

**T.C.  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKLEMELİ İMALATTA DESTEK YAPILARIN OPTİMİZASYONU ve  
TEMİZLENMESİ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Sarkis BOYACI**

**Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Erkan BAHÇE**

**HAZİRAN 2022**

**T.C  
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKLEMELİ İMALATTA DESTEK YAPILARIN OPTİMİZASYONU ve  
TEMİZLENMESİ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Sarkis BOYACI  
36183618078**

**Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Erkan BAHÇE**

**HAZİRAN 2022**

## TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalıőmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgmeden beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Erkan Bahçe'ye,

Çalıőmalarımnda ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalıőmalarım süresince de benden her türlü desteklerini esirgemeyen aileme,

Yüksek lisans tezim sırasında akademik bilgilerini benimle paylaşarak her türlü yardımda bulunan değerli dostum Öğr.Gör. Ender Emir'e,

FYL-2021-2723 nolu proje ile desteklerinden dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araőtırma Projeleri Birimi'ne

teşekkür ederim.

## ONUR SÖZÜ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “EKLEMELİ İMALATTA DESTEK YAPILARIN OPTİMİZASYONU ve TEMİZLENMESİ” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Sarkis BOYACI



## İÇİNDEKİLER

|  |      |
|--|------|
| TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ .....  | i    |
| ONUR SÖZÜ .....  | ii   |
| ÇİZELGELER DİZİNİ.....   | v    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....   | vi   |
| SEMBOLLER VE KISALTMALAR .....   | viii |
| ÖZET .....   | ix   |
| ABSTRACT .....   | x    |
| 1.GİRİŞ .....  | 1    |
| 2.KAYNAK ARAŞTIRMASI.....  | 3    |
| 2.1.Tezin Literatürdeki Yeri ve Organizasyon Şeması.....   | 8    |
| 3.GENEL BİLGİLER .....   | 10   |
| 3.1.Eklemeli İmalat ve Kullanılan Yöntemler .....  | 10   |
| 3.1.1.Fotopolimerizasyon .....   | 10   |
| 3.1.2.Malzeme püskürtme .....  | 11   |
| 3.1.3.Bağlayıcı püskürtme .....  | 12   |
| 3.1.4.Malzeme ekstrüzyonu.....   | 13   |
| 3.1.5.Levha/sac laminasyonu .....  | 13   |
| 3.1.6.Direkt enerji depolama .....   | 14   |
| 3.1.7.Toz yataklı eritme .....   | 15   |
| 3.2.Eklemeli İmalatta Destek Yapılar ve Önemi .....  | 15   |
| 3.2.1.Açısal destekler kullanılarak destek temasının azaltılması .....                                   | 18   |
| 3.2.2.İnce diş tip destek kullanılarak destek temasının azaltılması .....                                | 19   |
| 3.2.3.Ölçeklendirme kullanılarak destek yapıların azaltılması .....                                      | 19   |
| 3.2.4.Parça blok destekler kullanılarak destek yapıların azaltılması.....                                | 20   |
| 3.3.Destek Yapıların Optimizasyonu.....  | 20   |
| 3.3.1.Oryantasyon (yönelme) .....  | 21   |
| 3.3.2.Parça Geometrisi .....   | 21   |
| 3.3.3.Parça Ayırma yöntemi.....  | 21   |
| 3.3.4.Destek yoğunluğu .....   | 21   |
| 3.3.5.Çözünebilir Destekler .....  | 22   |
| 3.4.Destek Yapıların Kaldırılması .....  | 22   |
| 4.MATERYAL ve METOT .....  | 23   |
| 4.1.Deney Numunelerinin Tasarımı.....  | 23   |
| 4.2.Destek Yapıların Optimizasyonu.....  | 24   |
| 4.3.Deneyde Kullanılan Parçaların İmalatı.....   | 26   |
| 4.4.Destek Yapıların Optimizasyonu, Temizlenmesi ve Etkilerinin İncelenmesi..                            | 29   |
| 4.4.1.Destek yapıların optimizasyonunun etkilerinin incelenmesi.....                                     | 29   |
| 4.4.2.Frezeleme ile destek yapıların temizlenmesi.....   | 30   |
| 4.4.3.Destek yapıların işlenmesinde etkili gerilmelerin sonlu elemanlar<br>yöntemi ile incelenmesi ..... | 32   |
| 4.4.4.Tel fırça ile destek yapıların temizlenmesi.....   | 33   |
| 4.4.5.Taşlama ile destek yapıların temizlenmesi .....  | 34   |
| 4.4.6.Mikro motor freze ile destek yapıların temizlenmesi.....   | 35   |
| 4.4.7.Destek temizleme metotlarının yüzey kalitesine etkilerinin araştırılması.                          | 37   |
| 4.4.8.Destek temizleme metotlarının geometrik doğruluğa etkilerinin<br>araştırılması .....               | 38   |
| 4.4.9.Destek temizleme sonrası SEM analizi .....   | 38   |
| 5.BULGULAR ve TARTIŞMA .....   | 40   |

|  |           |
|--|-----------|
| 5.1.Farklı Destek Yapıların Etkilerinin İncelenmesi .....  | 40        |
| 5.1.1.Parçanın üretiminde kullanılan malzeme miktarı ve üretim süresi .....  | 42        |
| 5.1.2.Farklı destek yapılarının ısı dağılımına etkileri.....   | 44        |
| 5.1.3.Farklı destek yapıların geometrik tolerans üzerine etkileri .....  | 45        |
| 5.1.4.Farklı destek yapıların yüzey kalitesi üzerine etkileri .....  | 46        |
| 5.2.Destek Yapıların Temizlenmesinde Kullanılan Yöntemlerin Yüzey Kalitesi ve Boyutsal Doğruluk Üzerine Etkileri ..... | 48        |
| 5.2.1.Frezeleme ile destek yapıların temizlenmesi.....   | 48        |
| 5.2.2.Tel fırça ile destek yapıların temizlenmesi.....   | 52        |
| 5.2.3.Gravür taş ile destek yapıların temizlenmesi.....  | 53        |
| 5.2.4.Mikro motor freze ile destek yapıların temizlenmesi.....   | 54        |
| <b>6.SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....</b>   | <b>57</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>  | <b>59</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>  | <b>63</b> |



## ÇİZELGELER DİZİNİ

|   |    |
|---|----|
| Çizelge 4.1 : CoCr Alaşımının özellikleri.....  | 27 |
| Çizelge 4.2 : Kullanılan dikey işleme tezgahının özellikleri.....                       | 31 |
| Çizelge 4.3 : İşeme sırasında kullanılan parametreler.....                              | 31 |
| Çizelge 4.4 : Matkap tezgahının teknik özellikleri.....                                 | 33 |
| Çizelge 4.5 : Fırça ile temizlemede kullanılan devir sayıları.....                      | 34 |
| Çizelge 4.6 : Taşlama ile temizlemede kullanılan devir sayıları.....                    | 35 |
| Çizelge 4.7 : Mikro motor frezenin teknik özellikleri.....                              | 35 |
| Çizelge 5.1 : Kullanılan destek yapısına göre parça ağırlıkları ve imalat süreleri..... | 43 |



## ŞEKİLLER DİZİNİ

|   |    |
|---|----|
| Şekil 2.1 : Destek yapıların bölümleri. ....  | 4  |
| Şekil 2.2 : Çalışmanın organizasyon şeması. ....  | 9  |
| Şekil 3.1 : Fotopolimerizasyon yönteminin üretim şeması. ....   | 11 |
| Şekil 3.2 : Malzeme püskürtme metodunun üretim şeması. ....   | 11 |
| Şekil 3.3 : Bağlayıcı püskürtme metodunun üretim şeması. ....   | 12 |
| Şekil 3.4 : Eriyik yığarak modelleme metodunun üretim şeması. ....  | 13 |
| Şekil 3.5 : Levha/Sac laminasyonu metodunun üretim şeması. ....   | 14 |
| Şekil 3.6 : Direkt enerji depolama metodunun üretim şeması. ....  | 14 |
| Şekil 3.7 : Toz yataklı eritme metodunun üretim şeması. ....  | 15 |
| Şekil 3.8 : Eklemeli imalatta kullanılan destek türleri (Materialise 2018). ....  | 17 |
| Şekil 3.9 : Kullanılan destek yapıları; (a) Düz destek yapılar, (b) Açılı destek yapılar. ....  | 19 |
| Şekil 4.1 : Destek yapıların etkilerinin incelenmesi için kullanılan örnek model. ....  | 23 |
| Şekil 4.2 : Tasarlanan deney numuneleri. ....   | 24 |
| Şekil 4.3 : Optimizasyon sonrası desteklerin başlangıç noktalarının belirlenmesi. ....  | 24 |
| Şekil 4.4 : Tasarlanmış ağaç destek yapısı kullanılarak örnek modelin üretimi. ....   | 25 |
| Şekil 4.5 : Kullanılan diğer destek yapıları; (a) standart ağaç yapı, (b) çizgi yapı, (c) eş merkezli yapı, (d) gyroid yapı, (e) standart yapı. ....  | 26 |
| Şekil 4.6 : CoCr tozlarının sem görüntüsü. ....   | 27 |
| Şekil 4.7 : Concept Lazer M Cusing Lab Metal 3B yazıcı. ....  | 27 |
| Şekil 4.8 : Ultimaker 2+ Connect yazıcı. ....   | 28 |
| Şekil 4.9 : EYM yöntemi ile yapılan imalatlar sırasında termal görüntülerin alınması. ....  | 28 |
| Şekil 4.10 : WSA-224T hassas terazi. ....   | 29 |
| Şekil 4.11 : Co-Cr alaşımı ile üretilen numuneler de temizlenecek destek yapılar. ....  | 30 |
| Şekil 4.12 : JohnFord SV 41 dikey işleme tezgâhı. ....  | 30 |
| Şekil 4.13 : Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan kuvvet yönleri. ....   | 32 |
| Şekil 4.14 : Kullanılan matkap tezgâhı. ....  | 33 |
| Şekil 4.15 : Saçaklı çanak tel fırça. ....  | 34 |
| Şekil 4.16 : Gravür taşlama ucu. ....   | 35 |
| Şekil 4.17 : NSK Ultimate 500 mikro motor freze. ....   | 36 |
| Şekil 4.18 : Kullanılan freze uçları; (a) 10 mm küresel törpü freze, (b) konik yapıli törpü freze, (c) silindir oval başli freze, (d) konik sivri freze, (e) sivri çam freze. ....  | 36 |
| Şekil 4.19 : Destek yapıların temizleme işlemleri; (a) 10 mm küresel törpü freze, (b) konik yapıli törpü freze, (c) silindir oval başli freze, (d) konik sivri freze, (e) sivri çam freze. ....   | 37 |
| Şekil 4.20 : Temizleme işleminde kullanılan farklı geometrilerde frezeler; (a) Silindir alın kesmeli, (b) Oval gövdeli, (c) Küre uçlu çam. ....   | 37 |
| Şekil 4.21 : Parça üzerinde yüzey kalitesi ölçümü. ....   | 38 |
| Şekil 4.22 : Geometrik ölçümlerin yapılması. ....   | 38 |
| Şekil 4.23 : LEO EVO-40 taramalı elektron mikroskobu. ....  | 39 |
| Şekil 4.24 : Üretim sonrası destek yapıların mikro görüntüsü. ....  | 39 |
| Şekil 5.1 : Farklı destek yapılarına göre kurbağa modeli üretimi; (a) tasarlanmış ağaç destek yapı, (b) standart ağaç destek yapı, (c) çizgi destek yapı, (d) eş merkezli destek yapı, (e) gyroid destek yapı, (f) standart destek yapı. .... | 40 |
| Şekil 5.2 : Katmanlar arasındaki bağlanma durumu; (a) dilimleme sonrası beklenen, (b) standart destek yapısı ile üretilen, (c) Standart ağaç destek yapısı ile üretilen. ....   | 42 |
| Şekil 5.3 : Kurbağa modeli üretimi sırasında termal görüntüye bağlı sıcaklığın değişimi; (a) standart destek yapısı ile üretilen, (b) optimize destek yapısı ile üretilen. ....   | 44 |



|  |    |
|--|----|
| <b>Şekil 5.4</b> : Farklı destek yapılarına göre sıcaklıkların değişimi: a) blok destek yapılarında soğuma, b) çizgi destek yapısında soğuma. ....   | 45 |
| <b>Şekil 5.5</b> : Destek yapıların üretime etkisi; (a) standart destek yapısı ile üretilen, (b) optimize edilmiş destek yapısı ile üretilen. ....   | 45 |
| <b>Şekil 5.6</b> : Desteklerin temizlenmesinden sonra yüzey kaliteleri; (a) tasarlanmış ağaç destek yapısı, (b) standart ağaç destek yapısı, (c) çizgi destek yapısı, (d) eş merkezli destek yapısı, (e) gyroid destek yapısı, (f) standart destek yapısı..... | 47 |
| <b>Şekil 5.7</b> : Metal eklemeli imalat sonrasında destek yapıların görüntüleri.....  | 48 |
| <b>Şekil 5.8</b> : İşleme öncesi sonlu elemanlar analizi; (a) vonmises gerilmeleri, (b) yer değiştirmeler.....   | 49 |
| <b>Şekil 5.9</b> : İşleme sırasında destek yapıların hareketi.....   | 49 |
| <b>Şekil 5.10</b> : Yüzey pürüzlülüğü değişim grafikleri; (a) kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi, b) ilerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisi .....  | 50 |
| <b>Şekil 5.10 (devam)</b> : Yüzey pürüzlülüğü değişim grafikleri; (a) kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi, b) ilerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisi .....  | 51 |
| <b>Şekil 5.11</b> : Frezeleme işlemi öncesi ve sonrası parça görüntüleri; (a) üretilen destek yapılar, (b) temizleme sonrası parça.....  | 52 |
| <b>Şekil 5.12</b> : Tel fırça ile destek yapıların temizlenmesi; (a) 220 dev/dak, (b) 620 dev/dak, (c)1100 dev/dak.....  | 52 |
| <b>Şekil 5.13</b> : Gravür taş ile destek yapıların temizlenmesi; (a) 220 dev/dak, (b) 620 dev/dak, (c) 1100 dev/dak.....  | 53 |
| <b>Şekil 5.14</b> : Destek yapıların mikro motor freze ile temizlenmesi sonrası yüzey görüntüleri; (a) 10 mm küresel törpü freze, (b) konik yapılı törpü freze, (c) silindir oval başlı freze, (d) konik sivri freze, (e) sivri çam freze .....                | 54 |
| <b>Şekil 5.15</b> : Mikro motor freze ile temizleme sonrası yüzeyler; (a) Silindir alın kesmeli, (b) Oval gövdeli, (c) Küre uçlu çam .....   | 55 |
| <b>Şekil 5.16</b> : Mikro motor freze ile temizleme sonrası SEM görüntüleri; (a) Silindir alın kesmeli, (b) Oval gövdeli, (c) Küre uçlu çam .....  | 56 |

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

|             |                                 |
|-------------|---------------------------------|
| <b>3B</b>   | : 3 boyutlu                     |
| <b>2B</b>   | : 2 boyutlu                     |
| <b>STL</b>  | : Stereolitografi               |
| <b>SLM</b>  | : Seçici lazer kaynağı          |
| <b>DMLS</b> | : Direkt metal lazer sinterleme |
| <b>PLA</b>  | : Polilaktik asit               |
| <b>CAD</b>  | : Bilgisayar destekli tasarım   |
| <b>VTA</b>  | : Vertec çeviri algoritması     |
| <b>AMF</b>  | : Eklemeli imalat dosyası       |
| <b>UV</b>   | : Ultraviyole                   |
| <b>EYM</b>  | : Eriyik yığma modeli           |
| <b>SLS</b>  | : Seçici lazer sinterleme       |
| <b>SLE</b>  | : Seçici lazer ergitme          |
| <b>EIE</b>  | : Elektron ışını ile ergitme    |
| <b>mm</b>   | : Milimetre                     |
| <b>µm</b>   | : Mikrometre                    |
| <b>kW</b>   | : Kilovat                       |
| <b>N</b>    | : Newton                        |
| <b>SEM</b>  | : Taramalı elektron mikroskobu  |

# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EKLEMELİ İMALATTA DESTEK YAPILARIN OPTİMİZASYONU ve TEMİZLENMESİ

Sarkis BOYACI

İnönü Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı

63+X sayfa

2022

Danışman: Doç. Dr. Erkan BAHÇE

Eklemeli imalat malzemenin katman katman eritilip parça geometrisine göre serilip soğutularak birleştirilmesi ile üretilen ve son yıllarda giderek yaygınlaşan bir metottur. Malzemenin ergitilerek serilmesinden dolayı parça üretilirken eriyik malzemenin üretilecek parçanın geometrisine bağlı olarak, bozulmalarını ve sarkmalarını engellemek amacıyla destek yapılarının kullanılması gereklidir. Destek yapılar karmaşık parçaların üretimi için önemli bir yapıdır. Ancak destek yapılar üretim sonrası, tasarlanan parçayı elde edebilmek için temizlenmesi gereken yapılardır. Üretim sonrası temizlenip atıldığından dolayı üretim artışı olarak tanımlanır ve hem üretim maliyetini hem de üretim süresini arttırır. Bu sebeple son zamanlarda destek yapıların optimizasyonu üzerine çalışmalar da bir atış gözlemlenmektedir. Bu çalışmada karmaşık bir kurbağa modeli üzerinde EBM metodu kullanarak tasarlanmış ağaç, standart ağaç, eş merkezli, gyroid, çizgi ve standart destek yapılar ve standart destek yapılar kullanılarak üretimler yapılmıştır. Yapılan bu farklı üretimler sonrasında yüzey kalitesi ve geometrik doğruluk üzerine incelemeler yapılmıştır. Destek yapılarının temizlenmesi üzerine SLE metodu ile üretilen farklı geometrilerde frezeleme, tel fırça, taşlama ve mikro motor frezeleme ile temizleme yöntemleri karşılaştırılmıştır. Temizleme işlemi sonrasında parçaların yüzey kaliteleri ve geometrik doğrulukları incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda kullanılan farklı destek yapılar arasında, çizgi destek yapılarının kullanılan malzeme miktarında standart destek yapılarına göre %20 oranında azalma sağladığı, üretim süresinde ise %17 ye varan zaman kazandırdığı tespit edilmiştir. Çizgi destek yapıların üretim süresi ve zaman bakımından avantajlı olduğu, ancak temizleme sonrası yüzeyde bıraktığı izler yönünden standart ağaç destek yapıların daha olumlu sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Temizleme yöntemleri kıyaslandığında ise düz yüzeyli parçalarda frezelemenin hem pürüzlülük hem de geometrik doğruluk açısından en avantajlı yöntem olduğu ancak serbest şekilli yüzeylerde ise frezelemenin yerine mikro motor freze ile manuel temizlemenin daha verimli sonuçlar ortaya çıkardığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Eklemeli imalat, Destek optimizasyonu, Destek yapıların temizlenmesi

## ABSTRACT

Master Thesis

### OPTIMIZATION AND CLEANING SUPPORT STRUCTURES IN ADDITIVE MANUFACTURING

Sarkis BOYACI

Inonu University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

63+X sayfa

2022

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Erkan BAHCE

Additive manufacturing is a method that is produced by melting the material layer by layer, laying it according to the geometry of the part, and combining it by cooling, and it is a method that has become increasingly widespread in recent years. Due to the fact that the material is laid by melting, it is necessary to use support structures in order to prevent the molten material from deteriorating and sagging, depending on the geometry of the part to be produced. Support structures are an important structure for the production of complex parts. However, support structures are structures that need to be cleaned after production in order to obtain the designed part. Since it is cleaned and discarded after production, it is defined as production residue and increases both production cost and production time. For this reason, studies on the optimization of support structures have been observed recently. In this study, productions were made using tree, standard tree, concentric, gyroid, line and standard support structures and standard support structures designed using the EBM method on a complex frog model. After these different productions, examinations were made on the surface quality and geometric accuracy. On the cleaning of support structures, milling, wire brush, grinding and micro motor milling and cleaning methods in different geometries produced by SLE method were compared. After the cleaning process, the surface quality and geometric accuracy of the parts were examined. As a result of the studies, it has been determined that among the different support structures used, line support structures provide a 20% reduction in the amount of material used compared to standard support structures, and save up to 17% in production time. It has been observed that line support structures are advantageous in terms of production time and time, but standard tree support structures give more positive results in terms of traces left on the surface after cleaning. When the cleaning methods are compared, it is seen that milling is the most advantageous method in terms of both roughness and geometric accuracy in flat surface parts, but manual cleaning with micro motor milling instead of milling on free-form surfaces produces more efficient results.

**Keywords:** Additive manufacturing, Support optimization, Cleaning support structure

## 1. GİRİŞ

Son yıllardaki teknolojik gelişmelerle birlikte geleneksel imalat yöntemleriyle üretilmesi zor ve zaman alan karmaşık yapılar, eklemeli imalat prosesleri ile daha hızlı ve kolay şekilde yapılabilmektedir. Bu avantaj eklemeli imalatı, havacılık, elektronik, biyomedikal, otomotiv ve savunma sanayi gibi sektörlerde oldukça popüler hale getirmiştir. Eklemeli imalatın temelinde malzemenin katman katman birleştirilerek nihai ürünün elde edilmesi yatmaktadır. Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM International) eklemeli imalatı, 3B model verilerinden nesnelere oluşturmak için katmanlı malzeme birleştirme işlemi olarak tanımlamaktadır (ASTM F2915-12, 2012).

Eklemeli imalatın gelişimi incelendiğinde; topoğrafya alanında 1890'lerde kullanılmaya başlanan bu teknoloji, endüstriyel alanda 1951'de Munz'un önerdiği stereolitografi teknolojisinde uygulanmıştır (Munz, 1956). Yine bu alanda 1968'de Swainson iki lazer ışınının kesişme bölgesinde elde edilen polimerizasyon yöntemini önermiştir (Swainson, 1971). Ciraud tarafından 1971 yılında modern eklemeli imalat teknolojisinin bütün özelliklerine sahip bir toz birleştirme yöntemi geliştirilmiştir. 1979 yılında Housholder, lazer ile toz sinterlemenin ilk tanımlamasını yaparak düzlemsel tabakaların sırayla biriktirilmesini ve her tabakanın katılaşmasını araştırmıştır. Hull, 1983 yılında 3D Systems firması altında SLA makinesini tanıtmıştır. O yıllarda birçok eklemeli imalat yöntemi geliştirilmiş ve patent başvuruları yapılmıştır. Daha sonra bu teknolojiler şirketler tarafından ticarileştirilmiştir. 1990'ların ilk yarısında SLA'yı takiben Helysis Şirketi lamine nesne imalatı, Stratasys Şirketi eriyik ve yığarak modelleme, DTM Şirketi seçmeli lazer sinterleme, EOS Şirketi doğrudan metal toz lazer sinterleme, Cubital Şirketi katı zemin kütleme ve Soligen Şirketi 3B baskı teknolojilerini ticarileştirerek piyasaya sürmüşlerdir ve günümüzde giderek popüler bir imalat yöntemi olması üzerinde yapılan çalışmalarını genişletmiştir.

Eklemeli imalat temel olarak üç adımı içermektedir. Bunlardan ilki üretilmek istenen parçanın yüzeylerle temsil edilen ve hacmi olacak şekilde bilgisayar ortamında tasarlanmasıdır. İkinci adım oluşturulan tasarımın poligonlar tarafından temsil edilen STL (stereolitografi) formatına dönüştürülmesidir. Üçüncü adım olarak bir dilimleme yazılımı kullanılarak, oluşturulan STL

dosyasını üretim için kesitler halinde dilimler. Elde edilen her bir kesit kullanılan eklemeli imalat yöntemine göre 3B yazıcılar tarafından işlenerek nihai ürünün oluşmasını sağlar.

Uygulama yöntemine göre eklemeli imalat yedi kısma ayrılmaktadır. Bunlar fotopolimerizasyon, malzeme püskürtme, bağlayıcı püskürtme, malzeme ekstrüzyon, levha/sac laminasyonu, direkt enerji depolama ve toz yataklı eritme yöntemleridir. Fotopolimerizasyon yönteminde bilgisayar kontrollü ultraviyole ışın kaynağı ve polimerleşebilen reçineler yer almaktadır. Malzeme püskürtme yönteminde sıvı halde bulunan termoset polimerler kullanılır. Yazıcı kafası polimerleri dağıtarak katman katman parçayı oluşturur. Bağlayıcı püskürtme yöntemi toz bazlı bir malzeme ve bir bağlayıcıyı beraber kullanır. Malzeme ekstrüzyon yöntemi parçaları oluşturmak için termoplastik veya kompozit malzemeden sürekli filament kullanan bir üretim tekniğidir. Levha sac laminasyonu yöntemi katmanların yapıştırılmasını ve kesilmesi prensibine dayanır. Direkt enerji depolama yöntemi malzemeyi doğrudan eritip biriktirerek parçaları oluşturur. Toz yataklı eritme yöntemi parçaları oluşturmak için metal tozlarını ve tozları birleştirmek için lazer veya elektron ışınlarını kullanır.

Eklemeli imalatla hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın farklı eğimli yüzeylere sahip üretilecek modellerin hassas bir şekilde üretimi için eklemeli imalatla destek yapıları kullanılmaktadır. Destek yapılar eklemeli imalatın önemli bir elemanıdır. Bu yapılar gerilmelerin azaltılmasına, imalat sırasında oluşan ısının transferine, bir önceki katmandan farklı bir imalat yoluna sahip katmanların desteklenerek üretimine yardımcı olur. Üretilen parçanın geometrisi karmaşıklaştıkça destek yapılarının da artması gerekir. Destek yapılar imalat sırasında geometrik hassasiyeti etkileyen önemli bir faktördür ve imalat sonrasında parçadan çıkarılırken desteklenen yüzey üzerine olumsuz etkileri vardır. Kullanılan destek yapılar nihai ürünü ortaya çıkarmak için imalat sonrasında parçadan çıkarılması gereken, malzeme kullanımını ve imalat süresini arttıran imalat atıklarıdır. Bu nedenle destek yapılar üzerindeki çalışmalar eklemeli imalatın yaygınlaşması ve gelişmesi için büyük önem taşımaktadır.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Eklemeli imalat geleneksel imalat metotlarının aksine hammaddeden talaş kaldırma veya kütleli şekillendirme ile değil, ham maddenin ergitilerek katmanlar halinde birbirine eklenerek parçaların imalatı prensibine dayanır. Bu prensip tasarımın direkt olarak üç boyutlu hale getirilmesinden dolayı üç boyutlu yazdırma olarak ifade edilmektedir (ASTM F2792-12a, 2012). 3 boyutlu (3B) yazdırma teknolojisindeki malzeme çeşitliliği, parça kalitesi ve boyutsal toleransların olumlu yönde gelişmesiyle birlikte otomotiv, medikal, havacılık gibi sektörlerde kullanımı yaygınlaşmıştır.

Literatürde eklemeli imalatta parça üretiminde üretim süresi ve kullanılan üretim malzemelerinin miktarını araştırmak için yapılan çalışmalar dikkat çekmektedir. Jibin ve diğ. (2005) parçanın üretim süresini kısaltmak amacıyla, parçanın şeklini optimize ederek, destek yapılarını azaltmayı araştırmışlardır. C++ destekli açık kodu bir yazılım kullanarak geliştirilen yöntemi bir traktör parçasına uygulayarak imalat süresinin kısaltılabileceğini belirtmişlerdir. Kim ve diğ. (1994) parçaları minimum boyuta indirmek için bir optimizasyon metodu geliştirdiler. Parça yapımında meydana gelen merdiven hatalarını azaltmak için ise tavlama işlemini kullanmışlardır.

Destek yapılar üretildikten sonra üzerine oturtulan ince katman bir sonraki katman serilinceye kadar soğumaya başlayarak çekme yapmakta ve bu durum bir sonraki katmanı etkileyerek eğimli veya sarkan yüzeylerin oluşmasına sebebiyet vermektedir (di Angelo ve diğ, 2020). Oluşan bu yüzeyler bir sonraki katmanında düzgün olarak birleşmesini engelleyip üretilecek parçanın en üst katmanına kadar yüzey yapısını değiştirmektedir. Katmanların bu şekilde düzgün birleşmemesi üretilen parçanın en üst seviyesinde yüzey pürüzlülüğünü olumsuz olarak etkilemektedir. Destek yapılar parça üretiminde gerilmelerin azaltılmasına, imalat sırasında oluşan ısının transferine, bir önceki katmandan farklı bir imalat yoluna sahip katmanların desteklemesine olanak sağlarlar (Jiang ve diğ, 2018). Mercelis ve Kruth (2006) eklemeli imalat sırasında eritmenin ardından hızlı bir katılaşma olması sebebiyle artık gerilmelerin oluştuğunu ve artık gerilmelerin yapı üzerinde çatlama, çarpılma gibi istenmeyen etkilere sebep olduğunu açıklamışlardır. Strano ve diğ. (2013) SLM yöntemi ile parça üretiminde, destek oluşturma yöntemlerinden farklı olarak, hücreli destek yapılar kullanmışlardır. Hücreli destek yapılar sayesinde önemli oranda malzeme tasarrufu sağlayarak metal eklemeli imalatın sürdürülebilirliğini ve verimini arttırdığını ortaya koydular. Hussein ve diğ. (2013) DMLS yöntemi ile parça üretiminde kullanılan destek yapı miktarını azaltmak için kafes destek

yapılardan yararlanmışlardır. Deneylerini Ti6Al4V kullanarak yapmışlar ve destek yapılarının hacmini %8 oranında azaltarak imalat süresini ve kullanılan malzeme miktarını önemli ölçüde azaltmışlardır. Allen ve diğ. (1994) kullanılabilecek destek yapıların miktarını azaltmak için parçanın doğru üretim yönü ile daha az destek kullanılarak üretilebileceği üzerine çalışmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda doğru imalat yönü ile minimum destek yapısı kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Calignano (2014) destek yapılarını iki fonksiyonel alana bölerek incelemiştir. Bu alanlardan ilki genellikle dış olarak adlandırılan parça ile desteğin temas alanı, ikinci olarak ise ana destek yapısı ve destek tabanıdır (Şekil 2.1).



**Şekil 2.1** : Destek yapıların bölümleri.

Parçaların üretiminde kullanılan destek yapıların optimizasyonunu yaparak parçanın üretimine etkilerini araştırmıştır. Temas alanı parametrelerinin değişmesini altı farklı temas alanı parametresi oluşturarak Ti6Al4V ve AlSi10Mg alaşımlarını kullanarak değerlendirmiştir. Bunun için Taguchi optimizasyonu uygulamıştır. Dış yüksekliğinin hem alüminyum hem de titanyum alaşımlarında parçanın üretiminde önemli bir etkiye sahip olduklarını belirtmişlerdir. Alüminyum alaşımının üretiminde destek yapısının blok şeklinde oluşturulması anlamlı iken titanyumda önemli bir etkisi görülmemiştir. Ayrıca hem alüminyum hem de titanyum alaşımında dış tabanı aralığının ve z yüksekliğinin önemli bir etkisi görülmemiştir. Poyraz ve diğ. (2020) blok destek yapıların parçalı aralıklarının dış yüksekliğinin ve z yüksekliğinin etkilerini faktöriyel bir deneye göre araştırmışlardır. Inconel 625 malzemesi kullanılarak üretilen parçalarda daha küçük destek aralıklarında blok yapılar parçalarda daha az bozulmaya



neden olmuştur. Gan ve Wong (2016) Poyrazın bulduğu sonuçlara benzer sonuçlar bularak temas noktaları arasındaki mesafenin azaltılmasının sapmayı azalttığı sonucuna varmışlardır. Deneysel sonuçlara ek olarak simetrik ve asimetrik destek yapısının parçanın üretiminde geçici sıcaklık dağılımı arasındaki değişimini göstermek için sonlu elemanlar analizi kullanmışlardır. Asimetrik destek temas noktalarına sahip destek yapılarında sıcaklık dağılımının asimetrik olduğunu ve asimetrik katılaşmaya yol açtığı için kalıntı gerilmelerin ve büyük sapsmaların olduğunu belirtmişlerdir. Liu ve diğ. (2016) aynı parçanın üç farklı destek yapısıyla üretimin parça üzerindeki bozulmaya etkilerini araştırmışlardır. Parçalar aynı geometriye sahip olsa da destek yapılarının değişmesi parça boyutlarını değiştirmiştir. Özellikle parçanın üst uzunluklarında değişimlerin net bir şekilde olduğu belirtilmiştir. Jarvinen ve diğ. (2014) eklemeli imalatta paslanmaz çelik kullanarak yapılan üretimlerde ağ ve tüp desteklerin üretim sonrası parçadan çıkarılabilirliğini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda ağ destek yapılarının daha kolay çıkarılabildiğini ve yüzey kalitesine daha olumlu katkılar sağladığını ifade etmişlerdir. Majhi ve diğ. (1999) eklemeli imalatta katmanlar arasında meydana gelen merdiven basamağı etkisini, kullanılan destek hacmini ve destek yapıların parça ile temasını en aza indirebilmek için matematiksel bir yaklaşım sunmuşlardır. Merdiven basamağı optimizasyon formüllerinin çok yüzlü geometrilerde, destek optimizasyonu formülünün ise konveks çok yüzlülerde kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Paul ve Anand (2015) düzlemsel ve silindirik yüzeylerde destek yapısı hacmini azaltmak ve form hatalarını düzeltmek için 3B voksel tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir. Kullandıkları voksel algoritması ile destek hacmini %29 – 35 oranında, form hatalarını ise %11 – 26 oranında azaltmayı başarmışlardır. Huang ve diğ. (2009) STL modellerine dayalı bir destek algoritması geliştirerek standart destek yapıları ile karşılaştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda tasarlanmış destek yapılarının kullanılan malzeme miktarını ve imalat süresini %30 azalttığını tespit etmişlerdir. Jin ve diğ.(2015) eklemeli imalatta parçaların üretimini kolaylaştırmak için hem iç hem de dış destekler oluşturmayı hedeflemişlerdir. Üretim sırasında dış destek gerektiren alanların belirlenmesinde kesiştirme metodu ile eğim açısının eşik değeri  $35^{\circ}$  ve dış destek gerektiren alanlar ile dış noktalar arasındaki uzaklığı hesaplayarak değerlendirmişlerdir. İç destek yapıların tasarımı için parçanın duvar kalınlığına bağlı olarak dikey ve yatay yönde parçanın parçaya kesiştirme işlemini tekrar uygulamışlardır. Tasarladıkları parçayı ve destek yapılarını EYM yöntemi ile üretmişlerdir. Üretimler sonunda tasarladıkları destek yapılarının imalat süresini azalttığını belirtmişlerdir. Lee ve Lee (2017) yeni bir iç destek oluşturma algoritması geliştirerek imalat süresini kısaltmayı hedeflemişlerdir. Geliştirdikleri algoritmayı kullanarak EYM ile yaptıkları üretimler sonucunda üretim süresini ve kullanılan malzeme miktarını azaltmayı başarmışlardır. Das ve

diğ. (2015), direkt metal lazer sinterleme (DMLS) ile üretilecek olan parçanın boyutsal doğruluğunu bozmadan minimum hacimde destek yapısı kullanılacak üretim yönünü tespit etmeyi amaçlamışlardır. Gao ve diğ. (2015) kullanılan malzeme miktarını, destek kullanımını, son işlem prosesini azaltmayı amaçlayan bir 3B yazıcı modernizasyonu hedeflemişlerdir. Mevcut bir yazıcı üzerinde parçayı sabit bir tabla üzerinde üretmek yerinde 180° dönebilen bir tabla üzerinde, parçaları yüzey yüzey çevirerek PLA kullanarak üretmişlerdir. Modernize ettikleri yazıcı ile heykel modeller, bilgisayar faresi ve oyuncak üreterek test etmişlerdir. Üretimler sonucunda geliştirdikleri yazıcı ile hem kullanılan malzeme miktarını hem de destek miktarını azaltmayı başarmışlardır. Cheng ve diğ. (2019) metal eklemeli imalatta artık gerilmelerden kaynaklanan yapı hatalarını azaltmak için topoloji optimizasyonu metodunu kullanarak yeni bir destek yapı tasarlamayı hedeflemişlerdir. Tasarımlarında boşluklu ve kendi kendini desteklediğinden dolayı kafes yapıları kullanmışlardır. Önerdikleri yöntemin uygulanabilirliğini test etmek amacıyla Ti6Al4V kullanarak kübik hücreli yapı bir destek yapısı oluşturarak bir kalça implantı üretmişlerdir. Yaptıkları üretimler sonunda kullanılan malzeme miktarında %60 oranında azalma olduğunu ve optimize edilmiş destek yapılarının parçalardaki gerilme kaynaklı çatlamları önlediğini kanıtlamışlardır. Lu ve diğ. (2014) eklemeli imalatta kullanılan malzeme miktarını azaltmak için darbelere ve dış kuvvetlere dayanıklı bir dolgu optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları optimizasyonda Voronoi diyagramını kullanarak düzensiz petek yapılar oluşturmuş ve parçaların içerisine yerleştirmişlerdir. Oluşturdukları bu yapıları çeşitli numuneler üzerinde denemiş ve imalat sırasında oluşan gerilmeleri en aza indirerek güç ağırlık oranını maksimum seviyede tutmayı başarmışlardır. Schmidt ve diğ. (2014) Yüzey örnekleme metotlarından yararlanarak, sarkacak yüzeyleri belirlemiş ve destek yapıları bu noktalardan başlayarak oluşturulmasını önermişlerdir. Zhang ve diğ.(2019) standart destek yapılarına göre daha yüksek verimlilikte ve daha az malzeme kullanan “barycenter” tabanlı bir ağaç destek yapısı algoritması önerdiler. Belirledikleri noktadan destek yapıları aşağı doğru indirerek düğüm noktaları oluşturdukları ve bu noktaları kuvvetlendirerek destek yapıları oluşturdukları. Dumas ve diğ. (2014) desteklenmesi gereken yüzeylere yatay köprüler ve dikey sütunlardan oluşan bir iskele destek yapısı önerdiler. Tasarladıkları bu iskeleleri eriyik yığıma metodunu kullanarak ürettikleri numuneler üzerinde denediler. Deney sonuçlarında yüzey kalitesinin iyileştiğini, geometrik hassasiyeti arttırdığını ve kullanılan malzeme miktarının azaldığını belirttiler. Cheng ve Chou (2020) EBAM sürecinde destek malzemesi kullanımını ve üretim sonrası işlemleri azaltmak için bir destek tasarım yöntemi araştırmışlardır. Çalışmalarında ısıl destek ve ankraj tip destek yapısını önermişlerdir. Yaptıkları destek tasarımlarını sonlu elemanlar yöntemi ile analiz etmiş ve

tasarlanan yapıların termal gerilme kaynaklı bozulmaları etkili bir şekilde azalttığını göstermişlerdir.

Cloots ve diğ. (2013) kafes destek yapılarında ki destek mukavemetini arttırmak için ızgara yapısını kullanmışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda dikey ve yatay kuvvetlerin komşu destek yapılar arasındaki çapraz çubuklar tarafından emildiğini ve imalatın olumlu yönde etkilendiğini gösterdiler. Vora ve diğ. (2015) eklemeli imalatta destek yapılardan kaçınmak için “çapasız seçici lazer eritme” yöntemini kullanmışlardır. Üretim sırasında iki veya daha fazla toz malzemenin lazer ışını ile bölgesel olarak eritilebildiğini ve düşük katılma sıcaklığına sahip yeni bir alaşım oluşturduğunu belirttiler. Bu alaşımın toz yatağının ön ısıtması yardımıyla tüm yapı boyunca gerilimi azalttığını veya yarı katı durumu koruyabildiğini bu nedenle de gerilme kaynaklı bozulmaların azaldığını belirttiler.

Eklemeli imalatta parçaların üretilebilmesi için stereolitografi (STL) dosyalarına ihtiyaç duyulmaktadır. STL düzlemsel üçgen ağları ile parçanın CAD yüzeyini kaplar. STL'nin topoğrafyası düzgün bir şekilde tanımlanmadığından STL dosyalarından kaynaklanan sorunlar incelenmiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde; Leong ve diğ. (1996) STL dosyalarındaki yönler arasında örtüşen boşlukların olduğunu ve bazı bölümlerinin eksik olduğunu belirtmişlerdir. Stroud ve Xirouchakis (1999) STL dosya formatının üretim bilgilerini ve bazı fazlalıkları içermemesini büyük bir eksiklik olarak tanımlamışlardır. Navangul ve diğ. (2011) STL formatını uygulamalı olarak değiştirmek için yeni bir Vertec Çeviri Algoritması (VTA) geliştirmişlerdir. Zha ve Anand (2015) silindirik yapıları parçalar için giriş hatalarını azaltmaya yönelik bir Yüzey Tabanlı Modifikasyon Algoritması (SMA) kullanarak Giriş dosyasını değiştirmiş ve parça hatalarını azaltmışlardır. Allavarapu (2013) STL'deki düzlemsel üçgenleri Beizer yamaları ile değiştirerek giriş hatalarını en aza indirmek için bir algoritma geliştirdi. Eklemeli imalat dosyası (AMF) formatı STL formatına alternatif olarak tanıtılan, eğri üçgenler ve düzlemsel olmayan bir kombinasyonu kullanan bir dosya formatıdır. Bu format doku ve malzeme gibi bilgiler de içerir. Leite ve diğ. (2016) 3MF formatını keşfettiler. Bu format ağ yapısındaki 3B bir içeriği STL formatına göre daha iyi görselleştirdiğini belirtmişlerdir.

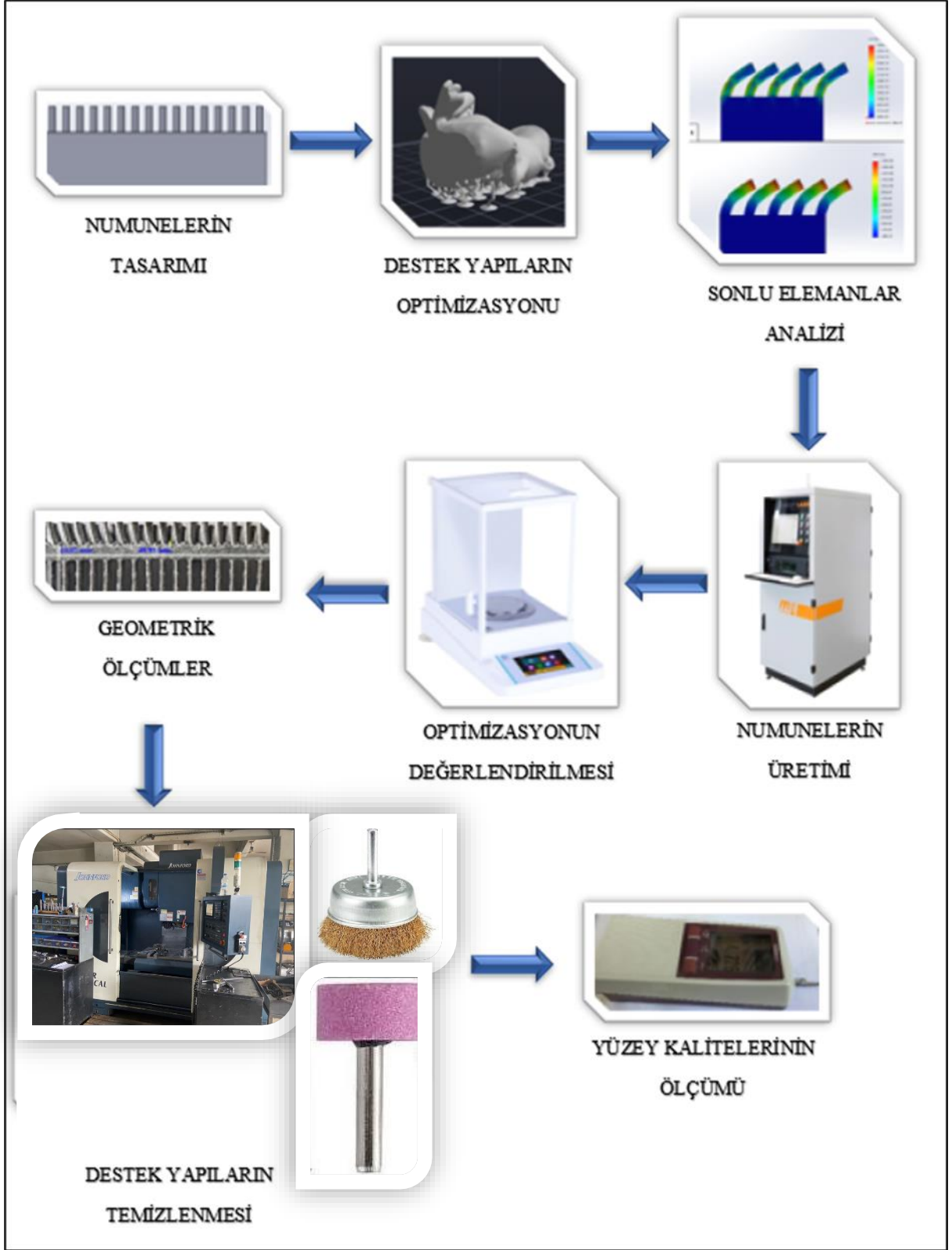
Eklemeli imalatta üretim yönü parçanın katmanlarına dik olan yönü ifade eder. İmalat yönü parçanın yüzey kalitesini, kullanılacak destek miktarını ve malzemesini etkilediği için önemli bir faktördür(Thrimurthulu ve diğ, 2004). Arni ve Gupta (2001) düzlemsel bir özelliğin düzlük hatasını dilim kalınlığının ve düzlemselliğin kosinüsü olarak formülleştirmişlerdir. Gauss kürelerini kullanarak parçadaki düzlemselliği elde etmek için en iyi yönelimleri belirlemişlerdir. Rattanawong ve diğ. (2001) minimum hacimsel hata yaklaşımını kullanarak

en iyi parça yapım yönünü belirlediler. Üretilen her parçayı çeşitli parametrelerin bir kombinasyonu olarak tanımladılar ve farklı yönlerde hacimsel hataları hesaplamışlardır. Zhao ve diğ. (2018) destek kullanmadan eklemeli imalat ile üretim yapmaya izin veren eğimli katman baskısı adında yeni bir strateji önerdiler. Üretilen parçayı eğimli olarak dilimleyerek, sarkan yapıların kendi kendilerini desteklemesini başardılar.

## **2.1. Tezin Literatürdeki Yeri ve Organizasyon Şeması**

Eklemeli imalat teknolojisindeki gelişmelerle birlikte kullanım alanları giderek artmaktadır. Gelişen bu yeni imalat yönteminin tasarım özgürlüğü, malzeme çeşitliliği gibi avantajlarının yanı sıra, kullanılan malzeme miktarının fazlalığı, üretim süresinin uzaması gibi dezavantajları da mevcuttur. Bu sebeplerden üretim süresinin azaltılması ve kullanılan malzeme miktarının en aza indirilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. İmalat sırasında destek yapıların kullanılması pek çok yöntemde mecburidir. Bu destek yapıları istenilen doğrulukta numunelerin üretimi için gereklidir. Destek yapılar hem kullanılan malzeme miktarını hem de imalat süresini uzatmaktadır. Üretim sırasında kullanılan destek yapılar üretim sonrası artık malzeme olarak değerlendirilmekte ve parçadan temizlenerek atılmaktadır.

Bu çalışma tasarım aşamasında üretilen parçanın destek yapılarını azaltmak amacıyla kullanılan metotlar ve farklı destek yapılarının kullanımı araştırılmıştır. Uygun destek yapısının tasarımından sonra bu yapıların parçadan uzaklaştırılması için kullanılan son işleme metotlarının parça üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu çalışmanın organizasyon şeması Şekil 2.2 de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Çalışmanın organizasyon şeması.

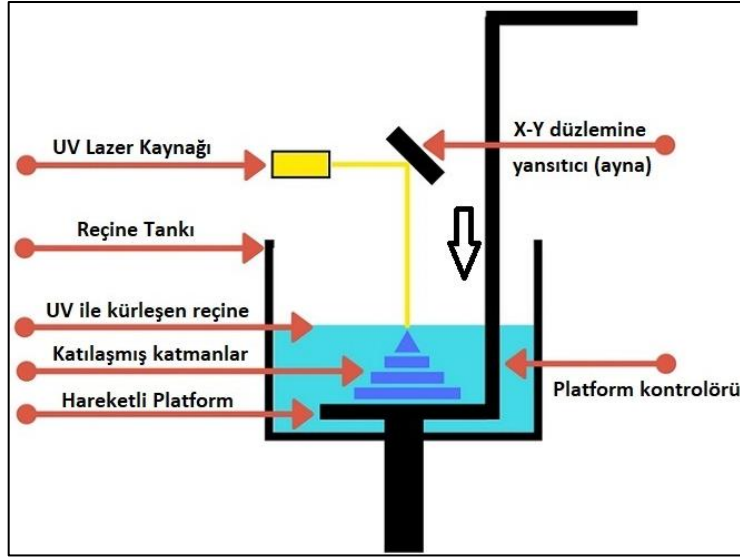
### 3. GENEL BİLGİLER

#### 3.1. Eklemeli İmalat ve Kullanılan Yöntemler

Tasarımdan imalata direkt geçiş imkânı veren eklemeli imalat temel olarak altı adımdan oluşur(Sürmen, 2019). İlk olarak üretilecek parça bilgisayar ortamında tasarlanır veya üç boyutlu tarama yöntemleri ile elde edilebilir. İkinci adım da yapılan tasarım STL formatında kaydedilir ve sonraki aşama olan dilimle programına aktarılır. Bu program STL dosyasını istenilen katman kalınlığına göre dilimler ve tasarımın G-kodlarını çıkarır. Elde edilen G-kodları yazıcıya aktarılır ve imalat süreci başlatılır. İmalat sürecinin bitmesinin ardından son adım olan desteklerin temizlenmesi işlemine geçilir. Desteklerin temizlenmesi çeşitli yöntemlerle yapılabilmektedir. Eklemeli imalat kullanılan malzemenin formuna göre ASTM F42 standardında yedi bölüme ayrılmıştır. Bunlar fotopolimerizasyon, malzeme püskürtme, bağlayıcı püskürtme, malzeme ekstrüzyon, levha/sac laminasyonu, direkt enerji depolama ve toz yataklı eritmedir (Yalçın ve diğ., 2017)

##### 3.1.1.Fotopolimerizasyon

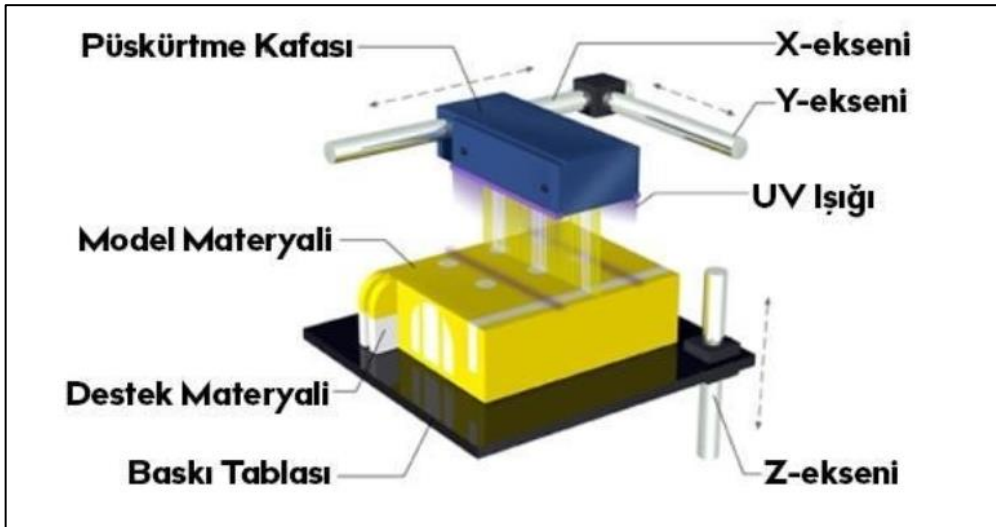
Fotopolimerizasyon yönteminin temelinde bilgisayar kontrollü ultraviyole ışın kaynağı ve ultraviyole ışın etkisi ile polimerleşebilen reçineler yer almaktadır. Bu yöntemde üretim reçine havuzundaki bir plaka üzerinde yapılır. Üretilecek ve dilimlenmiş parçanın ilk katmanı reçine üzerinde UV ışın ile katılaştırılır. Katılaştırma işlemi bittikten sonra plaka aşağı doğru hareket ederek yeni katmanı oluşturacak olan sıvı reçineyi üzerine alır ve katılaştırma işlemi devam eder. Katman katman yapılan bu işlem nihai ürün elde edilinceye kadar devam eder. Süreç sonunda oluşan parça makinadan çıkarılır ve UV ışın altında bekletilerek tamamen katılması sağlanır (Altun-Çiftçioğlu, 2010). Fotopolimerizasyon işleminin yüksek boyut hassasiyeti, yüzey kalitesi gibi avantajların yanında maliyetinin yüksek olması, imalat süresinin uzun olması, kullanılan reçine türlerinin sınırlı olması ve üretilen parçalarda düşük mukavemet gibi dezavantajları vardır. Fotopolimerizasyon işleminin üretim şeması Şekil 3.1 de verilmiştir.



Şekil 3.1 : Fotopolimerizasyon yönteminin üretim şeması.

### 3.1.2. Malzeme püskürtme

Malzeme püskürtme yöntemi 2B yazıcılara benzeyen bir eklemeli imalat sürecidir. Malzeme püskürtmede, sıvı halde bulunan termoset polimerler kullanılır. Yazıcı kafası ultraviyole ışık altında katılaştıran ışığa duyarlı bir malzemenin damlacıklarını dağıtarak katman katman parçayı oluşturur. Malzemeyi serme ve katılaştırma işlemi aynı anda yapılır (Yalçın ve diğ., 2017). Bu yöntemde üretilen parçalar yüzey kalitesi ve boyut hassasiyeti yüksek parçalar üretebilir. Üretilen parçalar homojen mekanik ve termal özelliklere sahiptir ancak ışığa duyarlıdır ve mekanik özellikleri zamanla bozulabilir. Malzeme püskürtme işleminin üretim şeması Şekil 3.2 de verilmiştir.



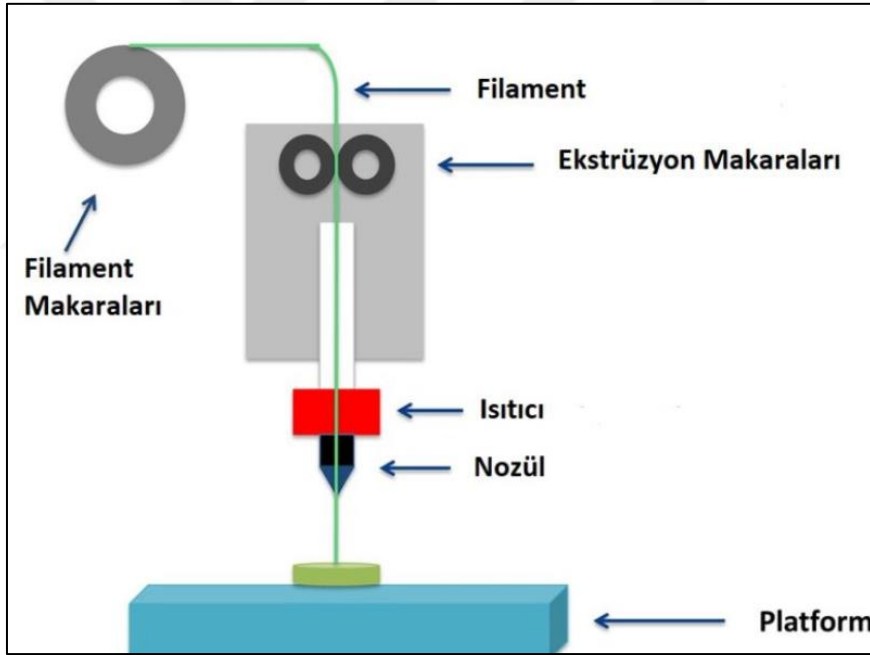
Şekil 3.2 : Malzeme püskürtme metodunun üretim şeması.





### 3.1.4. Malzeme ekstrüzyonu

Malzeme ekstrüzyon yöntemi, Eriyik Yığarak Modelleme (EYM) olarak S. Scott Crump tarafından tescillenmiştir. Bu yöntem parçaları oluşturmak için termoplastik veya kompozit malzemeden sürekli filament kullanan bir üretim tekniğidir. Bu teknikte kullanılan malzeme farklı aşamalardan geçirilerek plastik bir tel haline getirilir ve filament olarak adlandırılır. Filament genellikle ekstrüder olarak adlandırılan ısıtmalı bir kafa aracılığıyla bobinden beslenir. Eritilen malzeme ekstrüderden dışarı itilir ve ısıtılabilen bir baskı platformuna serilir. İlk katmanın oluşturulduktan sonra platform aşağı doğru hareket eder ve ikinci katman ilk katmanın üzerine inşa edilir. Bu döngü nihai ürün elde edilinceye kadar devam eder (Yalçın ve diğ., 2017). EYM metodunun şematik gösterimi Şekil 3.4 de verilmiştir. Bu yöntemin avantajları, malzeme çeşitliliği, kolay malzeme değiştirmeye elverişli olması, düşük başlangıç maliyetleri, küçük ve ince parçalar için daha hızlı imalat süresi ve diğerlerine kıyasla daha düşük proses sıcaklığıdır. Dezavantajları ise; görünür katman çizgileri, destek yapıların gerekli olabilmesi, imalat yönü boyunca zayıf mukavemet, bükülme, delaminasyon ve sıcaklık dalgalanmalarına karşı hassas olmalarıdır.

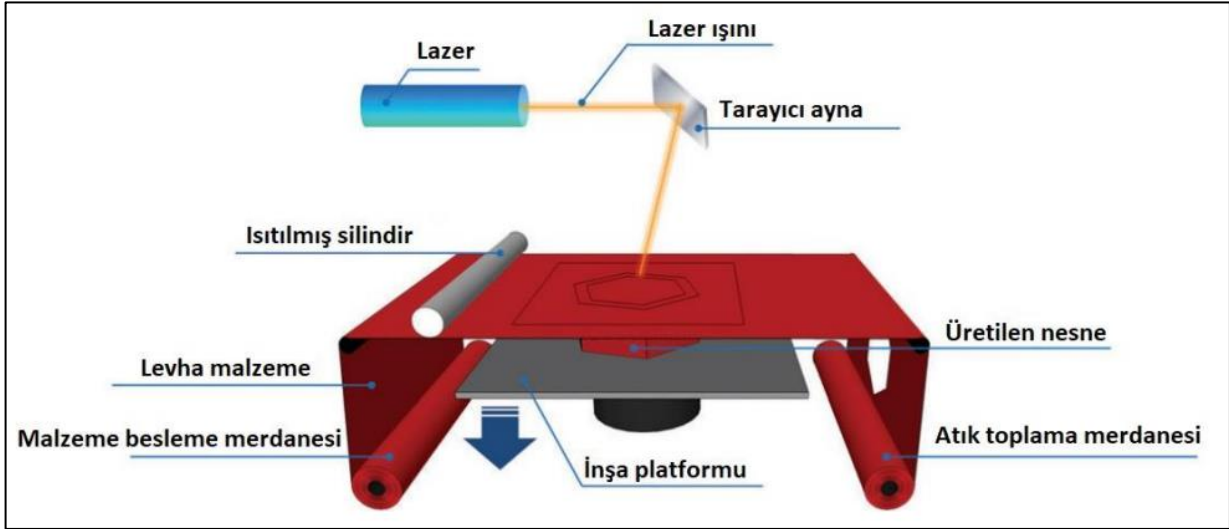


Şekil 3.4 : Eriyik yığarak modelleme metodunun üretim şeması.

### 3.1.5. Levha/sac laminasyonu

Levha/sac laminasyonu yöntemi katmanların yapıştırılması ve kesilmesi prensibine dayanır. İmalat platformu üzerine katmanı ilerleten besleme mekanizması, katmanı aşağıdaki katman ile birleştiren sıcak ve basınçlı merdane ve her katmanın dış hattını kesmek için lazer bileşenlerinden oluşur. Her bir kesme işleminden sonra platform katman kalınlığı kadar aşağı iner ve yeni tabaka eklenir. Daha sonra platform yükseltilecek merdane ile yapışması sağlanır ve kesme işlemi yapılır. Bu yöntemde rulo haline getirilebilen

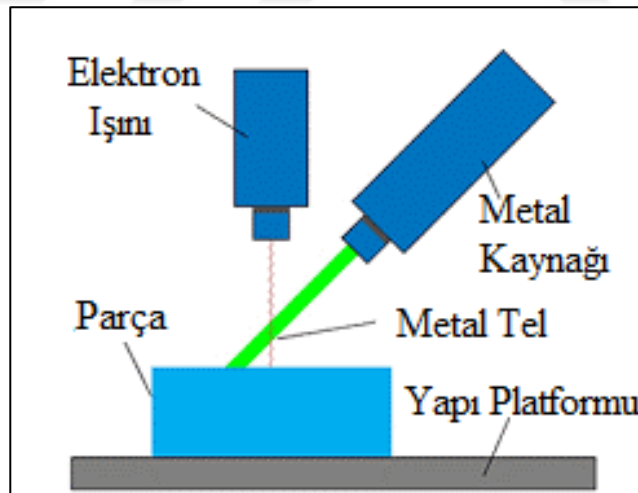
plastik ve sac metal malzemeler kullanılmaktadır. Levha/sac laminasyonu metodunun şematik gösterimi Şekil 3.5 de verilmiştir.



Şekil 3.5 : Levha/Sac laminasyonu metodunun üretim şeması.

### 3.1.6.Direkt enerji depolama

Direkt enerji depolama yöntemi malzemeleri doğrudan eriterek ve bunları iş parçası üzerinde katman katman biriktirerek parçalar oluşturur. Bu eklemeli imalat yöntemi metal tozları veya tel kaynak malzemeleri kullanılır. Bu metodun şematik gösterimi Şekil 3.6 da gösterilmiştir.



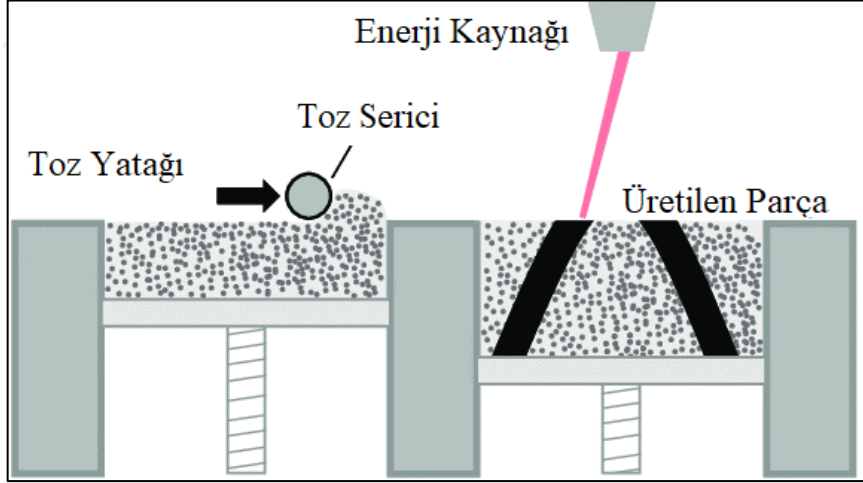
Şekil 3.6 : Direkt enerji depolama metodunun üretim şeması.

### 3.1.7. Toz yataklı eritme

Toz yataklı eritme yöntemi parçaları oluşturmak için metal tozlarını ve tozları birleştirmek için lazer veya elektron ışınlarını kullanır. Üretim yeri azot, neon, argon gibi gazlarla doldurulmuş ve vakum altındaki bir ortamdır. Bu metotta metal tozları üretim platformunun üzerine serilir ve lazer ya da elektron ışını ile birleştirilir. Birleştirme sonucunda platform katman kalınlığı kadar aşağı iner ve yeni katman serilir. Parça oluşturulana kadar bu döngü devam eder (Yalçın ve diğ, 2017). Bu yöntemin şematik gösterimi Şekil 3.7 de gösterilmiştir. Toz yataklı eritme metodunda ortaya çıkan artık gerilmeler parçaların üzerinde bükülmelere ve imalat hatalarına sebep olur. Bu hataların en aza indirilmesi için parçanın soğumasına yardımcı olmak üzere hava kanallarının kullanımı ve üretim yönü iyi seçilmelidir.

Toz yataklı eritme yöntemi temel olarak üç farklı yöntem ile gerçekleştirilir. Bunlar seçici lazer sinterleme, seçici lazer eritme ve elektron ışını ile eritmedir. SLS ve SLE teknik olarak eritme ve birleştirme işlemi için lazer ışını kullanılırlar. Ancak SLS ile poliamit, alümin ve kauçuk gibi malzemeler kullanılırken, SLE yönteminde sadece metal parçaların üretimi için kullanılır.

EIE yönteminde ise katılaştırma işlemi için yüksek enerjili bir elektron ışını kullanılır. Bu yöntem ile üretilen parçalarda SLM ve SLS ye göre daha az kalıntı gerilme oluşur ve geometrik hassasiyeti daha yüksektir.



Şekil 3.7 : Toz yataklı eritme metodunun üretim şeması.

### 3.2. Eklemeli İmalatta Destek Yapılar ve Önemi

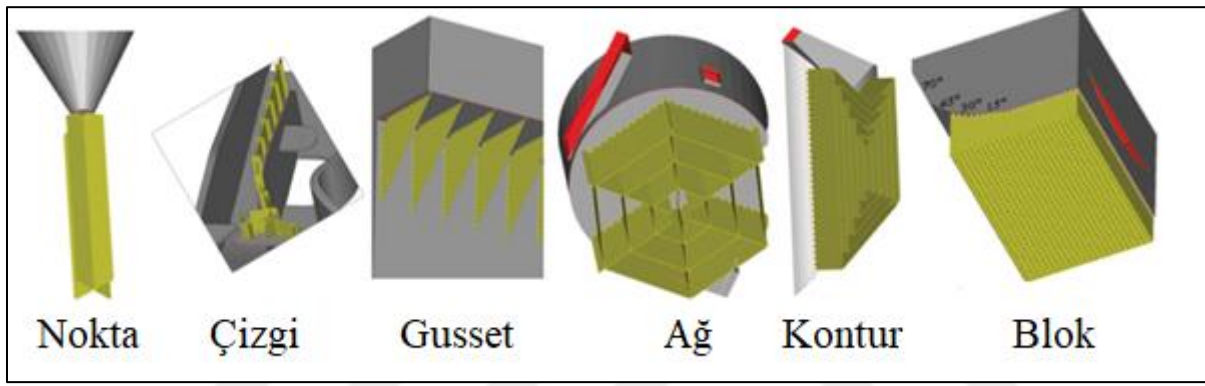
Bugün itibarıyla, metal bazlı katkılı üretim için çoğu sistem toz yataklı eritme metodunu kullanır. Eklemeli üretim, otomotiv ve havacılık gibi kritik endüstrilerde çeşitli üretim uygulamaları ile kanıtlanmış bir teknoloji haline gelmiştir. Bununla birlikte, toz yatak bazlı üretim için bileşenlerin tasarımı, parçanın şekillendirilmesinden daha fazlasıdır.

Eklemeli imalat ile üretilen neredeyse tüm nesnelere destek yapıları gerektirir ve eklemeli imalatın tasarımının başarılı üretiminde önemli bir faktördür. Tasarımcının üretim sürecinde bir parçanın boyutsal kararlılığını korumak için destek yapılarının doğru şekilde yerleşimini ve miktarını seçebilmelidir. Destek yapılar kavramı, üretim maliyetlerinin önemli bir kısmını oluşturur. Yetersiz destek yapıları parça geometrisinin bozulmasına neden olabilirken, çok yoğun olarak desteklenen bir parça üretim süresini artırır ve üretim sonrası ek işlem maliyetlerine neden olur.

Destek yapılar, baskı sırasında parçanın geometrisinden dolayı üretim yöntemine bağlı olarak parçayı destekleyen kısımdır. Tüm eklemeli imalat işlemleri destek yapılarına ihtiyaç duymamaktadır. EYM, DLS gibi üretim teknikleri genellikle destek gerektirirken, toz yataklı imalat yöntemlerinde genellikle destek yapılarına ihtiyaç duyulmaz. Eklemeli imalat sürecinde ısıtılarak ekstrüde edilmiş malzeme katmanları altlarındaki malzeme katmanlarına yapıştırılarak bir baskı yatağı oluşturulur. Ancak açılı bir yüzey olması durumunda alt katmanlarda sarkmalar meydana gelebilmektedir. Bu açı  $45^{\circ}$ 'yi aştığında sarkan kısım için genellikle destek gerekir. Destek kullanılmadığı durumlarda malzemenin ağırlığına çökme ile karşılaşılır ve üretim sürecinin başarısız olmasına neden olur. Destekler ihtiyaç duyulduğunda parça tasarımına entegre edilmeli ve üretildiğinde parçayı istenilen geometride üretilebilmektedir. Bu süreç eklemeli imalat için ekstra zaman ve hammadde ve ardından destek yapılarının üretim sonrası kaldırılması anlamına gelmektedir. Eklemeli imalat parçaları için destek yapıları tasarım ve tip yapısından farklılık gösterse de genel olarak ağaç ve blok yapılar olmak üzere iki kısımda kategorize edilirler. Ağaç yapılı destekler dallara veya gövdelere benzeyen yapılardır. Bir parçayı sarabilir ve çıkarma kolaylığı yüzünden açılı yüzeylere düzgün bir şekilde oturtulabilmektedir. Ağaç destekler hızlı şekilde tasarlanabilmekte, uygulanabilmekte ve test edilebilmektedir. Ağaç desteklerdeki dal benzeri yapılar belirli alanları desteklemek için uzak mesafelere ulaşma imkânını sağlamaktadır. Duvara benzeyen ve montaj noktaları ile genellikle bir kafes yapısı gibi oluşturulmakta ve parçanın yüzeyine dik olarak üretilmektedir. Blok destekler ağaç desteklere göre daha dayanıklıdır. Çıkarılması daha kolaydır. Yüksek hacimli üretim için ise verimlidir.

Deneyim, yazılım becerileri ve toz yatak prosesinin gücü ve sınırlamaları hakkında derinlemesine bilgi birikiminin doğru kombinasyonunun bir sonucu olarak doğru dengeyi bulmak önemlidir. Destek yapılarının oluşturulmasında geometrinin durumuna bağlı olarak mevcut yazılımlar farklı olanaklar sunmaktadır. Küçük yüzeylerin nokta destekler ile üretilmesi mümkündür. Çizgi desteği ile ince yüzeyler veya kenarlar desteklenebilir. Yapı içerisinde büyük çıkıntılar var ise parçanın iki yüzeyi arasında bir destek yapısı oluşturulabilir buda gusset

desteği olarak adlandırılır. Yuvarlak yüzeyler için ağ destekleri kullanılmaktadır. Daha geniş bir alanın desteklenmesine ihtiyaç varsa kontur desteği veya blok desteği seçilmelidir. Bu desteklerin hepsinde parça ile desteğin temas noktalarında dişler kullanılmaktadır. Blok destekleri parçanın desteklenen yüzeyinin altında bir ızgara yapıda oluşmaktadır. Bu ızgara yapı oldukça güçlü ve termal bozulmaya karşı iyi bir özelliğe sahiptir. Izgaranın aralığı, açısı kalınlığı ve bağlantı dişleri ile ilgili parametreler yazılımlarda değiştirilebilmektedir. Destek gerektiren parçaların yüzeyleri yapıdan yüksekse bu blok desteklerin yapısını da artmaktadır. Bu problemlerin üstesinden gelmenin bir yolu bir kökten ayrılan yapı platformları oluşturarak parçanın gerekli tüm yüzeylerinin desteklendiği ağaç destek yapılarıdır. Bu destek yapılar Şekil 3.8 de gösterilmiştir.



**Şekil 3.8 :** Eklemeli imalatta kullanılan destek türleri (Materialise 2018).

Destek yapılar ile ilgili genel olarak 45° kuralı vardır. Bu kural 45° veya daha büyük çıkıntılar için destek gerekeceği, 45°'nin altında ise destek gerekmeyeceğini öne sürmektedir. Eklemeli imalatta 45° genel kuralı yazılımlarda uygulanmakta ve parça tasarımının karmaşıklılığına ve kullanılan malzemeye bağlı olarak destek yapılarına duyulan ihtiyaç değişmektedir. Bazı durumlarda köprü yapıları destek yapılar alternatif olarak kullanılmaktadır. Bu teknik de parçanın geometrisinden ödün vermeden ısıtılan malzemenin kısa bir mesafe boyunca (genellikle 5 mm'den az) uzatıldığı veya gerdirilerek üretim yapılan bir tekniktir.

Farklı eklemeli imalat yöntemlerinin destek yapıları gerektirmesinin farklı nedenleri vardır. Bazı yöntemlerde imalat sürecinde yerçekiminin neden olduğu sarkmalara ve çökmelere karşı koymak veya üretim sırasında üretilen parça ile bağı bulunmayan barçaların bağlanmasını sağlamak için kullanılır. Destek yapılar aynı zamanda çoğu eklemeli imalat yönteminde imalat sırasında oluşacak termal gerilmeleri ve katılşma sonucu oluşacak çekme etkilerini azaltmak için de kullanılabilir. Bu yapılar ayrıca parçanın yapı platformuna sağlam bir şekilde bağlanması içinde kullanılır. Genel olarak destek yapıların kullanım amaçlarını üçe ayırabiliriz.

- Özellikle metal eklemeli imalat yöntemleri olmak üzere oluşacak olan termal gerilmeleri, şekil bozulmalarını ve artık gerilmeleri azaltmak amacıyla ısı transfer kanalı olarak
- Eklemeli imalatta aşağıdaki mevcut yüzey üzerine eklemeye yapılarak parça üretilir. Bu nedenle malzemenin hedeflenen yükseklikte eklenmesini ve tasarlanana çıkıntılarının oluşturulması için
- Dengesiz ve açılı yüzeylerin üretiminde hammadde parçanın ağırlığını kaldıramadığında baskı işlemi sırasında hareket edebilir. Bu durumu engellemek için destek yapılar bir sabitleyici rolü oynar.

Destek yapılar yukarıdaki avantajlarının yanında yeni sorunlar da çıkarır. Destek yapısının çıkardığı yeni sorunlar;

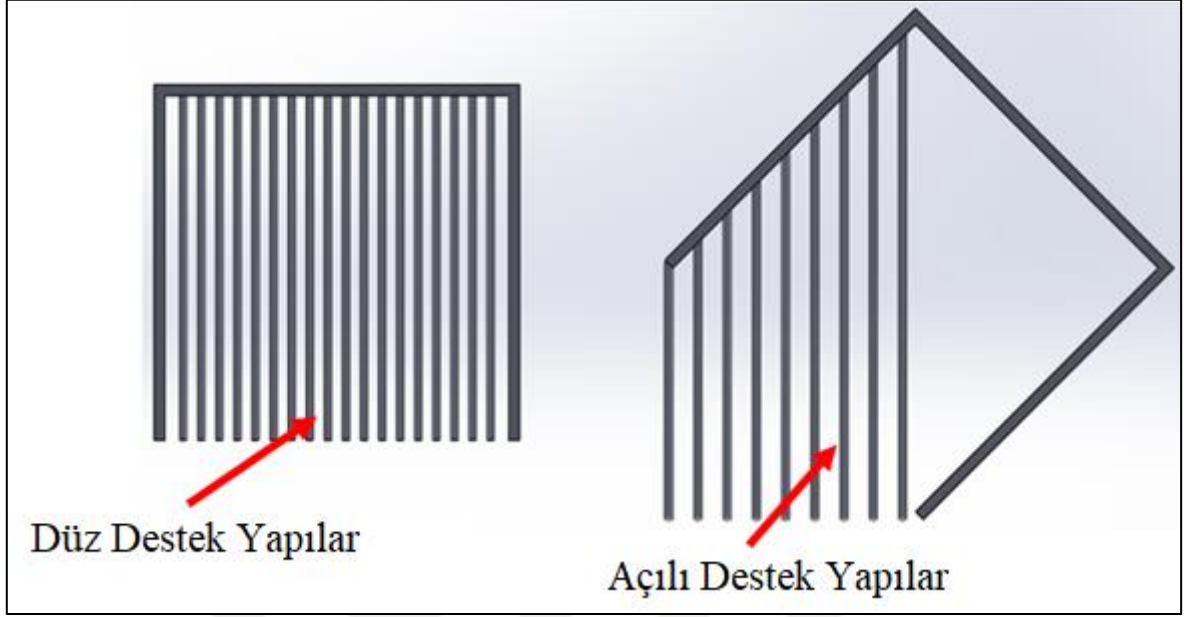
- Üretim sonrasında özellikle metal proseslerde üretim sonrası işlemler gerektirir. Kullanılan destek yapılar imalat sonrasında kesme, taşlama veya frezeleme gibi ek prosesler meydana getirir. Bu da üretim süresini ve üretim sonrası yüzey kalitesini etkileyecektir.
- Destek yapılar parçadan temizlendikten sonra geri dönüştürülmezse üretim artığı olur ve hammadde maliyetini artırır.
- Kullanılan destek yapılarının üretim sırasında yapılması gerektiğinden imalat süresini uzatır ve bu da kullanılan enerji miktarını artırır.

Destek yapıları eklemeli imalat sürecinde istenmeyen bir parça olarak kabul edilmektedir. Ne kadar fazla destek yapısı kullanılır ise o kadar fazla malzeme kullanılacak ve temizlenme işlemleri sonrası maliyetlerin yanı sıra yüzey kalitesi de düşecektir. Öte yandan destek yapıları parçanın yapı platformunu oluşturmak için gereklidir. Bu sayede parçanın kıvrılması yeni katmanlarda oluşabilecek hataların azalması ısı transferinin sağlanması gibi imalatı kolaylaştırmaktadır. Minimum miktarda destek uygulanarak tasarımın yapılması ve parça oryantasyonun hesaba katılması için 3B baskı yazılımlarında parçanın geometrisine bağlı olarak çeşitli destek türleri yer almaktadır. Üretilen parçalarda desteklerin çıkartılmasını kolaylaştıran veya son işlemeyi belirleyen dört farklı adım yer almaktadır.

### **3.2.1. Açıl destekler kullanılarak destek temasının azaltılması**

Parçanın geometrisine bağlı olarak destek yapıları, parçadan parçaya temaslı bir şekilde kullanılmaktadır. Bu genellikle üretim sonrası desteklerin temizlenmesi için iki katı bir işlem demektir ki bu durum her zaman arzu edilmez. Fakat destek yapılarının parçaya iki kez temas halinde olması gerekli değildir. Açılı destek yapıları kullanılarak destek yapısının alt kısmı yapı platformuna bağlanıp yüzey kalitesi sınırlandırılabilir. Bunun yanında parçaya iki kez temas ederek destek kullanılmaktan kaçınılmıyor ise desteği daha kolay temizlenebilecek bir alana

yönlendirilmesi avantaj sağlayacaktır. Açılı kullanılan destek yapıları ile düz destek yapıları Şekil 3.9 da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 : Kullanılan destek yapıları; (a) Düz destek yapılar, (b) Açılı destek yapılar.

### 3.2.2.İnce diş tip destek kullanılarak destek temasının azaltılması

Destek yapıların yeterince güçlü olmasını aynı zamanda çıkarılmasını kolaylaştırmak için güçlü destek yapıları ince dişler kullanılarak desteklerin bağlantısı parçaya sağlanır. Güçlü bir bağlantıya ihtiyaç varsa dişlerin parçaya belirli oranda girmesine izin verilmelidir. Aksi takdirde bağlantı kopabilir ve tabaka kaymasına neden olabilir. Dişler dikkatli bir şekilde çıkartılmadığında özellikle ince duvarlar ve hafif yapılar gibi hassas özellikli parçalarda istenmeyen çukurlara neden olabilir. Bu nedenle kum saati şeklinde olan önceden tanımlanmış kırılma noktaları oluşturulmasında fayda vardır. Bu noktalarda kırılma sonrası geri kalan parçayı çıkarmak için çeşitli yüzey temizleme işlemleri uygulanabilir.

### 3.2.3.Ölçeklendirme kullanılarak destek yapıların azaltılması

Destek yapısı genişliğinin parça üzerinde olduğu gibi yapı platformunda da her zaman eşit olması gerekmez. Güçlü bir platform bağlantısı gerekmiyor ise son işleme ihtiyaç duyacak alanı azaltmak için ölçek küçültülebilir. Ölçek küçültülürken kendinden destekli açının korunması önemlidir. Bunu yanında destek yapısını güçlendirmek ve destek yapısının dengesini sağlamak için uzun ve ince geometriler kullanılarak ölçeğin artırılması da gerçekleştirilebilir.

### **3.2.4.Parça blok destekler kullanılarak destek yapıların azaltılması**

Hacimsel destekler tamamen katı iken blok destekler eriyik havuzunda belirli kalınlıktaki çizgilerin bir araya getirilerek oluşturduğu ızgaralardan meydana gelir. Parçalı blok destekler veya destek yapıları arasındaki boşluk desteğin çıkarılmasını kolaylaştırır. Ancak bu işlem uygun parametreler kullanılarak yapılmalıdır. Örneğin; destekler manuel olarak kaldırılıyor ise bloklar arası mesafe temizleme aletinin yerleşmesi için yeterince büyük olmalıdır.

### **3.3. Destek Yapıların Optimizasyonu**

Eklemeli imalatla birçok parçanın üretiminde çarpılmayı ve yapıda oluşacak hasarı önlemek için destek yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Destek yapılarının gerekliliğini göstermek için ise “YHT” tekniği kullanılmaktadır. Bu teknik içerisinde yer alan “Y” harfi 45° uzanmakta ve çıkıntılarının açısı destek yapılarına ihtiyaç duymamaktadır. Çıkıntı açısı 45°’yi aşarsa destek yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. “H” harfinde ise harfin iki dikey elemanı birbirine göre 5 mm’den daha az mesafede ise yatay elemanı köprü tekniği ile yazdırmak mümkün olabilmektedir. Dikey elemanlar arasındaki mesafe 5 mm’den fazla ise yatay eleman için destek gerekmektedir. “YHT” tekniğinde “T” harfinde ise harfin iki kolu 90° ve yatay konumda uzanır ve destek yapıları gerektirmektedir. Çıkıntı açısının ötesinde diğer faktörlerde destek yapılarına olan ihtiyacı etkilemektedir. Örneğin 3B yazıcının kalitesi, yazdırma hızı gibi parametreler önemlidir. Yazdırma hızı düşük olan yazıcılar destek yapılarına olan ihtiyacı arttırabilmektedir.

Ancak destek yapılarının kullanımı parçanın üretiminde verimi azaltmaktadır. Destekli olarak üretilen parçaların inşa edilmesi daha uzun sürmekte, daha fazla malzeme kullanılmakta ve üretim sonrası temizlenmesi gerekmektedir. Buna bağlı olarak yer yer parçaya zarar verebilmektedir. Destek yapılarının olumsuz etkilerini azaltmak için sürece bağlı olarak oluşan hataları en aza indirmek, destek yapısı malzemesini azaltmak, üretim süresini ve işleme sonrası prosesi azaltmak amacıyla desteklerin optimize edilmesi ve son işleme adımlarını hassas bir şekilde gerçekleştirilmesi parçanın üretim verimliliğini etkilemektedir. Bu yapıların azaltılması ise optimizasyon ile mümkündür.

Destek yapıları çıkarılırken dikkatli olunmalıdır. Çünkü bunlar söküldüğünde bitmiş parçaya zarar verebilir veya yüzeyde izler bırakabilmektedir. Bu faktörler göz önüne alındığında parçaların ideal olarak destek yapılarına olan ihtiyacı en aza indirecek veya ortadan kaldıracak şekilde tasarlanmalı ve mümkün olduğunda parçaların kalitesi, maliyeti ve üretim açısından



optimize etmek için eklemeli imalatta destek teknikleri geliştirilmelidir. Destek yapılarının azaltılmasına yönelik stratejiler sırasıyla;

### **3.3.1.Oryantasyon (yönelme)**

Parçaların baskı yatağı üzerindeki yönü destek yapılara olan ihtiyacı etkileyebilmektedir. Çıkıntılı bir parça için parçanın yönünün değiştirilerek örneğin parçanın arkasına veya yanına dönderilerek üretim yöntemi destek yapılara ihtiyacı ortadan kaldıracaktır. Oryantasyonun doğru olarak yapılması hem parça geometrisini hem de yüzey kalitesini olumlu yönde etkiler(Bahçe ve diğ., 2022). Ayrıca “YHT” tekniğindeki Y, H ve T harflerinin sırt bölgelerine yerleştirilerek herhangi bir sarkan elemanın yanı sıra destek yapılara ve köprülere olan ihtiyacı ortadan kaldıracaktır.

### **3.3.2.Parça Geometrisi**

Bu yöntemde sınır şartlar dahilinde tasarlanan parçadaki çıkıntıların kaldırılması veya açılarının 45° nin altına düşürülmesini içermektedir. Gerçekte işlevsel gereksinimlere bağlı olarak ortadan kaldırılması imkânsız haldedir. Ancak parçanın geometrisini daha fazla kendi kendini destekleyen bir hale getirmek için, topoloji optimizasyonu, pah yapılar, köşebentler ve yarıçaplar gibi alternatif tasarım öğeleri eklenebilir.

### **3.3.3.Parça Ayırma yöntemi**

Eklemeli imalat teknolojisi karmaşık geometrilerin tek parça olarak üretilmesini sağlamaktadır. Ancak bu parçaların ihtiyaç duyduğu destek miktarları, kaliteleri veya maliyetleri azaltılırsa, parçayı daha sonra birleştirilebilecek daha küçük parçalara bölerek üretmek avantajlı olabilir. Örneğin küresel parçalar önemi ölçüde desteğe ihtiyaç duymaktadırlar. Fakat bunları ikiye bölerek, geniş düz bir yüzey oluşturarak tamamen ortadan kaldırmak mümkündür.

### **3.3.4.Destek yoğunluğu**

Destek yapılarına uygulanan baskıları ne kadar güçlü olmaları gerektiğini ve bunları üretmek için ne kadar malzeme gerektiğinin belirlenmesini içermektedir. Başarılı ve uygun bir maliyet ile üretim sağlamak için destek yapılarının sarkan elemanın boyutunu destekleyecek kadar olduğundan emin olunmalıdır. Ancak destek yapısı ne kadar yoğun olursa baskı sonrası temizlik o kadar zor olacaktır.

### **3.3.5.Çözünebilir Destekler**

Bazı eklemeli imalat teknolojilerinde ikinci bir baskı nozülü aracılığıyla ayrı bir çözünebilir malzemeden destek yapıları basılabilir. Üretim sonrası bozulmamış bir parça elde etmek için bu destek yapıları suya veya kimyasallara daldırılarak çözündürülürler. Çözünebilir destekler deste yapısının çıkarılması işlemi sırasında bitmiş parçanın zarar görme olasılığını en aza indirir. Birçok EYM yönteminde çözünebilir destekler kullanılmaktadır. DLS ve SLE yöntemlerinde ise çözünebilir destekler kullanılmaz.

### **3.4. Destek Yapıların Kaldırılması**

Üretim işlemi tamamlandıktan sonra üretilen parça yapı platformundan sökülür ve destek yapılarının temizlenmesi gereklidir. Destek yapılar standart destek yapıları ve çözülebilir destek yapıları olarak ikiye ayrılır (Sürmen, 2019). Standart destek yapıları el aletleri ile koparılarak veya frezeleme, taşlama ve kumlama gibi metotların yardımı ile temizlenebilir. Frezeleme yöntemi ile parçanın kalitesi korunur ve desteklenen alanlar frezelendiğinden ya da parlatıldığından ek bir işlem adımına gerek yoktur. Bu işlem merdiven basamağı gibi parça üzerindeki olumsuz etkileri ortadan kaldırmak için yüzey geometrisine bağlı olarak parçaya eklenen dış yüzeylerin temizlenmesi işleminde de kullanılmaktadır.

Çözülebilir destek yapıları ise suda veya malzeme için geliştirilmiş solüsyonlar içinde bekletilerek temizlenir. Bu temizleme yönteminde çift malzeme kullanabilen bir yazıcı kullanılarak iki farklı malzeme ile üretim yapılmalıdır. Temizlenmesi kolay olan ve son işlemi azaltan bu yöntem üretim maliyetlerini oldukça arttırır.

## 4. MATERYAL ve METOT

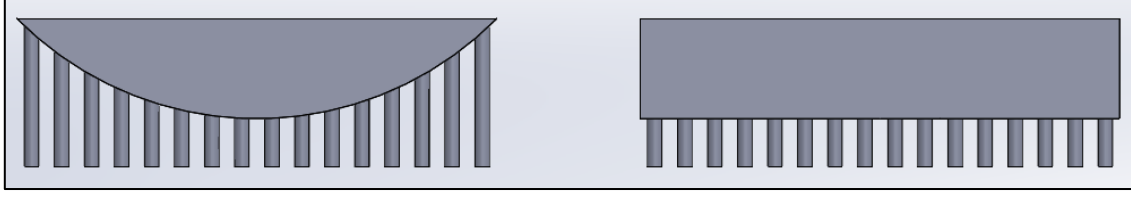
### 4.1. Deney Numunelerinin Tasarımı

Optimizasyon deneylerinde bir kurbağa modeli kullanıldı. Kullanılan kurbağa modeli Şekil 4.1 de gösterilmiştir. Kurbağa modeli kıvrımlı yüzeylerinden dolayı destek kullanmadan üretilmeyeceği ve destek yapısının etkilerinin rahatça gözlemleneceği düz yüzeylerinin olmasından dolayı seçilmiştir.



**Şekil 4.1 :** Destek yapıların etkilerinin incelenmesi için kullanılan örnek model.

Temizleme deneylerinde kullanılacak parçalar ise optimize edilmiş ve standart destek yapılar kullanılarak üretilecek şekilde ve destek yapılarının kaldırılmasının eğimli ve düz yüzeyde ki etkilerini incelemek amacıyla Şekil 4.2 deki gibi tasarlandı. Düz numuneler 50 mm uzunluğunda, 10 mm genişliğinde ve 10 mm boyunda, dairesel numune ise 50 mm kiriş uzunluğunda, 10 mm genişliğinde ve 70 mm çapında bilgisayar ortamında tasarlandı.

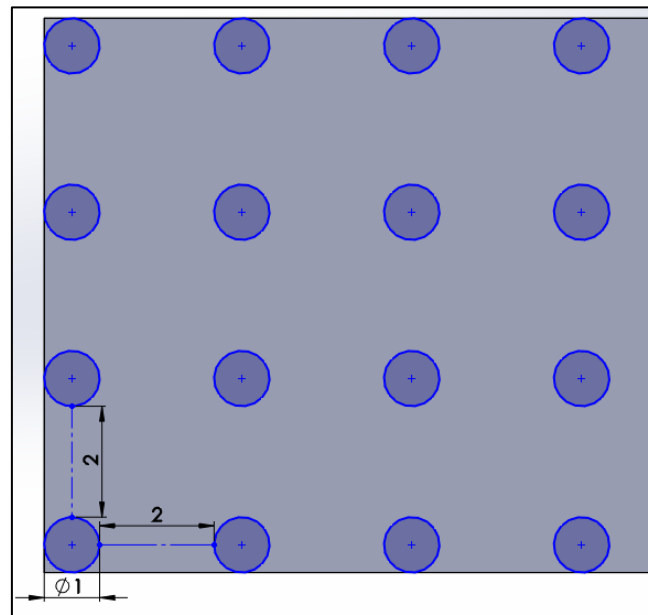


Şekil 4.2 : Tasarlanan deney numuneleri.

#### 4.2. Destek Yapıların Optimizasyonu

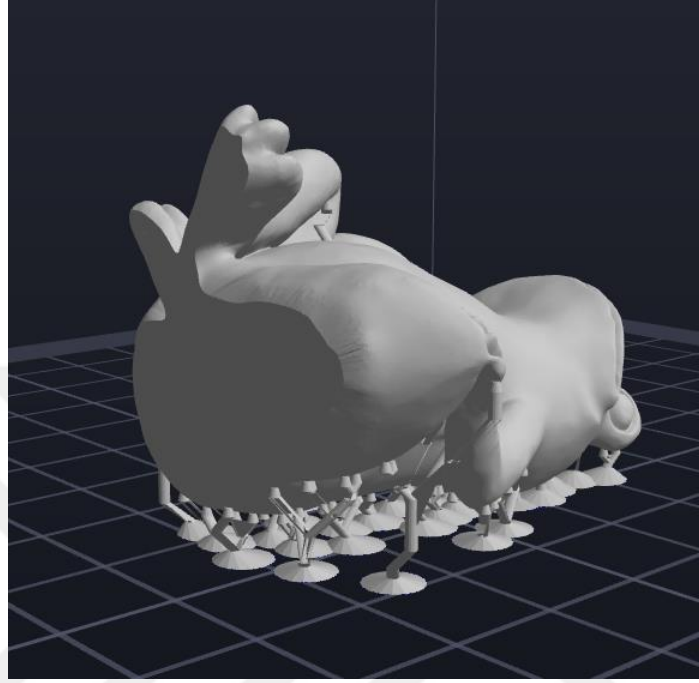
Destek yapılar, sadece imalat sırasında yüzeylerin sarkmasını ve bozulmasını engellemek amacıyla değil, aynı zamanda üretilen parçaların yapı düzleminden kaldırılabilmesi için gereklidir. Düz numunelerde destek yapılar, ısı birikimini engellemek ve termal gerilmelerin önüne geçmek amacıyla ince çubuk yapılar ve ısı transferini kolaylaştırmak için geniş boşluklar oluşturacak şekilde numunenin 50 x 10 mm olan yüzeyine, dairesel yüzeylerde ise eğri orta noktasından başlanarak daireselliği kapsayacak şekilde dilimleme yazılımı aracılığı ile standart olarak yerleştirildi (Şekil 4.2).

Destek optimizasyonu için öncelikle eklemeli imalatta destek yapı kullanılmadan üretilebilen kritik açılar  $45^\circ$  olarak belirlendi. Tasarlanan numunelerin imalat sırasında yapı tabanına bakan yüzlerinde desteklenmesi gereken yüzeyler yani  $45^\circ$  büyük alanlar tespit edildi. Dilimleme yazılımları ile atılan standart destek yapılar incelendiğinde destekler arası optimum mesafenin 2 mm olduğu tespit edildi. Desteklenecek alanlara 2 mm aralıkla desteklerin başlayacağı noktalar belirlendi. Desteklerin başlangıç noktaları Şekil 4.3 de gösterilmiştir.



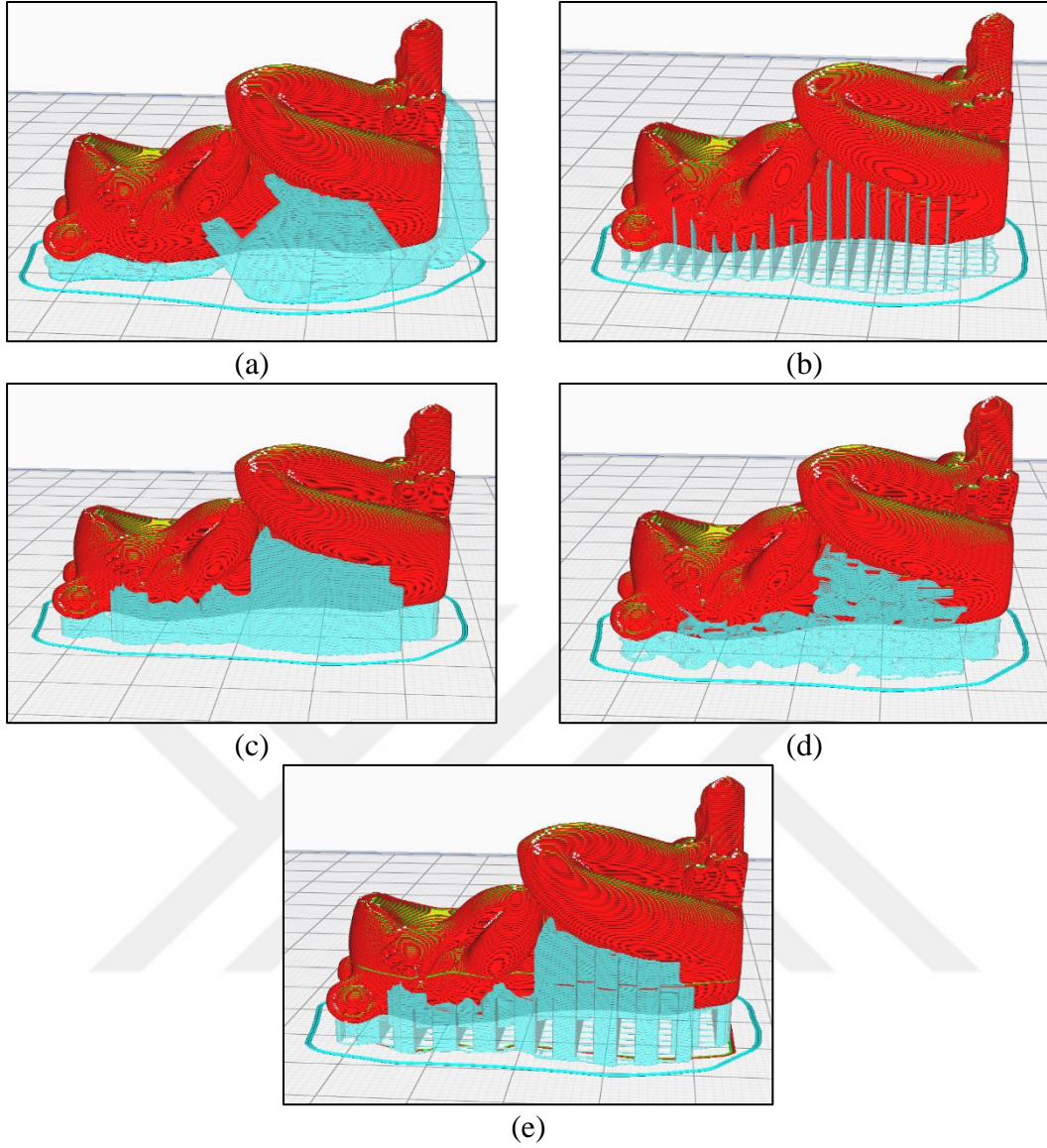
Şekil 4.3 : Optimizasyon sonrası desteklerin başlangıç noktalarının belirlenmesi.

Parça ile yapı tablası arasında mesafede standart çubuk destekler yerine 45° açılarla tasarlanmış ağaç destek yapıları kullanıldı ve ağaçların dalları 4 noktadaki desteklerin başlangıçlarını kapsayacak şekilde merkezlerde birleştirildi. Ağaç destek yapıların çapları 1 mm olacak şekilde FlashPrint dilimleme yazılımı ile yerleştirildi (Şekil 4.4).



**Şekil 4.4 :** Tasarlanmış ağaç destek yapısı kullanılarak örnek modelin üretimi.

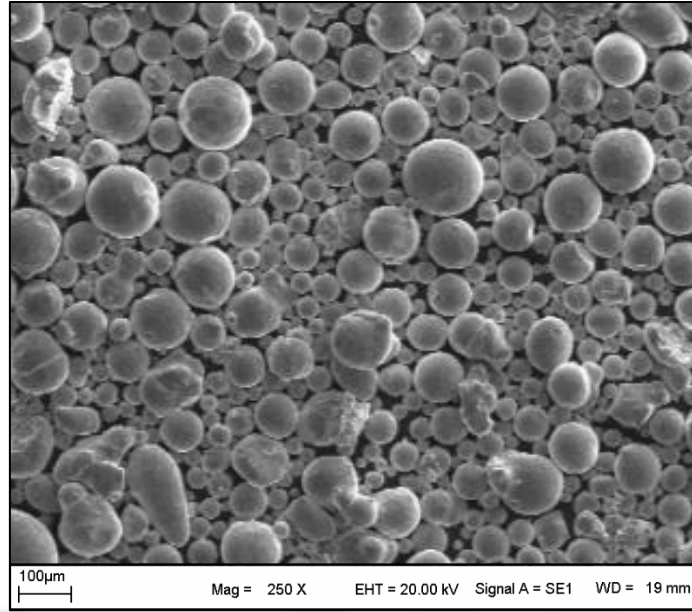
Farklı destek yapılarının üretim üzerine etkilerinin araştırılması amacıyla ağaç desteklerin yanında standart ağaç, çizgi, gyroid, eş merkezli ve standart destek yapılar kullanılarak üretim kalitesinin nasıl değiştiği gözlemlendi. Kullanılan diğer destek yapılar Şekil 4.5 de gösterilmiştir.



**Şekil 4.5 :** Kullanılan diğer destek yapıları; (a) standart ağaç yapısı, (b) çizgi yapısı, (c) eş merkezli yapısı, (d) gyroid yapısı, (e) standart yapısı.

### 4.3. Deneyde Kullanılan Parçaların İmalatı

Deneylerde kullanılacak parçaların üretiminde kolay temin edilebilen CoCr alaşımı kullanılmıştır. CoCr alaşımı küresel tanecikli yapıda ve tanecik boyutu 15 – 50  $\mu\text{m}$  olacak şekilde seçildi. CoCr tozlarının imalat öncesi SEM görüntüsü Şekil 4.6 da CoCr alaşımının içeriği ise Çizelge 4.1 de gösterilmiştir.



**Şekil 4.6 :** CoCr tozlarının sem görüntüsü.

**Çizelge 4.1 :** CoCr Alaşımının özellikleri.

| Malzeme  | Co    | Cr    | W    | Si   | C     | P    | Mo  |
|----------|-------|-------|------|------|-------|------|-----|
| Kütle(½) | Denge | 27,43 | 8,73 | 1,53 | 0,017 | 0,01 | 0,1 |

Bilgisayar ortamında tasarlanan parçalar STL formatına çevrilip, dilimleme işlemi yapıldıktan sonra Consept Lazer M Cusing Lab metal 3D yazıcı ile 15 – 30 µm tabaka kalınlığı, fiber lazer sistemi, 50 µm odak çapı ve 7 m/s tarama hızı ile üretildi. Üretimlerin yapıldığı 3B metal yazıcı Şekil 4.7 de gösterilmiştir.



**Şekil 4.7 :** Consept Lazer M Cusing Lab Metal 3B yazıcı.

Optimizasyon deneyleri ise metal eklemeli imalatta üretim maliyetinin yüksek olmasından dolayı eriyik biriktirme metodu ile PLA filament kullanılarak Ultimaker 2+ Connect yazıcı kullanılarak üretildi. EYM metodunda kullanılan yazıcı Şekil 4.8 de gösterilmiştir.



**Şekil 4.8 :** Ultimaker 2+ Connect yazıcı.

EYM ile üretimde 2,85 mm çapında PLA filament, 0,2 mm nozül çapı, %30 doluluk oranı, 60 mm/s üretim hızı kullanılmıştır.

Optimize edilmiş destek yapıları ile üretilen parçalarda imalat sırasında ısı dağılımına ve parçanın soğumasına etkilerinin araştırılması amacıyla Şekil 4.9 da gösterilen Testo 871 termal kamera kullanılarak sabit açı ve mesafede görüntülemeler yapıldı. Üretim sırasında görüntüler alındı.



**Şekil 4.9 :** EYM yöntemi ile yapılan imalatlar sırasında termal görüntülerin alınması.



#### 4.4. Destek Yapıların Optimizasyonu, Temizlenmesi ve Etkilerinin İncelenmesi

##### 4.4.1. Destek yapıların optimizasyonunun etkilerinin incelenmesi

İki farklı destek yapısı yani standart ve optimize edilmiş destek yapıları ile üretilen numunelerin ilk olarak kullanılan malzeme miktarında optimizasyonun etkilerini incelemek amacıyla WSA-224T hassas terazi kullanılarak 0,0001 hassasiyet ile tartımları gerçekleştirildi. Deneylerde kullanılan terazi Şekil 4.10 da gösterilmiştir.

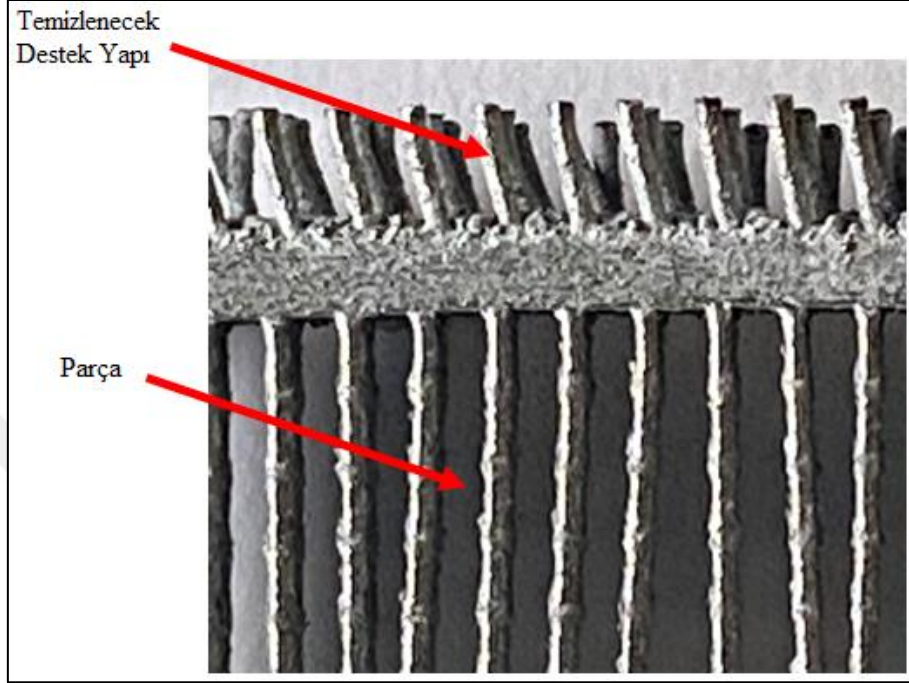


**Şekil 4.10 :** WSA-224T hassas terazi.

Tartım işleminin ardından iki farklı destek yapısının geometrik doğruluğa etkilerinin araştırılması amacıyla üretilen numunelerin fotoğrafları çekilerek ImageFocusAlpha yazılımı ile geometrik boyutlarının ölçümleri gerçekleştirildi.

#### 4.4.2.Frezeleme ile destek yapıların temizlenmesi

Üretilen metal parçalardaki frezeleme metodu ile temizlenecek olan destek yapılar Şekil 4.11 de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 : Co-Cr alaşımı ile üretilen numuneler de temizlenecek destek yapılar.

Destek yapılar Şekil 4.12 de gösterilen John Ford SV 41 dikey işleme makinesinde frezeleme metodu ile kaldırıldı. Kullanılan tezgâhın teknik özellikleri Çizelge 4.2 de verilmiştir.



Şekil 4.12 : JohnFord SV 41 dikey işleme tezgâhı.

**Çizelge 4.2** : Kullanılan dikey işleme tezgahının özellikleri.

| Teknik Özellik   |         | Ölçü       |
|------------------|---------|------------|
| X eksen uzunluğu | mm      | 1040       |
| Y eksen uzunluğu | mm      | 610        |
| Z eksen uzunluğu | mm      | 610        |
| Tabla boyutu     | mm      | 1194 x 610 |
| Mil gücü         | kw      | 11         |
| Max. devir       | dev/dak | 10000      |

İşleme sırasında 5 mm çapında 10 mm uzunluğunda 4 ağızlı parmak freze kullanıldı. Frezeleme işlemlerinin yüzey üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla temizleme işlemleri farklı devir ve ilerleme sayıları ile yapıldı. Kullanılan işleme parametreleri Çizelge 4.3 de verilmiştir.

**Çizelge 4.3** : İşleme sırasında kullanılan parametreler

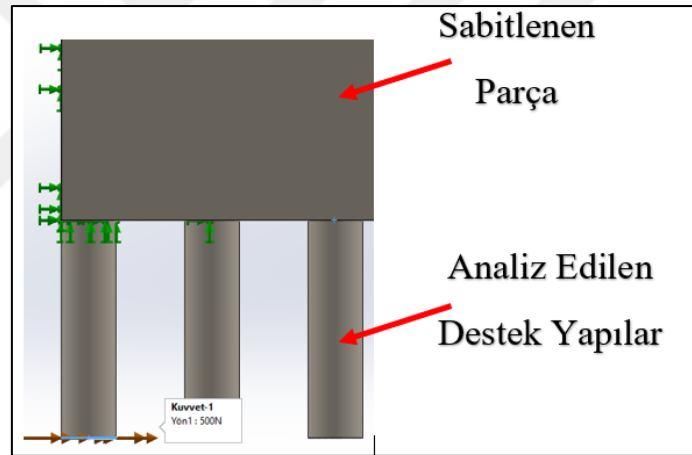
| Deney Numunesi | İlerleme (mm/dev) | Devir Sayısı (dev/dak) |
|----------------|-------------------|------------------------|
| Parça 1        | 0,1               | 2000                   |
| Parça 2        |                   | 4000                   |
| Parça 3        |                   | 6000                   |
| Parça 4        | 0,2               | 2000                   |
| Parça 5        |                   | 4000                   |
| Parça 6        |                   | 6000                   |
| Parça 7        | 0,3               | 2000                   |
| Parça 8        |                   | 4000                   |
| Parça 9        |                   | 6000                   |

İşleme parametrelerine göre freze takımının kesme hızı ( $V_c$ ) m/dak cinsinden denklem 4.1'deki gibi hesaplanmıştır. Burada freze takımının kendi eksenini etrafında bir dakikada yaptığı hareket devir sayısı ( $n$ ) ve takım çapı ( $D$ ) olarak alınmıştır.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (3.1)$$

#### 4.4.3. Destek yapılarının işlenmesinde etkili gerilmelerin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi

Üretilen parçalardaki destek yapılarına temizleme işlemi sırasında etki eden gerilmelerin incelenmesi amacı ile kullanılan destek yapılar bilgisayar ortamında tasarlandı ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizleri gerçekleştirildi. Sonlu elemanlar yönteminde parça sabitlenerek destek yapılarına literatürde temizleme esnasında hesaplanan 600 N kesme kuvveti işleme doğrultusunda uygulandı (Höller ve diğ., 2019). Kullanılan kuvvetlerin yönü Şekil 4.13 de verilmiştir.



Şekil 4.13 : Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan kuvvet yönleri.

#### 4.4.4. Tel fırça ile destek yapıların temizlenmesi

Üretilen numunelerin destek yapıları spot mingeneli sütun matkap ile çanak tel fırça kullanılarak temizlendi. Kullanılan tezgâh Şekil 4.14 de, tezgâh özellikleri ise Çizelge 4.4 de gösterilmiştir.



Şekil 4.14 : Kullanılan matkap tezgâhı.

Çizelge 4.4 : Matkap tezgâhının teknik özellikleri.

|                 |         |          |
|-----------------|---------|----------|
| Delme uzunluğu  | mm      | 150      |
| Sütun çapı      | mm      | 126      |
| Piston çapı     | mm      | 90       |
| Motor gücü      | kW      | 0,75     |
| Devir (min-max) | dev/dak | 220-1120 |

Temizleme işleminde sanayide yaygın olarak kullanılan ve maliyeti düşük çanak tel fırça kullanılmıştır (Şekil 4.15). Fırça ile temizleme ilerleme hızları sabit tutularak farklı devir sayılarının etkileri incelenmiştir. Deneyler sırasında kullanılan devir sayıları Çizelge 4.5 de verilmiştir.



**Şekil 4.15 :** Saçaklı çanak tel fırça.

**Çizelge 4.5 :** Fırça ile temizlemede kullanılan devir sayıları.

| Deney Numunesi | Devir Sayısı (dev/dak) |
|----------------|------------------------|
| Parça 1        | 1100                   |
| Parça 2        | 620                    |
| Parça 3        | 220                    |

#### **4.4.5.Taşlama ile destek yapıların temizlenmesi**

Üretilen diğer numunedeki destek yapılar 30 mm gravür taş kullanılarak Şekil 4.14 de gösterilen sütun matkapta, spot mengene kullanılarak temizlenmiştir. Gravür taş keskin kenarlı ve çeşitli ebatlarda bulunabildiğinden tercih edilmiştir. Kullanılan gravür taş Şekil 4. 16 de gösterilmiştir.



**Şekil 4.16 :** Gravür taşlama ucu.

Taşlama ile temizleme de ilerleme miktarları sabit tutularak farklı devir sayılarında temizleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan devir sayıları Çizelge 4.6 da gösterilmiştir.

**Çizelge 4.6 :** Taşlama ile temizlemede kullanılan devir sayıları.

| Deney Numunesi | Devir Sayısı (dev/dak) |
|----------------|------------------------|
| Parça 1        | 1100                   |
| Parça 2        | 620                    |
| Parça 3        | 220                    |

#### **4.4.6.Mikro motor freze ile destek yapıların temizlenmesi**

Kalan numunelerdeki destek yapılar eğri kontürlerin izlenebilmesi için, Şekil 4.17 de gösterilen NSK Ultimate 500 mikro motor freze kullanılarak 4000 dev/dak da Şekil 4.18 de gösterilen 10 mm küresel törpü freze, konik yapılı törpü freze, silindir oval başlı freze, konik sivri freze, sivri çam freze ile manuel olarak temizlendi. Kullanılan mikro motor frezin teknik özellikleri Çizelge 4.7 de verilmiştir.

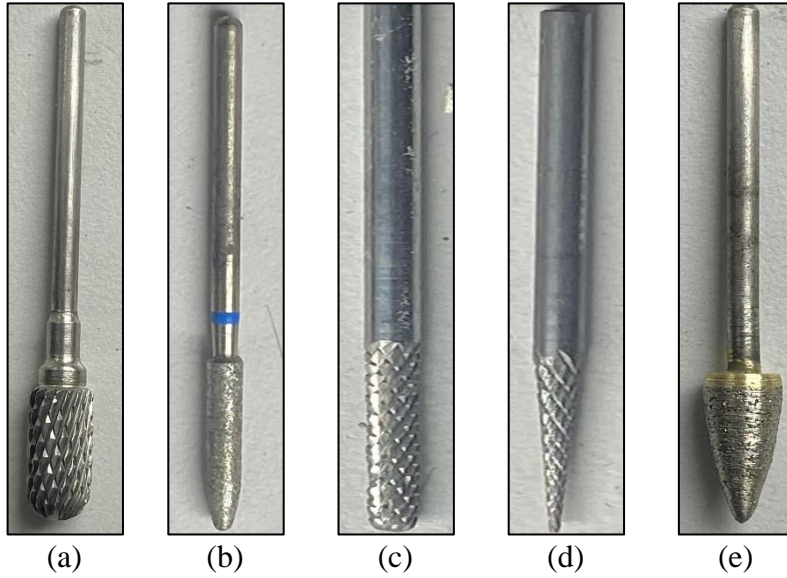
**Çizelge 4.7 :** Mikro motor frezenin teknik özellikleri

|              |         |              |
|--------------|---------|--------------|
| Max. tork    | Ncm     | 8,7          |
| Devir sayısı | dev/dak | 1000 – 50000 |



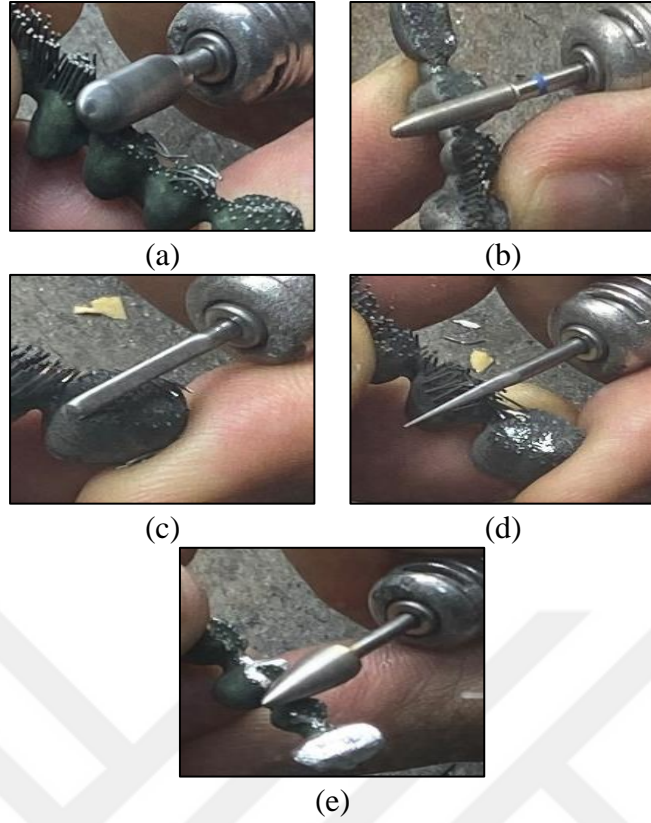
**Şekil 4.17 :** NSK Ultimate 500 mikro motor freze

Temizlik işlemleri manuel olarak yapıldığından aynı operatör ile aynı koşullarda üçer kez tekrarlandı. Temizlenen numunelerden rastgele birer tane seçilerek incelemeler yapıldı. Temizleme işlemi manuel olarak yapıldı. Şekil 4.19a silindirik frez ile temizleme Şekil 4.19b de ise konik elmas uç ile işleme gösterilmiştir.



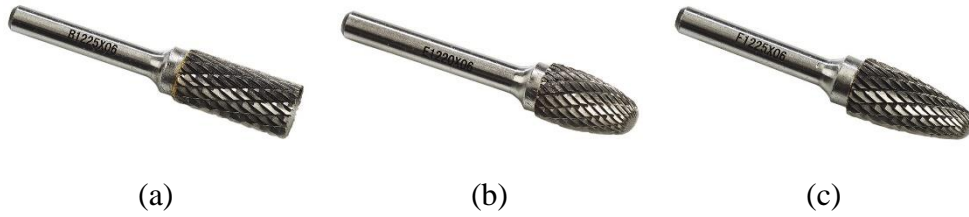
**Şekil 4.18 :** Kullanılan freze uçları; (a) 10 mm küresel törpü freze, (b) konik yapıli törpü freze, (c) silindir oval başli freze, (d) konik sivri freze, (e) sivri çam freze





**Şekil 4.19 :** Destek yapıların temizleme işlemleri; (a) 10 mm küresel törpü freze, (b) konik yapılı törpü freze, (c) silindirik oval başlı freze, (d) konik sivri freze, (e) sivri çam freze

Bu temizleme işleminin ardından diğer numuneler freze geometrisinin işleme üzerinde etkilerinin incelenmesi amacı ile Ş de gösterilen silindirik alın kesmeli, oval gövdeli ve küre uçlu çam freze ile aynı parametreler ile temizlendi.



**Şekil 4.20 :** Temizleme işleminde kullanılan farklı geometrilerde frezeler; (a) Silindirik alın kesmeli, (b) Oval gövdeli, (c) Küre uçlu çam

#### 4.4.7. Destek temizleme metotlarının yüzey kalitesine etkilerinin araştırılması

Kullanılan temizlik yöntemlerinin yüzey kalitesi üzerine etkilerini incelemek amacı ile Mitutoyo Sj-210 marka Portatif Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Cihazı kullanılarak temizleme metotlarının yüzey pürüzlülüklerine etkileri ölçüldü (Şekil 4.21).



Şekil 4.21 : Parça üzerinde yüzey kalitesi ölçümü.

#### 4.4.8. Destek temizleme metotlarının geometrik doğruluğa etkilerinin araştırılması

Yapılan son işlemlerin parça boyutlarına etkilerinin araştırılması amacı ile temizlenen parçaların çekilen görüntüleri üzerinden ImageFocusAlpha kullanılarak ölçümler yapıldı ve meydana gelen bozulmalar tespit edildi (Şekil 4.22)



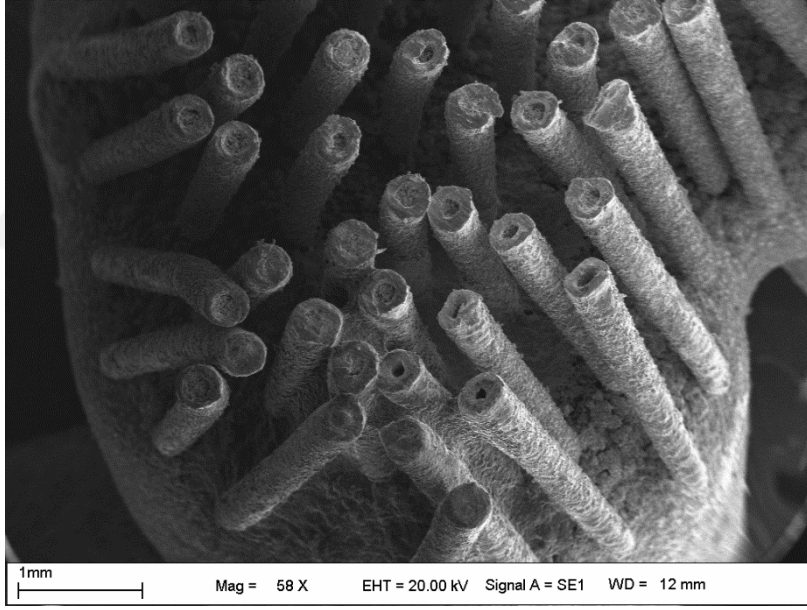
Şekil 4.22 : Geometrik ölçümlerin yapılması.

#### 4.4.9. Destek temizleme sonrası SEM analizi

Üretilen CoCr parçaların destek yapılarının imalat sonrası ve temizleme sonrası yüzeylerini incelemek amacı ile Şekil 4.23’de görülen LEO EVO-40 marka ve modele sahip taramalı elektron mikroskobunda (SEM) yüzey görüntüleri alındı. Temizleme öncesi yüzey görüntüsü Şekil 4.24 de gösterilmiştir.



Şekil 4.23 : LEO EVO-40 taramalı elektron mikroskobu

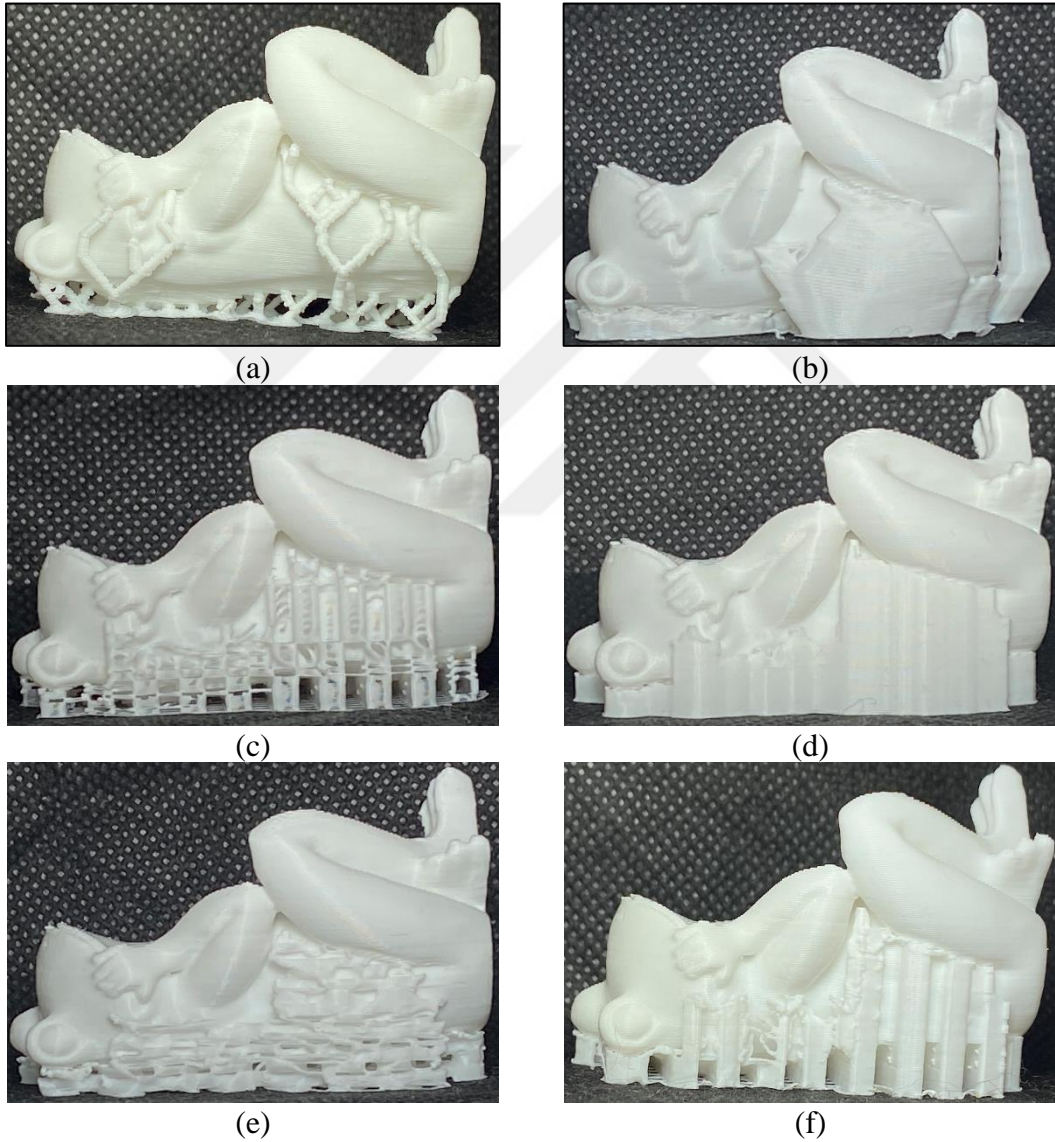


Şekil 4.24 : Üretim sonrası destek yapıların mikro görüntüsü

## 5. BULGULAR ve TARTIŞMA

### 5.1. Farklı Destek Yapılarının Etkilerinin İncelenmesi

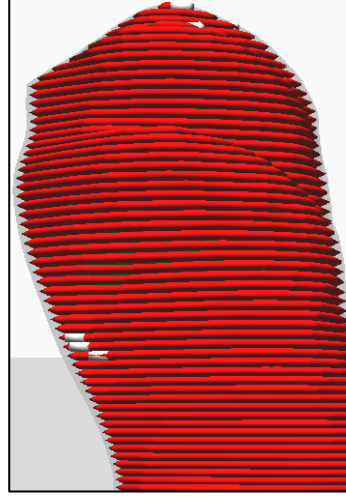
EYM yöntemi kullanılarak farklı yapılarda destek kullanılarak üretilen kurbağa modelinde destek yapıların parça çözünürlüğü, yüzey kalitesi, geometrik tolerans ve ağırlık gibi parametreler üzerinde etkili olduğu görüldü. Kurbağa modeli Şekil 5.1 de görüldüğü gibi sırasıyla ağaç destek yapı, standart ağaç yapı, çizgi yapı, eş merkezli yapı, gyroid yapı ve standart yapı ile üretildi.



**Şekil 5.1 :** Farklı destek yapılarına göre kurbağa modeli üretimi; (a) tasarlanmış ağaç destek yapı, (b) standart ağaç destek yapı, (c) çizgi destek yapı, (d) eş merkezli destek yapı, (e) gyroid destek yapı, (f) standart destek yapı.

Şekil 5.1 den görüldüğü destek yapılar sarkan yüzeyleri destekleyecek şekilde parçanın aşağı bakan yüzeylerini desteklemek amacıyla kullanılmıştır. Destek geometrilerinin sarkan yüzeylere göre dizaynının değişimi desteklenecek bölgeleri değiştirebilmektedir. Bu durum; Şekil 5.1a da tasarlanmış ağaç destek yapı ile üretimde kurbağanın ayaklarını ve bacaklarını destek kullanarak üretilirken, kol kısmında destek kullanımına gerek duyulmamasında. Şekil 5.1b de standart ağaç destek yapı ile üretimde kurbağanın sadece bacak ve kol bölgesinin desteklenmesinde, Şekil 5.1c de çizgi destek yağı ile üretimde kurbağanın yan kısmının komple desteklenmesinde, Şekil 5.1d ve e de eş merkezli ve gyroid destek yapısında sadece kolun desteklenmemesinde ve Şekil 5.1f de standart destek yapı ile yan yüzeylerin komple desteklenmesinde görülmüştür. Bu değişimin olmasındaki temel sebeplerden biri ağaç destek yapılarda parçanın geometrik formunu takip ederek desteklerin oluşturulmasıdır. Destek yapısı belirli bir yüksekliğe ulaştıktan sonra desteğe ihtiyaç duymadan parçanın kendi kendisini destekleyerek üretim gerçekleştirilmiştir. Diğer yöntemlerde ise parçanın iz düşümlerine göre destek yapılar oluşturulduğu için, literatürde de belirtildiği üzere yatay düzlemlerle  $45^\circ$  kritik eğim açısından küçük olan eğimlerde destek yapılar oluşturulmuştur. Özellikle bu bölgelerde oluşturulmasının sebebi parçada meydana gelebilecek çarpılma, sarkma, katmanların yapışmaması ve istenmeyen kalıntıların oluşmasını engellemeye çalışmaktadır.

Ayrıca destek yapıların her katman arasında ki bağlantı durumu sıcaklık basınç baskı hızı ve katman kalınlığı gibi baskı parametrelerinden etkilenmiştir. Şekil 5.2a da dilimleme sonrası üretimde elde edilmesi beklenen katmanlar gösterilmiştir. Ancak Şekil 5.2a ve b de farklı destek yapılarının kullanılmasına bağlı olarak değişen termal gerilmelerden dolayı katmanlardaki sarkmalar gösterilmiştir. Bunun üzerinde farklı destek yapılarının ve termal gerilmeye bağlı olarak çarpılmaların etkili olduğu düşünülmektedir. Bu çalışmada tekrara düşmemek amacı ile ısının etkisi ayrı bir bölüm olarak tartışılmıştır.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 5.2 :** Katmanlar arasındaki bağlanma durumu; (a) dilimleme sonrası beklenen, (b) standart destek yapısı ile üretilen, (c) Standart ağaç destek yapısı ile üretilen.

Parçaların üretiminde Şekil 5.2 de görüldüğü üzere desteklenmeyen bölgelerde ise sarkmaların belirgin bir şekilde olduğu görülmektedir. Bu sarkmalar katmanlar üzerine yazdırılan katmanı ve aralarındaki bağlantı durumunu etkilemektedir. Bu nedenle destek yapısı aynı zamanda parçanın mekanik özelliklerini etkileyecek önemli bir faktör olarak rol oynamaktadır. Aynı parçanın farklı destek yapıları ile üretilmesi sonucu nihai mekanik özellikleri birbirinden farklı olacaktır. Üretilen parçanın son şekli desteklenen alana ve destek yapılarının etkilerine bağlı olarak değişmektedir.

### **5.1.1.Parçanın üretiminde kullanılan malzeme miktarı ve üretim süresi**

Kullanılan destek yapısının seçiminde parçanın üretim geometrisinin hassasiyetinin yanında parçanın kütleli olarak ve imalat süresi olarak da istenilen hassasiyette üretilmesi oldukça

önemlidir. Bu bakımdan farklı destek yapılarına göre üretilen parçaların ağırlıkları ve imalat sürelerindeki değişim Çizelge 5.1 de gösterilmiştir.

**Çizelge 5.1 :** Kullanılan destek yapısına göre parça ağırlıkları ve imalat süreleri.

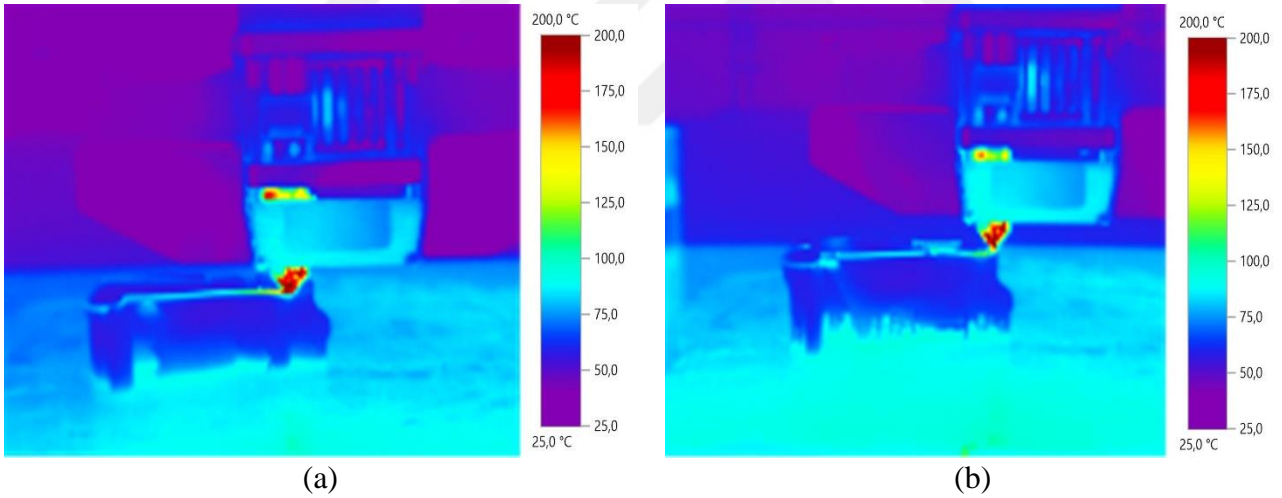
| <b>Deney Numunesi</b>        | <b>Parça Ağırlığı (gr.)</b> | <b>İmalat Süresi (dak.)</b> |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Çizgi destek yapı            | 5,3706                      | 45                          |
| Gyroid destek yapı           | 5,6097                      | 46                          |
| Eş merkezli destek yapı      | 5,7044                      | 47                          |
| Standart ağaç destek yapı    | 6,0401                      | 48                          |
| Tasarlanmış ağaç destek yapı | 6,0412                      | 48                          |
| Standart destek yapı         | 6,7141                      | 54                          |

Eklemeli imalatta genel olarak temel amaç en iyi yüzey kalitesini en az destek malzemesi kullanarak ve baskı süresini en aza indirerek üretimin yapılabilmesidir. Ancak günümüzdeki parçaların kompleks geometrilere sahip olmalarından dolayı farklı destek yapılarının kendilerine göre avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Tüm bu özellikler arasında nasıl birer denge sağlanacağı önemli bir sorundur. Yapılan üretimler sonucunda farklı destek yapılarının parçanın üretimi ile ilgili görevini yerine getirirken üretim için gerekli olan süreyi de azaltabileceğini göstermiştir (Çizelge 5.1). Üretim sonuçlarından da anlaşılacağı üzere en az destek malzemesi çizgi destek, gyroid destek, eş merkezli destek, standart ağaç destek, tasarlanmış ağaç destek ve standart destek olacak şekilde, baskı süresi ise çizgi destek, gyroid destek, eş merkezli destek, standart ağaç destek, tasarlanmış ağaç destek ve standart destek olarak elde edilmiştir. Farklı destek yapılarına göre üretilen parça için kullanılan malzeme ve imalat süresi açısından en avantajlı yapının çizgi destek yapısı olduğu tespit edilmiştir. Bu yöntemlerde ağırlıkların değişmesindeki önemli nedenlerden biri noktasal temas miktarının, destek yapılarının uzunluklarının ve kalınlıklarının değişkenlik göstermesidir. Blok tipi destek yapılarının parçanın geometrisinde fazla kütleinin olduğu yerlerde yoğunlaştığı, kontur desteklerin ise parçanın kontur yapılarına göre değiştiği tespit edilmiştir. Ticari yazılımlar kullanılarak oluşturulan destek yapılarda temel hedef içi boş hücresel veya doğandan esinlenilmiş yapılardır. Bu yapılar ve kombinasyonları zaman ve maliyeti düşürmek amacı ile simülasyon olarak uygulandığında ağırlık olarak gerçek değerlerle ortalama  $\pm\%10$  olarak değiştiği, süre olarak da en fazla bir dakikalık bir zaman değişimi olduğu görülmüştür.

### 5.1.2.Farklı destek yapılarının ısı dağılımına etkileri

Eklemeli imalat proseslerinde üretim esnasında meydana gelen termal gerilmeler parçanın boyut hassasiyeti ve yüzey kalitesi açısından önemlidir. Destek yapılar aynı zaman da parçanın üretimindeki termal koşulları da etkilemektedir. Farklı temas alanı ve destek tipleri ile üretimde termal iletimin Şekil 5.3 de görüldüğü gibi değişmesi baskı işlemlerini etkilemektedir. Şekil 5.3a da kullanılan destek yapısında ısı tabla ile destek arasında kalmış ve imalat sırasında soğumayı olumlu yönde etkilemiştir. Ancak Şekil 5.3b de kullanılan destek yapı soğumayarak ısının parçaya iletimini sağlamıştır. Buda parçanın soğumasını olumsuz yönde etkilemiştir. Desteklerin üretim aşamasında oluşan termal gerilmelerin yer yer eğilmelere neden olduğu tespit edilmiştir. Kurbağa modellerinin üretiminde farklı destek yapıları kullanılmasına rağmen modellerin üst ve alt bölgelerinde yüksek sıcaklık ölçülmüştür. Bu nedenle bu bölgelerin daha yavaş soğuması fazla termal genişleme ve yavaş bir büzülme ile sonuçlanmıştır. Buna bağlı olarak bu bölgelerde daha fazla hasar oluşmuştur.

Bu hasarlar desteklerin büzölmeye dayanacak kadar güçlü olmamasına bağlı olarak parçanın arka bölgesinde üretim kalitesini düşürdüğü görölmüştür.

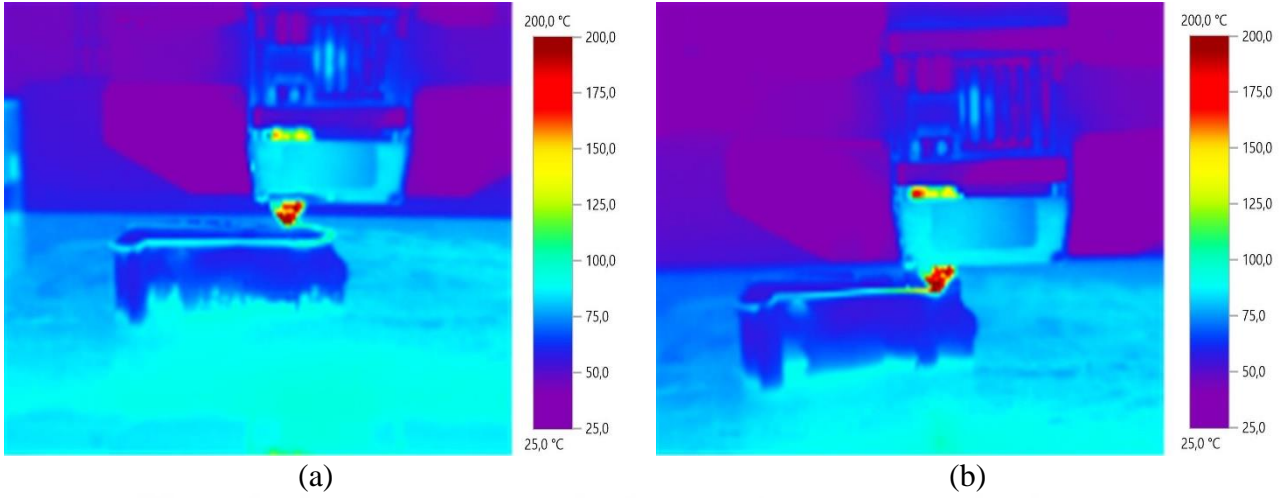


**Şekil 5.3 :** Kurbağa modeli üretimi sırasında termal görüntüye bağlı sıcaklığın değişimi; (a) standart destek yapısı ile üretilen, (b) optimize destek yapısı ile üretilen.

Destek yapıların bu özellikleri nedeni ile üretilen katmanda ısının yayılmasına yardımcı olan ve böylece mekanik özellikleri etkileyen bir iletim yapısı görevi üstlenmektedir. Şekil 5.4 de görüldüğü gibi farklı destek türleri farklı temas alanları nedeni ile farklı ısı iletimlerine yol açmıştır. Böylelikle farklı termal koşullara neden olmuştur. Bu koşullar da serilen katmanın soğuma hızını doğrudan etkilemiştir. Erken soğuyan katman bir sonraki katman için destek görevi üstlenerek parçanın üretimine pozitif yönde katkı sağlamıştır. Şekil 5.4 de üretimin aynı



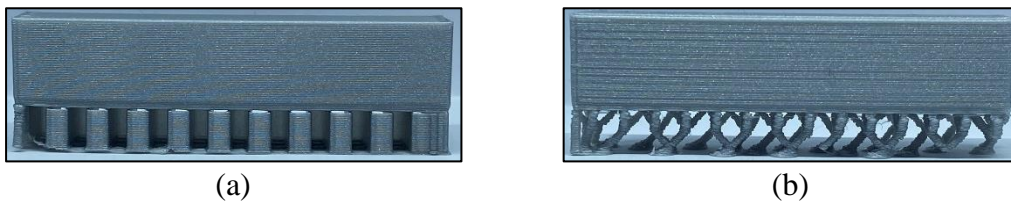
yerinde alınan termal görüntüler den görüleceği gibi Şekil 5.4b de kullanılan çizgi destek yapısının parçanın soğumasını hızlandırdığı görülmüştür.



**Şekil 5.4 :** Farklı destek yapılarına göre sıcaklıkların değişimi: a) blok destek yapılarında soğuma, b) çizgi destek yapısında soğuma.

### 5.1.3.Farklı destek yapıların geometrik tolerans üzerine etkileri

Termal gerilmeler malzemenin hacimlerinde erime işlemine bağlı olarak genişlemeye sebebiyet vermektedir. Daha sonra erimiş malzeme soğumakta ve katı hale gelirken malzemenin büzülmesine neden olmaktadır. Bu noktada malzemedeki gerilmeler bırakılmaktadır. Gerilmelerin birikmesi üretim sürecinde termal çarpılma ile sonuçlanmaktadır. Destek yapılar çıkartıldıktan sonra bu gerilmeler serbest kalabilir ancak parçanın deformasyonuna neden olabilmektedir. Bu durum Rossman'ın belirttiği gibi yay mekanizması şeklinde tanımlanmıştır. İki farklı destek yapısı ile üretilen düz parçalar Şekil 5.5 de gösterilmiştir.



**Şekil 5.5 :** Destek yapıların üretime etkisi; (a) standart destek yapısı ile üretilen, (b) tasarlanmış ağaç destek yapısı ile üretilen.

Üretilen numuneler incelendiğinde, tasarlanmış ağaç destek yapıları ile üretilen numunelerde çizgi desteklerin üzerindeki ilk katmanda daha az sarkma olduğu görülmüştür. Bunun sebebi bu yapıların arasında ki boşluk ve yapının inceliği sebebiyle hava akışının artması ve serilen malzemenin daha hızlı katılaşmasını sağlayarak, malzemenin sarkmasına fırsat vermeden katılaşması ve daha rijit bir imalata olanak sağlamasıdır. Basılan tüm parçalar geometrik tolerans için orijinal tasarlanmış değerlerle karşılaştırılmıştır. Farklı destek türlerinde geometrik doğruluklar incelendiğinde kurbağa modelinin sırt kısmının üst ve alt bölgesinde destek

yapıların belirgin etkileri ortaya çıkmıştır. Bunun dışındaki yüzeylerde geometrik doğruluklar hemen hemen benzer çıkmıştır.

#### **5.1.4.Farklı destek yapıların yüzey kalitesi üzerine etkileri**

Eklemeli imalatta katman kalınlığına, yapı açısına ve kullanılan yöntemle bağlı olarak geometrik bozulmaları engellemek için çıkıntılar ve açılal yüzeylerin desteklenmesi gerekmektedir. Ancak kullanılan destek yapısı üretim sonrası temizleme işleminin ardından yüzey kalitesinde olumsuz etkilere neden olabilir. Farklı destek yapılar temizlendikten sonra desteklenen alanın yüzey görüntüleri Şekil 5.6 da gösterilmiştir.

Kullanılan destek yapıların hepsinin katman sarkmalarını engellediği ancak ilk katmanın oluşmasında bozulmalara yol açtığı görülmüştür. Farklı destek yapılar karşılaştırıldığında Şekil 5.6c de gösterilen çizgi destek yapısının üzerine serilen ilk katman da bozulmanın en az olduğu görülmüştür.

Yapılan temizleme işlemlerinden sonra destek yapıların yüzeylerde bıraktığı izler karşılaştırıldığında ise Şekil 5.6a da gösterilen tasarlanmış ağaç destek yapının en kolay temizlenebilen ve yüzeyde en az destek izi bırakan yapı olduğu görülmüştür. Diğer destek yapılarında ise yüzeylerde destek kalıntılarının kalması temizleme sonrası bir son işlem gerektiğini göstermiştir.

Şekil 5.6 da görüleceği gibi bozulmaların en az olduğu ve ilk katmanın oluşturulmasında en iyi yüzey kalitesine ait üretimin çizgi destek yapısı ile yapıldığı görüldü. Ancak parçanın ön yüzeyinde çözünürlükte önemli bir farklılığın olmadığı görülmüştür. En kolay temizlenen ve yüzeyde neredeyse hiç iz bırakmayan yapının ise Şekil 5.6a da gösterilen tasarlanmış ağaç yapı olduğu tespit edildi.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

**Şekil 5.6 :** Desteklerin temizlenmesinden sonra yüzey kaliteleri; (a) tasarlanmış ağaç destek yapısı, (b) standart ağaç destek yapısı, (c) çizgi destek yapısı, (d) eş merkezli destek yapısı, (e) gyroid destek yapısı, (f) standart destek yapısı.

## 5.2. Destek Yapıların Temizlenmesinde Kullanılan Yöntemlerin Yüzey Kalitesi ve Boyutsal Doğruluk Üzerine Etkileri

Metal eklemeli imalat yöntemlerinde, sarkan yüzey ve çıkıntıların desteklenmesi dışında destek yapılar, üretilen parçaların üretim tablasına zarar vermeden çıkarılması açısından büyük çoğunlukla kullanılmaktadır. Parçanın üretim tablasından çıkarılması ardından destek yapıların görüntüleri Şekil 5.7 de gösterilmiştir.

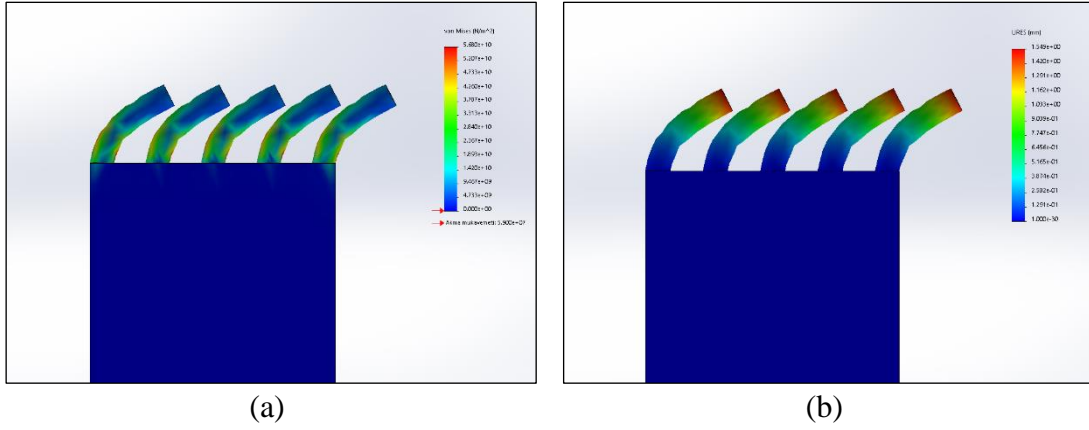


Şekil 5.7 : Metal eklemeli imalat sonrasında destek yapıların görüntüleri.

Şekil 5.7 de görüldüğü gibi destek yapıların parçadan uzaklaştırılması ve nihai ürünün elde edilmesi için gereklidir. Bu bölümde destek yapıların kaldırılması için; frezeleme, tel fırça, taşlama, silindirik frez ile işleme ve oval elmas uç ile işlemenin parça üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

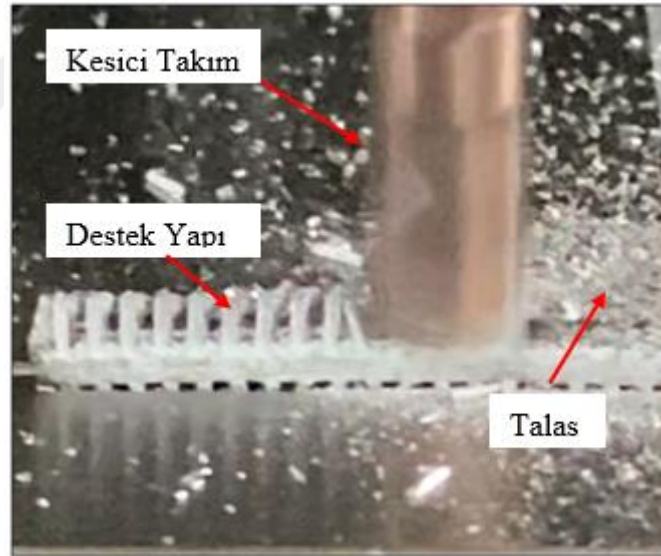
### 5.2.1.Frezeleme ile destek yapıların temizlenmesi

Metal eklemeli imalatta destek yapıların klasik imalat yöntemlerinden olan frezeleme ile temizlenmesinde desteklerin bükülmesi ve burulmasıyla sonuçlanan bir talaş kaldırma prosesi gerçekleşmiştir. Bu bükülme ve burulmalar ilk olarak sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Yapılan sonlu elemanlar analizinin sonuçları Şekil 5.8 de gösterilmiştir.



**Şekil 5.8 :** İşleme öncesi sonlu elemanlar analizi; (a) Von-mises gerilmeleri, (b) yer değiştirmeler.

İşleme sırasında elde edilen görüntüler incelendiğinde kesici takımın parçaya temas etmesi halinde destek yapıların ilk olarak Şekil 5.8 deki gibi yer değiştirdiği ve kesici takımın destek yapıları yatırdıktan sonra kesmesi ile destek yapıların dibinden kesilerek parçadan uzaklaştırıldığı görülmüştür. Kesme işlemi sırasında elde edilen destek hareketleri Şekil 5.9 de gösterilmiştir.



**Şekil 5.9 :** İşleme sırasında destek yapıların hareketi.

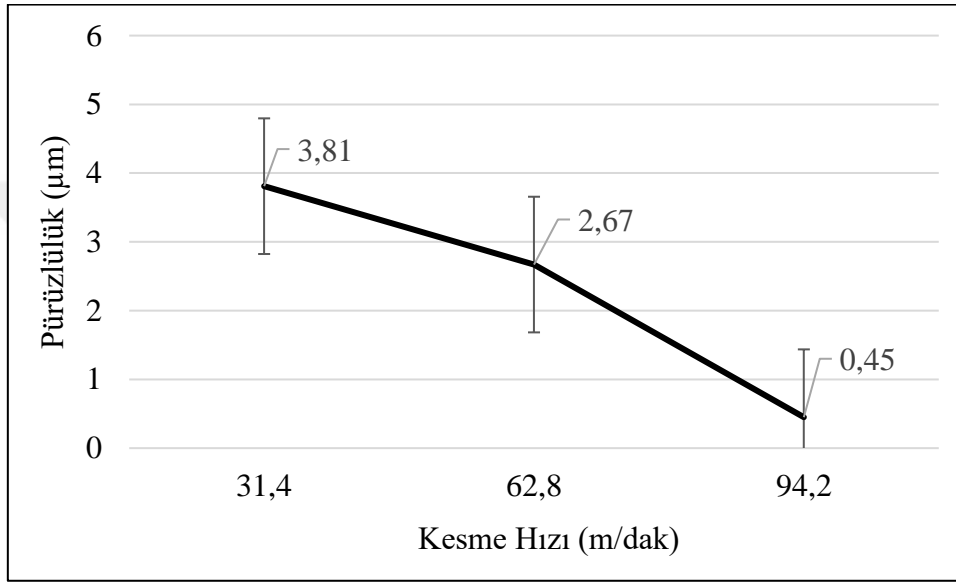
Frezeleme işleminde Şekil 5.9 de görüldüğü üzere destek yapıların yığılmadığı yani üst üste binmediği görülmüştür. Destek yapıların deformasyonu yüzey boyunca üniform olmayan bir yapıda gerçekleşmiştir. Yeterli deformasyon sağlandıktan sonra destek yapılarda kırılmaların olduğu görülmüştür.

Ancak frezedeki kesici ağız ve destekler arasında kesintiler olması nedeniyle takım aşınmaları hızlı bir şekilde gerçekleşmiştir. Ayrıca frezeleme işleminde farklı destek yapılarının frezelemesinde talaş kaldırma yönteminin ciddi bir değişiklik göstermediği tespit edildi.

Nitekim Höller ve diğ, (2019) belirttiği gibi farklı destek yapıların kesme kuvvetine ve işleme bir etkisinin olmadığı görüldü.

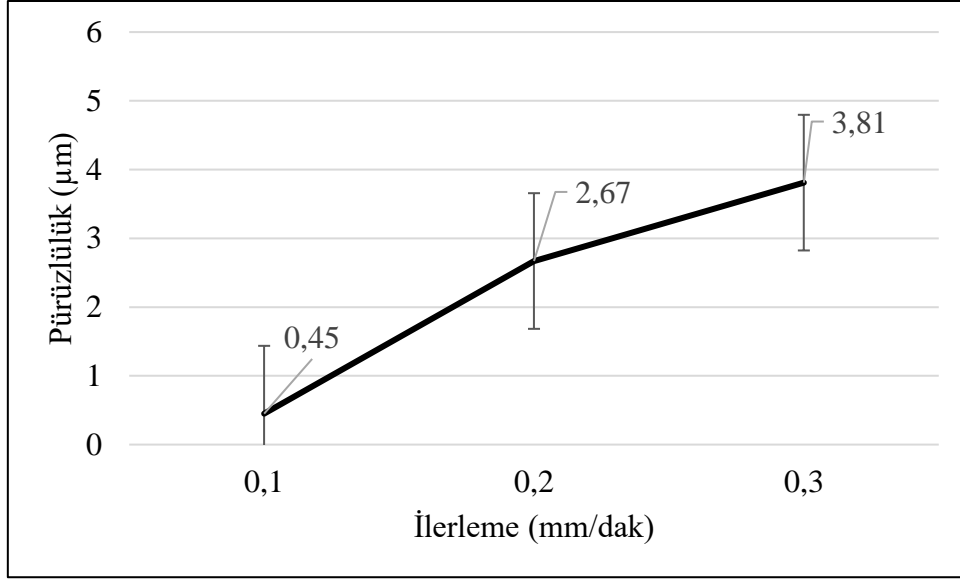
### 5.2.1.1.Frezelemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Destek yapıların frezeleme ile temizlemesinde farklı devir ve ilerleme sayıları kullanılmış ve temizleme sonrası numuneler üzerinden işleme yönün de üçer farklı yüzey pürüzlülüğü ölçümü alınmış ve ortalamaları kaydedilmiştir. Ölçüm sonuçlarında elde edilen yüzey pürüzlülükleri Şekil 5.11 da gösterilmiştir.



(a)

**Şekil 5.10 :** Yüzey pürüzlülüğü değişim grafikleri; (a) kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi, b) ilerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisi



(b)

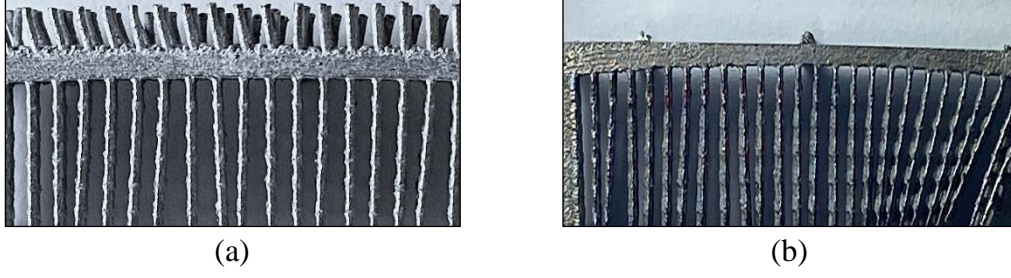
**Şekil 5.11 (devam):** Yüzey pürüzlülüğü değişim grafikleri; (a) kesme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi, b) ilerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Yapılan ölçüm sonuçlarına göre en yüksek pürüzlülük değeri 2,72 µm olarak 31,4 m/dak kesme hızında, en düşük pürüzlülük değeri ise 0,45 µm olarak 62,8 m/dak kesme hızında ölçülmüştür. Elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin artan kesme hızı ile azaldığı görülmüştür. Bu durum geleneksel talaş kaldırma yöntemlerinde ön görülen şekilde gerçekleşmiştir. Bu konu ile ilgili olarak literatür incelendiğinde kesme hızının artması ile tüketilen enerji miktarının kesme sırasında ısı enerjisine dönüşmesi sonucunda artan sıcaklığın talaş kesilmesini kolaylaştırdığı bunun sonucunda da yüzey kalitesinin iyileştiği belirtilmiştir (Şekil 5.11a) (Bahce ve diğ, 2018; Ulutan & Ozel, 2011)

İlerleme değerlerinin artması birim zamanda temizlenen destek yapı hacminin artmasına sebep olacaktır. Buna bağlı olarak da kesme kuvvetlerinde artışlar meydana gelecektir (Akhtar ve diğ, 2016). Takım üzerinde bu yüklerin artması yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir. (Şekil 5.11b)

### 5.2.1.2.Frezelemenin geometrik doğruluğa etkileri

Destek yapıların freze ile temizlenmesinde kesme işleminin kontrollü bir şekilde yapılması geometrik doğruluğu belirli sınırlar içerisinde tutmayı başarmıştır. Frezeleme yöntemi ile temizleme yapılırken hem destek yapılar hassas bir şekilde temizlenmiş hem de imalat sırasında termal gerilme kaynaklı olan şekil bozulmalarının düzeltilmesine olanak sağlamıştır. Frezeleme ile yapılan temizleme sonrası yüzey Şekil 5.12 da gösterilmiştir.

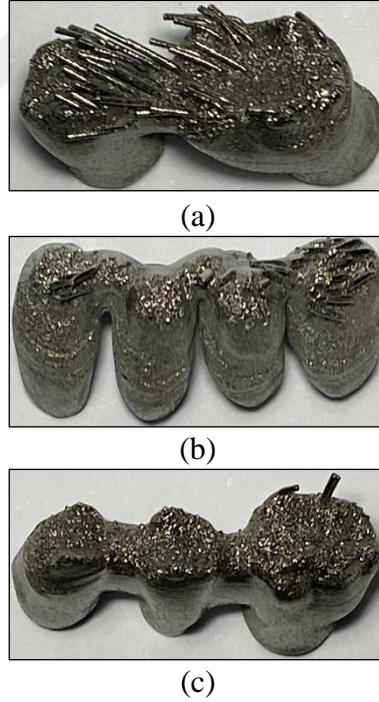


**Şekil 5.12 :** Frezeleme işlemi öncesi ve sonrası parça görüntüleri; (a) üretilen destek yapılar, (b) temizleme sonrası parça.

Yapılan geometrik ölçümler sonrasında freze ile yapılan kontrollü temizlik ve kesme işleminden kaynaklı elde edilen parçanın 10 mm olması gereken kalınlık değerinde yapılan ölçümün 9,97 mm olması temizleme işleminin başarılı olduğunu göstermiştir.

### 5.2.2. Tel fırça ile destek yapıların temizlenmesi

Tel fırça ile destek yapılar 3 farklı devir sayısında sabit ilerleme hızı ile temizleme yapılmıştır. Temizleme işlemlerinde tel fırça kullanılarak yapılan temizleme işlemlerinde devir sayısının etkisi Şekil 5.13 de gösterilmiştir.



**Şekil 5.13 :** Tel fırça ile destek yapıların temizlenmesi; (a) 220 dev/dak, (b) 620 dev/dak, (c) 1100 dev/dak.

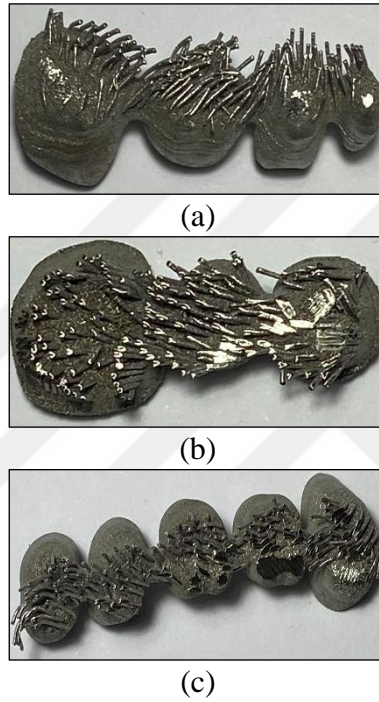
Şekil 5.13 de görüldüğü üzere devir sayısının artması destek yapıların kaldırılmasını kolaylaştırmıştır. Ancak tel fırçanın kesme ile değil de aşındırma ile destek yapıları koparması düşük devir sayılarında sıvamaya sebep vererek hem yüzey kalitesinin bozulmasına hem de destek yapıların tam olarak temizlenmeyerek yüzeyde kalıntılar bıraktığı tespit edilmiştir. Tel



fırça ile temizlemede kaliteli bir yüzey elde edilemediği ve destek yapıların tam olarak temizlenmediği, düşük devirlerde ise destek yapıların sadece eğilerek parça üzerine birleştiği görülmüştür.

### 5.2.3.Gravür taş ile destek yapıların temizlenmesi

Destek yapılarının temizlenmesinde uygulanan diğer bir yöntem olarak gravür taş belirlenmiştir. Temizleme işlemleri üç farklı devir sayısında uygulanmıştır. Bu temizleme işlemi sonrası elde edilen yüzeyler Şekil 5.14 de gösterilmiştir.

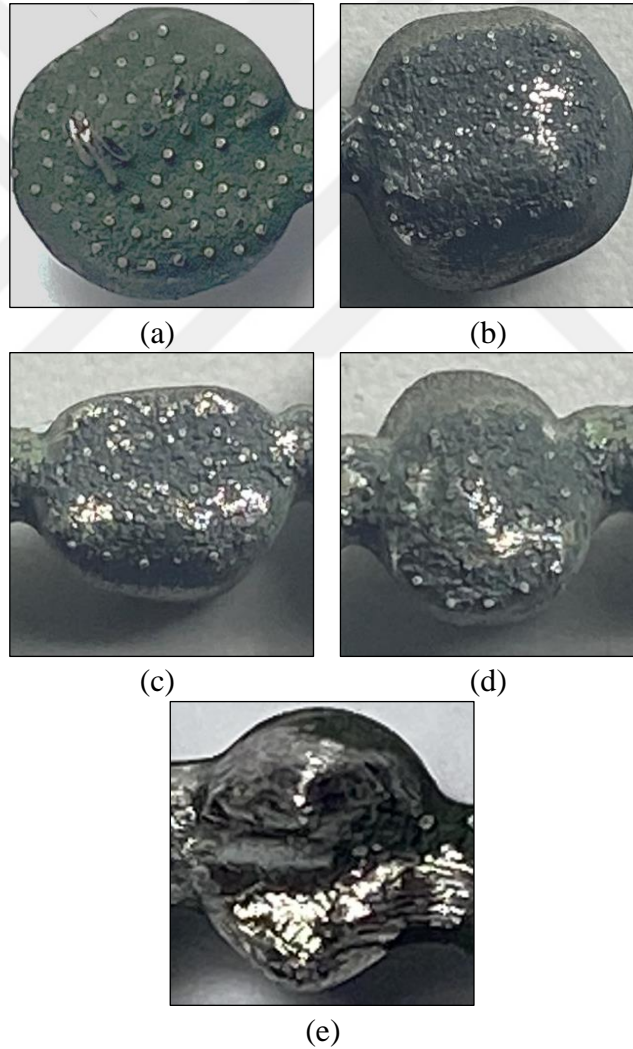


**Şekil 5.14 :** Gravür taş ile destek yapıların temizlenmesi; (a) 220 dev/dak, (b) 620 dev/dak, (c) 1100 dev/dak.

Şekil 5.14 den görüldüğü üzere düşük devir sayılarında desteklerle temas süresi arttığından yüksek devir sayısına göre desteklerin temizlenmesinde daha iyi sonuç vermiştir. Devir sayısı arttıkça gravür taşların yeterli eğilme momentini sağlamaması ve yeterli kesme süresinin olmaması nedeniyle destek yapıların parça üzerine eğilme şeklinde deformasyonlar meydana getirdiği görüldü (Şekil 5.14c). Bu işlemlerde en önemli problemlerden biri ilerleme hızının kontrol edilememesidir. Taşlama işlemi yüzeydeki en kısa nokta ile temas edecek şekilde yapıldı. Parçanın yüksek noktalarında parçanın geometrisini bozduğu, kısa noktalarda ise destekleri temizlemediği görüldü. Taşlama ile destek yapıların temizlenmesinin eğri formlar için kullanılabilir bir yöntem olmadığı görüldü.

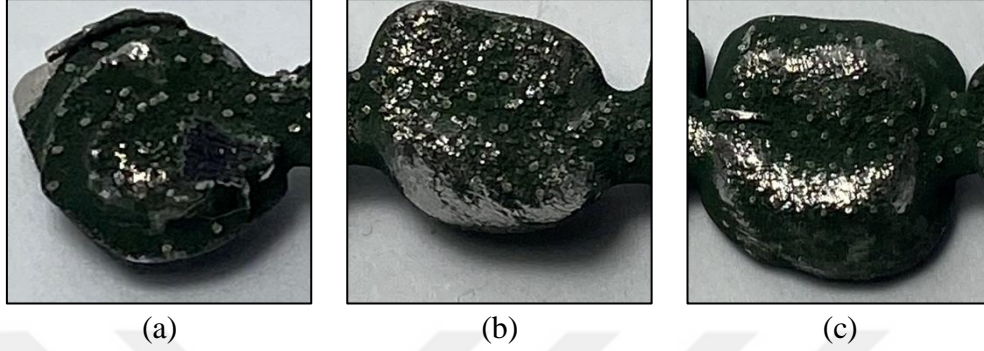
#### 5.2.4. Mikro motor freze ile destek yapıların temizlenmesi

Destek yapıların mikro motor freze kullanılarak temizlenmesi her bir değişik freze için iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci adımda 10 mm çapında küresel törpü freze ucu kullanılmıştır. İkinci aşamada ise konik yapılı törpü freze ucu kullanılmıştır. Birinci adımda kullanılan küresel törpü frezede 4100 devirde yapılan işlem sonrası desteklerin temizlendiği ancak yüzeylerde noktasal izlerin, diğer yöntemlerde kaldığı gibi tespit edilmiştir (Şekil 5.15). Destek temizleme işleminin ikinci adımı olan konik yapılı törpü freze de ise birinci adım da yüzeyde kalan izler manuel olarak kaldırılmıştır (Şekil 5.15e). İşlemin manuel olarak yapılması parça üzerinde takım izlerinin oluşmasına sebebiyet vermiştir. Ana parçanın geometrik hassasiyetinin mikron seviyede değiştiği tespit edilmiştir. Takımın kullanım şekline ve yüzeyin geometrisine bağlı olarak bu hatanın değiştiği belirlenmiştir.



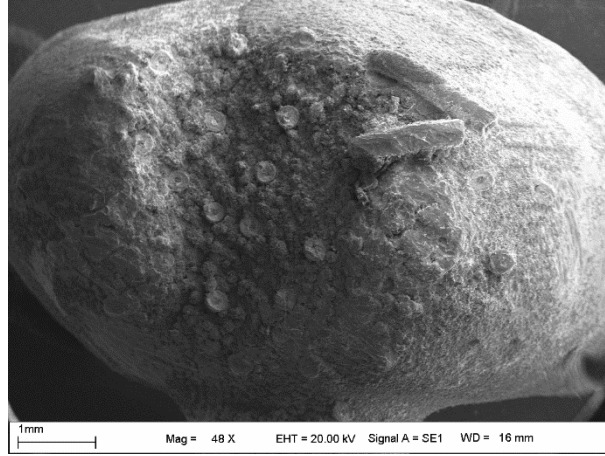
**Şekil 5.15 :** Destek yapıların mikro motor freze ile temizlenmesi sonrası yüzey görüntüleri; (a) 10 mm küresel törpü freze, (b) konik yapılı törpü freze, (c) silindir oval başlı freze, (d) konik sivri freze, (e) sivri çam freze

Küresel törpü freze ile yapılan temizleme işleminin diğer frezelere göre daha iyi sonuç vermesi üzerine, kullanılan freze geometrisinin etkilerinin incelenmesi amacıyla, silindir alın kesmeli, oval gövdeli ve küre uçlu çam freze ile 4000 dev/dak 'da aynı operatör ile aynı koşullar altında temizleme işlemleri yapılmıştır. Temizleme sonrası yüzey görüntüleri Şekil 5.16 de gösterilmiştir.

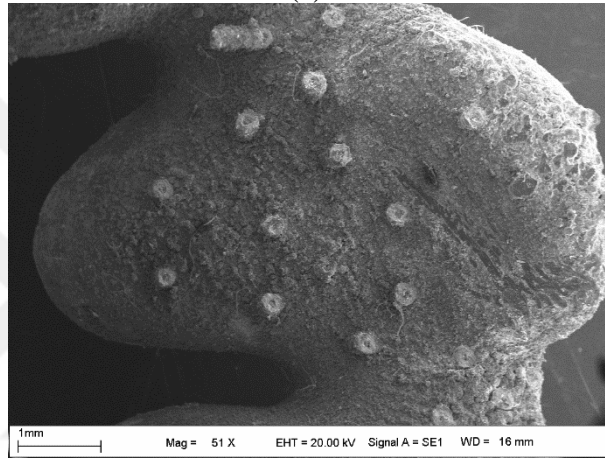


**Şekil 5.16 :** Mikro motor freze ile temizleme sonrası yüzeyler; (a) Silindir alın kesmeli, (b) Oval gövdeli, (c) Küre uçlu çam

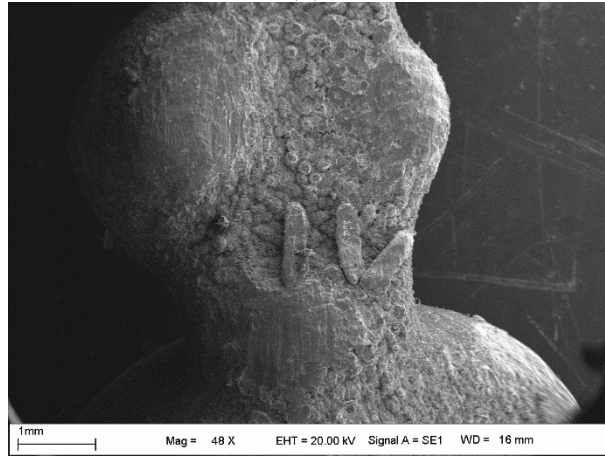
Küre uçlu çam freze ile yapılan temizlemede kullanılan kesici ucun Şekil 5.16c de gösterildiği gibi destek yapılarını tam olarak kesemediği, desteklerin temizlenmesi için parça yüzeyini de aşındırarak geometriyi bozduğu tespit edilmiştir. Silindir alın kesmeli freze ile yapılan temizleme işleminde Şekil 5.16a da ki gibi kesici ucun destek yapılarını parçaya en az zarar vererek temizlediği ancak serbest şekilli yüzeylerde eğri formun temizlenmesi için uygun olmadığı belirlenmiştir. Oval gövdeli freze ile yapılan temizleme işleminde en iyi yüzey kalitesinin elde edildiği görülmüştür. Bu durum ise frezenin eğri formunun temizleme işlemine tabii tutulan serbest şekilli yüzey formuna en uygun olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum Şekil 5.16b de gösterilmiştir. Yapılan bu temizleme işlemlerinin yüzey üzerinde bıraktığı deformasyonların daha detaylı incelenmesi için alınan SEM görüntüleri Şekil 5.17 da gösterilmiştir. Şekil 5.17a da frezenin girebildiği bölgelerde destek yapıların dibinden kesilerek koparıldığı ve yüzeyde bir aşınmanın olmadığı görülmüştür. Ancak eğri formdaki yüzeylerde destek kalıntıları tespit edilmiştir. Şekil 5.17b de ise destek yapıların tamamının parça yüzeyine zarar vermeden eğri ve düz yüzey fark etmeksizin temizlediği tespit edilmiştir. Şekil 5.17c de ise hem destek yapıların temizlenmediği hem de parça yüzeyinde aşınmaların olduğu görülmüştür. Farklı freze geometrilerinde meydana gelen bu değişiklikler freze geometrisinden kaynaklanmaktadır.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 5.17** : Mikro motor freze ile temizleme sonrası SEM görüntüleri; (a) Silindir alın kesmeli, (b) Oval gövdeli, (c) Küre uçlu çam

## 6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada farklı destek yapılarının parça üretiminde kullanılan malzeme miktarına, üretim süresine ve yüzey kalitesine etkileri EYM metodu kullanılarak araştırılmıştır. Ayrıca SLE yöntemi kullanılarak üretilen parçalardan destek yapıların temizlenmesi için frezeleme, tel fırça, gravür taş ve çeşitli geometrilerde frezeler ile mikro motor freze kullanılmıştır. Son olarak temizlenme sonrası freze geometrisinin parçanın yüzey kalitesi üzerine etkileri incelenmiştir. Elde edilen deney sonuçları maddeler halinde sıralanmıştır.

- ✓ Eklemeli imalat ile yapılan üretimlerde destek yapıların kullanımı karmaşık yapıların üretilmesi için oldukça önemlidir. Farklı destek yapılar kullanılarak üretilen numunelerde kullanılan malzeme miktarı ve üretim süresi olarak destek yapıların verimliliğinin sırasıyla; çizgi, gyroid, eş merkezli, standart ağaç, tasarlanmış ağaç ve standart destek yapılar olduğu belirlenmiştir. Çizgi destek yapılar kullanılan malzeme miktarını %20, imalat süresini ise %17 oranında azaltmıştır.
- ✓ Farklı türde destek yapıların temizlenmesi sonrası yüzey üzerinden alınan makro boyuttaki görüntüler incelendiğinde, diğer destek türlerine göre yüzey kalitesini en iyi oluşturan ve parçadan temizlenmesi ardından yüzeyde kalan iz miktarına göre sırasıyla; standart ağaç, eş merkezli, gyroid, çizgi, standart ve tasarlanmış ağaç destek yapılar olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Eklemeli imalat proseslerinde ısınma ve soğumalardan dolayı termal gerilmelerin etkilerinin boyut toleransını ve yüzey kalitesini etkilediği görülmüştür. Sıcaklığın kontrol edilmesi ve erken soğumanın çizgi destek yapılarında diğerlerine göre daha iyi olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ SLE yöntemi ile üretilen numunelerde destek yapılarının frezeleme ile temizlenmesinin sonucunda, kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığı tespit edilmiştir. Ancak frezeleme yönteminin serbest şekilli yüzeylerde etkili bir yöntem olmadığı belirlenmiştir.

- ✓ Serbest şekilli yüzeylerdeki destek yapıların temizlenmesinde kullanılan tel fırça ve gravür taşlama yönteminin destek yapıları kesemediği ve yüzeye yığarak ilerlediği ayrıca parçanın yüzeyinden de belirli bir miktar aşındırma yaparak geometrik doğruluğu olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir.
- ✓ Deneylede kullanılan mikro motor freze ile temizleme yöntemi tel fırça ve gravür taş yöntemlerine alternatif olarak sunulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda silindirik düz freze ile, eğrilerin takip edilerek temizlenmesinde destek yapıların neredeyse parça ile birleşim noktasından kesilerek temizlendiği gözlemlenmiştir. Ancak parça yüzeyinde kalan kalıntılar için oval elmas uç kullanılarak bir kere daha işlenmesi gerektiği belirlenmiştir.
- ✓ Temizlenme işlemleri incelendiğinde yüzey kalitesi ve boyutsal doğruluk olarak en iyi yöntemin frezeleme, eğri yüzeylerde ise mikro motor freze de oval gövdenin kullanılmasının olduğu belirlenmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda destek yapıların eklemeli imalat ile yapılan üretimde hem üretim maliyetlerini hem de üretim kalitesini etkileyen faktörler olduğu görüldü. Kullanılan destek yapının şekline göre destek yapıların temizlenmesi ve yüzey kalitesinde değişmelerin olduğu tespit edildi. Tasarlanmış ağaç destek yapıların standart ağaç destek yapılara yakın sonuçlar verdiği ve gelecek çalışmalarda daha farklı metotlar ile tasarlanarak standart ağaç destek yapılarından daha iyi sonu verebileceği görüldü. PLA yöntemi ile yapılan deneyde ki sonuçların metal eklemeli imalatta yapılan deney ile benzer sonuçlar vereceği öngörülmektedir. Bu çalışmada ortaya çıkan tasarlanmış ağaç destek yapılarının farklı algoritmalar kullanılarak optimize edilmesi, parçaların üretimi ve maliyeti açısından diğer yöntemlere göre avantajlı olacağı önerilmektedir.

## KAYNAKLAR

- Akhtar, W., Sun, J., & Chen, W. (2016).** Effect of Machining Parameters on Surface Integrity in High Speed Milling of Super Alloy GH4169/Inconel 718. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(5), 620–627. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.994769>
- Allavarapu, S. (n.d.).** *A New Additive Manufacturing (AM) File Format Using Bezier Patches MASTER OF SCIENCE (MS).*
- Allen, S. (1994).** *ON THE COMPUTATION OF PART ORIENTATION USING SUPPORT STRUCTURES IN LAYERED MANUFACTURING.*
- ALTUN-ÇİFTÇİOĞLU Gökçen Alev. (2010).** *Mathematical modeling and simulation of photopolymerization process in stereolithography.*
- Arni, R., & Gupta, S. K. (2001).** Manufacturability analysis of flatness tolerances in solid freeform fabrication. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 123(1). <https://doi.org/10.1115/1.1326439>
- ASTM F2792-12a. (2012).** Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, (Withdrawn 2015), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, [www.astm.org](http://www.astm.org). *ASTM International, West Conshohocken, PA.*
- ASTM F2915-12. (2012).** Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AFM) Version 1.2. *ASTM International, 2013.*
- BAHÇE, E., BOYACI, S., & GÜLER, M. S. (2022).** The Effects of the Production Direction on the Part in Additive Manufacturing. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 193–203. <https://doi.org/10.31466/kfbd.1011338>
- Bahce, E., Sami GÜLER, M., Emir, E., (2018).** CoCrMo Tibial Komponentin Karbür Takım ile İşlenmesinde Yüzey Özelliklerinin Araştırılması. *Ordu University Journal of Science and Technology Ordu Üniv. Bil. Tek. Derg.*, 8(1), 16–30.
- Calignano, F. (2014).** Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting. *Materials and Design*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.043>
- Cheng, B., & Chou, K. (2020).** A numerical investigation of support structure designs for overhangs in powder bed electron beam additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 49, 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.11.018>
- Cheng, L., Liang, X., Bai, J., Chen, Q., Lemon, J., & To, A. (2019).** On utilizing topology optimization to design support structure to prevent residual stress induced build failure in laser powder bed metal additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 27, 290–304. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.001>

- Cloots, M., Spierings, A. B., & Wegener, K. (2013).** “Assessing new support minimizing strategies for the additive manufacturing technology SLM.”
- Das, P., Chandran, R., Samant, R., & Anand, S. (2015).** Optimum Part Build Orientation in Additive Manufacturing for Minimizing Part Errors and Support Structures. *Procedia Manufacturing*, 1, 343–354. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.09.041>
- de Figueiredo Leite, J. V., Teixeira, J. M. N., & Teichrieb, V. (2016).** Optimizing 3D object visualization on the web. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9740. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-39907-2\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-319-39907-2_27)
- di Angelo, L., di Stefano, P., & Guardiani, E. (2020).** Search for the optimal build direction in additive manufacturing technologies: A review. In *Journal of Manufacturing and Materials Processing* (Vol. 4, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/JMMP4030071>
- Dumas, J., Hergel, J., & Lefebvre, S. (2014).** Bridging the gap: Automated steady scaffoldings for 3D printing. *ACM Transactions on Graphics*, 33(4). <https://doi.org/10.1145/2601097.2601153>
- Gan, M. X., & Wong, C. H. (2016).** Practical support structures for selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 474–484. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.08.006>
- Gao, W., Zhang, Y., Nazzetta, D. C., Ramani, K., & Cipra, R. J. (2015).** RevoMaker: Enabling multi-directional and functionally-embedded 3D printing using a rotational cuboidal platform. *UIST 2015 - Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 437–446. <https://doi.org/10.1145/2807442.2807476>
- Höller, C., Hinterbuchner, T., Schwemberger, P., Zopf, P., Pichler, R., & Haas, F. (2019).** Direct machining of selective laser melted components with optimized support structures. *Procedia CIRP*, 81, 375–380. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.065>
- Huang, X., Ye, C., Wu, S., Guo, K., & Mo, J. (2009).** Sloping wall structure support generation for fused deposition modeling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 42(11–12), 1074–1081. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1675-2>
- Hussein, A., Hao, L., Yan, C., Everson, R., & Young, P. (2013).** Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(7), 1019–1026. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.01.020>
- Järvinen, J. P., Matilainen, V., Li, X., Piili, H., Salminen, A., Mäkelä, I., & Nyrhilä, O. (2014).** Characterization of effect of support structures in laser additive manufacturing of stainless steel. *Physics Procedia*, 56(C), 72–81. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.099>



- Jiang, J., Xu, X., & Stringer, J. (2018).** Support structures for additive manufacturing: A review. In *Journal of Manufacturing and Materials Processing* (Vol. 2, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/jmmp2040064>
- Jibin, Z. (2005).** *Determination of Optimal Build Orientation Based on Satisfactory Degree Theory for RPT.*
- Jin, Y. an, He, Y., & Fu, J. zhong. (2015).** Support generation for additive manufacturing based on sliced data. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(9–12), 2041–2052. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7190-3>
- Lee, J., & Lee, K. (2017).** Block-based inner support structure generation algorithm for 3D printing using fused deposition modeling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(5–8), 2151–2163. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9239-3>
- Leong, K. F., Chua, C. K., & Ng, Y. M. (1996).** A study of stereolithography file errors and repair. Part 1. Generic solution. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 12(6). <https://doi.org/10.1007/BF01186929>
- Liu, Y., Yang, Y., & Wang, D. (2016).** A study on the residual stress during selective laser melting (SLM) of metallic powder. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(1–4), 647–656. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8466-y>
- Lu, L., Sharf, A., Zhao, H., Wei, Y., Fan, Q., Chen, X., Savoye, Y., Tu, C., Cohen-Or, D., & Chen, B. (2014).** Build-to-last: Strength to weight 3D printed objects. *ACM Transactions on Graphics*, 33(4). <https://doi.org/10.1145/2601097.2601168>
- Majhi, J., Janardan, R., Smid, M., & Gupta, P. (1999).** On some geometric optimization problems in layered manufacturing 6. In *Computational Geometry* (Vol. 12).
- Mercelis, P., & Kruth, J. P. (2006).** Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*, 12(5), 254–265. <https://doi.org/10.1108/13552540610707013>
- Munz, O. J. (1956).** 2,775,758.
- Navangul, G., Paul, R., & Anand, S. (2011).** A Vertex Translation Algorithm for adaptive modification of STL file in Layered Manufacturing. *ASME 2011 International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC 2011*, 1. <https://doi.org/10.1115/MSEC2011-50283>
- Paul, R., & Anand, S. (2015).** Optimization of layered manufacturing process for reducing form errors with minimal support structures. *Journal of Manufacturing Systems*, 36, 231–243. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.06.014>
- Poyraz, Yasa, E., Akbulut, G., Orhangül, A., & Pilatin, S. (2020).** Investigation of support structures for direct metal laser sintering (DMLS) of IN625 parts. *Proceedings - 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2015.*

- Rattanawong, W., Masood, S. H., & Iovenitti, P. (2001).** A volumetric approach to part-build orientations in rapid prototyping. *Journal of Materials Processing Technology*, 119(1–3). [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00924-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00924-4)
- Schmidt, R., & Umetani, N. (2014).** Branching support structures for 3D printing. *ACM SIGGRAPH 2014 Studio, SIGGRAPH 2014*. <https://doi.org/10.1145/2619195.2656293>
- Strano, G., Hao, L., Everson, R. M., & Evans, K. E. (2013).** A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(9–12), 1247–1254. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4403-x>
- Stroud, I., & Xirouchakis, P. C. (1999).** *STL and extensions*. [www.elsevier.com/locate/advengsoft](http://www.elsevier.com/locate/advengsoft)
- SÜRMEŒEN, H. K. (2019).** EKLEMELİ İMALAT (3B BASKI): TEKNOLOJİLER VE UYGULAMALAR. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 24(2), 373–392. <https://doi.org/10.17482/uumfd.519147>
- Swainson, W. K. (1971).** *METHOD, MEDIUM AND APPARATUS FOR PRODUCING THREE-DIMENSIONAL FIGURE PRODUCT*.
- Thrimurthulu, K., Pandey, P. M., & Reddy, N. V. (2004).** Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(6). <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2003.12.004>
- Ulutan, D., & Ozel, T. (2011).** Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. In *International Journal of Machine Tools and Manufacture* (Vol. 51, Issue 3, pp. 250–280). <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.11.003>
- Vora, P., Mumtaz, K., Todd, I., & Hopkinson, N. (2015).** AlSi12 in-situ alloy formation and residual stress reduction using anchorless selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 7, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.06.003>
- Yalçın, B., Ergene, B., & Tarihi, G. (2017).** *Endüstride Yeni Eğilim Olan 3-B Eklemeli İmalat Yöntemi Ve Metalurjisi ENDÜSTRİDE YENİ EĞİLİM OLAN 3-B EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ VE METALURJİSİ*.
- Zha, W., & Anand, S. (2015).** Geometric approaches to input file modification for part quality improvement in additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.06.021>
- Zhang, N., Zhang, L.-C., Chen, Y., & Shi, Y.-S. (2019).** Local Barycenter Based Efficient Tree-Support Generation for 3D Printing ☆☆☆. *Computer-Aided Design*, 115, 277–292. <https://doi.org/10.1016/j.cad>
- Zhao, H. ming, He, Y., Fu, J. zhong, & Qiu, J. jiang. (2018).** Inclined layer printing for fused deposition modeling without assisted supporting structure. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.11.011>

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad: Sarkis BOYACI**

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2012- 2017 İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yüksek Lisans:** 2018- ..., İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konstrüksiyon ve İmalat Ana Bilim Dalı

### MESLEKİ DENEYİM:

- 2015- 2017- Gökhan Makina San.Tic.Ltd.Şti. – Stajyer Mühendis
- 2017- 2018- Mavi Yapı Denetim – Kontrol Elemanı
- 2019- ... - Boysa Makina – Firma Yetkilisi

### YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR (Makaleler, Bildiriler, Patentler vb.)

- **BİLTEK KONGRESİ:** Eklemeli İmalatta Destek Yapıların Açısal Yüzeylerin Üretimine Etkilerinin Araştırılması – 2021 (Tam Metin/Sözlü Sunum)
- **ULUSAL MAKALE:** Eklemeli İmalatta Üretim Yönünün Parça Üretimine Etkileri – 2022 – Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi