



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN
MALZEMELERDE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Elif Esra BAYKAL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Elif Esra BAYKAL

19/01/2023

SEÇİCİ LAZER ERGİTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN MALZEMELERDE ÜRETİM PARAMETRELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Elif Esra BAYKAL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Eklemeli imalat, geleneksel imalat yöntemlerine alternatif olan yeni bir imalat yöntemidir. Bu yöntemler başlangıçta hızlı prototipleme için kullanılsa da günümüzde çok karmaşık geometrilere sahip ürünleri kesici alet veya kalıp kullanmadan üretme kolaylığı sağlamaktadır. Seçici lazer ergitme, toz yataklı bir metal eklemeli imalat yöntemidir. Bu yöntemde toz halindeki malzeme bir lazerle eritilir ve katmanlar halinde birbirine bağlanarak nihai ürün elde edilir. Uygun işlem parametrelerinin seçimi nihai özelliklerin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Bu tez çalışmasında, seçici lazer ergitme tezgâhında kontur parametresinin; ofset miktarı, lazer gücü, tarama hızı değiştirilmiş ve bu değişikliklerin malzemenin boyutsal doğruluk, yüzey pürüzlülüğü ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deney numuneleri, iç yüzey tarama parametreleri sabit tutularak, kontur parametresi değişkenleri olarak üç farklı ofset miktarı, üç farklı tarama hızı ve üç farklı lazer gücü kullanılarak üretilmiştir. Yapılan deneyler sonucu, ofset miktarının boyutsal doğruluk değerlerini değiştiren en etkin parametre olduğu tespit edilmiştir. Lazer gücü ve tarama hızına bağlı olarak boyutsal doğruluğun istenilen ölçülerde elde edilebildiği görülmüştür. Ofset miktarının yüzey kalitesi ve mukavemet değerlerini de etkilediği belirlenmiştir. En ideal kalınlık ölçüsü ise 0,175 mm ofset miktarında, 240 W lazer gücünde ve 420 mm/s tarama hızında 3,001 mm olarak belirlenmiştir. En ideal genişlik ölçüsü ise 0,14 mm ofset miktarında, 160 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızında 10,013 mm olarak belirlenmiştir.

Bilim Kodu : 91437

Anahtar Kelimeler : Eklemeli imalat, seçici lazer ergitme, mekanik özellikler, yüzey pürüzlülüğü, boyutsal doğruluk, SLM

Sayfa Adedi : 59

Danışman : Doç. Dr. Gültekin UZUN

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PRODUCTION ON MECHANICAL
PROPERTIES OF MATERIALS PRODUCED BY SELECTIVE LASER MELTING
METHOD

(M. Sc. Thesis)

Elif Esra BAYKAL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

Additive manufacturing is a new manufacturing method that is an alternative to traditional manufacturing methods. Although these methods were initially used for rapid prototyping, today, they provide ease of producing products with very intricate geometries without cutting tools or molds. Selective laser melting is a powder bed metal additive manufacturing method. In this method, the powdered material is melted with a laser and bonded together in layers to obtain the final product. The selection of suitable process parameters plays an important role in determining the final properties. In this thesis, the contour parameter of the selective laser melting machine. The offset amount, laser power and, scanning speed were changed and the effects of these changes on the dimensional accuracy, surface and roughness, and mechanical properties of the material were investigated. Experimental samples were produced using three different offset amounts, three different scanning speeds, and three different laser powers as contour parameter variables, keeping the inner surface scanning parameters constant. As a result of the experiments, it has been determined that the offset amount is the most effective parameter that changes the dimensional accuracy values. It has been observed that dimensional accuracy can be obtained in desired dimensions depending on the laser power and scanning speed. It was determined that the amount of offset also affects the surface quality and strength values. The ideal thickness was determined as 3,001 mm at an offset 0,175 mm, 240 W laser power and 420 mm/s scanning speed. The ideal width was determined as 10,013 mm at an offset of 0,14 mm, 160 W laser power and 280 mm/s scanning speed.

Science Code : 91437

Key Words : Additive manufacturing, selective laser melting, mechanical properties, surface roughness, dimensional accuracy, SLM

Page Number : 59

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Gültekin UZUN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım süresince benden desteğini, bilgi ve birikimini esirgemeyen, karşılaştığım birçok probleme rağmen bana olan inancını hiçbir zaman yitirmeyen ve bu tezin ortaya çıkmasını sağlayan değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Gültekin UZUN'a saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında yaptığımız deneylerde aktardığı bilgi birikimle ve teknik destekle bu yolda ilerlememde katkısı olan Sayın Prof. Dr. İhsan KORKUT, Sayın Doç. Dr. Yakup TURGUT, Sayın Prof. Dr. Alaattin KAÇAL, Arş. Gör. Dr. Bahattin YILMAZ, Arş. Gör. Duygu GÜRKAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatta her daim yanımda olan, emek ve özveriyle beni bugünlere getiren başta sevgili babam Fehmi YERLİKAYA olmak üzere annem, kardeşlerim ve yeğenlerime sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Son olarak hayatımın her aşamasında katkısı ve yardımı olan kıymetli eşim Yusuf BAYKAL'a sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Koordinasyon Birimi tarafından FYL-2021-7216 numaralı proje olarak desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa	
iv	ÖZET
v	ABSTRACT.....
vi	TEŞEKKÜR.....
vii	İÇİNDEKİLER
ix	ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....
xii	ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....
xiii	RESİMLERİN LİSTESİ
iv	SİMGELER VE KISALTMALAR.....
1	1. GİRİŞ.....
3	2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI
7	3. KURAMSAL TEMELLER
7	3.1. Eklemeli İmalat.....
10	3.1.1. Seçici lazer ergitme.....
11	3.1.2. Eklemeli imalatta kullanılan malzemeler ve alsı10mg alaşımı.....
12	3.2. Boyutsal Doğruluk
14	3.3. Yüzey Pürüzlülüğü.....
17	4. MATERYAL VE YÖNTEM.....
17	4.1. Toz Karakterizasyonu
17	4.2. Deney Numunesi Tasarımı ve İmalat Parametreleri
19	4.3. 3B Baskı Makinesi ve Özellikleri
20	4.5. Boyutsal Özelliklerin Araştırılması
21	4.6. Yüzey Özelliklerinin Araştırılması
22	4.7. Mukavemet Özelliklerinin Araştırılması

Sayfa

5. BULGULAR.....	25
5.1. Boyutsal Doğruluk Değerlerinin Değerlendirilmesi.....	25
5.2. Pürüzlülük Değerlerinin Değerlendirilmesi.....	30
5.3. Mukavemet Değerlerinin Değerlendirilmesi	38
6. SONUÇLAR VE ÖNERLİLER	46
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	51

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Ortalama yüzey pürüzlülük değerleri	6
Çizelge 2.2. Boyutsal doğruluk ölçümleri	7
Çizelge 3.1. İmalat yöntemleri ve aşındırıcı yöntemlere ait pürüzlülük değerleri.....	15
Çizelge 3.2. Yüzey kalite ve pürüzlülük değerleri.....	15
Çizelge 4.1. AlSi10Mg malzemesine ait kimyasal bileşenler.....	17
Çizelge 4.2. AlSi10Mg malzemesine ait mekanik değerler.....	17
Çizelge 4.3. İç yüzey sabit parametreleri	19
Çizelge 4.4. Numunelerin üretimi sırasında kullanılan değişken kontur parametreleri..	19
Çizelge 4.5. Concept Laser M2 Cusing makinesi fiziksel boyutları.....	20
Çizelge 4.6. Concept Laser M2 Cusing makinesinde oluşturulabilecek maksimum numune boyutları	20
Çizelge 4.7. Concept Laser M2 Cusing makinesi genel özellikleri	20
Çizelge 4.8. CMM cihazına ait teknik özellikler	21
Çizelge 4.9. Profilometre cihazına ait teknik özellikler	22
Çizelge 4.10. Hoytom Çekme Kopma Test Cihazı Bilgisayar Kontrollü HM-D teknik özellikleri	23
Çizelge 5.1. Boyutsal doğruluk ölçüm değerleri.....	25
Çizelge 5.2. Yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri	31
Çizelge 5.3. Akma ve kopma mukavemet değerleri	40

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Ölçüm yapılan yüzeyler	6
Şekil 2.2. Boyutsal doğruluk ölçüm noktaları	7
Şekil 3.1. Eklemeli imalatla temel aşamalar	8
Şekil 3.2. Eklemeli imalat sınıflandırılması.....	9
Şekil 3.3. Seçici lazer ergitme çalışma prensibi	10
Şekil 3.4. Kontur taraması ve iç yüzey taraması gösterimi.....	11
Şekil 3.5. Ra pürüzlülük değeri gösterimi	14
Şekil 3.6. Rz pürüzlülük değeri gösterimi	15
Şekil 4.1. Deney numunesi boyutları.....	18
Şekil 4.2. Deney numunesi tabla yerleşim üst-ön görünüşleri.....	18
Şekil 4.3. Concept Laser M2 Cusing cihazı.....	19
Şekil 4.4. Hexagon Global Performance CMM cihazı	21
Şekil 4.5. Mitutoyo SJ-410 profilometre	21
Şekil 4.6. Çekme deneylerinin yapıldığı Hoytom Çekme Kopma Test Cihazı Bilgisayar Kontrollü HM-D.....	22
Şekil 5.1. 3 mm kalınlık ölçüsünün ofset miktarına bağlı değişim grafiği.....	26
Şekil 5.2. 10 mm genişlik ölçüsünün ofset miktarına bağlı değişim grafiği.....	28
Şekil 5.3. Ortalama Ra pürüzlülük değerlerinin ofset miktarına bağlı değişim grafiği..	32
Şekil 5.4. Ortalama Rz pürüzlülük değerlerinin ofset miktarına bağlı değişim grafiği..	35
Şekil 5.5. Gerilme-Uzama diyagramı	38
Şekil 5.6. Numune 9: Gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	39
Şekil 5.7. Akma mukavemet değerlerinin ofset miktarına bağlı değişim grafiği	41
Şekil 5.8. Kopma mukavemet değerlerinin ofset miktarına bağlı değişim grafiği	43

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Üretilen numuneler üzerinden alınan SEM görüntüleri, a) D5, b) D25	34
Resim 5.2. Üretilen numuneler üzerinden alınan SEM görüntüleri, a) D7, b) D16	37

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
Al	Alüminyum
Co	Kobalt
Cu	Bakır
Cr	Krom
dk	Dakika
Fe	Demir
GPa	Giga Pascal
HB	Brinell Sertlik Değeri
HRC	Rockwell Sertlik Değeri
J	Joule
kg	Kilogram
Mg	Magnezyum
Mn	Mangan
MPa	Mega Pascal
m²	Metrekare
mm	Milimetre
µm	Mikrometre
Ni	Nikel
Nm	Newton Metre
Pb	Kurşun
P	Lazer Gücü
R_p	Plastik Ekstansometre
s	Saniye
Si	Silisyum
Sn	Kalay
Ti	Titanyum
W	Watt
Zn	Çinko

Kısaltmalar	Açıklamalar
2D	2 boyut
3D	3 boyut
Ar-Ge	Araştırma ve Geliştirme
ASTM	Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Derneği
BJ	Yapıştırıcı Püskürtme
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CMM	Üç Boyutlu Ölçüm Cihazı
D	Derinlik
DLP	Dijital Işık İşleme
DMLS	Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
EBAM	Elektron Işınlı Eklemeli İmalat
EBM	Elektron Işın Ergitme
FDM	Eriyik Yığma
G	Genişlik
LENS	Lazerle Net Şekillendirme
LOM	Lamine Nesne İmalatı
PJ	Çoklu Püskürtme
Ra	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
Rz	Ortalama pürüzlülük derinliği
SL (SLA), STL	Stereolitografi
SLM	Seçici Lazer Ergitme
SLS	Seçici Lazer Sinterleme
Y	Yükseklik

1. GİRİŞ

Uluslararası ASTM standartlarına göre eklemeli imalat, geleneksel üretim metodolojilerinin tersine, çoğunlukla katmanları üst üste dizerek üç boyutlu model çıktılarından nihai ürünleri meydana getirmek için malzemeleri birleştirme sürecidir [1]. Geleneksel imalat tekniklerinin dezavantajları nedeniyle eklemeli imalat teknikleri ortaya çıkmıştır. Eklemeli imalatın avantajları arasında döküm ve talaşlı imalat tekniklerine göre daha fazla tasarım özgürlüğü sunmaktadır. Kısıtlama olmaksızın ve istenen hafiflikte parça üretebilme, karmaşık kanallı parçaların ve birçok parçayı yekpare olarak üretilmektedir. Eklemeli imalat, pahalı veya işlenmesi zor alaşımların hammadde olarak kullanılabilmesi ve kalıp veya diğer aletlerin kullanılmasını gerektiren geleneksel tekniklerin aksine alet gereksinimi bulunmamaktadır [2].

Otomotiv, havacılık, biyomedikal gibi yüksek teknoloji sektörlerinde artan rekabete paralel olarak, hassas boyutlara ve uygulamaya yönelik özel mekanik niteliklere sahip mühendislik bileşenlerinin daha ucuza ve daha hızlı üretilebilmesi için artan bir talep vardır. Üreticiler, dünyadaki tüm bu endüstrilerde yüksek teknoloji, katma değeri yüksek ürünler üretmek için Ar-Ge faaliyetlerine daha fazla odaklanmaktadır. Seri üretimin gerekli olmadığı paket imalatlarda, belirli bir ürün için bireysel müşteri taleplerine odaklanmak, bu taleplere ekonomik bir şekilde cevap vermek ve cevap sürelerini kısaltmak çok önemli hale gelmiştir. Prototiplemede ve Ar-Ge çalışmalarında yeni tasarlanan parçaların bileşen şeklini uygulamaya özel niteliklerini doğrulamak üreticilere ek bir maliyet getirmektedir. Özellikle geleneksel üretim ve şekillendirme teknikleri kullanıldığında, her bir tasarımın test edilmesi için yeni bir kalıbın tasarlanması, üretilmesi ve şekillendirilme prosedürleri için pahalı aletlerin kullanılması yüksek maliyetlere neden olmaktadır. Tasarımdan üretime geçişte deneme-yanılma yönteminden kaynaklanan zaman ve para kayıplarının önlenmesi, ülkemizde katma değeri yüksek ürünlere yönelik Ar-Ge ve üretim faaliyetlerinin yaygınlaştırılması için ilk şarttır. Önümüzdeki yıllarda seri üretim gerektirmeyen küçük partiler halindeki üretime ve ucuz prototip üretimine olan ihtiyaçta önemli bir artış olacağı öngörülmektedir [3]. Günümüzde sıklıkla kullanılan birçok eklemeli imalat tekniği vardır. Bu teknikler, malzemeleri bir araya getirerek katmanları nasıl oluşturduklarına, parçaları nasıl ürettiklerine ve nasıl çalıştıklarına göre farklılık gösterir. Örneğin; seçici lazer ergitme (SLM), seçici lazer sinterleme ve eriyik yığıma modelleme gibi üretim yöntemlerinde amaç kullanılan katı malzemeyi yumuşatmak veya eriterek katmanları oluşturmaktır. Buna karşın

stereolitografi yöntemindeki amaç ise sıvı malzemeleri birleştirmektir. Kullanılan tüm tekniklerin artıları, eksileri vardır ve bazı üreticiler nihai olarak müşterilere parça için temel malzeme olarak toz veya polimer arasında seçim yapma seçeneği sunar [4]. Eklemeli imalat yaklaşımı, karmaşık ve geleneksel yöntemler kullanılarak yapılması neredeyse imkânsız olan veya çok sayıda uzun işlem aşaması gerektiren parçaların üretimini sağlar. Bu nedenle çok farklı birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sektörler; otomotiv, yüksek teknoloji, endüstriyel ürünler, medikal, insansız hava aracı ve uzay sanayi gibi sektörlerdir [5-6]. Uzun yıllardır eklemeli imalat gelişimini takip ederek raporlayan Wohlers Raporu'na göre; eklemeli imalat sektörünün 2020'deki %7,5'lik büyümeden 2021'de %19,5'a büyüdüğünü belirtilmektedir. 2022 raporuna göre, 3D baskı sektörü geliştikçe, artan sayıda şirket teknolojiyi seri üretim uygulamaları için kullanmaktadır [7]. Eklemeli imalat yöntemlerini kullanmanın bir başka avantajı da hem metal hem de polimer malzemeleri kullanma yeteneğidir. Bu üretim yöntemi sayesinde işlenmesi güç metaller de sektörde aktif olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler başlıca; alüminyum alaşımları, nikel alaşımları, gümüş, paslanmaz çelik çeşitleri, Co-Cr alaşımları, altın, titanyum alaşımları, takım çeliği olarak sayılabilir. Özellikle hafif alaşımlara kıyasla alüminyum alaşımları SLM işleminde sıklıkla test edilen malzemeler arasındadır [8].

Seçici lazer ergitme yöntemi, üç boyutlu nesneler üretebilmek için enerji kaynağı olarak lazer ışınını küçük, küresel tozlarla birleştiren bir eklemeli imalat yöntemidir. Seçici lazer ergitme yöntemi, toz yataklı sistemlerden en önemli eklemeli imalat yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Kullanılan malzeme çeşitliliği ve geometri açısından üç boyutlu ürün üretimine imkân sağlamaktadır. Destek yapılarının olması SLM yönteminde önemli bir ayrıcalık sunmaktadır, üretim sırasında açığa çıkan ısının hızlı bir şekilde yayılmasını ve parçanın üretimi sırasında geometrinin kontrolünü sağlar [9]. SLM yöntemi medikal, otomotiv, savunma ve havacılık gibi birçok sektörde ilgi görmektedir [10]. Son yıllarda SLE yöntemi, işlevselliği artırılmış karmaşık şekillerin üretimi ile birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılır hale gelmiştir. Nihai ürüne yakın geometriler kullanan bu teknik, daha az atık üreterek ve üretim döngüsünü kısaltarak çevreye karşı da olumlu bir davranış sergilemektedir [11]. Başlangıçta prototip yapımında kullanılsa da son dönemde ürünün kısa sürede son kullanıcıya ulaştırıldığı hızlı üretim tekniklerinden biri olmuştur [12].

Bu çalışmada en çok kullanılan eklemeli imalat yöntemlerinden olan seçici lazer ergitme yöntemi kullanılmıştır. Üretim materyali olarak AlSi10Mg metal tozu kullanılarak

numuneler üretilmiştir. Birçok üretim parametresi üretim sürecini etkilemekte olup parçanın boyutsal doğruluklarını, pürüzlülük değerlerini, mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Boyutsal doğruluğu ve yüzey kalitesini etkileyen en önemli parametre kontur parametreleri olarak literatürde ifade edilmektedir. SLM ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde ise içyapı parametrelerinin değişiminin malzemenin özelliklerine olan etkisinin incelendiği görülmüştür. Bu nedenle çalışmamızda kontur parametresi değişken parametre seçilerek; ofset miktarı, tarama hızı ve lazer gücü değiştirilmiştir. Bu parametre değişimlerinin üretilen numuneler üzerindeki yüzey pürüzlülüğü, boyutsal doğruluk ve mekanik özellikleri etkileri araştırılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Üretim parametrelerinin ve üretim stratejilerinin, seçici lazer ergitme yöntemi kullanılarak yapılan parçaların mekanik özellikleri, yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal doğruluğu üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Kullanılan üretim parametrelerinin ve en iyi üretim parametrelerinin belirlenmesi bu nedenle çok önemlidir. Bu alanda daha önce yapılan çalışmalarda iç yüzey parametre çalışmalarına daha sık rastlanırken kontur parametresi çalışması yok denecek kadar azdır. Literatürde bu amaçla yapılan çalışmalar sınırlı olmakla birlikte, mevcut çalışmalar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

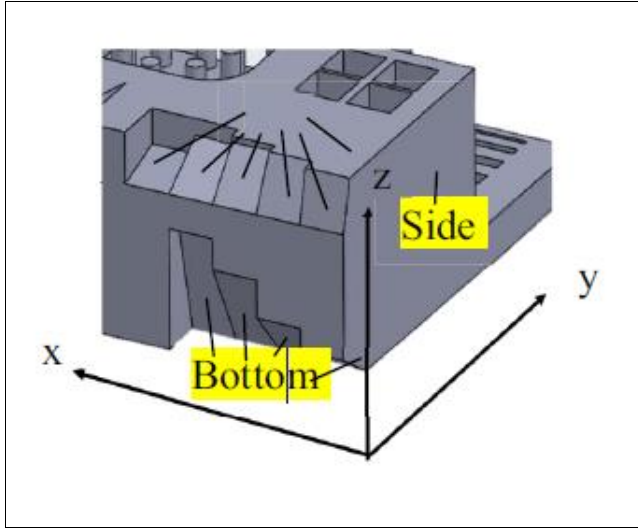
Vrana vd., AlSi10Mg toz malzemeden kafes yapılar üretmek için SLM tarama stratejisinin araştırılmasını ele almışlardır. Günümüzde, SLM son kullanıcılarının çoğu, farklı bileşenler üretmek için toz veya makine tedarikçileri tarafından önerilen lazer stratejisini ve parametrelerini kullanmaktadır. Ancak önerilen bu strateji ve parametreler, özellikle düşük hacimli kafes yapılarda malzeme ve şekil kusurlarına neden olabilir. Yapılan çalışmada, AlSi10Mg malzemesi için varsayılan ana tarama stratejisi kontur stratejisi olarak değiştirilmiş ve ana SLM işlem parametreleri geliştirilmiştir. Deneyler, kafes yapısının şeklini ve boyutunu dikkate alacak şekilde değiştirilmiştir. Çalışma ile geliştirilen parametrelerin, 0,25-0,4 J/mm²'lik önerilen giriş doğrusal enerji aralığını; dikme çapına, giriş doğrusal enerjisine ve dikmenin yönüne bağlı iz genişliğini; %35'lik lazer kontur izlerinin üst üste binmesini ve içten dışa yönünü kullanarak; 0,6 ila 3 mm arasında geniş bir dikme çapı aralığında yüksek malzeme yoğunluğuna (%99,8'den fazla) ve düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip kafes yapılar üretmenin mümkün olduğunu göstermiştir [13].

Han vd. yaptıkları çalışmada, SLM ile AlSi10Mg numuneler 200 W lazer gücünde, 600-3000 mm/s tarama hızında, 20 µm katman kalınlığında ve 0,04-0,10 µm tarama aralığı parametrelerin üretilmiştir. Boyutsal doğruluk, düşük yüzey kalitesi ve eriyik havuzunun genişliği arasında güçlü bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Küçük eriyik havuzuna ve iyi yüzey kalitesine sahip bir dikmenin yüksek boyutsal doğruluğa sahip olacağı sonucuna varmışlardır. Bu nedenle, eğimli bir dikme imal edilirken boyutsal doğruluğu arttırmak için yüksek tarama hızları kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Yapılan pürüzlülük testi sonuçları, Ra ortalama pürüzlülük değeri yaklaşık 3,536 µm, Rz pürüzlülük değeri yaklaşık 14,142 µm olarak ölçülmüştür [14].

Buchbinder vd., SLM ile üretilen AlSi10Mg alaşım numunelerini iki farklı yapı parametresi seti kullanarak test etmişlerdir. İlk numuneler 240 W lazer gücü ve 500 mm/s tarama hızı; diğer numuneler 960 W lazer gücü ve 1000 mm/s tarama hızında üretilmiştir. Nihai çekme mukavemetlerinin lazer gücünden bağımsız olduğu görülmüş ve her iki durumda da benzer değerler elde edilmiştir. Çekme mukavemetleri sırasıyla; 400-450 MPa ve akma mukavemetleri sırasıyla; 210-240 MPa olarak tespit edilmiştir. Yüksek lazer gücü ile üretilen numunelerin kopma uzaması, düşük güce kıyasla %25 daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca, bir SLM işleminde kopma anizotropisinde uzama ile ilgili olarak üç ana hususun nasıl dikkate alınması gerektiği açıklanmıştır. Bunlar; kusurlar ve gözenek varlığı, tane boyutları ve dokusu ile eriyik izleri ve katmanlar arasındaki arayüzler olduğu belirtilmiştir [15].

Kempen vd., SLM yöntemi ile AlSi10Mg numuneler üretmişlerdir. Bu numuneler XY ve Z doğrultularında 200 W lazer gücü, 1400 mm/s tarama hızında, 105 µm tarama boşluğu kullanılarak üretilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, XY doğrultusunda üretilen numunenin nihai çekme mukavemet değeri, 391 ± 6 MPa, Z doğrultusunda üretilen numunenin nihai çekme mukavemet değeri, 396 ± 8 MPa olarak bulunmuştur. Geleneksel döküm ve yaşlandırma işlemi uygulanmış AlSi10Mg malzemesine ait nihai çekme mukavemeti değerinin 300-317 MPa olduğunu belirtmişlerdir. XY ve Z doğrultularındaki mukavemet değerlerinin farklı çıkmasının sebebinin gözeneklilik olduğu sonucuna varmışlardır [16].

Kamarudin vd., SLM yöntemi ile AlSi10Mg numunelerin boyutsal doğruluk ve yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için numune üretmişlerdir. Kullanılan üretim parametreleri, lazer gücü 350 W, tarama hızı 1650 mm/s, tarama mesafesi 0,13 mm, katman kalınlığı 30 µm, lazer ışın çapı 80 µm, lazer ışın çapı ofset miktarı 0,025 mm olarak belirlenmiştir. Ölçümler Şekil 2.1’de görüldüğü gibi farklı yüzey ve açılardan yapılmıştır.



Şekil 2.1. Ölçüm yapılan yüzeyler

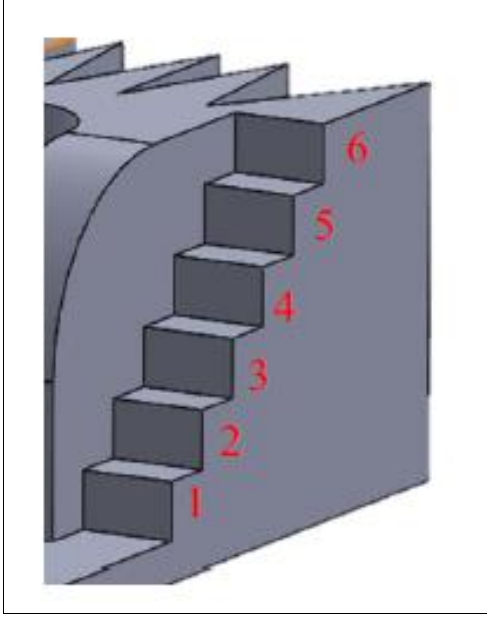
Elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları Çizelge 2.1’de belirtilmiştir.

Çizelge 2.1. Ortalama yüzey pürüzlülük değerleri

No	Ortalama	SLM AlSi10Mg						
		Üst Yüzey			Alt Yüzey			Yan Yüzey
		45°	60°	75°	45°	60°	75°	
1	Ra (µm)	3,35	2,28	3,43	9,20	8,32	7,19	2,29
2	Rz (µm)	15,05	12,16	15,63	42,16	43,61	34,96	11,45

Yüzey pürüzlülüğü, malzeme, toz parçacık boyutu, katman kalınlığı, lazer ve tarama parametreleri, tarama stratejisi ve yüzey son işlemleri gibi birçok faktöre bağlıdır [17]. Eğimli bir düzlemin yüzey pürüzlülüğü, katmanlı üretimden kaynaklanan merdiven etkisinden dolayı eğim açısına bağlıdır. Alt kısımdaki pürüzlülük değerleri, üst ve yan tarafın değerlerinden daha yüksektir.

Boyutsal doğruluk ölçümleri yapılan yüzeyler Şekil 2.2’de, ölçüm sonuçları Çizelge 2.2’de yer almaktadır.



Şekil 2.2. Boyutsal doğruluk ölçüm noktaları

Çizelge 2.2. Boyutsal doğruluk ölçümleri

Merdiven No.	1	2	3	4	5	6
CAD ölçüsü (mm)	3,000	6,000	9,000	12,000	15,000	18,000
1. Ölçüm	3,044	5,986	9,018	12,083	15,104	18,127
2. Ölçüm	3,011	5,996	9,042	12,085	15,126	18,184
3. Ölçüm	3,038	5,996	9,026	12,063	15,091	18,194
4. Ölçüm	3,031	5,992	9,028	12,077	15,107	18,168
5. Ölçüm	-1,470	0,240	-0,190	-0,690	-0,690	-0,710

Sapma için negatif değer, gerçek numunenin tasarlanan boyutun üzerinde genişlediğini gösterirken, bunun aksine sapmanın pozitif değeri parçanın büzüldüğünü göstermektedir. Bu çalışma için boyutsal doğruluğun kalıp imalatı için kabul edilmesi mümkündür ve bu eğilimi kalıp tasarımcısının kalıp tasarımını tahmin etmesi için önemlidir [17].

Song vd., SLM yöntemi ile 5x5x5mm boyutlarında ağırlıkça %0,02 C ve Fe'den numuneler üretmişlerdir. Numunelerin üretimi esnasında kullanılan parametreler; lazer gücü (60-80-100 W), tarama hızı 200 mm/s ile 1400 mm/s arasında değişken, lazer çapı 34 µm, tarama aralığı 40 µm, katman kalınlığı da 50 µm olarak seçilmiştir. 100 W sabit lazer gücünde 100-400 mm/s tarama hızı aralığında üretilen numuneler neredeyse %100'e yakın yoğunlukta elde edilebildiğini belirtmişlerdir. Tane boyutunun, aynı lazer gücünde tarama hızındaki

artışla birlikte giderek küçüldüğünü belirtmişlerdir. SLM ile üretilen demir numunelerin çekme mukavemetinin standart demirden çok daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. Çekme ve akma mukavemeti, aynı 100 W lazer gücü altında tarama hızının 270 mm/s'den 400 mm/s'ye çıkmasıyla çekme dayanımı 354 MPa değerinden 412 MPa değerine ulaşırken, akma dayanımı da 246 MPa değerinden 305 MPa değerine ulaşmıştır. Yüksek mukavemetin; tane boyutu, dislokasyon yoğunluğuna dayalı olduğu sonucuna varmışlardır [18].

Mancisidor vd., seçici lazer ergitme ile Inconel 718 malzemesi ile üretilen parçalarda optimum proses parametre tayini yapılmıştır. Kalıntı gözenekliliğinin standart işlem parametrelerine bağlı olmadığını vurgulamışlardır. Odak ofseti 8-10mm'ye kadar arttırarak gözenekliliğin önemli ölçüde azaldığını tespit etmişlerdir. Skywriting stratejisi ve odak ofseti, sonuçta ortaya çıkan artık gözeneklilik üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğundan, bu işlemin etkileştirilmesi ve kalibrasyonuna makine kurulumuna özel dikkat gösterilmesi gerektiğini belirtmişlerdir [19].

Yakout vd., Invar 36 ve Inconel 316L malzemelerin seçici lazer ergitme ile üretimi sırasında mikroyapısını ve mekanik özelliklerini test etmek için optimum parametre çalışması yapmışlardır. Lazer gücünün, tarama hızının ve tarama mesafesinin üretilen parçaların mikroyapıları üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlardır Değişen enerji yoğunlukları ile tozun ergiyip, ergimemesi durumunun değişkenlik gösterdiğini belirtmişlerdir. Enerji yoğunluğu arttıkça, parçalar daha yüksek yoğunlukta ve çekme testi sırasında daha sünek bir eğilim gösterdiği sonucuna varmışlardır [20].

Yang vd., seçici lazer ergitme ile üretilen özelleştirilmiş ortodontik (braket, diş teli) üretimin şekil doğruluğunu, boyutsal doğruluğunu ve yoğunluğunu optimize etmeye yönelik araştırma yapmışlardır. 316L paslanmaz çelik malzeme ile boyutsal doğruluğunu arttırmak için tarama hızı ve kontur taramasını birleştirerek ortogonal tarama stratejisi önermişlerdir. Yoğunluğu arttırmak için de yeniden eritme yönteminin faydalı olduğunu belirtmişlerdir. Boyutsal doğruluğu arttırmak için birleşik tarama stratejisi sonucunun doğruluğu daha yüksek braket yuvaları elde ettiklerini vurgulamışlardır [21].

Calignano ve Minetola, Hastelloy X isimli nikel bazlı süper alaşım malzeme ile seçici lazer ergitme cihazında üretilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü, boyutsal doğruluk, yapı yoğunluğu ve parça ile destek yapıların arasındaki ara yüz alanını araştırmak için çalışma

yapmışlardır. Genel olarak yapının hacmini oluşturmak için bir tarama işlemi kullanılırken, yapıların boyutsal doğruluğunu iyileştirmek ve yüzey kaplamasını iyileştirmek için kontur işlemi uygulamışlardır. Lazer ışın ofsetinin, karakteristik enerji ışın boyutunun neden olduğu potansiyel geometrik hatayı telafi ettiği sonucuna varmışlardır [22].

Sun vd., çeşitli lazer tarama hızlarında seçici lazer ergitme ile üretilen 316L paslanmaz çelik numunelerin tribolojik davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmada, SLM ile üretilen çeliğin doluluk oranının aşınma direncini arttırdığı belirtilmiştir. Bu çalışmada, SLM ile üretilen 316L çelik numunelerin aşınma direncinin, test koşullarına bağlı olarak dökümle yapılan numunelerden 6-17 kat daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. SLM ile üretilen parçaların birincil aşınma mekanizmasının kırılma olduğu ve üretimle ilgili gözeneklerin çatlakların oluşmasına ve aşınma testi sırasında malzeme kaybının artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir [23].

Liverani vd., SLM ile 316L paslanmaz çelik numuneler üretmişlerdir. Lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi ve inşa oryantasyonunun, yapılan numuneler üzerindeki mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Lazer gücü 100-150 W, tarama boşluğu 0,05-0,07 mm, oryantasyon 45°-90 değiştirilmiş, lazer çapı da 50 µm olarak sabit tutulmuştur. Yapılan deneyler sonucu, geleneksel olarak üretilmiş 316L malzemelerden daha yüksek nihai gerilme mukavemeti ve kopma uzamasına sahip tam yoğunluğa yakın numuneler elde etmenin mümkün olduğunu belirtmişlerdir [24].

Literatürde yapılan çalışmalarda, seçici lazer ergitme yöntemi ile özellikle AlSi10Mg malzemesi kullanılarak üretilen parçalarda, çoğunlukla iç yüzey parametrelerinin değişimi araştırılmıştır. Bu parametreler, inşa yönleri, tarama stratejileri, katman kalınlığı, tarama hızı ve lazer gücü olarak özetlenebilir. Bu iç yüzey parametrelerinin değişimi sonucunda parçalarda oluşan mekanik özellikler, yüzey pürüzlülüğü ve mikroyapılar incelenmiştir. Bu çalışmada literatürde yapılan çalışmaların aksine içyapı parametre değişimleri değil kontur parametresi değişimleri üzerine odaklanılmıştır. Kontur parametresinin değişimi sonucunda parçalarda ortaya çıkan boyutsal doğruluk, mekanik özellikler ve mikroyapı araştırmalarına rastlanmamıştır. Bu tez çalışmasının amacı kontur parametresi değişkenleri incelenmiştir. Bu parametrelerden ofset miktarı, tarama hızı ve lazer gücü parametrelerinin boyutsal doğruluk, yüzey kalitesi ve parça mukavemeti üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Her bir parametre için üç değişken belirlenmiştir. Üretilen numuneler

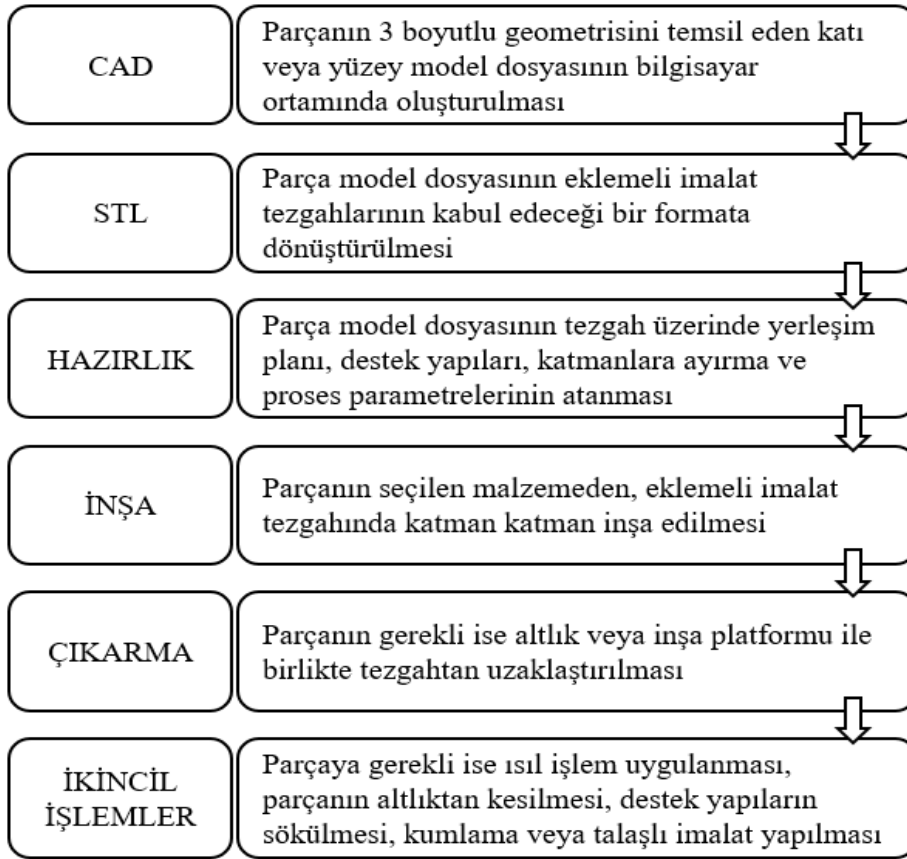
üzerinde yapılan ölçüm sonuçları ofset miktarı, lazer gücü ve tarama hızına göre grafiklerle açıklanmıştır.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Eklemeli İmalat

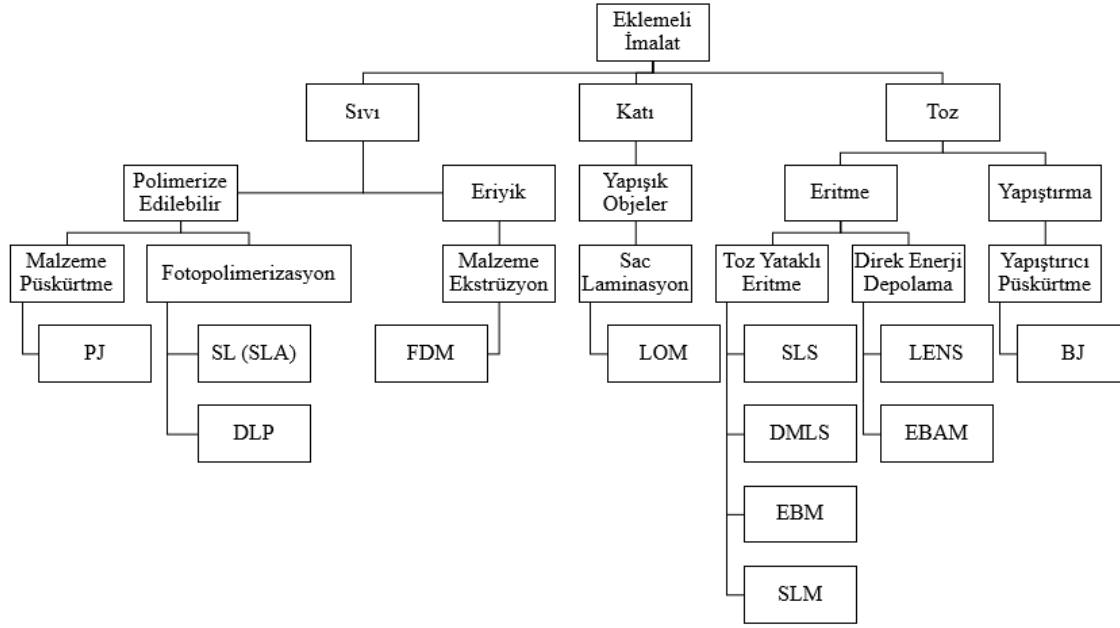
Katmanlı imalat olarak da bilinen eklemeli imalat yöntemleri günümüzde oldukça popüler ve sektörün taleplerini karşılayabilecek kapasiteye sahiptir. Geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında, prototip ürünler, test parçaları ve karmaşık tasarımlara sahip zor mekanik özelliklere sahip parçalar üretirken önemli derecede zaman ve maliyet tasarrufu sağlar. Enerji verimliliği sağlayan bu üretim süreci, geleneksel yöntemlere kıyasla daha kullanıcı ve üretim dostudur. Ayrıca bu üretim yöntemi kullanılarak üretilmesi amaçlanan tasarımların neredeyse hiç atık olmadan veya çok az atıkla üretilebilir. Bunun da sebebi bütünden parçaya gidilmesi değil parçadan bütüne gidilmesidir. Geleneksel üretim yöntemlerinde malzeme işlenmesi sırasında kullanılan soğutucu sıvı gibi çevreye zararlı maddelerin çıkışı olmadan ve en önemlisi talaş çıkışı olmadan gerçekleştirilebilen bu üretim yöntemi sayesinde istenen parçaya doğrudan erişim mümkün olmaktadır [25].

Eklemeli imalatın ayrıntıları, basit terminoloji normlarının çok ötesine geçer. Üzerinde çalışılacak eklemeli imalat teknolojisini seçtikten sonraki süreç hakkında derinlemesine araştırma yapmak gerekir çünkü farklı teknolojiler parça oluşturmak için farklı yapı prensiplerini kullanır. Yine de çeşitli eklemeli imalat teknolojilerinin büyük çoğunluğu birkaç ortak adımı paylaşmaktadır [26]. Bu ortak üretim basamakları Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Eklemeli imalatın temel aşamaları [6]

Literatürde eklemeli imalat süreçlerinin çeşitli sınıflandırmaları vardır. Bu sınıflandırmalar şu şekilde: polimerler, seramikler ve metaller gibi temel malzemeye göre, yapıştırma yöntemine bağlı olarak dolaylı ve doğrudan işlemler ve sıvı, toz ve katı tabaka işlemleri gibi hammadde girdisinin durumuna göre yapılabilir [20]. Eklemeli imalat hammadde girdisine göre sınıflandırılması Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



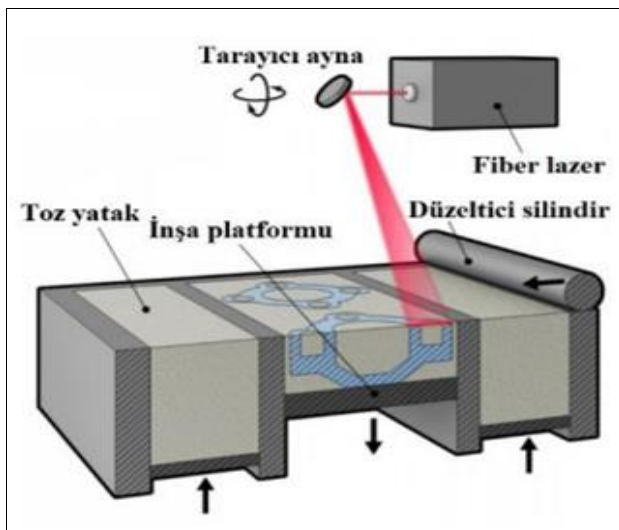
Şekil 3.2. Eklemeli imalat sınıflandırılması [8]

Metaller için farklı eklemeli imalat türleri, farklı ve özel teknolojiler kullanır ve çeşitli ilkelere uygun olarak ürünler oluştururlar. Kullanılan malzeme formu, malzeme ekleme yöntemi, enerji girdisi ve bu faktörlerin kombinasyonu, metaller için eklemeli üretim teknolojileri arasında önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Metaller, toz, tel ve levha olmak üzere üç farklı malzeme türü kullanılarak eklemeli süreçlerle üretilebilir. Tel ve sac metal malzemeler, kendilerini kullanan proseslerin hızlı imalat süreleri gibi avantajlara sahip transfer formları arasındadır, ancak zaman zaman geometrik ve metalurjik sorunlar yaşadıkları için günümüzün doğrudan parça imalatı uygulamalarında sınırlı tasarım özgürlüğü nedeniyle toz malzemeler kadar ilgi görmemişlerdir [6]. Literatür araştırmalarının toz yataklı eritme prosesleri üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Toz yataklı eritme sistemlerinde de kendi içlerinde farklılık oluşmasının nedeni yine enerji girdisi ve malzeme ekleme tekniğidir. Örneğin; Şekil 3.2’de görülen seçici lazer eritme yönteminde (SLM) lazer ile metal toz eritme söz konusu iken elektron ışın eritme (EBM) yönteminde de enerji girdisi olarak elektron ışını kullanılmaktadır. Eklemeli imalat yöntemleri içerisinde seçici lazer eritme (SLM) yöntemi en yaygın kullanılan eklemeli imalat türü olarak karşımıza çıkmaktadır. Otomotiv, medikal, havacılık gibi sektörlerde kullanılan parçaların çoğu SLM yöntemi ile üretilmekte ve nihai ürün olarak kullanılmaktadır.

3.1.1. Seçici Lazer Ergitme

Seçici lazer ergitme işlemi, seçici lazer sinterleme (SLS) ve elektron ışıın ergitme (EBM) olarak bilinen toz yataklı eritme teknolojileri sınıfına aittir. SLM işlemi toz yayma sistemi kullanılarak inşa platformuna yayılır. Toz tabakası, önceden ısıtılabilen inşa platformu üzerinde biriktirildikten sonra, bir lazer kaynağı toz yatağına yönlendirilir ve malzemeyi seçici olarak ergitilir. Çarpan ısı enerjisine maruz kalan tüm malzemenin tüm bölgesi, katman kalınlığından daha büyük bir derinliğe kadar eritilir. Bu tür bir yoğunlaştırma, iyi birleştirilmiş, yüksek yoğunluklu yapılar oluşturmada çok etkilidir. Bir katmanı tamamladıktan sonra, inşa platformu bir kalınlık katmanı kadar aşağı indirilir ve yeni toz tabakası serilir, düzleştirilir ve eritilir (Şekil 3.3). İşlem, istenen nihai ürün elde edilene kadar bu döngü ile devam eder [27].

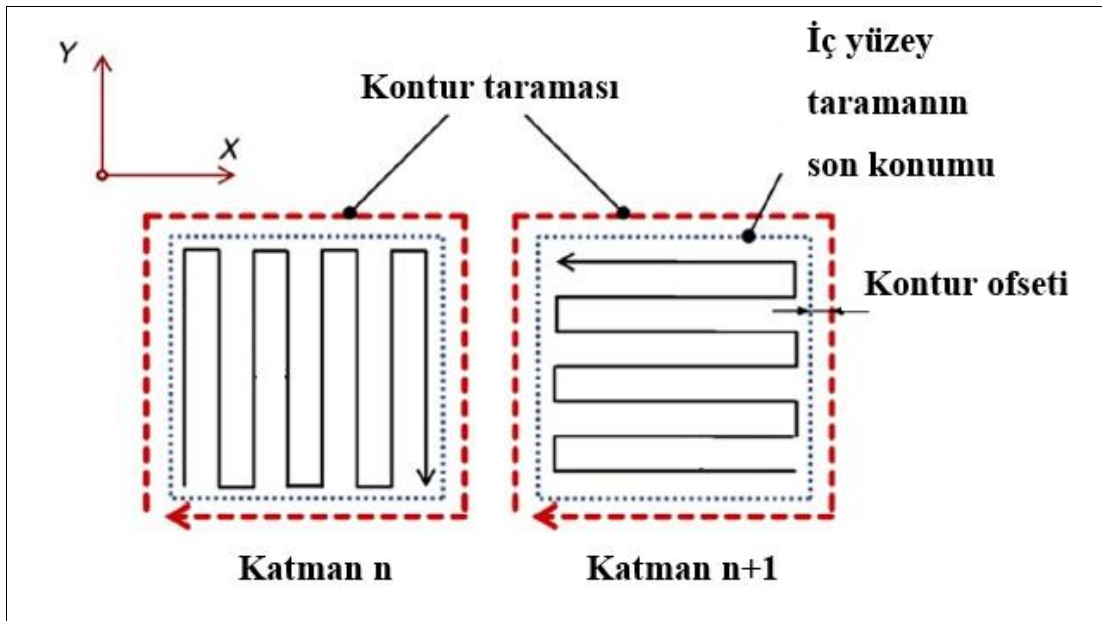
Seçici lazer ergitme sistemlerinde neredeyse hiç dalgalanma olmadan sürekli bir lazer darbesi ile çalışan fiber lazerler kullanılmaktadır. Galvano aynalar tarafından yönlendirilen lazer demeti tozun serildiği inşa platformuna planlanan tarama hızı ile etkileşim sağlanmaktadır. Seçici lazer ergitme yönteminde, seçici lazer sinterleme işleminden farklı olarak, tam erime gerçekleşir ve bir önceki katmanla bağ kurulması sağlanır. Bunun nedeni, lazer radyasyonunun ısı girdisinin toz tarafından emilmesidir. Parçanın bir kısmı oluşturulduktan sonra, önceki katmanla birleştirilir ve bu işlem tamamı oluşana kadar tekrarlanır. Kimyasal, morfolojik, mikroyapısal, mekanik ve tribolojik niteliklerdeki değişikliklere çeşitli üretim parametreleri neden olur [12].



Şekil 3.3. Seçici lazer ergitme çalışma prensibi [28]

Seçici lazer ergitme işleminde bileşenlerin nihai özelliklerini belirleyen çok çeşitli faktör ve değişkenleri içerir. Bunlar iki ana kategoriye ayrılabilir; toz özellikleri ve işlem parametreleri. Her faktörün nihai parçaların oluşumunda mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerinde doğrudan bir etkisi vardır. Toz özellikleri değişkenleri; parçacık şekli, parçacık boyutu ve dağılımı, kimyasal bileşim, termal iletkenlik ve erime sıcaklığıdır. Değişken proses parametreleri ise; lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı, koruyucu atmosfer, lazer ışın yarıçapı, lazer tipi, katman kalınlığı, tarama stratejisi, inşa oryantasyonu, gaz akışı ve tabla sıcaklığıdır [27].

Genel olarak, yapının hacmini oluşturmak için kontur taraması ve iç yüzey taraması olarak iki adımda gerçekleştirilir (Şekil 3.4). İç yüzey taraması seçilen tarama modeline göre değişiklik göstermektedir. CAD verileri ile ulaşılmak istenen nihai ürün boyutları kırmızı çizgi ile belirtilen sınırdır. Her tarama yöntemi için ayrıca birkaç parametre vardır; tarama hızı, lazer gücü, ışın ofseti gibi iç yüzey taraması için ayrıca tarama deseni ayarı ve temizleme gaz akışıdır [6].



Şekil 3.4. Kontur taraması ve iç yüzey taraması gösterimi

3.1.2. Eklemeli İmalatta Kullanılan Malzemeler ve AlSi10Mg Alaşımı

Eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılan malzemeler genel olarak; metal, polimer, seramik, hibrit malzemeler, biyolojik malzemeler ve kompozit olarak sınıflandırılabilir [29]. Metal

eklemeli imalat yöntemlerinde ise; magnezyum, nikel, titanyum, paslanmaz çelik, alüminyum ve CoCrMo alaşımları sıkça kullanılan malzemeler arasındadır. İstenen ürünün kullanım alanına göre kullanılan malzemenin çeşidi değişmektedir.

Yoğunluğu çeliğin yaklaşık üçte biri olan alüminyum alaşımlarının kullanımının arttığı görülmektedir. Alüminyum ve alaşımları günümüzde otomobil sektöründe motor blokları, pompa ve şanzıman gövdeleri, silindir kafaları, pistonlar ve sac metal bileşenler için yaygın olarak kullanılmaktadır [30]. Aynı zamanda havacılık ve uzay aracı motorlarının termal koruma sistemi, yüksek termal iletkenlik, hafiflik ve yüksek yük taşıma kapasitesi gibi mühendislik gereksinimlerini karşılamak için sıklıkla kafes veya hücresel bir yapı kullanılır. Karmaşık yapısal bileşenlerin tamamlayıcı şekillendirilmesi, kaynak ve diğer birleştirme teknikleriyle ilişkili ağırlık ve stres konsantrasyonlarının yanı sıra küçük ve orta ölçekli bileşenlerin imalatı ve montajı için gereken zaman ve araçları azaltır [31,32]. Alüminyum alaşımlarının uzay ve havacılık, otomobil, savunma gibi alanlarda sıklıkla yer almasının belli başlı nedenleri vardır. Bunlar; yoğunluklarının düşük olması, ısı ve elektrik iletkenliklerinin yüksek olması, bazı ortamlarda korozyon dayanımlarının iyi olması, kolay eriyebilmesi ve döküm özelliklerinin de iyi olmasıdır [33,9].

Alüminyum alaşımlarının mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri alaşım elementlerine ve mikroyapısına bağlı olarak değişir. Alüminyuma katılan en önemli alaşım elementleri bakır, mangan, silisyum, magnezyum ve çinkodur [34]. Alüminyum alaşımlarına silisyum ve magnezyumun etkileri birbirinden farklıdır. Silisyum, alaşımın akışkanlığı ve yüksek sıcaklık dayanımını %12'ye kadar artırır. İkili silisyum-alüminyum alaşımları iyi ısı ve elektrik iletkenliğine, düşük genleşmeye ve düşük özgül ağırlığa sahiptir. Ayrıca yüksek korozyon direncine de sahiptirler. Magnezyum, ikili alüminyum alaşımlarında yüksek korozyon direnci ve iyi anodik oksit kaplama özelliği sağlamaktadır. Magnezyum alaşımları alüminyumdan daha hafiftir ve işlenmesi en kolay alaşımdır. Bununla birlikte, soğuduktan sonra önemli ölçüde büzülmesi ve zayıf döküm kaliteleri nedeniyle karmaşık profillere sahip parçaların dökümü zordur [9].

3.2. Boyutsal Doğruluk

İş parçaları yapılırken kullanılan makinelerin yeni veya eski oluşu, ölçü aletlerinin hassaslığı, çalışılan ortamın ışık ve ısı durumu gibi faktörler göz önüne alındığında uzmanlar

tolerans sistemini geliştirmişlerdir. Parça üzerindeki ölçülerin kaba veya ince olmak üzere toleransları vardır. Tolerans, en basit ifadesiyle kabul edilebilir hata payı olarak tanımlanabilir. Tolerans genel olarak en büyük ölçü ile en küçük ölçü arasındaki farktır [35].

Boyut toleranslarını tanımlamak için kullanılan bazı kavramlar vardır, bu kavramlar başlıca aşağıdaki gibidir:

Nominal ölçü (Anma ölçüsü)

Bir elemandan söz ederken kullanılan tanımsal ölçüdür.

Sınırlar

Belirtilen en fazla ve en az ölçü

Tolerans

İki sınır arasındaki fark.

Karşılıklı tolerans

Nominal ölçüye göre, iki yöndeki değişiklik. Bu ölçü, bu iki sınır arasında kalır.

Tek taraflı tolerans

Nominal ölçü, sınırdan birisine eşit alınır, değişiklik diğer yönde uygulanır.

Boşluk

Delik ve cıvata gibi, silindirik parçaların bir araya getirilmesine ilişkin genel bir terimdir. Boşluk terimi, sadece içteki parça çapının dıştaki parça çapına göre daha küçük olduğu durumlarda kullanılır. Çapsal boşluk, ölçülen iki çap arasındaki farktır. Yarıçapsal (radyal) boşluk, ölçülen iki yarıçap arasındaki farktır.

Sıkılık

Boşluk teriminin tersine, iç parça çapının, dış parça çapından daha büyük olduğu durumdur.

Pay

Eşleşen parçalarda belirlenen minimum boşluk veya belirlenen maksimum sıkılıktır.

Boşluk veya sıkılık

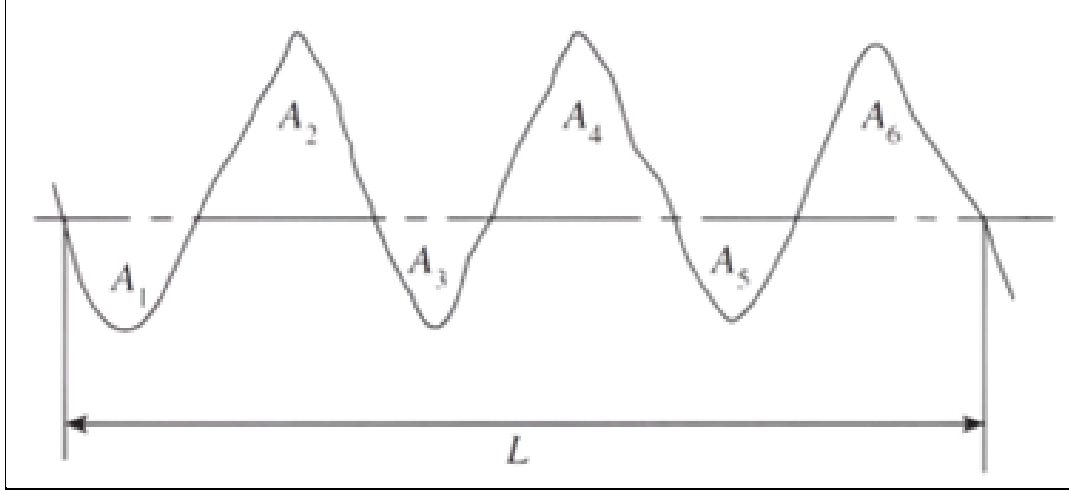
Birçok parça bir araya getirildiğinde, bireysel parçaların kendi ölçü ve toleranslarına bağlıdır [35].

Üretilen numunelerin boyutsal doğruluklarının analizi için CMM (Coordinate Measuring Machine) kullanılmaktadır. Koordinat ölçüm sistemi olarak da bilinen bu sistem kartezyen koordinatları kullanarak ölçümler gerçekleştirir. Sistemin X, Y ve Z eksenleri boyunca hareket eden 360° dönen kafası, çeşitli ölçüm seçenekleri sunar. Bilgisayar kontrollü olarak kullanıldığında, kafa otomatik olarak yönlendirilir ve bileşenle temas ettiğinde otomatik olarak noktalar alınır. Toplanan noktalar geometriler oluşturmak ve boyutsal ölçümler almak için kullanılır. Hem CAD verileri hem de CAD verisi olmayan numuneler için uygundur. CAD verileri kullanılarak planlanan ölçümün otomatik olarak tekrarlanması mümkündür. Boyutların ölçülmesi söz konusu olduğunda, CMM makineleri son derece hassastır. Hassas ölçümler 1 mikrona kadar yapılabilmektedir [36].

3.3. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü, yüzey dokusunun bir bileşenidir. Gerçek bir yüzeyin ideal biçiminden normal vektörü yönündeki sapmalar ile ölçülür. Bu sapmalar büyükse yüzey pürüzlü, küçükse yüzey pürüzsüzdür [37]. Yüzey pürüzlülükleri genel kapsamda aşağıdaki terimler ile tanımlanmaktadır.

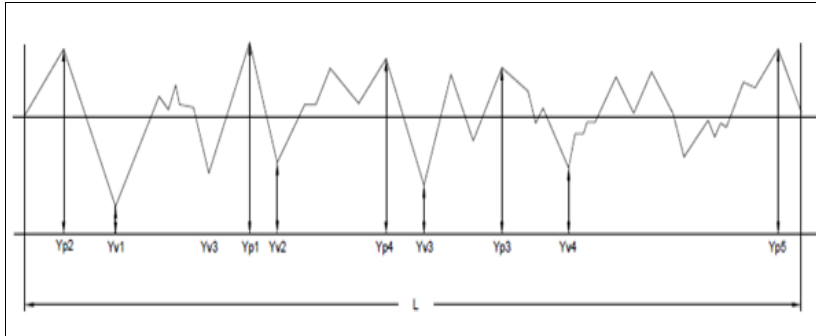
Ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a), ortalama merkez çizgi değeri olarak adlandırılan pürüzlülük parametresidir. Pürüzlülük profil koordinatlarının mutlak değerlerinin aritmetik ortalamasıdır, Şekil 3.5'te şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 3.5. Ra pürüzlülük değeri gösterimi [38]

$$Ra = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_N}{L} \text{ formülü ile hesaplanır.}$$

Rz pürüzlülük değeri, profilin en büyük yüksekliği değerleri ortalamasıdır. Örnekleme uzunluğundaki beş en yüksek tepe ile beş en derin çukur arasındaki mesafelerin ortalamasıdır Şekil 3.6'da şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 3.6. Rz pürüzlülük değeri gösterimi [38]

$$Rz = \frac{(Yp1 + Yp2 + Yp3 + Yp4 + Yp5) - (Yv1 + Yv2 + Yv3 + Yv4 + Yv5)}{5} \text{ formülü ile hesaplanır.}$$

Alışılmış imalat yöntemlerine ait yüzey pürüzlülükleri Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. İmalat yöntemleri ve aşındırıcı yöntemlere ait pürüzlülük değerleri [39]

İmalat yöntemleri ve aşındırıcı yöntemler	Yüzey Pürüzlülüğü Ra (μm)												
	0,01	0,03	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	13	25	50
Döküm									■	●	●	■	
Hassas Döküm						■	●	■					
Freze						■	●	●	■				
Torna						■	●	●	■				
Taşılama					●	●	●	●					
Honlama		■	■	●	●	■	■						
Parlatma				■	●	■							
Açıklama	● - Genellikle ■ - Nadiren												

Uygulamalarda farklılıkları önlemek için yüzey kaliteleri standart hale getirilmiştir ve ISO 1302/1992 ve TS2040/Şubat 1999'la açıklanmıştır. Bu standartlara göre 12 çeşit yüzey kalitesi belirlenmiştir ve Çizelge 3.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Yüzey kalite ve pürüzlülük değerleri [40]

Pürüzlülük	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
Ra (μm)	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50

4. MATERİYAL VE METOD

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar yedi bölümden oluşmaktadır. 1.bölüm üretimde kullanılan alaşımin özelliklerini içermektedir. 2-3. bölümler üretilen numunelerin boyutlarını ve üretim parametrelerini içermektedir. 4-7.bölümlerde çekme testi, pürüzlülük ölçümleri ve boyutsal doğruluk ölçümlerinin araştırılması yer almaktadır.

4.1. Toz Karakterizasyonu

Bu tez çalışmasında, AlSi10Mg tozu kullanılmıştır. AlSi10Mg alaşımları, yüksek mekanik özellikleri ve korozyona dayanıklılık açısından son yıllarda kullanım alanı gittikçe genişlemiştir. Eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılarak çok pürüzsüz bir yüzey de elde edilmesi mümkündür. Bu alaşımlar sıcak çatlamaya karşı dirençleri nedeniyle iyi kaynaklanabilirlik özelliğine sahiptir [41]. Başlıca uygulama alanları otomotiv, medikal, genel imalat sektörü ve havacılık sektörleri olarak sıralanabilir. Alüminyum ve alaşımlarından imal edilmiş motor blokları, pompa ve dişli kutusu gövdeleri, silindir başlıkları, piston gibi parçalar yaygın olarak kullanılmaktadır [41,42].

Temin edilen tozlar SLM sistemlerinde kullanıma özel olarak üretilmiş olup fiziksel ve kimyasal özellikleri standarttır. Bu tozların tedarikçi firma tarafından belirtilen kimyasal özellikleri ve mekanik değerleri Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. AlSi10Mg malzemesine ait kimyasal bileşenler [43]

AlSi10Mg – CL31AL									
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Pb, Sn	Ti
Kalan	9,00-11,00	<0,55	<0,05	<0,45	0,20-0,45	<0,05	<0,10	<0,05	<0,15

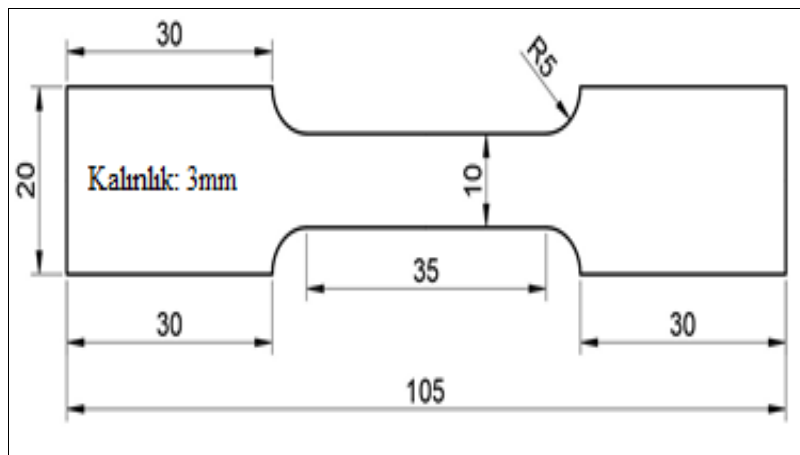
Çizelge 4.2. AlSi10Mg malzemesine ait mekanik değerler [3]

Mekanik Özellik	Değer
Akma Mukavemeti (R_p %0,2) (MPa)	270 ± 10 (XY)
	240 ± 10 (Z)
Çekme Mukavemeti (MPa)	460 ± 20 (XY)
	460 ± 20 (Z)
Elastik Modül (GPa)	75 ± 10 (XY)
	70 ± 10 (Z)
Uzama (%)	9 ± 2
Sertlik (HB/HRC)	119 ± 5

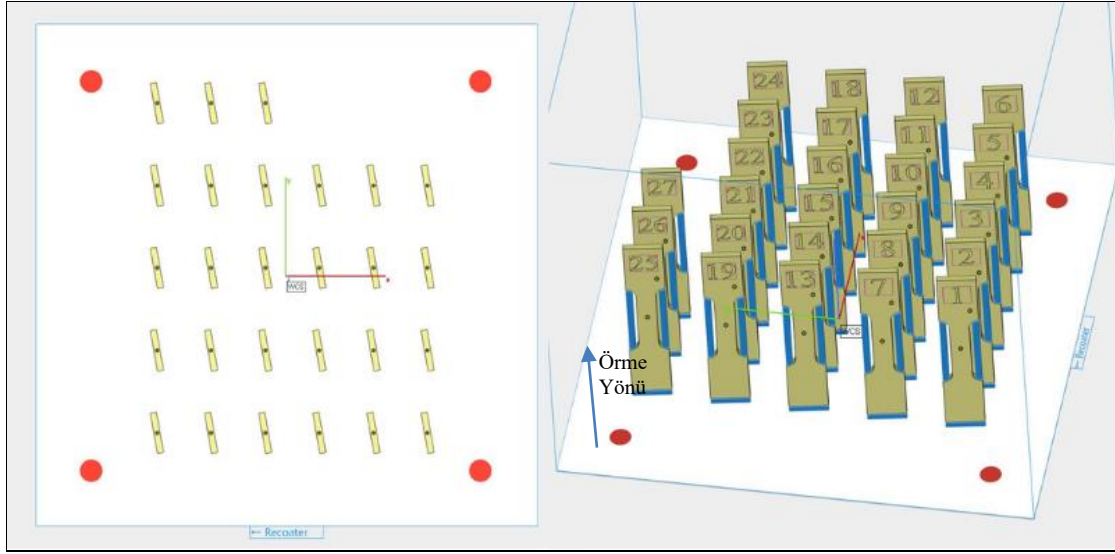
4.2. Deney Numunesi Tasarımı ve İmalat Parametreleri

Bu tezdeki deneysel çalışmalarda yapılacak testler için çekme numuneleri üretilmiştir. Bu numuneler, bitmiş ürünü yansıtmaya uygun şekil ve boyutlarda olmakla birlikte, incelenmesi gereken tüm unsurların test edilmesini sağlayacak şekilde belirlenmiştir.

Mekanik özellikler, pürüzlülük değerleri, geometrik doğruluk ölçümleri için Şekil 4.1’de parça ISO 6892-1:2016 ve ASTM E8:2016 standartlarına göre 3mm kalınlığında ve 10 mm genişliğinde belirlenmiştir. İlk olarak iki boyutlu olarak tasarlanan numune daha sonra kalınlık verilerek üç boyutlu nihai boyutuna getirilmiş ve üretim için tabla yerleşimi yapılmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.1. Deney numunesi boyutları



Şekil 4.2. Deney numunesi tabla yerleşim üst-ön görünüşleri

Bu çalışmada, ana değişken olarak kontur parametreleri seçilmiştir. Yapılan literatür araştırması sonucunda, kontur taraması yardımıyla seçici lazer ergitme cihazlarında üretilen parçaların boyutsal doğruluğunu geliştirmek amacıyla yaklaşımlar önerdikleri görülmüştür.

Numunelerin üretimi sırasında kullanılan iç yüzey örme parametreleri sabit tutulmuştur (Çizelge 4.3). Çizelge 4.4'te kontur parametresi değişkenleri olan güç, tarama hızı ve ofset miktarlarının değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.3. İç yüzey sabit parametreleri

İç Yüzey Sabit Parametreleri	Değer
Lazer Gücü (W)	140
Tarama Mesafesi (mm)	0,112
Lazer Çapı (mm)	0,120
Katman Kalınlığı (μm)	25
Tarama Hızı (mm/s)	800
Tarama Stratejisi	Island

Çizelge 4.4. Numunelerin üretimi sırasında kullanılan değişken kontur parametreleri

Kontur Parametresi Değişkenleri	Değerler		
Ofset (mm)	0,14	0,175	0,21
Lazer Gücü (W)	160	200	240
Tarama Hızı (mm/s)	280	350	420

4.3. 3B Baskı Makinesi ve Özellikleri

Tasarlanan numuneler Concept Laser M2 Cusing (Şekil 4.3) makinesinde basılmıştır. Titanyum ve alüminyum alaşımları gibi reaktif toz malzemelerin işlenmesi için özel olarak geliştirilmiş bir lazer sistemidir. Patlama ve yangın gerekliliklerine (ATEX Zone 22 kategori II 2D) uygun sensör ve ölçüm teknolojisine sahiptir.



Şekil 4.3. Concept Laser M2 Cusing cihazı

Seçici lazer ergitme makinesi olarak seçilen Concept Laser M2 Cusing cihazına ait teknik bilgiler Çizelge 4.5-4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Concept Laser M2 Cusing makinesi fiziksel boyutları [44]

Fiziksel Boyutlar	Değer
Genişlik (mm)	2695
Derinlik (mm)	1818
Yükseklik (mm)	2185
Ağırlık (kg)	Yaklaşık 2500

Çizelge 4.6. Concept Laser M2 Cusing makinesinde oluşturulabilecek maksimum numune boyutları [44]

Maksimum Numune Boyutları	Değer
Genişlik (mm)	250
Derinlik (mm)	250
Yükseklik (mm)	300

Çizelge 4.7. Concept Laser M2 Cusing makinesi genel özellikleri [44]

Makineye Ait Genel Parametreler	Özellikler
Kullanılan Malzemeler	*AlSi10Mg *Ti6Al4V *Paslanmaz Çelik *Inconel 625-Inconel 718 *Nikel Alaşımları *Kobalt – Krom Alaşımları
Baskı Süreci	400 W Fiber-Tek Lazer
Üretim Ortamı	Argon veya Nitrojen
Katman Kalınlığı	20-80 μm
Tarama Hızı	7-4,5 m/s
Odak Çapı	50-500 μm

4.5. Boyutsal Özelliklerin Araştırılması

Numunelerin üç boyutlu ölçüm cihazı CMM cihazı ile ölçümleri Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan Hexagon Global Performance ile gerçekleştirilmiştir. CMM cihazı ile 27 adet numuneye ait kalınlık 3 mm değeri ve 10 mm genişlik değerleri ölçülmüştür.



Şekil 4.4. Hexagon Global Performance CMM cihazı

Çizelge 4.8. CMM cihazına ait teknik özellikler [45]

Özellik	Değer
Prob (mm)	1,5-6 arasında değişen 6 adet prob
Ölçüm kabiliyeti (X) (mm)	700
Ölçüm kabiliyeti (Y) (mm)	1000
Ölçüm kabiliyeti (Z) (mm)	660

4.6. Yüzey Özelliklerinin Araştırılması

Numunelerin yüzey pürüzlülüklerinin ölçümünde profilometre Mitutoyo SJ-410 kullanılmıştır.



Şekil 4.5. Mitutoyo SJ-410 profilometre

Çizelge 4.9. Profilometre cihazına ait teknik özellikler [45]

Özellik	Değer
Ölçme uzunluğu (mm)	25
Tarama kuvveti (Nm)	0,75
Tarama hızı (mm/s)	0,005-1
Örnekleme uzunluğu (mm)	0,08 – 0,25 – 0,8 – 2,5 – 8 – 25

Ölçümler sırasında kullanılan parametreler aşağıda belirtilmiştir:

Standart: ISO 1997

Profil: R

Filtre: Gauss

λ_S : 2 μm (λ_S : pürüzlülük ile pürüzlülükten daha kısa dalga boylu sapmaları ayıran filtre)

λ_C : 0,8 mm (λ_C : pürüzlülük ile dalgalılık sapmalarını ayıran filtre)

V: 0,5 mm/s (V: tarama hızı)

N: 2 (N: pürüzlülük sınıf numarası)

F: 0,75Nm (F: tarama kuvveti)

Örnekleme uzunluğu (mm): 0,8 mm

4.7. Mukavemet Özelliklerinin Araştırılması

Numunelerin akma ve çekme mukavemet değerlerinin ölçümünde Bilgisayar Kontrollü HM-D Hoytom Çekme Kopma Test Cihazı kullanılmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. Çekme deneylerinin yapıldığı bilgisayar kontrollü HM-D Hoytom çekme kopma test cihazı

Çizelge 4.10. Bilgisayar Kontrollü HM-D Hoytom çekme kopma test cihazı teknik özellikleri [46]

Özellik	Değer
Kapasite (kN)	50
Maksimum hız (mm/dk)	750
Yer değiştirme (mm)	1000
Maksimum dikey boşluk (mm)	1230
Tutamaçlar arası boşluk (mm)	680
Kolonlar arası boşluk (mm)	450
Boyutlar (GxDxY) (mm)	900x650x1650
Ağırlık (kg)	380

Ölçümler sırasında kullanılan parametreler aşağıda belirtilmiştir:

Tip: Flat (Düz)

Boyut: 10*3 mm

Alan: 30 mm²

Çekme hızı: 1,00 mm/dk

5. BULGULAR

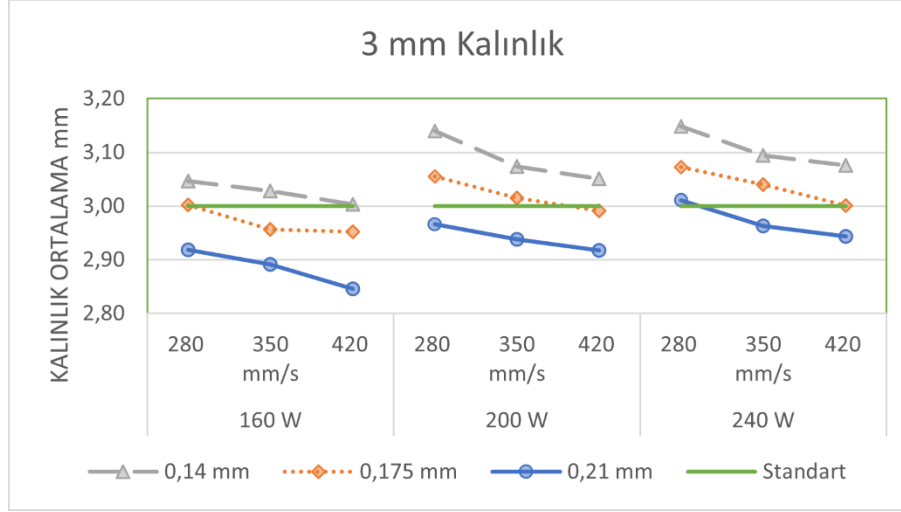
5.1. Boyutsal Doğruluk Değerlerinin Değerlendirilmesi

Belirtilen parametrelere göre imal edilen 27 adet numunenin imalatı sonrasında boyutsal doğruluğu için üç boyutlu ölçüm cihazı (CMM) kullanılmıştır. Numunelerin ofset miktarı (mm), lazer gücü (W) ve tarama hızına (mm/s) göre kalınlık (mm) ve genişlik (mm) ölçümlerine ait veriler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

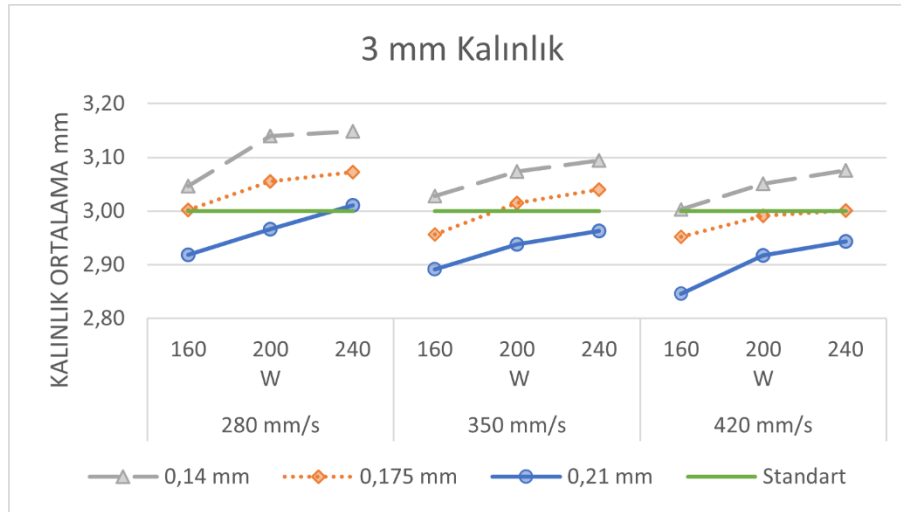
Çizelge 5.1. Boyutsal doğruluk ölçüm değerleri

Deney No	Ofset (mm)	Güç (W)	Hız (mm/s)	En (mm)	Boy (mm)
D1	0,14	160	280	3,047	10,013
D2		200	280	3,140	10,106
D3		240	280	3,149	10,133
D4		160	350	3,028	10,025
D5		200	350	3,074	10,072
D6		240	350	3,094	10,089
D7		160	420	3,003	9,977
D8		200	420	3,051	10,038
D9		240	420	3,076	10,058
D10		160	280	3,002	9,972
D11	0,175	200	280	3,055	10,040
D12		240	280	3,073	10,033
D13		160	350	2,956	9,940
D14		200	350	3,015	9,975
D15		240	350	3,040	10,017
D16		160	420	2,952	9,915
D17		200	420	2,991	9,967
D18		240	420	3,001	9,971
D19	0,21	160	280	2,919	9,873
D20		200	280	2,966	9,931
D21		240	280	3,011	9,959
D22		160	350	2,891	9,811
D23		200	350	2,938	9,903
D24		240	350	2,963	9,931
D25		160	420	2,846	9,823
D26		200	420	2,917	9,879
D27		240	420	2,943	9,910

3 mm kalınlık için deney numunelerinin imalat parametrelerine göre değişim grafiği Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.1. Ofset miktarına göre 3 mm kalınlık ölçüsünün grafiği a) Tarama hızına göre değişim grafiği b) Lazer gücüne göre değişim grafiği

Grafikler genel olarak değerlendirildiğinde, 3 mm’lik kalınlık ölçüsünün ofset miktarı ile değiştiği görülmektedir. Tüm ofset miktarlarında güç artıkça ölçülerin artış gösterdiği, hız artışı ile ölçülerde düşüş eğilimi sergilediği görülmektedir. En küçük kalınlık ölçüsü 0,21 mm ofset miktarında, 160 W gücünde ve 420 mm/s tarama hızında 2,846 mm olarak ölçülmüştür. En büyük kalınlık ölçüsü ise 0,14 mm ofset miktarında, 240 W gücünde ve 280 mm/s tarama hızında 3,149 mm olarak tespit edilmiştir. En ideal kalınlık ölçüsü ise 0,175 mm ofset miktarında, 240 W gücünde ve 420 mm/s tarama hızında 3,001 mm olarak

belirlenmiştir. Literatür araştırmalarında da boyutsal doğruluk düşük yüzey kalitesi ve eriyik havuzunun genişliği arasında güçlü bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Küçük eriyik havuzuna ve iyi yüzey kalitesine sahip bir parçanın yüksek boyutsal doğruluğa sahip olacağı sonucuna varmışlardır [10-14]. Yapılan diğer bir çalışmada, termal çarpılmaları ve lazer ışın çapından kaynaklanan boyut değişikliklerini telafi etmek için ofset değerlerinin analiz edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Yüksek boyutsal doğrulukta parça üretebilmek için prosesler, metal malzemenin art arda erimesi ve yeniden katılaşma nedeniyle lazer ışın çapı ve termal bozulmaların hesaba katılması gerektiği belirtilmiştir. Boyutsal doğruluğun tarama stratejileri ve ofset parametrelerinden etkilendiğini belirtmişlerdir [47]. Yapılan bu çalışmalara paralel olarak ofset miktarı nihai ürün boyutları için en önemli parametredir. Geometrik hatayı telafi etmek, boyutsal doğruluğu arttırmak için ofset miktarı optimizasyonu dikkat edilmesi gereken bir husustur.

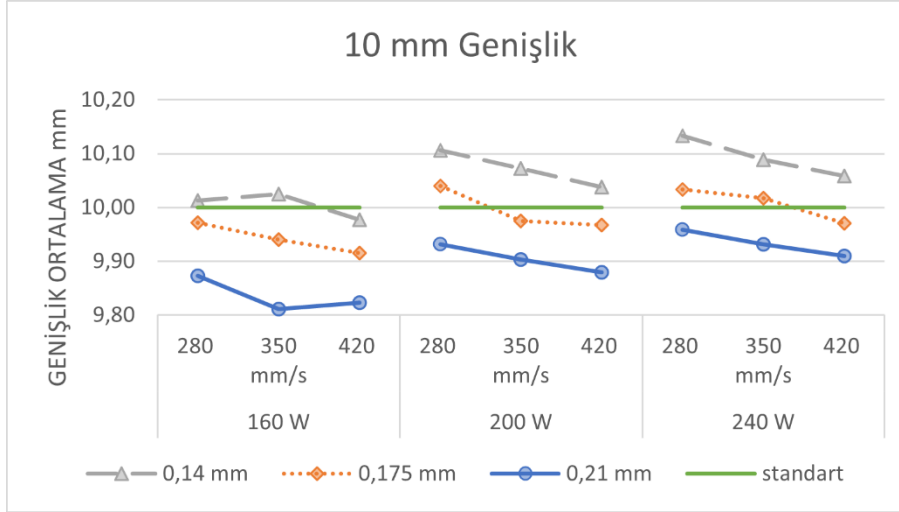
Şekil 5.1 grafiği incelendiğinde 0,14 mm ofset miktarı için 3 mm ölçüsünün artı değerlerde kaldığı görülmektedir. Bu aralık artı %0,09 ile artı %4,96 değer aralığında değişmektedir. 0,175 mm ofset miktarı için bazı durumlarda artı değerlerde, bazı durumlarda ise eksi değerlerde kalmaktadır. Bu aralık eksi %1,59 ile artı %2,43 aralığında değişmektedir. 0,21 mm ofset miktarı için tek bir değerde artı, diğer durumlarda eksi değerlerde kaldığı görülmektedir. Bu aralık eksi %5,13 ile artı %0,36 değer aralığında değişmektedir. Bu sonuçlardan yola çıkarak; 0,21 mm ofset miktarı ile üretilen parçaların kullanıma uygun olmadığı görülmektedir. Ancak 0,14 ve 0,175 mm ofset miktarları ile üretilen parçaların uygun parametreler ile kullanıma daha uygun olduğu, gerekirse üretim sonrası uygulanabilecek diğer imalat yöntemleri ile de istenilen ölçülere getirilebileceği görülmektedir.

Şekil 5.1 grafiği parametrelere göre değerlendirilecek olursa, 160W güçte 280 mm/s tarama hızında 0,14 mm ofset miktarındaki %25'lik artış 3 mm'lik parça ölçüsünde %1,75'lik azalışa neden olmaktadır. Ofset miktarının 0,21 mm olmasıyla 0,14 mm ofset miktarına göre parça ölçüsünde %4,30'lik azalış gerçekleşmektedir. 160 W güçte 350 mm/s tarama hızında 0,14 mm ofset miktarındaki %25'lik artış 3 mm'lik parça ölçüsünde %2,98'lik azalışa, ofset miktarındaki %50'lik artışıyla parça ölçüsünde %5,19'luk azalışa neden olduğu belirlenmiştir. 160 W güçte 420 mm/s tarama hızında 0,14 mm ofset miktarındaki %25'lik artış 3 mm'lik parça ölçüsünde %2,56'lik azalışa neden olurken, ofset miktarındaki %50'lik artış parça ölçüsünde %5,99'luk azalışa neden olmaktadır.

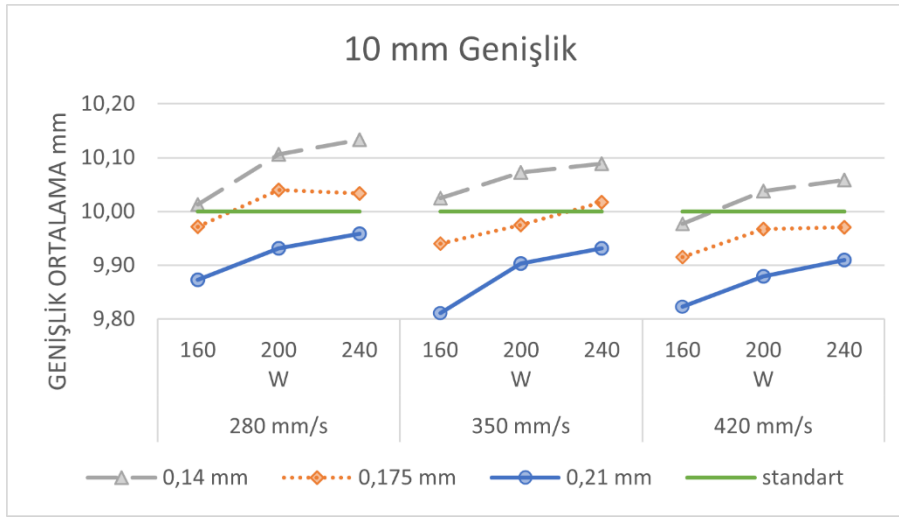
200 W güçte 280 mm/s tarama hızında 0,14 mm ofset miktarındaki %25'lik artış 3 mm'lik parça ölçüsünde %1,81'lik azalışa neden olmaktadır. Ofset miktarının 0,21 mm olmasıyla 0,14 mm ofset miktarına göre parça ölçüsünde %4,52'lik azalış gerçekleşmektedir. 200 W güçte 350 mm/s tarama hızında 0,14 mm ofset miktarındaki %25'lik artış 3 mm'lik parça ölçüsünde %1,08'lik azalışa, ofset miktarındaki %50'lik artışıyla parça ölçüsünde %4,05'lik azalışa neden olduğu belirlenmiştir. 200 W güçte 420 mm/s tarama hızında 0,14 mm ofset miktarındaki %25'lik artış 3 mm'lik parça ölçüsünde %2,62'lik azalışa neden olurken, ofset miktarındaki %50'lik artış parça ölçüsünde %5,14'lük azalışa neden olmaktadır.

240 W güçte 280 mm/s tarama hızında 0,14 mm ofset miktarındaki %25'lik artış 3 mm'lik parça ölçüsünde %2,78'lik azalışa neden olmaktadır. Ofset miktarının 0,21 mm olmasıyla 0,14 mm ofset miktarına göre parça ölçüsünde %4,58'lik azalış gerçekleşmektedir. 240 W güçte 350 mm/s tarama hızında 0,14 mm ofset miktarındaki %25'lik artış 3 mm'lik parça ölçüsünde %2,44'lük azalışa, ofset miktarındaki %50'lik artışıyla parça ölçüsünde %5,15'lik azalışa neden olduğu belirlenmiştir. 240 W güçte 420 mm/s tarama hızında 0,14 mm ofset miktarındaki %25'lik artış 3 mm'lik parça ölçüsünde %2,82'lik azalışa neden olurken, ofset miktarındaki %50'lik artış parça ölçüsünde %5,42'lik azalışa neden olmaktadır.

10 mm genişlik ölçüsünün ofset miktarı, güç ve hıza bağlı değişim grafiği Şekil 5.2'de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.2. Ofset miktarına göre genişlik ölçüsünün grafiği a) Tarama hızına göre değişim grafiği b) Lazer gücüne göre değişim grafiği

Grafikler genel olarak değerlendirildiğinde, 10 mm'lik genişlik ölçüsünün ofset miktarı ile değiştiği görülmektedir. Tüm ofset miktarlarında güç arttıkça ölçülerin artış gösterdiği, hız artışı ile ölçülerde düşüş eğilimi sergilediği görülmektedir. En küçük genişlik ölçüsü 0,21 mm ofset miktarında, 160 W gücünde, 350 mm/s tarama hızında 9,811 mm olarak ölçülmüştür. En büyük genişlik ölçüsü 0,14 mm ofset miktarında, 240 W gücünde, 280 mm/s tarama hızında 10,133 mm olarak tespit edilmiştir. En ideal genişlik ölçüsü 0,14 mm ofset miktarında, 160 W gücünde, 280 mm/s tarama hızında tasarım ölçüsüne en yakın değer 10,013 mm olarak belirlenmiştir.

Şekil 5.2 grafiği incelendiğinde 0,14 mm ofset miktarı için 10 mm ölçüsünün tek bir değer hariç artı değerde kaldığı görülmektedir. Bu aralık eksi %0,23 ile artı %1,33 değer aralığında değişmektedir. 0,175 mm ofset miktarı için bazı durumlarda artı değerlerde, bazı durumlarda ise eksi değerlerde kalmaktadır. Bu aralık artı %0,4 ile eksi %0,85 aralığında değişmektedir. 0,21 mm ofset miktarı için bütün durumlarda eksi değerlerde kaldığı görülmektedir. Bu aralık eksi %0,41 ile eksi %1,89 değer aralığında değişmektedir. Bu sonuçlardan yola çıkarak, 0,21 mm ofset miktarı ile üretilen parçaların kullanıma uygun olmadığı görülmektedir. Ancak 0,14 ve 0,175 mm ofset miktarları ile üretilen parçaların uygun parametreler ile kullanıma daha uygun olduğu, gerekirse üretim sonrası uygulanabilecek diğer imalat yöntemleri ile istenilen ölçülere getirilebileceği görülmektedir.

160W güçte 280 mm/s tarama hızında 0,14 mm ofset miktarındaki %25'lik artış 10 mm'lik parça ölçüsünde %0,23'lük azalışa neden olmaktadır. Ofset miktarının 0,21 mm olmasıyla 0,14 mm ofset miktarına göre parça ölçüsünde %1,37'lik azalış gerçekleşmektedir. 160 W güçte 350 mm/s tarama hızında 0,14 mm ofset miktarındaki %25'lik artış 10 mm'lik parça ölçüsünde %0,89'lük azalışa, ofset miktarındaki %50'lik artışıyla parça ölçüsünde %1,72'lik azalışa neden olduğu belirlenmiştir. 160 W güçte 420 mm/s tarama hızında 0,14 mm ofset miktarındaki %25'lik artış 10 mm'lik parça ölçüsünde %0,67'lik azalışa neden olurken, ofset miktarındaki %50'lik artış parça ölçüsünde %1,50'lik azalışa neden olmaktadır.

200 W güçte 280 mm/s tarama hızında 0,14 mm ofset miktarındaki %25'lik artış 10 mm'lik parça ölçüsünde %1,08'lik azalışa neden olmaktadır. Ofset miktarının 0,21 mm olmasıyla 0,14 mm ofset miktarına göre parça ölçüsünde %2,04 azalış gerçekleşmektedir. 200 W güçte 350 mm/s tarama hızında 0,14 mm ofset miktarındaki %25'lik artış 10 mm'lik parça ölçüsünde %0,99'lük azalışa, ofset miktarındaki %50'lik artış parça ölçüsünde %1,75'lik azalışa neden olduğu belirlenmiştir. 200 W güçte 420 mm/s tarama hızında 0,14 mm ofset miktarındaki %25'lik artış 10 mm'lik parça ölçüsünde %1,05'lik azalışa neden olurken, ofset miktarındaki %50'lik artış parça ölçüsünde %1,79'lük azalışa neden olmaktadır.

240 W güçte 280 mm/s tarama hızında 0,14 mm ofset miktarındaki %25'lik artış 10 mm'lik parça ölçüsünde %0,94'lük azalışa neden olmaktadır. Ofset miktarının 0,21 mm olmasıyla 0,14 mm ofset miktarına göre parça ölçüsünde %1,77'lik azalış gerçekleşmektedir. 240 W güçte 350 mm/s tarama hızında 0,14 mm ofset miktarındaki %25'lik artış 10 mm'lik parça

ölçüsünde %1,05'lik azalışa, ofset miktarındaki %50'lik artış parça ölçüsünde %1,98'lik azalışa neden olduğu belirlenmiştir. 240 W güçte 420 mm/s tarama hızında 0,14 mm ofset miktarındaki %25'lik artış 10 mm'lik parça ölçüsünde %1,09'luk azalışa neden olurken, ofset miktarındaki %50'lik artış parça ölçüsünde %1,79'luk azalışa neden olmaktadır.

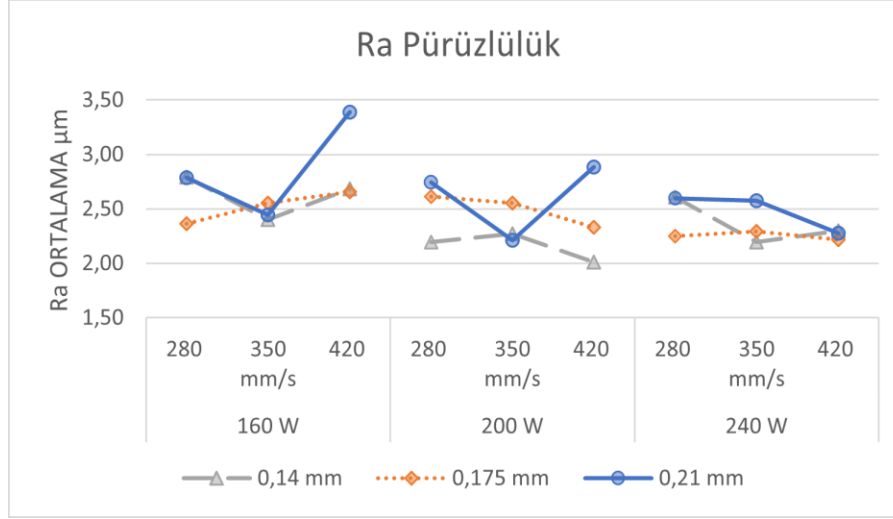
5.2. Pürüzlülük Değerlerinin Değerlendirilmesi

Belirtilen parametrelere göre üretilen 27 adet numunenin imalatı sonrasında yüzey pürüzlülüklerinin ölçümünde profilometre Mitutoyo SJ-410 cihazı kullanılmıştır. Numunelerin ofset (mm), güç (W) ve tarama hızına (mm/s) bağlı olarak Ra Ortalaması (μm) ve Rz Ortalaması (μm) ölçüm verileri Çizelge 5.2'de verilmiştir. Bu değerler 3 bölgeden ve her bölgede en az 3 ölçüm yapılarak 9 ölçümün ortalaması alınarak belirlenmiştir.

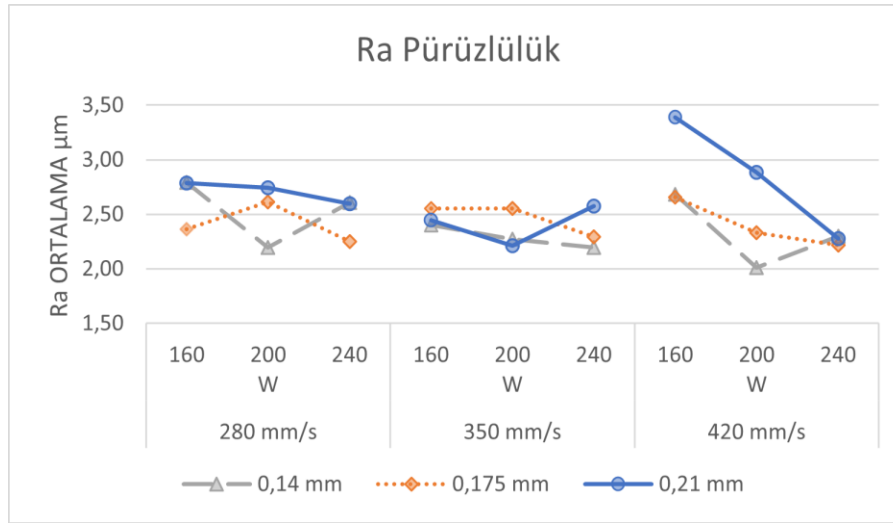
Çizelge 5.2. Yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri.

Deney No	Ofset (mm)	Güç (W)	Hız (mm/s)	Ort. Ra (μm)	Ort. Rz (μm)
D1	0,14	160	280	2,793	17,216
D2		200	280	2,197	14,361
D3		240	280	2,610	18,345
D4		160	350	2,400	16,801
D5		200	350	2,273	15,448
D6		240	350	2,194	15,962
D7		160	420	2,686	17,368
D8		200	420	2,011	15,583
D9		240	420	2,300	16,145
D10	0,175	160	280	2,363	17,192
D11		200	280	2,614	18,974
D12		240	280	2,252	16,978
D13		160	350	2,553	18,196
D14		200	350	2,555	16,593
D15		240	350	2,291	16,434
D16		160	420	2,654	18,363
D17		200	420	2,331	14,515
D18		240	420	2,217	14,685
D19	0,21	160	280	2,788	18,636
D20		200	280	2,743	17,988
D21		240	280	2,595	17,994
D22		160	350	2,444	17,659
D23		200	350	2,214	16,737
D24		240	350	2,577	19,591
D25		160	420	3,389	23,084
D26		200	420	2,885	20,577
D27		240	420	2,279	14,069

Tasarlanan deney numunelerinin imalat parametrelerine göre ölçülen ortalama Ra değerlerinin grafikleri Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.3. Ofset miktarına göre ortalama Ra pürüzlülük grafiği, a) Tarama hızına göre değişim grafiği b) Lazer gücüne göre değişim grafiği

Güç ve tarama hızı açısından bakıldığında; tarama hızı ve güce bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü genel anlamda düşüş eğilimi sergilemektedir. 280 mm/s ile 420 mm/s arasındaki tarama hızlarında %10 civarında düşüş eğilimi olduğu, güç açısından bakıldığında ise 160 W ile 240 W arasında %15 düşüş eğilimi görülmektedir. Fakat 160 W, 420 mm/s tarama hızında maksimum değerlerinin olduğu bununda erimeyen partiküllerden kaynaklı yüzeylerdeki tahribatlardan olduğu düşünülmektedir. Lazer gücü ve tarama hızı değişiminde yüzey pürüzlülüğünün kararlı bir durum sergilemediği görülmektedir. Bu durumu daha iyi açıklayabilmek için benzer literatür çalışmalarından faydalanılmıştır. Eriyik havuz

sıcaklığının yükselmesi; ayrıca katılaşma süresinin, sıvı fazın ısıtma kabiliyetinin ve akışkanlığının artmasına bağlanmıştır [3]. Literatürde yer alan bir çalışmaya bakıldığında, lazer ışını, toz yatağında emildiğinden, toz erimeye başlar ve hacim azalır. Yüzey gerilimi nedeniyle eriyik havuzuna daha fazla toz sürüklenebilir. Işının neden olduğu eriyik havuzu oldukça dinamiktir ve sıvı metallerin düşük viskozitesi ile yüzey gerilimi tarafından yönlendirilir. Sıvı ve katı sıcaklığı arasındaki viskozite değişiklikleri nedeniyle eriyik havuzu boyunca viskozite değişiklikleri, izlerin şeklini ve ortaya çıkan yüzey pürüzlülüğünü büyük ölçüde etkileyebilir. Bunun sonucunda da düzensiz eriyik izlerin oluşmasına neden olduğunu belirtmişlerdir [48]. Yapılan diğer bir çalışmada düşük yüzey kalitesi ve eriyik havuzunun genişliği arasında güçlü bir bağ olduğu belirtilmiştir. Küçük eriyik havuzunun oluşması ile yüzey kalitesinin iyileştiğini belirtmişlerdir [14, 15, 18-20]. Yapılan bir diğer çalışmada, lazer gücünün artması ve tarama hızının azalması ile eriyik havuzu sabit kalarak yüzey pürüzlülüğünün iyileşeceği sonucuna varmışlardır. Özellikle düşük tarama hızlarında, eriyik havuzunun topaklanmasının önemli bir sorun olduğu, yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiği belirtilmiştir [49]. Yapılan bu çalışmalara paralel olarak parametre setlerinin değişimine bağlı olarak pürüzlülük değerlerinde kararlı bir sonuç alınamamasının nedeni eriyik havuzlarının farklı şekillerde oluşmasıdır.

Şekil 5.3 ofset miktarına bağlı olarak incelenecek olursa, güç ve hıza bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. 0,21 mm ofset miktarıyla genel olarak daha yüksek pürüzlülük değerlerinin ölçüldüğü söylenebilir. 0,21 mm ofset miktarında tüm parametrelerin ortalaması alındığında Ra değerinin 2,657 μm değeri belirlenmektedir. Ofset miktarının 0,175 mm olduğu tüm parametrelerde ise bu değer 2,425 μm olarak tespit edilmektedir. En düşük Ra değerlerinin 0,14 mm ofset miktarı ile tespit edildiği söylenebilir. 0,14 mm ofset miktarına göre tüm değerlerin ortalaması 2,385 μm olarak gerçekleştiği görülmektedir. Ra pürüzlülük değerinin güce ve hıza bağlı olarak değiştiği görülmektedir. En düşük Ra pürüzlülük değeri 0,14 mm ofset miktarında, 200 W lazer gücünde, 420 mm/s tarama hızında minimum değer 2,011 μm ölçülmüştür. En yüksek Ra pürüzlülük değeri 0,21 mm ofset miktarında, 160 W lazer gücünde 420 mm/s tarama hızında maksimum değer 3,389 μm olarak tespit edilmiştir. Grafikler ve yorumlardan yola çıkarak Çizelge 3.1’de görüldüğü üzere elde edilen veriler ile hassas döküm, freze, torna ve taşlama sonucu elde edilen yüzey pürüzlülükleri elde edilmiştir. Aynı zamanda elde edilen veriler Çizelge 3.2’de yer alan yüzey kaliteleri standardına göre N7 ve N8 pürüzlülük sınıfına girmektedir.

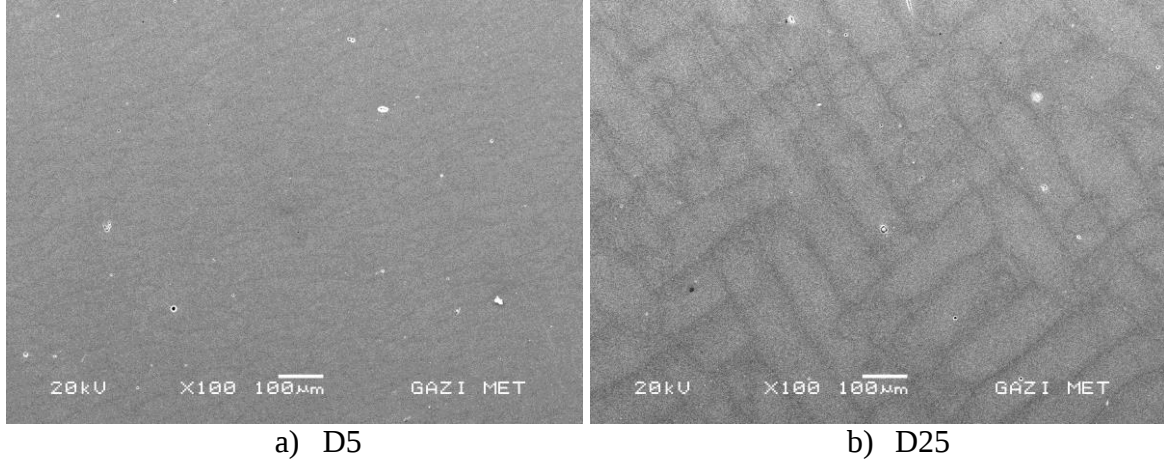
Şekil 5.3 parametrelere göre değerlendirilecek olursa, 0,14 mm ofset miktarında, 280 mm/s tarama hızında 160 W lazer gücündeki %25'lik artış Ra pürüzlülük değerinin %21,33'lük azalmasına neden olmaktadır. Lazer gücünün 240 W olmasıyla pürüzlülükte %6,55'lik azalış gerçekleşmektedir. 0,14 mm ofset miktarında, 350 mm/s tarama hızında 160 W lazer gücündeki %25'lik artış Ra pürüzlülük değerinin %5,29'luk azalmasına, lazer gücündeki %50'lik artış pürüzlülüğün %8,58'lik azalmasına neden olduğu belirlenmiştir. 0,14 mm ofset miktarında, 420 mm/s tarama hızında 160 W lazer gücündeki %25'lik artış Ra pürüzlülük değerinin %25,13'lük azalmasına neden olurken, lazer gücündeki %50'lik artış pürüzlülüğün %14,37'lik azalmasına neden olduğu belirlenmiştir.

0,175 mm ofset miktarında, 280 mm/s tarama hızında 160 W lazer gücündeki %25'lik artış Ra pürüzlülük değerinin %10,62'lik artmasına neden olmaktadır. Lazer gücünün 240 W olmasıyla pürüzlülükte %4,69'luk azalış gerçekleşmiştir. 0,175 mm ofset miktarında, 350 mm/s tarama hızında 160 W lazer gücündeki %25'lik artış Ra pürüzlülük değerinin %0,07'lik artmasına, lazer gücündeki %50'lik artış pürüzlülüğün %10,26'lık azalmasına neden olduğu belirtilmiştir. 0,175 mm ofset miktarında, 420 mm/s tarama hızında 160 W lazer gücündeki %25'lik artış Ra pürüzlülük değerinin %12,17'lik azalmasına neden olurken, lazer gücündeki %50'lik artış pürüzlülüğün %16,46'lık azalmasına neden olduğu belirlenmiştir.

0,21 mm ofset miktarında, 280 mm/s tarama hızında 160 W lazer gücündeki %25'lik artış Ra pürüzlülük değerinin %1,61'lik azalmasına neden olmaktadır. Lazer gücünün 240 W olmasıyla pürüzlülükte %6,92'lik azalış gerçekleşmektedir. 0,21 mm ofset miktarında, 350 mm/s tarama hızında 160 W lazer gücündeki %25'lik artış Ra pürüzlülük değerinin %9,41'lik azalmasına, lazer gücündeki %50'lik artış pürüzlülüğün %5,44'lük artmasına neden olduğu belirlenmiştir. 0,21 mm ofset miktarında, 420 mm/s tarama hızında 160 W lazer gücündeki %25'lik artış Ra pürüzlülük değerinin %14,87'lik azalmasına neden olurken, lazer gücündeki %50'lik artış pürüzlülüğün %32,75'lik azalmasına neden olduğu belirlenmiştir.

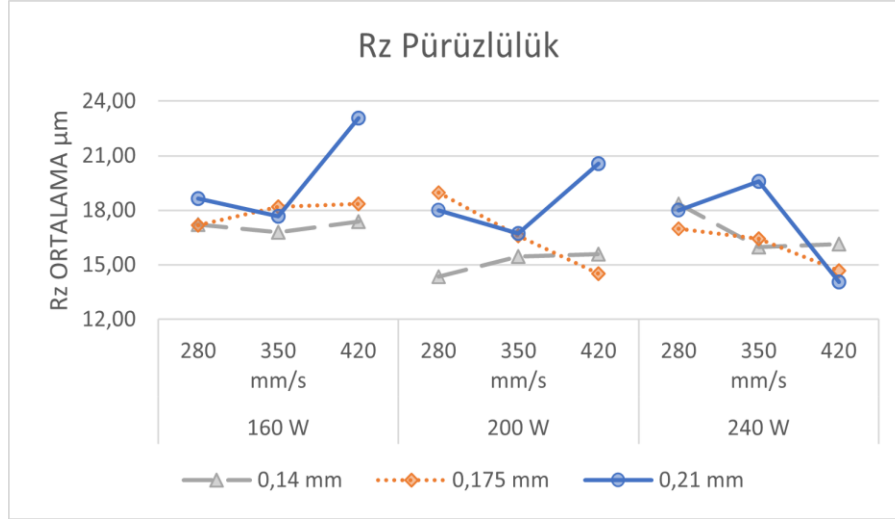
Üretilen numuneler üzerinden alınan SEM görüntüleri incelendiğinde (Resim 5.1), 0,14 mm ofset miktarında 200 W gücünde, 350 mm/s hızında Ra değerinin 2,273 μm (D5) görüntüsünde yüzeydeki erime izleri ve dalgalanmalarının, 0,21 mm ofset miktarında, 160 W lazer gücünde 420 mm/s tarama hızında ölçülen maksimum değer 3,389 μm (D25)'den

daha az olduğu anlaşılmaktadır. 5 numaralı deneyde düşük yüzey pürüzlülüğünün oluşumunu, daha yüksek lazer gücünün yüksek eriyik sıcaklığı sağlayarak daha iyi yüzey gerilimi ve ıslanabilirlik sağlayarak kararlı erimiş havuz ve pürüzsüz yüzey oluşumu sağladığı kanaatine varılmıştır [3].

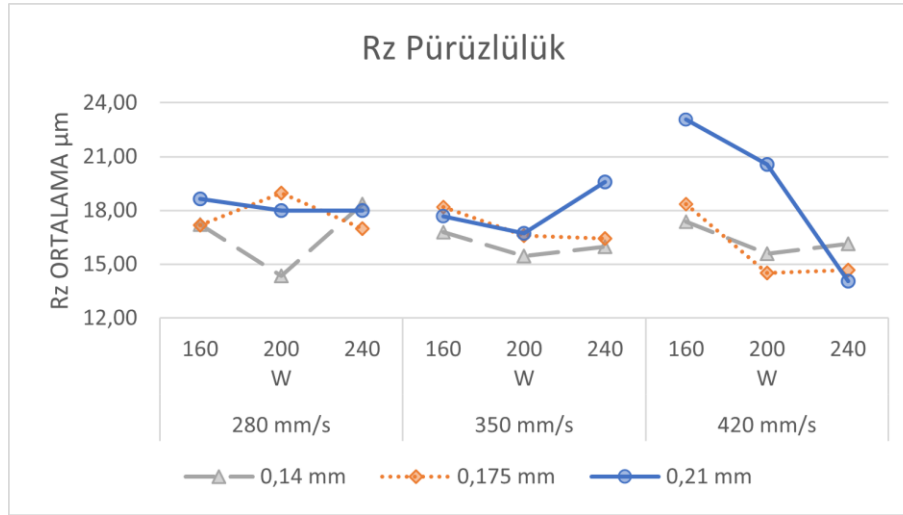


Resim 5.1. Üretilen numuneler üzerinden alınan SEM görüntüleri, a) D5, b) D25.

Deney numunelerinin imalat parametrelerine göre ortalama Rz değerlerinin grafikleri Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.4. Ofset miktarına göre ortalama Rz pürüzlülük grafiği a) Tarama hızına göre değişim grafiği b) Lazer gücüne göre değişim grafiği

Grafikler ve yorumları değerlendirildiğinde, Rz pürüzlülük değerinin lazer gücü ve tarama hızına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. En düşük Rz pürüzlülük değeri 0,21 mm ofset miktarında, 240 W lazer gücünde, 420 mm/s tarama hızında minimum değer 14,069 µm ölçülmüştür. En yüksek Rz pürüzlülük değeri 0,21 mm ofset miktarında, 160 W lazer gücünde, 420 mm/s hızında maksimum değer 23,084 µm olarak tespit edilmiştir. Şekil 5.4 incelendiğinde ortalama Rz değerleri de Ra değerlerine benzer durum sergilemektedir. Güç ve hıza bağlı olarak ortalama Rz değerleri değişiklik göstermektedir. Ofset miktarına göre grafik yorumlanacak olursa, 0,14 mm ofset miktarındaki verilerin ortalaması diğer ofset miktarlarından daha düşük (16,359 µm) tespit edilmiştir. En yüksek verilen ortalaması ise 0,21 mm ofset miktarında (18,482 µm) tespit edilmiştir.

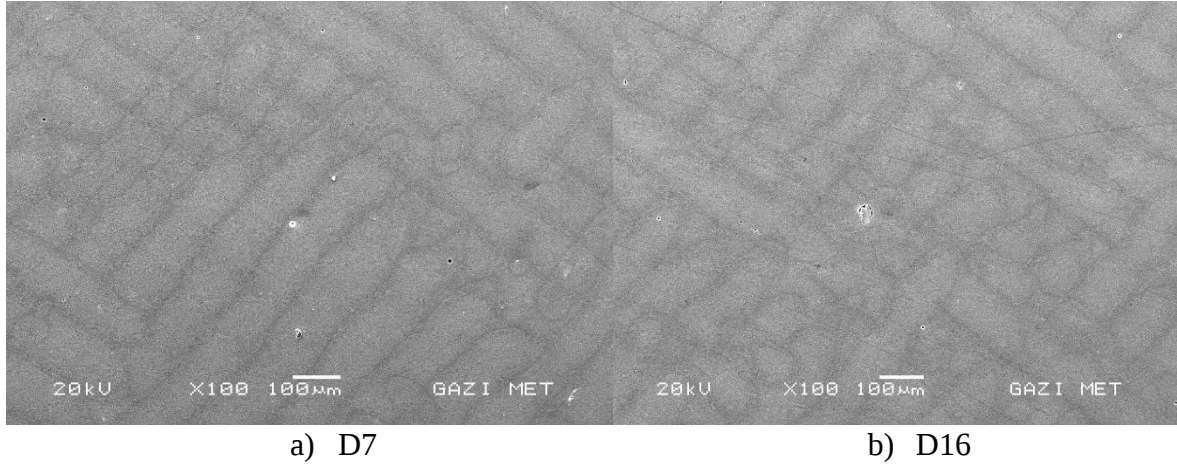
Şekil parametrelere göre değerlendirilecek olursa, 0,14 mm ofset miktarında, 280 mm/s tarama hızında 160 W lazer gücündeki %25'lik artış Rz pürüzlülük değerinin %16,58'lik azalışa neden olmaktadır. Lazer gücünün 240 W olmasıyla pürüzlülükte %6,55'lik artış gerçekleşmektedir. 0,14 mm ofset miktarında, 350 mm/s tarama hızında 160 W lazer gücündeki %25'lik artış Rz pürüzlülük değerinin %8,05'lik azalmasına, lazer gücündeki %50'lik artış pürüzlülüğün %4,99'luk azalmasına neden olduğu belirlenmiştir. 0,14 mm ofset miktarında, 420 mm/s tarama hızında 160 W lazer gücündeki %25'lik artış Rz pürüzlülük değerinin %10,27'lik azalmasına neden olurken, lazer gücündeki %50'lik artış pürüzlülüğün %7,04'lük azalmasına neden olduğu belirlenmiştir.

0,175 mm ofset miktarında, 280 mm/s tarama hızında 160 W lazer gücündeki %25'lik artış Rz pürüzlülük değerinin %10,36'lık artmasına neden olmaktadır. Lazer gücünün 240 W olmasıyla pürüzlülükte %1,24'lük azalış gerçekleşmektedir. 0,175 mm ofset miktarında, 350 mm/s tarama hızında 160 W lazer gücündeki %25'lik artış Rz pürüzlülük değerinin %8,80'lik azalmasına, lazer gücündeki %50'lik artış pürüzlülüğün %9,68'lik azalmasına neden olduğu belirlenmiştir. 0,175 mm ofset miktarında, 420 mm/s tarama hızında 160 W lazer gücündeki %25'lik artış Rz pürüzlülük değerinin %20,95'lik azalmasına neden olurken, lazer gücündeki %50'lik artış pürüzlülüğün %20,02'lik azalmasına neden olduğu belirlenmiştir.

0,21 mm ofset miktarında, 280 mm/s tarama hızında 160 W lazer gücündeki %25'lik artış Rz pürüzlülük değerinin %3,47'lik azalışa neden olmaktadır. Lazer gücünün 240 W olmasıyla pürüzlülükte %3,44'lük azalış gerçekleşmektedir. 0,21 mm ofset miktarında, 350 mm/s tarama hızında 160 W lazer gücündeki %25'lik artış Rz pürüzlülük değerinin %5,22'lik azalmasına, lazer gücündeki %50'lik artış pürüzlülüğün %10,94'lük artmasına neden olduğu belirlenmiştir. 0,21 mm ofset miktarında, 420 mm/s tarama hızında 160 W lazer gücündeki %25'lik artış Rz pürüzlülük değerinin %10,86'lik azalışa neden olurken, lazer gücündeki %50'lik artış pürüzlülüğün %39,05'lik azalışa neden olduğu belirlenmiştir.

Güç ve tarama hızı açısından bakıldığında; tarama hızı ve güce bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü genel anlamda düşüş eğilimi göstermektedir. 280 mm/s ile 420 mm/s arasındaki tarama hızlarında %10 civarında düşüş eğilimi olduğu, güç açısından bakıldığında ise 160 W ile 240 W arasında %15 düşüş eğilimi olduğu görülmektedir. Fakat 160 W, 420 mm/s tarama hızında maksimum değerlerinin olduğu bununda erimeyen partiküllerden kaynaklı

yüzeylerdeki tahribatlardan olduğu düşünülmektedir. Eriyik havuz sıcaklığının yükselmesi; ayrıca katılma süresinin, sıvı fazın ıslatma kabiliyetinin ve akışkanlığının artmasına bağlanmıştır [3].

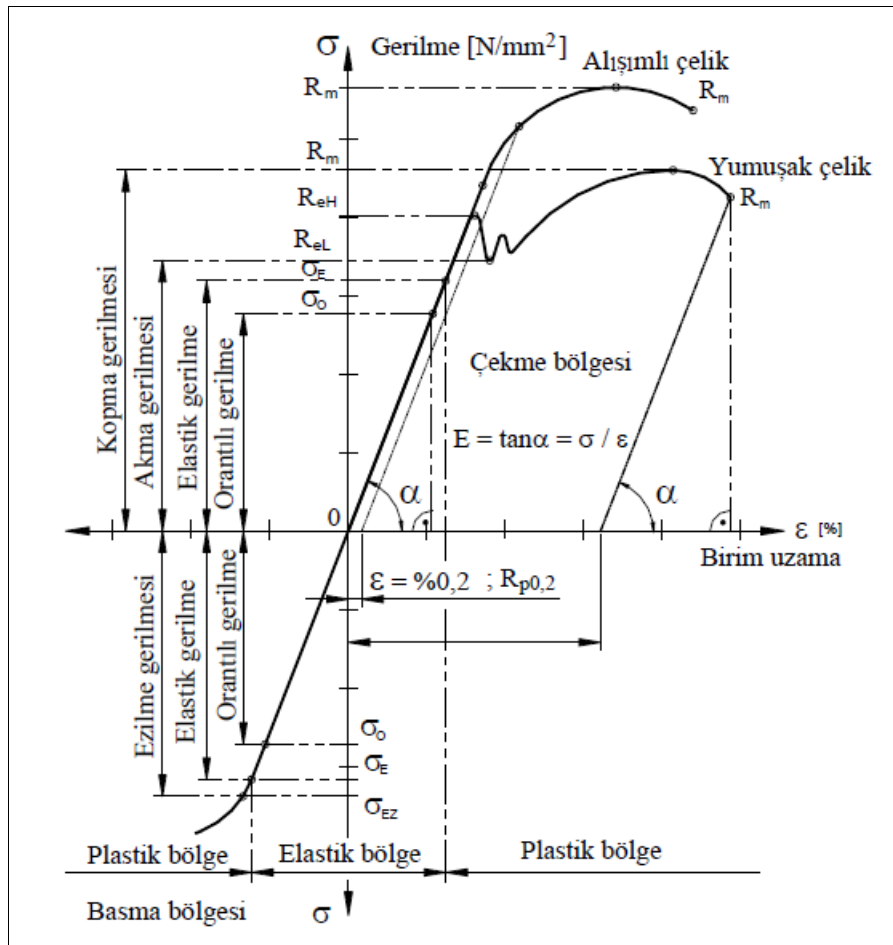


Resim 5.2. Üretilen numuneler üzerinden alınan SEM görüntüleri, a) D7, b) D16.

Literatürde yapılan bir araştırma sonucu tarama hızı arttıkça infiltrasyon etkisi ile tozların bağlanmasının çok zayıfladığı bununla birlikte Ra ve Rz pürüzlülük değerlerinin azaldığı görülmüştür. Araştırmacıların yapmış oldukları deneyler sonucunda elde edilen Ra ortalama pürüzlülük değeri yaklaşık 3,536 μm , Rz pürüzlülük değeri ise yaklaşık 14,142 μm olarak ölçülmüştür [14]. Bizim çalışmamızda da tüm değerlerin ortalaması olarak Ra değeri 2,489 μm , Rz 17,240 μm olarak gerçekleşmiş ve literatür ile paralellik göstermektedir.

5.3. Mukavemet Değerlerinin Değerlendirilmesi

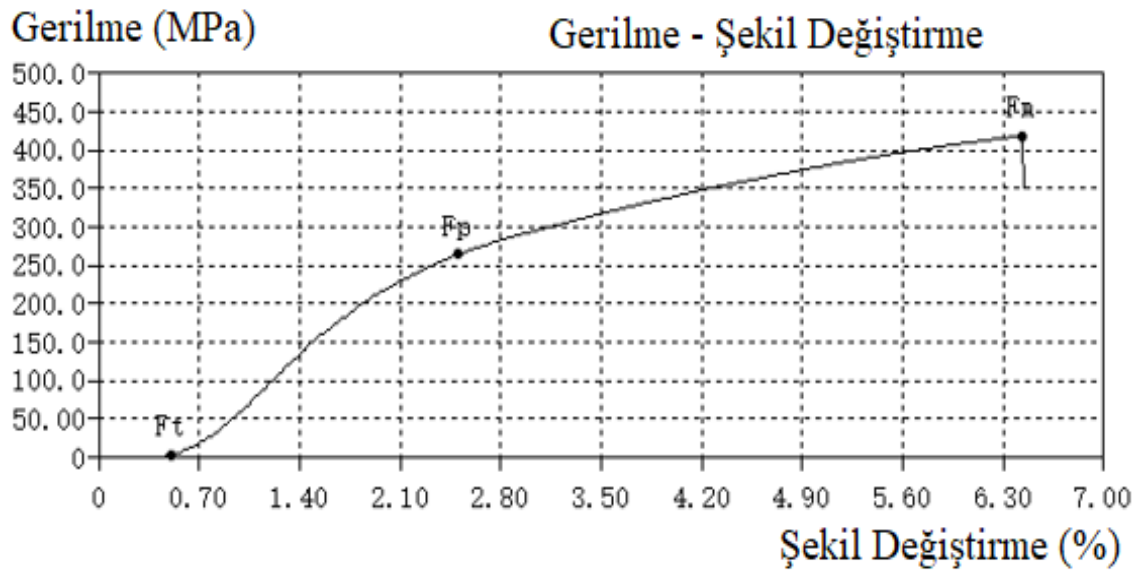
Kopma mukavemeti; Devamlı ve lineer fazlaşan gerilme sonucu malzemenin koptuğu gerilme büyüklüğüne "kopma mukavemeti" adı verilir ve R_m ile gösterilir. %0,2 Uzama mukavemeti; Kuvvetin sabit kalmasına rağmen kalıcı deformasyonun %0,2 olduğu gerilmenin değerine " %0,2 uzama mukavemeti " adı verilir ve R_p ile gösterilir [50].



Şekil 5.5. Gerilme-Uzama diyagramı [50]

Belirtilen parametrelere göre üretilen 27 adet numunenin imalatı sonrasında akma ve çekme mukavemeti değerleri Bilgisayar Kontrollü HM-D Hoytom Çekme Kopma Test Cihazı ile ölçülmüştür. Numunelerin ofset (mm), lazer gücü (W) ve tarama hızına (mm/s) bağlı Rp (MPa) ve Rm (MPa) ölçüm verileri Çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

D9'a ait gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 5.6'da verilmiştir. Numuneye ait grafikte, F_R noktası (R_m) hem çekme hem de kopma noktasına tekabül eder. F_P noktası (R_p) %0,2 uzama mukavemeti adı verilen teknik akma mukavemetidir.



Şekil 5.6. Numune 9: Gerilme-şekil değişirme grafiği

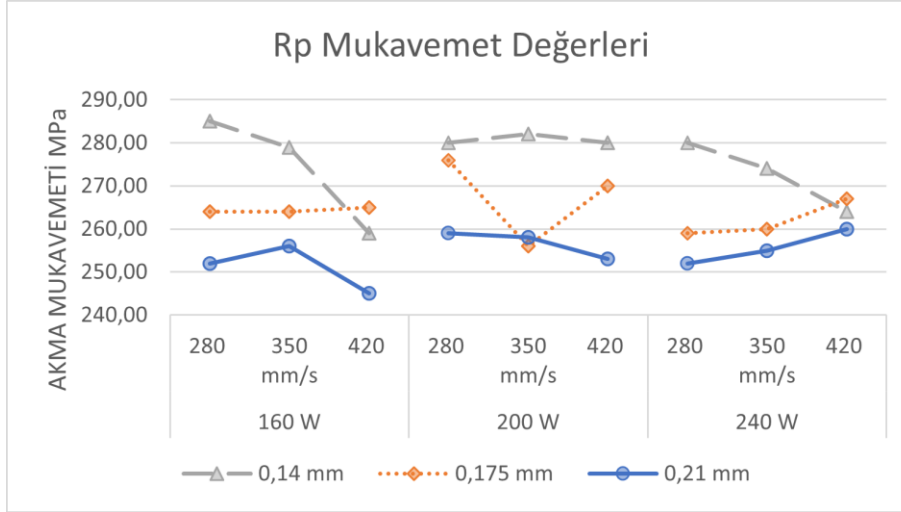
SLM ile üretilen parçaların mekanik davranışları geleneksel üretim yöntemleri ile üretilen parçalara kıyasla daha yüksek bir çekme mukavemetine ve aynı zamanda karşılaştırılabilir bir sünekliğe ve daha düşük bir yorulma ömrüne sahiptir [27].

Çizelge 5.3'te yapılan deneyler sonucunda elde edilen akma ve kopma mukavemetlerinin değerleri yer almaktadır.

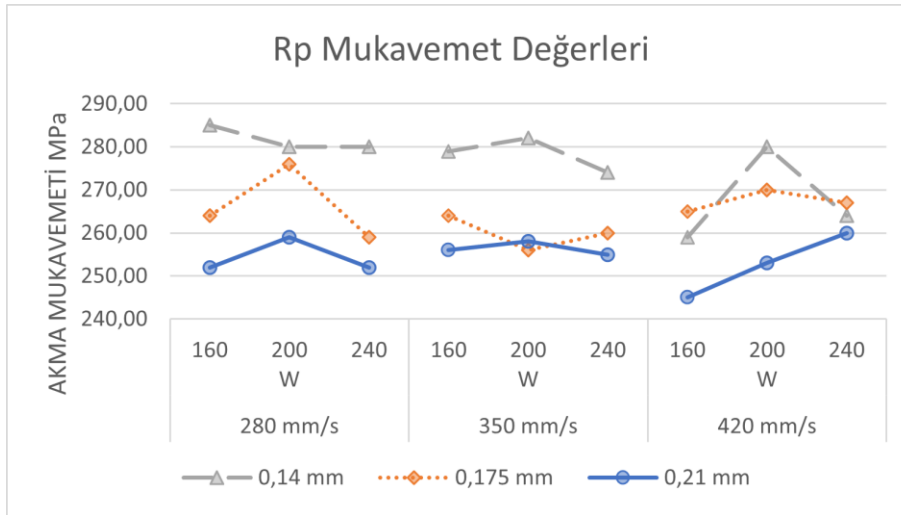
Çizelge 5.3. Akma ve kopma mukavemet değerleri

Deney No	Ofset (mm)	Güç (W)	Tarama Hızı (mm/s)	Akma Gerilmesi (MPa)	Kopma Gerilmesi (MPa)
D1	0,14	160	280	285,00	433,00
D2		200	280	280,00	412,00
D3		240	280	280,00	435,00
D4		160	350	279,00	431,00
D5		200	350	282,00	427,00
D6		240	350	274,00	425,00
D7		160	420	259,00	411,00
D8		200	420	280,00	431,00
D9		240	420	264,00	418,00
D10	0,175	160	280	264,00	424,00
D11		200	280	276,00	423,00
D12		240	280	259,00	420,00
D13		160	350	264,00	424,00
D14		200	350	256,00	406,00
D15		240	350	260,00	415,00
D16		160	420	265,00	416,00
D17		200	420	270,00	404,00
D18		240	420	267,00	411,00
D19	0,21	160	280	252,00	411,00
D20		200	280	259,00	409,00
D21		240	280	252,00	395,00
D22		160	350	256,00	408,00
D23		200	350	258,00	408,00
D24		240	350	255,00	404,00
D25		160	420	245,00	395,00
D26		200	420	253,00	402,00
D27		240	420	260,00	405,00

Deney numunelerinin imalat parametrelerine göre akma ve kopma mukavemet değerlerinin grafikleri Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.7. Ofset miktarına göre R_p mukavemet değerleri grafiği a) Tarama hızına göre değişim grafiği b) Lazer gücüne göre değişim grafiği

Grafikler ve yorumları değerlendirildiğinde, R_p mukavemet değerinin lazer gücü ve tarama hızına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. En düşük R_p mukavemet değeri 0,21 mm ofset miktarında, 160 W lazer gücünde, 420 mm/s tarama hızında minimum değer 245 MPa olarak ölçülmüştür. En yüksek R_p mukavemet değeri 0,14 mm ofset miktarında, 160 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızında maksimum değer 285 MPa olarak tespit edilmiştir. Dökümhanede üretilen Etial 171 isimli AlSi10Mg alaşımı ticari olarak mevcuttur. Dökümhanede üretilen AlSi10Mg alaşımı çekme mukavemet değeri ortalama 280 MPa, akma mukavemeti ise ortalama 250 MPa olarak belirtilmiştir [33]. Tez kapsamında yapılan deneyler sonucunda çekme mukavemetinin tüm deneylerin ortalaması olarak 415 MPa olarak bulunmuştur. Döküm yöntemi ile üretilen malzemeye göre 1,48 kat daha fazla çekme

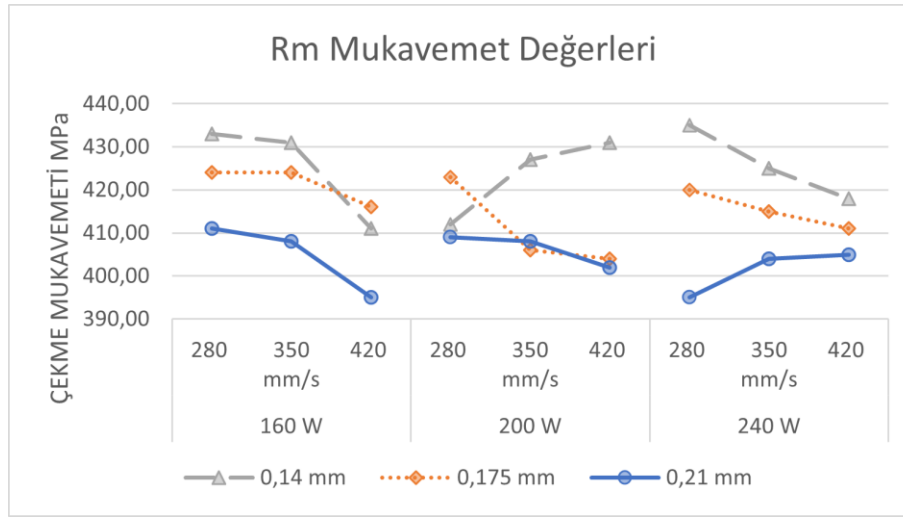
mukavemeti tespit edilmiştir. Akma mukavemeti değerlerinin ortalaması olarak 265 MPa bulunmuştur. Akma mukavemeti de döküm yöntemine göre 1,06 kat daha fazla belirlenmiştir. Lazer gücü değişiminin mukavemet değerlerinde bir farklılık oluşturmadığını, literatürde yapılan bir çalışmada, aynı lazer gücünde, tarama hızındaki artış ile tane boyutunun giderek küçüldüğünü belirtmişlerdir. Aynı 100 W lazer gücü altında yaptıkları çalışmada tarama hızının artmasıyla hem akma hem de çekme mukavemetlerinin arttığını belirtmişlerdir. Mukavemet değerlerinin değişmesini, tane boyutu ve dislokasyon yoğunluğuna bağlamışlardır [18].

Şekil 5.7 ofset miktarına göre değerlendirildiğinde en düşük akma mukavemeti değerleri 0,21 mm ofset miktarında, en yüksek değerler ise 0,14 mm ofset miktarında belirlenmiştir. Bu durum parça boyutsal toleranslıkla paralellik göstermektedir. Boyut küçüldükçe akma mukavemeti de düşüş göstermiştir.

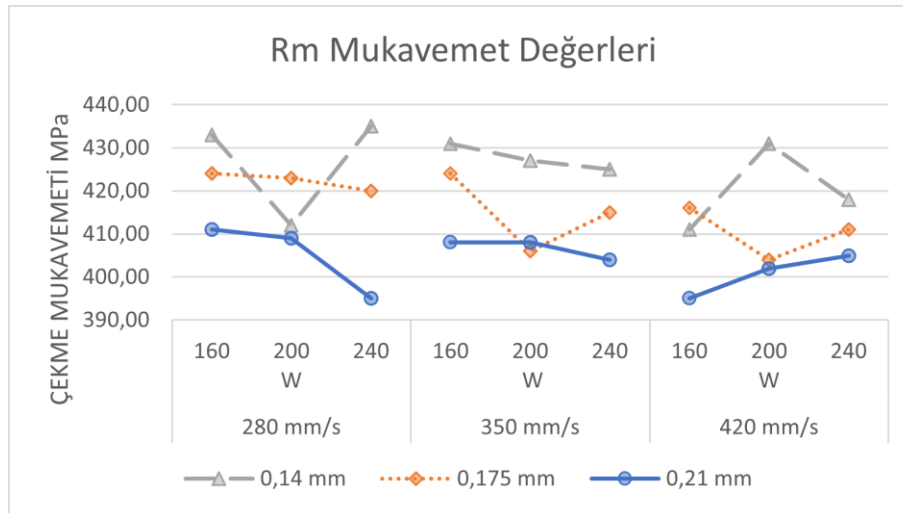
Şekil parametrelere göre incelendiğinde, 0,14 mm ofset miktarında, 160 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızındaki %25'lik artış R_p mukavemet değerinin %2,10'luk azalışa neden olmaktadır. Tarama hızı 420 mm/s olmasıyla R_p değerinin %9,12'lik azalış gerçekleşmektedir. 0,14 mm ofset miktarında, 200 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızındaki %25'lik artış R_p mukavemet değerinin %0,71'lik artmasına, tarama hızındaki %50'lik artışla R_p değerinin değişmediği görülmektedir. 0,14 mm ofset miktarında, 240 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızındaki %25'lik artış R_p mukavemet değerinin %2,14'lük azalışa neden olurken, tarama hızındaki %50'lik artış R_p değerinin %5,71'lik azalışa neden olduğu belirlenmiştir.

0,175 mm ofset miktarında, 160 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızındaki %25'lik artış R_p mukavemet değerinde bir değişikliğe neden olmazken, tarama hızı 420 mm/s olmasıyla R_p değerinin %0,37'lik artış gerçekleşmektedir. 0,175 mm ofset miktarında, 200 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızındaki %25'lik artış R_p mukavemet değerinin %7,24'lük azalışa, tarama hızındaki %50'lik artış R_p değerinin %2,17'lik azaldığı görülmektedir. 0,175 mm ofset miktarında, 240 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızındaki %25'lik artış R_p mukavemet değerinin %0,38'lik artışa neden olurken, tarama hızındaki %50'lik artış R_p değerinin %3,08'lik artışa neden olduğu belirlenmiştir.

0,21 mm ofset miktarında, 160 W lazer gücünde tarama hızındaki %25'lik artış R_p mukavemet değerinin %1,58'lik artışa neden olmaktadır. Tarama hızı 420 mm/s olmasıyla R_p değerinin %2,77'lik azalış gerçekleşmektedir. 0,21 mm ofset miktarında, 200 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızındaki %25'lik artış R_p mukavemet değerinin %0,38'lik azalmasına, tarama hızındaki %50'lik artış R_p değerinin %2,31'lik azalışa neden olduğu görülmektedir. 0,21 mm ofset miktarında, 240 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızındaki %25'lik artış R_p mukavemet değerinin %1,19'luk artışa neden olurken, tarama hızındaki %50'lik artış R_p değerinin %3,17'lik artışa neden olduğu belirlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.8. Ofset miktarına göre R_m çekme(kopma) mukavemeti grafiği a) Tarama hızına göre değişim grafiği b) Lazer gücüne göre değişim grafiği

Grafikler ve yorumları değerlendirildiğinde, R_m kopma mukavemeti lazer gücü ve tarama hızına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. En düşük R_m kopma mukavemeti 0,21 mm ofset miktarında hem 240 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızında hem de 160 W lazer gücünde 420 mm/s tarama hızında minimum değer 395 MPa ölçülmüştür. En yüksek R_m kopma mukavemeti 0,14 mm ofset miktarında, 240 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızında maksimum değer 435 MPa olarak tespit edilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalarda da nihai akma ve kopma mukavemetlerinin lazer gücünden bağımsız olduğunu ifade etmişlerdir [27]. Literatürde yapılan diğer bir çalışmada, ilk numune üretimi için 240 W lazer gücü ve 500 mm/s tarama hızı; ikinci için 960 W lazer gücü ve 1000 mm/s tarama hızında numuneler üretilmiştir. Nihai çekme mukavemetlerinin lazer gücünden bağımsız olduğunu ifade etmişlerdir [15]. Kopma mukavemet değerleri incelendiğinde en düşük çekme değeri 0,21 mm ofset değerlerinde, en yüksek değerler 0,14 mm ofset değerinde elde edilmiştir.

Sabit ofset miktarlarında ve sabit güçlerde tarama hızındaki artış ile parça kopma mukavemetinde azalma görülmektedir. Bu düşüşün yüksek tarama hızında metalürjik bağ oluşumunun zayıf ve tam erimemiş partiküllerin neden olduğu düzensiz gözeneklerin oluşumuna bağlıdır [51].

Yapılan bir çalışmada, AlSi10Mg alüminyum alaşım matrisli kompozit malzemeyi Vorteks yöntemi ile üretmiştir. Numunelerin üretimleri basınçlı pres döküm makinesinde kalıplanarak gerçekleştirilmiştir. Numunelere uygulanan çekme deneyi sonuçları; ortalama akma mukavemeti minimum ve maksimum değerleri 118 MPa-191 MPa, ortalama çekme mukavemeti minimum ve maksimum değerleri 178 MPa-310 MPa tespit edilmiştir [33]. Elde ettiğimiz sonuçlar akma mukavemeti minimum ve maksimum değerleri 245–285 MPa, çekme mukavemeti minimum ve maksimum değerleri 395-435 MPa'dır. Basınçlı pres döküm yöntemi ile üretilen numunelerin mukavemet değerleri ile kıyaslandığında daha yüksek mukavemet değerlerine sahip numuneler üretildiği açıkça görülmektedir.

Şekil parametrelere göre değerlendirilecek olursa, 0,14 mm ofset miktarında, 160 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızındaki %25'lik artış R_m mukavemet değerinin %0,46'lık azalışa neden olmaktadır. Tarama hızının 420 mm/s olmasıyla R_m değerinde %5,08'lik

azalış gerçekleşmektedir. 0,14 mm ofset miktarında, 200 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızındaki %25'lik artış R_m mukavemet değerinin %3,64'lük artmasına, tarama hızındaki %50'lik artış R_m değerinin %4,61'lik artışa neden olduğu belirlenmiştir. 0,14 mm ofset miktarında, 240 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızındaki %25'lik artış R_m mukavemet değerinin %2,29'lük azalışa neden olurken, tarama hızındaki %50'lik artış R_m değerinin %3,90'lük azalmasına neden olduğu belirlenmiştir.

0,175 mm ofset miktarında, 160 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızındaki %25'lik artış R_m mukavemet değerinde bir değişikliğe neden olmamıştır. Tarama hızının 420 mm/s olmasıyla R_m değerinin %1,88'lik azalış gerçekleşmektedir. 0,175 mm ofset miktarında, 200 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızındaki %25'lik artış R_m mukavemet değerinin %4,01'lik azalmasına, tarama hızındaki %50'lik artış R_m değerinin %4,49'lük azalmasına neden olduğu belirlenmiştir. 0,175 mm ofset miktarında, 240 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızındaki %25'lik artış R_m mukavemet değerinin %1,19'lük azalışa neden olurken, tarama hızındaki %50'lik artış R_m değerinin %2,14'lük azalmasına neden olduğu belirlenmiştir.

0,21 mm ofset miktarında, 160 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızındaki %25'lik artış R_m mukavemet değerinin %0,72'lik azalışa neden olmaktadır. Tarama hızının 420 mm/s olmasıyla R_m değerinin %3,89'lük azalış gerçekleşmektedir. 0,21 mm ofset miktarında, 200 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızındaki %25'lik artış R_m (kopma mukavemeti) değerinin %0,24'lük azalmasına, tarama hızındaki %50'lik artış R_m değerinin %1,71'lik azalmasına neden olduğu belirlenmiştir. 0,21 mm ofset miktarında, 240 W lazer gücünde, 280 mm/s tarama hızındaki %25'lik artış R_m mukavemet değerinin %2,27'lik artışa neden olurken, tarama hızındaki %50'lik artış R_m değerinin %2,53'lük artmasına neden olduğu belirlenmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan seçici lazer ergitme yöntemi ile AlSi10Mg malzemesi kullanılarak numuneler üretilmiştir. Üretim işlemi yapılırken kontur parametrelerinden; ofset miktarının, lazer gücünün ve tarama hızının üretilen numunelerin boyutsal doğruluğu, pürüzlülük değerleri ve mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Kontur parametresi değiştirilirken, iç yüzey parametreleri sabit tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre;

Kontur parametresine değişimlerine göre;

- Lazer gücü ve tarama hızı sabit tutulup ofset miktarı arttırıldıkça kalınlık ve genişlik ölçüsünün azalan eğilim gösterdiği,
- Ofset miktarı ve lazer gücü sabit tutulup tarama hızı arttırıldıkça kalınlık ve genişlik ölçüsünün azalan eğilim gösterdiği,
- Ofset miktarı ve tarama hızı sabit tutulup lazer gücü arttırıldıkça kalınlık ve genişlik ölçüsünün artış eğilimi gösterdiği,
- Lazer gücü ve tarama hızı sabit tutulup ofset miktarı arttırıldıkça yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiği,
- Lazer gücü ve tarama hızı değişiminde yüzey pürüzlülüğünün kararlı bir durum göstermediği,
- Lazer gücü ve tarama hızı sabit tutulup ofset miktarı arttırıldıkça akma mukavemetinin azalma eğilimi sergilediği,
- Lazer gücü ve tarama hızı değişiminde ofset miktarına göre değişiklikler tespit edilmiştir. 0,14 mm ofset miktarında tarama hızı artışı ile akma mukavemetinin azalma eğiliminde olduğu, fakat diğer ofset miktarlarında ise artış eğilimi gösterdiği,
- Lazer gücü ve tarama hızı değişiminde çekme mukavemeti üzerinde kararlı bir durum göstermediği,
- Çekme mukavemetinde ise akma mukavemetinde olduğu gibi ofset miktarının artışıyla mukavemet değerlerinin azalma eğilimi sergilediği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Alexander, A. E., Wake, N., Chepelev, L., Brantner, P., Ryan, J., Wang, K. C. (2021). A guideline for 3D printing terminology in biomedical research utilizing ISO/ASTM standards. *3D Printing in Medicine*, 7(1), 1-6.
2. Dedeakayoğulları, H., Kaçal, A. (2020). Eklemeli imalat teknolojileri ve kullanılan talaşlı imalat yöntemleri üzerine yapılan çalışmaların değerlendirilmesi. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 1(1), 1-12.
3. Öter Z.Ç. (2021), *Direkt metal lazer sinterleme (DMLS) yöntemi ile 3 boyutlu metal yazıcıda üretilen parçaların yüzey kalitesi, boyutsal hassasiyet ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Gebze Teknik Üniversitesi.
4. Özsolak, O. (2019). Eklemeli İmalat Yöntemleri ve Kullanılan Malzemeler. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 3(1), 9-14.
5. Internet: The State of 3D Printing 2022 Edition Sculpteo, <https://www.sculpteo.com/en/ebooks/state-of-3d-printing-report-2022/>, Son Erişim Tarihi: 22.12.2022
6. Poyraz, Ö., Kuşhan, M. C. (2018). Investigation of the effect of different process parameters for laser additive manufacturing of metals. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(2), 729-742.
7. İnternet: Wohlers Report 2022, <https://3dprintingindustry.com/news/wohlers-associates-publishes-its-2022-state-of-3d-printing-report-206157>, Son Erişim Tarihi: 22.12.2022
8. Khan H.M. (2019), *Seçici lazer ergitme yöntemiyle metal alaşımlarında mikrokanal üretiminin deneysel ve sayısal incelenmesi*, İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Entitüsü, Doktora Tezi.
9. Vrána, R., Jaroš, J., Koutný, D., Nosek, J., Zikmund, T., Kaiser, J., Paloušek, D. (2022). Contour laser strategy and its benefits for lattice structure manufacturing by selective laser melting technology. *Journal of Manufacturing Processes*, 74, 640-657.
10. Han, X., Zhu, H., Nie, X., Wang, G., Zeng, X. (2018). Investigation on selective laser melting AlSi10Mg cellular lattice strut: Molten pool morphology, surface roughness and dimensional accuracy. *Materials*, 11(3), 392.
11. Buchbinder, D., Meiners, W., Wissenbach, K., Poprawe, R. (2015). Selective laser melting of aluminum die-cast alloy—Correlations between process parameters, solidification conditions, and resulting mechanical properties. *Journal of Laser Applications*, 27(S2), S29205.

12. Song, B., Dong, S., Deng, S., Liao, H., Coddet, C. (2014). Microstructure and tensile properties of iron parts fabricated by selective laser melting. *Optics & Laser Technology*, 56, 451-460.
13. Mancisidor, A. M., Garciandia, F., San Sebastian, M., Álvarez, P., Díaz, J., Unanue, I. (2016). Reduction of the residual porosity in parts manufactured by selective laser melting using skywriting and high focus offset strategies. *Physics Procedia*, 83, 864-873.
14. Yakout, M., Cadamuro, A., Elbestawi, M. A., Veldhuis, S. C. (2017). The selection of process parameters in additive manufacturing for aerospace alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(5), 2081-2098.
15. Kempen, K, "Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting." *Physics Procedia* 39 (2012): 439-446.
16. Calignano, F., Minetola, P. (2019). Influence of process parameters on the porosity, accuracy, roughness, and support structures of hastelloy X produced by laser powder bed fusion. *Materials*, 12(19), 3178.
17. Sun, Y., Moroz, A., Alrbaey, K. (2014). Sliding wear characteristics and corrosion behaviour of selective laser melted 316L stainless steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(2), 518-526.
18. Liverani, E., Toschi, S., Ceschini, L., Fortunato, A. (2017). Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 249, 255-263.
19. Aktimur, B., Gökpınar, E. (2015). Katmanlı üretimin havacılıktaki uygulamaları. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 3(2), 463-469.
20. Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C., Duysak, A. (2013). Hizli prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, (031), 53-70.
21. Yakout, M., Elbestawi, M. A., Veldhuis, S. C. (2018). A review of metal additive manufacturing technologies. *Solid State Phenomena*, 278, 1-14.
22. Calignano, F, Paolo M. "Influence of process parameters on the porosity, accuracy, roughness, and support structures of hastelloy X produced by laser powder bed fusion." *Materials* 12.19 (2019): 3178.
23. Sun, Y., Adam M., Alrbaey, K., "Sliding wear characteristics and corrosion behaviour of selective laser melted 316L stainless steel." *Journal of materials engineering and performance* 23 (2014): 518-526.
24. Liverani, E., "Effect of selective laser melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel." *Journal of Materials Processing Technology* 249 (2017): 255-263.

25. Aktimur, B., Gökpınar E., "Katmanlı üretimin havacılıktaki uygulamaları." *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology* 3.2 (2015): 463-469
26. Gibson, I. "Additive manufacturing technologies 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing." (2015), Springer.
27. Trevisan, F. "On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: process, microstructure, and mechanical properties." *Materials* 10.1 (2017): 76.
28. Özer, G. "Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme." *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 9.1 (2020): 606-621.
29. Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M.C., Duysak, A. "Hızlı prototipleme teknolojileri ve uygulama alanları." *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University* 031 (2013): 53-70.
30. Vatansever, F., Ertürk A.T., Karabay S., "Alüminyum-silisyum alaşımlarının mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin t6 ısıl işlemi ile iyileştirilmesi." *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 20.60 (2018): 797-803.
31. Mishra, Rajiv S., Z. Y. Ma. "Friction stir welding and processing." *Materials science and engineering: R: reports* 50.1-2 (2005): 1-78.
32. Nie, F. "Microstructure and mechanical properties of pulse MIG welded 6061/A356 aluminum alloy dissimilar butt joints." *Journal of materials science & technology* 34.3 (2018): 551-560.
33. Bayar H. (2009), *SiCp takviyeli Etial 171 (AlSi10Mg) alüminyum alaşım matrisli kompozitten basınçlı pres döküm yöntemiyle parça üretimi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Makine Eğitimi, Gazi Üniversitesi.
34. Atkaya M. (2021), *Alüminyum 6061 t6 özelliğindeki malzemenin elektron ışın kaynağı yöntemi ile kaynaklanabilirliğinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
35. Budynas R.G., Nisbett J.K., Shigley'in Makine Mühendisliği Tasarımı. İstanbul: Literatür Yayıncılık, (2015): 19.
36. İnternet: CMM Coordinate Measuring Machine, www.poligonmuhendislik.com/hizmetlerimiz/kalite-kontrol-ve-raporlama/3-boyutlu-olcum/cmm-ve-tasinabilir-cmm, Erişim Tarihi: 22.12.2022.
37. Aksulu, M. Ganioglu, O. and Yandayan, T. "Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri Ve Yüzey Pürüzlülüğü Parametreleri." *TMMOB Makine Mühendisleri Odası IV. Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi, Eskişehir* (2001).
38. İnternet: Yüzey metrolojisi, <https://web.itu.edu.tr/gulmezt/Metroloji/Metroloji%20Bolum%208.pdf>, Son Erişim Tarihi: 22.12.2022

39. İnternet: Yüzey pürüzlülüğü, http://www.aksan-tm.com/makale/metrik_yuzey_puruzlulugu.php, Erişim Tarihi: 22.12.2022.
40. MEB (2013), Motorlu araçlar teknolojisi, Yüzey işaretleri ve toleranslar, Ankara.
41. Kahramanzade, H., Sert Y., Küçükömeroğlu T. "Sürtünme karıştırma işleminin eklemeli imalat yöntemi ile üretilen AlSi10Mg alaşımının tribolojik özelliklerine etkisi." *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 28 (2021): 1159-1166.
42. Majeed M. (2018), Numerical analysis of additive manufacturing of maraging steel, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek lisans tezi.
43. İnternet: AlSi10Mg tozuna ait bileşenler, https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2022-11/M2SERIES5_ALSI10MG_CMDS_20221109_RevC.pdf, Erişim Tarihi: 22.12.2022.
44. İnternet: Concept Laser M2 Cusing katalog, https://www.formadditive.com/EN/app/dn_content/5d4d3a083058b.pdf, Son Erişim Tarihi: 22.12.2022
45. İnternet: Tezgah ve cihaz kataloğu: CMM teknik özellikler, <https://tf-imalat.gazi.edu.tr/view/page/162814>, Son Erişim Tarihi: 22.12.2022
46. İnternet: Çekme kopma test cihazı teknik özellikler, <https://www.mtcmetalurji.com/17-hoytom-cekme-kopma-test-cihazı-bilgisayar-kontroll.html>, Son Erişim Tarihi: 22.12.2022
47. Kruth, J.P., "Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques." *Proceedings of the International Conference Polymers & Moulds Innovations PMI 2005*. 2005.
48. Kozak, J. Tomasz Z. "Accuracy problems of additive manufacturing using SLS/SLM processes." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2017. No. 1. AIP Publishing LLC, 2018.
49. Louvis, E.P., Fox, Christopher J. Sutcliffe. "Selective laser melting of aluminium components." *Journal of Materials Processing Technology* 211.2 (2011): 275-284.
50. İnternet: Mukavemet değerleri, formüller ve tablolar, <http://www.guven-kutay.ch/mukavemet/05-7-formul+tablolar.pdf>, Son Erişim Tarihi: 22.12.2022
51. Dong, S. "Research on metallurgical bonding of selective laser melted AlSi10Mg alloy." *Materials Research Express* 7.2 (2020): 025801.



Gazili olmak ayrıcalıktır