

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SEÇİCİ LAZER SİNTERLEME İLE ÜRETİLEN DESTEKSİZ  
YAPILARIN GEOMETRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Mevlana Celalettin KAPLAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
İmal Usulleri Programı

Danışman  
Prof. Dr. Mirigül ALTAN

Mart, 2021

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SEÇİCİ LAZER SİNERLEME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN DESTEKSİZ  
YAPILARIN GEOMETRİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Mevlana Celalettin KAPLAN tarafından hazırlanan tez çalışması **12/03/2021** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İmal Usulleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mirigül ALTAN  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Mirigül ALTAN, Danışman  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Doç. Dr. Orhan ÇAKIR, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Prof. Dr. Deniz UZUNSOY, Üye  
Bursa Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

Danışmanım Prof. Dr. Mirigöl ALTAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Seçici Lazer Sinterleme Yöntemi İle Üretilen Desteksiz Yapıların Geometrik Özelliklerinin İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Mevlana Celalettin KAPLAN

İmza

*Eşim Melike ve oğlum Tarık Emre'ye,*

## TEŞEKKÜR

---

Tez hazırlamamda desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve sabırla bana yol gösteren değerli danışmanım Prof. Dr. Mirigül ALTAN Hocama;

Akademik çalışmalar yapmam konusunda beni teşvik eden ve yönlendiren Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER Hocama;

Araştırma çalışmalarımda destek olan ve her türlü test, analiz konusunda kapılarını sonuna kadar açan Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi Alüminyum Test, Eğitim ve Araştırma Merkezi Müdürü Dr. Ebubekir KOÇ'a ve değerli ekibinden Mert COŞKUN, Zafer Çağatay ÖTER ve Gürkan TARAKÇI'ya;

Son olarak eğitim hayatımda bana her türlü imkânı sunan ve destekleyen annem Selma KAPLAN ve babam Şükrü Eyyüp KAPLAN'a;

şükranlarımı sunarım.

Mevlana Celalettin KAPLAN

# İÇİNDEKİLER

|                                                                 |             |
|-----------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>KISALTMA LİSTESİ</b>                                         | <b>vii</b>  |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>                                            | <b>viii</b> |
| <b>TABLO LİSTESİ</b>                                            | <b>x</b>    |
| <b>ÖZET</b>                                                     | <b>xi</b>   |
| <b>ABSTRACT</b>                                                 | <b>xiii</b> |
| <b>1 GİRİŞ</b>                                                  | <b>1</b>    |
| 1.1 Literatür Özeti .....                                       | 1           |
| 1.2 Tezin Amacı .....                                           | 3           |
| 1.3 Hipotez .....                                               | 3           |
| <b>2 EKLEMELİ İMALAT</b>                                        | <b>4</b>    |
| 2.1 Tekne fotopolimerizasyonu (Stereolitografi) .....           | 10          |
| 2.2 Malzeme Püskürtme (Material Jetting) .....                  | 11          |
| 2.3 Malzeme Ekstrüzyonu .....                                   | 12          |
| 2.4 Sac Laminasyonu .....                                       | 13          |
| 2.5 Yapıştırıcı ile Katmanlı İmalat (Binder Jetting) .....      | 14          |
| 2.6 Malzeme Biriktirme Yöntemi (Direct Energy Deposition) ..... | 15          |
| 2.7 Toz Yataklı Lazer Sistemleri .....                          | 16          |
| 2.8 Seçici Lazer Sinterleme .....                               | 19          |
| 2.8.1 Üretim Parametreleri .....                                | 22          |
| 2.8.2 SLS ile Üretilen Parçalarda Karşılaşılan Sorunlar .....   | 29          |
| <b>3 SEÇİCİ LAZER SİNERLEMEDE ÇIKINTI YAPILAR</b>               | <b>34</b>   |
| 3.1 Destek Kullanılarak Çıkıntı Yapıların Üretimi .....         | 34          |
| 3.2 Destek Kullanılmadan Çıkıntı Yapıların Üretimi .....        | 37          |
| <b>4 DENEYSEL ÇALIŞMA</b>                                       | <b>45</b>   |
| 4.1 Malzeme ve Kullanılan Ekipmanlar .....                      | 45          |
| 4.1.1 AlSi <sub>10</sub> Mg .....                               | 45          |
| 4.1.2 Eklemeli İmalat Makinesi ve Üretim Parametreleri .....    | 45          |
| 4.1.3 Numunelerin Boyutsal Ölçümleri .....                      | 46          |
| 4.1.4 Ağırlık Ölçümü .....                                      | 47          |
| 4.1.5 Yoğunluk Ölçümü .....                                     | 48          |

|                                         |           |
|-----------------------------------------|-----------|
| 4.2 Numune Üretimleri .....             | 48        |
| 4.2.1 1. Üretim .....                   | 48        |
| 4.2.2 2. Üretim .....                   | 50        |
| 4.2.3 3. Üretim .....                   | 51        |
| <b>5 BULGULAR VE TARTIŞMA</b>           | <b>53</b> |
| 5.1 1. Üretim Sonuçları .....           | 53        |
| 5.2 2. Üretim Sonuçları .....           | 59        |
| 5.2.1 Ağırlık Ölçümü Sonuçları .....    | 64        |
| 5.2.2 Yoğunluk Ölçümü Sonuçları .....   | 65        |
| 5.2.3 Hacim Ölçümü Sonuçları .....      | 66        |
| 5.2.4 Porozite Ölçümü Sonuçları .....   | 68        |
| 5.3 3. Üretim Sonuçları .....           | 72        |
| 5.3.1 Ağırlık Ölçümü Sonuçları .....    | 76        |
| <b>6 SONUÇ VE ÖNERİLER</b>              | <b>78</b> |
| <b>KAYNAKÇA</b>                         | <b>80</b> |
| <b>A 2. ÜRETİME AİT SEM GÖRÜNTÜLERİ</b> | <b>86</b> |
| <b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>        | <b>91</b> |

## KISALTMA LİSTESİ

---

|      |                                            |
|------|--------------------------------------------|
| ABS  | Akrilonitril Butadien Stiren               |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| CAD  | Computer Aided Design                      |
| DSPC | Direct Sheşş Production Casting            |
| FDM  | Fused Deposition Modelling                 |
| LOM  | Laminated Object Manufacturing             |
| MIT  | Massachusetts Institute of Technology      |
| PA   | Poliamid                                   |
| PC   | Polikarbonat                               |
| PE   | Polietilen                                 |
| PEEK | Polietereterketon                          |
| PP   | Polypropylen                               |
| SEM  | Scanning Electron Microscope               |
| SGC  | Selective Ground Curing                    |
| SLA  | Stereolithography                          |
| SLM  | Selective Laser Melting                    |
| SLS  | Selective Laser Sintering                  |
| STL  | Stereolithography                          |
| UV   | Ultraviole                                 |

## ŞEKİL LİSTESİ

---

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1 Eklemeli imalat, hızlı imalat ve hızlı prototipleme ayrımı.....           | 5  |
| Şekil 2.2 Eklemeli imalat yöntemlerinde üretim aşamaları .....                      | 6  |
| Şekil 2.3 Eklemeli imalatın avantajları/dezavantajları.....                         | 8  |
| Şekil 2.4 Eklemeli imalat kullanım alanları .....                                   | 9  |
| Şekil 2.5 Malzeme türlerine göre eklemeli imalat makine teknolojileri.....          | 10 |
| Şekil 2.6 SLA ve DLP .....                                                          | 11 |
| Şekil 2.7 Malzeme püskürtme yöntemi .....                                           | 12 |
| Şekil 2.8 Malzeme ekstrüzyon şematik gösterimi.....                                 | 13 |
| Şekil 2.9 Sac laminasyon yöntemi .....                                              | 14 |
| Şekil 2.10 Yapıştırıcı ile katmanlı imalat üretim süreci.....                       | 15 |
| Şekil 2.11 Metal biriktirme yöntemi şematik gösterimi [25] .....                    | 16 |
| Şekil 2.12 Toz yataklı lazer sistemi şematik gösterimi [31] .....                   | 17 |
| Şekil 2.13 Toz yataklı lazer sisteminde kullanılan birleşme yöntemleri .....        | 18 |
| Şekil 2.14 SLS ile üretim [7].....                                                  | 20 |
| Şekil 2.15 Katı hal difüzyonu şematik gösterimi .....                               | 21 |
| Şekil 2.16 Seçici lazer sinterlemede parametreler .....                             | 23 |
| Şekil 2.17 Bindirme oranı.....                                                      | 24 |
| Şekil 2.18 Yaygın olarak kullanılan tarama stratejileri [40] .....                  | 25 |
| Şekil 2.19 Üretim yönü .....                                                        | 26 |
| Şekil 2.20 Parametrelerin etkisinin belirlenmesi için gerçekleştirilen üretim ..... | 28 |
| Şekil 2.21 Tabakalaşma ve çatlak oluşumu .....                                      | 30 |
| Şekil 2.22 Gözenek oluşumu [47].....                                                | 30 |
| Şekil 2.23 Farklı lazer güçlerinde meydana gelen yumrulanma etkisi [9].....         | 32 |
| Şekil 2.24 Merdiven etkisi .....                                                    | 33 |
| Şekil 3.1 Destek yapı.....                                                          | 35 |
| Şekil 3.2 Destek yapı çeşitleri.....                                                | 35 |
| Şekil 3.3 Kafes destek yapısı.....                                                  | 36 |
| Şekil 3.4 Toz destekli üretilmiş yapılar .....                                      | 37 |
| Şekil 3.5 Cüruf oluşumu .....                                                       | 38 |
| Şekil 3.6 Marangoni etkisi .....                                                    | 39 |

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3.7</b> Ergime havuzunda marangoni akışı.....                               | 39 |
| <b>Şekil 3.8</b> Çarpılma oluşumu .....                                              | 40 |
| <b>Şekil 3.9</b> Farklı çıkıntı uzunluklarında üretim.....                           | 41 |
| <b>Şekil 3.10</b> Tarama yönünün askıda kalan yapı üzerindeki etkisi.....            | 41 |
| <b>Şekil 3.11</b> Isıl destekli üretim.....                                          | 42 |
| <b>Şekil 3.12</b> Destekli/Desteksiz dairesel profil üretimi.....                    | 42 |
| <b>Şekil 3.13</b> Konkav ve konveks çıkıntı üretimi .....                            | 43 |
| <b>Şekil 4.1</b> EOS M 290 DMLS eklemeli imalat makinası.....                        | 46 |
| <b>Şekil 4.2</b> Taramalı elektron mikroskobu .....                                  | 47 |
| <b>Şekil 4.3</b> Hassas dijital terazi.....                                          | 48 |
| <b>Şekil 4.4</b> Numune tasarımı .....                                               | 49 |
| <b>Şekil 4.5</b> Tarama yönü.....                                                    | 49 |
| <b>Şekil 4.6</b> 3. Üretim numune tasarımı.....                                      | 51 |
| <b>Şekil 5.1</b> 1.Üretimdeki numunelerin sem görüntüleri.....                       | 53 |
| <b>Şekil 5.2</b> 1.Üretimdeki numunelerin sem görüntüleri.....                       | 54 |
| <b>Şekil 5.3</b> Tarama yönü etkisi .....                                            | 56 |
| <b>Şekil 5.4</b> Çıkıntı uzunluğunun geometrik sapma üzerindeki etkisi.....          | 57 |
| <b>Şekil 5.5</b> Çıkıntı yüksekliğinin geometrik sapma üzerindeki etkisi .....       | 58 |
| <b>Şekil 5.6</b> 2. Üretime ait numunelerin SEM görüntüleri .....                    | 59 |
| <b>Şekil 5.7</b> Çıkıntı uzunluğunun geometrik sapmaya etkisi .....                  | 63 |
| <b>Şekil 5.8</b> Çıkıntı yüksekliğinin geometrik sapmaya etkisi.....                 | 63 |
| <b>Şekil 5.9</b> Ağırlık ile geometrik sapma miktarının karşılaştırılması.....       | 64 |
| <b>Şekil 5.10</b> Yoğunluk ile geometrik sapma değerlerinin karşılaştırılması.....   | 65 |
| <b>Şekil 5.11</b> Numunelerin teorik hacim ile gerçek hacim arasındaki fark .....    | 67 |
| <b>Şekil 5.12</b> Geometrik sapma ile gerçek hacim arasındaki ilişki.....            | 67 |
| <b>Şekil 5.13</b> Porozite ile geometrik sapma arasındaki ilişki.....                | 69 |
| <b>Şekil 5.14</b> 3. Üretim SEM görüntüleri .....                                    | 72 |
| <b>Şekil 5.15</b> 3. Üretim SEM görüntüleri .....                                    | 73 |
| <b>Şekil 5.16</b> 2. ve 3. Üretimdeki geometrik sapmada oluşan fark.....             | 75 |
| <b>Şekil 5.17</b> 2. ve 3 Üretimdeki numunelerin ağırlıklarının karşılaştırması..... | 76 |

## TABLO LİSTESİ

---

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 2.1</b> Seçici lazer sinterlemede üretim parametreleri [37] .....               | 22 |
| <b>Tablo 4.1</b> AlSi10Mg alaşımı malzeme kompozisyonu .....                             | 45 |
| <b>Tablo 4.2</b> EOS M 290 üretim parametreleri .....                                    | 46 |
| <b>Tablo 4.3</b> 1. Üretim için belirlenen numune ölçüleri .....                         | 50 |
| <b>Tablo 4.4</b> 2. Üretim için belirlenen numune ölçüleri .....                         | 51 |
| <b>Tablo 4.5</b> 3. Üretim için belirlenen numune ölçüleri .....                         | 52 |
| <b>Tablo 4.6</b> Çıkıntı içerisindeki boşluk ölçüleri ve hacmi .....                     | 52 |
| <b>Tablo 5.1</b> 1. Üretim ölçüm sonuçları .....                                         | 54 |
| <b>Tablo 5.2</b> Çıkıntı kısmında ortaya çıkan boyutsal fark.....                        | 55 |
| <b>Tablo 5.3</b> Boyutsal değişimleri incelemek için numunelerin sınıflandırılması ..... | 56 |
| <b>Tablo 5.4</b> 2. Üretim ölçüm sonuçları .....                                         | 60 |
| <b>Tablo 5.5</b> Çıkıntıda meydana gelen boyutsal fark.....                              | 61 |
| <b>Tablo 5.6</b> Boyutsal değişimleri incelemek için numunelerin sınıflandırılması ..... | 62 |
| <b>Tablo 5.7</b> 2. Üretime ait numunelerin ağırlık ölçümü .....                         | 64 |
| <b>Tablo 5.8</b> 2. Üretime ait numunelerin yoğunluk ölçümü .....                        | 65 |
| <b>Tablo 5.9</b> Numunelere ait teorik ve gerçek hacim değerleri .....                   | 66 |
| <b>Tablo 5.10</b> Numunelerdeki porozite miktarı .....                                   | 68 |
| <b>Tablo 5.11</b> 3. Üretim ölçüm sonuçları .....                                        | 74 |
| <b>Tablo 5.12</b> Çıkıntıda meydana gelen boyutsal fark .....                            | 74 |
| <b>Tablo 5.13</b> Ortalama boyutsal fark .....                                           | 75 |
| <b>Tablo 5.14</b> 3. Üretime ait numunelerin ağırlık ölçümü.....                         | 76 |

# Seçici Lazer Sinterleme İle Üretilen Desteksiz Yapıların Geometrik Özelliklerinin İncelenmesi

Mevlana Celalettin KAPLAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Mirigül ALTAN

Eklemeli imalat; geleneksel yöntemler ile imalatı zor olan karmaşık geometriye sahip parçaların üretilebilmesi, kişiselleştirilmiş ve esnek üretime imkân sunulması, hammaddenin en etkin ve verimli bir şekilde kullanılabilmesi, prototip üretimi ve ürün tasarımı çalışmaları için düşük maliyetli çözümler sunması vb. avantajlara sahip olması nedeniyle günümüzde birçok sektörde kullanılmaktadır. Eklemeli imalat yöntemlerinden ticari olarak en yaygın olarak kullanılanlardan birisi seçici lazer sinterleme yöntemleridir. Seçici lazer sinterlemede lazer gücü, tarama stratejisi, tarama hızı gibi üretim parametreleri ve üretilecek parçadaki boşluk, eğimli yüzey, çıkıntı gibi geometrik yapılar kritik öneme sahiptir.

Numune üzerinde bulunan çıkıntı yapılar destek yapı eklenerek üretilmekte, bu da zaman, maliyet, işçilik gibi ekstra maliyetler ortaya çıkarmaktadır. Aynı zamanda temizleme esnasında parçada mikro çatlak ve kırılma gibi deformasyonlara sebep olmaktadır. Destek yapı kullanılmadan gerçekleştirilen çıkıntı yapı üretiminde ise tozun absorbe ettiği enerji miktarı arttığından ergime havuzu genişlemekte ve geometrik sapmalar meydana gelmektedir.

Bu alışmada AlSi<sub>10</sub>Mg alaşımı kullanarak destek kullanılmadan üretilen çıkıntı yapılarıdaki meydana gelen geometrik sapmaların incelenmesi amacıyla deneysel üretimler gerçekleştirilmiştir. Farklı tarama stratejisi, çıkıntı uzunluğu ve çıkıntı yksekliliğinde üretilen numunelerin taramalı elektron mikroskobu ile görüntüsü alınarak meydana gelen geometrik sapma incelenmiştir. Ayrıca geometrik sapma nedeniyle numunede meydana gelen ağırlık, hacim, yoğunluk ve porozitedeki değişimler incelenmiştir. İlave olarak çıkıntı yapının içerisinde boşluk oluşturularak çıkıntı hafifletilmiş ve ağırlığın geometrik sapma üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre, 0<sup>0</sup>-45<sup>0</sup>-90<sup>0</sup> tarama stratejisinde geometrik sapma miktarının daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Diğer yandan çıkıntı uzunluğunun artması ile geometrik sapma miktarının arttığı anlaşılmıştır. ıkıntı yksekliliğinin artması çıkıntı yüzeyi ile tabla arasında mesafenin azaldığı ve bunun da geometrik sapmayı azalttığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca çıkıntı kısımda boşluk oluşturularak ağırlığının azaltılmasının geometrik sapmaya birincil derece etki etmediği anlaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Seii lazer sinterleme, desteksiz yapılar, çıkıntı yapılar, boyutsal doğruluk

# **Investigation of the Geometric Properties of Unsupported Structures Produced by Selective Laser Sintering**

Mevlana Celalettin KAPLAN

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Advisor: Prof. Dr. Mirigül ALTAN

Additive manufacturing technology is capable of producing parts with complex geometry that is difficult to manufacture with traditional methods, providing personalized and flexible production, using the raw material in the most effective and efficient way, providing low-cost solutions for prototype production and product design studies, etc. Due to its advantages, it is used in many sectors today. Selective laser sintering is one of the most widely used additive manufacturing methods commercially. In selective laser sintering, production parameters such as laser power, scanning strategy, scanning speed and geometric structures such as cavity, curved surface and overhangs in the part to be produced are critical.

The overhang structures on the sample are produced by adding support structure, which creates extra costs such as time, material and labor. At the same time, it causes deformations such as micro cracks and fractures in the part during cleaning. In the production of overhang structures without the use of support structures, as the amount of energy absorbed by the powder increases, the melting pool expands and geometric deviations occur.

In this study, experimental productions were carried out to examine the geometric deviations in the overhang structures produced using AlSi<sub>10</sub>Mg alloy without using supports. The geometric deviation that occurred was examined by taking the images of the samples produced with scanning the difference strategy, protrusion length and protrusion height with scanning electron microscopy. In addition, changes in weight, volume, density and porosity in the sample due to geometric deviation were investigated. In addition, by creating a space inside the overhang structure, the overhang is lightened and the effect of weight on geometric deviation has been investigated.

According to the results, it is understood that the geometric deviation amount is lower in 0°-45°-90° scanning strategy. Besides, it has been found that the geometric deviation increases with the increase in the length of the overhang. It has been found that the increase in the overhang height decreases the distance between the overhang surface and the table, and this decreases the geometric deviation. In addition, it has been understood that reducing the weight by creating a gap in the overhang part does not have a primary effect on the geometric deviation.

**Keywords:** Selective laser sintering, unsupported structures, overhang, geometric deviation

### 1.1 Literatür Özeti

Eklemeli imalat; geleneksel yöntemler ile imalatı zor olan karmaşık geometriye sahip parçaların üretilebilmesi, kişiselleştirilmiş ve esnek üretime imkan sunulması, hammaddenin en etkin ve verimli bir şekilde kullanılabilmesi, prototip üretimi ve ürün tasarımı çalışmaları için düşük maliyetli çözümler sunması, kesici takımlar bulunmaması, takım değiştirme gibi işlemler bulunmaması, ağır işçilik içermemesi, üretilecek parçaların bilgisayar ortamında tasarlandıktan sonra ilave bir işleme gerek olmaksızın nihai ürüne dönüştürülmesi gibi avantajlara sahip olması nedeniyle günümüzde birçok sektörde kullanılmaktadır [1].

Eklemeli imalat ASTM tarafından (2010), “malzemeleri üç boyutlu modelleme yazılımları yardımıyla, katmanlı bir şekilde, genellikle üst üste birleştirmek veya birbirine eklemek suretiyle üç boyutlu nesneler üretmek” şeklinde tanımlanmaktadır [2]. ASTM tarafından eklemeli imalat teknolojileri yedi sınıfa ayrılmış olup bunlar; tekne fotopolimerizasyonu, malzeme püskürtme, malzeme ekstrüzyonu, sac laminasyonu, yapıştırıcı ile katmanlı imalat, malzeme biriktirme ve toz yataklı lazer teknolojileridir. Bunlardan toz yataklı lazer teknolojisi içerisinde ticari olarak en yaygın olarak kullanılan yöntemler seçici lazer ergitme ve seçici lazer sinterleme yöntemleridir. Seçici lazer ergitme sisteminde lazer ışını uygulanan toz bölgede tamamen bir eriyik havuzu oluşurken; seçici lazer sinterlemede malzeme tamamen eritilmeyip, toz halindeki malzemenin likit faz difüzyonu ile sinterlenmesiyle imalat gerçekleştirilmektedir [3] [4] [5].

Seçici lazer sinterleme yöntemi gerek mühendislik uygulamalarında gerekse tasarım ve prototipleme işlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Üretilen malzemelerin mekanik ve geometrik özelliklerini büyük oranda etkileyen üretim parametreleri; lazer gücü, lazer nokta boyutu, bindirme oranı, tarama stratejisi ve açısı, üretim yönü, tarama hızı ve katman kalınlığı olarak bilinmektedir [6]. Üretim parametrelerinin yanlış belirlenmesi ile ortaya çıkan en yaygın sorunlar

tabakalaşma, çatlama, kalıntı gerilme, gözeneklilik, yumrulanma etkisi, merdiven etkisidir [6] [7] [8] [9].

Üretim parametrelerinin yanı sıra üretilen ürünün üzerinde boşluklar, eğimli yüzey ve çıkıntı gibi geometrik özellikler de elde edilen nihai ürünün mekanik özelliklerini ve boyutsal doğruluğunu büyük oranda etkilemektedir. Özellikle numune üzerinde çıkıntılar var ise bu kısımların altına destek yapı eklenerek üretim gerçekleştirilmektedir. Destek yapılar ise tasarım süreci ve optimizasyonu, zaman, maliyet, işçilik ile üretim sonrası yoğun işlem gerektirmesi ve temizleme esnasında parçada deformasyonlar gibi olumsuz etkilere neden olabilmektedir.

Destek yapı kullanılmadan gerçekleştirilen çıkıntı yapı üretiminde, çıkıntı olan kısımda boyutsal hatalar ve yüksek pürüzlülüğü meydana gelmektedir [10]. Destek yapı kullanılmadığında, lazerin uygulandığı noktada oluşan eriyik havuzunu destekleyecek katı bir yapının yerine toz olması, yer çekimi ve kılcallığın da etkisiyle eriyiğin aşağı doğru batmasına sebep olarak boyutsal doğrulukta kabul edilmeyecek oranlarda hatalara sebep olmaktadır [11].

Dana vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada farklı tarama stratejileri ile üretilen maraging çelik numunelerdeki toz destekli çıkıntı bulunan kısımlarda, çıkıntı uzunluğu arttıkça yüksek boyutsal hataların ortaya çıktığı anlaşılmıştır [12]. Cooper vd. (2017) tarafından toz destekli çıkıntılara sahip titanyum alaşımı numuneler ile yapılan çalışmada, çıkıntılı kısma temas etmeyen bir destek tasarlanıp ısı destek kullanarak üretim gerçekleştirilmiş olup, üretilen bazı numunelerde çarpılma meydana gelmiş olsa da ısı destek ile istenilen oranlarda üretim gerçekleştirilebilmiştir [13]. Khana vd. (2018) tarafından gerçekleştirilen dairesel profile sahip numunelerde destek yapı kullanılmadan üretimlerde, benzer şekilde boyutsal doğrulukta sorunlar meydana gelmiş, desteksiz olarak üretilen parçada, özellikle dairesel profilin en tepe noktasında cüruf oluşumu meydana gelmiştir [14]. Bir başka çalışmada ise çıkıntıların eğimli olarak üretilmesi gerektiği durumlarda, eğimli yüzeyin üretim tablası ile yaptığı açı 45°'den daha büyük ise desteksiz üretim yapılabileceği ortaya konulmuştur [11] [15].

## 1.2 Tezin Amacı

Toz yataklı eklemeli imalat yöntemlerinden birisi olan SLS’de, destek yapı kullanılmadan toz destekli olarak gerçekleştirilen çıkıntı yapı üretiminde, çıkıntı olan kısımda boyutsal hatalar meydana gelmektedir. Metal SLS makinesinde  $AlSi_{10}Mg$  alaşımı kullanılarak üretilen çıkıntılı kısımlara sahip numunelerde, çıkıntı kısmında meydana gelen geometrik sapmaların, çıkıntının boyutlarına göre değişimi ile geometrik sapmanın üretilen numuneye ait ağırlık, hacim, yoğunluk ve porozite değerleri ilişkisinin incelenmesi hedeflenmiştir.

## 1.3 Hipotez

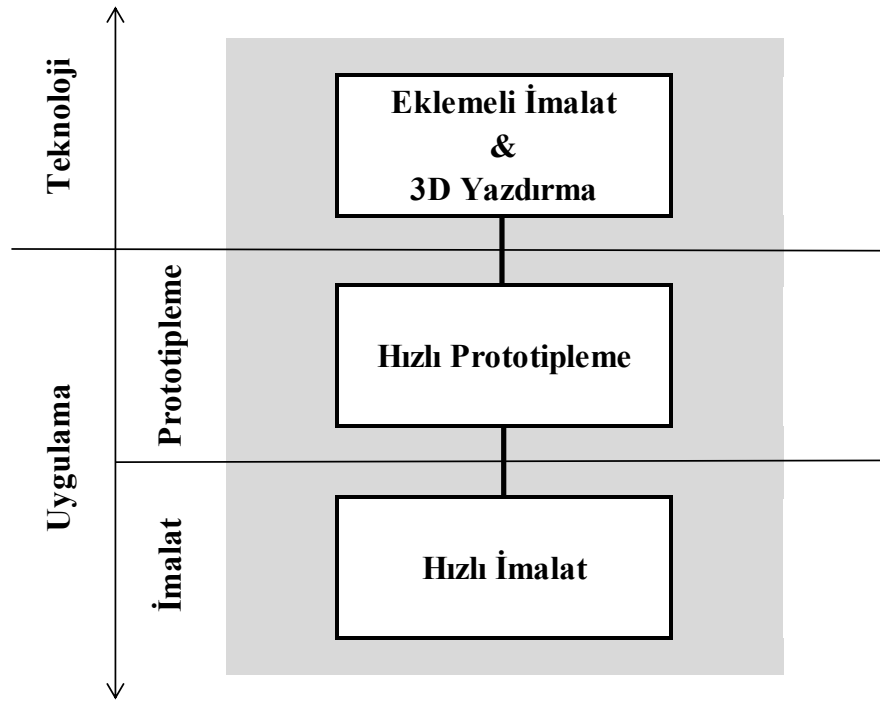
SLS yöntemi ile çıkıntı (overhang) yapıya sahip parçalarda, destek kullanılmadan üretilmesi ile meydana gelen geometrik sapma; uygun tarama stratejisinin ve çıkıntı için uygun geometrik boyutlarının tespit edilmesi ile azaltılabilir. Çıkıntı kısmında görülen geometrik sapmanın, çıkıntı hacmi ve porozite miktarında da etkili olduğu görülmüştür. Çıkıntılı bölgenin ağırlığının azaltılmasının birincil dereceden etkili olmadığı aksine parça, kafes yapısı ile hafifletildiğinde dahi yüksek miktarda geometrik sapmanın olduğu tespit edilmiştir.

Hızlı prototipleme veya hızlı imalat olarak isimlendirilen eklemeli imalat teknolojileri; maliyet, hız, güvenilirlik gibi konularda avantajlar yaratarak son yıllarda gelişimini büyük bir ivmeyle artırmış, geleneksel imalat teknolojileri ile rekabet edecek noktaya ulaşmıştır. Eklemeli imalat; lazer teknolojileri, malzeme bilimi ve makine mühendisliği alanlarının disiplinler arası gerçekleştirdiği çalışmalar sayesinde bu rekabet gücünü elde etmiş, bilim adamları ve uzmanlar tarafından “gelecek nesil” teknoloji olarak konumlandırılmıştır. Nitekim ülkemizde de ulusal kalkınma planlarında eklemeli imalat “kritik teknoloji” olarak belirlenmiş, buna yönelik teknoloji geliştirme, işgücü, altyapı, bilimsel araştırma gibi konularda yatırımlar yapılarak öncelikli desteklenecek teknoloji olarak sınıflandırılmıştır [16] [17] [18].

Bir ürünün katmanlı bir şekilde üretilmesi fikri, “eklemeli imalat” konusu henüz gündemde değilken ortaya çıkmıştır. İlk katmanlı üretim konsepti 1902 yılında Peacock adına patentlenen katmanlı üretilmiş “at nalı” ile gündeme gelmiştir. Bundan 50 yıl sonra, 1950 yılından itibaren katmanlı üretimin faydalarına yönelik çalışmalar yapılmaya başlanmış, takip eden 1960 ve 1980 arasında, katmanlı üretim süreçlerinin nasıl olması gerektiği konusunda tartışmalar devam ederek 3 boyutlu üretimin gerçekleştirilebileceğine yönelik somut fikirler oluşmuştur. Ardından eklemeli imalat ile ilgili patentler alınarak, ürünlerin prototip üretiminin temelleri ve prensipleri belirlenmiştir. 1987 yılında hızlı prototipleme sistemi olarak ilk ticari ürün, fotopolimer reçinenin UV lazer ışını vasıtasıyla fotopolimerizasyonu ile kürlenmesi metodunu kullanan Stereolithography (SLA) cihazı olmuştur. 1991 yılında ise FDM (fused deposition modelling), SGC (solid ground curing), LOM (laminated object manufacturing), SLS (selective laser sintering), DSPC (Direct shell production casting) sistemleri ticari ürün olarak piyasa sürülmüştür. Bu gelişmelerden sonra eklemeli imalat yöntemlerinde hızlı gelişmeler yaşanmaya başlanmış, mevcut yöntemlerdeki eksikler tespit edilerek iyileştirme çalışmaları yürütülmüş, polyjet, SLM (selective laser melting) gibi yeni metotlar geliştirilmiştir. Polimer, seramik, metal, kompozit, gıda mamulleri ve biyomalzemeler kullanılarak

üç boyutlu imalatın yapılabildiği sistemler geliştirilerek günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır [3].

Gerek literatürde gerekse ticari olarak eklemeli imalat ile ilgili “eklemeli imalat”, “3 boyutlu yazıcı”, “hızlı prototipleme” ve “hızlı imalat/üretim” gibi kavramlar kullanılmaktadır. Eklemeli imalat veya 3 boyutlu yazdırma, söz konusu imalat teknolojisinin genel ismi olup, Şekil 2.1’de belirtildiği gibi uygulama alanı olarak 2 alt kategoriye ayırmak mümkündür; hızlı prototipleme ve hızlı imalat. Hızlı prototipleme genellikle prototip, model ya da örnek bir deneme üretimi yapmak için kullanılırken, hızlı imalat son kullanıcıya sunulan nihai ürün olarak tanımlanmaktadır [19].

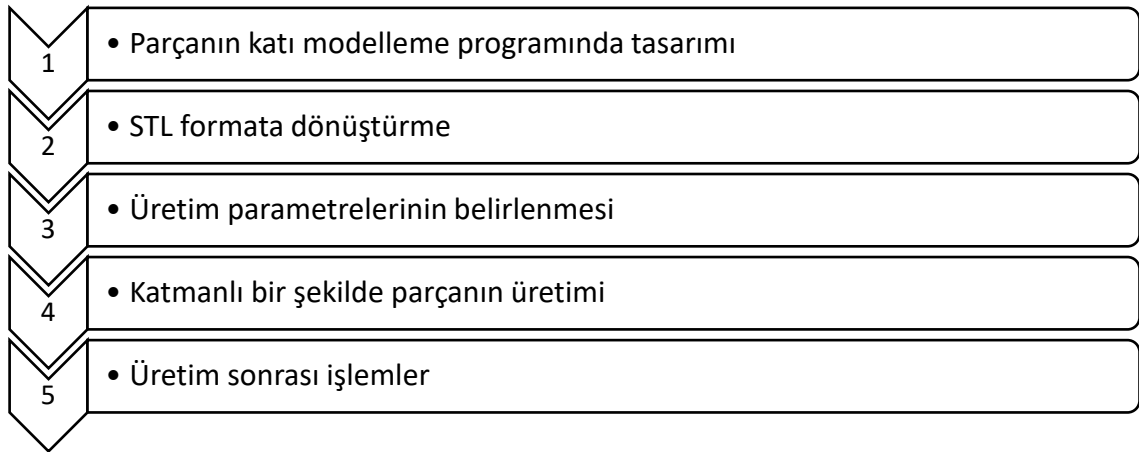


**Şekil 2.1** Eklemeli imalat, hızlı imalat ve hızlı prototipleme ayrımı

Eklemeli imalat temel olarak bilgisayarda tasarlanan bir parçanın (CAD-data) katmanlı bir şekilde üretilmesi süreci olarak tanımlanmaktadır. 3 boyutlu yazıcı olarak da bilinen eklemeli imalat, bilimsel ve teknolojik gelişmelerin etkisi ve endüstriyel olarak da kullanıma başlanmasından sonra bütün dünyanın ilgisini ve dikkatini çekmeye başlamıştır. Sadece bilim adamları ve ilgili teknoloji geliştiricisi ve üreticilerinin değil, öğrencilerden tasarımcılara kadar bütün kesimler, eklemeli

imalat ve getirdiği avantajları yakından takip etmeye ve öğrenmeye çalışmaktadır. Geleneksel imalat yöntemlerine göre karmaşık geometriye sahip parçaların üretim kolaylığı, esnek üretim imkânı, görece kısa sürede hızlı imalat ve maliyet etkinliği bu ilginin temelini oluşturmaktadır [20].

Herhangi bir eklemeli imalat yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen üretim süreçlerinde temel olarak ortaya çıkan iş akışı Şekil 2.2’de gösterilmektedir. 5 aşamadan oluşan üretim sürecinde öncelikle bilgisayar destekli yazılım (CAD) ile imal edilecek parçanın 3 boyutlu çizimi 1:1 ölçülerde gerçekleştirilir. CAD tasarımından sonra hemen hemen bütün katı modelleme programlarında mevcut olan “.STL” formatına çevrilir. “STL” ismi, ilk defa kullanılan eklemeli imalat yöntemi olan tekne fotopolimerizasyonu “**ST**ereo**L**ithography” isminin kısaltılmış halidir.



**Şekil 2.2** Eklemeli imalat yöntemlerinde üretim aşamaları

İlk defa STL formatı bu yöntemde kullanıldığından daha sonra diğer yöntemler için de aynı isim kullanılmaya devam edilmiştir. STL formatına dönüşüm ile 3 boyutlu parçanın her biriminin üçgen şekline dönüştürülerek ağ yapısı halinde parçanın üretime hazır hale getirilmesi işlemi gerçekleştirilir. Ardından STL formatında hazırlanan tasarım katman kalınlığı, üretim yönü, parçanın tabla üzerindeki konumu vd. özellikler; hammadde, makinenin kapasitesi, hızı, üretim gücü, parça kalitesi gibi kriterler göz önünde bulundurularak üretime hazır hale getirilir. Bundan sonra parçanın üretimi gerçekleştirilir ve son olarak üretim sonrası işlemler yapılır. Üretimden sonra parça üzerinde temizlik yapılır, varsa destek yapılar çeşitli yöntemler ile alınır. Metal üretim var ise iç gerilmeleri ve gözenekli yapıyı azaltmak

için ısıtma işlemi uygulanabilmekte, yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için taşlama, parlatma gibi işlemler uygulanabilmektedir [16].

Üretim süreçlerinde gerçekleşen paradigma değişimi ile imalat süreçlerinde hızla görülmeye başlanan eklemeli imalat yöntemlerinin, Şekil 2.3'te gösterildiği gibi geleneksel imalat yöntemlerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Öncelikle eklemeli imalat yönteminde kalıp, takım gibi maliyetli ve hazırlığı zaman alan araçlar kullanılmamakta, bu sayede hızlı bir üretim sürecinin gerçekleştirilmesi sağlanabilmektedir. Diğer yandan, geleneksel imalat yöntemlerinde maliyetli olan tasarım konusunda esnekliğin ön plana çıkmasıdır. Üretilen herhangi bir parçanın birden farklı tasarımı bile aynı anda üretilebilmekte, mühendisler ve tasarımcılar için önemli bir maliyet-zaman tasarrufu getirmekle birlikte özgürlük de sunmaktadır. Esnek üretim ile kişiye veya ilgili işe özel parçaların üretimi, özellikle medikal sektöründe kritik öneme sahip implant üretiminde eklemeli imalat önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Bununla beraber kompleks geometrilere sahip, geleneksel imalat yöntemleri ile üretilemeyen veya üretilmesi çok maliyetli olan parçalar ve tasarımların üretilmesi eklemeli imalat sayesinde mümkün olabilmektedir. İlave olarak üretim tasarımının uzaktan yapılarak dijital ortamda eklemeli imalat makinesine gönderilmesi ile üretim gerçekleştirilebilmekte, lojistik maliyetlerini ortadan kaldırarak uzaktan yönetilen dijital fabrikaların gelişimi sağlanmaktadır. Üretim süreçlerinde malzemeyi birleştirmek için kullanılan enerji (lazer, elektron ışını, vd.) tamamen çevre dostu olarak kabul edilmektedir. Aynı zamanda üretim esnasında sadece hammaddenin istenilen kısımları kullanıldığından geriye kalan hammadde tekrar kullanılabilir, atık malzemenin önüne geçilerek büyük oranda tasarruf sağlanabilmektedir [1] [16] [21].



**Şekil 2.3** Eklemeli imalatın avantajları/dezavantajları

Eklemeli imalat yöntemlerinin avantajlarının yanı sıra bazı zayıf yönler ve geliştirilmesi gereken alanlar mevcuttur. Özellikle genel olarak üretilecek parçaların boyutları tablanın genişliğine bağlıdır. Günümüzde kullanılan ticari eklemeli imalat cihazlarının büyük çoğunluğu boyut konusunda kısıtlar barındırmaktadır. Aynı zamanda mevcut sistemler küçük çaplı üretime uygun olup, plastik enjeksiyon gibi seri üretim için henüz elverişli değildir. Diğer yandan, eklemeli imalat ile üretilen parçalarda boyutsal doğruluk ve yüzey pürüzlülüğü gibi konularda da çeşitli kısıtlar mevcuttur. Bu yüzden üretim sonrası çeşitli ısıl işlemler ve özellikle destek yapıları üretimlerinde üretim sonrası işlemler gerekmektedir. Henüz yeni gelişen bir teknoloji olmasının da büyük etkisiyle, eklemeli imalat ile üretim için ilk yatırım maliyetleri çok yüksektir [1] [3] [21].

Eklemeli imalat sunduğu hızlı üretim, tasarım esnekliği, maliyet etkinlik gibi avantajları ile birçok sektörde ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. Şekil 2.4'deki gibi özellikle hafif ve karmaşık geometrili parçaların kolay bir şekilde üretilmesi sebebiyle havacılık, otomotiv, medikal, mimari modelleme ve tasarım ve enerji endüstrisinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra sektör yoğunluklarına bakıldığında düşük hacimli üretimin, karmaşık geometriye sahip

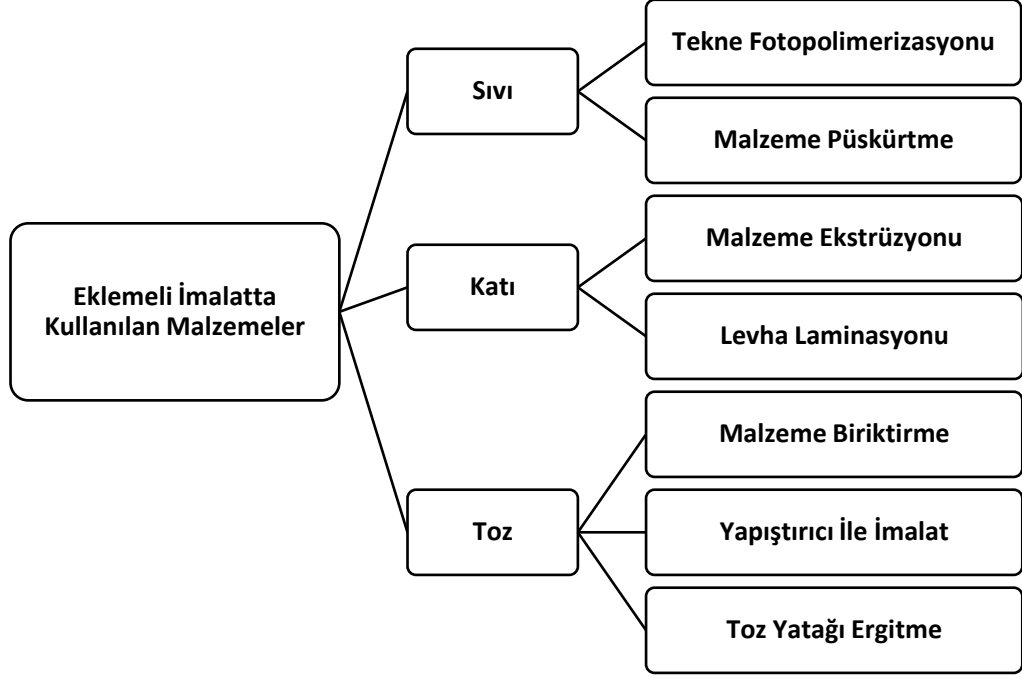
parçaların ve tasarım değişikliğinin yoğun olduğu sektörlerde özellikle tercih edilmektedir.



**Şekil 2.4** Eklemeli imalat kullanım alanları

Havacılık sektörü titanyum alaşımlı malzemelerin üretiminin kolay olması sebebiyle eklemeli imalatı tercih ederken, sağlık sektöründe yoğun olarak karmaşık anatomik yapıların üretilmesindeki kolaylık nedeniyle tercih edilmektedir. Tasarım alanı ise son derece emek yoğun bir sektör olması ve el işçiliği ile karmaşık parçaların üretilmesini gerektirdiğinden eklemeli imalat imkânları büyük oranda kolaylaştırıcı olmuştur [16] [22].

Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (ASTM) tarafından belirlenen standartlara göre günümüzde 7 farklı teknolojik altyapıya sahip olan eklemeli imalat makinesi türü olup bunlar; tekne polimerizasyonu, malzeme püskürtme, malzeme ekstrüzyonu, levha laminasyonu, malzeme biriktirme, yapıştırıcı ile imalat ve toz yatağı ergitme olarak belirlenmiştir [2]. Söz konusu makinelerde kullanılan hammaddenin durumuna göre, sıvı, katı ve toz olarak 3 farklı kategorizasyon yapılmış olup, Şekil 2.5'teki gibi gruplara ayrılmıştır [23].

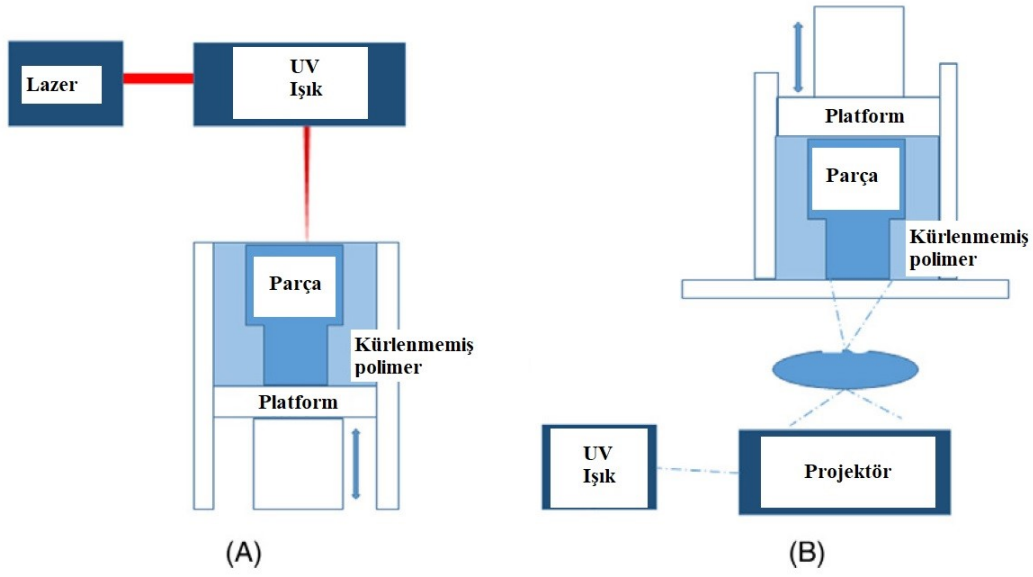


**Şekil 2.5** Malzeme türlerine göre eklemeli imalat makine teknolojileri

ASTM standardı ile kategorize edilmiş eklemeli imalat yöntemleri ve teknik detayları bundan sonraki bölümlerde belirtilmiştir.

## 2.1 Tekne fotopolimerizasyonu (Stereolitografi)

Tekne fotopolimerizasyonu 1984 yılında Charless Hull tarafından patentlenmiş olup, Şekil 2.6'da gösterildiği üzere fotopolimer bir malzemenin ışık ile sertleştirilerek (kürleme), katmanlı bir şekilde bilgisayar ortamında tasarlanmış parçanın üretilmesi esasına dayanmaktadır [24]. Stereolitografi (SLA) ve Digital Light Processing (DLP) olarak isimlendirilen yöntemler temelde fotopolimerizasyon tekniğine dayanmakla birlikte; SLA'da ultraviyole ışık, DLP'de projektör kullanılmaktadır.

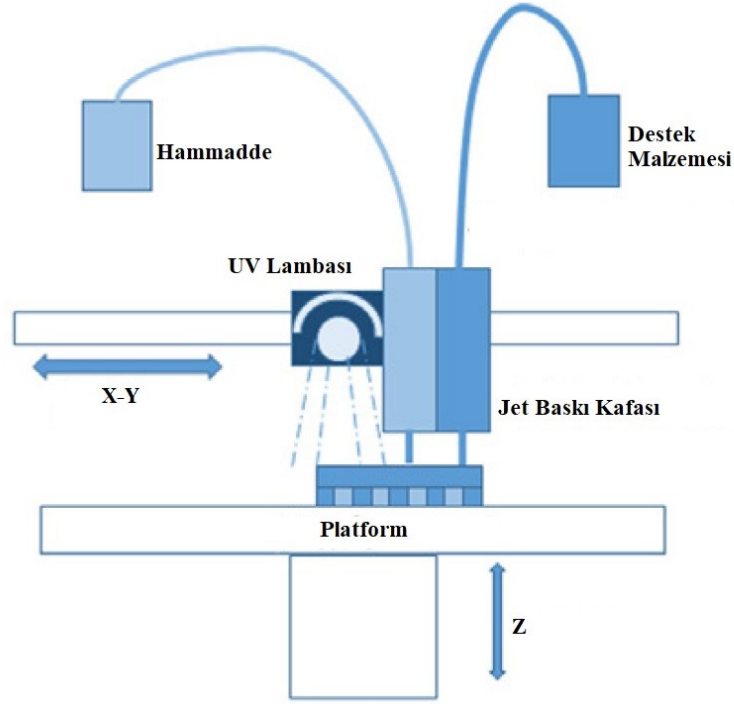


**Şekil 2.6** SLA ve DLP

Tekne fotopolimerizasyonu, elde edilen ürünlerin yüksek yüzey kalitesi, boyutsal doğruluğu ve çözünürlüğü, izotropik mekanik özellikleri sahip olması, esnek üretim sistemleri kurulabilmesi gibi özellikler nedeniyle geniş bir kullanım alanı bulmasına rağmen kullanılan malzemelerin kısıtlı olması, üretim hızının yavaş olması ve yüksek performans parçalarda mekanik özelliklerinin yetersiz olması kullanım alanını kısıtlamaktadır [25] [26].

## 2.2 Malzeme Püskürtme (Material Jetting)

1980'li yıllarda temelleri atılan malzeme püskürtme yöntemi ile katmanlı imalat, ilk defa 1994 yılında balmumu hammaddesi kullanılan versiyonu ticarileştirilmiş, günümüzde ise profesyonel olarak birçok sektörde -genellikle masaüstü yazıcı olarak- kullanılmaktadır. Malzeme püskürtme yöntemi, Şekil 2.7'deki gibi jet kafasından periyodik olarak damlatılan malzemenin katman yüzeyine soğuk bir şekilde kaynak olması ve aynı şekilde diğer katmanın da üst üste üretilmesi prensibine dayanan, sıvı esaslı katmanlı imalat yöntemidir. Genellikle balmumu ve akrilik fotopolimer malzemenin kullanıldığı yöntemde, seramik (zirkonya) ve metal (lehim) malzemelerin kullanıldığı uygulamalar da gerçekleştirilmiştir [3] [25].



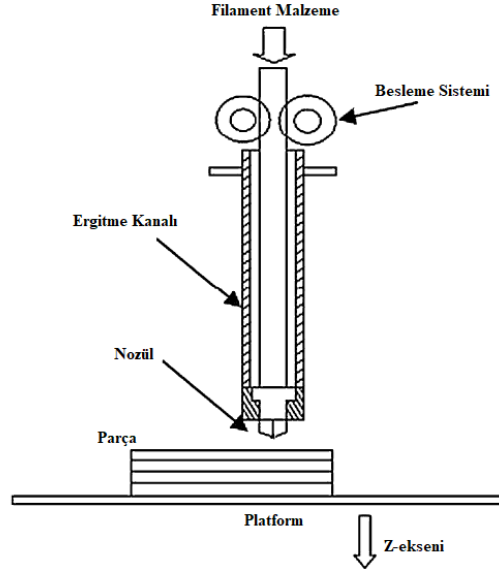
**Şekil 2.7** Malzeme püskürtme yöntemi

Malzeme püskürtme yöntemi özellikle tasarım ve prototip üretimi gibi amaçlar ile tasarım firmaları tarafından sıklıkla kullanılmakla beraber elektronik ve medikal sektörüne yönelik uygulamalar da yapılmaktadır [27]. Yöntemin en önemli avantajları düşük maliyet, yüksek üretim hızı, birden fazla malzeme kullanılarak parça üretimi ve çok renkli parça üretimine imkân tanınması olup, dezavantajları ise yöntem için uygun malzemenin az olması ve büyük parça üretiminde diğer yöntemlerin geometrik doğruluklarının daha iyi olması olarak belirtilmiştir [25].

### 2.3 Malzeme Ekstrüzyonu

1992 yılında Strasys firması tarafından geliştirilmiş ve ticarileştirme çalışmaları başlatılan malzeme ekstrüzyonu ile gerçekleştirilen yöntemde hammadde filament şeklinde bir besleyici yardımı ile Şekil 2.8’de gösterilen ertitme kanalına doğru itilir. Camsı geçiş sıcaklığı üzerine ya da erime noktasına ulaşan malzeme, bilgisayar ortamında belirlenen tasarıma göre nozül yardımı ile tabla üzerine katmanlı olarak eklenerek aşağıdan yukarıya doğru parçanın üretimi gerçekleştirilir. Ticari isimleri Eriyik Yığarak Modelleme (Fused Deposition Model) ve Eriyik Filament Modelleme (Fused Filament Fabrication) olan yöntemler ekstrüzyon prensibi ile çalışmaktadır.

Genellikle ABS ve PC gibi polimerler kullanılmakla birlikte yüksek performans polimerler, termoset, elastomer, polimer matrisli kompozitler ve biyomalzemeler de hammadde olarak kullanılabilir [3] [19] [25].

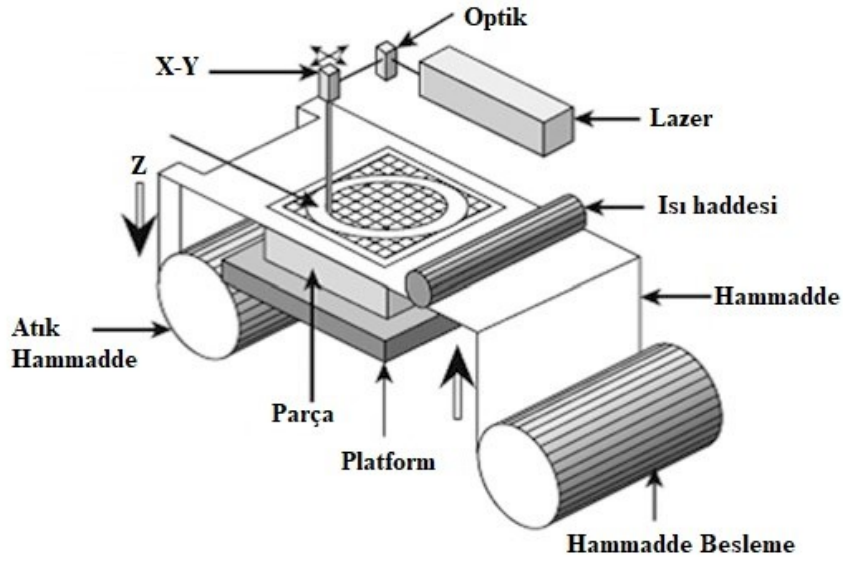


**Şekil 2.8** Malzeme ekstrüzyon şematik gösterimi

Günümüzde, en yaygın ve en ucuz yöntem olarak bilinen malzeme ekstrüzyon yöntemi birçok sektörde kullanılmakta olup, yavaş üretim, yüzey pürüzlülüğü, nozul dairesel ucu sebebiyle keskin hatların elde edilememesi, gözeneklilik ve anizotropik yapı oluşması nedeniyle mekanik özellikleri ve boyutsal doğruluk gibi yönleri kullanım alanlarını kısıtlamaktadır [3] [25].

## 2.4 Sac Laminasyonu

İlk defa 1991 yılında ticari olarak kullanılan ve ticari ismi Laminated Object Manufacturing (LOM) olan sac laminasyonu yöntemi, Şekil 2.9'da gösterildiği gibi lazer (veya kesici takım) kullanılarak, sac halindeki hammaddeden, bilgisayar ortamında tasarlanan ölçülerde parçanın kesilip üzerine aynı şekilde kesilen üst katmanın birbirine ısı, basınç, kimyasal bağlayıcı, yapıştırıcı vb. ile bağlanması esasına dayanan, hem ekleme hem de çıkarma içeren yöntemdir. Hammadde olarak sac halindeki polimer, metal, kompozit, kâğıt vb. gibi malzemeler kullanılmaktadır [3] [19] [25].

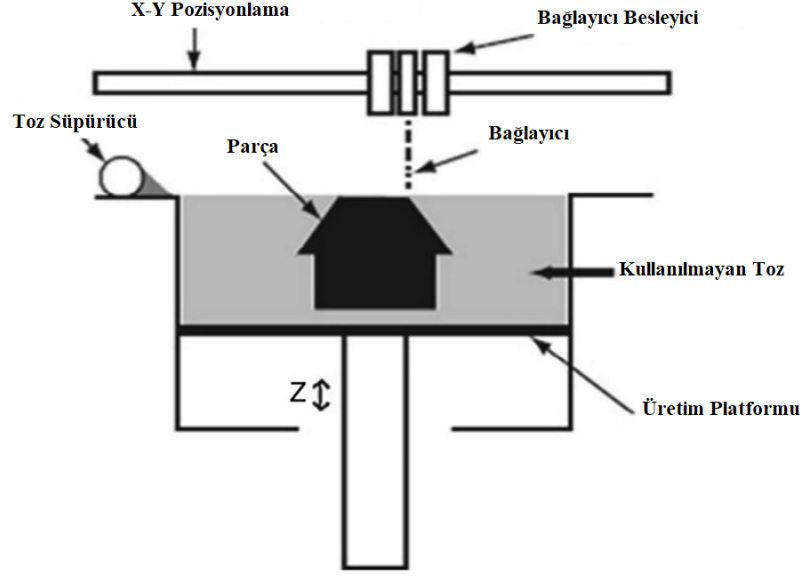


**Şekil 2.9** Sac laminasyon yöntemi

Diğer eklemeli imalat yöntemlerine kıyasla daha büyük ölçülü parçaların üretilmesi için uygun olan bu yöntemde karmaşık geometrilerin üretilmesi zor ve pahalıdır. Birbirinden farklı malzeme türlerinin bir arada kullanılması için uygun olup, atık miktarının fazla olması dezavantaj olarak değerlendirilmektedir [19].

## **2.5 Yapıştırıcı ile Katmanlı İmalat (Binder Jetting)**

Yapıştırıcı ile katmanlı imalat yöntemi 1993 yılında Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT) tarafından geliştirilen ve ticarileştirilen; kalıplama, döküm, medikal, elektronik, tasarım gibi birçok sektörde yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanan bir eklemeli imalat yöntemidir [28]. Toz halindeki malzemenin yapıştırıcı ile birbirine bağlanarak katmanlı bir şekilde istenilen geometrideki parçanın üretilmesi esasına dayanmaktadır. Şekil 2.10'da şematik olarak gösterilen üretim yönteminde; üretim tablasına tarayıcı ile belirli katman kalınlığında toz serpilerek bilgisayar ortamında belirlenen bölgelere hareketli kafa yardımı ile yapıştırıcı uygulanır. Bu süreç tasarlanan parça tamamlanana kadar her katman için de uygulanır [29].

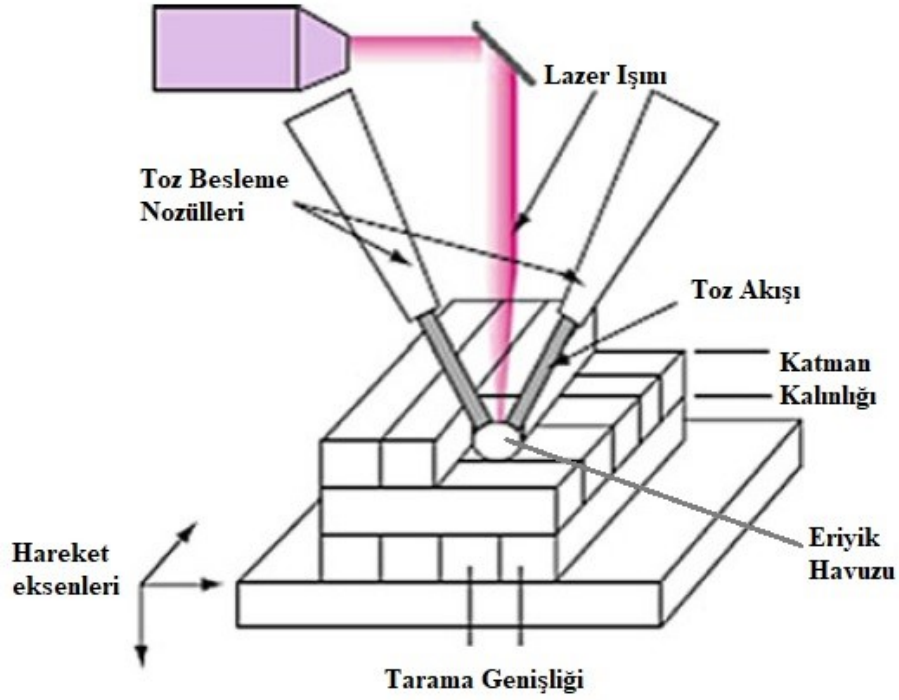


**Şekil 2.10** Yapıştırıcı ile katmanlı imalat üretim süreci

Yapıştırıcı ile Katmanlı İmalat yöntemi avantajları; katmanlı imalata uygun toz halindeki hemen hemen her malzemenin kullanılabilmesi, yüksek yazdırma hızı kapasitesi sağlaması, malzeme ve yapıştırıcı kullanımında karışım yapma imkânı sunması şeklinde sıralanmaktadır. Bunun yanı sıra üretilen parçaların mekanik özellikleri ve yüzey kaliteleri, diğer yöntemlere kıyasla daha düşüktür. Üretilen parçanın mekanik ve geometrik özellikleri, hammadde, imalat parametreleri, tasarım ve üretim sonrası işlemler gibi kriterlere bağlı olarak değişmektedir [28] [25].

## 2.6 Malzeme Biriktirme Yöntemi (Direct Energy Deposition)

Toz veya tel halindeki hammaddeyi farklı enerji kaynaklarıyla (lazer ışını, elektron ışını, ark) ertirmek suretiyle, Şekil 2.11'deki gibi bir önceki katman ile birleştirerek, bilgisayar ortamında tasarlanan parçanın üretilmesi esasına dayanan eklemeli imalat yöntemidir. Benzer yaklaşımı kullanarak sistemdeki enerji tipi, lazer gücü, lazer boyutu, toz iletim metodu, geri besleme sistemi gibi noktalarda farklı tekniklerin kullanıldığı birçok ticari isim mevcut olup, toz püskürtme, tel püskürtme, lazer direk döküm, lazer döküm, lazer biriktirme bunlardan bazılarıdır. Malzeme püskürtme yönteminde lazer enerjisi kullanıldığından, özellikle toz püskürtme yöntemindeki mikro yapı seçici lazer ertirme yöntemine benzemektedir [3] [25] [30].



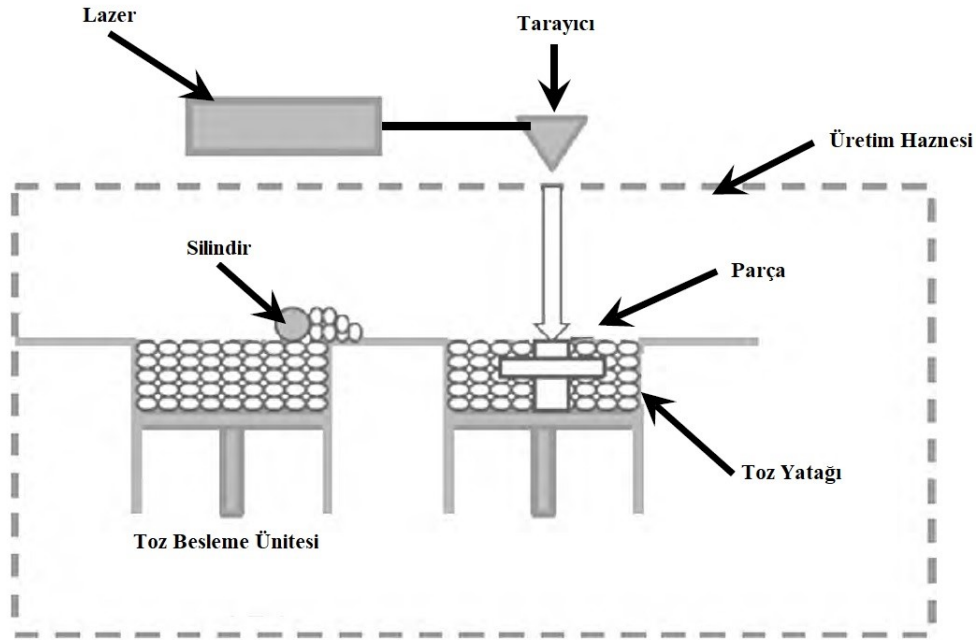
**Şekil 2.11** Metal biriktirme yöntemi şematik gösterimi [25]

Malzeme biriktirme yönteminde yüksek yoğunluklu ve proses parametreleri vasıtasıyla kontrol edilebilir ve değiştirilebilir mikro yapılar elde etmek mümkündür. İlave olarak malzeme besleme yönteminde, seçici lazer ergitmede önemli bir sorun olan desteksiz yapıların üretilebilmesi mümkündür [1]. Diğer yandan eriyik havuzu nedeniyle karmaşık geometrilere ve küçük parçalar için uygun olmaması, boyutsal doğruluk konusunda diğer yöntemlere kıyasla zayıf kalmaktadır [25].

## 2.7 Toz Yataklı Lazer Sistemleri

Toz yataklı lazer sistemine dayalı eklemeli imalat yöntemi ilk defa Teksas Üniversitesi tarafından ticarileştirilmiş olup, endüstriyel uygulamalarda kullanılan ilk yöntemlerden biridir [25]. Toz yataklı lazer sistemleri; üretim yatağı üzerine serilmiş toz halindeki ince bir malzeme katmanı üzerinde seçili bir bölgeye lazer ışını uygulanarak ergitme veya sinterleme ile şekillendirme esasına dayanmaktadır. Şekil 2.12’de gösterildiği gibi, toz katmanının üzerine lazer ışını uygulandıktan sonra diğer katmanın üretimi için tekrar ince bir toz katmanı bir silindir yardımı ile serilir ve yine seçili bir bölgeye lazer ışını uygulanarak katmanlı bir şekilde aşağıdan

yukarıya doğru, istenilen geometrik özelliklerdeki parça üretimi gerçekleştirilir [6]. Sinterlenen tozlar parçanın kendisi olup, sinterlenmeyen tozlar tabla üzerinde kalarak üretilen parçaya destek görevi görmekte, üretim tamamlandıktan sonra ise temizlenerek geri dönüşümü sağlanıp tekrar kullanılabilir. [31]



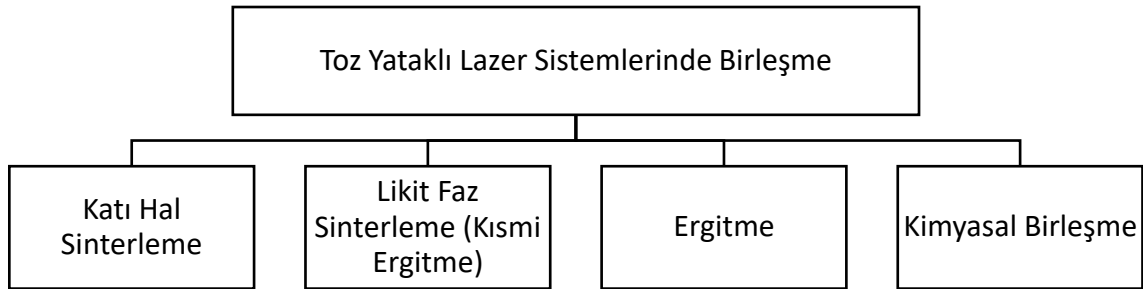
**Şekil 2.12** Toz yataklı lazer sistemi şematik gösterimi [31]

Üretimi tamamlanan her katmandan sonra toz yatağı üzerinde bulunan parça katman kalınlığı kadar aşağı iner ve toz besleme sistemi de aynı oranda yukarıya yükseltilerek toz besleme gerçekleştirilir. Bu süreç parça tamamlanana kadar devam etmekte olup, parça üretimi tamamlandığında üretim tablası yukarıya doğru yükseltilir ve parça tabladan alınır. [1].

Toz yataklı lazer ile imalat yönteminde, lazer ışını uygulanan toz halindeki malzemenin birleştirilmesi için Şekil 2.13'te gösterildiği gibi 4 farklı yöntem mevcuttur; katı hal sinterleme, kimyasal birleşme, likit faz birleşme ve ergitme [4].

**Katı hal sinterleme** toz malzeme erime sıcaklığı altında bir sıcaklığa yükseltilerek toz tanelerinin katı halde birleşmesi esasına dayanmaktadır. Sinterleme esnasında toz taneleri arasında boyun oluşumu gerçekleşir ve zamanla boyun büyüyerek birleşme tamamlanır. Yüksek lazer tarama hızlarında malzemenin birleşmesi için

yeterli zaman olamayacağından düşük lazer tarama hızları gerekmekte olup, ekonomik olmayan bir imalat yöntemi olarak değerlendirilmektedir [5].



**Şekil 2.13** Toz yataklı lazer sisteminde kullanılan birleşme yöntemleri

**Likit faz sinterleme (kısmi ergitme)** yönteminde erime sıcaklığı altında belirli bir sıcaklığa gelen toz malzemede tane sınırlarında erime başlar ancak tane merkezi katı halde kalmaktadır. Bu fiziksel hal esnasında taneler arası boyun oluşumu başlar ve belirli bir zaman içerisinde boyun büyür ve malzeme yoğunlaşarak taneler arasında oluşan gözenek yapı küçülür. Bunun yanı sıra tane boyutu farklı toz malzemeler kullanıldığında ise küçük toz parçalarının eriyerek daha büyük erimemiş toz parçalarının birleştirilmesi sağlanmaktadır. SLS yönteminde kullanılan bu işlemde toz partiküllerinin dış yüzeyi likit faz sinterleme için erimeye başladığında, tane merkezi katı halde kalır ve ısı azaltıcı gibi davranarak sadece yüzeyde birleşme işlemi gerçekleşmektedir. Yüksek tarama hızlarında birleşme gerçekleştiğinden daha ekonomik üretim imkânı sağlamaktadır [5] [32].

**Ergitme** ile birleşme ise herhangi bir üretim sonrası işleme gerek kalmaksızın tamamen yoğun ve gözeneksiz bir yapı üretmek için kullanılmaktadır. Seçici lazer ergitmede kullanılan bu yöntemde toz malzemenin %99,9 oranında eritilmesini sağlayacak lazer enerjisi kullanılmaktadır. Bu yöntem ile gözeneksiz bir yapı oluşmasına karşın, yoğun iç gerilme, çarpılma meydana gelebilmekte, yumrulama ve cüruf oluşumu da yüzey pürüzlülüğüne neden olabilmektedir [5].

**Kimyasal birleşme** yaygın olmasa da SLS makinelerinde kullanılmakta olup, Al tozlarının  $N_2$  atmosferinde AlN bileşiği oluşturması ile Al toz parçalarının birleşmesinin sağlanması esasına dayanmaktadır [5].

Ticari olarak en yaygın olarak kullanılan toz yataklı lazer sistemleri SLS ve seçici lazer ergitme sistemleri olarak bilinmektedir. Seçici lazer ergitme sisteminde lazer ışını uygulanan toz bölgede tamamen bir eriyik havuzu oluştururken, SLS’de malzeme tamamen eritilmeyip, toz halindeki malzemenin likit faz difüzyonu ile sinterlenerek imalat gerçekleştirilmektedir. Seçici lazer ergitme yönteminde birleşme işlemi için ergitme kullanılması yoğun bir malzeme yapısı elde edilebilmesi ve gözenek oluşmasına imkân vermemesini sağlayarak SLS’den daha iyi bir mikro yapı sağlamaktadır. Diğer yandan seçici lazer ergitme yönteminde yüksek enerji kullanımı gerekmekte, çapak oluşumu, iç gerilme, yumrulanma gibi kusurlar meydana gelebilmektedir. SLS yöntemi her ne kadar üretim sonrası işlem gerektiriyor olsa da seçici lazer ergitmede meydana gelen bazı kusurların daha az gerçekleşmesi ve düşük enerji kullanımı bu yöntemi avantajlı hale getirmektedir. Birleşme yöntemi dışında seçici lazer ergitme ve SLS arasında fark bulunmamaktadır [3] [4] [5].

Toz yataklı lazer sistemi ile imalatın gerçekleştiği SLS, seçici lazer ergitme ve elektron ışını ile ergitme benzer üretim süreçleri ihtiva etmekte, temel olarak yukarıda da bahsedildiği gibi toz birleşme yöntemi değişmektedir.

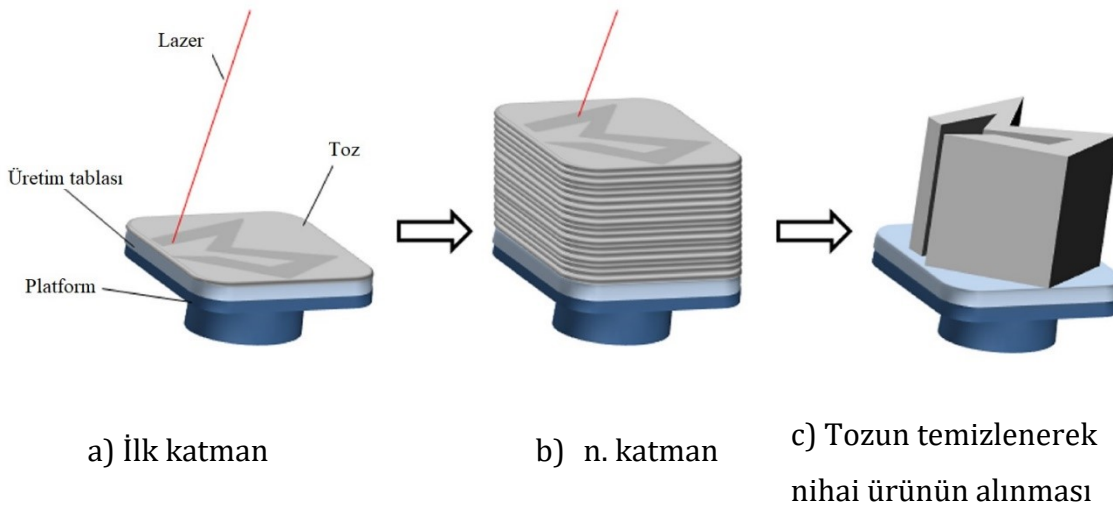
## **2.8 Seçici Lazer Sinterleme**

İşbu tez çalışmasında toz yataklı lazer yöntemlerinden birisi olan SLS sistemi kullanılarak deneysel çalışmalar yürütüldüğünden, bu bölüm altında SLS detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Lazer sinterleme 1989 yılında Carl Deckard tarafından geliştirilmiş ve Texas Üniversitesi tarafından patentlenmiştir. Bu sayede 1990 yılında Manriquez-Frayre ve Brouell tarafından metal malzeme ile eklemeli imalat gerçekleştirilmiştir [33]. Toz yataklı lazer sistemindeki üretim prensibi ile aynı şekilde üretim tablasının üzerine bir silindir yardımı ile genellikle 100  $\mu\text{m}$ ’nin altında katman kalınlığında serilen toz malzemenin lazer yardımı ile erime noktası altında bir sıcaklığa çıkarılması ve sinterlenmesi şeklinde üretim gerçekleştirilmektedir. SLS sistemlerinde genellikle CO<sub>2</sub> lazer, Nd:YAG (neodymium-doped yttrium aluminum garnet), fiber ve diyot lazer gibi yüksek güç üreten lazer sistemleri kullanılmaktadır.

Üretilecek malzemenin oksitlenmemesi için üretim haznesi nitrojen veya benzeri inert gaz ile sürekli beslenmektedir [16] [6] [34].

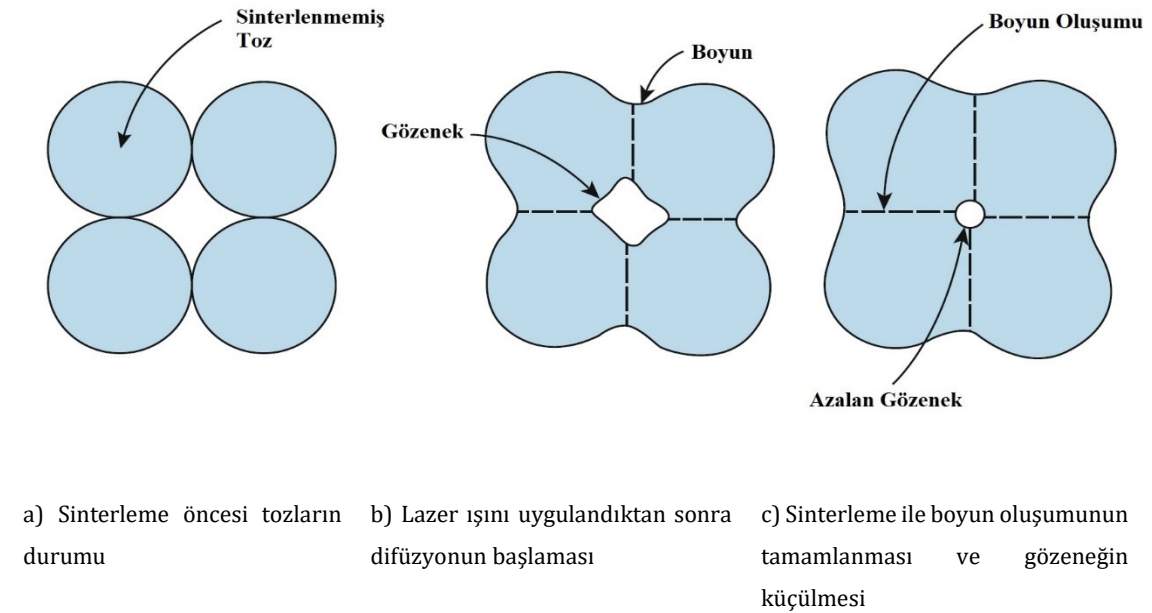
SLS yöntemi ile metal, seramik, polimer, cam ve pulvarize olabilen herhangi bir malzeme kolaylıkla eklemeli imalat sürecinde kullanılabilir [1]. Şekil 2.14'te SLS'de üretilen bir parçanın üretim esnasındaki aşamaları gösterilmektedir. Öncelikle ilk katman destek katman olarak tablada üretilir. Parça üretimi tamamlandıktan sonra arda kalan tozlar temizlenerek nihai parça elde edilir. Parçanın tabladan ayrılma işlemi elektrikli bir testere yardımı ile yapılabilir. Eğer kullanılmışsa, parça üzerindeki destek yapıları da ikincil bir işlem ile alınır.



**Şekil 2.14** SLS ile üretim [7]

SLS'de toz partikül üzerine uygulanan lazer ışınının uygulanma süresi genellikle 0,5 ms ile 0,25 ms arasında değişmektedir. Bu kadar kısa sürede gerçekleşen lazer uygulama süreci için, hızlı bir şekilde sinterlemenin gerçekleşmesi için katı hal sinterleme ile birleşme yeterli olmamakta, kısmi eritme ile likit faz sinterleme süreci gerçekleştirilmektedir [16]. Sinterlemede malzeme erime sıcaklığı ile erime sıcaklığının yarısı arasında bir sıcaklığa yükseltilmektedir. Bu işlemten sonra sinterleme mekanizması, toz parçacıkları üzerindeki enerjinin toz parçacıklarının birbirleri ile difüzyonu ile zamanla azalması ile gerçekleştirilir [25]. Toz parçacıklarında difüzyon gerçekleşmesi ile yüzey alanı azalır ve sinterleme yavaşlamaya başlar ve Şekil 2.15'te görüldüğü gibi tozlar arasında oluşan gözenek azalmaya başlar. Gözenek oluşumunu minimuma indirmek için sinterleme süresinin

uzatılması veya yüksek sinterleme sıcaklığı gerekmektedir. Bunun yanı sıra sıcak izostatik presleme yardımı ile de gözenek azaltılması sağlanabilmektedir.



**Şekil 2.15** Katı hal difüzyonu şematik gösterimi

SLS'in seçici lazer ertitme yöntemi ile temel farkı, seçici lazer ertitme yöntemi ile tamamen ertitme ile difüzyon gerçekleşirken SLS'de ertitme gerçekleşmeden Şekil 2.15'te gösterildiği gibi likit faz sinterleme gerçekleştirilmek suretiyle toz halindeki malzeme birleştirilmektedir [35]. Seçici lazer ertitme yönteminde meydana gelen soğuma sonrası termal kalıntı gerilmeler ve bir önceki katmanın da tekrar lazer ışınına maruz kalarak erimesi gibi sorunların önüne geçilmesi hedeflenmiştir [1].

Toz yataklı lazer sistemlerinde toz halindeki her malzeme hammadde olarak kullanılabilir. Polimerler için yaygın olarak yarı-kristalin yapıdaki polimerler kullanılmakta olup, PA başta olmak üzere PP, PEEK ve yüksek yoğunluklu PE gibi polimerler ticari olarak kullanılmaktadır [36]. Benzer şekilde kaynaklı imalatla kullanılabilen herhangi bir metal alaşımı toz yataklı ertitme sistemi için kullanılabilir. Yaygın olarak çelik alaşımları, paslanmaz çelikler, titanyum alaşımları, nikel esaslı alaşımlar, krom-kobalt alaşımları ve alüminyum alaşımları ticari olarak kullanılabilir. Polimer ve metal malzemenin yanı sıra seramik ve seramik kompozitler de toz yataklı ertitme sisteminde hammadde olarak kullanılabilir. Metal oksit, karbür, nitrür ve bunların kombinasyonlarını

içeren seramik malzemeler ile seramik-metal kompozitleri ticari olarak kullanılabilmektedir [25].

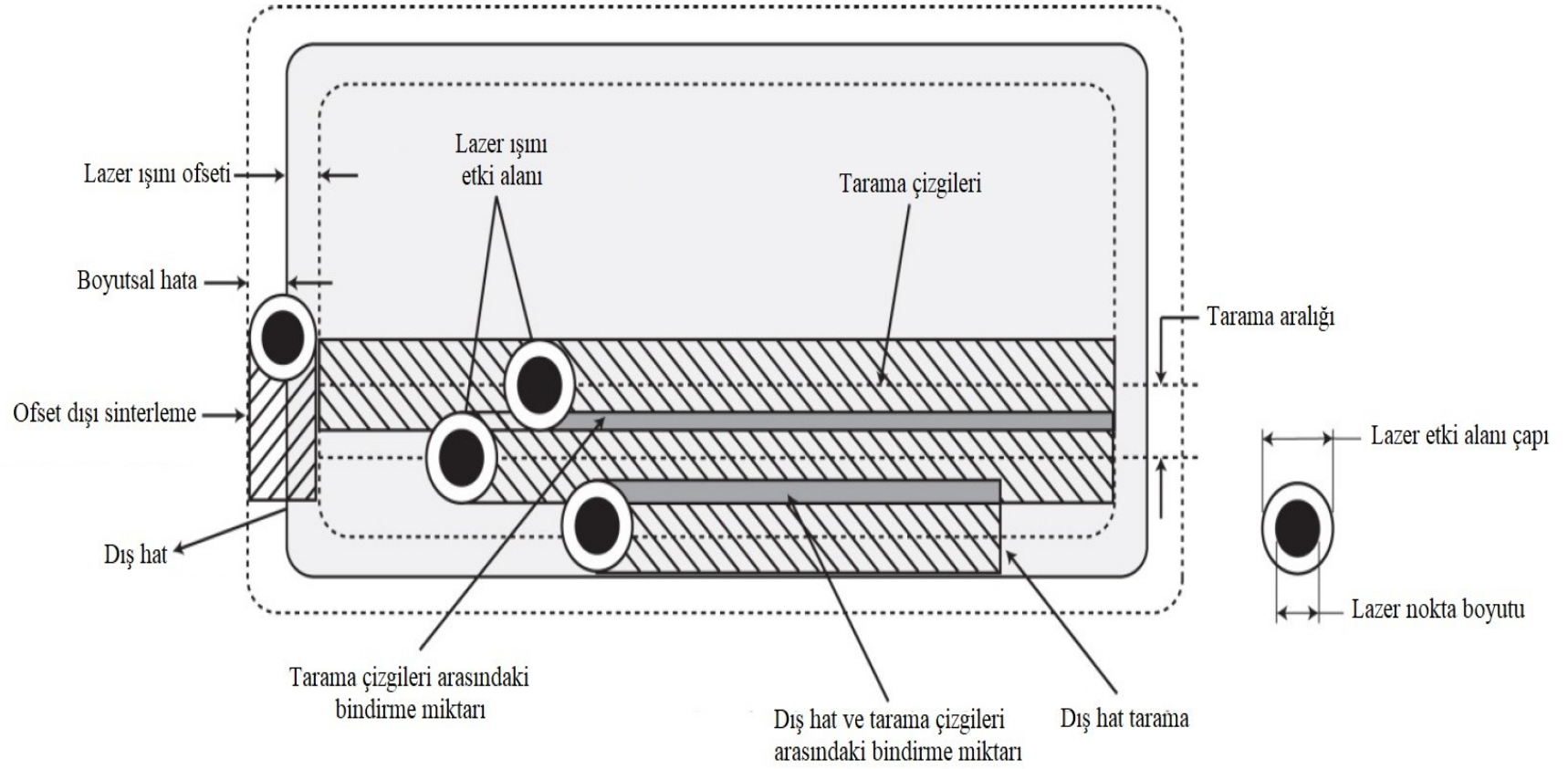
### 2.8.1 Üretim Parametreleri

Üretim parametreleri üretim sonrası ortaya çıkan parçanın yüzey pürüzlülüğü, boyutsal doğruluk, porozite ve diğer mekanik özelliklerinde kritik bir rol oynamaktadır. SLS’de kullanılan temel üretim parametreleri Tablo 2.1’de 4 ana kategoride gösterilmektedir. Söz konusu parametreler belirlenirken üretim öncesinde birbirinden bağımsız olarak değerlendirilmemektedir. Örneğin lazer gücü veya toz yatağı sıcaklığı, toz malzemenin boyutlarına, mekanik özelliklerine veya katman kalınlığına bağlı bir şekilde ayarlanmaktadır [25] [4].

**Tablo 2.1** Seçici lazer sinterlemede üretim parametreleri [37]

|                           |                                                                                                                  |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lazer parametreleri       | Lazer gücü, lazer nokta boyutu, lazer uygulama süresi ve frekansı                                                |
| Tarama parametreleri      | Tarama hızı, tarama boşluğu, tarama stratejisi                                                                   |
| Toz kaynaklı parametreler | Toz partikül şekli, büyüklüğü, dağılımı, tabla üzerindeki dağılımı, katman kalınlığı, toz malzemenin özellikleri |
| Sıcaklık parametreleri    | Toz yatağı sıcaklığı, toz besleyici sıcaklığı                                                                    |

Şekil 2.16’da ürünün geometrik ve mekanik özelliklerini etkileyen bazı parametreler gösterilmiştir. Şekilde gösterilen parametreler ile lazer gücü ve tarama hızı üzerinde en çok araştırma yapılan parametrelerdir.



**Şekil 2.16** Seçici lazer sinterlemede parametreler

### 2.8.1.1 Lazer Gücü

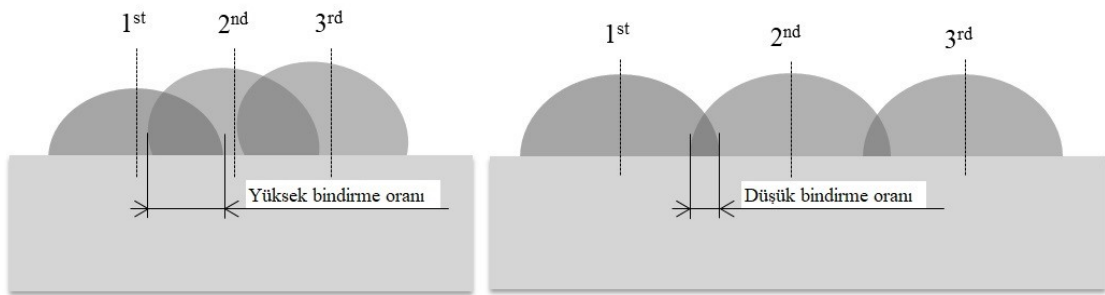
Lazer tarafından üretilen ve hammaddeye uygulanan lazer gücü, üretilen malzemenin mekanik ve geometrik özelliklerine doğrudan etki etmektedir. Her malzeme için belirlenmiş spesifik lazer gücü aralığı bulunmakta olup, bu değerin altında uygulanan lazer gücü kesikli sinterleme ve düzgün olmayan birleşmelere neden olmakta, tam tersi durum olan yüksek lazer gücü uygulandığında ise aşırı erime veya sinterlenmiş/birleşmenin meydana geldiği yüzeylerin tekrar erimesi meydana gelmektedir [6].

### 2.8.1.2 Lazer Nokta Boyutu

Hammadde üzerine uygulanan lazer ışını tarafından oluşturulan noktanın boyutuna ve şeklini belirtmektedir. Lazer gücü ve nokta boyutu malzeme üzerine uygulanan lazer ışınının yoğunluğunu belirlemektedir [6].

### 2.8.1.3 Bindirme Oranı

İmal edilen malzemenin yüzey pürüzlülüğü, gözeneklilik ve mekanik özelliklerini etkileyen ancak yüksek olması durumunda üretim süresini artıran önemli bir parametredir. Şekil 2.17’de görüldüğü gibi her tarama esnasında bir önceki taramanın üzerinden geçtiği oran ne kadar büyükse bindirme oranı o kadar büyük olmakta ancak bu durum tarama sayısını artıracığından üretim süresi de aynı oranda uzamaktadır [6] [38].

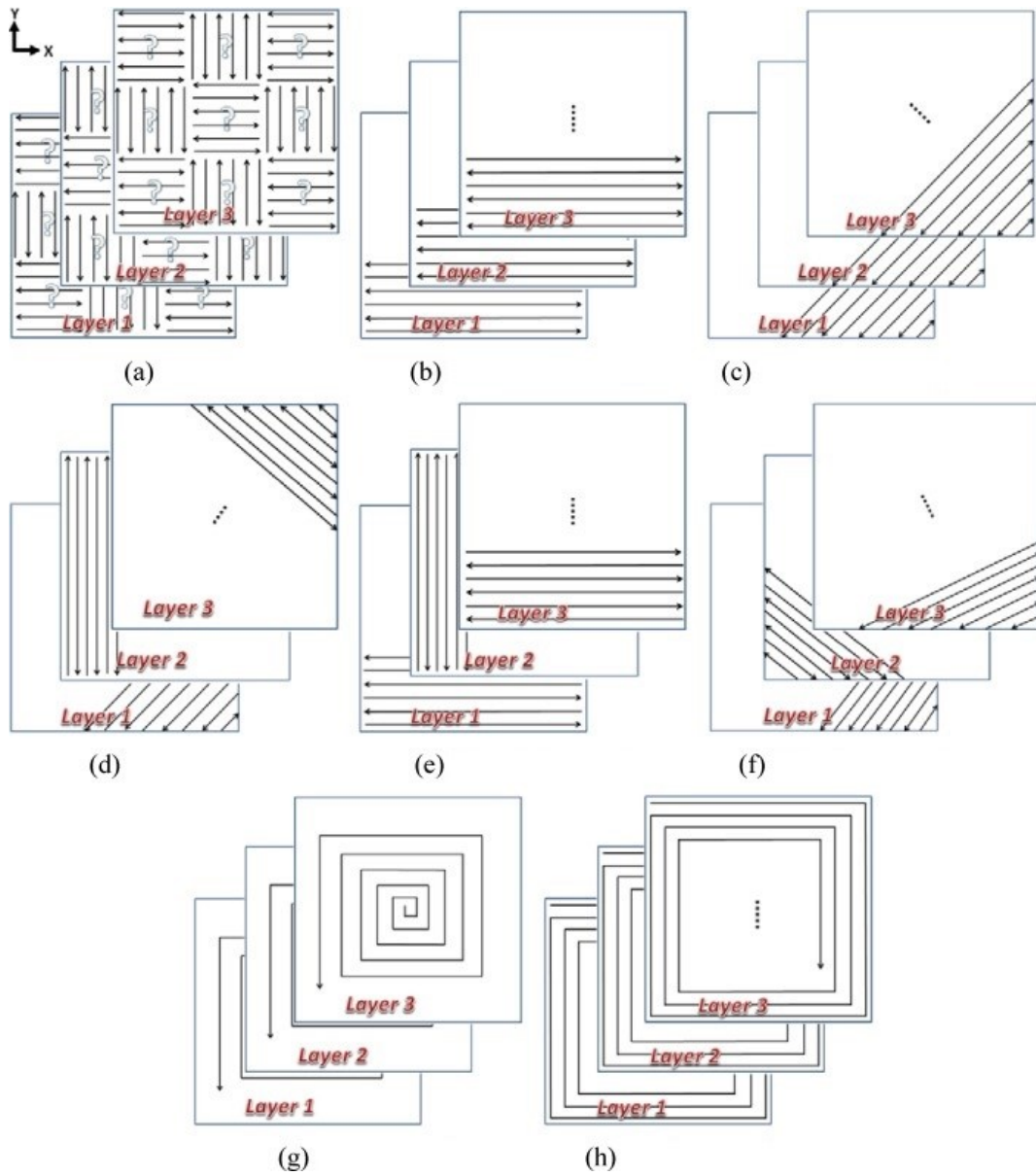


Şekil 2.17 Bindirme oranı

### 2.8.1.4 Tarama Stratejisi

Malzemenin özelliklerine etki eden, tasarım esnasında belirlenen, lazer ışının üretim boyunca takip ettiği rota olarak tanımlanan önemli bir parametredir. Tek

yönlü, çift yönlü, açılı, ada/satranç modeli gibi çeşitleri bulunmaktadır. Tarama stratejisi proses parametrelerine doğrudan etkisi bulunduğundan, tarama stratejisine göre lazer gücü ve tarama hızı optimize edilmelidir. Şekil 2.18’de gösterildiği gibi genellikle 5 farklı tarama stratejisi kullanılmaktadır; x eksenı boyunca tarama, y eksenı boyunca tarama, ada/satranç modeli tarama, katmanları x-y ekseninde sırayla tarama ve en yaygın kullanılan ardışık katmanlarda  $67^{\circ}$  açı yaparak tarama yönünün değışmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Bunlara ilave olarak  $45^{\circ}$  açı ile tarama yönünün ardışık katmanlarda dönmesi ile de üretim gerçekleştirilebilmektedir [6] [39] [40].



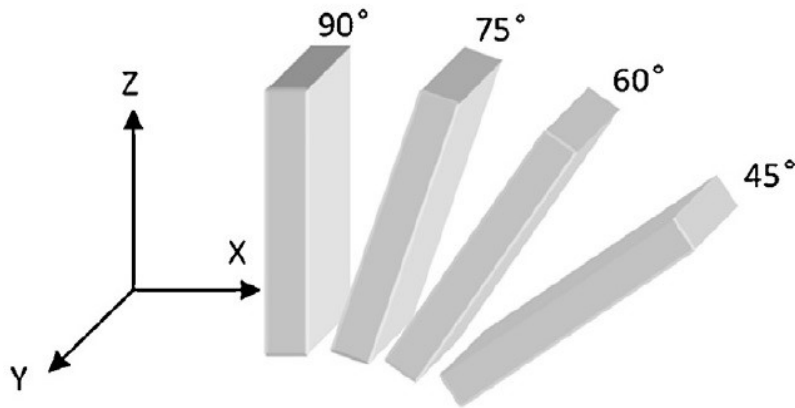
**Şekil 2.18** Yaygın olarak kullanılan tarama stratejileri [40]

### 2.8.1.5 Tarama açısı

Lazer ışının ardışık katmanlarda izlediği rotanın açısını belirtmek için kullanılır. Özellikle tarama stratejisi belirlenirken tarama açısının belirlenmesi önem kazanmaktadır. Tarama açısı malzemenin anizotropik olmasına neden olup mekanik özelliklerine etki edebilmektedir [41].

### 2.8.1.6 Üretim Yönü

İmal edilecek parçanın tabla ile boylamsal açısı olarak tanımlanmaktadır. Şekil 2.19'da gösterildiği gibi tablaya dikey olarak imal edilen numunelerin örnekteki diğer 3 parçaya göre daha yüksek çekme ve uzama dayanımına ve yorulma dayanımına sahip olmaktadır. Tablaya yatay olarak imal edilen parçalar ise daha az katman barındırdığından, katmanlar arası birleşme vb. gibi sorunların azalması beklenmektedir. Bunun yanı sıra üretim yönü yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal doğruluk noktasında belirleyici öneme sahiptir. Üretim yönüne göre malzemenin mekanik ve geometrik özelliklerindeki değişim eklemeli imalatta anizotropik yapı oluşmasının en önemli göstergesi olarak bilinmektedir. [42] [43].



Şekil 2.19 Üretim yönü

### 2.8.1.7 Tarama Hızı

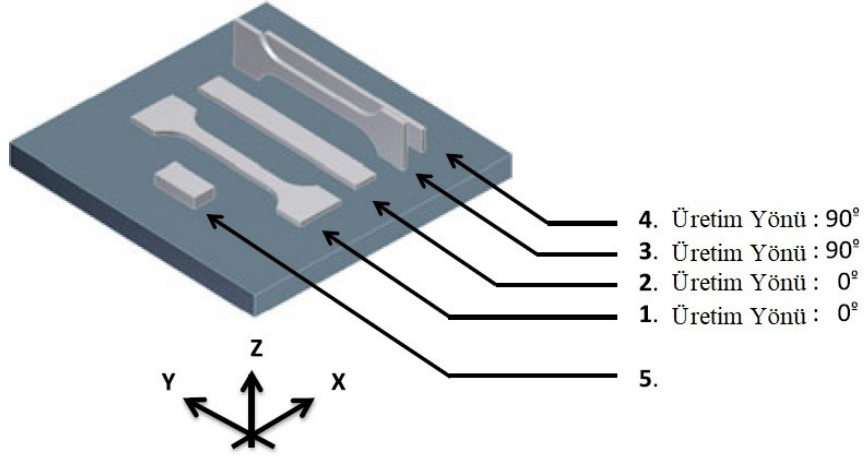
Birim zamanda malzeme üzerine uygulanan enerjinin miktarını belirlemektedir. Lazer ile tabla üzerindeki malzemenin herhangi bir noktada etkileşim halinde olduğu zaman lazer nokta boyutu ile tarama hızının oranı olarak belirlenmektedir. Tarama hızındaki değişim malzeme üzerine uygulanan enerji yoğunluğunu

belirlediğinden, üretilen parçanın geometrik ve mekanik özelliklerine doğrudan etki etmektedir. Düşük hız katmandaki malzemenin yanı sıra önceki katmanın da erimesine sebep olabileceken, yüksek hız gözenekli yapının oluşmasına sebep olabilmektedir. Uygulanan ısı kaynağı gücü ile hızı lazer sinterleme sistemlerinde malzemenin gözeneklilik, homojen birleşme gibi faktörleri belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır [3] [6].

#### **2.8.1.8 Katman Kalınlığı**

İmalat esnasında tabla üzerine serilen toz katmanın kalınlığını ifade etmektedir. Toz yataklı lazer sistemlerinde önemli bir parametre olan katman kalınlığı metal malzemelerde genellikle 100 mikronun altında olurken polimerlerde 50-150 mikron arasında belirlenmektedir [23]. Katman kalınlığı malzemenin mekanik özelliklerine etki etmekle birlikte bu etki minimum düzeylerde kalmaktadır. Bunun yanı sıra katman kalınlığı malzemenin geometrik özelliklerinde büyük etki taşımaktadır. Yüksek katman kalınlığı belirlenen üretimlere katmanlar arası birleşmelerde boşluklar ortaya çıkmakta, bu durum gözenekli yapı oluşturduğundan malzemenin mekanik özellikleri de etkilenmektedir. Katman kalınlığı lazer gücünün belirlenmesinde önemli bir etken olduğundan üretim sürecinde özellikle dikkat edilmesi gereken bir parametredir [44].

Çoğunlukla sadece bir parametreyi değiştirmek üretilen parçanın bir özelliğinde iyileşmeler sağlarken başka özelliklerinde hatalara sebebiyet verebilmektedir. Delgado, vd (2011) tarafından yapılan çalışmada SLS ile Şekil 2.20’de gösterilen numunelerin üretimi gerçekleştirilmiş ve katman kalınlığı, üretim yönü ve tarama hızı üzerinde yapılan değişimin parçanın mekanik ve geometrik özelliklerine etkisi araştırılmıştır.



**Şekil 2.20** Parametrelerin etkisinin belirlenmesi için gerçekleştirilen üretim

Üretim yönü  $0^\circ$  ve  $90^\circ$ , katman kalınlığı  $0,02\ \mu\text{m}$ ,  $0,03\ \mu\text{m}$ ,  $0,04\ \mu\text{m}$ ,  $0,06\ \mu\text{m}$  ve tarama hızı  $300\ \text{mm/s}$ ,  $360\ \text{mm/s}$ ,  $400\ \text{mm/s}$  ve  $500\ \text{mm/s}$  olarak belirlenen deneysel çalışma sonrasında yapılan istatistiksel analizler gerçekleştirilmiştir. Buna göre katman kalınlığının parçanın geometrik özelliklerine kayda değer bir etkisi gözlemlenmemiş, çekme dayanımı ve uzamada ise katman kalınlığındaki artış negatif etki göstermiştir. Üretim yönü parçanın hem geometrik hem mekanik özelliklerini etkilemiş;  $90^\circ$  üretim yönü parçanın kalınlığında ve uzamada olumlu etki göstermiş,  $0^\circ$  üretim yönünde yüzey pürüzlülüğü, eğilme dayanımı ve sertlikte daha iyi sonuç alınmıştır. Tarama hızı ise ne geometrik özelliklerde ne de mekanik özelliklerde doğrudan etki göstermemiştir. Lazer gücü ile tarama hızı doğrudan ilişkili olduğundan lazer gücünün bütün numuneler için sabit olması, tarama hızının parça özelliklerinde etki göstermemesinin gerekçesi olarak gösterilmektedir [34] [45]. Nitekim Calignano vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada farklı lazer gücü ve tarama hızlarında yüzey pürüzlülüğünde önemli değişimler gözlemlenmiş, yüksek tarama hızları ve düşük lazer gücünde yüzey pürüzlülüğü olumsuz sonuç vermiştir [46].

SLS’de üretim sürecini ve parça kalitesini büyük oranda etkileyen bazı noktalar bulunmaktadır. Boyutsal doğruluk büyük oranda toz partiküllerinin büyüklüğü ile ilgili olup, toz tanelerinin büyüklüğü ile parça kalitesi doğrudan ilgilidir. Bunun yanı sıra makine içerisinde oksitlenmenin engellenmesi büyük önem taşımaktadır. Bunun için üretim esnasında ilave inert gazlar kullanılmaktadır. İlave olarak, üretim

süreci malzeme erime noktasının altında sabit bir sıcaklıkta gerçekleşmeli ve bu sıcaklık üretim tamamlanana kadar sürekli sağlanmalıdır [1].

## **2.8.2 SLS ile Üretilen Parçalarda Karşılaşılan Sorunlar**

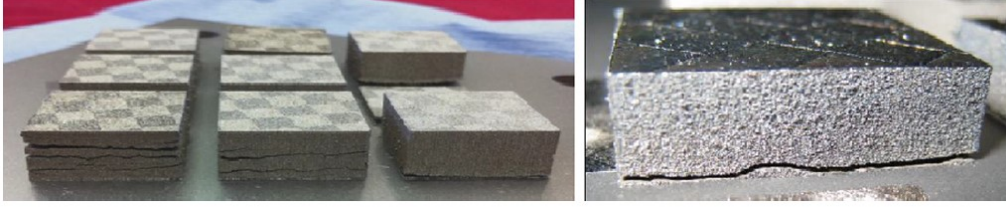
SLS sağladığı avantajlar ile geleneksel imalat yöntemlerine alternatif olarak kullanılabilen önemli bir eklemeli imalat yöntemi olarak bilinmektedir. Ancak üretim esnasında ortaya çıkan bazı sorunlar SLS'in kısıtları olarak kabul edilmekte, bu sorunların çözümü için bilimsel araştırmalar gerçekleştirilmektedir. Tabakalaşma, çatlama, kalıntı gerilme, yumru etkisi, merdiven etkisi ve diğer tasarım ile ortaya çıkan sorunlar bunlardan bazılarıdır.

### **2.8.2.1 Tabakalaşma, Çatlama ve Kalıntı Gerilme**

SLS sırasında parça üzerinde oluşan yüksek termal gerilme kalıntı gerilme oluşmasına neden olmakta, bu durum Şekil 2.21'de görülen tabakalaşma ya da katmanların birbirinden ayrılması ve çatlamaya sebep olmaktadır. Üretim esnasında meydana gelen ve etkileri üretim sonrası ortaya çıkan iç gerilmeler, gözeneksiz ve kaliteli parça üretilebilmesi için giderilmesi gerekmektedir. İç gerilmelere sebep olan mekanizmalar;

1. Halihazırda katılmış katmanının, üst katmanı oluşturulurken tekrar ergimesi nedeniyle oluşan gerilme,
2. En üstte bulunan katmanın soğuması sırasında oluşan gerilme

şeklinde sınıflandırılmıştır [6]. Birinci durumda eğer üstlerdeki katman sıcaklığı alttaki katmanların sıcaklığından daha yüksekse, sıcak olan katmanlar genişlemeye çalışacak ancak alttaki katmanlar buna engel olacağından ortaya basma gerilmesi çıkacaktır. Ortaya çıkan basma gerilmesi üstteki katmanların akma dayanımından yüksek olacak ve bu durum üst katmanların plastik deformasyona uğramasına neden olacaktır. Bu gerilme durumu parça soğuma esnasında çekme gerilmesine sebep olmaktadır. Bu çekme gerilmeleri iç gerilme olarak davranarak parça üzerinde çatlaklara sebep olmaktadır [6] [7].

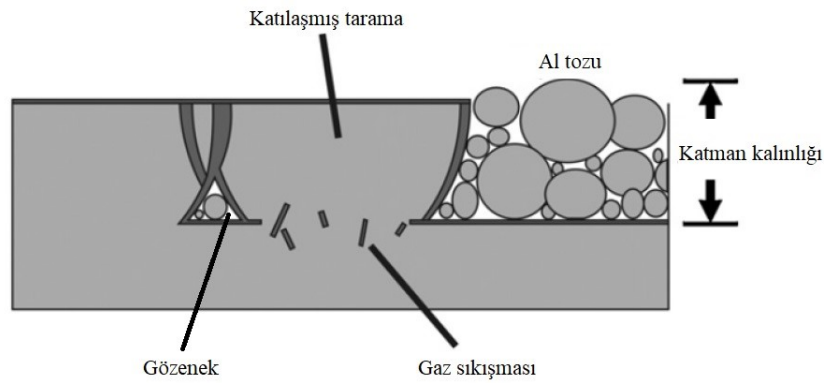


**Şekil 2.21** Tabakalaşma ve çatlak oluşumu

İkinci durumda üstteki katmanların soğuması sırasında ortaya çıkabilecek büzülme alttaki katmanlar ile olan ısı etkileşimi nedeniyle engellenmekte, bu durumda üst katmanlarda çekme gerilmesi, alt katmanlarda ise basma gerilmesine neden olmaktadır. Katmanlar arası ısı gradyanı azaltılması durumunda ısı gerilmeleri ve bu sebeple ortaya çıkan çatlaklar azaltılabilmektedir. Üretim haznesine ve üretim tablasına yapılan ön ısıtma işlemi belirtilen ısı gradyanı ve soğuma hızını azaltmakta, çarpımların ve kristalleşmiş yüzeyin önüne geçilmektedir. Aynı zamanda üretimden sonra ısı işlem uygulanarak kalıntı gerilme giderme işlemi de yapılabilmektedir [6] [7] [8].

### 2.8.2.2 Gözeneklilik

Gözeneklilik lazer eklemeli imalat sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan sorunlardan bir tanesidir. Şekil 2.22’de görüleceği gibi gözeneklilik; yeterli ergimenin olmaması veya koruyucu gazın yeterli olmadığı durumlarda haznede bulunan gazlar nedeniyle meydana gelmektedir. Gazlar nedeniyle ortaya çıkan gözeneklilik sinterleme esnasında ergime havuzunun, yüzeyde meydana gelen oksit tabakayı aşarak alt tabakalarda gaz sıkışması ile ortaya çıkmaktadır.

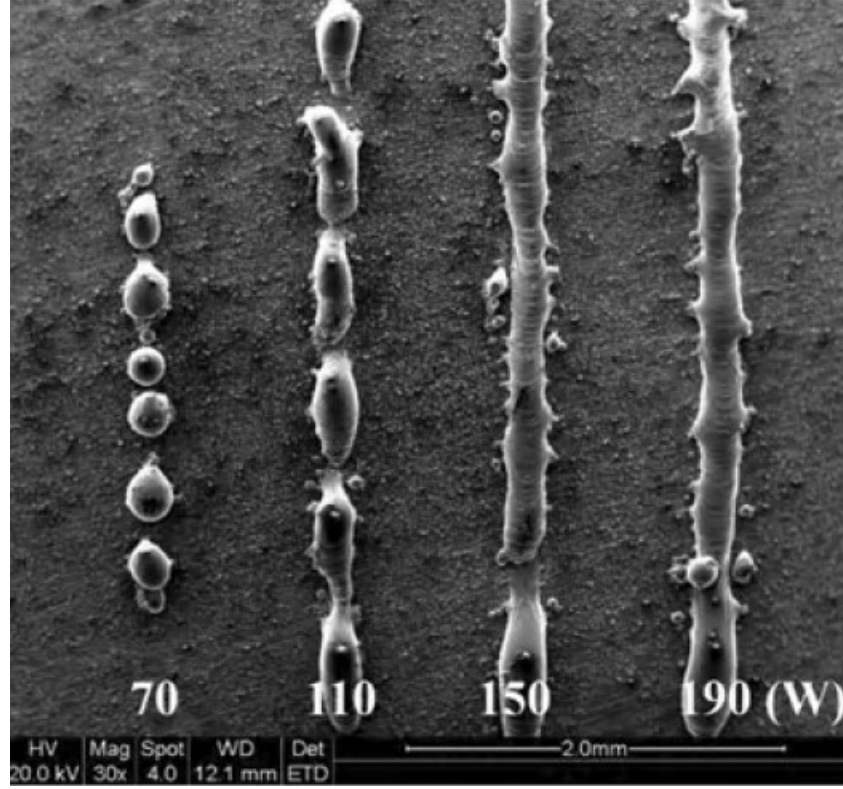


**Şekil 2.22** Gözenek oluşumu [47]

En sık karşılaşılan gözeneklilik nedeni olan yetersiz ergime ise tozların düzgün bir formda sinterlenmesine engel olur ve düzensiz sinterlenmiş bir tabaka ortaya çıkar. Yetersiz ergime ise genellikle düzensiz ve büyük gözeneklerin oluşmasına sebep olmakta; lazer gücü, tarama hızı ve tarama aralığı gibi proses parametrelerinin düzgün bir şekilde ayarlanması ile ortadan kaldırılabilir. Lazer gücünün azaltılması ve tarama hızının artırılması yüzey pürüzlülüğüne aynı oranda olumsuz etki yaratmaktadır. Bununla beraber tarama aralığının artırılması da tarama çizgileri arasında yeterli bindirme (overlap) olmayacağından gözenekliliğe neden olmaktadır [6] [8]. Gözeneklilik imal edilen parçanın yoğunluğuna da etki etmekte, gözeneklilik arttıkça hacim de artacağından yoğunlukta da azalma meydana gelmektedir.

#### ***2.8.2.3 Yumrulanma Etkisi (Balling effect)***

Balling etkisi malzeme karakteristiği ve proses koşulları nedeniyle ortaya çıkan metalürjik bir problem olarak tanımlanmaktadır. Yeni katman serilmesi esnasında bir önceki katman üzerinde yeterince yayılma sağlanamaması (ıslanabilirlik) ve yüzey gerilmesi sebebiyle yumrulanma ortaya çıkmaktadır. Lazer uygulandıktan sonra ergimiş bölge, yüzey gerilimi nedeniyle ortaya çıkan yüzey enerjisinin azaltılması için çekmeye eğilimli olmaktadır. Bu durum Şekil 2.23'te yer alan yumrulanma etkisine neden olmakta, yüzey pürüzlülüğü, gözeneklilik gibi sorunlara yol açmaktadır. Yüzeyde meydana gelen bu yumrulanma, tablaya yeni toz serpen bıçağın hareketine engel olarak üretimin durmasına sebep olabilmektedir. Yumrulanmaya sebep olan faktörler arasında oksitlenme, lazer gücü, tarama hızı, tarama aralığı ve katman kalınlığı yer almaktadır [6] [7] [9] [8].

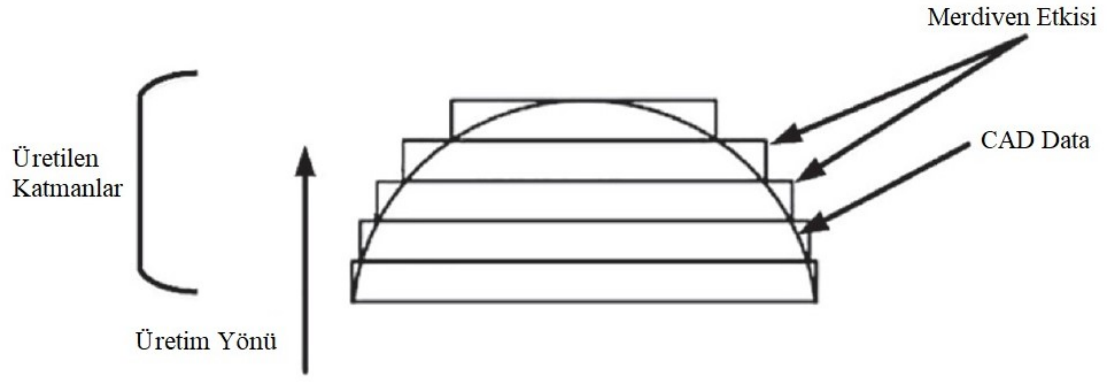


**Şekil 2.23** Farklı lazer güçlerinde meydana gelen yumrulanma etkisi [9]

Yüksek tarama hızı ve düşük lazer gücü ergime bölgesinin boyutunu ve alt katman ile temas alanını azaltarak alt katman üzerinde zayıf bir yayılma ve akışkanlık görülür ve bu durum yumrulanma etkisine sebep olur. Dolayısıyla bahsedilen proses parametreleri yumru oluşmasının önlenmesi için düzgün bir şekilde ayarlanmalıdır [6] [9].

#### **2.8.2.4 Merdiven Etkisi**

Merdiven etkisi lazer eklemeli imalat sistemlerinde karşılaşılan diğer bir sorundur. Şekil 2.24'te gösterildiği gibi eğimli, küresel ve kavisli parçalarda üretim yönü boyunca parçanın yüzeyinde pürüzlülüğe neden olmaktadır. Katman kalınlığı arttıkça doğal olarak merdiven etkisi de belirgin bir biçimde ortaya çıkmaktadır. Üretim yönünün uygun bir şekilde belirlenmesi ve üretim parametrelerinin (katman kalınlığı) dikkatli seçilmesi ile merdiven etkisi minimuma indirilebilmektedir [6].



**Şekil 2.24** Merdiven etkisi

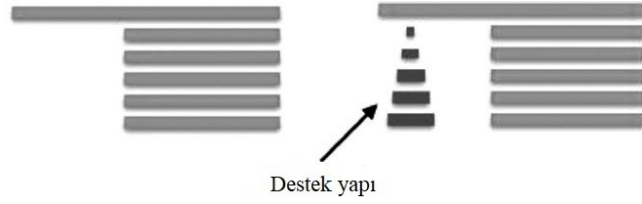
### **3.1 Destek Kullanılarak Çıkıntı Yapıların Üretimi**

Destek yapılar, birçok eklemeli imalat yönteminde kullanılmakta olup, üretim tasarımı esnasında göz önünde bulundurulması gereken önemli bir konudur. Destek yapılar tasarım için gerekli olsa da genellikle tercih edilmemektedir. Özellikle üretim öncesinde tasarım süreci ve optimizasyonu ilave zaman ve maliyete neden olmaktadır. Üretim esnasında da aynı şekilde üretim süresini artırmakta, aynı zamanda fazla malzeme kullanılması gerektiğinden malzeme sarfı, dolayısıyla maliyeti artmaktadır. Üretim sonrasında ise destek yapının esas parçadan ayrılması ve temizlenmesi de ilave zaman ve işçilik gerektirmekte, temizleme esnasında esas malzemeden ayrılma esnasında meydana gelen çatlak ve kopmalar da kaliteyi düşürmektedir [3].

Destek yapılar çeşitli nedenlerden ötürü imalat esnasında zaruri olduğundan kullanılmaktadır. Tekne fotopolimerizasyonu yönteminde tekne içerisinde parçaya uygulanan kaldırma kuvveti ve yüzeyde oluşan boyutsal küçülmelere karşı destek yapılar kullanılmaktadır. Malzeme ekstrüzyon yönteminde hem yer çekimi kuvveti hem de kalıntı termal gerilmeler nedeniyle parçada meydana gelecek boyutsal hataların minimize edilmesi için kullanılmaktadır. Toz yataklı ergitme yönteminde ise ergime-katılaşma sırasında meydana gelen termal gerilmelerin boyutsal doğruluğa negatif etkilerini ortadan kaldırmak için kullanılmaktadır. Özellikle metal toz malzeme kullanılan toz yataklı ergitme sistemlerinde yüksek sıcaklık değerlerinde imalat gerçekleştiği için yoğun bir destek yapı kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. [3]

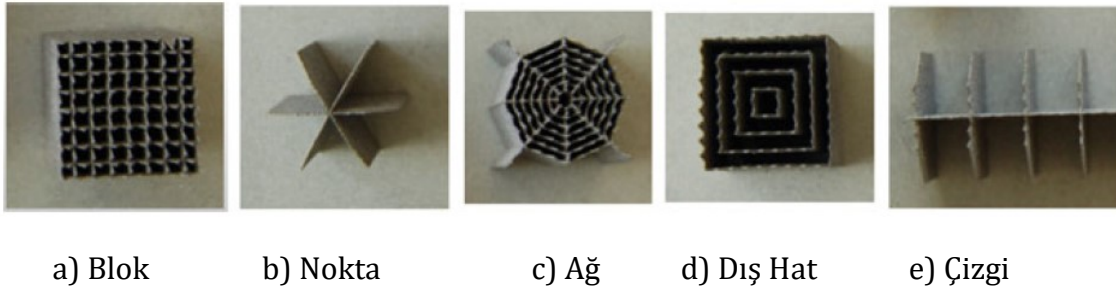
Destek yapı kullanımı üretim öncesinde karar verilmesi gereken bir husustur. Kullanılan malzeme, üretim parametreleri (katman kalınlığı, tarama hızı, vd.) ve parça tasarımı gibi kriterler göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle üretilecek parça üzerinde altında sadece toz olacak şekilde üretilmesi gereken çıkıntılar veya deliklerin üretiminde destek yapı ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.1’de görüldüğü

gibi çıkıntı olan bölgede parça düşmesini veya kalıntı gerilmeler nedeniyle meydana gelecek çarpılmaları engellemek için destek yapı kullanılmıştır.



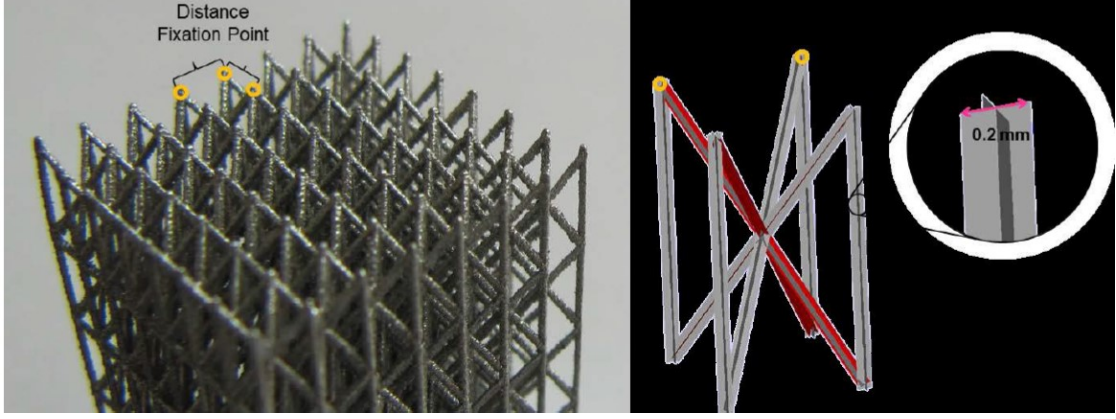
**Şekil 3.1** Destek yapı

Üretim öncesinde parça üzerinde kullanılacak destek yapının konumu, miktarı ve tasarımı belirlemek için çeşitli yazılımlar kullanılmaktadır. “Magics” yazılımı en yaygın olarak kullanılan STL tasarım yazılımıdır. Yazılım ile farklı destek yapısı çeşitleri, üretilecek parça üzerinde konumlandırılmaktadır. En çok kullanılan destek yapıları olan blok, nokta, ağ, çizgi ve dış hat destek yapıları Şekil 3.2’de gösterilmiştir [48]. Nokta destek yapıları küçük çıkıntılarda, ağ destek yapısı dairesel bölgelerde, çizgi destek yapıları ise dar çıkıntılarda kullanılmaktadır. Dış hat destek yapısı ise parçanın dış hattında daha kaliteli sonuç almak için kullanılmaktadır [10].



**Şekil 3.2** Destek yapı çeşitleri

İlave olarak, gerekli durumlarda destek yapı görevi gören kafes yapılar da sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 3.3’te gösterilen kafes yapısında ana destek gövdesi bulunmamakta, dış görevini ise kafes yapının bittiği yerdeki uçlar sağlamaktadır. Kafes yapısının kullanımı esnasında hücre büyüklükleri ve kafes kollarının ölçüleri üretim öncesinde tasarlanmalıdır [48].



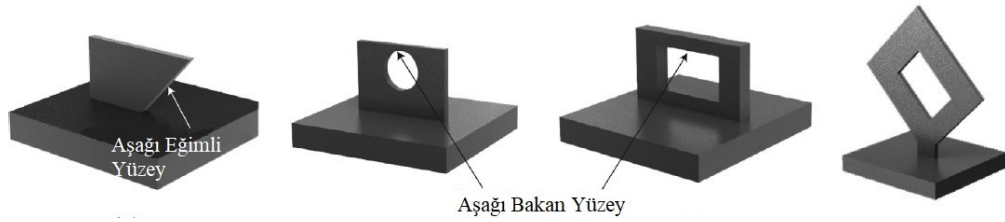
**Şekil 3.3** Kafes destek yapısı

Destek yapılar iki önemli fonksiyonel bölge barındırmaktadır; dişler ve ana destek yapısı. Destek yapısı üzerinde bulunan dişler parça ile destek yapısının birleştiği kısımlardır. Dişlerin ucu parça ile birleşerek parçada oluşabilecek deformasyonları engellemektedir. Destek ile parçanın dişler ile birleşmesinin temel sebebi; küçük birleşme noktaları oluşturularak üretim sonrasında parçadan kolay ayrılmasının sağlanması ve parça üzerinde ayrılma işleminde kopma veya çatlak oluşmasının engellenmesidir. Diğer yandan parça ile birleşen dişlerin birbirine çok yakın olması ayrılmanın zorlaşmasına, dişler arası mesafenin fazla olması ise parçada deformasyona yol açabilmektedir. Ana destek yapısı ise dikey ekseninde maruz kalacağı ağırlıklara ve yatay ekseninde oluşabilecek deformasyonlara yönelik dayanımlı olmalıdır. Dolayısıyla destek yapısı tasarımında parça ile temas sağlayacak dişler için de boyutsal optimizasyon gerekmektedir. [10].

Belirtilen destek yapılar birçok deneysel çalışma neticesinde başarılı bir üretim karakteristiğine sahip olduğu görüşmüştür. Ancak bazen destek yapısı üzerinde yer alan ince kolların üretiminde sorun ile karşılaşilmektedir. Örneğin Şekil 3.3’de gösterilen grid destek yapısında çok ince kollar kırılmalıdır ve üretim öncesinde tasarımı dikkatle yapılmalıdır. Dolayısıyla destek yapısı seçimi, dişler arası mesafe ve varsa destek yapısı üzerindeki hücre boyutları üretim öncesinde optimize edilmesi gerekmektedir.

### 3.2 Destek Kullanılmadan Çıkıntı Yapıların Üretimi

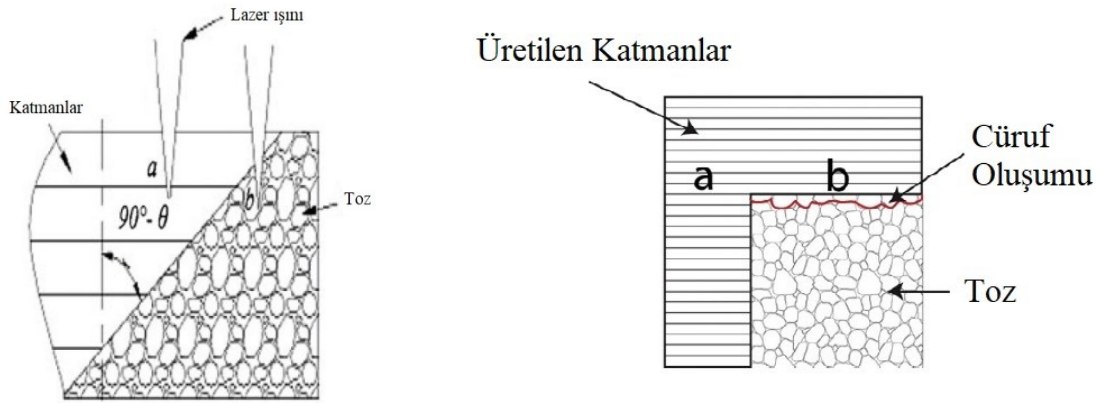
Geleneksel imalat yöntemleri üretilemeyen birçok parça eklemeli imalat ile üretilbilirken, eklemeli imalat da kendi içinde çeşitli zorlukları barındırmaktadır. Bunlardan en önemlisi çıkıntı yapılar olup, birçok parçada çıkıntı yapıların kullanılması kaçınılmazdır. Destek ile üretilmeyen çıkıntı yapılar, alt tarafında katı bir tabaka olmadığından sadece toz tarafından desteklenmektedir. Lazer toza uygulandığı anda oluşan ergime havuzu sadece toz tarafından desteklenmekte, toz ise ergime havuzunu yeterince destekleyememektedir. Bu durum ise çeşitli bozulmalara sebep olmaktadır. Toz tarafından desteklenen çıkıntı yapılar üretim tablasına paralel, eğimli veya dairesel şeklinde olabilmektedir. Şekil 3.4’de gösterilen çıkıntı yapılar önceki bölümde bahsedildiği gibi destek yapılar ile üretilbiliyor olsa da destek yapılar tasarım süreci ve optimizasyonu, zaman, maliyet, işçilik, üretim sonrası yoğun işlem gerektirmesi ve temizleme esnasında parçada deformasyonlar gibi olumsuz etkileri bulunmaktadır [3] [8].



**Şekil 3.4** Toz destekli üretilmiş yapılar

Destek yapı kullanılmadan gerçekleştirilen çıkıntı yapı üretiminde çeşitli sorunlar meydana gelmekte olup, bunlardan malzemede termal etkiler nedeniyle cüruf oluşumu ve çarpılma en yaygın karşılaşılan sorunlardır [10]. Lazer gücü, lazer nokta boyutu ve toz porozitesi gibi parametreler, lazerin uygulandığı bölgede ısı tesir altında kalan ergime havuzunun büyümesine ve uzamasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla arzu edilenden daha fazla bölge ısı tesir altında kalmakta ve daha fazla tozun ergimesine/sinterlenmesine sebep olmaktadır. Bu durum malzemede boyutsal doğruluğun ve mikroyapının olumsuz etkilenmesine sebep olmaktadır [49]. Şekil 3.5’de lazer, katı destekli “a” noktasını eritmeye başladığında ısı iletim oranı çok yüksek olmaktadır. Toz destekli “b” noktasında ise, eğer tüm parametreler aynı olması durumunda, tozun absorbe ettiği enerji miktarı çok yüksek olacaktır. Bu

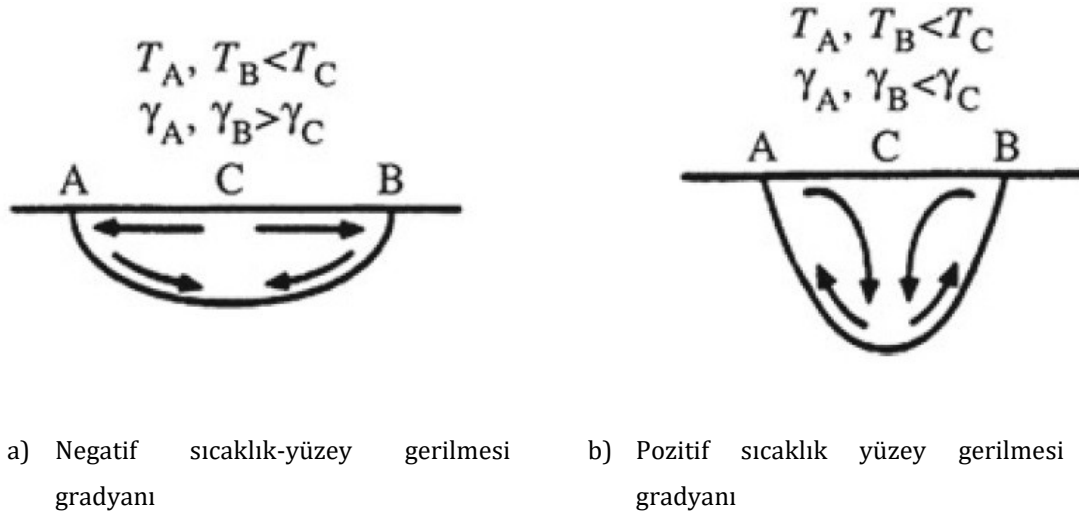
durum toz destekli “b” noktasında daha büyük bir ergime havuzu olmasına sebep olmaktadır. Eriyik havuzunu destekleyecek katı bir yapının yerine toz olması, ergime havuzunun büyümesi, yer çekimi ve kılcalığın da etkisiyle eriyiğin aşağı doğru batmasına sebep olur. Cüruf oluşumu olarak isimlendirilen bu oluşum (dross formation), boyutsal doğrulukta kabul edilmeyecek oranlarda hatalara sebep olmaktadır [10] [11] [49].



**Şekil 3.5** Cüruf oluşumu

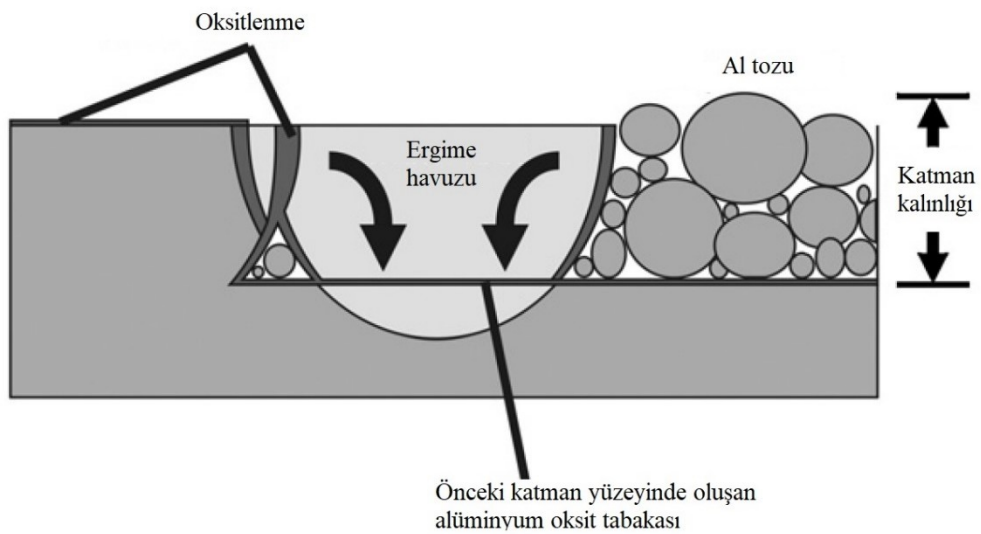
Üretim parametrelerinin uygun bir şekilde belirlenmesiyle dengeli bir ergime havuzunun oluşması sağlanarak cüruf oluşumu minimize edilebilmektedir. Derin olmayan ve uzunluğu sabit dengeli bir ergime havuzunun elde edilmesi için lazer gücü ve tarama hızı azaltılmalı ve ergime havuzunun katılaşması için süre verilmelidir. Aksi taktirde ergime havuzu genişleme ya da derinleşme eğilimine girebilmektedir. Ergime havuzu içerisinde enerji yoğunluğunun homojen olmaması nedeniyle sıcaklık dağılımı da homojen değildir. Oluşan bu sıcaklık gradyanı nedeniyle ergime havuzu içerisinde Şekil 3.6’da gösterilen marangoni etkisi meydana gelmektedir. Marangoni akışı ergime havuzunun yapısını ve katılaşma şeklini belirlemektedir. Negatif sıcaklık-yüzey gerilimi sahip metal alaşımları için marangoni etkisi Şekil 3.6 (a)’daki gibi olmaktadır. Çünkü merkezdeki lazer tarafından uygulanan sıcaklık çevreleyen alanlarınkinden daha yüksektir. Sonuç olarak, ergime havuzlarının yapısı daha sık ve geniş yüzeyli bir hale gelmektedir. Diğer yandan pozitif sıcaklık-yüzey gerilimi gradyanına sahip malzemelerde

marangoni etkisi Şekil 3.6 (b)'deki gibi daha dar ve daha derin bir ergime havuzu oluşmasına sebep olmaktadır [3].



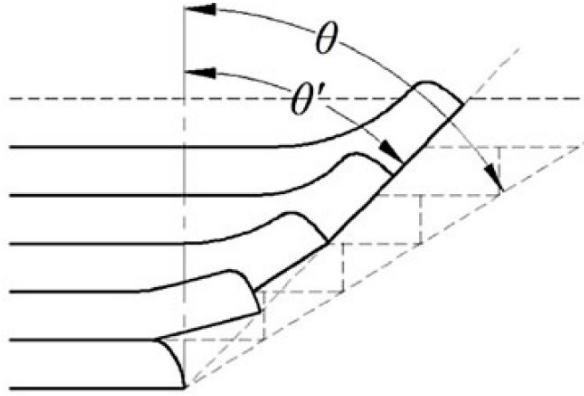
**Şekil 3.6** Marangoni etkisi

Alüminyum alaşımının kullanıldığı sistemlerde, Şekil 3.7'de gösterildiği gibi alüminyum oksit tabakası meydana gelmektedir [47]. Ergime havuzunun şeklinin belirlenmesini sağlayan marangoni etkisi alüminyum esaslı reaktif alaşımlarda türbülanslı bir akış yaratarak oluşan oksit katmanlarını kırılmasına neden olmaktadır. Ergime havuzunda oluşan oksit tabakası kırıldığında ise eriyik aşağı yönlü hareket ederek havuz derinleşir. [3] [47].



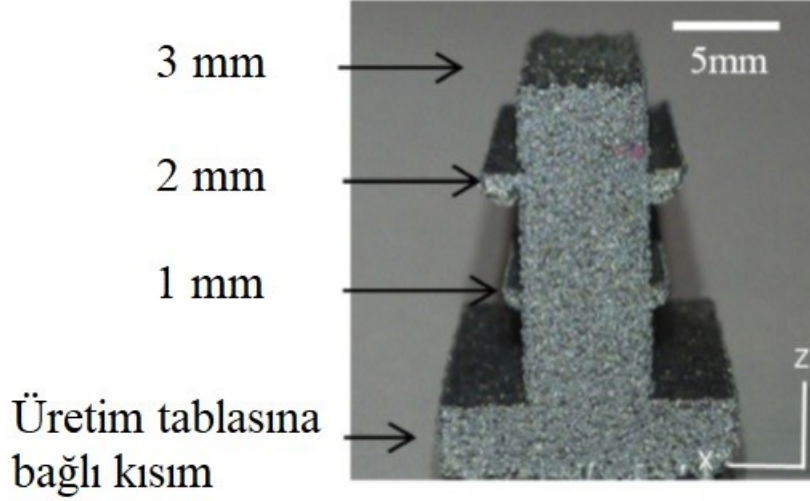
**Şekil 3.7** Ergime havuzunda marangoni akışı

Destek yapı olmadan üretilen çıkıntılı yapılarda karşılaşılan diğer sorun çarpılma dır. Hızlı katılma sonrası ortaya çıkan ısı gerilme neticesinde parçada plastik deformasyon meydana gelmektedir. Ergime havuzunun altında toz bulunması da eritilen bölgenin fiziksel olarak bağlanacağı noktanın olmaması, Şekil 3.8’de görüldüğü gibi çarpılmaya neden olmaktadır. Yüksek açılarda meydana gelen çarpılma, bir sonraki katman için toz serilmesi esnasında haddenin parçaya takılmasına ve üretimin durmasına sebep olabilmektedir. Sonuç olarak ortaya çıkan kalıntı gerilmeler, toz destekli çıkıntı yapılarda çarpılma oluşmasının temel sebebi olarak kabul edilmektedir [11].



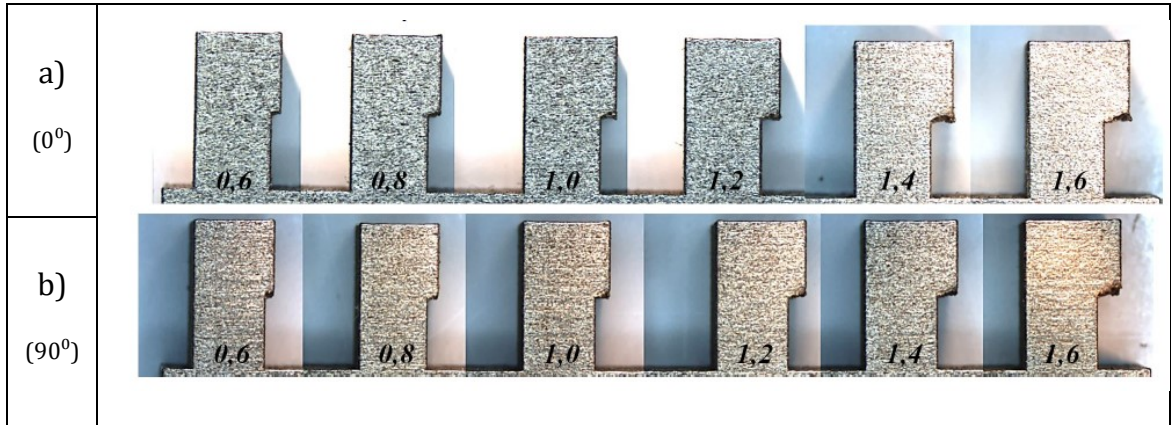
**Şekil 3.8** Çarpılma oluşumu

Seçici lazer ergitmede  $AlSi_{12}$  alaşımı kullanılarak üretilen çıkıntı yapıda 1 mm ve 2 mm uzunluğundaki çıkıntılar başarılı bir şekilde üretilirken 3 mm uzunluğundaki çıkıntı yapı üretilenmemiştir. Şekil 3.9’daki gibi 3 mm uzunluğunda çıkıntı üretimi esnasında makinede toz serme işlemi yapan hadde, çıkıntıda meydana gelen çarpılma nedeniyle ilerleyememiş ve üretim durmuştur [50]. Buradan hareketle 2 mm üzerinde uzunluğa sahip yapılar destek kullanılmadan üretilmeyeceği anlaşılmaktadır.



**Şekil 3.9** Farklı çıkıntı uzunluklarında üretim

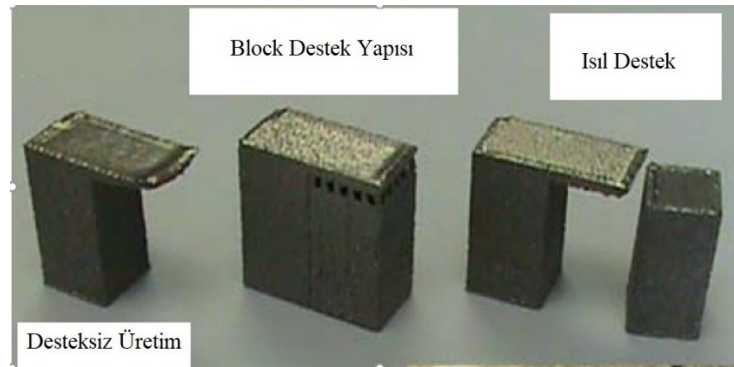
Dana vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada maraging çeliği kullanılarak sls ile üretilen numuneler, tabla yüzeyine göre sırasıyla X ( $0^\circ$ ) ve Y ( $90^\circ$ ) yönünde belirlenen tarama stratejisi ile üretilerek askıda kalan kısımlardaki boyutsal doğrulukları incelenmiştir. 0,6 mm'den başlayarak 0,2 mm artışla 1,6 mm'ye kadar üretilen altışar numune X ( $0^\circ$ ) ve Y( $90^\circ$ ) tarama açıları da askıda kalan kısımdaki uzunluk arttıkça deformasyonun arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.10). Bununla beraber üretilen parçaların tamamında askıda kalan kısımlarda köşeli bir geometri elde edilememiş ve yüzey pürüzlülüğü kabul edilebilir sınırlarda değildir [12].



**Şekil 3.10** Tarama yönünün askıda kalan yapı üzerindeki etkisi

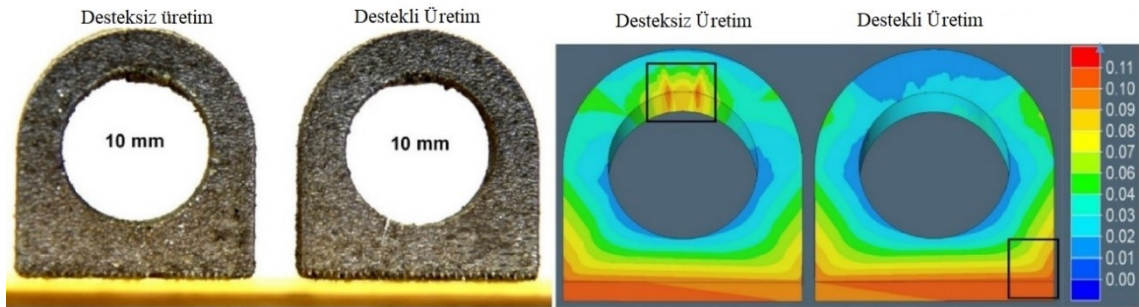
Cooper vd. (2017) askıda duran yapılar için yaptıkları çalışmada, tasarımı yapılan parçaya temas etmeyen ısı destek kullanarak üretim gerçekleştirilmiş ve boyutsal doğruluk incelenmiştir. Toz yataklı eklemeli imalat ile gerçekleştirilen üretimde

Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V alaşımı kullanılmış ve bütün numuneler için aynı üretim parametreleri kullanılmıştır. Şekil 3.11’de görüldüğü gibi parçanın askıda duran kısmına temas etmeyecek şekilde 0,63 mm’lik bir boşluk bırakılarak destek yapısı tasarlanmış ve üretim gerçekleştirilmiştir. Üretim sonucuna göre destek olmadan gerçekleştirilen üretimde çarpılma meydana gelirken ısıl destek ile üretilen parçada istenilen oranlarda üretim gerçekleştirilebilmiştir. Parça ile destek yapısı arasında kalan boşluğun daha büyük olduğu durumlarda ısıl destek etkisini kaybederken, daha küçük olduğu durumlarda ise parça ile destek arasında kısmi yapışmalar meydana gelmiştir [13].



**Şekil 3.11** Isıl destekli üretim

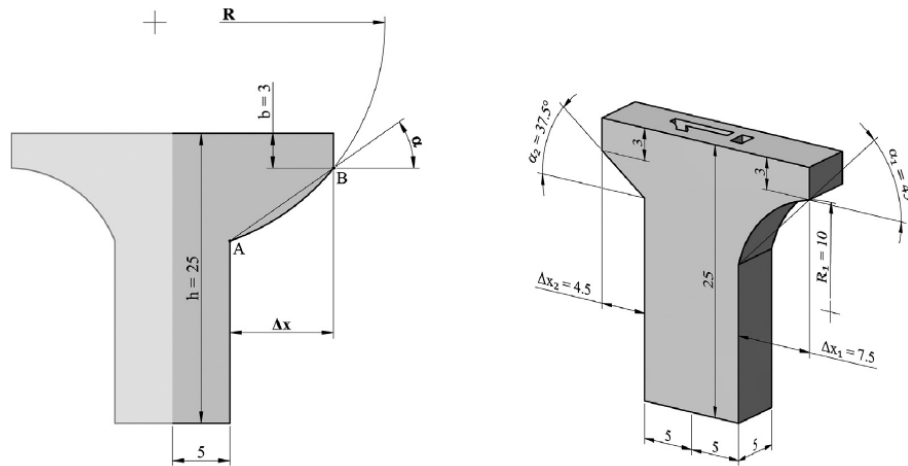
Dairesel profile sahip deliklerde ise destek yapı kullanılmadan üretimlerde benzer şekilde boyutsal doğrulukta sorunlar meydana gelmektedir. Şekil 3.12’de görüldüğü gibi destekli ve desteksiz gerçekleştirilen dairesel profil üretiminde boyutsal kalite farkı gösterilmektedir. Desteksiz olarak üretilen parçada, özellikle dairesel profil en tepe noktasında cüruf oluşumu meydana gelmiştir [51] [14].



**Şekil 3.12** Destekli/Desteksiz dairesel profil üretimi

Diğer yandan çıkıntılar eğimli olarak üretilmesi gerektiği durumlarda ise, eğimli yüzeyin üretim tablası ile yaptığı açı  $35^\circ$ 'den küçük ise mutlaka destek yapı kullanılması gerekmektedir.  $35^\circ$  ile  $45^\circ$  arasında yüzey pürüzlülüğü yüksek olduğu görüldüğünden  $45^\circ$ 'den daha büyük açılarda desteksiz üretim yapılabilir. Askıda duran konkav yüzeylerde 3 mm, konveks yüzeylerde ise 2 mm altında destek yapı olmadan üretim mümkündür. Daha büyük yarıçapa sahip konkav ve konveks yüzeylerde destek yapı kullanılması gerekmektedir. Bununla birlikte 7 mm ve daha büyük çapa sahip tablaya paralel olarak üretilen silindirik boşluklarda da destek yapısı kullanılması gerekmektedir. 5 mm'den uzun yarıçap yapılar üretilmesi gerektiğinde yarıçap yerine pah kırılması tavsiye edilmektedir [11] [15].

Atzeni ve Salmi (2015) tarafından yapılan çalışmada Şekil 3.13'de görüldüğü gibi destek yapı kullanılmadan konkav ve konveks çıkıntı üretimi gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 3.13** Konkav ve konveks çıkıntı üretimi

Yapılan çalışmada, sabit makine parametreleri ile AlSi10Mg malzemedan farklı oran ve ölçülerde 36 numune üretimi gerçekleştirilerek ANOVA ile farklı ölçülerin boyutsal doğruluk üzerinde etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak  $\alpha$  açısı,  $b/\Delta x$  oranı ve  $1/R$  kavis oranı elde edilen yüzey kalitesine büyük oranda etki etmektedir.  $\alpha$  açısındaki artış, çıkıntı yapıyı yatay konumdan dikey konumuna taşıdığından tolerans sınırları içerisinde üretim gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Bu durumda konveks yüzeylerde yüksek  $\alpha$  açısı, konkav yüzeylerde düşük  $\alpha$  açısı daha olumlu boyutsal doğruluk sonuçları vermektedir. Elde edilen bir diğer önemli sonuç ise

$b/\Delta x$  oranının düşük olduğu durumlarda daha olumlu boyutsal doğruluk elde edilmesi olmuştur [52].

### 4.1 Malzeme ve Kullanılan Ekipmanlar

#### 4.1.1 AlSi<sub>10</sub>Mg

Üretim için EOS marka, 2,67 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluğa ve 90 µm'nin altında tane büyüklüğüne sahip AlSi<sub>10</sub>Mg alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Alaşımın kompozisyon yapısı Tablo 4.1'de verilmiştir. AlSi<sub>10</sub>Mg alaşımı genellikle döküm yönteminde kullanılan ve iyi döküm özelliklerine sahip bir alaşım olup; iyi dayanım, sertlik ve dinamik özellikler sunmaktadır. İyi termal özellikler ve düşük ağırlık istenen uygulamalarda AlSi<sub>10</sub>Mg alaşımı tercih edilmektedir. Talaşlı işleme, kaynak, parlatma ve kaplama gibi uygulamalar gerekli görüldüğü durumlarda yapılabilmektedir [53].

**Tablo 4.1** AlSi<sub>10</sub>Mg alaşımı malzeme kompozisyonu

| Element  | Al   | Si | Fe   | Cu   | Mn   | Mg   | Ni   | Ti   | Zn  |
|----------|------|----|------|------|------|------|------|------|-----|
| Oran (%) | 87.2 | 11 | 0.55 | 0.05 | 0.45 | 0.45 | 0.05 | 0.15 | 0.1 |

#### 4.1.2 Eklemeli İmalat Makinesi ve Üretim Parametreleri

Deneyisel çalışma için gerekli numunelerin üretimi için Şekil 4.1'de gösterilen EOS M290 metal eklemeli imalat makinası kullanılmıştır.



**Şekil 4.1** EOS M 290 DMLS eklemeli imalat makinası

Numunelerin üretimi için belirlenen makine üretim parametreleri değiştirilmemiş olup, bütün üretimler için aynıdır. Üretim için kullanılan temel makine parametreleri Tablo 4.2’de belirtilmiştir.

**Tablo 4.2** EOS M 290 üretim parametreleri

| Lazer Tipi     | Lazer gücü  | Lazer Boyutu   | Ön Isıtma         |
|----------------|-------------|----------------|-------------------|
| Yb Fiber Lazer | 370 W       | 100 µm         | 35 <sup>0</sup> C |
| Ortam Gazı     | Tarama Hızı | Tarama Aralığı | Katman Kalınlığı  |
| Argon          | 1300 mm/s   | 0,19 mm        | 30 µm             |

#### 4.1.3 Numunelerin Boyutsal Ölçümleri

##### 4.1.3.1 Taramalı Elektron Mikroskobu ile Ölçüm

Üretilen numuneler üzerinden ölçüm alınması için Şekil 4.2’de gösterilen Hitachi SU3500 T2 marka taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. SEM görüntüleri ile üretilen numunelerin yüzeylerinde boyut ve şekilsel görüntüler alınmış olup, görüntüler üzerinde çıkıntı kısmının boyutsal ölçüleri ImageJ isimli yazılım yardımı ile elde edilmiştir.



**Şekil 4.2** Taramalı elektron mikroskobu

#### ***4.1.3.2 ImageJ Yazılımı ile Ölçüm***

ImageJ yazılımı Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Sağlık Enstitüsü laboratuvarlarında geliştirilmiş; görüntü işleme ile görüntüleme, değiştirme, analiz ve baskı amacıyla kullanılan piksel tabanlı bir istatistik programıdır. ImageJ yazılımı yardımı SEM cihazı ile elde edilen JPEG formatındaki görüntüler üzerinde numunelerin boyutlarının hassas bir şekilde ölçülmesini sağlamıştır. Bu çalışma kapsamında elde edilen ölçüm sonuçları ImageJ yardımı ile elde edilmiştir.

#### ***4.1.4 Ağırlık Ölçümü***

Numunelerin ağırlıkları Şekil 4.3'te gösterildiği gibi KERN marka hassas terazi ile ölçülmüştür. Cihaz 0,2 gr-1000 gr. ölçüm aralığına sahip olup, 0,001 gr'lık hassasiyete sahiptir.



**Şekil 4.3** Hassas dijital terazi

#### **4.1.5 Yoğunluk Ölçümü**

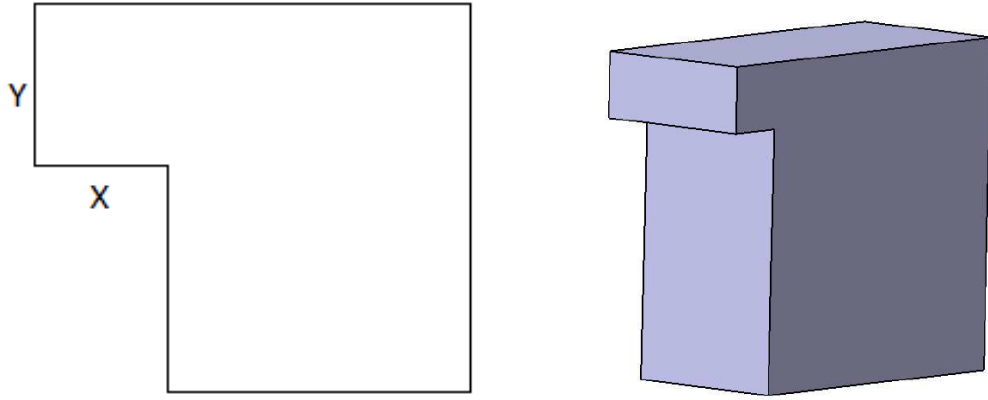
Numunelerin yoğunluk ölçümleri arşimet prensibi ile yoğunluk ölçüm kiti kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen yoğunluk değerleri, numune hacmi ve ağırlığı kullanılmak suretiyle porozite hesabı yapılmıştır.

### **4.2 Numune Üretimleri**

Çalışma kapsamında 3 set numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Bunlar “1. Üretim”, “2. Üretim” ve “3. Üretim” olarak adlandırılmıştır. Her numune seti üretimi sonrasında yapılan ölçüm ve analiz çalışmaları sonrası ihtiyaç duyulan yeni numune seti belirlenmiş ve gerekli üretim yapılmıştır.

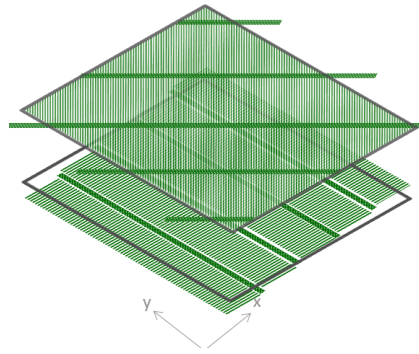
#### **4.2.1 1. Üretim**

Numunelerde çıkıntı boyutlarının etkisini görmek amacıyla Şekil 4.4’te katı modellemesi yapılmış numune üretilmiştir. Şekilde belirtilen “X” çıkıntı uzunluğu, “Y” ise çıkıntı yüksekliği olarak belirtilmiştir. Çıkıntı uzunluğu ve tasarım yönü ile ilgili üretim yapılmasına karar verilen ölçüler Tablo 4.3’te gösterilmektedir. Çıkıntı uzunluğu 1 mm, 1,5 mm ve 2 mm ölçülerinde; çıkıntı yüksekliği 2 mm ve 3 mm ölçülerinde olacak şekilde üretim gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 4.4** Numune tasarımı

Farklı çıkıntı uzunluklarının ve yüksekliklerinin çıkıntı oluşumunda etkisinin incelenmesinin yanı sıra tarama yönü de bir diğer değişken olarak incelenmiştir. Bu noktada üç farklı tarama yönünde üretim yapılmıştır. Sadece tabla üzerinde X yönünde tarama yapılması  $0^0$ , Y yönünde tarama yapılması  $90^0$  olarak kabul edilmiştir. Her katmanda  $45$  derecelik açı ile tarama yönünün değişmesi ile elde edilen  $0^0 - 45^0 - 90^0$  derecede tarama yapılması da bir diğer tarama stratejisi olarak belirlenmiş ve Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



**Şekil 4.5** Tarama yönü

**Tablo 4.3** 1. Üretim için belirlenen numune ölçüleri

| Parça No | Çıkıntı Uzunluğu<br>(X)<br>(mm) | Çıkıntı Yüksekliği<br>(Y)<br>(mm) | Tarama yönü    |
|----------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------|
| 1        | 1                               | 3                                 | 0°             |
| 2        | 1,5                             | 3                                 | 0°             |
| 3        | 1                               | 3                                 | 90°            |
| 4        | 1,5                             | 3                                 | 90°            |
| 5        | 1                               | 2                                 | 0° - 45° - 90° |
| 6        | 1,5                             | 2                                 | 0° - 45° - 90° |
| 7        | 2                               | 2                                 | 0° - 45° - 90° |
| 8        | 1                               | 3                                 | 0° - 45° - 90° |
| 9        | 1,5                             | 3                                 | 0° - 45° - 90° |
| 10       | 2                               | 3                                 | 0° - 45° - 90° |

Tarama yönünün etkisi 1 mm ve 1,5 mm çıkıntı uzunluğu ile 2 mm ve 3 mm çıkıntı yüksekliğine sahip numunelerde incelenmiştir. 2 mm çıkıntı uzunluğuna sahip numunelerde tarama yönü 0°- 45°-90° olarak üretilmiştir.

#### 4.2.2 2. Üretim

İlk numune üretiminde elde edilen sonuçlar çıkıntı uzunluğu ve yüksekliğinin geometrik sapma üzerinde etkisi için genel anlamda bir fikir vermiş olsa da, farklı çıkıntı uzunluğu ve yüksekliği ile daha geniş bir numune seti üretimine karar verilmiştir. Diğer yandan ilk üretimde 0° ve 90° derecede numune üretiminde olumlu netice alınamadığından bütün numunelerde 0°-45°-90° tarama yönü kullanılarak üretim yapılması planlanmıştır. Bu sayede sadece çıkıntı yüksekliğinin ve çıkıntı uzunluğunun geometrik sapma üzerindeki etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. İkinci üretiminde numuneler için belirlenen geometrik ölçüler Tablo 4.4'te gösterilmiştir.

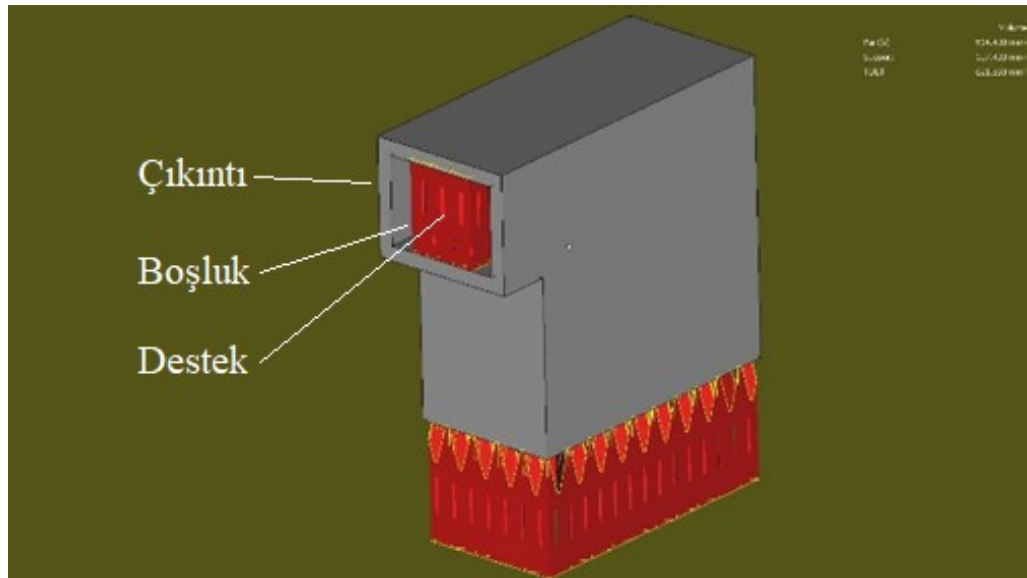
**Tablo 4.4 2. Üretim için belirlenen numune ölçüleri**

| Çıkıntı Uzunluğu-X (mm)      |   | 0,8  | 1,00 | 1,20 | 1,40 | 1,60 | 1,80 |
|------------------------------|---|------|------|------|------|------|------|
| Çıkıntı Yüksekliği<br>Y (mm) | 2 | N.1  | N.2  | N.3  | N.4  | N.5  | N.6  |
|                              | 3 | N.7  | N.8  | N.9  | N.10 | N.11 | N.12 |
|                              | 4 | N.13 | N.14 | N.15 | N.16 | N.17 | N.18 |

Buna göre 2 mm, 3 mm ve 4 mm'lik çıkıntı yüksekliklerinden her biri için 0,8 mm'den 1.8 mm'ye kadar 0,2 mm aralıkla 6 farklı çıkıntı uzunluğuna sahip toplamda 18 numune üretilmesi planlanmıştır.

#### 4.2.3 3. Üretim

2. üretim kapsamında belirlenen ölçüler doğrultusunda üretilen numunelerde boyutsal analiz ve ağırlık, hacim ve yoğunluk analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar çerçevesinde çıkıntı bölmesinin hacminin azaltılarak, çıkıntı hacmi ve ağırlığının geometrik sapma üzerindeki etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Şekil 4.6'da belirtilen tasarım ile çıkıntı bölmesinin iç kısmı standart bir cidar kalınlığı belirlenerek boşaltılmış ve destek eklenerek üretimi gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 4.6 3. Üretim numune tasarımı**

3. üretim kapsamında Tablo 4.5'te belirtilen ölçülerde, her birinin kalınlığı 5 mm olacak şekilde 6 adet numune üretilmiştir.

**Tablo 4.5** 3. Üretim için belirlenen numune ölçüleri

| Çıkıntı Uzunluğu-X (mm)      |   | 1,40 | 1,60 | 1,80 |
|------------------------------|---|------|------|------|
| Çıkıntı Yüksekliği<br>Y (mm) | 3 | N.1  | N.2  | N.3  |
|                              | 4 | N.4  | N5   | N.6  |

Buna göre 3 mm ve 4 mm'lik çıkıntı yükseklikleri için 1,4 mm, 1,6 mm ve 1.8 mm çıkıntı uzunluğuna sahip 6 numune üretilmiştir. Numunede belirlenen çıkıntılarda belirlenen boşluklar ve boşluk içerisinde üretimi yapılan destek yapısı için Tablo 4.6'da belirtilen ölçüler kullanılmıştır.

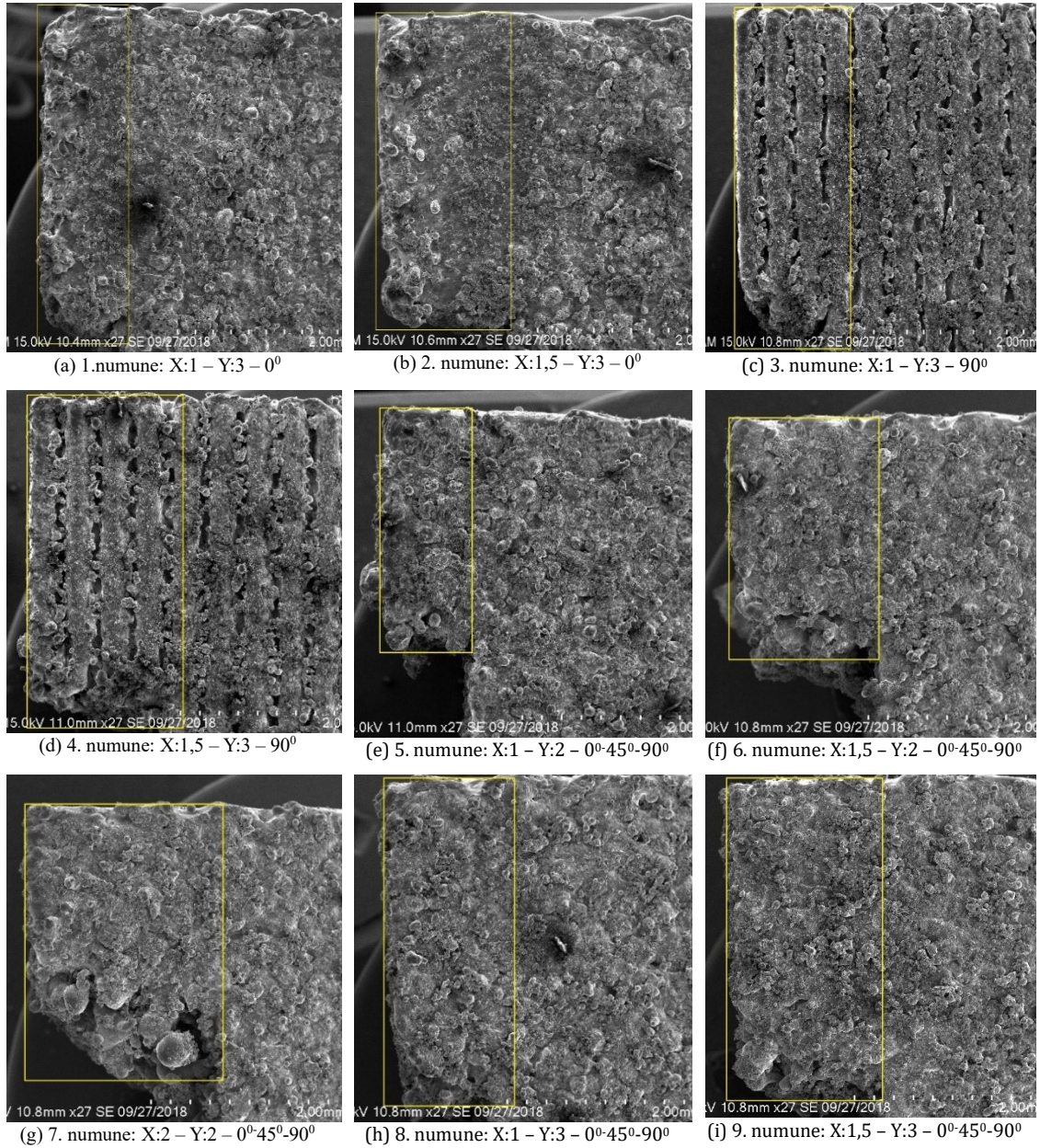
**Tablo 4.6** Çıkıntı içerisindeki boşluk ölçüleri ve hacmi

| No | Çıkıntı Hacmi (cm <sup>3</sup> ) | Boşluk Yüksekliği (mm) | Boşluk Genişliği (mm) | Boşluk Derinliği (mm) | Boşluk Hacmi (cm <sup>3</sup> ) | Destek Hacmi (cm <sup>3</sup> ) | Nihai Boşluk Hacmi (cm <sup>3</sup> ) |
|----|----------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| 1  | 0,021                            | 2                      | 4                     | 1,4                   | 0,0112                          | 0,0028                          | 0,0084                                |
| 2  | 0,024                            | 2                      | 4                     | 1,6                   | 0,0128                          | 0,0032                          | 0,0096                                |
| 3  | 0,027                            | 2                      | 4                     | 1,8                   | 0,0144                          | 0,0036                          | 0,0108                                |
| 4  | 0,028                            | 3                      | 4                     | 1,4                   | 0,0168                          | 0,0056                          | 0,0112                                |
| 5  | 0,032                            | 3                      | 4                     | 1,6                   | 0,0192                          | 0,0064                          | 0,0128                                |
| 6  | 0,036                            | 3                      | 4                     | 1,8                   | 0,0216                          | 0,0072                          | 0,0144                                |

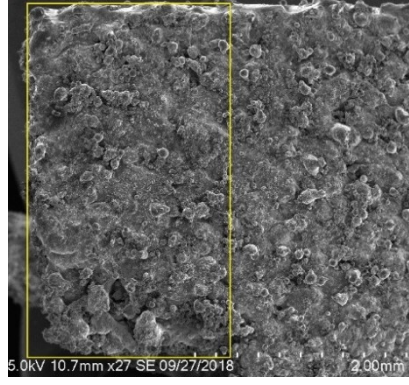
Numunenin çıkıntı bölümünde 1 mm duvar kalınlığı bırakılıp içerisi tamamen boşaltılmıştır. Oluşturulan boşluğa destek yapısı da eklenerek çıkıntı hacminin %40'ı kadar boşluk elde edilmiştir. Aynı oranında boşluk elde edilerek numune üretilmiştir. Bu sayede numune üzerinde bulunan çıkıntı bölmesinin hacim ve ağırlığının azaltılması ile geometrik sapma miktarında değişim gözlemlenmiştir.

### 5.1 1. Üretim Sonuçları

Üretilen numuneler herhangi ilave işleme tabi tutulmaksızın taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleri alınmıştır. Elde edilen görüntüler Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de yer almakta olup, çıkıntı boyutları ve tarama yönleri her görüntünün altında belirtilmiştir.



Şekil 5.1 1. Üretimdeki numunelerin sem görüntüleri



(j) 10. numune: X:2 – Y:3 – 0°-45°-90°

### Şekil 5.2 1. Üretimdeki numunelerin sem görüntüleri

Elde edilen görüntüler üzerinde sarı ile çerçeve içine alınmış olan çıkıntı bölümündeki çıkıntı uzunluğu ve yüksekliği ImageJ yazılımı ile ölçülmüştür. Çıkıntı yüksekliği Y', çıkıntı uzunluğu X' olarak kabul edilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları Tablo 5.1'de verilmiştir.

**Tablo 5.1** 1. Üretim ölçüm sonuçları

| Numune No | Tasarım |        |             | Sonuçlar |         |
|-----------|---------|--------|-------------|----------|---------|
|           | X (mm)  | Y (mm) | Tarama Yönü | X' (mm)  | Y' (mm) |
| 1         | 1,00    | 3,00   | 0°          | 0,8800   | 3,3690  |
| 2         | 1,50    | 3,00   | 0°          | 1,3706   | 3,4071  |
| 3         | 1,00    | 3,00   | 90°         | 1,0588   | 3,4509  |
| 4         | 1,50    | 3,00   | 90°         | 1,4471   | 3,4143  |
| 5         | 1,00    | 2,00   | 0°-45°-90°  | 0,9411   | 2,5047  |
| 6         | 1,50    | 2,00   | 0°-45°-90°  | 1,5401   | 2,4531  |
| 7         | 2,00    | 2,00   | 0°-45°-90°  | 1,9467   | 2,7809  |
| 8         | 1,00    | 3,00   | 0°-45°-90°  | 1,0530   | 3,3510  |
| 9         | 1,50    | 3,00   | 0°-45°-90°  | 1,5300   | 3,4250  |
| 10        | 2,00    | 3,00   | 0°-45°-90°  | 1,9770   | 3,4090  |

Tabloda belirtilen X' çıkıntı uzunluğunun, Y' ise çıkıntı yüksekliğinin ölçüm sonuçlarından elde edilen değerleridir. Tasarım ile elde edilen sonuçlar arasındaki fark ise üretim neticesinde elde edilen boyutsal fark olarak Tablo 5.2'de belirtilmiştir.

**Tablo 5.2** Çıkıntı kısmında ortaya çıkan boyutsal fark

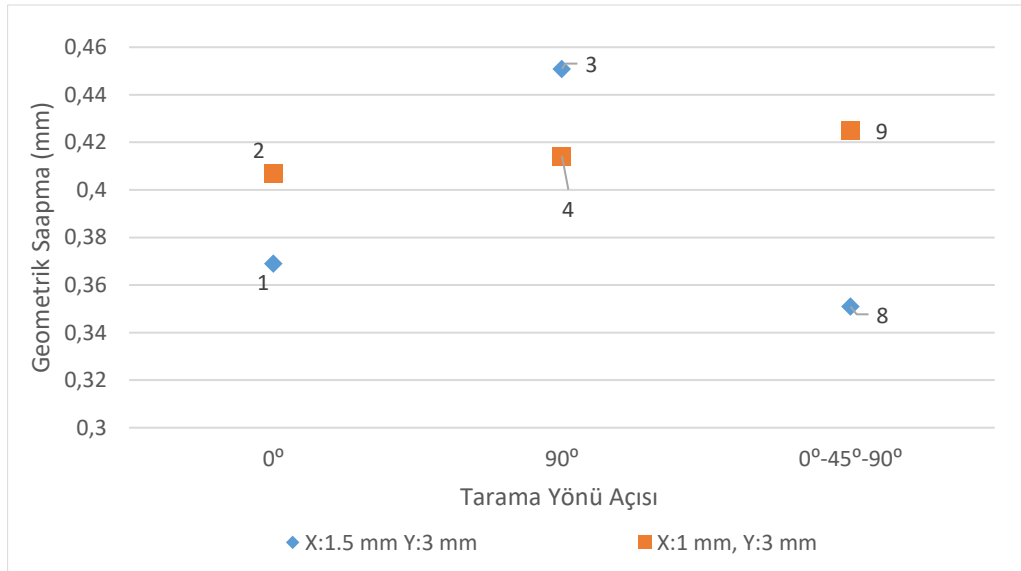
| Numune No | Boyutsal fark |             |
|-----------|---------------|-------------|
|           | X' - X (mm)   | Y' - Y (mm) |
| 1         | -0,1200       | 0,3690      |
| 2         | -0,1294       | 0,4071      |
| 3         | 0,0588        | 0,4509      |
| 4         | -0,0529       | 0,4143      |
| 5         | -0,0589       | 0,5047      |
| 6         | 0,0410        | 0,4531      |
| 7         | -0,0533       | 0,7809      |
| 8         | 0,0530        | 0,3510      |
| 9         | 0,0300        | 0,4250      |
| 10        | -0,0230       | 0,4090      |

Tablo 5.2'de belirtilen X'-X farkı bütün numunelerde çok düşük oranlarda kalmıştır. Tasarım ölçüsü olarak belirlenen 1 mm, 1,5 mm ve 2 mm'lik çıkıntı uzunlukları hemen hemen istenilen ölçülerde üretilmiştir. Diğer yandan Y'-Y farkı üretim sonrası ortaya çıkan boyutsal fark geometrik sapma olup, çıkıntı uzunluğu, yüksekliği ve tarama yönü çerçevesinde incelemek adına Tablo 5.3'te gösterildiği gibi 3 farklı grup oluşturulmuştur. 1. grupta aynı çıkıntı uzunluğu ve yüksekliğine sahip iki farklı numune grubu ile geometrik sapma üzerindeki tarama yönünün etkisi incelenmiştir. 2. grupta aynı çıkıntı yüksekliği ve tarama yönüne sahip parçalardaki çıkıntı uzunluğunun geometrik sapma üzerindeki etkisi incelenmiştir. 3. grupta ise aynı çıkıntı uzunluğu ve tarama yönüne sahip numunelerdeki çıkıntı yüksekliğinin geometrik sapma üzerindeki etkisi incelenmiştir.

**Tablo 5.3** Boyutsal değişimleri incelemek için numunelerin sınıflandırılması

|                |                                        |
|----------------|----------------------------------------|
| <b>1. grup</b> | Tarama yönü ve çıkıntı uzunluğu etkisi |
| <b>2. grup</b> | Çıkıntı uzunluğu etkisi                |
| <b>3. grup</b> | Çıkıntı yüksekliği etkisi              |

**1. grup** altında tarama yönü ve çıkıntı uzunluğunun geometrik sapma üzerindeki etkisi incelenmiş olup, ölçüm sonuçları Şekil 5.3'te verilmiştir. Buna göre çıkıntı uzunluğu 1 mm olan 2, 4 ve 9. numunelerde 0.41 mm ile 0,43 mm arasında geometrik sapma meydana gelmiştir. Çıkıntı uzunluğu 1,5 mm olan 1., 3. ve 8. numunelerde ise geometrik sapma tarama yönüne göre belirgin bir farklılık göstermiş olup; 0° tarama yönüne sahip 1. numunede 0,37 mm, 90° tarama yönüne sahip 3. numunede 0,45 mm, 0°-45°-90° tarama yönüne sahip 8. numunede ise 0,35 mm'lik geometrik sapma meydana gelmiştir. Dolayısıyla çıkıntı uzunluğu 1 mm olan numunelerde tarama yönünün geometrik sapmaya üzerinde etkisinin olmadığı, çıkıntı uzunluğu 1,5 mm olan numunelerde ise tarama yönünün geometrik sapmaya belirgin bir şekilde etki ettiği ortaya çıkmıştır.

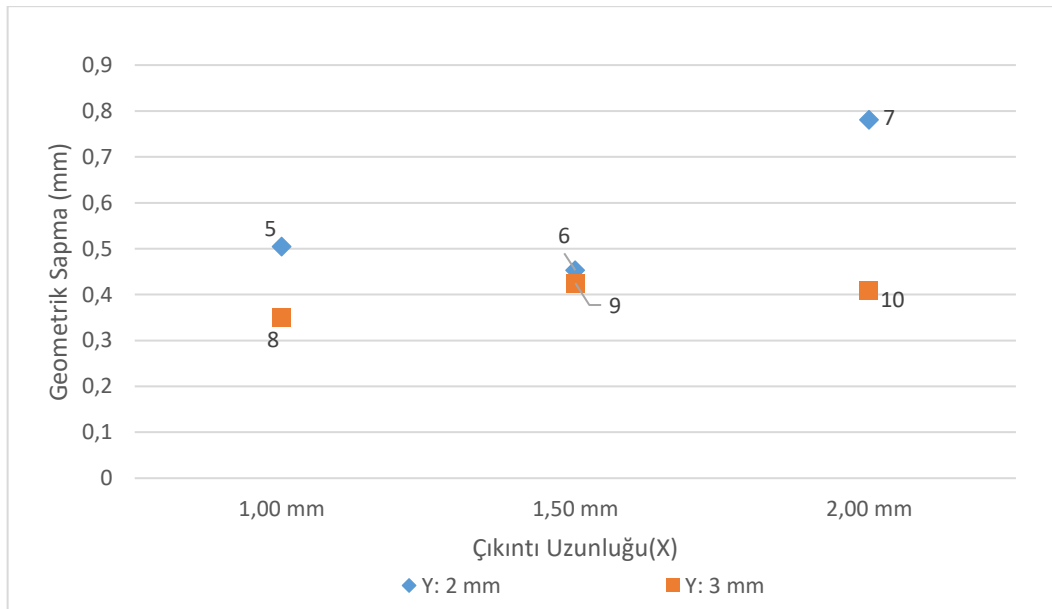


**Şekil 5.3** Tarama yönü etkisi

Çıkıntı uzunluğu 1,5 mm olan numunelerden 0°-45°-90° tarama yönüne sahip 8. numune ile 0° derece tarama yönüne sahip 1. numunede, 90° tarama yönüne sahip

3. numuneye göre daha düşük geometrik sapma meydana gelmiştir. Buna paralel olarak EOS firması tarafından tarama açısı  $0^{\circ}$ - $45^{\circ}$ - $90^{\circ}$  olarak üretim yapılması önerilmektedir [39]. Diğer yandan  $0^{\circ}$ - $45^{\circ}$ - $90^{\circ}$  tarama açısı mekanik özellikler ve mikro yapı açısından daha olumlu neticeler ortaya çıkarmaktadır [40] [54]. Aynı zamanda sadece  $0^{\circ}$  veya sadece  $90^{\circ}$  gibi tek yönlü tarama stratejilerinin uygulanması ısı kalıntı gerilmeleri artırarak parçada bozulmalara sebep olabilmektedir [3]. Elde edilen veriler ışığında, çalışmanın devamında  $0^{\circ}$ - $45^{\circ}$ - $90^{\circ}$  tarama açısı ile devam edilmiştir.

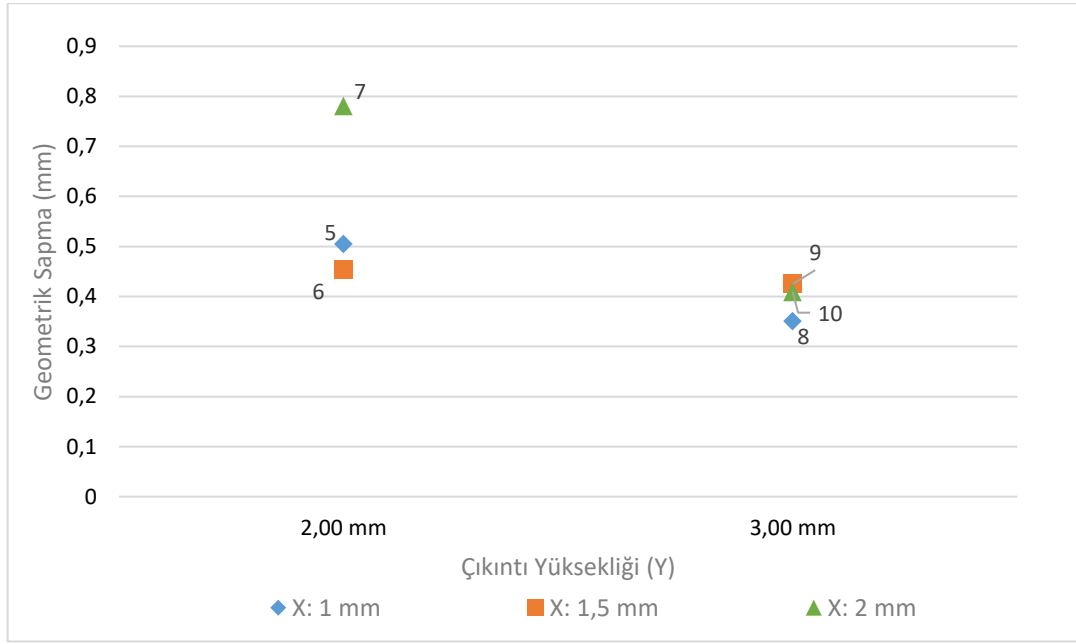
**2. grup** altında sabit çıkıntı yüksekliğindeki (Y) numunelerde, değişen çıkıntı uzunluğuna (X) bağlı geometrik sapma incelenmiş olup, ölçüm sonuçları Şekil 5.4’de verilmiştir. Çıkıntı yüksekliği 2 mm olan 5, 6 ve 7. numunelerden çıkıntı uzunluğu 1 mm olan 5. ve 1,5 mm olan 6. numunede meydana gelen geometrik sapma yaklaşık 0,5 mm’dır. Çıkıntı uzunluğu 2 mm olan 7. numunede ise geometrik sapma 0,8 mm olmuştur. Diğer yandan çıkıntı yüksekliği 3 mm olan 8, 9, ve 10. numunelerde ise geometrik sapma birbirine yakın ve yaklaşık 0,4 mm olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre 3 mm çıkıntı yüksekliğine sahip numunelerde daha düşük miktarda geometrik sapma meydana gelmiştir.



**Şekil 5.4** Çıkıntı uzunluğunun geometrik sapma üzerindeki etkisi

**3. grup** altında sabit çıkıntı uzunluğundaki (X) numunelerde, değişen çıkıntı yüksekliğine (Y) bağlı geometrik sapma incelenmiş olup, ölçüm sonuçları Şekil 5.5’te

verilmiştir. Çıkıntı uzunluğu 1 mm olan 5 ve 8. numunelerde sırasıyla 0,5 ve 0,35 mm geometrik sapma meydana gelmiştir. Çıkıntı uzunluğu 1,5 mm olan 6 ve 9. numunelerde geometrik sapma sırasıyla 0,45 ve 0,42 mm olmuştur. Çıkıntı uzunluğu 2 mm olan 7 ve 10. numunelerde meydana gelen geometrik sapma ise sırasıyla 0,8 ve 0,4 mm olmuştur. Elde edilen sonuçlara göre çıkıntı yüksekliği 3 mm olan numunelerde, çıkıntı yüksekliği 2 mm olan numunelere göre daha düşük miktarda geometrik sapma meydana gelmiştir.

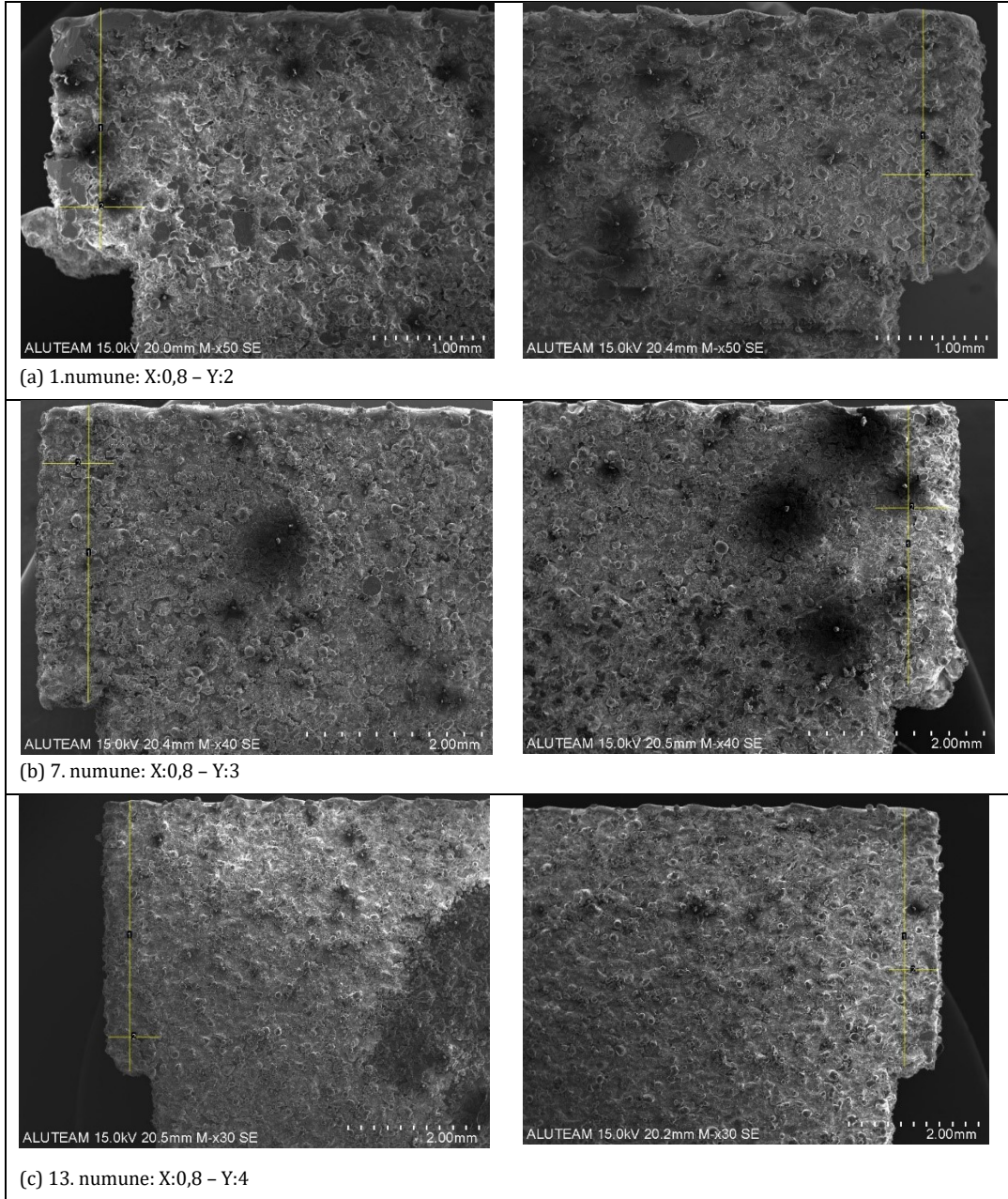


**Şekil 5.5** Çıkıntı yüksekliğinin geometrik sapma üzerindeki etkisi

Şekil 5.4'te gösterilen sonuçlara göre çıkıntı uzunluğu arttıkça geometrik sapmanın arttığı, Şekil 5.5'teki sonuçlara göre ise çıkıntı yüksekliği arttığında geometrik sapmanın azaldığı anlaşılmaktadır. 1. üretimde ortaya çıkan bu sonuçlar teyit etmek amacıyla farklı çıkıntı uzunlukları ve yükseklikleri belirlenerek daha geniş bir numune seti üretimi ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

## 5.2 2. Üretim Sonuçları

2. numune üretiminde makine parametreleri olarak 1. üretim için de kullanılan, Tablo 4.2’te belirtilen makine parametreleri kullanılmıştır. 18 adet numune üretimi gerçekleştirildikten sonra taramalı elektron mikroskobu ile her iki yüzeyi üzerinden görüntüler alınmıştır. Numunelerin tamamına ait görüntüler ek A’da belirtilmiş olup, örnek teşkil etmesi adına bazı görüntüler Şekil 5.6’da verilmiştir.



**Şekil 5.6** 2. Üretime ait numunelerin SEM görüntüleri

SEM görüntüleri üzerinden ImageJ programı yardımı ile çıkıntı boyutları alınmıştır. SEM görüntüleri ölçüm sonuçlarının doğruluğunun artırılması amacıyla numunelerin her iki yüzeyinden görüntü alınmış ve ImageJ ile ölçümü yapılmıştır. Çıkıntının ön tarafından alınan sonuçlar  $X'_{\text{ön}}$ ,  $Y'_{\text{ön}}$ ; arka tarafından alınan ölçümler ise  $X'_{\text{arka}}$ ,  $Y'_{\text{arka}}$  olarak belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.4'te gösterilmiştir.

**Tablo 5.4 2. Üretim ölçüm sonuçları**

|        | Tasarım   | Ölçüm Sonucu             |                            | Tasarım   | Ölçüm Sonucu             |                            |
|--------|-----------|--------------------------|----------------------------|-----------|--------------------------|----------------------------|
| Numune | X<br>(mm) | $X'_{\text{ön}}$<br>(mm) | $X'_{\text{arka}}$<br>(mm) | Y<br>(mm) | $Y'_{\text{ön}}$<br>(mm) | $Y'_{\text{arka}}$<br>(mm) |
| 1      | 0,8       | 0,762                    | 0,827                      | 2         | 2,176                    | 2,304                      |
| 2      | 1         | 1,014                    | 1                          | 2         | 2,61                     | 2,172                      |
| 3      | 1,2       | 1,275                    | 1,129                      | 2         | 2,556                    | 2,324                      |
| 4      | 1,4       | 1,392                    | 1,441                      | 2         | 2,178                    | 2,096                      |
| 5      | 1,6       | 1,575                    | 1,524                      | 2         | 2,246                    | 2,392                      |
| 6      | 1,8       | 1,762                    | 1,757                      | 2         | 2,405                    | 2,285                      |
| 7      | 0,8       | 0,809                    | 0,841                      | 3         | 3,391                    | 3,18                       |
| 8      | 1         | 0,986                    | 0,973                      | 3         | 3,412                    | 3,155                      |
| 9      | 1,2       | 1,14                     | 1,155                      | 3         | 3,414                    | 3,389                      |
| 10     | 1,4       | 1,417                    | 1,405                      | 3         | 3,092                    | 3,243                      |
| 11     | 1,6       | 1,568                    | 1,499                      | 3         | 3,506                    | 3,264                      |
| 12     | 1,8       | 1,76                     | 1,701                      | 3         | 3,566                    | 3,441                      |
| 13     | 0,8       | 0,775                    | 0,735                      | 4         | 4,129                    | 4,003                      |
| 14     | 1         | 0,925                    | 1,018                      | 4         | 4,212                    | 4,126                      |
| 15     | 1,2       | 1,068                    | 1,156                      | 4         | 4,494                    | 4,054                      |
| 16     | 1,4       | 1,342                    | 1,327                      | 4         | 4,414                    | 4,082                      |

**Tablo 5.4 2. Üretim ölçüm sonuçları (devamı)**

|           |     |       |       |   |       |       |
|-----------|-----|-------|-------|---|-------|-------|
| <b>17</b> | 1,6 | 1,588 | 1,499 | 4 | 4,525 | 4,117 |
| <b>18</b> | 1,8 | 1,748 | 1,707 | 4 | 4,333 | 4,23  |

Ölçüm sonuçlarına göre çıkıntı uzunluğu ve yüksekliğinde meydana gelen boyutsal fark Tablo 5.5'te gösterilmiştir.  $X-X'_{\text{ön}}$  ve  $X-X'_{\text{arka}}$  çıkıntı uzunluğunda meydana gelen boyutsal farkı gösterirken,  $Y-Y'_{\text{ön}}$  ve  $Y-Y'_{\text{arka}}$  ölçüleri de çıkıntı yüksekliğinde meydana gelen boyutsal farkı yani numunede askıda kalan çıkıntı bölümünde meydana gelen Geometrik Sapma miktarını belirtmektedir. Çıkıntı uzunluğunun ve yüksekliğinin geometrik sapma miktarında meydana getirdiği etkinin incelenmesinde, numunenin ön ve arka yüzeylerinden alınan ölçümlerin ortalaması alınmış olup,  $X'_{\text{ort}}$  ve  $Y'_{\text{ort}}$  olarak gösterilmiştir.

**Tablo 5.5 Çıkıntıda meydana gelen boyutsal fark**

| Numune no | Çıkıntı Uzunluğu           |                              |                           | Çıkıntı Yüksekliği         |                              |                           |
|-----------|----------------------------|------------------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------------|
|           | $X-X'_{\text{ön}}$<br>(mm) | $X-X'_{\text{arka}}$<br>(mm) | $X'_{\text{ort}}$<br>(mm) | $Y-Y'_{\text{ön}}$<br>(mm) | $Y-Y'_{\text{arka}}$<br>(mm) | $Y'_{\text{ort}}$<br>(mm) |
| <b>1</b>  | 0,038                      | -0,027                       | <b>0,006</b>              | 0,176                      | 0,304                        | <b>0,2400</b>             |
| <b>2</b>  | -0,014                     | 0,000                        | <b>-0,007</b>             | 0,610                      | 0,172                        | <b>0,3910</b>             |
| <b>3</b>  | -0,075                     | 0,071                        | <b>-0,002</b>             | 0,556                      | 0,324                        | <b>0,4400</b>             |
| <b>4</b>  | 0,008                      | -0,041                       | <b>-0,017</b>             | 0,178                      | 0,096                        | <b>0,1370</b>             |
| <b>5</b>  | 0,025                      | 0,076                        | <b>0,051</b>              | 0,246                      | 0,392                        | <b>0,3190</b>             |
| <b>6</b>  | 0,038                      | 0,043                        | <b>0,041</b>              | 0,405                      | 0,285                        | <b>0,3450</b>             |
| <b>7</b>  | -0,009                     | -0,041                       | <b>-0,025</b>             | 0,391                      | 0,180                        | <b>0,2855</b>             |
| <b>8</b>  | 0,014                      | 0,027                        | <b>0,021</b>              | 0,412                      | 0,155                        | <b>0,2835</b>             |
| <b>9</b>  | 0,060                      | 0,045                        | <b>0,053</b>              | 0,414                      | 0,389                        | <b>0,4015</b>             |
| <b>10</b> | -0,017                     | -0,005                       | <b>-0,011</b>             | 0,092                      | 0,243                        | <b>0,1675</b>             |
| <b>11</b> | 0,032                      | 0,101                        | <b>0,067</b>              | 0,506                      | 0,264                        | <b>0,3850</b>             |

**Tablo 5.5** Çıkıntıda meydana gelen boyutsal fark (devamı)

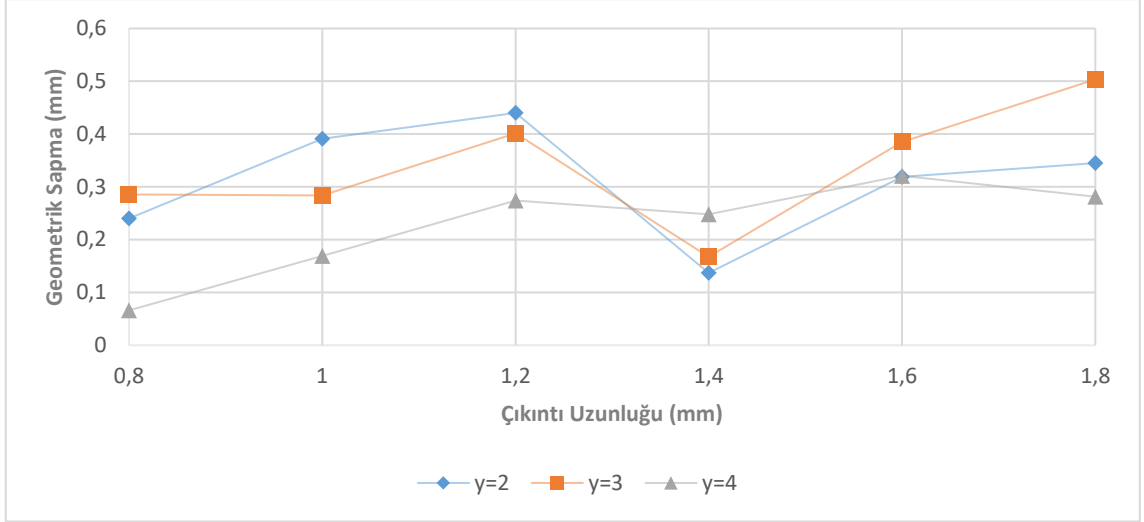
|           |       |        |              |       |       |               |
|-----------|-------|--------|--------------|-------|-------|---------------|
| <b>12</b> | 0,040 | 0,099  | <b>0,070</b> | 0,566 | 0,441 | <b>0,5035</b> |
| <b>13</b> | 0,025 | 0,065  | <b>0,045</b> | 0,129 | 0,003 | <b>0,0660</b> |
| <b>14</b> | 0,075 | -0,018 | <b>0,029</b> | 0,212 | 0,126 | <b>0,1690</b> |
| <b>15</b> | 0,132 | 0,044  | <b>0,088</b> | 0,494 | 0,054 | <b>0,2740</b> |
| <b>16</b> | 0,058 | 0,073  | <b>0,065</b> | 0,414 | 0,082 | <b>0,2480</b> |
| <b>17</b> | 0,012 | 0,101  | <b>0,057</b> | 0,525 | 0,117 | <b>0,3210</b> |
| <b>18</b> | 0,052 | 0,093  | <b>0,073</b> | 0,333 | 0,230 | <b>0,2815</b> |

Ölçüm sonuçları doğrultusunda üretim sonrasında ortaya çıkan geometrik sapmayı; çıkıntı uzunluğu ve yüksekliği çerçevesinde incelemek adına Tablo 5.6'da gösterildiği gibi 2 farklı grup oluşturulmuştur. 1. grupta aynı çıkıntı yüksekliğine sahip numunelerde çıkıntı uzunluğunun geometrik sapma üzerindeki etkisi incelenmiştir. 2. grupta ise aynı çıkıntı uzunluğuna sahip numunelerde çıkıntı yüksekliğinin geometrik sapma üzerindeki etkisi incelenmiştir.

**Tablo 5.6** Boyutsal değişimleri incelemek için numunelerin sınıflandırılması

|                |                                                       |
|----------------|-------------------------------------------------------|
| <b>1. Grup</b> | Geometrik sapmanın çıkıntı uzunluğuna göre değişimi   |
| <b>2. Grup</b> | Geometrik sapmanın çıkıntı yüksekliğine göre değişimi |

**1. grup** altında geometrik sapmanın çıkıntı uzunluğuna göre değişimi incelenmiş olup, ölçüm sonuçları Şekil 5.7'de belirtilmiştir. Numunelerin çıkıntı yüksekliği sırasıyla 2 mm, 3 mm ve 4 mm olup, sabittir. Çıkıntı uzunlukları ise sırasıyla 0,8 mm, 1 mm, 1,2 mm, 1,4 mm, 1,6 mm ve 1,8 mm olarak üretilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre çıkıntı uzunluğu arttıkça geometrik sapma miktarı ve dolayısıyla deformasyonun da arttığı sonucuna varılmıştır [12].

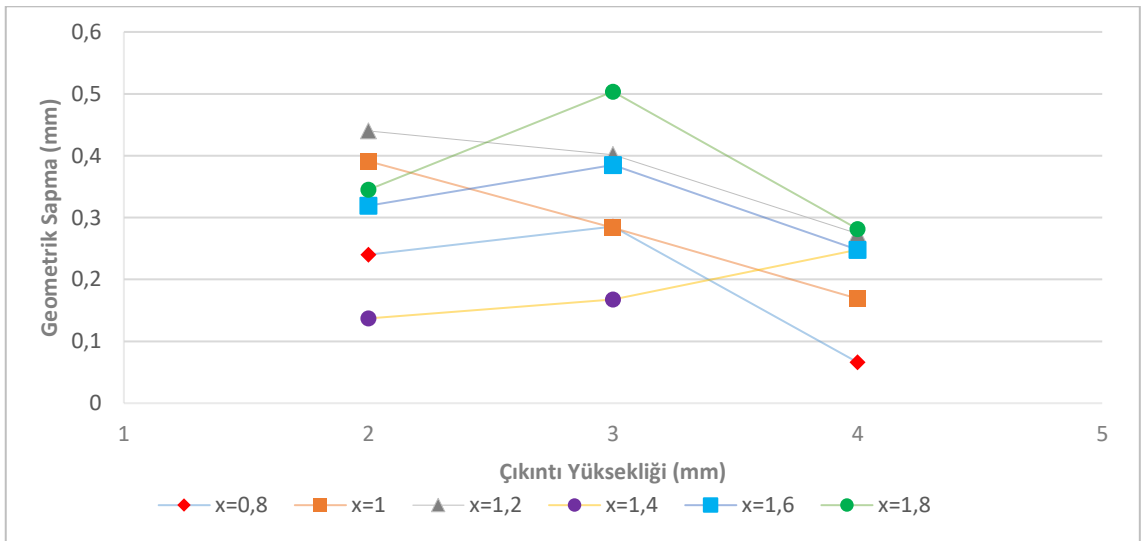


**Şekil 5.7** Çıkıntı uzunluğunun geometrik sapmaya etkisi

**2. grup** altında geometrik sapmanın çıkıntı yüksekliğine göre değişimi incelenmiş olup, ölçüm sonuçları

Şekil 5.8'de verilmiştir. 2. grupta numunelerin çıkıntı uzunluğu sırasıyla 0,8 mm, 1 mm, 1,2 mm, 1,4 mm, 1,6 mm ve 1,8 mm olup, sabittir. Çıkıntı yükseklikleri ise sırasıyla 2 mm, 3 mm ve 4 mm'dir. Buna göre çıkıntı uzunluğu  $x=sbt$  iken çıkıntı yüksekliğindeki değişime göre ortaya çıkan geometrik sapma miktarı

Şekil 5.8'de belirtilmiştir. Çıkıntı yüksekliği arttıkça, çıkıntının alt yüzeyi ile tabla arasında mesafe azalmaktadır. Bu durum çıkıntı yüksekliği arttıkça ortaya çıkan geometrik sapmanın miktarını azaltmıştır.



**Şekil 5.8** Çıkıntı yüksekliğinin geometrik sapmaya etkisi

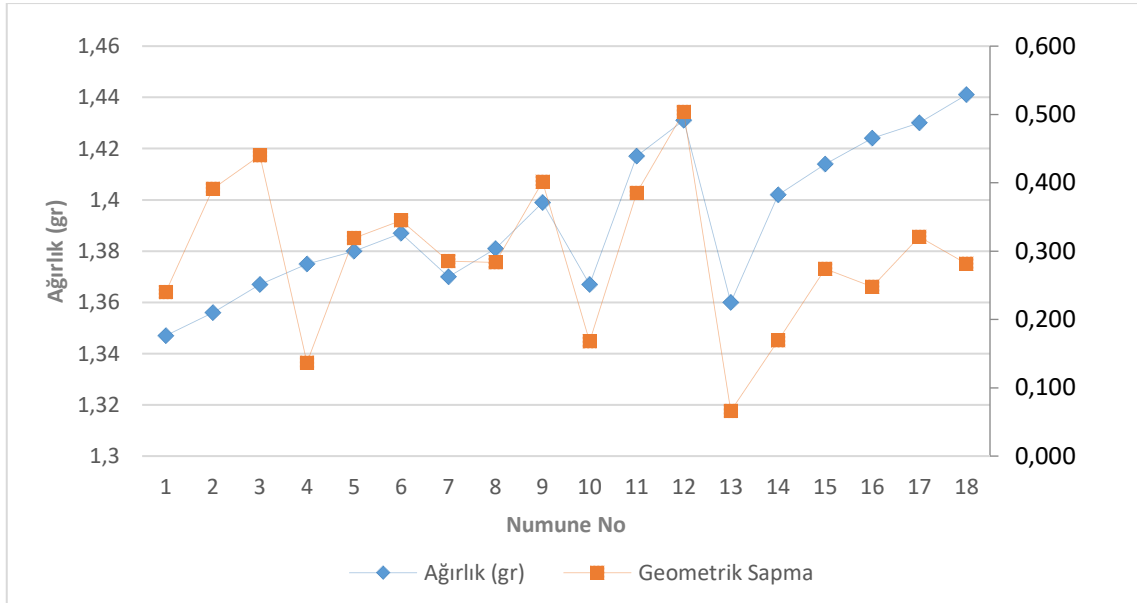
### 5.2.1 Ağırlık Ölçümü Sonuçları

Numunelerin ağırlık ölçümü hassas terazi ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre elde edilen numune ağırlıkları Tablo 5.7’de gösterilmiştir.

**Tablo 5.7 2. Üretime ait numunelerin ağırlık ölçümü**

| Numune No    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ağırlık (gr) | 1,347 | 1,356 | 1,367 | 1,375 | 1,38  | 1,387 | 1,37  | 1,381 | 1,399 |
| Numune No    | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    |
| Ağırlık (gr) | 1,367 | 1,417 | 1,431 | 1,36  | 1,402 | 1,414 | 1,424 | 1,43  | 1,441 |

Numunelerin ağırlıklarındaki farklılık öncelikle geometrik tasarımlarındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Buna ilave olarak toz destekli üretilen çıkıntı bölgesinde meydana gelen geometrik sapma da bu farklılığa etki etmektedir. Nitekim Şekil 5.9’da da görülen ağırlık ve geometrik sapma değerleri arasında korelasyon incelenmiştir.



**Şekil 5.9 Ağırlık ile geometrik sapma miktarının karşılaştırılması**

Buna göre korelasyon değerleri çıkıntı yüksekliği 2 mm olan 1-6. numunede 0,01 çıkıntı yüksekliği 3 mm olan 7-12. numunelerde 0,92 ve çıkıntı yüksekliği 4 mm olan 13-18. numunelerde 0,94 olarak hesaplanmıştır. İlk 6 numunede ortaya çıkan düşük korelasyon değeri, 4. numunede beklenmedik şekilde meydana gelen düşük

geometrik sapmadır. Buna rağmen diğer numunelerdeki geometrik sapma ve ağırlık arasında yüksek korelasyon tespit edildiğinden, ağırlık ile geometrik sapma arasında doğrusal bir ilişki olduğu değerlendirilmektedir.

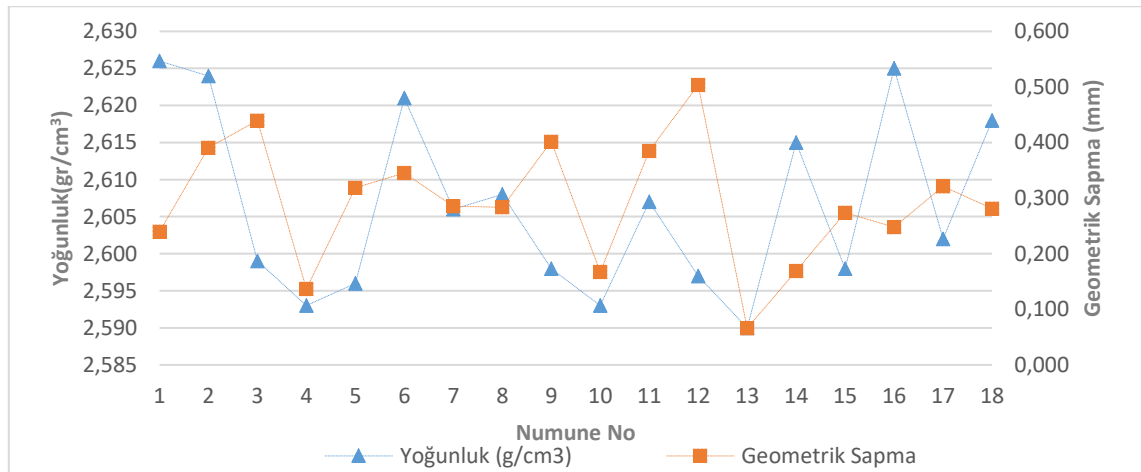
### 5.2.2 Yoğunluk Ölçümü Sonuçları

Arşimet prensibine dayalı yoğunluk ölçümü gerçekleştirilmiştir. Buna göre numunelerin elde edilen yoğunluk değerleri Tablo 5.8’de verilmiştir.

**Tablo 5.8 2. Üretime ait numunelerin yoğunluk ölçümü**

| Numune No                      | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> ) | 2,626 | 2,624 | 2,599 | 2,593 | 2,596 | 2,621 | 2,606 | 2,608 | 2,598 |
| Numune No                      | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    |
| Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> ) | 2,593 | 2,607 | 2,597 | 2,59  | 2,615 | 2,598 | 2,625 | 2,602 | 2,618 |

Aynı malzeme ve üretim koşulları altında üretilen numunelerin yoğunluklarında meydana gelen değişim, üretim esnasında sahip oldukları tek farklılık olan destek olmadan üretilen çıkıntı bölümünden ve bu noktada meydana gelen geometrik sapmadan kaynaklanmaktadır. Numunelerde meydana gelen geometrik sapma ile elde edilen yoğunluk değerlerinin karşılaştırması Şekil 5.10’da gösterilmiştir.



**Şekil 5.10 Yoğunluk ile geometrik sapma değerlerinin karşılaştırılması**

Numunelerde meydana gelen geometrik sapma ve yoğunluk değerleri arasındaki korelasyon incelenmiştir. Buna göre korelasyon değerleri, çıkıntı yüksekliği 2 mm olan 1-6. numunelerde 0,21, çıkıntı yüksekliği 3 mm olan 7-12. numunelerde 0,04 ve çıkıntı yüksekliği 4 mm olan 13-18. numunelerde 0,37 olarak hesaplanmıştır. Yoğunluk değerleri ile geometrik sapma miktarı arasında yüksek bir korelasyon görülemediğinden porozite miktarının belirlenmesine karar verilmiştir. Elde edilen yoğunluk ve ağırlık değerlerinden numunelerin hacimleri, sonrasında da numunelerdeki porozite miktarı hesaplanmıştır.

### 5.2.3 Hacim Ölçümü Sonuçları

Numunelerin CAD tasarımlarına göre sahip oldukları teorik hacim ile laboratuvar ortamında ölçülen yoğunlukları ve ağırlık değerlerinden gerçek hacimleri tespit edilmiş olup, Tablo 5.9'da belirtilmiştir.

$V_T = \text{Teorik Hacim}$  : CAD-data üzerinden belirlenen hacim

$$V_G = \frac{m_N}{d_N} \quad (5.1)$$

$V_G = \text{Gerçek Hacim}$  : Ağırlık ve yoğunluk değeri ile hesaplanan hacim

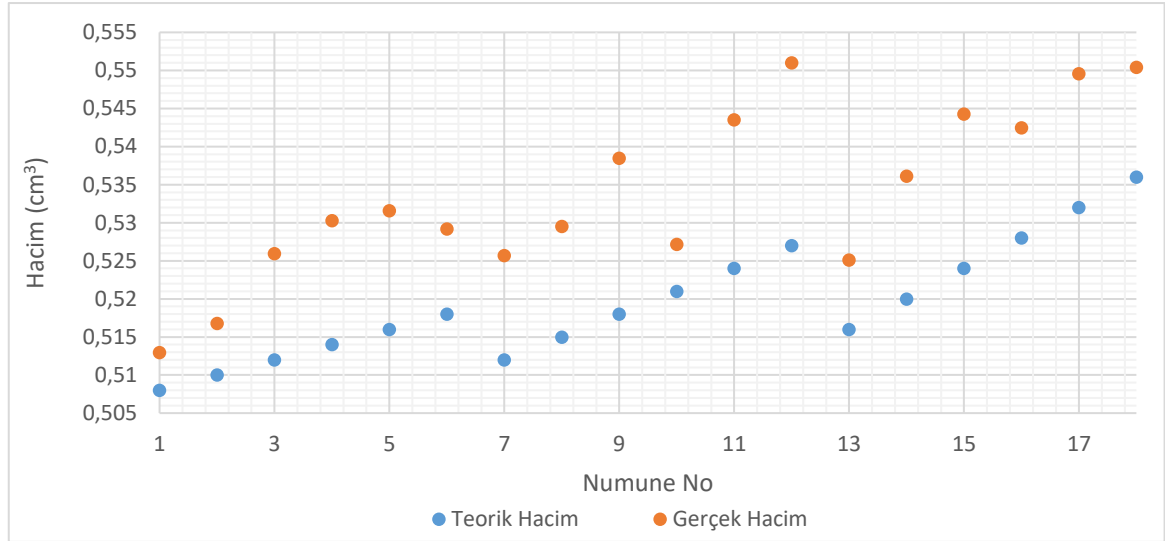
$m_N = \text{Numune Ağırlığı}$

$d_N = \text{Numune Yoğunluğu}$

**Tablo 5.9** Numunelere ait teorik ve gerçek hacim değerleri

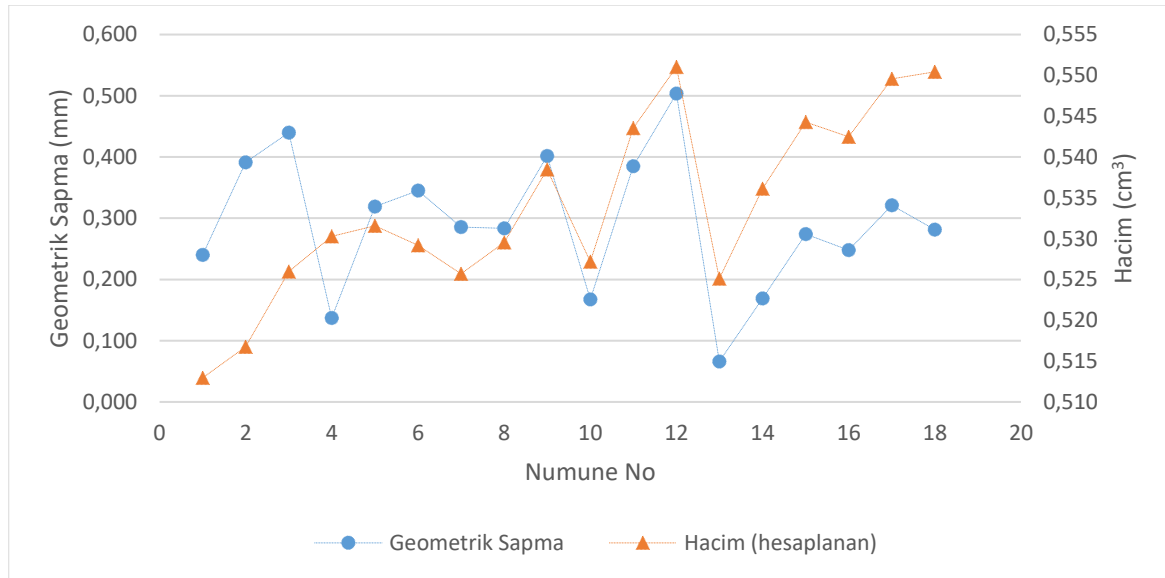
| Numune No                       | 1      | 2      | 3     | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      |
|---------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Teorik Hacim (cm <sup>3</sup> ) | 0,508  | 0,51   | 0,512 | 0,514  | 0,516  | 0,518  | 0,512  | 0,515  | 0,518  |
| Gerçek Hacim (cm <sup>3</sup> ) | 0,5129 | 0,5168 | 0,526 | 0,5303 | 0,5316 | 0,5292 | 0,5257 | 0,5295 | 0,5385 |
| Numune No                       | 10     | 11     | 12    | 13     | 14     | 15     | 16     | 17     | 18     |
| Teorik Hacim (cm <sup>3</sup> ) | 0,521  | 0,524  | 0,527 | 0,516  | 0,52   | 0,524  | 0,528  | 0,532  | 0,536  |
| Gerçek Hacim (cm <sup>3</sup> ) | 0,5272 | 0,5435 | 0,551 | 0,5251 | 0,5361 | 0,5443 | 0,5425 | 0,5496 | 0,5504 |

Numunelerin hesaplanan gerçek hacmi ile CAD-data ölçüleri üzerinden belirlenen hacim arasında Şekil 5.11’de gösterildiği gibi oluşan fark, üretim sonrası numune boyutlarında meydana gelen geometrik sapmalar nedeniyle oluşmaktadır.



**Şekil 5.11** Numunelerin teorik hacim ile gerçek hacim arasındaki fark

Şekil 5.12’deki grafikte gösterildiği gibi numune üzerinde meydana gelen geometrik sapma ile hesaplanan hacimler karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar geometrik sapma miktarları ile hacim değerlerinin uyumlu olduğunu göstermektedir.



**Şekil 5.12** Geometrik sapma ile gerçek hacim arasındaki ilişki

Numunelerde meydana gelen geometrik sapma ve hacim değerleri arasındaki korelasyon incelenmiştir. Buna göre korelasyon değerleri, çıkıntı yüksekliği 2 mm

olan 1-6. numunelerde 0,1, çıkıntı yüksekliği 3 mm olan 7-12. numunelerde 0,91 ve çıkıntı yüksekliği 4 mm olan 13-18. numunelerde 0,98 olarak hesaplanmıştır. Geometrik sapma ile gerçek hacim arasında uyum yukarıda da bahsedildiği gibi teorik hacim ile gerçek hacim arasında meydana gelen farkın toz destekli üretilen çıkıntıda meydana gelen geometrik sapmadan kaynaklandığı göstermektedir. Diğer yandan numunelerin gerçek hacimleri ile geometrik sapma arasında uyum olması, numunelerin SEM görüntüleri üzerinden alınan ölçümlerin hassasiyetini de göstermektedir.

#### 5.2.4 Porozite Ölçümü Sonuçları

Gerçek ve teorik hacimleri belirlenen numunelerin üretim sonrası oluşan porozite miktarı gerçek hacmin teorik hacme olan oranı belirlenerek elde edilmiştir. Teorik hacim numunelerin CAD-data.üzerinde belirlenen ölçüleri, gerçek hacim ise yoğunluk ve ağırlık ölçümü sonrasında elde edilen hacimdir. Buna göre porozite ölçümü aşağıda gösterildiği şekilde hesaplanmış olup, porozite miktarları Tablo 5.10'da gösterilmiştir.

$$p = \frac{V_T - V_G}{V_T} \% \quad (5.2)$$

$p = \text{Porozite}$

$V_T = \text{Teorik Hacim}$

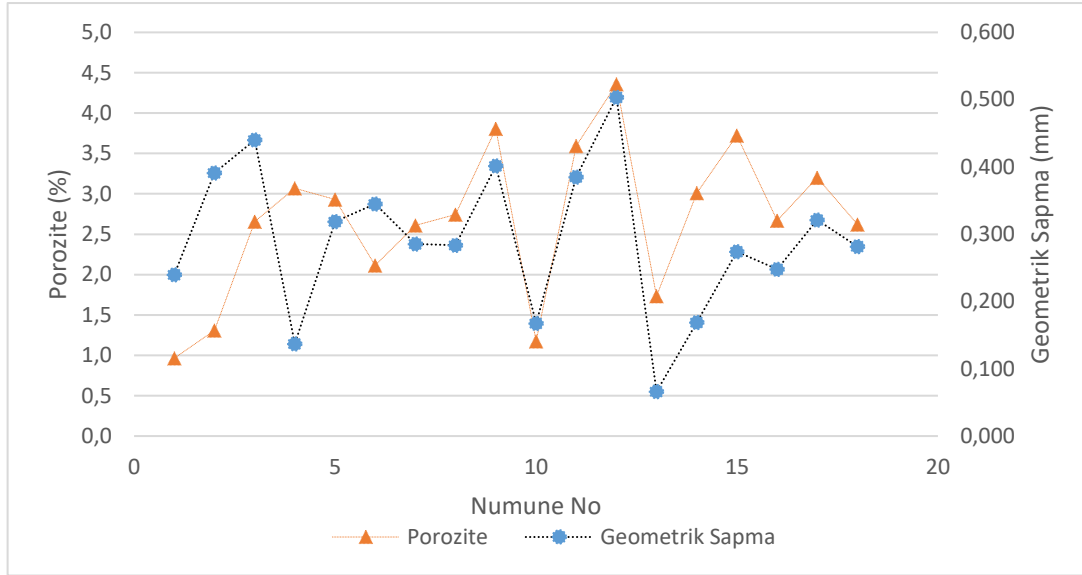
$V_G = \text{Gerçek Hacim}$

**Tablo 5.10** Numunelerdeki porozite miktarı

| Numune No    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Porozite (%) | 0,965 | 1,310 | 2,656 | 3,069 | 2,932 | 2,608 | 2,743 | 3,805 | 0,965 |
| Numune No    | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    |
| Porozite (%) | 1,174 | 3,594 | 4,359 | 1,732 | 3,010 | 2,669 | 3,198 | 2,620 | 1,174 |

Şekil 5.13'teki grafikte de gösterilen porozite değerleri ile geometrik sapma arasındaki korelasyon değerleri hesaplanmıştır. Buna göre korelasyon değerleri,

çıkıntı yüksekliği 2 mm olan 1-6. numunelerde 0,15, çıkıntı yüksekliği 3 mm olan 7-12. numunelerde 0,98 ve çıkıntı yüksekliği 4 mm olan 13-18. numunelerde 0,72 olarak hesaplanmıştır.



**Şekil 5.13** Porozite ile geometrik sapma arasındaki ilişki

Aynı üretim koşulları altında üretilen numunelerin porozite miktarlarının birbirine yakın olması beklenirken, üretilen numunelerdeki çıkıntı bölümündeki geometrik sapmalar numunenin hacminde; dolayısıyla porozite miktarında farklılıklara neden olmuştur.

Destek yapı kullanılmadan gerçekleştirilen çıkıntı yapı üretiminde lazer uygulanması ile tozun absorbe ettiği enerji miktarı çok yüksek olmaktadır. Dolayısıyla daha büyük ergime havuzu oluşmakta ve yer çekimi ve kılcallığın da etkisiyle ısı tesirin etki alanı genişlemektedir. Bu durum arzu edilenden daha fazla bölgenin ısı tesir altında kalmasına ve daha fazla bölgede toz ergimesine sebep olmaktadır. Sonuç olarak da boyutsal hatalar ve gözenekli bir mikro yapı ortaya çıkmaktadır [10] [49]. Bu durum, Şekil 5.13'deki geometrik sapma ile porozite miktarlarının birbiri ile doğru orantılı olmasını açıklamaktadır.

SLS ile yapılan çalışmalarda makine parametreleri belirli standart değerlerde tutularak hızlı üretim yapılması amaçlanmaktadır. Ancak makine parametrelerinin sabit tutulması, her üretimde aynı mekanik özelliklere ve mikroyapıya sahip malzeme elde edileceği anlamına gelmemektedir. Özellikle destek kullanılmadan

imal edilen çıkıntı yapılarda lazer doğrudan toz üzerine uygulandığından, ortaya çıkan eriyik havuzu her seferinde sabit özellikleri göstermemektedir. Eriyik havuzu bazen yüzeye yayılmış ve geniş bir geometride oluşurken bezen de dar ve derin bir yapıda ortaya çıkabilmektedir. Meydana gelen bu farklılık destek kullanılmadan üretilen çıkıntı yapılarda farklı boyutsal hatalar meydana getirmektedir [55].

$$E = P/v.s.t \quad (5.3)$$

E= Enerji yoğunluğu (J/mm<sup>3</sup>)

P= Lazer gücü (W)

v= Tarama hızı (mm/s)

s= Tarama aralığı (mm)

t= Katman kalınlığı(mm/s)

Eriyik havuzunda meydana gelen bu farklılık lazer gücü ve tarama hızının azaltılması ile elde edilecek düşük enerji yoğunluğu elde edilmesiyle kontrol altına alınabilmektedir [6] [8] [55].

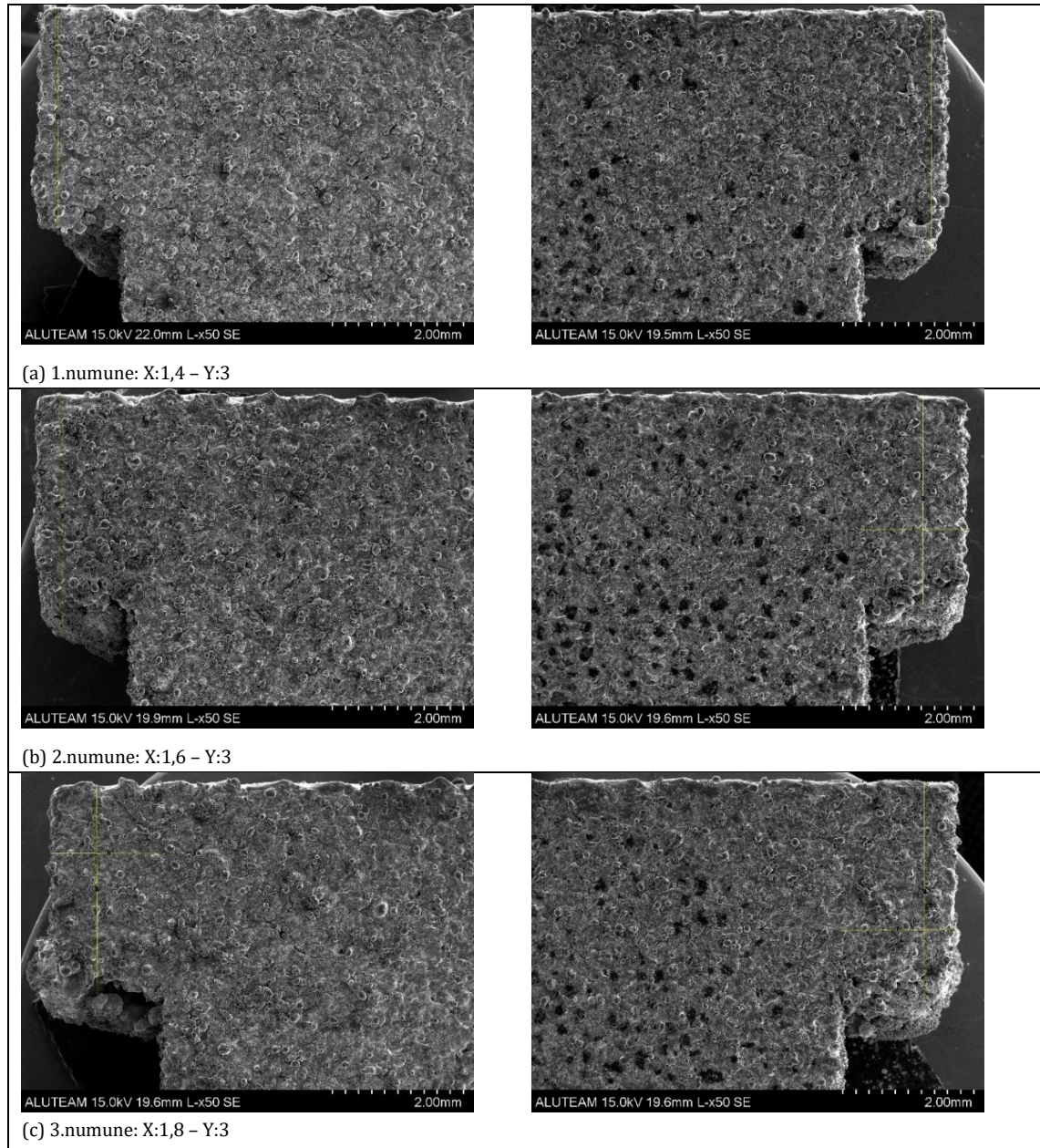
Makine parametrelerinden lazer gücü ve lazer nokta boyutu eriyik havuzunun genişlemesine ve ısı tesir altında kalan bölgenin artmasına sebep olmaktadır [49]. Bunun yanı sıra ön ısıtma sıcaklığının, malzemenin ergime sıcaklığının altında ancak yüksek bir sıcaklıkta tutulması malzemenin üretim esnasında hızlı soğumasını engelleyerek çarpılma oluşumunu azaltmaktadır. Dolayısıyla plastik deformasyona ve çarpılmalara sebep olan hızlı katılaşma ortadan kaldırılmaktadır [11]. İlave olarak tarama hızı da malzeme üzerine uygulanan enerjinin süresine etki etmektedir. Yüksek tarama hızları yetersiz ergimeye sebep olurken, yüksek lazer gücünde uygulanan düşük tarama hızları ergime havuzunun derinleşmesine ve genişlemesine sebep olarak malzemenin boyutsal doğruluğuna etki etmektedir [3] [6].

Yukarıda bahsedildiği gibi üretim parametrelerinin malzemenin geometrik doğruluğuna büyük oranda etki ettiği bilinmekle birlikte, bu çalışmada üretim parametreleri değiştirilmeyerek sadece numunelerin geometrik özellikleri değiştirilmiş ve ortaya çıkan geometrik sapma ile geometrik özellikler arasındaki

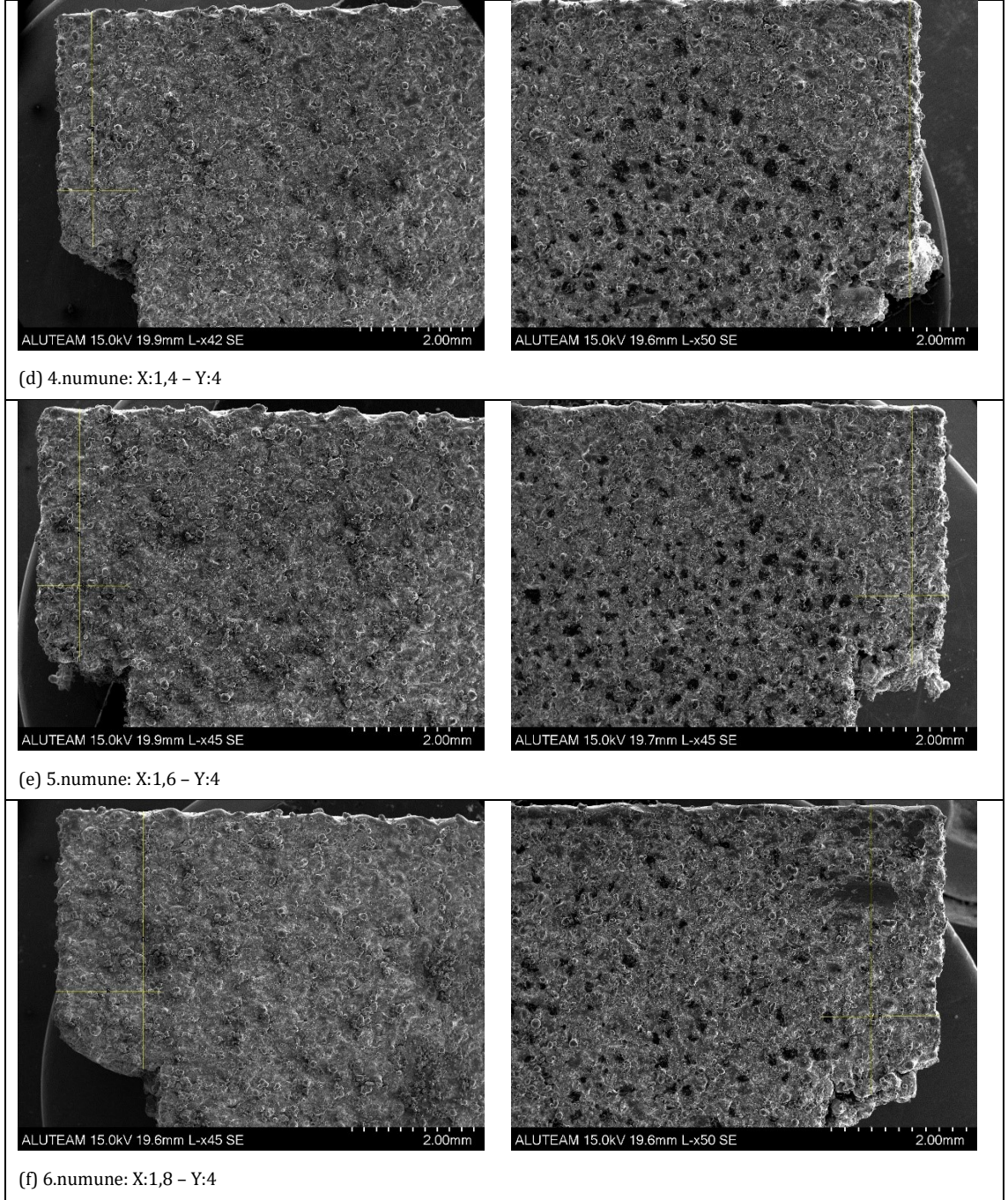
ilişki analiz edilmiştir. 2. üretimde elde edilen sonuçlar sonrasında, numunelerin çıkıntı kısımlarında boşluk oluşturularak yeni bir üretim gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Bu şekilde çıkıntı kısmının hacmi ve ağırlığı azaltılmak suretiyle; katman sayısı ve tarama süresi azaltılarak uygulanacak lazer gücünün azaltılması ve çıkıntı kısmında tozların parçaya yapışmasına sebep olan ısı etkinin minimize edilmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda 3. üretim gerçekleştirilecek geometrik sapmadaki değişim incelenmiştir.

### 5.3 3. Üretim Sonuçları

Numune üretiminde makine parametreleri olarak 1. üretim için de kullanılan, Tablo 4.2’te belirtilen makine parametreleri kullanılmıştır. Numunelerin çıkıntı olan kısımlarında Tablo 4.6’da belirtilen ölçüler doğrultusunda her numunede %40 oranında boşluk bırakılmıştır. 6 adet numune üretimi gerçekleştirildikten sonra taramalı elektron mikroskobunda görüntüleri alınmış olup, görüntüler Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’te verilmiştir. SEM görüntüleri üzerinden ImageJ programı yardımı ile çıkıntı boyutları alınmıştır.



Şekil 5.14 3. Üretim SEM görüntüleri



**Şekil 5.15 3. Üretim SEM görüntüleri**

SEM görüntüleri ölçüm sonuçlarının doğruluğunun artırılması amacıyla numunelerin her iki yüzeyinden alınarak çıkıntının hem ön hem de arka yüzeyinden ImageJ ile ölçüm yapılmıştır. Çıkıntının ön tarafından alınan sonuçlar X'ön, Y'ön; arka tarafından alınan ölçümler ise X'arka, Y'arka olarak belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.11'de gösterilmiştir.

**Tablo 5.11 3. Üretim ölçüm sonuçları**

|        | Tasarım   | Ölçüm Sonucu |                | Tasarım   | Ölçüm Sonucu |                |
|--------|-----------|--------------|----------------|-----------|--------------|----------------|
| Numune | X<br>(mm) | X'ön<br>(mm) | X'arka<br>(mm) | Y<br>(mm) | Y'ön<br>(mm) | Y'arka<br>(mm) |
| 1      | 1,4       | 1,391        | 1,386          | 3         | 3,372        | 3,762          |
| 2      | 1,6       | 1,609        | 1,489          | 3         | 3,476        | 3,714          |
| 3      | 1,8       | 1,809        | 1,746          | 3         | 3,640        | 3,613          |
| 4      | 1,4       | 1,398        | 1,384          | 4         | 4,107        | 4,838          |
| 5      | 1,6       | 1,566        | 1,518          | 4         | 4,627        | 4,355          |
| 6      | 1,8       | 1,783        | 1,742          | 4         | 4,624        | 4,379          |

Ölçüm sonuçlarına göre çıkıntı uzunluğu ve yüksekliğinde meydana gelen boyutsal fark Tablo 5.12’de gösterilmiştir. X-X'ön ve X-X'arka çıkıntı uzunluğunda meydana gelen boyutsal farkı gösterirken, Y-Y'ön ve Y-Y'arka ölçüleri de çıkıntı yüksekliğinde meydana gelen boyutsal farkı yani numunede askıda kalan bölümdeki geometrik sapmanın miktarını belirtmektedir.

**Tablo 5.12 Çıkıntıda meydana gelen boyutsal fark**

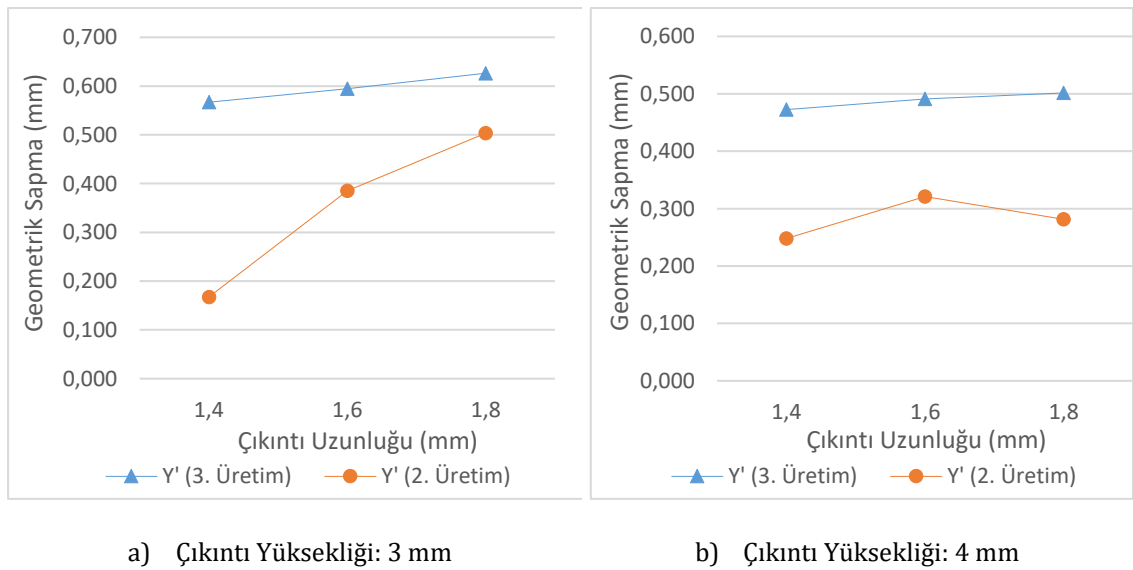
|           | Tasarım   | Boyutsal Fark  |                  | Tasarım   | Boyutsal Fark  |                  |
|-----------|-----------|----------------|------------------|-----------|----------------|------------------|
| Numune no | X<br>(mm) | X-X'ön<br>(mm) | X-X'arka<br>(mm) | Y<br>(mm) | Y-Y'ön<br>(mm) | Y-Y'arka<br>(mm) |
| 1         | 1,4       | 0,009          | 0,014            | 3         | 0,372          | 0,762            |
| 2         | 1,6       | 0,009          | 0,111            | 3         | 0,476          | 0,714            |
| 3         | 1,8       | 0,009          | 0,054            | 3         | 0,640          | 0,613            |
| 4         | 1,4       | 0,002          | 0,016            | 4         | 0,107          | 0,838            |
| 5         | 1,6       | 0,034          | 0,082            | 4         | 0,627          | 0,355            |
| 6         | 1,8       | 0,017          | 0,058            | 4         | 0,624          | 0,379            |

Çıkıntı uzunluğunun ve yüksekliğinin geometrik sapma miktarında meydana getirdiği etkinin incelenmesinde, numunenin ön ve arka yüzeylerinden alınan ölçümlerin ortalaması alınmış olup, ortalama boyutsal farklar Tablo 5.13'te gösterilmiştir.

**Tablo 5.13** Ortalama boyutsal fark

| Numune no | Boyutsal Fark       |                     |
|-----------|---------------------|---------------------|
|           | $X'_{ort} - X$ (mm) | $Y'_{ort} - Y$ (mm) |
| 1         | 0,012               | 0,567               |
| 2         | 0,060               | 0,595               |
| 3         | 0,032               | 0,627               |
| 4         | 0,009               | 0,473               |
| 5         | 0,058               | 0,491               |
| 6         | 0,038               | 0,502               |

3. üretimde elde edilen boyutsal fark ile 2. Üretimdeki aynı geometrik özelliklere sahip numunelerin boyutsal farkı kıyaslandığında Şekil 5.16'daki grafik elde edilmiştir. Grafikte 2. ve 3. üretimdeki çıkıntı yüksekliği aynı değerde iken farklı çıkıntı uzunluklarında oluşan geometrik sapma karşılaştırılmıştır. Buna göre çıkıntı bölümünde ağırlık ve hacim azaltıldığında geometrik sapma miktarında artış meydana gelmiştir.



**Şekil 5.16** 2. ve 3. Üretimdeki geometrik sapmada oluşan fark

Elde edilen sonuçlara göre çıkıntı yapılarda hacim azaltılması gerçekleştirilmiş olmasına rağmen geometrik sapma 2. üretimde elde edilen sonuçlardan daha fazla olmuştur. 3 mm yüksekliğinde üretilen çıkıntı yapı için 2. üretimde sırasıyla 0,168, 0,385 ve 0,504 mm'lik geometrik sapma meydana gelirken, 3. üretimde 0,567, 0,595 ve 0,627 mm'lik sapma oluşmuştur. Benzer şekilde 4 mm yüksekliğinde üretilen çıkıntı yapı için 2. üretimde 0,248, 0,321 ve 0,282 mm'lik sapma meydana gelirken 3. üretimde 0,473, 0,491 ve 0,502 mm'lik geometrik sapma oluşmuştur.

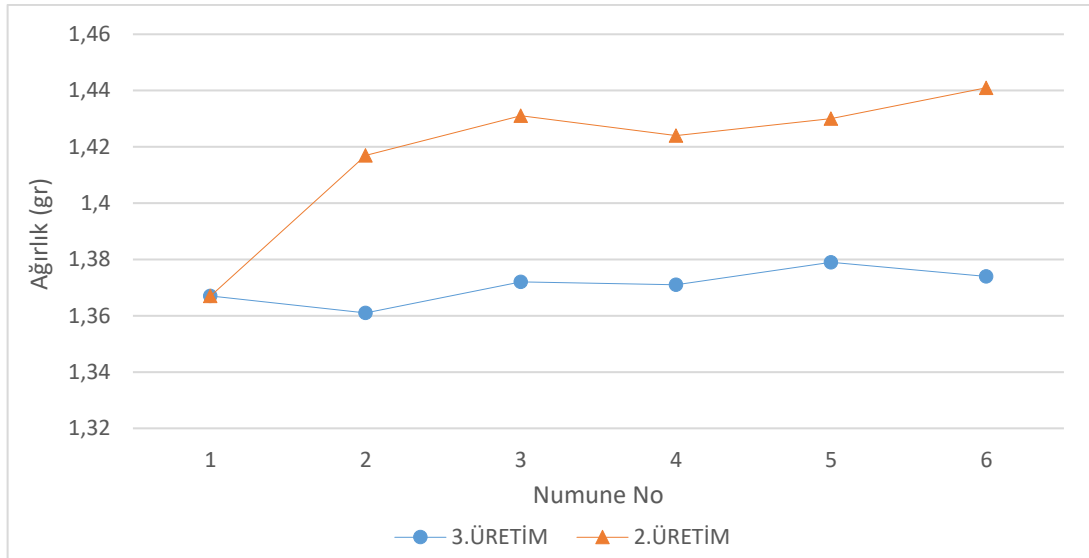
### 5.3.1 Ağırlık Ölçümü Sonuçları

Numunelerin ağırlık ölçümü hassas terazi ile gerçekleştirilmiştir. Buna göre elde edilen numune ağırlıkları Tablo 5.14'te gösterilmiştir.

**Tablo 5.14** 3. Üretime ait numunelerin ağırlık ölçümü

| Numune No    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ağırlık (gr) | 1,367 | 1,361 | 1,372 | 1,371 | 1,379 | 1,374 |

Elde edilen değerler 2. üretimde üretilen, aynı çıkıntı boyutlarına sahip numunelerin ağırlık değerleri ile kıyaslanarak Şekil 5.17'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.17** 2. ve 3 Üretimdeki numunelerin ağırlıklarının karşılaştırması

3. üretimdeki numunelerin çıkıntı kısmının boşluklu bir yapıda üretilmesi ile 2. üretimdeki numunelerden daha düşük ağırlıklara sahip olduğu anlaşılmıştır.

Çıkıntı bölümündeki boşluk içerisinde üretilen kafes yapısının içerisinde, ergime havuzunun genişlemesi nedeniyle yapışan tozların temizlenememesi numunelerde porozitenin artmasına sebep olacağı değerlendirilmiştir. Dolayısıyla hem geometrik sapmanın 2. üretimdekinden fazla olması hem de kafes yapısında meydana gelen tozların poroziteyi artırması göz önünde bulundurulduğunda, porozite miktarının 2. üretimde elde edilen porozite değerlerinden yüksek olacağı anlaşılmaktadır. Bu nedenle hacim, yoğunluk ve porozite ölçümleri yapılmamıştır.

Çıkıntı yapıdaki boşluk içerisindeki kafes yapısı üretilirken, uygulanan enerji yoğunluğu nedeniyle ergime havuzu genişlemiş olup, kafes etrafındaki tozların da ergiyerek parçaya yapışmasına neden olduğu değerlendirilmektedir. Bu durum numunelerde meydana gelen geometrik sapmanın 2. üretimde elde edilen geometrik sapmadan daha büyük olmasına sebep olmuştur. Diğer yandan çıkıntı bölümünde boşluk oluşturularak hafifletilmesinin geometrik sapmayı azaltmadığı, aksine dış faktörler nedeniyle arttırdığı anlaşılmıştır.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile toz yataklı eklemeli imalat yöntemlerinden birisi olan seçici lazer sinterlemede, destek yapı kullanılmadan, toz destekli olarak üretilen çıkıntı yapılar da meydana gelen geometrik sapmalar incelenmiştir. AlSi<sub>10</sub>Mg alaşım tozu kullanılarak üretilen çıkıntı yapıya sahip numunelerde; farklı tarama stratejisi, çıkıntı uzunluğu ve çıkıntı yüksekliğinde elde edilen geometrik sapma, ağırlık, hacim, yoğunluk ve porozite değerleri incelenmiştir. İlave olarak çıkıntı yapının içerisinde boşluk oluşturulmak suretiyle numune hafifletilerek çıkıntı ağırlığının geometrik sapma üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan ölçüm ve analizler neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- 0°, 90° ve 0°-45°-90° olmak üzere 3 farklı tarama yönü kullanılarak üretilen numunelerde geometrik sapma incelenmiştir. 0°-45°-90° tarama yönünde elde edilen geometrik sapma değerinde daha düşük geometrik sapma değeri elde edilmiştir.
- 1, 2 ve 3. üretimde farklı çıkıntı uzunluklarında numuneler üretilerek, çıkıntı uzunluğunun geometrik sapma üzerindeki etkisi incelenmiştir. Her 3 üretimde de elde edilen sonuçlara göre çıkıntı uzunluğu ile geometrik sapma arasında doğru orantı olduğu anlaşılmıştır. Buna göre çıkıntı uzunluğu arttıkça geometrik sapma miktarı artmaktadır.
- 1, 2 ve 3. üretimde farklı çıkıntı yüksekliklerinde numuneler üretilerek çıkıntı yüksekliğinin geometrik sapma üzerinde etkisi incelenmiştir. Numunelerin çıkıntı yüksekliği arttıkça, çıkıntının alt yüzeyi ile tabla arasındaki mesafe azalmış ve bu durum geometrik sapma miktarında azalma olmasını sağlamıştır. Buradan hareketle çıkıntının tabla ile arasındaki yüksekliğinin azalmasının geometrik sapmayı azalttığı anlaşılmıştır.
- Numunelerin çıkıntı kısmında meydana gelen geometrik sapma ile numunelerin ağırlık ve hacmi doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu doğrultuda numunelerin porozitesi de geometrik sapma arttıkça artmaktadır.
- Numunenin çıkıntı kısmında oluşturulan boşluk ile çıkıntının ağırlık ve hacmi %40 oranında azaltılmıştır. Ancak üretim sonrası elde edilen sonuçlara göre

çıkıntı bölgesinde meydana gelen geometrik sapma miktarı artmıştır. Dolayısıyla üretim esansında çıkıntı kısmın toz üzerine uyguladığı ağırlığın geometrik sapmaya etki etmediği anlaşılmaktadır.

- Toz destekli olarak üretilen çıkıntı yapılarda, boyutsal doğruluğa en çok etki eden faktör lazer uygulanan noktada oluşan ergime havuzunun yapısıdır. Ergime havuzunun genişlik ve derinliği, çıkıntı bölgesinde meydana gelen boyutsal hataların miktarını belirlemektedir. Çıkıntı yapılarda meydana gelen geometrik sapmalarda ergime havuzunun derinliğinin ve genişliğinin kontrol altına alınması için makine üretim parametreleri (lazer gücü ve tarama hızı) üzerinde çalışma yapılması önerilmektedir.

- [1] T. Srivatsan, Additive Manufacturing of Materials; Viable Techniques, Metals, Advances, Advantages and Applications, 2016.
- [2] ASTM, Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, 2010.
- [3] Li Yang, Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production, 2017.
- [4] J. Kruth, P. Mercelis and J. Vaerenbergh, Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting, 2005.
- [5] J. Kruth, G. Levy, F. Klocke and T. Childs, Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing, 2007.
- [6] C. P. Paul, A. N. Jinoop and K. S. Bindra, Metal additive manufacturing using lasers, 2019.
- [7] C. Y. Yap, C. K. Chua, Z. L. Dong, Z. H. Liu, D. Q. Zhang and L. E. Loh, Review of selective laser melting: Materials and applications, 2015.
- [8] J. Kruth, S. Dadbakhsh, B. Vrancken, K. Kempen, J. Vleugels and J. Humbeeck, Additive Manufacturing of Metals via Selective Laser Melting Process Aspects and Material Developments, 2016.
- [9] R. Li, J. Liu, Y. Shi, L. Wang and W. Jiang, Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process, 2012.
- [10] F. Calignano, Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting, 2014.

- [11] D. Wang, Y. Yang, Z. Yi and X. Su, Research on the fabricating quality optimization of the overhanging surface in SLM process, 2012.
- [12] M. Dana, I. Zetkova and P. Hanzl, Need For Support Structures Depending On Overhang Size, 2016.
- [13] K. Cooper, P. Steele, B. Cheng and K. Chou, Contact-Free Support Structures for Part Overhangs in Powder-Bed Metal Additive Manufacturing, 2017.
- [14] H. Khana, H. Dirikolua and E. Koç, Parameters optimization for horizontally built circular profiles: Numerical and experimental investigation, 2018.
- [15] M. Cloots, L. Zumofen, A. B. Spierings, A. Kirchheim and K. Wegener, Approaches to minimize overhang angles of SLM parts, 2017.
- [16] D. Gu, Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials, 2015.
- [17] On Birinci Kalkınma Planı, Strateji ve Bütçe Başkanlığı, 2019.
- [18] 2023 Sanayi ve Teknoloji Stratejisi, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2020.
- [19] A. Gebhardt and J.-S. Höttner, Additive Manufacturing, 2016.
- [20] T. Larimian and T. Borkar, Additive Manufacturing of In Situ Metal Matrix Composites, 2019.
- [21] E. Fereiduni, M. Yakout and M. Elbestawi, Laser-Based Additive Manufacturing of Lightweight Metal Matrix Composites, 2019.
- [22] N. Guo and M. Leu, Additive Manufacturing: Technology, Applications and Research Needs, 2013.

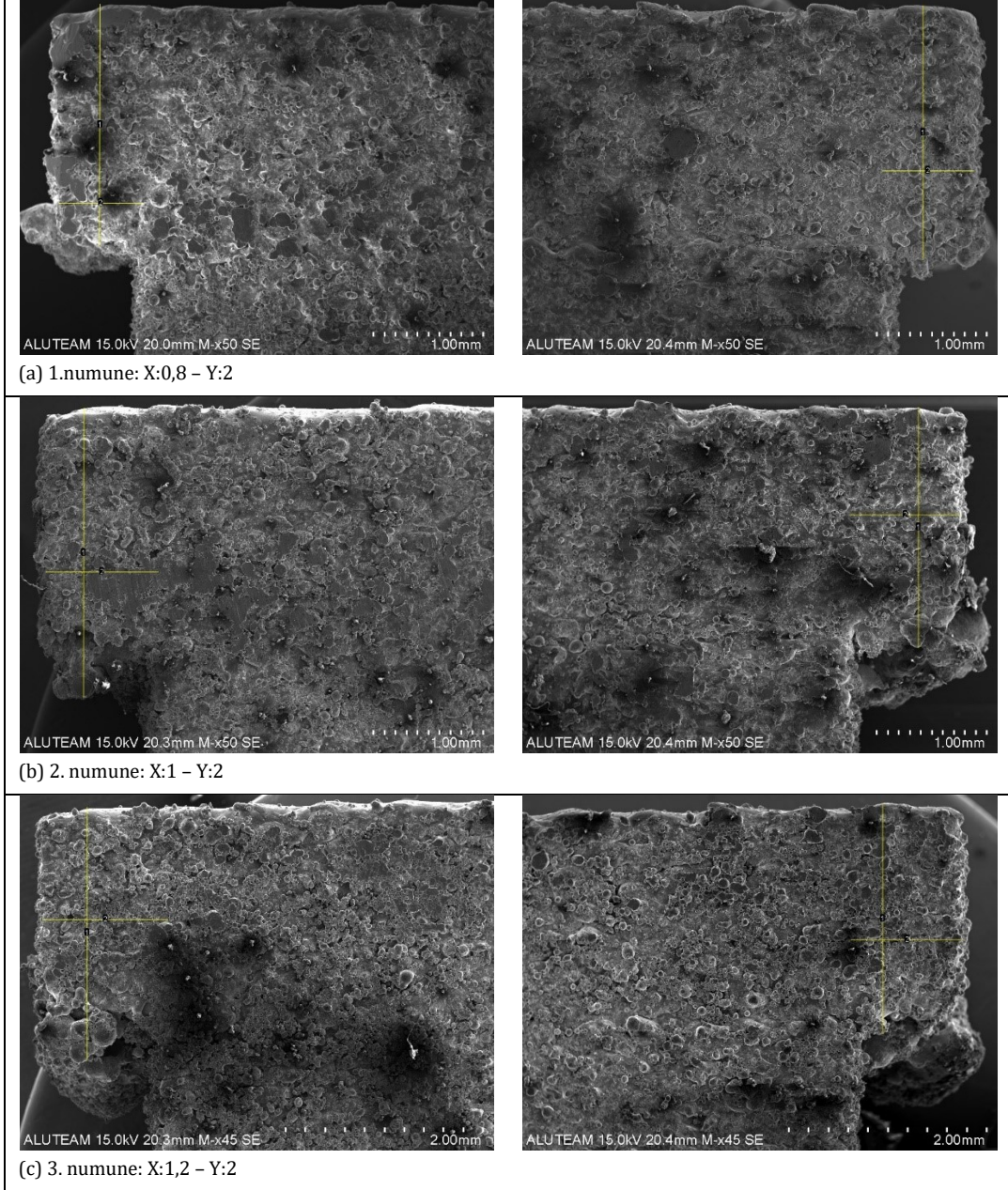
- [23] C. Kai Chua, C. H. Wong and W. Y. Yeong, Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D PRINTING AND ADDITIVE MANUFACTURING, 2017.
- [24] M. Mele, G. D'Avino and G. Campana, Life cycle impact assessment of desktop stereolithography, 2020.
- [25] I. Gibson, D. Rosen and B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, 2015.
- [26] C. B. Williamsa, L. D. Sturma and V. Meenakshisundaram, Modeling A Scanning-Mask Projection Vat Photopolymerization System For Multiscale Additive Manufacturing, 2020.
- [27] H. Wijshoff, Drop dynamics in the inkjet printing process, 2018.
- [28] M. Ziaeea and C. Nathan B. , Binder jetting: A review of process, materials, and methods, 2019.
- [29] H. Miyanaji, Z. Shanshan and L. Yang, A new physics-based model for equilibrium saturation determination in binder jetting additive manufacturing process, 2018.
- [30] K. Çelik and A. Özkan, Eklemeli İmalat Yöntemleri ile Üretim ve Onarım Uygulamaları, 2017.
- [31] W. Frazier, Metal additive manufacturing: a review, 2014.
- [32] P. Fischer, N. Karapatis, V. Romano, R. Glardon and H. Weber, A Model for the Interaction of Near-Infrared Laser Pulses With Metal Powders In Selective Laser Sintering, 2002.
- [33] R. Singh and J. P. Davim, Additive Manufacturing - Applications and Innovations, 2019.

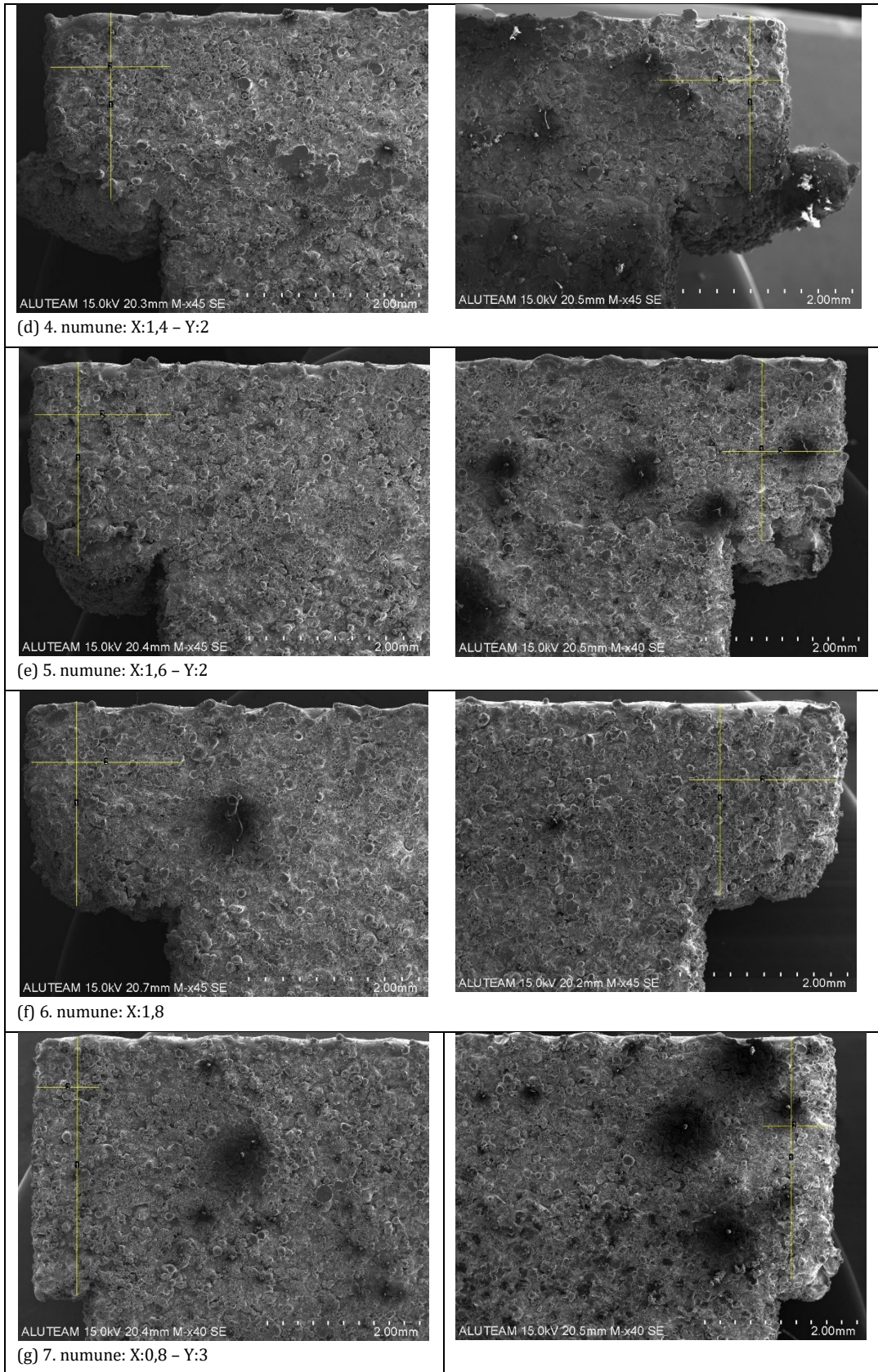
- [34] R. Verma and G. Kaushal, State of the Art of Powder Bed Fusion Additive Manufacturing: A Review, 2019.
- [35] G. Levy, R. Schindel and J. Kruth, Rapid Manufacturing And Rapid Tooling With Layer Manufacturing (LM) Technologies, State Of The Art And Future Perspectives, 2003.
- [36] G. R. and Z. S., Powder bed fusion of polymers, 2017.
- [37] G. Kannan and K. Rajendran, A Review on Status of Research in Metal Additive Manufacturing, 2017.
- [38] K. Guan, Z. Wang, M. Gao, X. Li and X. Zeng, Effects Of Processing Parameters On Tensile Properties Of Selective Laser Melted 304 Stainless Steel, 2013.
- [39] D. Manfredi, F. Calignano, M. Krishnan, R. Canali, E. Ambrosio, S. Biamino, D. Ugues, M. Pavese and P. Fino, Additive Manufacturing of Al Alloys and Aluminium Matrix Composites (AMCs), 2014.
- [40] B. Cheng, S. Shrestha and K. Chou, Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting, 2016.
- [41] C. Paul, P. Ganesh, S. Mishra, P. Bhargava, J. Negi and A. Nath, Investigating laser rapid manufacturing for Inconel-625 components, 2007.
- [42] W. Shifeng, L. Shuai, W. Qingsong, C. Yan, Z. Sheng and S. Yusheng, Effect of molten pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melting parts, 2014.
- [43] G. Morettinia, S. Mohammad, J. Razavib and G. Zucca, Effects of build orientation on fatigue behavior of Ti-6Al-4V as-built specimens produced by direct metal laser sintering, 2019.

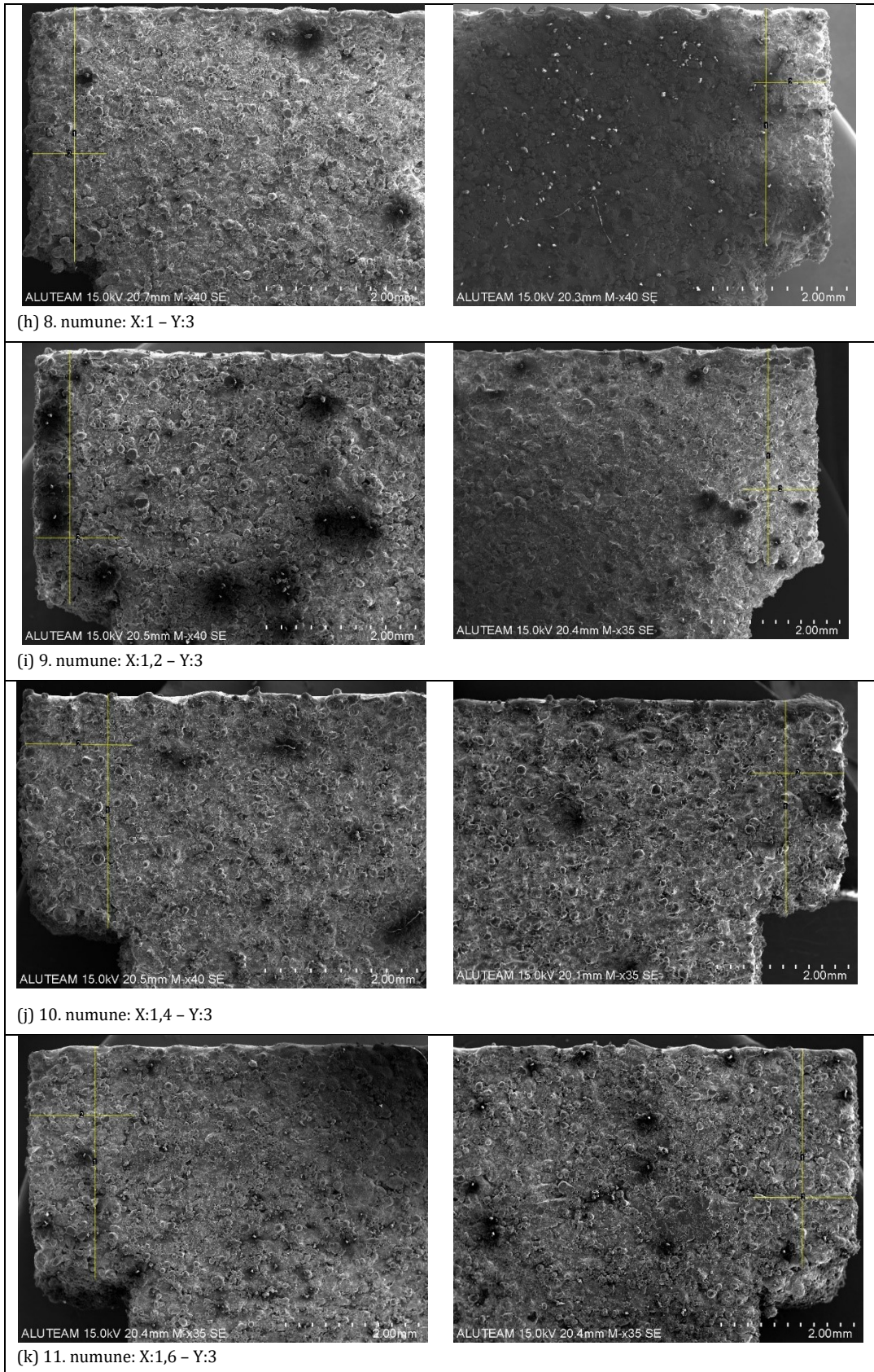
- [44] K. Lakshmi and G. Arumaikkannu, Influence of Process Parameters on Tensile Strength of Additive Manufactured Polymer Parts Using Taguchi Method, 2017.
- [45] J. Delgado, J. Ciurana and J. A. Rodríguez, Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with iron-based materials, 2011.
- [46] F. Calignano, D. Manfredi, E. P. Ambrosio and L. Iuliano, Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by DMLS, 2012.
- [47] E. Louvis, P. Fox and C. J. Sutcliffe, Selective Laser Melting of Aluminum Components, 2011.
- [48] K. Zeng, Optimization of support structures for selective laser melting,, 2015.
- [49] N. Shen and K. Chou, Thermal modeling of electron beam additive manufacturing process powder sintering effects, 2012.
- [50] P. Vora, K. Mumtaz, I. Todd and N. Hopkinson, AlSi12 in-situ alloy formation and residual stress reduction using anchorless selective laser melting, 2015.
- [51] Q. Han, H. Gu, S. Soe, R. Setchi, F. Lacan and J. Hill, Manufacturability of AlSi10Mg overhang structures fabricated by laser powder bed fusion, 2018.
- [52] E. Atzeni and A. Salmi, Study on unsupported overhangs of AlSi10Mg parts processed by Direct Metal Laser Sintering (DMLS), 2015.
- [53] EOS, EOS Aluminum Material Data Sheet, /[https://www.eos.info/03\\_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/aluminium/alsi10mg-9011-0024-m400\\_flexline\\_material\\_data\\_sheet\\_03-18\\_en.pdf](https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/aluminium/alsi10mg-9011-0024-m400_flexline_material_data_sheet_03-18_en.pdf).

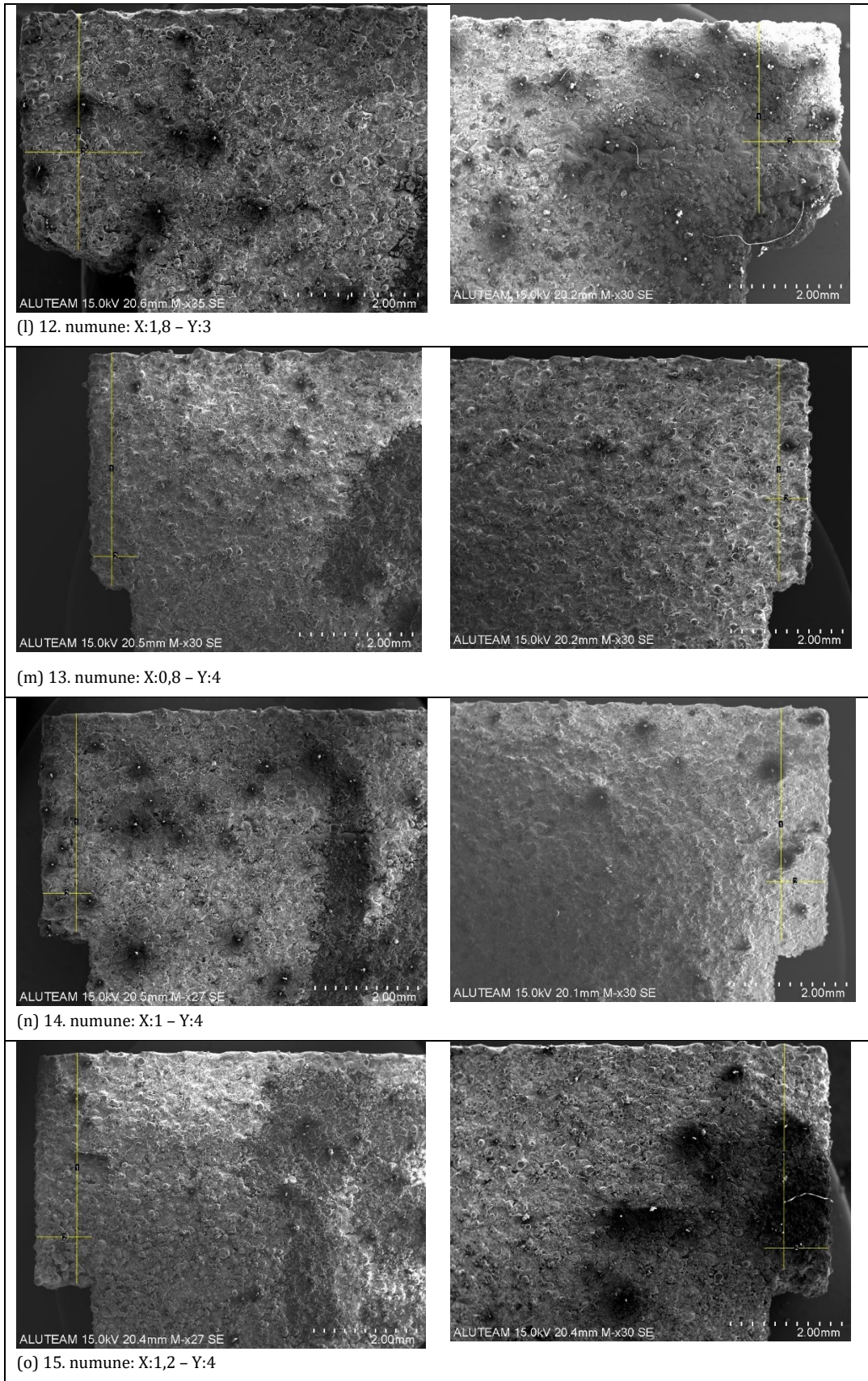
- [54] Y. Song, Q. Sun, K. Guo, X. Wang, J. Liu and J. Sun, Effect of scanning strategies on the microstructure and mechanical behavior of 316L stainless steel fabricated by selective laser melting, 2020.
- [55] S. Clijsters, T. Craeghs and J. Kruth, A priori process parameter adjustment for SLM process optimization, 2012.
- [56] F. Dini, S. Marjan, R. Hamidreza, J. Javadpour and S. A. Ghaffari, A review of binder jet process parameters; powder, binder, printing and sintering condition, 2019.
- [57] D. Wimpenny, B. Bryden and I. Pashby, Journal of Materials Processing Technology, 2003.
- [58] J. P. Singh and P. Pandey, Investigations to enhance the strength of open cell porous regular interconnect structure, 2019.
- [59] G. Ameta, Design Issues in Additive Manufacturing, 2016.
- [60] B. Cheng, S. Shrestha and K. Chou, Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting, 2016.
- [61] E. Louvis, P. Fox and C. Sutcliffe, Selective laser melting of aluminium components, 2010.

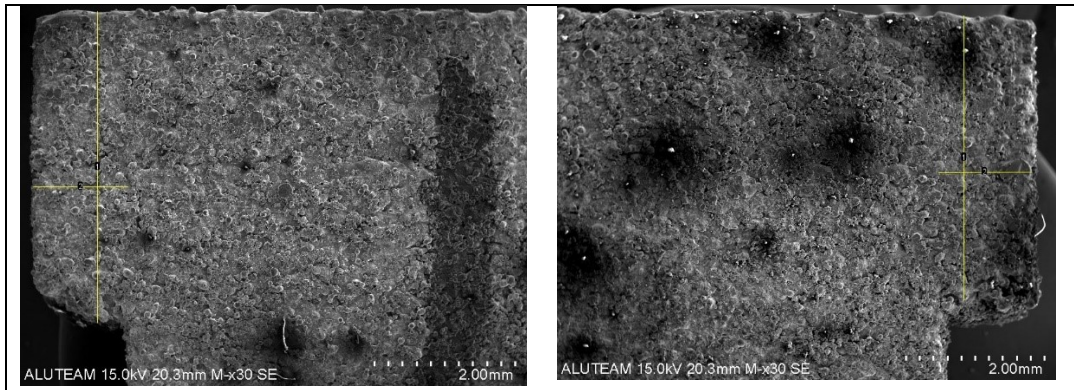
## 2. ÜRETİME AİT SEM GÖRÜNTÜLERİ



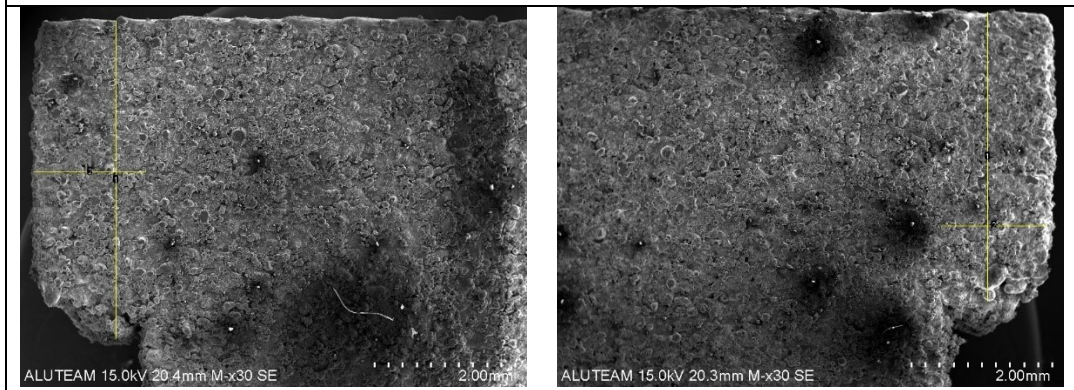




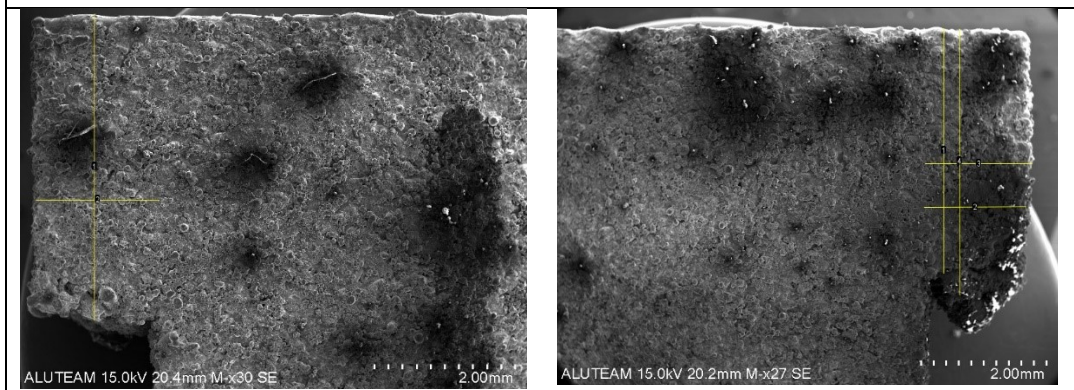




(p) 16. numune: X1,4 – Y:4



(q) 17. numune: X:1,6 – Y:4



(r) 18. numune: X:1,8 – Y:4

### **Konferans Bildirileri**

[1] Kaplan, M. C., Altan, M. Improving Accuracy of Overhanging Structures For Selective Laser Melting, 4<sup>th</sup> International Conference on Advances in Mechanical Engineering, 2018