





Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Üretim Parametrelerinin Seçici Lazer Ergitme Yöntemi ile Ti6Al4V Alaşımının Çekme Dayanımı, Elastisite Modülü ve Uzama Özelliklerine Etkisi

 Dilara Selma AYDIN^{a,*},  Çağrı Vakkas YILDIRIM^b,  Şenol ŞİRİN^c

^a Sivil Havacılık Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, TÜRKİYE

^b Uçak Gövde Motor Bölümü, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, TÜRKİYE

^c Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Gümüşova Meslek Yüksekokulu, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: dilaraa801@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.1134020

ÖZ

Eklemeli imalat, bilgisayar kontrollü üç boyutlu katı model verilerini kullanan modern bir imalat yöntemidir. Eklemeli imalatta amaç; malzemeyi kademeli şekilde üreterek nihai şekline getirmektir. Bu sayede karmaşık geometrilere sahip ürünlerin elde edilmesi diğer klasik yöntemlere göre nispeten daha kolaydır. Özellikle, yüksek ölçüm doğruluğuna, yüksek dayanıma ve düşük ağırlığa sahip parçaların hızlı üretilmesinin gerekli olduğu havacılık-uzay endüstrisi, biyomedikal ve savunma sanayii gibi geniş bir alanda tercih edilmektedir. Eklemeli imalat birçok alt yöntemden oluşmakta ve bu yöntemler malzemenin cinsi, parçanın boyutu, kullanım amacı, çalışma prensibi, malzemelerin hassasiyeti ve özellikleri, üretim sayısı ve hızı gibi birçok kritere bağlıdır. Seçici lazer eritme (SLM) yöntemi, eklemeli imalat yöntemleri arasında genellikle tercih edilmektedir. Ancak, SLM prosesini doğrudan ve dolaylı parametreler olmak üzere birçok faktör etkileyebilmektedir. Bu çalışmanın amacı, farklı üretim parametrelerinin SLM yöntemi kullanılarak üretilen Ti6Al4V alaşım malzemesi üzerinde mekanik özelliklerine etkisini incelemektir. Bu amaç doğrultusunda dört farklı üretim parametresi ve seviyeleri üretim parametresi olarak belirlenmiştir. Değerlendirme kriteri olarak çekme dayanımı, elastisite modülü ve uzama yüzdesi seçilmiştir. Deney tasarımında Taguchi L₁₆ tercih edilmiştir. Deney sonuçları değerlendirilirken S/N analizi kullanılmıştır. Kontrol faktörlerin etki düzeyini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen verilerle çekme dayanımı için optimum parametreler; 75 µm lazer odak çapı, 230 W lazer gücü, 60 µm tarama mesafesi ve 300 mm/sn hız tarama hızı olarak tespit edilirken, elastisite modülü için 60 µm tarama mesafesi, 450 mm/sn tarama hızı, 80 µm lazer odak çapı ve 250 W lazer gücü ve uzama miktarı için 90 µm lazer odak çapı, 150 µm tarama mesafesi, 450 mm/sn tarama hızı ve 230 W lazer gücü olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, Mekanik özellikler, Ti6Al4V, Seçici lazer eritme

The Effect of Production Parameters on Tensile Strength, Modulus of Elasticity and Elongation Properties of Ti6Al4V Alloy by Selective Laser Melting Method

ABSTRACT

Additive manufacturing is a modern manufacturing method that uses computer-controlled three-dimensional solid model data. The aim of additive manufacturing; It is to gradually produce the material and bring it to its final shape. In this way, products with complex geometries are relatively easier to obtain than other classical methods.

In particular, it is preferred in a wide area such as the aerospace industry, biomedical and defense industry, where it is necessary to produce parts with high measurement accuracy, high strength and low weight. Additive manufacturing consists of many sub-methods and these methods depend on many criteria such as the type of material, the size of the part, the purpose of use, the principle of operation, the precision and properties of the materials, the number and speed of production. Selective laser melting (SLM) method is generally preferred among additive manufacturing methods. However, many factors can affect the SLM process, including direct and indirect parameters. The aim of this study is to examine the effect of different production parameters on the mechanical properties of Ti6Al4V alloy material produced using the SLM method. For this purpose, four different production parameters and levels are determined as production parameters. Tensile strength, modulus of elasticity and elongation percentage are selected as the evaluation criteria. Taguchi L16 is preferred in experimental design. S/N analysis is used when evaluating the results of the experiment. Variance analysis (ANOVA) is performed to determine the level of impact of control factors. Optimum parameters for tensile strength with the data obtained from the results of the experiment are determined as 75 µm laser focal diameter, 230 W laser power, 60 µm scanning distance and 300 mm/s speed scanning speed, while 60 µm scanning distance for the elasticity module, 450 mm/s scanning speed, 80 µm laser focal diameter and 250 W laser power and 90 µm laser focus diameter for elongation amount, 150 µm scanning distance, 450 mm/s scanning speed and 230 W laser power are determined.

Keywords: Additive manufacturing, Mechanical properties, Ti6Al4V, Selective laser melting

I. GİRİŞ

Üç boyutlu model verilerinden nesnelere üretimine olanak sağlayan eklemeli imalat yöntemi, malzeme, üretim ve teslimat süreçleri açısından sunduğu avantajlar nedeniyle hem akademik hem de endüstriyel araştırmalara konu olmakta ve kapsamı günden güne giderek artmaktadır [1]. Bu yöntem, bileşenlerin geliştirilmiş tasarımına ve hızlı üretimine imkân sağlamaktadır. Özellikle karmaşık parçaların üretimini ve onarımını kolaylaştırmaktadır [2]. Bu imalat yöntemi, mühendisliğe yenilikçi bir yaklaşım sağlamaktadır. Eklemeli imalat yöntemleri kullanılan malzemenin şekli, ekleme tekniği, enerji kaynağının türü ve işlemin konfigürasyonu gibi birçok kritere bağlı olarak değişiklik göstermektedir [3]. Eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan seçici lazer ergitme (SLM), genellikle tercih edilen bir yöntemdir. SLM, karmaşık geometrilere ve içyapılara sahip neredeyse tam yoğunluklu nesnelere veya ince parçaların üretimini sağlayan yenilikçi teknoloji modern bir imalat süreci sunmaktadır [4]. SLM işlemi, martensitik çelik, H13 takım çeliği, alüminyum alaşımları ve titanyum alaşımları gibi çeşitli metalik malzemelerin üretiminde aktif olarak kullanılmaktadır [5]. Ti6Al4V titanyum alaşımı, yüksek özgül mukavemet, mükemmel korozyon direnci, düşük yoğunluk ve biyouyumluluk gibi kimyasal ve mekanik özelliklerinden dolayı, SLM yöntemiyle üretilen parçaların endüstriyel uygulamaları için oldukça umut vermektedir [6].

SLM yöntemi, toz haldeki metal malzemenin yüksek yoğunluklu bir lazer güç kaynağı yardımıyla katman katman eritilip net şekle yakın üç boyutlu bir parça üretilmesi prensibine dayanmaktadır [7], [8]. SLM yönteminde metal tozları lazer ışını ile taranmakta ve eritilmektedir. Böylelikle hızlı soğutma, yüksek yoğunluk ve yüksek sertlik gibi bazı avantajlar sunmaktadır. SLM, havacılıkta yaygın olarak tercih edilen Ti6Al4V alaşımı ile soğutma kanalları, iç boşluklar gibi karmaşık geometrilere sahip parçaların üretimi için oldukça yüksek potansiyel uygulamalara sahiptir. Ayrıca geleneksel imalat yöntemleriyle karşılaştırılabilir mekanik özellikler elde edilmekte ve bu yöntemle karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesinde iyileştirmeler sağlanmaktadır. Bu nedenle eklemeli imalat yöntemleri arasında sıklıkla tercih edilen yöntemdir [9]–[14].

Literatürde SLM yöntemiyle üretilen Ti6Al4V alaşımının çekme testiyle ilgili yeterli çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle benzer çalışmalardan bazılarında aşağıda değinilmiştir. Han ve diğ. [9] Ti6Al4V alaşımını 194 W lazer gücü, 20 µm katman kalınlığı, 400~1100 mm/sn arasında bir tarama hızı ve 70~120 µm arasında değişen bir tarama mesafesi kullanarak üretmişlerdir. Çalışmanın sonucunda araştırmacılar, XOY ve XOZ arasında artık çekme gerilmeleri ve mikrosertlik anizotropisi, optimize edilmiş enerji yoğunlukları (120~190 J/mm³) kullanarak 1268 MPa'lık bir çekme mukavemeti ve %4,2'lik bir uzama elde etmişlerdir. Enerji yoğunluğunun numunelerin mikroyapısını ve mekanik

özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynadığını öne sürmüşlerdir. Sun ve diğ. [15] SLM yöntemi ile 0°, 45° ve 90° yapım yönleri kullanarak Ti6Al4V alaşım numuneleri üretmişlerdir. Numunelerin mekanik özellikleri, giriş parametreleri olarak 350 W lazer gücü, 0.08 mm lazer odak çapı, 1000 mm/s tarama hızı ve 0.06 mm katman kalınlığı kullanılarak incelenmiştir. Deneysel sonuçların analizinde 45° kullanılarak üretilen numunelerin daha yüksek çekme mukavemeti (963,50 MPa) ve uzama değerlerine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Chang ve diğ. [16], SLM yöntemiyle Ti6Al4V alaşımından numuneler üretmişlerdir. Araştırmacılar çalışmalarında 350 W lazer gücü, 1250 mm/s tarama hızı, 0,06 mm katman kalınlığı ve zikzak tarama stratejisi kullanmışlardır. Deneysel çalışma sonucunda dikey yönde üretilen numunelerin uzama miktarı (%17,7) yatay yönde üretilen numunelerin uzama miktarından daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Wang ve diğ. [17], SLM yöntemiyle Ti6Al4V alaşımını üretmişlerdir. Araştırmacılar, çalışmalarında bir dizi parametre üzerinden mikro yapı ve mekanik özellikleri incelemişlerdir. Girdi parametreleri olarak 50 ila 250 W aralığında lazer gücü, 250 ila 1750 mm/s aralığında tarama hızı, 30 µm katman kalınlığı, 100 µm tarama mesafesi ve 60° tarama açısı kullanılmıştır. Deneysel sonuçları analiz eden araştırmacılar, 200~250 W lazer gücü ve 850~1150 mm/s tarama hızı ile optimal sonuçlara ulaşmışlardır. Ayrıca belirlenen parametre grubunda artan tarama hızı ile uzama miktarının arttığını ve 1150 mm/s tarama hızında %7,8 uzama elde ettiklerini iddia etmişlerdir. Shi ve diğ. [18] yaptıkları çalışmada Ti6Al4V alaşımını ürettiler. 400 W lazer gücü kullanılarak yapılan çalışmada, 40~80 mm/s aralığında tarama hızı ve yüksek tabaka kalınlığı, nispeten pürüzlü bir yüzeye sahip numunelerin nihai çekme mukavemetini 1050 MPa ve uzama değerini %7.03 seviyesinde elde etmişlerdir. Bunun metalurjik yapışma ve mikro yapıdan kaynaklandığını öne sürmüşlerdir. Literatür taraması göstermiştir ki Ti6Al4V alaşımının çekme dayanımı, elastisite modülü ve uzama miktarıyla ilgili yeterli çalışma mevcut değildir.

Mevcut çalışmada, SLM yöntemiyle üretilen Ti6Al4V alaşımının üretimi sırasında farklı proses parametrelerinin çekme dayanımı, elastisite modülü ve uzama miktarı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla bir dizi deney yapılmıştır. Deneyler sırasında üretim parametresi olarak dört ana parametre ve bu parametrelere ait dört farklı seviye kullanılmıştır. Deney tasarımında Taguchi L₁₆ ortogonal dizilim kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan malzemeler, deney tasarımının detayları ve ölçüleri, deney sonuçları, elde edilen sonuçlar ve bunların tartışılmasının detayları aşağıdaki bölümlerde sunulmaktadır.

II. DENEYSEL PROSEDÜR

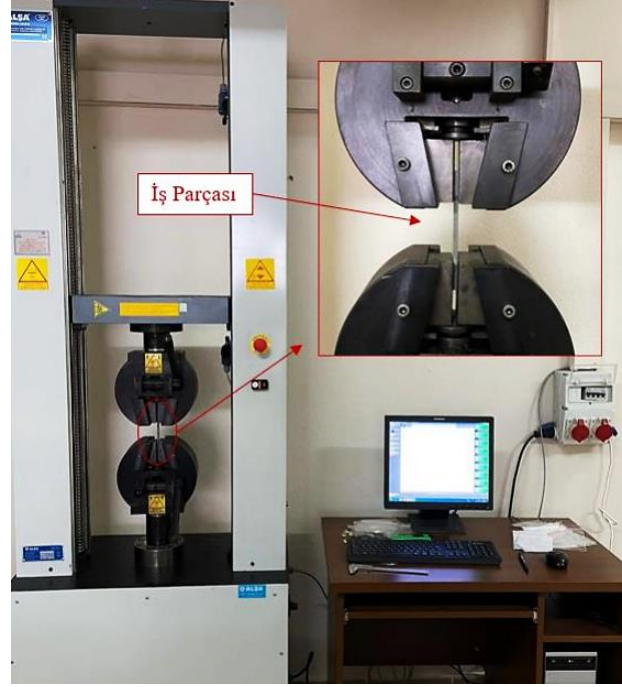
Mevcut çalışmada, Ti6Al4V titanyum alaşımının seçici lazer ergitme yöntemi ile birlikte üretim parametrelerinin çekme dayanımına, elastisite modülüne ve % uzama miktarına etkileri incelenmiştir. Ti6Al4V alaşım malzemeli iş parçası ASTM E 8M çekme standartları dikkate alınarak 16 adet iş parçası üretilmiştir. İş parçasının üretimi sırasında kullanılan gaz atomize Ti6Al4V metal tozları AP&C firması tarafından tedarik edilmiştir. Yapılan deneylerde çıktı parametresi, çekme mukavemeti, elastisite modülü, uzama miktarı olarak belirlenmiştir. Tablo 1’de deneyde kullanılan iş parçasına ait kimyasal bileşimi verilmiştir.

Tablo 1. Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi

Element	Al	V	Fe	C	O	N	H	Ti
Oran (%)	5,5~6,5	3,5~4,5	0~0,25	0~0,08	0~0,013	0~0,05	0~0,012	Denge

Üretim hacmi 250×250×300 mm olup maksimum lazer gücü 500 W olan Ermaksan Ena Vision 250 model SLM yazıcısında gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyde yatay yönlendirme (XZ-kenar yönü), şerit tarama stratejisi, 67° tarama açısı ve 30 µm katman kalınlığı sabit tutularak üretim yapılmıştır. Değişken parametreler ise lazer odak çapı (µm), tarama mesafesi (µm), tarama hızı (mm/sn) ve lazer gücü (W) olarak belirlenmiştir. Değişken ve sabit parametre seviyelerinin belirlenmesinde literatür bilgisi, araştırmacıların önceki çalışmaları ve ön deneyler etkili olmuştur. Çekme deneyi, 10 kN kapasiteye sahip Alşa firmasının MCK 10 elektromekanik çekme test cihazı kullanılarak ve 2 mm/dk hız altında

gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde ASTM E 8M çekme deneyi standartları dikkate alınmıştır. Bu deney, iş parçasının mukavemetini ve mekanik özelliklerini anlamak için oldukça önemlidir. Deneylerde kullanılan çekme cihazı ve iş parçasının çekme cihazına bağlanması Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. MCK 50 elektronik çekme testi cihazı ve iş parçasının bağlanması

Çalışmada, mekanik deney sonuçları ve sonrasında SLM üretim parametrelerinin bir fonksiyonu olarak elde edilen çıktı değerleri için Minitab 17 programı kullanılarak ANOVA analizleri yapılmıştır.

III. DENEY TASARIMI

Taguchi metodu, mühendislik deneylerinin tasarımı ve analizinde kullanılan önemli bir optimizasyon tekniğidir. Bu metot, dikey diziler yardımıyla deneylerin sayısını önemli ölçüde azaltmaktadır. Ayrıca kontrol edilemeyen faktörlerin etkisini de en aza indirmektedir [19]. Çekme deneyinde optimum kontrol faktörlerinin ve bu faktörlere ait seviyelerin belirlenmesinde Taguchi L₁₆ ortogonal dizini tercih edilmiştir. Kontrol faktörleri ve seviyeleri Tablo 2’de listelenmiştir.

Tablo 2. Deneylere ait kontrol parametreleri ve 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/sn	C	150	300	450	600
Lazer Gücü	W	D	190	210	230	250

Bu çalışmada, çekme dayanımı, elastisite modülü ve % uzama miktarı değerlerinin en büyük olması istendiğinden, S/N oranlarının hesaplanmasında “en büyük en iyi” amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Eşitlik 1’de buna ait değeri veren formül kullanılmıştır.

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

Burada, y deney sonucunu ve n, y değerlerinin sayısını ifade etmektedir [19]. Deney tasarımı sırasında kullanılan L₁₆ ortogonal dizisi Tablo 3'te listelenmiştir.

Tablo 3. Taguchi L16 deney tasarımı

Deney Sayısı	Kontrol Faktörleri ve Seviyeleri			
	A	B	C	D
1	75	60	150	190
2	75	90	300	210
3	75	120	450	230
4	75	150	600	250
5	80	60	300	230
6	80	90	150	250
7	80	120	600	190
8	80	150	450	210
9	85	60	450	250
10	85	90	600	230
11	85	120	150	210
12	85	150	300	190
13	90	60	600	210
14	90	90	450	190
15	90	120	300	250
16	90	150	150	230

Deneyde kullanılan kontrol faktörlerinin ve bu faktörlerin seviye değerlerinin etki oranlarını belirlemek amacıyla ANOVA yapılmıştır. Varyans analizi %95 güven aralığı ile yapılmıştır. Yapılan optimizasyon işleminde Minitab 17 programı kullanılmış ve analizler bu şekilde gerçekleştirilmiştir.

III. DENEY TASARIMI

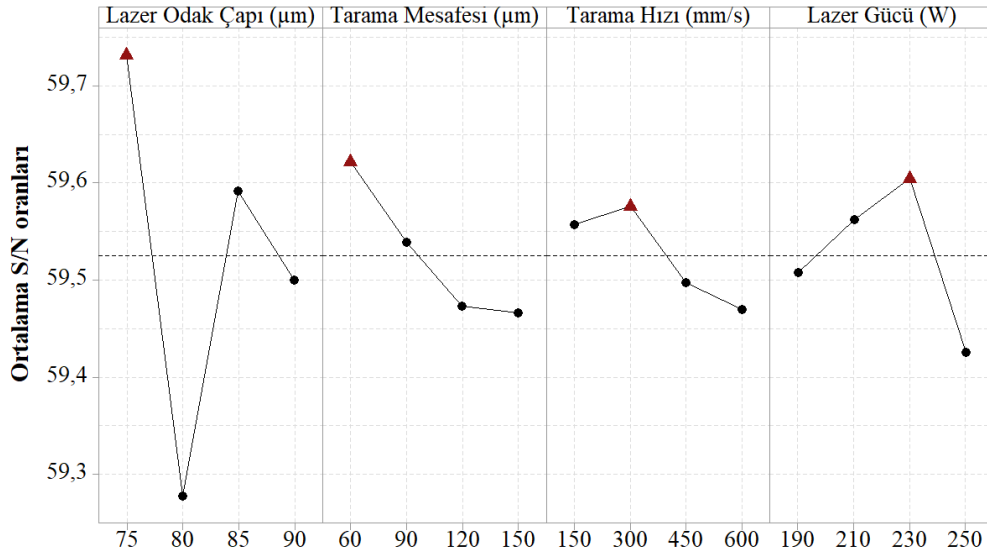
A. S/N ORAN ANALİZİ VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Ti6Al4V alaşımının çekme deneyi sonucunda ortaya çıkan çekme dayanımı, elastisite modülü ve uzama değerleri ile bunlara ait S/N değerleri Tablo 4'te listelenmiştir.

Tablo 4. Deney sonuçları ve bunlara ait S/N değerleri

Deney Sayısı	Kontrol Faktörleri				Deneysel Sonuçlar					
	A	B	C	D	Çekme Dayanımı (N/mm^2)	S/N Oranı (dB)	Elastisite Modülü (GPa)	S/N Oranı (dB)	Uzama (%)	S/N Oranı (dB)
1	75	60	150	190	982,71	59,84851	64,2	36,1507	12,882	22,19967
2	75	90	300	210	974,34	59,7742	64,9	36,2448	13,358	22,5148
3	75	120	450	230	968,57	59,7226	76,4	37,6618	12,274	21,7797
4	75	150	600	250	953,01	59,5819	60,3	35,6063	18,408	25,3001
5	80	60	300	230	951,53	59,5684	71,6	37,0982	16,816	24,5144
6	80	90	150	250	913,48	59,2129	66,2	36,4171	14,232	23,0653
7	80	120	600	190	900,8	59,0925	59,5	35,4903	11,412	21,1472
8	80	150	450	210	915,62	59,2343	81,7	38,2444	16,198	24,1892
9	85	60	450	250	944,26	59,5013	52,8	34,4526	18,203	25,2028
10	85	90	600	230	959	59,6363	62,2	35,8758	20,182	26,0992
11	85	120	150	210	963,01	59,6726	50,6	34,0830	17,298	24,7599
12	85	150	300	190	950,33	59,5574	40	32,0411	17,258	24,7398
13	90	60	600	210	951,63	59,5693	45,7	33,1983	16,954	24,5854
14	90	90	450	190	947,52	59,5317	32,2	30,1571	21,828	26,7802
15	90	120	300	250	933,81	59,4051	37,4	31,4574	14,872	23,4473
16	90	150	150	230	943,36	59,4935	40,8	32,2132	22,328	26,9770

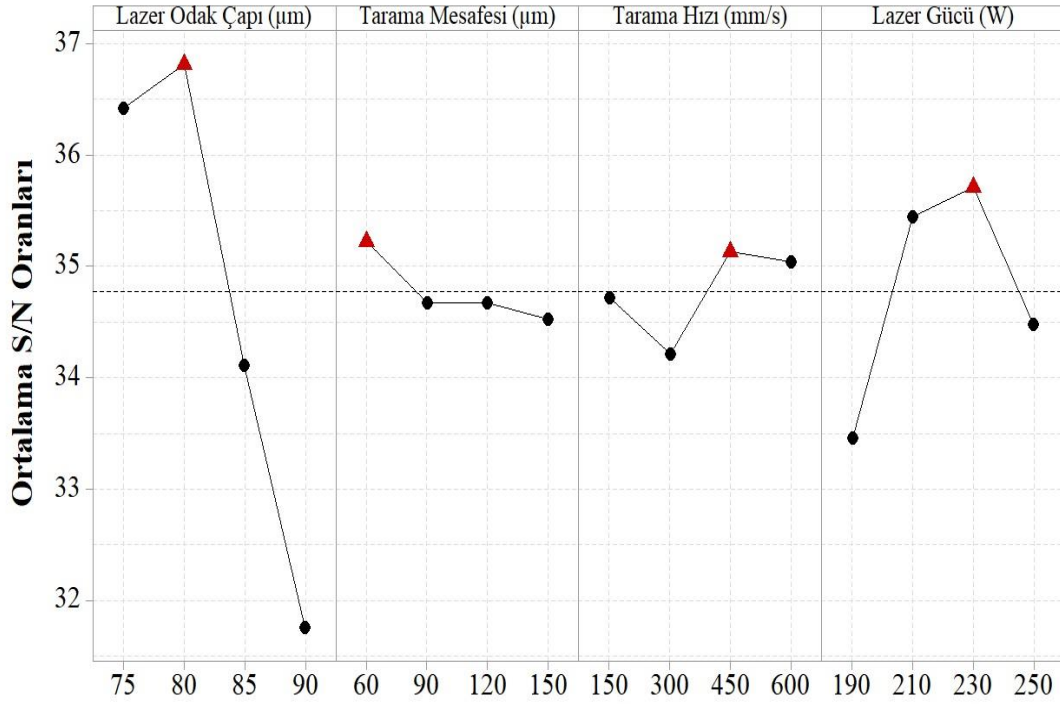
S/N ana etki grafiğinde kontrol faktörlerine ait en yüksek değer, ilgili faktörün optimum değerini vermektedir. Şekil 2’de çekme dayanımı, Şekil 3’te elastisite modül ve Şekil 4’te uzama değerlerine ait S/N ana etki grafikleri verilmiştir. Ayrıca, Tablo 5’ de bu ana etki grafiklerin sayısal değerlerini gösteren S/N yanıt tablosu gösterilmiştir.



Signal-to-noise: Larger is better

Şekil 2. Çekme Dayanımı için S/N oranları ortalama değerleri

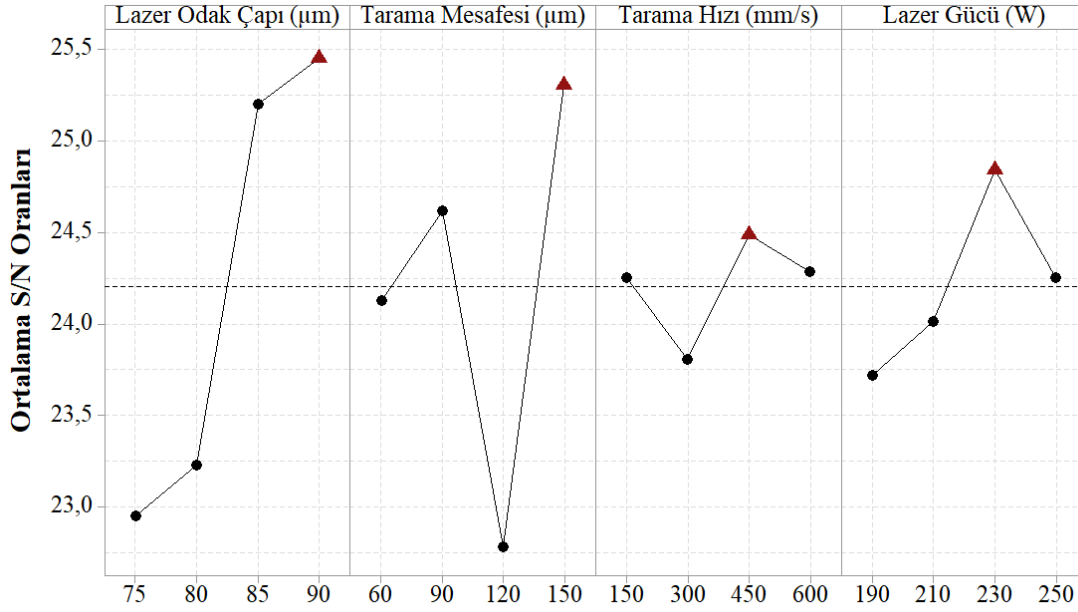
Şekil 2 verilen çekme dayanımı için S/N ana etki grafiği incelendiğinde 75 μm lazer odak çapı seviyesinde en yüksek dayanım elde edilmiştir. Lazer odak çapı 80 μm seviyesine arttırıldığında dayanımda azalma gözlemlenmiştir. Tarama mesafesinin artmasına bağlı olarak dayanım değerinde azalma meydana gelmiştir. Tarama mesafesi için en düşük dayanım değeri 150 μm seviyesinde gözlemlenirken en yüksek dayanım 60 μm seviyesinde elde edilmiştir. Tarama hızı için inceleme yapıldığında en düşük dayanımın 600 mm/s seviyesinde elde edildiği gözlemlenmiştir. Tarama hızının 150 mm/s seviyesinden 300 mm/s seviyesine çıkarılması dayanımın artmasına neden olduğu ve en yüksek dayanımın 300 mm/s seviyesinde elde edildiği gözlemlenmiştir. Lazer odak çapı için seviyelerdeki artış ile dayanımın arttığı ancak 230 W lazer gücünden daha yüksek bir seviyede lazer gücü kullanımıyla dayanımın azaldığı görülmektedir. Lazer gücü için en yüksek dayanım değerine 230 W lazer gücü kullanılarak elde edilirken en düşük dayanım değeri 250 W lazer gücü ile elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu durumda 75 μm lazer odak çapı, 60 μm tarama mesafesi, 300 mm/s tarama hızı ve 230 W lazer gücü kullanılarak optimum çekme dayanım değerleri elde edilmiştir.



Signal-to-noise: Larger is better

Şekil 3. Elastisite modül için S/N oranları ortalama değerleri

Seçici lazer ergitme sürecinde elde edilen sonuçların analizinde elastisite modül için süreci etkileyen kontrol faktörlerinin etkileri incelenmiştir. Şekil 3'te elastisite modül değeri için S/N ana etki grafiği verilmiştir, grafik incelendiğinde; lazer odak çapı için en düşük elastisite modül değeri 90 µm seviyesinde elde edilmiştir. Seviye değerleri 90 µm 80 µm doğru azaldıkça elastisite modül değeri doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek elastisite modül değerine 80 µm seviyesinde ulaşılmıştır. Tarama mesafesi faktörü incelendiğinde 150 µm seviyesinde en düşük elastisite modül elde edilirken en yüksek değere 60 µm seviyesinde ulaşılmıştır. 150 µm seviyesinden 60 µm seviyesine doğru azalma gösterdikçe elastisite modül değerinde artış gözlemlenmiştir. Tarama hızı için inceleme yapıldığında en düşük değere 300 mm/s seviyesinde ulaşılırken en yüksek değere 450 mm/s seviyesinde ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Seviye değerindeki bu artış elastisite modül değerinde artışa sebep olmuştur. Daha yüksek tarama hızı kullanıldığında azalma gözlemlenmiştir. Lazer gücü için inceleme yapıldığında 190 W seviyesinde en düşük değer elde edilirken, lazer gücünün artmasıyla elastisite modül değerinin iyileştiği gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak en yüksek değere 230 W seviyesinde ulaşılmıştır. Bu durumda, 80 µm lazer odak çapı, 60 µm tarama mesafesi, 450 mm/sn tarama hızı ve 250 W lazer gücünün bir kombinasyonu kullanılarak optimum elastisite modülü elde edilmektedir.



Signal-to-noise: Larger is better

Şekil 4. % uzama miktarı için S/N oranları ortalama değerleri

Şekil 4'te verilen % uzama miktarı için S/N ana etki grafiği incelendiğinde lazer odak çapı için 75 µm seviyesinden 90 µm seviyesine çıkıldıkça % uzama miktarında iyileşmeler olduğu gözlemlenmiştir. En düşük % uzama miktarına 75 µm seviyesinde ulaşılırken en yüksek uzama miktarına 90 µm seviyesinde ulaşılmıştır. Tarama mesafesinde 60 µm'den 90 µm seviyesine çıkıldıkça % uzama miktarında artma gözlemlenirken seviye değerinin daha da artmasıyla uzama miktarında azalma meydana gelmiştir ve en düşük % uzama miktarı 120 µm seviyesinde elde edilmiştir. 120 µm'den 150 µm seviyesine çıkıldığında % uzama miktarında iyileşmeler gözlemlenerek 150 µm'de en yüksek seviye değerine ulaşılmıştır. Bu durumda lazer odak çapı için 90 µm, tarama mesafesi için 150 µm, tarama hızı için 450 mm/sn ve lazer gücü için 230 W seviye kombinasyonları kullanılarak optimum uzama değerine ulaşılmıştır. Deneyde kullanılan alaşım için gerçekleştirilen uzama miktarı malzemenin sünek bir yapıya sahip olduğunun göstergesi olarak düşünülmektedir.

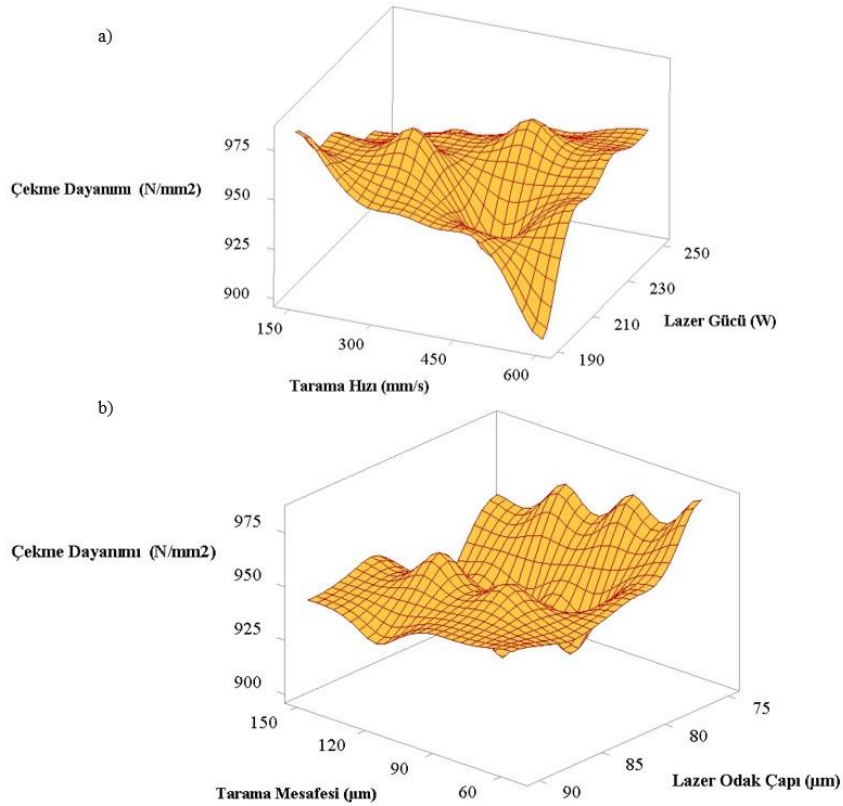
Tablo 5. Deney sonuçlarına ait S/N yanıt tabloları

Seviyeler	Kontrol Faktörleri			
	A	B	C	D
Çekme dayanımı				
1	59,73	59,62	59,56	59,51
2	59,28	59,54	59,58	59,56
3	59,59	59,47	59,50	59,61
4	59,50	59,47	59,47	59,43
Delta	0,45	0,16	0,11	0,18
Elastisite modülü				
1	36,42	35,22	34,72	33,46
2	36,81	34,67	34,21	35,44
3	34,11	34,67	35,13	35,71

Tablo 5 (devamı). Deney sonuçlarına ait S/N yanıt tabloları

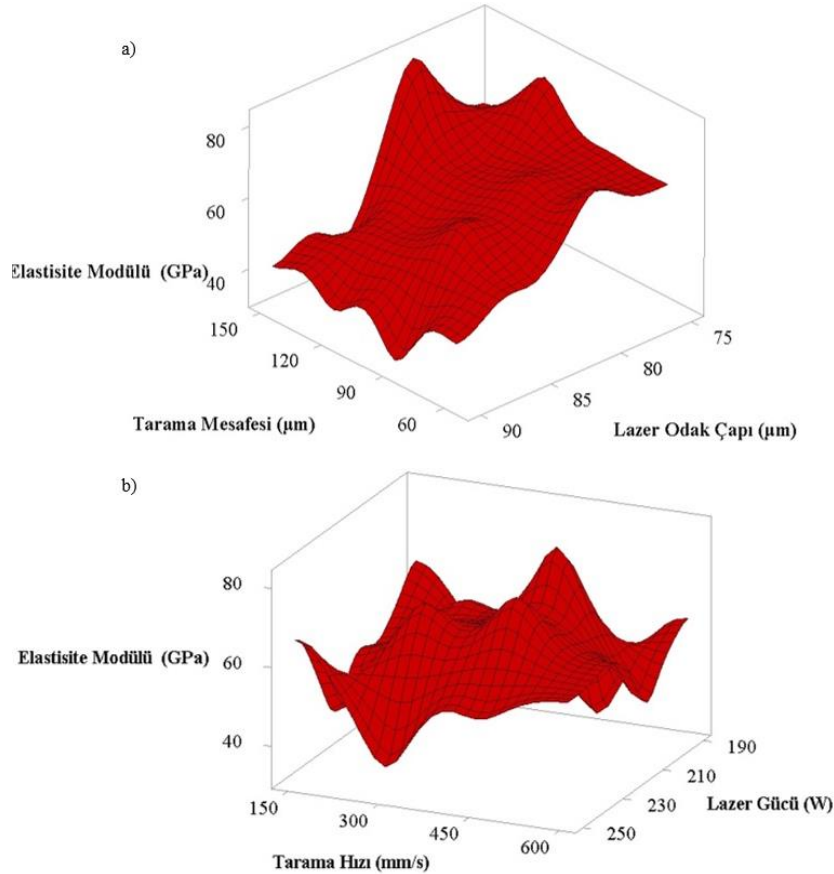
4	31,76	34,53	35,04	34,48
Delta	5,06	0,70	0,92	2,25
% Uzama miktarı				
1	22,95	24,13	24,25	23,72
2	23,23	24,61	23,80	24,01
3	25,20	22,78	24,49	24,84
4	25,45	25,30	24,28	24,25
Delta	2,50	2,52	0,68	1,13

Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4 ve Tablo 5’ te verilen görsel ve sayısal ifadelerden de anlaşılacağı gibi her bir kontrol faktör oranının en yüksek olduğu seviye değerleri ilgili parametreye ait optimum değer olarak tanımlanmaktadır. Başka bir deyişle, çekme dayanımı için optimum kontrol parametreleri lazer odak çapı için seviye 1 (S/N oranı 59,73 dB), tarama mesafesi için seviye 1 (S/N oranı 59,62 dB), tarama hızı için seviye 2 (S/N oranı 59,58 dB) ve lazer gücü için seviye 3 (S/N oranı ise 59,61 dB) olduğu görülürken elastisite modül için optimum kontrol parametre seviyeleri lazer odak çapı için seviye 2 (S/N oranı 36,81 dB), tarama mesafesi için seviye 1 (S/N oranı 35,22 dB), tarama hızı için seviye 3 (S/N oranı 35,13 dB) ve lazer gücü için seviye 3 (S/N oranı ise 35,71 dB) olduğu görülmektedir. Optimum % uzama değerini veren parametre seviyeleri ise lazer odak çapı için seviye 4 (S/N oranı 25,45 dB), tarama mesafesi için seviye 4 (S/N oranı 25,30 dB), tarama hızı için seviye 3 (S/N oranı 24,49 dB) ve lazer gücü için seviye 3 (S/N oranı ise 24,84 dB) olduğu görülmektedir. Kontrol faktörleri için S/N ana etki grafiği S/N yanıt tablosunu destekler niteliktedir. Şekil 5’te çekme dayanımına ait üç boyutlu grafik gösterilmektedir.



Şekil 5. SLM parametrelerinin çekme dayanımı üzerindeki etkisi: (a) tarama hızı ve lazer gücü, (b) tarama mesafesi ve lazer odak çapı

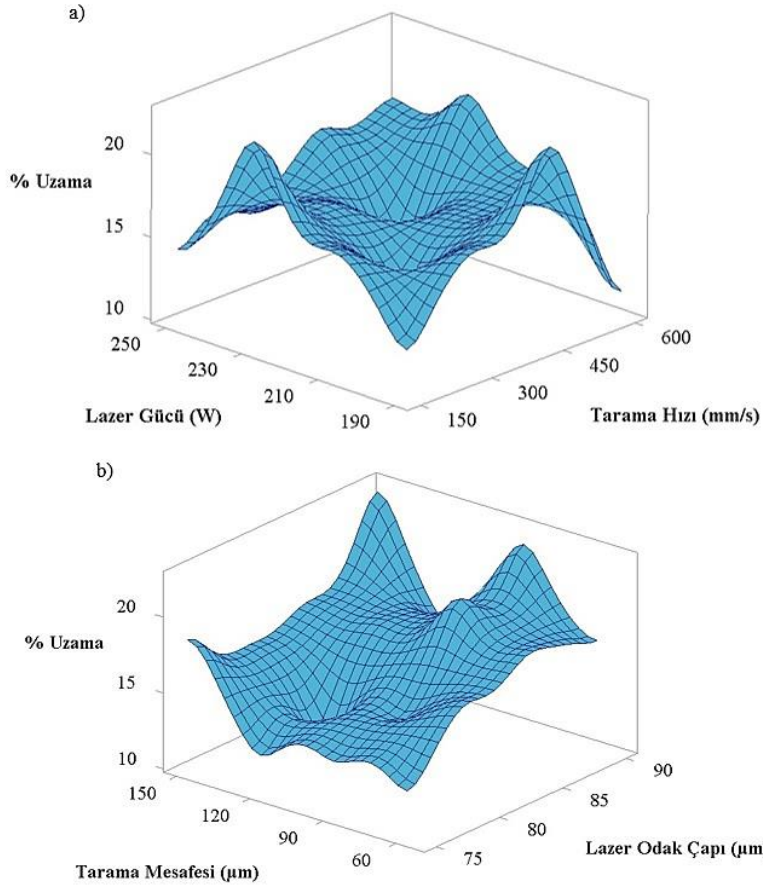
Şekil 5a incelendiğinde tarama hızı için en yüksek dayanım değerine 300 mm/sn (974,34 MPa) ile ulaşılırken düşük dayanıma 600 mm/sn (900,8 MPa) seviyesinde ulaşıldığı görülmektedir. Lazer gücünün çekme dayanımı üzerindeki etkisi incelendiğinde, lazer güç seviyesinin artırılması çekme dayanımının iyileşmesine yol açmaktadır. Lazer gücü için en yüksek dayanım değeri 230 W (968,57 MPa) ile elde edilirken, en düşük dayanım 190 W (900,8 MPa) ile elde edilmiştir. SLM işleminde ortalama bir tarama hızı ve lazer gücü kullanılarak kararlı bir yapı elde edildiğine ve bu durumun dayanımı önemli ölçüde etkilediği düşünülmektedir. Şekil 5b'de lazerin odak çapı arttıkça çekme dayanımının azaldığı görülmektedir. Lazer odak çapı, 75 µm seviyesinde en yüksek dayanım değerine ve 80 µm seviyesinde en düşük dayanım değerine sahiptir. Lazerin odak çapına göre çekme dayanımı incelendiğinde 75 µm seviyesindeki gerilme dayanım değeri 982,71 MPa iken 80 µm seviyesindeki gerilme dayanımı 913,48 MPa'dır. Bu nedenle, lazerin odak çapını 75 µm'den 80 µm'ye çıkarmak, gerilme dayanımında %7,6'lık bir azalma ile sonuçlanır. Tarama mesafesinin artmasıyla çekme mukavemetinin olumsuz etkilendiği ve mukavemetin düştüğü görülmektedir. Tarama mesafesinin artırılması aynı zamanda eriyik havuz boyutunu da artırır. Bu nedenle eksik ergitme işlemi içyapıda kusurların oluşmasına yol açmakta ve dayanımı azalttığı düşünülmektedir. En yüksek dayanım değerine tarama mesafesinde 60 µm (982,71 MPa) ile ulaşılmıştır. Artan tarama mesafesi ile çekme dayanımı azaldığı için en düşük mukavemet değeri 150 µm (915,62 MPa) seviyesinde elde edilmiştir. Tarama hızındaki artışın, toz malzemeyi ergitmek için yetersiz zamanın ve buna bağlı olarak oluşabilecek kusurların çekme dayanımını azalttığı düşünülmektedir. Şekil 6'da elastisite modülüne ait üç boyutlu grafik gösterilmektedir.



Şekil 6. SLM parametrelerinin elastisite modül üzerindeki etkisi: (a) tarama mesafesi ve lazer odak çapı, (b) tarama hızı ve lazer gücü

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, tipik Ti6Al4V alaşımının elastisite modülünden daha düşüktür. Bu durum, aşırı doygun V atomları nedeniyle kafes genişlemesine ve kafes üzerindeki büyük kusurlara (çıkıklar, ikizler ve istifleme hataları gibi) bağlanabilmektedir [4]. Şekil 6'da gösterilen üç boyutlu

grafik incelendiğinde kontrol faktörlerinin seviye değerlerine bağlı olarak elastisite modülünde değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Artan lazer gücü seviyesi ile elastisite modülünün arttığı görülmektedir. Özellikler üzerinde aynı etki, tarama mesafesi ve/veya lazer odak çapı azaltılarak da elde edilebilmektedir. Şekil 6a incelendiğinde lazer odak çapının seviye değerlerinin artması elastisite modülünde büyük ölçüde azalmaya neden olduğu görülmektedir. Bu durum, mikroyapısal homojensizliğin elastisite modülü değerlerinde değişkenliğe neden olduğu düşünülmektedir. Şekil 6b'de ise tarama mesafesi seviye değerleri arttıkça elastik modülün olumsuz etkilendiği görülmektedir. Lazer odak çapının ve tarama mesafesinin seviye değerlerinin artması, eriyik havuzunun boyutunun artmasına neden olmaktadır. Bu durumun eriyik havuzunun stabil bir yapıya ulaşmamasına ve dolayısıyla elastik modül değerinin düşmesine neden olduğu düşünülmektedir. Lazer odak çapı için en yüksek değer 80 μm ile 81,7 GPa, en düşük değer ise 90 μm ile 32,2 GPa elde edilmiştir. Tarama mesafesi için elastisite modülüne bakılacak olursa, en yüksek değer 60 μm ile 71,6 GPa, en düşük değer ise 150 μm ile 40,8 GPa ulaşmıştır. Tarama hızı göz önüne alındığında, en düşük sonuç 300 mm/sn'de 37,8 GPa, en yüksek değer ise 450 mm/sn'de 81,7 GPa olduğu görülmektedir. Tarama hızı arttıkça elastisite modülü değeri %53,73 oranında iyileşme göstermiştir. 300 mm/sn tarama hızı ve tarama mesafesinin üst düzey kombinasyonları da elastik modülün azaltılmasında aktif rol oynamıştır. Lazer gücü açısından en düşük elastisite modülü değeri 190 W (32,2 GPa) lazer gücü ile elde edilirken, en yüksek elastisite modülü değeri 230 W (71,6 GPa) lazer gücü ile elde edilmiştir. Bu çalışma sonucunda, veriler incelendiğinde, kontrol faktörleri için farklı seviye değerleri kullanılarak elde edilen elastisite modülündeki farklılıklar, farklı seviye değerlerinden kaynaklanan mikroyapıda oluşan kusurlar, toz malzemeyi ergitecek enerji yoğunluğu, numune içerisindeki gözeneklilik değeri ve üretim sırasındaki bağımsız değişkenliğin değişkenliğe neden olduğu düşünülmektedir. Şekil 7'de % uzama değerine ait üç boyutlu grafik gösterilmektedir.



Şekil 7. SLM parametrelerinin % uzama miktarı üzerindeki etkisi: (a) tarama hızı ve lazer gücü, (b) tarama mesafesi ve lazer odak çapı

Şekil 7a incelendiğinde artan lazer gücü ve tarama hızı uzama açısından olumlu sonuçlar göstermiştir. Lazer gücü için en düşük değer 190 W (%11,412) seviyesiyle elde edilirken, en yüksek değer 230 W (%22,328) seviyesinde elde edilerek %48,9 oranında iyileşme gözlemlenmiştir. Tarama hızına bakıldığında en düşük değer 300 mm/sn'de %13,358 iken en yüksek değer 450 mm/sn'de %21,288 iken uzama miktarında ise %38,8'lik bir iyileşme görülmektedir. Şekil 7b'de ise lazer odak çapı ve tarama mesafesinin uzama miktarına etkisi görülmektedir. Lazerin odak çapı için en düşük uzama miktarı %12,274 değeri ile 75 µm'de elde edilirken, en yüksek uzama miktarı 90 µm seviyesinde %21,828'dir. Tarama mesafesi açısından en düşük değer 120 µm seviyesinde (%11,412) elde edilirken, en yüksek uzama miktarı 150 µm seviyesinde (%22,328) elde edilmiştir. Tarama mesafesindeki bu artış, uzama miktarında %48,9'luk bir iyileşme ile sonuçlanmıştır.

B. VARYANS ANALİZİ (ANOVA)

Deney tasarımı esnasında kullanılan kontrol faktörlerinin etkileşimlerini, performans özellikleri üzerindeki etkilerini ve farklı parametre seviyelerinde performans özelliklerindeki değişiklikleri belirlemek için varyans analizi kullanılmıştır [19]. Tablo 6'da çekme dayanımı, elastisite modülü ve uzama miktarına ait ANOVA sonuçları verilmiştir. Varyans analizleri %95 güven aralığı ile yapılmıştır. Burada SD değeri serbestlik derecesini, KT değeri karelerin toplamını, KO değeri karelerin ortalamasını ve PCR ise kontrol faktörlerinin etki oranlarını temsil etmektedir.

Tablo 6. ANOVA tablosu

Faktörler	SD	KT	KO	F	P	PCR
Çekme Dayanımı						
Lazer Odak Çapı (µm)	3	5131,3	1710,4	14,71	0,027	69,20%
Tarama Mesafesi (µm)	3	737,5	245,8	2,11	0,277	9,95%
Tarama Hızı (mm/sn)	3	349,0	116,3	1,00	0,500	4,71%
Lazer Gücü (W)	3	848,5	282,8	2,43	0,242	11,44%
Hata	3	348,8	116,3	-	-	4,70%
Toplam	15	7415,1	-	-	-	100,00%
Elastisite Modülü						
Lazer Odak Çapı (µm)	3	2423,41	807,804	16,84	0,022	76,26%
Tarama Mesafesi (µm)	3	20,56	6,852	0,14	0,928	0,65%
Tarama Hızı (mm/sn)	3	114,45	38,149	0,80	0,572	3,60%
Lazer Gücü (W)	3	475,39	158,462	3,30	0,176	14,96%
Hata	3	143,92	47,972	-	-	4,53%
Toplam	15	3177,72	-	-	-	100,00%
Uzama Miktarı						
Lazer Odak Çapı (µm)	3	71,017	23,672	2,80	0,210	44,79%
Tarama Mesafesi (µm)	3	46,054	15,351	1,81	0,318	29,05%
Tarama Hızı (mm/sn)	3	5,331	1,777	0,21	0,884	3,36%
Lazer Gücü (W)	3	10,762	3,587	0,42	0,750	6,79%
Hata	3	25,382	8,461	-	-	16,01%
Toplam	15	158,547	-	-	-	100,00%

ANOVA sonuçlarına göre çekme dayanımı üzerinde lazer odak çapı %69,20, lazer gücü %11,44, tarama mesafesi %9,95 ve tarama hızı %4,71 etki oranlarına sahiptir. En etkili faktörün %69,20 oranıyla lazer odak çapı olduğu görülmektedir. Analiz hesaplanmasında oluşan hata oranı %4,70 çıkmıştır. Elastisite modülü için etki oranları sırasıyla lazer odak çapı %76,26, lazer gücü %14,96, tarama hızı %3,60 ve tarama mesafesi %0,65 olduğu görülmektedir. Çalışmada hata oranı %4,53 çıkmıştır. En etkili faktörün %76,26 oranıyla lazer odak çapı olduğu görülmektedir. Uzama miktarında ise en etkili kontrol faktörünün %44,79 etki oranıyla lazer odak çapı olduğu anlaşılmaktadır. Lazer odak çapını, sırasıyla tarama mesafesi %29,05, lazer gücü %6,79 ve tarama hızı %3,36 etki oranıyla takip ettiği görülmektedir. Yapılan analiz sonucunda hata oranı %16,01 seviyesinde çıkmıştır. Shi ve diğ. [18] çalışmalarında Ti6Al4V alaşımli numuneleri 400 W lazer gücü, 40 ile 80 mm/s aralığında tarama hızı ve 200 µm katman kalınlığı kullanarak üretmişlerdir. Yaptıkları çalışmada nispeten kaba yüzeye sahip numuneler elde edilirken numunelerin gerilme mukavemeti ve uzama yüzdeleri sırasıyla 1050 MPa ve %7,03 seviyesinde elde etmişlerdir. Araştırmacılar sonuçların analizinde bu durumun mikroyapı ve metalürjik yapışma nedeniyle kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir. Kong ve diğ. [11] yaptıkları çalışmada Ti6Al4V alaşımı için yoğunluk iyileştirme üzerine çalışmalar yapmışlardır. Araştırmacılar 177 W lazer gücü, 50-70 µm lazer odak çapı, 100-280 µm tarama mesafesi ve 50 µm katman kalınlığı değerlerini girdi parametresi olarak kullanmışlardır. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, gözenekliliğin alana göre %0,1'den küçük olduğunu gösterirken alaşımın mikroyapısı martensitik α' fazı sergilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca deney sonuçlarına göre çekme mukavemeti 920-960 MPa ve uzama miktarını %3-5 olduğu gözlemlenmiştir. Araştırmacılar, çekme numunelerinin kırılma yüzeylerinin, sünek ve gevrek kırılmanın bir karışımı olduğunu ileri sürmüşlerdir. Chang ve diğ. [16] Ti6Al4V alaşımını SLM yöntemiyle üreterek numunenin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Girdi parametresi olarak 350 W lazer gücü, 1250 mm/s tarama hızı, 0,1 mm tarama mesafesi ve 0,06 mm katman kalınlığı kullanmışlardır. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, numunelerde belirli bir dikey yorulma dağılımı olmasına rağmen, çekme dayanımı 953 MPa elde edilirken uzama miktarı %17,7 olarak elde edilmiştir. Araştırmacılar numunelerin uygun bir çekme dayanımı ve mükemmel süneklilik sergilediğini ileri sürmüşlerdir. Sonuç olarak yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar literatürle paralellik gösterdiği anlaşılmaktadır.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımı SLM yöntemiyle farklı üretim parametreleri ve bu parametrelere ait farklı seviye değerleri kullanılarak üretilmiştir. Üretim sonucunda belirlenen parametrelerin ve seviyelerin çekme dayanımı, elastisite modülü ve uzama miktarı üzerindeki etkiler incelenmiştir. Çalışmada bahsedilen birçok araştırmacı SLM yöntemi kullanılarak Ti6Al4V alaşımın mekanik özelliklerini iyileştirmek için çalışmalar yapmışlardır. Yapılan çalışmalar katman kalınlığı, lazer gücü, tarama hızı ve tarama mesafesi dahil olmak üzere üretim parametrelerinin etkilerini dikkate alan lazer enerji yoğunluğu, SLM ile üretilen malzemelerin işlenebilirliğini, mekanik özelliklerini ve mikro yapısının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır [9]. Wang ve diğ. [17], yüksek kalitede numune elde etmek ve mikroyapıdaki değişimi analiz etmek için SLM yöntemiyle işlenmiş titanyum alaşımının optimum yüzey pürüzlülük ve yoğunluk değerlerini saptamak için SLM üretim parametrelerinin optimizasyonu araştırmışlardır. Ayrıca optimum SLM parametre değerlerinde malzemelerin çekme özelliklerini de incelenmişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada girdi parametresi olarak 30 µm katman kalınlığı, 100 µm tarama mesafesi, 50-250W aralığında lazer gücü, 250-1750 mm/s aralığında tarama hızı ve 60° tarama açısı kullanmışlardır. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, tarama hızının 250 mm/s olduğu numunenin mikro yapısı bazı kaba ve eş eksenli tanelerden oluştuğunu ve tarama hızının hızla 550 mm/s'ye yükselmesiyle, mikro yapıdaki eğilimleri açıkça gözlemlenmiştir. Tarama hızının mikroyapıda önemli bir etken olduğunu belirtmişlerdir. Üretim parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştıran araştırmacılar hem tarama hızının hem de lazer gücünün çekme mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını belirtmişlerdir. Çekme dayanımları

1350-1400 MPa aralığında değiştiğini gözlemlenmişlerdir. Öte yandan uzama miktarı için tarama hızının ve lazer gücünün etkileri incelendiğinde 200-250 W lazer gücü aralığında uzama miktarı yaklaşık olarak %7,8 elde edilirken 275 W lazer gücü seviyesinde uzama miktarında azalma (%5) gözlemlenmiştir. Analiz tarama hızı için yapıldığında 700 mm/s tarama hızında uzama miktarı %3,8 elde edilirken tarama hızının artmasıyla uzama miktarının (%7,8) önemli ölçüde arttığını gözlemlenmişlerdir. Numunelerin gözeneklilik oranı %1'den düşük olduğu göz önünde bulundurularak nano- β partikülleri ve α (α') martensitik yapıları içeren mikroyapının değişiminde etkisinin önemli olduğunu ve β -fazının oluşması titanyum alaşımının sünekliliğini azalttığını ve α kolonilerinin kayma uzunluğu titanyum alaşımının uzama miktarında önemli bir rol oynadığını ileri sürmüşlerdir.

Taguchi yöntemi ile yapılan optimizasyonun optimum üretim koşullarını belirlemede başarılı olduğu görülmüştür. Yapılan deneyler ve analizler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Mekanik özellikleri belirlemek için yapılan deneylere ait sonuçların analizinde veriler S/N oranına dönüştürülerek değerlendirmeler yapılmıştır.
- Deney sonuçları analiz edildiğinde, 75 μ m lazer odak çapı, 230 W lazer gücü, 60 μ m tarama mesafesi ve 300 mm/sn hız tarama hızı kombinasyonları kullanılarak çekme dayanımı için optimum sonuç elde edilmiştir.
- Elastisite modülü için optimum sonuç, 60 μ m tarama mesafesi, 450 mm/sn tarama hızı, 80 μ m lazer odak çapı ve 250 W lazer gücü kombinasyonları kullanılarak elde edilmiştir.
- % uzama için en uygun sonuç, lazerin odak çapı için 90 μ m, tarama mesafesi için 150 μ m, tarama hızı için 450 mm/sn ve lazerin gücü için 230 W seviyelerinin bir kombinasyonu kullanılarak elde edilmiştir.
- Çekme dayanımı üzerinde en etkili parametre lazer odak çapı (%69.20), en etkisiz parametre ise tarama hızı (%4.71) olurken elastisite modülü üzerinde en etkili parametre lazer odak çapı (%76.26), en etkisiz parametre ise tarama mesafesi (%0.65) ve uzama miktarı için en etkili parametre lazer odak çapı (%44.79), en etkisiz parametre ise tarama hızı (%3.36) olmuştur.
- Tarama mesafesinde artışa bağlı olarak çekme dayanımında ve elastisite modül değerinde azalma gözlemlenmiştir.
- Lazer odak çapındaki artış ile % uzama miktarı doğru orantılı iyileşme göstermiştir.
- Numunedeki elastik modül değeri ve uzama miktarı için tarama hızının farklı seviyeleri incelendiğinde ilk olarak değerlerde düşüş gözlemlenmiş ancak tarama hızının artmasıyla her iki parametre için de en iyi sonucun elde edildiği görülmüştür.
- Gelecek çalışmalar için; farklı kontrol parametre ve seviye değerleri kullanılarak mikrosertlik ve yüzey topoğrafyası üzerindeki etkileri incelenebilir.
- Çalışmada sabit parametre değerleri değiştirilerek mekanik özelliklerde meydana gelen değişimler incelenebilir. Bunun yanı sıra değişken parametre değerleri sabit tutularak, sabit parametre değerleri ise değiştirilerek numunelerin mekanik özellikleri ve yüzey pürüzlülüğü incelenebilir.

V. KAYNAKLAR

[1] Ö. Poyraz, "Metallerin lazer katmanlı imalatında kullanılan proses parametrelerinin etkisinin, modelleme ve simülasyon yöntemleri kullanılarak incelenmesi", Doktora tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2018.

[2] O. Özsolak, "Eklemeli İmalat Yöntemleri Ve Kullanılan Malzemeler", *Int. J. Innov. Eng. Appl.*, c. 3, s. 1, ss. 9-14, 2019.

- [3] Ö. Poyraz and M. C. Kuşhan, "Investigation of the effect of different process parameters for laser additive manufacturing of metals," *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Derg.*, vol. 33, no. 2, pp. 729–742, 2018..
- [4] I. Yadroitsava, S. Grewar, D. Hattingh, and I. Yadroitsev, "Residual stress in SLM Ti6Al4V alloy specimens", *Mater. Sci. Forum*, vol. 828–829, pp. 305–310, 2015.
- [5] K. S. Al-Rubaie, S. Melotti, A. Rabelo, J. M. Paiva, M. A. Elbestawi, and S. C. Veldhuis, "Machinability of SLM-produced Ti6Al4V titanium alloy parts", *J. Manuf. Process.*, vol. 57, pp. 768–786, Sep. 2020.
- [6] S. Leuders, M. Thöne, A. Riemer, T. Niendorf, T. Tröster, H. A. Richard and H. J. Maier., "On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance", *Int. J. Fatigue*, vol. 48, pp. 300–307, Mar. 2013.
- [7] A. Popovich, V. Sufiarov, E. Borisov, and I. Polozov, "Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Manufactured by SLM", *Key Eng. Mater.*, vol. 651–653, pp. 677–682, 2015.
- [8] A. V. S. R. Prasad, K. Ramji, and G. L. Datta, "An experimental study of wire EDM on Ti-6Al-4V Alloy", *Procedia Mater. Sci.*, vol. 5, pp. 2567–2576, 2014.
- [9] J. Han, J. Yang, H. Yu, J. Yin, M. Gao, Z. Wang and X. Zeng, "Microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V dependence on laser energy density", *Rapid Prototyp. J.*, vol. 23, no. 2, pp. 217–226, 2017.
- [10] B. Song, S. Dong, B. Zhang, H. Liao, and C. Coddet, "Effects of processing parameters on microstructure and mechanical property of selective laser melted Ti6Al4V", *Mater. Des.*, vol. 35, pp. 120–125, 2012.
- [11] C.-J. Kong, C. J. Tuck, I. A. Ashcroft, R. D. Wildman, and R. Hague, "High density Ti6Al4V via slim processing: microstructure and mechanical properties", *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2011, pp. 475-483.
- [12] M. Roudnicka, J. Bigas, and D. Vojtech, "Tuning porosity and mechanical properties of Ti6Al4V alloy additively manufactured by SLM", *Key Eng. Mater.*, vol. 865, pp. 1–5, 2020.
- [13] M. Simonelli, Y. Y. Tse, and C. Tuck, "Effect of the build orientation on the mechanical properties and fracture modes of SLM Ti-6Al-4V", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 616, pp. 1–11, 2014.
- [14] B. Song, S. Dong, H. Liao, and C. Coddet, "Process parameter selection for selective laser melting of Ti6Al4V based on temperature distribution simulation and experimental sintering", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 61, no. 9–12, pp. 967–974, 2012.
- [15] W. Sun, Y. Ma, W. Huang, W. Zhang, and X. Qian, "Effects of build direction on tensile and fatigue performance of selective laser melting Ti6Al4V titanium alloy", *Int. J. Fatigue*, vol. 130, no. pp. 105260, 2020.
- [16] K. Chang *et al.*, "Microstructural feature and mechanical property in different building directions of additive manufactured Ti6Al4V alloy", *Mater. Lett.*, vol. 267, pp. 127516, 2020.
- [17] Z. Wang, Z. Xiao, Y. Tse, C. Huang, and W. Zhang, "Optimization of processing parameters and establishment of a relationship between microstructure and mechanical properties of SLM titanium alloy", *Opt. Laser Technol.*, vol. 112, pp. 159–167, 2019.

[18] X. Shi *et al.*, “Performance of high layer thickness in selective laser melting of Ti6Al4V”, *Materials (Basel)*, vol. 9, no. 12, p. 975, 2016.

[19] Ç. V. Yıldırım, “Grafit parçacık takviyeli nano akışkan kullanılarak AISI 316’nın frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığının optimizasyonu”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknol. Derg.*, c. 7, s. 1, ss. 326–341, 2019.