



**SEÇİCİ LAZER ERGİTME METODU İLE ALÜMİNYUMDAN MAMUL  
PARÇA ÜRETİMİNDE EN KÜÇÜK UNSUR GEOMETRİSİNİN  
DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ**

**Bilâl YURDAKUL**

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

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 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.

Bilal YURDAKUL

13/07/2023

# SEÇİCİ LAZER ERGİTME METODU İLE ALÜMİNYUMDAN MAMUL PARÇA ÜRETİMİNDE EN KÜÇÜK UNSUR GEOMETRİSİNİN DENEYSEL OLARAK

## BELİRLENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Bilâl YURDAKUL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2023

### ÖZET

Günümüzde git gide daha fazla sektörde kullanımına rastladığımız eklemeli imalat yöntemlerinin en fazla tercih edileni olan seçici lazer ergitme metodu karmaşık tasarımları alüminyum, titanyum, paslanmaz çelik gibi malzemelerden üretebilme kabiliyeti nedeniyle biyomedikal, elektronik, otomotiv, savunma ve havacılık sektörlerinde kullanım alanına sahiptir. Yöntemin farklı sektörler için daha ilgi çekici hale gelmesi adına sınırlarının daha iyi belirlenmesi gereklidir. Bu çalışma alüminyum tozu kullanılarak en küçük unsur geometrisini deneysel yollarla belirlemek amacıyla yapılmıştır. Belirlenecek olan alt limitler sonucunda; biyomedikal sektöründe kullanılan implantlarda bulunan çıkıntı unsurları, havacılık ve otomotiv sektörleri başta olmak üzere farklı alanlarda kullanılan kafes yapıların birim hücre boyutları, ısıtma/soğutma sektörleri için ısı transferini artıracak mikro kanal ve kanatçık yapılar daha sağlıklı tasarlanıp üretilebilecektir. Çalışmada literatür incelenerek üretilmiş ve üretilmemiş unsurlar dikkate alınarak tasarlanan kıyaslama model tasarlanmıştır. Kıyaslama için iki ayrı model tasarlanmış olup, 0,05 mm'den 1 mm'ye kadar sıralanmış çıkıntı ve delik unsurları bulunan birinci model ve 15°'den 90°'ye kadar sıralanmış desteksiz açılı unsurları barındıran ikinci model, üretici firmanın tecrübeleri sonucu oluşmuş optimum değerleri ışığında üretilmeye çalışılmıştır. Üretilen modellerin ölçüm analizleri, mikroskopta alınan görüntülerin piksel sayma programı vasıtasıyla ölçme mantığına dayanmaktadır. Sonuçlara bakıldığında, ilk modelde saptanmaya çalışılan eksenî imal yönünde çıkıntı unsur için 0,5 mm'lik bir çap üretilbildiği görülmüştür. Eksenî imal yönünde delik unsur için ise 0,4 mm çapında; ancak imalat sonrası işleme ihtiyaç duyan unsurlar üretilmişken, eksenî imal yönüne dik delik ise sarkıntı oluşumu görülerek 0,6 mm çapında üretim yapılabilmiştir. Desteksiz üretilen açılı unsurun araştırıldığı ikinci modelde ise 30° ve daha büyük açılı unsurlar üretilmişken 15° açılı unsurun alt yüzeyinde ciddi bir deformasyon görülmüştür.

Bilim Kodu : 91438  
Anahtar Kelimeler : Seçimli Lazer Ergitme, Eklemeli İmalat, Alt Limit, En Küçük Unsur, Alüminyum  
Sayfa Adedi : 96  
Danışman : Prof. Dr. Yusuf USTA

EXPERIMENTAL STUDY OF DEFINING MINIMUM ELEMENT GEOMETRY IN  
THE PRODUCTION OF ALUMINUM PARTS BY SELECTIVE LASER MELTING  
METHOD

(M. Sc. Thesis)

Bilâl YURDAKUL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2023

ABSTRACT

Selective laser melting is the most preferred method of additive manufacturing, which is widely used more and more in various sectors recently. This method is used in the biomedical, electronics, automotive, defense and aerospace industries due to its ability to produce complex designs from materials such as aluminum, titanium, stainless steel. In order to make the method more interesting for different areas, it is necessary to define its enhanced limits. This study aims to determine the smallest feature geometry experimentally using aluminum powder. As a result of the lower limits to be determined, it will be able to be designed and produced more accurately. The protruding elements found in the implants used in the biomedical sector, the unit cell dimensions of the lattice structures used in different fields, especially in the aviation and automotive, the micro-channel and fin structures that will increase the heat transfer for the heating/cooling applications will be better understood at the end of the study. In the study, a comparison model was designed by examining the literature and taking into account the features that could and could not be produced. Two different models were designed for comparison. The first model with protruding and hole features arranged from 0.05 mm to 1 mm, and the second model with unsupported angled elements arranged from 15° to 90°. The production was carried out according to the optimum values formed by experience of the manufacturer. Measurements and analyzes of the produced models are based on the measurement logic of the images taken under an optical microscope through the pixel counting software. Results have stated that a 0.5 mm diameter can be produced for the protruding features in the direction of building. 0.4 mm in diameter for the hole feature with its build direction; however, elements that need a post-production process could be produced. If the axis is perpendicular to the build direction, overhang formation can be seen and production with a diameter of 0.6 mm could be formed. In the second model, in which the angled element that can be produced without support was investigated, 30° and larger angled elements could be produced, while a serious deformation was observed on the bottom surface of the 15° angled element.

Science Code : 91438

Key Words : Selective Laser Melting, Additive Manufacturing, Sublimit, Minimum Feature, Aluminum

Page Number : 96

Supervisor : Prof. Dr. Yusuf USTA

## TEŞEKKÜR

Çalışma boyunca bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, çalışmaya kıymetli katkılarda bulunan değerli hocam ve danıőmanım Prof. Dr. Yusuf USTA'ya teőekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmaya katkılarından dolayı Dr. Öğretim Üyesi Arif BALCI'ya da teőekkürü bir borç bilirim.

Çalışmanın imalat bölümünü yürüten Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi Alüminyum Test Eğitim ve Araőtırma Merkezi (ALUTEAM) çalıőanlarına bilgi, tecrübe ve yardımlarından dolayı teőekkürlerimi sunarım.

Sadece tez süresi boyunca değil hayatımın tüm anlarında hiçbir desteğini esirgemeyen büyük özveri gösteren ailemin her bir ferdine sonsuz minnetimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	x
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	5
2.1. Eklemeli İmalatın Tanımı ve Tarihsel Gelişimi .....	5
2.2. Seçici Lazer Ergitme .....	11
2.3. Seçici Lazer Ergitme Metodunun Avantaj ve Dezavantajları .....	14
2.4. Seçici Lazer Ergitme Metodunun Kullandığı Alanlar.....	15
2.5. Seçici Lazer Ergitme Metodunu Etkileyen Parametreler .....	20
2.6. Kafes yapılar .....	23
2.7. Seçici Lazer Ergitme Metodunun Alt Limitleri .....	25
3. METOT VE YÖNTEM .....	35
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	45
4.1. Unsur Değerlendirmeleri.....	47
4.1.1. Ekseni imal yönüne paralel olarak üretilen unsurlar (üst unsurlar) .....	47
4.1.2. Ekseni imal yönüne dik olarak üretilen unsurlar (yan unsurlar) .....	54
4.1.3. Ekseni imal yönüne paralel olarak üretilen delikler (üst delikler) .....	61

	<b>Sayfa</b>
4.1.4. Ekseni imal yönüne dik olarak üretilen delikler (yan delikler).....	66
4.1.5. Desteksiz şekilde üretilen açılı unsurlar.....	70
<b>5. SONUÇLAR.....</b>	<b>79</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>83</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>91</b>
EK-1. Birinci model teknik resmi – 1. sayfa .....	92
EK-2. İkinci model teknik resmi.....	95
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>96</b>

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan AlSi10Mg tozunun kimyasal bileşimi .....	38
Çizelge 3.2. Giriş parametreleri .....	39
Çizelge 4.1. İmal yönünde üretilen çıkıntı unsur sonuçları (çapaklar unsur üzerinde) ..	51
Çizelge 4.2. İmal yönünde üretilen çıkıntı unsur sonuçları (çapaksız).....	51
Çizelge 4.3. Ekseni imal tablasına paralel üretilen unsur .....	57
Çizelge 4.4. Ekseni İmal tablasına paralel üretilen unsur (dış kontur sapmaları).....	57
Çizelge 4.5. İmal Yönünde Üretilen Delik Unsurlar (Çapaklı Sonuçlar) .....	64
Çizelge 4.6. İmal Yönünde Üretilen Delik Unsurlar (Çapaksız Sonuçlar).....	64
Çizelge 4.7. Ekseni Zeminde Paralel Üretilen Delik Unsurlar .....	68
Çizelge 4.8. Açılı unsurların üst kısmının yaptığı açı.....	74
Çizelge 4.9. Açılı unsurların alt kısmının yaptığı açı .....	75

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Eklemeli imalat yöntemlerinin farklı isimlendirmeleri .....	6
Şekil 2.2. Eklemeli imalat yöntemlerinde 2017 ve 2018 yılında tercih edilen malzeme dağılımı.....	7
Şekil 2.3. Metal eklemeli imalatın tarihsel gelişimi .....	8
Şekil 2.4 Eklemeli imalatın sınıflandırılması.....	9
Şekil 2.5. Eklemeli imalat yöntemlerinin kullanım oranı .....	11
Şekil 4.1 Ekseni imal yönünde unsurların hata paylarının grafiksel gösterimi .....	51
Şekil 4.2 Ekseni zemine paralel unsurların hata paylarının grafiksel gösterimi.....	57
Şekil 4.3 Ekseni zemine paralel unsurların sapma miktarlarının grafiksel gösterimi..	58
Şekil 4.4 Ekseni imal yönünde olan deliklerin hata paylarının grafiksel gösterimi ....	64
Şekil 4.5 Ekseni zemine paralel olan delik unsurlarının hata paylarının grafiksel gösterimi.....	69
Şekil 4.6 Açılı unsurların üst ve alt yüzeylerinden alınan ölçümlerin hata payları .....	75

## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 2.1. SLE işleminin şematik gösterimi.....	12
Resim 2.2. Hazırlanmış olan CAD verilerinin bilgisayar ortamında düzenlenmesi.....	13
Resim 2.3. SLE imalatının temsili gösterimi.....	13
Resim 2.4. SLE işleminin adımları.....	13
Resim 2.5. GE firmasının ürettiği yakıt nozulu.....	16
Resim 2.6. 3D yazıcı ve SLE yöntemi ile üretilen rotor örneği.....	17
Resim 2.7. (sol görünüş) bilgisayar ortamında kesit görüntüsü (sağ) üretilen parça.....	17
Resim 2.8. Airbus firmasının SLE yöntemi kullanılarak ürettiği parça.....	18
Resim 2.9. Pratt&Whitney firmasının SLE yöntemi ile ürettiği parça.....	18
Resim 2.10. Kalça ve diz implantlarından örnekler.....	19
Resim 2.11. Fraunhofer Lazer Teknolojisi Enstitüsü (ILT) firmasının SLE yöntemi ile ürettiği parçalar (üst) helikopter için üretilen parça (alt) yarış arabası için üretilen parça.....	19
Resim 2.12. SLE yönteminde etkili parametreler.....	20
Resim 2.13. Kruth ve arkadaşlarının çalışmada kullandığı model.....	26
Resim 2.14. Kaliamoorthy ve arkadaşlarının kullandığı model.....	26
Resim 2.15. Kamarudin ve arkadaşlarının çalışmasında kullanılan model.....	27
Resim 2.16. Yasa ve arkadaşlarının çalışmasında kullanılan model.....	28
Resim 2.17. Wang ve arkadaşlarının çalışmasında kullanılan modeller.....	29
Resim 2.18. Thomas'ın desteksiz zemine paralel unsur imalat testi.....	31
Resim 2.19. Vora ve arkadaşlarının desteksiz ürettiği çıkıntı unsur barındıran ürün.....	31
Resim 2.20. Vora ve arkadaşlarının ürettiği 10 mm desteksiz ürün ve yay ürünü.....	32
Resim 2.21. Meyer ve arkadaşlarının yaptığı çalışma görselleri.....	32

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.1. Çıkıntı ve delik unsurların üretim değerlendirilmesi için hazırlanmış birinci model .....	36
Resim 3.2. Model 1 üzerindeki unsurlar; (a) imal yönünde çıkıntı unsur, (b) zemine paralel çıkıntı unsur, (c) imal yönünde delik, (d) zemine paralel delik .....	37
Resim 3.3. Açılı unsurların test edilmesi için tasarlanmış olan ikinci model.....	37
Resim 3.4. Model 2 açılı unsurlar soldan sağa artarak giden unsur dizilimi .....	38
Resim 3.5. Seçici Lazer Ergitme Makinesi (SLE), EOS M290.....	38
Resim 3.6. Üretilen numunelerin tabladan ayrılmadan önceki görseli .....	39
Resim 3.7. İmal edilen ürünlerin kırılmaması için yapılan taşıma kutuları.....	40
Resim 3.8. Andonstar AD407 dijital mikroskop .....	41
Resim 3.9. Mikroskop ölçümlerinde kullanılan 3D yazıcı ile üretilmiş altlıklar: (a) birinci model (b) ikinci model .....	41
Resim 3.10. Açılı unsurun mikroskop üzerindeki görseli.....	42
Resim 3.11. Çıkıntı unsurun mikroskop üzerindeki görüntüsü .....	42
Resim 3.12. Image J programında ölçüm .....	43
Resim 4.1. Üretilen ilk modelin önden görünümü.....	45
Resim 4.2. Üretilen ilk modelin arkadan görünümü.....	46
Resim 4.3. Üretilen ikinci model .....	46
Resim 4.4. Üretilen numunelerin tabladan çıkarılmadan önceki hali .....	47
Resim 4.5. İmal yönünde üretilen unsurlar .....	48
Resim 4.6. İmal yönünde üretilen unsurlar .....	48
Resim 4.7. İmal yönünde üretilen ve daha sonra kırılan unsurlar .....	52
Resim 4.8. İmal yönünde üretilen ve üretilmeyen unsurlar .....	53
Resim 4.9. Wang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada imal yönünde üretilmiş silindirik unsurlar .....	54
Resim 4.10. Zemine paralel üretilen unsurlar .....	55

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 4.11. Zemine paralel üretilen unsurlar .....	55
Resim 4.12. Tabladan ayırma esnasında kırılan zemine paralel unsurlar .....	59
Resim 4.13. Zemine paralel üretilen unsurlar (kırılan unsurlar).....	59
Resim 4.14. Xu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada destek kullanılmadan üretilen unsurlar .....	60
Resim 4.15. İmal yönünde üretilen delikler .....	61
Resim 4.16. İmal yönünde üretilen delikler .....	61
Resim 4.17. Wang ve arkadaşlarının imal yönünde ürettiği delik unsurlar.....	65
Resim 4.18. Ekseni zemine paralel yönde üretilen delikler .....	66
Resim 4.19. Ekseni zemine paralel yönde üretilen delikler .....	67
Resim 4.20. Wang ve arkadaşlarının imal yönüne dik yönde ürettiği delik unsurlar.....	69
Resim 4.21. Kruth ve arkadaşlarının çalışması (a) geri besleme olmaksızın paralel taramalı üretim (b) geri beslemeli paralel taramalı üretim (c) geri besleme olmaksızın dik yönde taramalı üretim (d) geri beslemeli dik yönde taramalı üretim .....	70
Resim 4.22. İkinci Model – Açılı unsur (90°) .....	72
Resim 4.23. İkinci Model – Açılı unsur (75°) .....	72
Resim 4.24. İkinci Model – Açılı unsur (60°) .....	73
Resim 4.25. İkinci Model – Açılı unsur (45°) .....	73
Resim 4.26. İkinci Model – Açılı unsur (30°) .....	74
Resim 4.27. İkinci Model – Açılı unsur (15°) .....	74
Resim 4.28. Xu ve arkadaşlarının açısal sınırları belirlemek için yaptığı çalışma .....	76
Resim 4.29. Wang ve arkadaşlarının açılı unsur çıktısı.....	76

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

### Simgeler

### Açıklamalar

<b>cm</b>	Santimetre
<b>E</b>	Enerji yoğunluğu
<b>J</b>	Joule
<b>m</b>	Metre
<b>m<sup>2</sup></b>	Metrekare
<b>m<sup>3</sup></b>	Metreküp
<b>mm</b>	Milimetre
<b>P</b>	Lazer gücü
<b>s</b>	Tarama mesafesi
<b>t</b>	Katman kalınlığı
<b>v</b>	Tarama hızı
<b>W</b>	Watt
<b>µm</b>	Mikrometre
<b>°</b>	Derece

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

<b>ASTM</b>	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
<b>BJ</b>	Yapıştırıcı ile Katmanlı İmalat
<b>CAD</b>	Bilgisayar Tabanlı Tasarım
<b>CMM</b>	Koordinat Ölçüm Makinesi
<b>DED</b>	Direkt Enerji Depolama
<b>DMLM</b>	Lazer ile Direkt Metal Ergitme
<b>DMLS</b>	Lazer ile Direkt Metal Sinterleme
<b>FDM</b>	Kaynaşmış Biriktirme Modelleme
<b>HD</b>	Yüksek Netlik

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>ISO</b>	Uluslararası Standardizasyon Teşkilatı
<b>LCD</b>	Sıvı Kristal Görüntü
<b>LPBF</b>	Lazer ile Toz Tabanlı Füzyon
<b>MEMS</b>	Mikro Elektro Mekanik Sistemler
<b>Micro CT</b>	Bilgisayarlı Mikro Tomografi
<b>MJ</b>	Malzeme Püskürtme
<b>MEX</b>	Malzeme Ekstrüzyon
<b>PBF</b>	Toz Yataklı Eritme
<b>RM</b>	Hızlı İmalat
<b>RP</b>	Hızlı Prototipleme
<b>RT</b>	Hızlı Takımlama
<b>SHL</b>	Levha/Sac Laminasyon Metodu
<b>SLE</b>	Seçici Lazer Ergitme
<b>SLM</b>	Seçici Lazer Ergitme
<b>SLS</b>	Seçici Lazer Sinterleme
<b>STL</b>	Standart Üçgenleme Dili
<b>UV</b>	Ultraviyole Işın
<b>VPP</b>	Fotopolimerizasyon
<b>3D</b>	Üç Boyutlu

## 1. GİRİŞ

İmalat yöntemleri denilince akla birçok yöntem gelmekte, iki ana başlık altında değerlendirilen bu yöntemler talaşlı imalat ve talaşsız imalat olarak isimlendirilmektedir. Talaşlı imalat; tornalama, frezeleme, delme ve taşlama gibi yöntemleri barındırmaktadır. Talaşsız imalat denilince ise akla sac şekillendirme, döküm, dövme, sıcak ve soğuk çekme, ekstrüzyon gibi yöntemler gelmektedir. Artık çok genç bir teknoloji denilemeyecek olan eklemeli imalat ise bir başka yöntemdir. 1980'lerde ortaya çıkmış olan bu teknoloji günümüzde yabana atılmayacak bir oranda kullanılmaktadır. Sunduğu birçok avantaj sayesinde farklı birçok sektörde kullanılan bu teknoloji geleneksel yöntemlerin kısıtlamalarından arınmış olup üretim ve tasarım mantığını değiştirmiş ve daha da değiştirmeye devam etmektedir.

Eksiltmeli imalatın aksine ekleme mantığına dayalı olan bu yöntemler adından da anlaşılacağı üzere sıfırdan bir ürün meydana getirmektedir. Bu sebeple geleneksel yöntemlerin dayattığı bazı tasarımsal sınırlamaları göz ardı edebilmesi yöntemin en göz alıcı avantajıdır. Tasarım özgürlüğü noktasında sınırlamaların oldukça düşük olması nedeniyle diğer yöntemlerde üretilemeyen karmaşık yapılar bu yöntemler kullanılarak üretilebilmektedir.

Gelişen teknolojilerin katkıları sonucu eklemeli imalat yöntemleri farklı malzemelerle üretim yapabilmeye olanağını artırarak geçmiş uygulamalarda soru işareti doğuran kısıtlamaları da ortadan kaldırmıştır. Böylece başlarda polimer bazlı ürünlerle imalat yapan ve bu sebeple prototip üretimi için kullanılan yöntemler zaman içerisinde birçok malzeme ile üretim kabiliyetine erişmesi dolayısıyla imalat içinde tercih edilir hale gelmiştir.

Geleneksel yöntemlerle üretilen muadilleri ile kıyaslanabilir mekanik özellikler elde edilebilen bu teknolojiler sayesinde karmaşık geometrileri çeşitli malzemelerle üreterek birçok kısıtlamayı ortadan kaldırmıştır.

Bir başka avantajı olan ayarlanabilir gözeneklilik ile farklı uygulamalar için çekici bir teknolojidir. Bu sayede ağırlık optimizasyonu yapılan tasarımlarla kompleks yapıları, çeşitli malzemelerle, muadil mekanik özellikler elde ederek üretebilir ürünler ortaya koymaktadır. Daha birçok avantajı ile farklı sektörlerin ilgi odağı haline gelmiş bu teknolojiler; savunma, havacılık, uzay, otomotiv, biyomedikal, ısıtma sektörü gibi alanlarda tercih edilmektedir.

Elbette sunduğu birçok avantajın yanı sıra bazı kısıtlamalar söz konusudur. Bunlar arasında en göze çarpan iki olgu yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal sınırlamalardır.

Eklemeli imalat yöntemleri denilince akla genellikle üç boyutlu yazıcılar gelmektedir. Bir eklemeli imalat yöntemi olan üç boyutlu yazıcıların yanı sıra farklı yöntemler de mevcuttur. Bu çalışmada, yedi gruba ayrılmış olan yöntemlerin içinden toz yataklı sistemler olan “Seçici Lazer Ergitme (SLE)” yöntemi değerlendirilecektir.

Yukarıda bahsedilen kısıtlamalar Seçici Lazer Ergitme metodu içinde geçerlidir. Literatüre bakıldığında yüzey pürüzlülüğü üzerine birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya da devam edilmektedir. Boyutsal sınırlamalar üzerine de farklı çalışmalar bulunmakta olup daha çok st sınırlara odaklanılmıştır. Bu çalışmada ise yöntemin alt sınırları belirlenmeye çalışılacaktır.

Çalışma sonunda elde edilecek sonuçlarla özellikle savunma, havacılık, sağlık, robotik, mikro elektro mekanik sistemler (MEMS) için kazanımlar ortaya konulması amaçlanmıştır.

#### Araştırmanın amacı

Seçici Lazer Ergitme yöntemi ile üretilebilecek en küçük unsurların araştırılacağı bu çalışmada beş farklı konu üzerinde durulacak ve alt sınırlar tespit edilmeye çalışılacaktır. Bu konular şu şekildedir:

- İmal yönünde üretilebilecek en küçük unsur,
- Zemine paralel yönde üretilebilecek en küçük unsur,
- İmal yönünde üretilebilecek en küçük delik,
- Zemine paralel yönde üretilebilecek en küçük delik,
- Destek kullanılmadan üretilebilecek en küçük açı

#### Araştırmanın konusu

Literatüre bakıldığında yapılan benzer çalışmalar dikkate alınarak yapılacak tasarımlar, literatürde üretilen ölçüleri de barındıracak şekilde belirlenecek ve daha da ileri taşınmaya çalışılacaktır. Solidworks programı üzerinde yapılacak olan tasarımlar, EOS firması

tarafından üretilmiş olan EOS M290 Seçici Lazer Ergitme makinesi ile AlSi10Mg alüminyum alaşımı kullanılarak üretilecektir. Üretim sonucunda Andonstar marka AD407 dijital mikroskop kullanılarak alınan görüntüler Image J programı vasıtasıyla piksel sayım metodu kullanılarak ölçülecektir.



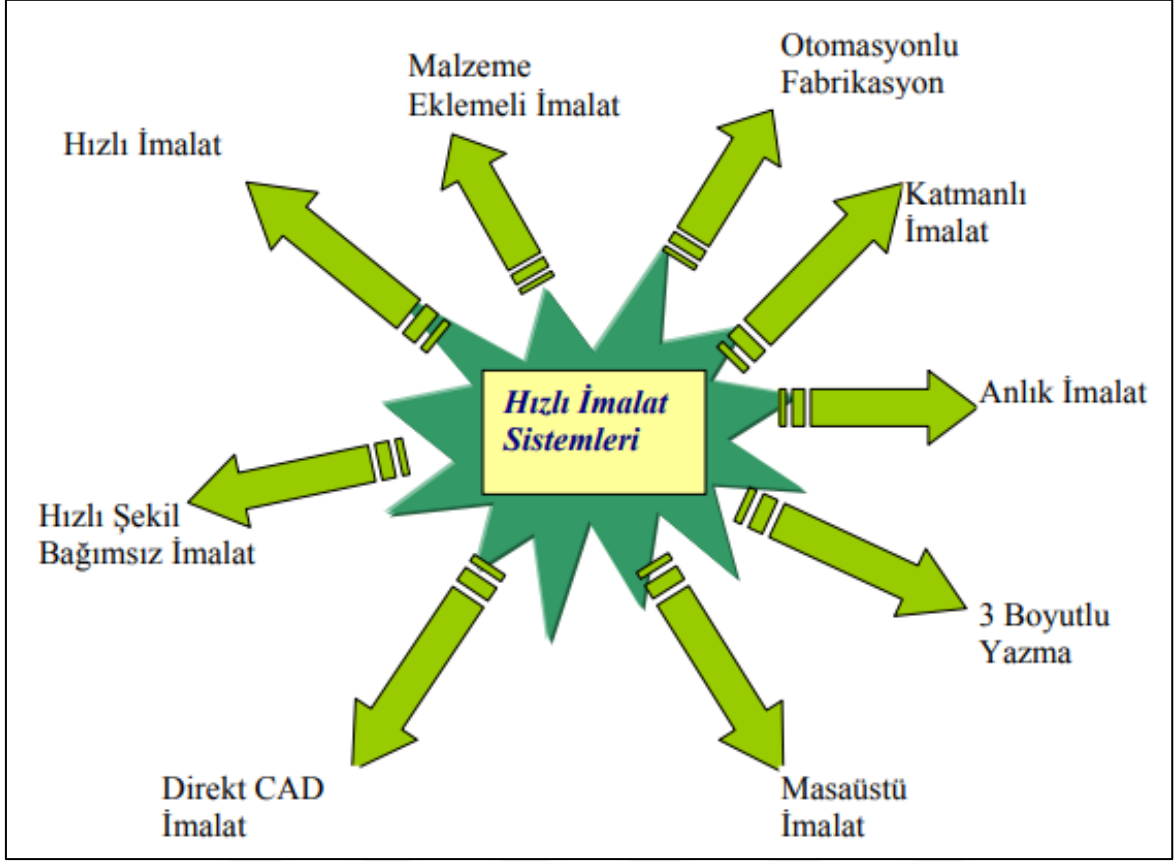


## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1. Eklemeli İmalatın Tanımı ve Tarihsel Gelişimi

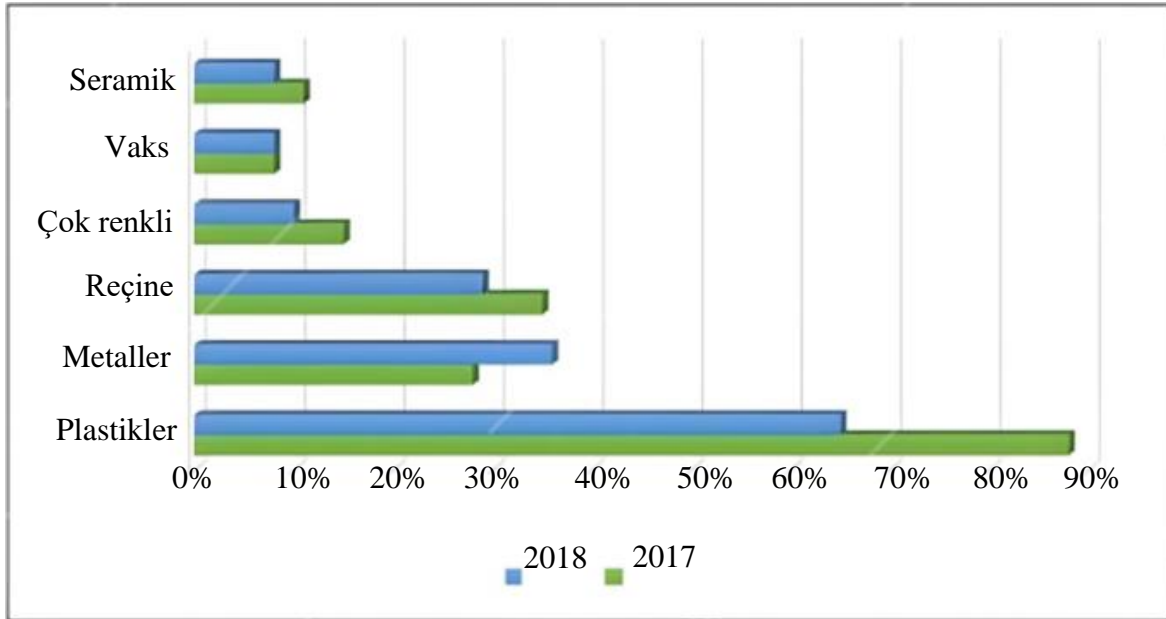
Eklemeli imalat, eksiltmeli imalat ve şekillendirici imalat yöntemlerinin aksine üç boyutlu model verilerinden yararlanarak parça üretmek için malzemeleri katman katman birleştirme esasına dayanmaktadır [1]. Günümüzde sunduğu birçok avantaj sebebiyle eklemeli imalat yöntemleri gitgide popüleritesini artırmakta, farklı sektörler için üretim metotları arasında kendine yer bulmaktadır. Eklemeli imalat yöntemlerinin avantajları arasında; karmaşık geometriler üretebilme, farklı malzemeler ile üretim yapabilme, malzeme ve enerji sarfiyatının düşük olması, nitelikli elemana duyulan ihtiyacın az olması, ön hazırlık süresinin düşük olması ve üretim basamaklarının azalması, takım-kalıp-fikstür gibi ek aparatlara ihtiyaç duymaması gibi kabiliyetler sıralanabilir. Bunun yanında geleneksel yöntemler ile karşılaştırıldığında bazı dezavantajlar da bulunmaktadır. Üretim hızı, ürün boyutlarında üst ve alt sınır, yüzey kalitesi gibi faktörler eklemeli imalat yöntemlerinin geliştirilmeye çalışılan bölümleridir.

1970'lerde Fransız Pierre Ciraud'un toz malzemeye enerji uygulanarak geometriler ortaya çıkarma mantığına dayanan patent başvurusu eklemeli imalatın temeli sayılabilir [2]. Eklemeli imalatın ticarileşmesi ise ilk olarak 1987 yılında "stereolitografi" kavramı ile başlamıştır [3]. Eklemeli imalat yöntemleri sunduğu önemli avantajlar sebebiyle başlarda farklı sektörlerin prototip ihtiyacını hızlı bir şekilde karşılayabildiğinden belli bir süre "hızlı prototipleme (ing. RP: rapid prototyping)" adı ile tanınmış, 90'lı yıllardaki gelişmelerle "hızlı imalat (ing. RM: rapid manufacturing)" kavramına yerini bırakmış, 2000'li yıllarda bu kavrama getirdiği başkaca avantajlar nedeniyle "hızlı takımlama (ing. RT: rapid tooling)" ismi eklenmiştir [4, 5]. Burada hızlı imalat uzun vadede kullanılabilir ürünlerin üretimini ifade ederken, hızlı takımlama ise uzun vadede kullanılabilir araçların üretimini nitelemektedir [5]. Henüz genç sayılabilecek olan bu teknoloji için farklı terimler kullanılmakta olup (Şekil 2.1), bu çalışmada "eklemeli imalat" kavramı kullanılacaktır.



Şekil 2.1. Eklemeli imalat yöntemlerinin farklı isimlendirmeleri [6]

İlk çıkışında polimer tabanlı malzeme imalatı yapılabilen eklemeli imalat yöntemleri zaman içerisinde gelişerek polimer, seramik, metal ve kompozit malzemeler ile üretim yapabilme kapasitesine erişmiştir. Gün geçtikçe kullanımı daha da artan metal malzemeler akademik çalışmaların ilgi odağı olmuştur. Yöntemin ortaya çıkışı polimer bazlı malzemeler üzerine olduğundan üretim ağırlığı başlarda plastik malzemelerde çok baskın olsa da zamanla yöntemin güvenilirliğini de artırması ile imalatların yaklaşık %40'ı metal malzeme kullanılarak gerçekleşmekte (Şekil 2.2) ve yüksek bir eğilimle artmaya devam etmektedir [7].

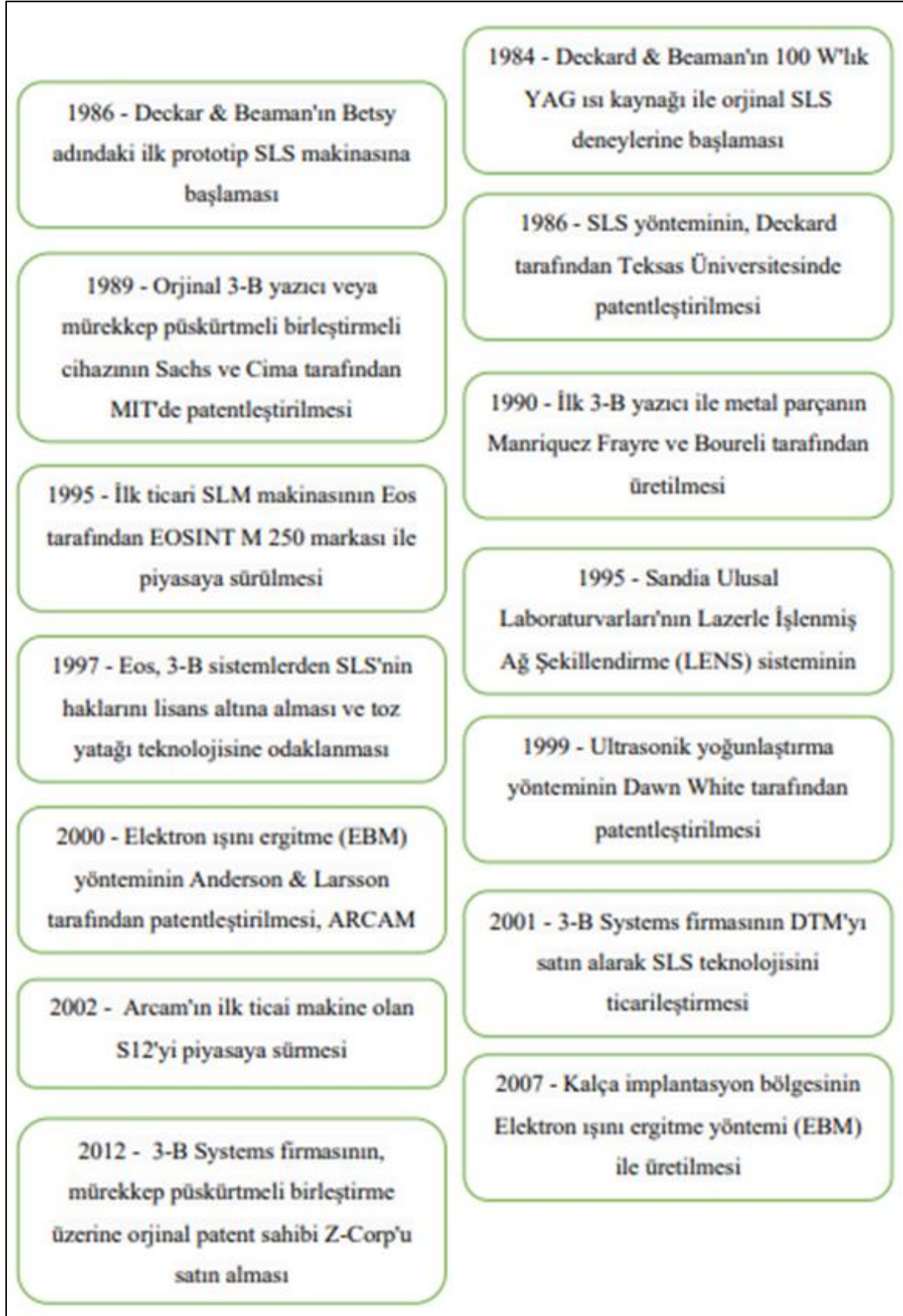


Şekil 2.2. Eklemeli imalat yöntemlerinde 2017 ve 2018 yılında tercih edilen malzeme dağılımı [7]

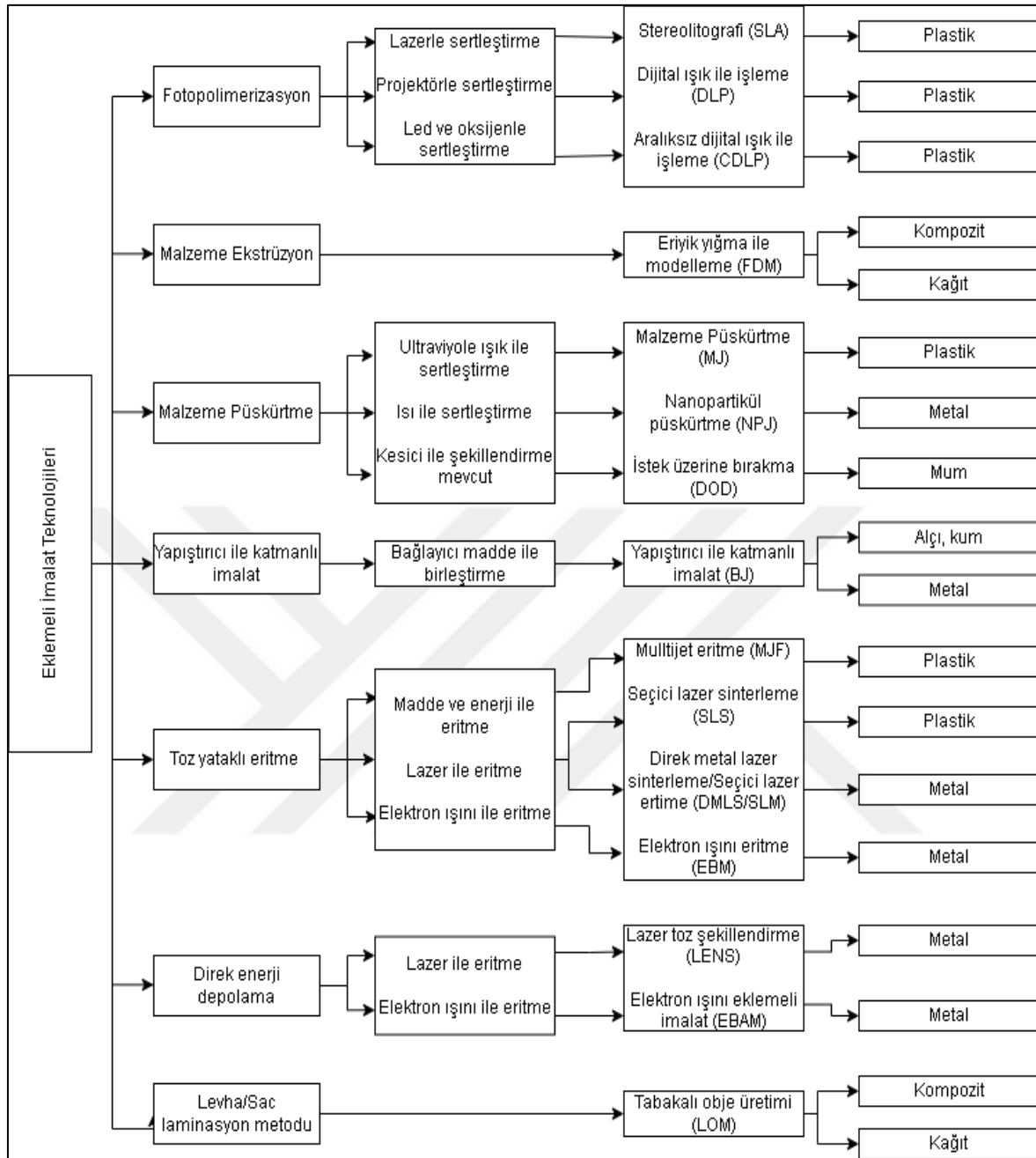
Bu çalışmanın da konusu olan metal eklemeli imalat zaman içerisinde özellikle lazer teknolojisi ve malzeme biliminin gelişimi ile sınıf atlamıştır. 1984'te Deckard & Beaman tarafından ilk orijinal "Seçici Lazer Sinterleme (ing. SLS: Selective Laser Sintering)" deneyleriyle başlayan serüven günümüzde farklı birçok ticari girişimle patentleştirilmiş yöntemlere ön ayak olmuştur. Şekil 2.3 metal eklemeli imalatın gelişimini kronolojik olarak göstermektedir.

Zaman içerisinde gelişen bilim ve teknolojinin katkılarıyla farklı birçok metot ortaya çıkmıştır. Alanın vadettiği ekonomik potansiyel birçok ticari girişime vesile olmuş, patent çalışmaları hız kazanmış günden güne farklı isimlerle farklı metotların ortaya çıkması ile yöntemler karmaşık bir hal almıştır. Bu karışıklığın önüne geçmek için ASTM/ISO bir çalışmanın sonucunda yöntemleri yedi gruba ayırmıştır [1]. Şekil 2.4'de Eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması verilmiştir.

Eklemeli imalat 7 ana başlık altında değerlendirildiğinde; fotopolimerizasyon (ing. VPP: vat photopolymerization), malzeme ekstrüzyon (ing. MEX: material extrusion), malzeme püskürtme (ing. MJ: material jetting), yapıştırıcı ile katmanlı imalat (ing. BJ: binder jetting), toz yataklı eritme (ing. PBF: powder bed fusion), direkt enerji depolama (ing. DED: direct energy deposition) ve levha/sac laminasyon metodu (ing. SHL: sheet lamination) şeklinde sınıflandırma yapılması mümkündür [1]. Kısaca bu metotları tanımlamak gerekirse [1, 8]:



Şekil 2.3. Metal eklemeli imalatın tarihsel gelişimi [9]



Şekil 2.4. Eklemeli imalatın sınıflandırılması [1, 8]

**Fotopolimerizasyon:** bir hazne içerisinde bulunan foto-sertleştirilebilir reçineler veya ışın ile reaksiyona giren fotopolimer malzemelerin bir ışın vasıtasıyla kürlenerek katman katman üç boyutlu ürün oluşturma metodudur [10].

**Malzeme Ekstrüzyon:** polimer, plastik veya kompozit filamentin eritilerek basınç vasıtasıyla bir nozuldun dışarı itilip imal platformu üzerinde soğumasıyla katman katman üç boyutlu ürün oluşturma metodudur [11]. Tipik 3B yazıcılar (ing. FDM: Fused Deposition Modeling) bu gruba girmektedir.

Malzeme Püskürtme: farklı renkte polimer, mum veya metal malzeme bir nozuldan püskürtülüp, sonrasında ultraviyole ışın (UV) ışın kullanılarak sertleştirilmek suretiyle katman katman üç boyutlu ürün oluşturma metodudur [12]. Bu metotla farklı renk içeren ürünler üretilebilmektedir.

Yapıştırıcı ile katmanlı imalat: imal tablasına serilen yapıştırıcı malzeme ile metal, kum ve seramik gibi malzemelerden oluşan karışımın uygulanan enerji ile katman katman birleştirilmesi mantığıyla üç boyutlu ürün oluşturma metodudur [13]. Bu metotla da farklı renk içeren ürünler üretilebilmektedir.

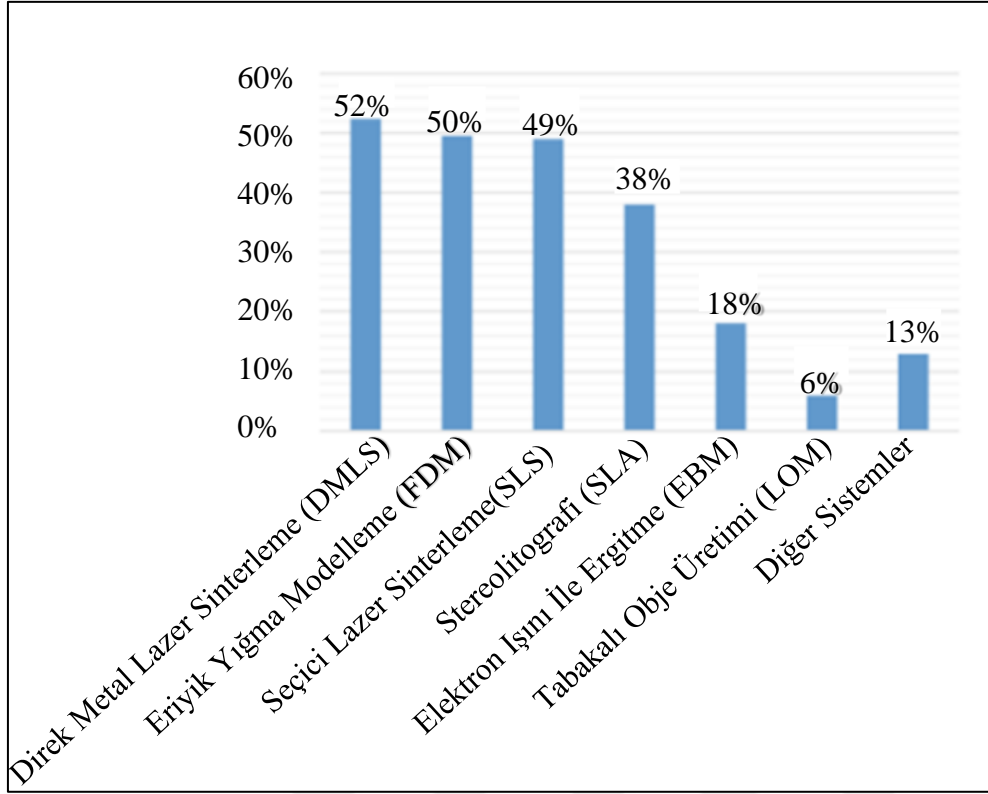
Toz yataklı eritme/sinterleme: imal tablasına serilen metal, seramik veya polimer malzemenin bir lazer kaynağı vasıtasıyla eritilerek ya da sinterlenerek katman katman birleştirilmesi ile üç boyutlu ürün oluşturma metodudur [14]. Söz konusu çalışma bu kategoriye girmektedir.

Direkt enerji depolama: metal, seramik veya polimer malzemenin imal platformuna aktarılırken ısıtılarak üç boyutlu ürün oluşturma metodudur [15]. Bu yöntemde toz yataklı sistemlerden farklı olarak hammadde ve lazer kaynağı bir kafa üzerindedir.

Levha/sac laminasyon metodu: rulo haline getirilebilen plastik ve sac metal malzemelerin katmanları arasına yapıştırıcı sürülüp, ısıtılmış bir merdane ile basınç uygulanıp, sonrasında lazer ile kesilerek katman katman üç boyutlu ürün oluşturma metodudur [16].

Bu yöntemler eklemeli imalat yöntemlerinin farklı kollarıdır. Bu kollar altında da birçok farklı metot tanımlanmıştır. Her biri farklı avantaj ve dezavantaja sahiptirler. Yöntem seçimi yapılırken nihai üründe istenilen özellikler dikkate alınarak bu seçim yapılmalıdır.

Şekil 2.5 farklı eklemeli imalat metotlarının kullanım karşılaştırmasını sunmaktadır. Tabloya bakıldığında metal toz yataklı sistemlerin münferit müşterilerin dahi satın alabildiği FDM sisteminden daha çok tercih ediliyor olması dikkat çekicidir. Bu sebeple eklemeli imalat yöntemleri üzerine yapılan akademik çalışmalarda bu yöne kaymış durumdadır. Bu çalışma bir toz yataklı eritme teknolojisi olan “Seçici Lazer Ergitme (ing. SLM: selective laser melting) metodunu konu almaktadır. Çalışmada bundan sonra “Seçici lazer ergitme” metodunun kısaltması olan “SLE” kullanılacaktır.



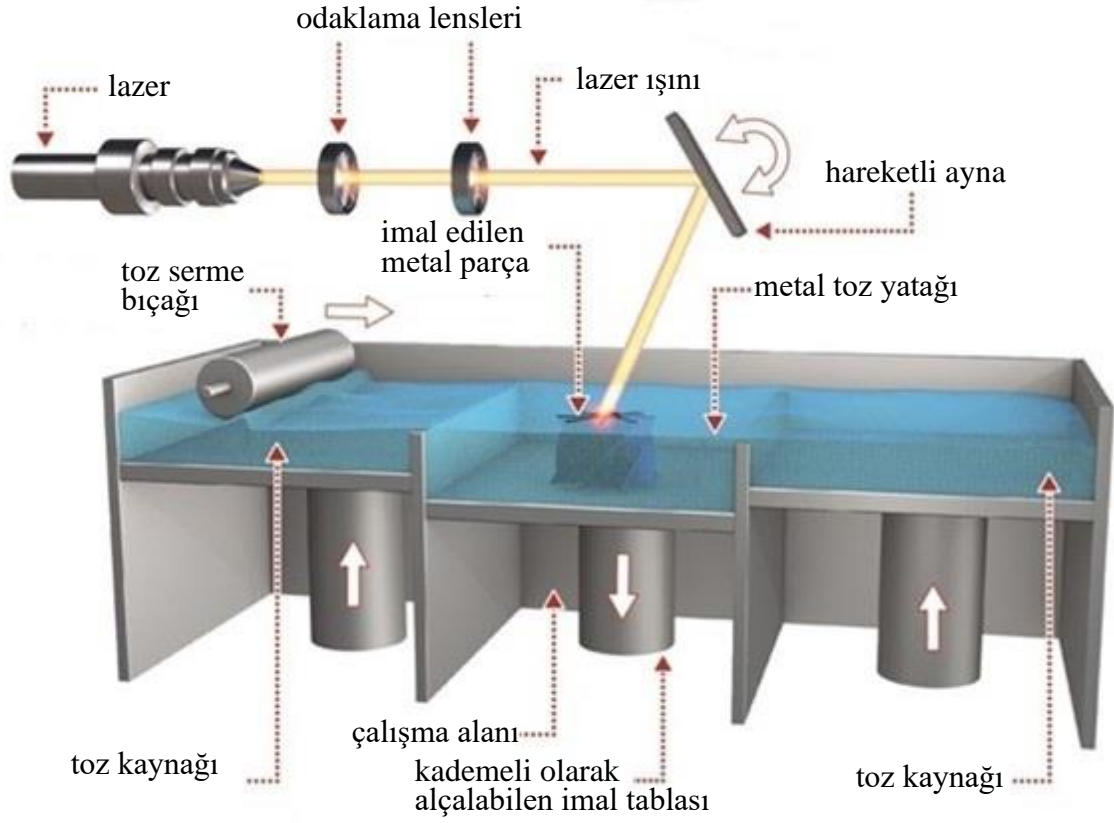
Şekil 2.5. Eklemeli imalat yöntemlerinin kullanım oranı [7]

## 2.2. Seçici Lazer Ergitme

Eklemeli imalat yöntemlerinden, toz yataklı eritme sınıfında yer alan “Seçici Lazer Ergitme (SLE)” metodu, literatürde birkaç farklı isimle anılmaktadır. Dünyada Doğrudan Metal Lazer Ergitme (ing. DMLM: Direct Metal Laser Melting), Lazer Tozu Yatak Füzyonu (ing. LPBF: Laser Powder Bed Fusion) gibi isimler kullanılırken özellikle Amerika’da Seçici Lazer Sinterleme (ing. SLS: Selective Laser Sintering), Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (ing. DMLS: Direct Metal Laser Sintering) gibi farklı isimlerle de anılmaktadır [17].

Bu tezde kullanılacak proses olan SLE için farklı tanımlar söz konusudur. Fakat bu tanımların en doğrusu; toz halde bulunan hammaddenin bir lazer vasıtasıyla seçici olarak ergitilip katman katman birleştirilmesi ile ürün oluşturma olarak tanımlanabilir. Resim 2.1’de SLE yönteminin şematik resmi verilmiştir.

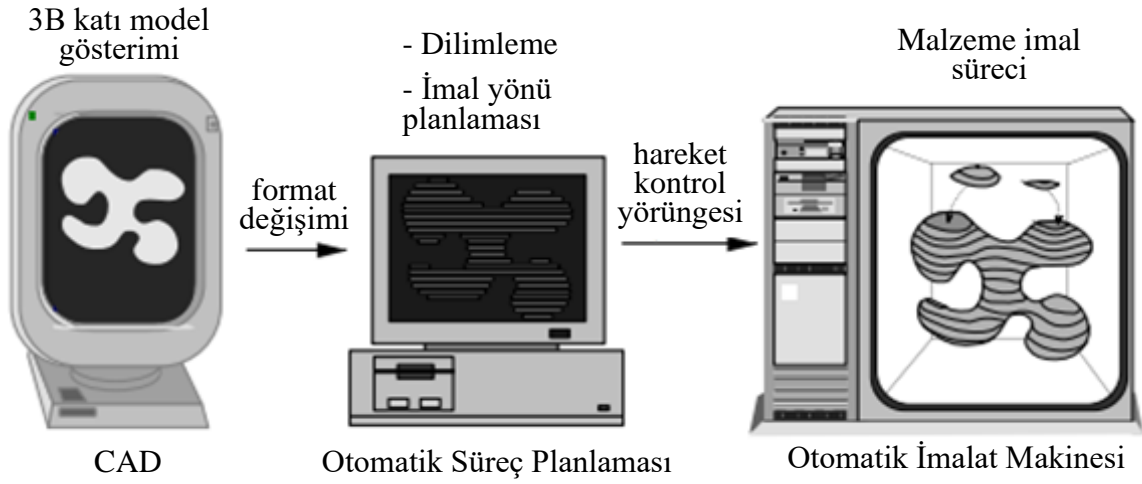
SLE makinesinde lazer, odaklanma lensi, ayna, imal tablası, toz serilimi için bıçak ve toz besleme haznesi bulunmaktadır. Temel olarak lazerden çıkan ışın odaklanma lensleri ve ayna vasıtası ile imal tablasına serilmiş olan toza yansıtılarak ergitilip katılma prensibine göre çalışmaktadır.



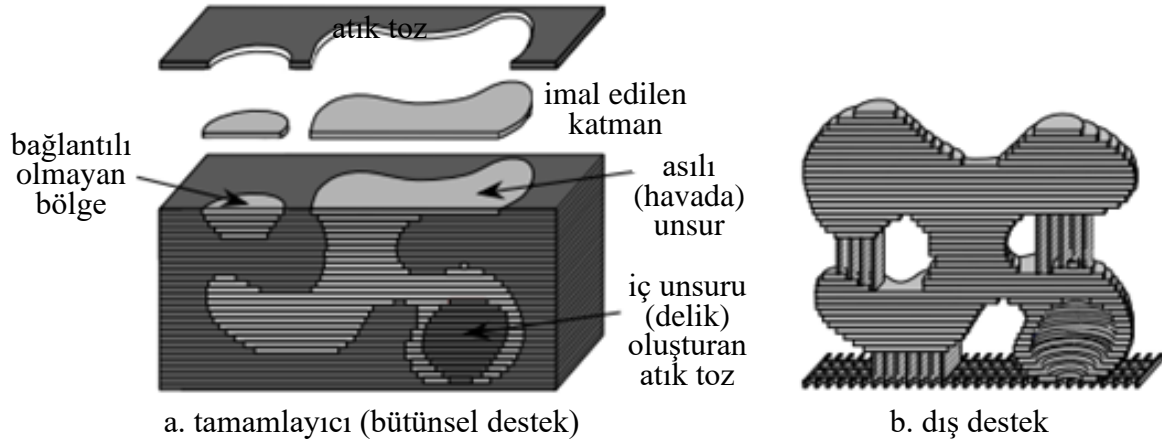
Resim 2.1. SLE işleminin şematik gösterimi [18]

Tüm eklemeli imalat yöntemlerinin ortak ve ilk basamağı bilgisayar ortamında oluşturulmuş 3 boyutlu CAD (control aided design) verilerinin bilgisayar yardımı ile 2 boyutlu veriler haline getirilmesidir (Resim 2.2). Bu iki boyutlu veriler için kullanılan dosya formatı genellikle tüm eklemeli imalat yöntemlerinde aynıdır. Bu format stereolitografi (ing: stereolithography) ya da standart üçgen dili (ing: Standart Triangle Language) şeklinde türkçeleştirilebilecek STL formatı olarak bilinmektedir. STL formatının yanında eklemeli imalat formatı (ing: Additive Manufacturing Format) olarak adlandırılan dosya formatının kullanımı da tercih edilen dosya tiplerine baktığımızda karşımıza çıkmaktadır [19, 20].

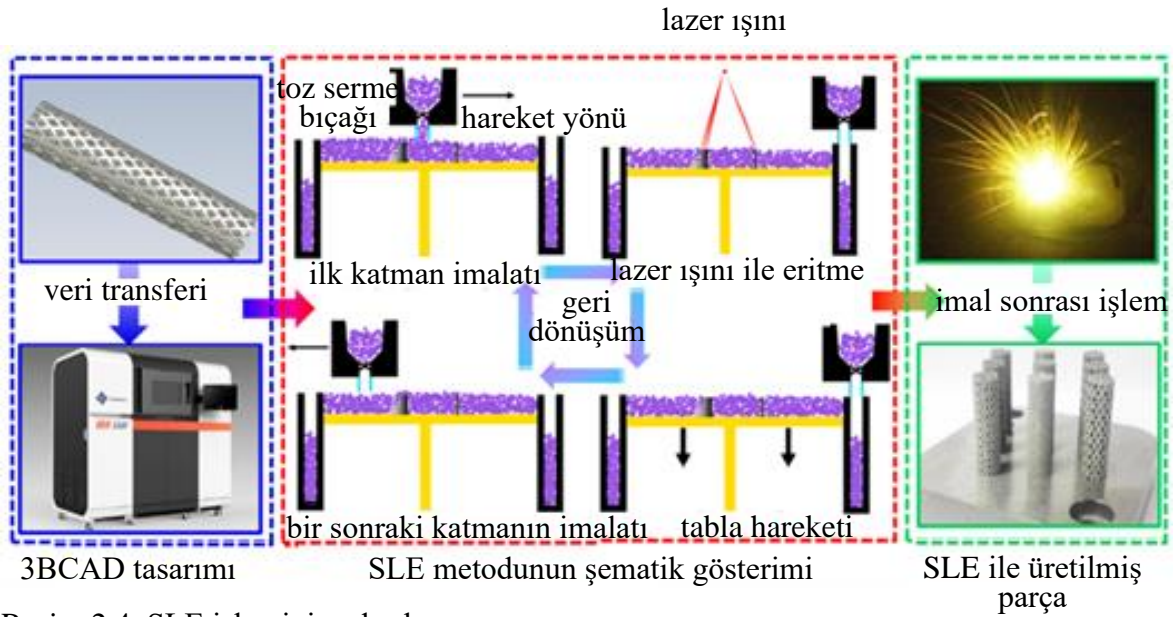
İki boyutlu verilerin makineye yüklenmesinin ardından bu verilere göre ilk katmanı oluşturabilmek için besleme haznesinde bulunan tozlar özel bıçaklar kullanılarak imal tablasına serilir. Serilmiş olan tozlar yüksek yoğunluklu bir lazer vasıtasıyla seçici olarak ergitilip birleştirilmesi ile belirlenen kesite göre katman imal edilir. İlk katman imal edildikten sonra imal platformu belirlenen katman kalınlığı kadar aşağı iner ve toz serme işleminden itibaren diğer katmanlar için aynı adımlar gerçekleşir. Her katman bir önceki katmana konsolide olur ve tüm ürün bu mantıkla oluşturulur [21]. SLE işleminin şematik gösterimi Resim 2.3'te gösterilirken, işlemin detaylı adımları Resim 2.4'te verilmiştir [22].



Resim 2.2. Hazırlanmış olan CAD verilerinin bilgisayar ortamında düzenlenmesi [23]



Resim 2.3. SLE imalatının temsili gösterimi [23]



Resim 2.4. SLE işleminin adımları

### 2.3. Seçici Lazer Ergitme Metodunun Avantaj ve Dezavantajları

SLE yönteminin sunduğu birçok avantaj vardır. Bu yöntemin en başta gelen avantajı yüksek tasarım esnekliği ve bu sayede oluşturulabilecek karmaşık geometrilerin üretimine olanak sağlamasıdır [19, 24]. Yöntemin tasarım özgürlüğünü ileri götüren bir diğer husus da geleneksel üretim yöntemlerinin dayattığı kısıtlamalar bertaraf edilerek daha ince ayrıntılara sahip ürünler üretilme olanağı elde edilmesidir [25, 26]. Son yıllarda gelişen lazer teknolojisinin de katkıları dolayısıyla yüksek doğrulukta parça üretilme yeteneği birçok sektörün ilgisini SLE yöntemine kaydırmıştır.

Yöntemin bir başka avantajı ise; polimer, metal, seramik ve kompozit malzeme ile üretim yapabilme yeteneği dolayısıyla fonksiyonel çok malzemeli ürünler üretilme kabiliyetidir [27, 28, 29]. Neredeyse %100 yoğunluklu parça üretilme kabiliyeti de bu yöntemin bir diğer önemli avantajıdır [30, 31]. Yüksek yoğunluklu parça üretilme yeteneğinin yanında kütle ayarlayabilme özelliği de yöntemin getirdiği önemli avantajlardandır [32].

Geleneksel imalat yöntemlerinin imalat için ihtiyaç duyduğu özel takım-fikstür aparatlarına bu yöntemde ihtiyaç duyulmaması kayda değer bir başka avantajdır [32]. Hammadde olarak kullandığı tozun tekrar kullanılabilmesi de söz konusudur [33]. Bir başka çok önemli avantaj ise tüm eklemeli imalat yöntemlerini ön plana çıkaran ve SLE yönteminde daha da ileri taşınabilen düşük “buy-to-fly-ratio” oranıdır [34, 35, 36]. Burada geçen “buy-to-fly-ratio” nihai ürünün hammaddeye oranı olarak türkçeleştirilebilir ve hammaddenin ürüne dönüşürken ortaya çıkardığı atık miktarının fazlalığına vurgu yapılmaktadır.

Mekanik özellikler dikkate alındığında da önemli bir artı ortaya çıkmaktadır. Döküm muadilleri ile karşılaştırıldığında yüksek mekanik özellikler sergileyen parçaların bu yöntemle üretilbildiği farklı çalışmalara konu olmuştur. Bu bağlamda çekme mukavemeti, sertlik, yüksek aşınma direnci gibi özelliklerin döküm muadillerine göre daha yüksek sonuçlar verdiği görülmüştür [37]. Çekme ve akma mukavemeti değerlendirildiğinde SLE ile üretilen numunelerin daha yüksek değerler verdiği saptanmıştır [31, 38, 39]. Başka çalışmalarda daha yüksek sertliğin yöntemle üretilen parça ile elde edilebileceği belirlenmiştir [31, 38, 40, 41]. Prashanth ve arkadaşları yöntemle yüksek aşınma direnci sergileyen parçalar üretilbildiğini belirlemiştir [42]. Özellikle döküm yöntemi ile üretilen muadil ürünlere denk mekanik özellikler elde edilebilirken bir başka önemli avantaj SLE yöntemi ile hafif parçalar üretilme kabiliyetidir [43, 44].

Seçici lazer ergitme yönteminin getirdiği yüksek sayıda avantajın yanında bazı dezavantajlarda bulunmaktadır. Bunların birçoğu eklemeli imalat yöntemlerinin doğası gereği ortaya çıkan olgular olsa da SLE yönteminin toz tabanlı imalat yöntemi olması dolayısıyla da bazı hatalar bulunmaktadır. Hala bu hataların giderilmesi için çalışmalar devam etmekte ve zamanla belli bir yolda katedilmektedir. Bu dezavantajlardan bazıları şu şekildedir:

İlk başta göze çarpan dezavantaj yüzey kalitesidir. Yöntemin doğası gereği üretilen parçalarda yüksek yüzey pürüzlülüğü ile karşılaşmaktadır [45]. Daha önce yapılan çalışmalarda ölçülmüş yüzey pürüzlülük değeri parçanın üst yüzeyi için  $Ra=12 \mu m \pm 2 \mu m$  olarak ölçülmüştür [46]. Yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmenin yolları vardır; parametre optimizasyonu [47], yeniden eritme metodu [45, 46] ve seçici lazer erozyonu [48] gibi farklı yöntemler kullanılarak yüzey kalitesinde iyileştirilme yapılabildiği daha önceki çalışmalarla kanıtlanmıştır. Bunlara ek olarak bilyalı dövme [49], işleme ve aşındırıcı ile kumlama gibi mekanik ya da asit ile aşındırma ve oksidasyon gibi kimyasal post-proses işlemleri [50] ile yüzey pürüzlülüğünün iyileştirildiği literatürde karşımıza çıkmaktadır.

Yüzey pürüzlülüğünden sonra çalışmaların en fazla yoğunlaştığı diğer husus gözenekliliktir ve bu olgu dayanım, sertlik, uzama ve yüzey kalitesi gibi mekanik özelliklerle doğrudan ilişkilidir [51]. Gözeneklilikte tıpkı yüzey pürüzlülüğü gibi parametre optimizasyonu ve yeniden eritme ile iyileştirilmektedir.

Yukarıda bahsedilen ana iki dezavantajın yanında başkaca geliştirilmeye çalışılan konular vardır. Bunlar, SLE işleminin üretim mantığının bir sonucu olarak oluşan yüksek sıcaklık gradyanları dolayısıyla ortaya çıkan sıcak çatlaklar ve üretim yönüne bağlı oluşan anizotropik özellikler [52, 53], sıcaklık dağılımına bağlı olarak oluşan sıvı ile hava arasındaki yüzey gerilimi kaynaklı marangoni fonksiyonu [54], kalıntı stres oluşumu [55], topaklanma problemi [56] ve makine yatırımı ile malzeme pahalılığı dolayısıyla maliyet olarak söylenebilir.

#### **2.4. Seçici Lazer Ergitme Metodunun Kullandığı Alanlar**

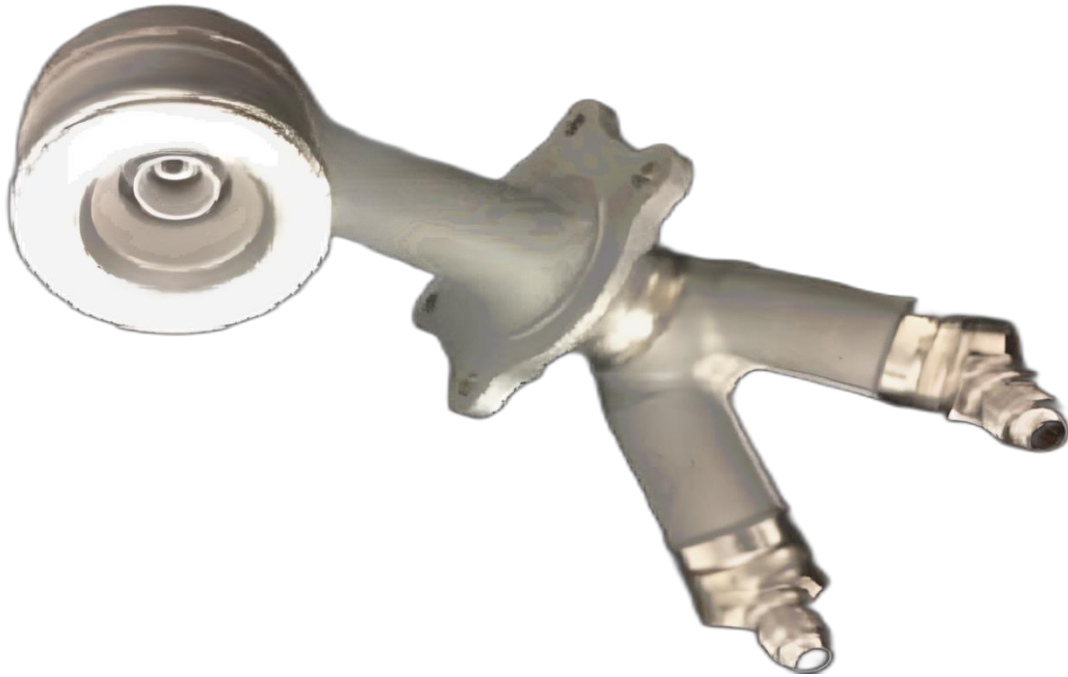
Seçici lazer ergitme metodu daha önce de bahsedildiği gibi son yıllarda imalat sektöründe gitgide daha fazla yer bulmaktadır. Özellikle yukarıda da anlatılan avantajlar ile farklı birçok

sektör içerisinde kendine yer açmıştır. Bu özellikler arasında özellikle daha hafif, daha kompleks ve daha yüksek ya da eşdeğer mekanik özelliklerde parça üretebilme kabiliyeti, bunlardan ayrı olarak daha düşük “buy-to-fly” oranı, daha az üretim adımı, birden fazla montajlanan ürünleri tek bir parça şeklinde üretebilme kabiliyeti gibi nedenlerden dolayı havacılık, otomotiv, sağlık, gıda, mücevher gibi farklı birçok sektörde kullanımını görebiliriz [36, 57].

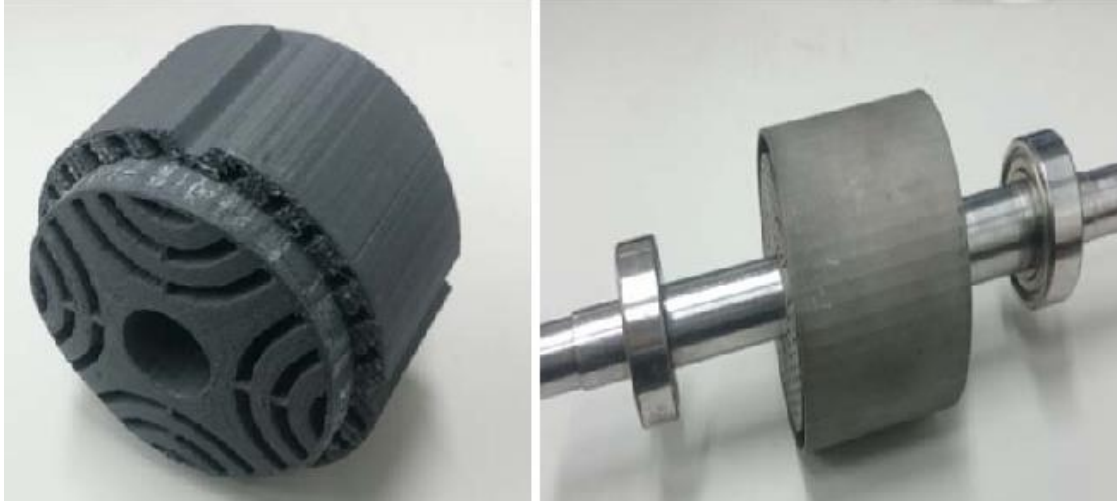
SLE yöntem ile üretilen ürünlere bazı örnekler şu şekildedir:

General Electronic (GE) firması 20 parçadan oluşan yakıt nozul parçasını tek bir parçadan SLE yöntemi ile üretmiş böylece parça sayısını azaltmış, montaj aşamasını kolaylaştırmıştır, mevcut parça daha hafif hale gelirken, mukavemeti de artırılmıştır [36]. Bahsi geçen parça Resim 2.5’te gösterilmiştir.

Bir başka akademik çalışmada ise geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor olan rotor imalatının SLE yöntemi ile yapıldığı belirtilmiştir [58]. Resim 2.6’da görseli verilmiş olan parçanın üretimi için geleneksel yöntemler dikkate alındığında çeşitli zorluklarla karşılaşılacağı buna karşın eklemeli imalat yöntemleri ile bu zorlukların üstesinden kolayca gelinerek fonksiyonel bir parça üretilebileceği açıktır.



Resim 2.5. GE firmasının ürettiği yakıt nozulu [36]



Resim 2.6. 3D yazıcı ve SLE yöntemi ile üretilen rotor örneği [58]

Geleneksel yöntemler ile üretilmesi imkânsız olan bir diğer parça ise başka bir araştırmada “Lazer ışın yöntemi (ing. Laser Beam Melting)” yani SLE yöntemi ile üretilmiştir. Bu üretim ile ağırlık noktasında kazanım elde edilirken eylemsizlik mukavemeti ile birlikte konik iç şekli ile gerilim yoğunluğu azaltılmıştır. Resim 2.7’de hem bilgisayar ortamındaki kesit görüntüsü hem de üretilen parça gösterilmiştir.

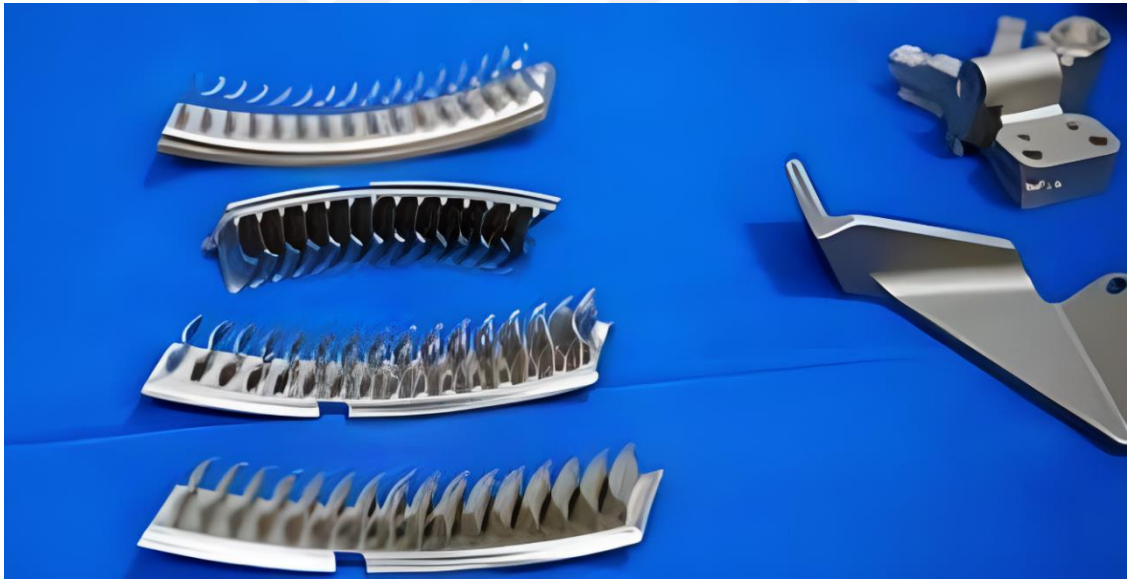


Resim 2.7. (sol görünüş) bilgisayar ortamında kesit görüntüsü (sağ) üretilen parça [58]

SLE yönteminin havacılık sektöründe kullanımına bir örnek olarak Airbus firmasının A320 uçaklarında kullandığı parça verilebilir. SLE yöntemi ile üretilen parça topoloji optimizasyonu ve malzeme seçimi sayesinde kütleli anlamda ciddi bir avantaj sağlamıştır. Söz konusu parça Resim 2.8’de verilmiştir [59]. Havacılık sektöründen bir başka örnek Pratt&Whitney Bombardier uçaklarında kullanılan ve SLE ile üretilmiş olan motor parçalarıdır. Resim 2.9’da görseli paylaşılmış olan bu parça ile firma parça özelinde ağırlıkta ciddi fayda sağlamıştır [59].



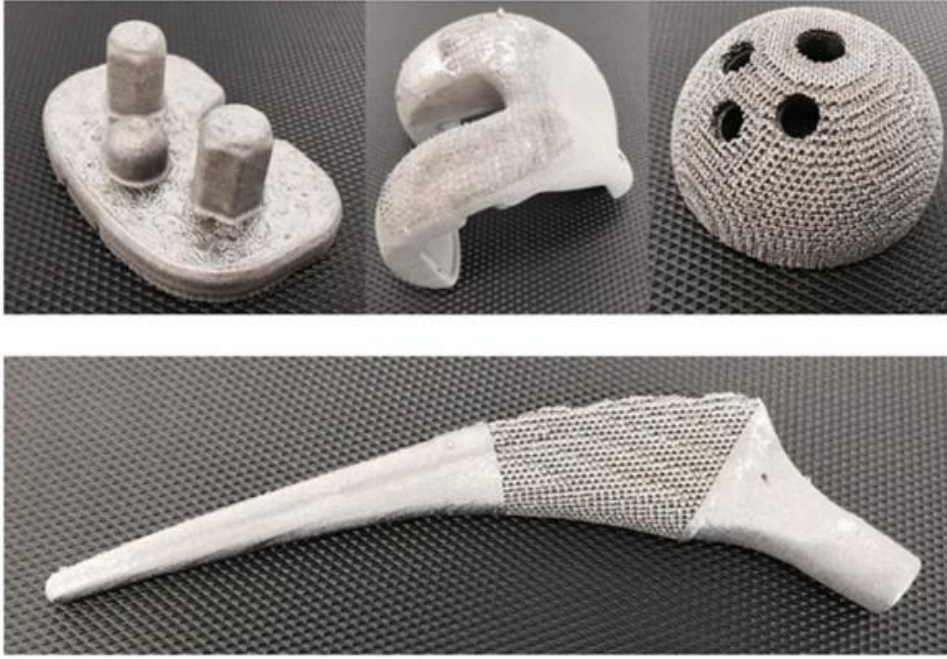
Resim 2.8. Airbus firmasının SLE yöntemi kullanılarak ürettiği parça [59]



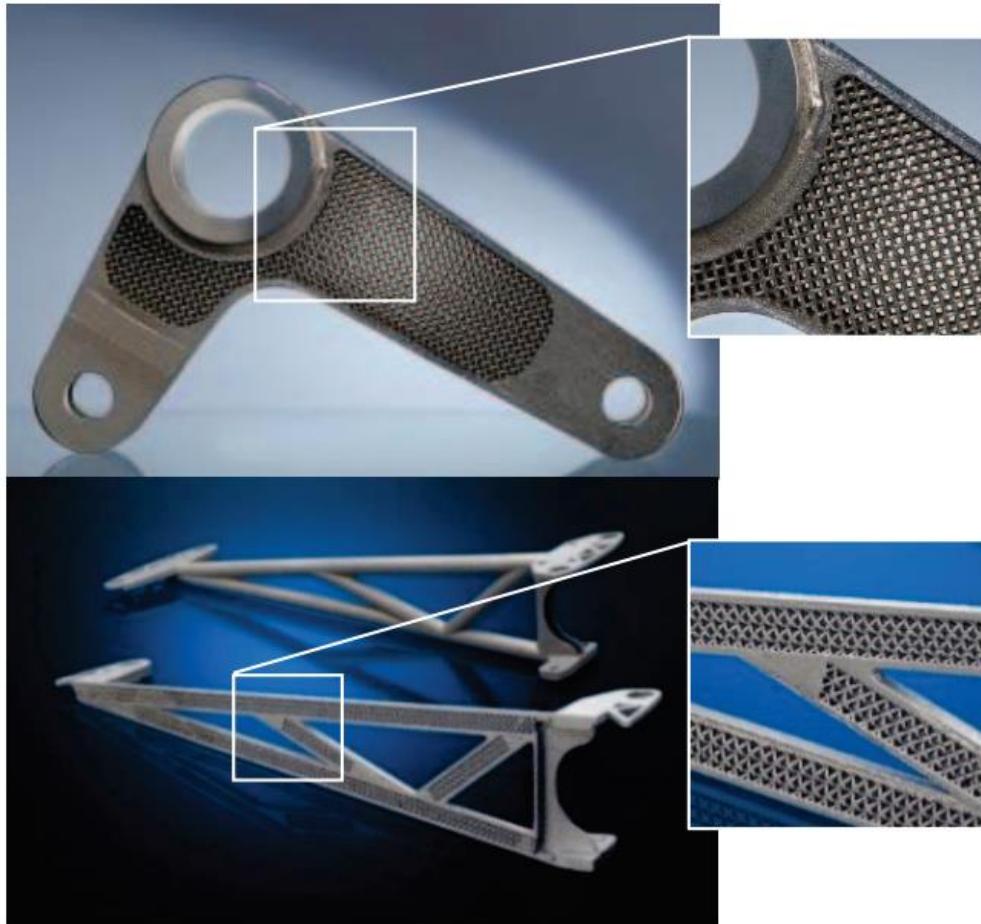
Resim 2.9. Pratt&Whitney firmasının SLE yöntemi ile ürettiği parça [59]

SLE yöntemi biyomedikal sektöründe oldukça umut vadeci bir yöntem olup farklı birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle implant ve diş sektöründe sıkça kullanılmaya başlanmış olan eklemeli imalat yöntemlerinden SLE yöntemi için implant örneği Resim 2.10’da verilmiştir [60].

Fraunhofer Lazer Teknolojisi Enstitüsü (ILT) hafiflik, yüksek mekanik özellikler ve düşük ağırlık ihtiyacını karşılaması dolayısıyla SLE yöntemi ile havacılık ve otomotiv parçaları üretmiştir [61]. Üretilen parçaların görseli Resim 2.11’de verilmiştir.



Resim 2.10. Kalça ve diz implantlarından örnekler [60]

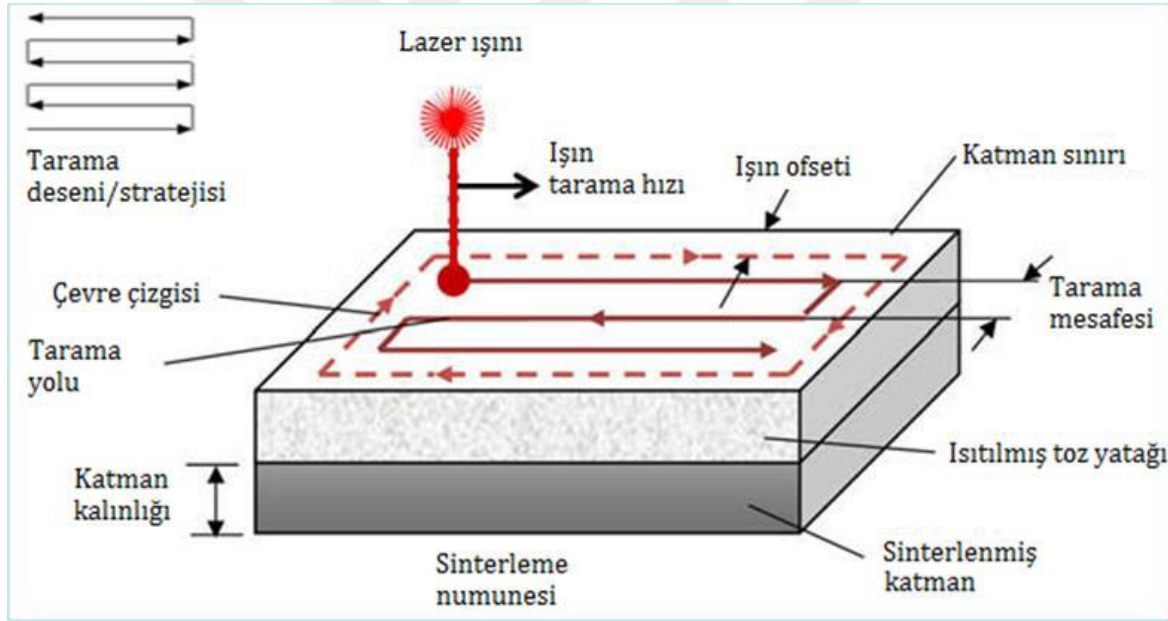


Resim 2.11. Fraunhofer Lazer Teknolojisi Enstitüsü (ILT) firmasının SLE yöntemi ile ürettiği parçalar (üst) helikopter için üretilen parça (alt) yarış arabası için üretilen parça [61]

## 2.5. Seçici Lazer Ergitme Metodunu Etkileyen Parametreler

Çalışma her ne kadar üretimsel açıdan yöntemin alt limitlerini saptamaya yönelik olsa da metodun daha iyi anlaşılması için fiziksel olguların iyi anlaşılması gerekmektedir. Bu bakımdan yöntem üzerinde etkili olan unsurların ortaya konulması gerekmektedir.

Seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilen parça üzerinde iki ana başlık altında toplayabileceğimiz parametreler bütünü vardır. Bu iki ana başlık giriş ve çıkış parametreleri olarak adlandırılmaktadır. Giriş parametreleri; enerji yoğunluğu, lazer gücü, tarama hızı, tarama mesafesi, katman kalınlığı, malzeme içeriği, tarama stratejisi ve imalat atmosferidir. Çıkış parametreleri ise; yüzey kalitesi, dayanım, metalurjik yapı, bağıl yoğunluk, sertlik, şekil ve boyut doğruluğu olarak sıralanabilir [4].



Resim 2.12. SLE yönteminde etkili parametreler [4]

Yukarıda bahsedilen enerji yoğunluğu diğer işlem parametrelerinin etkilediği bir olgu olup aşağıdaki denklem ile hesaplanabilmektedir:

$$E = \frac{p}{v \cdot s \cdot t}$$

E: Enerji yoğunluğu (J/mm<sup>3</sup>),  
s: Tarama aralığı (mm)

P: Lazer gücü (Watt)  
t: Katman kalınlığı (mm).

v: Tarama hızı (mm/s),

Yöntem söz konusu olduğunda en fazla soru işaretine sebep olan olgunun boyutsal doğruluk olduğundan daha önce bahsedilmişti. Burada doğruluğu etkileyen parametrelere bakıldığında; işlem parametreleri ve malzemenin yanında katman kalınlığı ve parça yerleşiminin de önemli bir etkisi vardır [62]. Bu sebeple parça yerleşimini tasarımın kritik bir parçası olarak görmek gerekmektedir. Bu yerleşim sırasında tabladan ayırma işlemi göz önünde bulundurulmalı iken yerleşimin aynı zamanda çarpılma, çökme ve ısının imal esnasında parçadan uzaklaştırılmasına ve stabil kalmasına yardımcı olan destek yapıların yerleşimi de dikkate alınmalıdır.

Seçici lazer ergitme yöntemi ile üretilecek en küçük unsurun eriyik havuz büyüklüğü ile sınırlı olduğu daha önceki çalışmalarda belirlenmiştir. Eriyik havuzu ise lazer odak çapı ile beraber termal nüfuziyet, hammadde (toz) çapı gibi farklı parametrelere bağlıdır. Calignano ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada yukarıdaki olgu sebebiyle alüminyum parça ile üretilebilecek en küçük kare unsurun 0,8 mm olacağı kayda geçmiştir [62].

Li ve arkadaşlarının paslanmaz toz üzerinde yaptığı araştırmada [63] farklı giriş parametrelerinin çıkış parametreleri üzerindeki etkisini gözlemlemek için sonlu elemanlar metodu kullanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda; tarama hızının lazer enerji yoğunluğu dolayısıyla da maksimum sıcaklık ve iz genişliğini etkilediğini, tarama hızının optimum seviyeye getirilerek yöntemde gözlemlenen buharlaşma ve gözenekliliğinin önlenebileceği ortaya çıkmıştır. Lazer gücünün artırılması ile maksimum sıcaklığı artırarak katmanların birbirine daha iyi yapışmasının sağlanabileceği fakat optimum gücün aşılması durumunda topaklaşma görülebileceği saptanmıştır. Sonuç olarak daha önce bahsedilen daha geniş bir eriyik havuz elde etmek için, düşük tarama hızı, yüksek lazer gücü, daha kısa tarama aralığı seçimi önem arz etmektedir. Uygun parametre seçimleri ile daha yoğun bir parça üretiminin mümkün olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

Topaklanma olgusunun hem düşük enerji yoğunluğu hem de yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle ortaya çıktığı Cherry ve arkadaşlarının yaptığı çalışma ile [64] ortaya konulmuştur. Aynı çalışma ile gözenekliliğin doğrudan enerji yoğunluğunun bir sonucu olduğu ortaya çıkmış, yükselen yoğunluk ile gözenekliliğin düştüğü fakat belli bir değerden sonra tekrar arttığı gözlemlenmiştir. Çalışma SLE yöntemi ile yüksek yoğunluklu parçalar üretilebileceğini kanıtlamıştır.

Yoğunluğun yöntem kullanılarak yüksek enerji yoğunluğu ile çok yüksek seviyelere (%99) ulaşabileceğini gösteren bir diğer çalışma Attar ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadır [65]. Fakat çalışma daha önceki çalışmalar gibi enerji yoğunluğunun belli bir seviyeden sonra bağıl yoğunluk üzerinde olumsuz yönde bir eğilim gösterdiğini ortaya koymuştur. Aynı şekilde lazer gücünün de bağıl yoğunluk üzerinde etken olduğunu optimum seviyedeki lazer gücünün yüksek bağıl yoğunluklu ürünler ortaya koyabileceğini göstermiştir. Çalışma yöntemi ile üretilen ürünlerin geleneksel yöntemler ile üretilenlere görece daha yüksek sertliğe sahip olduğunu, soğuk haddelenmiş ürünler ile karşılaştırılabilir seviyede olduğunu ortaya koymuştur. Dayanımın da geleneksel üretim yöntemleri ile üretilen ürünlerle karşılaştırılabilir olduğunu göstermiş, nihai akma ve çekme dayanımının aynı şekilde geleneksel yöntemlerle üretilen ürünlerden daha iyi sonuçlar verdiğini gözler önüne sermiştir.

Seçici lazer ergitme metodunda üretilen ürünün çıkış parametrelerini yani nihai ürünün mekanik özelliklerini etkileyen bir diğer husus ise toz bileşimidir. Averyanova ve arkadaşlarının [66] PH 17-4 paslanmaz tozunun farklı kimyasal birleşimi üzerinde yaptığı çalışma sonunda değişen kimyasal bileşimin farklı mikro yapı ve özellik meydana getirdiği ortaya çıkmıştır.

Alüminyum üzerine yapılan çalışmalara bakacak olursak; Seçici Ergitme Metodu ile alüminyum alaşımlarının irdelendiği farklı birçok çalışma karşımıza çıkmaktadır. Kaufmann ve arkadaşlarının EN AW 7075 alüminyum alaşımı üzerine yaptığı çalışmada [53]; düşük tarama hızlarında artan tarama hızı ile bağıl yoğunluğun arttığı gözlemlenmiştir. Bunun aksi durumunda ise yani sabit lazer gücünde artan tarama hızı ile bağıl yoğunlukta olumsuz yönde ilerleyiş mevcuttur.

Aboulhakir ve arkadaşlarının bu çalışmanın da konusu olan AlSi10Mg alüminyum alaşımı üzerine yaptığı çalışmada [67] ise SLE yöntemi ile üretilen ürünün mikro sertlik yönünden geleneksel yöntemlerden daha üstün sonuçlar ortaya koyduğu anlaşılmıştır. Çalışma aynı zamanda kimyasal bileşim olarak AlSi10Mg alaşımına benzer kimyasal içerik gösteren A360 alaşımı ile kıyaslandığında mukavemet yönünden karşılaştırılabilir sonuçlar ortaya koyduğunu göstermiştir. Buna karşın çalışma sonunda SLE yöntemi ile üretilen alüminyum alaşımlarının anizotropik özellik gösterdiğini ve A360 alüminyum alaşımı ile karşılaştırıldığında sünekliliğin daha düşük kaldığını ortaya koymuştur.

Bir başka AlSi10Mg tozu üzerinde yapılan çalışmada [40] ise Kempen ve arkadaşları ham haldeki tozun kimyasal bileşimi, şekli ve boyut dağılımının çıkan ürünün kalitesinde kritik bir öneme sahip olduğunu saptamıştır. Ayrıca düşük enerji girişi sonucu daha önce de bahsedildiği gibi topaklanma ve katmanlar arasında düzgün bağlantı oluşmama gibi sorunlarla karşılaşılabilceğini rapor etmiştir. Buna karşın yüksek enerji girişinin bozulma ve düzensizliklere sebebiyet vereceğini söylemiştir. Çalışmada üretilen ürün ile optimum giriş parametrelerinin iyi sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir. Yüksek tarama hızı ile yüksek yoğunluk (%99,4) ve daha düşük tarama hızı ile iyi yüzey kalitesi (20 µm) elde edilebileceğini ortaya koymuştur.

Trevisan ve arkadaşlarının AlSi10Mg üzerine yaptığı çalışmada [43] toz özelliklerinin imal sonunda çıkan ürüne etki ettiğinden bahsetmiştir. Hızlı katılma, yönlü ısı akışı, yüksek sıcaklık gradyanları gibi metalürjik fenomenler sebebiyle ultra ince yapılar oluşacağını dolayısıyla yüksek mekanik özellikler elde edileceğini not etmiştir. Oluşan ince yapı sonucu döküm ve dövme muadilleri ile karşılaştırılabilir dayanım ve sertlik ortaya çıkacağı gösterilmiştir.

## **2.6. Kafes Yapılar**

Bu çalışmanın katkı sağlayacağı alanların başında gelen kafes yapılar günümüzde birçok sektöre farklı avantajlar sunmaktadır. Birçok mühendislik uygulamasında mekanik özellikler, kontrol edilebilir gözeneklilik, ısı iletkenlik ya da yalıtım, akustik iletkenlik ya da yalıtım ve düşük kütleli özellik gibi sunduğu farklı avantajlar nedeniyle tercih edilmektedir. Kafes yapılar; yüksek mekanik özellikler nedeniyle yapısal uygulamalarda, yüksek enerji emme, yüksek sertlik gibi mekanik özellikler ve kemiğin büyümesine olanak sağlaması gibi özel kavramlar nedeniyle biyomedikal sektörde, yine yüksek mekanik özellikler, hafiflik ve ısı yalıtım özelliği nedeniyle denizcilik, havacılık ve otomotiv sektöründe, yüksek yüzey alanı, hafiflik ve gözenekli yapı üretebilme kabiliyeti nedeniyle filtre imalatı ve ısı uygulamalarda gözlerin yönleme çevrilmesine neden olmuştur [61, 68].

Seçici Lazer Ergitme yönteminin getirdiği avantajlar göz önüne alındığında özellikle mukavemeti yüksek buna karşın hafif yapılar üretebilme kabiliyeti yöntemi öne çıkarmaktadır. Bu ve bunun gibi birçok avantajı nedeniyle kafes yapılar söz konusu olduğunda ilk akla gelen yöntem Seçici Lazer Ergitme Metodudur. Yöntemin kafes yapılar için sunduğu avantajlardan birkaçı [68]:

- Yöntemin ürün kalitesine katkıları
  - Fonksiyonel parça üretimi
  - Uygulamaya göre özelleştirilebilir özellik üretebilme kabiliyeti
- Yöntemin operasyon ve toplam maliyete getirdiği avantajlar
  - Hammadde sarfiyatının düşüklüğü
  - Atık madde sarfiyatının düşüklüğü
  - Karmaşık geometrili parçalar için imalat işlem adımının düşmesi
- Yöntemin parça ağırlığına getirdiği avantajlar
  - CAD-CAM uyumu sebebiyle özel parçaların hızlı üretimi

SLE yöntemi ile kafes yapıların üretilme kabiliyetini araştırmaya yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. Bunlardan ilki Hao ve arkadaşlarının 316L paslanmaz tozu kullanılarak SLE yöntemi ile kafes yapı üretimi üzerine yaptığı çalışmada [69], 2 mm çapındaki payandaların hiçbir deformasyon gözlenmeden; 8 mm çapındaki payandaların ise belirgin bir deformasyon olmaksızın üretilbildiği rapor edilmiştir.

Leary ve arkadaşlarının AlSi12Mg alaşımından yöntem kullanılarak üretilen kafes yapıların incelenmesi sonucu [19]: optimize edilmiş işlem parametreleri ile sağlam ve klasik kafes yapısı davranışı sergileyen yapılar elde edilmiştir. Döküm muadilleri ile kıyaslanabilir mekanik özellikler elde edilmiştir. Payandaların alt yüzeylerinde yüksek yüzey pürüzlülüğü saptanmış ve artan açı ile pürüzlülüğün azaldığı görülmüştür. Diyagonal payandaların keşişiminde gerilim konsantrasyonları belirlenmiştir. Çalışmada aynı zamanda 35,3°, 45° ve 90° açılı 0,5 mm, 1 mm, 2 mm ve 3 mm çaplarındaki unsurlar üretilmiştir. Buna karşın 0° açıda unsur üretilmemiştir.

Yan ve arkadaşları kafes yapılar üzerine yaptığı çalışma ile [70], 2 mm ile 8 mm arasındaki hücre boyutuna sahip kafes yapıların SLE yöntemi ile üretilbildiğini göstermiştir. Üretilen bu yapılar herhangi bir desteğe ihtiyaç duymadan üretilmiştir. Hücre boyutunun düşmesi ile daha yoğun yapıların elde edilebildiği kayıtlara geçmiş, hücre boyutunun artması ile mekanik özelliklerde düşüş meydana geldiği not edilmiştir.

Niendorf ve arkadaşları kafes yapıların mikroyapısını incelediği çalışmada payanda çapı 0,65 mm ile 5 mm arasında olan kafes yapıları üretmeyi başarmıştır [71]. Mikroyapı olarak döküm yöntemi ile üretilen yapılara benzer sonuçlar elde edildiğinden bahsetmiştir.

## 2.7. Seçici Lazer Ergitme Metodunun Alt Limitleri

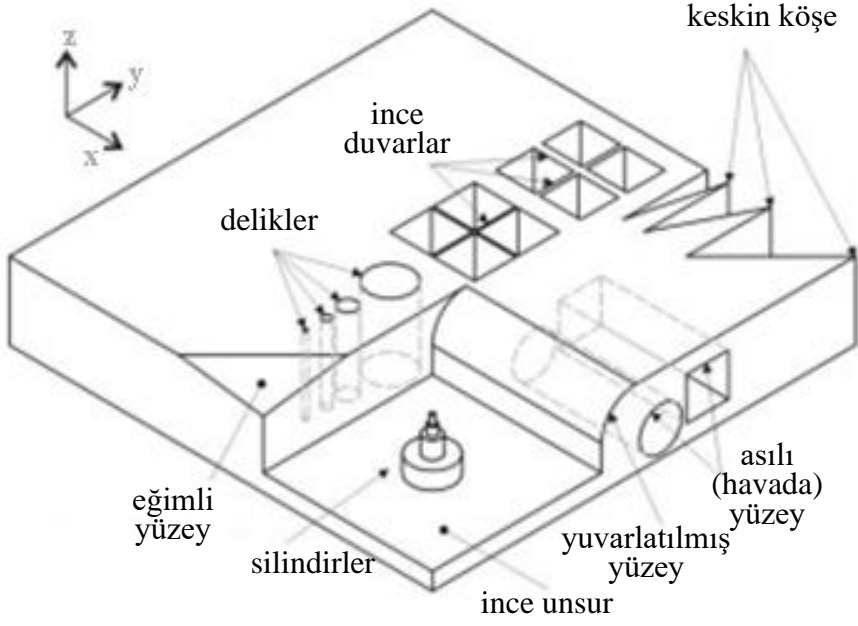
Yapılan bu çalışmada seçici lazer ergitme metodunun alt limitlerini belirlemek birincil amaçtır. Bu kapsamda alüminyum alaşım tozundan tasarlanan kıyaslama model (ing. Benchmark) imal edilip daha önce yapılmış çalışmalarda ortaya çıkan sonuçlar daha ileri taşınmaya çalışılacak ya da mevcut çalışmalarda bahsi geçen üretimler tekrarlanmaya çalışılacaktır.

Literatüre bakıldığında yöntem üzerinde parametre, mekanik özellikler, kafes yapıları ile ilgili çalışmalar üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Bu çalışmanın konusu üzerinde ise yeterince durulmadığı ve bu konunun daha fazla çalışma ile netlik kazanması gerekliliği fikri ile yola çıkılmıştır. Ayrıca bu çalışma ile literatürde çalışmaların yoğunlaştığı alanlara da katkı sağlanacağı fikri önemlidir. Örneğin kafes yapıların doğası dolayısıyla desteksiz üretilmesi gerekliliği [61] yapıların destek olmadan üretilmesini zorunlu hale getirmektedir. Bu çalışma ortaya konacak bilgilerle tasarımcılara fikir verecektir.

Her ne kadar konu ile alakalı çalışmalar yeterli değilse de yapılan bazı çalışmalar ile birtakım veriler mevcuttur. Geçmişten günümüze literatüre bakıldığı zaman yapılan çalışmalar ve bu çalışma sonucunda ortaya çıkan sonuçlar şu şekildedir:

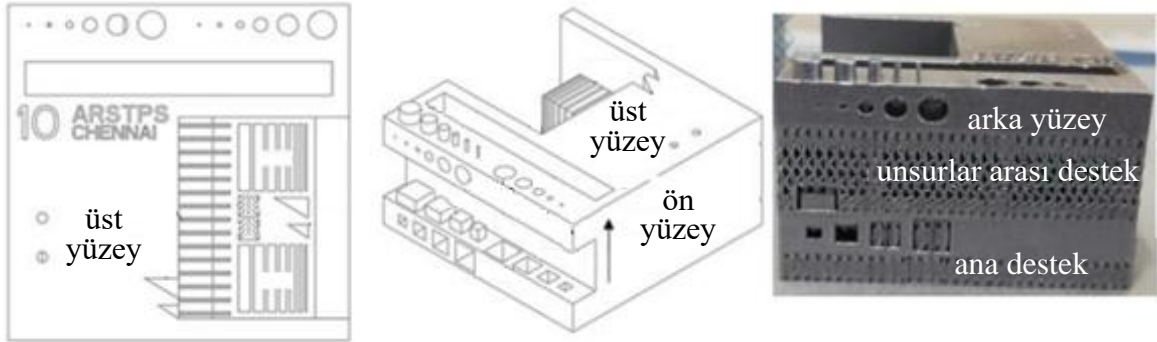
Kruth ve arkadaşları [72] farklı ölçülerdeki farklı unsurların üretilebilme kabiliyetini test etmek amacıyla bir kıyaslama model hazırlamışlardır. Çalışma farklı SLS/SLE makinelerinde farklı malzemelerle tekrar edilmiştir. Çalışma esnasında kullanılan model Resim 2.13'te verilmiştir.

Çalışma sonuçlarından bu çalışma ile paralel incelenen konulara bakıldığında ilk göze çarpan sonuç 0,5 mm çapındaki deliklerin üretilemediğidir. 1 mm çapındaki deliklerin bile üç işlemde kabul edilebilir sınırlar içerisinde üretilemediği diğer iki işlemde ise 0,05 mm ve 0,1 mm sapma ile üretilebildiği görülmektedir. Silindirik unsurlarda ise 1 mm çapındaki yapılar özellikle üç işlemde başarılı bir şekilde üretilirken, 0,5 mm çapındaki yapılarda iki işlemde 0,13 mm gibi bir sapma ile üretilmiş diğer üç işlemde ise başarılı bir şekilde üretilememiştir [72].



Resim 2.13. Kruth ve arkadaşlarının çalışmada kullandığı model [72]

Kaliamoorthy ve arkadaşları [73] bu çalışmanın da hammadde konusu olan AlSi10Mg alüminyum alaşımı üzerine bir kıyaslama model çalışması yapmış ve farklı birçok geometrik şekli barındıran bir model üretiminde yöntem ile üretilebilecek alt limitleri belirlemeye çalışmıştır. Model Resim 2.14'te verilmiştir.

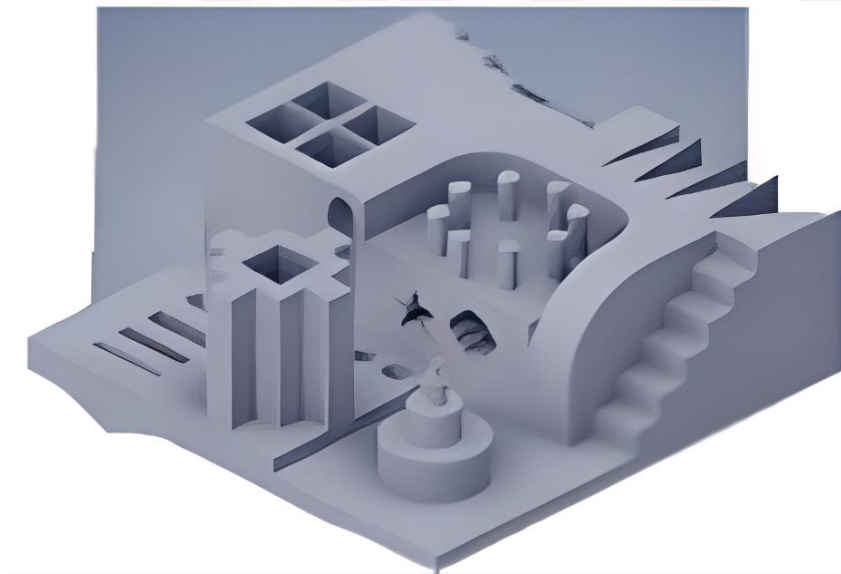


Resim 2.14. Kaliamoorthy ve arkadaşlarının kullandığı model [73]

Çalışma sonucunda 1 mm'nin üzerindeki tüm unsurların başarılı bir şekilde üretildiği tespit edilmiş bunun yanında 0,6 mm çapındaki silindirik unsurlarda üretilebilmişken, 0,3 mm çapındaki unsurun ise üretildiği fakat serme bıçağının tekrarlı hareketleri sonucu stabil bir ölçü çıkmadığı görülmüştür. Delik unsurlarında ise hem imal yönüne paralel hem de dik 0,3-0,6-1-2-3-4 mm çaplarında delikler imal edilmesi amaçlanmıştır. İmal yönüne paralel delikler incelendiğinde 2, 3 ve 4 mm çapındaki delikler başarılı bir şekilde üretilmişken 1 mm ve altındaki delikler başarılı bir şekilde üretilememiştir. İmal yönüne dik deliklere

bakıldığında ise paralel olanlara göre daha başarılı sonuçlar elde edilmiş fakat 0,6 mm ve altındaki deliklerin üretilmediği rapor edilmiştir. Dairesel şekilli soğutma kanalları için ise üretilen unsurun eliptik bir form aldığı görülmüştür. Çalışmada ayrıca 45° açılı silindirik unsurların üretilmediği rapor edilmiştir [73].

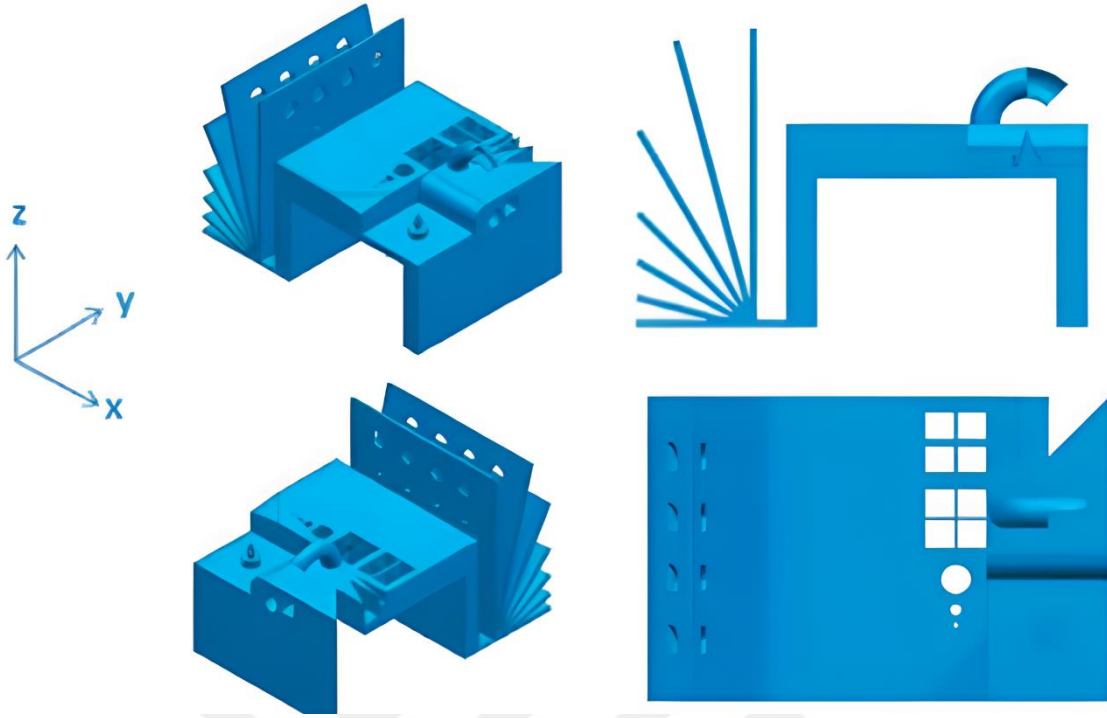
Bir başka kıyaslama model üzerindeki çalışma da Kamarudin ve arkadaşlarının çalışmasıdır [74]. Çalışma yine AlSi10Mg alüminyum tozu üzerine yapılmıştır. Farklı ölçülerdeki farklı unsurların SLE yöntemi ile üretim kabiliyetini test etmek amacıyla Resim 2.15'te gösterilen kıyaslama model tasarlanıp üretilmiştir. İnce duvar üretebilme kabiliyetinden, alt ve üst yüzeylerdeki açılı yapıların üretimine, silindirik ve keskin köşeli unsurlardan, dairesel ve keskin köşeli deliklere kadar farklı birçok konuda inceleme yapılmak amacıyla kapsamlı bir model belirlenmiştir.



Resim 2.15. Kamarudin ve arkadaşlarının çalışmasında kullanılan model [74]

Bu tezde yapılan çalışma ile benzer inceleme alanına bakıldığında 0,5-1,5-5-10 mm çapında silindirik unsur üretiminin sonucunda 1,5 mm ve yukarıdaki unsurlar başarılı bir şekilde üretilmişken, 0,5 mm çapındaki unsur %11,66 sapma ile üretilmiştir. Delik unsurlar için ise 0,5 mm çapındaki deliklerin üretilmediği rapor edilmiştir [74].

Yasa ve arkadaşları havacılık sektörü için en uygun SLE makinesini seçmek için bir kıyaslama model üzerinde çalışma yapmıştır [75]. Dört farklı firmadan imal edilmesi istenen model Resim 2.16'da verilmiştir. Çalışmada bir nikel alaşımı olan Inconel 625 tozu kullanılmıştır.



Resim 2.16. Yasa ve arkadaşlarının çalışmasında kullanılan model [75]

Dört farklı firma tarafından imal edilen ürünlerin imal yönü üretici firmaya bırakıldığından farklı sonuçlar ortaya çıkmıştır. Model üzerinde bulunan 0,5-1,5-5-10 mm çaplarında silindirik unsur ve delik yapıların sonuçları incelendiğinde her iki geometriyi de ayrı ayrı sadece birer firmanın üretebildiği görülmüştür. Silindirik unsurları firmalardan birinin 0,5 mm çapında olanını 20  $\mu\text{m}$  hassasiyette olmak üzere diğer yapıları ise herhangi bir problem olmaksızın üretebildiği görülmüşken başka bir firmanın delik yapıları tüm delikleri 100  $\mu\text{m}$  hassasiyetle üretebildiği belirtilmiştir [75].

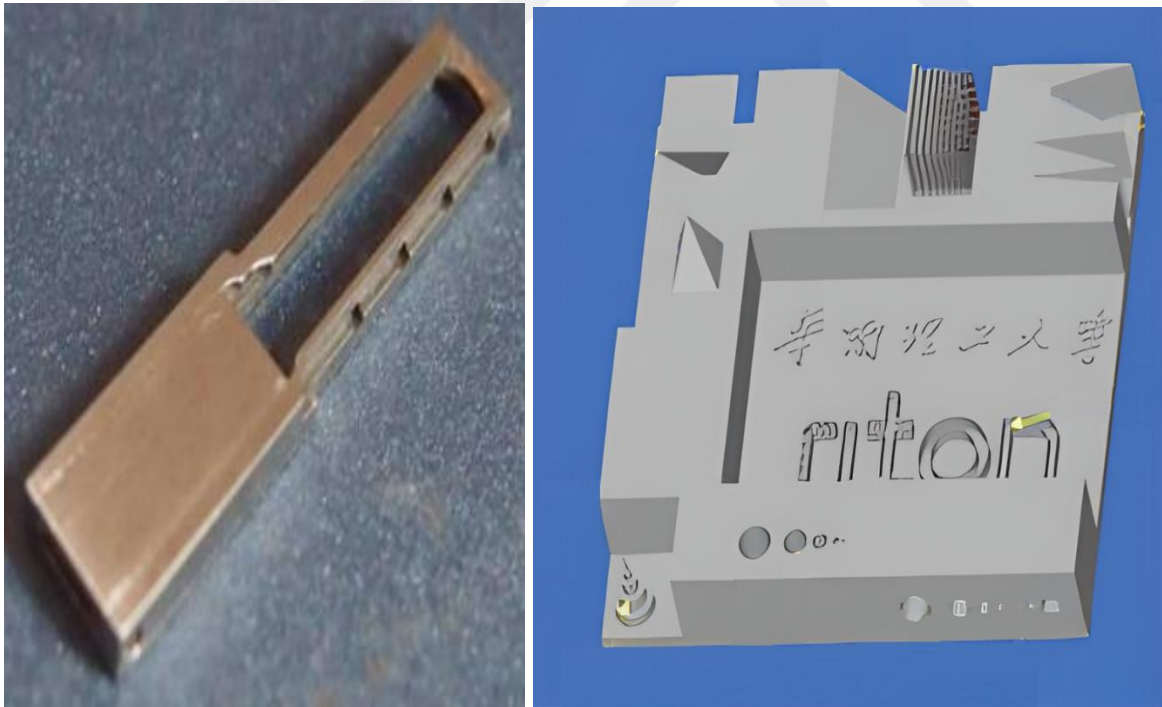
Yadroitsev ve Bertrand'ın paslanmaz tozu (904L) ile mikro soğutma sistemlerinin SLE yöntemi ile imal edilmesi üzerine yaptığı çalışma ile 0,4 mm çapında 1 mm uzunluğunda pimler üretebildiği rapor edilmiştir [27].

Wong ve arkadaşları [25] SLE yöntemi ile hem alüminyum (6061) tozu hem de paslanmaz (316L) tozundan ısı alıcılar imal ederek bu yöntemle üretilen ürünün soğutucu özelliğini test etmiştir. Kanatçık vasıtasıyla yüzey alanını artırarak daha yüksek ısı transferi hedeflenen çalışma ile 1 mm'nin altındaki kanal ve kanatçıkların üretildiği rapor edilmiştir.

Xu ve arkadaşları [76] titanyum alaşımından (Ti-6Al-4V) üretilmiş numune ile yöntemin sınırlarını belirlemeye çalışmıştır. Çalışmasında insan kemiğine uyumlu implantların

yöntem ile üretimi konusu irdelenmiştir. Bu sebeple çeşitli hacim oranlarında üretilmiş kafes yapılarını incelemiş ve bazı sonuçlar elde etmiştir. Spiral bir yapının yükselme açısının  $30^\circ$ 'den büyük olması gerektiği, kemerli bir yapının çıkıntı uzunluğunun 1,04 mm'den yüksek olmasının sağlıklı olacağı, delik çapı ve duvar kalınlığının 0,1 mm'den yüksek olması gerektiğini kaydetmiştir.

Wang ve diğerlerinin yaptığı çalışmada ise [77] paslanmaz (316L) tozdan belirli küçük unsurları da içeren bir araba anahtarı imalatı ve bir kıyaslama model imalatı SLE yöntemi ile yapılmıştır (Resim 2.17). Çalışma, bu tezde yapılacak çalışmaya oldukça paralellik gösteren bir çalışma olup; silindirik unsur imal yönüne paralel ve dik delikler ve son olarak da açılı unsurların üretilebilirliğini incelemiştir. Neticede 0,15 mm çapındaki silindirik unsuru başarılı bir şekilde üretirken, imal yönüne dik delikler için 0,5 mm çapındaki unsurun başarılı bir şekilde üretilemediği fakat bunun üzerindeki tüm deliklerin üretilebildiğini not etmiş, yan deliklerde ise çapak ve çöküntü meydana geldiğini rapor etmiştir. Açılı unsurlar için ise  $40^\circ$ 'nin altındaki unsurların başarılı bir şekilde üretilemediğinden bahsetmiştir.



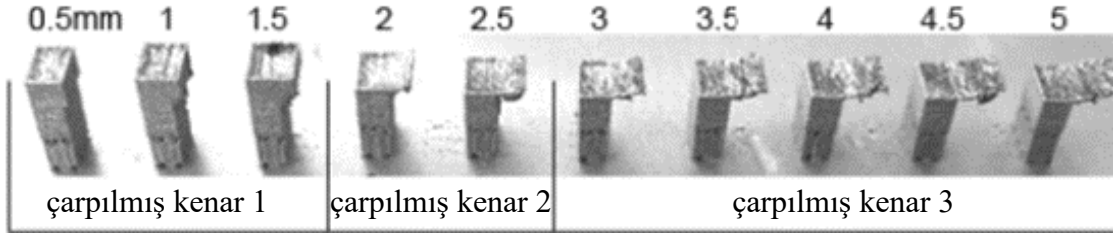
Resim 2.17. Wang ve arkadaşlarının çalışmasında kullanılan modeller [77]

Çalışmanın bir diğer ana konusu olan açılı unsur imalatı için de bazı çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarını da dikkate alınarak hazırlanan ikinci bir kıyaslama parçası ile literatürün ileriye taşınması ya da teyit edilmesi birincil amaçtır.

Wang ve arkadaşlarının yaptığı iki ayrı çalışma ile açılı unsuru belirlemede kritik parametreler belirlenmiş yaptıkları deneysel çalışma ile 316L paslanmaz tozu kullanılarak açılı unsurun alt sınırları saptanmaya çalışılmıştır [77, 78]. Özellikle açılı ve çıkıntı unsur imalatında destek ihtiyacının büyük ısı gradyanları nedeniyle önemli olduğu, bu ısının orada hapsolmaması için destek yapıların ısı iletiminde önem arz ettiğinden bahsedilmiştir. Destek unsuru içermeyen yapılarda gevşek tozların kritik açı değerlerinde bu iletimi sağlayamadığı hatta izolasyon görevi görerek termal gerilmelerin artmasına yol açtığı saptanmıştır. İmal açısının değiştirilemediği durumlarda enerji girdisinin optimizasyonunun gerekliliğine vurgu yapılmıştır. Unsurun uzunluğunun nihai üründe çarpılma ve bozulmalarla doğru orantılı olduğundan bahsetmiştir. Çalışma sonunda hem teorik hem de pratikte 45° açının en güvenilir sonuç verdiği ortaya konmuştur.

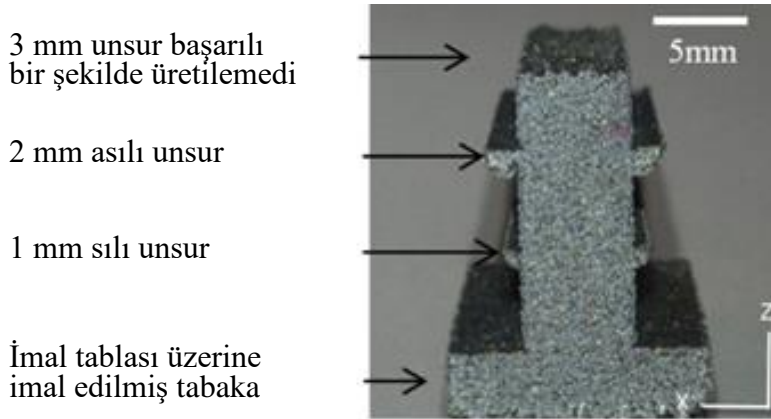
Cloots ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise [79] iki farklı seçici lazer ergitme makinesi kullanılarak 316L paslanmaz tozundan üretilebilecek açı irdelenmiştir. Çalışmada tarama açılarının çıkıntı unsur imalatında ne derece etken olduğu da sorgulanmış, unsurun çıkıntı yönüne dik tarama açısının çıkıntı yönüne nazaran daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. 20° açılı unsuru sadece çıkıntı yönüne dik (0°) açı ile üretilebilmenin mümkün olduğundan bahsetmiştir. Ayrıca tarama hızının da bir etken olduğu ve artan tarama hızı ile daha iyi sonuçların ortaya çıktığı belirtilmiştir. ConceptLaser M2 makinesi ile 30°'nin altında unsurlar üretilebilirken Renishaw makinesi ile bu değerlere inilemediği bildirilmiştir. Çalışma iç bölgeyi ayrı dış bölgeyi ayrı parametreler ile taramayı da irdelenmiş ve 35°'nin altında çıkıntı unsur üretebilmenin kabuk kalınlığını artırarak mümkün olacağı bilgisini literatüre kazandırmıştır. Çalışmanın sonunda, lazer tarama yönü unsur konturlarına paralel olduğu durumda en başarılı sonuçları elde edeceği bilgisi ortaya çıkmıştır.

Thomas SLE yönteminin limitlerini araştırdığı projede [80] 316L tozunu kullanmıştır. Yöntemin farklı alanlardaki limitlerinin araştırıldığı bu projede önemli bulgular ortaya çıkmıştır. Farklı imal açılarında yaptığı deneyler sonucu 45°'nin altında tekrar eden başarılı sonuçların elde edilemeyeceğinden bahsetmiştir. 0,5 mm'den 5 mm'ye kadar destek yapı olmaksızın zemine paralel unsur üretebilme testinde ise 0,5 mm, 1 mm ve 1,5 mm dışındaki tüm unsurların deformasyona uğradığını rapor etmiştir (Resim 2.18). Çalışmada aynı zamanda tarama yönünün önemine vurgu yapılmış olup, unsur uzunluğu boyunca taramanın daha iyi sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Ekseni zemine paralel delik unsurlar için ise üst kısmında sarkıntı oluşacağı bu sebeple mümkünse dairesel form yerine alternatif formların kullanılabileceği gerekliliğine vurgu yapmıştır.



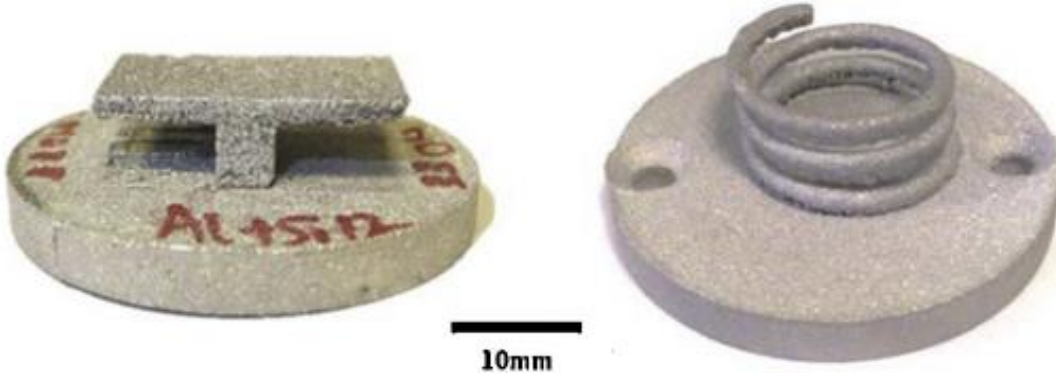
Resim 2.18. Thomas'ın desteksiz zemine paralel unsur imalat testi [80]

Vora ve arkadaşları alüminyum alaşımlarının SLE yöntemi kullanılarak üretilebilme yeteneklerini sorgulamıştır [81]. Alüminyum ve Silisyum elementlerinin oluşturduğu bir alaşım ile bu elementlerin alaşımlanmamış halinin yöntem ile başarılı bir şekilde üretilebildiği sonucuna varmışlardır. Alüminyum ve silisyum tozlarını yöntem vasıtasıyla In-Situ yöntemi ile üretmeyi başarmışlardır. Çalışma ön ısıtma sonucunda termal gerilmelerin azaldığını, uzunluğu düşük çıkıntılı unsurların üretilebildiğini ortaya koymuştur. Çalışma sonucunda 2 mm'nin üzerindeki çıkıntıların çarpıldığı, 5 mm'lik uzunlukta maksimum 1 mm çarpılma olduğu ortaya çıkmıştır. Çalışmada 10 mm desteksiz çıkıntıyı 1 mm çarpılma ile üretmeyi başarmışlardır. Ayrıca yay benzeri bir yapı imal edilmiştir. Bu yayda desteksiz yatay uzunluk olarak 20 mm unsurlar bulunmaktadır. Resim 2.19 ve Resim 2.20'de çalışmada başarılı bir şekilde üretilmiş ürünlerin görselleri mevcuttur.



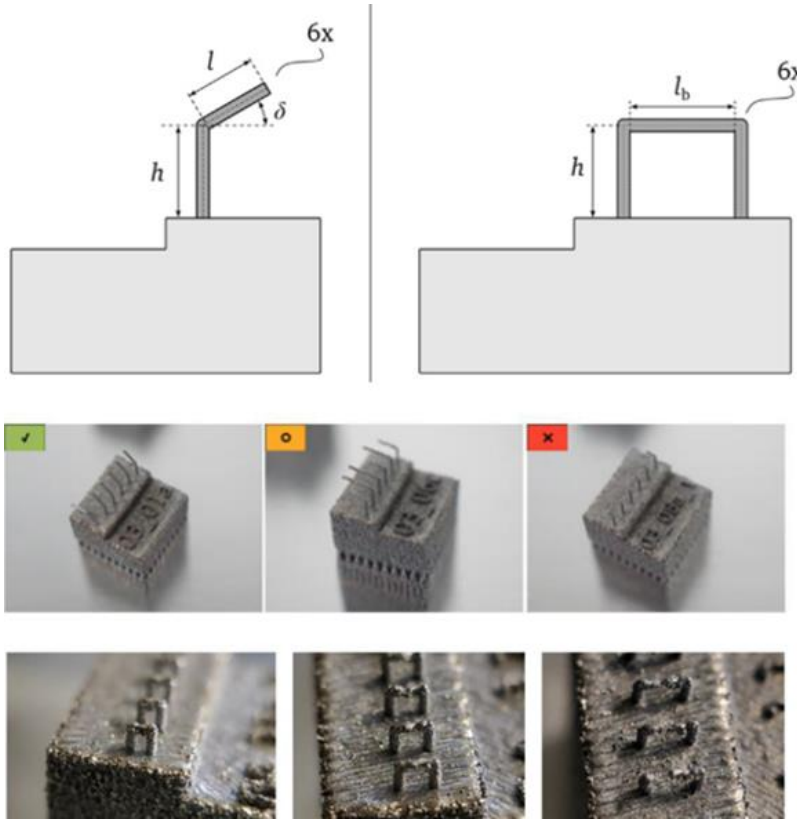
Resim 2.19. Vora ve arkadaşlarının desteksiz ürettiği çıkıntı unsur barındıran ürün [81]

Calignano alüminyum ve titanyum alaşımları kullanılarak SLE yöntemi ile üretilebilecek açılı unsurlar üzerine yaptığı çalışmasında destek kullanılmaksızın 30°'ye kadar tüm unsurların başarılı bir şekilde üretilebildiğini rapor etmiştir. Buna karşın tüm unsurların alt yüzeyinde yüksek yüzey pürüzlülüğü bulunduğu bahsetmiştir. Titanyum malzemenin üretilen parçaların alüminyum malzemenin üretilen parçalara göre daha az başarılı olduğunu not etmiştir [82].



Resim 2.20. Vora ve arkadaşlarının ürettiği 10 mm desteksiz ürün ve yay ürünü [81]

Yakın zamanda yapılmış olan Meyer ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [83] ise bu çalışmada da kullanılacak olan AlSi10Mg tozu kullanılarak SLE yönteminin sınırları araştırılmıştır. Çalışmada açılı unsur imalatı ve zemine paralel çıkıntı unsurun üretilebilirliği test edilmiştir. Açılı unsur için  $8^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $40^\circ$  açı yapan test parçaları değerlendirilmiş ve sonuç olarak  $8^\circ$  ve  $15^\circ$  açıdaki unsurların başarısız olduğu saptanmıştır. Köprü geometrisine sahip model ile de eksenine zemine paralel unsurlar değerlendirilmiştir. Yapılan imalat sonucunda 1 mm boyundaki unsurlar üretilmiştir. Çalışma sonucu ortaya çıkan ürünün görseli Resim 2.21’de verilmiştir.



Resim 2.21. Meyer ve arkadaşlarının yaptığı çalışma görselleri [83]

Bu çalışmanın katkı sağlayacağı bir konuda birçok farklı sektörde önemli avantajlar sunan kafes yapılarıdır. Çalışma sonucunda ortaya çıkan sonuçlar da dikkate alınarak hem açılı hem de payanda çapları belirlenerek kafes yapılarda alt limitlerde ortaya konulmuş olacaktır.

Bu çalışmanın ortaya koyacağı değerlerin birçok sektöre ışık tutması beklenmektedir. Biyomedikal sektöründe seçici lazer ergitme yöntemi kullanılarak üretilen implantlar için hem delik hem de çıkıntı unsurlar kemiğin büyümesine ve implanta bağlanarak daha uyumlu hale gelmesine katkıda bulunmaktadır. Bu bakımdan çalışmanın sonucu biyomedikal sektörüne katkıda bulunacaktır.

Havacılık ve savunma sektöründe sıkça tercih edilen kafes yapıların payanda çapı, payanda açısı, minimum birim hücre boyutunun belirlenmesine olumlu katkılar sağlayacak olan çalışma ile kafes yapı tasarımı için fikir vermesi açısından değerli bir çalışma potansiyeli ortaya koymaktadır.

MEMS sektöründe kullanılan ısı emicilerin tasarım ve boyut kısıtlamaları gereği geleneksel yöntemler ile üretilmesinin zorluğu daha önceki çalışmalarca ortaya konmuştur. SLE ile geleneksel yöntemlerin getirdiği fiziksel kısıtlamalar ortadan kalkar ve ısı transferi konusunda daha yüksek performans sergileyecek küçük kanal ve çıkıntılar ile daha iyi sonuçlar alınabilecek ürünler üretilebilir [62].



### 3. METOT VE YÖNTEM

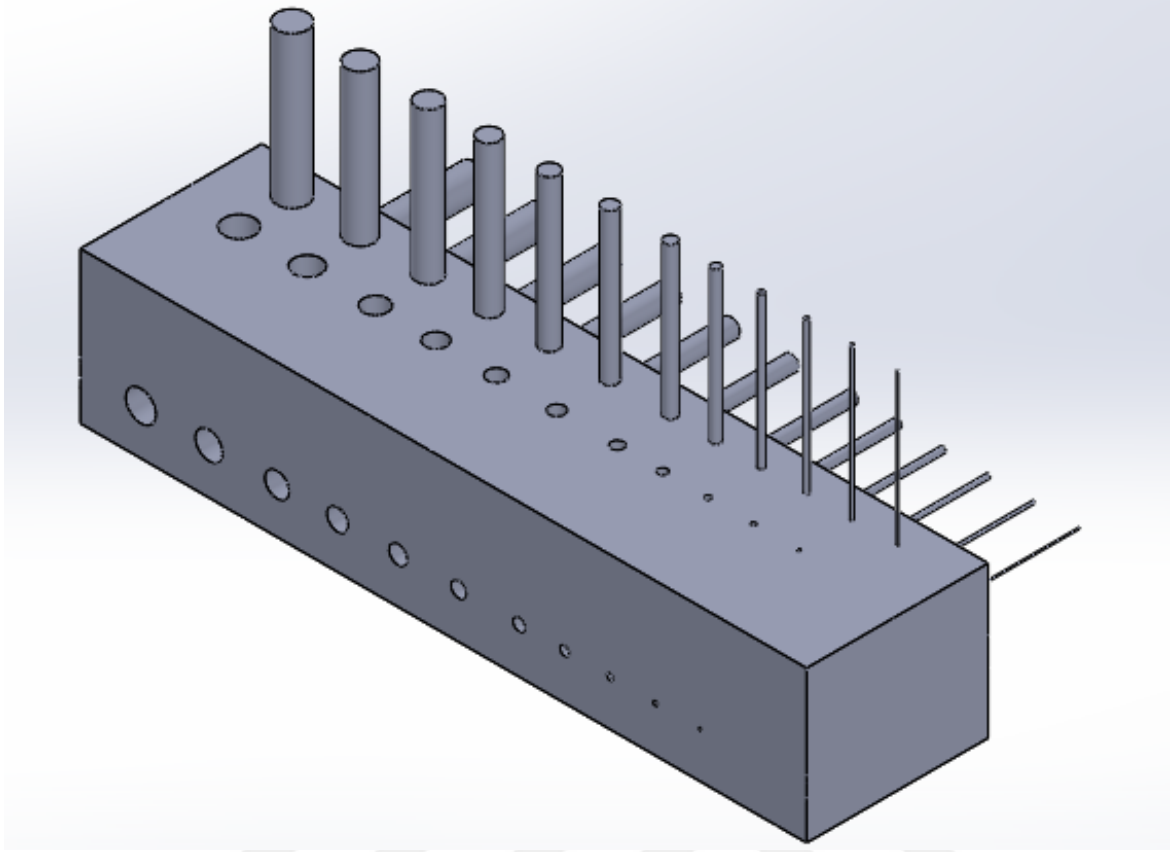
Yapılan bu çalışmada Seçici Lazer Ergitme metodunun alt limitleri belirlenmeye çalışılmıştır. Yöntem ile üretilebilecek beş farklı olgu araştırılmaktadır. Bu olguların belirlenmesi ile yöntem daha iyi anlaşılacak ve tasarımcı, üretimci, kullanıcı gibi farklı kesimlere daha anlaşılabilir daha somut veriler sunulacaktır.

Araştırılacak bu olgulara bakıldığında; birincisi imal yönünde üretilebilecek en küçük çıkıntı unsur, ikincisi zemine paralel desteksiz üretilebilecek en küçük çıkıntı unsur, üçüncüsü imal yönünde üretilebilecek en küçük delik, dördüncüsü eksen zemine paralel üretilebilecek desteksiz en küçük delik ve beşincisi de desteğe ihtiyaç duymadan üretilebilecek en düşük açıdır (burada açıdan kasıt unsur ile tabla arasındaki açı).

Araştırılacak olan olgular dikkate alındığında kompleks bir tasarım ya da tüm unsurların bir arada olacağı bir “benchmark” model olması yerine iki farklı basit geometri ile değerlendirilmesi daha uygun görülmüştür. Farklı metotlar gerektirmediği için de özel bir tasarım programına ihtiyaç duyulmamış ve tasarımların Solidworks programında yapılmasının herhangi bir sorun teşkil etmeyeceğine karar verilmiştir.

Yukarıda tespit edilmek istenen hususları değerlendirmek için iki farklı kıyaslama model tasarlanmıştır. Birinci model (Resim 3.1) ilk dört olguyu incelemek için oluşturulmuşken; ikinci model (Resim 3.2) beşinci konu olan açığı tespit etmek için tasarlanmıştır. Birinci modelin detaylı teknik resmi Ek-1’de, ikinci modelin detaylı Teknik resmi Ek-2’de verilmiştir.

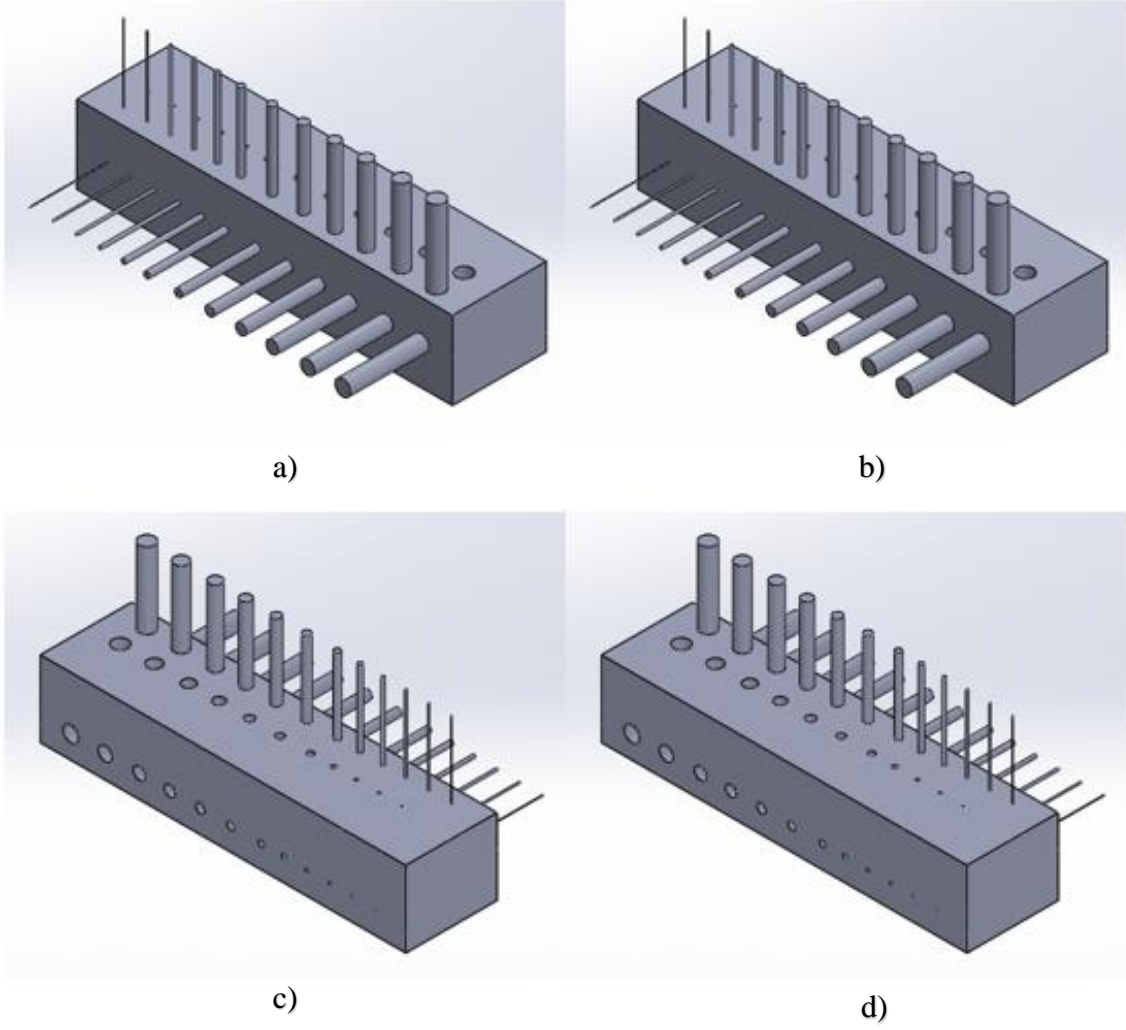
Resim 3.1’de görülebileceği üzere ilk model üzerinde 0,05 mm’den 1 mm’ye kadar çeşitli unsurlar ve delikler konumlandırılmıştır. Bu model ile hem çıkıntı unsurların imal yönünde ve zemine paralel hem de delik unsurların aynı mantıkla imal yönünde ve zemine paralel şekilde destek unsur kullanılmaksızın üretilebilirliği test edilmiştir.



Resim 3.1. Çıkıntı ve delik unsurların üretim değerlendirilmesi için hazırlanmış birinci model

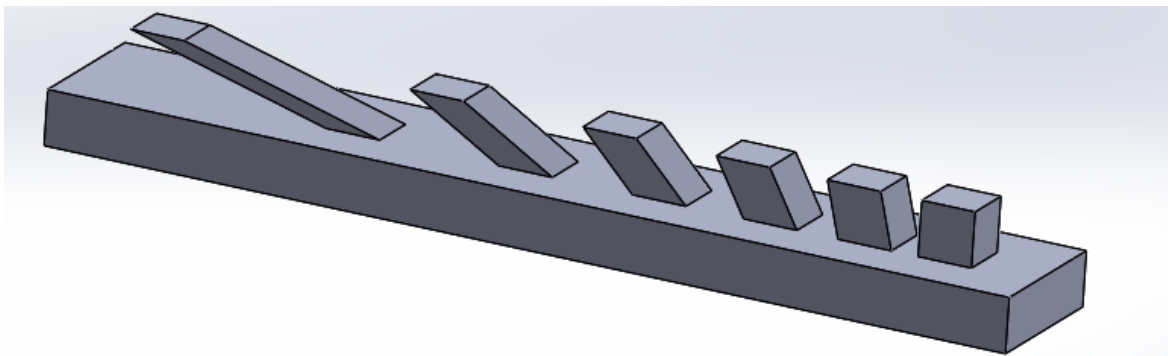
İlk model de tasarlanmış unsurlar:

- İmal yönünde unsur : 1 – 0,9 – 0,8 – 0,7 – 0,6 – 0,5 – 0,4 – 0,3 – 0,2 – 0,15 – 0,1 – 0,05 (Resim 3.2a)
- Zemine paralel unsur : 1 – 0,9 – 0,8 – 0,7 – 0,6 – 0,5 – 0,4 – 0,3 – 0,2 – 0,15 – 0,1 – 0,05 (Resim 3.2b)
- İmal yönünde delik : 1 – 0,9 – 0,8 – 0,7 – 0,6 – 0,5 – 0,4 – 0,3 – 0,2 – 0,15 – 0,1 – 0,05 (Resim 3.2c)
- Zemine paralel delik : 1 – 0,9 – 0,8 – 0,7 – 0,6 – 0,5 – 0,4 – 0,3 – 0,2 – 0,15 – 0,1 – 0,05 (Resim 3.2d)



Resim 3.2. Model 1 üzerindeki unsurlar; (a) imal yönünde çıkıntı unsur, (b) zemine paralel çıkıntı unsur, (c) imal yönünde delik, (d) zemine paralel delik

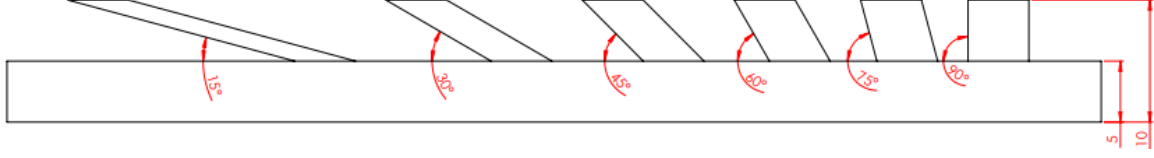
İkinci model ise  $15^\circ$ 'den  $90^\circ$ 'ye zemin ile açı yapan sırayla  $15^\circ$  artan unsur takımını barındıracak şekilde tasarlanmıştır. İkinci modelin izometrik görüntüsü Resim 3.3'te verilmiştir.



Resim 3.3. Açılı unsurların test edilmesi için tasarlanmış olan ikinci model

İkinci modelde tasarlanmış unsurlar:

- Unsurun zemin ile yaptığı açı:  $90^\circ - 75^\circ - 60^\circ - 45^\circ - 30^\circ - 15^\circ$  (Resim 3.4)



Resim 3.4. Model 2 açılı unsurlar soldan sağa artarak giden unsur dizilimi

Çalışmada toz malzemesi olarak AlSi10Mg seçilmiş olup kimyasal içeriği Çizelge 3.1’de verilmiştir. Üretimde kullanılan tozun boyutsal dağılımı 20-70  $\mu\text{m}$  arasında değişirken ortalama toz boyutu 30  $\mu\text{m}$ ’dir.

Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan AlSi10Mg tozunun kimyasal bileşimi

AlSi10Mg												
Si	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Ti	Ni	Pb	Sn	Cr	Others	Al
9.90	0.45	0.05	0.55	0.45	0.10	0.15	0.05	0.05	0.05	–	0.15	Bal

Üretim Fatih Sultan Mehmet Üniversitesi bünyesindeki Aluteam merkezi tarafından gerçekleştirilmiş olup kullanılan makine EOS firmasının EOS M290 model Seçici Lazer Ergitme makinesidir (Resim 3.5). Çalışma sırasındaki giriş parametreleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

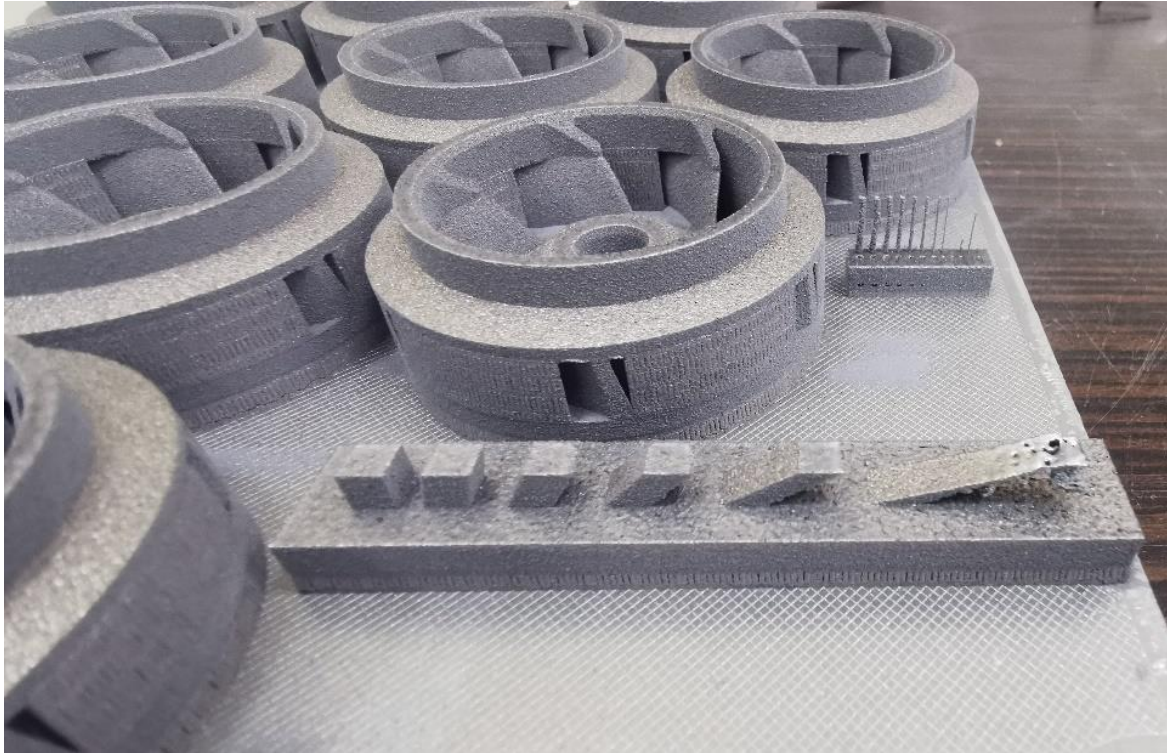


Resim 3.5. Seçici Lazer Ergitme Makinesi (SLE), EOS M290

Çizelge 3.2. Giriş parametreleri

Lazer gücü (Watt)	370
Tarama Aralığı (mm)	0,19
Lazer çapı (mm)	0,1
Tarama Hızı (mm/sn)	1300
Ortalama toz boyutu ( $\mu\text{m}$ )	30
Enerji Yoğunluğu ( $\text{J}/\text{mm}^3$ )	49,93

İmal işlemi yukarıdaki parametreler ışığında gerçekleştirilmiştir. İstenilen parametreler üretici firmanın başka müşterilerinin de talep ettiği parametrelerle aynı olduğundan ve üretilecek ürün tabla kapasitesinin bir hayli altında olduğundan üretici firmanın diğer müşterileri ile aynı anda imal edilmiştir. Resim 3.6'da ürünlerin tabladan ayrılmadan önceki hali verilmiştir.



Resim 3.6. Üretilen numunelerin tabladan ayrılmadan önceki görseli

Üretilen ürünlerde bulunan ince unsurların transfer aşamasında kırılmaması için 3D yazıcıdan taşıma aparatları imal edilmiştir. Bu taşıma aparatlarının görseli Resim 3.7'de verilmiştir.



Resim 3.7. İmal edilen ürünlerin kırılmaması için yapılan taşıma kutuları

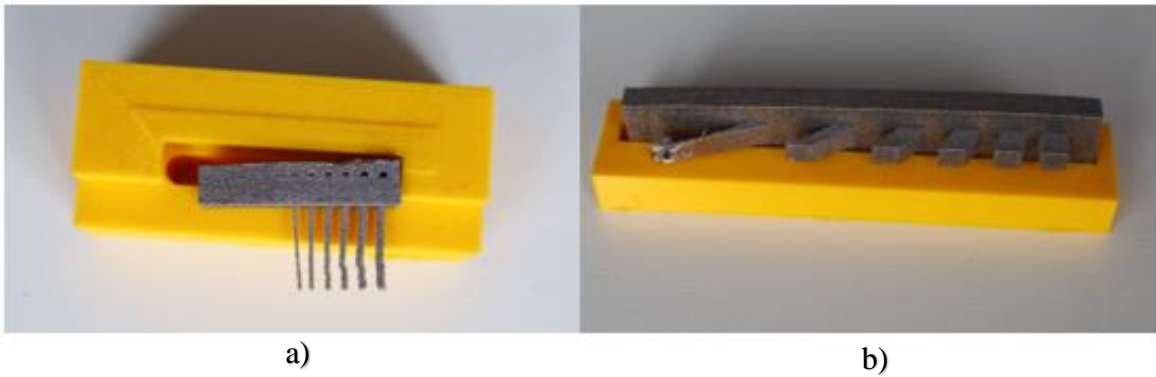
Üretilen ürünlerin ölçüm çalışması için farklı yöntemler düşünülmüştür. İlk etapta Micro CT ile ölçüm alınması düşünülmüşse de kullanılan malzemenin yüksek yansıtıcılığı nedeniyle sağlıklı sonuç alınamayacağı görüşüyle vazgeçilmiştir. Bir diğer seçenek olan koordinat ölçüm cihazı (ing, CMM: coordinate measurement machine) ile ölçüm düşüncesi ise dokunarak ölçüm almasının özellikle çıkıntı unsurların çok ince olmasının getirebileceği olası kırılma riski sebebiyle kullanılmamıştır. Cetvel, kumpas gibi çeşitli manuel ölçüm yönteminin de hem dokunarak ölçme hem de ölçen kişi değişkeni sebebiyle düşünülmemiştir. Bu sebeplerden ötürü mikroskop ile alınan görüntünün piksel sayma programı vasıtasıyla ölçü hesaplama mantığının en sağlıklı çözüm olacağı görüşüyle bu yönteme başvurulmuştur.

Ölçü kontrolü için Andonstar marka AD407 dijital mikroskop kullanılmıştır. Bu mikroskop 4 megapiksel HD görüntü sensörü, endüstriyel lens, ayarlanabilir kafa ve 7 inç LCD ekran, fotoğraf ve video çekme özelliklerine sahip bir dijital mikroskoptur. Çalışma odak mesafesi 5-17 cm aralığındadır. Fotoğraf çözünürlüğü 4032x3024'tür. Mikroskobun görseli Resim 3.8'de verilmiştir. Ürünlerin mikroskop üzerindeki görüntüsü Resim 3.10 ve Resim 3.11'de gösterilmiştir.

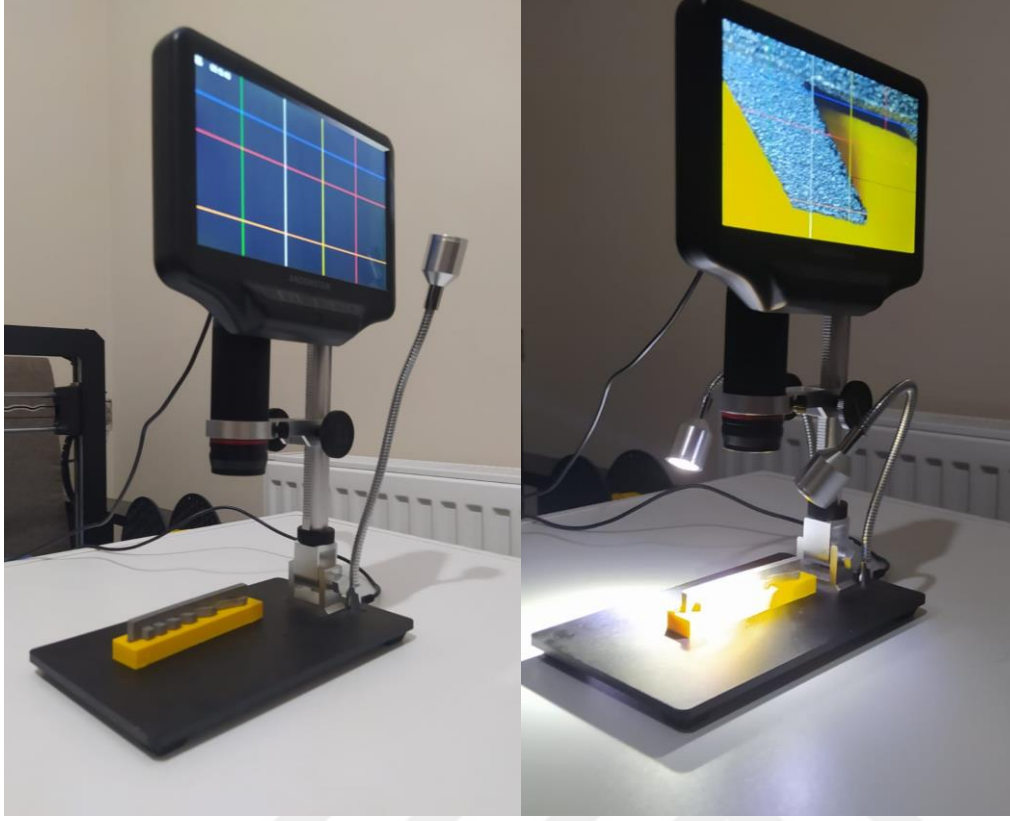


Resim 3.8. Andonstar AD407 dijital mikroskop

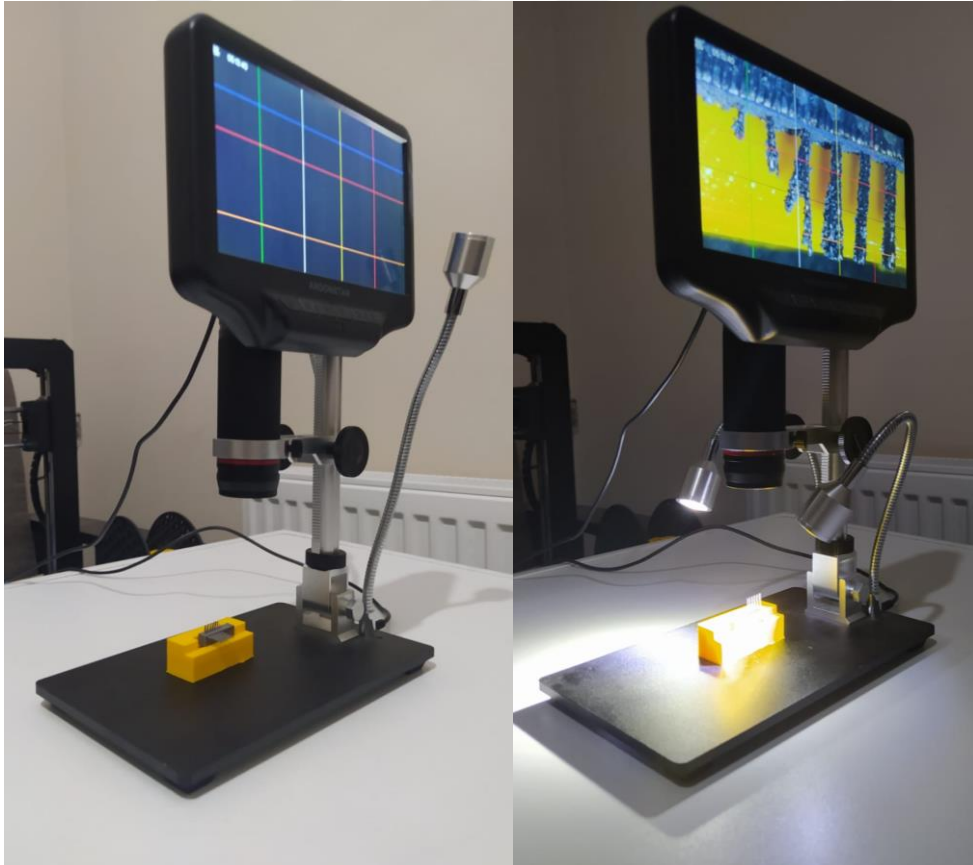
Ölçümler sırasında mikroskop ölçeği belli bir netliğe ayarlanmış olup ölçeğin değişmemesi için 3 boyutlu yazıcı kullanılarak üretilmiş iki parça altlık olarak kullanılmıştır (Resim 3.9). Ürünlerin mikroskopta ölçüm esnasındaki görüntüleri Resim 3.10 ve Resim 3.11’de verilmiştir.



Resim 3.9. Mikroskop ölçümlerinde kullanılan 3D yazıcı ile üretilmiş altlıklar: (a) birinci model (b) ikinci model

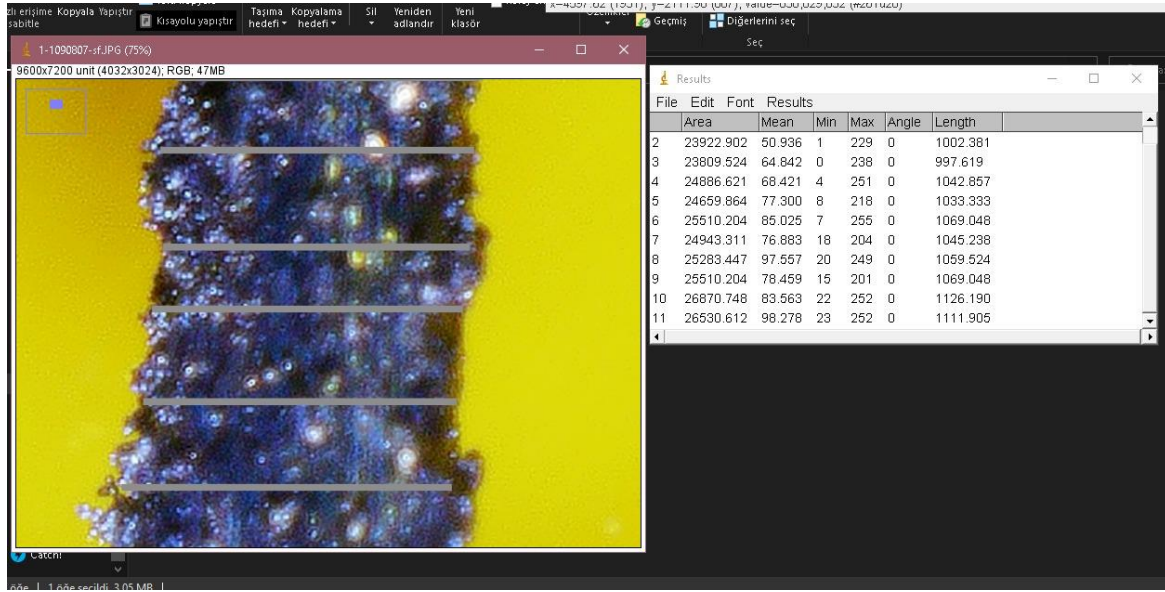


Resim 3.10. Açılı unsurun mikroskop üzerindeki görseli



Resim 3.11. Çıkıntı unsurun mikroskop üzerindeki görüntüsü

Sonuçlar Image J programı vasıtasıyla alınan görüntülerin piksel sayımı neticesinde tespit edilmiştir. Program görüntü içerisinde ölçüsü bilinen bir parametre baz alınarak ölçülmesi istenen unsurun neticelendirilmesi mantığıyla çalışmaktadır. Bu programda baz alınan ölçümün görüntü içerisindeki pikseli sayılır ve bilinen ölçüye karşılık gelen piksel tespit edilir. Sonrasında belirlenmek istenen unsurun pikseli sayılarak karşılaştırma yöntemi ile sonuç belirlenir. İnceleme esnasındaki görsel Resim 3.12’de verilmiştir.



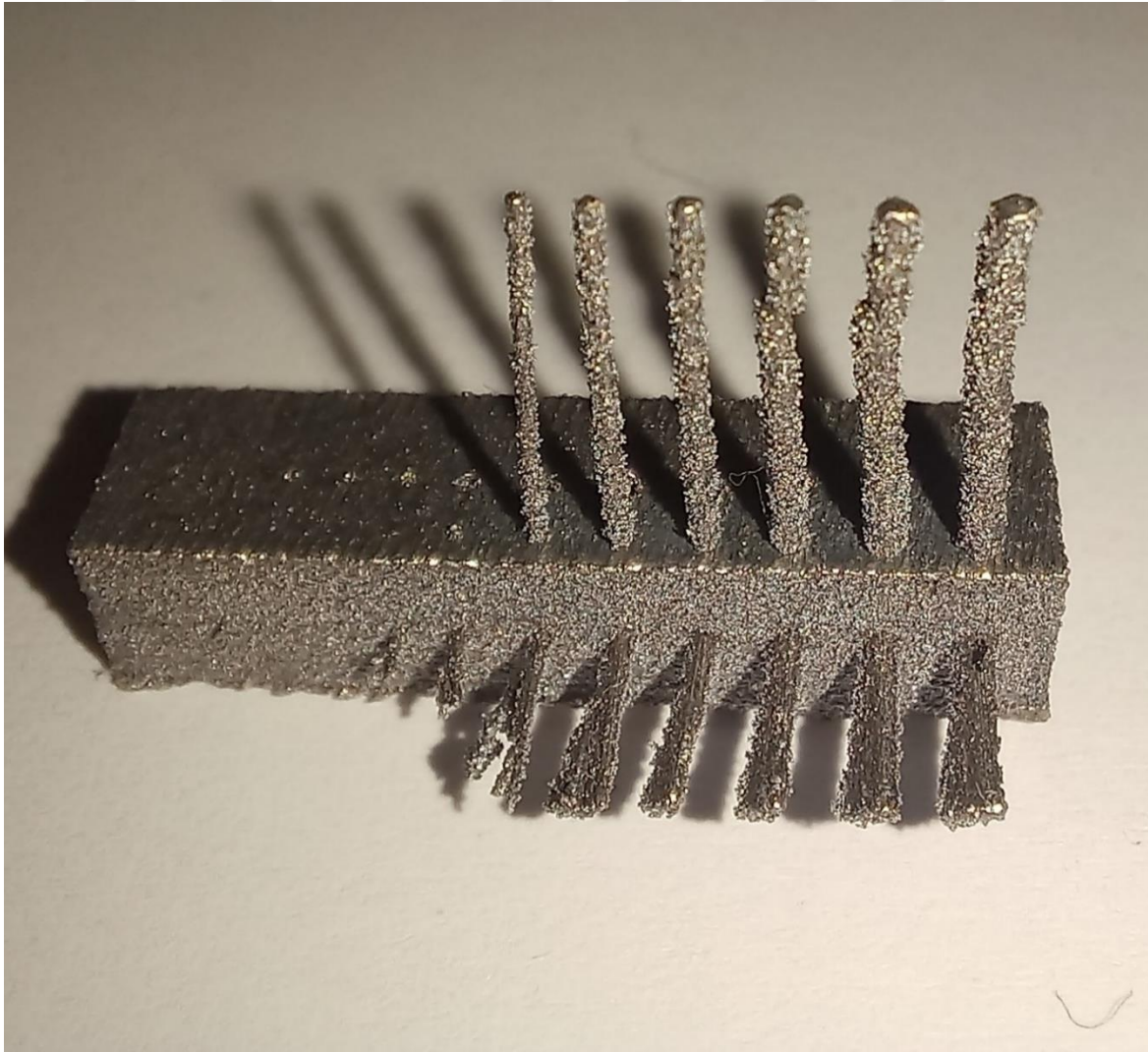
Resim 3.12. Image J programında ölçüm



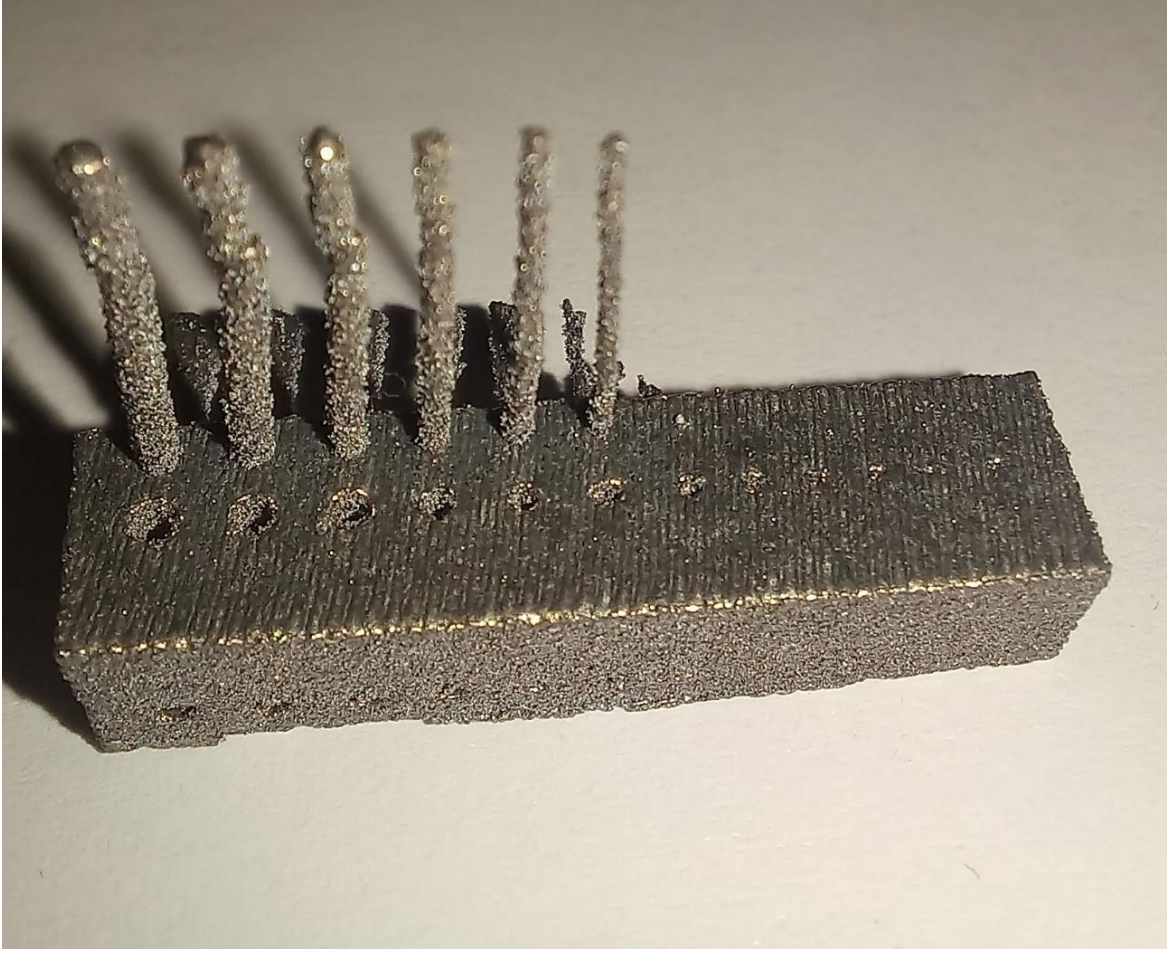
#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Seçici lazer ergitme metodunun alt limitlerini belirlemek amacıyla yapılan bu çalışmada ilk adımda tasarlanan ürünler imal edilmiştir. Sonrasında imal edilen ürünlere ölçüm analizi yapıp tasarımıyla karşılaştırma yapılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

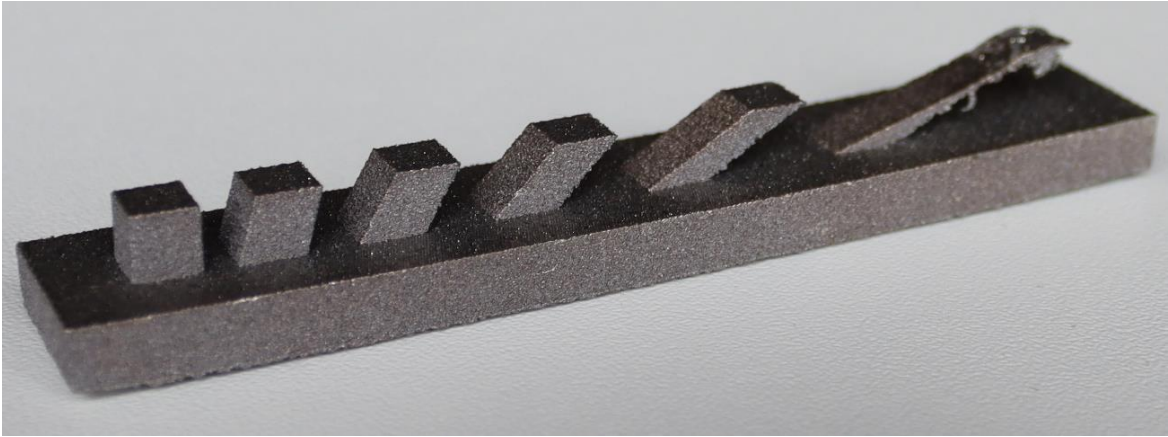
Çalışmada iki model tasarlanmıştır. İlk modelde imal edilebilecek en küçük delik ve çıkıntı unsur tespit edilmeye çalışılırken ikinci model ile destek kullanılmadan üretilebilecek en düşük açıyı saptamak amaçlanmıştır. Üretilen ilk model Resim 4.1 ve Resim 4.2’de, ikinci model ise Resim 4.3’te verilmiştir.



Resim 4.1. Üretilen ilk modelin önden görünümü

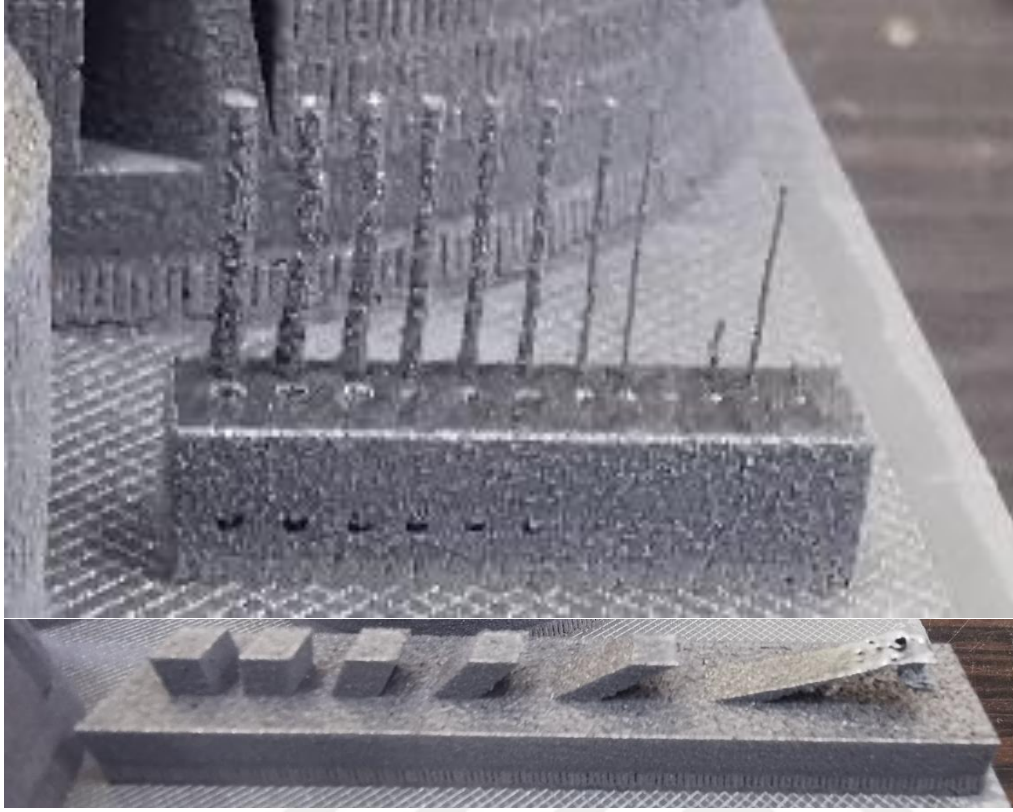


Resim 4.2. Üretilen ilk modelin arkadan görünümü



Resim 4.3. Üretilen ikinci model

En küçük unsurların tespiti amacıyla üretilen ilk modelde çok küçük unsurların üretilebileceği görülmektedir. Bu unsurlardan bazılarının ürünü tabladan ayırma işlemi sırasında kırıldığını dolayısıyla ölçü kontrolü esnasında değerlendirilmeye alınmadığını belirtmekte fayda vardır (Resim 4.4).



Resim 4.4. Üretilen numunelerin tabladan çıkarılmadan önceki hali

Yukarıdaki görsellerden de görüleceği üzere çıkan ürünler önemli derecede yüzey pürüzlülüğüne sahiptir. Yöntemin doğası gereği yüksek yüzey pürüzlülüğünde çıkan ürünlerin daha sağlıklı değerlendirilmesi için ölçüm sonuçlarının irdelenmesi iki farklı bakış açısıyla yapılmış olup çıkan sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

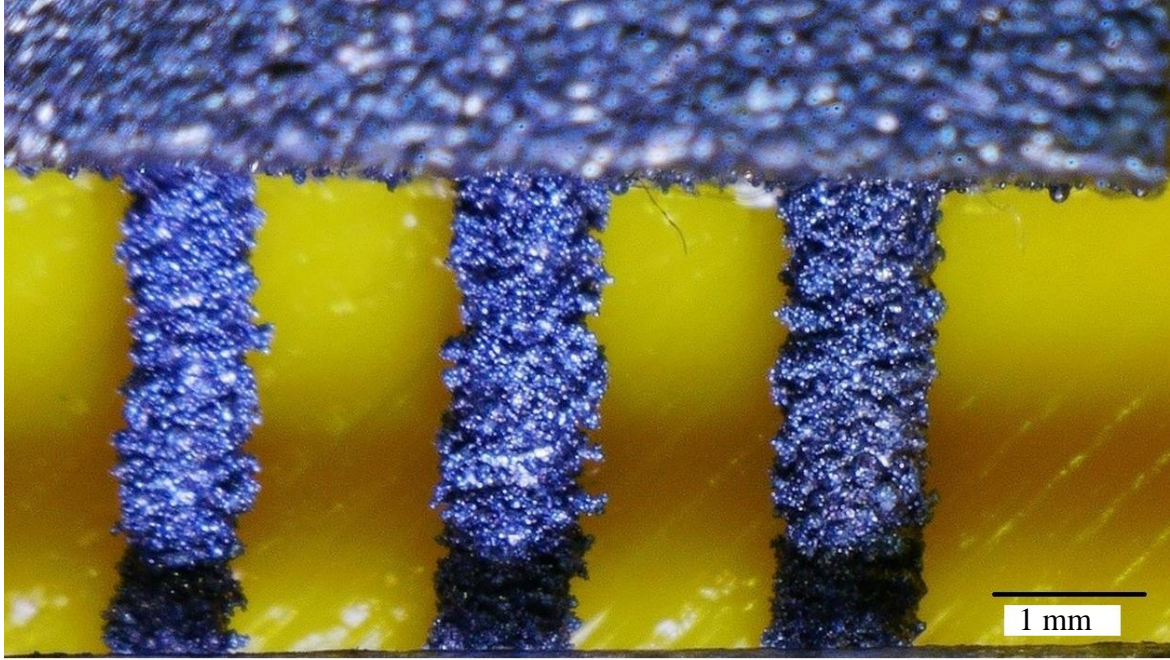
Yukarıda bahsedilen yaklaşımlardan ilki olan yöntemde çıktıların çapaklı halinin değerlendirildiği yaklaşım, ikinci yöntemde ise yapışan tozların dikkate alınmadan belirlendiği yaklaşım benimsenmiştir. Aşağıda her iki yaklaşımla belirlenen sonuçlar paylaşılmıştır.

#### **4.1. Unsur Değerlendirmeleri**

##### **4.1.1. Ekseni imal yönüne paralel olarak üretilen unsurlar (üst unsurlar)**

İlk modelde en küçük unsur ve deliklerin farklı yönlerde imal edilebilirliğinin araştırıldığından bahsedilmişti. İlk değerlendirilecek olan olgu imal yönünde üretilebilecek en küçük unsurlardır. İncelenen tüm unsur sonuçlarına bakıldığında bu bölüm sonuçları en

başarılı sonuçlar olarak göze çarpmaktadır. Resim 4.5 ve Resim 4.6'da imal yönündeki unsurların mikroskop incelemesindeki görüntüleri verilmiştir.

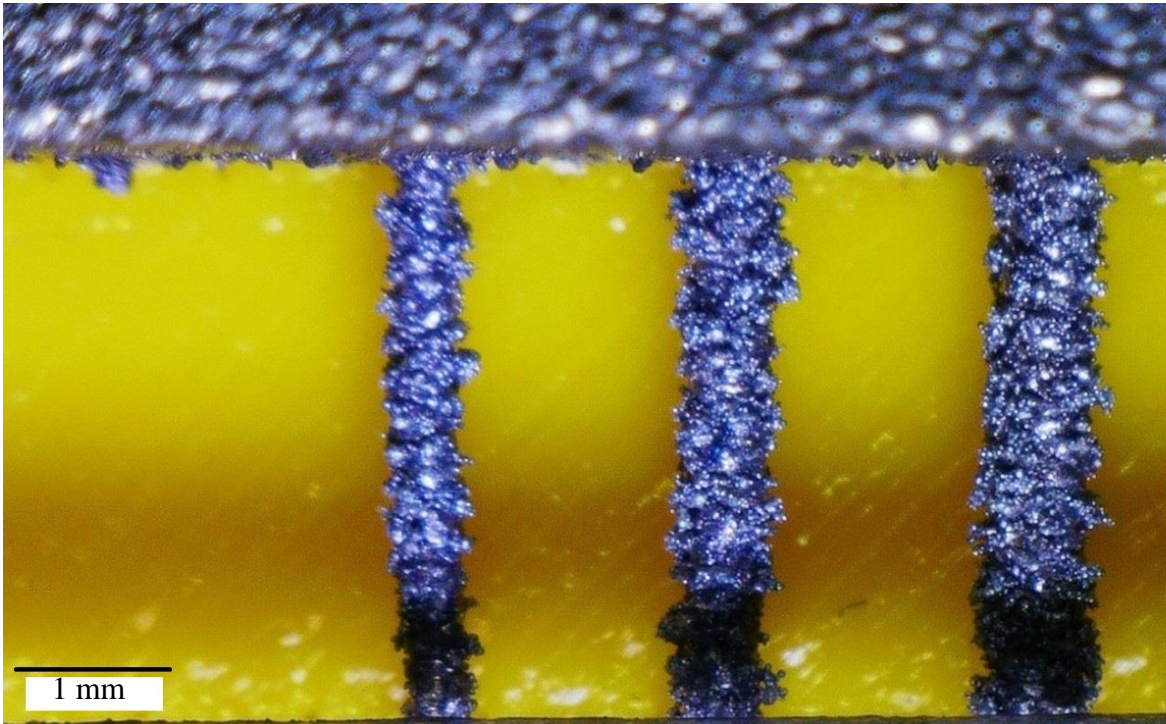


Ø0,8 mm

Ø0,9 mm

Ø1 mm

Resim 4.5. İmal yönünde üretilen unsurlar



Ø0,4 mm

Ø0,5 mm

Ø0,6 mm

Ø0,7 mm

Resim 4.6. İmal yönünde üretilen unsurlar

Resim 4.6'ya bakıldığında 0,5 mm çapındaki unsurun başarılı bir şekilde üretildiği buna karşın 0,4 mm çapındaki unsurun üretilmediği görülmektedir. Tabladan ayırma işlemi esnasında kırılan unsurlar olduğu görülmüştür.

İki farklı yaklaşımla değerlendirilen sonuçlardan her bir çaptaki unsur için elde edilen bulgular aşağıda değerlendirilmiştir.

#### Ø1,00 mm

Çapakların dikkate alındığı değerlendirmede farklı noktalardan ölçüm alınmış olup ortalama değerin 1,02 mm geldiği ve %1,73'lük bir sapma olduğu görülmektedir. Ölçüm noktalarından alınan en yüksek değerin 1,08 mm, en düşük değerin ise 0,95 mm olduğu görülmektedir. Unsurun en dip noktasında tam ergimemiş tozların birikmesi sonucu daha yüksek sonuçların buradan alındığı kaydedilmelidir.

Çapakların dikkate alınmadığı değerlendirilmenin sonucunda ise unsur çapının ortalama 1,01 mm geldiği ve %1,05'lük küçük bir sapmanın söz konusu olduğu görülmektedir. Buradaki en yüksek değere bakıldığında 1,06 mm en düşük değerin ise 0,94 mm olduğu görülmektedir.

#### Ø0,9 mm

İlk setin ikinci unsuru olan 0,9 mm çapındaki unsurun çapaklar dikkate alınarak yapılan ölçüm sonuçlarına bakıldığında ortalama değerin 0,96 mm geldiği ve %6,49'lük bir sapma olduğu görülmektedir. Ölçüm noktalarından alınan en yüksek değer 1,11 mm, en düşük değer ise 0,83 mm şeklinde kayda geçmiştir.

Çapakların dikkate alınmadığı değerlendirilmede ise sonucun ortalama olarak 0,98 mm geldiği görülmektedir. Bu sonuç tasarıma göre %2,38'lik bir sapma ile farklıdır. Ölçümlerde en yüksek değer 0,94 mm, en düşük değer ise 0,82 mm olarak ölçülmüştür.

#### Ø0,8 mm

Unsurun çapaklı haliyle değerlendirmesinde ortalama değer 0,85 mm olarak saptanmıştır. Bu sonuç %5,63'lük bir sapmaya tekabül etmektedir. Ölçüm noktalarından alınan en yüksek değer 0,94 mm, en düşük değer ise 0,74 mm'dir.

Çapakların dikkate alınmadığı durumda sonucun 0,81 mm geldiği ve %1,49'luk yüksek yüzdeli bir başarı söz konusu olduğu görülmektedir. Sonuçlar arasında en yüksek değer 0,86 mm, en düşük değer 0,76 mm olarak kayda geçmiştir.

#### Ø0,7 mm

Çapakların dikkate alınarak değerlendirildiği 0,7 mm çapındaki dördüncü unsur için ortalama sonucun 0,75 mm geldiği ve %7,27'lik bir sapma olduğu görülmektedir. En yüksek değer 0,86 mm, en düşük değer ise 0,67 mm'dir.

İkinci yaklaşımda ise sonucun 0,72 mm geldiği ve %2,98'lik başarılı üretimin bu unsur içinde devam ettiği görülmektedir. Buradaki en yüksek değere bakıldığında 0,76 mm, en düşük değer ise 0,67 mm olduğu görülmektedir.

#### Ø0,6 mm

Unsurda çapaklı haldeki değerlendirmenin ortalama sonucu 0,62 mm'dir. Bu sapmanın %2,88 olduğu anlamına gelir. Alınan en yüksek değer 0,74 mm, en düşük değer ise 0,51 mm'dir.

Çapaksız halindeki sonuçlarda %1,39'luk sapma ile başarılı bir sonuç olan 0,61 mm çapında unsur üretilebilmiştir. Buradaki en yüksek değere bakıldığında 0,66 mm en düşük değer ise 0,57 mm olduğu görülmektedir.

#### Ø0,5 mm

Başarılı bir şekilde üretilebilen en küçük bu unsurun ortalama değeri 0,49 mm'dir. Sapmanın %0,95 olduğu hesaplanmıştır. Ölçüm noktalarından alınan en yüksek değer 0,60 mm, en düşük değer ise 0,40 mm olduğu görülmektedir.

Çapakların dikkate alınmadığı değerlendirilmenin ise 0,47 mm geldiği ve %6,43'lük sapmaya sahip bir başarı söz konusu olduğu görülmektedir. Buradaki en yüksek değere bakıldığında 0,54 mm en düşük değer ise 0,40 mm olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'den de görüleceği üzere 0,5 mm ve üzerindeki unsurlar başarılı

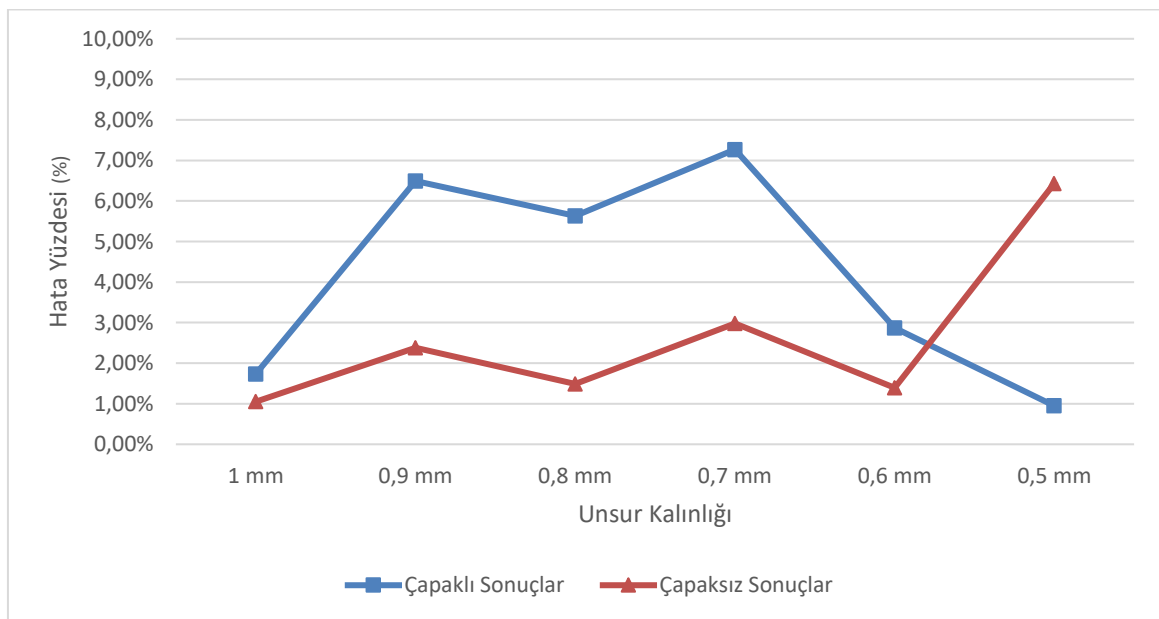
bir şekilde üretilmiştir. Unsurlar içerisinde tasarıma en uzak kalan unsur bile %6,43'lük bir pay ile 0,5 mm'dir. Çapaklar dikkate alınarak yapılan değerlendirme de bile en yüksek standart sapmanın 0,07'de kalmış olması oldukça stabil sonuçlar elde edildiğini göstermektedir (Şekil 4.1).

Çizelge 4.1. İmal yönünde üretilen çıkıntı unsur sonuçları (çapaklar unsur üzerinde)

	Min. Çap (mm)	Maks. Çap (mm)	Ort. Çap (mm)	Stan. Sap.	Hata Yüzdesi (%)
1,0 mm	0,95	1,08	1,02	0,03	1,73
0,9 mm	0,83	1,11	0,96	0,07	6,49
0,8 mm	0,74	0,94	0,85	0,05	5,63
0,7 mm	0,67	0,86	0,75	0,05	7,27
0,6 mm	0,51	0,74	0,62	0,06	2,87
0,5 mm	0,40	0,60	0,50	0,05	0,95

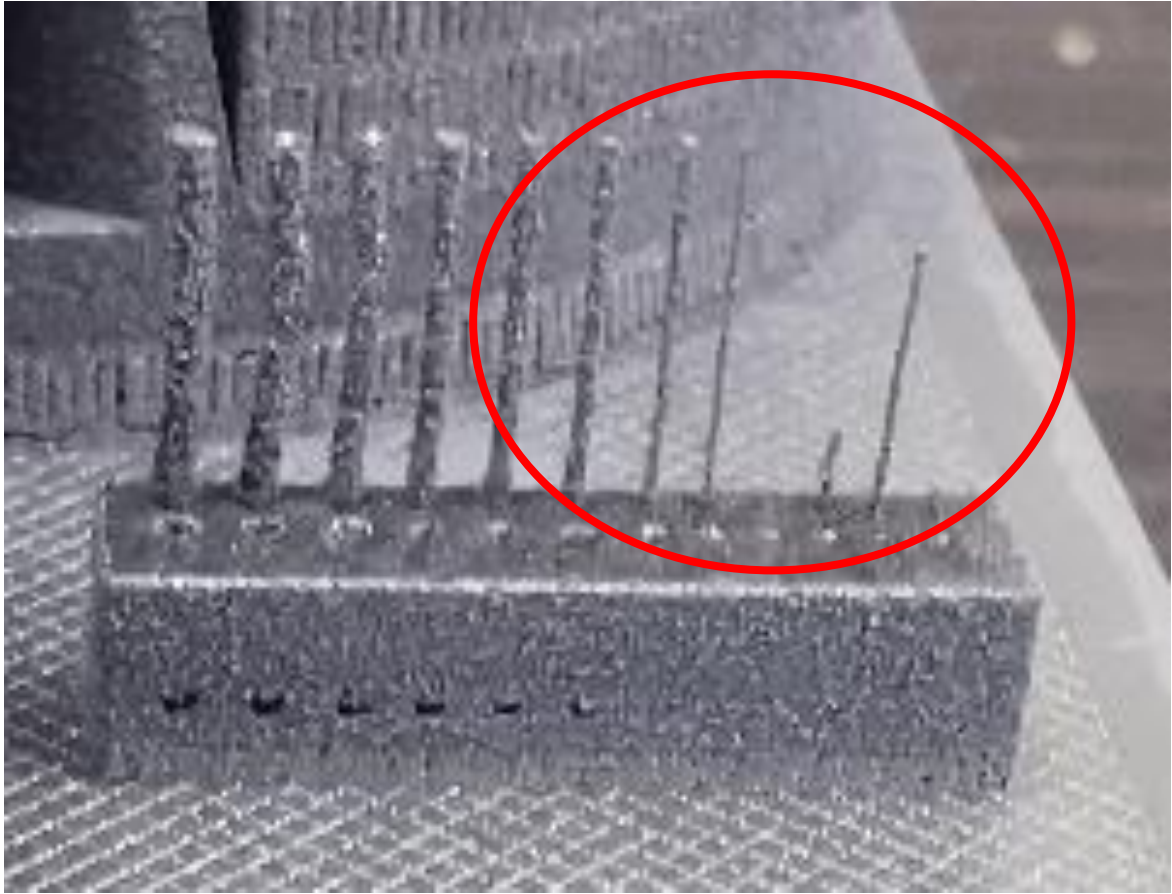
Çizelge 4.2. İmal yönünde üretilen çıkıntı unsur sonuçları (çapaksız)

	Min. Çap (mm)	Maks. Çap (mm)	Ort. Çap (mm)	Stan. Sap.	Hata Yüzdesi (%)
1,0 mm	0,94	1,06	1,01	0,03	1,05
0,9 mm	0,82	0,98	0,92	0,03	2,38
0,8 mm	0,76	0,86	0,81	0,03	1,49
0,7 mm	0,67	0,76	0,72	0,02	2,98
0,6 mm	0,57	0,66	0,61	0,02	1,39
0,5 mm	0,40	0,54	0,47	0,04	6,43



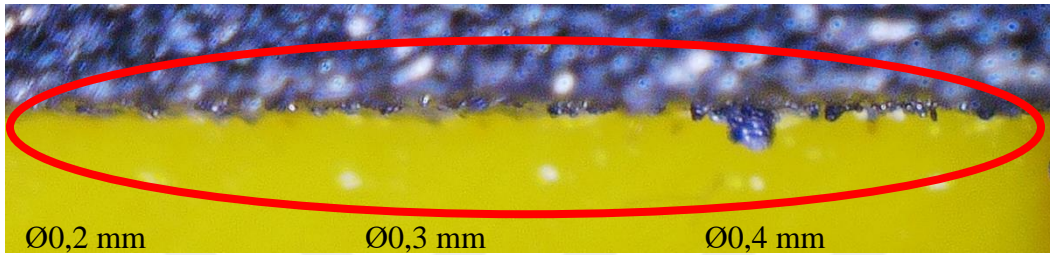
Şekil 4.1. Ekseni imal yönünde unsurların hata paylarının grafiksel gösterimi

İmal yönünde üretilen unsurlar incelendiğinde daha düşük çapta unsurların da üretilebildiği fakat tabladan ayırma işlemi esnasında kırıldığını not etmekte fayda vardır. Söz konusu unsurlar için Resim 4.7'den de görülebileceği gibi 0,4 ve 0,3 mm çapındaki unsurlarda üretilebilmiştir. Hatta 0,1 mm çapındaki unsurun da üretilebildiği fakat istenilen boyda üretilemediği görülmektedir. Bu durum daha düşük unsur üretimindeki ilk sınırlayıcı faktöre götürmektedir ve bu da unsurun en boy oranıdır (ing: aspect ratio). Daha önce literatürde bu noktaya Virdyawan ve arkadaşlarının da [84] değindiği gibi yüksek en boy oranları yöntem için bir sınırlayıcı faktördür. Üretici firmadan üretim öncesi tasarım ile alakalı alınan geri bildirimde en boy oranının 1/10'dan yüksek olması durumunda başarılı üretim gerçekleştirilemeyeceği bilgisi alınmıştır. Unsur yüksekliğinin tasarımda 10 mm olarak belirlendiği de hesaba katılınca ilk unsur hariç diğer unsurların hiç birisinin üretilemeyeceği firma tarafından söylenmiş fakat çıkan sonuçlara bakıldığında bu oranın 0,5/10 hesabıyla 1/20 olarak güncellenmesinin yerinde olacağı ilk kazanım olarak göze çarpmaktadır. Üretilemeyen unsurlar için ilk akla gelen sınırlayıcı faktör olan en-boy oranını not etmek önemlidir.



Resim 4.7. İmal yönünde üretilen ve daha sonra kırılan unsurlar

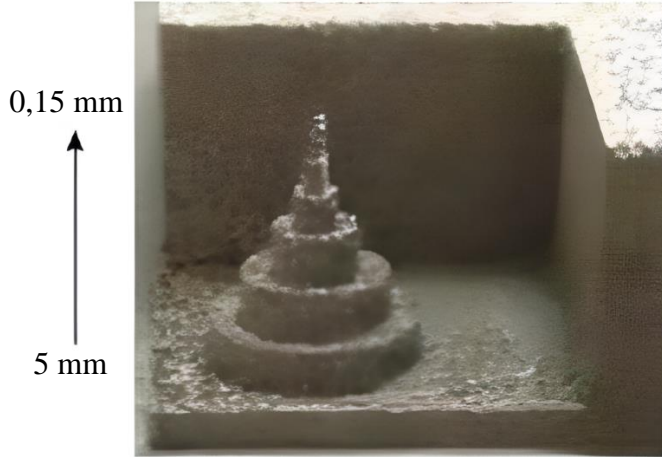
Tabladan ayırma işlemi sırasında kırılan fakat Resim 4.7’de istenilen boyda üretilebilmiş olan 0,4 ve 0,3 mm çapındaki unsurlar için ise yüksek en-boy oranının etkili olduğu düşünülmektedir. Çapın düşük yüksekliğin ise yüksek olması dolayısıyla zayıf kalan unsurlar ayırma işlemi sırasında oluşan kuvvete dayanamayarak kırılmıştır. Bu durum unsurların üretilebilmiş olsa da çok zayıf kaldığı gerçeğini ortaya koymaktadır. Resim 4.8 incelendiğinde 0,4 mm’nin en alt noktanın biraz üzerinden 0,3 mm’nin ise tam dipten kırıldığı görülmektedir.



Resim 4.8. İmal yönünde üretilen ve üretilmeyen unsurlar

Bir diğer sınırlayıcı faktör ise yine literatürde sıkça üzerinde durulan lazer odak çapıdır. Parametre setinde de (Çizelge 3.2) verildiği gibi çalışmada kullanılan lazer odak çapı 0,5 mm’dir. Bu kapsamda başarılı şekilde üretilen unsura bakıldığında literatürün tekrar doğrulandığı görülmüştür, çünkü imal yönünde üretilebilen en küçük unsur 0,5 mm’dir. Tabladan ayırma işlemi sırasında kırılan unsurlarda dışarıda bırakıldığında daha düşük çaptaki unsurlar başarılı bir şekilde üretilmemiş olarak kabul edilmiştir. Bu sonuçlar ışığında Kaliamoorthy ve arkadaşlarının [73] yapmış olduğu 0,6 mm çapının altındaki unsurların üretilmeyeceği bilgisi, 0,5 mm çapındaki unsurların başarılı bir şekilde üretilmediğini rapor eden Kamarudin ve arkadaşlarının [74] çalışması ve 0,5 mm çapındaki unsurları yüksek sapma ile üretebilmiş Kruth ve arkadaşlarının [72] yayını daha da ileri taşınmıştır.

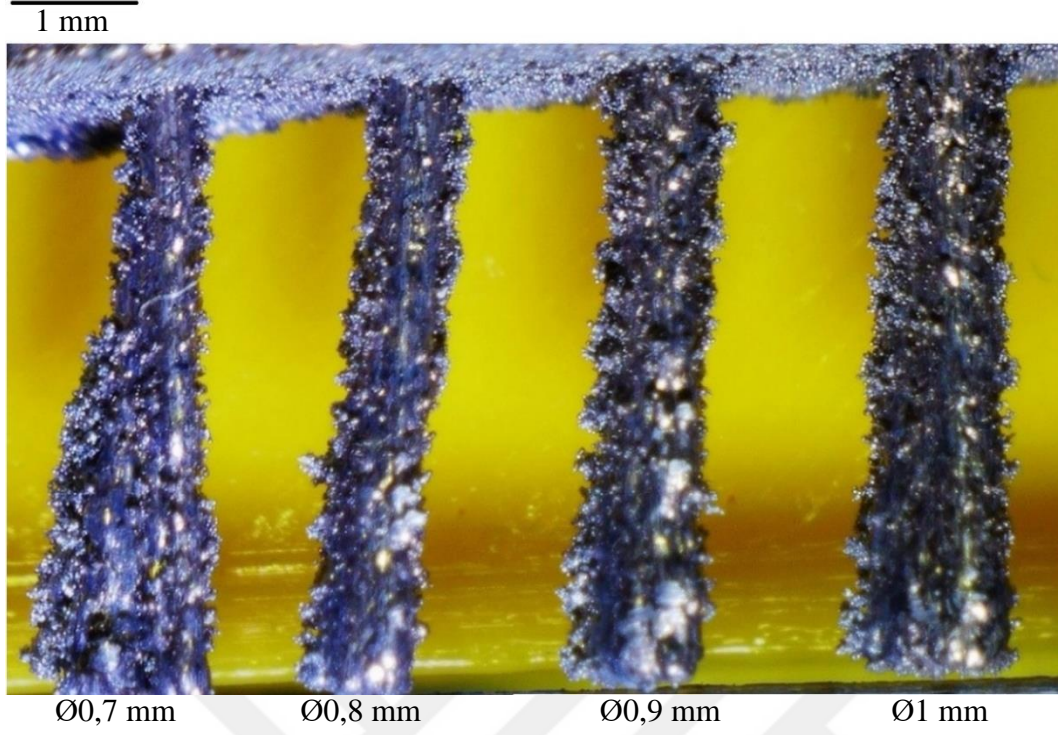
Diğer çalışmalara karşın Wang ve arkadaşlarının [77] 316L paslanmaz ile yaptığı çalışmadaki değerlerin yapılan bu çalışmadan daha başarılı sonuçlar ortaya koyduğunu belirtmekte fayda vardır. Çalışmada 0,15 mm’den 5 mm’ye kadar tasarlanmış unsurların başarılı bir şekilde üretildiği bildirilmiştir (Resim 4.9). Bu farklılığın iki sebebi olduğu düşünülmektedir. Birincisi kullanılan malzemenin yöntem için daha uygun olması (316L) ikincisi ise üretilen unsurların boylarının daha düşük olmasıdır. Buda daha önce bahsedilen en-boy oranına bağlanmıştır. Yeniden imalat yapılması durumunda en-boy oranının optimize edilmesi gerektiği altı çizili olarak not edilmelidir.



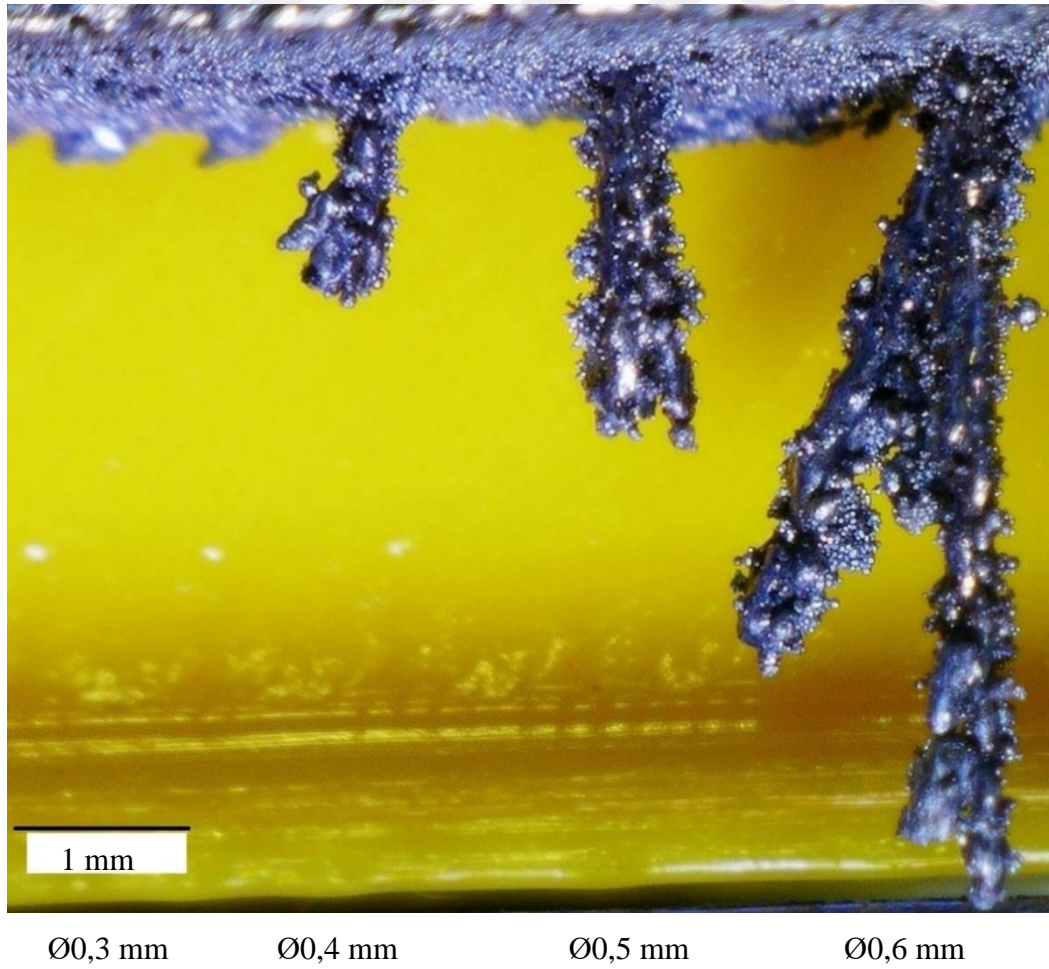
Resim 4.9. Wang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada imal yönünde üretilmiş silindirik unsurlar [77]

#### 4.1.2. Ekseni imal yönüne dik olarak üretilen unsurlar (yan unsurlar)

En küçük unsur incelemesinde destek olmaksızın zemine paralel unsur üretebilme kabiliyetine bakıldığında ne yazık ki tatmin edici sonuçlara ulaşılamamıştır. Resim 4.10 ve Resim 4.11'e bakıldığında 1 mm'den 50  $\mu\text{m}$ 'ye kadar zemine paralel oluşturulmuş unsurların hiçbirinin başarılı bir şekilde üretilmediği, önemli derecede deformasyona uğradığı hem resimlerden hem de ölçüm sonuçlarından açık bir şekilde görülmektedir. Tüm unsurlar için dip kısımdan uca doğru deformasyonun arttığı anlaşılmaktadır. Unsur dibinden uca doğru gittikçe artan deformasyonun imal yönünde ortaya çıktığı görülmektedir. Bu durumun temel sebebi tamamı desteksiz olan unsurun uca doğru zayıflamasıdır. Kısmi ergimiş tozların ergimemiş tozlarla bağ kurması sonucu mukavim olmayan unsurlar etkilenerek unsurlarda imal yönünde artan bir deformasyon olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3'de ve bu sonuçların grafiksel gösterimi de Şekil 4.2'de verilmiştir.



Resim 4.10. Zemine paralel üretilen unsurlar



Resim 4.11. Zemine paralel üretilen unsurlar

Deformasyonun dolayısıyla çapakların fazla olması sebebiyle bir önceki unsur incelemesinde kullanılmış olan çapaksız ölçüm yaklaşımı bu kısımda yapılmamıştır. Sonuçlara bakıldığında:

#### Ø1,0 mm

Unsur dibinden uca doğru farklı noktalardan alınan ölçümlerin ortalama değerinin 1,21 mm olduğu ve bu değer %20,86'lık bir sapmaya karşılık geldiği belirlenmiştir. Üretilen en büyük unsurun bu olduğu dikkate alındığında başarılı bir sonucun ortaya çıkmadığı aşıkardır. Tabanda değerler görece daha düşükken uç kısımda ciddi bir artış olduğu saptanmıştır. Ölçülen en düşük değer 0,99 mm iken en yüksek değer 1,46 mm şeklinde ortaya çıkmıştır.

#### Ø0,9 mm

Tıpkı 1 mm'de olduğu gibi 0,9 mm'lik unsur içinde aynı deformasyon durumu söz konusudur. Ortalama sonucun 1,12 mm olduğu ve %24,17 gibi çok yüksek bir sapma ile hedeflenen boyuttan epey uzak kalındığı saptanmıştır. Ölçülen en düşük değer 0,94 iken en yüksek değer 1,35 mm olarak kaydedilmiştir.

#### Ø0,8 mm

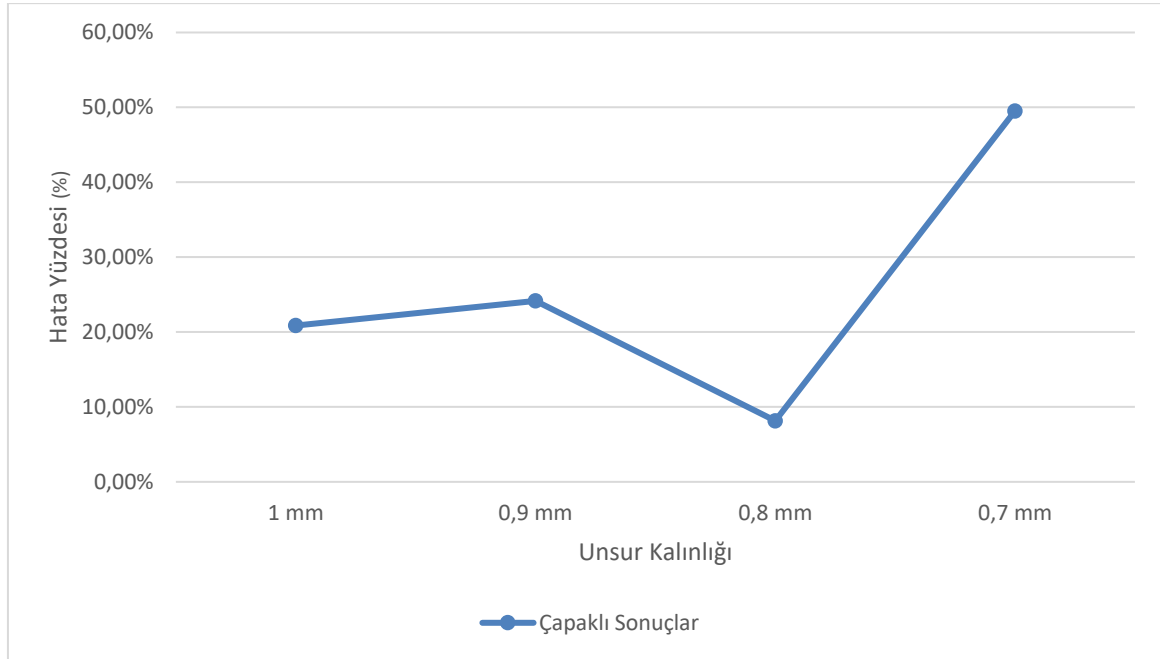
0,8 mm çapındaki unsura bakıldığında 1 mm ve 0,9 mm'den daha başarılı üretim yapıldığı ancak imal yönünde eksenin olması gereken eksenle açığı yaptığı görülmüştür. Yüksek standart sapma ile beraber ortalama değerinde %8,15'lik bir sapma söz konusudur. Ölçülen en düşük değer 0,73 mm, en yüksek değer ise 1,08 mm şeklindedir. Sonuçlar görece istenilen değerlere yakın olsa da geometrik olarak başarılı bir sonuçtan bahsedilememektedir.

#### Ø0,7 mm

0,7 mm çapındaki unsur istenilen uzunluğa yakın bir şekilde üretilen son unsurdur. %49 gibi kabul edilemeyecek bir sapma ile ortalama 1,05 mm değer ortaya çıkmıştır. 0,66 mm en küçük, 1,53 mm en yüksek sonuç ölçülmüştür.

Çizelge 4.3. Ekseni imal tablasına paralel üretilen unsur

	Min. Çap (mm)	Maks. Çap (mm)	Ort. Çap (mm)	Stan. Sap.	Hata Yüzdesi (%)
1,0 mm	0,99	1,46	1,21	0,14	20,86
0,9 mm	0,94	1,35	1,12	0,11	24,17
0,8 mm	0,73	1,08	0,87	0,07	8,15
0,7 mm	0,66	1,53	1,05	0,29	49,52

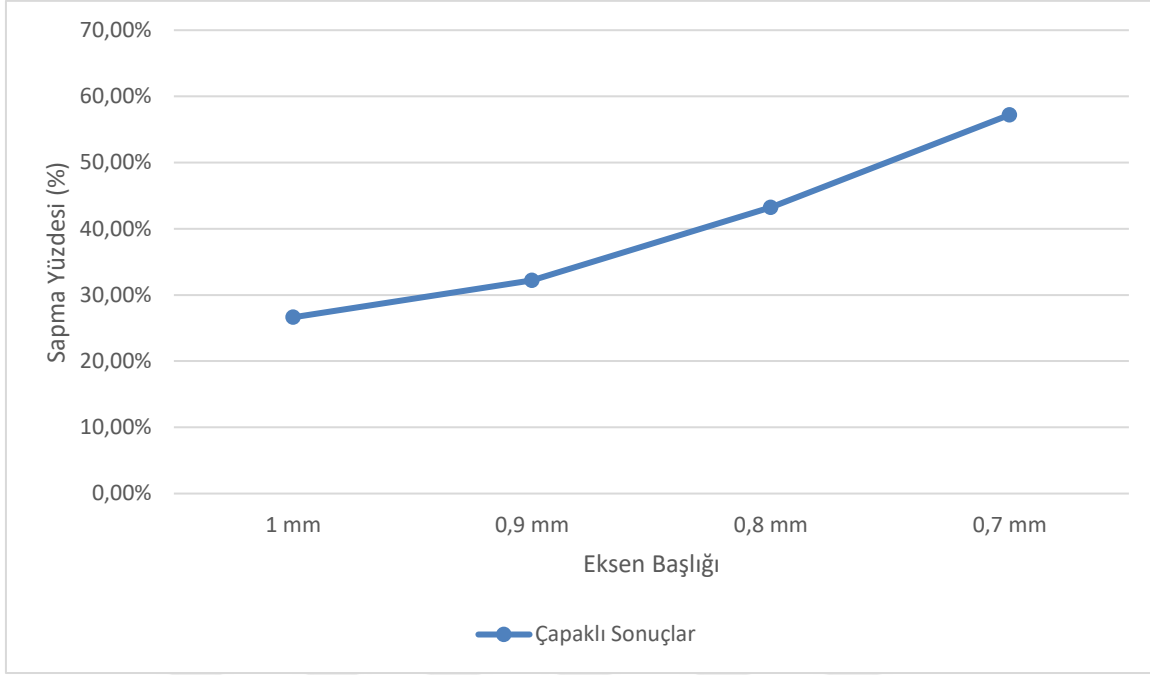


Şekil 4.2. Ekseni zemine paralel unsurların hata paylarının grafiksel gösterimi

Çıkan sonuçlara bakıldığında 0,8 mm çapındaki unsurun başarılı bir şekilde üretildiği görülmektedir. Fakat görseller incelendiğinde (Resim 4.10 ve Resim 4.11) eksenlerin kaydığı ya da unsur çaplarının uca doğru artmış olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu bölümde ayrıca üretilen unsurların uç kısımlarının olması gereken eksenden ne kadar saptığını tespit etmek adına ek bir ölçüm yapılmıştır (Çizelge 4.4). Analiz sonucu ortaya çıkan sapma miktarlarının grafiksel gösterimi Şekil 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Ekseni İmal tablasına paralel üretilen unsur (dış konturun sapmaları)

	Min. Çap (mm)	Maks. Çap (mm)	Ort. Çap (mm)	Stan. Sap.	Hata Yüzdesi (%)
1,0 mm	1,00	1,50	1,27	0,14	26,63
0,9 mm	0,93	1,49	1,19	0,15	32,20
0,8 mm	0,86	1,42	1,15	0,16	43,22
0,7 mm	0,80	1,40	1,10	0,18	57,21

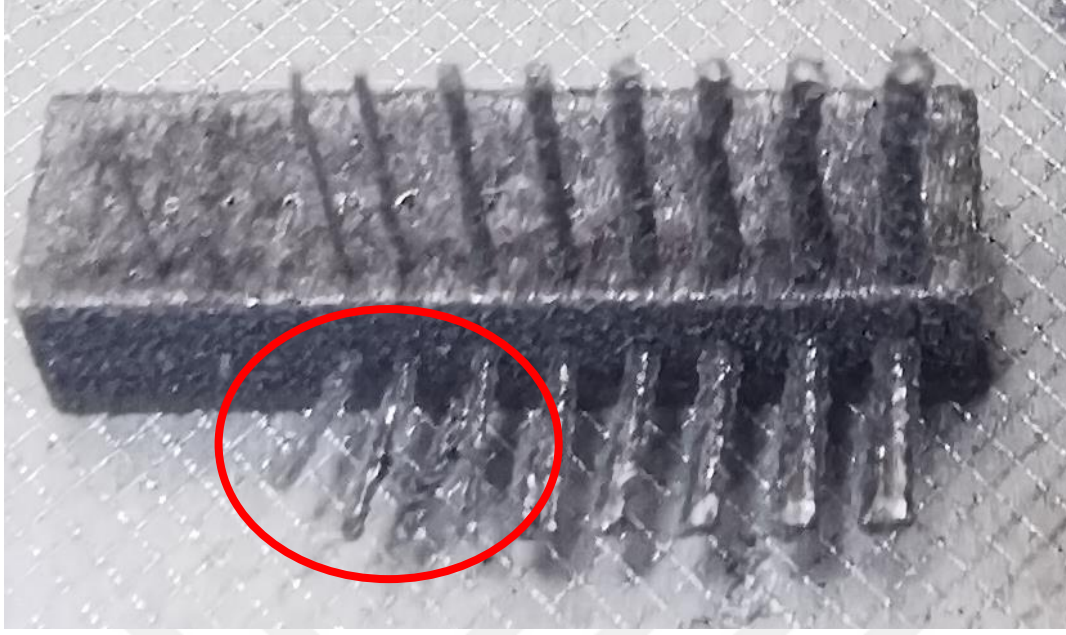


Şekil 4.3. Ekseni zemine paralel unsurların sapma miktarlarının grafiksel gösterimi

Çap ölçümlerine bakıldığında (Şekil 4.2) 0,8 mm çapındaki unsur başarılı bir şekilde üretilmiş gibi görünse de sapma miktarlarının kıyaslandığı grafiğe bakıldığında (Şekil 4.3) unsurun olması gereken ekseninde olmadığı %43,22'lik bir sapma ile üretildiği görülmektedir.

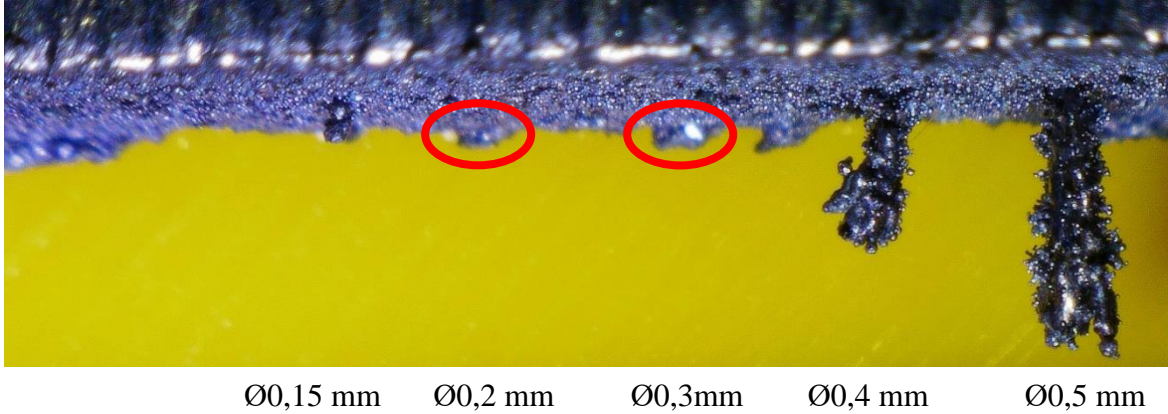
Zemine paralel unsurlar için imal yönünde üretilen unsurlardan farklı bir deformasyon ortaya çıkmıştır. İmal yönündeki unsurlarla kıyaslandığında oldukça başarısız verilerle karşılaşıldığı sonuçlardan da açıkça görülmektedir. Literatüre bakıldığında da oldukça az çalışma yapılması belki de başarısız sonuçların sunulan makalelere yansımamasından gelmektedir. Bu çalışma ile en azından sonraki çalışmalara ışık tutacak sonuçların kayda geçmesi önem arz etmektedir.

Yine imal yönünde üretilen unsurlarda olduğu gibi bu unsur setlerinde de tabladan ayırma işlemi sırasında kırılan unsurlar olduğu görülmüştür. Resim 4.12'de görülen 0,5 mm çapındaki unsurda deforme olup ayrı bir yönde ilerlemiş çıkıntının tabladan ayırmadan önceki görselle (Resim 4.10 ve Resim 4.11) karşılaştırıldığında kırıldığı, aynı şekilde 0,4 mm ve 0,3 mm'lik unsurlarında daha uzun boylarda üretilebildiği fakat ayırma işlemi sonucu kırıldığı görülebilmektedir.



Resim 4.12. Tabladan ayırma esnasında kırılan zemine paralel unsurlar

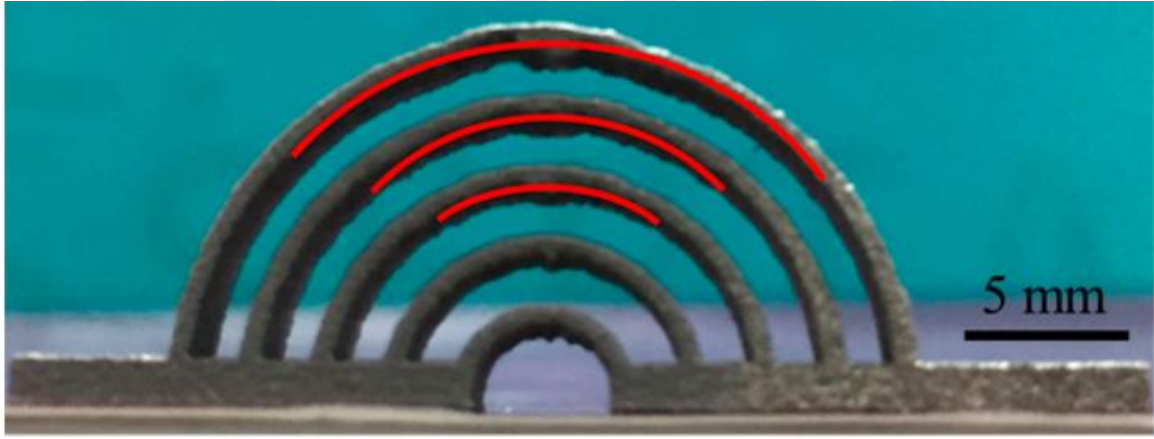
Kırılma noktalarına bakıldığında da imal yönünde üretilen unsurlardan farklı bir durumla karşılaşılmaktadır. Resim 4.13'te kırılan unsurların en dipten kırılmadığı görülmektedir. Zaten stabil olmayan unsurların iç bağlarının da zayıf olması sebebiyle dışarıdan gelen ilk kuvvet sonucunda unsur en zayıf bölgeden kırılmıştır.



Resim 4.13. Zemine paralel üretilen unsurlar (kırılan unsurlar)

Seçici lazer ergitme yönteminde yöntemin doğası gereği imal esnasında katı unsur ile gevşek tozlar arasında ısı iletim hızlarında farklılıklar söz konusudur. İmal esnasında kontura yakın bölgelerdeki gevşek tozlar bir miktar ısıya maruz kalmaktadır. Isıya maruz kalan gevşek tozlar kısmen erimektedir. Yukarıda bahsedilen farklı ısı iletim hızları neticesinde yerçekimi ve kılcal kuvvetler katı yapıdaki emilen enerjinin daha büyük olmasına sebebiyet vermektedir. Bu olay sonucunda da çapak oluşumu meydana gelmektedir [78].

Xu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [76] üzerinde durulan kısımlardan biri destek olmaksızın sarkıntı yapılar üretilebilme sınırı olmuştur. Yapılan çalışmada yarıçapı 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 ve 18 mm olan bir dizi kemerli köprü yapılarının üretilebilirliği araştırılmıştır (Resim 4.14). Çalışma unsur çapının artışı ile deformasyonun doğru orantılı bir şekilde arttığını ortaya çıkarmıştır. Eriyik havuzunun destekler tarafından değil de gevşek tozlar tarafından desteklenmesi ve eriyik havuzundaki yerçekimi kuvvetinin dikey yöndeki yüzey gerilimini yenmesiyle alt tabakadaki gevşek tozların erimiş halde bulunan tozları yeteri kadar destekleyememesine bunun sonucunda da çöküntüler meydana gelmesine tanıklık edilmiştir. Xu çalışmasında 1,04 mm'nin üzerinde sarkıntı yapıların desteklenmesi gerektiğini aksi takdirde deformasyon ve çöküntüler görüleceğini rapor etmiştir.

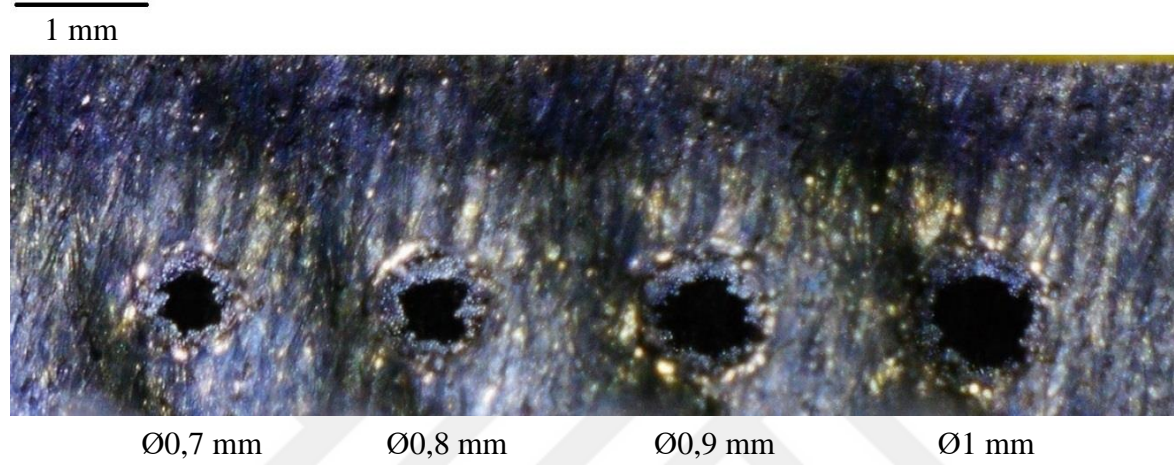


Resim 4.14. Xu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada destek kullanılmadan üretilen unsurlar

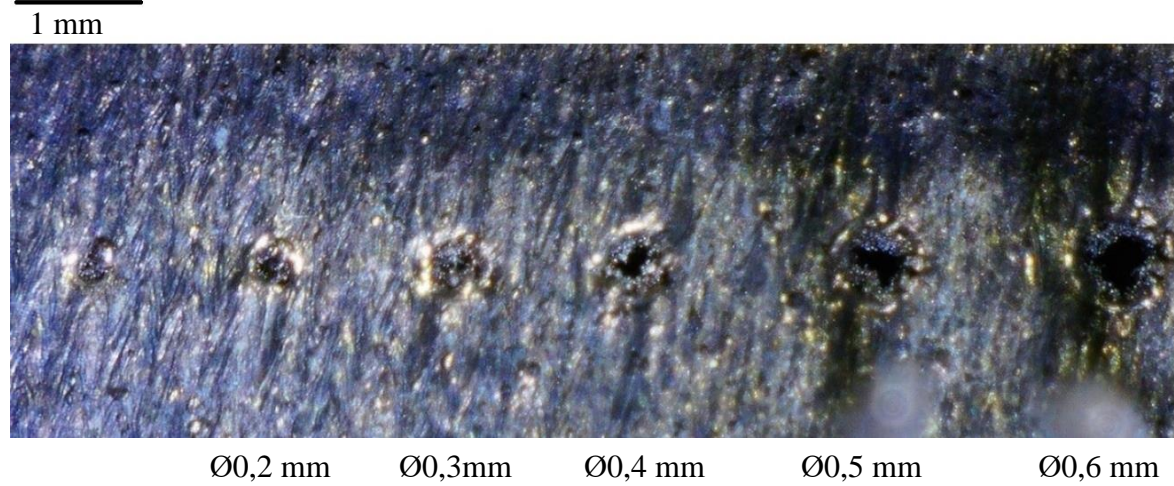
Çalışmada görülen deformasyonlar daha önce literatürde bildirilen sonuçlarla uyum göstermektedir. Daha önce bahsedilen en-boy oranı dolayısıyla uzun çıkıntılar ve toz serme bıçağının tekrarlı teması sonucu unsurlar üretilememiştir. Thomas'ın tez çalışmasında [80] bahsettiği gibi bu çalışmada da toz serme bıçağının tekrarlı temasının özellikle bıçağın hareket eksenindeki unsur oluşumuna olumsuz yönde etki ettiği saptanmıştır. Üretilmeyen unsurun yüksek en-boy oranı nedeniyle olduğunu destekleyen diğer bir çalışma ise Virdyawan ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadır [84]. Virdyawan ve arkadaşları zemine paralel şekilde üretilmeye çalışılan 5 mm uzunluğunda çapı 1,2 mm olan unsurun üretilemediğini rapor etmiştir. Bu ölçülerde bir unsurun imal edilebilmesi için imal açısının artırılması gerektiğini rapor etmiştir.

### 4.1.3. Ekseni imal yönüne paralel olarak üretilen delikler (üst delikler)

İmal yönündeki delik üretiminde de kısmen başarılı sonuçlar ortaya çıkmıştır (Resim 4-15 ve 4-16). Fakat yüksek oranda çapak oluşumu gözlenmiş olup daha önce literatürde bahsedilen delik unsurlarda imal sonrası işlem ihtiyacının bu imalatlarla birlikte hala geçerliliğini koruduğu görülmüştür. Sonuçlar aşağıdaki gibidir.



Resim 4.15. İmal yönünde üretilen delikler



Resim 4.16. İmal yönünde üretilen delikler

İmal yönünde üretilen çıkıntı unsur mantığında kullanılan hem çapaksız ölçüm hem de çapaklı ölçüm mantığı burada da uygulanmıştır. Çapaklı ölçüm sonuçlarında standart sapmanın çok yüksek olduğu belirlenmiştir (Çizelge 4.5). Buna karşın mikroskop görüntülerine bakıldığında kısmi ergimiş tozların ergiyen tozlarla konsolide olması sonucu çapaklı bir görünüm oluştuğu açıkça görülmektedir. Çapaklar dikkate alınmadan yapılan ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde istenilen sonuçlara yakın değerler elde edildiği, iki

yaklaşımın sonuçları değerlendirildiğinde imal sonrası işlem gerekliliği belli olsa da istenilen geometrinin yöntem ile üretilebildiği sonucu çıkmıştır (Çizelge 4.6). Ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 4.4’de verilmiştir.

#### Ø1,0 mm

1 mm çapındaki unsur için doğrudan ölçüm sonucu %24,93’lük bir sapma ile ortalama 0,75 mm şeklindedir. En düşük değerin 0,67 mm, en yüksek değerin ise 0,83 mm olduğu görülmüştür. Standart sapmanın 0,06 mm olması dairesel formdan epey uzak olduğunu göstermektedir.

Çapaksız sonuçlar değerlendirildiğinde ise %1,2 sapma ile 0,99 mm ortalama sonucun elde edildiği görülmektedir. 0,97 mm en düşük değer, 1,01 mm en yüksek değer olarak okunmuştur.

#### Ø0,9 mm

0,9 mm çapındaki unsur için çapaklı ölçüm sonucu %25,13’lük bir sapma ile ortalama 0,67 mm şeklindedir. En düşük değerin 0,6 mm, en yüksek değerin ise 0,77 mm olduğu bulunmuştur.

Çapaksız sonuçlar değerlendirildiğinde ise %0,54 sapma ile 0,895 mm ortalama sonucun elde edildiği görülmektedir. 0,87 mm en düşük değer, 0,93 mm en yüksek değer olarak okunmuştur.

#### Ø0,8 mm

Üçüncü unsur olan 0,8 mm çapındaki unsura bakıldığında ortalama değer 0,51 mm olduğu, bu sonucunda %36,8’lük bir sapmaya karşılık geldiği hesaplanmıştır. Ölçümlerde en düşük değer 0,43 mm, en yüksek değer ise 0,57 mm olarak kayda geçmiştir.

Çapaksız sonuçlarda ise yine yüksek başarı göze çarpmaktadır. %0,23 sapma ile 0,80 mm ortalama sonuç gayet başarılı bir sonuç olarak kayda geçmiştir. 0,78 mm en düşük değer, 0,82 mm en yüksek değer olarak okunmuştur.

### Ø0,7 mm

Ortalama değer olarak 0,45 mm ölçülen 0,7 mm çapındaki unsur için sapmanın %35,85 gibi yüksek bir oranda olduğu belirlenmiştir. Sonuçlarda en düşük değer 0,38 mm, en yüksek değer ise 0,49 mm şeklindedir.

Çapakların dikkate alınmadığı değerlendirmede %2,23 sapma ile 0,68 mm ortalama sonucun elde edildiği görülmektedir. 0,67 mm en düşük değer, 0,70 mm en yüksek değer olarak okunmuştur.

### Ø0,6 mm

Beşinci unsur olan 0,6 mm çapındaki unsorda da yüksek sapma saptanmıştır. %39,63'lık bir sapma ile ortalama 0,36 mm değeri tasarlanan değerden oldukça uzaktır. Sonuçlara bakıldığında 0,30 mm ile en düşük, 0,44 mm ile de en yüksek değer kayda geçmiştir.

Çapaksız yapılan değerlendirmede yüksek başarının bu unsorda da devam ettiği görülmektedir. %0,54 sapma ile 0,60 mm ortalama sonuç ortaya çıkmıştır. 0,59 mm en düşük değer, 0,61 mm en yüksek değer olarak okunmuştur

### Ø0,5 mm

Çapak oranının gözle görülebilir seviyede arttığı 0,5 mm çapındaki unsur ölçümlerinde %44,46'lık bir sapma söz konusu olup ortalama 0,28 mm değeri ortaya çıkmıştır. En düşük değer 0,17 mm, en yüksek değer ise 0,36 mm olarak ölçülmüştür.

Çapaksız sonuçlar değerlendirildiğinde ise %3,0 sapma ile 0,52 mm ortalama sonucun elde edildiği görülmektedir. 0,5 mm en düşük değer, 0,54 mm en yüksek değer olarak okunmuştur.

### Ø0,4 mm

Delik formunun anlaşılabilirdiği son unsur 0,4 mm'dir. Çapaklı ölçüm sonucu 0,20 mm ortalama değer, %49,28'lık sapma şeklindedir. En düşük değerin 0,12 mm, en yüksek değerin ise 0,26 mm olduğu ölçümler sonucu kayda geçmiştir.

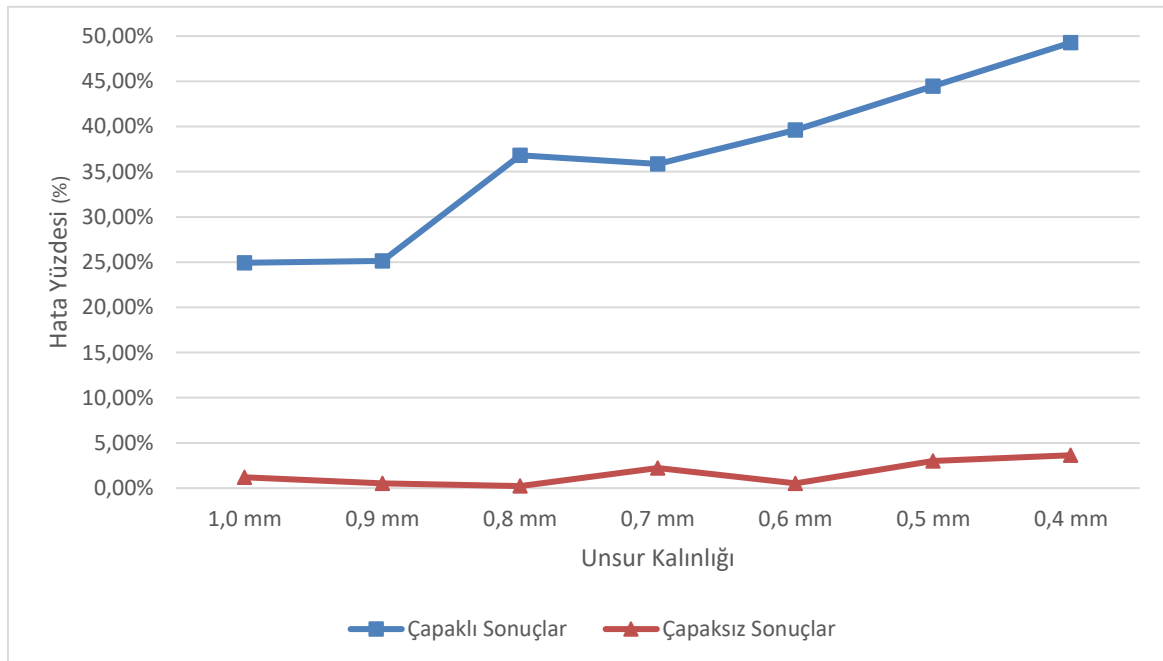
Son unsurun çapaklar dikkate alınmadan yapılan ölçüm yaklaşımında Çapaksız sonuçlar değerlendirildiğinde ise %3,64 sapma ile 0,41 mm ortalama sonucun elde edildiği görülmektedir. 0,4 mm en düşük değer, 0,44 mm en yüksek değer olarak okunmuştur

Çizelge 4.5. İmal Yönünde Üretilen Delik Unsurlar (Çapaklı Sonuçlar)

	Min. Çap (mm)	Maks. Çap (mm)	Ort. Çap (mm)	Stan. Sap.	Hata Yüzdesi (%)
1,0 mm	0,67	0,83	0,75	0,06	24,93
0,9 mm	0,60	0,77	0,67	0,06	25,13
0,8 mm	0,43	0,57	0,51	0,05	36,80
0,7 mm	0,38	0,49	0,45	0,03	35,85
0,6 mm	0,30	0,44	0,36	0,05	39,63
0,5 mm	0,17	0,36	0,28	0,07	44,46
0,4 mm	0,12	0,26	0,20	0,05	49,28

Çizelge 4.6. İmal Yönünde Üretilen Delik Unsurlar (Çapaksız Sonuçlar)

	Min. Çap (mm)	Maks. Çap (mm)	Ort. Çap (mm)	Stan. Sap.	Hata Yüzdesi (%)
1,0 mm	0,97	1,01	0,99	0,01	1,20
0,9 mm	0,87	0,93	0,90	0,01	0,53
0,8 mm	0,78	0,82	0,80	0,01	0,23
0,7 mm	0,67	0,70	0,68	0,01	2,23
0,6 mm	0,59	0,61	0,60	0,01	0,54
0,5 mm	0,50	0,54	0,52	0,01	3,00
0,4 mm	0,40	0,44	0,41	0,01	3,64

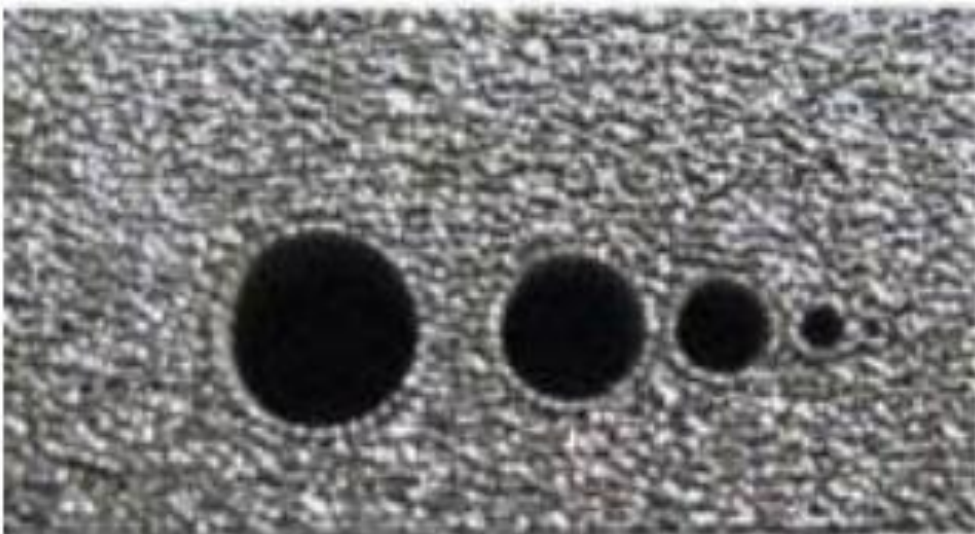


Şekil 4.4. Ekseni imal yönünde olan deliklerin hata paylarının grafiksel gösterimi

Delikler için çıkıntı unsurlardan biraz daha farklı bir durum söz konusudur. Üretim esnasında tam ergimemiş tozların çevreleyen ısı nedeniyle delik unsurların duvarlarına yapışarak dairesel formu bozduğu görülmüştür. Buna karşın Resim 4.15 ve Resim 4.16'da da görüleceği gibi delik formları dairesel olmasa da delik unsuru oluşmuştur. Ergimemiş tozlar yapışsa da çapaklar dikkate alınmadan yapılan ölçümler neticesinde düşük hata payları ile istenilen formların oluştuğu görülmektedir.

Ergimiş tozların yapışması sonucu formların bozulması Xu ve arkadaşlarının yaptığı çalışma [76] ile oldukça uyumludur. Çalışma sonuçları daha önce literatürde bahsedildiği gibi imal sonrası işleme ihtiyacının kabulü niteliğindedir. Çapakların dikkate alındığı sonuçlar ile dikkate alınmadığı sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde post-proses sürecinin özellikle delik formları için elzem olduğu sonucuna varmak için önemli bir kanıt taşımaktadır. Xu ve arkadaşları titanyum alaşımı (Ti-6Al-4V) kullanarak yaptığı çalışmada oldukça başarılı sonuçlar elde etmiş, 0,1 mm'ye kadar tüm unsurları başarılı bir şekilde imal edebilmiştir. Burada alüminyum ile titanyum malzemenin farkı göz önünde bulundurulmalıdır. Zira alüminyumun özellikle de yansıtıcılık özelliğinin getirdiği kısıtlama yöntem için üretim zorluğu için kritik bir olgudur.

Wang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [77] 0,2 mm'den 4 mm'ye kadar imal yönünde delikler üretilmeye çalışılmıştır. 0,2 mm ve 0,5 mm çapındaki unsurlarda çapak kalıntılarının gözlemlendiğini ve bu sebeple temiz bir sonuç elde edilemediği bilgisi verilmiştir. Yapılan çalışma sonucu Resim 4.17'den incelenebilir.

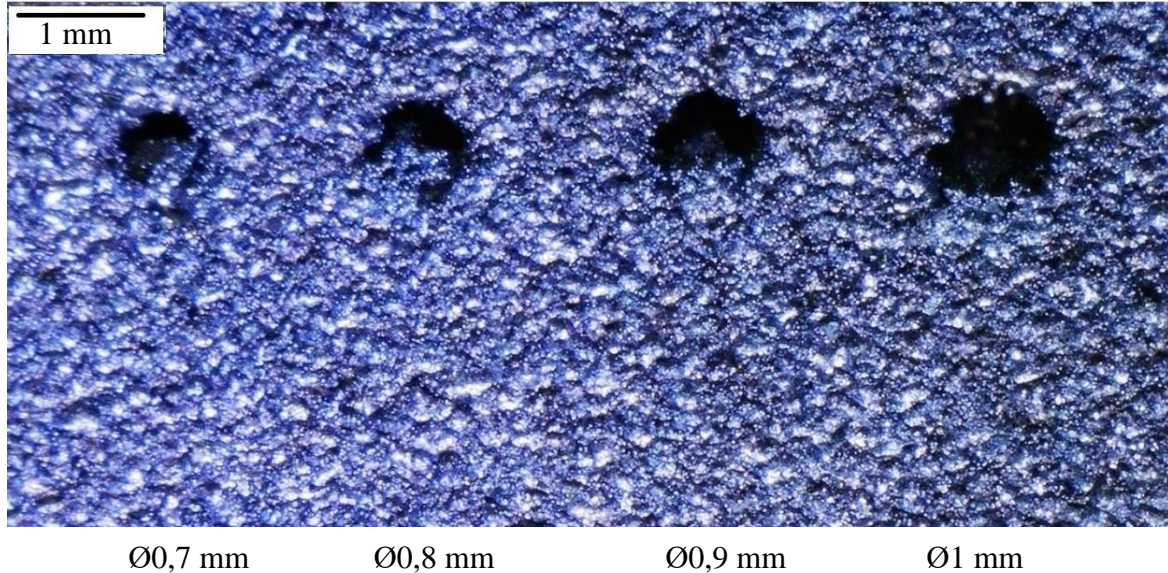


Resim 4.17. Wang ve arkadaşlarının imal yönünde ürettiği delik unsurlar [77]

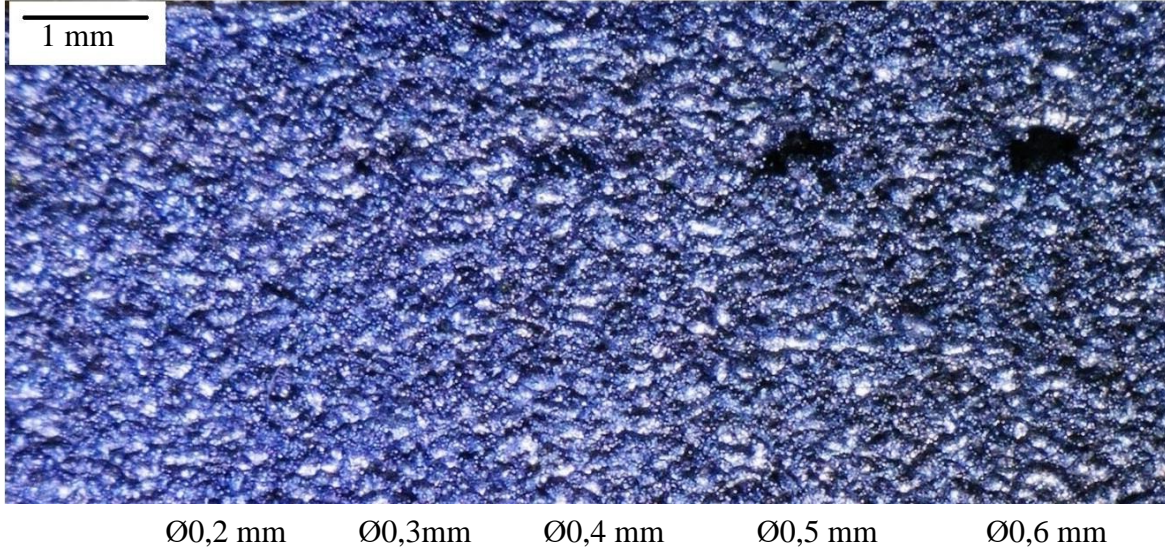
Delik unsurlarında iki önemli parametre etkendir. Lazer nokta çapı dolayısıyla ışın ofseti ve tarama stratejisi bu iki önemli parametredir. İmal işleminde ilk önce sınırlar oluşturulur, burada sınır ile taranan kısmın merkezi aynıdır. Taranan bölge merkezde kaldığı için ışın aynı zamanda çevresel tozları da ısıtır bu ısıtma her ne kadar erimeye sebep olmasa da toz erime noktasına yaklaşır ve erimiş bölge ile kaynaşma gösterir. Delik çapı ile termal olguların olumsuz etkisi ters orantılıdır. Yani çapın düşmesi daha fazla gevşek tozun ısıdan etkilenerek unsura yapışmasına sebep olmaktadır. İmal resimlerinde görülen çapaklarının sebebi bu olgudur. Çalışma sonunda 1 mm çapındaki unsurdan 0,4 mm çapındaki unsura kadar tasarlanmış unsurların üretilebildiği not edilmelidir.

#### 4.1.4. Ekseni imal yönüne dik olarak üretilen delikler (yan delikler)

İlk modelde son inceleme konusu olan ekseni zemine paralel yönde olan delik unsurların üretilebilme kabiliyetine bakıldığında tıpkı çıkıntı unsurda olduğu gibi destek ihtiyacının önemi bir kez daha göz önüne çıkmaktadır. Destek yapılarının olmamasından ötürü deliklerin üst kısmında sarkıntı yapıların oluştuğu Resim 4.18 ve Resim 4.19'da açık bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Yapılan ölçümlerin sonuçları Çizelge 4.7'de ve sonuçların grafiksel gösterimi Şekil 4.5'te verilmiştir.



Resim 4.18. Ekseni zemine paralel yönde üretilen delikler



Resim 4.19. Ekseni zemine paralel yönde üretilen delikler

#### Ø1,0 mm

Bu çalışmada ölçüm yaparken kullanılan çapaklı ve çapaksız ölçüm mantığı burada da kullanılmak istense de sadece ilk unsur olan 1 mm çapındaki delik formunda sarkıntı gözlemlenmemesi ve diğer tüm unsurlarda bir sarkıntı oluşması sebebi ile çapakların dikkate alınmadan ölçülebilmesi aksi durumda başarısız bir üretim olduğunun kayıtlara geçilmesi gerektiği not edilebilir. 1 mm dışındaki unsurlar her ne kadar çapaksız ölçüm metodu kullanılarak alınsa da sarkıntı yapıların oluşumu ekseni zemine paralel olduğu durumda destek olmaksızın üretilmemesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Sarkıntının en az olduğu 1 mm'lik unsura bakıldığında %19,41'lik sapma ile 0,81 mm ortalama çapında üretim gerçekleştiği görülmekte en yüksek değer 0,93 mm, en düşük değer ise 0,62 mm olduğu, çapakların dikkate alınmadığı durumda ise başarılı sayılacak bir sonuç olan %0,31'lik sapma ile 1,0 mm ortalama değere ulaşıldığı en yüksek değer 1,03 mm en düşük değer ise 0,97 mm olduğu ortaya çıkmaktadır.

#### Ø0,9 mm

0,9 mm'nin incelemesinde sarkıntı yapıların çok olması sebebiyle tam bir dairesel formdan bahsedilemez bu sebeple sarkıntı yapı dikkate alınmadan yapılan ölçümlerde %0,36'lik sapma ile 0,90 mm ortalama değer elde edilmiştir. Bu ölçümde en düşük değer 0,88 iken en yüksek değer 0,93 olarak ölçülmüştür.

Ø0,8 mm

Çap 0,8 mm için yapılan çapaksız ölçümlerin sonucunda ortalama 0,81 mm'lik bir sonuç elde edildi. Bu sonuç %1,37'lik bir sapmaya tekabül ediyor olup, ölçümlerde en düşük 0,77 mm, en yüksek ise 0,85 mm değerleri elde edilmiştir.

Ø0,7 mm

Sarkıntı yapıların temizlenebilecek halde olduğu son unsur 0,7 mm'de gözlemlenebilmektedir (Resim 4.18). Bu unsur için yapılan ölçüm sonuçlarına bakıldığında %2,13'lük bir sapma ile ortalama 0,71 mm değerine ulaşılmıştır. Alınan ölçümler için en yüksek değer 0,74 mm, en düşük değer ise 0,69 mm olduğu not edilmiştir.

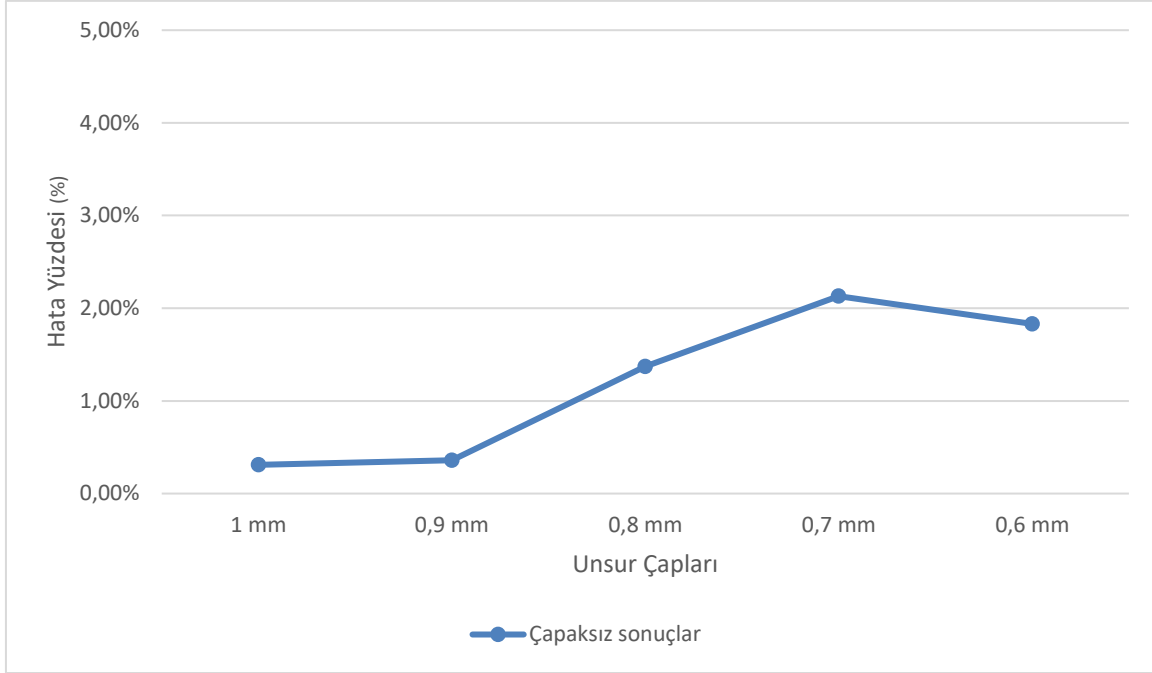
Ø0,6 mm

Delik formunun belli olduğu son unsur 0,6 mm'dir. Ölçüm sonuçlarına bakıldığında yüksek yüzde sebebiyle başarılı bir sonuç elde edilmiş gibi görünse de dairesel formun ciddi oranda oluşmadığı Resim 4.19'da görülebilmektedir. Yüzesel olarak %1,83 gibi yüksek bir başarı oranı görülse de standart sapmanın 0,04 mm olduğu unutulmamalıdır. Ölçümlerde elde edilen en düşük değer 0,56 en yüksek değer ise 0,69 mm'dir.

Çizelge 4.7. Ekseni Zemine Paralel Üretilen Delik Unsurlar

	Min. Çap (mm)	Maks. Çap (mm)	Ort. Çap (mm)	Stan. Sap.	Hata Yüzdesi (%)
1,0 mm	0,97	1,03	1,00	0,01	0,31
0,9 mm	0,88	0,93	0,90	0,02	0,36
0,8 mm	0,77	0,85	0,81	0,02	1,37
0,7 mm	0,69	0,74	0,71	0,02	2,13
0,6 mm	0,56	0,69	0,61	0,04	1,83

Bu bölümde bahsi geçen delikler desteksiz bir şekilde üretilmeye çalışılmıştır. Bir sonraki bölümde incelenecek olan desteksiz üretim çalışmasının sonuçları da bu kısmı ilgilendirmektedir. Çünkü dairesel formun üst kısmı 0° olarak kabul edilebilir. Çıktılar incelendiğinde 1 mm hariç tüm unsurlarda sarkıntı meydana gelmiştir. Bu sarkıntı yapılar parametre optimizasyonu ile beraber daha da iyileştirilebilir.



Şekil 4.5. Ekseni zemine paralel olan delik unsurlarının hata paylarının grafiksel gösterimi

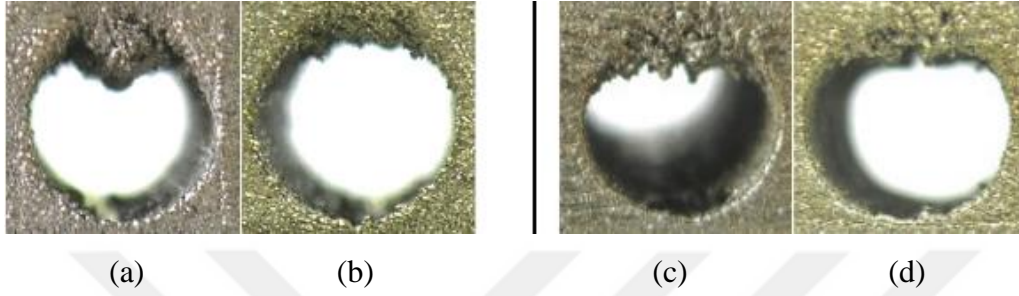
Bu çalışmanın sonuçları ile paralel çıktılar elde eden Wang ve arkadaşları [77] da benzer sonuçlar ile karşılaşmış ve unsurlarda çöküntü olduğu not edilmiştir (Resim 4.20).



Resim 4.20. Wang ve arkadaşlarının imal yönüne dik yönde ürettiği delik unsurlar [77]

Kruth ve arkadaşlarının SLE makinesine yaptığı eklemelerle farklı bir mantıkla yürüttüğü çalışmada [85] makineye fotodiyot ve kamera yerleştirerek gerçek zamanlı bir şekilde sisteme eriyik havuzu hakkında bilgi göndererek güç ayarlanmaya çalışılmıştır. Gerçek zamanlı olarak lazer gücü değiştirilmek suretiyle imal yönüne dik delik formu imal edilmeye

çalışılmıştır. Burada imal yönünden (z ekseni) ayrı olarak tarama yönünün (x ve y eksenlerinde) etkisi gözlemlenmeye çalışılmış ve eriyik havuzunun etkileri incelenmiştir. Çalışma sonunda tarama yönünün sarkıntının uzandığı yönde olması ve gerçek zamanlı bir şekilde ayarlanan lazer gücü ile daha stabil sonuçlar elde edildiği bulunmuştur. Resim 4.21’de çalışma sonucunda ortaya çıkan ürünlerin görseli verilmiştir.



Resim 4.21. Kruth ve arkadaşlarının çalışması (a) geri besleme olmaksızın paralel taramalı üretim (b) geri beslemeli paralel taramalı üretim (c) geri besleme olmaksızın dik yönde taramalı üretim (d) geri beslemeli dik yönde taramalı üretim

#### 4.1.5. Desteksiz şekilde üretilen açılı unsurlar

Seçici lazer ergitme metodu ile üretim esnasında belirli bir açının altında kalan unsurların desteklenme mantığı bulunmaktadır. Bahse konu unsurlar destek yapılar ile desteklenerek istenilen tasarımın sağlıklı bir şekilde çıkmasına olanak tanınmaktadır. Literatüre bakıldığında ortak görüş  $45^\circ$ 'nin altındaki açıların desteklenmesi yönündedir. Yine literatürde,  $45^\circ$ 'nin altında bir açığa sahip unsurlarda yöntem ile üretilen ürünlerde sıkça karşılaşılan hatalardan “merdiven etkisinin” arttığı kayda geçmiştir [82]. Bu sebeple belirli bir açının altındaki unsurların desteklenmesi gerekmektedir. Fakat bu yapıların parçadan ayrılması hem maliyet hem zaman hem de iş gücü bakımından ciddi külfet getirmektedir. Bahsedilen bu sınırlayıcı faktörlerin en aza indirilmesi ile yöntemin sektörler için daha çekici hale geleceği açıktır. Bu sebeple yöntemin alt limitlerinin belirlenmesi amacı taşıyan bu çalışmada ikinci model olarak açılı unsurların desteksiz bir şekilde üretilme kabiliyeti belirlenmeye çalışılmıştır.

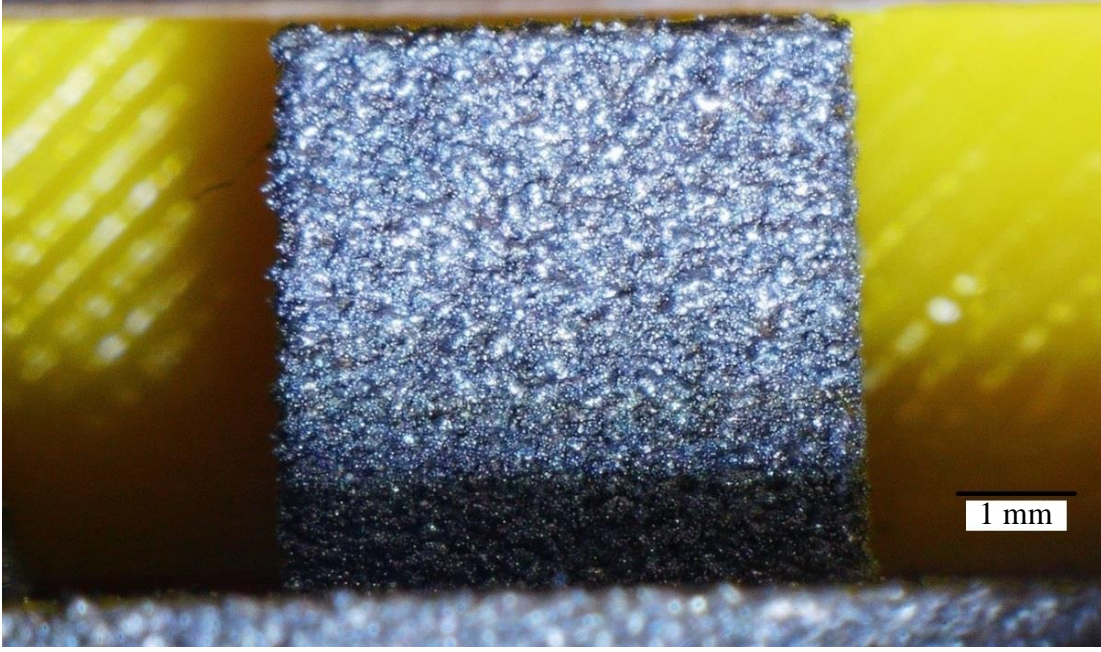
Seçici lazer ergitme metodunun doğası gereği imal esnasında yüksek sıcaklık gradyanları oluşmaktadır. Uygulanan yüksek lazer enerjisinin oluşturduğu yüksek sıcaklıklar ve hızla soğuma mantığı sonucunda oluşan bu sıcaklık gradyanları başta artık gerilmeler gibi olumsuz etkilere sebebiyet vermektedir. Bu olumsuz etkilerin minimize edilebilmesi için oluşan ısının dağıtılması gerekmektedir. Özellikle çıkıntı yapılarında ısı dağılımı daha da

önem kazanmaktadır. Çünkü bu yapıların etrafında oluşan bir yapı olmadığından ısı dağılımı sınırlanmaktadır. Etrafında herhangi bir katı yapı olmayan çıkıntı yapılar destek yapılar kullanılarak oluşturulduğunda bahsedilen bu ısı dağılımı destek yapılar ve gevşek tozlar (katılaşmamış) vasıtasıyla sağlanır. Burada ısı dağılımına gevşek tozların destek yapılara kıyasla çok daha düşük seviyede katkı sağladığı bilgisini vermek gerekmektedir. Literatürde ısı iletiminin imal bölgesine göre gevşek tozların bulunduğu bölgedeki hızı 1/100 şeklinde geçmektedir [78]. Hatta açının kritik hale geldiği durumlarda gevşek tozlar izolasyon görevi görmekte ve ısının iletimine olumsuz yönde katkı sağlamaktadır [79]. Bahsedilen sebepten dolayı destek yapıları çıkıntı yapılarda oluşacak birikmiş ısıyı alması açısından yapının oluşumunda hayati bir öneme sahiptir. Özellikle düşen çıkıntı açılarında destek yapılarının önemi git gide daha da önem kazanmaktadır. Dolayısıyla çıkıntı açısı ile destek yapılarının bulunması arasında ters orantı vardır.

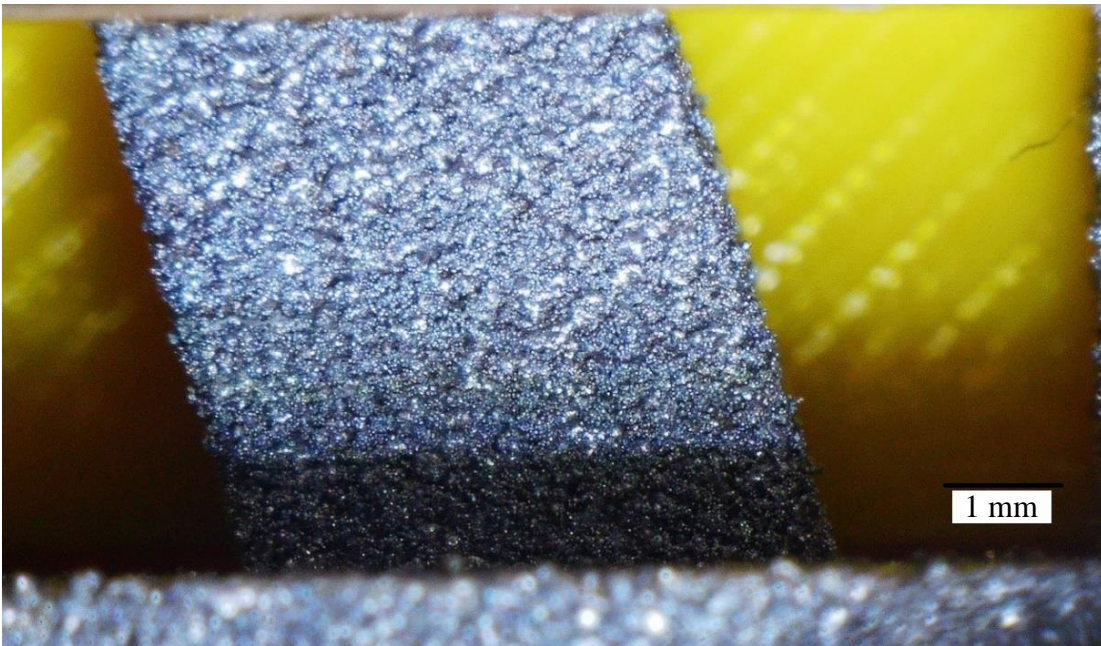
Destek yapılarının unsuru oluşturmada önemi olduğu gibi yöneme getirdiği dezavantajlar da vardır. Özellikle imal süresi oldukça olumsuz yönde etkilemektedir. Hem imal sırasında hem de imal sonrası parçadan ayırma sırasında ciddi bir süre kaybına neden olan destek yapıları, sürenin yanında yüzey kalitesine de olumsuz yönde etki etmektedir. Bunun yanında imal edilen parçanın geometrisi gereği bu yapıların parçadan ayrılmasının da sınırlı ya da mümkün olmadığı durumlar söz konusu olabilmektedir. Burada hem geometri dolayısıyla destek yapılara erişim, hem de unsurun düşük kalınlığı ya da zayıf yapısı gereği ayırma işlemi esnasında unsura zarar verme ihtimalinden bahsedilmektedir. Destek yapıların parçadan ayrılması durumunda bile bulunduğu yüzeyde imal sonrası işleme ihtiyaç duyulmaktadır [78]. İmal sonrası taşlama, kumlama gibi prosesler yöntemi daha maliyetli ve daha uzun süreli bir proses haline getirmektedir. Bu sebepten yöntemin destek yapılara ihtiyaç duymadan üretilebilecek en düşük açığı saptamak hem üretici hem tasarımcı açısından ciddi faydalar barındırmaktadır.

Daha önce konu ile ilgili yapılan çalışmalar neticesinde imal parametrelerini ayarlamamanın çıkıntı unsurların oluşumunda olumlu etkileri olduğu literatüre girmiştir [78, 79]. Çıkıntı yapıların üretilebilmesi için düşük yoğunluğa ihtiyaç olduğu daha önceki çalışmalarda altı çizilen bir konudur. Enerji yoğunluğu üç parametre ile ilişkilidir; tarama hızı, katman kalınlığı ve tarama mesafesi. Wang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [78] teorik olarak çıkıntı unsurun uzunluğunun lazer odak yarıçapından küçük olması gerektiği bu durumda da 45°'nin üzerindeki açılarda sorunsuz bir imalat gerçekleştirilebileceği bilgisi ortaya konulmuştur.

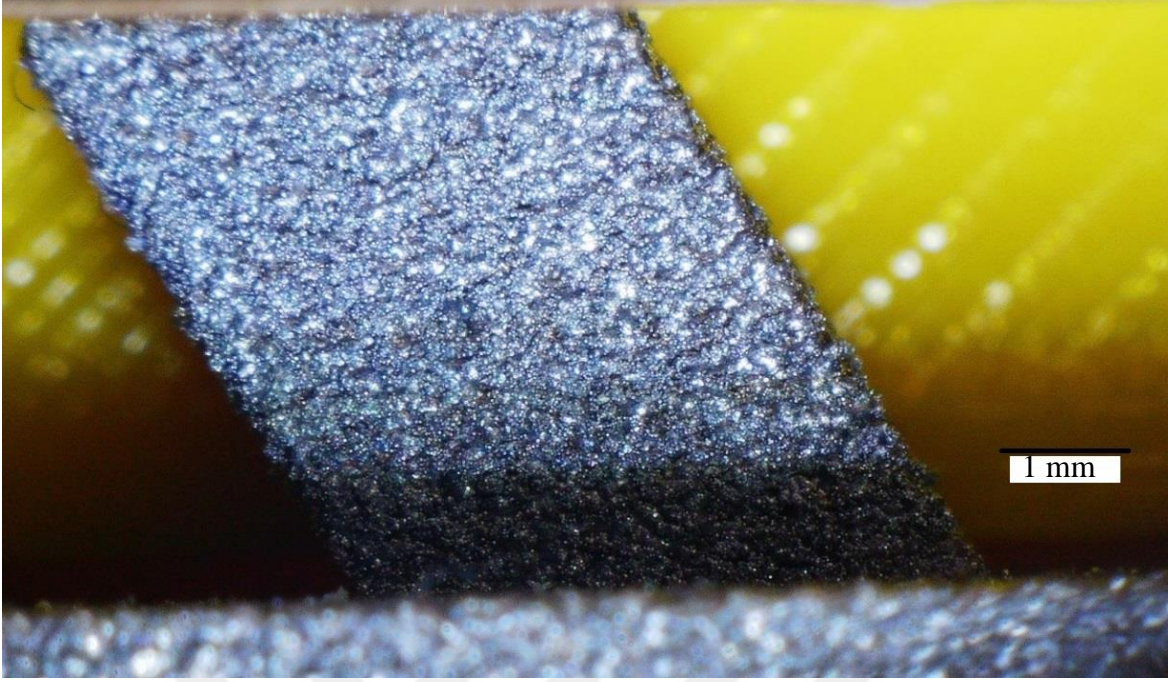
İkinci modelin üretimine bakıldığında  $15^\circ$  hariç başarılı bir şekilde üretim ortaya çıkmıştır. Sadece  $15^\circ$ 'lik unsurun alt kısmında yüksek yüzey pürüzlülüğü görülmüş olup bu unsurun başarılı bir şekilde üretilmediği fakat diğer tüm unsurların başarılı bir şekilde imal edildiği kaydedilmiştir. Resim 4-22 – Resim 4-27’de üretilen bu unsurlar görülmektedir. Ayrıca Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9’da açılal sapmalarla ilgili sayısal çıktılar, Şekil 4.6’da da bunların grafik şeklindeki sonuçları verilmiştir.



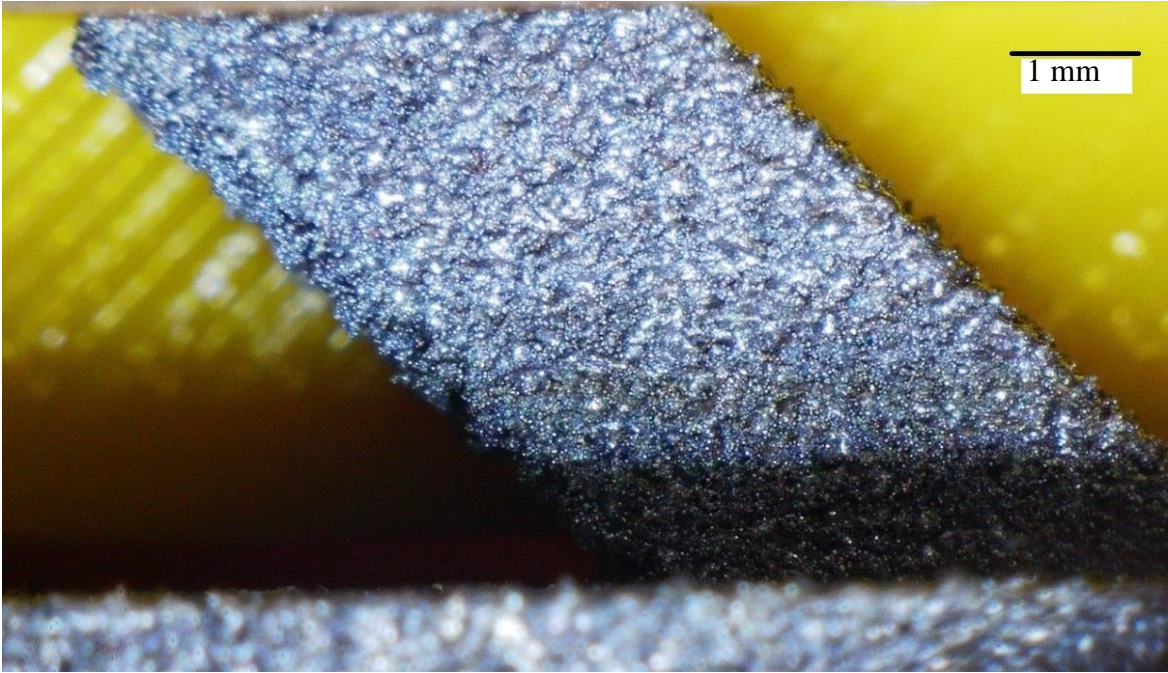
Resim 4.22. İkinci Model – Açılı unsur ( $90^\circ$ )



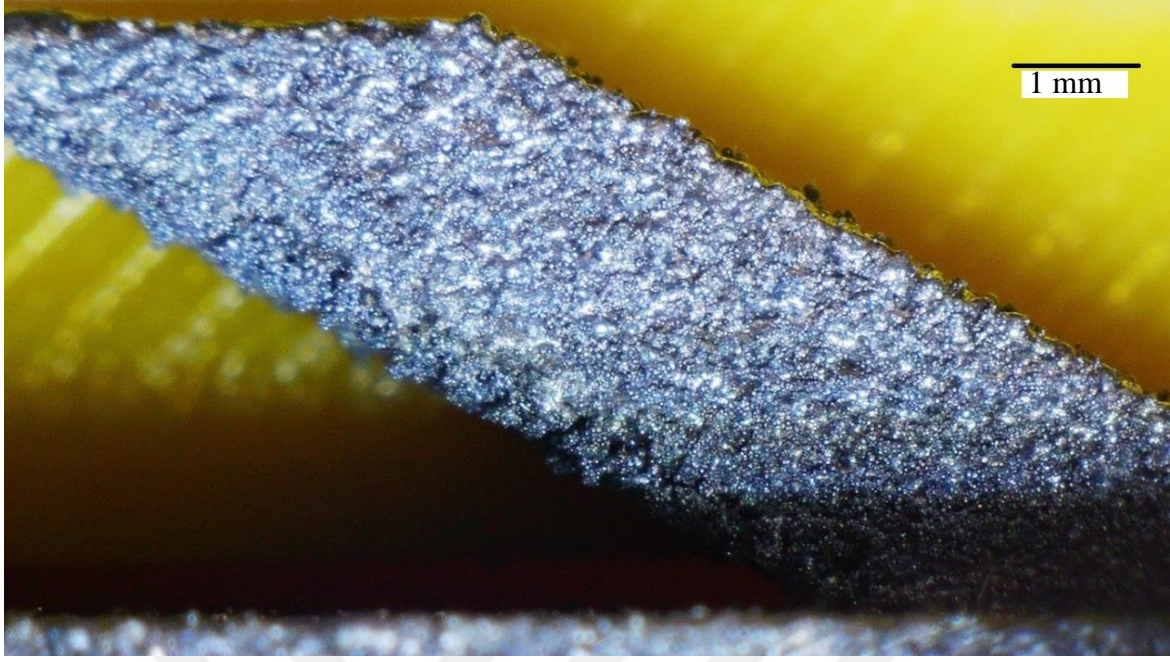
Resim 4.23. İkinci Model – Açılı unsur ( $75^\circ$ )



Resim 4.24. İkinci Model – Açılı unsur ( $60^\circ$ )



Resim 4.25. İkinci Model – Açılı unsur ( $45^\circ$ )



Resim 4.26. İkinci Model – Açılı unsur (30°)



Resim 4.27. İkinci Model – Açılı unsur (15°)

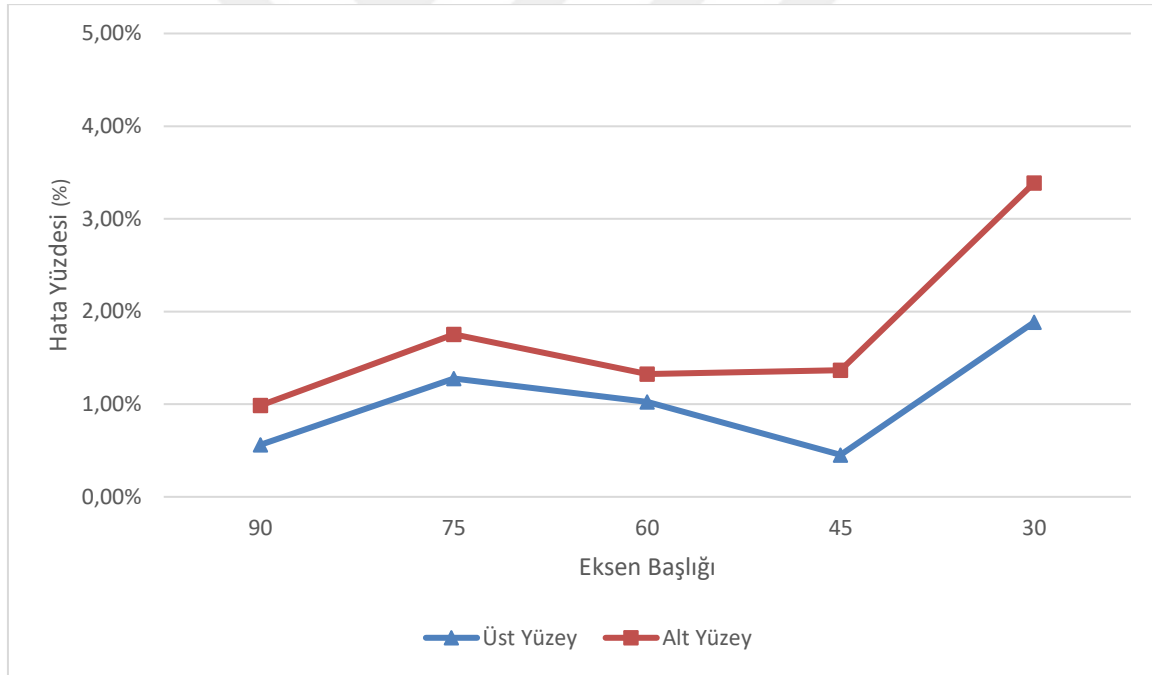
Çizelge 4.8. Açılı unsurların üst kısmının yaptığı açı

	Yaptığı Açı (°)	Hata Payı (%)
90°	89,50	0,56
75°	74,06	1,28
60°	60,62	1,02
45°	44,80	0,45
30°	29,45	1,89

Çizelge 4.9. Açılı unsurların alt kısmının yaptığı açı

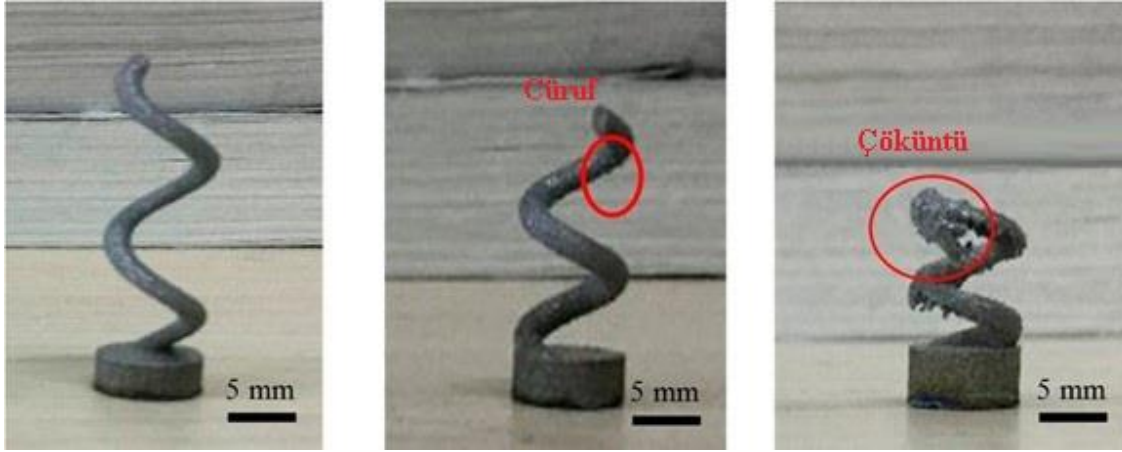
	Yaptığı Açı (°)	Hata Payı (%)
90°	89.12	0,99
75°	73.71	1,75
60°	59.22	1,32
45°	45.62	1,37
30°	29.08	3,39

Seçici lazer ergitme metodunun imalat mantığına bakıldığında katmanlar işlenmiş bir katmanın üzerine inşa edilmektedir. İkinci katman, ilk katmanın imalat sırasında lazer ışınına doğru bükülme eğilimi ve erime havuzunun soğuma sırasında büzülmesi nedeniyle bu yöne doğru kaymak ister. Sonuçta da ikinci katmanın deformasyon eğilimi ortaya çıkmaktadır.



Şekil 4.6. Açılı unsurların üst ve alt yüzeylerinden alınan ölçümlerin hata payları

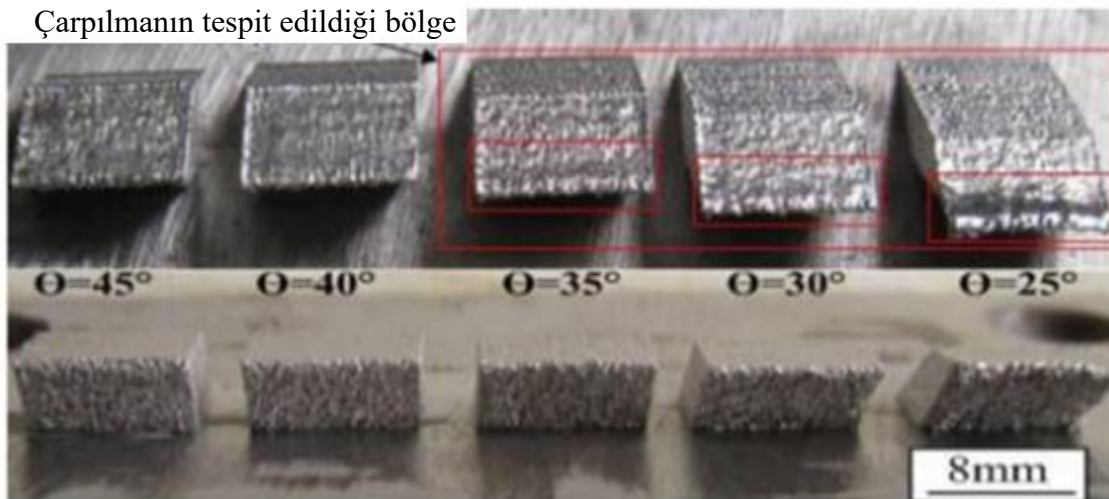
Literatüre bakıldığında birçok çalışma 30°'nin altında ki açılı unsurların başarılı bir şekilde üretilmediğini bildirilmiştir. Xu ve arkadaşları çalışmasında [76] 30°'nin altında unsurların üretilmediği bilgisini paylaşmıştır. Çalışmada 60°, 45° ve 30° ile yükselen spiral yapılar imal edilmeye çalışılmıştır. 60° ve 45°'lik açılar başarılı bir şekilde üretilirken 30°'lik açıda çöküntüler meydana gelmiştir. Yapılan çalışma sonucunda imal edilen parçaların görseli Resim 4.28'de görülmektedir.



Resim 4.28. Xu ve arkadaşlarının açısal sınırları belirlemek için yaptığı çalışma

45°'lik yapıda çok ufak bir sarkıntı olsa da başarılı bir şekilde üretildiği söylenebilir, buna karşılık 30°'lik yapının ciddi bir deformasyona uğradığı Resim 4.28'de görülmektedir. İmal yönüne zıt konumlanan bölgelerde toz serme bıçağının çarpmasının deformasyona sebep olduğu not edilmiştir [76].

Wang ve arkadaşları ise 40°'nin üzerindeki açılarda unsurların başarılı bir şekilde üretilebildiği fakat açının düşmesi ile gevşek tozların yapışma oranının arttığı dolayısıyla da yüzey pürüzlülüğünün arttığını bildirmiştir. Yapılan çalışmanın çıktı görselleri Resim 4.29'da görülebilir.



Resim 4.29. Wang ve arkadaşlarının açılı unsur çıktısı [77, 78]

Cloots ve arkadaşları 316L paslanmaz tozu ile yaptığı çalışmada [79] 35°'nin altındaki ince unsurların üretilemediğini bu değer altına inilmesi durumunda daha yüksek kabuk kalınlığı ile sorunsuz bir imalatın mümkün olabileceği bilgisini paylaşmıştır.

Yaptığımız çalışma dikkate alındığında tasarımsal anlamda yanlış bir tercih yapıldığı görülmüştür. Düşen açı değerlerinde unsurun üst kısmının incelenerek devam etmesi yerine sabit tutulmasının daha doğru olacağı belirlenmiştir. İlerleyen çalışmalarda bu hususun dikkate alınması önem arz etmektedir.

Literatürde daha önce üretilemeyeceği ifade edilen sınırın altına inilmesi bu çalışmanın bir diğer özgün noktasıdır. Çizelge 4.8, Çizelge 4.9'dan ve Resim 4.22 - Resim 4.26'dan görüleceği üzere 30°'ye kadar olan tüm unsurlar başarılı bir şekilde imal edilmiştir. Çalışmanın sonuçları üretim sınırının 15° ile 30° derece arasında bir yerde olacağını göstermektedir. Bu sonuç ileride yapılacak çalışmanın bu aralığa odaklanması gerektiği konusunda araştırmacılara ışık tutacaktır.



## 5. SONUÇLAR

AlSi10Mg alüminyum alaşım tozu kullanılarak bu malzeme ile Seçici Lazer Ergitme metodu kullanılarak üretilecek ürünlerin alt sınırlarının belirlenmeye çalışıldığı bu çalışmada EOS firmasının ürettiği EOS M290 Seçici Lazer Ergitme makinesi tercih edilmiştir.

İmal yönünde ve zemine paralel üretilebilecek en küçük unsur ile delik unsurun yanı sıra destek ihtiyacı duyulmaksızın üretilebilecek en düşük açının tespitini taşıyan bu çalışmada sonuçlar şu şekildedir:

- İmal yönünde çapı 0,05 mm'den 1 mm'ye kadar olan unsur setlerinin imali sonucu üretilebilen en küçük unsur çapı 0,5 mm'dir. Çapakların unsur üzerinde asılı bir şekilde ve çapakların dikkate alınmadan değerlendirilmesi sonucu ortaya çıkan ortalama değerler sırası ile 0,5 mm ve 0,47 mm'dir. Ayrıca ürünün tabladan ayrılmadan önceki haline bakıldığında 0,3 mm ve 0,4 mm'nin de üretildiği fakat tabladan ayrılma esnasında çok ince olan unsurların kırıldığı göz ardı edilmemelidir.
- Ekseni zemine paralel yönde imal edilen unsurlara bakıldığında başarılı bir imalat gerçekleştirilememiştir. Toz serme bıçağının tekrarlı teması sonucu unsurlar deforme olmuş unsur çapı azaldıkça unsurların bozulma oranının arttığı görülmüştür. Her ne kadar en kalın unsur dahi başarılı bir şekilde üretilemediyse de tıpkı imal yönündeki unsurlar gibi daha düşük çapa sahip unsurların çok bozuk olarak da olsa üretilebildiği ve tabladan ayırma işlemi sırasında kırıldığı görülmüştür.
- Ekseni imal yönünde uzanan delik unsurlar için yapılan üretim sonucu ciddi bir çapak birikimi görülmüştür. Çapakların dikkate alınmadan yapıldığı ölçüm analizleri sonucu 0,4 mm'nin üretildiği görülmüşse de çapaklı unsurlardaki değerlendirmelerden görüleceği üzere delik formunun yapışan tozlar neticesinde bozularak %49'luk bir sapma ile imal edilen ortalama çap 0,2 mm olarak ortaya çıkmıştır.
- Ekseni zemine paralel deliklere bakıldığında desteksiz üretilmeye çalışılan delikler için sarkıntı olduğu görülmüştür. Delik formunun belli olduğu üretilen en küçük unsur çapı 0,6 mm'dir. Sonuçlara bakıldığında hata payı her ne kadar düşük gözükse de standart sapmanın büyük olduğu unutulmamalıdır.
- Ekseni zeminle açı yapan unsurlara bakılan ikinci modelle destek ihtiyacı olmaksızın 30° açılı unsur üretilebilmiştir. Bu açının altındaki unsur olan 15° açığa sahip unsurun alt yüzeyinde deformasyonlar gözlemlenmiş olup 30°'nin altındaki unsurlar için destek ihtiyacı olduğu kayda geçmiştir.

Çalışma daha önce literatürde kayda geçmiş olan bazı sonuçları teyit eder niteliktedir. Bazı sonuçlar ise literatürde başarılı bir şekilde üretilmediği söylenen sınırların üstüne çıkmıştır. Bunun yanında bazı sonuçlarda ise daha önce üretilmediği kayda geçen bazı sonuçlara ise ulaşamamıştır.

- Daha önce alüminyum tozundan ekseni imal yönünde 0,5 mm çapında üretilmediği kayda geçen en küçük unsur bu çalışmada başarılı bir şekilde üretilmiş olup literatüre kazanım olarak geçecektir.
- Literatürde ekseni zemine paralel unsurlar için çok az çalışma bulunmaktadır. Benzer çalışma olarak alınabilecek çalışmaya bakıldığında 5 mm'nin üzerindeki uzunlukta unsurların destek olmaksızın üretilmeyeceği belirtilmiştir.
- Ekseni imal yönünde olan deliklere bakıldığında ise titanyum tozundan 0,1 mm çapındaki unsurların üretilmediği görülmektedir. Paslanmaz tozu ile yapılan başka bir çalışmada ise 0,2 mm ve 0,5 mm çapındaki deliklerin gevşek tozlarla kapandığı ifade edilmiştir. Alüminyum malzeme ile yapılan bu çalışmada malzemenin getirdiği dezavantajlar göz önünde bulundurularak görece başarılı sonuçlar elde edildiğinden bahsedilebilir.
- Ekseni zemine paralel olan delik unsurlardaki sonuçlar ise literatürde yapılan çalışmalara benzer sonuçlar ortaya koymuştur. Tıpkı daha önceki çalışmalarda olduğu gibi delik unsurların üst kısmında sarkıntılar oluştuğu daha önce yapılan çalışmalarda da rapor edilmiştir.
- Ekseni zeminle açı yapan unsurlar için ise daha önce yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkan değerler 30°'nin üzerinde olduğu yönündedir. Farklı çalışmalarda başarılı bir şekilde üretilen açının 35° ve 40° olduğu görülmektedir. Bu çalışmada elde edilen 30°'lik sonuç ile literatüre bu yönden olumlu bir katkı söz konusudur.

Bu çalışmanın sonuçları dikkate alındığında ileride yapılacak olan çalışmalarda bazı hususlar üzerinde durarak bu çalışma ve dolayısıyla literatür daha ileri taşınabilir. Sonraki çalışmalara verilecek tavsiyeler şu şekildedir:

- Yapılacak olan çalışmalarda ilk etapta parametre optimizasyonu önemli olacaktır. Sadece parametre optimizasyonu ile bu çalışmanın sonuçları dahi ileri taşınabileceği düşünülmektedir.

- Başka bir tavsiye ise çıkıntı unsurlar için en-boy optimizasyonudur. Üretilebilecek minimum unsurun araştırıldığı bu çalışmada mümkün olmasa da gerçek kullanıma göz önünde bulundurularak yapılacak olan çalışmalarda unsurun boyu olabildiğince düşük tutularak daha başarılı sonuçlar elde edilmesi çok olasıdır.
- Özellikle zemine paralel unsurların üretimi için parçanın tablaya yerleşimi önem arz etmektedir. Toz serme bıçağının tekrarlı temasının önlenmesi ve hareket yönü dikkate alınarak yapılacak yerleşim ile ekseni zemine paralel unsurların üretiminde daha başarılı sonuçlar elde edileceği bu çalışmanın sonucunda ortaya çıkan hakim görüştür.
- Bu çalışmanın sonucunda ortaya çıkan destek ihtiyacı olmaksızın üretilen en küçük unsur için açı değeri  $30^\circ$  olarak ortaya çıkmıştır. Başarılı bir şekilde üretilmeyen  $15^\circ$ 'si bize  $15^\circ$  ile  $30^\circ$  arasında bir değer üretilbileceği konusunda umut vermektedir. Bu nedenle ilerleyen çalışmalarda bu aralığa odaklanmakta fayda vardır.



## KAYNAKLAR

1. ISO/ASTM 52900. (2015). Standard terminology for additive manufacturing technologies–General principles–Terminology. *ASTM Book of Standards*, 1-9.
2. Shellabear, M., and Nyrrhilä, O. (2004). *DMLS-Development history and state of the art*. LANE conference, Erlangen, 21-24.
3. Wohlers, T., and Gornet, T. (2014). History of additive manufacturing. *Wohlers Report*. Denver, 118.
4. Duman, B., ve Kayacan, M. C. (2017). Doğrudan metal lazer sinterleme/ergitme yöntemi ile imal edilecek parçanın mekanik özelliklerinin tahmini. *Teknik Bilimler Dergisi*, 7(1), 12-28.
5. Kruth, J. P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., Froyen, L., and Rombouts, M. (2005). Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 11(1), 26-36.
6. Sofu, M. M. (2007). *Hızlı direkt imalatta kullanılan seçici lazer sinterleme ve ergitme cihazının gövde tasarımı ve imalatı*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
7. İnternet: Dutta, S., Dasgupta, S., and Chimata, G. (2020). Engineering and economic aspects of additive manufacturing in energy related industries. *Engrxiv*, URL: <https://engrxiv.org/preprint/view/1222/2552>, Son Erişim Tarihi: 25.08.2023.
8. Sames, W. J., List, F. A., Pannala, S., Dehoff, R. R., and Babu, S. S. (2016). The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*, 61(5), 315-360.
9. Yalçın, B., ve Ergene, B. (2017). Endüstride yeni eğilim olan 3-D eklemeli imalat yöntemi ve metalurjisi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 9(3), 65-88.
10. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Gibson, I., Rosen, D., and Khorasani, M. (2021). Vat photopolymerization. *Additive Manufacturing Technologies*, 77-124.
11. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Gibson, I., Rosen, D., and Khorasani, M. (2021). Material extrusion. *Additive Manufacturing Technologies*, 171-201.
12. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Gibson, I., Rosen, D., and Khorasani, M. (2021). Material jetting. *Additive Manufacturing Technologies*, 203-235.
13. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Gibson, I., Rosen, D., and Khorasani, M. (2021). Binder jetting. *Additive manufacturing technologies*, 237-252.

14. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Gibson, I., Rosen, D., and Khorasani, M. (2021). Powder bed fusion. *Additive Manufacturing Technologies*, 125-170.
15. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Gibson, I., Rosen, D., and Stucker, B. (2015). Directed energy deposition processes. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 245-268.
16. Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., Gibson, I., Rosen, D. W., and Stucker, B. (2010). Sheet lamination processes. *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, 223-252.
17. Väänänen, H. (2020). *Optimization of slm parameters for IN718 production*. Master of Thesis, Oulu University Mechanical and Production engineering, Oulu.
18. İnternet: Leinenbach, D. C. (2020). Schematic of SLM. *Empa*. URL: <https://www.empa.ch/web/coating-competence-center/selective-laser-melting>, Son Erişim Tarihi: 07.06.2023.
19. Leary, M., Mazur, M., Elambasseril, J., McMillan, M., Chirent, T., Sun, Y., and Brandt, M. (2016). Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures. *Materials and Design*, 98, 344-357.
20. McMillan, M., Jurg, M., Leary, M., and Brandt, M. (2015). Programmatic lattice generation for additive manufacture. *Procedia Technology*, 20, 178-184.
21. Weiss, L. E. (1997). *Processes overview rapid prototyping in Europe and Japan*. JTEC/WTEC Conference. Baltimore. 102.
22. Wang, P., Eckert, J., Prashanth, K. G., Wu, M. W., Kaban, I., Xi, L. X., and Scudino, S. (2020). A review of particulate-reinforced aluminum matrix composites fabricated by selective laser melting. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 30(8), 2001-2034.
23. Olakanmi, E. O., Cochrane, R. F., and Dalgarno, K. W. (2015). A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science*, 74, 401-477.
24. Bertocco, A., Esposito, L., Aurino, A., Borrelli, D., and Caraviello, A. (2021). Influence of SLM parameters on the compressive behaviour of lattice structures in 17-4PH stainless steel. *Materials Science and Engineering*, 1038(1), 012035.
25. Wong, M., Tsopanos, S., Sutcliffe, C. J., and Owen, I. (2007). Selective laser melting of heat transfer devices. *Rapid Prototyping Journal*, 13(5), 291-297.
26. Klahn, C., Leutenecker, B., and Meboldt, M. (2015). Design strategies for the process of additive manufacturing. *Procedia Cirp*, 36, 230-235.
27. Yadroitsev, I., and Bertrand, P. (2010). Selective laser melting in micro manufacturing. *Annals of DAAAM and Proceedings*, 319.

28. Kumar, S., and Kruth, J. P. (2010). Composites by rapid prototyping technology. *Materials and Design*, 31(2), 850-856.
29. Sercombe, T. B., and Li, X. (2016). Selective laser melting of aluminium and aluminium metal matrix composites. *Materials Technology*, 31(2), 77-85.
30. Phutela, C., Aboulkhair, N. T., Tuck, C. J., and Ashcroft, I. (2019). The effects of feature sizes in selectively laser melted Ti-6Al-4V parts on the validity of optimised process parameters. *Materials*, 13(1), 117.
31. Buchbinder, D., Schleifenbaum, H., Heidrich, S., Meiners, W., and Bültmann, J. J. P. P. (2011). High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts. *Physics Procedia*, 12, 271-278.
32. Kamarudin, K., Wahab, M. S., Shayfull, Z., Ahmed, A., and Raus, A. A. (2016). *Dimensional accuracy and surface roughness analysis for AlSi10Mg produced by selective laser melting (SLM)*. MATEC Web of Conferences, 78, 01077.
33. Ardila, L. C., Garcíandia, F., González-Díaz, J. B., Álvarez, P., Echeverría, A., Petite, M. M., and Ochoa, J. (2014). Effect of IN718 recycled powder reuse on properties of parts manufactured by means of selective laser melting. *Physics Procedia*, 56, 99-107.
34. Kumar, D., Jhavar, S., Arya, A., Prashanth, K. G., and Suwas, S. (2021). Mechanisms controlling fracture toughness of additively manufactured stainless steel 316L. *International Journal of Fracture*, 1-18.
35. Wang, Z., Ummethala, R., Singh, N., Tang, S., Suryanarayana, C., Eckert, J., and Prashanth, K. G. (2020). Selective laser melting of aluminum and its alloys. *Materials*, 13(20), 4564.
36. Bhavar, V., Kattire, P., Patil, V., Khot, S., Gujar, K., and Singh, R. (2017). A review on powder bed fusion technology of metal additive manufacturing. *Additive Manufacturing Handbook*, 251-253.
37. Wang, L. F., Sun, J., Yu, X. L., Shi, Y., Zhu, X. G., Cheng, L. Y., ... and Guo, L. J. (2018). Enhancement in mechanical properties of selectively laser-melted AlSi10Mg aluminum alloys by T6-like heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 734, 299-310.
38. Aboulkhair, N. T., Maskery, I., Tuck, C., Ashcroft, I., and Everitt, N. M. (2016). The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 667, 139-146.
39. Read, N., Wang, W., Essa, K., and Attallah, M. M. (2015). Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development. *Materials and Design*, 65, 417-424.

40. Kempen, K., Thijs, L., Yasa, E., Badrossamay, M., Verheecke, W., and Kruth, J. P. (2011). *Process optimization and microstructural analysis for selective laser melting of AlSi10Mg*. International Solid Freeform Fabrication Symposium, Texas.
41. Everitt, N. M., Aboulkhair, N. T., Maskery, I., Tuck, C., Ashcroft, I. (2016). Nanoindentation shows uniform local mechanical properties across melt pools and layers produced by selective laser melting of AlSi10Mg alloy. *Advanced Materials Letters*, 7(1), 13-16.
42. Prashanth, K. G., Debalina, B., Wang, Z., Gostin, P. F., Gebert, A., Calin, M., and Eckert, J. (2014). Tribological and corrosion properties of Al-12Si produced by selective laser melting. *Journal of Materials Research*, 29(17), 2044-2054.
43. Trevisan, F., Calignano, F., Lorusso, M., Pakkanen, J., Aversa, A., Ambrosio, E. P., and Manfredi, D. (2017). On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: process, microstructure, and mechanical properties. *Materials*, 10(1), 76.
44. Ullah, I., Elambasseril, J., Brandt, M., and Feih, S. (2014). Performance of bio-inspired Kagome truss core structures under compression and shear loading. *Composite Structures*, 118, 294-302.
45. Simoni, F., Huxol, A., and Villmer, F. J. (2021). Improving surface quality in selective laser melting based tool making. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32, 1927-1938.
46. Yasa, E., and Kruth, J. P. (2011). Application of laser re-melting on selective laser melting parts. *Advances in Production engineering and Management*, 6(4), 259-270.
47. Majeed, A., Ahmed, A., Salam, A., and Sheikh, M. Z. (2019). Surface quality improvement by parameters analysis, optimization and heat treatment of AlSi10Mg parts manufactured by SLM additive manufacturing. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2(4), 288-295.
48. Yasa, E., Kruth, J. P., and Deckers, J. (2011). Manufacturing by combining selective laser melting and selective laser erosion/laser re-melting. *CIRP annals*, 60(1), 263-266.
49. Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E. P., Iuliano, L., and Fino, P. (2013). Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 2743-2751.
50. Kruth, J. P., Yasa, E., and Deckers, J. (2008). *Roughness improvement in selective laser melting*. In Proceedings of the 3rd International Conference on Polymers and Moulds Innovations, Heverlee. 170-183.
51. Casalino, G., Campanelli, S. L., Contuzzi, N., and Ludovico, A. D. (2015). Experimental investigation and statistical optimisation of the selective laser melting process of a maraging steel. *Optics and Laser Technology*, 65, 151-158.

52. Galy, C., Le Guen, E., Lacoste, E., and Arvieu, C. (2018). Main defects observed in aluminum alloy parts produced by SLM: From causes to consequences. *Additive Manufacturing*, 22, 165-175.
53. Kaufmann, N., Imran, M., Wischeropp, T. M., Emmelmann, C., Siddique, S., and Walther, F. (2016). Influence of process parameters on the quality of aluminium alloy EN AW 7075 using selective laser melting (SLM). *Physics Procedia*, 83, 918-926.
54. Rohit, T., Kurian, A., Senthilkumaran, K., and Arivazhagan, N. (2013). Studies on absorptivity and Marangoni flow during laser sintering. *In Advanced Materials Research*, 622, 531-534
55. Olakanmi, E. O., Cochrane, R. F., and Dalgarno, K. W. (2015). A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science*, 74, 401-477.
56. Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E. P., Iuliano, L., and Fino, P. (2013). Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 2743-2751.
57. Horn, T. J., and Harrysson, O. L. (2012). Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications. *Science progress*, 95(3), 255-282.
58. Zhang, Z. Y., Jhong, K. J., Cheng, C. W., Huang, P. W., Tsai, M. C., and Lee, W. H. (2016, 14-17 March). *Metal 3D printing of synchronous reluctance motor*. In 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology, Taipei, 1125-1128.
59. Özsoy, K., Duman, B., ve Gültekin, D. İ. (2019). Metal part production with additive manufacturing for aerospace and defense industry. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 11(3), 201-210.
60. Sing, S. L., and Sing, S. L. (2019). Concepts of selective laser melting for orthopaedic implants. *Selective Laser Melting of Novel Titanium-Tantalum Alloy as Orthopaedic Biomaterial*, 9-36.
61. Tao, W., and Leu, M. C. (2016, 01-03 August). *Design of lattice structure for additive manufacturing*. In 2016 International Symposium on Flexible Automation, Cleveland, 325-332.
62. Calignano, F., Lorusso, M., Pakkanen, J., Trevisan, F., Ambrosio, E. P., Manfredi, D., and Fino, P. (2017). Investigation of accuracy and dimensional limits of part produced in aluminum alloy by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, 451-458.
63. Li, R., Shi, Y., Liu, J., Yao, H., and Zhang, W. (2009). Effects of processing parameters on the temperature field of selective laser melting metal powder. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 48, 186-195.

64. Cherry, J. A., Davies, H. M., Mehmood, S., Lavery, N. P., Brown, S. G. R., and Sienz, J. (2015). Investigation into the effect of process parameters on microstructural and physical properties of 316L stainless steel parts by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76, 869-879.
65. Attar, H., Calin, M., Zhang, L. C., Scudino, S., and Eckert, J. (2014). Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium. *Materials Science and Engineering: A*, 593, 170-177.
66. Averyanova, M., Bertrand, P., and Verquin, B. (2010). *Effect of initial powder properties on final microstructure and mechanical properties of parts manufactured by selective laser melting*. Annals of DAAAM for 2010 and Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium, Vienna, 21, 1726-9679
67. Aboulkhair, N. T., Stephens, A., Maskery, I., Tuck, C., Ashcroft, I., and Everitt, N. M. (2015). *Mechanical properties of selective laser melted AlSi10Mg: nano, micro, and macro properties*. International Solid Freeform Fabrication Symposium, Texas.
68. Internet: Rehme, O. (2010). Cellular design for laser freeform fabrication. *Cuvillier Verlag*. URL: [https://cuvillier.de/uploads/preview/public\\_file/1820/9783869552736.pdf](https://cuvillier.de/uploads/preview/public_file/1820/9783869552736.pdf), Son Erişim Tarihi: 05.06.2023.
69. Hao, L., Raymont, D., Yan, C., Hussein, A., and Young, P. (2011). *Design and additive manufacturing of cellular lattice structures*. In The International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, 249-254.
70. Yan, C., Hao, L., Hussein, A., and Raymont, D. (2012). Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 62, 32-38.
71. Niendorf, T., Brenne, F., and Schaper, M. (2014). Lattice structures manufactured by SLM: On the effect of geometrical dimensions on microstructure evolution during processing. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 45, 1181-1185.
72. Kruth, J. P., Vandenbroucke, B., Van Vaerenbergh, J., and Mercelis, P. (2005, 20-23 April). *Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques*. In Proceedings of the International Conference Polymers and Moulds Innovations PMI 2005, Gent.
73. Subbaian Kaliamoorthy, P., Subbiah, R., Bensingh, J., Kader, A., and Nayak, S. (2020). Benchmarking the complex geometric profiles, dimensional accuracy and surface analysis of printed parts. *Rapid Prototyping Journal*, 26(2), 319-329.
74. Kamarudin, K., Wahab, M. S., Raus, A. A., Ahmed, A., and Shamsudin, S. (2017, April). *Benchmarking of dimensional accuracy and surface roughness for AlSi10Mg part by selective laser melting (SLM)*. In AIP Conference Proceedings, Melville 1831, 020047

75. Yasa, E., Poyraz, Ö., Yağmur, A., Yılmaz, R., ve Pilatin, S. (2014). Benchmarking for Metal Additive Manufacturing. *MSI Defence Review.*, 68-71.
76. Xu, Y., Zhang, D., Zhou, Y., Wang, W., and Cao, X. (2017). Study on topology optimization design, manufacturability, and performance evaluation of Ti-6Al-4V porous structures fabricated by selective laser melting (SLM). *Materials*, 10(9), 1048.
77. Wang, D., Song, C., Yang, Y., Liu, R., Ye, Z., Xiao, D., and Liu, Y. (2016). Research on the redesign of precision tools and their manufacturing process based on selective laser melting (SLM). *Rapid Prototyping Journal*, 22(1), 104-114.
78. Wang, D., Yang, Y., Yi, Z., and Su, X. (2013). Research on the fabricating quality optimization of the overhanging surface in SLM process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65, 1471-1484.
79. Cloots, M., Zumofen, L., Spierings, A. B., Kirchheim, A., and Wegener, K. (2017). Approaches to minimize overhang angles of SLM parts. *Rapid Prototyping Journal*, 23(2), 362-369.
80. Thomas, D. (2010). *The development of design rules for selective laser melting*. Doctoral dissertation, University of Wales, Cardiff.
81. Vora, P., Mumtaz, K., Todd, I., and Hopkinson, N. (2015). AlSi12 in-situ alloy formation and residual stress reduction using anchorless selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 7, 12-19.
82. Calignano, F. (2014). Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting. *Materials and Design*, 64, 203-213.
83. Meyer, G., Musekamp, J., Göbel, F., Gardian, F., and Mittelstedt, C. (2022). Manufacturability investigation of inclined AlSi10Mg lattice struts by means of selective laser melting. *Manufacturing Letters*, 31, 101-105.
84. Virdyawan, V., Giles, J. W., van Arkel, R. J., Oldfield, M., and Baena, F. R. High Aspect Ratio *Additive Manufacturing of a Biologically Inspired Surgical Needle*. Department of Mechanical Engineering, Imperial College London, London.
85. Kruth, J. P., Mercelis, P., Van Vaerenbergh, J., and Craeghs, T. (2007). Feedback control of selective laser melting. *In Virtual and Rapid Manufacturing*, 521-528.
86. Kempen, K., Thijs, L., Van Humbeeck, J., and Kruth, J. P. (2012). Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting. *Physics Procedia*, 39, 439-446.

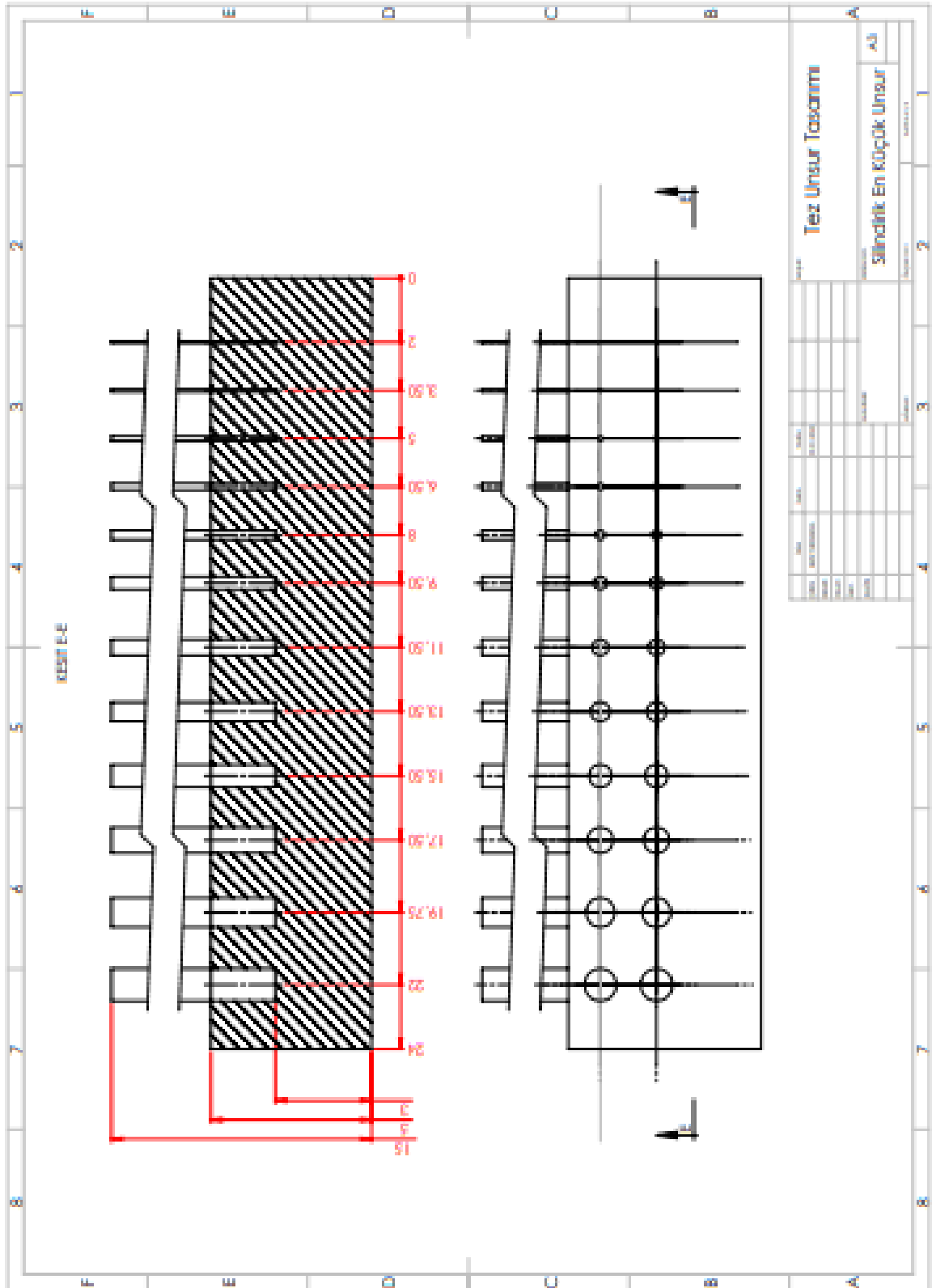




**EKLER**



EK-1. (devam) Birinci model teknik resmi – 2. sayfa









*Gazili olmak ayrıcalıktır*