiği incelenmiştir. Tabla tabanına DVRT mesafe ölçerler monte edilerek çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda; lazerle işleme esnasında kademeli olarak tablada z eksenine göre yukarı yönlü (+) çarpılmalar oluşmakta, imalat bitip parça soğumaya başladığı durumda ise ters yönde bir kalıcı çarpılma oluşmuştur. Inconel 718 malzemede Ti6Al4V

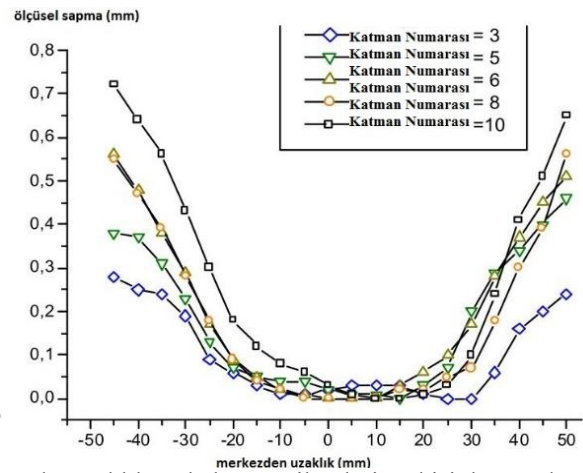
malzemeye göre çok daha fazla çarpılma gözlenmiştir. Aynı sıcaklık artışı da yine inconel malzemede karşımıza çıkmaktadır. İmalat esnasındaki çarpılma etkisinin zamana bağlı olarak dengeye girdiği gözlenmiştir. Inconel malzemede 0,85mm, Ti6Al4V malzemede 0,4mm kadar bir çarpılma meydana gelmiştir. Aynı zamanda Renishaw tezgâhta çok daha fazla çarpılma etkisi gözlenmiştir. Ti6Al4V malzemede oluşan gerilim gevşemesi etkisinin tablada çarpılma davranışını azalttığı anlaşılmıştır [64].

Kalıntı gerilmelerin azaltılmasının önemi vurgulanmıştır. Böylelikle parça boyutları ve parça performansı istenen seviyede tutulabilecektir [22,25]. Alüminyum esaslı malzemelerle yapılan çalışmalarda, 400W lazer gücü, 30 µm katman kalınlığı, 100 µm lazer çapı ve 35°C ön ısıtma gibi parametreler tercih edilmiştir.

2.3. Boyutsal Değişimler

Çalışmalarda kafes yapılar da kullanılmıştır. Kafes yapı parça imalatında ısı birikmesi fazla olursa sıcaklık ergime noktasının üzerine çıkarak istenmeyen etkilere sebep olabilir. Bu nedenle hacimsel ve boyutsal sapsmalar meydana gelebilir. Bu durum yalnızca kafes yapılar için geçerli değildir. Tüm imalat için geçerlidir [41,65].

Yapılan başka bir çalışmada parça boyutları açısından çeşitli incelemeler yapılmıştır. Yapılan çalışma numune geometrileri belirlemeleri açısından örnek teşkil edecektir. Numuneler belirlenirken uzun, kısa, dar, geniş, dairesel, silindirik ve bazı özel formlar için örnek teşkil etmektedir. Bu geometriler ve yüzeyde merkezden uzaklaştıkça oluşan ölçüsel sapma miktarları Şekil 19 'te gösterilmiştir [71]. Kalıntı gerilmelerin azaltılmasının en önemli hedeflerden bir tanesi olması gerektiği vurgulanmıştır. Böylelikle parça boyutları ve parça performansı istenen seviyede tutulabilecektir [22,25].



Tüm çalışmalar incelendiğinde henüz bu alanda yeterli çalışmanın yapılmadığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca sonlu elemanlar modellemesi ile yapılan çalışmaların tamamının eksik öngörüler barındırdığı tespit edilmiştir. Çünkü imalat esnasındaki kalıntı gerilmeler parça özelliklerinin tamamını etkilemektedir. Ayrıca sonlu elemanlar ile modelleme yapılırken yalnızca sinterlenmiş metal öngörülmektedir. Hâlbuki gerçekte, toz metaller lazer ile enerji alıp rijit bir yapı oluşturmaktadır. Bunlara ek olarak birçok sonlu elemanlar modeli tek bir katman için model kurmaktadır, bütünü anlamaya yönelik bir çalışma yapılması gereklidir. Tablo 2’de belirtilen parametreler çalışmalar sonucunda ortaya çıkarılmıştır. Ancak daha kapsamlı çalışmalar yapılarak tablo doğrulanmalı ve geliştirilmelidir [15-71].

Tablo 2. DMLS ile imalatta kalıntı gerilmelere etki eden parametrelerin önem sırasına göre gösterilmesi

Etkili parametreler
Sıcaklık değişimleri (dolaylı)
Malzeme özellikleri
Enerji yoğunluğu
Parça geometrisi
Katman sayısı
Tarama hızı
Tarama stratejisi
Tarama mesafesi
Ön ısıtma ve ortam sıcaklıkları
Destek yapılar

3. SONUÇLAR

Yapılan çalışma ile eklemeli imalat metodlarından olan DMLS ile imalat incelenmiştir. Çalışmada öncelikli olarak imalat parametrelerinden ve dış etmenlerden kaynaklanan sıcaklık dağılımları ve nedenleri anlaşılmasına çalışılmıştır. Sonraki kısımlarda ise sıcaklık dağılımlarına bağlı olarak parçalarda meydana gelen şekil değişimleri incelenmiştir:

DMLS imalatın sıcaklık dağılımları, boyutsal değişimler ve kalıntı gerilmeler açısından anlaşılmasına yönelik deneysel ve teorik çalışmalar sonuç olarak; Kalıntı gerilmelere ve termal etkilerden dolayı meydana gelen boyutsal değişimlere sebep olan parametreler nispeten belirlenmiş olsa da bu parametrelerin etkileri sayısal olarak belirlenmelidir. Kalıntı gerilmeler ve termal sonlu elemanlar analizlerinin daha gerçekçi yapılabilmesi için sınır şartlarını gerçeğe uygun belirlemek gerekmektedir. Gerçekçi sonuçların elde edilebileceği şekilde sınır şartlarını belirlemek ve analiz sonuçlarının gerçek deneylerle kıyaslanması önem arz etmektedir. Ancak bu şekilde yapılacak kapsamlı bir çalışma ile DMLS ile eklemeli imalat derinlemesine anlaşılması olacaktır.

İmalat esnasındaki termal davranışların ve bu termal davranışlar sonucunda meydana gelecek olan boyutsal değişimlerin deneysel ve sonlu elemanlar modellemesi yapılmalıdır. Elde edilen bağıntılar aracılığıyla sonraki

imalatlarda hatalardan kaçınmak ve istenen özellikleri elde etmek mümkün olacaktır.

Kalıntı gerilmeler ve boyutsal değişimler kontrol altında tutulacak şekilde optimum parametre tayin edilmesi ile daha büyük boyutlu ve daha yüksek performanslı parçaların imalatı mümkün hale gelecektir. Böylece DMLS ile imalatın kullanılabilirliği artacaktır. Yöntemin endüstriyel potansiyeli ve imalatçılar tarafından kabul edilirliği de artacaktır.

4. KAYNAKLAR

- [1] W. J. Sames, F. A. List, S. Pannala, R. R. Dehoff, and S. S. Babu, “The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing,” *Int. Mater. Rev.*, vol. 61, no. 5, pp. 315–360, 2016.
- [2] C. Körner, “Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting - A review,” *Int. Mater. Rev.*, vol. 61, no. 5, pp. 361–377, 2016.
- [3] D. D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, and R. Poprawe, “Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms,” *Int. Mater. Rev.*, vol. 57, no. 3, pp. 133–164, 2012.
- [4] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, and C. Emmelmann, “Additive manufacturing of metals,” *Acta Mater.*, vol. 117, pp. 371–392, Sep. 2016.
- [5] T. DebRoy, H. L. Wei, J. S. Zuback, T. Mukherjee, J. W. Elmer, J. O. Milewski, A. M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, and W. Zhang, “Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 92, pp. 112–224, Mar. 2018.
- [6] K. V. Wong and A. Hernandez, “A Review of Additive Manufacturing,” *ISRN Mech. Eng.*, vol. 2012, pp. 1–10, 2012.
- [7] S. K. Everton, M. Hirsch, P. Stravroulakis, R. K. Leach, and A. T. Clare, “Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing,” *Mater. Des.*, vol. 95, pp. 431–445, 2016.
- [8] W. E. Frazier, “Metal additive manufacturing: A review,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 23, no. 6, pp. 1917–1928, 2014.
- [9] S. S. Kayacan M. Y., “Ürün geliştirme sürecinde hızlı prototip uygulamaları,” *Plast. Derg.*, vol. 125, pp. 122–130, 2014.
- [10] ASTM International, F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. 2013.
- [11] D. Manfredi, F. Calignano, E. P. Ambrosio, M. Krishnan, R. Canali, S. Biamino, M. Pavese, E. Atzeni, L. Luliano, P. Fino, and C. Badini, “Direct Metal Laser Sintering: An additive manufacturing technology ready to produce lightweight structural parts for robotic applications,” *Metall. Ital.*, vol. 105, no. 10, pp. 15–24, 2013.
- [12] “httpen,” wikipedia, 2014. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_sintering.
- [13] Additively.com, “No Title.” [Online]. Available: <https://www.additively.com/en/learn-about/laser-melting>.
- [14] M. Yan, S. D. Luo, G. B. Schaffer, and M. Qian, “Impurity (Fe, Cl, and P)-induced grain boundary and

secondary phases in commercially pure titanium (CP-Ti)," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 44, no. 8, pp. 3961–3969, 2013.

[15] M. Yan, M. S. Dargusch, C. Kong, J. A. Kimpton, S. Kohara, M. Brandt, and M. Qian, "In Situ Synchrotron Radiation Study of TiH₂-6Al-4V and Ti-6Al-4V: Accelerated Alloying and Phase Transformation, and Formation of an Oxygen-Enriched Ti₄Fe₂O Phase in TiH₂-6Al-4V," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 46, no. 1, pp. 41–45, 2015.

[16] M. Yan, S. D. Luo, G. B. Schaffer, and M. Qian, "TEM and XRD characterisation of commercially pure ??-Ti made by powder metallurgy and casting," *Mater. Lett.*, vol. 72, pp. 64–67, 2012.

[17] M. Yan, M. Qian, C. Kong, and M. S. Dargusch, "Impacts of trace carbon on the microstructure of as-sintered biomedical Ti-15Mo alloy and reassessment of the maximum carbon limit," *Acta Biomater.*, vol. 10, no. 2, pp. 1014–1023, 2014.

[18] K. U. Kainer, "High Temperature Ceramic Matrix Composites," 2006.

[19] M. Qian, Y. F. Yang, S. D. Luo, and H. P. Tang, 12. Elsevier Inc., 2015.

[20] K. Crosby, "Titanium-6Aluminum-4Vanadium For Functionally Graded Orthopedic Implant Applications," Univ. Connect., 2013.

[21] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, "Additive manufacturing technologies," *Vasa*, no. December, 2010.

[22] J. Wroe, *INTRODUCTION TO Additive Manufacturing TECHNOLOGY*, 1st ed. Shrewsbury: Association, European powder metallurgy, 2012.

[23] A. Simchi and H. Pohl, "Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 359, no. 1–2, pp. 119–128, 2003.

[24] J. Delgado, J. Ciurana, and C. A. Rodríguez, "Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with iron-based materials," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 60, no. 5–8, pp. 601–610, 2012.

[25] F. Cagnano, D. Manfredi, E. P. Ambrosio, L. Iuliano, and P. Fino, "Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, no. 9–12, pp. 2743–2751, 2013.

[26] H. Pohl, A. Simchi, M. Issa, and H. C. Dias, "Thermal stresses in direct metal laser sintering," *Proc. SFF Symp.*, pp. 366–372, 2001.

[27] I. Shishkovsky, "Stress-strain analysis of porous scaffolds made from titanium alloys synthesized via SLS method," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 255, no. 24, pp. 9902–9905, 2009.

[28] H. Exner, P. Regenfuss, L. Hartwig, S. Klötzer, and R. Ebert, "Selective laser micro sintering with a novel process," *Proc. SPIE*, vol. 5063, pp. 145–151, 2003.

[29] S. Caro, D. Chablat, R. Ur-Rehman, P. Wenger, and A. Bernard, "Global Product Development," pp. 373–383, 2011.

[30] L. S. Bertol, W. K. Júnior, F. P. Da Silva, and C. Aumund-Kopp, "Medical design: Direct metal laser sintering of Ti-6Al-4V," *Mater. Des.*, vol. 31, no. 8, pp. 3982–3988, 2010.

[31] R. Paul, "Modeling and optimization of powder based additive manufacturing (AM) processes," 2013.

[32] F. Xie, X. He, S. Cao, and X. Qu, "Structural and mechanical characteristics of porous 316L stainless steel fabricated by indirect selective laser sintering," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 6, pp. 838–843, 2013.

[33] C. Aumund-Kopp and F. Petzoldt, "Laser Sintering of parts with complex internal structures," *Proc. 2008 world Congr. powder Metall. Part. Mater.*, vol. 1, no. 3, pp. 385–397, 2008.

[34] T. Hayashi, K. Maekawa, M. Tamura, and K. Hanyu, "Selective Laser Sintering Method Using Titanium Powder Sheet Toward Fabrication of Porous Bone Substitutes," *JSME Int. J. Ser. A*, vol. 48, no. 4, pp. 369–375, 2005.

[35] L. Ventola, F. Robotti, M. Dialameh, F. Cagnano, D. Manfredi, E. Chiavazzo, and P. Asinari, "Rough surfaces with enhanced heat transfer for electronics cooling by direct metal laser sintering," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 75, pp. 58–74, 2014.

[36] Y. Ning, "Process Parameter Optimization for Direct Metal Laser Sintering (DMLS)," p. 167, 2005.

[37] M. H. Farshidianfar, A. Khajepour, and A. P. Gerlich, "Effect of real-time cooling rate on microstructure in Laser Additive Manufacturing," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 231, pp. 468–478, 2016.

[38] Y. Ningy, J. Y. H. Fuh, Y. S. Wongy, and H. T. Lohy, "An intelligent parameter selection system for the direct metal laser sintering process," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 42, no. 1, pp. 183–199, 2004.

[39] Y. Ning, Y. S. Wong, J. Y. H. Fuh, and H. T. Loh, "An approach to minimize build errors in direct metal laser sintering," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 73–80, 2006.

[40] S. Merkt, C. Hinke, J. Bultmann, M. Brandt, and M. Xie, "The mechanical response of TiAl₆V₄ lattice structures manufactured by SLM in quasi static and dynamic compression tests," vol. 17006, pp. 3–10, 2015.

[41] J. Parthasarathy, B. Starly, and S. Raman, "A design for the additive manufacture of functionally graded porous structures with tailored mechanical properties for biomedical applications," *J. Manuf. Process.*, vol. 13, no. 2, pp. 160–170, 2011.

[42] C. Yan, L. Hao, A. Hussein, P. Young, J. Huang, and W. Zhu, "Microstructure and mechanical properties of aluminium alloy cellular lattice structures manufactured by direct metal laser sintering," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 628, pp. 238–246, 2015.

[43] M. Yan and P. Yu, "An Overview of Densification, Microstructure and Mechanical Property of Additively Manufactured Ti-6Al-4V — Comparison among Selective Laser Melting, Electron Beam Melting, Laser Metal Deposition and Selective Laser Sintering, and with Conventional Powder," *Sinter. Tech. Mater.*, pp. 76–106, 2015.

- [44] A. Vlasea, M., Lane, B., Lopez, F., Mekhontsev, S., Donmez, "DEVELOPMENT OF POWDER BED FUSION ADDITIVE MANUFACTURING TEST BED FOR ENHANCED REAL-TIME PROCESS CONTROL," *Proc. Int. Solid Free. Fabr. Symp.*, vol. 1, no. 1, pp. 527–539, 2015.
- [45] J. Živčák, M. Šarik, and R. Hudák, "FEA simulation of thermal processes during the direct metal laser sintering of Ti64 titanium powder," *Measurement*, vol. 94, pp. 893–901, 2016.
- [46] O. Kayabaşı, E. Yüzbaşıoğlu, and F. Erzincanlı, "Static, dynamic and fatigue behaviors of dental implant using finite element method," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 37, no. 10, pp. 649–658, 2006.
- [47] J. Romano, L. Ladani, and M. Sadowski, "Thermal Modeling of Laser Based Additive Manufacturing Processes within Common Materials," *Procedia Manuf.*, vol. 1, pp. 238–250, 2015.
- [48] a. Cerardi, M. Caneri, R. Meneghello, G. Concheri, and M. Ricotta, "Mechanical characterization of polyamide cellular structures fabricated using selective laser sintering technologies," *Mater. Des.*, vol. 46, pp. 910–915, 2013.
- [49] G. Campoli, M. S. Borleffs, S. Amin Yavari, R. Wauthle, H. Weinans, and a. a. Zadpoor, "Mechanical properties of open-cell metallic biomaterials manufactured using additive manufacturing," *Mater. Des.*, vol. 49, pp. 957–965, 2013.
- [50] R. Guo, "Numerical Analysis on Static Mechanical Properties of the Periodic Multilayer Lattice Material," *Engineering*, vol. 3, no. 12, pp. 1149–1154, 2011.
- [51] W. Gao, Y. Zhang, D. Ramanujan, K. Ramani, Y. Chen, C. B. Williams, C. C. L. Wang, Y. C. Shin, S. Zhang, and P. D. Zavattieri, "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering," *Comput. Des.*, vol. 69, pp. 65–89, 2015.
- [52] H. W. Mindt, O. Desmaison, M. Megahed, A. Peralta, and J. Neumann, "Modeling of Powder Bed Manufacturing Defects," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 27, no. 1, pp. 32–43, 2018.
- [53] D. M. Jacobson and G. Bennett, "Practical Issues in the Application of Direct Metal Laser Sintering," *Solid Free. Fabr. Symp.*, pp. 728–739, 2006.
- [54] M. L. Vlasea, B. Lane, F. Lopez, S. Mekhontsev, and A. Donmez, "Development of powder bed fusion additive manufacturing test bed for enhanced real-time process control," *26th Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp.*, pp. 527–539, 2015.
- [55] S. Mounsey, B. Hon, and C. Sutcliffe, "Performance modelling and simulation of metal powder bed fusion production system," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 1, pp. 421–424, 2016.
- [56] A. E. Patterson, S. L. Messimer, and P. A. Farrington, "Overhanging Features and the SLM/DMLS Residual Stresses Problem: Review and Future Research Need," *Technologies*, vol. 5, no. 2, p. 15, 2017.
- [57] H. Peng, D. B. Go, R. Billo, S. Gong, M. R. Shankar, B. A. Gatrell, J. Budzinski, P. Ostiguy, R. Attardo, C. Tomonto, J. Neidig, and D. Hoelzle, "Part-scale model for fast prediction of thermal distortion in DMLS additive manufacturing ; Part 1 : a thermal circuit network model," in *Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2016, pp. 361–381.
- [58] H. Peng, D. B. Go, R. Billo, S. Gong, M. R. Shankar, B. A. Gatrell, J. Budzinski, P. Ostiguy, R. Attardo, C. Tomonto, J. Neidig, and D. Hoelzle, "Part-scale model for fast prediction of thermal distortion in DMLS additive manufacturing ; Part 2 : a quasistatic thermomechanical model," in *Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2016, pp. 382–397.
- [59] Y. Gao, J. Xingb, J. Zhanga, N. Luoa, and H. Zheng, "Research on measurement method of selective laser sintering (SLS) transient temperature," *Opt. Opt.*, vol. 119, pp. 1–6, 2007.
- [60] J. Lee and V. Prabhu, "Simulation modeling for optimal control of additive manufacturing processes," *Addit. Manuf.*, 2016.
- [61] B. Lane, S. Moylan, E. P. Whintont, and L. Ma, "Thermographic measurements of the commercial laser powder bed fusion process at NIST," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 22, no. 5, pp. 778–787, 2016.
- [62] B. Lane, E. Whintont, and S. Moylan, "Multiple sensor detection of process phenomena in laser powder bed fusion," *Thermosense Therm. Infrared Appl.*, vol. 9861, no. 986104–1, pp. 1–9, 2016.
- [63] J. C. Heigel and B. M. Lane, "Measurement of the Melt Pool Length During Single Scan Tracks in a Commercial Laser Powder Bed Fusion Process," *Vol. 2 Addit. Manuf. Mater.*, no. April, p. V002T01A045, 2017.
- [64] A. J. Dunbar, E. R. Denlinger, M. F. Gouge, T. W. Simpson, and P. Michaleris, "Comparisons of laser powder bed fusion additive manufacturing builds through experimental in situ distortion and temperature measurements," *Addit. Manuf.*, vol. 15, pp. 57–65, 2017.
- [65] T. Keller, G. Lindwall, S. Ghosh, L. Ma, B. M. Lane, F. Zhang, U. R. Kattner, E. A. Lass, J. C. Heigel, Y. Idell, M. E. Williams, A. J. Allen, J. E. Guyer, and L. E. Levine, "Application of finite element, phase-field, and CALPHAD-based methods to additive manufacturing of Ni-based superalloys," *Acta Mater.*, vol. 139, pp. 244–253, 2017.
- [66] L. E. Criales, Y. M. Arisoy, B. Lane, S. Moylan, A. Donmez, and T. Özel, "Predictive modeling and optimization of multi-track processing for laser powder bed fusion of nickel alloy 625," *Addit. Manuf.*, vol. 13, pp. 14–36, 2017.
- [67] L. Ma, J. Fong, B. Lane, S. Moylan, J. Filliben, A. Heckert, and L. Levine, "Using Design of Experiments in Finite Element Modeling To Identify Critical Variables for Laser Powder Bed Fusion," *Solid Free. Fabr. Symp.*, pp. 219–228, 2015.
- [68] I. Yadroitsava and I. Yadroitsev, "Residual stress in metal specimens produced by direct metal laser sintering," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [69] F. State, "RESIDUAL STRESSES IN DIRECT METAL LASER SINTERED PARTS," *Interim Interdiscip. J.*, vol. 14, no. 1, pp. 110–123, 2015.
- [70] C. Yan, L. Hao, A. Hussein, S. L. Bubb, P. Young, and D. Raymont, "Evaluation of light-weight AlSi10Mg

periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, no. 4, pp. 856–864, 2014.

[71] W. F. Mitchell, D. C. Lang, T. A. Merdes, E. W.

Reutze, and G. S. Welsh, “DIMENSIONAL ACCURACY OF TITANIUM DIRECT METAL LASER SINTERED,” in *Proceedings of the 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2016, pp. 2029–2042.