

AlSi10Mg Alaşımının SLM Yöntemiyle Üretilmesinde Proses Parametrelerinin Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkisi

Arif Lütfi ÖZSOY¹, Emine ŞİRİN², Çağrı Vakkas YILDIRIM^{3*}, Murat SARIKAYA⁴

¹Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Ankara Havacılık Meslek Yüksekokulu, Uçak Teknolojisi Bölümü, 06790, Etimesgut/ANKARA

²Düzce Üniversitesi, Gümüşova Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 81850, Gümüşova/DÜZCE

³Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Gövde ve Motor Bakımı Bölümü, 38030, Melikgazi/KAYSERİ

⁴Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 57000, SİNOP

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/02/2024
Düzeltilme: 06/03/2024
Kabul: 14/03/2024

Anahtar Kelimeler

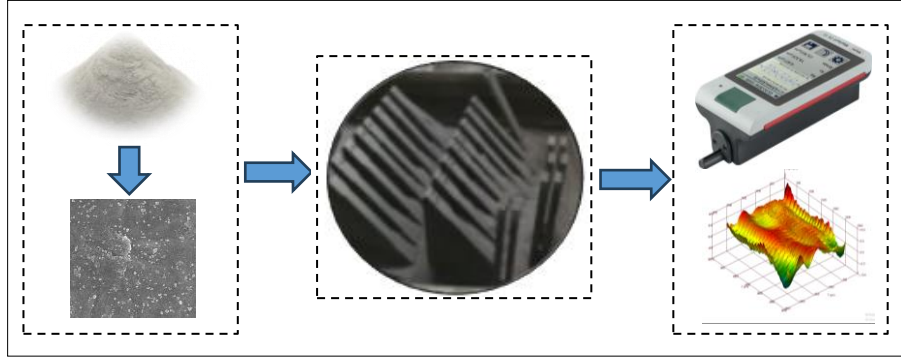
Eklemeli İmalat
Seçici Lazer Ergitme
AlSi10Mg
Yüzey Pürüzlülüğü,
Taguchi

Article Info

Research article
Received: 15/02/2024
Revision: 06/03/2024
Accepted: 14/03/2024

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada farklı seviyelerde lazer gücü, tarama mesafesi, lazer çapı ve tarama hızı parametreleri kullanılarak SLM yöntemi ile AlSi10Mg alaşımı üretilerek, bu üretim parametrelerinin yüzey kalitesine etkileri incelenmiştir. /In this study, AlSi10Mg alloy was produced by the SLM method using different levels of laser power, scanning distance, laser diameter and scanning speed parameters, and the effects of these production parameters on the surface quality were examined.



Şekil A: Grafik özet / Figure A: Graphical abstract

Keywords

Additive Manufacturing
Selective Laser Melting
AlSi10Mg
Surface Roughness
Taguchi

Önemli noktalar (Highlights)

- SLM yöntemi ile AlSi10Mg alaşımı üretilirdi./ AlSi10Mg alloy was produced by SLM method.
- Üretim sırasında farklı üretim parametreleri kullanıldı./ Different production parameters were used during production.
- Üretim sırasında kullanılan farklı üretim parametrelere bağlı olarak yüzey kalitesi değerlendirildi./Surface quality was evaluated depending on different production parameters used during production.
- Taguchi optimizasyon tekniği kullanıldı./ Taguchi optimization technique was used

Amaç (Aim): Farklı üretim parametreleri kullanılarak üretilen AlSi10Mg alaşımının yüzey kalitesinin incelenmesi amaçlanmıştır./ It was aimed to examine the surface quality of the AlSi10Mg alloy produced using different production parameters.

Özgünlük (Originality): Lazer gücü, tarama mesafesi, lazer çapı ve tarama hızı gibi üretim parametreleriyle üretilen AlSi10Mg alaşımının yüzey kalitesi incelenmiştir./ The surface quality of the AlSi10Mg alloy produced with production parameters such as laser power, scanning distance, laser diameter and scanning speed was examined.

Bulgular (Results): Sonuçların analizine göre, en iyi yüzey pürüzlülüğü değerinin 360 W lazer gücü, 0,13 mm tarama mesafesi, 0,10 mm lazer çapı, 1200 mm/s tarama hızı kombinasyonu kullanılarak elde edildiği tespit edilmiştir./According to the analysis of the results, it was determined that the best surface roughness value was obtained using the combination of 360 W laser power, 0.13 mm scanning distance, 0.10 mm laser diameter, 1200 mm/s scanning speed.

Sonuç (Conclusion): Genel olarak değerlendirildiğinde en iyi yüzey kalitesi elde edilmesi bakımından yüksek lazer gücü ve düşük lazer çapı değerinin daha etkili olduğu tespit edilmiştir./ When evaluated in general, it has been determined that high laser power and low laser diameter values are more effective in obtaining the best surface quality.



AlSi10Mg Alaşımının SLM Yöntemiyle Üretilmesinde Proses Parametrelerinin Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkisi

Arif Lütfi ÖZSOY¹ , Emine ŞİRİN² , Çağrı Vakkas YILDIRIM^{3*} , Murat SARIKAYA⁴

¹Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Ankara Havacılık Meslek Yüksekokulu, Uçak Teknolojisi Bölümü, 06790, Etimesgut/ANKARA

²Düzce Üniversitesi, Gümüşova Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 81850, Gümüşova/DÜZCE

³Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Gövde ve Motor Bakımı Bölümü, 38030, Melikgazi/KAYSERİ

⁴Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 57000, SİNOP

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 15/02/2024
Düzeltilme: 06/03/2024
Kabul: 14/03/2024

Anahtar Kelimeler

Eklemeli İmalat
Seçici Lazer Ergitme
AlSi10Mg
Yüzey Pürüzlülüğü,
Taguchi

Öz

Eklemeli imalat (Eİ) yöntemi, dijital bir 3D model kullanılarak nesnelerin katman katman biriktirilmesiyle nihai ürünleri ortaya çıkaran bir üretim yöntemidir. Eİ sayesinde geleneksel yöntemle üretilmesi neredeyse imkansız olan karmaşık geometri ürünler üretilebilir. Dahası, yüksek malzeme israfı ve özel takımlara duyulan ihtiyaç gibi geleneksel üretimin diğer sınırlamaları da elimine edilebilir. Bununla beraber, Eİ yönteminin bazı dezavantajları vardır ve yüzey kalitesi bu dezavantajlardan biridir. Optimum yüzey kalitesinin elde edilmesi için ilk yapılması gereken de optimum üretim parametrelerinin belirlenmesidir. Bu çalışmada, bu amaca yönelik olarak yapılan deneylerde, farklı üretim parametreleri ve seviyeleri kullanılarak AlSi10Mg alaşımı üretilmiştir. Üretim sırasında Eİ yöntemlerinden birisi olan Seçici Lazer Ergitme (SLM) yöntemi tercih edilmiştir. Böylece bazı üretim parametreleri ve seviyelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Üretim parametresi olarak lazer gücü, tarama mesafesi, tarama hızı, lazer çapı ve her bir parametreye ait dört seviye seçilmiştir. Üretim maliyetlerinin ve deney sayısını azaltmak için Taguchi L₁₆ dikey dizinine göre deney tasarımı yapılmıştır. Üretilen numunelere ait ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ölçülmüş ve daha detaylı bir yüzey analizi yapabilmek için yüzeylerin topoğrafya haritaları elde edilmiştir. Üretim parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini göstermek için ANOVA analizi yapılmıştır. Deney sonuçlarının analiziyle birlikte, en iyi yüzey pürüzlülüğü değerinin 360 W lazer gücü, 0,13 mm tarama mesafesi, 0,10 mm lazer çapı, 1200 mm/s tarama hızı kombinasyonu kullanılarak elde edildiği tespit edilmiştir.

Effect of Process Parameters on Surface Quality in the Production of AlSi10Mg Alloy by SLM Method

Article Info

Research article
Received: 15/02/2024
Revision: 06/03/2024
Accepted: 14/03/2024

Keywords

Additive Manufacturing
Selective Laser Melting
AlSi10Mg
Surface Roughness
Taguchi

Abstract

Additive manufacturing (AM) is a manufacturing method that creates final products by depositing objects layer by layer using a digital 3D model. Thanks to AM, products with complex geometries that are almost impossible to manufacture using traditional methods can be produced. Additionally, other limitations of traditional manufacturing, such as high material waste and the need for special tooling, can be eliminated. However, the AM method has some disadvantages, and surface quality is one of them. In order to obtain optimum surface quality, the first thing to do is to determine the optimum production parameters. In this study, AlSi10Mg alloy was produced using different production parameters and levels in experiments conducted for this purpose. Selective Laser Melting (SLM) method, one of the AM methods, was preferred during production. Thus, it was aimed to investigate the effect of some production parameters and levels on average surface roughness. As production parameters, laser power, scanning distance, scanning speed, laser diameter and four levels for each parameter were selected. Experimental design was made according to the Taguchi L₁₆ vertical array to reduce production costs and the number of experiments. The average surface roughness (Ra) of the produced samples was measured and topographic maps of the surfaces were obtained in order to perform a more detailed surface analysis. ANOVA analysis was performed to show the effect of production parameters on surface roughness. From the analysis of results, it was determined that the best surface roughness value was obtained using the combination of 360 W laser power, 0.13 mm scanning distance, 0.10 mm laser diameter, 1200 mm/s scanning speed.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum alaşımları, uçak yapılarında 1920'lerin sonlarından beri ana gövde malzemesi olarak kullanılmaktadır. Kompozit yapıların artan kullanımıyla beraber gelecekte rolünün azalacağı öngörülse de kompozit malzemelerin yüksek maliyeti, imalatının emek isteyen yoğun süreçlere sahip olması gibi önemli nedenlerden dolayı ana gövde yapısı ve bazı kritik parçalar için kritik malzeme olarak kullanılmaya devam edecektir [1]. Uçak yapılarında alüminyumun tercih edilmesindeki en önemli sebepler ucuz, hafif ve doğru alaşım ve/veya ısıl işleme birlikte oldukça yüksek mukavemet seviyelerine çıkmasıdır [2]. Alüminyum alaşımları sadece havacılık değil birçok mühendislik uygulaması için ideal bir malzeme grubudur. Bunun en büyük nedenleri ise hafiflik, yüksek korozyon direnci, tasarım kolaylığı, yüksek dövülebilirlik ve bunların mükemmel seviyede kombinasyonu olarak sıralanabilir [3]. Bu malzeme grubunun en bilinenlerinden biri de AlSi10Mg alaşımıdır. Al-Si-Mg sistemindeki ötektik altı bir alaşım olan AlSi10Mg alaşımı, yüksek mekanik özellikleri, hafifliği, korozyon direnci ve düşük termal genleşme özelliği nedeniyle havacılık, denizcilik, nükleer tesis uygulamaları ve otomotiv gibi kritik sektörlerde yoğun olarak tercih edilmektedir [4]. Bunların dışında, düşük ağırlık yüksek mekanik özellik istenen birçok sektör için de alternatif malzeme tanımına uymaktadır [5]. Bu özelliklerinin yanında iyi kaynak edilebilirliğe sahip olması da endüstrilerin tercih etme nedenleri arasındadır [6]. Bunlara ek olarak, günümüz uçak ve havacılık endüstrisinin en önemli sorunlarından birisi uçuş maliyetlerini düşürmektir. Bu aşamada en büyük esneklik ana gövdeyi oluşturan malzeme yapısını hafifletmek olabilir. Örneğin, gözenekli yapıya sahip bir malzeme çok daha hafif olacaktır ve uçak gövdesinin ağırlığında önemli iyileştirmeler sunacaktır. Bu nedenle açık hücreli gözenekli yapıların üretilmesinde en çok tercih edilen yöntemlerden biri de eklemeli imalat yöntemidir. Ayrıca, uçak bileşenleri, yüksek standartlara sahip birçok parçadan oluşmaktadır. Bu parçaların da yalnızca %10'u düzenli değişime ihtiyaç duymaktadır. Bununla beraber, hemen her parçası da ön görülemeyen bir şekilde arızalanabilmekte ve değişimleri gerekmektedir. Böyle bir durumda, değişimi ön görülemeyen parçaların üretilmesi ve stokta bulunması önemli bir maliyet olarak ortaya çıkmaktadır ve bazı zamanlar tedarik zincirini kilitleyebilmektedir. İhtiyaç halinde üretilmesi durumunda ise klasik imalat yöntemlerinin kullanımında süre birkaç ayı bulabilmekte ve maliyetleri artırabilmektedir. Bu nedenlerden ötürü

Eİ teknolojisi uçak parçalarının imalatı için önemli bir alternatif olarak görülmektedir [7].

ASTM F42 komitesine göre eklemeli imalat, çıkarmalı imalatın tersine 3D model verilerinden nesneler yapmak için malzemelerin katman katman birleştirilmesi olarak tanımlanmaktadır [8]. Son yıllarda katmanlı imalat teknolojisi hızla sanayileşmeye doğru gitmektedir. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri ve Almanya'daki büyük otomotiv şirketlerinin %75'i parça üretimi için Eİ teknolojisini kullanmaya başlamıştır. 2019 yılında yayınlanan bir rapora göre Eİ pazarının önümüzdeki 5 yıl için tahmini ortalama yıllık büyümesi %23'ün üzerindedir [9]. Bu teknoloji sayesinde talaşlı imalat veya döküm yöntemiyle üretilmesi zor olan karmaşık geometrili parçalar gözenekli, içi boş ve hafif olarak rahatlıkla üretilir. Böylelikle, geleneksel imalat yöntemlerinin vazgeçilemez bir parçası olan birçok kısıtlama ortadan kaldırılabilir ve çok daha esnek bir üretim süreci hayata geçirilebilir [4]. Ayrıca, Eİ teknolojisi 2025 yılına kadar CO₂ emisyonlarını 130,5-525,5 Mt ve tedarik zinciri maliyetlerini küresel olarak 170 ila 593 milyar dolar arasında düşürebileceği öngörülmektedir [10]. Wohlers Report 2021'e göre, Covid-19 salgınına rağmen, 2020'de %7,5'lik bir endüstri genişlemesi olmuş ve Eİ makineleri ve sistem yükseltme satışları yaklaşık 12,8 milyar dolara ulaşmıştır. Büyüme, son 10 yıldaki ortalama %27,4'tür [11]. Bu veriler Eİ sektörünün potansiyelinin daha net görülmesini sağlamaktadır. Eİ yöntemi kullanılarak yapılan parçalar sayesinde uçak yapılarındaki ağırlığın ve karbon emisyon oranının azaltıldığı çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir. Örneğin, Autodesk araştırma bilimcisi Andreas Bastian 3D baskı teknolojisini kullanarak uçak koltuklarının çerçevesini hafifletmiş ve böylece karbon emisyonu, yakıt tasarrufu gibi konularda önemli iyileştirmeler sunmuştur. 2015 yılında Autodesk ve Airbus arasında yapılan bir iş birliğine göre eklemeli imalat yöntemi kullanılarak 3D baskılı bir uçak kabini yapısal bileşeni oluşturulmuştur. Şu anda Federal Aviation Administration (FAA) testinden geçmekte olan bu bileşenin 96000 arabayı trafikten kaldırmaya eşit derecede karbon emisyonunu azalttığı iddia edilmektedir [12]. Rolls-Royce firması bazı jet motoru parçalarının Eİ teknolojisi ile üretilmesini planlarken 2013 yılında NASA Eİ teknolojisi ile üretilmiş parçalara sahip roket motorunu test etmiştir. Dahası, Amerikan Donanması F/A-18 (Hornet) jeti ve JSF için birçok plastik parçayı Eİ teknolojisi kullanarak üretmiştir. Bir başka sektörel uygulamada LZN, ILAS ve Airbus'tan oluşan şirketler birliği kabin içinde bulunan mutfak, lavabo, dolap gibi yapıları uçağın ana yapısına

tutturan braketleri yeniden tasarlayarak Eİ teknolojisi ile üretmiş ve eskisine göre daha iyi statik dayanım özellikleri elde etmiştir [13]. Tomlin ve Meyer [14], Airbus A320 nacelle hinge destek parçasını yeniden tasarlayarak Eİ teknolojisi ile üretmişler ve ağırlık açısından önemli iyileştirmeler elde ettiklerini iddia etmişlerdir. General Electric Aviation (GE) firması yeni GE9X motor serisi için birçok bileşeni Eİ teknolojisi ile üretmektedir. Günümüzde hali hazırda birçok hava aracının önemli sayıda yapısal parçası Eİ teknolojisi kullanılarak üretilmektedir [15]. Bununla beraber, Eİ teknolojisi yeni bir teknoloji olduğu için optimum sonuçları veren parametre gruplarının henüz tam netleşmediği ve bu yöndeki çalışmaların birçok araştırmacı için ilgi odağı olduğu literatürde görülmektedir.

Boschetto ve diğ. [16] SLM yöntemini kullandıkları çalışmalarında proses parametrelerini değiştirerek AlSi10Mg numuneleri üretmişler ve proses parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Geliştirdikleri model sayesinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli iyileşmeler kaydettiklerini sunmuşlardır. Gupta ve diğ. [4], SLM yöntemiyle AlSi10Mg alaşımı üretmişler ve tabaka rotasyonunun mikro yapı, tane boyutu, yüzey topografyası, artık gerilmeler ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışma esnasında tabaka dönüş değeri olarak üç farklı açı (0° , 45° ve 90°) kullanmışlardır. Mikro yapısal analiz için EBSD, SEM ve XRD kullanan araştırmacılar en iyi sonucu 90° 'nin verdiğini iddia etmişlerdir. Tane boyutu, kalıntı gerilmeler ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin de tabaka dönüş açısı değerlerinin artmasıyla azaldığını tespit etmişlerdir. Wang ve diğ. [17], SLM yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini lazer enerji yoğunluğu yöntemi ile incelemişlerdir. İlk başlarda düşen yüzey pürüzlülüğü ve gözenekliliğin, enerji yoğunluğunun artmasıyla yavaş yavaş arttığını gözlemlemişlerdir. Majeed ve diğ. [18], AlSi10Mg malzemenin SLM yöntemiyle üretiminde lazer gücü, tarama hızı ve tarama mesafesi gibi işlem parametrelerinin; yüzey kalitesine olan etkilerini araştırmışlardır. İşlem parametrelerinin yüzey kalitesini etkilediğini tespit eden araştırmacılar lazer gücünün artmasıyla yüzey pürüzlülüğünde artış gözlemlemişlerdir. Subbiah ve diğ. [19], SLM yöntemiyle ürettikleri AlSi10Mg alaşımında destek yapıları, tarama yönü ve son işlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. SLE yöntemiyle yapılan ürünlerde destek yapısının

önemini vurgulayan araştırmacılar, sonlu eleman analizini kullanarak optimum sonucu verecek destek türünü belirlemişler ve numune üretiminde bu yöntemi uygulamışlardır. Deney sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü değerlerini analiz eden araştırmacılar SLM yönteminin geleneksel yöntemle alternatif olabileceğini iddia etmişlerdir. Fiegl ve diğ. [20], AlSi10Mg alaşımının SLM yöntemiyle üretilmesi esnasında proses parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, prozite ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemek için bir dizi deney yapmışlardır. Numune üretimi esnasında giriş parametresi olarak katman kalınlığı, hacim enerjisi, nitrojen atmosferi ve ada tarama stratejisini seçen araştırmacılar kapsamlı bir araştırma yapmışlardır. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar proses tasarımı ve bileşen yerleşiminin ürün kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Caiazzo ve diğ. Inconel 718 malzemeyi lazer toz füzyon yatağı yöntemi ile üreterek hacimsel enerji yoğunluğunun yüzey pürüzlülüğü, gözenek sayısı ve boyutu ve mikrosertlik özelliği üzerine etkilerini incelemişlerdir. Hacimsel enerji yoğunluğunun artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığını tespit etmişlerdir. İstatistiksel analiz sonucunda hacimsel enerji yoğunluğunun yüzey pürüzlülüğünde etkili parametre olduğunu gözlemlemişlerdir [21]. Burada bir kısmı verilen çalışmaların haricinde literatürde çok fazla SLM yöntemiyle numune üretildiği ve ısı transferi, yorulma, yüzey kalitesi, vb. gibi özelliklere bakıldığı görülecektir. Bir başka deyişle, Eİ yöntemiyle AlSi10Mg alaşımının üretilmesi oldukça yaygındır. Çünkü AlSi10Mg alaşımının düşük erime noktası ve ötektik bileşimi lazer tabanlı sistemler tarafından kolayca işlenmesini sağlamaktadır [22]. Bu alaşım otomotiv, denizcilik, havacılık ve nükleer sektörler gibi farklı uygulama alanlarında büyük potansiyele sahiptir. Bu nedenle Al alaşımlarının, özellikle AlSi10Mg'nin SLM yöntemi ile üretimi araştırma konuları arasındadır.

Eklemeli imalat teknolojisi çok yeni bir imalat yöntemi olduğu için optimum işleme parametrelerinin henüz netleşmediği literatürdeki çalışmalardan anlaşılmaktadır. Doğru parametre kombinasyonunun elde edilmesi malzemelerin, makinelerin ve tasarımların çok daha verimli bir şekilde kullanılmasına olanak tanıyacağından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, dört farklı seviyeye sahip lazer gücü, tarama mesafesi, lazer çapı ve tarama hızı parametreleri seçilerek bitmiş ürünün yüzey kalitesi üzerindeki etkileri

incelenmiştir. Doğrudan parametre etkilerinin görülmesi amaçlandığından deney numunelerine ısıtma işlemi, yüzey kalitesini artırma vb. gibi ikincil işlemler yapılmamıştır. Çalışmaya ait deneysel prosedür, tartışma ve sonuçlar aşağıda başlıklar halinde detaylı olarak sunulmuştur.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

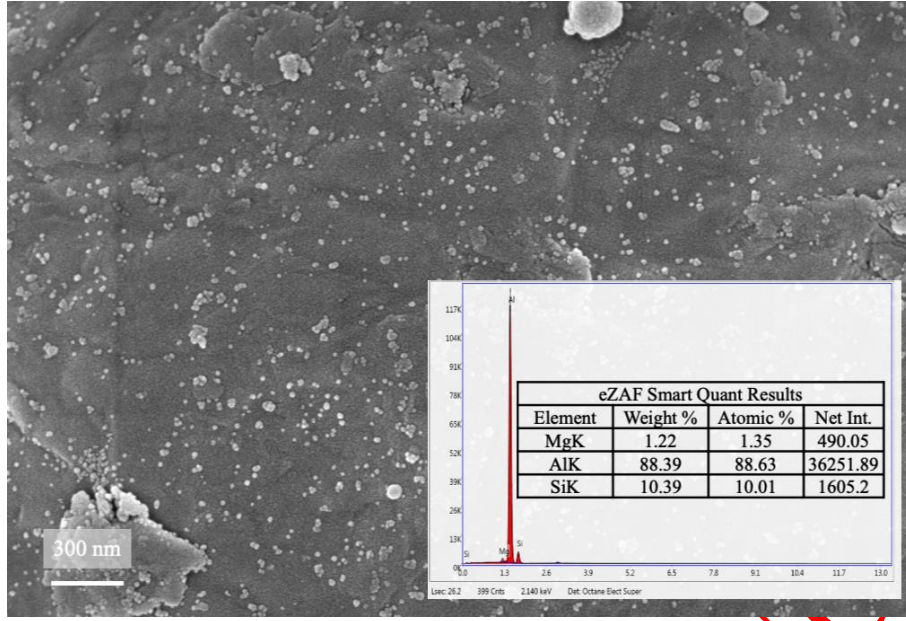
2.1. AlSi10Mg Numunelerin Üretimi (Production of AlSi10Mg Samples)

SLM işlemi, seçici lazer sinterleme (SLS) ve elektron ışını eritme (EBM) gibi toz yataklı füzyon teknolojileri sınıfına aittir. Bu işlemde, genellikle 20-60 µm kalınlığındaki bir toz tabakası, yeniden kaplayıcı bıçak olarak bilinen bir toz yayma sistemi kullanılarak üretim alanına yayılır. Toz tabakası, önceden ısıtılabilen üretim platformuna yerleştirildiğinde toz yatağına bir lazer yönlendirilir ve malzemeyi kaynak yapar gibi eritir. Isı enerjisine maruz kalan malzeme, tabaka kalınlığından daha büyük bir derinliğe kadar eritilir. Bir katman tamamlandıktan sonra üretim platformu bir katman kadar alçaltılır ve yeni bir toz katman serilir. Serilen toz katmanı daha sonra düzleştirilir ve eritilir. Bu işlem nihai ürün tamamlanuncaya kadar devam eder [23]. Bu çalışmada, SLM yöntemi tercih edilmiş ve AlSi10Mg alaşımı bu yöntem aracılığıyla

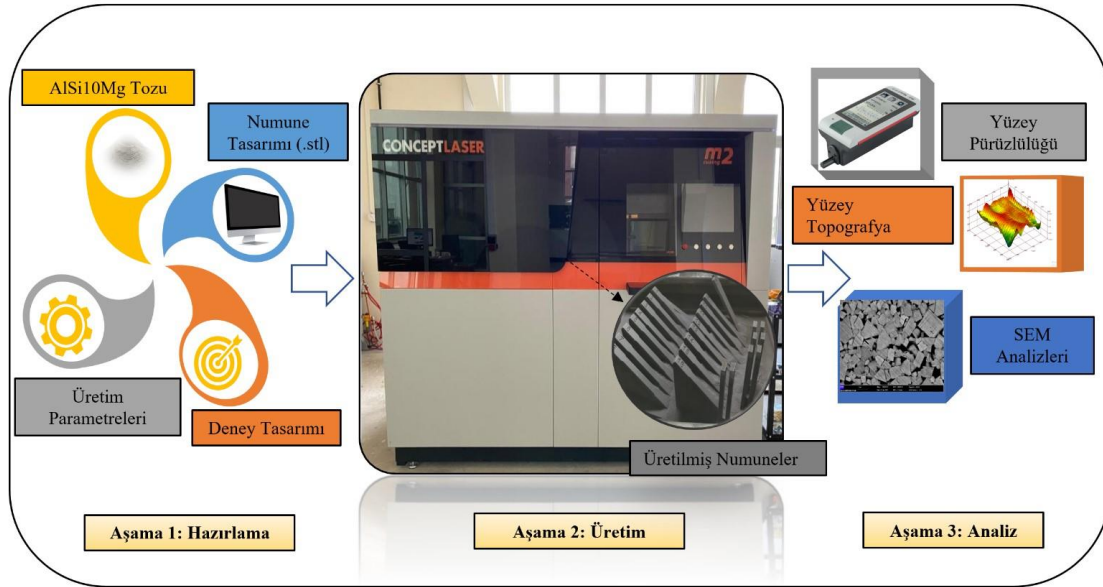
üretimiştir. Kimyasal bileşimi Tablo 1'de gösterilen AlSi10Mg tozu, EKTAM (Türkiye) aracılığıyla Concept Laser (Almanya) firmasından temin edilmiştir. Şekil 1 kullanılan tozun taramalı elektron mikroskobu (SEM) aracılığıyla elde edilmiş görüntüsünü ve EDX analizi sonucunu göstermektedir. Şekil incelendiğinde toz parçacıklarının küresel olmadığı açık bir şekilde görülmektedir. EDX analizi sonucu toza ait kimyasal içeriğin teoriyle uyumlu olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, partikül boyutu dağılımı toz yataklı sistemlerde tozun akışkanlığını ve erime davranışını etkilediği için boyut dağılımı analiz edilmiştir. Analiz neticesinde ortalama partikül boyutunun ~35 µm civarında olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, düzensiz morfolojiye rağmen, tozun SLM için makul bir akışkanlığı olduğu anlaşılmıştır. Tozlarla ilgili bilgilerin kesinleşmesinden sonra numune üretimine geçilmiştir. Numunelerin üretimi esnasında ürün işleme kapasitesi 250x250x350 mm (x, y, z) olan M2 Cusing Concept Laser SLM tezgâhı kullanılmıştır. Numuneler bilgisayar ortamında katı cisim modelleme yazılımlarından birinde tasarlanmıştır. Tasarlanan katı model verisinin üç boyutlu yazıcı arayüzüne aktarımı için .STL formatına dönüştürülerek belirlenen parametreler çerçevesinde üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin desteklerinin temizlenmesi için tel erazyon tezgâhı kullanılmıştır. Çalışmaya ait deney seti Şekil 2'de gösterilmektedir.

Tablo 1. AlSi10Mg kimyasal bileşimi (% ağırlıkça) (Chemical composition of AlSi10Mg (% by weight))

Si	Fe	Pb	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Ti	Al
9,92	0,137	0,004	0,004	0,291	0,04	0,01	0,003	0,006	Geri kalan



Şekil 1. AlSi10Mg tozunun SEM görüntüsü ve EDX analizi (SEM image and EDX analysis of AlSi10Mg powder)



Şekil 2. Deney seti (Experimental setup)

2.2. Ölçümler (Measurements)

Deney numunelerinde ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümü için Mahr Marsurf PS 10 taşınabilir yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. Ölçümler ISO 4287 [24] standardına göre yapılmış olup ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (R_a) dikkate alınmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçülürken üretim yönünde rastgele bölgelerden 3 ölçüm yapılmış ve bu değerlerin ortalaması alınarak ortalama yüzey pürüzlülük değeri elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı her deney öncesinde kalibrasyon bloklarıyla kalibre edilmiştir. Ayrıca, üretilen numunelere ait yüzey topoğrafya haritasının çıkarılması ve daha sağlıklı bir yüzey kalitesi analizi

yapmak için Phase View marka optik yüzey profilometre kullanılmıştır. Yüzey profilometre, kamera ve sensörler yardımıyla yüzeylerin optik fotoğraflarını çekerek üç boyutlu yüzey topoğrafyasına, yazılım vasıtasıyla dönüştüren bir cihazdır. Çalışmanın bu safhasında optik üç boyutlu yüzey topoğrafya ölçümleri, yüzeylerden rastgele seçilen $2,5 \times 2,5$ mm boyutlarındaki alanlarda gerçekleştirilmiştir.

2.3. Deneysel Tasarım ve Analizler (Experimental Design and Analyses)

Deney numunelerinin üretimi için planlanan deney setinde lazer gücü, tarama mesafesi, lazer çapı ve tarama hızının numune özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak Taguchi L_{16} dikey dizini kullanılarak deney tasarımı yapılmıştır. Deney setinde kullanılan parametre ve seviyeler Tablo 2’de sunulurken deney tasarımı Tablo 3’te sunulmuştur. Deney setine ait sabit parametre değerleri; tarama açısı 45° , ada tarama stratejisi ve katman kalınlığı 0,025 mm olarak belirlenerek argon gazı atmosferinde üretilmiştir. Klasik deneysel tasarım yöntemlerinin kullanımında üretim parametreleri ve üretim seviyelerinin artması deney sayısında artışa neden olduğundan maliyeti de doğru oranda etkilemektedir. Taguchi yönteminde ise üretim ve tasarım süreçlerinde zamandan tasarruf edildiği gibi maliyetten de önemli ölçüde kar edilmektedir. Taguchi yönteminin asıl amacı tasarımda ve parametrede kaliteli üretimi gerçekleştirerek deney sayısını minimuma indirmektir. Ayrıca bu yöntem ile klasik deneysel yöntemlerde kontrolü sağlanamayan, dikkate alınmayan ve bu durumlara

bağlı değişken faktörlerin de denetimi yapılabilmektedir. Taguchi yönteminin bahsedilen olumlu özellikleri göz önüne alınarak bu çalışmanın deney setinde kullanılmıştır. Taguchi yönteminde kontrol faktörlerinin kalitesini belirlemek için deney sonuçları S/N (sinyal/gürültü) oranına dönüştürülmektedir. Sinyal (S) üretim tasarımıdaki süreçte uygun koşulları, gürültü (N) ise çeşitliliğe neden olacak bütün faktörleri özümlemektedir. S/N oranları analiz edilirken niteliğinin cinsine bağlı olarak üç farklı değer bulunmaktadır. Bunlar “en küçük en iyi”, “nominal en iyi” ve “en büyük en iyi” biçimindedir [25]. Deney setinde amaç en düşük yüzey pürüzlülük değerini hesaplamak olduğundan yüzey pürüzlülüğü için “en küçük en iyi” (Eşitlik. 1) yaklaşımı dikkate alınmış ve hesaplamalar aşağıdaki formüllere göre yapılmıştır;

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

Burada y performans karakteristiğine ait sonuçları gösterirken n deney sayısını temsil etmektedir [26].

Tablo 2. Üretim parametreleri ve Taguchi L_{16} seviyeleri (Production parameters and Taguchi L_{16} levels)

Parameters	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Lazer gücü	W	120	200	280	360
Tarama mesafesi	mm	0,10	0,13	0,16	0,19
Lazer çapı	mm	0,10	0,12	0,14	0,16
Tarama hızı	mm/sn	800	1200	1600	2000

Varyans analizi kaliteyi belirleyen çıktı parametresinin (Yüzey pürüzlülüğü) etki eden faktörlerden ne ölçüde etkilediklerini ve farklı seviyelerin nasıl bir değişkenliğe yol açtıklarını belirleyen matematiksel bir tekniktir. Ayrıca elde edilen sonuçların güvenilirliği de belirlenebilir [27].

Regresyon analizi, bağımsız değişkenlerle bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiyi matematiksel fonksiyon kullanarak belirleyen bir analiz yöntemidir. Regresyon analizinde bazı denklemler oluşturularak bağımlı değişkenlere bağlı olarak bağımsız değişkenlerin tahmini yapılabilmektedir [28].

3. DENEY VE OPTİMİZASYON SONUÇLARI (EXPERIMENT AND OPTIMIZATION RESULTS)

3.1. S/N Oranlarının Analizleri (Analysis of S/N Ratios Analyses)

L_{16} deneyleri için ortalama yüzey pürüzlülüğüne ait kontrol faktörleri, seviyeleri,

deney sonuçları ve bu sonuçlara ait S/N oranları Tablo 4’te sunulmuştur. Deney sonuçlarına göre Ra ortalama değeri 2,99 μm olarak elde edilirken bu sonuçlara ait S/N oranlarının ortalama değeri ise -9,16 dB olarak bulunmuştur.

Tablo 3. Deneysel tasarım ve Taguchi L₁₆ deney sonuçları (Experimental design and Taguchi L₁₆ experimental results)

Deney No.	Kontrol Faktörleri				Deneysel Sonuçlar	
	Lazer gücü (W)	Tarama mesafesi (mm)	Lazer çapı (mm)	Tarama hızı (mm/sn)	Ra (µm)	S/N oranı (db)
1	120	0,10	0,10	800	4,09	-12,2345
2	120	0,13	0,12	1200	3,68	-11,3170
3	120	0,16	0,14	1600	4,61	-13,2740
4	120	0,19	0,16	2000	5,53	-14,8545
5	200	0,10	0,12	1600	2,79	-8,9121
6	200	0,13	0,10	2000	2,57	-8,1987
7	200	0,16	0,16	800	2,73	-8,7233
8	200	0,19	0,14	1200	2,94	-9,3669
9	280	0,10	0,14	2000	2,30	-7,2346
10	280	0,13	0,16	1600	2,50	-7,9588
11	280	0,16	0,10	1200	2,25	-7,0437
12	280	0,19	0,12	800	2,50	-7,9588
13	360	0,10	0,16	1200	2,36	-7,4582
14	360	0,13	0,14	800	2,26	-7,0822
15	360	0,16	0,12	2000	2,46	-7,8187
16	360	0,19	0,10	1600	2,27	-7,1205

Deney sonuçlarına bağlı olarak elde edilen S/N oranlarının optimizasyonu için Taguchi metodu kullanılmıştır. Ra sonuçları için S/N yanıt tablosu

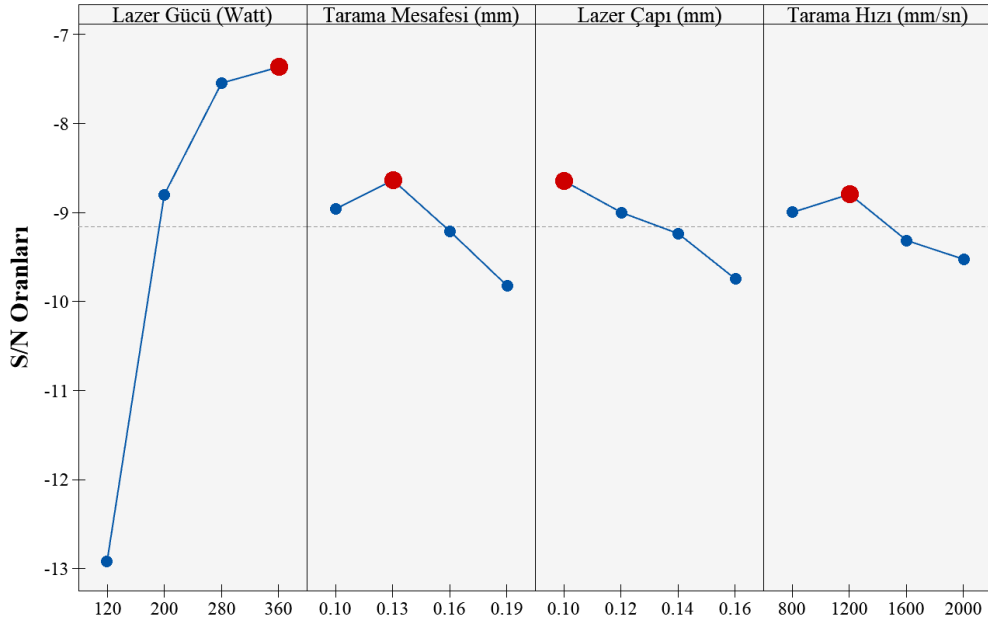
Şekil 3’de sunulmuştur. Şekil 3 incelendiğinde, optimum Ra değerleri için kontrol faktörlerine ait optimum seviyeler görülecektir.

Tablo 4. Yüzey pürüzlülüğü için S/N yanıt tablosu (S/N response table for surface roughness)

Seviyeler	Kontrol faktörleri			
	Lazer Gücü (Watt)	Tarama Mesafesi (mm)	Lazer Çapı (mm)	Tarama Hızı (mm/sn)
Seviye 1	-12,92	-8,96	-8,649	-9,000
Seviye 2	-8,80	-8,640	-9,002	-8,796
Seviye 3	-7,55	-9,215	-9,239	-9,316
Seviye 4	-7,37	-9,825	-9,749	-9,527
Delta	5,55	1,186	1,099	0,730

Tablo 4’e göre optimum Ra değerini veren parametre seviyeleri ve S/N oranları sıralanacak olursa; lazer gücü için Seviye 4, S/N oranı -7,37 dB, tarama mesafesi için Seviye 2, S/N oranı -8,640 dB, lazer çapı için Seviye 1, S/N oranı -8,649 dB ve

tarama hızı için Seviye 2, S/N oranı -8,796 dB olduğu görülmektedir. Ayrıca, Şekil 3’te Ra deneylerinde faktörler ve faktörlere ait seviyelerin etkisini gösteren ana etki grafiği sunulmuştur.



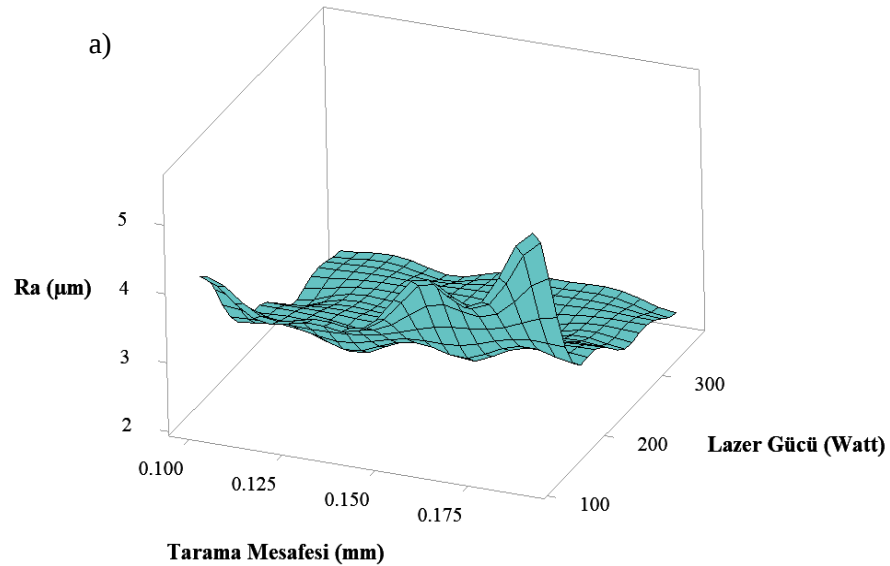
Sinyal-gürültü: En küçük en iyidir

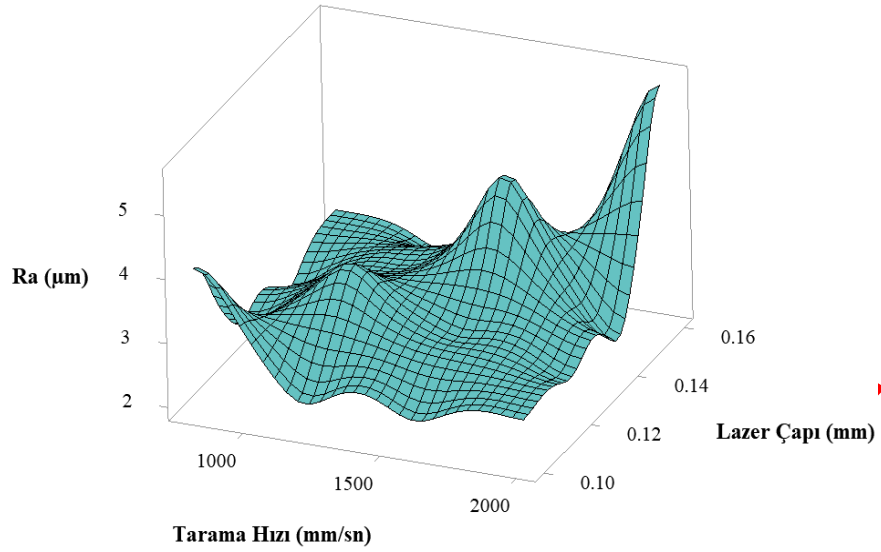
Şekil 3. Farklı üretim parametrelerine göre Ra ana etki grafiği (Ra main effect graphic according to different production parameters)

Şekil 3 incelendiğinde, optimum Ra değerini elde ederken lazer gücü için 4. seviye, tarama mesafesi için 2. seviye, lazer çapı için 1. seviye ve tarama hızı için 2. seviye değerlerin optimum sonucu verdiği görülmektedir. Bir başka deyişle, optimum Ra değeri 360 Watt lazer gücü, 0,13 mm tarama mesafesi, 0,10 mm lazer çapı ve 1200 mm/sn tarama hızı değerlerinin kombinasyonu ile elde edilmiştir.

3.2. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

Yüzey pürüzlülüğü, lazer gücü, lazer çapı, tarama mesafesi, tarama hızı gibi faktörler tarafından kontrol edilebilmektedir [29]. AlSi10Mg alaşımının SLM yöntemi ile üretilmesinde lazer gücü, tarama mesafesi, lazer çapı ve tarama hızına bağlı olarak Ra değerleri belirgin bir şekilde değişiklik göstermektedir. Tarama mesafesi ve lazer gücüne bağlı olarak Ra değerindeki değişimi gösteren üç boyutlu yüzey grafiği Şekil 4'te sunulmuştur.





Şekil 4. SLM parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi: (a) tarama mesafesi ve lazer gücü, (b) tarama hızı ve lazer çapı. (Effect of SLM parameters on average surface roughness: (a) scanning distance and laser power, (b) scanning speed and laser diameter)

Şekil 4a tarama mesafesi açısından incelendiğinde, en yüksek Ra değeri 0,19 mm tarama mesafesinde görülürken en düşük Ra değeri ise 0,13 mm tarama mesafesinde görülmüştür. Tarama mesafesinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğü artış eğilimi göstermiştir. Bu durum artan tarama mesafesine bağlı olarak eriyik havuzu boyutunun artmasına ve pürüzlü bir yüzey oluşmasına bağlanabilir [18]. Lazer gücü bakımından incelendiğinde lazer gücünün artmasının Ra değerini olumlu yönde etkilediği görülmektedir (Şekil 4a). Lazer gücü açısından en düşük Ra değeri 360 W lazer gücü ile elde edilirken en yüksek Ra değeri 120 W lazer gücü ile elde edilmiştir. Bu durum lazer gücünün artması lazer gücünde biriken izlerin artmasına neden olur şeklinde ifade edilebilir. Dahası biriken izlerin artması lazer gücünün izlerinin kararlılığını artırarak tozların yapışma kalitesini artırmasıyla ilişkilendirilir. Ayrıca artan lazer gücü enerji yoğunluğunu artırmakta ve Eİ ile üretilen parçaların Ra değerini etkili bir şekilde azaltmaktadır. Enerji yoğunluğunun azalmasında ise yapışan parçacıklar ve topaklanmaya bağlı olarak Ra değeri artış göstermektedir. Bunun sonucunda lazer gücünün artması Ra değerinde bir azalmaya neden olmaktadır [30–33].

Tarama hızı ve lazer çapına bağlı olarak Ra değerindeki değişimi gösteren üç boyutlu yüzey grafiği Şekil 4b’de sunulmuştur. Şekil 4b tarama hızı açısından incelendiğinde en yüksek Ra değeri 2000 mm/sn tarama hızında görülürken en düşük Ra değeri 1200 mm/sn tarama hızında elde edilmiştir.

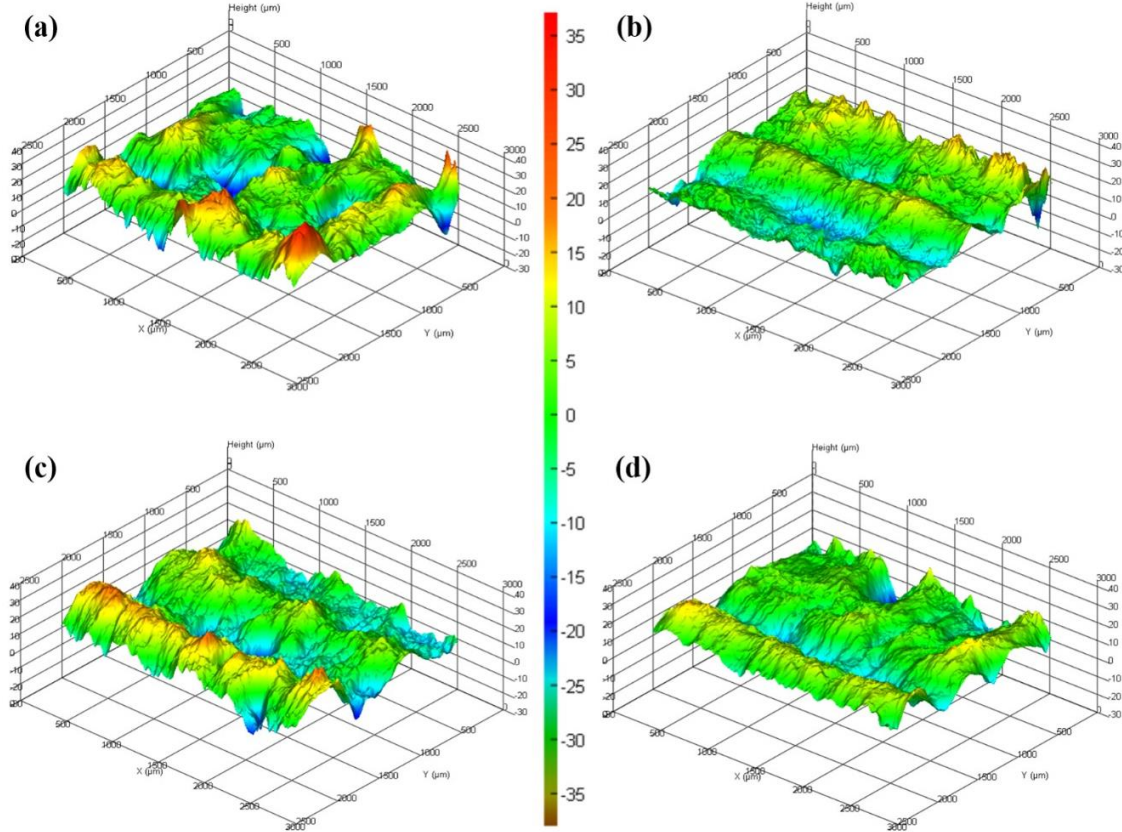
Tarama hızının artmasıyla Ra değeri önce bir miktar düşüş göstermektedir. Tarama hızı artmaya devam ettikçe Ra değerinde küçük oranlarda artış ve azalmalar göstermektedir. Bu durum tarama hızındaki artışın toz malzemenin ergime hızını düşürdüğünden katılma hızını da düşürmesine bağlanmaktadır. Katılma hızının düşmesiyle beraber Ra değerinde artış olabileceği beklenen bir durumdur ve literatürde de örnekleri mevcuttur [31].

Şekil 4b lazer çapı açısından incelendiğinde lazer çapının artmasıyla Ra değerinin olumsuz yönde etkilendiği gözlemlenmektedir. Lazer çapı açısından en yüksek Ra değeri 0,16 mm lazer çapında elde edilirken en düşük Ra değeri 0,10 mm lazer çapında elde edilmiştir. Lazer çapının artması lazer izlerinde bir azalmaya neden olur. Bunun sonucu olarak tozlar erimez ve parçacıklar arasında boşluklar meydana gelerek yüzey pürüzlülüğünde bir artışa neden olmaktadır [17]. Deneysel çalışma sonucunda lazer çapının azaltılarak lazer gücünün artırılmasının daha iyi Ra sonuçları verdiği görülmüştür. Koutiri ve diğ. yaptıkları çalışmada Inconel 625 malzemenin SLM yöntemi ile üretiminde proses parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini inceleyerek benzer durumu vurgulamışlardır [34].

3.3. Yüzey Topografya Sonuçları (Surface Topography Results)

Birbiriyle temas halinde çalışan parçalarda çalışma bölgesinde gerçek temas yüzeyinin artırılarak sürtünmenin ve aşınmanın azaltılması için parçaların yüzey kalitesi önemli parametrelerden biridir. Yüzey kalitesi aşınmayı azaltarak parçaların ömrünü artırmaktadır. Dolayısıyla yüzey kalitesinin

detaylı bir şekilde incelenmesi derinlemesine analiz yapmak için elzem bir durumdur. Lazer gücünün Ra üzerinde etkili parametre olduğu bilindiğinden, sabit tarama mesafesinde (0,19 mm) lazer gücü artışına bağlı olarak yüzey topografya görüntüleri incelenmiştir. Şekil 5 üretim sonrası malzemelerin sabit tarama mesafesi ve farklı lazer gücüne bağlı yüzey topografya görüntüleri verilmektedir.



Şekil 5. Yüzey topografya görüntüleri (a) Deney 4 (b)Deney 8 (c)Deney 12, (d)Deney 16 (Surface topography images (a) Experiment 4 (b)Experiment 8 (c)Experiment 12, (d)Experiment 16)

Görüntüler incelendiğinde Şekil 5a’da tepe ve çukur noktaların daha fazla olduğu görülmektedir. Daha az dalgalı bir yüzey yapısına yani daha düzgün bir profile sahip olan görüntü ise Deney 16 ya ait olan görüntüdür (Şekil 5d). En düşük Ra değerine sahip yüzey topografya görüntüsü 360 Watt lazer gücüne, 0,19 mm tarama mesafesine, 0,10 mm lazer çapına ve 1600 mm/sn tarama hızına sahip deney koşullarında elde edilmiştir. Şekil genel olarak incelendiğinde lazer gücünün artmasıyla yüzey topografya görüntülerinin daha düzgün hale geldiği, tepe ve çukur noktaların azalarak daha yüzeyel olduğu anlaşılmaktadır. Yüzey topografya sonuçları

ile yüzey pürüzlülük sonuçları paralellik göstermektedir.

3.4. Varyans Analizi (Analysis of Variance)

Girdi faktörleri olan tarama mesafesi, lazer gücü, tarama hızı ve lazer çapının Ra değeri üzerindeki etkisini göstermek için ANOVA kullanılmıştır. ANOVA, % 95 güven aralığında gerçekleştirilmiş ve sonuçları Tablo 5’de sunulmuştur. Hata oranı % 3,02 olması ile elde edilen sonuçlar analizin güvenilirliğini kanıtlar niteliktedir.

Tablo 5. Yüzey pürüzlülüğü deney sonuçlarına ait ANOVA tablosu (ANOVA table of surface roughness experiment results)

Faktörler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
Lazer gücü	3	12,2219	4,0740	28,35	0,011	85,58
Tarama mesafesi	3	0,6814	0,2271	1,58	0,358	4,77
Lazer çapı	3	0,5644	0,1881	1,31	0,415	3,95
Tarama hızı	3	0,3829	0,1276	0,89	0,538	2,68
Hata	3	0,4312	0,1437	-	-	3,02
Toplam	15	-	-	-	-	100,00

Tablo 5’de yer alan katkı oranları girdi parametrelerinin Ra değeri üzerindeki önem derecesini göstermektedir. Ra üzerinde en etkili faktör % 85,58 oranı ile lazer gücü olarak elde edilmiştir. Bunu sırasıyla % 4,77, % 3,95 ve % 2,68 oranları ile tarama mesafesi, lazer çapı ve tarama hızı takip etmiştir.

3.5. Regresyon Analizi (Analysis of Regression)

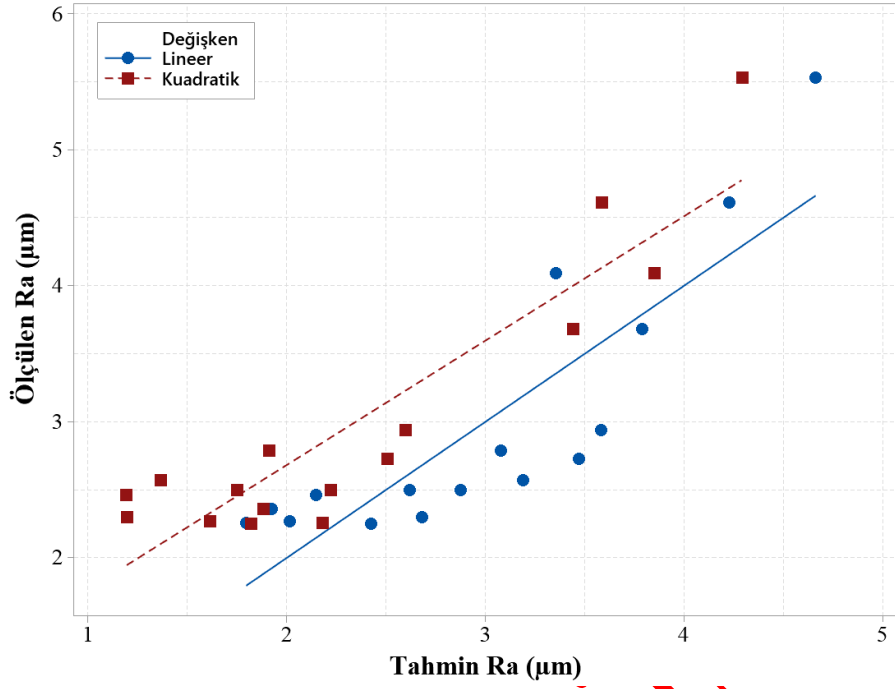
Regresyon analizleri bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki etkileşimi belirlemek için kullanılan bir analiz yöntemidir. Deneysel yöntemlerle elde edilen 16 adet yüzey pürüzlülüğü sonucu için regresyon analizi uygulanmıştır. Regresyon denklemlerinin oluşturulmasında lazer gücü, tarama mesafesi, lazer çapı ve tarama hızı proses girdi faktörü olarak kullanılmıştır. Proses girdi faktörleri kullanılarak elde edilen birinci dereceden denklem Eşitlik 2’deki gibi elde edilmiştir.

$$Ra(\mu m) = 2,81 - 0,00849 * LG + 5,12 * TM + 8,13 * LC + 0,000299 * TH \quad (2)$$

Eşitlik 2’ye göre elde edilen denklemin belirleme katsayısı (R^2) 0,7356 olarak bulunmuştur. Ancak, bulunan katsayıya göre gerçek değerler ile tahmin değerleri arasındaki fark fazla olacağından faktör etkileşimlerini de kapsayan ikinci dereceden denklem üretilmiştir. Elde edilen ikinci dereceden denklem Eşitlik 3’teki gibidir.

$$Ra(\mu m) = -36,7 + 0,0671 * LG + 69,5 * TM + 764 * LC - 0,0292 * TH - 0,000166 * LG^2 + 119,4 * TM^2 - 1731 * LC^2 + 0,000004 * TH^2 - 0,0048 * LG * TM - 0,0197 * LG * LC - 0,000002 * LG * TH - 2092 * TM * LC + 0,1233 * TM * TH \quad (3)$$

Eşitlik 3’e göre ikinci derece denklemin belirleme katsayısı (R^2) ise 0,9887 olarak bulunmuştur. Deney sonuçları ile her iki denklemden elde edilen tahmin sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 6’da sunulmaktadır. Şekil incelendiğinde, deney sonuçlarına en yakın tahmin değerlerinin ikinci dereceden denklem ile elde edildiği görülmektedir.



Şekil 6. Tahmin sonuçları ile gerçek ölçümlerin karşılaştırılması (Comparison of prediction results and actual measurements)

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Bu çalışmada, SLM yöntemi kullanılarak üretilen AlSi10Mg parçalarının proses parametrelerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü ve yüzey topografyaları üzerine etkileri incelenmiştir. Taguchi dikey dizini kullanılarak deney tasarımı ve sonuçların analizi yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen bilgiler aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Çalışma sonucunda ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinin farklı parametre ve seviyelerde farklı sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Genel olarak tarama mesafesinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğü artış eğilimi göstermiştir.
- ANOVA, % 95 güven aralığında gerçekleştirilmiştir. Hata oranının % 3,02 olması elde edilen analiz sonuçlarının güvenilirliğini göstermektedir.
- Ortalama yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametre % 85,58 katkı oranıyla lazer gücü olmuştur. Bunu sırasıyla % 4,77, % 3,95 ve % 2,68 oranları ile tarama mesafesi, lazer çapı ve tarama hızı takip etmiştir.
- Yüzey pürüzlülük ortalama değeri Ra için geliştirilen kuadratik regresyon analiz

denklemleriyle hesaplanan verilerin, deneysel çalışma sonucunda elde edilen gerçek verilerle % 98,87 oranında yakınlık gösterdiği tespit edilmiştir.

Yapılan çalışma neticesinde, S/N analizi yapılarak gerçekleştirilen optimizasyon da en düşük yüzey pürüzlülüğünü veren proses parametreleri 360 W lazer gücü, 0,10 mm lazer çapı, 1200 mm/sn tarama hızı ve 0,13 mm tarama mesafesi olarak bulunmuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FYL-2021-10915 kodlu proje ile desteklenmiştir.

This study was supported by Erciyes University Scientific Research Projects Unit with the project code FYL-2021-10915.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The authors of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Arif Lütfi ÖZSOY: Deney düzeneğini hazırlayarak deneyleri yapmıştır.

He prepared the experimental setup and performed the experiments

Emine ŞİRİN: Deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She analyzed the results and performed the writing process.

Çağrı Vakkas YILDIRIM: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

Murat SARIKAYA: Deney sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Choi, J. W. Architecture of a knowledge based engineering system for weight and cost estimation for a composite airplane structures. Expert Systems with Applications. 2009;36(8), 10828-10836.
- [2] Rambabu P, Eswara Prasad N, Kutumbarao V V., Wanhill RJH. Aluminium Alloys for Aerospace Applications. 2017:29–52.
- [3] Abioye, T. E., Zuhailawati, H., Aizad, S., Anasyida AS. Geometrical, microstructural and mechanical characterization of pulse laser welded thin sheet 5052-H32 aluminium alloy for aerospace applications. Trans Nonferrous Met Soc China. 2019;29:667–79.
- [4] Gupta MK, Singla AK, Ji H, Song Q, Liu Z, Cai W, et al. Impact of layer rotation on micro-structure, grain size, surface integrity and mechanical behaviour of SLM Al-Si-10Mg alloy. J Mater Res Technol. 2020;9:9506–22.
- [5] Li W, Li S, Liu J, Zhang A, Zhou Y, Wei Q, et al. Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism. Mater Sci Eng A. 2016;663:116–25.
- [6] Liu X, Zhao C, Zhou X, Shen Z, Liu W. Microstructure of selective laser melted AlSi10Mg alloy. Mater Des. 2019;168:107677.
- [7] Singamneni, S., Yifan, L. V., Hewitt, A., Chalk, R., Thomas, W., & Jordison D. Additive Manufacturing for the Aircraft Industry: A Review. 2019.
- [8] ASTM52901-16 standard guide for additive manufacturing—general principles—requirements for purchased AM parts. ASTM International, West Conshohocken. 2016.
- [9] Kandukuri S, Ze · Chen. Progress of Metal AM and Certification Pathway. Trans Indian Natl Acad Eng. 2021;6:909–15.
- [10] Gebler M, Schoot Uiterkamp AJM, Visser C. A global sustainability perspective on 3D printing technologies. Energy Policy. 2014;74:158–67.
- [11] Wohlers, T. Wohlers report 2021: 3D printing and additive manufacturing global state of the industry.2021.
- [12] Froes F. Combining additive manufacturing with conventional casting and reduced density materials to greatly reduce the weight of airplane components such as passenger seat frames. Addit Manuf Aerosp Ind. 2019:419–25.
- [13] Aktimur B, Gökpinar ES. Katmanlı Üretimin Havacılıkdaki Uygulamaları. Gazi Univ J Sci Part C Des Technol. 2015;3:463–9.
- [14] Tomlin M. Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part.2011.
- [15] Blakey-Milner B, Gradl P, Snedden G, Brooks M, Pitot J, Lopez E, et al. Metal additive manufacturing in aerospace: A review. Mater Des. 2021;209:110008.
- [16] Boschetto A, Bottini L, Veniali F. Roughness modeling of AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting. J Mater Process Technol. 2017;241:154–63.
- [17] Wang L zhi, Wang S, Wu J jiao.

- Experimental investigation on densification behavior and surface roughness of AlSi10Mg powders produced by selective laser melting. *Opt Laser Technol.* 2017;96:88–96.
- [18] Majeed A, Ahmed A, Salam A, Sheikh MZ. Surface quality improvement by parameters analysis, optimization and heat treatment of AlSi10Mg parts manufactured by SLM additive manufacturing. *Int J Light Mater Manuf.* 2019;2:288–95.
- [19] Subbiah, R., Bensingh, J., Kader, A., & Nayak, S. Influence of printing parameters on structures, mechanical properties and surface characterization of aluminium alloy manufactured using selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2020; 106, 5137-5147.
- [20] Fiegl T, Franke M, Körner C. Impact of build envelope on the properties of additive manufactured parts from AlSi10Mg. *Opt Laser Technol.* 2019;111:51–7.
- [21] Caiazzo F, Alfieri V, Casalino G. On the Relevance of Volumetric Energy Density in the Investigation of Inconel 718 Laser Powder Bed Fusion. *Mater.* 2020, Vol 13, Page 538 2020;13:538.
- [22] Wang P, Lei H, Zhu X, Chen H, Fang D. Influence of manufacturing geometric defects on the mechanical properties of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting. *J Alloys Compd.* 2019;789:852–9.
- [23] Trevisan F, Calignano F, Lorusso M, Materials JP-, 2017 U. On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: process, microstructure, and mechanical properties. *Materials (Basel)* 2017;10:76.
- [24] 4287: 1997. Geometrical product specifications (GPS)–Surface texture: profile method Terms, definitions and surface texture parameters. 1998.
- [25] Yıldırım ÇV, Kivak T, Turgay, Murat Sarıkaya, Fehmi Erzincanlı . Determination of MQL Parameters Contributing to Sustainable Machining in the Milling of Nickel-Base Superalloy Waspaloy. *Arab J Sci Eng.* 2017;42:4667–81.
- [26] Kivak T. Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. *Measurement* 2014;50:19–28.
- [27] Savaşkan M, Taptık Y, Ürgen M. Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu. *İTÜDERGİSİ/D.* 2010;3.
- [28] Yücel A, Yıldırım ÇV. AA2024 Alaşımının Tornalanmasında Nanoakışkan Konsantrasyon Oranı ve MMY Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Sıcaklığı Üzerindeki Etkisi. *Manuf Technol Appl.* 2020;1:18–32.
- [29] Bean GE, Witkin DB, McLouth TD, Patel DN, Zaldivar R. Effect of laser focus shift on surface quality and density of Inconel 718 parts produced via selective laser melting. *Addit Manuf.* 2018;22:207–15.
- [30] Yang T, Liu T, Liao W, MacDonald E, Wei H, Chen X, et al. The influence of process parameters on vertical surface roughness of the AlSi10Mg parts fabricated by selective laser melting. *J Mater Process Technol.* 2019;266:26–36.
- [31] Bhaduri D, Penchev P, Dimov S, Essa K, Carter LN, Pruncu CI, et al. On the surface integrity of additive manufactured and post-processed AlSi10Mg parts. *Procedia CIRP.* 2020;87:339–44.
- [32] Wang Z, Xiao Z, Tse Y, Huang C, Zhang W. Optimization of processing parameters and establishment of a relationship between microstructure and mechanical properties of SLM titanium alloy. *Opt Laser Technol.* 2019;112:159–67.
- [33] Maamoun AH, Xue YF, Elbestawi MA, Veldhuis SC. Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on the Quality of Al Alloy Parts: Powder Characterization, Density, Surface Roughness, and Dimensional Accuracy. *Mater.* 2018, Vol 11, 2018;11:2343.
- [34] Koutiri I, Pessard E, Peyre P, Amlou O, De Terris T. Influence of SLM process parameters on the surface finish, porosity rate and fatigue behavior of as-built Inconel 625 parts. *J Mater Process Technol.* 2018;255:536–46.