

Defects, Mechanical Properties and Surface Roughness of AlSi10Mg Alloy Parts Produced by Selective Laser Melting (SLM) Method-A Review

Yusuf SİYAMBAŞ^{1,*}  Yakup TURGUT² 

¹Erzincan Binali Yıldırım University Vocational High School, Department of Machinery and Metal Technologies, 24100, Merkez/ERZİNCAN

²Gazi University Faculty of Technology, Department of Manufacturing Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Review article
Received: 13/06/2022
Revision: 26/06/2022
Accepted: 29/06/2022

Highlights

- Product quality in additive manufacturing of AlSi10Mg Alloy
- Effect of manufacturing parameters on defects
- Effect of energy density on mechanical properties

Keywords

Additive manufacturing
Manufacturing parameters
Porosity
Mechanical properties
Surface roughness

In this study, a comprehensive review was made on the usability of the products produced from AlSi10Mg alloy as the final product.

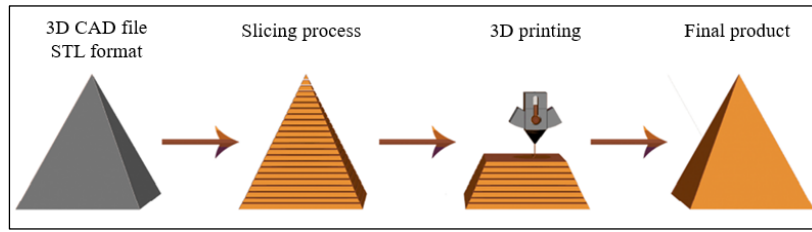


Figure A. Additive manufacturing process

Purpose: In this study, it is aimed to investigate the effect of manufacturing parameters on product quality in additive manufacturing of AlSi10Mg alloy by Selective laser melting (SLM) method.

Theory and Methods: In this study, studies on additive manufacturing of AlSi10Mg alloy by SLM method were investigated in terms of manufacturing parameters, the effects of manufacturing parameters on the finished product and the positive and negative aspects of the method were revealed.

Results: It has been determined that AlSi10Mg alloy parts produced by additive manufacturing show better strength properties compared to those produced by casting method, and the desired density can be obtained by using the appropriate parameters for manufacturing.

Conclusion: It has been determined that energy density is effective on product quality in the production of AlSi10Mg alloy parts by SLM method. It has been observed that the ideal energy density for minimum porosity in the produced parts is in the range of 50-75 J/mm³. It was determined that the level of porosity increased with increasing and decreasing energy densities.



Defects, Mechanical Properties and Surface Roughness of AlSi10Mg Alloy Parts Produced by Selective Laser Melting (SLM) Method-A Review

Yusuf SİYAMBAŞ^{1,*} Yakup TURGUT²

¹Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 24100, Merkez/ERZİNCAN

²Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Abstract

Metal-based additive manufacturing is a modern manufacturing process in which three-dimensional (3D) objects are fabricated by layer-by-layer melting of metallic powder or wire with an energy source. Selective laser melting (SLM) method is used in both scientific and industrial fields as it allows the production of complex and light structures. AlSi10Mg alloy is widely used in aerospace, automotive, marine and medical industries, as well as in various applications that require special designs and is one of the prominent materials in SLM research. The quality of a product produced by the SLM method requires optimization of manufacturing parameters (laser power, scanning speed, scanning distance, layer thickness) that affect the energy density required for melting. With the use of inappropriate manufacturing parameters, internal stresses arising from deformation mechanisms occur due to the process and distortion, cracking and dimensional changes occur on the part. Variables such as powder material properties, uneven distribution of powder layer, deformation during manufacturing, changes in laser beam can cause metallurgical pores. Any defects that occur in the manufacturing process have a negative effect on the mechanical properties and surface quality of the final part. In this study, the results obtained by researching the studies in the literature to produce parts with high density, high strength properties and high surface quality from AlSi10Mg alloy by selective laser melting method are presented. As a result of the research, it has been determined that energy density is more decisive on product quality. It has been determined that the ideal energy density for the least porosity in the products is in the range of 50-75 J/mm³, and the AlSi10Mg alloy parts produced by additive manufacturing show better strength properties compared to those produced by the casting method.

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru: 13/06/2022
Düzeltilme: 26/06/2022
Kabul: 29/06/2022

Keywords

Additive manufacturing
Manufacturing parameters
Porosity
Mechanical properties
Surface roughness

Anahtar Kelimeler

Ekllemeli imalat
İmalat parametreleri
Gözeneklilik
Mekanik özellikler
Yüzey pürüzlülüğü

Seçici Lazer Ergitme (SLM) Yöntemi ile Üretilen AlSi10Mg Alaşımli Parçalarda Kusurlar, Mekanik Özellikler ve Yüzey Pürüzlülüğü-Bir Araştırma

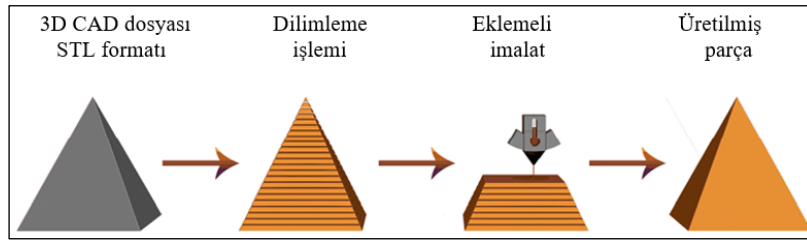
Öz

Metal esaslı ekllemeli imalat, bir enerji kaynağı ile metalik tozun veya telin katman katman eritilmesi yoluyla üç boyutlu (3B) nesnelere imal edildiği modern bir üretim sürecidir. Seçici lazer eritme (SLM) yöntemi, karmaşık ve hafif yapıların üretimine olanak sağladığından hem bilimsel hem de endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. AlSi10Mg alaşımı havacılık, otomotiv, denizcilik ve medikal endüstrilerin yanı sıra, özel tasarımlara ihtiyaç duyulan çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakta ve SLM araştırmalarında öne çıkan malzemelerden biri durumundadır. SLM yöntemi ile üretilen bir ürünün kalitesi, ergitme için gerekli olan enerji yoğunluğunu etkileyen imalat parametrelerinin (lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi, katman kalınlığı) optimizasyonunu gerektirmektedir. Uygun olmayan imalat parametrelerinin kullanılması ile süreç gereği deformasyon mekanizmalarından kaynaklanan iç gerilmeler oluşmakta ve parça üzerinde çarpılma, çatlama ve boyutsal değişim meydana gelmektedir. Toz malzeme özellikleri, toz tabakasının düzgün olmayan dağıtımı, imalat sırasında deformasyon, lazer ışınındaki değişiklikler gibi değişkenler metalurjik gözeneklere neden olabilmektedir. İmalat sürecinde oluşan her türlü kusur nihai parçanın mekanik özellikleri ve yüzey kalitesi üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Bu çalışmada seçici lazer eritme yöntemi ile AlSi10Mg alaşımından yüksek yoğunlukta, yüksek mukavemet özelliklerinde ve yüksek yüzey kalitesinde parçalar üretmek için literatürde yapılan çalışmalar araştırılarak elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Araştırma sonucunda, enerji yoğunluğunun ürün kalitesi üzerinde daha belirleyici olduğu tespit edilmiştir. Ürünlerde en az gözeneklilik için ideal enerji yoğunluğunun 50-75 J/mm³ aralığında

olduğu, eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg alaşımlı parçaların döküm yöntemi ile üretilenlere kıyasla daha iyi mukavemet özelliği gösterdiği belirlenmiştir.

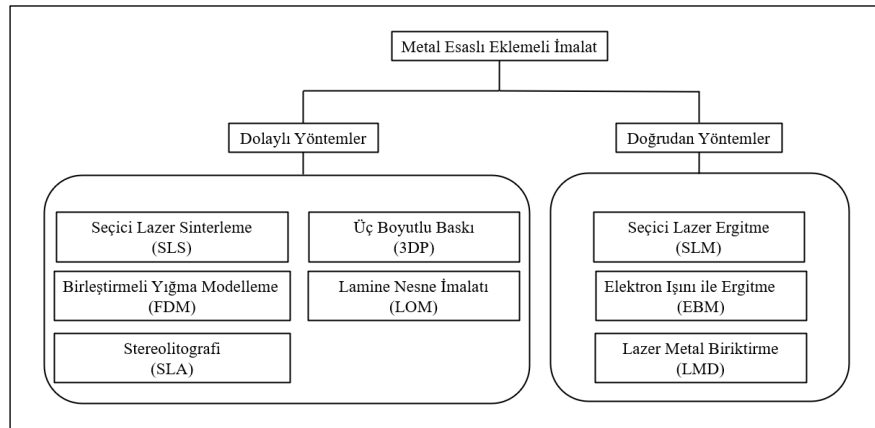
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Üç boyutlu (3B) baskı veya hızlı prototipleme olarak bilinen eklemeli imalat hem endüstriyel hemde akademik çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. ASTM (American society for testing materials) uluslararası F42 komitesine göre eklemeli imalat teknolojisi; gelişmiş CAD yazılımları ile oluşturulmuş üç boyutlu tasarımlardan yararlanarak farklı nesnelere üretmek amacıyla malzemeleri katman katman biriktirme işlemidir [1-2]. Eklemeli imalat yöntemi otomotiv, havacılık ve tıbbi uygulamalar için yüksek performans gerektiren parçaların imalatında yeni bir üretim tekniği olarak kullanılmaktadır [3]. Eklemeli imalat yöntemleri geleneksel imalat yöntemleri ile karşılaştırıldığında kafes yapıları gibi oldukça karmaşık parçaların üretimi, talaş kaldırma operasyonlarına göre düşük malzeme sarfiyatı, perçinleme ve yapıştırma gibi birleştirme işlemlerinin azaltılması ve daha temiz üretim ortamı gibi avantajlara sahiptir [4]. Bu nedenle eklemeli imalat, polimerlerden kompozitlere, saf metallere kadar çeşitli türdeki parçaların imal edilmesinde geniş bir alanda kullanılmaktadır. Bu avantajların yanı sıra, üretilen parça boyutunun ve malzeme çeşitliliğinin sınırlı olması, kusurlar, imalat sonrası ilave işlemler (ısıl işlem, talaşlı imalat vb.) gibi dezavantajlarla da karşılaşmaktadır [5-6].



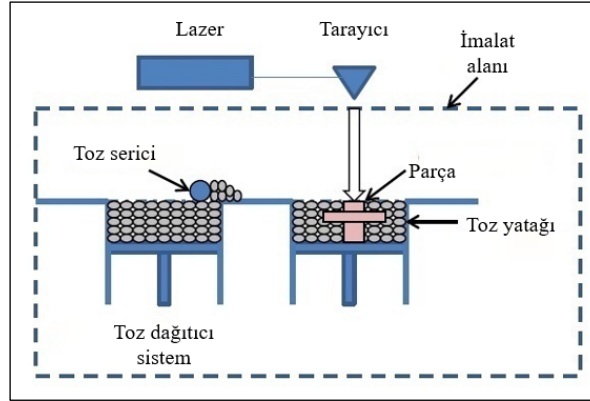
Şekil 1. Eklemeli imalat süreci [7]

Metal esaslı eklemeli imalat, bir enerji kaynağı ile metalik tozun veya telin katman katman eritilmesi yoluyla üç boyutlu (3B) nesnelere imal edildiği modern bir üretim sürecidir. Metal esaslı eklemeli imalat ile üretilen parçalar sürünme, oksidasyon, korozyon direnci ve yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruma yeteneği gibi önemli özelliklere sahiptir [8]. Metal esaslı eklemeli imalat (MAM) doğrudan ve dolaylı yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır [9]. Dolaylı yöntemlerde %90'dan fazla yoğunluğa sahip parçalar üretmek için sıcak izostatik presleme (HIP) gibi son işlemler gerekmektedir [9]. Diğer yandan yoğunluğu %90'ın üzerinde olan parçalar optimize edilmiş proses parametreleri aracılığıyla doğrudan yöntemlerle üretilmektedir.



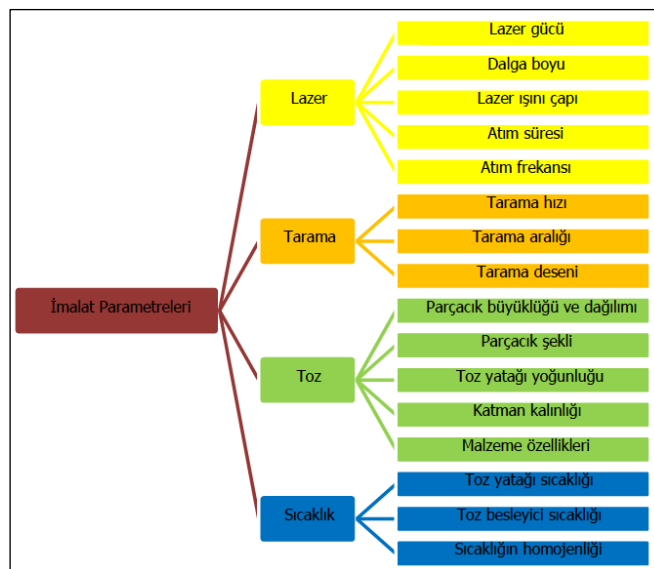
Şekil 2. Metal esaslı eklemeli imalatın sınıflandırılması [10]

Seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi karmaşık iç yapıya sahip bileşenleri üretmek için kullanılan eklemeli imalat yöntemidir [11]. Bu yöntemde CAD verisine göre bir enerji kaynağı ile toz yatağına serilen tozları belirlenmiş bir tarama yönünde eriterek yüksek yoğunluğa sahip parçalar elde edilmektedir [12]. SLM yönteminde hızlı soğuma oranından dolayı üretilen parçalar ince mikro yapıya sahiptir. Bu nedenle SLM tarafından üretilen parçalar, yöntemin getirmiş olduğu gelişmiş mikro yapı ile üstün mekanik özellikler sergilemektedir [13]. Ayrıca SLM yöntemi ile üretilen parçalar geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla yüksek yoğunluğa ve daha iyi performansa sahiptirler [14].



Şekil 3. Seçici lazer ergitme (SLM) prosesi [15]

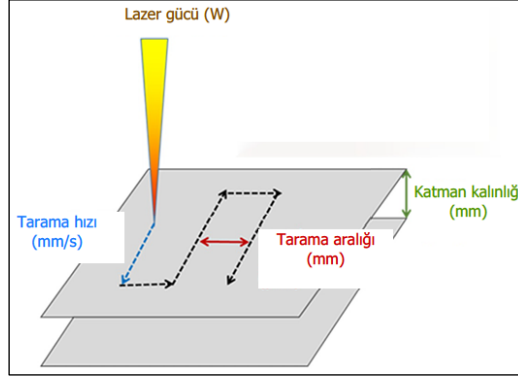
Alüminyum alaşımları havacılık, otomotiv, denizcilik ve medikal endüstrilerin yanı sıra, spesifik tasarımlara ihtiyaç duyulan çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Al-Si alaşımları arasında AlSi10Mg alaşımı yüksek mekanik özellikleri ve korozyon dayanımı ile ön plana çıkmakta ve eklemeli imalat yöntemiyle de oldukça iyi bir yüzey kalitesinde üretilebilmektedir [16]. Ayrıca AlSi10Mg alaşımı düşük boyutlu büzülme, kaynaklanabilirlik, düşük ağırlık oranı ve işlenebilirlik gibi mühendislik özelliklerinin bir arada olduğu bir alüminyum alaşımıdır [17]. Bu alaşımların üretilmesinde ise seçici lazer ergitme yönteminin (SLM) yeri oldukça önemlidir. SLM yöntemi yüksek yoğunlukta parçaların üretilmesine imkân tanıdığından AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır [18]. SLM ile metal parçaların istenilen kalitede üretilmesinde, toz yatağındaki metal tozu eritmek ve istenen şekilde katılaştırmak için kullanılan imalat parametreleri oldukça önemlidir. Yapılan çalışmalarda parametreler lazer, tarama, toz ve sıcaklık ile ilgili olmak üzere dört ana başlık altında toplanmıştır (Şekil 4) [19].



Şekil 4. SLM yönteminde imalat parametrelerinin sınıflandırılması [19-20].

SLM yöntemi ile metal parça üretiminde giriş parametreleri nihai ürünün kalitesini etkilemektedir. Giriş parametreleri; lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı, katman kalınlığı, tarama deseni, inşa yönü, toz

karakteristiği gibi değişkenler olarak kullanılırken çıkış parametreleri; bağıl yoğunluk, mekanik özellikler, yüzey pürüzlülüğü, geometrik doğruluk ve metalürjik yapı olarak ifade edilmektedir [21]. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, eklemeli imalat prosesini etkileyen birincil faktörün enerji yoğunluğu (E) olduğu görülmüştür (Şekil 5). Enerji yoğunluğu; tarama gücünün tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığına oranı ile ifade edilmekte ve eşitlik 1 ile hesaplanmaktadır.



Şekil 5. Lazer toz yatağı füzyon proseslerinde yaygın kullanılan imalat parametreleri [22]

$$E = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad (1)$$

Eşitlik 1’de E enerji yoğunluğunu (J/mm^3), P lazer gücünü (W), v tarama hızını (mm/s), h tarama aralığını (mm) ve t katman kalınlığını (mm) ifade etmektedir. Eşitliğe göre lazer gücü artarsa veya tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığı azalır işlemin enerji yoğunluğu artar. SLM sürecinde optimum bir enerji yoğunluğu değeri bulunmakta ve bu değer kullanılan toz alaşımına ve imalat tezgahına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [23].

Eklemeli imalat ile üretilen parçaların mukavemet özellikleri, yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluk gibi ürün kalitesini belirleyen özellikleri, imalat parametrelerinin uygun seçimi ile önemli ölçüde iyileştirilmektedir. Eklemeli imalat sürecinde çok sayıda parametre olmasına rağmen lazer, tarama ve toz parametreleri yaygın olarak araştırılmaktadır. Lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığı SLM yönteminde kullanılan önemli imalat parametreleridir. Eklemeli imalat teknikleri ile üretilen Al alaşımlarının mukavemetlerinin iyi olmasına rağmen mekanik özellikleri prosesle ilgili kusurlardan ciddi şekilde etkilenmektedir. Eklemeli imalat ile ilgili kusurların başında gözeneklilik ön plana çıkmakta ve bu durumda optimize edilmemiş bir süreçten kaynaklanmaktadır [3, 24-26]. SLM yönteminde toz alaşımlarının yüksek sıcaklıklara maruz kalması tozdaki belirli elementlerin buharlaşmasına neden olmaktadır. Bu durumda eriyik havuzunda buhar basıncının birikmesi ile malzeme birikimini olumsuz etkilemekte ve beraberinde erimiş malzemenin sıçramasına neden olarak düşük yoğunluklu ve gözenekli parçalara neden olmaktadır [27]. Gözenekliliği enerji yoğunluğu ile ilişkilendirerek kararlı bir eriyik havuzu elde etmek için birçok çalışma yapılmıştır. Optimum enerji yoğunluğunda tama yakın yoğun ürünler elde edilirken çok düşük veya çok yüksek enerji yoğunluğunda sırasıyla füzyon eksikliğine ve anahtar deliği gözenekliliğine yol açmaktadır [28-30].

Yüzey kalitesi, üretilen parçaların kullanım ömrü üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Pürüzlü yüzeylerin metalik malzemelerin yorulma performansını olumsuz etkilediği bilinmektedir. Bu nedenle, dinamik yükler altında çalışacak parçalarda yüksek yüzey kalitesi aranmaktadır. SLM yönteminde tasarım esnekliği ve parça kalitesi gibi önemli avantajlar elde edilirken yüzey kalitesi açısından hala önemli eksiklikler bulunmaktadır. Eklemeli imalat ile üretilen parçalarda oluşan yüzey pürüzlülüğü kısmen erimiş toz parçacıklarının yüzeye bağlanması ve katman katman üretim süreci ile ilişkilidir [31-32]. Bu nedenle eklemeli imalat ile üretilen ürünlerin yüzey kalitesinin ve kullanım ömrünün artırılması için imalat parametreleriyle ilişkisinin doğru bir şekilde seçilmesi önemlidir. Eklemeli imalat ile imal edilen parçaların yüzey dokuları, kullanılan enerji yoğunluğu (lazer gücü, katman kalınlığı, tarama hızı, tarama aralığı), toz boyutu ve dağılımı, yüzeyin inşa yüzeyine olan açısı ve ikincil işlemler gibi birçok parametreden etkilenmektedir [33,34]. Yapılan çalışmalarda yüzey pürüzlülüğünü azaltmak ve üretilen parçaların

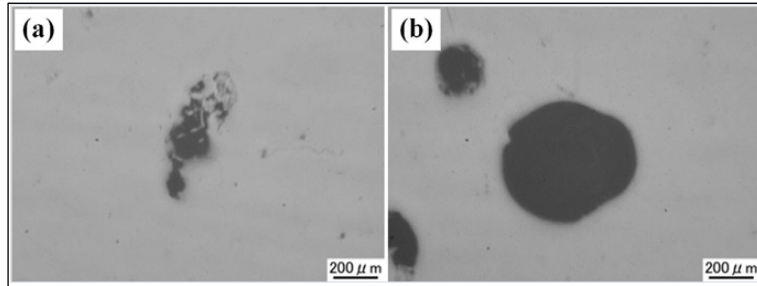
kullanım ömrünü arttırmak için imalat sonrası işlemler önerilmiştir [35-40]. İmalat sonrası ilave işlemlerle oluşacak maliyet ve zamanın yanı sıra bu işlemlerin gözenekli yapılar, kafes bileşenleri ve karmaşık geometriler üzerinde gerçekleştirilmesi oldukça zordur. Bu nedenle kapsamlı yüzey iyileştirmesine ihtiyaç duymadan eklemeli imalat ile üretilen parçaları nihai ürün olarak kullanılması oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında kullanılması imalat parametrelerinin ürün kalitesi üzerindeki etkilerine odaklanılmıştır. Literatür araştırmasında, eklemeli imalatı etkileyen birçok parametre olmasına rağmen nihai ürüne ulaşma noktasında en etkili faktörün enerji yoğunluğu olduğu görülmüştür. Bu nedenle araştırılan parametreler enerji yoğunluğunun hesaplanmasında kullanılan parametreler üzerinde durulmuştur. AlSi10Mg alaşımının SLM yönteminde kullanılması imalat parametrelerinin gözeneklilik, mekanik özellikleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkileri kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Bu çalışmanın, SLM yöntemi ile eklemeli imalatta üretilen parçaların nihai ürüne ulaşmak için yapılacak çalışmalara yardımcı olacağı düşünülmektedir.

2. METAL ESASLI EKLEMELİ İMALAT (METAL BASED ADDITIVE MANUFACTURING)

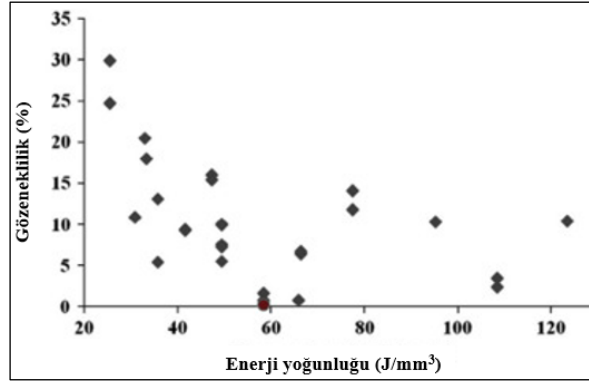
2.1. İmalat Parametrelerinin Gözeneklilik Üzerindeki Etkisi (Effect of Manufacturing Parameters on Porosity)

Metal esaslı eklemeli imalatla karşılaşılan en yaygın kusurlardan biri gözenekliliktir. Bu kusur genellikle füzyon eksikliği gözenekliliği (lack of fusion) ve anahtar deliği gözenekliliği (keyhole porosity) olarak iki şekilde ortaya çıkmaktadır (Şekil 6). Füzyon eksikliği gözenekliliği imalat parametrelerinin birbirleri ile uyumsuzluğundan kaynaklanan toz tabakalarının eksik erimesi ile oluşmaktadır. Anahtar deliği gözenekliliği yüksek enerji girişinin metali kolayca buharlaşmasına neden olması ile gaz kabarcıklarının parça yüzeyinin altında sıkışması ile oluşmaktadır. Füzyon eksikliği gözenekliliğinin anahtar deliği gözenekliliğine kıyasla gerilmeyi arttırıcı olarak hareket etme olasılığı daha yüksektir [22,41-42].



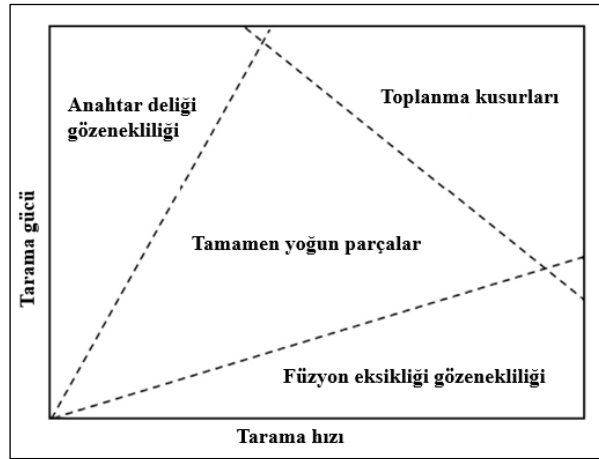
Şekil 6. Parçada oluşan gözeneklilikler (a) füzyon eksikliği (b) anahtar deliği [43]

Eklemeli imalatla malzemenin yoğunluğu ürün kalitesi açısından önemli bir faktördür. Dolayısı ile daha yoğun bir ürün elde etmek için optimum imalat parametreleri aralığının belirlenmesi gerekmektedir. Çok yüksek veya çok düşük enerji yoğunluğu kombinasyonlarında üretilen ürünlerde farklı kusur oluşturma mekanizmaları meydana gelmektedir [44]. Read vd. [23] SLM yöntemi ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımlı parçalarda gözeneklilik oluşumu üzerindeki imalat parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda lazer gücünün, tarama hızının ve tarama hızı ile tarama aralığı arasındaki etkileşimin gözenek oluşumunu önemli ölçüde etkilediğini gözlemlemişlerdir. Düşük ve yüksek enerji yoğunluklarında gözenekliliğin arttığını ve AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında düşük gözeneklilik için optimum enerji yoğunluğunun 60-75 J/mm³ arasında olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 7).



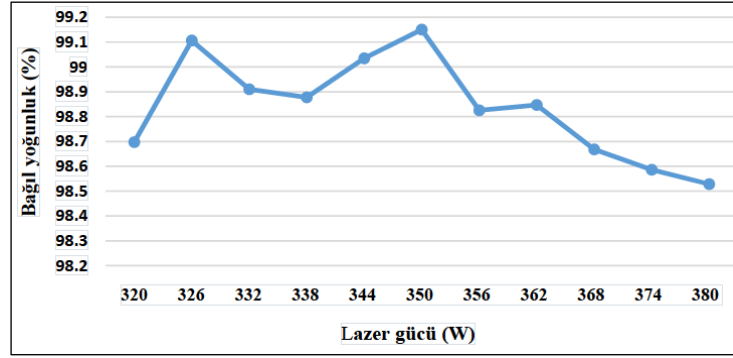
Şekil 7. Enerji yoğunluğunun gözeneklilik ile ilişkisi [23]

Eklemeli imalat çalışmalarında gözeneklilik ve imalat parametreleri arasındaki ilişki kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır (Şekil 8). Gözeneklilik dışında toplanma kusurları da işleme parametrelerinden etkilenmektedir. Gu ve Shen [45] yüksek tarama hızının lazer kaynaklı eriyik sıçramalarına neden olabileceğini ve bununla toplanma kusurlarına yol açabileceğini ve bu kusuru azaltmak için tarama hızını ve katman kalınlığını azaltmak gerektiğini ifade etmişlerdir.



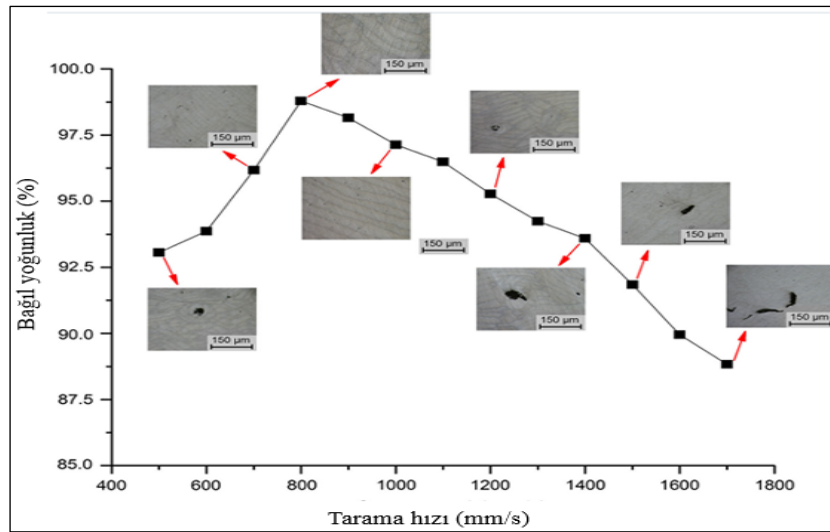
Şekil 8. İmalat parametrelerinin gözeneklilik üzerindeki etkisinin gösterimi [46]

Literatürde, SLM yöntemi ile üretilen parçaların kalitesini arttırmak için imalat parametrelerinin kusurlar ve parçaların bağıl yoğunluğu üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmalar da yapılmıştır [3, 43, 47]. Bağıl yoğunluk SLM ile üretilen parçaların ürün kalitesinin önemli bir göstergesi olarak görülmektedir. Daha yüksek bir bağıl yoğunluk değerinde oluşan kusurlar daha düşük bir hacimde oluşmakta ve istenilen yoğunlukta parçalar elde edilmektedir. İmalat parametrelerinin, elde edilen parçaların kusurları ve bağıl yoğunluğu üzerinde önemli etkileri vardır. Lazer gücü bağıl yoğunluk üzerinde en etkili parametre olduğu belirtilmiştir [48]. Eşitlik 1’de lazer gücünün enerji yoğunluğu ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. Lazer gücünün artması ile enerji yoğunluğundaki artış, toz malzemenin tamamen erimesine ve bağıl yoğunluğun artmasına neden olmaktadır. Ayrıca lazer gücü belirli bir değeri aştığında malzeme buharlaşması ile kusurların meydana gelmesine ve beraberinde daha düşük bir bağıl yoğunluğa neden olmaktadır [48]. Ahmed vd. [49]. AlSi10Mg alaşımlı parçaların üretilmesinde imalat parametrelerinin bağıl yoğunluk üzerindeki etkisini araştırmışlardır. İmalat parametreleri olarak tarama hızı (1650 mm/s) tarama aralığı (0,13 mm) ve tarama gücü (320-380 W) değişkenleri kullanılmıştır. 350 W lazer gücünde üretilen numunelerin bağıl yoğunluğunun %99’un üzerinde olduğunu ve artan lazer güçlerinde bağıl yoğunluğun düştüğünü belirtmişlerdir (Şekil 9).



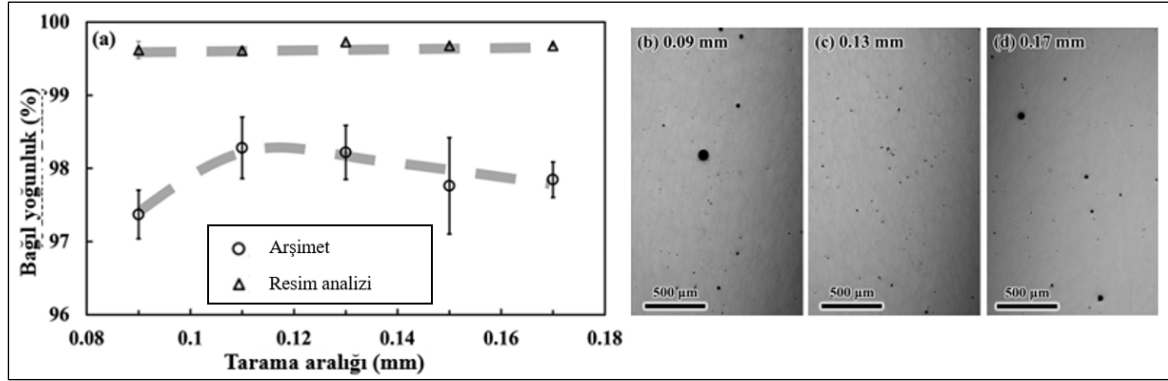
Şekil 9. Bağlı yoğunluğun lazer gücü ile değişimi [49]

Tarama hızı eşitlik 1'de gösterildiği gibi enerji yoğunluğu ile ters orantılıdır ve üretilen parçaların bağlı yoğunluğu üzerinde farklı bir etkiye sahiptir. Çok düşük bir tarama hızı aşırı enerji yoğunluğuna yol açabilir ve SLM sürecinde ertitme havuzunda malzeme buharlaşmasına ve sıçramasına neden olabilir. Bu durumda yüksek gözenek oranıyla sonuçlanmaktadır. Çok yüksek bir tarama hızı toz malzemenin tamamen erimesi için yetersiz enerji yoğunluğuna ve füzyon eksikliği kusurlarına neden olmaktadır. Chen vd. [47] AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında tarama hızının parçanın bağlı yoğunluğu üzerindeki etkisini araştırmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada imalat parametreleri lazer gücü (180 W), tarama aralığı (0,06 mm) ve tarama hızı (300-1700 mm/s) olarak kullanılmıştır. Tarama hızı 500 mm/s'den 800 mm/s'ye çıkarken parçanın bağlı yoğunluğu %94'ten %98'e yükselmiştir. Tarama hızı 800 mm/s'nin üzerine çıktığında tarama hızı arttıkça numunenin bağlı yoğunluğu azalmıştır. Bağlı yoğunluktaki bu azalmayı katılma aşamasında tarama hızı arttıkça erimeyen parçacıkların neden olduğu gözenek ve toplanma miktarındaki artışlarla ilişkilendirmişlerdir (Şekil 10).



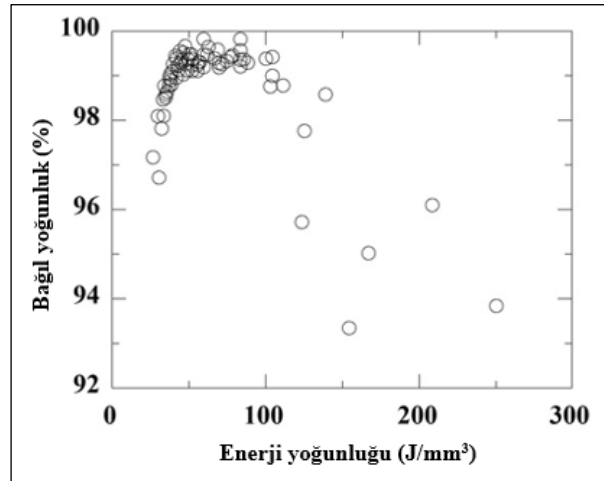
Şekil 10. Bağlı yoğunluğun tarama hızı ile değişimi [47]

Tarama aralığı, bağlı yoğunluk üzerinde tarama hızına benzer bir etkiye sahiptir. Daha büyük tarama aralığı ile bağlı yoğunluk maksimum değerine kadar artar ve sonra azalmaktadır. Hyer vd. [50] AlSi10Mg alaşımını numunelerin üretilmesinde tarama aralığının bağlı yoğunluğa etkisini araştırmışlardır. Çalışmada lazer gücü (250 W), tarama hızı (1200 mm/s) ve katman kalınlığı (0,03 mm) parametreleri sabit tutularak değişken tarama aralıklarında (0,09-0,13-0,17 mm) parçalar üretilmiştir. Üretim sonrasında en yüksek bağlı yoğunluğun 0,13 mm tarama aralığında elde edildiğini ve enerji yoğunluğunun 53,41 J/mm³ olduğunu söylemişlerdir. Tarama aralığı 0,13 mm'den daha düşük veya daha yüksek olduğunda bağlı yoğunluk azalmıştır. Bağlı yoğunluk azalışını düşük ve yüksek enerji yoğunluğu ile ilişkilendirmişlerdir (Şekil 11).



Şekil 11. Tarama aralığının bağıl yoğunluk üzerindeki etkisi [50]

Metal tozlarının ergitme yoğunluğu, lazer ışınının enerji yoğunluğuna bağlıdır [21]. Belirlenecek olan en uygun enerji yoğunluğunu sağlayan imalat parametreleri ile üretilen numunelerde %100'e çok yakın bağıl yoğunluk elde edilmektedir. Kimura vd. [43] optimum bağıl yoğunlukta parçalar üretmek için lazer parametrelerini araştırmışlardır. Üretilen numunelerin bağıl yoğunluğu yüksek ve düşük enerji yoğunluğunda azalmış ve düşüşler 100 J/mm^3 'ü aşan enerji yoğunluğunda daha belirgin olmuştur. Yüksek yoğunluklu (%99'dan fazla) numunelerin üretiminde ideal enerji yoğunluğu aralığının $50\text{-}100 \text{ J/mm}^3$ olduğu görülmüştür (Şekil 12).



Şekil 12. Enerji yoğunluğunun bağıl yoğunluk üzerindeki etkisi [43]

Tablo 1'de AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında imalat parametrelerinin üretilen parçaların yoğunluğu üzerindeki etkileri verilmiştir. Elde edilen parçalar tam yoğun ($\delta \geq \%99$), yoğun ($\% 99 < \delta \leq \%85$) ve gözenekli ($\delta < \%85$) olarak sınıflandırılmıştır.

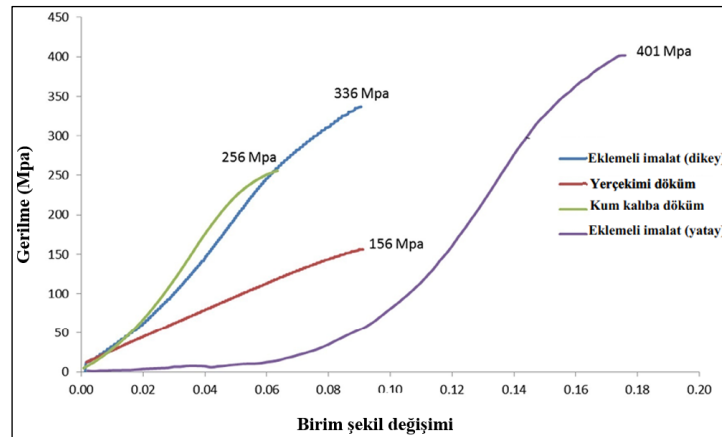
Tablo 1. AlSi10Mg alaşımlı parçaların üretimi için kullanılan temel imalat parametreleri ve değerleri

Malzeme	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Tarama Aralığı (µm)	Katman Kalınlığı (µm)	Enerji Yoğunluğu (J/mm ³)	Tam yoğun, Yoğun, Gözenekli	Ref. no
AlSi10Mg	350	1050	170	50	39	Tam yoğun	[51]
	788	1099	300	60	40	Tam yoğun	
	463,625,788,950	500,800,1099,1400,1700,2000	300,350,400	60	17-75	Yoğun	[52]
	100	250,500,750,1000	50,100	40	25-200	Yoğun	[3]
	320,360,400,370	600,750,900,1300	70,90-116,40,190	30,30	145-200,50	Yoğun, Yoğun	[53], [54]

240, 260, 320, 360, 400	1200, 1400, 1600, 1800, 2000	36, 40, 45, 51.4, 60	30	111	Tam yoğun	[55]
400, 440	1350, 1500	105	50	38-56	Tam yoğun	[56]
300	1230	105	50	68	Yoğun	[56]
150	500, 1500, 2500	45, 75, 105,	30	74, 95, 222	Tam yoğun	[57]
250	1500	75	30	74	Yoğun	[57]
150	2500	105, 150	30, 60	9, 13	Gözenekli	[57]

2.2. İmalat Parametrelerinin Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkisi (Effect of Manufacturing Parameters on Mechanical Properties)

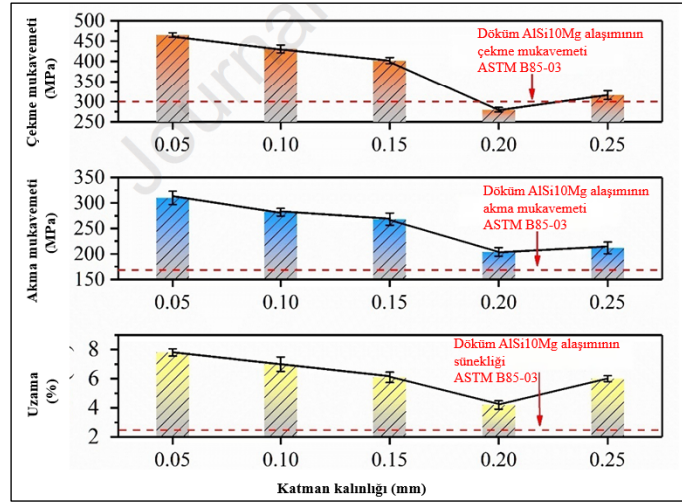
Eklemeli imalatta nihai ürüne ulaşma sürecinde birçok parametre söz konusudur. Bu nedenle parametrelerin ürün kalitesi (çekme mukavemeti, akma mukavemeti, süneklik, sertlik) üzerindeki etkisinin araştırılması gerekmektedir. SLM yöntemi ile üretilen parçalarının mekanik özellikleri geleneksel bir üretim yöntemi ile üretilen parçalardan daha yüksektir. SLM ile üretilen AlSi10Mg parçalarının döküm yöntemi ile üretilenlere göre daha yüksek çekme mukavemeti ve sertlik göstermektedir. Eklemeli imalatın bu avantajı imal edilen parçaların ince taneli mikro yapıda olması ile açıklanmaktadır [58]. Jawade vd. [59] SLM yöntemi ve geleneksel yöntemlerle (döküm) üretilen AlSi10Mg alaşımlı numunelerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Eklemeli imalat ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımlı parçaların döküm yöntemi ile üretilenlere kıyasla daha iyi çekme mukavemeti gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca eklemeli imalat ile yatay olarak üretilen numunelerin dikey yöndeki numunelere kıyasla daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu mukavemet artışını yatay yönde oluşturulan katmanların çekme testi sırasında yüklenme yönü boyunca üretilmesi ile katmanlar arası daha iyi bağ yapısı ile açıklamışlardır (Şekil 13). Kempen vd. [60] AlSi10Mg alaşımlı numunelerin eklemeli imalatında yatay olarak üretilen numunelerin mukavemet açısından daha iyi performans sergilediğini söylemişlerdir.



Şekil 13. AlSi10Mg alaşımlı parçalarının mukavemet açısından karşılaştırılması [59]

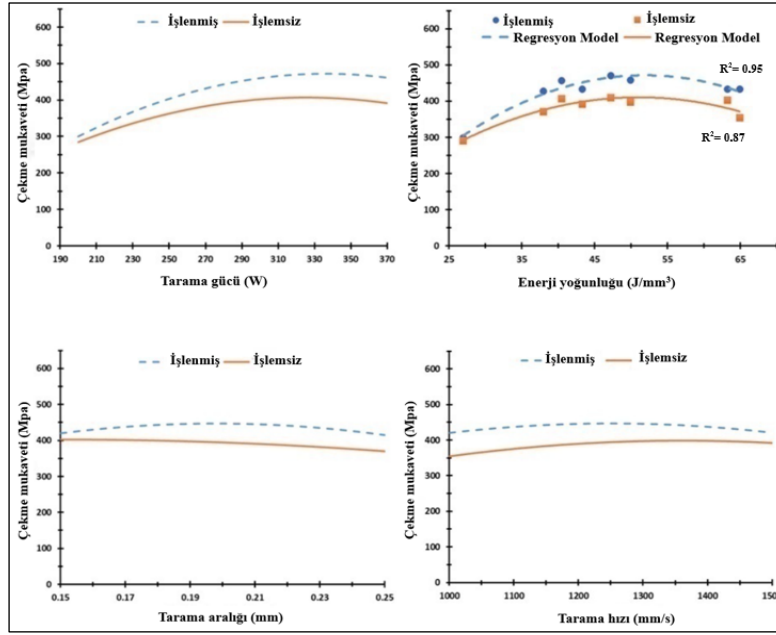
Dong vd. [61] AlSi10Mg alaşımından üretilen parçalar üzerinde tarama hızının çekme mukavemeti ve sünekliğe etkisini araştırmışlardır. Parça üretiminde kullanılan parametreler tarama aralığı (0,7 mm), tarama hızı (950-1100-1250-1400 mm/s), tarama gücü (190 W) ve katman kalınlığı (0,03 mm) olarak belirlenmiştir. 950 mm/s tarama hızında maksimum çekme mukavemeti (386 MPa) ve süneklik (%5,6) elde edilmiştir. Tarama hızı 1100 mm/s'den 1400 mm/s değerine yükseldikçe çekme dayanımı kademeli olarak 386 MPa'dan 330 MPa'ya, süneklik değeri 1400 mm/s tarama hızında %4'e düşmüştür. Mekanik özelliklerdeki bu düşüşü yüksek tarama hızında zayıf metalurjik bağ oluşumu ve erimemiş partiküllerin neden olduğu düzensiz gözeneklerin oluşumuna atfetmişlerdir. Liu vd. [62] AlSi10Mg alaşımından üretilen numuneler üzerinde katman kalınlığının mekanik özelliklerine etkisi incelemişlerdir. Çalışma sonucunda numunelerinin mekanik özellikleri katman kalınlığının değişimi ile artan ve azalan bir eğilim sergilemiştir. Katman kalınlığı 0,05 mm olduğunda mekanik özellikler en yüksek değere ulaşmış ve çekme mukavemeti, akma mukavemeti, süneklik değerleri sırasıyla 465 MPa, 310 MPa ve %7,8'dir. Katman kalınlığının artmasıyla birlikte parçaların mukavemet özelliği önce 0,2 mm katman kalınlığında en düşük değere (çekme

mukavemeti 280 MPa, akma mukavemeti 204 MPa, süneklik %4.2) kadar düşmekte ve en yüksek katman kalınlığı değerinde belirgin bir şekilde artmıştır. Parçaların mukavemet özelliklerinin döküm yöntemi ile elde edilen AlSi10Mg alaşımlı parçalardan daha üstün olduğunu söylemişlerdir (Şekil 14).



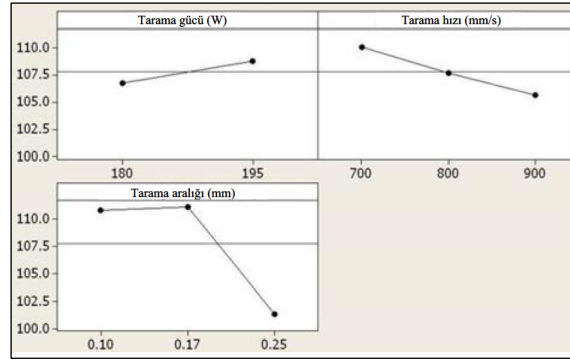
Şekil 14. Katman kalınlığının mekanik özellikler üzerindeki etkisi [62]

AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında enerji yoğunluğunun mekanik özellikler üzerindeki etkisi bir çok çalışmada araştırılmıştır. AlSi10Mg alaşımından üretilen parçalar için ideal enerji yoğunluğunun belirlenmesi ürün kalitesi açısından önemlidir. İdeal enerji yoğunluğunda üretilmeyen parçalarda kusurlar oluşmakta ve üretilen parçalar mukavemet özellikleri açısından olumsuz etkilenmektedir. Maamoun vd. [63] eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg alaşımlı parçaların ve eklemeli imalat sonrası işlem görmüş parçaların çekme mukavemeti üzerinde imalat parametrelerinin etkisini araştırmışlardır. İşlem görmüş parçaların işlemsiz parçalara göre daha yüksek çekme mukavemetine sahip olduğu görülmüştür. Çekme mukavemetindeki bu farkın yüzey pürüzlülüğünden kaynaklandığı belirtilmiştir. Şekil 15'te görüldüğü gibi deneysel sonuçlar ile regresyon modeli arasında bir uyum söz konusudur. Lazer gücü çekme mukavemeti üzerinde tarama aralığı ve tarama hızından daha etkilidir. Optimum enerji yoğunluğu değeri 50 J/mm^3 olduğunu ve bu değerın 1300 mm/s tarama hızı, 370 W lazer gücü ve $0,19 \text{ mm}$ tarama aralığında elde edilebileceğini vurgulamışlardır (Şekil 15). Wu vd. [64] AlSi10 Mg alaşımlı parçaların üretilmesinde yakın bir enerji yoğunluğunun ($50\text{-}65 \text{ J/mm}^3$) ideal değer olduğunu, Kimura ve Nakamoto [43] AlSi7Mg alaşımlı numunelerin imal edilmesinde 60 J/mm^3 bir enerji yoğunluğunun optimum değer olduğunu belirtmişlerdir.



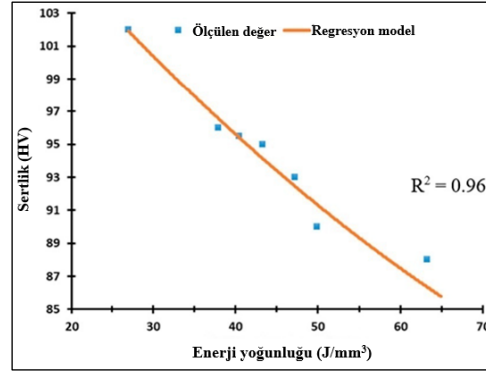
Şekil 15. İmalat parametrelerinin çekme mukavemeti üzerindeki [63]

Sertlik birçok endüstriyel uygulamada dikkate alınan önemli bir yüzey özelliğidir. Sertlik, malzemenin bölgesel plastik deformasyona karşı gösterdiği direncin karşılığıdır. Krishnan vd. [65] AlSi10Mg alaşımli parçaların üretilmesinde imalat parametrelerinin sertlik üzerindeki etkisi incelemiştir. İşlem üzerindeki en etkili parametreyi belirlemek için anova metodu kullanılmıştır. Sertliği en çok etkileyen parametrenin tarama aralığı olduğu bunu sırası ile tarama hızı ve lazer gücünün izlediğini söylemişlerdir (Şekil 16).



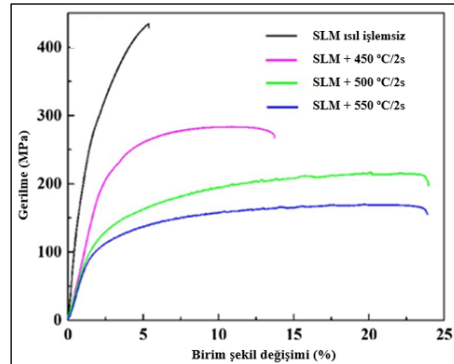
Şekil 16. Sertlik faktörünün etki grafiği [65]

Sertlik değeri gözeneklilik ile ilişkilidir. Bu nedenle gözenekliliği azaltan parametrelerin optimize edilmesi ile üretilen parçaların yüksek sertlikte olması sağlanmaktadır. Maamoun vd. [63] tarama gücü, tarama hızı ve tarama aralığının sertlik üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Enerji yoğunluğu arttıkça parçaların sertliğinin belirli bir seviyeye kadar arttığını ve daha yüksek enerji yoğunluğunda oluşan kusurlar nedeni ile azaldığını bildirmişlerdir. Artan ve azalan enerji yoğunluklarında sertlik değeri 86-103 HV arasında değişmekte ve maksimum değer 27 J/mm³ enerji yoğunluğunda elde edilmiştir. Enerji yoğunluğundaki artış anahtar deliği gözenekliliğine yol açmıştır. Lazer gücünün artması ile sertlik değerinin azaldığını, tarama aralığının ve tarama hızının artması ile parçanın sertliğinin arttığını belirtmişlerdir (Şekil 17). Giovagnoli vd. [66] AlSi10Mg alaşımli parçaların üretilmesinde enerji yoğunluğunun sertlik üzerindeki etkisini araştırmışlardır. İdeal sertlik için enerji yoğunluğu aralığının 35-40 J/mm³ olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 17. Enerji yoğunluğunun sertlik üzerindeki etkisi [63]

SLM yöntemi ile üretilen parçalarda ergitme sürecinden kaynaklanan büyük kalıntı gerilmeler oluşmakta ve bu durumda parçaların sünekliklerinin düşük olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, kalıtsal kusurların üstesinden gelmek, mekanik ve mikroyapısal performansı artırmak için üretim sonrası numunelere ısıl işlemler uygulanmaktadır. Aboulkhair vd. [67] SLM yöntemi ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımlı parçalara uygulanan T6 ısıl işleminin mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Isıl işlem sonrası malzemenin çekme mukavemeti, akma mukavemeti, sertlik değeri ve elastisite modülünde azalma meydana gelirken süneklik değeri artmıştır. Çalışma sonunda süneklik ısıl işlemle önemli ölçüde artarken mukavemet özelliklerinde küçük bir azalma ile döküm yöntemi ile karşılaştırıldığında SLM parçasının daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Li vd. [68] SLM ile üretilen AlSi10Mg alaşımlı parçalarının mikro yapıları ve mekanik özellikleri üzerinde ısıl işlemlerinin etkisini incelemişlerdir. Standart T6 ısıl işlem yöntemine uygun olarak numuneler farklı sıcaklıklarda (450, 500, 550 °C) 2 saat boyunca çözeltiye alma işlemine tabi tutulmuş, ardından su verme işlemi yapılmıştır. SLM yöntemi ile üretilen numunenin akma dayanımı (322 MPa) ve çekme dayanımının (434 MPa) en yüksek olmasına rağmen en düşük sünekliğe (%5) sahiptir. Numuneler 2 saat boyunca 450 °C'de çözelti ısıl işlemine tabi tutulduğunda hem akma dayanımı (196 MPa) hemde çekme dayanımında (282 MPa) hızlı bir düşüş olurken, süneklikte (%13) büyük bir artış olmuştur. Çözelti sıcaklığının 550 °C'ye kadar artmasıyla, numuneler en düşük akma ve çekme dayanımı (90 ve 168 MPa) sergilerken, süneklikte maksimum değere (%23) yükseldiğini belirtmişlerdir (Şekil 18).



Şekil 18. Isıl işlemin farklı sıcaklıklarda mekanik özelliklere etkisi [68]

Tablo 2'de AlSi10Mg alaşımlı parçalarının mekanik özellikleri verilmiştir. Aşağıdaki tabloda derlenen tüm çalışmalar 25-110 J/mm³ enerji yoğunluğu değerleri arasındadır. Bu nedenle artan ve azalan enerji yoğunluğu değerlerinde mekanik özelliklerdeki değişim birbiriyle karşılaştırılabilir durumdadır.

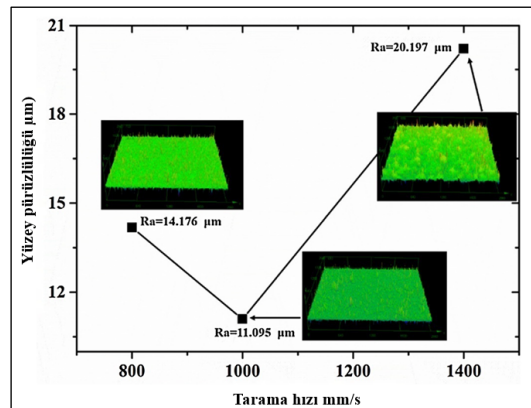
Tablo 2. AlSi10Mg alaşımlı parçaların mekanik özellikleri üzerinde imalat parametrelerinin etkisi

Malzeme	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Tarama Aralığı (mm)	Katman Kalınlığı (mm)	İnşa Yönü	Enerji Yoğunluğu (J/mm ³)	Sertlik (HV)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Ref no
	350	1650	0,13	0,03	Yatay	54,39	139	242,5	412	[69]
	195	700	0,17	0,03	-	54,62	119,92	-	-	[65]
	340	1300	0,2	0,03	Yatay	43,58	-	248	386	[70]
	200	1400	0,105	0,03	Yatay	45,35	127	-	391	[60]

AlSi10Mg	250	500	0,15	0,05	Yatay	66,66	113,54	301,26	401,89	[59]
	150	1000	0,05	0,05	Yatay	60	127	-	460	[71]
	300	500	0,15	0,05	-	80	145	220	400	[72]
	180	1000	0,05	0,03	-	120	139	-	360	[73]
	190	950	0,07	0,03	-	95,23	125	-	380	[61]
	200	550	0,13	0,025	-	111,88	125	268	333	[67]
	330	1200	0,15	0,03	-	61,11	-	-	335	[74]
	350	1140	0,17	0,05	-	36,11	132,55	322,17	435,25	[68]
	200	1400	0,105	0,03	-	45,35	136	-	396	[75]
	250	1400	0,13	0,03	-	45,78	128	263,6	448	[76]
	370	1300	0,19	0,03	-	49,93	-	268	404	[77]
	370	1000	0,19	0,03	Yatay	64,91	118	186	354	[63]
	370	1300	0,19	0,03	Yatay	49,93	115	196	396	
	350	1170	0,24	0,05	-	24,92	-	300	455	[78]
320	1455	0,11	0,05	-	39,98	-	240	385	[79]	
400	1000	0,165	0,025	-	96,96	-	-	312	[80]	

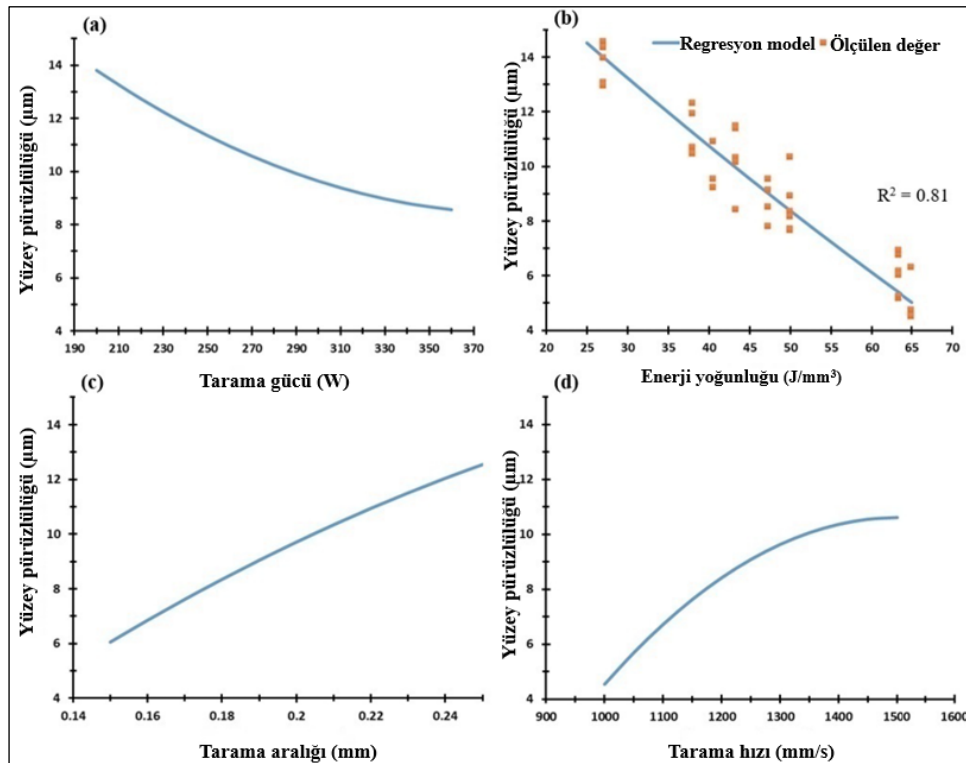
2.3. İmalat Parametrelerinin Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkisi (Effect of Manufacturing Parameters on Surface Quality)

Yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için, eklemeli imalat süreçlerini ve pürüzlülüğe neden olan değişkenlerin daha iyi anlaşılması gerekmektedir. Literatür araştırmasında lazer gücünün, tarama hızının, tarama aralığının, katman kalınlığının ve bunların etkileşiminin (enerji yoğunluğunun) genellikle SLM yöntemi ile üretilen parçaların yüzey kalitesini etkileyen birincil parametreler olduğu görülmüştür [81-83]. Brecher vd. [84] tarama gücünün çok yüksek olduğunda eriyik havuzundaki aşırı enerji yoğunluğu nedeniyle toz malzemenin sıçrama potansiyeli olduğunu ve bunun nispeten düşük bir yüzey kalitesine yol açabileceğini söylemiştir. Tarama hızı açısından genellikle düşük bir hız tercih edilir, çünkü uzun süre eriyik havuzunun yeniden dağıtılmasına ve düz bir yüzey elde etmesine olanak tanımaktadır [82]. Pei vd. [73] AlSi10Mg alaşımlı ürünlerin üretilmesinde lazer gücünün, tarama hızının ve tarama aralığının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar SLM ile üretilmiş numunelerin gözeneklilik seviyesinin lazer ışınının enerji yoğunluğu ve tarama aralığından önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. En iyi yüzey pürüzlülüğünü en düşük tarama aralığında (0,05 mm), en düşük tarama gücünde (150 W) ve orta tarama hızında (1000 mm/s) elde etmişlerdir (Şekil 19). Calignano vd. [85] lazer gücü, tarama hızı ve tarama aralığının SLM işlemi ile üretilen AlSi10Mg alaşımlı parçalarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Parçalar bilyalı dövme öncesi ve sonrası olmak üzere yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilmiştir. Çalışmada Taguchi L18 dizisi kullanılmış ve tarama hızının yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametre olduğu ve bilyeli dövme işleminin yüzey pürüzlülüğünü %83 oranında azalttığını bulmuşlardır. Sharma vd. [86] yaptıkları çalışmada lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve inşa yönü (0°, 45°, 90°) gibi imalat parametrelerinin AlSi10Mg alaşımlı parçaların yoğunluğu ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Parametrelerin işlem üzerindeki etkisini belirlemek için anova analizi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin tarama aralığı ve bunu sırası ile lazer gücü, tarama hızı ve inşa yönü olduğunu ifade etmişlerdir.



Şekil 19. Yüzey pürüzlülüğünün imalat parametreleri ile değişimi [73]

Sharma vd. [86] yaptıkları çalışmada lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve inşa yönü (0° , 45° , 90°) gibi imalat parametrelerinin AlSi10Mg alaşımlı parçaların yoğunluğu ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Parametrelerin işlem üzerindeki etkisini belirlemek için anova analizi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda yoğunluk ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin tarama aralığı ve bunu sırası ile lazer gücü, tarama hızı ve inşa yönü olduğunu ifade etmişlerdir. Wang vd. [87] lazer enerji yoğunluğunun yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Aşırı yüksek lazer enerji yoğunluğunun toplanma kusuruna yol açabileceğini, yetersiz lazer enerji yoğunluğunun ise gözeneklilik ve mikro çatlak gibi kusurlar üretme eğiliminde olduğunu ve yüzey pürüzlülüğünü etkilediğini gözlemlemişlerdir. Hitzler vd. [88] üretilmiş numunelerin yüzey pürüzlülüğünün imalat tablası üzerindeki konumlarına göre değiştiğini belirtmiştir. Ayrıca enerji yoğunluğunun artmasının üst yüzeyde ölçülen pürüzlülük değerlerinin yan yüzlere göre daha düşük değerlerde olduğunu söylemişlerdir. Maamoun vd. [89] imalat parametrelerinin AlSi10Mg alaşımlı parçaların yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemiştir. 370 W lazer gücünde, 1000 mm/s tarama hızı ve 0,19 mm tarama aralığı değerleri ile hesaplanan 65 J/mm^3 enerji yoğunluğunda $4,5 \mu\text{m}$ 'lik bir yüzey pürüzlülüğü elde edildiğini ifade etmişlerdir (Şekil 20). Bir başka çalışmada AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında en düşük yüzey pürüzlülüğünün ($5,09 \mu\text{m}$) 50 J/mm^3 enerji yoğunluğunda olduğu vurgulanmıştır [90]. Majeed vd. [91] AlSi10Mg alaşımlı parçaların üretiminde imalat parametrelerinin (lazer gücü, tarama hızı, örtüşme oranı, tarama aralığı) ve ısıl işlemlerin (çözeltiye alma, yapay yaşlandırma) yüzey kalitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda ısıl işlemsiz olarak 320 W lazer gücü, 600 mm/s tarama hızı, %35 örtüşme oranı ve 0,088 mm tarama aralığı parametreleri ile en iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü çözeltiye alma (540°C 'de 2 saat) ısıl işlemi ile daha da azaltılabileceğini bildirmişlerdir.

**Şekil 20.** İmalat parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi [89]

Tablo 3'de AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında imalat parametrelerinin üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri verilmiştir.

Tablo 3. AlSi10Mg alaşımlı parçaların yüzey pürüzlülükleri üzerinde imalat parametrelerinin etkisi

Malzeme	Lazer Gücü (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Tarama Aralığı (µm)	Örtüşme Oranı (%)	Katman Kalınlığı (mm)	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	Ref. no
AlSi10Mg	320	600	102,4	25	-	6,86	[91]
	320	600	95,5	30	-	3,73	
	320	600	88,7	35	-	3,57	
	320	750	93,1	25	-	3,80	
	320	750	86,9	30	-	3,92	
	320	750	80,7	35	-	3,85	[89]
	320	900	70,9	35	-	4,28	
	370	1000	190	-	0,03	4,5	
	370	1300	190	-	0,03	5,09	
	150	1000	50	-	-	11,09	

3. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Eklemeli imalat ile üretilen ürünlerin nihai (son) ürün olarak kullanılabilirliği son derece önemlidir. Nihai ürüne ulaşma aşamasında ideal imalat parametreleri ürün kalitesi açısından önemli bir faktördür. Optimum imalat parametreleri belirlenerek istenilen kalitede parçalar elde etmek mümkündür. Bu çalışmada, seçici lazer ergitme (SLM) yöntemi ile AlSi10Mg alaşımının eklemeli imalatında imalat parametrelerinin ürün kalitesi üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Bu araştırma ile elde edilen önemli sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- SLM yöntemi ile AlSi10Mg alaşımli parçaların imalatında enerji yoğunluğunun ürün kalitesinde etkili olduğu tespit edilmiştir.
- Üretilen parçalarda en az gözeneklilik için ideal enerji yoğunluğu, 50-75 J/mm³ aralığındadır. Artan ve azalan enerji yoğunluklarında gözeneklilik seviyesinin arttığı belirlenmiştir.
- Bağlı yoğunluk, lazer gücü, tarama hızı ve tarama aralığı parametrelerinin artan değerleri ile optimum seviyelere ulaştığı ve bu parametrelerin yüksek değerlerinde bağlı yoğunluğun azaldığı görülmüştür.
- AlSi10Mg alaşımından üretilen parçaların optimum bağlı yoğunluk değeri 50-100 J/mm³ enerji yoğunluğu aralığında elde edildiği görülmüştür.
- Eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg alaşımli parçalar döküm yöntemi ile üretilenlere kıyasla daha iyi mukavemet özelliği gösterdiği tespit edilmiştir.
- AlSi10Mg alaşımli parçalar için optimum çekme mukavemeti, 50-65 J/mm³ enerji yoğunluğu aralığında elde edilmiştir.
- Sertlik üzerinde etkili parametrenin tarama aralığı olduğu gözlenmiştir.
- Isıl işlemin sünekliği artırıcı etkiye sahip olduğu görülmüştür.
- AlSi10Mg alaşımli parçaların üretilmesinde en düşük yüzey pürüzlülüğü 50-65 J/mm³ enerji yoğunluğu aralığında oluştuğu görülmüştür.
- Isıl işlem ile yüzey pürüzlülüğünün daha da azaltılabileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. Günay, S. Gündüz, H. Yılmaz, N. Yaşar, R. Kaçar, PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu, *Politeknik Dergisi*, 23(1): 73-79, (2020).
- [2] C. Kiraz, H. K. Sezer, İ. Şahin, Kuyumculuk sektöründe 3B baskı tasarım tekniklerinin özgürlüğünden faydalanıldığında sektöre getirileri, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2(2): 46-58, (2018).
- [3] N. T. Aboulkhair, N. M. Everitt, I. Ashcroft, C. Tuck, Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting, *Additive manufacturing*, 1, 77-86, (2014).
- [4] N. Hutasoit, R. A. Rashid, S. Palanisamy, A. Duguid, Effect of build orientation and post-build heat treatment on the mechanical properties of cold spray additively manufactured copper parts, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110(9): 2341-2357, (2020).
- [5] M. Günay, İ. Yeşildağ, Mechanical Properties of Low Carbon Steel Produced by GMAW-based Additive Manufacturing, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(3): 175-182, (2021).
- [6] H. Dedeakayoğulları, A. Kaçal, Eklemeli İmalat Teknolojileri ve Kullanılan Talaşlı İmalat Yöntemleri Üzerine Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi, *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 1(1): 1-12, (2020).
- [7] <http://my3dconcepts.com/explore/how-3d-printing-works>, 20.01.2022.
- [8] A. N. Jinoop, S. K. Subbu, R. A. Kumar, Mechanical and microstructural characterisation on direct metal laser sintered Inconel 718, *International Journal of Additive and Subtractive Materials Manufacturing*, 2(1): 1-12, (2018).
- [9] L. Yang, *Additive manufacturing of metals: the technology, materials, design and production*, Cham: Springer, 45-61, (2017).
- [10] N. Guo, M.C. Leu, Additive manufacturing: technology, applications and research needs, *Frontiers of mechanical engineering*, 8(3): 215-243, (2013).
- [11] K. G. Prashanth, S. Scudino, H. J. Klauss, K. B. Surreddi, L. Löber, Z. Wang, J. Eckert, Microstructure and mechanical properties of Al-12Si produced by selective laser melting: Effect of heat treatment, *Materials Science and Engineering: A*, 590, 153-160, (2014).
- [12] F. Trevisan, F. Calignano, M. Lorusso, J. Pakkanen, A. Aversa, E. P. Ambrosio, D. Manfredi, On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: process, microstructure, and mechanical properties, *Materials*, 10(1): 76. (2017).
- [13] E. Brandl, U. Heckenberger, V. Holzinger, D. Buchbinder, Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior, *Materials & Design*, 34, 159-169, (2012).
- [14] E. Louvis, P. Fox, C. J. Sutcliffe, Selective laser melting of aluminium components, *Journal of Materials Processing Technology*, 211(2): 275-284. (2011).
- [15] W. E. Frazier, Metal additive manufacturing: a review, *Journal of Materials Engineering and performance*, 23(6): 1917-1928, (2014).
- [16] H. Kahramanzade, Y. Sert, T. Küçükömeroğlu, Sürtünme Karıştırma İşleminin Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilen AlSi10Mg Alaşımının Tribolojik Özelliklerine Etkisi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (28), 1159-1166. (2021).

- [17] W. D. Nix, H. Gao, Indentation size effects in crystalline materials: a law for strain gradient plasticity, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 46(3): 411-425, (1998).
- [18] D. Buchbinder, W. Meiners, K. Wissenbach R. Popraw, Selective laser melting of aluminum die-cast alloy correlations between process parameters, solidification conditions, and resulting mechanical properties, *Journal of Laser Applications*, 27 (S2): (2015).
- [19] S. Sun, M. Brandt, M. J. L. A. M. Easton, Powder bed fusion processes: An overview, *Laser Additive Manufacturing*, 55-77, 2017.
- [20] E. U. Solakoğlu, Lazerle Metal Toz Ergitme (SLM) Prosesi Sonrası Proses Parametrelerinin Yüzey Kalitesine Olan Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 10, (2018).
- [21] B. Duman, M. C. Kayacan, Doğrudan metal lazer sinterleme/ergitme yöntemi ile imal edilecek parçanın mekanik özelliklerinin tahmini, *Teknik Bilimler Dergisi*, 7(1): 12-28. (2017).
- [22] J. P. Oliveira, A. D. LaLonde, J. Ma, Processing parameters in laser powder bed fusion metal additive manufacturing, *Materials & Design*, 193, 108762, (2020).
- [23] N. Read, W. Wang, K. Essa, M. M. Attallah, Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development, *Materials & Design (1980-2015)*, 65, 417-424, (2015).
- [24] P. Wei, Z. Wei, Z. Chen, J. Du, Y. He, J. Li, Y. Zhou, The AlSi10Mg samples produced by selective laser melting: single track, densification, microstructure and mechanical behavior, *Appl. Surf. Sci.*, 408, 38-50, (2017).
- [25] S. Siddique, M. Imran, E. Wycisk, C. Emmelmann, F. Walther, Influence of process-induced microstructure and imperfections on mechanical properties of AlSi12 processed by selective laser melting, *J. Mater. Process. Technol.*, 221, 205-213, (2015).
- [26] Ö. Bayraktar, G. Uzun, R. Çakiroğlu, A. Guldaz, Experimental study on the 3D-printed plastic parts and predicting the mechanical properties using artificial neural networks, *Polymers for Advanced Technologies*, 28(8): 1044-1051, (2017).
- [27] Y. Liu, Y. Yang, S. Mai, D. Wang, C. Song, Investigation into spatter behavior during selective laser melting of AISI 316L stainless steel powder, *Materials & Design*, 87, 797-806, (2015).
- [28] A. A. Martin, N. P. Calta, S. A. Khairallah, J. Wang, P. J. Depond, A.Y. Fong, V. Thampy, G. M. Guss, A. M. Kiss, K. H. Stone, C. J. Tassone, J. Nelson Weker, M. F. Toney, T. Van Buuren, M. J. Matthews, Dynamics of pore formation during laser powder bed fusion additive manufacturing, *Nature communications* 10(1): 1-10, (2019).
- [29] M. Bayat, A. Thanki, S. Mohanty, A. Witvrouw, S. Yang, J. Thorborg, N.S. Tiedje, J. H. Hattel, Keyhole-induced porosities in laser-based powder bed fusion (L-PBF) of Ti6Al4V: high-fidelity modelling and experimental validation, *Addit. Manuf.*, 30, 100835, (2019).
- [30] G. Kasperovich, J. Haubrich, J. Gussone, G. Requena, Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting, *Materials & Design*, 105, 160-170, (2016).
- [31] W. E. Frazier, Metal additive manufacturing: a review, *Journal of Materials Engineering and performance*, 23(6): 1917-1928, (2014).

- [32] W. J. Sames, F. A. List, S. Pannala, R. R. Dehoff, S. S. Babu, The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing, *International materials reviews*, 61(5): 315-360. (2016).
- [33] A. Triantaphyllou, C. L. Giusca, G. D. Macaulay, F. Roerig, M. Hoebel, R. K. Leach, K. A. Milne, Surface texture measurement for additive manufacturing, *Surface topography: metrology and properties*, 3(2): 024002, (2015).
- [34] G. Strano, L. Hao, R. M. Everson, K. E. Evans, Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting, *Journal of Materials Processing Technology*, 213(4): 589-597, (2013).
- [35] N. N. Kumbhar, A. V. Mulay, Post processing methods used to improve surface finish of products which are manufactured by additive manufacturing technologies: a review, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 99(4): 481-487, (2018).
- [36] L. Hackel, J. R. Rankin, A. Rubenchik, W. E. King, M. Matthews, Laser peening: A tool for additive manufacturing post-processing, *Additive Manufacturing*, 24, 67-75, (2018).
- [37] S. Lee, Z. Ahmadi, J. W. Pegues, M. Mahjouri-Samani, N. Shamsaei, Laser polishing for improving fatigue performance of additive manufactured Ti-6Al-4V parts, *Optics & Laser Technology*, 134, 106639, (2021).
- [38] M. Kahlin, H. Ansell, D. Basu, A., Kerwin, L. Newton, B. Smith, J. J. Moverare, Improved fatigue strength of additively manufactured Ti6Al4V by surface post processing, *International Journal of Fatigue*, 134, 105497, (2020).
- [39] E. Maleki, S. Bagherifard, M. Bandini, M. Guagliano, Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities, *Additive Manufacturing*, 37, 101619, (2021).
- [40] A. Du Plessis, P. Sperling, A. Beerlink, O. Kruger, L. Tshabalala, S. Hoosain, S. G. Le Roux, Standard method for microCT-based additive manufacturing quality control 3: surface roughness, *MethodsX*, 5, 1111-1116, 2018.
- [41] Q. Wang, Z. Zhang, X. Tong, S. Dong, Z. Cui, X. Wang, L. Ren, Effects of process parameters on the microstructure and mechanical properties of 24CrNiMo steel fabricated by selective laser melting, *Optics & Laser Technology*, 128, 106262, (2020).
- [42] T. Gustmann, A. Neves, U. Kühn, P. Gargarella, C. S. Kiminami, C. Bolfarini, S. Pauly, Influence of processing parameters on the fabrication of a Cu-Al-Ni-Mn shape-memory alloy by selective laser melting, *Additive Manufacturing*, 11, 23-31, (2016).
- [43] T. Kimura, T. Nakamoto, Microstructures and mechanical properties of A356 (AlSi7Mg0.3) aluminum alloy fabricated by selective laser melting, *Mater. Des.*, 89, 1294-1301, (2016).
- [44] H. Gong, K. Rafi, H. Gu, T. Starr, B. Stucker, Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes, *Additive Manufacturing*, 1, 87-98, (2014).
- [45] D. Gu, Y. Shen, Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods, *Materials & Design*, 30(8): 2903-2910, (2009).
- [46] V. Gopan, K. L. D. Wins, A. Surendran, Innovative potential of additive friction stir deposition among current laser based metal additive manufacturing processes: A review, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 32, 228-248, (2021).

- [47] Z. Chen, Z. Wei, P. Wei, S. Chen, B. Lu, J. Du, S. Zhang, Experimental research on selective laser melting AlSi10Mg alloys: process, densification and performance, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(12): 5897-5905, (2017).
- [48] Y. Bai, Y. Yang, D. Wang, M. Zhang, Influence mechanism of parameters process and mechanical properties evolution mechanism of maraging steel 300 by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*, 703, 116-123, (2017).
- [49] A. Ahmed, M. S. Wahab, A. A. Raus, K. Kamarudin, Q. Bakhsh, D. Ali, Effects of selective laser melting parameters on relative density of AlSi10Mg, *Int. J. Eng. Technol*, 8(6): 2552-2557, (2016).
- [50] H. Hyer, L. Zhou, S. Park, G. Gottsfriz, G. Benson, B. Tolentino, Y. Sohn, Understanding the laser powder bed fusion of AlSi10Mg alloy, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 9(4): 484-502, (2020).
- [51] E. Cerri, E. Ghio, G. Bolelli, Effect of the Distance from Build Platform and Post-Heat Treatment of AlSi10Mg Alloy Manufactured by Single-and Multi-Laser Selective Laser Melting, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(7): 4981-4992, (2021).
- [52] S. Bai, N. Perevoshchikova, Y. Sha, X. Wu, The effects of selective laser melting process parameters on relative density of the AlSi10Mg parts and suitable procedures of the archimedes method, *Applied Sciences*, 9(3): 583, (2019).
- [53] A. Majeed, Y. J. Lv, Zhang, T. Peng, Z. Atta, A. Ahmed, Investigation of T4 and T6 heat treatment influences on relative density and porosity of AlSi10Mg alloy components manufactured by SLM, *Computers & Industrial Engineering*, 139, 106194, (2020).
- [54] L. Girelli, M. Tocci, M. Gelfi, A. Pola, Study of heat treatment parameters for additively manufactured AlSi10Mg in comparison with corresponding cast alloy, *Materials Science and Engineering: A*, 739, 317-328, (2019).
- [55] T. Yang, T. Liu, W. Liao, E. MacDonald, H. Wei, C. Zhang, K. Zhang, Laser powder bed fusion of AlSi10Mg: Influence of energy intensities on spatter and porosity evolution, microstructure and mechanical properties, *Journal of Alloys and Compounds*, 849, 156300, (2020).
- [56] K. Riener, S. Oswald, M. Winkler, G. J. Leichtfried, Influence of storage conditions and reconditioning of AlSi10Mg powder on the quality of parts produced by laser powder bed fusion (LPBF), *Additive Manufacturing*, 39, 101896, (2021).
- [57] J. C. Hastie, M. E. Kartal, L. N. Carter, M. M. Attallah, D. M. Mulvihill, Classifying shape of internal pores within AlSi10Mg alloy manufactured by laser powder bed fusion using 3D X-ray micro computed tomography: Influence of processing parameters and heat treatment, *Materials Characterization*, 163, 110225, (2020).
- [58] L. P. Lam, D. Q. Zhang, Z. H. Liu, C. K. Chua, Phase analysis and microstructure characterisation of AlSi10Mg parts produced by Selective Laser Melting, *Virtual and Physical Prototyping*, 10(4): 207-215 (2015).
- [59] S. A. Jawade, R. S. Joshi, S. B. Desai, Comparative study of mechanical properties of additively manufactured aluminum alloy, *Materials Today: Proceedings*, 46, 9270-9274. (2021).
- [60] K. Kempen, L. Thijs, J. Van Humbeeck, J. P. Kruth, Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting, *Physics Procedia*, 39, 439-446, (2012).

- [61] S. Dong, X. Zhang, F. Ma, J. Jiang, W. Yang, Z. Lin, Research on metallurgical bonding of selective laser melted AlSi10Mg alloy, *Materials Research Express*, 7(2): 025801, (2020).
- [62] M. Liu, K. Wei, X. Yue, G. Huang, J. Deng, X. Zeng, High power laser powder bed fusion of AlSi10Mg alloy: effect of laser beam mode, *Journal of Alloys and Compounds*, 164779, (2022).
- [63] A. H. Maamoun, Y. F. Xue, M. A. Elbestawi, S. C. Veldhuis, The effect of selective laser melting process parameters on the microstructure and mechanical properties of Al6061 and AlSi10Mg alloys, *Materials*, 12(1): 12, (2018).
- [64] H. Wu, Y. Ren, J. Ren, L. Liang, R. Li, Q. Fang, I. Baker, Selective laser melted AlSi10Mg alloy under melting mode transition: Microstructure evolution, nanomechanical behaviors and tensile properties, *Journal of Alloys and Compounds*, 873, 159823, (2021).
- [65] M Krishnan, E. Atzeni, R. Canali, F. Calignano, D. Manfredi, E. P. Ambrosio, L. Iuliano, On the effect of process parameters on properties of AlSi10Mg parts produced by DMLS, *Rapid Prototyping Journal*, (2014).
- [66] M. Giovagnoli, G. Silvi, M. Merlin, M. T. Di Giovanni, Optimisation of process parameters for an additively manufactured AlSi10Mg alloy: Limitations of the energy density-based approach on porosity and mechanical properties estimation, *Materials Science and Engineering: A*, 802, 140613 (2021).
- [67] N. T. Aboulkhair, I. Maskery, C. Tuck, I. Ashcroft, N. M. Everitt, The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment, *Materials Science and Engineering: A*, 667, 139-146, (2016).
- [68] W. Li, S. Li, J. Liu, A. Zhang, Y. Zhou, Q. Wei, Y. Shi, Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism, *Materials Science and Engineering: A*, (663) 116-125, (2016).
- [69] A. A. Raus, M. S. Wahab, M. Ibrahim, K. Kamarudin, A. Ahmed, S. Shamsudin, Mechanical and physical properties of AlSi10Mg processed through selective laser melting, In *AIP Conference Proceedings*, 1831(1), 020027, (2017).
- [70] R. Casati, M. Hamidi Nasab, M. Coduri, V. Tirelli, M. Vedani, Effects of platform pre-heating and thermal-treatment strategies on properties of AlSi10Mg alloy processed by selective laser melting, *Metals*, 8(11): 954, (2018).
- [71] B. J. Mfusi, L. C. Tshabalala, A. P. I. Popoola, N. R. Mathe, The effect of selective laser melting build orientation on the mechanical properties of AlSi10Mg parts, In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 430(1): 012028, (2018).
- [72] D. Buchbinder, H. Schleifenbaum, S. Heidrich, W. Meiners, J. J. P. P. Bültmann, High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts, *Physics Procedia*, 12, 271-278, (2011).
- [73] P. Wei, Z. Wei, Z. Chen, J. Du, Y. He, J. Li, Y. Zhou, The AlSi10Mg samples produced by selective laser melting: single track, densification, microstructure and mechanical behavior, *Applied surface science*, 408, 38-50, (2017).
- [74] R. K. Shah, P. P. Dey, Process parameter optimization of DMLS process to produce AlSi10Mg components, In *Journal of Physics: Conference Series*, 1240(1): 012011, (2019).

- [75] K. Kempen, L.Thijs, J. Van Humbeeck, J. P. Kruth, Processing AlSi10Mg by selective laser melting: parameter optimisation and material characterisation, *Materials Science and Technology*, 31(8): 917-923, (2015).
- [76] T. H. Park, M. S. Baek, H. Hyer, Y. Sohn, K. A. Lee, Effect of direct aging on the microstructure and tensile properties of AlSi10Mg alloy manufactured by selective laser melting process, *Materials Characterization*, 176, 111113, (2021).
- [77] P. Wang, H. Lei, X. Zhu, H. Chen, D. Fang, Influence of manufacturing geometric defects on the mechanical properties of AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting, *Journal of Alloys and Compounds*, 789, 852-859, (2019).
- [78] B. Chen, S. K. Moon, X. Yao, G. Bi, J. Shen, J. Umeda, K. Kondoh, Strength and strain hardening of a selective laser melted AlSi10Mg alloy, *Scripta Materialia*, 141, 45-49, (2017).
- [79] K. Gokuldoss Prashanth, S. Scudino, J. Eckert, Tensile properties of Al-12Si fabricated via selective laser melting (SLM) at different temperatures, *Technologies*, 4(4): 38, (2016).
- [80] J. Sun, L. Qiu, F. Wang, Y. Yang, L. Guo, A new modification effect of eutectic Si in selective laser melted AlSi10Mg, *Materials Science and Technology*, 35(6): 709-715, (2019).
- [81] A. Simchi, The role of particle size on the laser sintering of iron powder, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 35(5): 937-948, (2004).
- [82] K. Mumtaz, N. Hopkinson, Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting, *Rapid Prototyping Journal*, (2009).
- [83] J. P. Kruth, L. Froyen, J. Van Vaerenbergh, P. Mercelis, M. Rombouts, B. Lauwers, Selective laser melting of iron-based powder, *Journal of materials processing technology*, 149(1-3): 616-622, (2004).
- [84] C. Brecher, S. Jeschke, G. Schuh, S. Aghassi, J. Arnoscht, F. Bauhoff, F. Welter, Integrative production technology for high-wage countries, In *Integrative production technology for high-wage countries*, 17-76, (2012).
- [85] F. Calignano, D. Manfredi, E. P. Ambrosio, L. Iuliano, P. Fino, Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(9): 2743-2751, (2013).
- [86] R. Sharma, S. Kumar, R. Saha, Investigation of Laser Sintered AlSi10Mg Specimens for Density and Surface Roughness, In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 804(1): 012024, (2020).
- [87] L. Z. Wang, S. Wang, J. J. Wu, Experimental investigation on densification behavior and surface roughness of AlSi10Mg powders produced by selective laser melting, *Optics & Laser Technology*, 96, 88-96, (2017).
- [88] L. Hitzler, J. Hirsch, M. Merkel, W. Hall, A. Öchsner, Position dependent surface quality in selective laser melting: Positionsabhängige Oberflächenqualität im selektiven Laserstrahlschmelzen, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 48(5): 327-334, (2017).
- [89] A. H. Maamoun, Y. F. Xue, M. A. Elbestawi, S. C. Veldhuis, 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, (2018).

- [90] Z. Ç. Öter, Direkt metal lazer sinterleme (DMLS) yöntemi ile 3 boyutlu metal yazıcıda üretilen parçaların yüzey kalitesi, boyutsal hassasiyet ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi, Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, Türkiye, 2021.
- [91] A. Majeed, A. Ahmed, A. Salam M. Z. Sheikh, Surface quality improvement by parameters analysis, optimization and heat treatment of AlSi10Mg parts manufactured by SLM additive manufacturing, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2(4): 288-295, (2019).