

## DMLS YÖNTEMİYLE İMAL EDİLEN Ti6Al4V ALAŞIM ÖZELLİKLERİNE İŞLEM PARAMETRELERİNİN ETKİSİ

Sevil TURHAN\*, Abdullah ÖZSOY

Geliş Tarihi/ Received: 05.01.2016, Kabul tarihi/Accepted: 24.06.2016

### Özet

Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan DMLS (doğrudan lazer metal lazer sinterleme) cihazı ile Ti6Al4V toz malzemesi kullanılarak deney numuneleri üretilmiştir. DMLS imalat yöntemi ile lazer gücü, lazer tarama hızı, tarama mesafesi gibi farklı imalat işlem parametreleri ve bu parametrelere bağlı farklı enerji yoğunluğu değerlerinde ve X tarama stratejisini Ti6Al4V toz malzemesine uygulayarak deney numunelerinin imalatı yapılmıştır. Farklı lazer enerji yoğunluğu değerleri uygulayarak numunelerin, mikrosertlik, imalat yoğunluğu ve mikroyapısı araştırılmıştır. Numuneye Standart imalat işlem parametreleri 1,36 J/mm<sup>2</sup> enerji yoğunluğu ve x-tarama stratejisi uygulayarak 345 HV mikrosertlik değeri elde edilirken, 3 J/mm<sup>2</sup> enerji yoğunluğu değerinde 414 HV mikrosertlik değerine ulaşılmıştır. Standart imalat işlem parametreleriyle imalat (sinterleme) yoğunluğu 4.40 g/cm<sup>3</sup> iken, 3 J/mm<sup>2</sup> enerji yoğunluğu değerinde 4.44 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk elde edilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde numunenin enine kesitinde eş eksenli tanelerin oluştuğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Metal sinterleme, işlem parametreleri, mikroyapı, mikrosertlik, yoğunluk, Ti6Al4V

## EFFECT OF PROCESS PARAMETERS TO Ti6Al4V ALLOY PROPERTIES PRODUCED BY DMLS METHOD

### Abstract

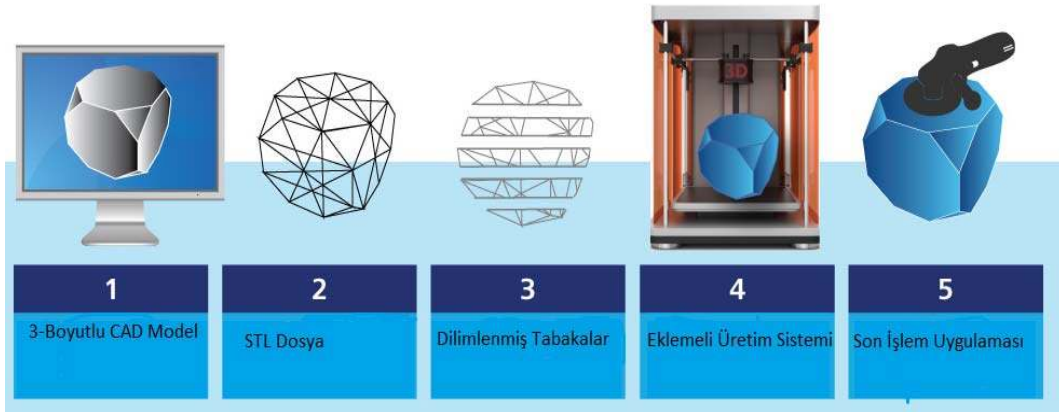
In this study, test specimens were produced by using DMLS device is one of the additive manufacturing methods. Test specimens were produced by using Ti6Al4V powders with some different process parameters such as laser power, laser velocity, hatch distance and these parameters related to energy density and applied to X hatching strategy. It was investigated that microhardness, manufacturing density and microstructure by applying to different laser energy density. While microhardness was 1.36 J/mm<sup>2</sup> energy 345 HV, microhardness was increased 414 HV applied to energy density 3 J/mm<sup>2</sup>. While production (sintering) density was 1.36 J/mm<sup>2</sup> energy 4.40 g/cm<sup>3</sup>, produced (sintering) was increased 4.44 g/cm<sup>3</sup> applied to energy density 3 J/mm<sup>2</sup>. It is observationed that microstructure was occurred equiaxed grains in the cross section of the sample.

**Key Words:** Metal sintering, process parameters, microstructure, microhardness, density,

\*Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Müh. Bölümü, Isparta, Türkiye  
E-posta: sevilurhan@sdu.edu.tr

## 1.Giriş

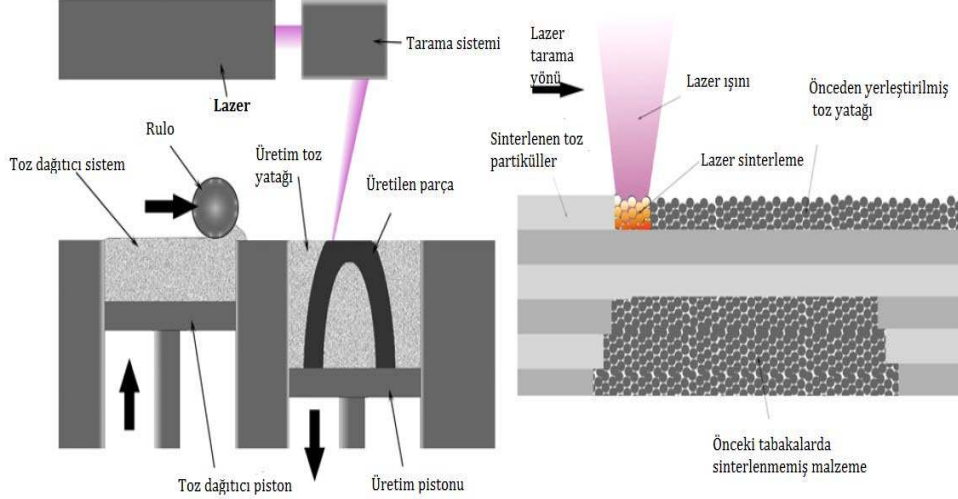
İmalat endüstrisi daima ürünün imalat fiyatını azaltırken ürünün kalitesini arttırmaya yönelik arayışlar içerisinde. Geleneksel imalat yöntemlerinden olan tornalama, frezeleme ve diş açma gibi imalat yöntemleriyle 3-boyutlu fiziksel modeli oluşturmak için kullanılan kesici takım parçadan malzemeyi kesip çıkartarak nihai ürüne ulaşmaktadır (Ning, 2005). Geleneksel imalat yöntemlerinde, küçük ve karmaşık yapıya sahip 3-boyutlu geometrik modelin oluşturulmasında küçük ayrıntıların istenilen geometrik boyutlarda imalatı zordur. Eİ (eklemeli imalat) sistemlerinde öncelikle imalatı istenen 3-boyutlu fiziksel modelin 3-boyutlu CAD (computer aid desing) modeli oluşturulmaktadır ve Eİ makineleri aracılığıyla bu CAD modeline göre parçalar imal edilmektedir. Burada 3-boyutlu fiziksel geometrik modelin başarılı bir şekilde imal edilebilmesi, CAD verisinin başarılı bir şekilde oluşturulabilmesine bağlıdır. Eİ sistemlerinde üretilecek parça CAD verisine uygun olarak doğrudan Eİ makinelerinden elde edilebilmesi ve ek bir işlem basamağı olmadığından dolayı imalattan zaman ve maliyet kazancı sağlanmaktadır. Eklemeli imalat makinelerinde polimerler, seramikler, metal ve alaşımları ve bu malzemelerin kombinasyonu ile oluşturulan kompozit malzemeler gibi geniş malzeme çeşitliliği kullanılabilir (Calignano vd., 2013).



**Şekil** Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı.. Eklemeli imalat sisteminde işlem akışı (Mark Cotteleer vd., 2014)

Eİ yöntemlerinin hemen hemen tümünde aynı imalat işlem basamakları uygulanmaktadır ve bu işlem basamaklarının işlemsıraşı şekil 1.'de gösterilmiştir. 1 Numarada Eİ yöntemi ile üretilecek olan ürünün 3-boyutlu CAD modeli oluşturulmuştur. 2 Numarada ise bu 3-boyutlu CAD modeli MAGİC gibi bir arayüz program aracılığıyla 3-boyutlu CAD modeli STL dosyasına dönüştürülür, STL dosyası 3-boyutlu fiziksel modelin yüzeyini üçgenlere bölerek fiziksel modelin daha basit gösterimini sağlar. Daha sonra bu STL dosyasını bir RAPİD PROTOTİP gibi programlar aracılığıyla 3 numarada gösterildiği gibi cihazın belirlediği imalat tabaka kalınlığına göre 3-boyutlu fiziksel modeli 2-boyutlu dilimlenmiş tabakalara ayırılır. İmalata hazır olan modelin verisi makineye gönderilir ve burada 3-boyutlu CAD modele göre imalat başlatılır. Eİ yöntemiyle imalatı tamamlanan parçalar imalat tablosu ile birlikte makineden çıkartılarak herhangi bir kesici ekipman ile imalat tablosundan ayrılırlar. 5 Numarada gösterilen son işlem uygulamasında ise parçanın kullanım amacına yönelik olarak

istenen mekanik, fiziksel ve yüzey özelliklerini elde etmek için çeşitli yüzey modifikasyonları ve/veya ısıl işlem uygulamaları yapılabilmektedir.



**Şekil 2.** SLS ekipmanları ve çalışma prensibi (Yan ve Yu, 2015)

Şekil 2’de imalat odasında toz malzemenin lazer enerjisi aracılığıyla sinterleme mekanizması gösterilmiştir. Toz yatağının üst kısmında imalat alanı olarak adlandırılır ve burada gerçek tabakalar imal edilir. İmalat odası lazer gücünü minimize etmek için ön ısıtma ile ısıtılır ve malzemede oluşabilecek oksidasyonu engellemek için koruyucu gaz kullanılır (Yu, 2005). Burada dilimlenmiş katman kalınlığına göre toz malzeme imalat platformu üzerine serilerek lazer veya elektron ışını gibi enerji kaynakları kullanılarak toz malzeme ergitilir/sinterlenir. Her bir katmanın sinterleme işlemi tamamlandıktan sonra imalat platformu her bir katman kalınlığı kadar aşağıya indirilerek bir sonraki katmanı oluşturmak için toz serilir ve tekrar sinterleme işlemi uygulayarak nihai üretilene ulaşana kadar bu işlemler tekrar etmektedir.

Milan vd. (2006) yılında, titanyum malzemesinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinden yüksek erime noktası, yüksek ağırlık oranı, korozif ortamda inert olması ve iyi aşınma direncine sahip olduğu belirtilmiştir. Bu özelliklerinden dolayı da tıp, denizcilik, nükleer, hava ve uzay teknolojilerinde yaygın olarak kullanılmakta olduğunu söylemişlerdir.

Casalino vd. (2015), eklemeli imalat yöntemlerinden olan SLM imalat parametrelerinin kontrolü ile lazer enerji yoğunluğunu değiştirerek çelik malzemesinden imal edilen parçaların mikroyapısı, mekanik ve yüzey özelliklerini incelemişler. SLM parametrelerinin kontrolü ile parçanın yoğunluğu, mukavemeti, sertliği ve yüzey pürüzlülüğü doğrudan ilgili olduğunu göstermişlerdir. Burada optimum işlem parametreleri oluşturularak imal ettikleri parçalarda yaklaşık olarak tam yoğunluğa ulaşabilmişlerdir.

Khaing vd. (2001), EOS DMLS imalat yöntemi ile 3-boyutlu CAD metal parçalarını detaylarıyla imal edilebilmektedir. Ancak üretilen parçaların sınırlı mukavemeti ve boyutsal doğruluğu ve kötü yüzey özellikleri hızlı prototip imalat yöntemlerinin dezavantajlarından (Pulak M. Pandey). Çalışmalarında optimum işlem parametreleri oluşturarak parçanın boyutsal doğruluğunu ve sinterleme kalitesi iyileştirebilmişlerdir.

Simichi vd. (2003), DMLS imalat yönteminde lazer tarama mesafesi ve tarama deseni gibi işlem parametrelerinin optimizasyonu ile yüksek yoğunlukta (%95 teorik yoğunluk) parçalar imal edilebilmişlerdir.

Razvan vd. (2011), SLM işleminde birçok giriş parametresi vardır ve bu parametreler SLM ile imal edilen parçaların farklı mekanik özelliklerini elde etmek için kontrol edilebilir. Lazer parametreleri (lazer gücü, lazer tarama aralığı), Yasa vd. (2010), farklı metal toz özellikleri (toz boyutu, malzemenin alaşım yüzdesi) ve farklı tozu ergitme lazer parametreleri (tabaka kalınlığı, tarama hızı) vardır. Bu giriş parametrelerine bağlı olarak parçaların farklı mekanik özellikleri; sertlik, yoğunluk, mukavemet, gözeneklilik oranı gibi çıkış parametreleri elde edilebilir.

Eklemeli imalat teknolojilerinde imalat hızı, parça kalitesi, parçanın boyutsal doğruluğu ve malzeme özellikleri önem kazanmaktadır ve bu özellikleri geliştirmek çalışmalar devam etmektedir. Özellikle bu teknolojiler ile imal edilen parçalara herhangi ek bir işlem uygulamaksızın son kullanım için uygun hale getirilebilmeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada, DMLS imalat yöntemiyle ve imalat işlem parametrelerinden farklı lazer gücü, lazer hızı ve tarama mesafesi kullanılmıştır. Bu işlem parametrelerine bağlı olan farklı enerji yoğunluğu değerleri elde edilerek Ti6Al4V tozlarından numune imalatı yapılarak, işlem parametrelerinin mikrosertlik ve yoğunluğa etkileri incelenmiştir. Ayrıca sinterleme yöntemiyle imal edilen Ti6Al4V alaşımın mikroyapısı incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Deney Numune Malzemesi

Bu çalışmada kullanılan Ti6Al4V toz malzemesinin kimyasal bileşimi, yoğunluğu ve maksimum 50 µm olan toz tanecik boyutu değerleri tablo 1'de verilmektedir. EOS 280 DMLS cihazında sinterlenecek olan Ti6Al4V toz malzemesi EOS firması tarafından tedarik edilmiştir.

**Tablo 1.** Ti6Al4V tozunun kimyasal ve fiziksel özellikleri

| Kimyasal kompozisyon          | Ti | Al(%)    | V(%)    | O         | N        | C        | H        | Fe        |
|-------------------------------|----|----------|---------|-----------|----------|----------|----------|-----------|
| Main element                  |    | 5.5-6.75 | 3.5-4.5 | <2000 ppm | <500 ppm | <800 ppm | <150 ppm | <3000 ppm |
| Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) |    |          |         |           |          |          |          | 4.42      |
| Toz tanecik boyutu (µm)       |    |          |         |           |          |          |          | 20-50     |

## 2.2. Metot

Bu çalışmada, deney numuneleri EOS M280 DMLS (doğrudan metal lazer sinterleme) cihazı ile imal edilmiştir. Bu cihaz ile Ti6Al4V tozu lazer enerjisi ile sinterlenmiştir. Ti6Al4V malzemesinin oksijene karşı yüksek reaktifliğinden dolayı, sinterleme esnasında imalat odasının oksijen seviyesi koruyucu gaz olarak Argon gazı ile kontrol edilmiştir. İmalat esnasında, Ti6Al4V tozu katman kalınlığına göre serildiver her bir katmanın lazer enerjisi ile sinterlenmiştir. Sinterlenen katman üzerine yeniden toz malzeme serilmekte ve önceki tabakanın üzerine yeni katman sinterlenerek eklenmektedir. Bu işlem katman katman nihai ürüne ulaşana kadar devam etmektedir.

**Tablo 2.** DMLS M280 cihazı için imalatta kullanılan parametreler

| Parametre        | Değer                  |
|------------------|------------------------|
| Lazer ışın çapı  | 100-500 µm             |
| Tabaka kalınlığı | 30 µm (constant)       |
| Lazer hızı       | 1250 mm/s              |
| Lazer gücü       | 170 W                  |
| Tarama mesafesi  | 0.1 mm                 |
| Enerji yoğunluğu | 1.36 J/mm <sup>2</sup> |

Tablo 2’de DMLS M280 cihazı için lazer çapı 100 – 500 µm arasında, toz tabaka kalınlığı 30 µm sabittir. Ti6Al4V tozunu DMLS M280 cihazı ile sinterlenmesi için EOS firması bazı işlem parametrelerini tavsiye etmektedir. Bu imalat işlem parametrelerinden, lazer gücü 170 W, lazer hızı 1250 mm/s ve tarama mesafesi 0.1mm olarak verilmiş ve bu üç parametreye bağlı olarak elde edilen lazer enerji yoğunluğu 1.36 J/mm<sup>2</sup> olarak 1 eşitliğine göre hesaplanmıştır (Yu, 2005).

$$\text{Enerji yoğunluğu (Joule /mm}^2\text{)} = \frac{P \text{ (W)}}{v \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right) \cdot h \text{ (mm)}} \quad (1)$$

Burada P (W): lazer gücü

V(mm/s): Lazer tarama hızı

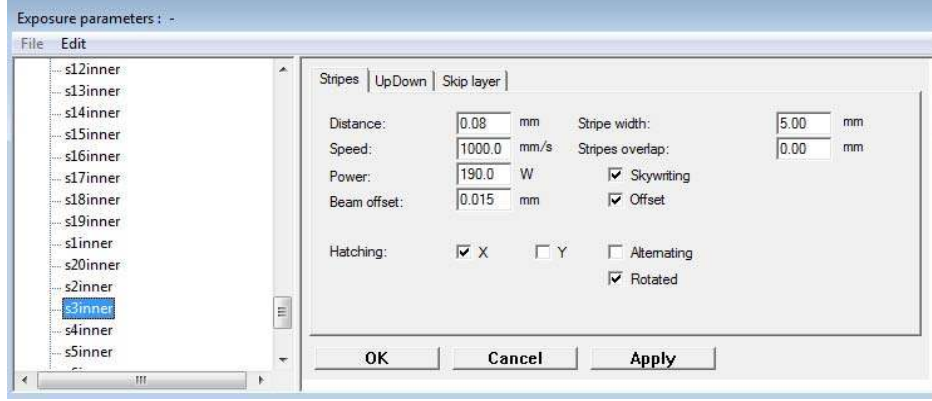
H(mm): Tarama mesafesi

**Tablo 3.** DMLS ile üretilecek numunelerin imalat işlem parametreleri

| Numune sıra no | Enerji Yoğunluğu (W/mm <sup>2</sup> ) | Lazer Gücü (W) | Tarama Hızı (mm/s) | Tarama Mesafesi (mm) |
|----------------|---------------------------------------|----------------|--------------------|----------------------|
| 1              | 1.36                                  | 170            | 1250               | 0.1                  |
| 2              | 2.50                                  | 180            | 900                | 0.08                 |
| 3              | 2.96                                  | 160            | 900                | 0.06                 |
| 4              | 3.00                                  | 180            | 1000               | 0.06                 |

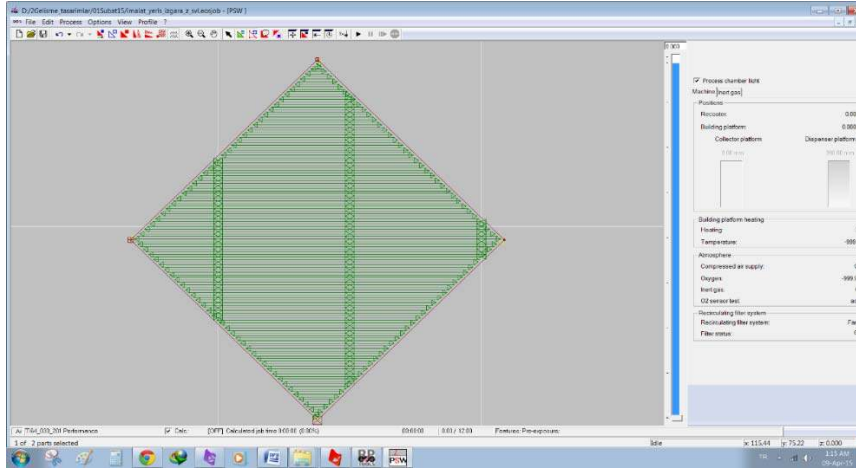
|   |      |     |     |      |
|---|------|-----|-----|------|
| 5 | 3.51 | 190 | 900 | 0.06 |
|---|------|-----|-----|------|

Tablo 3’de belirlenen imalat işlem parametrelerine göre numuneler imal edildi. Lazer sinterleme yönteminde toz malzeme katman katman lazer enerji yoğunluğu aracılığıyla sinterlenmektedir. Toz malzemeyi birleştirmede kullanılan lazer enerji yoğunluğu ve bunu etkileyen parametreler tozun sinterleme kalitesini etkilemektedir, bu da parçanın mikrosertlik gibi sonuçları mekanik özelliklerini etkilemektedir.



Şekil 3. İmalat parametrelerinin ve X tarama tipinin seçimi

Şekil 3’de DMLS cihazı ile Ti6Al4V tozunu sinterlemek için imalat işlem parametrelerinin seçim alanı gösterilmiştir. Burada lazer gücü (power), lazer hızı (speed), tarama mesafesi (distance) ve tarama stratejisi (X-rotated) seçiminin yapıldığı görülmektedir.



Şekil 4. X tarama tipinin birinci katman görüntüsü

Şekil 4’de 30 mikron tabaka kalınlığında X rotated tarama tipinin birinci katman tarama vektörlerinin yönü ve tarama mesafesi görülmektedir. Burada her bir katmanın tarama desenine göre taraması tamamlanıp bir diğer katmana geçildiğinde  $67^{\circ}$  açı ile saat yönünün tersi yönünde dönerek tarama deseni oluşmakta ve lazer ışını bu tarama çizgi desenlerine göre Ti6Al4V tozunu sinterlemektedir.

### 2.3. DMLS ile İmalat



Şekil 5. DMLS cihazında ilk katman toz malzeminin serilmesi



Şekil 6. DMLS cihazında ilk toz katman tabakasının lazer enerjisi ile yakılması

Şekil 4’de imalat için hazırlanan makine içerisinde imalat odasında ilk katman (30 $\mu$ m) Ti6Al4V toz malzemesinin gösterilmektedir. Şekil 5’de Serilen toz malzemenin 3D CAD datasına göre lazer enerjisi ile sinterlenmesi gösterilmektedir. Şekil 6’de DMLS imalat yöntemi ile imal edilen deney numunelerinin imalatı bittikten sonra makineden çıkartılmış ve imalt tablosundan kesilmeden önceki görüntüsü verilmektedir.

### 2.4. Gerilim Giderme Tavlaması

Eklemeli imalat makinesinde imalat esnasında imal edilen parçalara lazerin yüksek enerji yoğunluğuna ve kısa sürede soğumalarından dolayı iç gerilmeler oluşmaktadır. Her bir katmanın imalatında meydana gelen bu olay parça içerisinde artık gerilmeler oluşturmaktadır. İmalat yönteminden dolayı meydana gelen bu iç gerilemeler parçada yüklemeler altında deformasyona neden olabilir. Bundan dolayı sıcaklık ve süre kontrollü gerilim giderme tavlaması yapılmaktadır. Gerilim giderme tavlama sırasında parçalar Ti6Al4V malzemesinin reaktifliğinden ortamdaki oksijen gazıyla reaksiyona girmesini engellemek amacıyla argon

gazı atmosferi altında yapıldı. Fırında içerisine yerleştirilen parçalar 650 °C 'ye 1 saatte ısıtılmış ve 650 °C sabit sıcaklıkta 3 saat bekletildi ve sıcaklık oda sıcaklığına düşene kadar fırın içerisinde doğal soğutulmaya tabi tutulmuştur.

## 2.5. Metalografik Numune Hazırlama

Metalografik incelemelerini yapmak için deney numune hazırlandı. Bu hazırlamada numunelerin alt kısmı 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200,1500 numaralı zımparalar ile sırasıyla zımparalandı ve daha sonra 1µm elmas pasta ile parlatıldı. Daha sonra Ti6Al4V malzemesi için tavsiye edilen %85 H<sub>2</sub>O, %10 HF ve %5 HNO<sub>3</sub> kimyasal bileşimleri ile dağlama çözeltisi hazırlandı. Dağlama işlemi yaklaşık olarak 5-6 dakika süre ile gerçekleştirildi. Nikon Eclipsen MA100 marka optik mikroskobu ile metalografik incelemeler gerçekleştirildi.

## 2.6. Mikrosertlik Ölçümü

Numunelerin Vickers mikrosertlik ölçümleri ve mikroyapı incelemeleri için metalografik numune hazırlaması yapıldı. Mikrosertlik ölçümü 300 gr yük 15 s uygulanarak Shimadzu marka cihaz ile yapılmıştır. Her bir numunenin üst bölgesinden beş ölçüm alınarak bu değerlerin ortalaması hesaplandı.

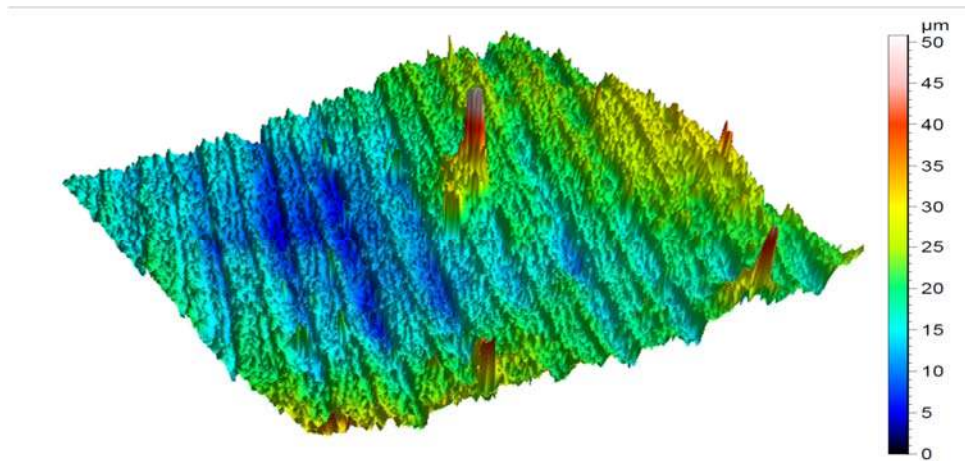
## 2.7. Arşimed Metoduna Göre Yoğunluk Hesaplama

Farklı imalat parametreleri kullanılarak elde edilen enerji yoğunluğu değerlerinde ve bu enerji yoğunluğuna bağlı olarak değişen yoğunluk değerleri Arşimed metoduna göre hesaplandı. Burada numunelerin havadaki ağırlığı hassas terazi ile tartıldı. Numunelerin hacmini hesaplamak için saf su içerisinde bırakılan numunenin taşan sıvı kütesinden numunenin hacmi hesaplandı. Parça yoğunluğu eşitlik 2'deki formüle göre hesaplandı.

$$d(\text{g/cm}^3)=m/V \quad (2)$$

## 3. Sonuçlar ve Tartışma

### 3.1. Yüzey Topografik İncelemesi





### Şekil 7. 3D Profilometre cihazı ile numunenin yüzey topografik görüntüsü

190 W lazer gücü, 900 mm/s lazer hızı, 0.06 mm tarama mesafesi ve 3.51 J/mm<sup>2</sup> enerji yoğunluğu işlem parametreleri olan deney numunesinin 3-boyutlu yüzey profilometre ile ölçülen üst yüzey topografik görüntüsü şekil 7’de verilmektedir. Bu yüzey topografik görüntüde lazer enerjisiyle Ti6Al4V tozunun sinterleme çizgileri mesafesi ve tarama yönü görülmektedir. Bu yüzey topografiğinde yüksek enerji yoğunluğundan dolayı toz malzemenin sinterlenme çizgileri birbirine iyi yapışmış ve ortalama yüzey kalitesi de oldukça pürüzsüzdür.

### 3.2. Yoğunluk İncelemesi

**Tablo 4.** Lazer parametrelerine göre yoğunluk sonuçları

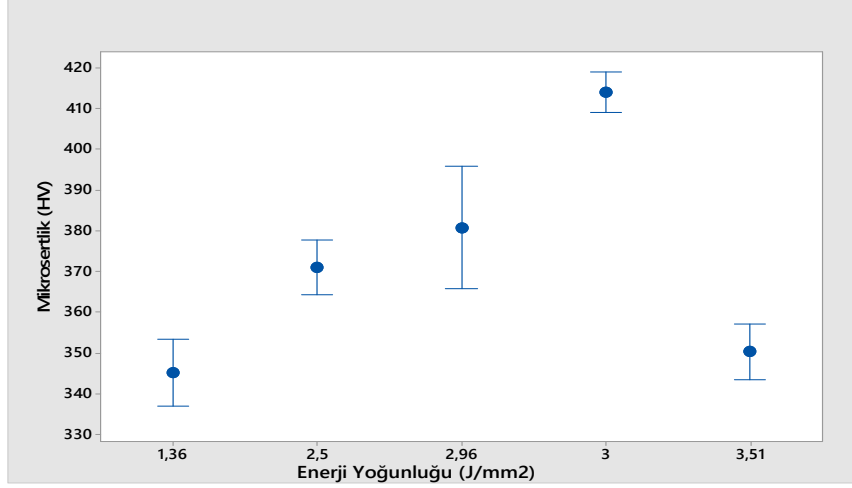
| Enerji Yoğunluk (J/mm <sup>2</sup> ) | Lazer Gücü (W) | Tarama Hızı (mm/s) | Tarama Mesafesi (mm) | Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> ) | Standart Sapma |
|--------------------------------------|----------------|--------------------|----------------------|-------------------------------|----------------|
| 1.36                                 | 170            | 1250               | 0.1                  | 4.40                          | 0.0009         |
| 2.96                                 | 160            | 900                | 0.06                 | 4.43                          | 0,0002         |
| 3                                    | 180            | 1000               | 0.06                 | 4.44                          | 0.0018         |
| 3.51                                 | 190            | 900                | 0.06                 | 4.41                          | 0.0009         |

DMLS imalat metodu ve farklı işlem parametreleri uygulayarak imal edilen deney numunelerinin yoğunluk ölçümü Arşimed metoduna göre yapılmıştır. Bu metoda göre elde edilen yoğunluk sonuçları ve standart sapma değerleri yukarıdaki tabloda gösterilmektedir.

İmalatın başlangıcında değiştirilebilen parametrelerden biri olan lazer gücü arttıkça, yoğunluk değeri de artmaktadır. Tarama hızı ve tarama mesafesi değeri arttırıldığında ise, parçanın yoğunluk değerinin azaldığı görülmektedir. Bu sonuçlar, bu üç parametrenin etkileşimiyle elde edilen enerji yoğunluğunu parçanın yoğunluğu arasındaki ilişkiyi desteklemektedir. İstatiksel analiz sonucunda yoğunluğa en fazla etkisi olan işlem parametresinin tarama mesafesi olduğu, bunu sırasıyla lazer gücü ve tarama hızı takip etmektedir (Turhan S., 2016).

Bu çalışmanın sonuçları Becker vd. 2015 yılında yaptıkları çalışma ile uyusmaktadır ve Becker vd. 2015 yılında yaptıkları çalışmada; Ti6Al4V tozunu DMLS imalat metodu ile sinterlenmesi sonucunda 4,42 (g/cm<sup>3</sup>) yoğunluğunda parça imal etmiştir (Becker vd. 2015).

### 3.3. Mikrosertlik İncelemesi

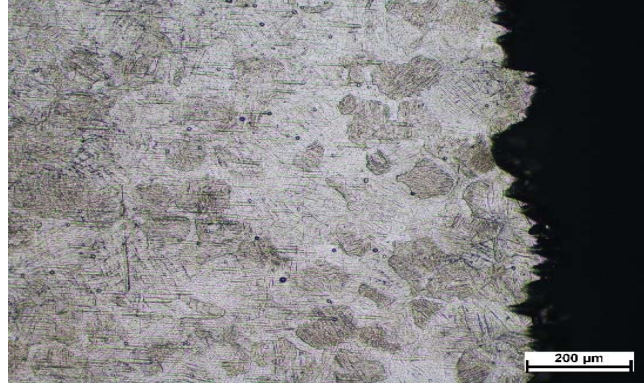


Şekil 8.1,36, 2,5, 2,96, 3 ve 3.51 J/mm<sup>2</sup> enerji yoğunluğu Vickers mikrosertlik sonuçları

Şekil 8’da 1.36, 2.5, 2,96, 3 ve 3.51 J/mm<sup>2</sup> enerji yoğunluğuna sahip deney numunlerinin Vickers mikrosertlik sonuçları gösterilmektedir ve sırasıyla aritmetik ortalamaları 345, 371, 380, 414 ve 350 HV’dir. Şekil 6’da gösterildiği gibi enerji yoğunluğu değeri arttıkça mikrosertlik de artmaktadır, ancak 3 J/mm<sup>2</sup> enerji yoğunluğu değerinden sonra mikrosertlik sonucunda bir azalma görülmektedir. Maksimum mikrosertlik 414 HV sonucu için optimum enerji yoğunluğu 3 J/mm<sup>2</sup> olduğu belirlenmiştir. 2012 yılında yapılan bu çalışmada DMLS cihazı ile Ti6Al4V malzemesi kullanılarak farklı enerji yoğunluğu değerlerine karşılık elde edilen mikrosertlik değerlerinde, enerji yoğunluğu 45 j/mm<sup>3</sup> olduğunda 317HV en yüksek mikrosertlik değerine ulaşmışlardır (Larosa v.d. 2012).

Şekil 8.’da enerji yoğunluğu 1.36’dan 3 J/mm<sup>2</sup> ‘ye kadar artmasıyla mikrosertlik değeri de artmaktadır, bu durum enerji yoğunluğu değeri arttıkça parça içerisinde gözenek yoğunluğunun azalmasıyla ilgilidir. Ancak, 3 J/mm<sup>2</sup> ‘den sonra enerji yoğunluğu arttıkça mikrosertlik değeri azalmaktadır. Bu durum faz yapısı ile ilgilidir, yüksek sinterleme sıcaklıklarında  $\alpha+\beta$  faz yapısından  $\beta$  faz yapısına geçiş olur. 3 J/mm<sup>2</sup> ‘den daha düşük enerji yoğunluklarında sinterleme sıcaklığı daha düşüktür. Titanyum  $\alpha$  fazından  $\beta$  fazına geçiş sıcaklığı 883 °C’dir. Yüksek sıcaklıklarda  $\alpha+\beta$  faz yapısından  $\beta$  faz yapısına geçiş olacaktır ve yapıda  $\alpha$  fazı azalacaktır,  $\alpha$  fazının mikrosertlik değeri  $\beta$  fazından daha yüksektir (Song vd. 2012).

### 3.4. Mikroyapı İncelemesi



**Şekil 9.** Enerji yoğunluğu  $1.36 \text{ J/mm}^2$  (x100)

Şekil 9’de numune enine kesitinin Optik mikroskobu ile 100 büyütmedeki mikroyapı görüntüsü verilmektedir. Enine kesit görüntüsü mikroyapıda eş eksenli taneler görülmekte ve imalat yönteminden kaynaklı gözenekler görülmektedir. Mikroyapı görüntüsünde beyaz  $\alpha$  fazını, siyahlar  $\beta$  fazını temsil etmektedir. DMLS imalat yönteminde sinterlemede hızlı soğumadan dolayı mikroyapıda martenzit yapı görülmektedir. Titanyum alaşımlarında hekzagonal  $\alpha$  fazı bcc  $\beta$  fazına dönüşümü ( $\beta$  dönüşüm sıcaklığı) soğuma oranına bağlı olarak martenzik olarak meydana gelebilir.  $\beta$  dönüşüm sıcaklığı hızlı soğumayla olursa,  $\beta$  fazı  $\alpha'$  ne martenzit olarak dönüşebilir. Daha yavaş soğumayla, Widmanstätten  $\alpha$  fazına dönüşebilir (Lütjri and Williams, 2007).

### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada imalat işlem parametrelerinden lazer gücü, lazer hızı ve tarama mesafesi parametreleri değiştirilerek farklı lazer enerji yoğunlukları ile Ti6Al4V tozu sinterlenmiştir. Yüksek enerji yoğunluğu değerlerinde imal edilen numunelerde yüksek yoğunluk ve mikrosertlik değerlerine ulaşılmıştır. Standart imalat işlem parametre ile  $1,36 \text{ J/mm}^2$  enerji yoğunluğunda parça yoğunluğu  $4,41 \text{ g/cm}^3$  iken,  $3 \text{ J/mm}^2$  enerji yoğunluğunda  $4,44 \text{ g/cm}^3$  yoğunluk değerine ulaşılmıştır. Standart imalat parametresi  $1,36 \text{ J/mm}^2$  enerji yoğunluğunda parçanın mikrosertliği 345 HV iken  $3 \text{ J/mm}^2$  enerji yoğunluğunda mikrosertliği 414 HV değerine ulaşılmıştır. Bu çalışmada yüksek imalat yoğunluğu ve mikrosertlik değerleri için optimum enerji yoğunluğunun  $3 \text{ J/mm}^2$  olduğu elde edilmiştir. DMLS ile üretilen Ti6Al4V parçalarının enine kesit mikroyapısında imalat yönteminden kaynaklı gözenekler ve eş eksenli taneler görülmüştür.

Bu çalışmada 4129-YL-114 No’lu Proje ile Yüksek Lisans tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı’na teşekkür ederiz.

## 5. Kaynaklar

- Becker, T.H., Beck, M., Scheffer, C., 2015. Microstructure And Mechanical Properties Of Direct Metal Laser Sintering Ti6Al4V. South African Journal Of Industrial Engineering. 26, 1-10.
- 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 Manufacturing Technoloji. 67, 2743-2751.
- Cotteleer, M., Holdowsky J., Mahto, M., 2014. The Basics of Additive manufacturing. The 3D Opportunity Primer, 6 March.
- Yan, M. Ve YU, M. 2015. An Overview Of Densification, Microstructure and Mechanical Property Of Additively Manufactured Ti6Al4V Comparison Among Selective Laser Melting, Electron Beam Melting, Laser Metal Deposition And Selective Laser Sintering And With Conventional Power Metallurgy. Chapter 5. Licensee In Tech. 83s.
- Casalino G., Campanelli S.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.
- Khaing, M.W., Fuh, J.Y.H., Lu, L. 2001. Direct metal laser sintering For Rapid Tooling: processing and characterisation of EOS parts. Journal of Materials Processing Technology, 113, 269-272
- Larosa, M.L., Jardini, A.L., Zavaglia, C.A.C., Kharmandayan, P., Calderoni, D., Filho, R.M., 2012. Influence Of Parameters Of Ti6Al4V Alloy In DMLS Process Used For Craniomaxillofacial Reconstruction. Congresso Latio Americano de Artificial Biomaterials.
- Lütjering, G., and Williams, J.C., 2007. Engineering Materials and Process. Titanium. Springer. Berlin Heidelberg New York. 16.
- Milan Trtica, Biljana Gakovic, Dimitri Batani, Tara Desai, Peter Panjan, Bojan Radak, 2006. Surface modifications of a titanium implant by a picosecond Nd:YAG laser operating at 1064 and 532nm. Applied Surface Science 253, 2551–2556.
- Ning, Y., 2005. Process Parameter Optimization for Direct Metal Laser Sintering (DMLS). National University of Singapore, Department of Mechanical Engineering, Doctor Thesis., 1, Singapur.
- Pulak M. Pandey, Rapid prototyping Technologies, Applications And Part Deposition Planning. Departmen Of Mechanical Engineering India Institute of Tecnology Delhi.

- Razvan, P., Petru, B., Mihai D., 2011. Research On How To Improve The Mechanical Properties Of The Metallic Parts Made By Selective Laser Melting (SLM), Technical University of Cluj-Napoca B- dul Munciino. 103-105, Cluj-Napoca Romania.
- Simichi, A., Petzoldt, F., Pohl, H. 2003. On The Development Of Direct Metal Laser Sintering For Rapid Tooling. Journal Of Materials Processing Technology. 141, 319-328.
- Song B., Dong S., Liao H., Coddet C., 2012. Process Parameters Selection for Selective Laser Melting of Ti6Al4V Based On Temperature Distribution Simulation and Experimental Sintering. Int J Manuf Technol. 61:967-974.
- Turhan, S., 2016. DMLS ile Üretilen Ti6Al4V Parçalarında Lazer Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Yasa, E., Kruth, J.P., 2010. Investigation Of Laser And Process Parameters For Selective Laser Erosion, Precision Engineering, 34, 101–112.