

AR-GE AMAÇLI DOĞRUDAN METAL LAZER SİNTERLEME (DMLS) TEZGÂHI İŞLEM PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI

Burhan DUMAN*, M. Cengiz KAYACAN

Geliş Tarihi/ Received: 01.11.2017, Kabul tarihi/Accepted: 27.12.2017

Özet

Eklemeli imalat teknolojileri 1970 yıllarında, tasarımların numunelerini hızlıca imal etmeyi amaçlayan hızlı prototiplenme sistemleri ile başlanmıştır. 80'li yılların başından itibaren numune yerine gerçek parça imalata gündeme gelmeye başlamış ve imalat yönteminin adı Eklemeli İmalat olarak ifade edilmiştir. 90'lı yıllarda da eklemeli imalat sistemlerindeki gelişmelerle metal ve seramikten son kullanım amaçlı doğrudan fonksiyonel parçalar imal etme denemelerine başlanmıştır. Günümüzde de Seçmeli Lazer Sinterleme/Ergitme (SLS/E) makineleri ile birçok alanda çeşitli metal tozları kullanılarak klasik imalat yöntemleri ile imal edilemeyecek kadar karmaşık geometride olan parçaların göreceli olarak çok hızlı bir şekilde imalatı yapılabilmektedir. Bu çalışmada, Kalkınma bakanlığı destekli proje kapsamında tasarlanıp, ülkemizde ilk olarak imalatı yapılan, Doğrudan Metal Lazer Sinterleme tezgâhi kullanılmıştır. Tezgâh işlem parametrelerini belirleme amaçlı 316L paslanmaz çelik tozu kullanılarak; lazer gücü 50W-175W, tarama hızı 5mm/s-1000mm/s aralıklarında değiştirilerek tekli çizgi tarama, çoklu çizgi tarama ve tek katman tarama halinde deneyler yapılmıştır. Lazer gücünün 100-175W değerlerinde ve tarama hızının 85,100mm/s değerlerinde daha düzgün bir birleşme ile tekli çizgi elde edilmiştir. Lazer gücünün 100W, 125W değerleri ile tarama hızının 100mm/s,200mm/s değerlerinde kaynaşma görülmüştür. Lazer gücü 100W, tarama hızı 400mm/s ve tarama mesafesi 25µm değerlerinde iken daha başarılı katman oluşumu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, işlem parametreleri, metal sinterleme tezgâhi

INVESTIGATION OF PROCESS PARAMETERS OF DIRECT METAL LASER SINTERING (DMLS) BENCH FOR RESEARCH AND DEVELOPMENT PURPOSE

Abstract

In 1970s rapid prototyping systems, aimed at producing the samples of design. Since the beginning of 1980s people have started to talk manufacturing real part instead of sampling and they called the method of manufacturing as additive manufacturing. In 1990s with the development of additive manufacturing systems it has been started to manufacture direct end use functional part from metal and ceramic. Nowadays, with SLS machines by using various metal powders the part which has so complex geometry that cannot be manufactured by using conventional methods are able to be manufactured in many fields. DMLS bench which has first been manufactured in our country and which has been designed within the project supported by ministry of development was used in this study. Many experiments have been carried out aiming at determining bench process parameters by using 316L stainless steel powder. Single line scan, multi line scan and single layer scan were tried by changing the laser power between the range of 50W and 175W and scanning speed between the range of 5mm/s and 1000mm/s. Single line was achieved with a proper merging; the laser power was 100-175W and scanning speed was 85-100mm/s. Fusion was observed when the laser power was 100W, 125W and scanning

*Süleyman Demirel Üniversitesi Uluborlu S.Karasoy MYO, Bilgisayar Teknolojileri Bölümü, Isparta
E-posta: burhanduman@sdu.edu.tr

speed was 100mm/s,200mm/s. More successful layer formation was observed when the laser power was 100W, scanning speed was 400mm/s and scanning distance 25µm.

Key Words: Additive manufacturing, metal sintering bench, process parameters

1. Giriş

1970 yıllarında hızlı prototipleme sistemleri, tasarımların numunelerini imal etmeyi amaçlamıştır. 80'li yılların başından itibaren numune yerine gerçek parça imalatı gündeme gelmeye başlamış ve imalat yönteminin adı Eklemeli İmalat olarak ifade edilmiştir. 90'lı yıllarda da eklemeli imalat sistemlerindeki gelişmelerle metal ve seramikten son kullanım amaçlı doğrudan fonksiyonel parçalar üretilmeye başlanmıştır.

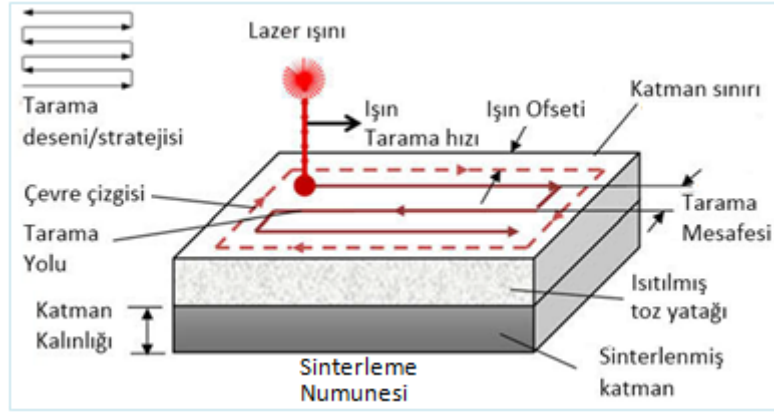
Eklemeli imalat, üç boyutlu (3B) geometrik verileri kullanarak malzemenin bir biri ardına katman katman eklenmesiyle, karmaşık geometriyi fiziksel parçaların hızlı bir şekilde imalatını gerçekleştiren bir imalat tekniğidir. Bu teknikte parça, bilgisayar destekli tasarım (BDT) programları ile çizim, tersine mühendislik (TM), bilgisayarlı tomografi (BT) gibi farklı yöntemlerle elde edilen 3B modelden imal edilir. 3B model çok sayıda ince katmanlara ayrılır (dilimlenir) ve imalat sistemleri, parça tamamlanuncaya kadar her bir katmanı ardışık biçimde imal etmek için bu geometrik veriyi kullanırlar (CustomPartNet, 2014; SME, 1970; Stratasys, 1989; Giannatsis ve Dedoussis, 2009; Çelik vd., 2013).

En yaygın eklemeli imalat teknikleri; steryolitografi (SLA), ergiterek yığıma ile modelleme (FDM), üç boyutlu yazıcı (3DP), seçmeli lazer sinterleme (SLS) ve seçmeli lazer ergitme (SLM), doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS), elektron ışınli ergitme (EBM) gibi yöntemlerdir. Bu teknikler ile sıvı reçineden, polimerlerden, polimer tozlarından ve metal tozlarından üç boyutlu fiziksel parçalar imal edilebilmektedir.

1989-1990 yıllarında Teksas Üniversitesinde Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) için başlayan araştırmalar 1990'ların başlarında pek çok enstitünün bu konuda çalışmaları ile devam etmiştir (Shellabear ve Nyrrhilä, 2004). 1990'ların başlarında Katolik Leuven Üniversitesinde (Belçika) metal sinterleme makinesi geliştirilmiş (CUL, 2014) ve 1995'de Fraunhofer İmalat Teknolojileri Enstitüsünde de deneysel amaçlı doğrudan metal ergitme yapan lazer sinterleme tipi cihaz imal edilmiştir (Das, 2003; Casalino vd., 2015).

Özellikle metal parçaların eklemeli imalatında, son kullanıma uygun imalat yöntemlerinin başında Seçmeli Lazer Sinterleme/Ergitme (SLS/E) yöntemi gelmektedir. SLS/E tekniğinde, ısıtıldığında kaynaşabilen toz halindeki bir imalat hammaddesi ince ve düzgün bir tabaka halinde yayılarak yüzeydeki seçilen bölgeler lazer ışınıyla taranır. Işının yüzeye çarptığı noktalarda oluşan sıcaklıkla toz malzeme kısmen eriyerek veya sinterlenerek temas halinde olduğu diğer toz taneleri ile kaynaşır. Bu işlemde sonra imalat zarfının tabanında bulunan platform, bir katman kalınlığı kadar aşağı çekilir. Her katmanın oluşumu için bu işlemler gerektiği kadar (katman sayısına) tekrarlandıktan sonra, imalat süresince doğal bir destek görevi üstlenmiş olan serbest tozlar fırça veya vakumlu emici ile manuel olarak temizlenerek imal edilen parça imalat zarfından alınır (Deckard, 1989; King ve Tansey, 2002; Partee vd., 2006; Neğiş, 2014). SLS/E işleminde lazer enerji kaynağı olarak genellikle Fiber lazer, Karbon dioksit (CO₂) lazer ve Neodmiyum:Yttrium-alüminyum-garnet (Nd:YAG) lazer; inşa kabini içerisindeki atmosferik ortamın sağlanmasında koruyucu gaz olarak da Azot ve Argon kullanılmaktadır (Wen vd., 2014).

SLS/E ile metal parça imalatında birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametreler, giriş ve çıkış parametreleri adı altında ikiye ayrılabilir. Giriş parametreleri lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi, tarama deseni (stratejisi), katman kalınlığı, imalat atmosferi ve toz karakteristiği olarak belirtilebilir. Çıkış parametreleri ise bağıl yoğunluk, sertlik, yüzey kalitesi, dayanım, metalurjik yapı, şekil ve boyut doğruluğu gibi parametrelerdir (Klocke vd., 2003; Chatterjee vd., 2003). Giriş parametrelerinin bazıları şematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Giriş parametrelerinin şematik gösterimi (Senthilkumaran vd., 2009' dan uyarlama)

Çalışmalarda en etkili işlem parametresi olarak, enerji yoğunluğu belirtilmektedir. Enerji yoğunluğu; lazer gücünün, tarama hızı, tarama mesafesi, katman kalınlığı parametrelerine oranı ile ifade edilmekte ve Eşitlik 1 ile hesaplanmaktadır (Kruth vd., 2005);

$$E=P/(v.s.t) \quad (1)$$

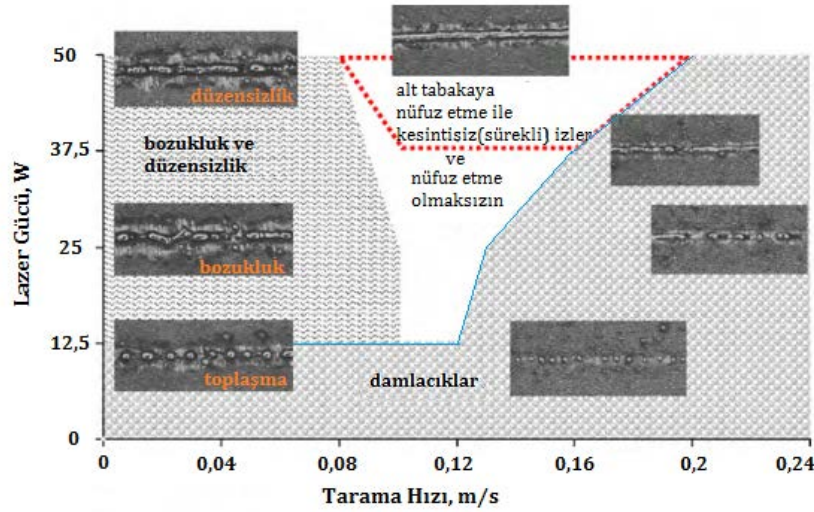
Eşitlikte; E enerji yoğunluğunu (J/mm³), P lazer gücünü (Watt), v tarama hızını (mm/s), s tarama mesafesini (mm), t katman kalınlığını (mm) ifade etmektedir.

SLS/E süreci ile üretilen bir parçanın performansı sinterleme/ergitme olgusunu ve işlem için gerekli enerji yoğunluğunun miktarını etkileyen parametrelerin tam bir kontrolünü ve optimizasyonunu gerektirmektedir. İşlem parametrelerinin mekanik özellikler, yüzey pürüzlülüğü ve yoğunluk gibi nihai ürün çıkış özellikleri üzerine doğrudan etkileri bulunmaktadır. Bu nedenle, çeşitli toz malzemeler kullanılarak işlem parametrelerini en iyilemeye yönelik birçok çalışma yapılmıştır (Delgado vd., 2012; Jia ve Gu, 2014; Kempen vd., 2011; 22Calignano vd., 2013; Laohaprapanon vd., 2011).

Bilindiği gibi DMLS'de fiziksel parça, katmanların üst üste kaynaşmasından (katman katman) meydana gelmektedir. Katmanlar da sinterlenmiş izlerin yan yana kaynaşmasından oluşmaktadır. Sürekli olmayan sinterlenmiş izler, katmanda ve dolayısı ile parçada istenilen nitelikte kaynaşma meydana getiremezler. Bu durum, imal edilen parçanın performansını (mekanik özelliklerini vb.) olumsuz yönde etkiler.

DMLS işleminde bir katmanda, tarama izinin sürekli olduğu yerlerde "kararlı bölgeler" ve bunun dışında "kararsız bölgeler" vardır (Şekil 2). Kararsızlıklar, düşük tarama hızı ile bozukluklar ve düzensizlikler şeklinde gözükür ve tersine, aşırı yüksek hız "toplaşma

etkisine" yol açar. Düşük tarama hızında daha düşük lazer gücünde enerji yoğunluğu, alt tabakayı eritmek için yetersizdir ve temas bölgesinin dengeleyici etkisi (alt tabaka içine nüfuz) kaybolur. Enerji yoğunluğunun ergimiş tozu kaynatacak ve buharlaştıracak seviyede olması durumunda, buhar geri tepme basıncı sinterlenmiş izlerin bozulmasını neden olur (Şekil 3.8). Lazer gücünün daha da azaltılması ile, izler damlacık dizisi (toplaşma) haline gelir (Yadroitsev vd., 2010). Tipik bir seçmeli lazer eritme kusuru olan toplaşma olgusu, tarama çizgileri ve katmanlar arası iyi bir birleşim için zararlıdır ve kötü yüzey yapışmasına (ıslatma) neden olarak DMLS işleminin kalitesini bozar (Li vd., 2012).



Şekil 2. İlk katman tekli iz proses haritası (Yadroitsev vd., 2010)

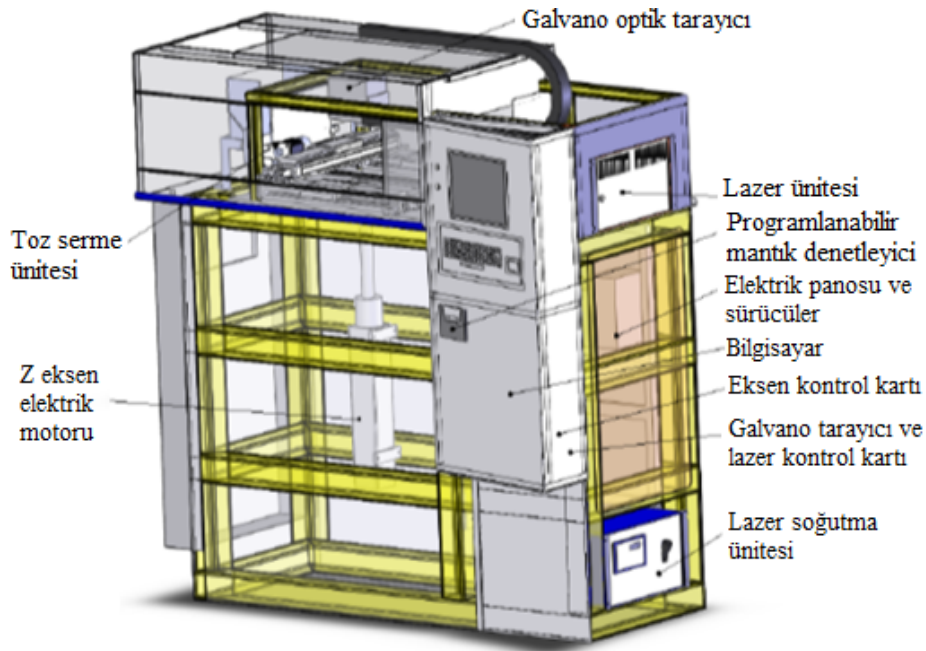
Toplaşmanın en önemli nedenlerinden bir tanesi, tek bir lazer izi (çizgisi)'ndeki enerji yoğunluğunun (lazer gücü/tarama hızı) uygun olarak belirlenmemesidir (Yadroitsev vd., 2010). Joo vd. (2010), çalışmalarında düşük tarama hızlarının toplaşmaya sebep olduğunu, yüksek tarama hızlarının da zayıf bağlantıya neden olduğunu ve doğrusalık oranını düşürdüğünü bildirmişlerdir. Bir diğer önemli neden ise imalat kabinindeki oksijen içeriğidir. Oksijen oranının %0.1 daha büyük olması bu soruna yol açar [25]. Bunun dışında katman kalınlığı (Elsen, 2007) ve toz malzemenin ısı iletkenliği de toplaşmayı etkilemektedir (Yadroitsev vd., 2010). Toplaşma etkisini önlemek için, enerji girdisi ve ısı transferi olaylarının optimum parametrelerinin belirlenmesi ve termal süreçleri stabilize edilmesi gerekmektedir (Yadroitsev vd., 2010). Yüksek lazer çizgisi enerji yoğunluğu, yüksek lazer gücü ve düşük tarama hızı uygulanarak elde edilebilir ve iyi bir yapışma (ıslatma) özelliği sağlayabilir. Tarama hızının azaltılması ile ergime havuzunun uzunluk-genişlik oranını azaltmak ve alt katman ile temasın genişliğini artırarak işlemi kararlı hale getirebilir (Gusarov vd., 2007). Metal topların ergitme ve ıslatılma sebebiyle yüzey yeniden ergitme işlemi de, belirli bir ölçüde toplaşma etkisini hafifletebilir (Li vd., 2012).

Bu çalışmada, Ar-Ge amaçlı Doğrudan Metal Lazer Sinterleme tezgâhı ile İşlem parametrelerini belirleme amaçlı bir seri deney yapılmıştır. Deneyler hava ortamında ve azot gazı püskürtme ile tek çizgi sinterleme, çoklu çizgi sinterleme ve tek katman sinterleme olarak gerçekleştirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Doğrudan Metal Lazer Sinterleme Tezgâhı

Kalkınma bakanlığı destekli proje kapsamında tasarlanıp üretilen Ar-Ge amaçlı Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) tezgahı Şekil 3’de verilmiştir. Çalışmada kullanılan tezgahın en temel donanımları lazer ünitesi, lazer soğutma ünitesi, galvano optik tarayıcı, galvano optik tarayıcı ve lazer kontrol kartı, elektrik motorları ve sürücüler, toz serme ünitesi, Programlanabilir Mantık Denetleyici (PMD) ve Masaüstü Bilgisayar (MB)'dır. Tezgah, çıkış gücü maksimum 200W, ışın çapı 5 ± 0.7 mm, sürekli veya modülasyonlu çalışabilen su soğutmalı Yb-Fiber lazer ünitesi bulunmaktadır.



Şekil 3. Çalışmada kullanılan tezgâhın görünümü (Baydar vd., 2005)

2.2. Paslanmaz Çelik Tozu

Çalışmada, 316L paslanmaz çelik tozu kullanılmıştır. 316L paslanmaz çelik tozu kimyasal kompozisyonu Çizelge 1’de verilmiştir (Stanch, 2014).

Çizelge 1. 316L paslanmaz çelik tozu kimyasal kompozisyonu

Bileşenler	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Ni%	Cr%	Mo%	N%
Min.		---	---	---	---	10.00	16.00	2.00	---
Mak.	0.030	0.750	2.00	0.045	0.030	14.00	18.00	3.00	0.100

2.3. Deneysel Yöntem

Lazer ergitme ile bir katmanda, çizgisel olarak en iyi toz birleşmesini sağlayacak tezgâh işlem parametrelerini belirlemek için bir dizi deneyler yapılmıştır. Deneylerde kullanılan parametreler; Katman kalınlığı, tarama mesafesi, tarama hızı ve lazer gücüdür. İşlem parametreleri ve değerleri, literatüre (Yadroitsev vd., 2007; Yadroitsev vd., 2010) göre belirlenmiştir. Deneyler hava ortamında ve azot gazı püskürtme ile; tek çizgi sinterleme, çoklu çizgi sinterleme, ve tek katman sinterleme olarak gerçekleştirilmiştir.

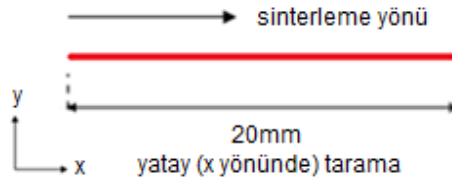
Sinterleme işleminden önce, imal edilecek parçanın geometrik olarak boyut doğruluğu ve bazı mekaniksel özelliklerin uygun bir şekilde sağlanabilmesi için galvano optik tarayıcının odak noktasının ve maksimum tarama alanının bulunması gerekmektedir. Bu sebeple deneysel çalışmadan önce tezgâhın iş tablası üzerindeki çalışma alanı kalibrasyonu yapılmıştır.

SLS/SLE ile imalat işleminde ilk olarak sinterleme çizgileri oluşmakta, sinterleme çizgilerinin yan yana gelmesinden katman, katmanların üst üste birleşmesinden de 3B bir parça elde edilmektedir. Bu sebeple tezgâh üzerindeki deneylere tekli tarama çizgileri ile başlanmış, daha sonra çoklu çizgi tarama ve tek katman oluşturma ile devam edilmiştir.

Deneylerin istenilen kombinasyonlar ile gerçekleştirilmesi amacı ile tezgâh için geliştirilmiş olan yazılım içerisine C# programlama dilinde oluşturulmuş kod parçası eklenmiştir.

2.3.1. Tek çizgi halinde sinterleme (Tek çizgi tarama)

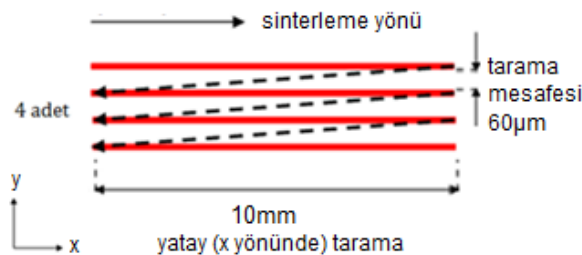
Sadece bir adet tarama çizgisi farklı parametreler ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'de deneylerde kullanılan tek tarama çizgisi ölçüsü ve tarama yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 4. Tek tarama çizgisi ölçüsü ve tarama yöntemi

2.3.2. Çoklu çizgi halinde sinterleme (Çoklu çizgi tarama)

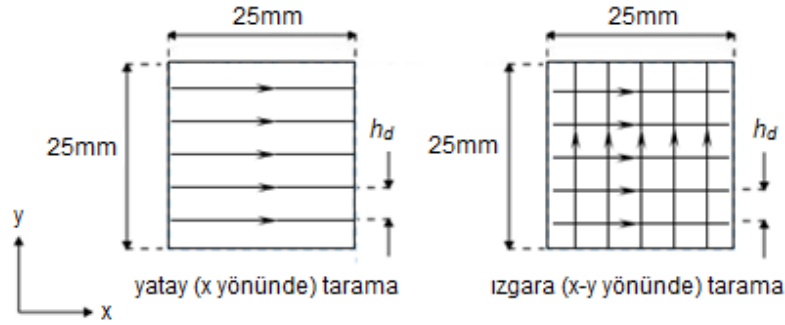
Hava ortamındaki bu deneyler, 6 farklı lazer güç değeri, 11 farklı tarama hızı için yapılmıştır. Tarama çizgileri uzunluğu 10mm olacak şekilde 4 adet yan yana gerçekleştirilmiştir. Katman kalınlığı ve tarama mesafesi 60µm olarak ayarlanmıştır. Şekil 5'de çoklu tarama çizgileri ölçüsü ve tarama yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 5. Çoklu tarama çizgileri ölçüsü ve tarama yöntemi

2.3.3. Tek katman olarak sinterleme (Tek katman tarama)

Bu deneyde, tek katman toz serilerek o katmanda 25x25mm ebatlarında kare biçiminde şekil oluşturmak için ergitme işlemi lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi (h_d), katman kalınlığı gibi parametrelerin belli değerleri ile yatay ve ızgara tarama yöntemi kullanılarak yapılmıştır (Şekil 6).



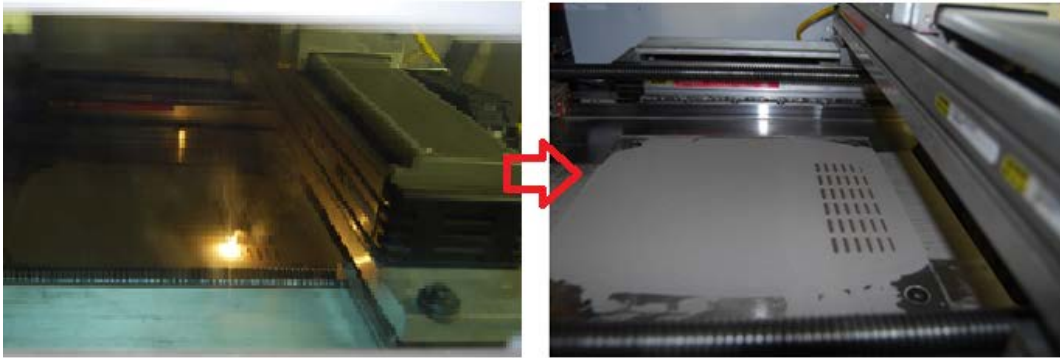
Şekil 6. Tek katman sinterleme test parçası ölçüleri ve tarama yöntemi

3. Araştırma Bulguları

Bu bölümde Ar-Ge amaçlı DMLS tezgâhı ile Tekli çizgi, Çoklu çizgi ve Tek katman sinterleme olarak yapılan deneylerin bulguları verilmiştir.

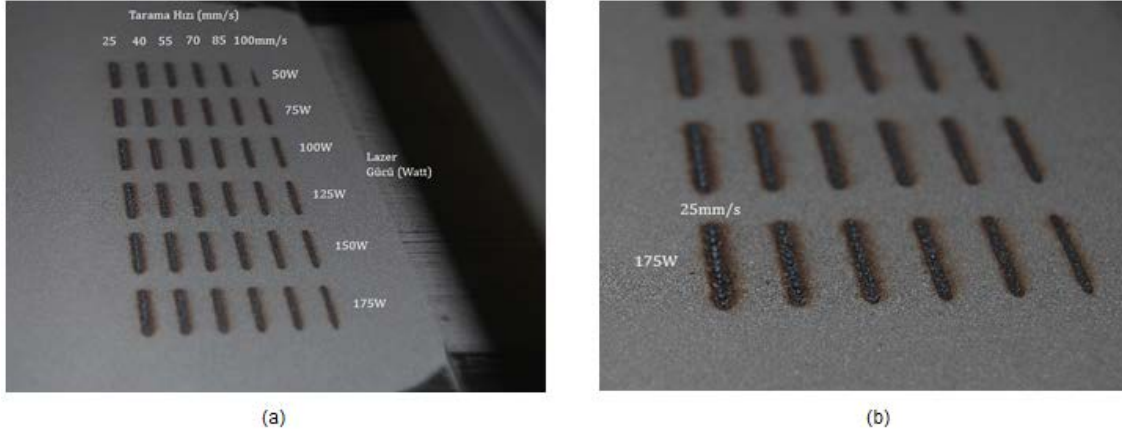
3.1. Tekli çizgi halinde sinterleme

Yapılan deneylerde sadece bir adet tarama çizgisi farklı parametreler ile gerçekleştirilmiştir. Tek tarama çizgisi denemeleri ile tezgâh kabini içinde sinterleme işleminin oluşumu Şekil 7’de gösterilmiştir.



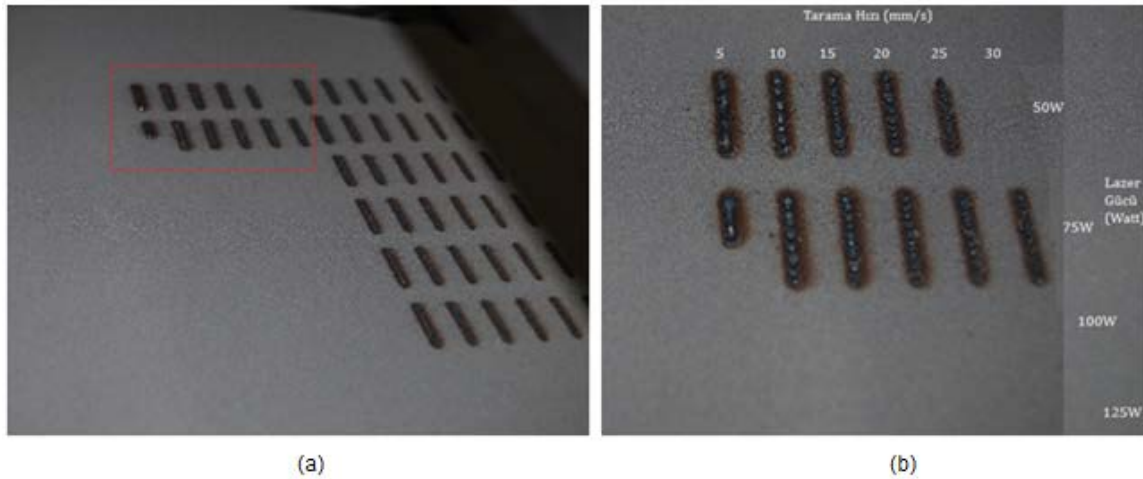
Şekil 7. Tek çizgi halinde sinterleme işlemi

Belirtilen deneyde lazer gücü 50W ile 175W arasında, tarama hızı 100mm/s ile 25mm/s arasında kademeli olarak değiştirilmiştir. Katman kalınlığı ise yaklaşık 300mikron’ a ayarlanmıştır. Tarama çizgi uzunlukları 10mm olacak şekilde tarama gerçekleştirilmiş, işlem sonrası görüntü Şekil 8’ de verilmiştir.



Şekil 8. Tek çizgi halinde sinterleme işlemi a) tarama hızı:25-100mm/s, lazer gücü:50-175W
b) yakınlştırılmış görüntü

Diğer bir denemede lazer gücü aynı aralıkta bırakılarak, tarama hızı 30mm/s ile 5mm/s arasında 5 birimlik kademelerle değiştirilmiştir. Bu işlemin sonucu Şekil 9’ da verilmiştir.



Şekil 9. Tek çizgi halinde sinterleme işlemi a) tarama hızı: 5-30mm/s, lazer gücü: 50-175W b) yakınlştırılmış görüntü

Lazer ünitesinin arızalı olmasından kaynaklı yüksek lazer gücü ve düşük tarama hızlarında Sinterleme çizgileri oluşmamıştır.

3.2. Çoklu çizgi halinde sinterleme (Çoklu çizgi tarama)

Hava ortamındaki bu deneyler, 50-175W arası lazer güç değerleri ve 50-1000mm/s tarama hızı değerleri ile çoklu çizgi halinde yapılmıştır. Katman kalınlığı 300 µm ve tarama mesafesi 60µm olarak ayarlanmıştır. Çoklu çizgi halinde sinterleme işlemin sonuçları Çizelge 2’de verilmiştir. Diğer bir denemede hız parametreleri düşürülerek çoklu çizgi halinde sinterleme işlemi yapılmıştır. Lazer gücünün 125W ve üzeri değerlerinde lazer arızası sebebiyle işlem yarıda kalmıştır. Bu deneyin sonuçları Çizelge 3’de verilmiştir.

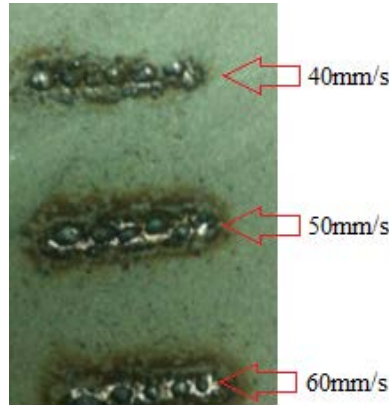
Çizelge 2. Çoklu çizgi halinde sinterleme

Watt mm/s	50W	75W	100W	125W	150W	175W
50						
100						
200						
300						
400						
500						
600						
700						
800						
900						
1000						

Çizelge 3. Düşük hızlarda çoklu çizgi halinde sinterleme

Watt mm/s	50W	75W	100W	125W	150W	175W
5						
10						
20						
30						
40						
50						
60						
70						
80						
90						
100						

Düşük tarama hızlarında düzensiz ve kalın bir tarama çizgisi görülmektedir. Tarama hızı yükseldikçe tarama çizgileri incelmekte ve daha düzenli/seçilebilir toplama oluşmaktadır (Şekil 10).



Şekil 10. Düşük tarama hızlarında toplama meydana gelmesi (lazer gücü 100w, tarama hızı 40-50-60 mm/s)

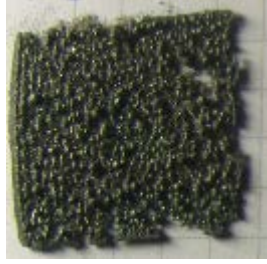

Çizelge 2 ve Çizelge 3' e göre, düşük tarama hızlarında daha büyük çaplı toplama ve yayılma (tarama çizgisinde kalınlaşma) meydana gelmiştir. Yüksek tarama hızlarında ise daha küçük çaplı toplama ve ince tarama çizgisi oluşmuştur.

3.3. Tek katman Sinterleme

Bu deneyde, tek katman toz serilerek 25x25mm ebatlarında kare biçiminde yapı oluşturmak için lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi (h_d), katman kalınlığı gibi parametreler belli değerler ile yatay ve ızgara tarama yöntemi kullanılarak ergitme işlemi yapılmıştır. Farklı parametrelere göre elde edilen sonuçlar Çizelge 4'de sunulmuştur.

Çizelge 4. Tek katman sinterleme işlemi sonuçları







Katman Kalınlığı: 500 μ m			
Lazer Gücü	50W	50W	75W
Tarama Mes.	50 μ m	50 μ m	50 μ m
Tarama Hızı	5(mm/s)	100(mm/s)	100(mm/s)
Azot Püskürt.	Evet	Hayır	Evet
Katman Kalınlığı: 500 μ m			
Lazer Gücü	50W	50W	75W






Tarama Mes.	50 μ m	50 μ m	50 μ m
Tarama Hızı	250(mm/s)	400(mm/s)	400(mm/s)
Azot Püskürt.	Hayır	Hayır	Hayır
Katman Kalınlığı: 500μm			
Lazer Gücü	100W	100W	
Tarama Mes.	50 μ m	25 μ m	
Tarama Hızı	400(mm/s)	400(mm/s)	
Azot Püskürt.	Evet	Evet	

Gerçekleştirilen denemeler sonucunda (Çizelge 4) düşük lazer gücü ve tarama hızlarında birleşme olmamış, aşırı derecede toplama meydana gelmiş ve ergitme alanının dışına toplaşmalar sıçramıştır. Lazer gücü ve tarama hızının artması ile kısmen birleşmeler sağlanmış, çok düzgün bir katmanın oluşmadığı görülmüştür. Tarama mesafesinin 50 μ m'den 25 μ m'ye düşürülmesi ile kısmen düzgün bir katman parça elde edilmiş fakat çizgileri arasında boşluklar meydana gelmiş, tarama çizgilerinin düzgün olarak birleştiği ve tam yoğun bir katman oluşmamıştır.

Literatürde atmosferik ortamın sızdırmaz bir kabinde Nitrojen, Argon ve Azot gibi gazların ortama bırakılmasıyla sağlandığı belirtilmektedir (Li vd., 2012). Ayrıca, ticari olarak üretimi yapılan Lazer Sinterleme ve Ergitme tezgâhlarında da atmosferik ortam mutlaka sağlanmıştır (SLM Solutions, 2011; 3ddt, 2012). Bu durum göz önünde bulundurularak kabin kısmi olarak sızdırmaz hale getirilmiş, kabin içerisine koruyucu gaz olarak azot gazı püskürtülmüş ve tekrar denemeler yapılmıştır. Yapılan deneylerin sonuçları çizelge olarak aşağıda verilmiştir (Çizelge 5).

Çizelge 5. Kısmi izolasyon ile tek katman sinterleme sonuçları

Katman Kalınlığı: 100μm			
Lazer Gücü	50W	50W	50W
Tarama Mes.	80 μ m	80 μ m	80 μ m
Tarama Hızı	50(mm/s)	100(mm/s)	250(mm/s)
Azot Püskürt.	Evet	Evet	Evet
Katman Kalınlığı: 100μm			
Lazer Gücü	50W	50W	10W
Tarama Mes.	80 μ m	80 μ m	80 μ m

Tarama Hızı	500(mm/s)	700(mm/s)	250(mm/s)
Azot Püskürt.	Evet	Evet	Evet
Katman Kalınlığı: 100µm			
Lazer Gücü	50W	50W	50W
Tarama Mes.	50µm	50µm	50µm
Tarama Hızı	800(mm/s)	400(mm/s)	20(mm/s)
Tarama deseni	Izgara	Izgara	Izgara
Azot Püskürt.	Evet	Evet	Evet
Katman Kalınlığı: 100µm			
Lazer Gücü	90W	50W	
Tarama Mes.	80µm	50µm	
Tarama Hızı	250(mm/s) iş yarıda kaldı	700(mm/s)	
Azot Püskürt.	Evet	Evet	

Izgara tarama yönteminde hemen hemen aynı parametre değerlerinde, yatay taramaya göre daha düzgün parçalar elde edilmiş fakat parçada çatlaklar ve çarpılmalar meydana gelmiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Tek katmanda oluşan çatlaklar ve çarpılmalar

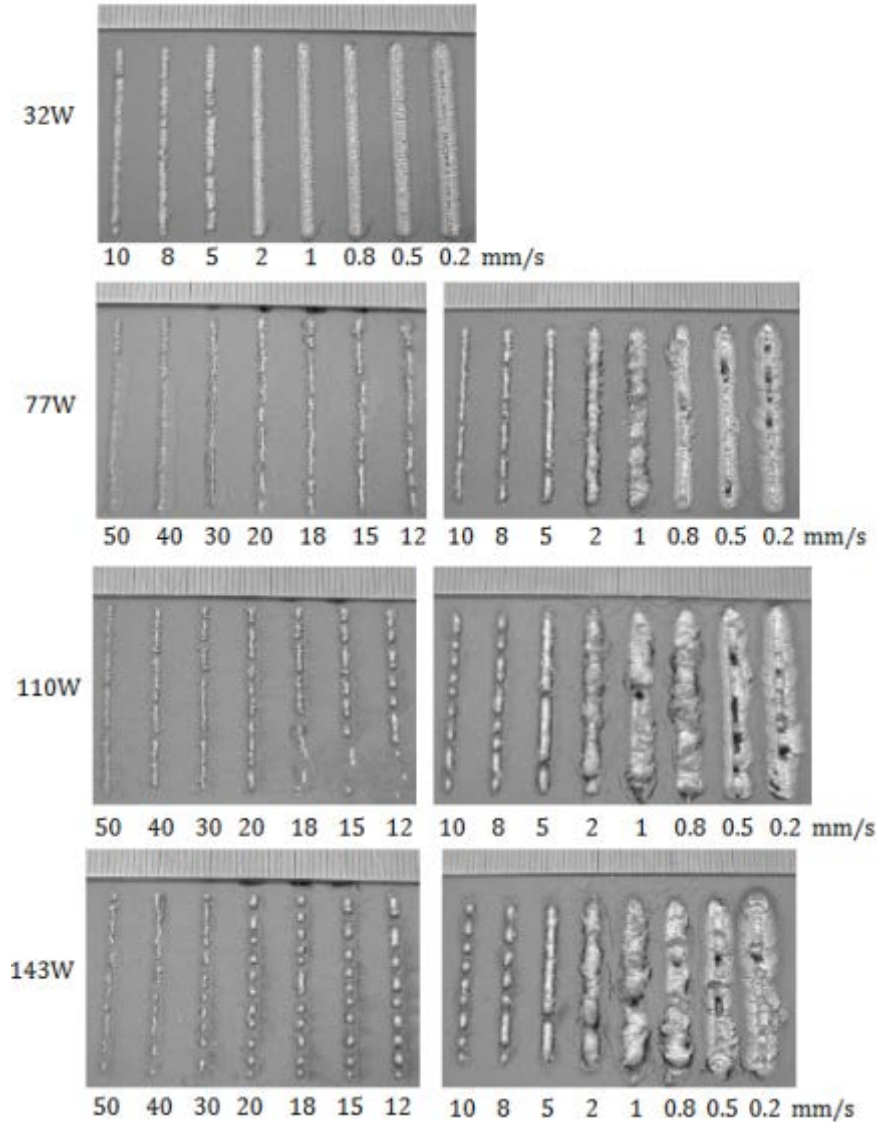
4. Tartışma ve Sonuç

SLS/E işleminde çok iyi bir katman oluşumu (ip benzeri düzgün lazer sinterleme çizgilerinin birbirleri ile kaynaşması) için lazer işlem parametrelerinin en uygununun seçilmesi ve atmosferik ortamın sağlanması gerekliliği önceki çalışmalarca da belirtilmektedir. İşlem parametrelerinin en uygununun seçilememesi ve işlem ortamının sağlanmaması sebebi ile toplama ve düzgün olmayan lazer sinterleme izleri oluşmakta, sonuçta iyi bir katman oluşumu meydana gelmemektedir.

İmalat kabindeki oksijen içeriği toplama başlangıcında önemli bir rol oynamaktadır. Atmosferin oksijen içeriğinin %0.1'e düşürülmesi ile toplama önemli ölçüde azaltılabileceği

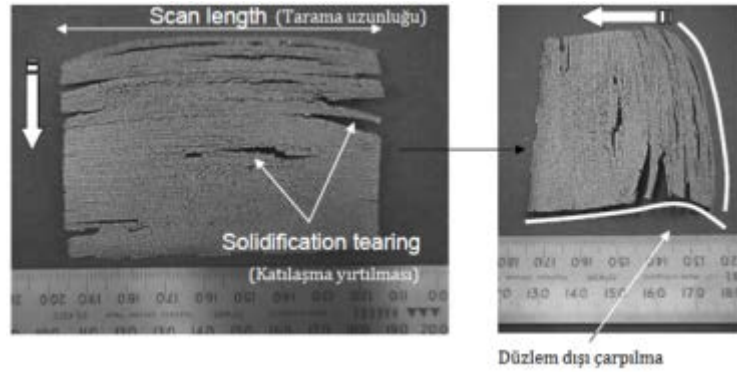
belirtilmektedir (Li vd., 2012]. Oksijensiz atmosferik ortam da Azot, Argon ve Helyum gibi gazlar kullanarak sağlanmaktadır (Wang vd., 2014).

Toplaşmanın oluşumundaki başka bir önemli neden ise işlem parametreleridir. Uygun işlem parametrelerinin kullanılmaması bu oluşumu ortaya çıkarmaktadır. Yadroitsev vd. (2012), metal tozu (904L paslanmaz çelik) ile yapmış oldukları çalışmalarında tekli izlerin davranışlarının ve geometrilerinin lazer gücü, tarama hızı, katman kalınlığı gibi işlem parametrelerine ve toz karakteristiğine bağlı olduğunu bildirmişlerdir. Hauser (2003), tez çalışmasında argon ve hava atmosferinde tekli çizgi, tek katman ve çok katman ergitme işlemleri farklı parametrelerle gerçekleştirilmiştir. Hauser (2003) çalışmasında tekli çizgi halinde ergitme işlemini argon atmosferinde değişik lazer gücü ve tarama hızı değerleri ile yaparak ergime davranışlarını incelemiştir. Sınırlı lazer gücü ve tarama hızı değerlerinde düzgün bir birleşme ile tekli çizgi elde edilmiş (32W, 0.8-2mm/s) çoğu değerde toplama ve düzgün olmayan çizgiler görülmüştür (Şekil 12). Çalışmada 314s HC tipi paslanmaz çelik tozu kullanılmıştır.



Şekil 12. Argon atmosferinde farklı tarama koşullarında ergitilmiş izler (Hauser, 2003)

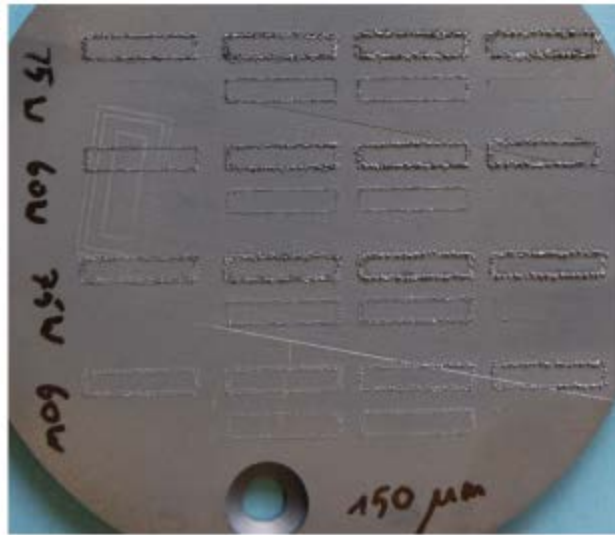
Aynı çalışmada, tek katman ergitme işlemi önden toz yüzeyi boyunca yapılmış ve bozulmalar meydana gelmiştir (Şekil 13). Bozulma, tabakaların eğilmesi ve komşu çizgiler arasındaki katılma yırtılmasının oluşumu, tarama uzunluğunun artması ile arttığı bildirilmiştir.



Şekil 13. Tarama uzunluğu 80mm olan bir katmandaki katman bozulması ve katılma yırtılması (Hauser, 2003)

Elsen (2007), tarafından yapılan benzer bir tez çalışmasında, farklı çizgi tarama testleri gerçekleştirilmiştir. Ergime havuzunun kaotik davranışı ve parazit faktörlerin olması sebebiyle, davranış sadece açıklanmış fakat kanıtlanmamıştır. Değişik lazer gücü (P_L), tarama hızı (V) ve lazer ışın çapı (d_x) ile 150 mikron katman kalınlığında testler yapılmıştır (Şekil 14). Tarama hızının artması ile toplama kaybolmuş ve tekrar görünmüştür. "Toplama yüksek tarama hızlarında oluşur" gibi basit bir açıklamanın yapılmasının doğru olmadığı bildirilmiştir.

d_x [μm]	P_L [W]	V [mm/s]			
200	75	25	10	5	2
		500	100	50	200
	60	25	10	5	2
		500	100	50	200
> 200	75	25	10	5	2
		500	100	50	200
	60	25	10	5	2
		500	100	50	200



Şekil 14. İş tablası üzerinde tarama çizgileri (Elsen, 2007)

Çalışmada tekli lazer tarama çizgilerinde, yüksek hız (100mm/s) ve düşük güç (50W) değerlerinde toplama etkisi görülmekte ergiyen tozlar iş tablasına yapışmamakta ve aralarında kaynaşma meydana gelmemektedir. Ters şekilde, düşük hız (25 mm/s) ve yüksek güç (175W) değerlerinde de eriyekteki buharlaşma tepkimesi sebebiyle toplama oluşmaktadır. Lazer gücünün 100-175W değerlerinde ve tarama hızınının 85,100mm/s değerlerinde daha düzgün bir birleşme ile tekli çizgi elde edilmiştir.

Çoklu lazer tarama çizgilerinde lazer gücünün 50-100W değerinde, tarama hızının 10-100mm/s değerlerinde daha büyük çaplı topaşmalar ve yayılma (tarama çizgisinde kalınlaşma) meydana gelmiştir. Yüksek tarama hızlarında (200-1000mm/s) ise daha küçük çaplı topaşmalar ve ince tarama çizgisi oluşmuştur. Lazer gücünün 100W, 125W değerleri ile tarama hızının 100,200mm/s değerlerinde kaynaşma görülmüştür.

Tek katman sinterleme işleminde lazer gücünün 50W ve tarama hızının 5-100mm/s değerlerinde birleşme oluşmamıştır. Izgara tarama yönteminde hemen hemen aynı parametre değerlerinde, yatay taramaya göre daha düzgün katman elde edilmiş fakat katmanda çatlaklar ve çarpılmalar meydana gelmiştir. Lazer gücü 100W, tarama hızı 400mm/s ve tarama mesafesi 25µm değerlerinde iken daha başarılı katman oluşumu gözlemlenmiştir.

Sızdırmazlığın ve atmosferik ortamın daha iyi sağlanması oksidasyon oluşumunu ve sinterleme izlerindeki topaşmaları giderecektir. Mekanik sistemin daha hassas olması durumunda istenilen katman kalınlığında toz serilebilecek ve çok düzgün bir katman birleşmesi oluşacaktır.

5. Teşekkür

Yazarlar, çalışmayı 2668-D-11 nolu Proje ile maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür eder.

Kaynaklar

Baydar, M.L., Kayacan, M.C., Yorgancıgil, H., Varol R., Eroğlu, E., Kayacan, R., Bekçi, U., Çolak, O., Taylan, F., İlkaz, S., Sofu, M.M., Hamamcı, E., Salman, Ö., (2005). Lazer Sinterleme Yöntemiyle Metal Tozundan Hızlı Prototipleme Yapan Cihaz Tasarımı Ve İmalatı. Proje No: 2003K121020/11, 180s.

Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E.P., Iuliano, L., Fino, P., (2013). Influence Of Process Parameters On Surface Roughness of Aluminum Parts Produced by DMLS. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 67, 42743-2751.

Casalino, G., Campanelli, L., Contuzzi, N., Ludovico, A.D., (2015). Experimental Investigation And Statistical Optimisation Of The Selective Laser Melting Process Of A Maraging Steel. Optics&Laser Technology, 65, 151-158.

Catholic University of Leuven (CUL), <http://www.mech.kuleuven.be/pp/facilities/sms2>, 1425. (2014.12.18).

Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C., Duysak, A. (2013). Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 31, 53-69.

Chatterjee, N., Kumar, S., Saha, P., Mishra, P.K., Choudhury, A.R., (2003). An Experimental Design Approach To Selective Laser Sintering Of Low Carbon Steel. Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology, India.

- CustomPartNet, Inc., <http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication> (2014.03.20)
- Das, S., (2003). Physical Aspects of Process Control in Selective Laser Sintering of Metals. *Advanced Engineering Materials*, 5,10, 701-711.
- Deckard, C., (1989). Method And Apparatus For Producing Parts By Selective Sintering. US Patent 4,863,538.
- Delgado, J., Ciurana, J., Rodríguez, C.A., (2012). Influence Of Process Parameters On Part Quality And Mechanical Properties For DMLS And SLM With Iron-Based Materials. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 60, 601-610.
- Elsen, M.V., (2007). Complexity of Selective Laser Melting: A New Optimization Approach. Catholic University Leuven, Faculty Of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Ph.D. Thesis, 185p, Belgium.
- Giannatsis, J., Dedoussis, V. (2009). Additive Fabrication Technologies Applied To Medicine And Health Care: A Review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 40, 116-127.
- Gusarov, A.V., Yadroitsev, I., Bertrand, Ph., Smurov, I. I., (2007). Heat Transfer Modelling and Stability Analysis of Selective Laser Melting. *ELSEVIER, Applied Surface Science*, 254, 975-979.
- Hauser, C., (2003). Selective Laser Sintering Of A Stainless Steel Powder. University Of Leeds, School of Mechanical Engineering, Ph.D. Thesis, 279p, UK.
- Jia, Q., Gu, D., (2014). Selective Laser Melting Additive Manufacturing Of Inconel 718 Superalloy Parts: Densification, Microstructure and Properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 585, 713-721.
- Joo, B.D., Jang, J.H., Lee, J.H., Son, Y.M., Moon, Y.H., (2010). Effect of Laser Parameters on Sintered Powder Morphology. *J. Mater. Sci. Technol.*, 26(4), 375-378.
- Kempen, K., Thijs, L., Yasa, E., Badrossamay, M., Verheecke, W., Kruth, J.-P., (2011). Process Optimization And Microstructural Analysis For Selective Laser Melting Of AlSi10Mg. Catholic University of Leuven, Departement of Mechanical Engineering, Belgium, 484-495.
- King, D., Tansey, T., (2002). Alternative materials for rapid tooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 121, 313-317.
- Klocke, F., Wagner, C., Ader, C., (2003). Development Of An Integrated Model For Selective Metal Laser Sintering. *Progress In Virtual Manufacturing Systems: Proceedings. 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Saarland University, 03-05 June 2003, Saarbrücken, Germany.*
- Kruth, J.-P., B. Vandenbroucke, B., Van Vaerenbergh, J., Naert, I., (2005). Rapid Manufacturing of Dental Prostheses by means of Selective Laser Sintering/Melting. *Proceedings of the AFPR*, 4.

- Laohaprapanon, A., Jeamwattachai, P., Wongcumchang, M., Chantarapanich, N., Chantawerod, S., Sitthiseripratip, K., Wisutmethangoon, S., (2011). Optimal Scanning Condition of Selective Laser Melting Processing with Stainless Steel 316L Powder. *Advanced Materials Research*, 341-342, 816-820.
- Li, R., Liu, J., Shi, Y., Wang, L., Jiang, W., (2012). Balling Behavior Of Stainless Steel And Nickel Powder During Selective Laser Melting Process. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 59, 1025-1035.
- Neğiş, E., (2014). <http://www.turkcadcam.net/rapor/autofab/> (2014.09.09).
- Partee, B., Hollister, S.J., Das, S., (2006). Selective Laser Sintering Process Optimization for Layered Manufacturing of CAPA® 6501 Polycaprolactone Bone Tissue Engineering Scaffolds. *Journal of Manufacturing Science and Engineering (ASME)*, 128, 531-540.
- Senthilkumaran, K., Pandey, P.M., Rao, P.V.M., (2009). Influence Of Building Strategies On The Accuracy Of Parts In Selective Laser Sintering. *Materials and Design*, 30, 2946-2954.
- Shellabear, M., Nyrhilä, O., (2004). DMLS – Development History and State of the Art. LANE 2004 conference, Sept., Erlangen, Germany, 21-24.
- SLM Solutions GmbH, (2011) <http://www.slm-solutions.com/en/products/slm-equipment/slm280-hl/>, (2012.12.06).
- Society of Manufacturing Engineers (SME), (1970). <http://www.sme.org/Tertiary.aspx?id=17485#sthash.gkpsIRmg.dpuf> (2014.03.20).
- Stanch Stainless Steel Co. Ltd., <http://www.stanch.com/stainless-steel-316L.htm>, (2014.05.12).
- Stratasys Ltd. (1989). <http://www.stratasys.com> (2014.10.19).
- Wang, X.J., Zhang, L.C., Fang, M.H., Sercombe, T.B., (2014). The Effect Of Atmosphere On The Structure And Properties Of A Selective Laser Melted Al–12Si Alloy. *Materials Science & Engineering A*, 597, 370-375.
- Wen, S.F., Yan, C.Z., Wei, Q.S., Zhang, L.C., Zhao, X., Zhu, W., Shi, Y.S., (2014). Investigation And Development Of Large-Scale Equipment And High Performance Materials For Powder Bed Laser Fusion Additive Manufacturing, Virtual and Physical Prototyping, 9,4, 213-223.
- Yadroitsev, I., Bertrand, P., Smurov, I., (2007). Parametric Analysis Of The Selective Laser Melting Process. *Applied Surface Science*, 253, 8064-8069.
- Yadroitsev, I., Gusarov, A., Yadroitsava, I., Smurov, I., (2010). Single Track Formation in Selective Laser Melting of Metal Powders. *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 12, 1624-1631.

Yadroitsev, I., Yadroitsava, I., Bertrand, P., Smurov, I., (2012). Factor Analysis Of Selective Laser Melting Process Parameters And Geometrical Characteristics Of Synthesized Single Tracks. Rapid Prototyping Journal, 18, 3, 201-208.29.

3ddt, (2011).

<http://www.3ddt.com.tr/en/content.php?sec=1&cat=1&scat=1&getDetail=57>, (2012.12.06).