



OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETERS USING TAGUCHI METHOD IN PRODUCTION OF Ti6Al4V ALLOY BY SLM METHOD

Dilara Selma Aydın^{*1}, Arif Lütfi Özsoy¹, Çağrı Vakkas Yıldırım²

¹Erciyes University, Institute of Science and Technology, Kayseri, Turkey

²Erciyes University, Faculty of Aviation and Space Sciences, Kayseri, Turkey

Abstract

Original scientific paper

The additive manufacturing method offers significant improvements in the production of parts with complex geometries, which are difficult or impossible to produce with traditional manufacturing methods. However, the question of whether the output quality is at the desired level remains up-to-date. Therefore, obtaining the optimum production parameters is very important in order to increase the output quality. In this study, a series of experiments were carried out using different process parameters of Ti6Al4V alloy produced by Selective Laser Melting (SLM) method. Thus, it is aimed to examine the effect of four different parameters and their levels on the surface quality. During the analysis of the surface quality, the average surface roughness (Ra) was determined as the output parameter. Experimental design was carried out using the Taguchi L16 vertical array. ANOVA analysis was performed to show the effect of process parameters on the result. With the analysis of the test results, a surface roughness value of 7.773 μm was obtained by using the combination of 75 μm laser focal diameter, 60 μm scanning distance, 150 mm/s scanning speed and 250 W laser power for the best surface roughness value.

Keywords: Additive manufacturing, selective laser melting, surface quality, Ti6Al4V, Taguchi method.

Ti6Al4V ALAŞIMININ SLM YÖNTEMİYLE ÜRETİLMESİNDE TAGUCHİ METODU KULLANILARAK PROSES PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Özet

Orijinal bilimsel makale

Eklemeli imalat yöntemi, geleneksel imalat yöntemleriyle üretimi zor ya da mümkün olmayan, karmaşık geometriye sahip parçaların üretiminde önemli iyileştirmeler sunmaktadır. Ancak, çıktı kalitesinin istenilen seviyede olup olmadığı sorusu güncelliğini korumaktadır. Dolayısıyla, optimum üretim parametrelerinin elde edilmesi çıktı kalitesini artırmak adına oldukça önemlidir. Bu çalışmada, Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemiyle üretilmiş Ti6Al4V alaşımının farklı proses parametreleri kullanılarak bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Böylece, dört farklı parametre ve seviyelerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Yüzey kalitesinin analizi sırasında ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) çıktı parametresi olarak belirlenmiştir. Deney tasarımı, Taguchi L₁₆ dikey dizini kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Proses parametrelerinin sonuç üzerindeki etkisini göstermek için ANOVA analizi yapılmıştır. Deney sonuçlarının analiziyle birlikte, en iyi yüzey pürüzlülüğü değerinin 75 μm lazer odak çapı, 60 μm tarama mesafesi, 150 mm/s tarama hızı ve 250 W lazer gücü kombinasyonu kullanılarak 7.773 μm yüzey pürüzlük değeri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, seçici lazer ergitme, Ti6Al4V, Taguchi metodu, yüzey kalitesi.

1 Giriş

Titanyum, ilk olarak 1791 yılında William Gregor tarafından keşfedilen ve siyah kumlardan beyaz metal oksit ayrıştırılarak elde edilen bir metaldir [1,7,10]. Titanyum ve alaşımları, günümüzde havacılık ve uzay başta olmak üzere sağlık, kimya, denizcilik, spor gibi sektörlerde önemli bir yere sahiptir [1,4]. Titanyum alaşımları arasında en çok tercih edilen alaşım Ti6Al4V'dir [36]. Bu alaşımı diğer malzemelere nazaran ön plana çıkaran özellikleri yüksek

dayanım sağlarken yoğunluğunun düşük olması, düşük elastik modülü ve termal iletkenliği, yüksek sıcaklık dayanımı, mükemmel korozyon direnci ve kompozit yapı malzemeleriyle rekabet edici özelliklere sahip olması şeklinde sıralanabilir [1,4,23,37]. Ti6Al4V alaşımları genellikle geleneksel imalat yöntemleriyle üretilmektedir. Bu parçaların geleneksel imalatı, hammadde malzemenin dövme, döküm ve haddeleme işlemlerinin ardından son şekil ve boyutlandırılmasına kadar devam eden bir süreçtir. Ancak, bu yöntemde üretim sürecinde yüksek miktarda

* Corresponding author.

E-mail address: dilaraa801@gmail.com (D. S. Aydın)

Received 05 April 2022; Received in revised form 02 July 2022; Accepted 10 July 2022

2587-1943 | © 2022 IJIEA. All rights reserved.

Doi: <https://doi.org/10.46460/ijiea.1099019>

atık malzeme oluşmakta ve üretimin maliyeti artmaktadır [4,18]. Üretimde geleneksel imalatın getirdiği dezavantajların yanı sıra, işlenmesi de oldukça zor bir metaldir. Bu durumun sebebi alaşımın zayıf termal iletkenliği ve mukavemetinin yüksek olmasından kaynaklı parça ve kesici uç arasında yüksek sıcaklıkların meydana gelmesidir. Böylelikle, plastik deformasyon ve malzemenin şekillendirilmesi zorlaşmaktadır. Ayrıca, yüksek sıcaklık değerlerinde bu alaşımlar kesici uç ile kimyasal tepkimeye girmekte ve takım ucunda yüksek sıcaklık değerleri oluşmasına sebep olmaktadır. Bu durumun sonucunda kesici uçta hız aşınma meydana gelmekte ve talaşlı imalat sırasında oluşan titreşimler parçanın yüzey kalitesini de olumsuz yönde etkilemektedir [7,9,18,26]. Geleneksel imalatta karşılaşılan bu zorluklar neticesinde alternatif bir üretim yöntemi olan eklemeli imalat yöntemi kullanılmaktadır.

Eklemeli imalat ham malzemenin katmanlar halinde biriktirilerek üretildiği yeni nesil bir imalat yöntemidir [11,34,36]. Bu yöntemde ham malzemedan talaş kaldırmak yerine toz malzeme üst üste eklenerek birleştirilmesi prensibine göre çalışmaktadır. Bu durum, eklemeli imalat yöntemini geleneksel imalattan ayıran en önemli faktördür [3,13,20]. Eklemeli imalat yöntemi karmaşık geometrik şekilli parçaların üretimini kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, tasarım özgürlüğü sağlamakta, hafif yapıların üretimine imkân vermekte ve parçalar bütün olarak üretildiğinden montaj gereksinimini ortadan kaldırarak önemli iyileştirmeler sunmaktadır. Eklemeli imalat, geleneksel imalat yöntemleriyle karşılaştırıldığında sağladığı avantajlar nedeniyle tercih edilebilir bir yöntem olarak değerlendirilmektedir [11,25,34]. Eklemeli imalat yöntemleri arasında seçici lazer ergitme (SLM), metal tozların tamamen ergitilmesiyle yüksek yoğunluğa sahip parçaları üretmek için oldukça uygun bir yöntemdir. Üretilen parçaların yoğunluğu ergimiş toz tanelerinin iyi bir şekilde birleştirilmesine bağlıdır. Ayrıca, geleneksel imalat yöntemleriyle karşılaştırılabilir mekanik özelliklere ulaşabilmektedir. Bu nedenle eklemeli imalat yöntemleri arasında en çok tercih edilen yöntemdir [14,28,33,35,39]. SLM yöntemi, yüksek yoğunluklu lazer güç kaynağı yardımıyla metal toz malzemenin katman katman ergitilip birleştirilerek üç boyutlu parçanın net şekle yakın üretilmesi prensibine dayanmaktadır [24,36]. Yöntem, yüksek mekanik özelliklere, yüksek yoğunluğa ve karmaşık geometrik yapı parçalarının üretiminde verimli olduğu kadar malzeme ve maliyet açısından da önemli iyileştirmeler sağlamaktadır [8]. Bu yöntemin sunduğu en ilgi çekici özelliklerden biri, işlem parametrelerini ayarlayarak parçanın mikro yapısının belirli bir oranda uyarlanmasına imkân sağlamaktır. SLM yönteminde üretilen parçalara hızlı bir şekilde soğutma işlemi uygulanmaktadır. Bu durum, üretilen parçaların mekanik özelliklerini iyileştirmektedir [14,32]. Ayrıca SLM yöntemi, yüksek ölçü hassasiyeti gerektiren parçaların üretimine de olanak sağlamaktadır [22]. Yöntemin getirdiği dezavantaj ise, yüksek sıcaklık değişim ve yoğunlaştırma oranı, yüksek miktarda iç gerilmelere ya da parça bozulmasına neden olmaktadır. Bu durum yüzey pürüzlülüğünü olumsuz yönde etkilemektedir [16]. Sürece özgü meydana gelen pürüzlü yüzey parçaların kullanımına sınırlamalar getirmektedir [8]. Yüzey pürüzlülüğünü kullanılan toz malzemenin partikül boyutu, üretim

sırasında parçanın katman kalınlığı, uygulanan lazerin gücü ve tarama parametreleri etkilemektedir. Bu nedenle malzemenin ve işlem parametrelerinin doğru belirlenmesi üretim kalitesi açısından oldukça önemlidir [16]. İşlem parametreleri arasında tarama hızı, ergitme esnasında verilen enerji miktarını belirlemekte, bu nedenle parçanın yüzey kalitesini etkilemektedir. Lazer gücü, işlem sırasında oluşan sıcaklık farkının şiddetini belirlemekte ve sıcaklığın artmasıyla toz malzeme ergitilmektedir. Dolayısıyla, parçanın yüzey kalitesi uygulanan lazer gücünün seviyesinden etkilenmektedir. Katman kalınlığı ve inşa yönü parametrelerinin optimum olmayan değerleri, işlenen parça yüzeyinde ‘merdiven etkisine’ yol açabileceğinden yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir. Tarama mesafesinin de işlenen parçanın yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğu görülmektedir [8,21]. Ayrıca bir parçanın yüzey pürüzlülüğü, toplanma olarak adlandırılan olaydan da etkilenebilmektedir. Toplanma, eriyik havuzunda küçük kürelerin meydana gelerek bölünmesi olayıdır. Bu durum katmanların birleşmesinde ciddi sorun oluşturmaktadır. İşlenen parçanın yoğunluğunu azaltmakta, yan/üst yüzeylerin pürüzlülüğünü arttırmaktadır [21]. Literatürde SLM yöntemi kullanılarak üretilen Ti6Al4V alaşımının yüzey kalitesi üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin; Sadalı M. ve diğ. [29] SLM ile üretilen Ti6Al4V numuneler için tarama hızı parametresinin mikro gözenekler, yüzey morfolojisi ve pürüzlülük üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Tarama hızı olarak 695, 775 ve 853 mm/sn’lik değerleri kullanmışlardır. Deney sonuçlarının analizinde, 775 mm/sn’lik tarama hızı, 175 W lazer gücü, 0.12 mm tarama mesafesi ve 30 µm katman kalınlığı kullanılarak işlenen numunelerin yüzey morfolojisi ve mikro yapının yüksek kalitede olduğu gözlemlenmiştir. Yaptıkları çalışmada, 0.506 µm ile minimum yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerine ulaşıldığını belirtmişlerdir. Król M. ve diğ. [16] SLM ile üretilen Ti6Al4V numunelerin işlem parametrelerinin ve eğim açısının yan/üst yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. İşlem parametrelerini lazer gücü, tarama mesafesi, tarama hızı ve maruz kalma süresi olarak belirlemişlerdir. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, 150 W lazer gücü, 290 mm/sn tarama hızı, 25 µs maruz kalma süresi, 25 µm tarama mesafesi kullanılarak en az yüzey pürüzlülük değerine ulaşmışlardır. Ayrıca, yan/üst yüzeylerde eğimli modeller için alt tabaka referans alınarak yaklaşık 10-20 derece eğilerek üretmenin daha düşük yüzey pürüzlülüğüne imkân sağlayacağını ileri sürmüşlerdir. Shi X. ve diğ. [31] SLM ile üretilen Ti6Al4V alaşımıyla yaptıkları çalışmada yüksek tabaka kalınlığının işlem sırasında çekme özelliklerinden ziyade yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Eyzat Y. ve diğ. [6] SLM ile üretilen Ti6Al4V numuneler üzerinde ısıtma işleminin etkisi ve çeşitli özellikler ile yüzey mekanik yıpratma işleminin etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, yüzey mekanik yıpratma işleminin numunelerin yüksek yüzey pürüzlülüğünü %80 oranında azalttığını, mekanik özelliklerinin de iyileştirilebileceğini gözlemlenmişlerdir. Li Y. ve diğ. [17] kısmen ergimiş toz tanelerinin parçanın dış yüzeyine yapışması ve oksidasyonun yüzey kalitesini etkileyen en önemli faktörler olduğu kanısına varmışlardır. Farklı eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak üretilen Ti6Al4V

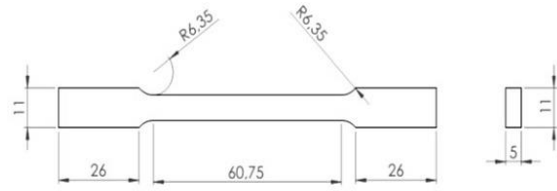
parçalarında meydana gelen yüzey pürüzlülüğünde yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED) yönteminde en pürüzsüz yüzeyin elde edildiği ardından seçici lazer ergitme (SLM) ve elektron ışın ergitme (EBM) yöntemleri gelmektedir. Ayrıca direkt metal lazer sinterleme (DMLS) yöntemiyle üretilen numunelerinde EBM yöntemine ile karşılaştırıldığında daha düşük yüzey pürüzlülük değeri elde edilmektedir. Bu durumun nedeni DMLS yönteminde, tamamen erimiş lazer izleri ile karakterize edildiğinden yüzey pürüzlülüğü daha düşüktür. DED yönteminde ise kullanılan tozlar ortamdaki uzaklaştırıldığından, DED işleminde kısmen erimiş tozların yapışması SLM ve EBM yöntemlerine göre çok daha düşüktür, çünkü SLM ve EBM yöntemleri kullanılan tozları toz yatağında tutmaktadır [5,18]. Rafi H. ve diğ. [27] SLM ve EBM yöntemleri ile Ti6Al4V numuneleri kullanılarak yaptıkları çalışmada farklı tarama hızlarının, katman kalınlıklarının ve toz boyutlarının yüzey pürüzlülüğüne yol açtığını belirtmişlerdir. Ayrıca, SLM ile üretilen numunelerin yüzeylerinin EBM ile üretilen numunelerle kıyaslandığında çok daha pürüzlü olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Yüzey kalitesi mühendislik uygulamalarında yer alan bileşenler için önemli bir çıktı parametresidir. Bu nedenle, imalatta kullanılan yöntemlerde yüzey kalitesinin iyileştirilmesi için optimum parametre grubunun belirlenmesi risk teşkil etmektedir. Söz konusu durum, eklemeli imalat ile üretilen parçalar için de oldukça önem arz etmektedir. Bu amaç doğrultusunda yapılan çalışmaların bazıları ve bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Fakat, kendi içerisinde birçok alt yöntemi olan eklemeli imalat, bu yöntemlere ait değişken girdi parametrelerini ve seviyelerini bulundurmaktadır. Bu değişkenlerle elde edilen ya da elde edilecek olan yüzeylerin kalitelerinin incelenmesi oldukça önemli bir husustur. Yapılan çalışmada, SLM yöntemiyle üretilen Ti6Al4V alaşımının üretimi sırasında farklı proses parametrelerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla bir dizi deney yapılmıştır. Deneylerde girdi parametresi olarak dört ana parametre ve bu parametrelere ait dört farklı seviye belirlenmiştir. Çıktı parametresi olarak ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) incelenmiştir. Deney tasarımında Taguchi L_{16} ortogonal dizisi kullanılmıştır. Ayrıca en küçük yüzey pürüzlülük değerini elde etmek amacıyla deney sonuçları Taguchi'nin S/N oranına dönüştürülerek değerlendirilmiştir. Çalışmaya ait kullanılan malzeme, deney tasarıma ait detaylar ve ölçümler, deneysel bulgular, elde edilen sonuçlar ve tartışılmasına yönelik detaylar aşağıda bölümler halinde sunulmuştur.

2 Materyal ve Metot

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımı numuneler seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Bu alaşımın yüksek mukavemet ve korozyona karşı dirençli olması sebebiyle tercih edilmiştir. Numunelerin üretiminde maksimum lazer gücü 500 W ve sürekli dalga iterbium fiber lazerle donatılmış Ermaksan Enavision 250 modeli bir eklemeli imalat makinesi kullanılarak ASTM E 8M çekme standardına göre 16 adet çekme numunesi üretilmiştir. Numunelerin üretimi Ar (argon) gazı atmosferinde yapılmıştır. Deney numunelerine ait teknik

ölçüler ve üretim sonucu numunelerin genel görünümü Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Deney numunelerine ait teknik ölçüler ve üretim sonucu numunelerin genel görünümü.

Yüzey pürüzlülüğü, üretilen iş parçasının mekanik özelliklerini etkileyen önemli bir kalite kriteridir [30]. Bu amaçla çalışmada işlem parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri analiz edilecektir. Sabit ve değişken parametrelerin belirlenmesinde literatür bilgisi, araştırmacıların önceki çalışmaları ve deneyleri etkili olmuştur. Değişken parametreler lazer gücü (W), tarama mesafesi (μm), tarama hızı (mm/s), lazer odak çapı (μm) ve bu parametrelere ait farklı seviye değerleri ile üretilen numunelerin yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Değişken parametrelere ait değerler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Tablo 1. SLM yönteminde kullanılan değişken işlem parametre ve değerleri.

Proses Parametreleri	Parametre Seviyeleri
Lazer Gücü (W)	190, 210, 230, 250
Tarama Mesafesi (μm)	60, 90, 120, 150
Tarama Hızı (mm/s)	150, 300, 450, 600
Lazer Odak Çapı (μm)	75, 80, 85, 90

Ortalama yüzey pürüzlülük ölçümleri ISO 4287 standartlarına uygun olarak Mahr Marsurf PS10 taşınabilir yüzey pürüzlülük cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ortalama Ra değeri belirlenirken üretilen numunenin malzeme işleme yönü dikkate alınarak baştan ortadan ve sondan olmak üzere 3 farklı noktada ölçümler yapılmıştır. SLM işlem parametrelerinin optimum değerlerinin belirlenmesinde ve deneysel sürecini olumsuz yönde etkileyen zaman ve maliyet faktörlerini en aza indirmek amacıyla Taguchi L_{16} dikey dizini kullanılarak deney tasarımı yapılmıştır. Bu deney tasarımında belirlenen parametrelerin optimize edilmesi, kararlı olması ve minimum süreç değişkenliği sağlamak amacıyla sinyal-gürültü (S/N) oranı kullanılmıştır ve deneysel sonuçlar S/N oranına çevrilerek değerlendirilmiştir. S/N değerlerini tanımlamak için kullanılan kriterler arasında "en küçük en iyi" yaklaşımı, en küçük ortalama yüzey pürüzlülük değerlerini belirlemek için kullanılmıştır. Bu yaklaşımın sonuçları Eşitlik 1'deki formül ile hesaplanmıştır.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (1)$$

Taguchi L_{16} dikey dizin deney tasarımında kullanılan kontrol faktörleri ve bu faktörlerin seviye değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Deney tasarımında kullanılan kontrol faktörleri ve bu faktörlerin seviye değerleri.

Kontrol Faktörleri	Birim	Sembol	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Lazer Odak Çapı	μm	A	75	80	85	90
Tarama Mesafesi	μm	B	60	90	120	150
Tarama Hızı	mm/s	C	150	300	450	600
Lazer Gücü	W	D	190	210	230	250

Tablo 3. Taguchi L_{16} deney tasarımı.

Deney Sayısı	Kontrol Faktörleri ve Seviye Değerleri				Deneysel Sonuçlar	
	A	B	C	D	Ra (μm)	S/N Oranı
1	75	60	150	190	7.773	17.76471
2	75	90	300	210	10.020	20.01735
3	75	120	450	230	15.024	23.53571
4	75	150	600	250	11.894	21.50656
5	80	60	300	230	11.157	20.95095
6	80	90	150	250	10.719	20.60309
7	80	120	600	190	14.739	23.36936
8	80	150	450	210	12.496	21.93542
9	85	60	450	250	9.382	19.44591
10	85	90	600	230	11.512	21.22302
11	85	120	150	210	16.067	24.11870
12	85	150	300	190	14.620	23.29895
13	90	60	600	210	10.691	20.58037
14	90	90	450	190	13.471	22.58800
15	90	120	300	250	13.790	22.79129
16	90	150	150	230	13.288	22.46919

Tablo 4'de yüzey pürüzlülüğü için S/N yanıt tablosu verilmiştir. Bu tabloda optimum proses parametre değerleri için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri görülmektedir.

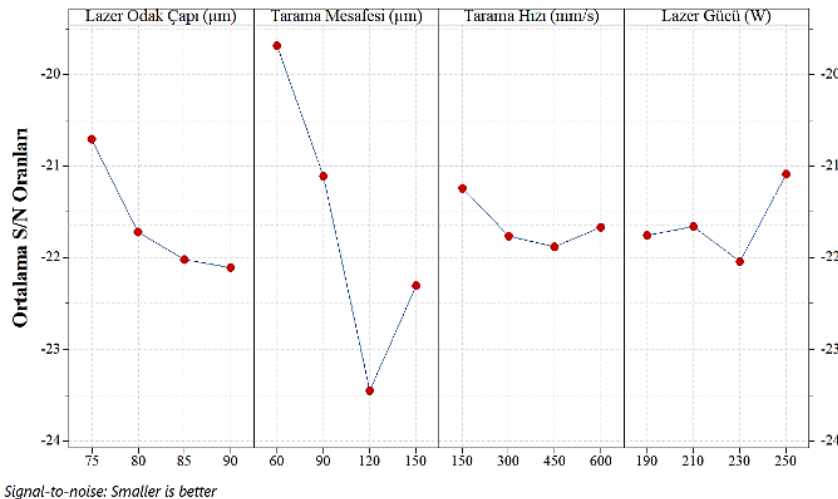
Tablo 4. S/N yanıt tablosu.

Seviyeler	Kontrol Faktörleri			
	A	B	C	D
1	20.71	19.69	21.24	21.76
2	21.71	21.11	21.76	21.66
3	22.02	23.45	21.88	22.04
4	22.11	22.30	21.67	21.09
Delta	1.40	3.77	0.64	0.96

3 Deney Sonuçlarının Analizi

SLM yöntemiyle Ti6Al4V alaşımının üretimi sonucunda elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri ve bu değerlere ait S/N oranları Tablo 3'de listelenmiştir.

Yüzey pürüzlülüğüne ait S/N oranları ana etki grafiği Şekil 2'de gösterilmiştir. Kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri grafiğe göre ilgili faktörün en üst noktasında yer almaktadır. Dolayısıyla, lazer odak çapı için optimum S/N oranı 20.71 ile en iyi sonuca 75 μm seviyesinde ulaşılmaktadır. Tarama mesafesi için S/N oranı 19.69 ile en iyi sonuca 60 μm seviyesinde ulaşıldığı görülmektedir. Tarama hızı için S/N oranı 21.24 ile en iyi sonuç 150 mm/s seviyesinde elde edilmektedir. Aynı analiz lazer gücü için yapıldığında S/N oranı 21.09 ile en iyi sonucu 250 W seviyesinin verdiğini göstermektedir. Bu durumda en iyi ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 75 μm lazer odak çapı, 60 μm tarama mesafesi, 150 mm/s tarama hızı ve 250 W lazer gücü kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 2. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için kontrol faktörlerinin S/N oranına etkisi.

Yüzey pürüzlülüğü, lazer gücü, lazer odak çapı, tarama mesafesi, tarama hızı gibi faktörler tarafından kontrol edilebilmektedir [2]. Seçici lazer ergitme işleminde elde edilen sonuçlara göre kontrol faktörlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini değerlendirmek gerekirse lazer gücünün yüzey pürüzlülüğü üzerinde oldukça önemli olduğu anlaşılmaktadır. Lazer gücünün artması ile iyileşen yüzey pürüzlülüğü, bir önceki katmanın yeniden ergimesini sağlayarak eriyik havuzun daha homojen bir hal almasına imkân sağladığı düşünülmektedir. Tarama mesafesinin artması ise, eriyik havuz boyutunu artırmakta ve bu durum pürüzlü bir yüzey ile sonuçlanmaktadır. Şekil 2 incelendiğinde tarama hızının artması ortalama yüzey pürüzlülüğünün de artmasına neden olmuştur. Ayrıca, SLM işlemi sırasında toz malzemeyi eritecek miktarda lazer gücünün sağlanamaması numunelerin yüzey pürüzlülüğünü olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir.

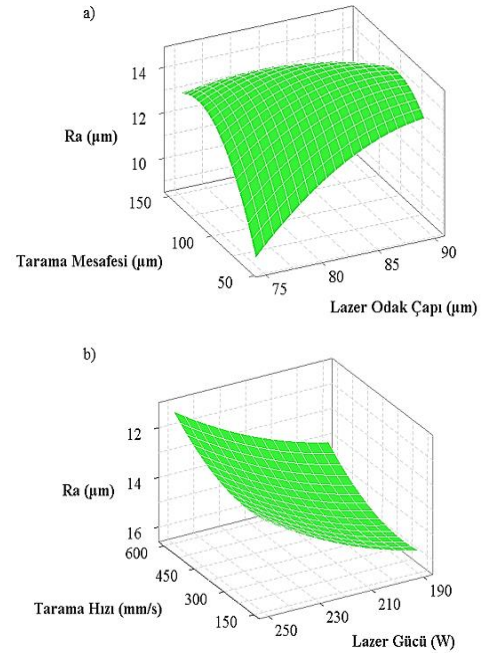
Şekil 3a'da tarama mesafesi ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişkiyi gösteren 3D yüzey grafiği, en düşük yüzey pürüzlülüğünün 60 µm kullanılarak elde edildiğini göstermektedir. Yüzey pürüzlülüğü sırasıyla 150, 120, 90, 60 µm tarama mesafesi kullanımıyla azalma eğilimi göstermiştir. Metal tozu eritecek lazer gücünü dalga boyuyla birlikte odak çapı da etkilemektedir. Odak çapı azaltılarak lazer gücünün artırılması yüzey pürüzlülüğü açısından daha olumlu sonuçlar vermektedir. Koutiri I. ve diğ. [15] yüksek seviyede lazer gücü kullanılarak lazer odak çapının artırılmasıyla yüzey pürüzlülüğünün belirgin bir miktarda arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Şekil 3b'de tarama hızının ve lazer gücünün yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi gösterilmektedir. 150 mm/s tarama hızı ve 250W lazer gücü kullanılarak üretilen numunelerde yüzey pürüzlülüğünün önemli miktarda azaldığı gözlemlenmiştir.

Tarama hızının artırılması daha pürüzlü bir yüzey ile sonuçlanmaktadır. Bu durumun nedeni tarama hızının artmasıyla toz malzemenin ergimesi için yeterli sürenin sağlanamaması ve katılma hızının azalması nedeniyle yüzey kalitesini olumsuz etkilediği düşünülmektedir.

Sadali M. ve diğ. [29] yaptıkları çalışmada tarama hızının artmasıyla yüzeyin bozulduğunu ancak tarama hızının daha da artmasıyla yüzey kalitesinin iyileştiğini belirtmişlerdir. Shi X. ve diğ. [31] tarama hızının azaltılmasıyla sürekli tarama hızları elde edilerek yüzey pürüzlülüğünün azaltılacağını ileri sürmüşlerdir. Wang Z.

ve diğ. [38] benzer sonuçlar elde ederek düşük lazer gücü ve artan tarama hızı değerlerinde yüzey pürüzlülüğünün arttığını belirtmişlerdir. Maamoun A. ve diğ. [19] belirttiği gibi tarama hızı ile yüzey pürüzlülüğü arasında önemli bir ilişki vardır. Sonuç olarak, deney sonuçları literatürle de paralellik göstermiştir.

Kontrol faktörlerinin ve seviyelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etki oranlarının belirlenmesi için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Bu analiz %95 güven aralığında gerçekleştirilmiştir. Taguchi L₁₆ dikey dizini kullanılarak gerçekleştirilen yüzey pürüzlülüğü deneylerinin ANOVA sonuçları Tablo 5'de verilmiştir. Tarama mesafesi, lazer odak çapı, lazer gücü ve tarama hızı faktörlerinin yüzey pürüzlülüğüne katkı yüzdeleri sırasıyla %74.17, %9.57, %5.26 ve %1.13 olduğu görülmektedir. Bu sonuçlardan elde edilen bilgilere göre yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktör tarama mesafesidir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için hata oranı %9.94 seviyesinde gerçekleşmiştir. Güvenilir bir istatistiksel analiz için bu oranın %20'den küçük olması gerekmektedir [12]. Elde edilen sonuçlar analizin güvenilirliğini kanıtlar niteliktedir.



Şekil 3. SLM parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi: (a) tarama mesafesi ve lazer odak çapı, (b) tarama hızı ve lazer gücü.

Tablo 5. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları.

Faktörler	SD	KT	KO	F	P	PCR (%)
Lazer Odak Çapı (µm)	3	7.5897	2.5299	0.96	0.512	9.57
Tarama Mesafesi (µm)	3	58.7744	19.5915	7.46	0.067	74.10
Tarama Hızı (mm/s)	3	0.8986	0.2995	0.11	0.946	1.13
Lazer Gücü (W)	3	4.1705	1.3902	0.53	0.693	5.26
Hata	3	7.8814	2.6271	-	-	9.94
Toplam	15	79.3146	-	-	-	100

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, SLM yöntemi kullanılarak üretilen Ti6Al4V parçalarının ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde proses parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Taguchi dikey dizini kullanılarak deney tasarımı ve sonuçların analizi yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen bilgiler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Çalışma sonucunda parametre seviyelerinin farklı kombinasyonları ortalama yüzey pürüzlülüğünü etkilediği görülmüştür.
- Ortalama yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametre %74.10 katkı oranıyla tarama mesafesi olmuştur.

- Tarama mesafesinde 60 µm üzerindeki seviyelerde yüzey pürüzlülüğünü olumsuz yönde etkilemiştir. Ancak, 120 µm'den daha yüksek bir tarama hızının kullanılmasıyla yüzey pürüzlülüğünde bir miktar azalma gözlemlenmiştir.
- Lazer gücünün artmasıyla daha pürüzlü bir yüzey elde edilmiştir. Ancak, lazer gücünün daha da artması yüzeyi iyileştirerek yüzey pürüzlülüğünün azalmasını sağlamıştır.

S/N analizi yapılarak gerçekleştirilen optimizasyon da en düşük yüzey pürüzlülüğünü veren işlem parametreleri 75 µm lazer odak çapı, 60 µm tarama mesafesi, 150 mm/s tarama hızı ve 250 W lazer gücü olarak bulunmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje kodu: FYL-2021-11339).

Bilgilendirme

Bu çalışmada Etik Kurul Onay belgesine gerek yoktur.

Kaynaklar

- [1] Bayrak, Ö. (2013). *Plazma oksitleme işleminin Ti6Al7Nb ve Ti45Nb alaşımlarının tribolojik, elektrokimyasal ve biyouyumluluk özelliklerine etkisi*. (Doctoral dissertation, Atatürk University).
- [2] Bean, G. E., Witkin, D. B., McLouth, T. D., Patel, D. N., & Zaldivar, R. J. (2018). Effect of laser focus shift on surface quality and density of Inconel 718 parts produced via selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 22, 207–215.
- [3] Çelik, K., & Özkan, A. (2017). Eklemeli imalat yöntemleri ile üretim ve onarım uygulamaları. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 107–121.
- [4] Çelik, Y. H., & Kılıçkap, E. (2018). Titanyum ve alaşımlarının işlenmesinde karşılaşılan zorlukların araştırılması: Derleme. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(1), 163–175.
- [5] Çevik Z. A., Özsoy K., Erçetin A. (2021). The Effect of Machining Process on The Physical and Surface Morphology of Ti6Al4V Specimens Produced Through Powder Bed Fusion Additive Manufacturing” *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 5(2), 187-194.
- [6] Eyzat, Y., Chemkhi, M., Portella, Q., Gardan, J., Remond, J., & Reira, D. (2019). Characterization and mechanical properties of as-built SLM Ti-6Al-4V subjected to surface mechanical post-treatment. *Procedia CIRP*, 81, 1225–1229.
- [7] Güner, Ç. (2019). *Ti-6Al-4V Sacların mikroyapı değişimi ve geri yaylanma davranışının incelenmesi*. (Master's dissertation, Bursa Uludağ University).
- [8] Günther, J., Leuders, S., Koppa, P., Tröster, T., Henkel, S., Biermann, H., & Niendorf, T. (2018). On the effect of internal channels and surface roughness on the high-cycle fatigue performance of Ti-6Al-4V processed by SLM. *Materials & Design*, 143, 1–11.
- [9] Huang, R., Riddle, M., Graziano, D., Warren, J., Das, S., Nimbalkar, S., Cresko, J., & Masanet, E. (2016). Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1559–1570.

- [10] İşler, Ö. (2017). *Titanyum ve alaşımlarının elektrokimyasal davranışları*. (Master's dissertation, Cukurova University).
- [11] Kaya, M. (2021). *Eklemeli imalat ile üretilen inconel 718 parçalarının ezerek parlatma yöntemiyle yüzey iyileştirme sürecinin modellenmesi ve deneysel doğrulanması*. (Master's dissertation, Marmara University).
- [12] Kıvak, T. (2014). Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. *Measurement*, 50(1), 19–28.
- [13] Koç, O. O. (2021). *Eklemeli üretim yöntemiyle üretilen parçaların farklı yazdırma parametrelerinin akustik özelliklere etkisinin incelenmesi*. (Master's dissertation, Necmettin Erbakan University).
- [14] Kong, C.-J., Tuck, C. J., Ashcroft, I. A., Wildman, R. D., & Hague, R. (2011). High density Ti6Al4V via slim processing: microstructure and mechanical properties. *2011 International Solid Freeform Fabrication Symposium*.
- [15] Koutiri, I., Pessard, E., Peyre, P., Amlou, O., & De Terris, T. (2018). Influence of SLM process parameters on the surface finish, porosity rate and fatigue behavior of as-built Inconel 625 parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 255, 536–546.
- [16] Król, M., & Tański, T. (2016). Surface quality research for selective Laser melting of Ti-6Al-4V alloy. *Archives of Metallurgy and Materials*, 61(3), 1291–1296.
- [17] Li, Y., Yang, H., Lin, X., Huang, W., Li, J., & Zhou, Y. (2003). The influences of processing parameters on forming characterizations during laser rapid forming. *Materials Science and Engineering: A*, 360(1–2), 18–25.
- [18] Liu, S., & Shin, Y. C. (2019). Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Materials & Design*, 164, 107552.
- [19] Maamoun, A., Xue, Y., Elbestawi, M., & Veldhuis, S. (2018). Effect of selective laser melting process parameters on the quality of Al alloy parts: powder characterization, density, surface roughness, and dimensional accuracy. *Materials*, 11(12), 2343.
- [20] Memu, F. (2019). *Katmanlı imalat yöntemiyle üretilmiş Ti-6Al-4V alaşımının mekanik özelliklerinin incelenmesi*. (Master's dissertation, TOBB Economy and Technology University).
- [21] Mumtaz, K. A., & Hopkinson, N. (2010). Selective laser melting of thin wall parts using pulse shaping. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(2), 279–287.
- [22] Özer, G. (2020). Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 606–621.
- [23] Pişken, B. (2007). *Titanyum ve alaşımlarının termal oksidasyon özelliklerine tin kaplamanın etkilerinin incelenmesi*. (Master's dissertation, Istanbul Technical University).
- [24] Popovich, A., Sufiarov, V., Borisov, E., & Polozov, I. (2015). Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Manufactured by SLM. *Key Engineering Materials*, 651–653, 677–682.
- [25] Poyraz, Ö. (2018). *Metallerin lazer katmanlı imalatında kullanılan proses parametrelerinin etkisinin, modelleme ve simülasyon yöntemleri kullanılarak incelenmesi*. (Doctoral dissertation, Eskisehir Osmangazi University).
- [26] Prasad, A. V. S. R., Ramji, K., & Datta, G. L. (2014). An experimental study of wire EDM on Ti-6Al-4V Alloy. *Procedia Materials Science*, 5, 2567–2576.
- [27] Rafi, H. K., Karthik, N. V., Gong, H., Starr, T. L., & Stucker, B. E. (2013). Microstructures and mechanical properties of Ti6Al4V parts fabricated by selective laser melting and electron beam melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(12), 3872–3883.

- [28] Roudnicka, M., Bigas, J., & Vojtech, D. (2020). Tuning porosity and mechanical properties of Ti6Al4V alloy additively manufactured by SLM. *Key Engineering Materials*, 865, 1–5.
- [29] Sadali, M. F., Hassan, M. Z., Ahmad, F., Yahaya, H., & Rasid, Z. A. (2020). Influence of selective laser melting scanning speed parameter on the surface morphology, surface roughness, and micropores for manufactured Ti6Al4V parts. *Journal of Materials Research*, 35(15), 2025–2035.
- [30] Sangwan, K. S., Saxena, S., & Kant, G. (2015). Optimization of Machining Parameters to Minimize Surface Roughness using Integrated ANN-GA Approach. *Procedia CIRP*, 29, 305–310.
- [31] Shi, X., Ma, S., Liu, C., Chen, C., Wu, Q., Chen, X., & Lu, J. (2016). Performance of high layer thickness in selective laser melting of Ti6Al4V. *Materials*, 9(12), 975.
- [32] Simonelli, M., Tse, Y. Y., & Tuck, C. (2012). Microstructure of Ti-6Al-4V produced by selective laser melting. *Journal of Physics: Conference Series*, 371, 1–5.
- [33] Simonelli, M., Tse, Y. Y., & Tuck, C. (2014). Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti-6Al-4V. *Materials Science and Engineering: A*, 616, 1–11.
- [34] Solakoğlu, E. U. (2018). *Lazerle metal toz ergitme (SLM) prosesi sonrası proses parametrelerinin yüzey kalitesine olan etkisinin incelenmesi*. (Master's dissertation, Eskisehir Osmangazi University).
- [35] Song, B., Dong, S., Liao, H., & Coddet, C. (2012). Process parameter selection for selective laser melting of Ti6Al4V based on temperature distribution simulation and experimental sintering. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61(9–12), 967–974.
- [36] Taftalı, M. (2018). *Seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi kullanılarak farklı yüzey geometrilerinde üretilmiş metal destekli dental seramik alt yapıların statik ve dinamik davranışlarının belirlenmesi*. (Master's dissertation, Erzurum Technical University).
- [37] Toptan, F., Alves, A. C., Carvalho, Ó., Bartolomeu, F., Pinto, A. M. P., Silva, F., & Miranda, G. (2019). Corrosion and tribocorrosion behaviour of Ti6Al4V produced by selective laser melting and hot pressing in comparison with the commercial alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 266, 239–245.
- [38] Wang, Z., Xiao, Z., Tse, Y., Huang, C., & Zhang, W. (2019). Optimization of processing parameters and establishment of a relationship between microstructure and mechanical properties of SLM titanium alloy. *Optics & Laser Technology*, 112, 159–167.
- [39] Yadroitsev, I., & Smurov, I. (2011). Surface morphology in selective laser melting of metal powders. *Physics Procedia*, 12(1), 264–270.