

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

**FDM TİPİ 3 BOYUTLU YAZICILARDAKİ ÖRGÜ
PARAMETRELERİNİN ÜRÜN DAYANIMINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serdar EFE

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : MAKİNE TASARIM VE İMALAT
Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Yaşar KAHRAMAN

Şubat 2020

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FDM TİPİ 3 BOYUTLU YAZICILARDAKİ ÖRGÜ
PARAMETRELERİNİN ÜRÜN DAYANIMINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serdar EFE

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dal : MAKİNE TASARIM VE İMALAT

Bu tez 27.02.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



**Dr. Öğr. Üyesi
Yaşar KAHRAMAN
Jüri Başkanı**



**Dr. Öğr. Üyesi
Sedat İRİÇ
Üye**



**Dr. Öğr. Üyesi
Ekrem ALTUNCU
Üye**

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Serdar EFE

28.02.2020

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Yaşar KAHRAMAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Proje akışı süresince laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen, tüm deneyimlerini her daim paylaşan Sakarya Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölüm Başkanı Yardımcısı Dr. Öğr. Üyesi Sedat İRİÇ'e teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışma sırasında motivasyon koçu olarak her daim yanımda olan dostum, meslektaşım Işıl ÜNAL'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
KAYNAK TARAMASI	5
2.1. Eklemeli İmalat	5
2.2. Eklemeli İmalat Yöntemleri	5
2.2.1. Lazer esaslı yöntemler	6
2.2.2. Ekstrüzyon işlemleri	11
2.2.3. Malzeme püskürtme.....	12
2.2.4. Yapıştırıcı bazlı işlemler	13
2.2.5. Elektron ışını.....	15
2.3. Eklemeli İmalat Süreçlerinin Sınıflandırılması	15
2.4. Üç Boyutlu Baskı İşleminin Temelleri.....	17
2.5. Eklemeli İmalatta Kullanılan Malzemeler	18
2.5.1. Metaller ve alaşımlar	18
2.5.2. Polimerler ve kompozitler	19
2.5.3. Seramikler	22

2.5.4. Beton	23
2.5.5. 3 boyut baskı için farklı malzemelerin karşılaştırılması	25
2.6. Üç Boyutlu Yazıcı Çeşitleri	27
2.6.1. Kartezyen tipi üç boyutlu yazıcılar	27
2.6.2. Delta tipi üç boyutlu yazıcılar	28
2.6.3. Polar tipi üç boyutlu yazıcılar	30
2.6.4. Scara tipi üç boyutlu yazıcılar	30
 BÖLÜM 3.	
MATERYAL VE YÖNTEM	32
3.1. Materyal	32
3.2. Üç Boyutlu Yazıcı Genel Yapısı	32
3.2.1. Üç boyutlu yazıcının parçaları	34
3.3. Test Parçalarının Tasarımı	36
3.3.1. Parçaların tasarımında kullanılan standart: ASTM-D638	37
 BÖLÜM 4.	
DENEYSEL ÇALIŞMA	39
4.1. Dilimleme Yazılımı (Slic3r).....	39
4.2. Örnek Model	44
 BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	71

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

3B	: Üç Boyut
3BY	: Üç Boyutlu Yazıcı
ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
BDT	: Bilgisayar Destekli Tasarım
BDÜ	: Bilgisayar Destekli Üretim
BNK	: Bilgisayar Nümerik Kontrolü
BPÜ	: Balistik Parça Üretimi
DMLS	: Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
DMY	: Direk Metal Yığma
EİÜ	: Elektron Işınli Üretim
FDM	: Fused Deposition Modeling (Eriyik Yığarak Modelleme)
HEK	: Holografik Etkileşim ile Katılaştırma
IEK	: Işın Etkileşimi ile Katılaştırma
KFP	: Katı Folyo Polimerizasyonu
KZK	: Katı Zemin Kürleme
LİNŞ	: Lazerle İşlenmiş Net Şekillendirme
LNİ	: Lamine Nesne İmalatı
LTY	: Lazer Tozu Yığma
MJM	: Multijet Modelleme
MYP	: Mürekkep Püskürtmeli Yazıcı
PA	: Poliamid
PK	: Polikarbonat
PLA	: Polilaktik Asit
SLA	: Stereolitografi
SLE	: Seçmeli Lazer Ergitme
SLK	: Seçmeli Lazer Kaplama

SLS : Seçmeli Lazer Sinterleme
STP : Sıvı Termal Polimerizasyonu
UV : Ultraviyole



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Lazer polimerizasyonu eklemeli imalat prosesi.....	7
Şekil 2.2. Lazer eritme eklemeli imalat prosesi.	8
Şekil 2.3. Ekstrüzyon eklemeli imalat prosesi.	11
Şekil 2.4. Malzeme püskürtme eklemeli imalat prosesi.....	12
Şekil 2.5. Yapışkan eklemeli imalat prosesi.	14
Şekil 2.6. Elektron ışını eklemeli imalat prosesi.....	15
Şekil 2.7. 3B fiziksel parçaları üretmenin beş temel adımı.....	17
Şekil 2.8. Eklemeli imalat ile üretilmiş metal parça örnekleri.	19
Şekil 2.9. Eklemeli imalat ile üretilmiş polimer parça örnekleri.	21
Şekil 2.10. Eklemeli imalat ile üretilmiş seramik parça örnekleri.	23
Şekil 2.11. Eklemeli imalatın beton malzeme kullanılarak üretilmiş parça örneklerine ait ürünler.	24
Şekil 2.12. Kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcı.	28
Şekil 2.13. Delta tipi 3 boyutlu yazıcı.....	29
Şekil 2.14. Polar tipi 3 boyutlu yazıcı.	31
Şekil 2.15. Scara tipi 3 boyutlu yazıcı.....	31
Şekil 3.1. Tasarlanan 3 boyutlu yazıcı.	33
Şekil 3.2. Tasarlanan 3 boyutlu yazıcı.	33
Şekil 3.3. Üretilen 3 boyutlu yazıcı (genel görüntü).	33
Şekil 3.4. Arduino ATMEGA 2560	34
Şekil 3.5. RAMPS 1.4 (RepRap Arduino Mega Pololu Shield) elektronik kontrol kartı.....	34
Şekil 3.6. Nema 17 adım motoru.	35
Şekil 3.7. Bowden tipi ekstrüder.	35
Şekil 3.8. Lineer raylar.....	36
Şekil 3.9. GT2 kayışı ve buna uyumlu kasnaklar.....	36

Şekil 3.10. ASTM-D638 Tip-1 test örneği.	38
Şekil 3.11. Çekme numunesi modeli.	38
Şekil 4.1. Slic3r programının arayüzü.....	39
Şekil 4.2. Slic3r programında yapılabilecek değişen yoğunluklarda dolgu desenleri	40
Şekil 4.3. % 100 dolu olarak üretilen çekme test parçası.....	41
Şekil 4.4. Çekme testi yapılan numune.	41
Şekil 4.5. Test numunesinde %100 dolu üretilecek kısımlara ait hazırlanmış model.	42
Şekil 4.6. Farklı dolgu desenlerine ait gerilme-gerilim grafiği.	42
Şekil 4.7. Kesit görseli.	43
Şekil 4.8. Çekme testi sonuç grafiği.....	44
Şekil 4.9. Gözlü kanca standartları ve görseli.....	44
Şekil 4.10. PTC Creo Parametric 6.0'da oluşturulan model.....	45
Şekil 4.11. Kanca kontak noktalarının belirlenmesi.	45
Şekil 4.12. Kanca kontak noktalarının belirlenmesi.	46
Şekil 4.13. Kanca sınır şartlarının belirlenmesi.	46
Şekil 4.14. Kanca yük yükleme.	47
Şekil 4.15. Kanca üzerinde oluşan gerilme bölgeleri.....	47
Şekil 4.16. Çekme testi yapılan %100 dolu kanca numunesi.	48
Şekil 4.17. Üretilen kanca numuneleri.	48
Şekil 4.18. Çekme deneyi aşamaları.	49
Şekil 4.19. Çekme deneyi aşamaları.	49
Şekil 4.20. Kesit görseli.	50
Şekil 4.21. Üretim süreleri karşılaştırma grafiği.....	52
Şekil 4.22. Ağırlık karşılaştırma grafiği.....	52
Şekil 4.23. Kopma değerleri karşılaştırma grafiği.	52
Şekil 4.24. Honeycomb dolgu desen ile %20 dolulukta üretilip çekme testi yapılmış numuneler.	53
Şekil 4.25. Gerilimin yüksek olduğu bölge.....	53
Şekil 4.26. Kesit görseli.	54
Şekil 4.27. Üretim süreleri karşılaştırma grafiği.....	56
Şekil 4.28. Ağırlık karşılaştırma grafiği.....	56
Şekil 4.29. Kopma değerleri karşılaştırma grafiği.	56

Şekil 5.1. Kancada tam dolu üretilmesi önerilen bölge.	61
Şekil 5.2. Kancada tam dolu üretilmesi önerilen bölge.	62



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Eklemeli imalat ve çıkarmalı imalat yöntemlerinin karşılaştırması.	4
Tablo 2.1. Eklemeli üretim süreci sınıflandırılması.	16
Tablo 2.2. Eklemeli imalat işlem kategorisine göre doğrudan eklemeli imalat tarafından işlenen mevcut ticari malzemeler.	26
Tablo 3.1. ASTM-D638 Tip-1 numune boyutları.	38
Tablo 4.1. Üretim parametreleri.	40
Tablo 4.2. Çekme numunesinin çekme testi sonuçları ve her iki dolgu deseni ve yüzdelikleri için oluşan örme tipleri.	43
Tablo 4.3. Kanca numunesinin çekme testi sonuçları ve her iki dolgu deseni ve yüzdelikleri için oluşan örme tipleri.	51
Tablo 4.4. Kanca numunesinin çekme testi sonuçları ve her iki dolgu deseni ve yüzdelikleri için oluşan örme tipleri.	55
Tablo 4.5. Test verilerinin karşılaştırmalı gösterimi.	57
Tablo 4.6. Yüzdelik olarak değişim fark tablosu.	58

ÖZET

Anahtar kelimeler: Gözlü kanca optimizasyonu, eklemeli imalat, 3 boyutlu yazıcı, dayanım, dolgu deseni

Sanayi devriminden bu yana, çeşitli imalat yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler temelde talaşlı ve talaşsız imalat olmak üzere iki kategoride toplanmaktadır. Günümüzde gerek müşteri beklentilerinin değişmesi gerekse de çevre sorunlarına olan duyarlılığın artması ile birlikte geleneksel üretim yöntemlerinin yetersiz veya verimsiz kaldığı durumlarda eklemeli imalat yöntemi bu sorunların çözümünde en önde gelen alternatif üretim tekniği olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada, eklemeli imalat yöntemi ile bu yöntemin avantaj ve dezavantajları hakkında literatür çalışması yapılmış ve 3 boyutlu (3B) yazıcı teknolojisi ile üretilen endüstriyel bir parçanın dayanımı incelenmiştir. Bu amaçla sanayide yük taşıma sistemlerinde sıklıkla kullanılan gözlü kanca bilgisayar destekli tasarım (BDT) yazılımı ile modellendikten sonra farklı üretim parametreleri (doluluk oranı ve iç örme yapısı) kullanılarak eklemeli imalat yöntemi ile üretilerek yük taşıma kabiliyeti deneysel olarak incelenmiştir. Bunun yanında model sonlu elemanlar yöntemi ile de analiz edilerek parça üzerinde oluşan gerilmeler incelenmiştir. Deney sonucunda kırılmanın başladığı ve sonlu elemanlar analizi ile tespit edilen gerilmenin en yüksek olduğu bölgede iç örme yapısında iyileştirmeler yapılarak modelin yük taşıma kapasitesindeki değişimler karşılaştırılmıştır. Bu amaçla üretim parametrelerinin değiştirilebildiği açık kaynak kodlu kartezyen tip bir 3 Boyutlu yazıcı tasarlanıp üretilmiştir.

Bu tez çalışması sonucunda iç örme yapısının, üretim süresine, kullanılan malzeme miktarına ve parçaların dayanıklılığına olan etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bunun yanında 3B üretim teknolojisinin sağlamış olduğu avantaj kullanarak gerek test gerekse de sonlu elemanlar yöntemi ile parça üzerinde tespit edilen zayıf bölgelerde güçlendirmeler yapılarak parçaların dayanımlarının arttırılabildiği de görülmüştür.

THE EFFECT OF INFILL PATTERNS' PARAMETERS IN FDM TYPE 3D PRINTERS ON PRODUCT RESISTANCE

SUMMARY

Keywords: Eyehook optimization, additive manufacturing, 3D printer, strength, infill pattern

Since the industrial revolution, various manufacturing methods have been developed. These methods are basically grouped in two categories: machining and chipless manufacturing. Nowadays, additive manufacturing method is the most prominent alternative production method in the solution of these problems in cases where traditional production methods are inadequate or inefficient, with the change of customer expectations and increased sensitivity to environmental problems.

In this study, the literature study which is about additive manufacturing method in terms of the advantages and disadvantages of this method is reviewed and the strength of an industrial part produced with 3D printer technology is investigated. For this purpose, an eyed hook which is frequently used in load carrying systems in the industry, is modeled with CAD software and is experimentally examined while producing by additive manufacturing method with different production parameters (filling density and infill pattern). Additionally, the model is analyzed with the finite element method and the stresses on the part are examined. As a result of the experiment, in the part of the samples where the breaking started and the highest stress is determined by finite element analysis, improvements are made in the infill pattern and the capacity changes are compared. For this purpose, an open source cartesian type 3D printer is designed and manufactured, where production parameters can be changed.

As a result of this thesis study, the effect of the infill pattern on the production time, the amount of material used and the durability of the parts is examined comparatively. In addition, with the advantage provided by 3D production technology, it is observed that the strength of the parts can be increased by making reinforcements on the weak volume detected on the part either by test or finite element method.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Sanayi devriminden bu yana, çeşitli imalat teknolojileri geliştirilmiştir. Bu teknolojiler süreçlerine göre eklemeli imalat, çıkarmalı imalat ve biçimlendirici imalat olarak üç ana grupta toplanabilir.

Çıkarmalı imalat ya da genel kullanımıyla talaşlı imalat, bir bütünden malzeme çıkartılarak nihai ürün elde etme prensibine dayanır. Malzeme; kesme, delme veya taşlama yoluyla ana malzemeden çıkarılır. Bu işlemler manuel olarak gerçekleştirilebilse de, genellikle bilgisayar nümerik kontrolü (BNK) kullanılarak elde edilir. Tornalama, frezeleme matkapla delme, kesme gibi işlemler konvansiyonel tezgâhlarda yapılmakta olup, günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte BNK tezgâhları yaygın olarak çıkarmalı imalatta kullanılmaktadır.

BNK işlemede, sayısal kontrollü bir kesici alet, bir geometriye oluşturmak için malzemeyi mekanik olarak kaldırır. Bu işlemde elde edilecek parça, BDT programında modellenir, malzemesinin nasıl işleneceği BNK makinesine bilgisayar destekli üretim (BDÜ) kodlarıyla BNK tezgâhına tanımlanır. Tornalama, delme ve frezeleme gibi 3 boyut modellere göre malzemenin çıkarılmasını ilgilendiren üç ana işleme süreci vardır. Diğer çıkarmalı imalat işlemleri lazerle kesme, su jeti ile kesme, tel erozyon, elektriksel deşarj işlemesi ve plazma ile kesimdir. Bu yöntemler esas olarak 2 boyut işlemede kullanılır.

Çıkarmalı üretiminin avantajları;

- Metaller, plastikler ve plastik kompozitler ve hatta ahşap da dahil olmak üzere çok çeşitli malzemelere uygulanabilir.

- Düz yüzey, delik, silindir, vida dişi, yarık vb. hemen hemen her geometriyi elde etmek için kullanılabilir.
- Yaklaşık 0.025 mm yakın toleransla yüksek hassasiyet sağlayabilir.
- Pürüzsüz yüzey kalitesi elde edilebilir.

Çıkarmalı üretiminin dezavantajları;

- Oluşan talaşlar boşa harcandığında malzeme israfı vardır. Talaşlar geri dönüştürülebilse bile, hala atık malzeme olarak görülmelidir.
- Her parça için ilave ve biçimlendirici üretim yöntemlerinden daha fazla zaman alır.

Eklemeli imalat, çıkarıcı ve biçimlendirici imalat metodolojilerinin aksine, genellikle katman üzerinde katman olan 3B model verilerinden parçalar yapmak için malzemelerin birleştirme işlemidir. Katkı maddesi imalatındaki mevcut küresel aktivitenin çoğunluğu polimer esaslı sistemleri içermesine rağmen, metal parça imalatına yönelik faaliyetler ve eğilimler olmuştur.

Eklemeli imalat yaygın olarak 3B baskı olarak bilinir. 3B yazıcı olarak bilinen makineler kullanılarak gerçekleştirilir. 3B baskı terimi, hammadde malzemesi ve enerji kaynağına göre farklılık gösteren bir dizi işlemi kapsar. Bununla birlikte, tüm işlemlerde ortak olan temel adımlar vardır.

1. Basılacak parçanın BDT ile tasarlanması.
2. Daha sonra özel dilimleme yazılımı ile modelin birkaç kesit katmanına dilimlenmesi.
3. Kullanılan teknolojiye bağlı olarak, 3B yazıcının toz, tel, levha veya sıvı olabilecek hammadde malzemesini eritmeye, kaynaştırmaya veya sertleştirmeye devam ederek istenen geometri oluşana kadar katman katman biriktirilmesi.

3B baskı işlemleri arasında Stereolitografi (SLA), Malzeme Püskürtme (MP), Seçici Lazer Eritme (SLE) veya Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS), Elektron Işını Üretim (EIÜ) bulunur.

Eklemeli imalatın avantajları;

- Hurda malzeme olmaması nedeniyle oldukça verimlidir.
- Tasarım aşamasından üretime geçiş hızlıdır.
- Karmaşık tasarımların üretimi kolaydır.

Eklemeli üretimin dezavantajları;

- Diğer üretim işlemleriyle karşılaştırıldığında sınırlı bir malzeme yelpazesine sahiptir.
- Metal üretimi zor ve pahalıdır.
- Seri ve çok sayıda üretim için uygun değildir.

Eklemeli imalat ve çıkarmalı imalat yöntemlerinin karşılaştırması; Tablo 1.1’de gösterilmiştir [1].

Hem eklemeli hem de çıkarmalı imalat yöntemleriyle bir ürünün prototipi oluşturulabilir. Ancak prototipleme için eklemeli imalat tercih edilir. Prototipleme süreci tamamlanmış ürünler için, çıkarmalı imalat daha uygundur. Bunun nedeni, çıkarmalı imalat ile üretilen parçaların her zaman son işlem gerektirmemesi ve daha iyi mekanik özelliklere sahip olmasıdır.

1-10 adet gibi küçük üretim adetleri söz konusu ise, üretim hammaddesinin ucuz olmasından dolayı 3 boyutlu baskı yöntemi daha uygundur. 10-10000 aynı parçaların üretim işlemleri, çıkarmalı imalat kullanılarak daha düşük maliyetlidir. 10000’den büyük miktarlar için biçimlendirici üretim süreçleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Küçük boyutlu ve detaylı parçalar eklemeli imalat ile daha iyi üretilir. Diğer taraftan, çıkarmalı imalat büyük parçalar için daha uygundur.

Metal, ahşap, cam, taş ve köpük gibi malzemelerin eklemeli imalat kullanılarak imal edilmesi çok pahalıdır veya imkânsızdır. Bu tür malzemeler çıkarmalı imalatı gerektirir. Diğer taraftan, esnek TPU (Termoplastik Poliüretan) ve üstün alaşımlar gibi işlenmesi zor malzemeler 3 boyutlu olarak basılabilir.

Tablo 1.1. Eklemeli imalat ve çıkarmalı imalat yöntemlerinin karşılaştırması.

	Eklemeli İmalat	Çıkarmalı İmalat
Elde edilebilir karmaşık geometriler	5 eksenli BNK işlemeden bile daha iyi, oldukça karmaşık ve girift geometrilere sahip parçalar üretilebilir.	Nispeten basit geometriye daha uygundur.
Üretilen parçaların özellikleri	Delik ve dişli gibi özellikler verimli bir şekilde üretilemez.	Verimli biçimde delikler ve dişli bölümler oluşturulabilir.
Üretilen parçaların özellikleri	Üretilen parçalar yetersiz mekanik özelliklere sahip olabilir. Parçalar katman katman oluşturulduğundan, bu tabakalar arasında yapısal zayıflıklar ortaya çıkmakta ve bu da spesifik özelliklerden ödün vermektedir.	Üretilen parçalar mükemmel mekanik ve ısı özelliklerine sahip olabilir.
Hassasiyet	Boyutsal hassasiyet azdır. En doğru eklemeli imalat işlemi olan SLE / DMLE, 0.100 mm kadar hassas toleranslar üretebilir.	Daha büyük boyutsal hassasiyet sağlayabilir. 0,025 mm'ye kadar hassas toleranslar mümkündür.
Üretim Malzemeleri	Ağırlıklı olarak plastiklerle ve küçük ölçüde metallerle çalışılabilir.	Plastik, metal, ahşap, köpük, cam ve taş dahil çok çeşitli malzemelerle çalışılabilir
Bitime	Üretilen parçalar her zaman bitirme işlemleri gerektirir.	Üretilen parçalar son işlem gerektirmeyebilir.
Kurulum	Tasarımdan üretime, parça başına daha kısa sürede sonuçlanan minimum kurulum gerektirir. Parçanın BDT modelini tasarladıktan ve döndürdükten sonra yapması gereken tek şey hammadde malzemesini ayarlamaktır.	Kurulumu için daha fazla çaba ve zaman gerektirir. BNK işlemede, örneğin, bir BDT modeli oluşturulduktan ve onu G Koduna döndürdükten sonra, BNK makinesinin çeşitli ayarlarının yapılması ve parametrelerinin (iş parçasını çalışma tezgahına yerleştirilmesi, uygun kesme sıvısının seçilmesi-hazırlanması, kesici takımı seçilmesi-takılması, doğru hız, besleme ve kesme derinliğinin ayarlanması) ayarlanması gerekir.
Ölçeklenebilirlik	Üretim maliyeti, üretim miktarıyla doğru orantılıdır. Bununla birlikte, üretim miktarı arttıkça, üretim maliyetleri önemli ölçüde artar.	Üretim maliyeti, üretim miktarıyla ters orantılıdır. Üretim miktarı arttıkça, üretim maliyetleri azalır.
Hız ve maliyet	Geometrik olarak küçük parçalar, plastikler ve küçük üretim çalışmaları için daha hızlı ve daha ucuzdur.	Göreceli büyük parçalar, metaller ve büyük üretim çalışmaları için daha hızlı ve daha ucuzdur.

Özetle, eklemeli imalat, plastikten yapılan küçük, oldukça karmaşık parçaların prototipleme ve küçük ölçekli üretiminde en uygun ve verimli yöntemdir. Çıkarmalı imalat, çok çeşitli malzemelerden yapılmış nispeten basit, büyük parçaların büyük ölçekli üretimi için daha verimlidir [1].

BÖLÜM 2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Eklemeli İmalat

ASTM standardı F2792-10'a göre eklemeli imalat, “geleneksel makineyle işleme gibi çıkarmalı üretim metodolojilerinin aksine, malzemelerin 3 boyutlu model verilerinden nesneler yapmak için genellikle üst üste katmanlar şeklinde birleştirilmesi sürecidir” [2]. Eklemeli imalat yöntemleri, ürüne özel hazırlanmış malzemeler, plastikler ve metaller dahil olmak üzere oldukça geniş bir malzeme çeşidiyle sifıra yakın fire vererek, geleneksel yöntemlerle üretilemeyecek kadar karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesine imkân tanımaktadır. Bu nedenle eklemeli imalat, üretim esnekliği ve hassas üretim kapasitesinden dolayı “tasarım özgürlüğü” sunan, tasarımcıların ve mühendislerin düşük hacimlerde ekonomik olarak üretilbilecek benzersiz ürünler tasarlamalarını sağlayan bir araçtır. Eklemeli imalat teknolojisinin gelişmesi ile birlikte, kullanılan malzemelerin çevreyle dost ve ekolojik hayata zarar vermeyen malzemelerden seçilmesinin kolay hale gelmesi, bu yöntemin diğer yöntemlere göre daha çevreci olmasını sağlamaktadır. Eklemeli imalat teknolojileri ve yöntemleri, uygulama ve pazar payı bakımından sürekli artmakta, otomotiv, medikal, havacılık ve uzay gibi çeşitli üretim alanlarına yayılmaktadır ve bu güçlü büyümenin önümüzdeki yıllarda da devam etmesi beklenmektedir [3].

2.2. Eklemeli İmalat Yöntemleri

Günümüzde, çalışma prensibi ve kullanılan malzeme türüne göre çok çeşitli eklemeli imalat yöntemi mevcuttur. Örneğin seçici lazer ergitme (SLE), seçici lazer sinterleme (SLS) ve eriyik yığarak modelleme (FDM); stereolitografi (SLA) gibi bazı yöntemler, tabakaları üretmek için malzemeleri eritir veya yumuşatır. Her yöntemin avantajları ve dezavantajları vardır. En uygun 3 boyutlu baskı makinesini seçerken göz önünde

bulundurulması gereken başlıca parametreler hızı, yazdırılan prototipin maliyeti, kullanılan hammadde ve maliyeti ile yazıcının boyutu olarak sıralanabilir [4]. Günümüzde, yük altında çalışan yapıların eklemeli imalatına yönelik önemli çalışmalar vardır. Bu yapılar üretilirken mukavemeti göz önünde bulundurularak malzeme seçimi yapılmalıdır.

2.2.1. Lazer esaslı yöntemler

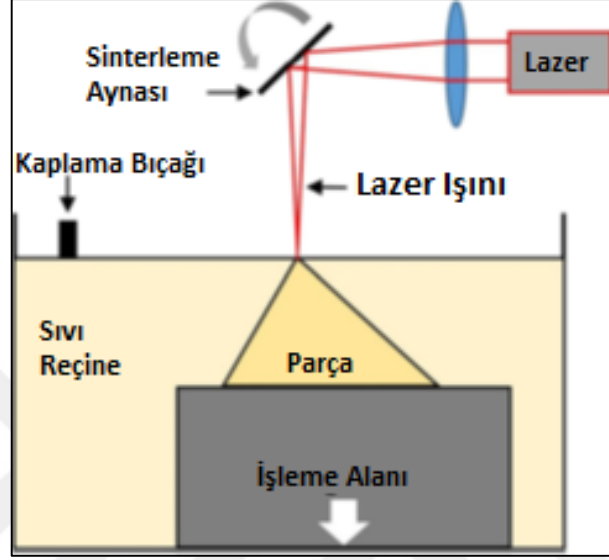
Lazer esaslı eklemeli imalat yöntemleri; malzemeyi eritmek, katılaştırmak ve sertleştirmek amacıyla düşük güç ile orta güçte bir lazer kaynağı kullanır. Lazer esaslı işlemler, faz değiştirme mekanizmasına bağlı olarak, lazer eritme ve lazer polimerizasyonu olmak üzere iki alt kategoriye ayrılabilir. Lazer eritme işlemlerinde; malzeme, toz halinde ya bir toz yatağına ya da nozüller vasıtasıyla doğrudan işleme ünitesine gönderilir. Malzemeyi eritmek için bir lazer ışını kullanılır; bu daha sonra soğur ve katılaşarak parçayı oluşturur. Lazer polimerizasyonunda, malzeme genellikle, düşük güçlü bir lazer kaynağı tarafından sağlanan UV radyasyonuna maruz kaldığında sertleşen, ışığa duyarlı bir reçinedir.

2.2.1.1. Lazer polimerizasyon

Tüm lazer polimerizasyon eklemeli imalat işlemleri, bir lazer kaynağından ışığa duyarlı (ışık kaynağı ile katılan) bir sıvı reçine malzemenin faz değişim prensibine dayanmaktadır. Lazer polimerizasyon işlemleri, nispeten düşük mukavemetli reçinenin polimer parçalarının üretilmesiyle sınırlıdır, bu nedenle yapısal parçaların üretiminde değil prototip ve yapısal olmayan uygulamalarda kullanılabilirler. Lazer polimerizasyonu eklemeli imalat proses şeması Şekil 2.1’de gösterilmiştir [5].

Stereolitografi (SLA): Stereolitografi, ışığa duyarlı monomer reçinelerinin, UV ışını altında fotopolimerizasyonu prensibine dayanmaktadır. UV ışın kaynağı, yüzeydeki ince bir tabakayı katılaştıran düşük güçte bir He-Cd veya Nd: YVO4 lazeridir. Bir SLA makinesi, temel olarak bir sıvı reçine banyosuna batırılan bir platformdan ve kontrol için uygun donanım ve yazılımı içeren bir lazer kaynağından oluşur. Parçanın bir

katmanı, reçine yüzeyinde üç boyutlu model verilerine göre lazer tarafından taranır. Katmanın konturu tarandıktan sonra, iç kısımlar çapraz paralel olarak taranır ve dolayısıyla katılaşır. Bir kanat, düzlüğü sağlamak için yüzeyi gezer ve bir sonraki katmana aynı anda bağlanırken yeni katman oluşturulur [6].



Şekil 2.1. Lazer polimerizasyonu eklemeli imalat prosesi.

Katı zemin kürleme (KZK): KZK, katman geometrisinin üretilmesinin yüksek güçlü bir UV lambası veya lazer kaynaklı bir maske aracılığıyla gerçekleştirilen foto-polimer bazlı bir eklemeli imalat teknolojisidir [3].

KZK, 1986 yılında Cubital Ltd. tarafından geliştirilmiş ve ticarileştirilmiştir. Yöntem tam doğruluk ve çok iyi bir inşaa oranı sunarken, sistemin karmaşıklığı nedeniyle yüksek işletme maliyetleri taşımaktadır.

Sıvı termal polimerizasyonu (STP): STP, parçanın ardarda sıvı polimer tabakalarının katılaşmasıyla yapılan SLA'ya benzer bir işlemdir. Bununla beraber, STP'de kullanılan polimerler, fotopolimerlerin yerine termosettir ve dolayısıyla katılaşma, ışık yerine termal enerji ile sağlanmaktadır. İşlemin termal yapısı, ısı dağılımı nedeniyle, polimerizasyon bölgesi sınırlarının kontrolünü zorlaştırır [7]. Bu nedenle, STP ile üretilen parçaların boyut hassasiyeti daha azdır. Bununla birlikte, işlem nispeten

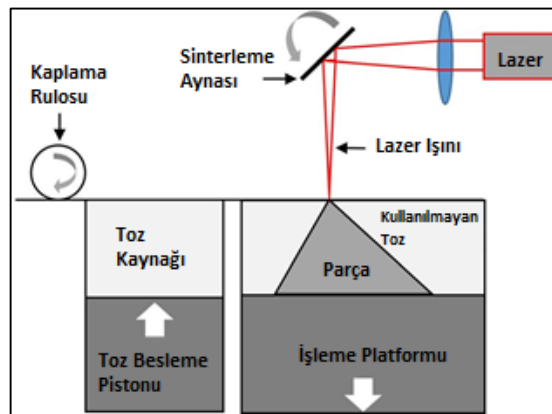
yüksek bir verime sahiptir ve hassasiyetin bir sorun olmadığı uygulamalarda düşünülebilir.

Işın etkileşimi ile katılaştırma (IEK): IEK, farklı dalga boylarına sahip iki lazer ışınının kesişimindeki ışığa duyarlı polimerlerin noktasal katılaşması prensibine dayanır. İlk lazer, sıvı polimeri tersinir, yarı kararlı duruma getirir. Daha sonra sıvı polimer, ikinci lazer ışını ile polimerize edilir. Prosesin, lazer ışınının daha yüksek derinliklerde yetersiz absorpsiyonu, hali hazırda katılaşmış malzemenin gölgelenme etkileri ve lazer ışınının difraksiyonu (kırınım) gibi çeşitli teknik sınırlamaları olmakla birlikte bu durum, ışın demetlerinin kesişiminde zorluklara yol açmaktadır [7].

Holografik etkileşim ile katılaştırma (HEK): Bu işlem, noktasal bir bölge yerine polimer yüzeyinin tamamının katılaşması için bir havuzdaki sıvı photosensitiv polimere holografik bir şeklin yansıtılması prensibine dayanır [7]. Bu işlem temelinde katı zemin kürlenmesine çok benzer.

2.2.1.2. Lazer ergitme

Lazer ergitme yönteminde, toz halindeki malzeme bir lazer kaynağı yardımıyla ergitilir. Malzeme daha sonra soğuyup katılaşarak, nihai ürünü oluşturur. Tarama optiği, lazer ışınını, x-y düzleminde yönlendirmek için kullanılırken, bir platform, bu düzleme dik z-yönüne doğru hareket eder. Lazer ergitme eklemeli imalat proses şeması Şekil 2.2’de gösterilmiştir [5].



Şekil 2.2. Lazer eritme eklemeli imalat prosesi.

Seçmeli lazer sinterleme (SLS): Seçmeli lazer sinterleme işleminde, taneciklerin birbirine yapışmasını sağlayacak şekilde bir lazer ışınıyla (plastik için 7 W [8] ile 200 W arasında değişmektedir [3] ,[9].) ısıtılan ince bir toz kullanır [10]. Süreç, sinterleme olarak bilinmesine rağmen, tamamen doğru bir tabir değildir. Toz, lazer ışını ile sinterlenmeden önce, ısıl bozulmayı en aza indirmek ve bir önceki tabakadaki füzyonu kolaylaştırmak için tüm yatak, malzemenin erime noktasının hemen altında ısıtılır. Her katman yapıldıktan sonra, yatak indirilir ve yeni bir toz katmanı uygulanır. Daha sonra tozu düzgün bir şekilde yaymak için dönen bir rulo kullanılır. Sinterlenmiş malzeme, parçayı oluştururken, sinterlenmemiş malzeme tozu, yapıyı desteklemek için yerinde kalır. Sinterlenmemiş malzeme, parça tamamlandıktan sonra temizlenebilir ve geri dönüştürülebilir. Bu yöntemde, metal tozları, naylon, naylon kompozitler, kum, balmumu ve polikarbonatlar gibi malzemeler kullanılabilir [10]. Bununla birlikte işlem, nispeten yavaştır (metalik yapılar için EIÜ ile karşılaştırıldığında) ve ısıl bozulma ve üründe çatlaklara yol açabilecek düzenli olmayan termal alan yayılımı gibi sorunlar içerir. Buna rağmen, yüksek doğruluk derecesi ve yüzey kalitesi SLS'yi en çok kullanılan metal eklemeli imalat işlemlerinden biri haline getirmektedir.

Seçmeli lazer ergitme (SLE): Seçmeli lazer ergitme SLS'ye benzer bir işlemdir; ikisi de aynı kavramın örneklemevidir, ancak teknik detaylarda farklılık gösterir. Sinterleme yerine, SLE işleminde, bir parça oluşturmak için toz eritilir. Bu nedenle, lazer ışınının gücü genellikle daha yüksektir (yaklaşık 400 W) [3].

Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS): Doğrudan metal lazer sinterleme, SLS / SLE'ye benzer bir lazer bazlı eklemeli imalat işlemidir. Bununla birlikte, SLS / SLE çeşitli malzemeleri işleyebilse de, DMLS yalnızca metal tozlarını işler. DMLS, EOS tarafından geliştirilmiştir ve ticari bir markadır. EOS makinelerinin tipik lazer gücü 200–400 W arasında değişmektedir [11].

Lazerle işlenmiş net şekillendirme (LİNS): Lazerle işlenmiş net şekillendirme, metal tozunu eritmek için yüksek güçlü bir lazer kullanır. Özel olarak tasarlanmış bir toz besleme nozülü, toz akışını doğrudan odaklanmış lazer ışınına enjekte eder ve lazer kafası ve toz nozülü, bileşik bir ünite olarak hareket eder. Metal tozlar, kafanın

çevresine, yerçekimi ile veya basınçlı bir taşıyıcı gaz kullanılarak iletilir ve dağıtılır. Lazer ışını, alt tabaka üzerinde veya önceden biriktirilmiş katmanlar üzerinde, erimiş malzemeden küçük bir havuz yaratır. Bu bölgeye beslenen toz, havuzda tüketilir ve bu da malzeme yüzeyinin yüksekliğinin artmasına sebep olur. X-y tablası, nesnenin her katmanını üretmek için hareket ettirilir. Her katman tamamlandığında kafa dikey olarak hareket eder. Bu teknik, DMY, LTY ve SLK gibi birçok yöntemle eş değerdir [11]. SLE gibi toz yatakları kullanan işlemlerle karşılaştırıldığında, bu teknolojiyle oluşturulan nesneler birkaç metre uzunluğa kadar olabilir; ancak, hassasiyet ve yüzey kalitesi genellikle daha düşüktür.

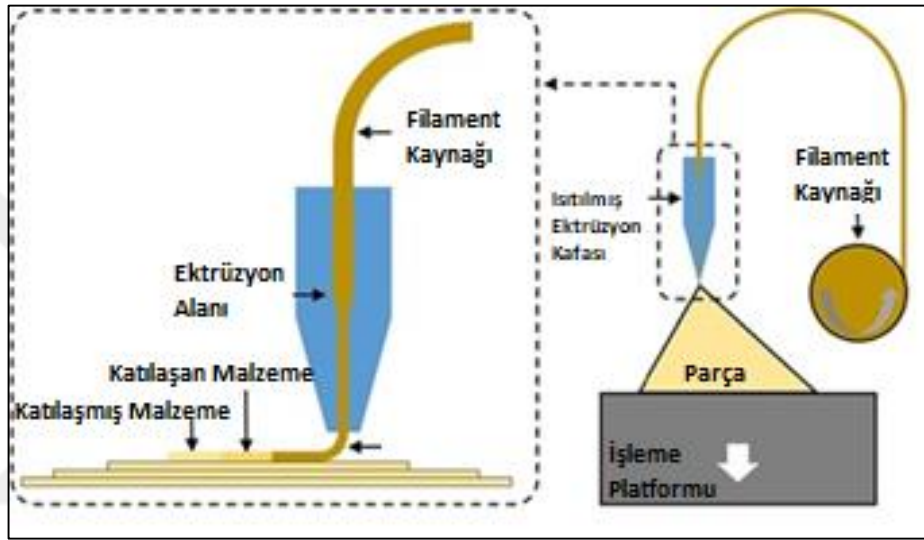
Direkt metal yığma (DMY): DMY, toz halindeki metal malzemeyi sinterlemek veya eritmek için güç kaynağı olarak bir lazer kullanan ve lazerin bir 3 boyutlu model tarafından tanımlanan uzayda noktalara otomatik olarak hedef alınarak, katı bir yapı oluşturmak için malzemeyi birbirine bağlayan bir eklemeli imalat tekniğidir. Çalışma prensibi, SLS / SLE işlemine benzer, ancak bu yöntemde toz, yatakta değildir. Bunun yerine toz, LİNS'ine benzer şekilde doğrudan işlem başlığına bir dizi nozul (genellikle 3) ile beslenir.

Lazer tozu yığma (LTY): Bu eklemeli imalat işleminde, direkt olarak alt tabakadaki lazer ışını odak noktasına bir toz / hava karışımı enjekte edilir. Bu işlemin çeşitleri LINS, SLK ve DMY'dir [3].

Seçmeli lazer kaplama (SLK): Seçmeli lazer kaplama, lazeri, bir sübstrat üzerinde metal tozunu eritmek için bir ısıtma kaynağı olarak kullanan başka bir malzeme işleme tekniğidir. Bu teknik, hızlı imalat işlemi olarak, bir noktadan noktaya ve bir tabaka halinde parça oluşturmak için uygulanmaktadır. Net şekle yakın geometrilere sahip fonksiyonel metal parçalar yaratmanın bir yolu olarak tanıtılmıştır ve geleneksel hızlı prototipleme tekniklerine göre önemli bir avantaja sahiptir. Bunun nedeni, geleneksel hızlı prototipleme tekniklerinde kalıp hazırlama işlemini içeren iki aşamalı prosese kıyasla parçanın net ölçülerle doğrudan imal edilmesidir [12].

2.2.2. Ekstrüzyon işlemleri

Malzeme ekstrüzyon işlemleri sıcak ortamda gerçekleştirilir. Genellikle filament tel şeklindeki plastik malzemeyi, yumuşatmak veya eritmek için ısıtılmış bir ekstrüzyon memesi kullanılır. Malzeme eritildikten sonra, bir ekstrüzyon memesinden geçer ve daha sonra son ürünü katılaştırmak için soğutulur. Ekstrüzyon eklemeli imalat proses şeması Şekil 2.3'te gösterilmiştir [8].



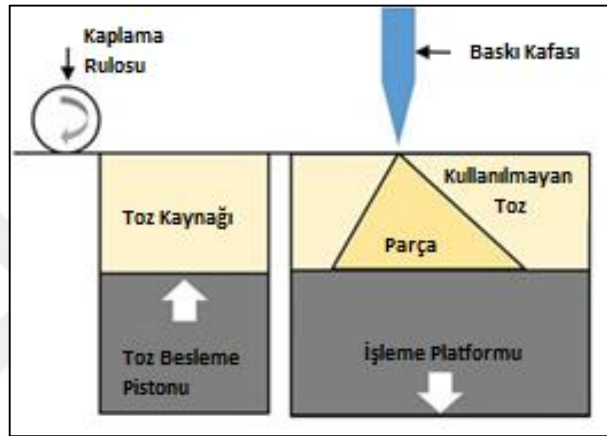
Şekil 2.3. Ekstrüzyon eklemeli imalat prosesi.

2.2.2.1. Eriyik yığarak modelleme (FDM)

FDM tekniğinde, erimiş bir termoplastik malzeme lifinin bir substrat üzerine biriktiren hareketli bir kafa kullanılır. Malzeme, ergime noktasının 1°C üstüne kadar ısıtılır, böylece ekstrüzyondan hemen sonra katılır ve daha sonra önceki katmanlara bağlanır. FDM sistem kafası genellikle, biri imalat malzemesi için diğeri destek malzeme için iki ağızlık içerir. Sistemin avantajı, ABS, tıbbi ABS, PLA, döküm mumu ve elastomerler gibi ucuz, toksik olmayan, kokusuz malzemelerin çeşitli renk ve tiplerde kullanılabilmesidir [10]. FDM sürecinin basitliği, nispeten ucuz ekipman ve hammadde ile çalışılabilmesi, düşük maliyetli plastik parçaların üretimi için idealdir. Bununla birlikte, hassasiyet ve yüzey kalitesi, toz bazlı plastik eklemeli imalat işlemleriyle karşılaştırıldığında nispeten düşüktür.

2.2.3. Malzeme püskürtme

Malzeme püskürtme işlemlerinde, tozu katı bir cisimde bağlamak için, kontrollü bir şekilde, erimiş malzeme veya daha genel olarak bir bağlayıcı (yapışkan) “püskürtmek” için ince uçlar kullanılır. Sistemin çalışma prensibi, herhangi bir faz değişikliği olmamasına rağmen, tüm lazer eritme işlemleri gibidir. Malzeme püskürtme eklemeli imalat proses şeması Şekil 2.4’te gösterilmiştir [5].



Şekil 2.4. Malzeme püskürtme eklemeli imalat süreci.

2.2.3.1. Üç boyutlu yazıcı (3BY)

3BY, parçaların toz yatağı içeren bir piston içinde oluşturulduğu katmanlı bir üretim işlemidir. Daha ayrıntılı olarak, piston kademeli olarak düşürülür ve üstten yeni bir toz tabakası yayılır. Parça, bağlayıcıya toza “mürekkep püskürtmeli yazdırma” ile oluşturulur [13].

2.2.3.2. Mürekkep püskürtmeli yazıcı (MPY)

MPY, mürekkep damlacıklarını kâğıda, plastik veya diğer yüzeylere sürterek dijital bir görüntü oluşturan bir tür bilgisayar baskısıdır. MPY’ler en yaygın kullanılan yazıcı türüdür ve küçük ucuz tüketici modellerinden on binlerce dolara veya daha fazlasına mal olabilecek çok büyük profesyonel makinelere kadar çeşitlilik gösterir [13].

2.2.3.3. Multijet modelleme (MJM)

MJM'nin temelini oluşturan prensip, diğer hızlı prototipleme sistemlerinde kullanılan katmanlama prensibidir. MJM, üç boyutlu olarak uygulanan mürekkep püskürtmeli baskıya benzer bir teknik kullanarak modeller oluşturur. MJM kafası, x-y düzleminde hareket eder ve yalnızca gerektiğinde özel termo-polimer malzeme bırakır ve modelin tek bir katmanını oluşturur. Bir UV ışın kaynağı, biriken termo-polimerin sertleşmesi için her geçiş boyunca yanıp söner. Katman tamamlandığında, platform kafadan uzaklaşır (z eksen) ve kafa bir sonraki katmanı oluşturmaya başlar [7].

2.2.3.4. Balistik parçacık üretimi (BPÜ)

BPÜ işlemi, hedef substrat üzerinde biriktirilecek olan piezoelektrik mürekkep püskürtmeli baskı ağızlıklarından çıkan bir erimiş damla akışını kapsar. İşlem, malzeme akışını substrat üzerine konumlandırmak için katı modelin 3 boyutlu verilerini kullanır. İşlem, malzemenin erimesine dayandığından, özellikle eriyen ve katılaşan termoplastikler ve metaller gibi malzemeler için özellikle uygundur [7].

2.2.3.5. Termojet

Thermojet, multijet modellemeye benzer bir işlemdir. Sistem, SLA'dan daha az hassas olmasına rağmen balmumu benzeri plastik modeller üretir. Makine, çoklu püskürtme nozullarına sahip geniş bir alan kafası kullanır. Bu püskürtme kafaları, katı cisim oluşturmak üzere çarpışma sırasında soğuyan ve sertleşen damlacıklar püskürtmektedir. Bu işlem, kuyumculuk endüstrisinde döküm kalıplarının oluşturulması ve diğer hassas döküm uygulamalarında yaygın olarak kullanılır.

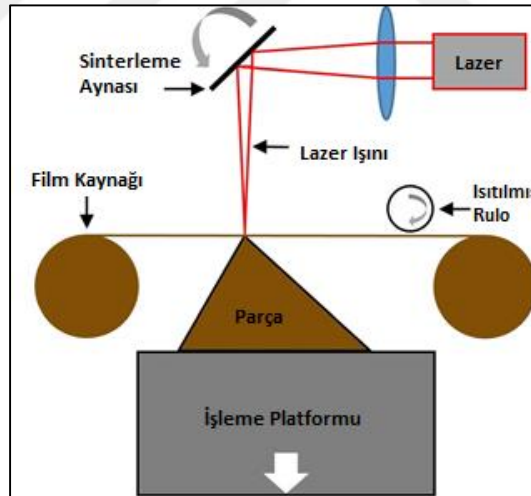
2.2.4. Yapıştırıcı bazlı işlemler

Yapıştırıcı bazlı işlemlerin günümüzde kullanımı yaygın değildir. Çalışma prensibi (genellikle bir lazer) istenen ana hatlarda ince bir kâğıt veya plastik film kesen bir kesici içerir. Film daha sonra ısıtılmış bir kompaktör tarafından öncekinin üzerine

bastırılır, böylece alt tabakaya yapıştırılmak üzere filmin aşağı yüzünde mevcut olan bir ısıyla sertleşen yapıştırıcı etkinleştirilir. Yapışkan eklemeli imalat proses şeması Şekil 2.5’te gösterilmiştir [5].

2.2.4.1.Lamine nesne imalatı (LNI)

LNI’de kullanılan malzeme, ısıya duyarlı bir yapışkan içeren özel bir kâğıt türüdür. Kağıt, bir rulodan beslenir ve diğer tabakaya yapışması yine bir silindir yardımıyla sağlanır. Katmanın konturu, tam olarak bir katman (kâğıt) kalınlıkta bir derinliğe girecek şekilde özenle ayarlanmış bir CO₂ beslemeli lazerle kesilir. Kalan malzeme, çıkarılmasını kolaylaştırmak için dikdörtgenlere kesilir, ancak destek olarak kullanılmak üzere yapım sırasında yerinde kalır. Kullanılan malzeme tabakası üretim tablasından daha geniştir, böylece, parça katmanı kesildiğinde, bir toplayıcı rulo ile çekilmek ve böylece sürekli olarak bir sonraki tabakaya malzeme sağlamak için tabakanın kenarları sağlam kalır [10].



Şekil 2.5. Yapışkan eklemeli imalat prosesi.

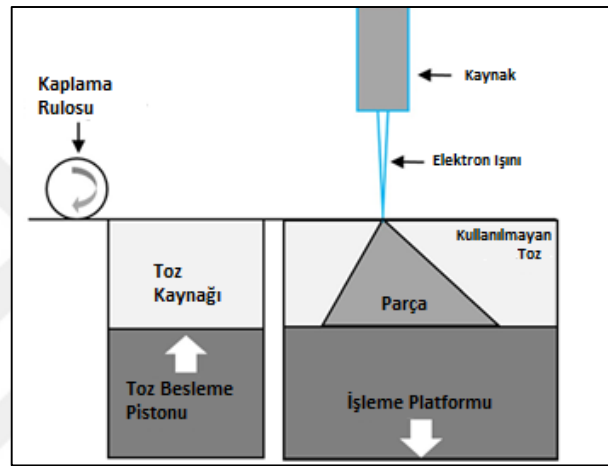
2.2.4.2. Katı folyo polimerizasyonu (KFP)

İşlem, yarı-polimerize plastik folyoların, uygun ışık kaynağına maruz kalması prensibiyle tam polimerizasyonuna dayanmaktadır. Yarı polimerize folyo ilk önce katılaşmış kısım üzerine istiflenir ve daha sonra tam polimerizasyondan sonra

bağlanma sağlanacak şekilde aydınlatılır. Işıklandırılmayan fazla folyo, istenen kısmın gerisinde bırakılarak uygun bir çözücü içinde çözülerek çıkarılabilir [7].

2.2.5. Elektron ışını

Elektron ışını işlemleri, lazer eritme işlemleriyle aynıdır, ancak bir lazer ışını yerine, malzemeyi eritmek veya sinterlemek için bir enerji kaynağı olarak bir elektron ışını kullanılır. Elektron ışını eklemeli imalat proses şeması Şekil 2.6'da gösterilmiştir [5].



Şekil 2.6. Elektron ışını eklemeli imalat proses.

2.2.5.1. Elektron ışını üretim (EIÜ)

EIÜ, yalnızca metalik parçalar oluşturmak için uygun olsa da, SLS'ye benzer ve nispeten yeni fakat hızla gelişen bir yöntemdir. Toz, 30-60 KV'lık yüksek voltajlı bir elektron ışını ile eritilir. İşlem, oksidasyon sorunlarını önlemek için yüksek vakumlu bir odada gerçekleştirilir. EIÜ ayrıca çok çeşitli önceden alaşımlı metalleri de işleyebilir [14]. SLS ile karşılaştırıldığında, EIÜ çok daha yüksek verim ve daha düzgün termal alan dağılımı sunabilir; ancak, hassasiyet ve yüzey kalitesi düşüktür.

2.3. Eklemeli İmalat Süreçlerinin Sınıflandırılması

Eklemeli imalat süreçlerinin sınıflandırılması Tablo 2.1'deki gibi özetlenebilir [3].

Tablo 2.1. Eklemeli üretim süreci sınıflandırılması.

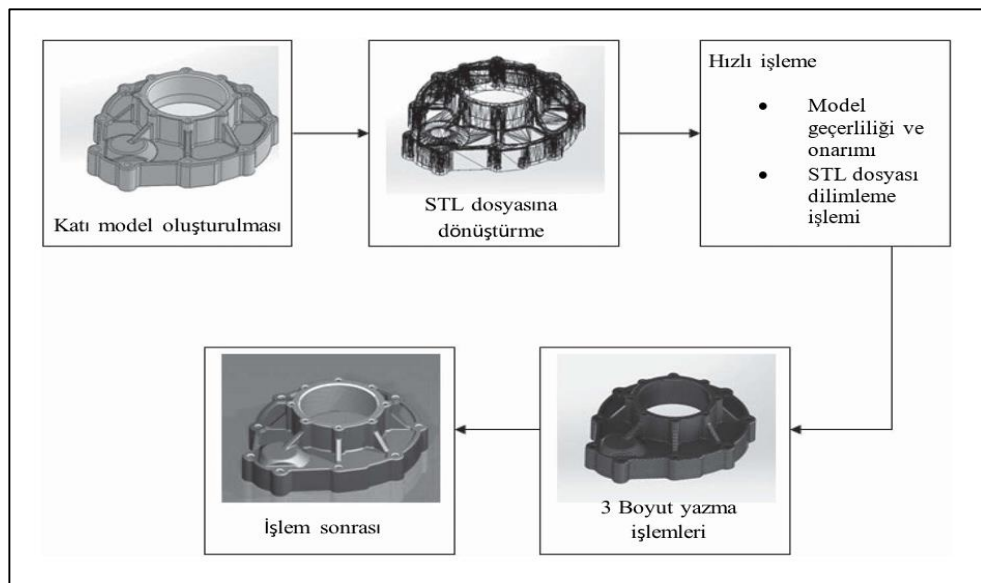
Eklemeli İmalat Yöntemleri															
İşlemler		Lazer Tabanlı Eklemeli İmalat Yöntemleri						Termal Ekstrüzyon		Metal Püskürtme		Malzeme Yapıştırma		Elektron Işını	
		Lazer Ergitme			Lazer Polimerzasyonu										
İşlem Şematiği															
İsim	Malzeme	SLS		DMY		SLA		FDM		3BY		LNİ		EIE	
		SLE		LENS		KZK		Robocasting		MYP		KFP			
		DMLS		SLK		STP				MJM					
				LTY		IEK				BPİ					
						HEK				Termojet					
Malzeme Kütle Tipi		Toz		Sıvı		Katı									

2.4. Üç Boyutlu Baskı İşleminin Temelleri

Hem mevcut hem de gelişen 3B baskı işlemleriyle üretilen tüm parçalar için, üretim sürecinde ortak olarak gerçekleştirilmesi gereken çeşitli prosedürler mevcuttur. İlk olarak, üretilecek parçanın katı veya yüzey BDT modeli oluşturulmalı ve daha sonra her 3 boyutlu baskı makinesine özel dilimleme yazılımıyla önceden belirlenmiş kalınlıkta katmanlar halinde elektronik olarak ayrılmalıdır. Bu katmanlı çapraz bölümler, parçanın şeklini toplu olarak tanımlar. Dilimlenmiş her bölüm hakkında bilgi daha sonra elektronik olarak 3 boyutlu baskı makinesine katman halinde iletilir. 3 boyutlu baskı makinesi, malzemeleri yalnızca bölümün “katı” alanlarında işler. Takip eden katmanlar, parça tamamlanana kadar sırayla işlenir. 3 boyut yazdırma işlemi fiziksel parçaları üretmek için aşağıdaki beş temel adımı kullanır [15].

1. Tasarımın BDT modelinin oluşturulması.
2. BDT modelinin bir STL dosya formatına dönüştürülmesi.
3. STL dosyasını 2 boyut kesit kesit katmanlarına dilimlenmesi.
4. Prototipin üretilmesi.
5. İşlem sonrası.

Bu beş aşamalı işlem Şekil 2.7’de gösterilmektedir [16].



Şekil 2.7. 3B fiziksel parçaları üretmenin beş temel adımı.

2.5. Eklemeli İmalatta Kullanılan Malzemeler

2.5.1. Metaller ve alaşımlar

Metallerin kullanıldığı eklemeli imalat, geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla özel bağlantıları olan karmaşık geometrilerin üretimi için büyük özgürlük sağlar. Özellikle, yapısal, koruyucu mühendislik ve yalıtım problemlerine aynı anda çözümler sağlamak için çok fonksiyonlu bileşenler geliştirilebilir [17]. Paslanmaz ve takım çelikleri, bazı alüminyum alaşımları, titanyum ve alaşımları ve nikel bazlı alaşımlar gibi birçok metalik malzemeler, 3BY tabanlı eklemeli imalat işlemleri kullanılarak parça üretilebilir [18]. 3BY teknolojileri, iyi mekanik özelliklere sahip bileşenleri ve yüksek hassasiyetle ($\pm 0,02$ mm) karmaşık şekilleri üretebilir. Bununla birlikte, bu sistemler oldukça yavaştır (dört lazerle 105 cm^3 / saate kadar) ve bu nedenle çoğunlukla küçük parçalar için kullanılır [17].

Titanyum ve alaşımları, çelik alaşımları, birkaç alüminyum alaşımı, nikel alaşımları ve bazı kobalt bazlı ve magnezyum alaşımları eklemeli imalat için optimize edilmiştir [18]. Özellikle, titanyum ve alaşımları, çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılan yüksek performanslı malzemelerdir [19],[20]. Yüksek işleme maliyetleri ve geleneksel üretim yöntemlerine dayanan uzun teslim süresi ile karakterize edilirler. Böylece eklemeli imalat, daha az maliyetle çok karmaşık yapılar üreterek önemli ekonomik avantajlar sunabilir. Ti ve Ti6Al4V [21],[22] ayrıntılı olarak çalışılmıştır ve şu anda havacılık ve biyomedikal alanlardaki ticari uygulamalar için kullanılmaktadır. Östenitik paslanmaz çelikler [23], yüksek dayanımlı çelikler [24], sertleşebilir paslanmaz çelikler [25] ve takım çelikleri [26] gibi çelikler eklemeli imalatta yaygın olarak kullanılır. Bu alaşımlar sadece genel uygulamalar için değil, aynı zamanda araçlar veya kalıplama uygulamaları gibi yüksek mukavemet ve sertlik koşulları için de kullanılabilir. Östenitik çelikler ve çökelme sertleşebilir paslanmaz çelikler, eklemeli imalat parametrelerine özellikle duyarlıdır [25].

Eklemeli imalat Al alaşımlarının kullanımı sınırlı düzeydedir. Ti alaşımlarıyla karşılaştırıldığında, bunların işlenmesi kolaydır ve maliyetleri düşüktür.

Eklemeli imalat ile üretilmiş metal parça örnekleri, Şekil 2.8’de gösterilmiştir [27].



Şekil 2.8. Eklemeli imalat ile üretilmiş metal parça örnekleri.

2.5.2. Polimerler ve kompozitler

Polimerler, çeşitliliği ve farklı 3 boyut baskı işlemlerine uyum kolaylıkları nedeniyle 3 boyut baskı endüstrisindeki en yaygın kullanılan malzemeler olarak kabul edilir. Eklemeli imalat için polimerler, termoplastik filamentler, reaktif monomerler, reçine veya toz halinde bulunur. Polimerlerin ve kompozitlerin 3B baskısını kullanma kabiliyeti, uzay, mimari, oyuncak imalatı ve tıbbi alanlar gibi birçok endüstriyel uygulamada birkaç yıldır araştırılmaktadır. 3 boyutlu baskı kullanarak kompozitlerin üretilmesinin faydalarından bazıları, geometriyi istenilen yüksek hassasiyette üretilme imkânı vermesidir. Ayrıca, bu işlem, istenilen ürünler için kalıplama ve ekstrüzyon gibi diğer geleneksel biçimlendirme yöntemlerinden daha uygun maliyetli olabilir. Öte yandan, çoğunlukla 3 boyutlu yazıcılar tarafından üretilen saf polimer ürünler, yapılarındaki sağlamlık ve işlevsellik eksikliği nedeniyle, genellikle kavramsal prototipler için kullanılmakta olup, daha iyi performans gösteren ileri polimer kompozitlerin üretimi için çeşitli yöntem ve materyallerin geliştirilmesine öncülük etmektedirler. 3 boyutlu basılmış polimerlerin düşük mekanik özelliklerinin giderilmesine yönelik araştırmalar devam etmektedir. 3 boyutlu basılmış polimerlerin daha düşük mekanik özelliklerinin çözülmesine yönelik olarak daha iyi performans

gösteren ileri polimer kompozitlerin üretimi için çeşitli yöntem ve malzemelerin geliştirilmesine yol açan araştırmalar yürütülmektedir [28] , [29].

Fotopolimer reçineler stereolitografi 3D baskıda UV ışığı ile aktif hale getirildiğinde polimerize olabilir. Wohlers Associates tarafından yapılan yıllık endüstri araştırmasına göre, endüstriyel sektörlerdeki 3 boyut baskı pazarının yaklaşık %50'si fotopolimerler kullanılarak üretilen prototiplere atfedilmektedir [30]. Bununla birlikte, fotopolimerlerin termomekanik özellikleri hala geliştirilmektedir. Örneğin, 3 boyutlu basılmış polimerlerin moleküler yapısı ve hizalanması, UV'ye maruz kalma ve yoğunluktaki gradyan nedeniyle katmanların kalınlığına bağlıdır [31] , [32]. Öte yandan, seçici lazer sinterleme için plastik (SLS), 3 boyut baskı için ikinci en önemli sınıf olarak bildirilmektedir. SLS polimerleri arasında polistiren, poliamitler ve termoplastik elastomerler vardır [30]. Doğruluk, ince tabakalar ve hassasiyet, fotopolimer bazlı sistemlerle sağlanır. Yeni reçinelerin kullanıldığı diğer gelişmeler, dayanıklılığı ve sıcaklık direncini arttırmıştır. Termoplastik polimerler, (örneğin, akrilonitril-bütadien-stiren kopolimerleri (ABS) [33], polikarbonat (PK) [34] ve polilaktik asit (PLA) [35]) çeşitli 3 boyut baskı yöntemleri ile işlenebilir. Her ne kadar düşük sıcaklıkta optimum bir reçine viskozitesinin muhafaza edilmesi PLA kullanmak için kilit bir zorluk olsa da, iki çözüm yolu önerilebilir: 1. işlem sırasında sıcaklığın artırılması ve 2. uygun bir plastikleştirici kullanılması. Sonuncu çözelti, termal bozulmayı önlediğinden daha avantajlıdır.

Polimerlerin ve kompozitlerin imalatı için Stereolitografi, SLS, EMI, 3 boyutlu biyolojik baskı ve mürekkep püskürtmeli baskı gibi çeşitli 3 boyut baskı teknikleri mevcuttur. EMI en çok düşük erime noktalarına sahip polimer kompozitlerin ve termoplastiklerin imalatında kullanılır [28]. Bununla birlikte, iyi fiziksel özelliklere sahip çevre dostu polimerik malzemeler EMI için büyük öneme sahiptir çünkü ABS ve PLA gibi 3 boyut baskı için kullanılan yaygın ticari polimerler gerekli çıktıları karşılamamaktadır. ABS, iyi mekanik özelliklere sahiptir, ancak işleme sırasında hoş olmayan bir koku yayar; oysa PLA çevre dostudur ama zayıf mekanik özelliklere sahiptir [36]. Song ve arkadaşları [37] 3 boyut baskılı PLA'nın, enjeksiyonla kalıplanmış PLA, yani elasto-plastik ile ortotropik davranış karşılaştırıldığında, hem

2.5.3. Seramikler

Eklemeli imalat, biyomalzemeler ve doku mühendisliği (örneğin kemiklerin ve dişlerin çatı yapıları) için ileri seramik üretiminin temel bir yöntemi haline gelmiştir [40]. Baskı doğruluğuna rağmen, tabakalar halinde görünüm ve sınırlı sayıda malzeme seçimi, seramiklerin 3 boyutlu baskısının önündeki en büyük zorluklardır [28]. İstenen şekli oluşturmak için sinterlenmiş seramik parçaların işlenmesi zaman alıcı ve maliyetli bir işlemdir. Bu nedenle, karmaşık şekillerle seramik üretimi için sinterleme işleminin ardından karmaşık şekillerin 3 boyutlu baskısı daha çekici hale geldi. Ayrıca, gözenekli seramik veya kafeslerin 3 boyutlu baskısı, farklı uygulamalar için özel olarak geliştirilmiş gelişmiş hafif malzemeler geliştirerek sayısız fayda sağlamıştır. Doku mühendisliğinde kullanılan seramik ölçekler, geleneksel döküm ve sinterleme yöntemlerine kıyasla daha kolay ve daha hızlı hale gelmiştir [40].

Ek olarak, 3 boyut baskı, kafeslerin gözeneklerini kontrol etme avantajına sahiptir [17]. 3 boyut baskılı seramik örgülerin mekanik özelliklerinin geleneksel yöntemlere göre geliştirilmesine yönelik farklı yöntemler ve malzemeler araştırılmıştır. Li ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada [41] CaSO_4 ve dekstrin ilavesiyle gözenekli bir alümina seramik geliştirilmiş, bu da çok yüksek bükülme gücü göstermiştir. Öte yandan, Maurath ve Willenbacher, [42] seramik süspansiyonun akış biçimi ve homojenliği açısından mürekkep baskısı işlemini geliştirerek, optimize sinterleme işleminin yanı sıra, özel bir mukavemete sahip bir petek yapısının çatlamadan yapılabilceğini ve daha iyi boyutsal uygunluğu olduğunu göstermiştir. Minas ve arkadaşları, [43] 3 boyut baskılı seramik köpük mürekkebinin, ağırlıkça oranı yüksek bir hiyerarşik gözenekli seramik halinde karışımını araştırdı. Bu yöntemde, kafes yapısının (yani, baskı sırasındaki ilmekler arasındaki boşluk) 3 boyut baskısı ile daha büyük gözenekler elde edildi ve mikro gözenekler köpüğün içindeki hava kabarcıkları tarafından yaratıldı. Eklemeli imalat ile üretilmiş seramik parça örneklerine ait ürün görselleri Şekil 2.10'da gösterilmiştir [44].



Şekil 2.10. Eklemeli imalat ile üretilmiş seramik parça örnekleri.

2.5.4. Beton

Eklemeli imalat teknolojisi, inşaat sektöründe de kullanılmaktadır. Mürekkep püskürtmeli baskıya benzer bir yapı, bina yapılarının eklemeli imalatında kullanılan ana yöntem olarak kontur işçiliği olarak geliştirilmiştir [45]. Bu yöntemde beton hamurunu çıkarmak için daha büyük nozullar ve yüksek basınç kullanır. Katmanlar halinde görünüm yerine pürüzsüz bir yüzey elde etmek için, yazıcı kafasına takılı bir mala aparatı cihazı tasarlanmıştır [45]. Halen, inşaat sektörü için 3 boyutlu baskı teknolojisi başlangıç aşamasındadır. Bu nedenle, teknolojinin yaşam döngüsü performansı henüz belirlenmemiştir.

Betonun yaş özelliği, başarılı kontur işçiliğinin en önemli yönleridir. Karmaşık şekillerin 3 boyutlu baskısı ekstrüzyon (ekstrüzyon edilebilirlik ve geniş zaman ve sonraki tabakaların desteği (inşa edilebilirlik) için betonun yüksek dayanımı) için yüksek çalışabilme kabiliyeti gerektirir. Ekstrüzyon için ayarlamadan önce uzun süreli işlenebilirlik gerekliliğini karşılayabilecek ve aynı zamanda çökmeden sonraki tabakaları desteklemek için yüksek erken dayanıma sahip bir karışım tasarımı, iyi tasarlanmış bir malzeme ve ekipman gerektirir.

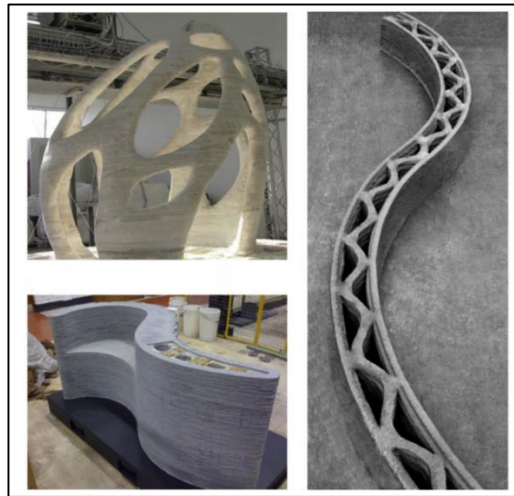
3 boyut baskılı fiberle güçlendirilmiş beton kompozitler, geleneksel fiberle güçlendirilmiş betona kıyasla, basılı bir yapıdaki lif oryantasyonunu kontrol etmenin faydasını sağlar. Farklı baskı yolları boyunca karbon kenarlarının oryantasyon

serbestliği, x-y düzleminde paralel çizgiler basılması durumunda 30 MPa'ya kadar artmış dayanma gücünü önemli ölçüde artırır [46].

Islak betonun 3 boyutlu baskısındaki zorluklar sadece betonun ekstrüzyon ve aynı zamanda katmanlar arası yapışma, deformasyon ve inşa edilebilirlik gibi yapısal özellikleri için yeterli işlenebilirliğe ve geniş zamana sahip olması amacı ile yaş özelliklerini kontrol etmeye dayanmaz.

3 boyut baskılı yapıların dayanıklılığı da araştırılmalıdır. Örneğın, 3 boyut basılı bir yapı, geleneksel betona kıyasla havanın maruz kalmasına karşı koruyacak kalıp eksikliği nedeniyle suyun buharlaşmasını hızlandırmış olabilir. Bu da büzülmeyi ve çatlama riskini artırabilir. Yüksek dayanımlı yapılar oluşturmak için toz yataklı eklemeli imalatın daha da geliştirilmesi gerekir. Mevcut zorluklara rağmen, tasarım özgürlüğü ve beton gibi daha ucuz malzemeler içeren karmaşık yapıların inşa edilmesi, 3 boyut basılı beton geliştiren araştırmacıların ana girişimleri olmuştur. 3 boyut baskı için farklı beton karışımlarının geliştirilmesi, dünya genelinde 3 boyut baskı yapılarının ve evlerin üretilmesine neden oldu. Gelecek nesil 3 boyut basılı yapılar, aydaki inşaatlarda kullanılmaya başlandı [45],[47].

Eklemeli imalatın beton malzeme kullanılarak üretilmiş parça örneklerine ait ürünler Şekil 2.11'de gösterilmiştir [48].



Şekil 2.11. Eklemeli imalatın beton malzeme kullanılarak üretilmiş parça örneklerine ait ürünler.

2.5.5. 3 boyut baskı için farklı malzemelerin karşılaştırılması

Çikolatadan, ileri düzey çok işlevli malzemelere kadar çok çeşitli malzemeler, katkı maddesi üretim teknolojilerindeki hızlı gelişme sonucunda 3 boyutlu basılabilir. 3 boyutlu baskılar için filament, tel, toz, macun, tabaka ve mürekkep formundaki malzemeler kullanılabilir. Polimerler havacılık, otomotiv, spor, tıp, mimari ve oyuncak endüstrileri için geliştirilen en yaygın malzemeler olarak kabul edilir. 3D baskıda kullanılan polimerler çoğunlukla EMI (en yaygın yöntem) 'de filament formunda, toz yatak yönteminde tozlar veya yardımcı bağlayıcı veya Stereolitografide reçineler şeklindedir. Akrilonitril-bütadien-stiren kopolimerleri (ABS), poliamid (PA), polikarbonat (PK) ve polilaktik asit (PLA) gibi termoplastik polimerler ve polistiren, poliamidler ve fotopolimer reçineler gibi termoset tozları en çok kullanılan polimerlerdir. 3B baskı Mekanik özelliklerin eksikliğinden dolayı, 3 boyutlu basılmış polimerler çoğunlukla hızlı prototipleme için kullanılır. Bununla birlikte, polimerlerin takviyeli ve nano malzemelerle güçlendirilmesi, son yıllarda yük taşıyıcı veya işlevsel bileşenler olarak kullanılacak basılı ürünlerin mekanik özelliklerini artırma amacıyla tanıtılmıştır [17].

Mevcut 3 boyut baskı teknolojileri, farklı malzemeleri birleştirerek ve konumlarını tam olarak kontrol ederek üretilen parçaların çok işlevli özelliklerini uyarlayabilir. Bazıları katmanlar arasında malzemeleri değiştirebilir, bazıları da bir katmanın içindeki malzemeleri değiştirebilir. Ancak, bazı sınırlamalar vardır. Örneğin, yüksek basınçlı püskürtme sistemleri sadece iyi polimerleşebilen ve benzer sertleşme sıcaklıklarına sahip polimerleri birleştirebilir ve EMI gibi ekstrüzyon bazlı yöntemler yalnızca benzer erime sıcaklıklarına sahip malzemeleri birleştirebilir [49]. Multijet EMI yöntemleri, biyolojik baskı uygulamalarında ve özellikle doku matrisini taklit etmek için hücrelerle birleştirilen karmaşık hidrojel tarayıcılarının üretiminde daha fazla dikkat çekmektedir [50]. Birçok 3 boyut baskı teknolojileri, metal alaşımlarının veya seramiklerin kombinasyonuna izin verir ve sonuç olarak, aynı anda daha fazla malzeme ekstrüzyona sokulabilir. Bununla birlikte, temas eden iki malzeme arasında istenmeyen fazların oluşumunu önlemek için ek özen gösterilmelidir [51]. Toz bazlı teknolojilerde farklı erime sıcaklıklarına sahip tozların kullanılmasında bir miktar

başarı elde edilmiştir [49],[52]. Bununla birlikte, yüksek erime noktalarına sahip tozlara bitişik düşük erime noktalarına sahip malzemelerin yeniden eritilmesi veya bozunması nedeniyle sorunlara rastlanabilir. Ayrıca, malzeme işlemenin sayısal modelleme ve optimizasyon tekniklerinin geliştirilmesi, çok malzemeli üretim işlemlerine ve çok işlevli yanıtlarına yardımcı olabilir [53].

Tablo 2.2’de eklemeli imalat işlem kategorisine göre doğrudan eklemeli imalat tarafından işlenen mevcut ticari malzemeler gösterilmiştir [54].

Tablo 2.2. Eklemeli imalat işlem kategorisine göre doğrudan eklemeli imalat tarafından işlenen mevcut ticari malzemeler.

Malzeme	Amorf	Yarı Kristaller	Thermoset	Malzeme Ekstrüzyon	Tekne Polimerizasyonu	Metal Püskürtme	Toz Yatağı Füzyonu	Bağlayıcı Püskürtme	Sac Laminasyonu	Yönlendirilmiş Enerjili Yığma
ABS [Akrilonitril Butadien Stiren]	X			X						
Polikarbonat	X			X						
PC/ABS Blend	X			X						
PLA [Polilaktik asit]	X			X						
Polieterimid (PEI)	X			X						
Akrilikler			X		X	X				
Alkriolatlar			X		X	X				
Epoksiler			X		X	X				
Poliamid (Nylon) 11 and 12		X					X			
Saf		X					X			
Cam Dolgulu		X					X			
Karbon Dolgulu		X					X			
Metal (Al) Dolgulu		X					X			
Polymer Bağlı	X	X		X						
Polistiren	X						X			
Polipropilen		X					X			
Polyester (“Flex”)							X			
Polietereterketon (PEEK)		X		X			X			
Termoplastik poliüretan (Elastomer)				X			X			
Çikolata		X		X						
Kağıt									X	
Alüminyum Alaşımları							X	X	X	X
Co–Cr Alaşımları							X	X		X
Altın							X			
Nikel Alaşımları							X	X		X
Gümüş							X			
Paslanmaz Çelik							X	X	X	X
Titanyum, (ticari saflıkta)							X	X	X	X
Ti–6Al–4V							X	X	X	X
Takım Çelikleri							X	X		X

2.6. Üç Boyutlu Yazıcı Çeşitleri

Günümüzde 3 boyutlu yazıcılar Kartezyen, Delta, Polar ve Scara olarak çalışma mantıklarına göre 4 tiptir.

2.6.1. Kartezyen tipi üç boyutlu yazıcılar

Günümüzde en yaygın kullanılan yazıcı çeşididir. Gerek kullanımı, gerekse toplaması kolay olduğundan dolayı kartezyen yazıcılar daha çok tercih edilmektedir.

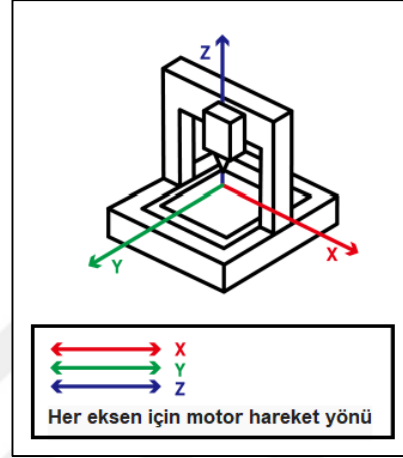
Kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcılar, doğrusal koordinat sistemini kullanan ve sadece 3 doğrusal eksen olan X, Y ve Z doğrultularında hareketlerini ve koordinatlarını yürüterek çalışır [55].

Başka bir deyişle, x ve y koordinatları bir noktanın yanal ve uzunlamasına pozisyonlarını tanımlar, z koordinatı ise yüksekliğini tanımlar. Standart bir kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcıda her katman, baskı kafası bir katman yüksekliğinde yukarı hareket etmeden önce her bir noktanın x ve y koordinatlarını kullanarak yazdırılır. Ardından, yazdırma kafasının geçerli yüksekliğinin z koordinatına karşılık gelen bir sonraki katmanı yazdırmaya devam eder.

Kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcı kullanmanın en büyük avantajı, en yaygın 3 boyutlu yazıcı olmasıdır. Kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcı ile ilgili her türlü bilgiye ulaşmak ve yedek parçalarını bulmak kolaydır. Çok çeşitli ebatta yazıcı mevcut olduğundan masaüstü uygulamalarında bile ekonomik sonuçlar verebilen sistemlerdir.

Kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcıların farklı hareket kriterleri olabilir. Bazı modellerde tamamen sabit yapı platformları bulunurken, bazılarında bir veya iki yönde hareket edebilen platformlar vardır. Her durumda, bir kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcı, kartezyen düzlemindeki her bir yön için bir tane olmak üzere, en az üç adet step motor kullanılır.

Kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcının baskı kafası tipik olarak yukarıdan askıya alındığından, daha geniş yapım platformlarına sahiptir. Bu özellik, geniş tabanlı modelleri üretmek için idealdir. Ancak, kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcıyla oluşturabilecek bir yapının yüksekliği, yazıcı kafasının maksimum yüksekliği ile sınırlıdır. Şekil 2.12’de kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcı gösterilmektedir [56].



Şekil 2.12. Kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcı.

2.6.2. Delta tipi üç boyutlu yazıcılar

Delta tipi 3 boyutlu yazıcılar, yine kartezyen sistemini kullanan ama fark olarak z eksenindeki hareketini 3 step motorun ortak hareketiyle yöneten bir yazıcı çeşididir [55].

Bir delta tipi 3 boyutlu yazıcıda, ekstrüder yukarıdan değil, üçgen bir konfigürasyonda üç kol pozisyonu ile askıya alınır. Üç kol, yazdırılan modele göre konumlandırmak için ekstrüder üzerine bastırıp çeker.

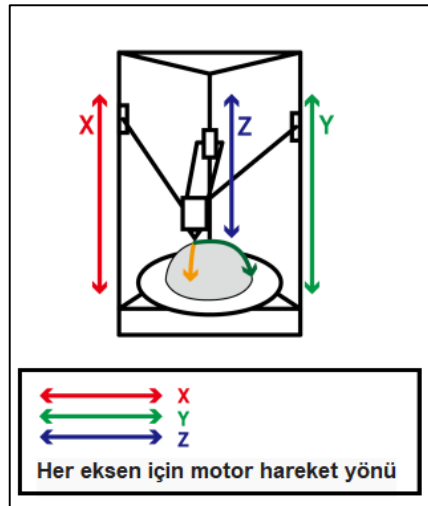
Delta tipi 3 boyutlu yazıcılar baskı kafasını x, y ve z konumlarına göre konumlandırmak yerine, üç kolun her biri baskı kafasını modele göre yapı platformunda konumlandırmak için açısını değiştirir. Kesin konuma ulaşma, tüm konumlandırma kollarının açısını dikkate alan bir dizi trigonometrik işlem ile yapılır. Üçgen yapıları nedeniyle, delta tipi 3 boyutlu yazıcılar dairesel baskılar için daha uygun hale getiren dairesel bir yapı platformuna sahiptir.

Delta tipi 3 boyutlu yazıcıların en büyük avantajları hızlı olmalarıdır. Baskı kafasının konumunu kontrol etmek için üç kol kullanarak, delta tipi 3 boyutlu yazıcı, step motorların ağırlığını ekstrüderden uzağa hareket ettirmeyi başarır. Delta tipi 3 boyutlu yazıcılar ayrıca baskı kafasını daha da hafifletmek için tipik olarak Bowden tipi bir ekstrüder kullanır. Bu durum, delta tipi 3 boyutlu yazıcıların baskı kafasının oldukça hızlı hareket etmesini sağlar.

Delta tipi 3 boyut yazıcılar yazdırma hızını sınırlayan atalet ve momentum taşınım sorunlarına karşı hassastırlar. Her ne kadar hız için tasarlanmış olsalar da, Delta tipi 3 boyutlu yazıcılar düşük hassasiyetlikleri ile bilinirler, sonuçta daha az ayrıntı ve daha pürüzlü bir görüntü elde etmenizi sağlar.

Bowden ekstrüderlerinin kullanımı, delta tipi 3 boyutlu yazıcılarda kullanılabilecek filament türleri açısından oldukça sınırlıdır. Bowden ekstrüderlerinin, filamentin uzun filament yolu boyunca deforme olma ihtimalini artırması nedeniyle esnek filamentler kullanıldığında problemli olabilir.

Delta tipi 3 boyutlu yazıcılar yüksek modeller inşa etmek için mükemmeldirler [57]. Şekil 2.13'te Delta tipi 3 boyutlu yazıcı görülmektedir [56].



Şekil 2.13. Delta tipi 3 boyutlu yazıcı.

2.6.3. Polar tipi üç boyutlu yazıcılar

Polar tipi 3 boyutlu yazıcılar henüz çok yaygın olarak kullanılmayan yazıcılardır. Kartezyen koordinat sistemi kullanmak yerine, polar tipi 3 boyutlu yazıcılar kutupsal koordinat sistemi kullanır. Bu sistemde, noktalar yalnızca iki sayı kullanılarak tanımlanır: Bunlar 3 boyutlu alanda bir açı ve önceden tanımlanmış bir merkezden ayrılma mesafesi veya yarıçapıdır.

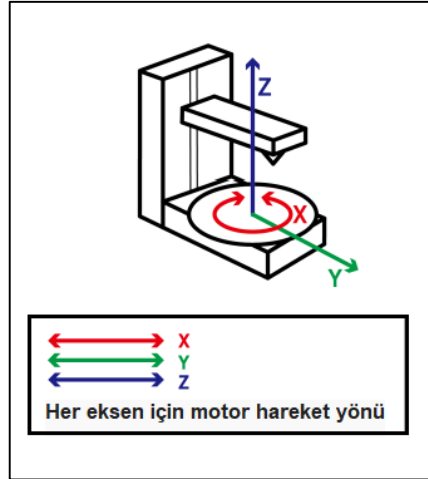
Hareketli mekanizmalar, kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcılarda gördüğümüzden çok farklıdır. Sabit bir platform yerine, polar tipi 3 boyutlu yazıcıların baskı yatağı dönebilir, sola ve sağa hareket edebilir veya ileri ve geri hareket edebilir. Bu, neredeyse sabit olan bir baskı yatağına sahip olmasını mümkün kılar ve yalnızca başka bir katmana geçerken yukarı ve aşağı hareket eder. Bu tasarım, polar tipi 3 boyutlu yazıcıların çok daha küçük bir alan kullanarak mükemmel bir yapı hacmi oluşturmasını sağlar.

Polar tipi 3 boyutlu yazıcılar aynı zamanda çok verimlidirler, çünkü sadece biri yapı platformunu döndürmek ve hareket ettirmek, diğeri de baskı kafasının yüksekliğini kontrol etmek için olan iki step motorla çalışabilirler.

Açıkçası, bir polar tipi 3 boyutlu yazıcı kullanmanın en büyük dezavantajı, henüz çok yaygın olmamasıdır. Yaygın kullanımının olmaması ve karmaşık tasarımı sebebiyle Kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcılardan daha maliyetlidir. Polar tipi 3 boyutlu yazıcı görseli Şekil 2.14'te gösterilmiştir [56].

2.6.4. Scara tipi üç boyutlu yazıcılar

Robotik kollar, özellikle büyük otomotiv tesislerinde endüstriyel üretim hatlarında bileşenleri monte etmek için kullanılır. 3 boyutlu baskılar robotik kolları üretim süreçlerine, özellikle de binaların 3 boyutlu baskılarında görülen üretim sürecine, dâhil etmeye başlarken, bu teknoloji hala geliştirilme aşamasındadır.



Şekil 2.14. Polar tipi 3 boyutlu yazıcı.

Yaygın olarak kullanılan bir baskı işlemi olmasa da, bu FDM baskı yöntemi kullanımda bir artış görülmeye başlamıştır. Bunun nedeni, işlemin bir baskı plakasına sabitlenmemesi ve daha hareketli olmasını sağlamaktır. Ek olarak, FDM 3 boyutlu yazıcı kafasını yerleştirirken ki esneklik sayesinde, karmaşık yapılar oluşturmak daha kolaydır. Bununla birlikte, son baskı kalitesinin geleneksel kartezyen yazıcılar kadar iyi olmadığı görülmektedir [58]. Scara tipi 3 boyutlu yazıcı görseli Şekil 2.15'te gösterilmiştir [59].



Şekil 2.15. Scara tipi 3 boyutlu yazıcı.

BÖLÜM 3. MATERİYAL VE YÖNTEM

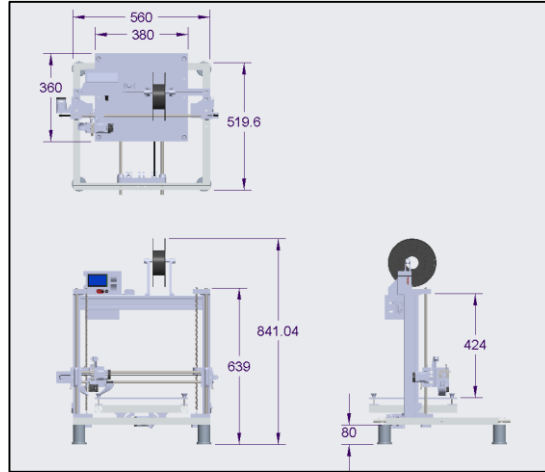
3.1. Materyal

Bu çalışmada endüstriyel olarak yük taşıma sistemlerinde kullanılan gözlü kancanın eklemeli imalat ile üretilebilirliği ve yük taşıma kabiliyetinin artırılması incelenmiştir. Araştırmada, Uzeras firmasının üretmiş olduğu “1.75 mm Kırmızı PLA Plus Filament 1000 gr” [60] malzeme kullanılmıştır.

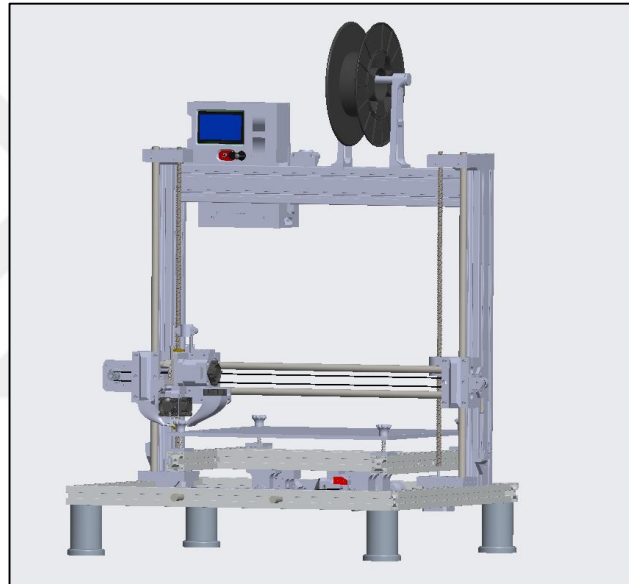
3.2. Üç Boyutlu Yazıcı Genel Yapısı

3 boyutlu yazıcılar; kartezyen, delta ve corexy gibi farklı tasarımlarda üretilmektedir. Kartezyen tasarımlı 3 boyutlu yazıcılar genellikle xyz kartezyen platformuna bağlı termoplastik bir püskürtücüden oluşur. Kartezyen 3 boyutlu yazıcıda, x ve y eksen hareketleri eksantrik tetik kayışı tarafından sağlanır. Z eksenindeki hareket, vidalı mil kullanılarak iki kademeli motorla kontrol edilir.

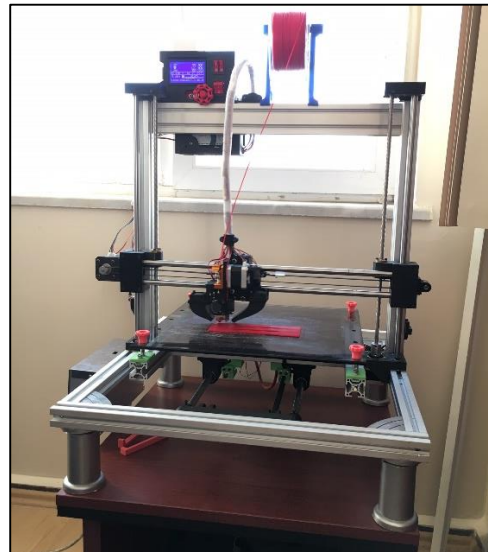
Tasarlanan 3 boyutlu yazıcıya ait PTC Creo Parametric 6.0 BDT yazılımından alınan ekran görüntüsü Şekil 3.1’de ve Şekil 3.2’de verilmiştir. Üretilen 3 boyutlu yazıcı Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Tasarlanan 3 boyutlu yazıcı.



Şekil 3.2. Tasarlanan 3 boyutlu yazıcı.



Şekil 3.3. Üretilen 3 boyutlu yazıcı (genel görüntü).

3.2.1. Üç boyutlu yazıcının parçaları

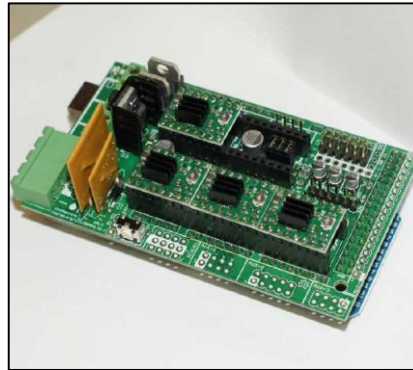
Bu başlık altında bir üç boyutlu yazıcı yapımında kullanılması gereken başlıca ekipmanlar sıralanmıştır.

Arduino Mega 2560 ; Atmega 2560 temelli bir mikrodenetleyici kartı olan Arduino Mega 2560 R3 üzerinde 15 tanesi PWM çıkışı olarak kullanılabilecek 54 adet dijital giriş/çıkış pini, 16Mhz kristal, usb soketi, güç soketi, 4 UART (donanımsal seri port), ICSP konektörü, 16 adet analog giriş ve reset tuşu bulunmaktadır [61]. Şekil 3.4'te Arduino ATMEGA 2560 modelinin görünüşü paylaşılmıştır.



Şekil 3.4. Arduino ATMEGA 2560 .

Kontrol kartı (Anakart); anakart veya kontrol kartı olarak da adlandırılan denetleyici anakart, 3D yazıcının beynidir. Bilgisayardan gönderilen komutlara dayanarak hareket bileşenlerini (step motorları) yönlendiren ve sensörlerden gelen girdileri (ısıtıcı nozzle ve ısıtıcı tabla kontrolü) yorumlayan temel işlemleri yürütür [62]. Şekil 3.5'te RAMPS 1.4 (RepRap Arduino Mega Pololu Shield) elektronik kontrol kartı görülmektedir [63].



Şekil 3.5. RAMPS 1.4 (RepRap Arduino Mega Pololu Shield) elektronik kontrol kartı.

Adım motoru (Step motoru); toplam beş adet adım motoru (step motoru) kullanılmıştır. Bu motorların iki adeti z ekseni, bir adeti x ekseni ve bir adeti de y ekseni kontrolü olmak üzere, bir adet de filament sürmek için kullanılmıştır. Şekil 3.6'da kullanılan Nema 17 adım motoru görülmektedir [64].



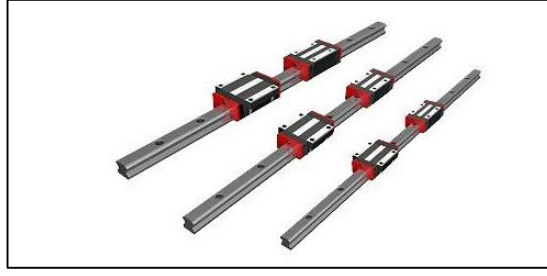
Şekil 3.6. Nema 17 adım motoru.

Ekstrüder; filament ısıtıcı uca iten mekanizmadır. 1,75 mm ile 3 mm arasında kalınlığı olan malzemeler ile çalışabilmektedir. Şekil 3.7'de kullanılan bowden tipi ekstrüder görülmektedir [65].



Şekil 3.7. Bowden tipi ekstrüder.

Lineer raylar; ekstrüderin x ve y eksenlerindeki hareketi için lineer raylar kullanılmıştır. Şekil 3.8'de kullanılan lineer raylar görülmektedir [66].



Şekil 3.8. Lineer raylar.

Kayış ve kasnaklar; ağırlıklı olarak üç boyutlu yazıcıların tasarımlarında GT2 kayışı ve buna uyumlu kasnaklar kullanılmaktadır. Kayışların malzemesi poliüretandır. Poliüretan malzemenin avantajı olarak kayışların dişleri kimyasallara ve kirletici maddelere karşı dayanımlıdır. Yağlama ve gerdirmeye ayarı gerektirmeksizin iyi performanslı uzun çalışma süresine sahiptirler. Bu kayışlar lineer raylar ile birlikte ekstrüderin hareket mekanizmasını oluşturur. Yüksek kaliteli olmayan bir kayış kullanılması durumunda baskıda elde edilen parçanın hata payı yükselecektir. Şekil 3.9’da kullanılan GT2 kayışı ve buna uyumlu kasnaklar görülmektedir [67].



Şekil 3.9. GT2 kayışı ve buna uyumlu kasnaklar.

3.3. Test Parçalarının Tasarımı

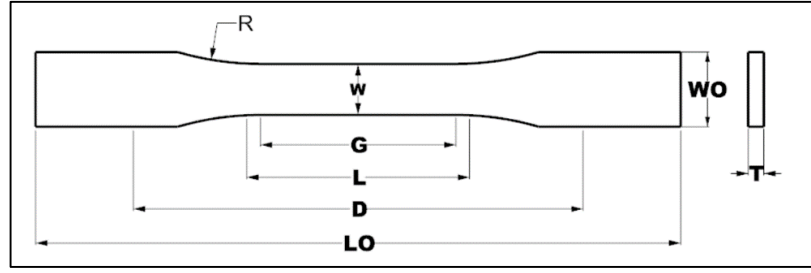
Test aşamasında, ilk geometri BDT yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu çalışmada geometrileri modellemek için PTC Creo Parametric 6.0 BDT yazılımı kullanılmıştır.

3.3.1. Parçaların tasarımında kullanılan standart: ASTM-D638

Yararlı ve kaliteli karakterizasyon için, araştırma ve geliştirme çalışmalarında güvenilir veriler gerekir. Kesin karşılaştırmalı sonuçlar elde etmek için belli bir standart düşünülmelidir. Bu nedenle, tasarım ve test aşamasının ilk safhalarında güvenilirlik için teknik olarak ISO-527 test standardına eşdeğer olan ASTM-D638 standardı [68] kullanılır. ASTM-D638 standardı dikdörtgen kesitli deney örnekleri biçiminde plastikler için standart bir test yöntemidir. Bu standart ön işleme, sıcaklık, nem ve 14 mm kalınlığa kadar olan farklı numuneler için test hızı gibi deney parametrelerini tanımlar.

ASTM D638'de sert ve yarı sert plastikler, sert olmayan plastikler, takviyeli kompozitler ve sert borular için kullanılabilecek birkaç test numunesi tipi (Tip I, Tip II, Tip III, Tip IV ve Tip V numuneleri) vardır. Sert veya yarı sert plastikler için, eğer numune her açıdan elverişli ve kalınlığı 7 mm veya daha az ise, Tip I tercih edilen numunedir. Çekilecek olan numunenin dar kısmında kırılmaması bekleniyorsa, Tip I yerine Tip II kullanılmalıdır. Tip V numunesi sınırlı malzeme ile 4 mm kalınlığa sahiptir ve daha çok termal veya çevresel stabilite testleri için kullanılır. Sert ve yarı sert malzemeleri karşılaştırmak için, Tip IV numunesi seçilmelidir. 7 mm ve 14 mm kalınlıklar arasında, Tip III numuneleri kullanılmalıdır. Kalınlığı 4 mm veya daha küçük olan numuneler için sert olmayan plastik malzemelerde, Tip IV kullanılabilir. Numunenin kalınlığı 7 mm ile 14 mm arasında ise tasarım ve test için Tip III numunesi kullanılmalıdır. Yüksek ortotropik laminat içeren güçlendirilmiş kompozitler için de Tip I numunesi kullanılmalıdır.

Bu tez çalışmasının ilk aşamasında, test örneklerinin ayrıntılı şekli ve boyutları ASTM D-638 standartından alınmıştır. Kalıplanmış veya ekstrüde edilmiş yarı-sert plastik malzemeler için daha uygun olması sebebi ile bu standarttaki Tip I numunesi seçilmiştir. Bu standart içerisinde Tip I numunesi için belirtilen test çekme hızı 5mm/dk'dır. Numunenin geometrisi Şekil 3.10'da [68] ve ilgili boyutlar Tablo 3.1'de verilmiştir [68].

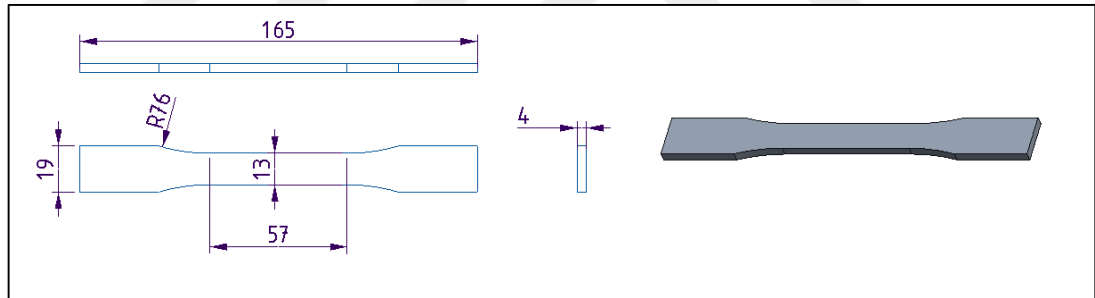


Şekil 3.10. ASTM-D638 Tip-1 test örneği.

Tablo 3.1. ASTM-D638 Tip-1 numune boyutları

Ölçüler	[mm]	Ölçüler	[mm]
W–Dar bölüm genişliği	13	G–Gösterge uzunluğu	50
L–Dar bölüm uzunluğu	57	D–Kulpları arasındaki mesafe	115
WO–Genel genişlik (min)	19	R–Kavis yarıçapı	76
LO–Genel uzunluk (min)	165	T–Kalınlık	4

İncelenen ASTM standartları doğrultusunda PTC Creo Parametric 6.0 BDT yazılımında oluşturulan çekme model görseli Şekil 3.11’de verilmiştir.



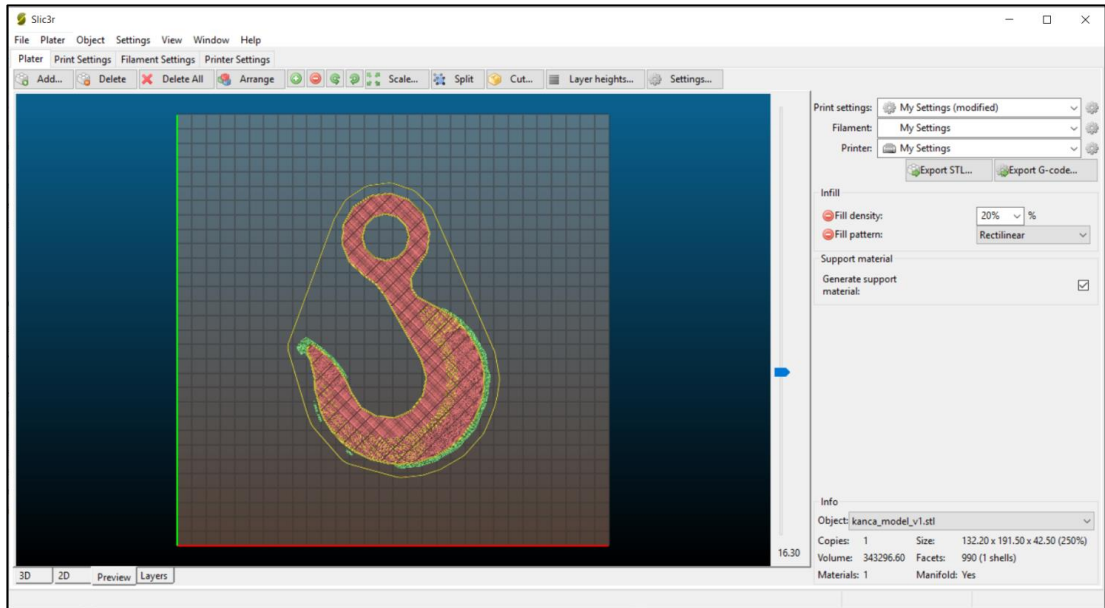
Şekil 3.11. Çekme numunesi modeli.

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMA

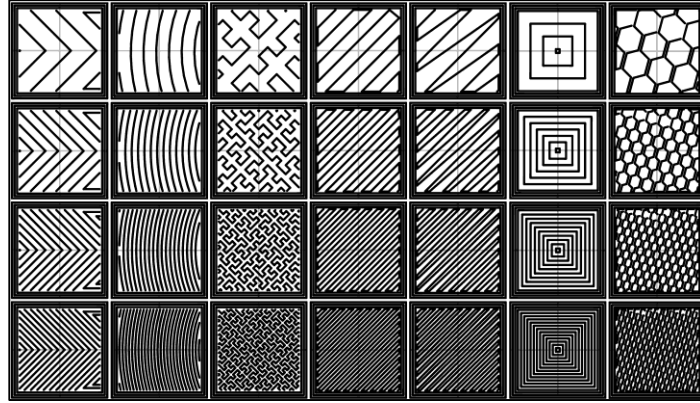
4.1. Dilimleme Yazılımı (Slic3r)

Slic3r, 3 boyut modellerin yazdırılabilir katmanlara dilimlenmesine odaklanan birçok açık kaynaklı yazılımdan biridir. Bu yazılım farklı 3 boyutlu yazıcı için güvenilir bir çözüm ortağı olmuştur. Slic3r, çoklu ekstrüder, farklı duvar kalınlıkları ve iç dolgu tipleri gibi özellikleri desteklemektedir. Yazılımın bu özelliği kullanılarak, bir baskı işi sırasında birden fazla baskı kafası kontrol edilebilir [69].

Slic3r programının arayüzü Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Slic3r programında parça üzerine uygulanabilecek dolgu tipleri ve yoğunlukları Şekil 4.2’de verilmiştir [70]. Yukarıdan aşağı: 20%, 40%, 60%, 80%. Soldan sağa: Octagram Spiral, Archimedean Chords, Hilbert Curve, Rectilinear, Line, Concentric, Honeycomb.



Şekil 4.1. Slic3r programının arayüzü.



Şekil 4.2. Slic3r programında yapılabilecek değişen yoğunluklarda dolgu desenleri

Bu çalışmada Uzaras firmasının üretmiş olduğu PLA malzemesi kullanılmıştır. Çekme testinde kullanılacak numuneler ve deneyler sırasında kullanılacak parçalar Tablo 4.1’de gösterilen parametreler ile üretilmiştir.

Tablo 4.1. Üretim parametreleri.

Üretim Parametreleri	
Nozzle sıcaklığı	195 °C
Tabla sıcaklığı	45 °C
Yazdırma hızı	30 mm/sn
Katman kalınlığı	0,2 mm
Duvar kalınlığı	1,2 mm
Taban dolgu katman sayısı	3
Tavan dolgu katman sayısı	3

Şekil 4.3’te tez çalışması için tasarlanıp 3B yazıcı kullanılarak %100 dolulukta üretilmiş çekme test numunelerine ait görsel verilmiştir.



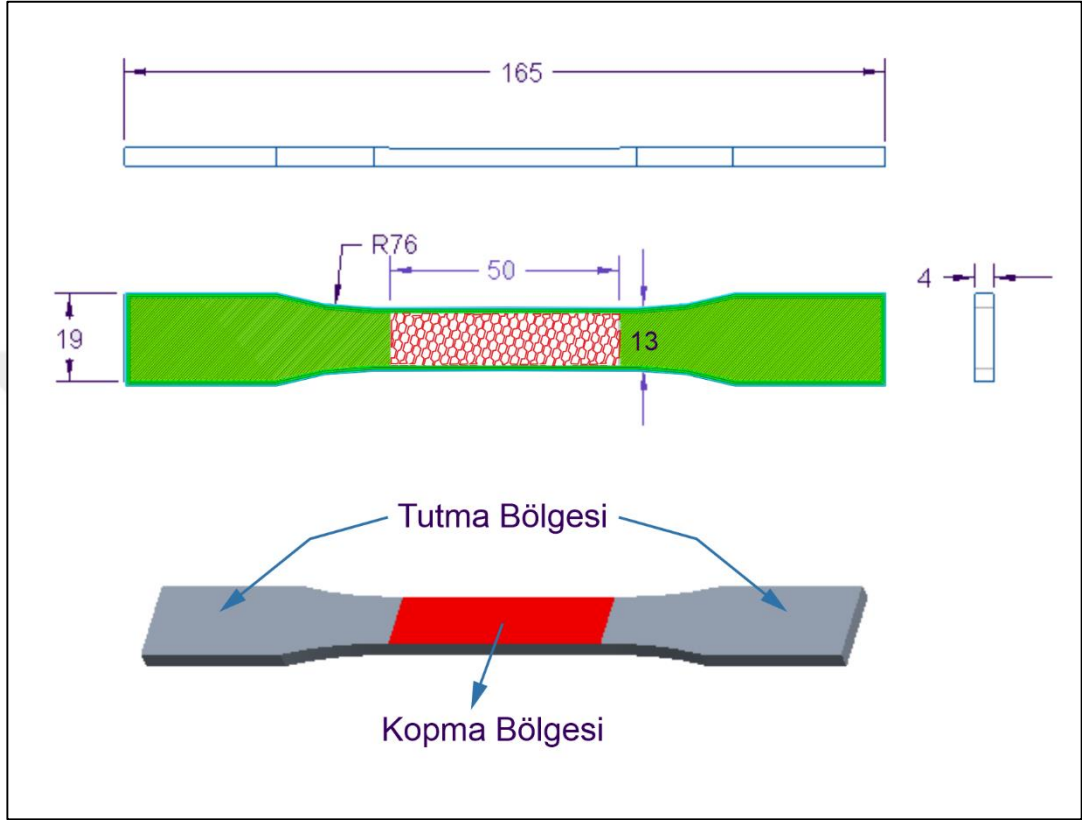
Şekil 4.3. % 100 dolu olarak üretilen çekme test parçası.

Yapılan çekme testi sonucunda %100 dolu olarak üretilen parçanın 2731,8 N değerinde koptuğu görülmüştür. Çekme testi yapılan numune Şekil 4.4'te verilmiştir. Çekme testinde dolgu biçimlerinin çekme dayanımına etkisinin tam olarak gözlemlenebilmesi için, numunenin tutma bölgesi ile kopma bölgesi farklı doluluk oran ve desenlerinde üretilmiştir. Bu amaçla numune tutma bölgesi, Şekil 4.5'te görüldüğü gibi %100 doluluk oranında üretilmiştir. Kopma bölgesi ise Rectilinear ve Honeycomb dolgu desenlerinde (en mukavim değerlerin elde edildiği iki seçenek olan [71]) ve farklı doluluk oranlarında Slic3r dilimleme yazılımı yardımıyla üretilmiştir.

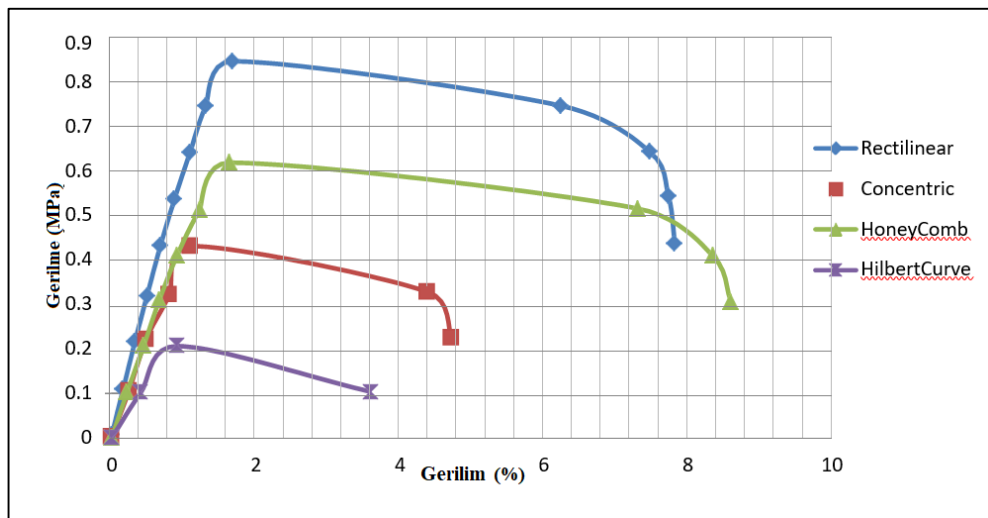


Şekil 4.4. Çekme testi yapılan numune.

Test numunesinde %100 dolu üretilecek kısımlara ait hazırlanmış katı model görseli Şekil 4.5'te verilmiştir. Farklı dolgu desenlerine ait gerilme-gerilim grafiği Şekil 4.6'da gösterilmiştir [71].



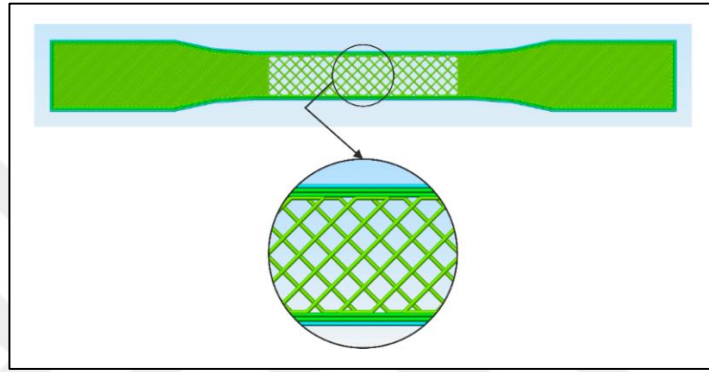
Şekil 4.5. Test numunesinde % 100 dolu üretilecek kısımlara ait hazırlanmış model.



Şekil 4.6. Farklı dolgu desenlerine ait gerilme-gerilim grafiği.

Oluşturulan bu test numunesi iki farklı dolgu deseni (Rectilinear ve Honeycomb) ile ve farklı dolgu yüzdelikleri ile oluşturularak çekme testi yapılmıştır.

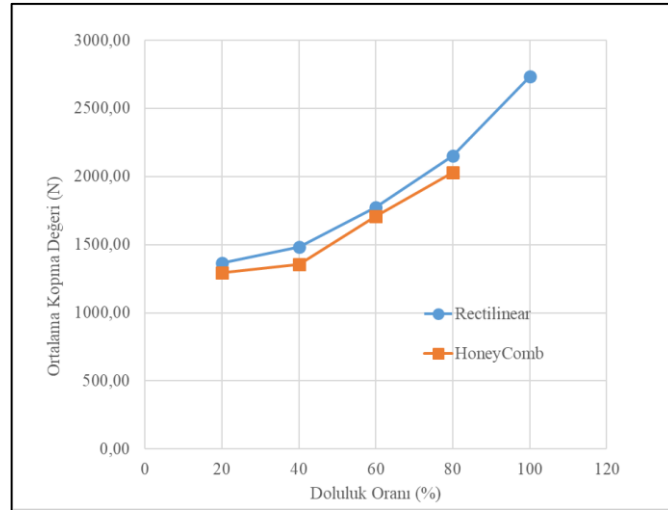
Her iki dolgu deseni ve yüzdelikleri için oluşan örme tipleri ve her tip için yapılan çekme testi sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 4.2’de verilmiştir ve tabloda Şekil 4.7’deki kesit görüntüleri kullanılmıştır. Aynı tabloda görülen çekme deneyi sonuçlarından elde edilen veriler ile oluşturulan grafik Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Kesit görseli.

Tablo 4.2. Çekme numunesinin çekme testi sonuçları ve her iki dolgu deseni ve yüzdelikleri için oluşan örme tipleri.

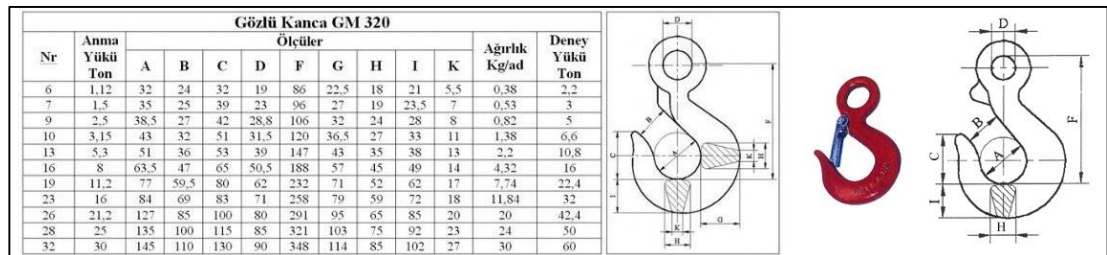
Doluluk Oranı (%)	Örme Görseli		Ortalama Kopma Değeri (N)		Kopma Değerleri Arasındaki Fark (%)
	Rectilinear	Honeycomb	Rectilinear	Honeycomb	
20			1366,51	1292,72	5,71
40			1484,62	1356,01	9,49
60			1774,32	1705,58	4,03
80			2149,74	2029,61	5,92
100			2731,84		



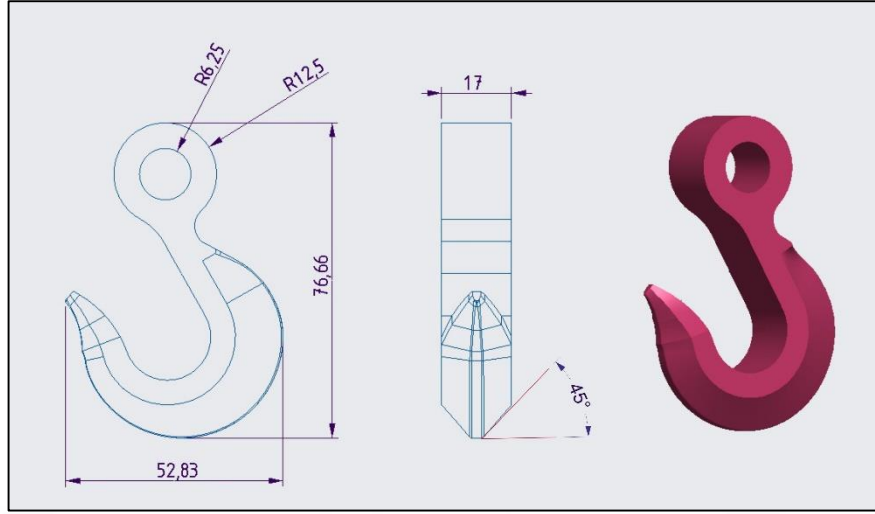
Şekil 4.8. Çekme testi sonuç grafiği.

4.2. Örnek Model

Test numuneleri ile elde edilen sonuçların endüstriyel ürünler üzerinde de uygulanabilirliğinin test edilmesi amacıyla piyasada yaygın olarak kullanılan gözlü kanca üzerinde deneysel çalışmalar bu tez kapsamında yapılmıştır. Kancalar, tipik olarak endüstrilerdeki malzemelerin taşınmasında kullanılan oldukça önemli bileşenlerdir. Temel olarak bir kaldırma zincirinin halkasını, bir kelepçe veya kablo soketinin pimini bağlamak için tasarlanmış bir kaldırma tertibatıdır ve iş sağlığı güvenliği kurallarına uymak zorundadır [72]. Bu çalışmada 3B yazıcıda üretilen bir gözlü kancanın dolgu desenleri ve doluluk oranları değiştirilerek mukavemetinin değişim oranı deneysel olarak incelenmiştir. Test model hazırlanırken Şekil 4.9'daki [73] standartlara uyularak model 3 boyutlu yazıcıda üretilebilecek şekilde revize edilmiş ve Şekil 4.10'da gösterildiği gibi PTC Creo Parametric 6.0 BDT yazılımında katı modeli oluşturulmuştur.

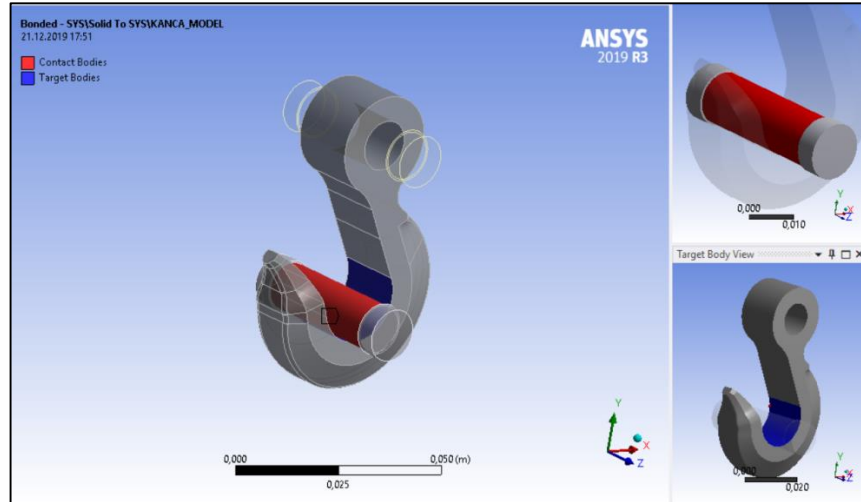


Şekil 4.9. Gözlü kanca standartları ve görseli.



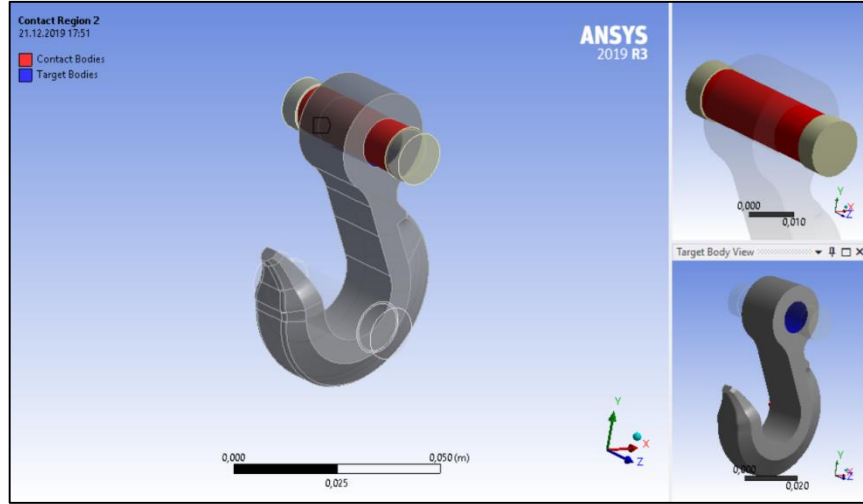
Şekil 4.10. PTC Creo Parametric 6.0'da oluşturulan model.

Oluşturulan bu kanca modelinin çekme sırasında en çok gerilmeye maruz kaldığı bölgeleri belirlemek adına ANSYS R3 2019 yazılımında çekme testi analizi yapılmıştır. Bu analize ait adımlar kısaca aşağıda belirtilmiştir. Şekil 4.11'deki görselde görüleceği üzere çekme testi sırasında alt milin temas ettiği bölge “bonded” kontak olarak tanımlanmıştır.



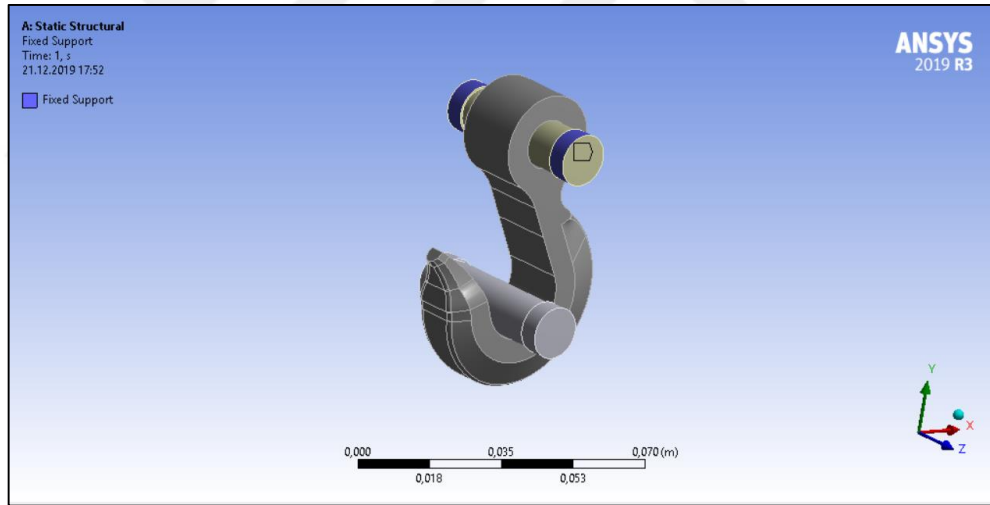
Şekil 4.11. Kanca kontak noktalarının belirlenmesi.

Şekil 4.12'deki görselde görüleceği üzere çekme testi sırasında üst milin temas ettiği bölge “fix” kontak olarak tanımlanmıştır.



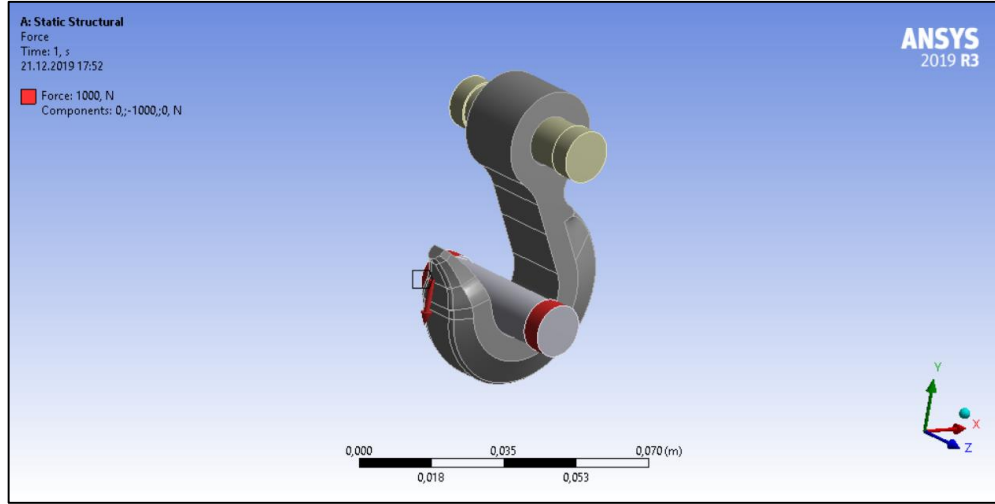
Şekil 4.12. Kanca kontak noktalarının belirlenmesi.

Şekil 4.13'deki görselde görüleceği üzere çekme testi sırasında üst milin temas ettiği bölge sabitlenmiştir.



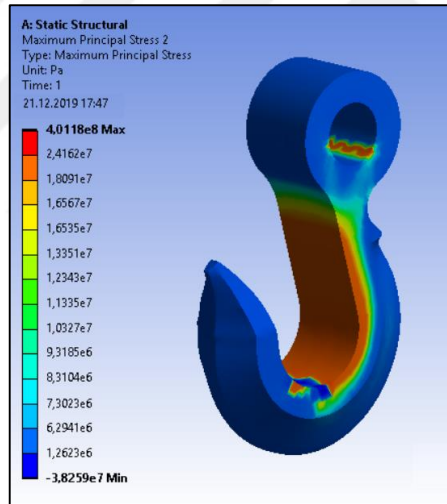
Şekil 4.13. Kanca sınır şartlarının belirlenmesi.

Şekil 4.14'deki görselde görüleceği üzere çekme testi sırasında alt mil aşağı doğru 1000 N yüklenmiştir.



Şekil 4.14. Kanca yük yükleme.

Yapılan analiz sonucunda kanca üzerinde oluşan gerilmeleri gösteren görsel Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Kanca üzerinde oluşan gerilme bölgeleri.

PTC Creo Parametric 6.0 BDT yazılımında oluşturulan model %100 dolu olarak 3 adet üretilmiş ve çekme testi yapılmıştır. Bu parçaların sırasıyla 2432,46 N, 2395,81 N, 2401,37 N değerlerinde koptuğu görülmüştür. Bu değerlerin aritmetik ortalaması alındığında parçanın 2409,88 N değerinde koptuğu görülmüş ve kopma bölgesi incelendiğinde Şekil 4.16’da görüleceği üzere ANSYS yazılımında çekme testi analizindeki aynı bölgeden koptuğu saptanmıştır.



Şekil 4.16. Çekme testi yapılan %100 dolu kanca numunesi.

Oluşturulan bu model çekme numunesinde olduğu gibi iki farklı dolgu deseni (Rectilinear ve Honeycomb) ve farklı dolgu yüzdelikleri (%20, %40, %60, %80) ile üretilerek çekme testi yapılmıştır. Üretilen kanca numunelerine ait görsel Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17. Üretilen kanca numuneleri.

Her iki dolgu deseni ve farklı yüzdelikler için oluşan test numune tipleri ve her numune tipi için yapılan çekme testi sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 4.2’de verilmiştir. Çekme deneyi aşamalarına ait görseller Şekil 4.18, Şekil 4.19’da verilmiştir. Tablo

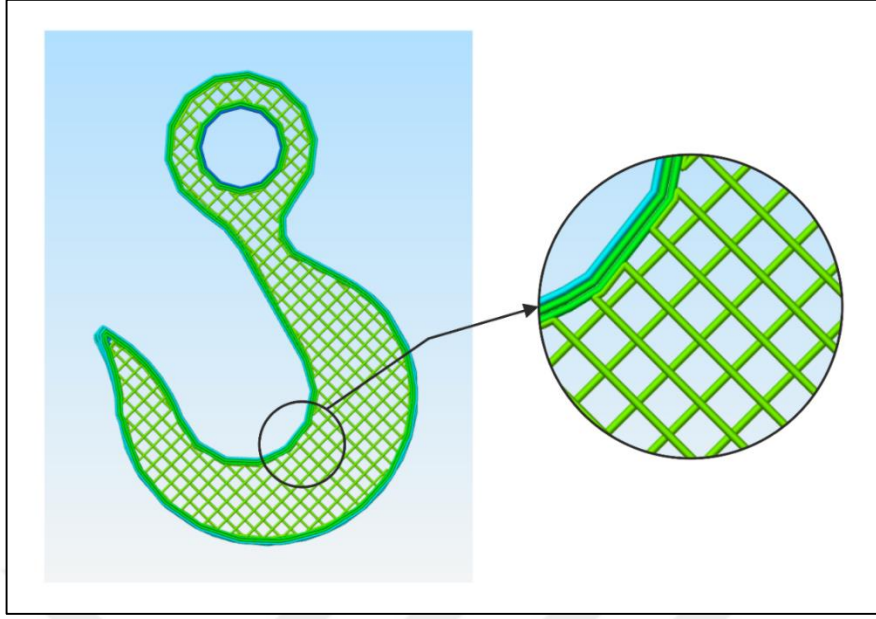
4.3'te görülen çekme deneyi sonuçlarından elde edilen veriler ile oluşturulan grafikler Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23'te sunulmuştur. Bu tabloda Şekil 4.20'deki kesit görüntüleri kullanılmıştır.



Şekil 4.18. Çekme deneyi aşamaları.

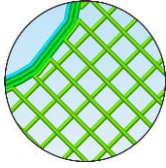
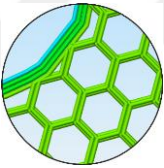
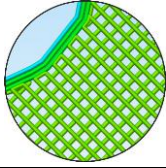
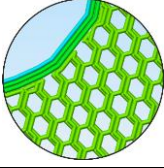
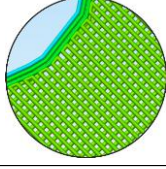
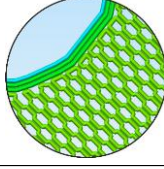
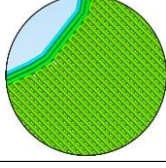
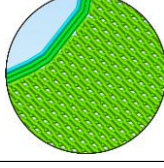
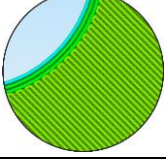


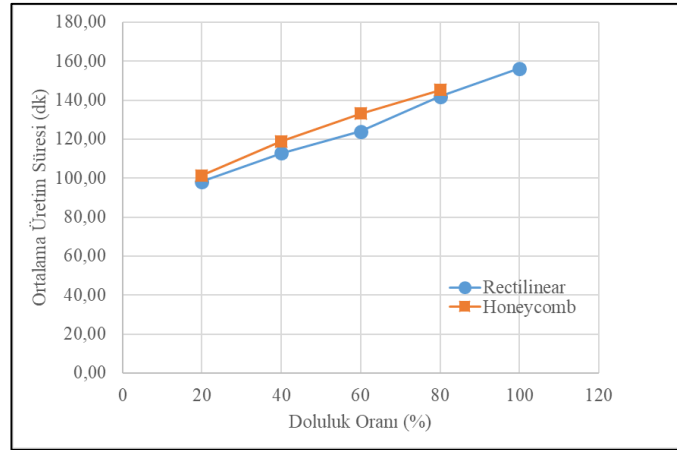
Şekil 4.19. Çekme deneyi aşamaları.



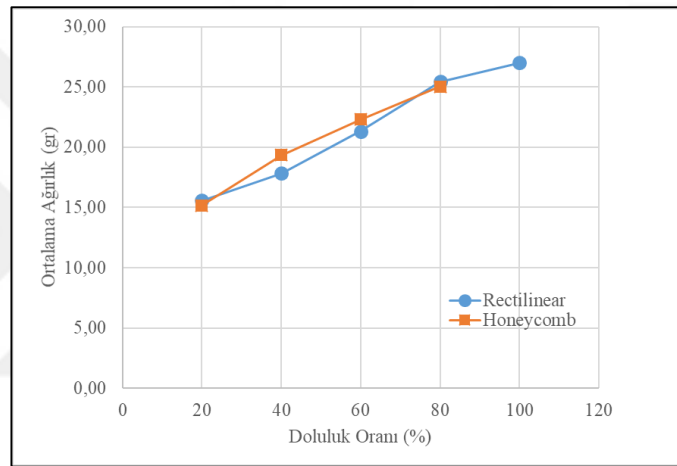
Şekil 4.20. Kesit görseli.

Tablo 4.3. Kanca numunesinin çekme testi sonuçları ve her iki dolgu deseni ve yüzdelikleri için oluşan örme tipleri.

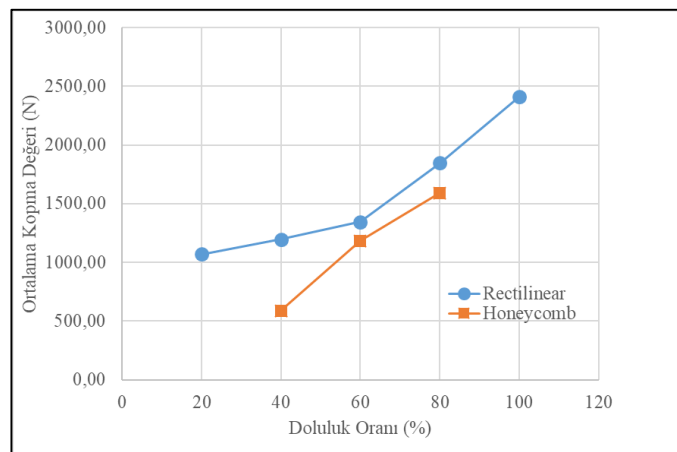
Doluluk Oranı (%)	Örme Görseli		Ortalama Üretim Süresi (dk)		Ortalama Ağırlık (gr)		Ortalama Kopma Değeri (N)		Fark (%)		
	Rectilinear	Honeycomb	Rectilinear	Honeycomb	Rectilinear	Honeycomb	Rectilinear	Honeycomb	Üretim Süresi	Ağırlık	Kopma Değeri
20			98,32	101,29	15,57	15,16	1069,33	Geçersiz.	3,0	2,6	#DEĞER!
40			112,78	118,99	17,82	19,36	1195,66	586,83	5,5	-8,6	50,9
60			123,92	133,19	21,33	22,31	1346,70	1183,99	7,5	-4,6	12,1
80			141,87	145,25	25,46	25,02	1849,13	1593,02	2,4	1,7	13,9
100			156,26		27,02		2409,88				



Şekil 4.21. Üretim süreleri karşılaştırma grafiği.



Şekil 4.22. Ağırlık karşılaştırma grafiği.



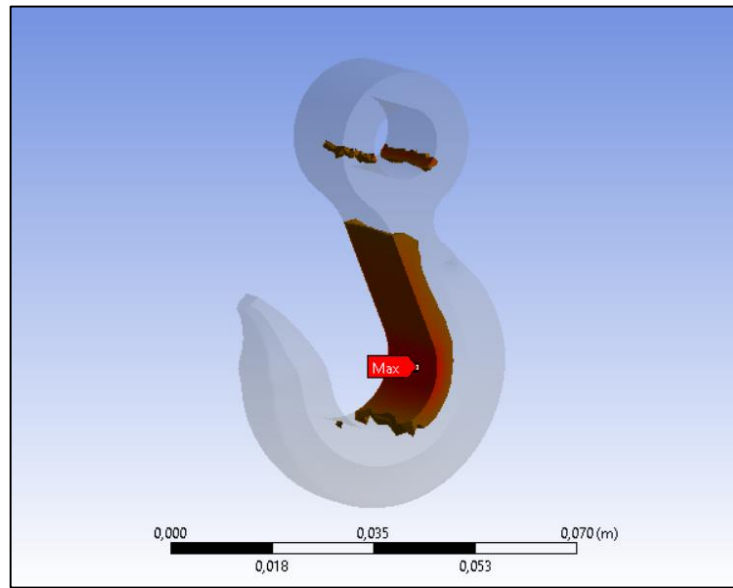
Şekil 4.23. Kopma değerleri karşılaştırma grafiği.

%20 doluluk oranlı Honeycomb dolgu deseninin kanca duvarı ile yaptığı bağlantının yetersiz olmasından dolayı çekme testi sonucunda önce dolgu duvardan ayrılmış ve ardından kopma Şekil 4.24’te görüldüğü gibi olmuştur. Bu sebepten dolayı da Tablo 4.3’te %20’lik oran için “Geçersiz” ifadesi kullanılmıştır.



Şekil 4.24. Honeycomb dolgu deseni ile %20 dolulukta üretilip çekme testi yapılmış numuneler.

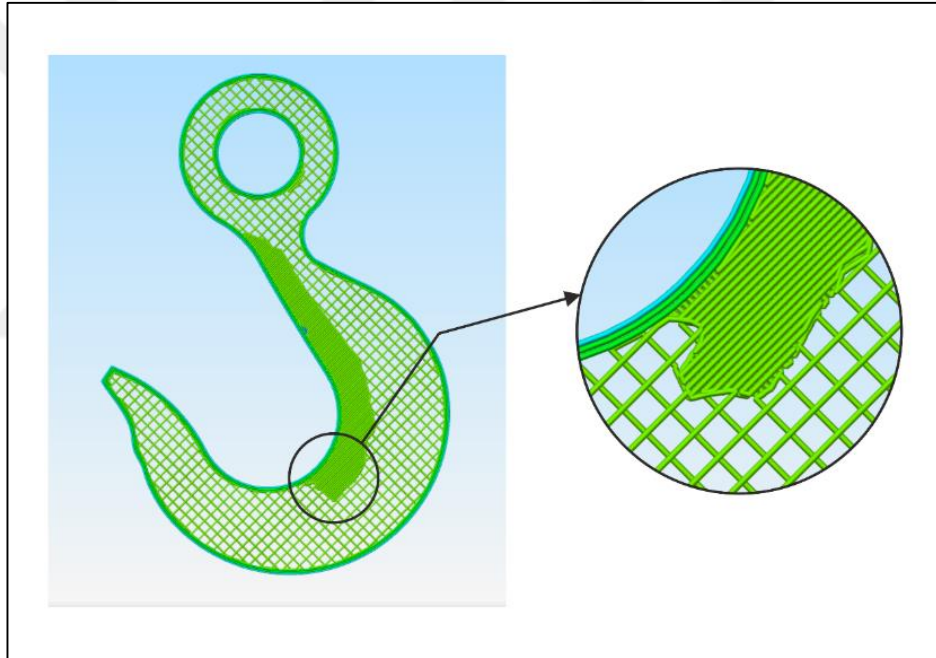
ANSYS yazılımında belirlenen gerilimin yüksek olduğu %65’lik bölge (Şekil 4.25) STL datası olarak yazılımdan alınmıştır.



Şekil 4.25. Gerilimin yüksek olduğu bölge.

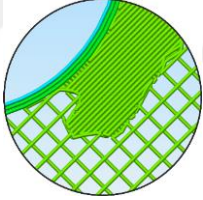
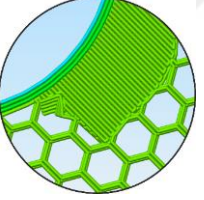
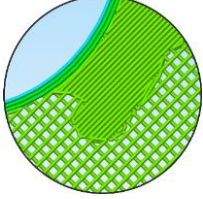
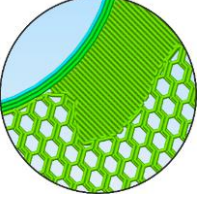
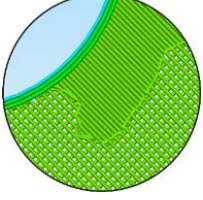
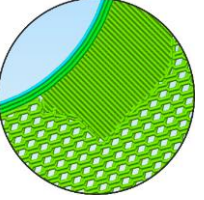
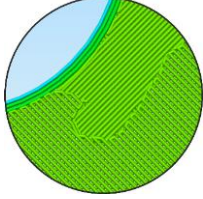
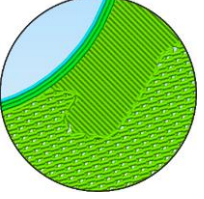
Kancada gerilimin yüksek olduğu bölge %100 dolu, geri kalan bölgelerde ise iki farklı dolgu deseni ve farklı yüzde doluluk oranı için 3'er numune üretilerek zaman, malzeme, mukavemet değışimleri arasındaki ilişki incelenmiştir.

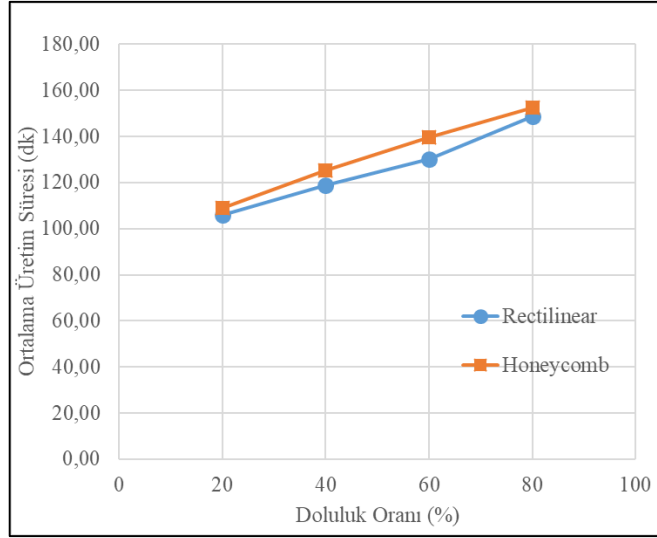
Her durum için üretilen 3 numune üzerinde yapılan çekme testine sonuçlarından elde edilen verilerin aritmetik ortalaması alınarak sonuçlar Tablo 4.3'te verilmiştir ve bu tabloda Şekil 4.26'daki kesit görüntüsü kullanılmıştır. Aynı tabloda görülen çekme deneyi sonuçlarından elde edilen veriler ile oluşturulan grafikler Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da verilmiştir.



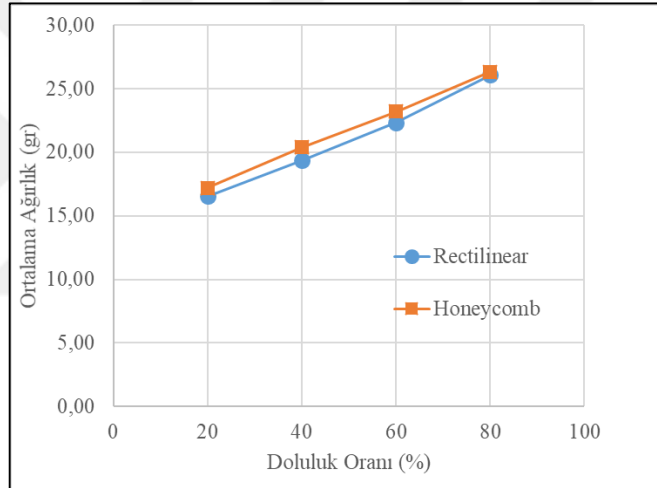
Şekil 4.26. Kesit görseli.

Tablo 4.4. Kanca numunesinin çekme testi sonuçları ve her iki dolgu deseni ve yüzdelikleri için oluşan örme tipleri.

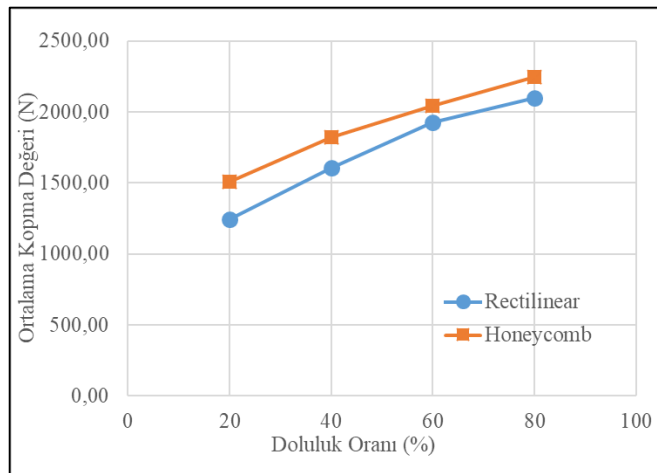
Doluluk Oranı (%)	Örme Görseli		Ortalama Üretim Süresi (dk)		Ortalama Ağırlık (gr)		Ortalama Kopma Değeri (N)		Fark (%)		
	Rectilinear	Honeycomb	Rectilinear	Honeycomb	Rectilinear	Honeycomb	Rectilinear	Honeycomb	Üretim Süresi	Ağırlık	Kopma Değeri
20			105,77	108,97	16,54	17,18	1243,71	1510,06	3,02	3,91	21,42
40			118,77	125,31	19,35	20,39	1608,35	1820,66	5,50	5,36	13,20
60			130,06	139,78	22,35	23,21	1929,81	2046,67	7,47	3,86	6,06
80			148,90	152,45	26,10	26,33	2100,00	2250,00	2,38	0,88	7,14



Şekil 4.27. Üretim süreleri karşılaştırma grafiği.



Şekil 4.28. Ağırlık karşılaştırma grafiği.



Şekil 4.29. Kopma değerleri karşılaştırma grafiği.

Yapılan tüm testler sonucunda elde edilen üretim süreleri, ağırlık ve kopma değerleri verilerinin karşılaştırmalı olarak gösterimi Tablo 4.5’te detaylı olarak sunulmuştur.

Tablo 4.5. Test verilerinin karşılaştırmalı gösterimi.

Doluluk Oranı (%)	Ortalama Üretim Süresi (dk)				Ortalama Ağırlık (gr)				Ortalama Kopma Değeri (N)			
	İyileştirme Yapılmamış Kanca		İyileştirme Yapılmış Kanca		İyileştirme Yapılmamış Kanca		İyileştirme Yapılmış Kanca		İyileştirme Yapılmamış Kanca		İyileştirme Yapılmış Kanca	
	RL	HC	RL	HC	RL	HC	RL	HC	RL	HC	RL	HC
20	98,32	101,29	105,77	108,97	15,57	15,16	16,54	17,18	1069,33	427,88	1243,71	1510,06
40	112,78	118,99	118,77	125,31	17,82	19,36	19,35	20,39	1195,66	586,83	1608,35	1820,66
60	123,92	133,19	130,06	139,78	21,33	22,31	22,35	23,21	1346,70	1183,99	1929,81	2046,67
80	141,87	145,25	148,90	152,45	25,46	25,02	26,10	26,33	1849,13	1593,02	2100,00	2250,00
100	156,26				27,02				2409,88			

Bu verilerin ışığında iyileştirme yapılmış kanca modelleri ile iyileştirme yapılmamış kanca modelleri karşılaştırıldığında üretim süreleri, ağırlık ve kopma değerleri arasındaki yüzde değişim farkları Tablo 4.6’da sunulmuştur.

Tablo 4.6. Yüzdelik olarak değişim fark tablosu.

Doluluk Oranı (%)	İyileştirme Yapılmamış Kanca Örme Görseli			İyileştirme Yapılmış Kanca Örme Görseli		Fark (%)											
	RL	HC		RL	HC	Üretim Süresi		Ağırlık		Kopma Değeri							
						RL	HC	RL	HC	RL	HC						
20			→			7,58	↑	7,58	↑	6,22	↑	13,31	↑	16,31	↑		
40			→			5,31	↑	5,31	↑	8,55	↑	5,30	↑	34,52	↑	210,25	↑
60			→			4,95	↑	4,95	↑	4,76	↑	4,05	↑	43,30	↑	72,86	↑
80			→			4,95	↑	4,95	↑	2,52	↑	5,23	↑	13,57	↑	41,24	↑

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 3 boyutlu yazıcılarda PLA malzeme kullanılarak üretilen ürünlerin dolgu desenlerinin değişiminin üretim süresine, ürün ağırlığına, dayanım değerlerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

Literatür çalışması sonucunda elde edilen bilgiler ışığında 3 boyutlu yazıcıda oluşturulabilecek dolgu desenleri arasında ağırlık/dayanım oranı en iyi olarak belirtilen desenlerden ikisi olan Rectilinear ve Honeycomb dolgu desenleri tez çalışmasında kullanılmıştır.

Bu dolgu desenleri kullanılarak üretilen çekme numunelerinin dayanımının, doluluk oranı ile değişiminin incelenmesi amacıyla numuneler %20, %40, %60, %80, %100 doluluk oranlarında üretilerek testler yapılmıştır.

Çalışma kapsamında tasarımı yapılan gözlü kanca %20, %40, %60, %80, %100 doluluk oranlarında Rectilinear ve Honeycomb dolgu desenleri kullanılarak üretilip, çekme testi yapılmıştır. Sonuçlar doluluk oranı arttıkça kancanın yük taşıma kabiliyetinin de arttığını göstermiştir. Bunun yanında doluluk oranına bağlı olarak Rectilinear dolgu deseninin Honeycomb dolgu desenine göre yaklaşık %20 ile %60 oranında daha yüksek taşıma kabiliyeti sağladığı da görülmüştür. Buna bağlı olarak üretim süre ve harcanan malzeme oranlarının doluluk oranına göre yaklaşık %7,5 oranında arttığı görülmüştür.

Parçanın taşıma kabiliyetinin artırılması amacıyla, ANSYS sonlu elemanlar yazılımı yardımıyla, parça üzerinde uygulanan çekme yükü sonucunda oluşan gerilmenin en yüksek olduğu bölge hacimsel olarak belirlenmiştir. Bu hacim test edilecek yeni kanca numunelerinde Rectilinear dolgu deseni ve %100 doluluk oranı ile diğer kısımlar ise

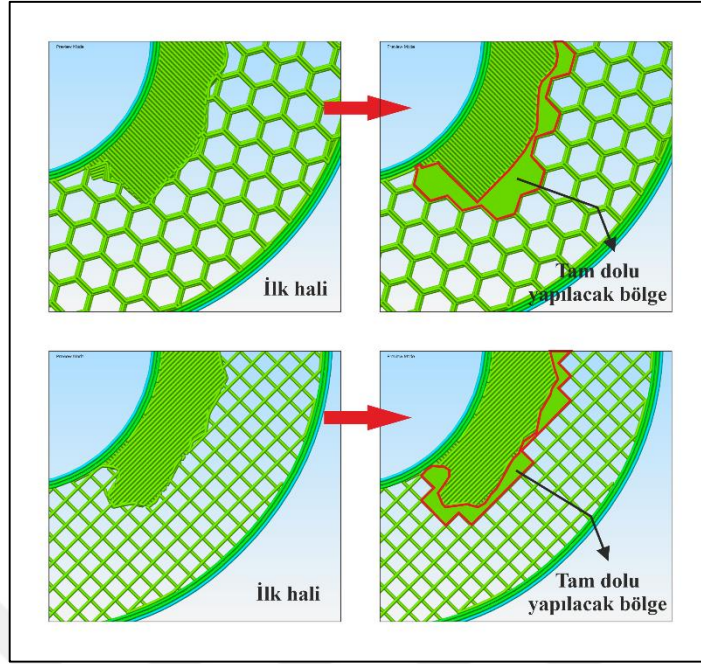
ilk testlerde yapıldığı gibi Rectilinear ve Honeycomb dolgu desenleri ve %20, %40, %60, %80 doluluk oranları ile üretilmiştir.

Gerilmenin yüksek olduğu hacim kullanılarak üretilen numuneler üzerinde yapılan testler sonucunda Rectilinear dolgu deseninde, ilk duruma göre taşıma kabiliyetinde %13 ile %43 oranında iyileşme olduğu görülmüştür. Bu durum Honeycomb dolgu deseninde %40 ile %210 oranında iyileşme olarak görülmüştür. Bu numunelerin üretim süre ve harcanan malzeme oranları da incelendiğinde doluluk oranına bağlı olarak bu değerlerin üretim süresinde her iki dolgu deseninde de yaklaşık %5 ile %7,5 oranında, harcanan malzeme de ise Rectilinear dolgu deseninde yaklaşık %2,5 ile %8,5, Honeycomb dolgu deseninde yaklaşık %4 ile %5 oranında arttığı görülmüştür.

Bunun yanı sıra Honeycomb deseni incelendiğinde iyileştirme yapılmamış kancanın %80 doluluk oranında elde edilen kopma değeri (1593,2 N), iyileştirme yapıldıktan sonra üretim süresinde %7,58'lik ve ağırlıkta %13,31'lik artış ile yaklaşık olarak %20 doluluktaki kancada (1510,06 N) görülmüştür.

İlk duruma göre Honeycomb dolgu deseninde %40 doluluk oranında görülen taşıma kapasitesindeki %210'a varan artışın, gerilmenin yüksek olduğu bölgenin %100 doluluk ile üretilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. İlk testlerde de görüldüğü gibi Honeycomb dolgu deseni, dilimleme programı olarak kullanılan Slic3r yazılımındaki Honeycomb deseninin her bir katmanda döndürülerek üretilmesinden düşük dayanım sergilemektedir. Bundaki temel sebep desenlerin döndürülmesinden dolayı her bir katmanın duvarlar ile yapmış olduğu bağlantının birbirinden farklılık içermesidir. Ancak yüksek gerilme bölgesi %100 dolulukta üretilen parçalarda gerek parçaların duvar ile bağlantı yapısı gerekse de %100 doluluktan dolayı parçanın dayanımı büyük oranda artmaktadır. Bu artış oranı dolgu oranı arttıkça azalmaktadır.

- Sıcaklık, üretim hızı, katman kalınlığı, duvar ve taban/tavan katman sayıları gibi üretim parametrelerinin parça dayanımına etkisinin incelenmesi,
- Honeycomb dolgu deseni kullanılarak üretilen parçalarda desenin gerek duvar ile yapmış olduğu bağlantı bölgelerinde gerekse de desenin kendi



Şekil 5.2. Kancada tam dolu üretilmesi önerilen bölge.

gibi konular hakkında da detaylı çalışmaların yapılması eklemeli imalat yönteminin kapasitesinin anlaşılması ve farklı sektörler için üretilen parçalara uygulanabilmesine olanak tanımasın açısından faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] “Subtractive & additive manufacturing: processes, differences, explanations.” [Online]. Available: <https://resources.shift.parts/en/subtractive-manufacturing-vs-additive-manufacturing/>. [Accessed: 03-Dec-2019].
- [2] ASTM INTERNATIONAL, “ASTM F2792-12a,” *Rapid Manuf. Assoc.*, pp. 1–3, 2013.
- [3] H. Bikas, P. Stavropoulos, and G. Chryssolouris, “Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 83, no. 1, pp. 389–405, Mar. 2016.
- [4] D. T. Pham and S. S. Dimov, *Rapid Manufacturing*. London: Springer London, 2001.
- [5] A. Woesz, “Rapid Prototyping to Produce POROUS SCAFFOLDS WITH CONTROLLED ARCHITECTURE for Possible use in Bone Tissue Engineering,” in *Virtual Prototyping & Bio Manufacturing in Medical Applications*, B. Bidanda and P. Bártolo, Eds. Boston, MA: Springer US, 2008, pp. 171–206.
- [6] K. Salonitis, G. Tsoukantas, P. Stavropoulos, and A. Stournaras, “A critical review of stereolithography process modeling,” *Virtual Model. Rapid Manuf. - Adv. Res. Virtual Rapid Prototyp.*, 2003.
- [7] N. B. Dahotre and S. P. Harimkar, *Laser fabrication and machining of materials*. 2008.
- [8] J. P. Kruth, “Material Ingress Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques,” *CIRP Ann.*, vol. 40, no. 2, pp. 603–614, 1991.
- [9] M. Castoro and R. P. Center, “Impact of Laser Power and Build Orientation on the Mechanical Properties of Selectively Laser Sintered Parts.”
- [10] G. Chryssolouris, “Manufacturing systems: theory and practice, 2nd edn. Springer, New York,” vol. 66, pp. 37–39, 2012.

- [11] M. W. Khaing, J. Y. H. Fuh, and L. Lu, "Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterisation of EOS parts," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 113, no. 1, pp. 269–272, 2001.
- [12] J. Liu and L. Li, "In-time motion adjustment in laser cladding manufacturing process for improving dimensional accuracy and surface finish of the formed part," *Opt. Laser Technol.*, vol. 36, no. 6, pp. 477–483, Sep. 2004.
- [13] J. Pandremenos, J. Paralikas, G. Chryssolouris, B. Dybala, and J. W. Gunnink, "Rm Product Development : Design Principles , Simulation and Tools," 2008.
- [14] K. V. Wong and A. Hernandez, "A Review of Additive Manufacturing," *ISRN Mech. Eng.*, vol. 2012, pp. 1–10, 2012.
- [15] "Idiot's Guides 3D Printing.pdf | 3 D Printing | Technology." [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/358795028/Idiot-s-Guides-3D-Printing-pdf>. [Accessed: 13-Nov-2019].
- [16] Noorani Rafiq, *3D Printing Technology, Applications and Selection*. CRC Press Taylor & Francis Group, 2017.
- [17] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Compos. Part B Eng.*, vol. 143, no. February, pp. 172–196, 2018.
- [18] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, and C. Emmelmann, "Additive manufacturing of metals," *Acta Mater.*, vol. 117, pp. 371–392, 2016.
- [19] E. Sheydaeian and E. Toyserkani, "A new approach for fabrication of titanium-titanium boride periodic composite via additive manufacturing and pressure-less sintering," *Compos. Part B Eng.*, vol. 138, pp. 140–148, Apr. 2018.
- [20] Y. Hu, W. Cong, X. Wang, Y. Li, F. Ning, and H. Wang, "Laser deposition-additive manufacturing of TiB-Ti composites with novel three-dimensional quasi-continuous network microstructure: Effects on strengthening and toughening," *Compos. Part B Eng.*, vol. 133, pp. 91–100, Jan. 2018.
- [21] H. Attar, M. Calin, L. C. Zhang, S. Scudino, and J. Eckert, "Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 593, pp. 170–177, Jan. 2014.

- [22] J. Vaithilingam, S. Kilsby, R. D. Goodridge, S. D. R. Christie, S. Edmondson, and R. J. M. Hague, "Functionalisation of Ti6Al4V components fabricated using selective laser melting with a bioactive compound," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 46, pp. 52–61, Jan. 2015.
- [23] H. D. Carlton, A. Haboub, G. F. Gallegos, D. Y. Parkinson, and A. A. MacDowell, "Damage evolution and failure mechanisms in additively manufactured stainless steel," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 651, pp. 406–414, Jan. 2016.
- [24] G. Casalino, S. L. Campanelli, N. Contuzzi, and A. D. Ludovico, "Experimental investigation and statistical optimisation of the selective laser melting process of a maraging steel," *Opt. Laser Technol.*, vol. 65, pp. 151–158, Jan. 2015.
- [25] L. E. Murr *et al.*, "Microstructures and Properties of 17-4 PH Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 1, no. 3, pp. 167–177, Oct. 2012.
- [26] J. Mazumder, J. Choi, K. Nagarathnam, J. Koch, and D. Hetzner, "The direct metal deposition of H13 tool steel for 3-D components," *JOM*, vol. 49, no. 5, pp. 55–60, May 1997.
- [27] "When Is 3D Printing Cost Effective? : Additive Manufacturing Magazine." [Online]. Available: [https://www.additivemanufacturing.media/blog/post/when-is-3d-printing-cost-effective\(2\)](https://www.additivemanufacturing.media/blog/post/when-is-3d-printing-cost-effective(2)). [Accessed: 08-Dec-2019].
- [28] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, and D. Hui, "3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective," *Compos. Part B Eng.*, vol. 110, pp. 442–458, Feb. 2017.
- [29] A. Takezawa and M. Kobashi, "Design methodology for porous composites with tunable thermal expansion produced by multi-material topology optimization and additive manufacturing," *Compos. Part B Eng.*, vol. 131, pp. 21–29, Dec. 2017.
- [30] S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, and R. Mülhaupt, "Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing," *Chem. Rev.*, vol. 117, no. 15, pp. 10212–10290, 2017.

- [31] N. B. Gundrati, P. Chakraborty, C. Zhou, and D. D. L. Chung, "First observation of the effect of the layer printing sequence on the molecular structure of three-dimensionally printed polymer, as shown by in-plane capacitance measurement," *Compos. Part B Eng.*, vol. 140, pp. 78–82, May 2018.
- [32] N. B. Gundrati, P. Chakraborty, C. Zhou, and D. D. L. Chung, "Effects of printing conditions on the molecular alignment of three-dimensionally printed polymer," *Compos. Part B Eng.*, vol. 134, pp. 164–168, Feb. 2018.
- [33] G. Postiglione, G. Natale, G. Griffini, M. Levi, and S. Turri, "Conductive 3D microstructures by direct 3D printing of polymer/carbon nanotube nanocomposites via liquid deposition modeling," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 76, pp. 110–114, Sep. 2015.
- [34] J. Yang, J. H. Cho, and M. J. Yoo, "Selective metallization on copper aluminate composite via laser direct structuring technology," *Compos. Part B Eng.*, vol. 110, pp. 361–367, Feb. 2017.
- [35] Y. Zhuang *et al.*, "3D-printing of materials with anisotropic heat distribution using conductive polylactic acid composites," *Mater. Des.*, vol. 126, pp. 135–140, Jul. 2017.
- [36] C.-C. Kuo *et al.*, "Preparation of starch/acrylonitrile-butadiene-styrene copolymers (ABS) biomass alloys and their feasible evaluation for 3D printing applications," *Compos. Part B Eng.*, vol. 86, pp. 36–39, Feb. 2016.
- [37] Y. Song, Y. Li, W. Song, K. Yee, K.-Y. Lee, and V. L. Tagarielli, "Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA," *Mater. Des.*, vol. 123, pp. 154–164, Jun. 2017.
- [38] S. A. Hinchcliffe, K. M. Hess, and W. V. Srubar, "Experimental and theoretical investigation of prestressed natural fiber-reinforced polylactic acid (PLA) composite materials," *Compos. Part B Eng.*, vol. 95, pp. 346–354, Jun. 2016.
- [39] G. Alaimo, S. Marconi, L. Costato, and F. Auricchio, "Influence of meso-structure and chemical composition on FDM 3D-printed parts," *Compos. Part B Eng.*, vol. 113, pp. 371–380, Mar. 2017.
- [40] Y. Wen *et al.*, "3D printed porous ceramic scaffolds for bone tissue engineering: a review," *Biomater. Sci.*, vol. 5, no. 9, pp. 1690–1698, 2017.

- [41] X. Li, M. Gao, and Y. Jiang, "Microstructure and mechanical properties of porous alumina ceramic prepared by a combination of 3-D printing and sintering," *Ceram. Int.*, vol. 42, no. 10, pp. 12531–12535, Aug. 2016.
- [42] J. Maurath and N. Willenbacher, "3D printing of open-porous cellular ceramics with high specific strength," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 37, no. 15, pp. 4833–4842, Dec. 2017.
- [43] C. Minas, D. Carnelli, E. Tervoort, and A. R. Studart, "3D Printing of Emulsions and Foams into Hierarchical Porous Ceramics," *Adv. Mater.*, vol. 28, no. 45, pp. 9993–9999, Dec. 2016.
- [44] "Technical Ceramics - Custom Manufactured | Precision Ceramics." [Online]. Available: <https://precision-ceramics.com/products/custom-ceramic-parts-components/>. [Accessed: 08-Dec-2019].
- [45] B. Khoshnevis, "Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies," *Autom. Constr.*, vol. 13, no. 1, pp. 5–19, Jan. 2004.
- [46] M. Hambach and D. Volkmer, "Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 79, pp. 62–70, May 2017.
- [47] G. Cesaretti, E. Dini, X. De Kestelier, V. Colla, and L. Pambaguian, "Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology," *Acta Astronaut.*, vol. 93, pp. 430–450, Jan. 2014.
- [48] S. Lim, R. A. Buswell, T. T. Le, S. A. Austin, A. G. F. Gibb, and T. Thorpe, "Developments in construction-scale additive manufacturing processes," *Autom. Constr.*, vol. 21, no. 1, pp. 262–268, 2012.
- [49] M. Vaezi, S. Chianrabutra, B. Mellor, and S. Yang, "Multiple material additive manufacturing – Part 1: a review," *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 8, no. 1, pp. 19–50, 2013.
- [50] J. Woo Jung, J.-S. Lee, and D.-W. Cho, "Computer-aided multiple-head 3D printing system for printing of heterogeneous organ/tissue constructs," 2016.
- [51] D. C. Hofmann *et al.*, "Compositionally graded metals: A new frontier of additive manufacturing," *J. Mater. Res.*, vol. 29, no. 17, pp. 1899–1910, Sep. 2014.

- [52] Y. Chivel, “New Approach to Multi-material Processing in Selective Laser Melting,” *Phys. Procedia*, vol. 83, pp. 891–898, Jan. 2016.
- [53] A. T. Gaynor, N. A. Meisel, C. B. Williams, and J. K. Guest, “Multiple-Material Topology Optimization of Compliant Mechanisms Created Via PolyJet Three-Dimensional Printing,” *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 136, no. 6, Dec. 2014.
- [54] D. Bourell *et al.*, “Materials for additive manufacturing,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 2, pp. 659–681, 2017.
- [55] “3D Yazıcı Çeşitleri ve Şekilleri Nelerdir? Hangisi Daha İyi? (Kartezyen, Delta, Polar ve Scara Farkı) - Kerteriz Blog.” [Online]. Available: <https://kerteriz.net/3d-yazici-cesitleri-ve-sekilleri-nelerdir/>. [Accessed: 12-Nov-2019].
- [56] T. Wakimoto, R. Takamori, S. Eguchi, and H. Tanaka, “Growable robot with ‘additive-additive-manufacturing,” *Conf. Hum. Factors Comput. Syst. - Proc.*, vol. 2018-April, pp. 1–6, 2018.
- [57] “Cartesian, Delta, and Polar 3D Printers: What are They and What’s the Difference? - 3D Insider.” [Online]. Available: <https://3dinsider.com/cartesian-vs-delta-vs-polar/>. [Accessed: 12-Nov-2019].
- [58] “The 4 Types of FFF / FDM 3D Printer Explained (Cartesian, Delta, Polar) - 3Dnatives.” [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/>. [Accessed: 12-Nov-2019].
- [59] “The 4 Types of FDM 3D Printer Explained (Cartesian, Delta, Polar & Scara) - 3DSourced.” [Online]. Available: <https://3dsourced.com/3d-printers/types-of-fdm-3d-printer-cartesian-delta/>. [Accessed: 13-Nov-2019].
- [60] “UZARAS 3D A.Ş. 3D YAZICI VE FİLAMANT SATIŞI.” [Online]. Available: <https://www.uzaras3d.com/filament-1230295310/pla-plus/uzaras-1-75-mm-kirmizi-pla-plus-filament-1000gr.html>. [Accessed: 07-Dec-2019].
- [61] “Oriijinal Arduino Mega 2560 R3 Satın Al | Robotistan.com.” [Online]. Available: <https://www.robotistan.com/orjinal-arduino-mega-2560-r3-yeni-versiyon-1>. [Accessed: 11-Dec-2019].

- [62] “Parts of a 3D Printer: List of Major 3D Printing Components - 3D Insider.” [Online]. Available: <https://3dinsider.com/3d-printer-parts/>. [Accessed: 11-Dec-2019].
- [63] “RepRap Ramps 1.4 3D Printer Kontrol Kartı Satın Al | Robotistan.com.” [Online]. Available: <https://www.robotistan.com/reprap-ramps-14-3d-printer-kontrol-karti>. [Accessed: 12-Dec-2019].
- [64] “Bipolar NEMA 17 200 Adım 42x38 mm 2.8 V Step Motor - PL-2267 Satın Al | Robotistan.com.” [Online]. Available: <https://www.robotistan.com/bipolar-nema-17-200-adim-42x38mm-28v-step-motor>. [Accessed: 12-Dec-2019].
- [65] “3B Yazıcı Extruder - Reprap Uyumlu Step Motorlu Extruder Satın Al | Robotistan.com.” [Online]. Available: <https://www.robotistan.com/3b-yazici-extruder-makerbot-reprap-uyumlu-step-motorlu-extruder>. [Accessed: 12-Dec-2019].
- [66] “DMS Lineer Raylar ve Arabalar | Doğuş Kalıp.” [Online]. Available: <https://www.doguskalip.com.tr/Urun/dms-lineer-raylar-ve-arabalar/4334>. [Accessed: 12-Dec-2019].
- [67] “Kasnak : GT2 Kasnak ve Kayış Seti Satın Al.” [Online]. Available: <https://www.robolinkmarket.com/gt2-kasnak-ve-kayis-seti.html>. [Accessed: 12-Dec-2019].
- [68] E3-95, “Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens,” *ASTM Int.*, vol. 82, no. C, pp. 1–15, 2016.
- [69] “Slicing-Software: Slic3r - Update: Stable Version 1.2.9 Released - 3Printr.com.” [Online]. Available: <https://www.3printr.com/slicing-software-slic3r-5514410/>. [Accessed: 18-Dec-2019].
- [70] “Slic3r Manual – Print Settings.” [Online]. Available: <https://manual.slic3r.org/expert-mode/print-settings>. [Accessed: 18-Dec-2019].
- [71] S. F. Khan, H. Zakaria, Y. L. Chong, M. A. M. Saad, and K. Basaruddin, “Effect of infill on tensile and flexural strength of 3D printed PLA parts,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 429, no. 1, 2018.
- [72] A. K. S. and A. V. H. Jatin Rajpal, Rucha S.Bhirud, “Finite Element Analysis and Optimization of Automobile Chassis,” *Int. J. Innov. Technol. Res.*, vol. 3, no. 7, pp. 2075–2082, 2015.

- [73] “gözlü kanca | Çelik Halat, Çelikhalat, Paslanmaz, Galvaniz, Renkli, Halatlar, Bilgi.” [Online]. Available: <http://asilcelikhalat.com/bilgi/tag/gozlu-kanca/>. [Accessed: 20-Dec-2019].



ÖZGEÇMİŞ

Serdar EFE, 03.05.1982’de İstanbul’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul’da tamamladı. 1999 yılında Eyüp Otakçılar Lisesi’nden mezun oldu. 2000 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü’nü 2004 yılında bitirdi. 2004 yılında Sakarya Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans eğitimine başladı. Bu yıllar içerisinde özel sektörde çalıştı. 2009 yılında Amerika Birleşik Devletleri’de pazarlama sertifika programına başladı. 2010 yılında bu programı bitirip New York’ta mühendis olarak çalışmaya başladı. 2013 yılında Türkiye’ye geri döndü. Satış yönetimi, Operasyon yönetimi, Proje yönetimi pozisyonlarında çalıştı.