

**İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINA AİT TERMOPLASTİK KOMPOZİT
YAPISAL PARÇALARIN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU YÖNTEMİ
İLE TASARIMI VE EKLEMELİ İMALAT METODU İLE ÜRETİM
ŞARTLARININ İNCELENMESİ**

Fikrat GAFURZADE

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Eylül 2022

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Fikrat GAFURZADE'nin “İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINA AİT TERMOPLASTİK KOMPOZİT YAPISAL PARÇALARIN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU YÖNTEMİ İLE TASARIMI VE EKLEMELİ İMALAT METODU İLE ÜRETİM ŞARTLARININ İNCELENMESİ” başlıklı çalışması 06/09/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, Makine Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye (Tez Danışmanı) : Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK
Üye : Dr. Öğr. Üyesi. Hasan ŞAHİN
Üye : Doç. Dr. Ümit ER

Prof. Dr. Murat TANIŞLI
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek lisans ğrencisi Fikrat GAFURZADE, İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINA AİT TERMOPLASTİK KOMPOZİT YAPISAL PARÇALARIN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU YÖNTEMİ İLE TASARIMI VE EKLEMELİ İMALAT METODU İLE ÜRETİM şARTLARININ İNCELENMESİ başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı
Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

ÖZET

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARINA AİT TERMOPLASTİK KOMPOZİT YAPISAL
PARÇALARIN TOPOLOJİ OPTİMİZASYONU YÖNTEMİ İLE TASARIMI VE
EKLEMELİ İMALAT METODU İLE ÜRETİM ŞARTLARININ İNCELENMESİ

Fikrat GAFURZADE

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eylül, 2022

Danışman: Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

Araştırmada, topoloji optimizasyon kullanarak boyut aralığı 375*375*45 mm'den daha az olan, yapı olarak 'altıgen' şeklinde bir çerçeveye sahip bir Hexacopter tasarlanmıştır.

Çalışma esnasında ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren), CF ABS (Karbon Fiber takviyeli ABS), ONYX olmak üzere üç farklı malzeme kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında havacılık ürün mekanik özelliklerinin incelenmesi, kütlü azaltma amaçlı topoloji optimizasyonu ve ideal mekanik performans için mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amaçlanarak, analitik ve numerik analizler yapılmıştır. Bahsi geçen malzemeler ile baskı oryantasyonu ve dolgu yoğunluk oranı olmak üzere farklı üretim parametrelerine göre hesaplamalar yapılmıştır. Analitik modellemeye ek olarak sonlu elemanlar analizleri de gerçekleştirilmiş ve seçilen bir ürüne malzeme ekstrüzyon esaslı eklemeli imalat ile üretilen farklı polimer ve polimer matris malzeme özellikleri atanarak topoloji optimizasyonuna tabi tutulmuştur. Aynı eleman türü ve boyutları, aynı yükleme koşulları ve aynı kütle azaltım hedefi ile yapılan topoloji optimizasyonları sonucunda ortaya çıkan geometriler tartışılmış ve optimizasyon hedef ve kısıtlarında yer almayan nihai hacimleri açısından tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yapısal optimizasyon, Topoloji optimizasyonu, Eklemeli imalat teknolojileri, Analitik modelleme

ABSTRACT

DESIGN OF THERMOPLASTIC COMPOSITE STRUCTURAL PARTS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES WITH TOPOLOGY OPTIMIZATION METHOD AND ANALYSIS OF PRODUCTION CONDITIONS WITH ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

Fikrat GAFURZADE

Department of Mechanical Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, September 2022

Supervisor: Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

In this research, implemented a 'hexagonal' shaped frame with a size range of less than 375*375*45 mm hexacopter by utilizing topology optimization.

During the study, three different materials were utilized: ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), CF ABS (Carbon Fiber Reinforced ABS), and ONYX. The mechanical characteristics of aerospace goods, topology optimization for mass reduction, and mechanical property enhancement for perfect mechanical performance were the goals of the analytical and numerical analyses conducted for this thesis. Calculations using the aforementioned materials were done based on various production factors. Print orientation and filling density ratio were these production variables that could be controlled. Finite element analyses were performed in addition to analytical modeling, and a chosen product was subjected to topology optimization by assigning various polymer and polymer matrix material attributes created via material extrusion-based additive manufacturing. The geometries that arise from topological optimizations with the same element type and dimensions, loading conditions, and mass reduction target are discussed in terms of their final volumes, which are not included in the optimization goals and constraints.

Keywords: Structural optimization, Topology optimization, Additive manufacturing technologies, Analytical modeling

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca bilgisi, tecrübesi, sabrı ve yardımları ile beni yönlendiren, değerli vaktini hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK'a müteşekkirim

Çalışmanın tüm aşamalarında yardımlarından ve fedakârlıklarından dolayı üniversite arkadaşlarıma, testlerin yapılması ve analizlerin doğrulanmasında yol gösteren yüksek lisans makine mühendisliği mezunu değerli arkadaşım Abas ABASOV'a yardımları için teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatımın her sürecinde yanımda olarak beni destekleyen, en iyi şekilde yetiştiren, fikir veren, kendi ihtiyaçlarını erteleyerek benim için maddi, manevi emek harcayan aileme ve ağabeyim Elçin GAFURZADE'ye sadece bu tez kapsamında değil tüm hayat boyunca sonsuz teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Eylül 2022

Fikrat GAFURZADE

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla” tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....
Fikrat GAFURZADE

İÇİNDEKİLER

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
DANIŞMAN ONAYI	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR	vi
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
TABLOLAR DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Eklemeli İmalat	3
1.2. Eklemeli imalat yöntemleri	7
1.2.1. Stereolitografi (Stereolithography-SL).....	9
1.2.2. Dijital Işık İşleme (Dijital Light Processing-DLP)	9
1.2.3. Sürekli Dijital Işık İşleme (Continuous Direct Dijital Light Processing-CDLP).....	9
1.2.4. Çoklu Püskürtme (Polyjet-PJ)	10
1.2.5. Lamine Nesne İmalatı (Laminated Object Manufacturing-LOM)	10
1.2.6. Seçmeli Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering – SLS)	11
1.3. Eriyik Biriktirme Yöntemi (Fused Deposition Modeling-FDM)	11
1.3.1. Eriyik Biriktirme yönteminde üretim parametreleri.....	15
1.3.2. Katman kalınlığı	15
1.3.3. Dolgu deseni	16
1.3.4. Tabla sıcaklığı	17

1.3.5. Nozül sıcaklığı.....	18
1.3.6. Oryantasyon açısı	19
1.3.7. Üretim hızı.....	19
1.3.8. Doluluk oranı	20
1.3.9. Tasarım kriterleri.....	20
1.3.10. Parça üzerinde merdiven gibi kademeler oluşması.....	21
1.4. Eklemeli İmalat yönteminde kullanılan malzemeler	22
1.4.1. Eklemeli İmalatde havacılık teknolojilerinde kullanılan malzemeler	23
1.5. Eklemeli imalatta kullanılan üç boyutlu yazıcılar ve kullanım alanları.....	25
1.6. Topoloji optimizasyonu	26
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	28
2.1. Literatürde eklemeli imalat üzerine topoloji optimizasyon uygulamaları	30
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	31
3.1 Analitik Hesaplamalar.....	32
3.2 Numerik Modelleme.....	38
3.2.1. Tasarım.....	39
3.2.2. Numerik Analiz.....	40
3.2.3. Topoloji optimizasyonu.....	43
4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR	44
4.1. Analitik sonuçlar	45
4.2. Numerik modelleme sonuçları	47
4.3. Topoloji optimizasyon sonuçları.....	54
4.4. Planlanan son konfigürasyon hali	56
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKÇA.....	59
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1.1. Eklemeli imalat teknolojilerinin karşılaştırılması	8
Tablo 1.2. Dolgu desenine göre ABS malzeme parametreleri	17
Tablo 3.1. Hesaplamalarda kullanılan kontrol edilebilir parametreler.....	31
Tablo 3.2. Hesaplamalarda kullanılan bazı parametreler.....	38
Tablo 4.1. Çekme gerilmesi için analitik hesaplama sonuçları.....	45
Tablo 4.2. Elastisite modülü için analitik hesaplama sonuçları	46
Tablo 4.3. Yoğunluk değerleri için analitik hesaplama sonuçları.....	46
Tablo 4.4. Ansys malzeme kütüphanesine tanımlanan malzeme ve mekanik özellikler	47
Tablo 4.5. Topoloji optimizasyon sonuçları	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Eklemeli imalat teknolojileri kullanım oranları	5
Şekil 1.2. Eklemeli imalat (3B baskı) işlem adımları.....	6
Şekil 1.3. Eklemeli imalat teknolojileri uygulama alanları ve pazar payı dağılımı.....	7
Şekil 1.4. Eriyik biriktirme yöntemi çalışma prensibi.....	13
Şekil 1.5. Eriyik biriktirme yönteminde destek yapıları.....	14
Şekil 1.6. Malzemenin destek parçaları ve destek parçalarından sökülmüş hali.....	14
Şekil 1.7. Örnek katman kalınlıkları.....	16
Şekil 1.8. Dolgu desenleri (A) doğrusal,(B) bal peteği,(C) çizgisel, ve (D) 20%, (E) 50%, ve (F) 100% değişken olarak kullanılan yoğunluklar	17
Şekil 1.9. Malzeme ekstrüzyonu ve nozül sıcaklık dağılımı	18
Şekil 1.10. Üretim açısı	19
Şekil 1.11. Farklı doluluk oranları.....	20
Şekil 1.12. İmalatı yapılacak parçanın x-y-z ekseninde oryantasyonu.....	21
Şekil 1.13. (a) Parçanın görünümü (b) Parçanın takım yolu (c) Parçanın kademeli yüzeyleri	22
Şekil 1.14. Prototip imalatından sonra parçada oluşan kademeler	22
Şekil 1.15. Eklemeli İmalat yöntemlerine göre kullanılan malzemeler	23
Şekil 1.16. FDM teknolojisinde kullanılan termoplastik malzemeler	25
Şekil 1.17. Sırasıyla boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu.....	26
Şekil 1.18. Eklemeli imalat teknolojileri ile üretimi için topoloji optimizasyonu gerçekleştirilen havacılık braketi	27
Şekil 1.19. Optimizasyon süreci	28
Şekil 3.1. ASTM D638 standartına uygun çekme numunesi	32
Şekil 3.2. Hayali dikdörtgen, filamentin en kesiti ve oluşan boşluğun teknik resmi	33
Şekil 3.3. Üç farklı dizilimde filamentlerin oluşturduğu boşlukların şematik şekli a) boşluksuz, b) negatif.....	34
Şekil 3.4. Sinochip T4 tarımsal ilaçlama dronu.....	39
Şekil 3.5. AGWP-30 tarımsal ilaçlama dronu	39
Şekil 3.6. Fusion 360 ile dron gövde parçasının tasarım aşamaları.	40

Şekil 3.7. Dron gövde parçası tasarımı.....	40
Şekil 3.8. Dron gövde parçasının ANSYS Workbench Design Modeler arayüzünde görüntüsü	41
Şekil 3.9. ANSYS malzeme kütüphanesine CF ABS polimer kompozitinin tanımlanması	41
Şekil 3.10. Ağ yapı parametrelerinin belirlenmesi	42
Şekil 3.11. a) Sabit bölgeler, b) Kuvvetin uygulandığı bölgeler	42
Şekil 3.12. Numerik analiz aşamaları	43
Şekil 3.13. Topoloji optimizasyon bölümünün statik analiz sistemine aktarımı.....	44
Şekil 3.14. ANSYS programında Topoloji optimizasyon ayarları	44
Şekil 4.1. ABS_0_60 malzemesi için gerilme enerjisi	48
Şekil 4.2. ABS_0_80 malzemesi için gerilme enerjisi	48
Şekil 4.3. ABS_0_100 malzemesi için gerilme enerjisi	49
Şekil 4.4. ABS_90_100 malzemesi için gerilme enerjisi	49
Şekil 4.5. Deformasyon enerjisi; a) ABS_0_60 , b) ABS_0_80, c) ABS_0_100, d) ABS_90_100	49
Şekil 4.6. ABS için numerik sonuçlar	50
Şekil 4.7. CF ABS_0_60 malzemesi için gerilme enerjisi	50
Şekil 4.8. CF ABS_0_80 malzemesi için gerilme enerjisi	51
Şekil 4.9. CF ABS_0_100 malzemesi için gerilme enerjisi	51
Şekil 4.10. CF ABS_90_100 malzemesi için gerilme enerjisi	51
Şekil 4.11. Deformasyon enerjisi; a) CF ABS_0_60 , b) CF ABS_0_80, c) CF ABS_0_100, d) CF ABS_90_100.....	52
Şekil 4.12. ABS/CF için numerik sonuçlar	52
Şekil 4.13. Numerik analiz sonuçları; a) ONYX_0_100 , b) ONYX_90_100	53
Şekil 4.14. ONYX için numerik sonuçlar.....	53
Şekil 4.15. Topoloji optmizasyon sonucu	54
Şekil 4.16. Topoloji optimizasyon sonrası tasarım sonucu	56
Şekil 4.17. Çizilen parçanın render hali	56
Şekil 4.18. Parçaları birleştirilmiş son tasarım çizimi render hali	57

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

L	:	Numune boyu
H	:	Numune eni
B	:	Numune kalınlığı
V_c	:	Numune hacmi
A_c	:	Numunenin en kesit alanı
H	:	Katman kalınlığı
m	:	Filamentin dikdörtken alanının eni
b	:	Filamentin eni
y	:	Duvar kalınlığı
S_1	:	Filamentin dairesel yanından oluşan alan
S_2	:	Filamentin dikdörtken alanı
A_r	:	Filamentin en kesit alanı
e	:	Hayali dikdörtkenin eni
d	:	Hayali dikdörtkenin uzunluğu
S_d	:	Hayali dikdörtkenin alanı
Δ	:	Filamentlerin dizilim karakterizasyonu
S	:	Bir filamentin oluşturduğu boşluk en kesit alanı
l_b	:	0° oryantasyonla basılmış filamentin uzunluğu
V_{11}	:	0° oryantasyonla basılmış bir filamentin oluşturduğu boşluk hacmi
V_b^1	:	0° oryantasyonla üretilmiş numunenin boşluk
V_B^1	:	0° oryantasyonla üretilmiş numunenin boşluk oranı
A_b^1	:	0° oryantasyonla üretilmiş numunenin boşluksuz kesit alanı
l_f	:	Elyaf uzunluğu
d_f	:	Elyaf çapı
η_l	:	0° oryantasyonlu numunenin elyaf takviye oranı
V_f	:	Elyaf hacim oranı
E_f	:	Elyaf elastisite modülü
E_m	:	Matris elastisite modülü

E_c^{11}	:	0° oryantasyonla üretilmiş numunenin kompozit elastisite modülü
E^{11}	:	0° oryantasyonla üretilmiş kompozit numunenin nihai elastisite modülü
E_s^{11}	:	0° oryantasyonla üretilmiş saf polimer numunenin elastisite modülü
σ^1	:	0° oryantasyonla üretilmiş numunenin maruz kaldığı gerilme
ε^{11}	:	0° oryantasyonla üretilmiş kompozit numunenin şekil değişmesi
l_z	:	90° oryantasyonla basılmış filamentin uzunluğu
V_{22}	:	90° oryantasyonla basılmış bir filamentin oluşturduğu boşluk hacmi
V_b^2	:	90° oryantasyonla üretilmiş numunenin boşluk hacmi
V_B^2	:	90° oryantasyonla üretilmiş numunenin boşluk hacim oranı
A_b^2	:	90° oryantasyonla üretilmiş numunenin boşluksuz en kesit alanı
η_t	:	90° oryantasyonlu numunenin elyaf takviye oranı
E_c^{22}	:	90° oryantasyonla üretilmiş numunenin kompozit elastisite modülü
l	:	Filamentlerin kesişiminde bulunan dik üçgen kenarı
M	:	Filamentlerin yapışma alanının uzunluğu
ρ	:	Filamentlerin yapışma uzunluğu oranı
E^{22}	:	90° oryantasyonla üretilmiş kompozit numunenin nihai elastisite modülü
E_s^{22}	:	90° oryantasyonla üretilmiş saf polimer numunenin elastisite modülü
σ^2	:	0° oryantasyonla üretilmiş numunenin maruz gerilme
ε^{22}	:	90° oryantasyonla üretilmiş kompozit numunenin şekil değişmesi
ζ	:	Amirik faktör
V_1^1	:	90°/0° oryantasyonla üretilmiş numunede 0° oryantasyonlu filamentlerin oluşturduğu boşluk hacmi
V_2^1	:	90°/0° oryantasyonla üretilmiş numunede 90° oryantasyonlu filamentlerin oluşturduğu boşluk hacmi
V_b^{12}	:	90°/0° oryantasyonla üretilmiş numunede toplam boşluk hacmi
V_B^{12}	:	90°/0° oryantasyonla üretilmiş numunenin boşluk hacim oranı
A_b^{12}	:	90°/0° oryantasyonla üretilmiş numunenin boşluksuz en kesit alanı
α	:	0° oryantasyonlu filamentlerin say oranı
E_c^{12}	:	90° oryantasyonla üretilmiş numunenin kompozit elastisite modülü
E_s^{12}	:	90°/0° oryantasyonlu saf polimerler için nihai elastisite modülü

σ^{12}	:	90°/0° oryantasyonla üretilmiş numunenin maruz kaldığı gerilme
ε^{12}	:	90°/0° oryantasyonla üretilmiş kompozit numunenin şekil değişmesi
ε_s^{11}	:	0° oryantasyonla üretilmiş saf polimer numunenin şekil değişmesi
ε_s^{22}	:	90° oryantasyonla üretilmiş saf polimer numunenin şekil değişmesi
ε_s^{12}	:	90°/0° oryantasyonla üretilmiş saf polimer numunenin şekil değişmesi
$\bar{\chi}$	:	Boyutsal ölçümlerin ortalaması
χ	:	Boyutsal ölçümlerde ölçülen boyut büyüklüğü
S_χ	:	Boyutsal ölçümlerde standart sapma
ABS	:	Akrilonitril Bütadien Stiren
CAD	:	Bilgisayar Destekli Tasarım
FDM	:	Eriyik Yığma Modelleme
Eİ	:	Ekemeli İmalat
İHA	:	İnsansız Hava Aracı
ME	:	Malzeme Ekstrüzyonu
PA	:	Poliamid, Naylon
PC	:	Polikarbon
PETG	:	Polietilen Tereftalat Glikol
PLA	:	Polilaktik Asit
PVA	:	Polivinil Alkol
SEA	:	Sonlu Elemanlar Analizi
SLA	:	Stereolithography
STL	:	Standard Triangle Language veya Standard Tessellation Language
TO	:	Topoloji Optimizasyonu

1. GİRİŞ

Günümüz piyasa koşullarında hızlı değişim, gelişim ve tüketicilerin farklı ürünlere yönelik sürekli değişen talepleri birçok durumda geleneksel üretim yöntemlerinin etkisiz kalmasına sebep olmaktadır. Günümüz işletmeleri, tüketicilerinin talep ve gereksinimlerini karşılamak için faaliyetlerinde daha çevik ve daha hızlı olmaları gerekmektedir [1].

Değişken pazar ortamında tüketicilerin gereksinimlerini karşılamak, özellikle süreç teknolojilerinde köklü değişiklikler gerektiriyor. Buna göre ölçek tasarrufuna dayalı montaj hatlarının ileri üretim teknolojileriyle (İİT) esnek bir yapıya kavuşturulması, tür ve sürat ekonomisi çerçevesinde üretime olanak verecek bir yapıya kavuşturulması gerekmektedir.

1980'lerde, bilgi teknolojisi ve ileri üretim teknolojileri, sanayileşmiş ülkelerde eşanlamlı olarak kullanılmışlardır. Bilgi teknolojisi, bilgisayar ve iletişim teknolojilerinin bir karışımı şeklinde düşünülebilir. Herhangi bir fabrikada; siparişlerin kabulü, imalata yönelik olarak hammaddeyle yardımcı malzemelerin temini, imalat prosesi, imalat planlaması, kalite kontrol ile dağıtım bilgiye dayalı süreçlerdir. Bu noktada bilişim teknolojilerinin kullanılması kaçınılmazdır [2].

Bilgisayar destekli sistemler ve bilgi teknolojisindeki gelişmeler, ileri üretim teknolojilerinin yaygın olarak kullanılmasına yol açmıştır. Artan global rekabet, ileri üretim teknolojilerinin uygulanması, geliştirilmesiyle transferine olan ilgiyi artırmıştır. İleri üretim teknolojileri, birçok yeni imalat stratejisinin temelidir ve işletmelerin ürünleri daha düşük maliyetle ve alıcılara daha hızlı dağıtma yeteneğini arttırmaktadır. İleri üretim teknolojileri, modern iş dünyasındaki en mühim gelişmelerden biridir ve endüstride yaygın olarak kabul görmektedir [3].

Ancak 1980'li yıllarda geleneksel üretim yöntemlerinin ötesine geçen ve farklı bir yöntem temelinde üretilen bir üretim yöntemi doğmuştur. Eklemeli üretim adı verilen bu yöntem, geleneksel üretim yöntemlerinde olduğu gibi hammaddeden talaş kaldırılarak değil, üretimde kullanılacak hammaddeye birbirinin üzerine ilave edilerek üretilir. Bu nedenle yöntem, hammaddelerin verimli kullanılmasına, atık malzeme miktarının en aza indirilmesine olanak tanır ve hedeflenen parçanın üretimi, gerekli miktarda malzeme kullanılarak gerçekleştirilir [4].

Geleneksel üretim yöntemleri, üretim aşamasında hangi araçların ve süreçlerin kullanılması gerektiğini, gerçekleştirilecek işlemlerin sırasını ve parçayı tamamlamak için herhangi bir ekstra ekipmanın gerekli olacağını belirlemek için parçanın tasarımının dikkatli ve detaylı analizini gerektirir. Ancak Eklemeli İmalatın önemli prensibi, üç boyutlu nesnelerin doğrudan bilgisayar destekli tasarım (CAD) verilerinden imalıdır. Bu nedenle üretim aşamasında diğer yöntemlerdeki olduğu gibi ilave ekipmana, kesici takıma ve kapsamlı süreç planlamasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Katmanlı imalatta üretimi için önemli olan boyutsal detayları, kullanılacak malzemeyi ve eklemeli imalat yöntemlerinin çalışma prensibini anlamak yeterlidir.

Eklemeli üretim yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte bu gelişmeye paralel olarak gelişen malzeme teknolojisi ile üretimi zor ve yüksek maliyetli malzemelerden yapılan ürünlerin üretilmesi için ek üretim yöntemleri kullanılabilir. Veya eklemeli imalat yöntemi, üretimde zorluk çekmeden düşük maliyetli üretim ürünlerinin mekanik ve diğer özelliklerini geliştirmek için kullanışlıdır. Örneğin termoplastik malzemelerden yapılan ürünlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanılan takviye malzemeleri ile bu ürünlerin üretimi de eklemeli imalat ile mümkündür [5].

Gelişen üretim yöntemleriyle (eklemeli imalat, dijital üretim vb.) günümüzde karmaşık geometrileri olan parçalar kolaylıkla üretilabilmektedir. Bu sayede malzeme tüketimi, ağırlıkla süre vb. parametreler ciddi düzeyde azaltılabilir. Bu tür hallerde (sınırsız tasarım esnekliği ve organik yüzeylere sahip tasarımlarda), üretken tasarımla topoloji optimizasyon yöntemleri, ileri imalat uygulamalarında hafif ve yüksek performanslı parçaların tasarım ve analizinde yaygın ve aktif olarak kullanılmaktadır [6].

Havacılık araçlarının parçalarından, eklemeli imalat teknolojileri ile üretilen oyuncak araç üretimine kadar geniş bir ürün yelpazesi düşünüldüğünde, bu hemen hemen tüm sektörlerde uygulanabilen bir teknolojidir. Bununla birlikte, kullanılan ekipmanın maliyetinin düşürülmesi, bu teknolojilerin kullanım kapsamını daha da genişletecek, kullanılabilecek malzemelerin çeşitliliğini artıracaktır [7].

Çalışmada, kompozit malzemelerin kullanımına yönelik en iyi imalat parametreleri için malzeme parametreleri göz önünde bulundurularak farklı parametreler kullanılarak deneysel tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Karbon elyaf takviyeli termoplastik parçaların üretimi için en iyi üretim parametreleri belirlenmiştir. İnsansız bir hava aracının gövde

parçası topoloji optimize edilerek kütle azaltma çalışması yapılmış ve tasarlanan parçanın en iyi imalat parametreleri kullanılarak üretilmesi planlanmıştır.

Topoloji optimizasyonu, kavramsal bir yapı oluşturmak amaçlı simülasyona odaklanan bir metottur. İşlemin sonucunda sağlanan yapılar genel olarak organik olup, geleneksel üretim yöntemleri ile model sadeleştirilmeden üretim yapılması mümkün olmamaktadır. Bu nedenle eklemeli üretim teknolojilerinin ortaya çıkması, topoloji optimizasyonu neticelerinin uygulanmasını mümkün kılmıştır [8].

1.1. Eklemeli İmalat

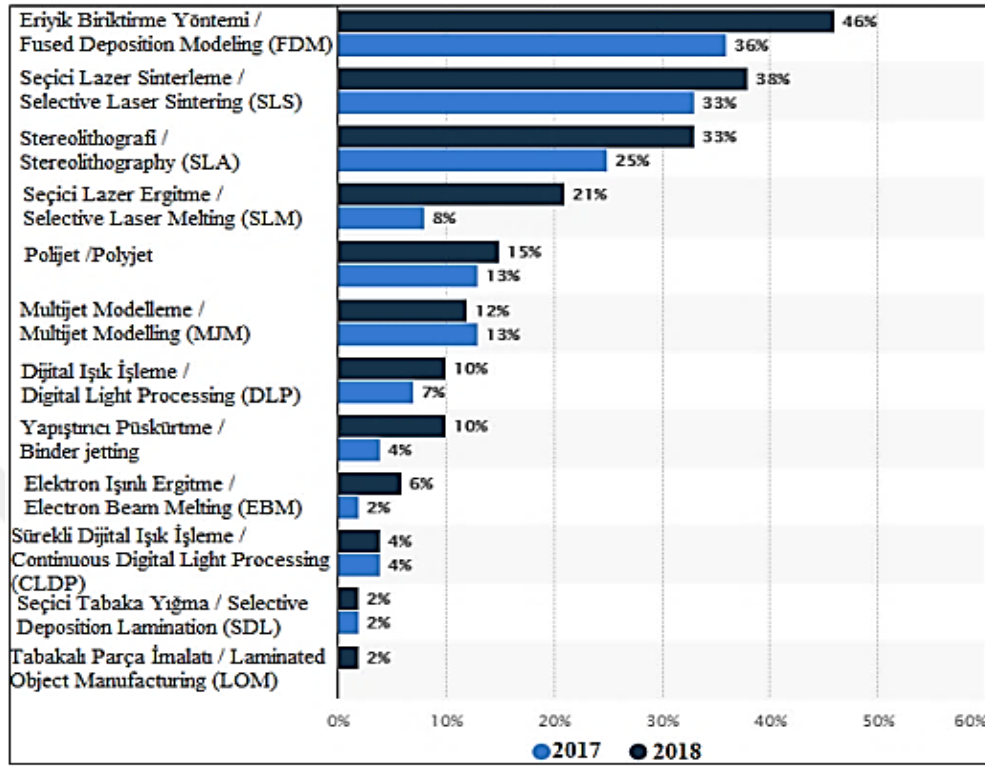
1980'lerde tanıtılan ve malzeme ekleme gerekçesine dayanan bir imalat yöntemidir. Ek isteğe bağlı teknolojiler kullanılarak oran her yıl artırılmakta ve yöntemin uygulandığı alanlar daha da genişletilmektedir. Eklemeli imalat, geleneksel bir kesici alet yardımıyla malzemeyi azaltarak ürün üretme mantığının aksine, bir kesici alete ihtiyaç duymadan malzeme katman katman eklenerek üretim gerçekleştirilir [9].

Eklemeli imalat parça üretimi için oluşturulan her katman, parçanın katmanların oluşturulduğu yönde kesit görünümüdür. Her katmanın önceden belirlenmiş bir kalınlığı vardır. Katman kalınlıkları ne kadar ince olursa, ürün üretmek istediğimiz ürüne o kadar yakın olacaktır. Katmanlı imalat tanımından da anlaşılacağı gibi, şimdiye kadarki tüm eklemeli imalat makineleri katman bazlı üretim yapmaktadır. Bu makinelerin ortak özelliği katman tabanlı çalışmanın yanı sıra, eklemeli üretim makinelerini diğerlerinden ayıran özellikler de bulunmaktadır. Bunlar üretimde kullanılan hammaddeler, katman oluşturma yöntemleri ve katmanları birleştirme yöntemidir. Eklemeli imalatta üretilcek parçanın malzeme cinsi, istenilen ebat ve mekanik özellikler, parça yapım hızı, yapılacak bitirme işlemleri, parçanın ebatı ve toplam maliyet gibi farklı yöntemlerin kullanılmasının nedenlerini sıralayabiliriz [10].

Bu metot ilk önce 1980'li senelerde sterolitografi (StereolithographySL) teknolojisine sahip 3D Systems şirketi tarafından tanıtılmıştır [11]. O dönemlerde pek çok ek üretim metodu geliştirilmiş ve patent başvuruları yapılmıştır. Bu teknolojiler daha sonra Şirketler tarafından ticarileştirilmiştir. 1990'lı yılların ilk elli yılında, SL'den sonra, Helysis Corporation lamine nesne üretimi (Laminated Object Manufacturing-LOM), Stratasys

Corporation Eriyik biriktirme modellemesi (Fused Deposition Modeling-FDM), DTM Corporation seçici lazer sinterleme (Selective Laser Sintering-SLS), EOS Corporation direkt metal tozu lazer sinterleme (Direct Metal Laser Sintering-DMLS), Cubital Corporation sert zımparalama (Solid Ground Curing-SGC) ve Soligen Corporation 3D baskı (Three Dimensional Printing- -3DP) teknolojilerini pazara sürmüştür [12]. 3D baskı (3DP) süreci gerçekte Massachusetts Institute of Technology'nin (MIT) lisansladığı bir eklemeli üretim teknolojisidir. Dilimleme yazılımının ürettiği 3 boyutlu verilere göre sıvı bağlayıcı toz yatağındaki hareketli bir nozülünden malzeme üzerine püskürtülür ve bir katman oluşturulur. Ardından toz yatağı tabaka kalınlığına indirilmektedir ve üst kısım toz malzeme ile sıvanmaktadır ve katılaştırma işlemi geometrik verilere göre tekrarlanır ve mevcut tabakanın üzerine yeni bir tabaka oluşturulmaktadır. Bu şekilde tüm nesne elde edilir ve yapışmayan toz temizlenir [13]. Bu teknoloji 2B baskı makinelerinde kullanılan inkjet baskı teknolojisi ile benzer olduğu için 3 boyutlu baskı olarak adlandırılır ve bu teknolojiyle çalışan makinelere 3 boyutlu yazıcılar denir. Daha sonra benzer mantık ile çalışan teknolojiler geliştirilmiş ve söz konusu teknolojiler masaüstü makinelere aktarılacak suretiyle ev ve bürolarda geniş kitlelerin kullanımına sunulmuştur. Söz konusu teknolojilerin dayandığı imalat metotları toplum arasında 3D baskı (3DP) olarak bilinir ve katmanlı imalatla süratli prototipleme terimleri 3D baskı şeklinde adlandırılır.

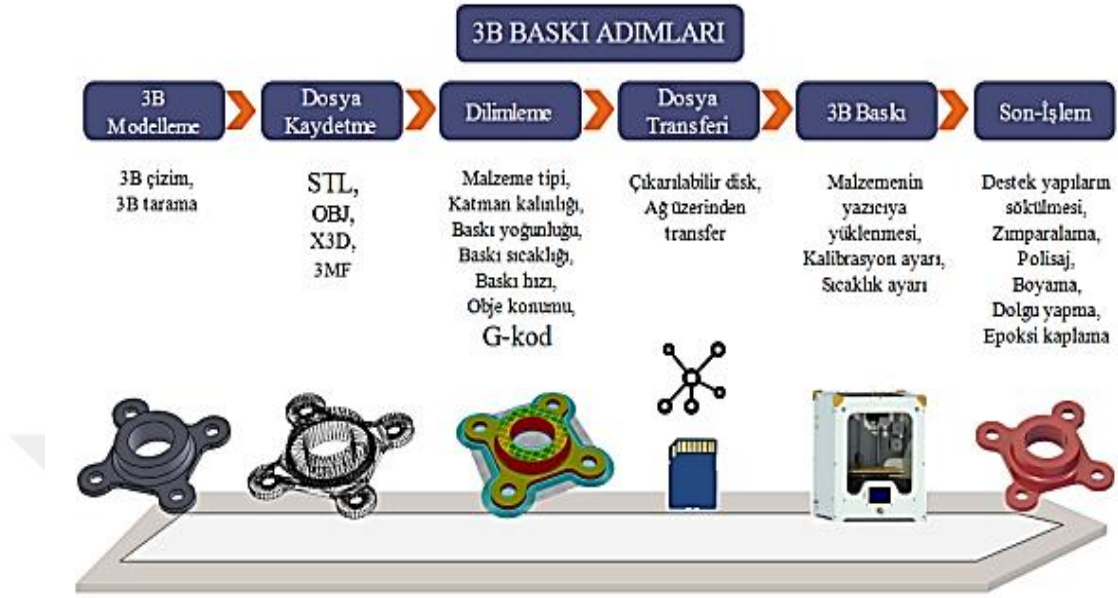
Tüm eklemeli imalat yöntemlerinde üretimin temeli, hammaddelerin farklı prensiplerle birleştirilmesine dayanmaktadır. Bu kombinasyon katmanları oluşturur ve katmanlar parçayı oluşturur. Her gün bu teknolojiye dayalı olarak farklı yöntemler ortaya çıkmakta ve eklemeli imalatın kullanım alanı genişlemektedir. Var olan Eklemeli İmalat yöntemlerinin artan kullanım oranları göz önüne alındığında, gelecekte eklemeli imalat teknolojilerine olan ilginin devam edeceği ve kullanımlarının daha da yaygınlaşacağı söylenebilir (Şekil 1.1). Şekilde 2018 yılına kadar olan Eklemeli imalat teknolojileri kullanım oranları gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Eklemeli imalat teknolojileri kullanım oranları [http-1]

Pek çok farklı teknolojiyi bünyesinde barındıran 3B baskı, geleneksel olarak tasarlanan objelerin, Eklemeli İmalat tekniklerinden yararlanarak fiziksel objelere çevrilmesine olanak sağlayan pratik bir üretim teknolojisidir. 3B baskının temel gerekçesi olan Eklemeli İmalat, frezeleme, tornalama vb. bilinen bilgisayar yardımlı işleme süreçlerine dayalı bir üretim yönteminin tersidir. Bir malzeme bloğundan parçaların kesilmesi ve çıkarılmasıyla üç boyutlu bir nesne elde edilir [14].

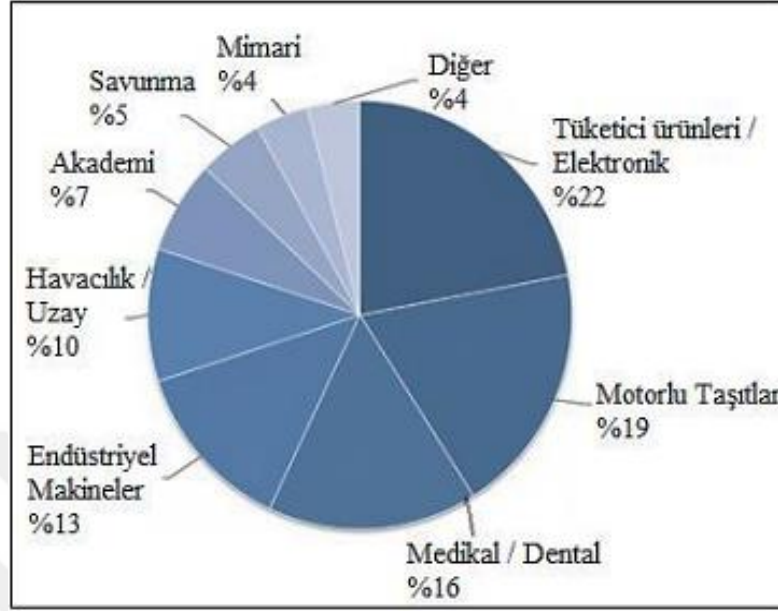
Tasarımdan üretime doğrudan geçiş sağlayan eklemeli imalat yöntemleri genellikle 6 işlem adımından oluşur. Şekil 1.2'de eklemeli üretim sürecinin aşamaları sırayla gösterilmektedir. 3D baskı süreci genel olarak altı ana adımdan oluşur ve tasarımdan üretime hat ve kalıp gerektirmeden geçişi sağlar (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Eklemeli imalat (3B baskı) işlem adımları [14]

Bu aşamalar sırası ile Dijital olarak üretilecek nesnenin 3 boyutlu modelinin alınması, model dosyasının dilimleme programı için uygun dosya formatına dönüştürülmesi, modelin dilimleme programına aktarılması, G kodlarının katmanlanması ve çıkarılması, G kodlarının 3 boyutlu yazıcıya aktarılması, 3B yazıcıyı baskı ve baskı için hazırlama, baskılamanın başlatılması, fiziksel nesnenin elde edilmesi son olarak, alınan nesneyi destek yapılarından temizleme ve sonraki işlem adımlarını uygulanmasıdır.

Tüketici ürünleri ve elektronik ürünler, günümüzde katmanlı imalat teknolojilerinin en büyük pazar payını oluştururken, otomotiv, havacılık, medikal/dişçilik sektörlerinin de katmanlı imalat uygulamalarına önem verdiği görülmektedir. Önümüzdeki on yılda, Eklemeli İmalat teknolojilerinin tüm endüstriler tarafından benimsenmesi bekleniyor, bu nedenle Eklemeli İmalattaki yüzde ve kullanım oranları giderek artacak. Havacılık, otomotiv ve tıp sektörlerinin 2025 yılına kadar katmanlı imalat pazarının %51'ini oluşturacağı tahmin edilmektedir [15]. Eklemeli İmalat teknolojilerinin uygulama sahaları Şekil 1.3'tedir.



Şekil 1.3. Eklemeli imalat teknolojileri uygulama alanları ve pazar payı dağılımı [15]

1.2. Eklemeli imalat yöntemleri

Eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılmakta olan katmanlama teknikleriyle malzemeler çeşitlenmek suretiyle çeşitli yöntemlerinin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Bu teknikleri kullanan çeşitli isimler altında ticarileştirilmiş teknolojiler de vardır. Yöntemde kullanılan malzemelerin başlangıç koşullarına göre eklemeli üretim teknolojilerini sınıflandırmak mümkündür. Bu nedenle sıvı bazlı malzemelerin, katı bazlı malzemelerin veya toz bazlı malzemelerin kullanıldığı yöntemler olarak genel bir tanım verilmektedir (Tablo.1.1) [16].

Farklı bir sınıflandırma ise, malzemelerden ziyade katmanın oluşumunda kullanılan teknolojilere dayanmaktadır. Bu çeşitlemelere göre eklemeli imalatta yöntemler; foto polimerizasyon, malzeme ekstrüzyonu, yapıştırıcı püskürtme, direkt enerji depolama, toz yataklı ergitme, malzeme püskürtme, levha laminasyonu olarak belirtilebilir [16]. Bu çalışmada yaygın olarak kullanılmakta olan eklemeli üretim teknolojileri Tablo 1.1'de sınıflandırılmış ve teknolojilerin temel özellikleri gösterilerek karşılaştırılmıştır [14].

Tablo 1.1. Eklemeli imalat teknolojilerinin karşılaştırılması [14]

	TİP	KAT EGO Rİ	YÖNTEM	TEK NOL OJİ	MALZE ME	GÜÇ KAYNAĞ I	ÖZELLİKLER
E K L E M E L İ	Sıvı	Eriyik	Malzeme ekstrüzyonu	FDM	Termoplastik	Termal enerji	-Düşük yazıcı maliyetleri -Çoklu malzemeye baskı -Düşük parça çözünürlüğü -Zayıf yüzey işsonu -Düşük baskı sürati -Yüksek baskı sürati
			Fotopolimerizasyon	SL(SLA) DLP	Fotopolimer, Seramik	UV ışını	-Yüksek parça çözünürlüğü -Yüksek ayrıntı
			Malzeme püskürtme	PJ	Fotopolimer, Wax	UV ışını	-Malzeme maliyeti yüksektir -Yüksek baskı sürati -Çözünürlük, projeksiyonun piksel boyutu ile sınırlıdır -Çoklu malzemeye baskı
	Katı	Yapışık objeler	Sac laminasyonu	LOM	Kağıt, Plastik film, Metalik sac	Lazer ışını	-İyi yüzey işsonu -Yüksek doğruluk -Yüksek ayrıntı -İyi yüzey işsonu
			Toz yataklı eritme	SLS DMSL SLM EBM LENS EBAM	Poliamid, Polimer Metal tozu, Seramik tozu	Yüksek Güçlü lazer ışını Elektron ışını	-Yazıcı, malzemeye süreç maliyetleri düşük -Büyük boyutlu malzemeeri basabilme -Dikey olarak zayıf dayanıklılık
			Direkt enerji depolama		Erimiş metal tozu	Lazer ışını	-Yüksek doğruluk -Yüksek ayrıntı -Tam dolu parça imalatı -Yüksek dayanıklılık
	Toz	Yapıştırma	Yapıştırıcı püskürtme	BJ	Seramik tozu, Metal tozu, Kum	Termal enerji	-Destek yapıları gerekmemektedir -Hasarlanmış ve aşınmış parçaları tamir edebilme - Son-işlem gerekir
							-Renkli nesne baskısı
							-Destek yapıları gerekmemektedir -Geniş malzeme alternetifi
							-Yüksek baskı sürati -Son-işleme ilgili infiltran malzeme gerektirmektedir -Düşük dayanım -Yüksek gözeneklilik
İ M A L A T	Toz	Yapıştırma	Yapıştırıcı püskürtme	BJ	Seramik tozu, Metal tozu, Kum	Termal enerji	-Destek yapıları gerekmemektedir -Geniş malzeme alternetifi -Yüksek baskı sürati -Son-işleme ilgili infiltran malzeme gerektirmektedir -Düşük dayanım -Yüksek gözeneklilik

1.2.1. Stereolitografi (Stereolithography-SL)

SL teknolojisi, oda sıcaklığında sıvı halde olan bir fotopolimer reçine tabakasının bölgelerinin ultraviyole lazer ışığı ile kürlenmesi prensibine dayanmaktadır. Kürleştirme uygulaması, 3B yazıcı teknolojilerinin temeli olan eklemeli üretim mantığına göre gerçekleştirilmektedir. Tüm katmanlar, 3B dilimleme yazılımı kullanılmak suretiyle önceden oluşturulmuş G kodu datalarına dayalı olarak üretilir. Bu bilgilerden hareketle lazer ışını reçine tabakasını tarar ve kürleştirme işlemini gerçekleştirir. İlk katman sertleştikten sonra üretim tablası bir kat daha yükseğe taşınır ve yeni bir tabaka uygulanır ve kürleme işlemi tekrarlanır. Tüm nesne, katmanlar eklenerek üretilir [17].

Bu biçimde, belli bir geometri olmadan sıvı reçineden çok detaylı geometrileri olan 3 boyutlu nesneler elde edilebilir. Yüksek hassasiyet ve pürüzsüz yüzeyler ile bu 3B baskı teknolojisi, pek çok sahada ayrıntılı nesnelerin üretimi için oldukça uygundur. Ayrıca, fotopolimere seramik tozu süspansiyonları ilave edilerek seramik-reçine karışımının lazer polimerizasyonu ile kompleks biçimler de elde edilebilir [19].

1.2.2. Dijital Işık İşleme (Dijital Light Processing-DLP)

DLP ve SL teknolojileri birbirine çok benzeyen iki teknolojidir. Ana farklılıkları, ışık kaynaklarının farklılığıdır. DLP baskı teknolojisinde UV lazerin yerine reçine havuzunun altında bir projektör bulunmaktadır.[19] SL'de lazer ışını katmanı taramak suretiyle ilerlerse, DLP'de tüm katman yüzeyini bir kerede etkiler ve böylece daha hızlı bir baskı hızı elde eder. Ancak SL, yüksek çözünürlüklü parçalar için daha uygundur. DLP teknolojisinde projektör tarafından yansıtılan her katmanın görüntüsü piksellerden oluştuğu için katmanın kenarlarında küçük dikdörtgen hacimler oluşur. DLP'de projektör çözünürlüğü doğrudan baskı kalitesi ve baskı hacmi ile ilgilidir.

1.2.3. Sürekli Dijital Işık İşleme (Continous Direct Dijital Light Processing-CDLP)

Sürekli Sıvı Arayüz İmalatı (Continuous Liquid Interface Production-CLIP) olarak tanınan yöntem, dijital ışık projeksiyonu, oksijen geçirebilen lensler ve programlanabilir sıvı reçine kullanmak suretiyle yüksek mekanik özellikleri bulunan yüksek çözünürlüklü parçaların üretimine yönelik olarak kullanılmakta olan yeni bir Eklemeli İmalat yöntemidir.

DLP teknolojisinin çalışma gerekçesine benzer şekilde, CLIP'teki üretim tablası sürekli olarak Z düzleminde hareket etmektedir. Bu şekilde hedef objeler daha az sürede tamamlanabilmektedir. Tumbston ve diğerleri, CLIP yöntemini kullanarak çalışmalarında, 100 mikrometrenin altındaki çözünürlük değerlerinde onlarca santimetrelik monolitik polimer objelerin sürekli imalatını göstermiştir. Sürekli bir sıvı ara yüzünün oluşumu, lens ile fotopolimerizasyonun engellendiği polimerleştirici kısım arasında bir "ölü bölge" (kalıcı sıvı ara yüzü) oluşturan UV projeksiyon düzleminin altında oksijen geçirebilen bir lens ile sağlanır. Ek olarak, CLIP yöntemi ile reçine kullanılarak 100 mm/saat üzerindeki baskı hızlarında karmaşık katı parçalar üretilir. Bu baskı hızı, 3D baskının uzun süre değil, dakikalar içinde yapılmasını sağlar [20].

1.2.4. Çoklu Püskürtme (Polyjet-PJ)

Fotopolimer reçine malzemesiyle 3 boyutlu nesneler üretebilen bir başka 3 boyutlu baskı yöntemi de Polyjet'tir. Inkjet yöntemi mantığı ile çalışan bu teknik, renkli parçalar imalı için kullanılabilmekte olup, aynı anda birçok malzemeyi basabilme kabiliyeti olan hızlı bir yöntemdir. Bu özellik aracılığıyla basılmış olan nesnenin istenilen bölümleri sert ya da yumuşak olarak ayarlanabilmektedir. Bu sayede tek parça üstünde farklı mekanik özellikleri bulunan parçalar sağlanabilir. Pürüzsüz yüzeylerle ayrıntılı geometrileri bulunan parçaların üretimi için ideal olan bu teknoloji, inkjet iki boyutlu yazıcıların baskı sistemiyle SL baskı teknolojisinin bir kombinasyonu şeklinde düşünülebilir. Fotopolimer reçine baskı tablasına püskürtüldüğünde, kürlleme işlemi UV ışığı kullanılmak suretiyle gerçekleştirilir ve öteki 3D baskı teknolojilerindeki gibi, parçanın üretimini tamamlamak için oluşturulan katmanın üzerine bir katman daha eklenir. Farklı malzemelerin aynı anda kullanılmasına izin veren polyjet teknolojisi sayesinde destek yapıları kolaylıkla temizlenebilir ve hatta suda çözülebilecek şekilde hazırlanabilir. Böylece destek parçalarının temizliği çok zorlanmadan gerçekleştirilmekte ve temizleme işlemi sonunda yüzeylerde iz oluşmamaktadır [14].

1.2.5. Lamine Nesne İmalatı (Laminated Object Manufacturing-LOM)

LOM, bir parça üretiminde katmanlama ve çıkarma yöntemlerinin bir arada kullanıldığı bir yöntemdir. Sac şeklinde malzeme kullanılmaktadır. LOM teknolojisinde en

çok kullanılan malzemeler kağıt, plastik film, metal levha ve seramik bant olarak bilinir. Sac malzeme karbondioksit bazlı bir lazer vasıtasıyla, dilimleme programında elde edilen verilere göre kesilir. Kesim işleminden sonra malzemenin yerleştiği tabla sac kalınlığına (0,05 mm-5 mm) indirilerek ve üzerine yeni bir sac malzeme ilave edilir. Katmanlar, bir termal konektör kullanılarak basınç ve ısı işlemleriyle birbirine bağlanır. Kesilen kısım bir sonraki katmana destek görevi yapar. Bu işlem 3 boyutlu bir nesne elde edilene kadar devam eder. LOM teknolojisinin temel avantajı, işlem sonrası ve destekleyici yapılara ihtiyaç olmaması, malzeme yapısının işlem sırasında deforme olmaması ve düşük maliyetli olmasıdır. Bu teknolojinin dezavantajları arasında, yeniden kullanılmazsa kesilen malzemenin israfı, düşük yüzey çözünürlüğüyle karmaşık iç boşluklarla kanallara sahip parçaların üretilmesindeki zorluk sayılabilir [21].

1.2.6. Seçmeli Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering – SLS)

SLS yöntemi, toz halindeki malzemenin lazer ışını sinterlemeyle birleştirilmesine ilkesine dayanmaktadır. SLS yönteminde malzeme erimeden birleştirilir [22]. Sinterlenmemiş tozlar destek görevi görür ve işlem sonunda parçanın tozu alınır ve çıkarılır. Bu yöntemde “metal, naylon, seramik, cam vb.” farklı parçaların kullanımına olanak sağlar. SLS ile üretimi gerçekleştirilen parçalarda dahili gerilimler oluşabilir. Buna yönelik olarak gerilim giderme tavlaması yapılabilmektedir. 3B baskı endüstrisinde popüler olan bu teknik, teknolojinin maliyetini artıran güçlü bir lazer kaynağı gerektirir. Bu nedenle ev kullanıcıları ve küçük ofisler arasında kullanımı yaygın değildir.

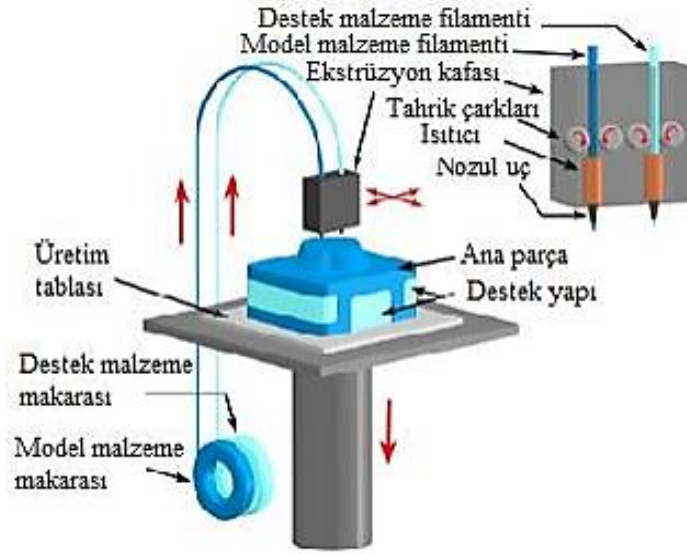
1.3. Eriyik Biriktirme Yöntemi (Fused Deposition Modeling-FDM)

Eriyik Biriktirme Yöntemi, polimer esaslı malzemelerin katmanlar halinde yapılandırılmasıyla imal edilen bir eklemeli üretim yöntemidir. Eriyik biriktirme teknolojisinde kullanılan ekipman maliyetinin minimum olması, karmaşık geometrilere sahip parçaların kısa bir üretim döngüsünde herhangi bir kesici alete ihtiyaç duymadan üretilmesi ve düşük kalıntı malzeme oranları yöntemin avantajları arasında sayılabilir. Yöntemin pek çok farklı imalat parametresi vardır ve söz konusu parametrelerle üretilcek parçaların görsel veya işlevsel özellikleri değiştirilebilmekte ve amaç çerçevesindeki parçalar

üretilebilmektedir. Yöntemin yaygın olarak kullanılması malzeme çeşitliliğinin de artmasına neden olmaktadır.

Yöntem genellikle termoplastik filamentler malzemelerin ısıtılan bloktan geçerek yarı eritilmesi ve ısıtma bloğunun uç kısmında olan bir nozül aracılığıyla belirlenen hızlarda üretim masasına aktarılmasıyla gerçekleştirilir. Tüm eklemeli imalat teknolojilerinde görüldüğü gibi eriyik biriktirme metodunda da katı model verileri göz önünde bulundurularak imalat yapılmaktadır. Üretilen model dilimlendikten sonraki aşamada, yarı erimiş malzeme, x ve y düzlemleri olmak üzere parçanın geometrisini oluşturmak için ekstrüder tarafından fabrikasyon tablasına aktarılır. İlk katman kalınlığı kadar parça oluşturulduktan sonra, üretim tablası bir katman kalınlığına indiğinde veya ekstrüder bir katman kalınlığı kadar arttığında yeni bir katman oluşturulur. Parça oluşana kadar nozül den tablaya katman katman malzeme aktararak işlem devam eder (Şekil.1.4.).

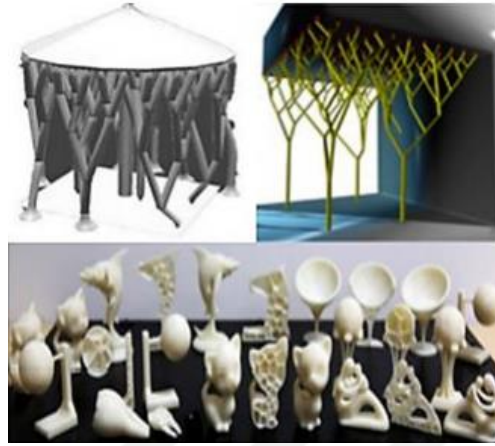
Bu yöntem ile üretilen parçanın dış yüzeylerinde katman izleri görülebilmektedir. Bu duruma alan yazında merdiven tesiri de denmektedir [23]. İşlem sonrası aşamada, FDM baskılı parçalardaki söz konusu etkiyle yüzey pürüzlülüğü, zımparalamayla ve buharlaştırmayla azaltılabilmektedir. Bu teknolojiyle elde edilen parçalar çok dayanıklıdır ve işlevsel olarak kullanılabilir. Baskı hızı düşük olmasına karşın, yazdırılan parçanın üstün mekanik, termal ve kimyasal özellikleri, kullanım kolaylığı, çevre dostu olmasıyla yazıcının düşük maliyeti gibi nedenlerle FDM teknolojisi diğer 3B baskı teknolojilerinden daha popüler hale gelmiştir. Ancak, düşük yüzey doğruluğu, baskı hızıyla metal parçaların imalatına yönelik olarak FDM teknolojisinin uyumsuzluğu kimi sahalarda kullanılması sınırlamıştır. Yine de FDM yöntemi, seramik ile metal tozlarının farklı termoplastikler ile kıyaslanması mümkün kılıyor [14].



Şekil 1.4. Eriyik biriktirme yöntemi çalışma prensibi [24]

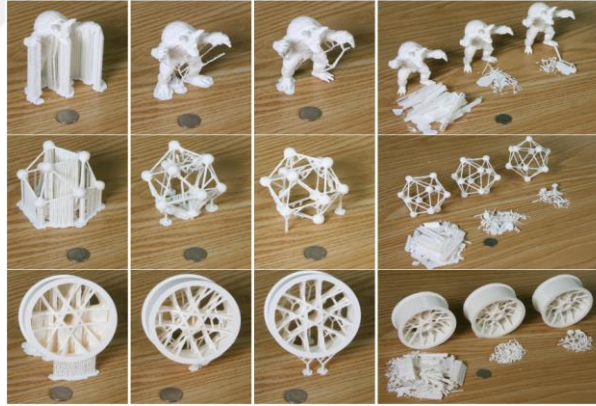
Çok nozüllü FDM yazıcılarla çok renkli baskı yapılabilir ve destek parçalarını yazdırmak için ikinci bir nozül de kullanılabilir. Destek yapıları veya özel çözümler için suda çözünür malzemelerin kullanılması, özellikle karmaşık geometriler için büyük kolaylık sağlayabilir.

Destek yapısının gerekli olduğu zamanlarda destek yapılar parçaların çarpışmasını önleyecek, üretilmesi amaçlanan parça ile mümkün olduğu kadar az temas edecek, üründen kolayca ayrılacak, ürün geometrisine zarar vermeyecek ve üretim süresini, malzeme tüketimini ve maliyetini azaltacak şekilde optimize edilmelidir. Destek yapılarının oluşturulmasında hacim oranlarının düşük olması sebebiyle genellikle gözenekli yapılar uygun görülmektedir. Gözenekli yapıların gözenekli yapısı fazla malzeme kullanımını azaltır ve hedef parça ile temas yüzeyini minimuma indirerek kolay ayrıştırılabilmesini sağlar. Bal peteği destekleri, dallı destekler, ağaç benzeri dendroid destekleri, köprü destekleri kullanılarak eriterek biriktirmeye uyarlanabilir, temas yüzeyi azaltılabilir (Şekil 1.5). Eriyik biriktirme yönteminde Sliccer ve Cura gibi dilimleme yazılımlarını kullanarak destek yapıları oluşturmak mümkündür [24].



Şekil 1.5. Eriyik biriktirme yönteminde destek yapıları [24]

Destek yapılar parça imalatının son aşamasında sökülerek parçadan ayrılırlar. Şekil 1.6'da eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş bir malzemenin destek parçalarını ve destek parçalarından sökülmüş hali gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Malzemenin destek parçaları ve destek parçalarından sökülmüş hali [25]

Eriyik biriktirme metodunda en çok kullanılmakta olan malzemeler, filament haline getirilen termoplastik esaslı polimerler olarak bilinir. Söz konusu malzemeler ekstrüzyonla imal edilmektedir. Yöntemde termoplastik malzemelerin sisteme granül halinde beslenmesi, sistemdeki malzemelerin kimyasal özellikleri çerçevesinde belli bir sıcaklık aralığında ısıtılıp eritilmesiyle erimiş malzemenin nozüle aktarılması ile üretim gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde kullanılan filamentler genel olarak 1,75 mm ila 2,85 mm arasında değişir. Termoplastik malzemeler yeniden ısıtılabilir, eritilebilir ve filament formuna geri

dönüştürülebilir. Eriyik biriktirme işleminde pek çok termoplastik malzeme kullanılabilir. Pratikte çoğunlukla kullanılmakta olan termoplastik malzemeler; Akrilonitril bütadien stiren (ABS) ve Polilaktik asit (PLA). Bu malzemelerin dışında; Poliamid (PA), Polikarbonat (PC), Polivinil alkol (PVA), Polietilen tereftalat (PETG), Polipropilen (PP), Polifenilsülfen (PPSF), Termoplastik Poliüretan (TPU) gibi pek çok termoplastik malzeme kullanılmaktadır [24].

1.3.1. Eriyik Biriktirme yönteminde üretim parametreleri

Eriyik biriktirme metodunda, termoplastik esaslı hammaddenin katı forma ve filamentin bir ısıtma elemanından geçirilerek yarı erimiş halinin bir nozülden geçirilip platform tabakası haline getirilmesiyle üretim gerçekleştirilir. Üretimi planlanan 3 boyutlu objenin dizaynının yapılmasının ardından saptanan parametreler çerçevesinde üretim gerçekleştirilir. FDM (Fused Deposition Modeling-Additive Manufacturing) teknolojisine sahip 3D yazıcılarda verimli baskılar alabilmek üzere kimi parametreleri belirlenmesi gerekiyor. Kullanım alanları çerçevesinde imalat parametreleri mühim bir role sahiptir. Mesela mühendislik alanında prototipleme için tercih edilecek bir modelin yüklere dayanması beklenirken, mimaride veya maket endüstrisinde görsellik sağlamlıktan daha önemlidir. Bu nedenle modellerin üretim parametrelerini nerede kullanılacağına göre ayarlanması gerekmektedir. EBY yönteminin pek çok farklı imalat parametresi vardır. Söz konusu parametrelere örnek olarak; “katman kalınlığı dolgu deseni, tabla sıcaklığı, nozül sıcaklığı, üretim açısı, baskı hızı, doluluk oranı” olarak gösterilebilir [http-2].

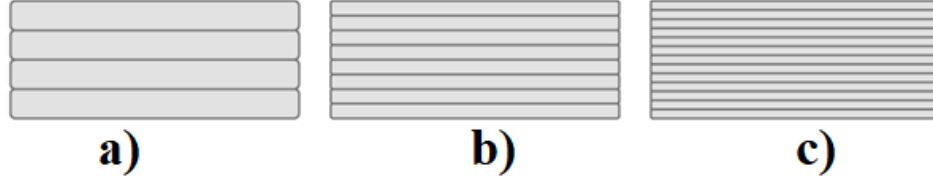
1.3.2. Katman kalınlığı

FDM teknolojisinde model dijital olarak dilimlenmesinin ardından 3D yazıcıda katmanlar biçiminde yazdırılır. Bu nedenle tabakanın kalınlığı, yüzeyin kalitesini direkt olarak etkiler. Daha ince kalınlık, üretilen parçanın daha iyi yüzey kalitesinde olmasını sağlar. Katman kalınlığını azaltmak, yazdırılacak katman sayısını artıracak ve bu da baskı müddetini artıracaktır [http-3]. Söz konusu ayarla ilgili olarak karar verilmesi gereken yüzey kalitesi/baskı süresi dengesi olacaktır. Bu bağlamda çoğunlukla şu neticeler gösterilebilir;

Düşük Yüzey Kalitesi/Süratli Baskı: (a)

Normal Yüzey Kalitesi/Orta Süratli Baskı: (b)

Yüksek Yüzey Kalitesi/Yavaş Süratte Baskı: (c)



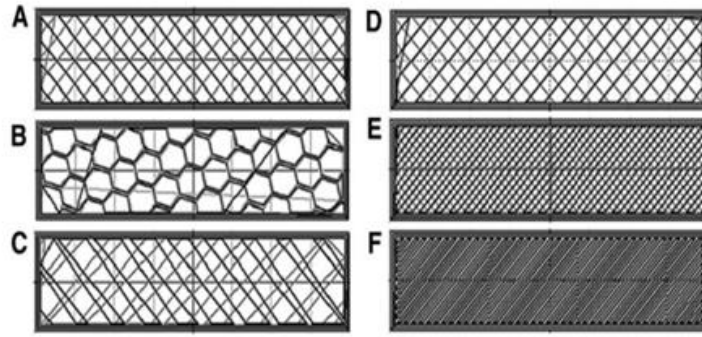
Şekil 1.7. Örnek katman kalınlıkları [http-4]

Birçok halda üretimle ilgili olarak en ideal maksimum katman kalınlığı kullanılan nozül çapının %80'den fazla olmayacak biçimde en az katman kalınlığıysa nozül çapının %25'inden düşük olmayacak biçimde tavsiye edilmektedir [24].

1.3.3. Dolgu deseni

Eriyik biriktirme metodunda parçalar hep içi dolu katı modeller şeklinde imal edilmemektedir. Uygulamaya göre belirlenebilen doluluk oranlarında parçaların içleri malzeme ile doldurularak üretilebilir. Bu sayede kullanılan malzemede ve imalat süresinde tasarruf sağlanabilir.

Üretim zamanı parçanın iç hatları oluşturulduğu zaman ayarlanabilen farklı dolgu desenleri vardır. İmalatta kullanılmakta olan dilimleme programlarında dolgu kalıpları belirtilerek imalat gerçekleştirilir. İmalatta kullanılabilecek dolgu örnekleri; Bir petek deseni, doğrusal, paralel çizgiler, çizgiler, spiraller ve eşmerkezli çizgiler dahil olmak üzere pek çok değişik biçim alabilir (Şekil 1.8). Tanımlanabilen söz konusu dolgu desenleriyle her türlü şekille yapıda kompleks geometriler oluşturulabilir ve modeldeki dolgu deseni değiştirilmek suretiyle baskı süresi kısaltılabilir.



Şekil 1.8. Dolgu desenleri (A) doğrusal, (B) bal peteği, (C) çizgisel, ve (D) 20%, (E) 50%, ve (F) 100% değişken olarak kullanılan yoğunluklar [26]

Ayrıca kullanılması amaçlanan dolgu desenleri imalatta gereken malzeme miktarını da belirlemekle beraber, modelin mekanik özelliklerine etki etmekte, özelleştirilmiş veya tek parçaların imalı için uygun olmaktadır. Aşağıdaki çizelge ABS malzemesinin dolgu desenine göre değişen parametrelerini içermektedir.

Tablo 1.2. Dolgu desenine göre ABS malzeme parametreleri [26]

Dolgu deseni	Dolgu yoğunluğu	Gerilme Direnci(MPa)	Çekme Gerilmesi(%)	Elastisite Modulu(MPa)	Ağırlık (g)
Çizgisel	20	16.00	4.76	499	11.06
Çizgisel	50	20.06	4.86	640	13.98
Çizgisel	100	35.68	5.30	784	17.54
Doğrusal	20	15.62	5.30	408	10.64
Doğrusal	50	19.58	4.62	659	13.98
Doğrusal	100	36.40	5.36	834	19
Bal peteği	20	16.52	4.44	568	11.22
Bal peteği	50	21.78	4.38	745	14.76
Bal peteği	100	36.10	5.42	802	18.88
Ham ABS	—	36.56	5.44	1826	

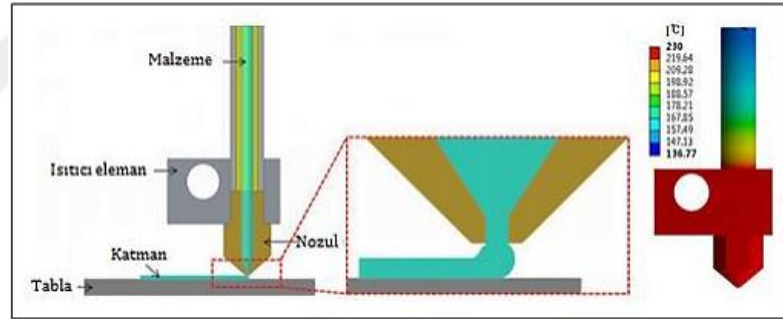
1.3.4. Tabla sıcaklığı

İlk basılan tabakanın levhaya yapışması parçanın oluşumunda ve mekanik özelliklerinde önemlidir. Düşük kaliteli ürünler, zayıf yapışmaya, üretim sırasında malzemenin hızlı soğumasına ve nesnenin kaymasına, bükülmesine veya bozulmasına neden olabilir [http-2]. Kendinde ısıtma özelliği barındıran tablalar kullanılarak malzemenin hızlı sertleşmesini önlemek ve tablaya yapışmasını artırmak mümkün olmaktadır. Erimiş malzemenin üretim tablasına yapışması için ısıtma tek başına yeterli değildir. Bu sebeple, ilk

katın yüzeye yapışmasını arttırmak için, tablayı ısıtmaya ek olarak, yüzey izopropil alkol vb. ile işlemek, tabla yüzeyini yağ ve kalıntılardan temizlemek gerekir. Ayrıca yüzeye sonradan çıkarılabilen yapıştırıcılar uygulanabilir.

1.3.5. Nozül sıcaklığı

Nozül sıcaklıkları da eriyik biriktirme yönteminde kullanılan başlıca parametrelerdendir. EYM teknolojisi, filament geometrisindeki hammaddenin küçük çaplı bir nozül vasıtasıyla numune tablasına ısıtılarak sistemli olarak aktarılmasına dayanmaktadır. Eriyik biriktirme yönteminde termoplastik esaslı malzemeler kullanılmaktadır. Malzemenin ekstrüzyonu sırasında ekstrüderde meydana gelen sıcaklık değişimleri ve yarı erimiş malzemenin nozül ucundan üretim tablosuna transferi Şekil 1.9'da gösterilmiştir.



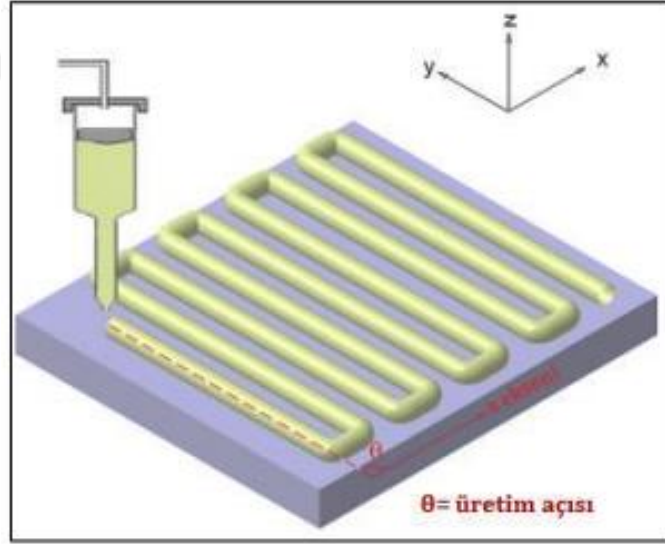
Şekil 1.9. Malzeme ekstrüzyonu ve nozül sıcaklık dağılımı [http-3]

Nozül, katı modele göre her katmanda doldurulacak koordinatlara malzemeyi besler ve beslemeden hemen sonra malzeme soğur ve katılaşır. Bir katmandaki bütün baskı işlemleri tamamlandığında, numune tablası bir katman kadar iner ve üretim yeni bir katmanla devam eder.

Nozül sıcaklığının artırılmasıyla, beslenen yeni katman daha önce basılan katmanlara dokunduğunda daha yüksek bir arayüzey sıcaklığına sebep olmaktadır, bu da katmanların yapışmalarını arttırmaktadır. Bundan dolayı nozül sıcaklığının artırılması, kullanılan malzemenin bozunma sıcaklığının aşılması koşuluyla yapıdaki boşlukları ve kusurları minimuma indirerek mekanik özellikleri iyileştirir [http-4].

1.3.6. Oryantasyon açısı

İmalat açısı, eriyik biriktirme metodunda erimiş malzemeyi imalat tablasına aktarmak için kullanılan yolun x eksenine göre açısını temsil eder (Şekil 1.10). Dilimleme programları 0° ve 90° arasında ayarlanabilen imalat açılarıyla katmanlar oluştururken, isteğe bağlı olarak bütün katmanlar tek bir açı kullanılmak suretiyle üretilebilir. Tek açılı üretimlerde, ekstrüderin ileri ve geri hareketi sırasında her katman yalnızca belirli bir açıda oluşturulur iken, çok açılı imalatlarda ekstrüder, belirli bir açıda bir katman ve bir önceki açıda dik bir katman oluşturur. Kimi ticari 3B yazıcılarda, imalat parametrelerinin değiştirilmesi kısıtlanmıştır, böylece kullanıcının üretim açılarını değiştirmesine izin verilmez ve katmanlar genel olarak 45° ’lik bir imalat açısında oluşturulur. Bu gibi durumlarda üretim tablasına yerleştirilecek parçanın yönünü üç boyutlu yazıcı yönetim yazılımından değiştirerek farklı üretim açıları elde etmek mümkündür [30].



Şekil 1.10. Üretim açısı [31]

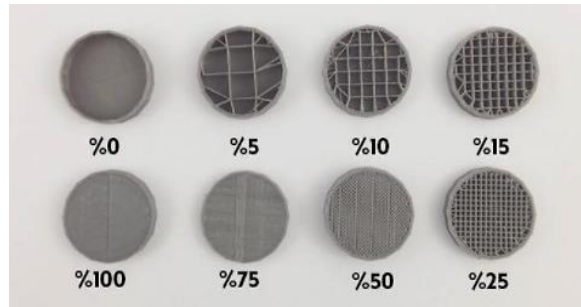
1.3.7. Üretim hızı

Üretim hızı, eriyik biriktirme metoduna parça imalatı sırasında ekstrüderin hareket ettiği hızı belirlemektedir. Sistem, ekstrüderde metal bir soğutma bloğu, bir soğutma yardımcı fanı, bir seramik ısıtıcı, bir ısıtma bloğu ve bir nozül ucundan oluşur. Makaradan beslenen filament malzeme bir dişli mekanizmasıyla sürülmek suretiyle nozül ucuna iletilir.

Ekstrüdere giren parçanın ısıtma bloğuna ulaşmadan erimesi istenmeyen bir durumdur. Erken eritme, malzemenin soğutma bloğundan ısıtma bloğuna transferini ve üretimi engellemektedir. Normal ergitme işleminde soğutma bloğundan beslenen malzeme ısıtma bloğuna girer ve bloktaki seramik ısıtıcının yardımı ile saptanan sıcaklığa dek ısıtılmaktadır. Bu proses imalat süresince devam eder ve beslenen malzeme miktarı ve üretim süresi ekstrüderin hızına göre değişir. Yüksek üretim hızı ile parça imaline gereken vakit ve katmanlarda ısıya maruz kalma süresi kısalmır. Bu nedenle katılma hızlı gerçekleşmektedir. Daha düşük baskı hızlarında üretim süresi uzar, tabakalar uzun süre ısıya maruz kalmış olur ve hızlı katılmanın engellenmiş olur. Bu durumu yüksek üretim hızına göre difüzyon derecesinin yükselmesi şeklinde ifade edilebilir [32].

1.3.8. Doluluk oranı

İsminden de anlaşıldığı gibi 3D katı modelin, içerisini dolduracak olan materyalin oranı doluluk oranı olarak tanınır. Söz konusu parametre direkt olarak parçanın dayanıklılığını etki etmektedir. Ama fazla doluluk materyal maliyetini, parçanın ağırlığıyla baskı süratini gereksiz bir biçimde artırabilir. Bu çerçevede, söz konusu neticeler de dikkate alınarak, optimum bir oran kurulması gerekmektedir. Mesela %30-40'lık doluluk oranı, bir makine parçası için gereken dayanıklılığını optimal bir doluluk oranı ile sağlayabilir. Benzer yaklaşım ile bir süs eşyası için %20'lik bir doluluk oranı yetecektir (şekil 1.11) [http-3].

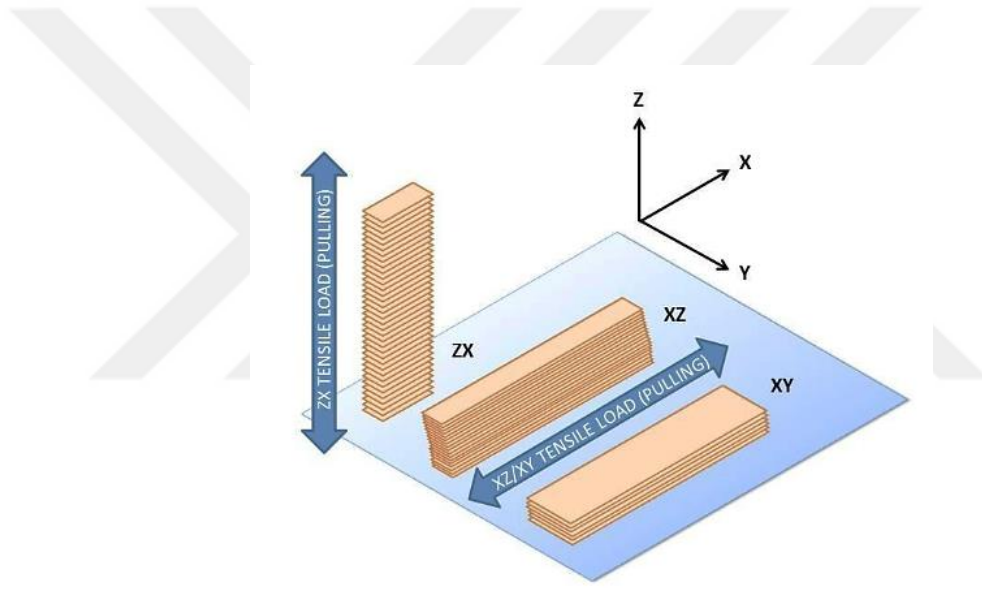


Şekil 1.11. Farklı doluluk oranları [http-3]

1.3.9. Tasarım kriterleri

İmalatı yapılacak parçanın x-y ekseninde oryantasyonu parçanın mukavemetini etkilediği gibi üretim süresini de kısaltmaktadır. Çünkü çoğu eriyik biriktirme sistemi xy

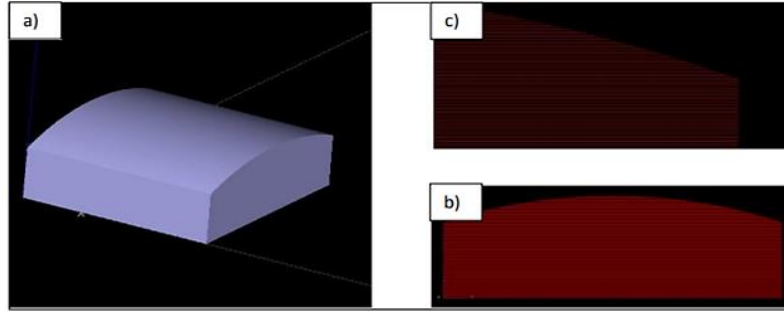
ekseninde daha hızlı hareket ederek geride malzeme bırakabilir. Eriyik biriktirme yönteminde her katman x-y ekseninde oluşturulmakta ve bu katmanlar z düzleminde üst üste yığılmaktadır. (Şekil 1.12) Katı modellerde üretime geçmeden önce dilimlenerek katmanlara ayrılır. Belirtilen katmanların üretiminde izlenen takım yolları, kavisli ve kavisli alanları doldurmadan, sadece yatay yönde hareket eder. Bu nedenle parçaların özellikle kavisli ve eğimli olan yüzeylerinde yüzey kalitesi düşmektedir. Bu, katmanlı imalatta merdiven etkisi olarak tanımlanır. Katman kalınlıklarını mümkün olduğu kadar düşük ölçüde tutarak merdiven etkisi en aza indirilebilmektedir.



Şekil 1.12. İmalatı yapılacak parçanın x-y-z ekseninde oryantasyonu [http-5]

1.3.10. Parça üzerinde merdiven gibi kademeler oluşması

Prototip parça imal edildiği zaman parçanın parabolik yüzeylerde malzemenin aktığı nozül çapına göre yüzeyde kademeler oluşmaktadır. Bu kademeler, birbiri ile yapışan parçalarda istenilmeyen durumdur. Bu kademeler bilgisayarda prototip makinası yazılımında görülmektedir. Şekil 1.13'te prototip makinası yazılım ekranındaki kademeler görülmektedir. Şekil 1.14'te üretim yapılan bir parçanın yüzeyinde meydana gelen kademeler gösterilmiştir.



Şekil 1.13. (a) Parçanın görünümü (b) Parçanın takım yolu (c) Parçanın kademe yüzeyleri [33]



Şekil 1.14. Prototip imalatından sonra parçada oluşan kademeler [33]

1.4. Eklemeli İmalat yönteminde kullanılan malzemeler

Eklemeli imalat yöntemlerinin gelişmesine paralel olarak bu yöntemlerde kullanılan malzeme çeşitleri de her geçen gün artmaktadır. Farklı yöntemlerde farklı malzemeler kullanılmaktadır. Üretilecek parçanın farklı sektörlerde farklı gereksinimleri karşılayabilmesi için doğru malzeme seçimi yapılarak üretim sürecinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Eklemeli imalat yöntemlerinde en çok kullanılan malzeme plastiktir. Plastik malzemelerin üretimi diğer malzemelere göre daha kolaydır. Plastik malzemeleri hammadde olarak kullanan eklemeli imalat makineleri, plastik malzemelerin imalat kolaylığı nedeniyle daha hızlı gelişmiştir. Ancak eklemeli imalatın gelişmesi ve yeni yöntemlerin keşfedilmesiyle birlikte, eklemeli imalat yöntemleriyle üretilen malzemelerin çeşitliliği de artmıştır. Eklemeli imalat yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte metal, seramik ve kompozit malzemelerin kullanımı yaygınlaşmıştır. Şekil 1.15'te eklemeli imalat proseslerinde kullanılan malzemeler ve bunların kullanıldıkları yöntemler gösterilmektedir.

KATMANLI ÜRETİM TEKNOLOJİLERİNE BAKIŞ							
Yöntemler	Lazer Esaslı Metotlar			Termal Eksrüzyon	Malzeme Püskürtme	Malzeme Laminasyon	Elektron Işın Ergitme
	Lazer Ergitme		Lazer Polimerizasyon				
Şematik							
TİCARİ İSİMLER MALZEMELER	SLM	DMD	SLA	FDM	3DP	LOM	EBM
	SLS	LENS	SGC	FFF	IJP	SFP	
	DMLS	SLC	LTP	RoboCasting	MJM		
		LPD	BIS	BAAM	BPM		
			HIS		Thermojet		
MALZEME TİPLERİ							
	Toz Malzeme						
	Sıvı Malzemeler						
	Katı Malzemeler						

Şekil 1.15. Eklemeli İmalat yöntemlerine göre kullanılan malzemeler [34]

1.4.1. Eklemeli İmalatde havacılık teknolojilerinde kullanılan malzemeler

Günümüzde Eklemeli İmalat teknolojileri, havacılık sektörünün sıklıkla kullanmış olduğu hafif ancak yüksek mukavemet değerlerine sahip süper alaşım malzemelerin yanında karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler, yüksek performanslı termoplastik kompozitler yapısal parçaların üretiminde başarı ile kullanabilmektedir.

Eklemeli İmalat teknolojilerinde kullanımı henüz ARGE aşamasında olan yüksek performanslı kompozit termoplastiklerin de havacılık sektöründe yapısal parçaların doğrudan inşasında ve kalıp üretimlerinde kullanımı başlamıştır. Bu kapsamda ULTHEM, PEEK, PEI, PEAK gibi yüksek performanslı kompozit termoplastikler değişik uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Ek olarak orta performanslı kompozit termoplastikler sırasında bulunan ABS, ABS/CF, PA6, PA6/CF gibi malzemeler İHA parçaları tasarımında da kullanılmaktadır.

Uygulamalarda çoğu zaman malzemenin yüksek mukavemet gereksinimleri beklenirken, aynı zamanda hafif olması havacılık sektörü bakımından önemli faktörlerdendir. Havacılık sektörünün bu gereksinimi kısa zamanda örnek olarak Karbon Fiber Elyaf Takviyeli kompozitlerin gelişmesini, kompozit termoplastikler gibi alaşımların artan oranlarda kullanımını gerekli kılmıştır. Eklemeli imalat teknolojilerinden elde edilen

ürünler artık sektörde yaygınlaştığı için bu tür malzemelerle üretilebilecek teknolojiler hızla gelişmeye devam ediyor. Son yıllarda, özellikle uçak veya insansız hava aracının yapısal parçalarının hafif ve yüksek mukavemetli malzemelerden üretilmesi gerektiğinden, bu talebi karşılamak için havacılık endüstrisinde ileri teknoloji kompozit malzemeler giderek yaygınlaşmaktadır.

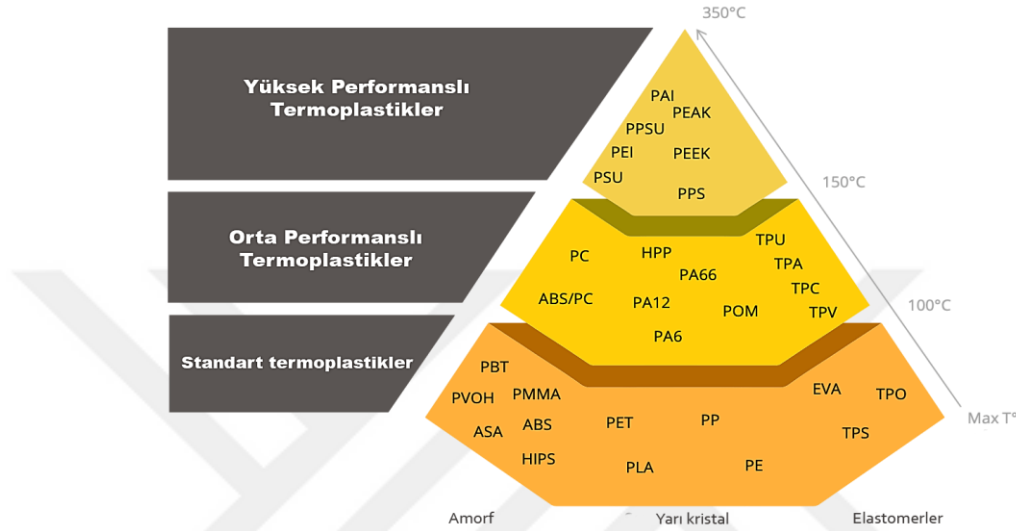
Bu yenilikçi termoplastik malzemeler geri dönüşüm imkanı sağladığından daha önceden kullanılan epoksi bazlı karbon elyaf takviyeli kompozitlere göre daha sürdürülebilir bir malzeme olarak havacılık sektöründe tercih edilmeye başlanmıştır.

Bu tür kalıpların üretilmesinde hem maliyet avantajı hem de üretim zamanı açısından bir avantaj sağlayan bu yenilikçi teknoloji üzerinde PEEK, PEAK, PEI veya ABS gibi yeni nesil termoplastik malzemelerin geliştirilmesi devam etmektedir.

Pek çok farklı imalat yöntemi arasında; Polimer filamentin yarı erimiş birikildiği FDM , fotopolimer tabakasının UV veya lazerle uygulandığı SLA ve metal tozları ile SLS ,kağıt/plastik/metal malzemelerin sinterlenip yapıştırıldığı LOM vardır. Üretim yöntemlerine göre farklı olan bu teknoloji arasında, polimerik mühendislik malzemelerini kullanabilen, maliyeti en düşük, maliyeti en az ve malzeme çeşitliliği en fazla olan FDM'dir.Bu teknolojinin bilimsel temeli yüksek viskoziteli malzemelerin bir nozülde ekstrüzyonuna dayanmaktadır.

Plastik enjeksiyon sektöründe en çok kullanılan malzemelerden biri; yüksek dayanımlı, ağırlıkça hafif bir malzeme olan ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren) malzemesidir. Bundan başka nişasta esaslı olduğundan sağlık, güvenlik açısından daha uygun ancak nispeten daha düşük dayanımlı PLA (Polilaktik asit) da yaygın FDM malzemeleri arasındadır. Sağlık açısından güvenli olduğu için medikal uygulamalarda tercih edilebilecek bir malzemedir. Mekanik dayanıklılığı yüksek olan ve termo-mekanik özellikleri arttırılmış PC (Polikarbonat)'nin mukavemeti ile ABS'nin esnekliğini içeren karışımlar da FDM yönteminde kullanılabilir. Isıl eğilmeye de dayanıklı olan (189 °C kadar) PPSF (polifenilsülfon) ve yüksek mukavemeti ve hafifliği nedeniyle havacılık ve otomotiv endüstrisinde tercih edilen ULTEM 9085 kullanılmaktadır. Ek olarak Nylon 66 ile kırılmış (kısa fiber) karbon fiber kompozitler takviyeden sonra olağanüstü mekanik özellikler, yüksek özgül çekme mukavemeti, aşınma direnci, yüksek modül ve düşük yoğunluk sergilediği için FDM teknolojisinde sık kullanılan malzemeler arasındadır [35].

Aşağıdaki şekilde FDM teknolojisinde kullanılan diğer termoplastik malzemelerde gösterilmiştir.



Şekil 1.16. FDM teknolojisinde kullanılan termoplastik malzemeler [35]

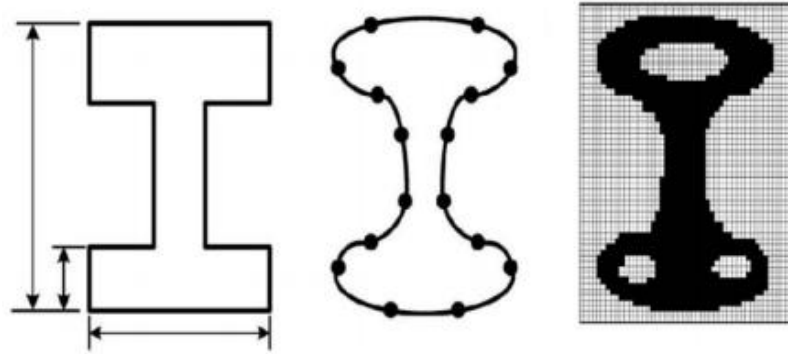
1.5. Eklemeli imalatda kullanılan üç boyutlu yazıcılar ve kullanım alanları

3B yazıcının başlangıcı 1970'lerin sonlarına kadar gitse de ilk katı malzeme baskı işlemi 1982 yılında Hideo KODAMA tarafından gerçekleştirilmiştir. İlk 3B yazıcı 1984 yılında 3D Systems Corp.'un kurucusu Charles HULL tarafından üretildi. O yılların teknolojisi ile birlikte üç boyutlu yazıcılar, boyutlarının büyük olması ve maliyetinin yüksek olması nedeniyle ağırlıklı olarak prototiplemede kullanılmıştır. 1988 yılında, ilk renkli baskıları üreten yazıcılar için Selective Laser Sintering (SLS) ve Fused Deposition Modeling (FDM) teknolojileri keşfedildi. 3D yazıcılar 1995 yılında piyasaya çıktı. Z Corporation, 1996 yılında ilk yüksek çözünürlüklü 3D yazıcıyı geliştirdi. 21. Yüzyılda teknolojinin gelişmesiyle birlikte üretim maliyetlerinin düşmesi nedeniyle ortak pazar haline gelmiştir. 2007'de Regrap adlı ilk açık kaynaklı yazıcılar piyasaya sürüldü. Açık kaynak kodlu üç boyutlu yazıcılar gelişmeye başladı. 2008 yılında Object Geometries, farklı malzemeleri aynı anda kullanarak ürünler üretebilen Connex500 modelini geliştirdi. 2009 yılından bu yana, başlangıçta sadece endüstride kullanılan üç boyutlu yazıcılar, 3D Systems tarafından geliştirilen Makerbot ve Cubify gibi modellerle artık evlerde kullanılıyor [5].

3B yazıcı teknolojisi Tıp, Uzay ve Havacılık, Kalıpçılık, Otomotiv, Diş Hekimliği, Askeri Teçhizat, Mimarlık, Kişisel Aletler, Heykelticilik, Kuyumculuk ve Eğitim gibi birçok farklı alanda kullanılmaya başlandı. Bu teknoloji ile yapılan akademik çalışmalara bakıldığında ülkemizde ürün geliştirme, canlı doku ve organ baskısı, bireysel cerrahi cihazlar, yüz ve bacak protezleri, işitme cihazları ve diş uygulamaları gibi farklı uzmanlık alanlarının olduğu görülmektedir. Bir başka şaşırtıcı kullanım örneği de gıda endüstrisidir. 3D yazıcıları kullanarak pasta süslemeleri yapılmaktadır. Ayrıca sanat eserlerinde ön modelleme aşamasında kullanılmış, bu da eserlerin kalitesini önceden belirlememizi sağlıyor.

1.6. Topoloji optimizasyonu

Gelişen teknoloji ile beraber yüksek performanslı ve hafif parçaların tasarım ve üretim süreci büyük önem kazanmıştır. Bu amaçla tasarım zamanı hedef parçaya yapısal optimizasyon uygulanarak ideal yapıya ulaşması sağlanır. Boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu olarak ayrılan üç yapısal optimizasyon arasında, topoloji optimizasyonu en kapsamlı olarak kabul edilir çünkü mühendisler ve tasarımcılara önceden tasarlanmış bir tasarıma ihtiyaç duymadan yeni tasarım fikirleri sunar (Şekil 1.17.) [36].



Şekil 1.17. Sırasıyla boyut, şekil ve topoloji optimizasyonu [36]

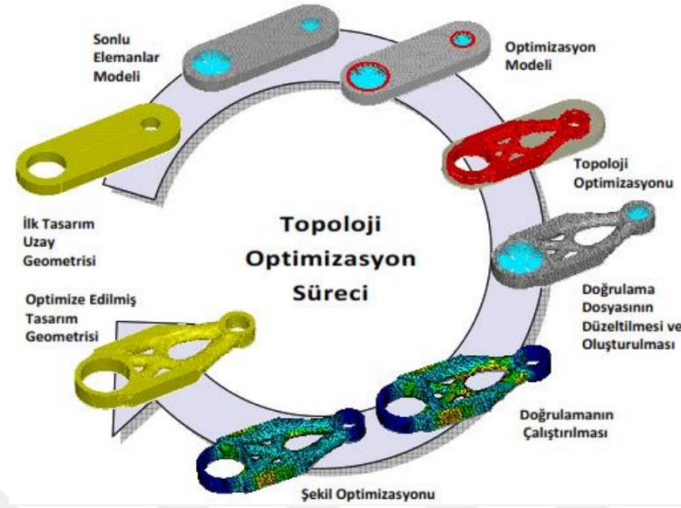
Topoloji optimizasyonu, belirli tasarım alanında malzemenin optimal dağılımı için kullanılmaktadır. Yapının toplam gücü ve doğal frekansı üzerinde en az etkiye sahip bölgeler belirlenir ve yapıdan çıkarılması gereken bölgeler belirlenir. Mevcut tasarımları güçlendirmek, ağırlığı azaltmak ve ideal şekle ulaşmak için topoloji optimizasyon

kullanmanın verimli olduğu bulunmuştur. Malzemenin topoloji optimizasyonu yöntemiyle dağıtımını organize etme sürecinde, yapıda delikler, çıkıntılar, oluklar oluşturma, yeni elemanların yazılması veya silinmesi gerçekleştirilir. Bu yöntem ile parçanın işlevi değiştirilmeden parçanın ağırlığı azaltılarak ideal yapıya ulaşılması sağlanır. Bu nedenle havacılık, uzay, otomotiv ve medikal endüstrilerinde en hafif ve en yüksek performanslı parçaların tasarlanmasında etkili bir yöntem haline gelmiştir. Topoloji optimizasyonu, kavramsal yapıların oluşturulmasına uygulanan simülasyon odaklı bir yöntemdir. İşlem sonucunda elde edilen yapılar genellikle organiktir ve geleneksel imalat yöntemleri ile model sadeleştirilmeden üretilemez. Bu nedenle ek üretim teknolojilerinin ortaya çıkması, topoloji optimizasyonu sonuçlarının uygulanmasını mümkün kılmıştır [36]. Topoloji optimizasyonundan sonra metal malzeme kullanılarak eklemeli imalat teknolojileri tarafından üretilen bir havacılık braket örneği Şekil 1.18'de gösterilmektedir.



Şekil 1.18. Eklemeli imalat teknolojileri ile üretimi için topoloji optimizasyonu gerçekleştirilen havacılık braket [37]

Topoloji optimizasyonu uygulama sürecinde öncelikle tasarlanan veya mevcut parçanın katı modelinde optimizasyonun uygulanacağı tasarım alanı tanımlanır. Daha sonra parça üzerine gerekli kısıtlamalar yerleştirilir ve kuvvet uygulanır. Analiz işlemi tamamlandıktan sonra numune analiz edilir ve istenilen sonuç alınamazsa işlem tekrarlanabilir (Şekil 1.19.).



Şekil 1.19. Optimizasyon süreci [38]

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde, eriyik biriktirme yönteminde kullanılan termoplastiklerin ve elyaf takviyeli termoplastiklerin üretiminde kullanılan çeşitli imalat parametrelerinin, topoloji optimizasyonu üzerindeki etkisini araştıran çalışmalar gözden geçirilmiştir.

Zhong vd. (2001), FDM teknolojisinde ABS polimer ve kısa cam elyaf takviyeli ABS kompozit malzeme üretimini araştırmıştır. İlk olarak, esneklik ve elastikiyet sağlamak için ABS polimerine ve cam elyaf takviyesine doğrusal düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE) eklenmiştir. Araştırmada kullanılan cam elyaf takviyesinin ağırlığı %18 olmuştur. Sonuçlara göre, polimer malzemeye ek olarak cam elyaf takviyesi, kompozitin uzunlamasına yüklenme zamanı daha yüksek bir basınç dayanımına sahip olduğunu göstermiştir. Ancak ABS malzemeye esneklik ve herhangi bir uyumlaştırıcı kullanılmadan ilave edilen kısa cam elyaf takviyesinin katmanlar arası yapışmayı minimuma indirdiği bildirilmiştir [39].

Ziemyan ve ark. (2012) ABS malzemeden yapılmış numuneleri çekme ve eğilme koşulları altında dört farklı üretim açısında incelemiştir. Kullanılan üç üretim açılarında (0° , 45° , 90°) katmanlar tek yönde üretilirken diğer açı ($45^\circ/-45^\circ$) birbirine dik olarak yapılmıştır. Yüklenme eksenine paralel 0° imalat açısında en yüksek çekme ve eğilme dayanımları sırasıyla 25.72 MPa ve 38.1 MPa 'da elde edilirken, 90° üretim açısında en düşük dayanım değerleri çekmede 14.56 MPa ve basmada 20.8 MPa 'da elde edildi. 0° 'lik bir akma açısında, tabaka oluşumunun çekme yönüne paralel olduğunu, moleküllerin yük eksenine boyunca

dağılmasına izin verdiğini ve çekme yüklemesine karşı direnci arttırdığını bildirdiler. 45° ve 90° üretim açılarında, tabakalardaki kısa elyaf uzunlukları nedeniyle yük taşıma kapasitesinin düştüğü tespit edilmiştir [40].

Ning vd. (2015), sabit olarak seçtikleri 0.2 mm katman kalınlığı, 230°C nozül sıcaklığı, 25 mm/s üretim hızı ve 45°/-45° üretim açısında süreksiz karbon elyaf takviyeli ABS malzemeler ile deney numuneleri üreterek farklı karbon içeriklerinin mukavemete etkisini incelemiştir. %0, 3, 5, 7.5, 10, 15 oranında karbon içeriklerindeki çekme deneylerinde en iyi değeri, %5 karbon takviyesi olan numunelerde 42 MPa çekme mukavemeti, 2.5 GPa elastisite modülü sonucu almışlar. %5 içerikten sonra numunelerdeki mukavemet değerleri 32 MPa ve 1.9 GPa kadar azalmış ve ABS malzemedan elde ettikleri 34 MPa'dan daha az değerler elde etmişlerdir. Karbon fiber içeriği ağırlıkça %10'dan fazla olduğunda gözenek oluşumu ve etkileşimin azalması sebebinden kırılabilirliğin daha da artacağı ve ABS malzemesine göre daha az mukavemet değerleri ile sonuçlanacağını belirtmişlerdir [41].

Choi vd. (2016), üretim tablasının sıcaklık değişiminin eriyik biriktirme yöntemiyle imal edilen parçaların şekil deformasyonları üzerindeki etkisini araştırmıştır. ABS termoplastik filamentlerin kullanıldığı üretimlerde, nozül sıcaklığı ve üretim hızını sabit seçerek 50°C, 70°C, 90°C ve 110°C olmak üzere dört sıcaklıkta objelerde meydana gelen büzülme miktarı ölçülmüş ve % hata hesaplaması yapılmıştır. 110°C'ye getirilen sıcaklığında ABS malzemenin camsı geçiş sıcaklığına (105°C) yaklaşıldığı için imal edilen parçalarda meydana gelen büzülme oranları %90'da %3 seviyelerine inmiştir [42].

(Karaman ve Çolak, 2019), ASTM D638 test numuneleri ABS Plus termoplastik malzeme kullanılarak eriyik biriktirme tekniği ile imal edilmiştir. Numuneler çeşitli doluluk oranlarında ve birkaç üretim açılarında üretilerek çekme testleri yapılmıştır. Çekme testleri sonuçlarına göre doluluk oranlarının ve üretim açılarının mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilediği anlaşılmıştır. Doluluk yüzdesi arttıkça çekme mukavemetinde %70'lik bir artış ve elastisite modülünde %60'lık bir artış olmuştur. Test sonuçlarına göre %100 doluluk oranlarında ve 30°/-60° üretim açısında optimum iyi mekanik özellikler bulunmuştur. Bunlar; 37.67 MPa'lık bir gerilme mukavemeti ve 0.99 GPa'lık bir elastisite modülü elde edilmiştir. Gerilme oranları dikkate alındığında 45°/-45° üretim açılarında üretilen numunelerin doluluk oranlarında 30°/-60° ve 90°/0° üretim açılarında üretilen numunelere göre daha fazla uzama gösterdiği sonucuna varılmıştır. En yüksek uzama yüzdesi %6,4 ile

45°/-45° üretim açısında, en düşük yüzde uzama ise %4,7 ile 90°/0° üretim açısında elde edilmiştir [24].

Ning vd. (2017), karbon fiber takviyeli ABS kompozit malzeme ile %100 doluluk oranı ve farklı imalat parametreleri ile çekme numuneleri üreterek imalat parametrelerinin mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. 0/90° üretim açısında üretilen numunelerin 45°/-45° üretim açısında üretilen numunelere göre daha yüksek dayanım değerlerine sahip olduğu ve 0/90° üretim açısında üretimde stabil kabul edildiği tespit edilmiştir. 15-35 mm/s üretim hızı aralığında yapılan testlerde en iyi değerler 25 mm/s üretim hızında 32.3 MPa çekme mukavemeti ve 0.85 GPa elastik modül olarak elde edilirken, 35 mm/s üretim hızında en düşük değerler elde edilmiştir. Baskı hızının karbon matris ve tabaka yapışması arasında olan etkileşimi önemli şekilde etkilediği bildirilmiştir. 200-240°C arasındaki nozül sıcaklıklarında gerçekleştirilen üretimlerde en iyi mekanik özellikler 220°C sıcaklıkta 32,3 MPa çekme mukavemeti ve 0.85 GPa elastisite modülü değerleri bulunmuştur. Daha düşük ve daha yüksek sıcaklık zamanı daha düşük güç değerleri elde edildiği bildirilmiştir. 0,15-0,35 mm arasında değişen katman kalınlıklarına sahip imalatlarda en iyi dayanım değerleri 0,15 mm katman kalınlığında 36,8 MPa ve 1,1 GPa değerleri bulunmuş ve katman kalınlığı yükseldikçe dayanımın azaldığı bildirilmiştir [43].

2.1. Literatürde eklemeli imalat üzerine topoloji optimizasyon uygulamaları

Razaie ve diğerleri, (2013) topoloji optimizasyon yöntemlerinin uygulanmasındaki sorunları ve olasılıkları araştırmıştır. Daha sonra bu metodolojiyi malzeme ekstrüzyonu ile eklemeli imalata uyguladılar. Sonuç olarak, araştırmacılar, malzeme ekstrüzyon eklemeli imalat teknolojisi ve topoloji optimizasyon tekniklerini birleştirerek, daha az malzeme kullanarak ve daha kısa sürede daha hafif ve daha uygun maliyetli parçalar üretmenin mümkün olduğunu bildirmektedir [44].

Park ve diğerleri, (2019) malzeme ekstrüzyonu ile eklemeli imalat üzerine bir topoloji optimizasyonu çalışması yürütmüştür. Bu çalışmada Biatlon sporlarında kullanılan bir tüfek stoğunun desteklenmesi üzerine bir topoloji optimizasyonu çalışması yapılmıştır. Parça üzerinde bir sonlu eleman analizi yapılmış ve parça topolojisi yapısal mukavemeti korumak için optimize edilmiştir. Kundak desteği, malzeme ekstrüzyonlu bir eklemeli üretim sistemi

aracılığıyla ABS malzemesi kullanılarak üretilmiştir. Sonuç olarak, %40 daha hafif bir parça elde edilmiştir. Desteğin 100 gramdan hafif olduğu ve ağırlıkta belirgin bir artış olmadığı için biatlon müsabakalarında kullanılabileceği söyleniyor [45].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında havacılık ürün mekanik özelliklerinin incelenmesi, kütlü azaltma amaçlı topoloji optimizasyonu ve ideal mekanik performans için mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amaçlanarak, analitik ve numerik analizler yapılmıştır. Materyal ve yöntem bölümü iki ana başlıktan oluşmaktadır. Öncelikle analitik modelde daha önceki çalışmalardan formüller ve veriler referans alınarak malzemelere bağlı olarak gerilme, yoğunluk ve elastisite modülleri hesaplanmıştır. Çalışma esnasında üç farklı malzeme kullanılmıştır. Bu malzemeler ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren), CF ABS (Karbon Fiber takviyeli Akrilonitril Bütadien Stiren), ONYX olmuştur. Bahsi geçen malzemeler ile farklı üretim parametrelerine göre hesaplamalar yapılmıştır. Bu kontrol edilebilir üretim parametreleri baskı oryantasyonu ve dolgu yoğunluk oranı olmuştur. Malzemelere göre kontrol edilebilir parametreler tabloda verilmiştir.

Tablo 3.1. Hesaplamalarda kullanılan kontroledilebilir parametreler

Malzeme	Baskı oryantasyonu	Dolgu yoğunluk oranı
ABS	0°	%60
ABS	0°	%80
ABS	0°	%100
ABS	90°	%100
CF ABS	0°	%60
CF ABS	0°	%80
CF ABS	0°	%100
CF ABS	90°	%100
ONYX	0°	%100
ONYX	90°	%100

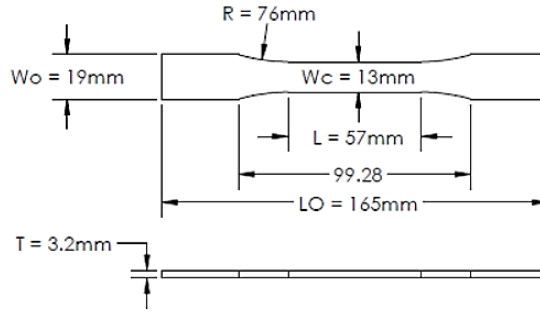
Tabloda verilen malzeme ve üretim parametrelerinin her biri için ayrı ayrılıkta hesaplamalar yapılmıştır. Sonrasında elde edilen mekanik özellikler ANSYS Workbench'e

dahil edilerek numerik analizler yapılmıştır. Numerik analizler esnasında modellenen tasarım üzerine kuvvet uygulanarak parçanın maruz kaldığı maksimum gerilme ve deformasyon enerjisi numerik olarak hesaplanmıştır.

3.1 Analitik Hesaplamalar

Tez çalışmasının analitik modellemeler bölümünde analitik ve geometrik yöntemler kullanılarak yüksek lisans öğrencisi tarafından daha önce oluşturulmuş mekanik modelden yararlanılmıştır [46]. Bu aşamada mekanik model kullanılarak mekanik özellikler analitik olarak hesaplanmıştır. Kullanılan model hem üretim parametrelerine bağlı hem de malzem özelliklerine bağlı hesaplamaların yapılmasına imkan tanımaktadır. Bahsi geçen önceki çalışmada oluşturulan model bir çok malzeme ve literatürdeki önceki çalışmalar ile doğrulanmış ve malzeme ekstrüzyonlu eklemeli imalat için başarılı kabuledilebilecek değerler elde edilmiştir.

Analitik hesaplamalar esnasında öncelikle 0° ve 90° oryantasyonlu numune için dolgu yoğunluklarına bağlı olarak boşuk hacmi ve boşluk en kesit alanı hesaplanmıştır. Geometrik hesaplamalarda ASTM D638 standartına uygun çekme numunesi kullanılmıştır. Şekil 3.1’de ASTM D638 standartına uygun çekme numunesi verilmiştir.

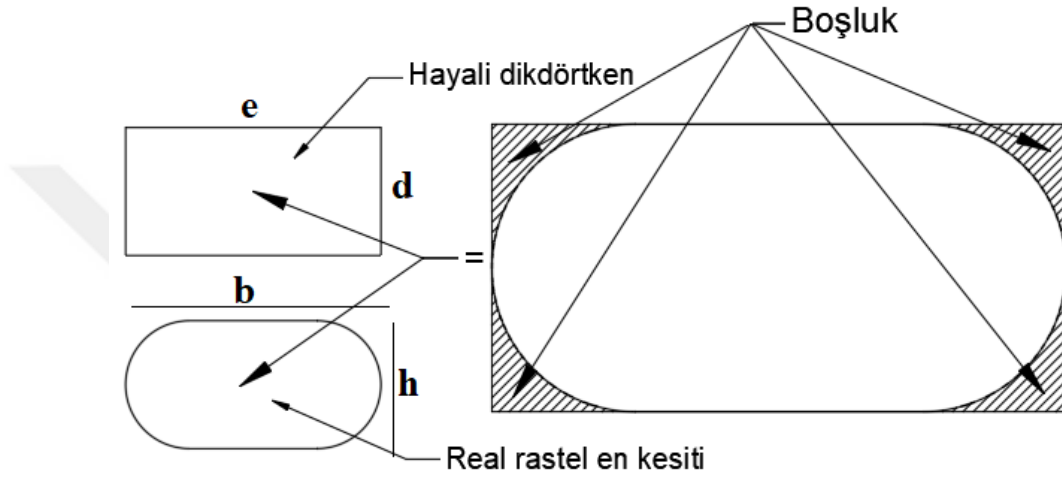


Şekil 3.1. ASTM D638 standartına uygun çekme numunesi [47]

İlk olarak numunenin ölçüleri L uzunluklu, H kalınlıklı, B genişlikli numunenin hacmi V_c hesaplanmıştır.

$$V_c = L \times H \times B \quad (3.1)$$

Sonrasında parçadaki bir boşluğun en esit alanını bulmak amaçlanarak bir filamentin, bir filament qabarit boyutundaki dikdörtkennin en kesit alanı hesaplanmıştır. Filament boyutundaki dikdörtken alanından filamentin alanı çıkartılarak bir filamentin oluşturduğu en kesit alanı bulunmuştur [46].



Şekil 3.2. Hayali dikdörtgen, filamentin en kesiti ve oluşan boşluğun teknik resmi

Burada rastel nozülünden akıtılan ergiyik haldeki filamente denilmektedir. (3.2), (3.3) ve (3.4) formülleri ile sırasıyla bir filamentin en kesit alanı, hayali dikdörtkenin en kesit alanı ve bir filamentin oluşturduğu boşluğun en kesit alanı hesaplanmaktadır.

$$A_r = 2 \times S_1 + S_2 = \frac{\pi \times h^2}{4} + h \times (b - h) \quad (3.2)$$

$$d=h ; e=b ; S_d = d \times (e \pm \Delta) \quad (3.3)$$

$$S = S_d - A_r \quad (3.4)$$

Sonrasında 0° oryantasyonlu numune için farklı dolgu yoğunluk oranlarında hesaplamalar yapıla bilmesi için T_1 parametresi dahil edilmiştir. T_1 numunedeki boşluk oranını karakterize etmektedir. 0° oryantasyon için hesaplamalar zamanı numunenin eni aşağıdaki formül şeklinde olacaktır.

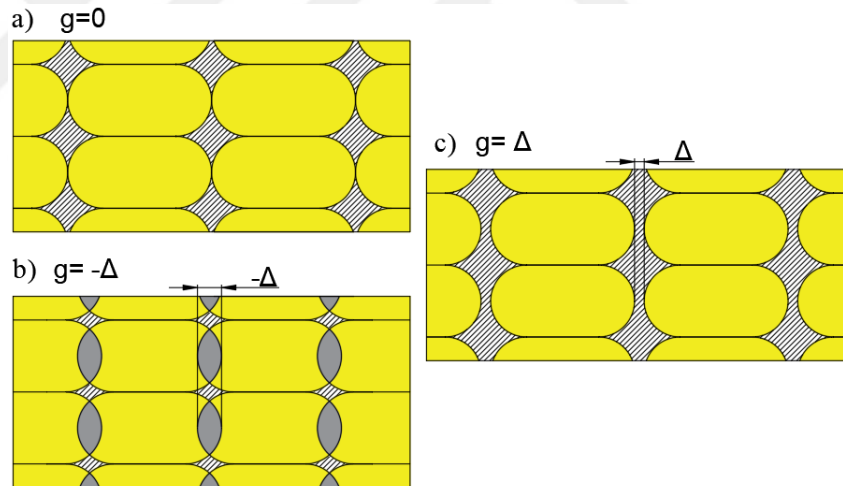
$$B_1 = B - T_1 \times B \quad (3.5)$$

Yani, numunenin boşluklu kısmını dikkate almadan sadece dolu kısımlar üzerinde hesaplamalar yapılacaktır. Dolgu yoğunluğundan başka filamentler arasında oluşan

boşlukların hacmi, bu hacmin numunede hacim oranı ve gerilme hesaplamaları için dolu en kesit alanı A.ABASOV tarafından yüksek lisans tezinde geliştirilen mekanik model vasıtasıyla hesaplanacaktır. Bahsi geçen mekanik model aşağıdaki formüller ile gösterilmiştir.

$$V_b^1 = \frac{H}{h} \times \frac{B_1 - 2 \times y}{b \pm \Delta} \times S \times (L - 2 \times y) \quad (3.6)$$

(3.6) formülünde h- katman kalınlığı, B_1 - boşluksuz numune eni, y- duvar kalınlığı, b- nozül çapı (filament eni), S- bir filamentin oluşturduğu boşluk, Δ - filament dizilim karakterizasyonudur. Δ parametresi filamentler arasındaki hava boşluğunu göstermektedir [46]. Malzeme ekstrüzyon esaslı eklemeli imalat ile üretilen parçada filamentlerin dizilim şekilleri şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Üç farklı dizilimde filamentlerin oluşturduğu boşlukların şematik şekli a) boşluksuz, b) negatif hava boşluğu, c) pozitif hava boşluğu.

Hesaplamalar esnasında Δ değeri -0.02 mm negatif hava boşluğu olarak dikkate alınmıştır [46].

Sonrasında numunedeki boşluk hacim oranı ve filamentler arasındaki boşlukların toplam en kesit alanı modele uygun olarak hesaplanmıştır.

$$V_B^1 = \frac{V_b^1 + T_1 \times V_c}{V_c} \quad (3.7)$$

(3.7) formülü numunedeki hem dolgu oranına göre yaranan boşlukların hem de filamentlerin aralarında oluşturduğu boşlukların toplam hacim oranını ifade etmektedir

$$A_b^1 = V_B^1 \times A_c \quad (3.8)$$

(3.8) formülünde A_c numunenin en kesit alanıdır.

Aynı yöntemle 90° oryantasyonlu numune için de mekanik model kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. 0° oryantasyon için yapılan hesaplamalardan farklı olarak T_2 parametresi dahil edilmiş, 90° oryantasyon ile basılmış numune uzunluğunda boşluk alanları çıkarılmış ve numunede dolgu yoğunluk oranına göre oluşmuş boşluklar dikkate alınmamıştır.

$$L_1 = L - T_2 \times L \quad (3.9)$$

90° oryantasyonlu numune için filamentlerin sayı hesaplanırken numunenin L_1 uzunluğu yani, dolgu oranına göre oluşan boşluklardan arındırılmış uzunluğu kullanılacaktır.

0° oryantasyon için yapılan hesaplamalarda olduğu gibi 90° oryantasyon için yapılan hesaplamalarda da aynı yöntem kullanılmıştır. 90° oryantasyon ile malzeme ekstrüzyon esaslı eklemeli imal edilen numune için filamentlerin arasında oluşan boşluk hacmi (3.10) formülü ile hesaplanacaktır.

$$V_b^2 = \frac{H}{h} \times \frac{L_1 - 2 \times y}{b \pm \Delta} \times S \times (B - 2 \times y) \quad (3.10)$$

Burada, L_1 - boşluksuz numune uzunluğudur. Boşluk hacim oranı ve filamentler arasındaki boşlukların toplam en kesit alanı 90° oryantasyon ile basılmış numune için modele uygun olarak hesaplanmıştır.

$$V_B^2 = \frac{V_b^2 + T_2 \times V_c}{V_c} \quad (3.11)$$

(3.11) formülü 90° oryantasyonlu numunedeki hem dolgu oranına göre yaranan boşlukların hem de filamentlerin aralarında oluşturduğu boşlukların toplam hacim oranını ifade etmektedir

$$A_b^2 = V_B^2 \times A_c \quad (3.12)$$

(3.12) formülü 90° oryantasyonlu numunenin dolu yani, boşluksuz en kesit alanını ifade etmektedir.

Sonrasında 0° ve 90° oryantasyonlar ile basılmış numunelerin ayrılıkta uygulanan kuvvete bağlı olarak maruz kaldığı gerilmeler hesaplanmıştır. (3.13) ve (3.14) formülleri sırasıyla 0° ve 90° oryantasyonlu numuneler için gerilmeleri ifade etmektedir.

$$\sigma_1 = \frac{F}{A_c - A_b^1} \quad (3.13)$$

$$\sigma_2 = \frac{F}{A_c - A_b^2} \quad (3.14)$$

Analitik hesaplamaların ikinci aşamasında numunelerin elastisite modülleri hesaplanmıştır. Elastisite modüllerinin hesaplanmasında bahsi geçen önceki analitik çalışmada oluşturulan malzeme özelliklerine bağlı mekanik model kulanılmıştır [46]. 0° oryantasyon için elastisite modülü modeli aşağıdaki formülde verilmiştir.

$$E^{11} = \frac{A_r}{S_d} \times \frac{1 + 2 \times \frac{l_f}{d_f} \times \eta_l \times V_f}{1 - \eta_l \times V_f} \times E_m \quad (3.15)$$

$$\eta_l = \frac{\left(\frac{E_f}{E_m}\right) - 1}{\frac{E_f}{E_m} + 2 \left(\frac{l_f}{d_f}\right)} \quad (3.16)$$

Burada, E^{11} - 0° oryantasyonlu numune için elastisite modülü, E_m - matris elastisite modülü, E_f - fiber elastisite modülü, V_f - fiber hacim oranı, η_l - 0° oryantasyonlu numune için takviye sabiti, l_f - fiber uzunluğu, d_f - fiber çapıdır. (3.16) formülü termoplastik polimer kompozit numune için elastisite modülünü ifade etmektedir. Saf polimerler için elastisite modülü (3.17) formülü ile hesaplanacaktır [46].

$$E_s^{11} = \frac{A_r}{S_d} \times E_m \quad (3.17)$$

Aynı model kullanılarak 90° oryantasyon ile basılmış kompozit numunenin elastisite modülü de hesaplanmıştır.

$$E^{22} = \frac{2.6 \times \sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 - \left(\frac{h}{2} - \left|\frac{A}{2}\right|\right)^2}}{h} \times \frac{1 + 2 \times \eta_t \times V_f}{1 - \eta_t \times V_f} \times E_m \times \zeta \quad (3.18)$$

$$\eta_t = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + 2} \quad (3.19)$$

Burada, E^{22} - 90° oryantasyonlu numune için elastisite modülü, η_t - 90° oryantasyonlu numune için takviye sabiti, ζ - ampirik faktördür ve deneysel olarak belirlenmektedir. Hesaplamalarda $\zeta = 0.96$ olarak kabul edilmiştir. Aynı şekilde saf polimerler için de elastisite modüller hesaplanabilir. (3.20) formülü 90° oryantasyon ile saf polimer malzemeden basılmış numune için elastisite modülünü ifade etmektedir.

$$E_s^{22} = \frac{2.6 \times \sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 - \left(\frac{h}{2} - \left|\frac{A}{2}\right|\right)^2}}{h} \times E_m \times \zeta \quad (3.20)$$

Yukarıda belirtilmiş yöntemler ile elastisite modülleri ve gerilmeler hesaplanmış, sonrasında numunelerin çekmede gerinme değerleri bulunmuştur. 0° ve 90° oryantasyon ile basılmış kompozit numuneler için gerinmeler sırasıyla (3.21) ve (3.22) formülleri ile hesaplanacaktır.

$$\varepsilon^{11} = \frac{\sigma^1}{E^{11}} \quad (3.21)$$

$$\varepsilon^{22} = \frac{\sigma^2}{E^{22}} \quad (3.22)$$

(3.17) ve (3.20) formülleri kullanılarak saf polimer malzemeden eklemeli imal edilmiş numuneler için gerinmeler hesaplanabilir.

$$\varepsilon^{11} = \frac{\sigma^1}{E_s^{11}} \quad (3.23)$$

$$\varepsilon^{22} = \frac{\sigma^2}{E_s^{22}} \quad (3.24)$$

Analitik hesaplamaların son aşaması olarak Malzeme ekstrüzyon esaslı eklemeli imal edilmiş parçanın yoğunluğu bulunmuştur. Üç farklı malzeme için yoğunluklar belirtilen önceki analitik çalışmada geliştirilmiş malzeme ekatrüzyonu ile eklemeli imal edilen kompozitlerin yoğunluk modeli ile hesaplanmıştır. Sözü geçen yoğunluk modeli (3.25) formülü ile belirtilmiştir.

$\rho_1 = \frac{v_f}{V_c - V_b} \times \rho_f + \left(\frac{V_c - V_b}{V_c} - \frac{v_f}{V_c - V_b} \right) \times \rho_m$ - Malzeme ekstrüzyon yöntemi ile üretilen kompozit parçada yoğunluk için karışım kuralı.

Burada, $\rho_{k.k.}$ - yoğunluk için karışım kuralı, ρ_1 - malzeme ekstrüzyonu yöntemi ile üretilmiş parçada yoğunluk için karışım kuralı, ρ_f - elyaf yoğunluğu, ρ_m - matris yoğunluğu, v_f - elyaf hacmidir.

Hesaplamalar esnasında kuvvet değerleri literatürde var olan önceki deneysel çalışmalardan alınmıştır. Hesaplamalarda kullanılan literatürler Tablo 3.2’de belirtilmiştir.

Tablo 3.2. Hesaplamalarda kullanılan bazı parametreler

Malzeme	Oryantasyon (°)	Dolgu yoğunluğu (%)	Kaynak
ABS	0	60	[50]
ABS	0	80	[50]
ABS	0	100	[50], [51]
ABS	90	100	[51], [52]
CF ABS	0	60	[53]
CF ABS	0	80	[53]
CF ABS	0	100	[53]
CF ABS	90	100	[54]
ONYX	0	100	[46]

3.2 Numerik Modelleme

Bu tez çalışmasının numerik aşaması dron gövde tasarımını, gövde parçanın numerik analizini ve topoloji optimizasyonunu içermektedir. İlk olarak tasarım aşamasında kullanılmak üzere model aranmıştır. Tasarım arama sonucu olarak Tarım Dron’u tasarımı bulunmuş ve gövde kısmı “Fusion 360” programı kullanılarak yeniden modellenmiştir. Elde edilen 3 boyutlu model “.iges” formatında “ANSYS Workbench” programına aktarılmıştır. ANSYS’de gövde parçanın numerik analizi yapılmıştır. Numerik analiz esnasında önceki bölümde belirtilmiş her malzemeye göre ayrı ayrılıkta denemeler yapılmıştır. Sonrasında parça topoloji optimizasyon sürecine tabi tutulmuştur. Topoloji optimizasyon çalışmasında hedef %50 kütle azaltma olmuştur. Numerik çalışmanın son aşamasında topoloji optimizasyon sonucuna uygun parça yeniden tasarlanmıştır.

3.2.1. Tasarım

Tez çalışmasının modelleme aşamasına tasarım aramakla başlanmıştır.İlk olarak Çin üretimi olan Sinochip T4 tarımsal ilaçlama dronu referans alınmıştır.Sinochip T4 tarımsal ilaçlama dronu gövde kısmı tamamen karbon fiber malzemeden yapılmış, kanatları açık şekilde 1950 mm ve yerden yüksekliği 700 mm olup, toplam 20 kg faydalı yük kaldırabilecek şekilde tasarlanmıştır. Sinochip T4 tarımsal ilaçlama dronu şekil 3.4'te gösterilmektedir [http-6].



Şekil 3.4. Sinochip T4 tarımsal ilaçlama dronu [http-6]

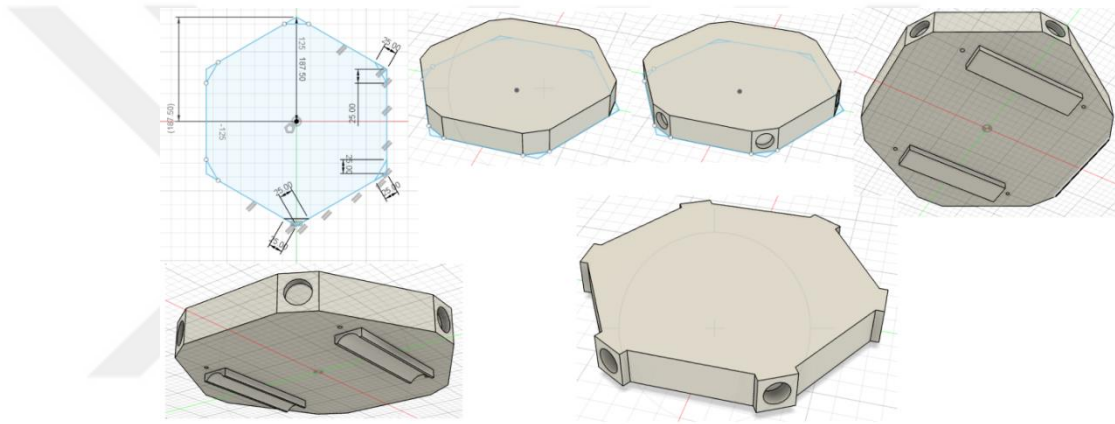
Bundan başka yine Çin üretimi olan AGWP-30 tarımsal ilaçlama dronu tasarımına bakılmıştır.Açık şekilde ölçüleri 2100 mm, yerden 780 mm yükseklikte olan dron karbon fiber malzemeden yapılmıştır.Faydalı yük kapasitesi 30L olan dron 68 kg toplam ağırlıkla bataryaya bağlı olarak en az 30 dakika havada kalmaktadır [http-7]. AGWP-30 tarımsal ilaçlama dronu şekil 3.5'de gösterilmektedir.



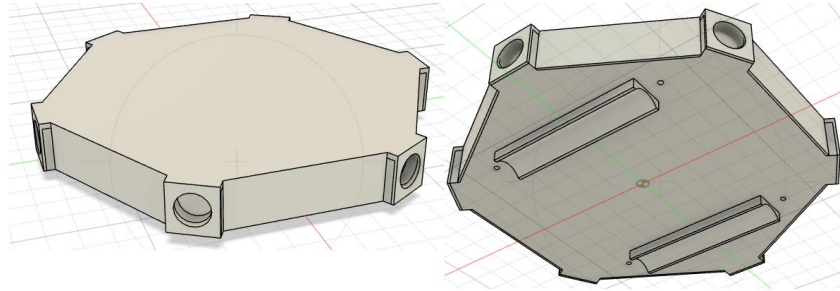
Şekil 3.5. AGWP-30 tarımsal ilaçlama dronu [http-7]

Tasarım arama işlemi sonucu referans alınan tarımsal ilaçlama dronu tasarımlarına göre yapılmıştır. Tarım Dron'u ekinleri ilaçlamak maksadı ile kullanılan havacılık ürünüdür. Sözü geçen ürünün gövde kısmı yeniden tasarlanmıştır. Üç boyutlu modelleme Fusion 360 programının akademik sürümü ile yapılmıştır.

Fusion 360 ile modelleme esnasında 43 aşamada tasarım yapılmıştır. Şekil 3.6'da gövde parçasının bazı tasarım aşamaları belirtilmiştir.



Şekil 3.6. Fusion 360 ile dron gövde parçasının tasarım aşamaları.

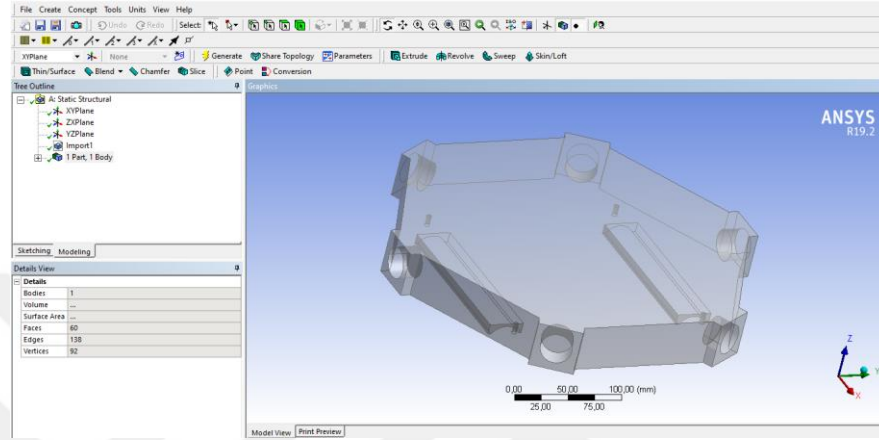


Şekil 3.7. Dron gövde parçası tasarımı

3.2.2. Numerik Analiz

Nümerik analiz aşamasında parçanın ANSYS programı ile statik analizi yapılmış, sınır şartları belirlenerek maruz kaldığı maksimum gerilme hesaplanmış ve deformasyon enerjisi sumulyasyonları yapılmıştır. İlk olarak tasarım Fusion 360 programından ANSYS programına aktarılmıştır. Üç boyutlu model “.iges” formatın çevrilerek ANSYS

Workbench'in "Design Modeler" bölümüne aktarılmıştır. Şekil 3.8'de tasarım modelinin ANSYS Workbench Design Modeler ara yüzünde görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.8. Dron gövde parçasının ANSYS Workbench Design Modeler arayüzünde görüntüsü

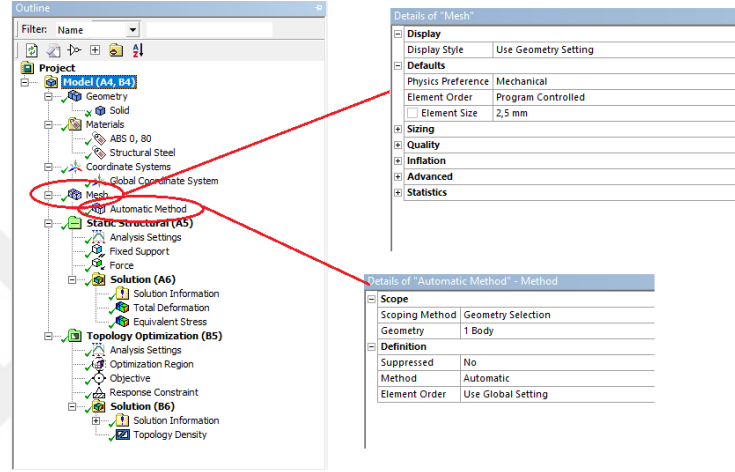
Sonrasında ANSYS Workbench'de model Static Structural bölümüne tanımlanmıştır. Analizler yapılmadan önce Tablo 3.1'deki tüm malzemeler ANSYS malzeme kütüphanesine dahil edilmiştir. Şekil 3.9.'da 0° oryantasyonlu %100 dolgu oranlı karbon fiber takviyeli ABS polimer kompozitinin ANSYS malzeme kütüphanesine tanımlanması gösterilmiştir.

Outline of Schematic A2, B2: Engineering Data				
	A	B	C	E
1	Contents of Engineering Data		Source	Description
2	Material			
3	CF ABS 0, 100		D:\CF ABS 0, 100\cf abs 0, 100_files	
4	Structural Steel		General_Materials.xml	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material			

Properties of Outline Row 3: CF ABS 0, 100				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	1,01	g cm ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Mo...		
6	Young's Modulus	120,8	MPa	
7	Poisson's Ratio	0,3		
8	Bulk Modulus	1,0067E+08	Pa	
9	Shear Modulus	4,6462E+07	Pa	
10	Tensile Ultimate Strength	2822,8	MPa	

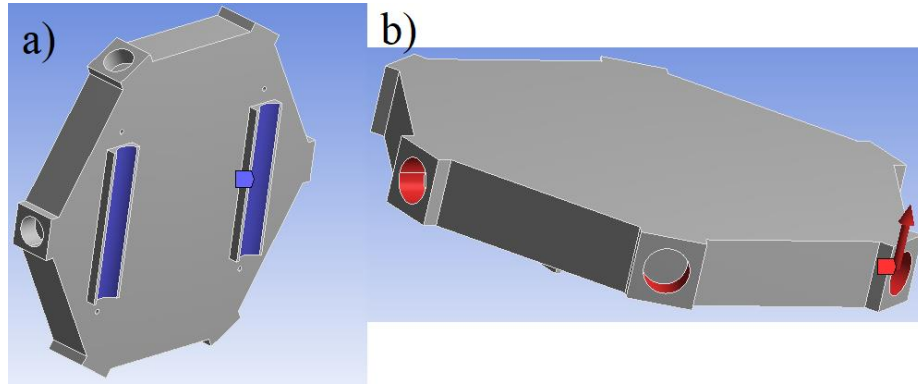
Şekil 3.9. ANSYS malzeme kütüphanesine CF ABS polimer kompozitinin tanımlanması

Sonraki aşamada modelin ağ yapısı belirlenmiştir. Gövde parçasının ağ boyutu 2.5 mm olarak ağ boyutu ise “Automatic” olarak seçilmiştir. Şekil 3.10. 'da modelin ağ yapısı parametreleri verilmiştir.



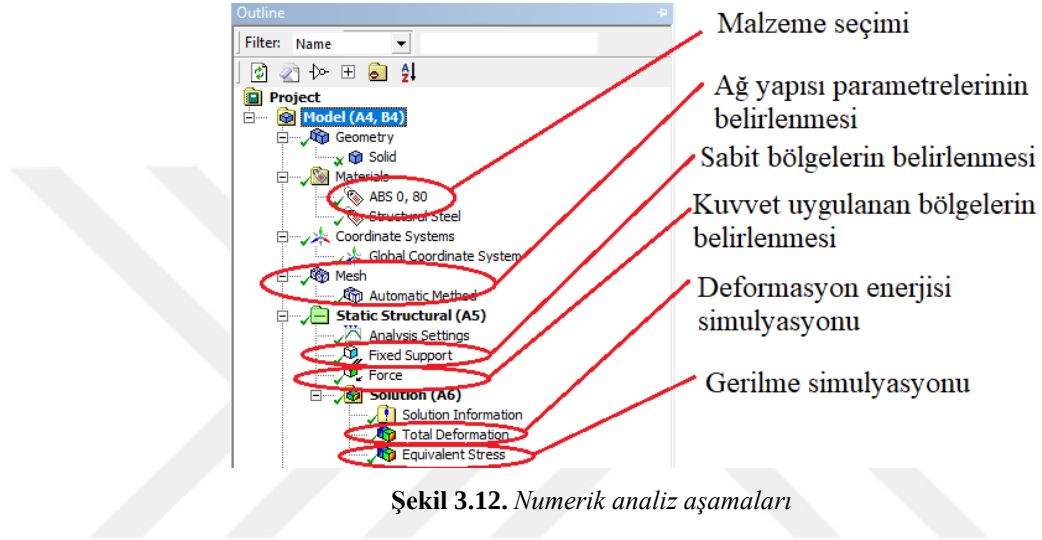
Şekil 3.10. Ağ yapı parametrelerinin belirlenmesi

Sonrasında parça şekil 3.11 (a) 'de gösterilen bölgeden sabitlenmiştir. Gövde parçasının kanat yuvalarından Z ekseni yönünde 400 N kuvvet uygulanmıştır. Bahsi geçen kuvvet değeri belirlenirken gövdeye monte edilecek ayaklar ve ilaç tankının ağırlığı dikkate alınmıştır. Şekil 3.11. 'de parçaya kuvvet uygulama bölgelerinin ve sabit bölgelerin tanımlanması gösterilmiştir.



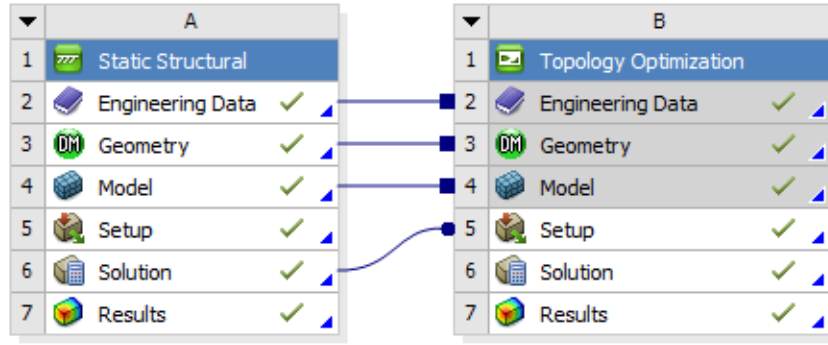
Şekil 3.11. a) Sabit bölgeler, b) Kuvvetin uygulandığı bölgeler

Statik analizin son aşaması olarak max. gerileme ve max deformasyon simulyasyonları yapılmış ve parçanın maruz kaldığı max. gerilme ve max. defromasyon değerleri sırasıyla MPa ve mm cinsinden elde edilmiştir. Şekil 3.12. 'de ANSYS Workbench'e tanımlanan numerik analiz aşamaları gösterilmiştir.



3.2.3. Topoloji optimizasyonu

Zamanımızda yüksek performanslı ve hafif ürünlerin tasarım ve üretim süreci büyük önem kazanmıştır. Tasarımı yapılan parçalar için bir çok imalat tekniğinde geniş kullanılmaktadır. Bunlardan biri de modeller tasarlanırken malzeme dağılımının ideal şekilde sağlanması için kullanılan topoloji optimizasyon yöntemidir. Topoloji optimizasyon sürecinde parçada gerilmeyi artırmadan malzeme azaltılması amaçlanmaktadır. Bu tezin topoloji optimizasyon aşamasında önceki bölümlerde bahsi geçen parça kütle hafifletme amaçlanarak topoloji optimizasyon sürecine tabi tutulmuştur. Öncelikle numerik modellemede belirlenen sınır şartları sabit tutularak ANSYS Workbench'de "Static Structural" sistemine "Topology Optimization" bölümü tanımlanmıştır. Şekil 3.13'de topoloji optimizasyon bölümünün statik analiz sistemine aktarımı gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Topoloji optimizasyon bölümünün statik analiz sistemine aktarımı

Topoloji optimizasyon aşaması tek aşamalı olarak yapılmıştır. Topoloji optimizasyon %50 kütle azaltma amaçlanarak uygulanmıştır. Şekil 3.14. 'de ANSYS topoloji optimizasyon ayarları gösterilmiştir.

Details of "Response Constraint"	
[-] Scope	
Scoping Method	Optimization Region
Optimization Region Selection	Optimization Region
[-] Definition	
Type	Response Constraint
Response	Mass
Define By	Constant
☐ Percent to Retain	50 %
Suppressed	No

Şekil 3.14. ANSYS programında Topoloji optimizasyon ayarları

Topoloji optimizasyon süreci her bir malzemeye uygulanmış ve kütle azaltma işleminden sonra hacim değişimi tüm malzemeler için tablo şeklinde toplanmıştır. Numerik modelleme, tasarım ve topoloji optimizasyon sonuçları bulgular ve tartışmalar başlığında etraflı şekilde tartışılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bulgular ve tartışmalar başlığı dört ana başlıktan oluşmaktadır. Bu başlıklar analitik sonuçlar, numerik modelleme sonuçları, topoloji optimizasyon sonuçları ve sonuç tasarım

bölümleridir. Analitik sonuçlar başlığı altında her bir malzeme için gerilme, elastisite modülleri ve yoğunluk hesaplama sonuçları paylaşılmıştır. Analitik hesaplamalardan elde edilen sonuç değerler ile yapılan numerik analiz sonuçları numerik modelleme bölümünde tartışılmıştır. Topoloji optimizasyon sonuçları bölümünde kütle azaltma sonrası elde edilen katı model .ş final kütleler ve final hacimler verilmiştir. Sonuç tasarım bölümünde topoloji optimizasyon süreci sonrası yeniden tasarlanan gövde parça yeniden tasarlanmış ve Dron modellenmiştir.

4.1. Analitik sonuçlar

Daha önce belirtilen analitik model kullanılarak Tablo 1'deki tüm malzemeler için çekme gerilmeleri, elastisite modülleri ve yoğunluklar hesaplanmıştır. Çekme gerilmeleri hesaplanırken literatür taraması yapılmıştır. Literatür taraması esnasında ABS, kısa karbon fiber takviyeli ABS ve ONYX malzemelerini, bu malzemeler ile farklı baskı oryantasyonlarında ve farklı dolgu yoğunluk oranlarında üretimi ve çekme testlerini içeren kaynaklar aranmıştır. Bulunan kaynaklar listelenmiş ve bu listeden dolgun içeriğine göre kaynaklar seçilerek liste daraltılmıştır. Bulunan kaynaklarda her bir malzemeye göre çekme testi zamanı uygulanan maksimum kuvvet değerleri referans alınmış ve analitik hesaplamalarda kullanılarak çekme gerilmeleri hesaplanmıştır. Analitik modeli içeren tüm formüller ve parametreler Excel programına aktarılmış ve hesaplamalar bahsi geçen programla yapılmıştır.

İlk olarak numunelerin çekme gerilmeleri hesaplanmıştır. Tablo 4.1'de tüm malzemeler için çekme gerilmesi sonuçları belirtilmiştir.

Tablo 4.1. Çekme gerilmesi için analitik hesaplama sonuçları

Malzeme	Oryantasyon (°)	Dolgu oranı (%)	Çekme gerilmesi (MPa)
ABS	0°	%60	24.5
ABS	0°	%80	22.6
ABS	0°	%100	31.4
ABS	90°	%100	18.8
CF ABS	0°	%60	52.1

Tablo 4.2. (DEVAM) Çekme gerilmesi için analitik hesaplama sonuçları

CF ABS	0°	%80	107
CF ABS	0°	%100	120.8
CF ABS	90°	%100	31
ONYX	0°	%100	46.54
ONYX	90°	%100	32.7

Sonrasında analitik kullanılarak tüm malzemeler için elastisite modülleri hesaplanmıştır. Tablo 4.2’de tüm malzemeler için elastisite modülleri sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.3. Elastisite modülü için analitik hesaplama sonuçları

Malzeme	Oryantasyon (°)	Dolgu oranı (%)	Elastisite modülü (MPa)
ABS	0°	%60	1807.34
ABS	0°	%80	1807.34
ABS	0°	%100	1807.34
ABS	90°	%100	1430.2
CF ABS	0°	%60	2822.83
CF ABS	0°	%80	2822.83
CF ABS	0°	%100	2822.83
CF ABS	90°	%100	1620.2
ONYX	0°	%100	3394.9
ONYX	90°	%100	1006.7

Son olarak her bir malzeme için yoğunluklar hesaplanmıştır. Yoğunluklar için hesaplama sadece polimer kompozit malzemeler için yapılmıştır. Saf polimer olanlar için yoğunluk değeri literatürden referans alınmıştır [48]. (Tablo 4.3)

Tablo 4.4. Yoğunluk değerleri için analitik hesaplama sonuçları

Malzeme	Oryantasyon (°)	Dolgu oranı (%)	Yoğunluk (g/cm ³)
ABS	0°	%60	1.05
ABS	0°	%80	1.05
ABS	0°	%100	1.05
ABS	90°	%100	1.05

Tablo 4.5. (DEVAM) Yoğunluk değerleri için analitik hesaplama sonuçları

CF ABS	0°	%60	1.01
CF ABS	0°	%80	1.01
CF ABS	0°	%100	1.01
CF ABS	90°	%100	1.01
ONYX	0°	%100	1.15
ONYX	90°	%100	1.15

Sonraki aşamada her üç tablodaki değerler kullanılarak numerim modelleme yapılmıştır. Numerik modelleme aşaması takip eden bölümde daha geniş şekilde anlatılmıştır.

4.2. Numerik modelleme sonuçları

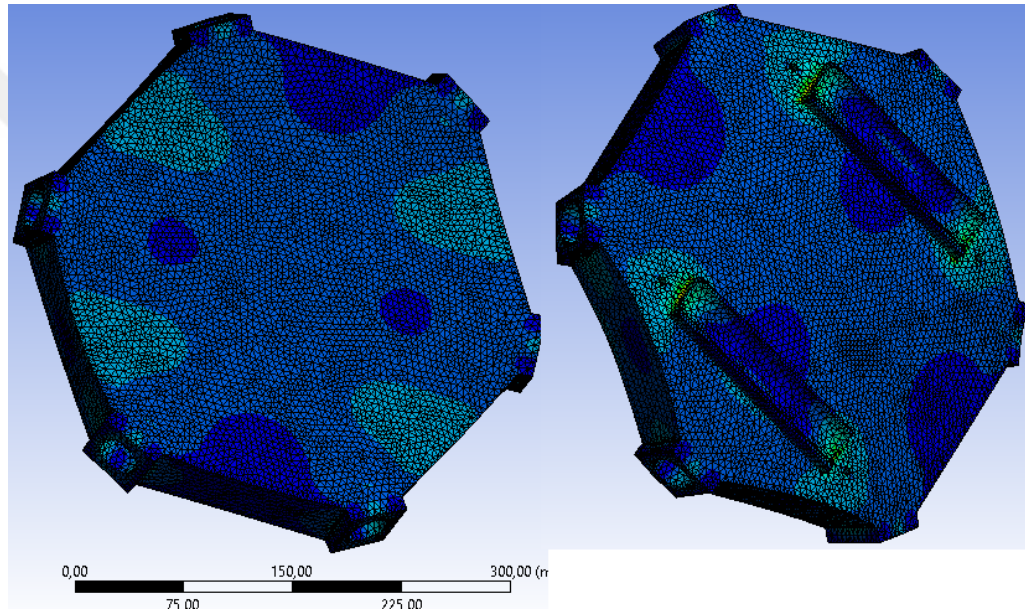
Numerik modelleme bölümünde ANSYS programı ile gerilme ve deformasyon sonuçları tartışılmıştır. Her bir malzemeye göre yapılan analitik hesaplamaların sonuçları kullanılarak ANSYS kütüphanesine tüm malzemeler tanımlanılmıştır. Tablo 4.4. 'de ANSYS malzeme kütüphanesine tanımlanan malzemeler ve mekanik özellikler verilmiştir.

Tablo 4.6. Ansys malzeme kütüphanesine tanımlanan malzeme ve mekanik özellikler

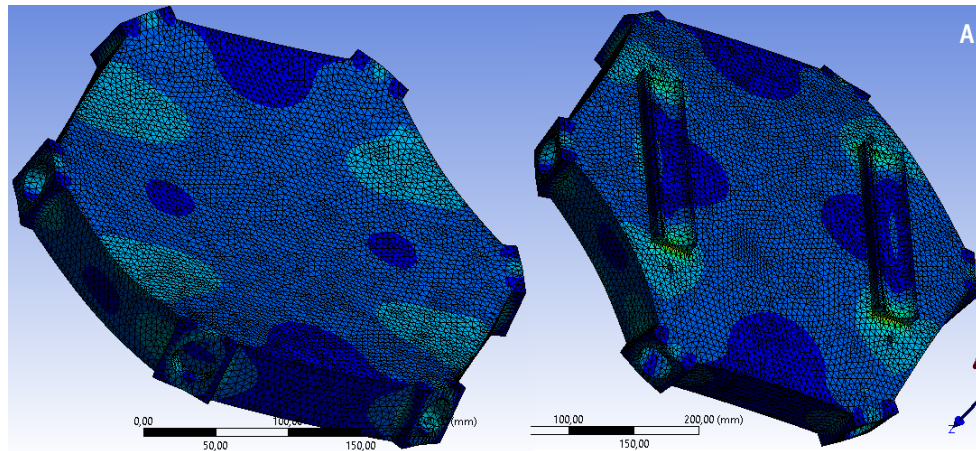
Malzeme	Çekme gerilmesi (MPa)	Elastisite modülü (MPa)	Yoğunluk (g/cm ³)	Poisson oranı
ABS_0_60	24.5	1807.34	1.05	0.35
ABS_0_80	22.6	1807.34	1.05	0.35
ABS_0_100	31.4	1807.34	1.05	0.35
ABS_90_100	18.8	1430.2	1.05	0.35
CF ABS_0_60	52.1	2822.83	1.01	0.3
CF ABS_0_80	107	2822.83	1.01	0.3
CF ABS_0_100	120.8	2822.83	1.01	0.3
CF ABS_90_100	31	1620.2	1.01	0.3
ONYX_0_100	46.54	3394.9	1.15	0.35
ONYX_90_100	32.7	1006.7	1.15	0.35

Tablo 4.4 'deki Poisson oranları literatürden elde edilmiştir [49].

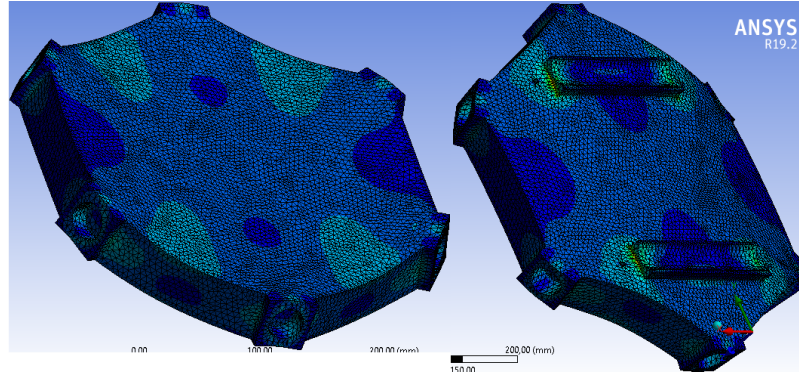
Malzemeler tanımlandıktan sonra her bir malzeme uygun gövde parçanın statik analizi yapılmıştır. Numerik analiz zaman gerilme deformasyon simulyasyonları gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de sırasıyla ABS_0_60, ABS_0_80, ABS_0_100 ve ABS_90_100 malzemeleri için gerilme simulyasyonu sonuçları gösterilmiştir. Malzemeler isim kodlarında malzeme isminden sonraki ilk rakam oryantasyonu ikinci rakam ise dolgu oranını gösterilmektedir.



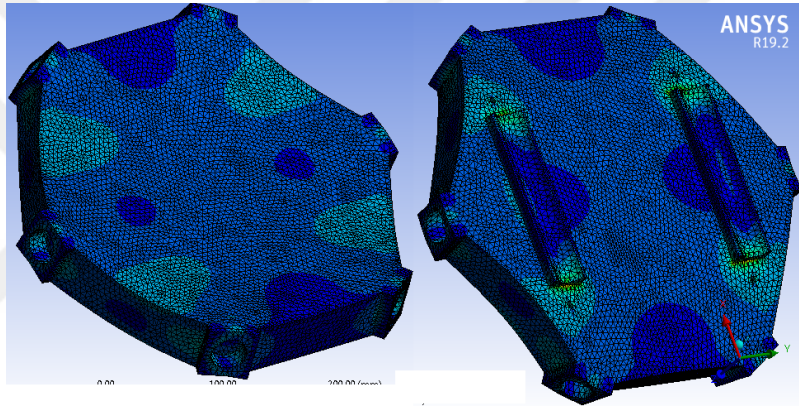
Şekil 4.1. ABS_0_60 malzemesi için gerilme enerjisi



Şekil 4.2. ABS_0_80 malzemesi için gerilme enerjisi

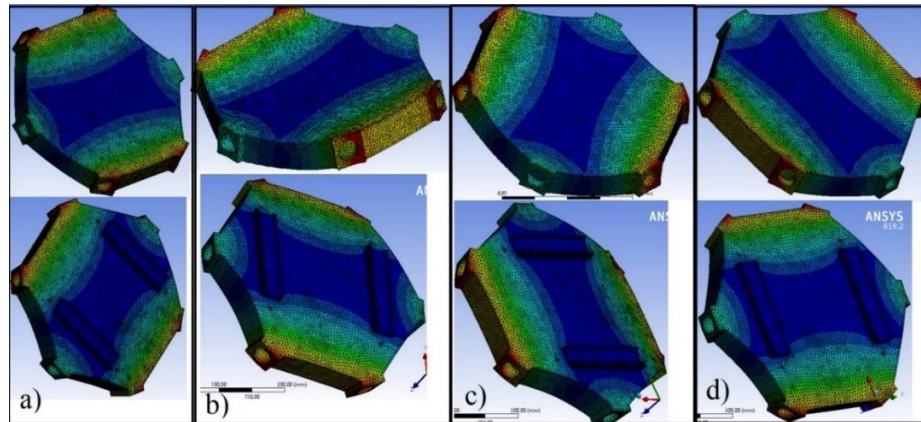


Şekil 4.3. ABS_0_100 malzemesi için gerilme enerjisi



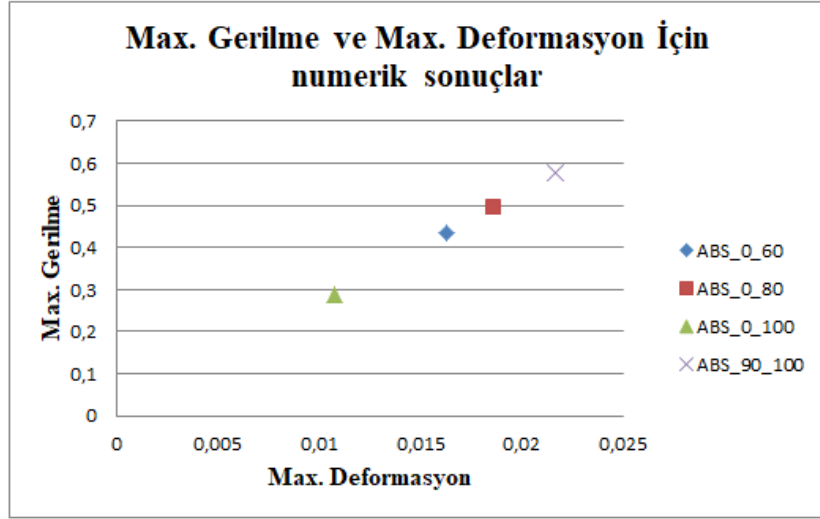
Şekil 4.4. ABS_90_100 malzemesi için gerilme enerjisi

Şekil 4.5. 'de ABS_0_60, ABS_0_80, ABS_0_100 ve ABS_90_100 malzemeleri için deformasyon enerjisi belirtilmiştir.



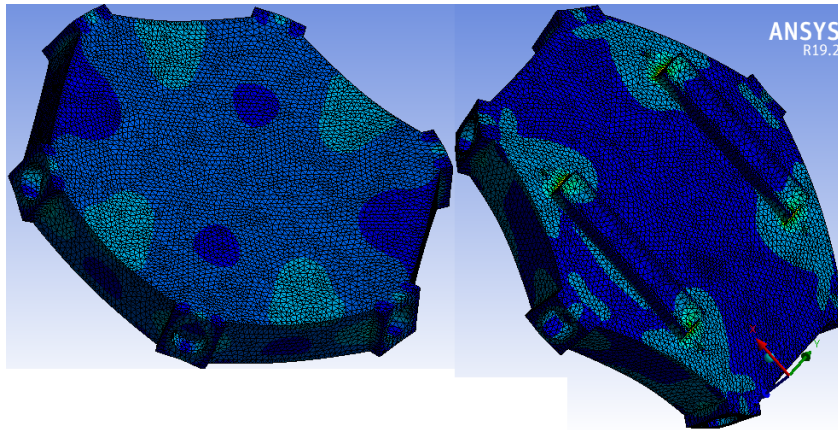
Şekil 4.5. Deformasyon enerjisi; a) ABS_0_60 , b) ABS_0_80, c) ABS_0_100, d) ABS_90_100

Şekillerden görüldüğü üzere her dört numune için yük dağılımı ve kuvvet hatları çok benzerdir. Şekil 4.6’ da her dört malzeme için max. gerilme ve deformasyon için numerik sonuçlar grafiksel olarak gösterilmiştir.

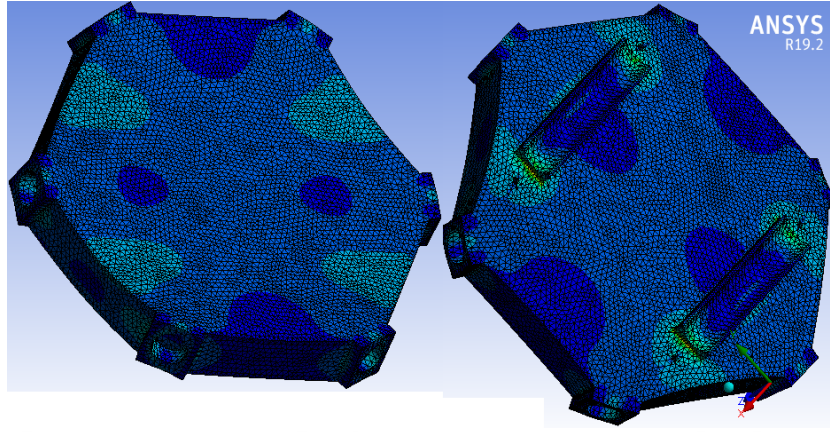


Şekil 4.6. ABS için numerik sonuçlar

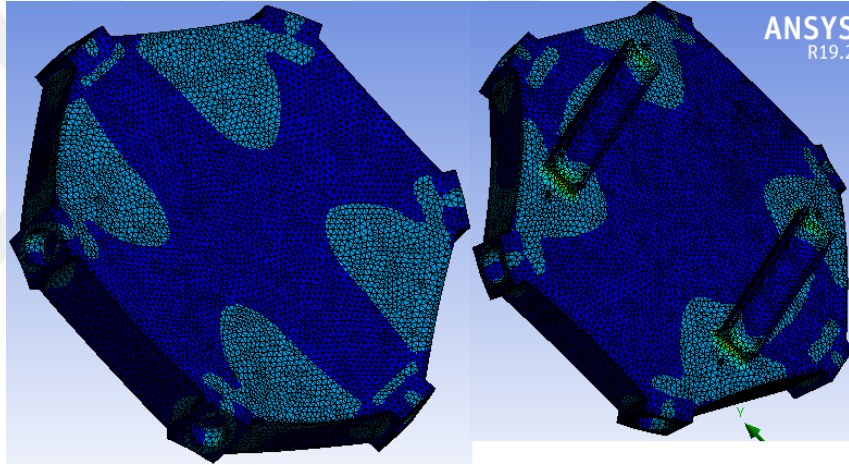
Sonrasında karbon fiber takviyeli ABS malzemeleri için kütüphane oluşturulup aynı yöntemlerle numerik analizler yapılmıştır. Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 da sırasıyla CF ABS_0_60, CF ABS_0_80, CF ABS_0_100 ve CF ABS_90_100 malzemeleri için gerilme simulyasyonu sonuçları gösterilmiştir.



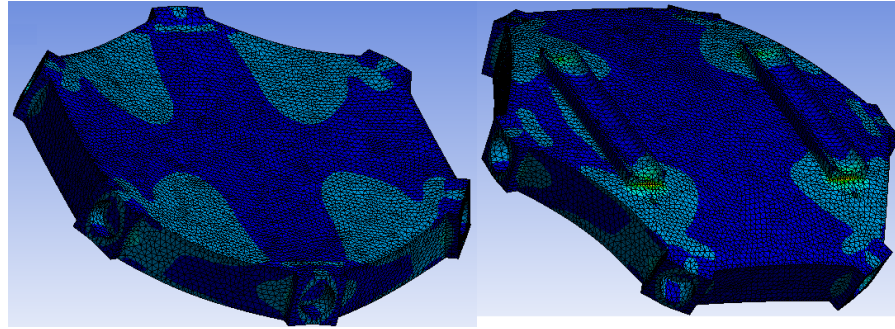
Şekil 4.7. CF ABS_0_60 malzemesi için gerilme enerjisi



Şekil 4.8. CF ABS_0_80 malzemesi için gerilme enerjisi

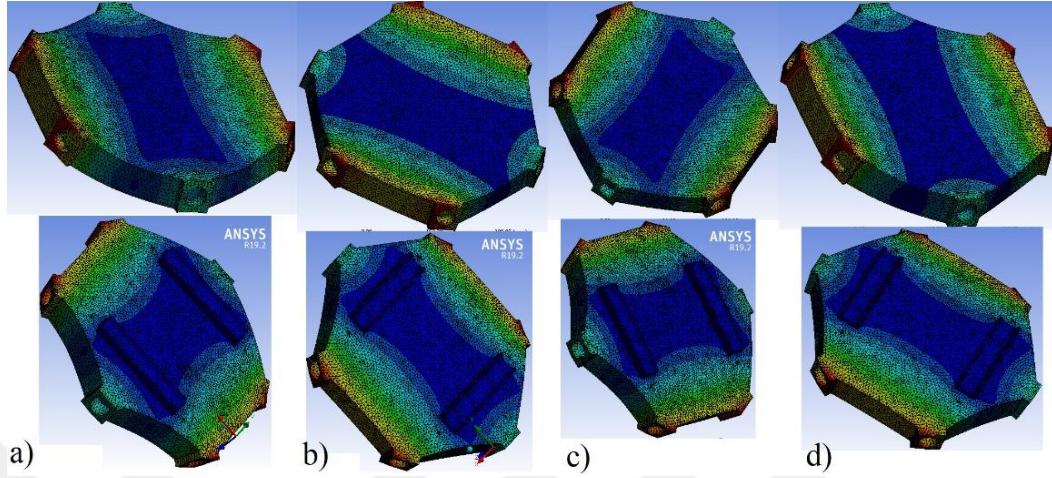


Şekil 4.9. CF ABS_0_100 malzemesi için gerilme enerjisi



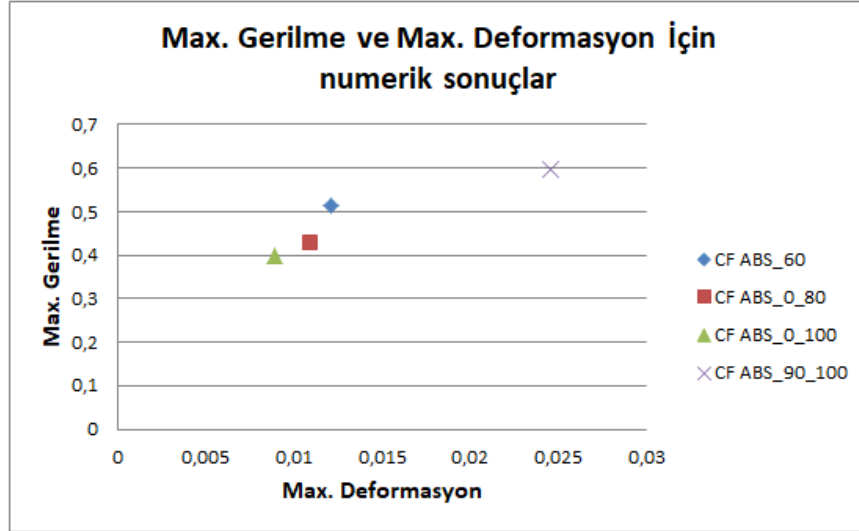
Şekil 4.10. CF ABS_90_100 malzemesi için gerilme enerjisi

Gövde parçanın numerik gerilme analizleri yapıldıktan her dört malzeme için ayrılıkta sonra deformasyon enerjisi simule edilmiştir. Şekil 4.11’de CF ABS_0_60, CF ABS_0_80, CF ABS_0_100 ve CF ABS_90_100 malzemeleri için deformasyon enerjisi belirtilmiştir.



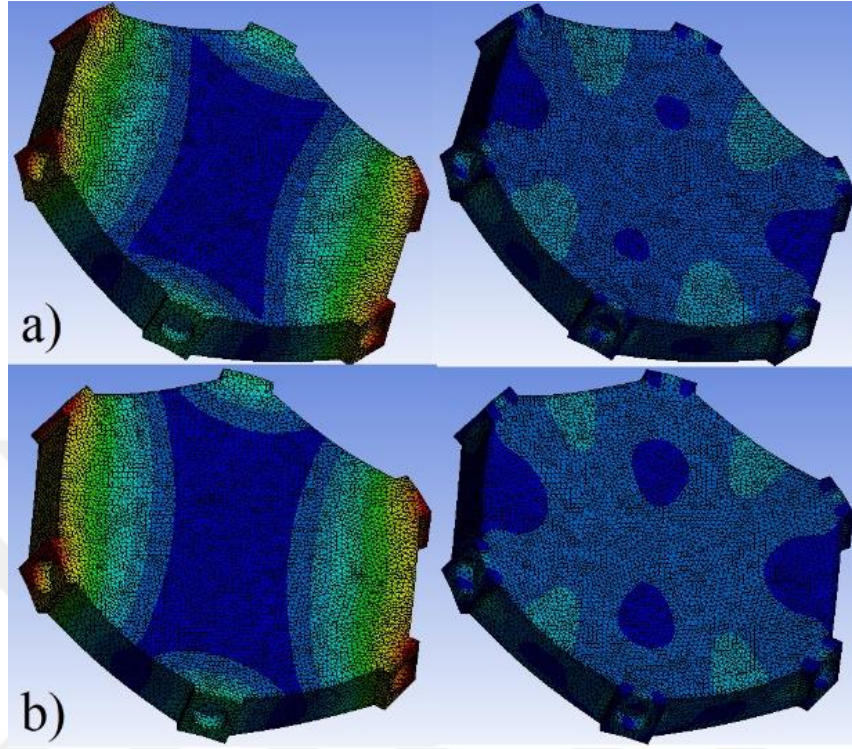
Şekil 4.11. Deformasyon enerjisi; a) CF ABS_0_60, b) CF ABS_0_80, c) CF ABS_0_100, d) CF ABS_90_100

CF ABS malzemeleri için gerilme ve deformasyon değerleri Excel programında tabloya toplanmış ve grafik çizdirilmiştir. Şekil 4.12. 'de her dört malzeme için max. gerilme ve deformasyon için numerik sonuçlar grafiksel olarak gösterilmiştir.



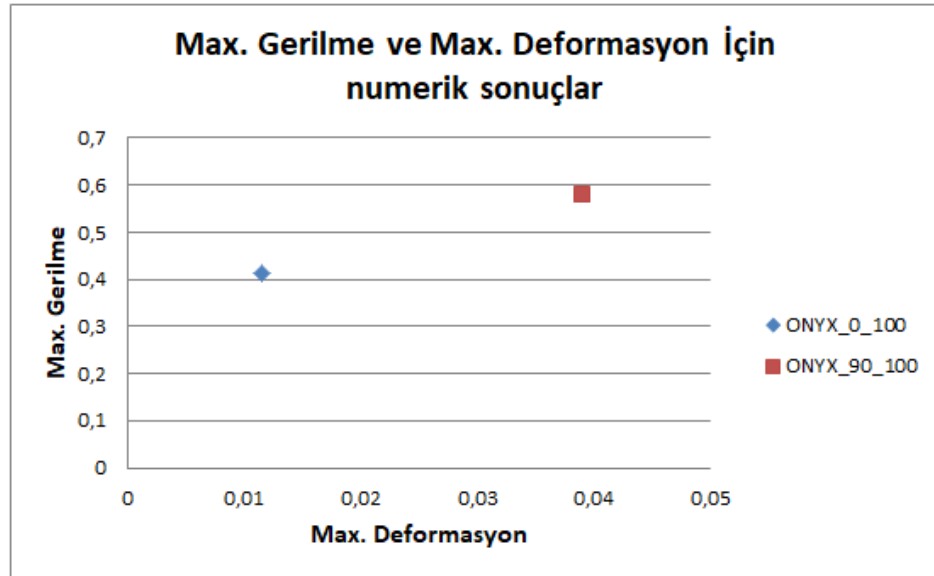
Şekil 4.12. ABS/CF için numerik sonuçlar

Nümerik analizin son aşamasında 0° ve 90° oryantastonla %100 dolgu yoğunluk oranıyla tasarlanmış gövde parçanın gerilme ve deformasyon enerjileri simule edilmiştir. Şekil 4.13'de ONYX_0_100 ve ONYX_90_100 malzemeleri için numerik sonuçlar verilmiştir.



Şekil 4.13. Numerik analiz sonuçları; a) ONYX_0_100 , b) ONYX_90_100

ONYX_0_100 ve ONYX_90_100 malzemeleri ile tasarlanan parçanın uğradığı gerilme ve deformasyon değerleri grafiksel olarak Şekil 4.14’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.14. ONYX için numerik sonuçlar

4.3. Topoloji optimizasyon sonuçları

Bu tez çalışmasında az malzeme kullanarak, hafif ve ideal mekanik özelliklere sahip ürün tasarımı yapılması amaçlanmıştır. Çalışmanın başlarında parça hafifliğine üretim parametresi olan dolgu yoğunluk oranı ile katkı sağlanması planlanmıştır. Hem analitik hem de numerik analizlerin sonucu sonrası üretim parametrelerinin ve malzeme seçiminin mekanik özelliklerin belirlenmesi ve iyileştirilmesi maksadıyla yapılması yönünde çalışılmıştır. Parça kütlesini azaltmak için ise topoloji optimizasyon işlemi uygulanmıştır. Numerik ve analitik analizi yapılmış parçanın her bir malzeme için mekanik özellikleri dikkate alınmış ve içlerinden en iyi mekanik performansa sahip malzemeden tasarlanmış gövde parça topoloji optimizasyon sürecine tabi tutulmuştur. Hem numerik analiz hem de analitik hesaplamalar zamanı 0° oryantasyonlu ve %100 dolgu yoğunluklu %5 karbon fiber takviyeli ABS malzemesinin mekanik özelliklerinin diğerlerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bahsi geçen malzeme ile tasarımı yapılmış gövde parçaya %50 kütle azaltma amaçlanarak topoloji optimizasyon uygulanmıştır. Şekil 4.15 'de CF ABS_0_100 malzemesi ile tasarlanan gövde parçanın topoloji optimizasyon sonucu gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Topoloji optimizasyon sonucu

Şekilden görüldüğü Dron ayaklarının birleşeceği bölgelerde kalınlık korunmuş, diğer kısımlar inceltirilmiştir. Gövde parçanın sol ve sağ bölgeleri ayaklar vasıtasıyla güçlenecektir. Bu sebepten TO sonucuna göre tasarım yapılırken orta kısmın inceliği korunabilir.

Topoloji Optimizasyon ANSYS programıyla yapılmış ve sonuçta parçanın final kütle ve final hacmi kaydedilmiştir. Tablo 4.5’de TO sonucu elde edilmiş final hacim ve kütle belirtilmiştir.

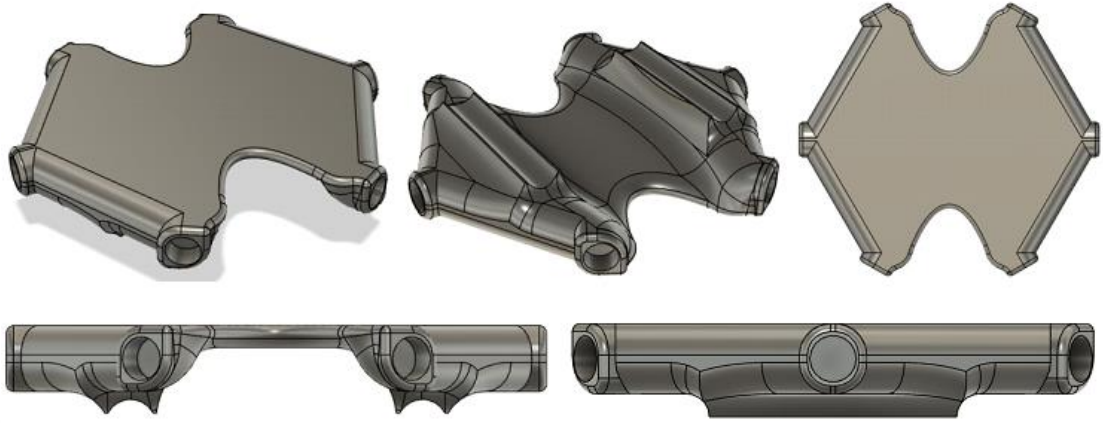
Tablo 4.7. Topoloji optimizasyon sonuçları

Malzeme	Orjinal hacim (mm ³)	Final hacim (mm ³)	Orjinal kütle (kg)	Final kütle (kg)
CF ABS_0_100	4.1321e+006	2.1656e+006	4.1734e+006	2.1873+006
Oran (%)	52.4		52.4	

Tabloda verilen sonuç değerlerde görüldüğü gibi kütle ve hacim %52.4 oranında azaltılmıştır. Planlanan kütle ve hacim değerleri elde edilen sonuç değerlerle aynı olmuştur. Sonrasında Fusion 360 tasarım programı kullanılarak topoloji optimizasyon sonucuna göre gövde parça ve Dron tasarımı yapılmıştır. Sonuç tasarımlar takip eden bölümde verilmiştir. Topoloji optimizasyonu sonucu elde edilen model, sonradan katı modele dönüştürülmüştür.

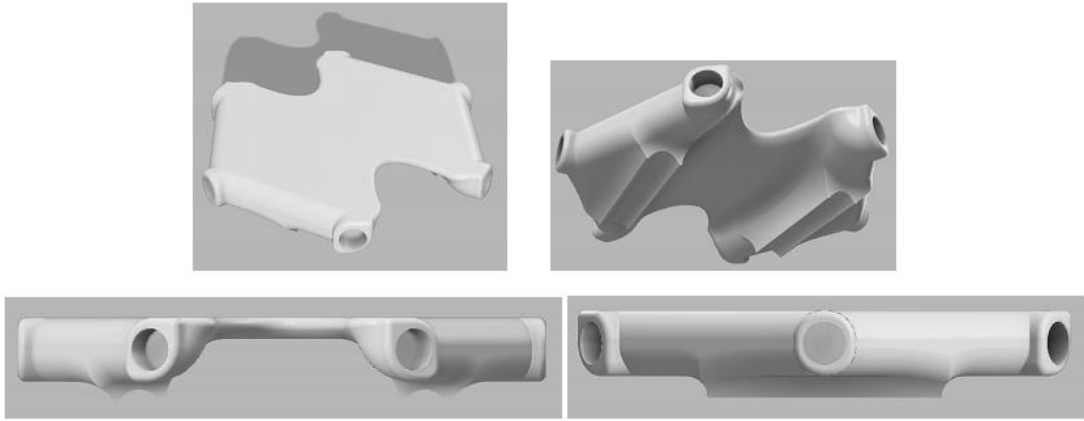
Malzemeler FDM metodu ile üretildiğinde, yazıcıda üretilme ve yerleştirme şekillerine bağlı olarak, üretim sonrasında termoplastik kompozit malzemenin verilen mekanik özellikleri değişebilir. Bunun sebebi eklemeli imalat ile üretilen parçaların yapım yönüne göre anizotropi (eşyönlülük) gösterme eğiliminde olmasıdır. Bu kurala göre optimizasyon sonucu üzerine çizilecek olan tasarım parametreleri sonuçtan farklı olarak daha yüksek değerlerle çizilmiştir.

Topoloji optimizasyon sonrası üretilen drone çerçevesinin son konfigürasyon hali şekil 4.16 ’de birkaç yönden gösterilmiştir.



Şekil 4.16. *Topoloji optimizasyon sonrası tasarım sonucu*

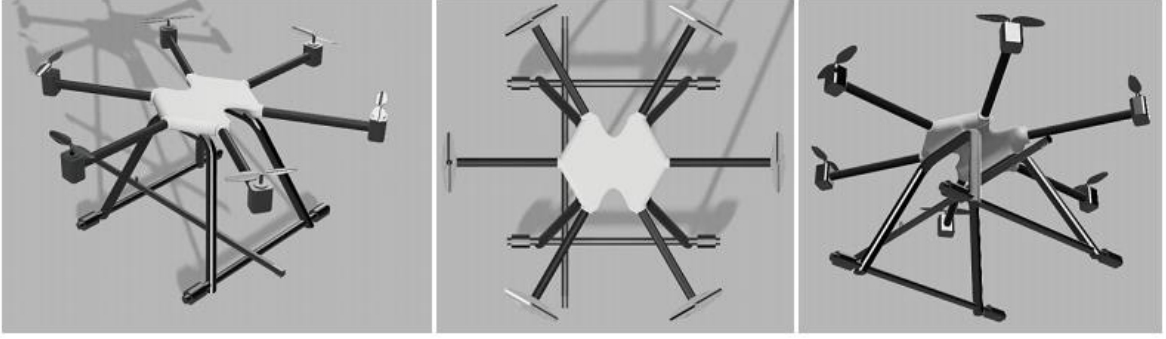
Aşağıdaki şekilde parçanın render hali gösterilmiştir (Şekil 4.17.).



Şekil 4.17. *Çizilen parçanın render hali*

4.4. Planlanan son konfigürasyon hali

Son olarak bütün sistem parçaları görev durumuna göre çeşitli parametreler kullanılarak seçildikten sonra ilaçlama deposu haricindeki tüm parçaların tasarımı bilgisayar destekli çizim programları (Fusion360) kullanılarak her parçanın tek tek çizilip birleştirilmesiyle tamamlanmıştır. Son tasarım çizimi render hali şekil 4.18’de görülmektedir.



Şekil 4.18. Parçaları birleştirilmiş son tasarım çizimi render hali

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada termoplastik kompozit malzeme için en iyi üretim parametreleri seçilerek Dron gövde parçasına topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Başlangıç halinde 4.1734 kg olan kütle topoloji optimizasyonu sonuç olarak %52,4 kütle kaybı ile 2.1873 kg'a kadar azaltılmıştır. Diğer imalat yöntemlerinde bu şekilde bir parçanın imalatı için parça kalıbının yapılması gerekmektedir. Kalıp üretimi zamanı imalata kadar farklı pekçok sürecin olması, kalıp malzemesi, çalışan, makine gibi faktörlerin devreye girmesi önemli maliyet gerektirmekte ve süreci karmaşık hale getirmektedir. Ancak eriyik biriktirme yönteminde bunu benzer proseslerin bulunmaması parçaların direkt olarak modelden üretilebilirliği, imalat için farklı ekipmana ve çalışana gerek kalmaması süreci kolaylaştırmakta, düşük makine ve malzeme maliyeti bu yöntemin avantajlarını önemli şekilde arttırmaktadır.

Bu çalışmada optimizasyon yapıldıktan sonra bile dron parçasının aynı koşullarda çalışması sağlanmıştır. Optimizasyonun teknik faydalarının yanı sıra göze hitap etmesine de dikkat edilmiştir. Kaba duran parçalar tasarımda görüldüğü gibi incelik ve optimizasyon sonucunda oluşan boşluklarda yaratıcı tasarımlar üretilir.

Üretimi gerçekleştirilecek olan dronun tarımsal ilaçlama gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılması amaçlanmaktadır. Dronun üretim şartlarının kolaylaştırılması, maliyetinin ve ağırlığının düşürülmesi üretimin seri üretim haline geçmesine yol açacaktır. Bu tür üretimin artması tarım sektörü için de katkıda bulunarak tarım sektörünün daha da gelişmesini sağlayacaktır.

Yapılan çalışma kapsamında aşağıdaki öneriler dikkate alınabilir:

- Çalışmada karbon elyaf takviyeli ABS malzeme, saf ABS ve ONYX malzemeleri kullanılmıştır. Eriyik biriktirme yönteminde farklı malzemelerin kullanımının araştırılması ve bu malzemelerde kullanılacak farklı parametrelerin mekanik özelliklere etkisi araştırılabilir.

- Elde edilen mekanik özelliklerde çeşitli üretim çalışmaları yapılabilir. Ek talep koşullarına göre farklı termoplastik kompozit malzemelerin mekanik özellikleri eklemeli imalat şartlarına göre belirlendiğinde, farklı endüstriyel uygulamaların geliştirilmesine olanak sağlayabilir.

- Eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak elde edilen mekanik özellikler için, topoloji optimizasyon yazılımı veri kitaplıkları yeterli malzeme tanımlarından yoksundur. Yeni araştırmalarla elde edilecek özellikler, eklemeli imalata uygun yeni yapısal parçaların tasarımında bu programların kullanımından yararlanabilir.

KAYNAKÇA

- [1] AKIN, Bahadır, (1998), Küresel Rekabet Ortamında Teknoloji Yönetimi ve Bisküvi, Çikolata ve Gofret Sanayiinde Teknoloji Yönetimine İlişkin Bir Uygulama, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Konya, Selçuk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- [2] KARAKAŞ, Şahsenem, (2009), İleri İmalat Teknolojileri, <http://www.google.com.tr/search?hl=en&q=%22ileri+imalat+teknolojileri%22>, Erişim Tarihi: 19.01.2009.
- [3] HOTTENSTEIN, Michael R., CASEY Michael S. and DUNN Steven C., (1997), *Facilitation of Advanced Manufacturing Technology: Implementation and Transfer, Industrial Management*, Vol 39, Issue
- [4] ŞİMŞEK, M.Şerif ve AKIN, H.Bahadır, (2003), *Teknoloji Yönetimi ve Örgütsel Değişim*, (Birinci Basım), Konya, Çizgi Kitabevi.
- [5] Çiftçi, S. (2020). *Termoplastik kompozitlerin büyük hacimli Eklemeli İmalat sisteminde üretimi için granül beslemeli ekstrüzyon sisteminin geliştirilmesi* (Master's thesis, Eskişehir Teknik Üniversitesi).
- [6] EREN, O., & SEZER, H. (2019). *Üretken Tasarım ve Topoloji Optimizasyonu Yaklaşımlarıyla Ürün Tasarımı*.
- [7] AMFG (2019). 3D Printing with Polymers: All You Need to Know. https://amfg.ai/2019/01/17/3d-printing-with-polymers-all-you-need-to-know/#The_Future_of_Polymer_3D_Printing. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)
- [8] Brackett, D., Ashcroft, I., & Hague, R. (2011, August). Topology optimization for additive manufacturing. In *2011 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. University of Texas at Austin.
- [9] Standard, A. S. T. M. (2012). Standard terminology for additive manufacturing technologies. *ASTM International F2792-12'a*.
- [10] Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010). Photopolymerization processes. In *Additive Manufacturing Technologies* (pp. 78-119). Springer, Boston, MA.
- [11] Jacobs, P. F. (1992). Fundamentals of stereolithography. *1992 International Solid Freeform Fabrication Symposium*.
- [12] Danforth, S. C. ve Safari, A. (1996, August). Solid freeform fabrication: novel manufacturing opportunities for electronic ceramics. *Applications of Ferroelectrics, 1996. ISAF'96., Proceedings of the Tenth IEEE International Symposium*, 1, 183-188. doi:10.1109/isaf.1996.602732

- [13] Yan, X. ve Gu, P. E. N. G. (1996). A review of rapid prototyping technologies and systems. *Computer-Aided Design*, 28(4), 307–318. doi:10.1016/0010-4485(95)00035-6
- [14] Sürmen, H. K. (2019). EKLEMELİ İMALAT (3B BASKI): TEKNOLOJİLER VE UYGULAMALAR. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-392.
- [15] Verhoef, L. A., Budde, B. W., Chockalingam, C., Nodar, B. G., Van Wijk, A. J. (2018). The effect of additive manufacturing on global energy demand: An assessment using a bottom-up approach. *Energy Policy*, 112, 349-360.
- [16] Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B. (2014). Additive manufacturing technologies. Springer, 498p, New York.
- [17] Hull, C. W. (1986). *U.S. Patent No. 4,575,330*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [18] Chaput, C. ve Chartier, T. (2007, August). Fabrication of ceramics by stereolithography. *RTeJournal-Forum für Rapid Technologie*, 4(1).
- [19] Hornbeck, L. J. (1991). *U.S. Patent No. 5,061,049*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [20] Tumbleston, J. R., Shirvanyants, D., Ermoshkin, N., Januszewicz, R., Johnson, A. R., Kelly, D. ve Samulski, E. T. (2015). Continuous liquid interface production of 3D objects. *Science*, 2397. doi:10.1126/science.aaa2397
- [21] Wong, K. V. ve Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*. 2012. doi:10.5402/2012/208760
- [22] Beaman, J. J. ve Deckard, C. R. (1990). *U.S. Patent No. 4,938,816*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [23] Garg, A., Bhattacharya, A. ve Batish, A. (2016). On surface finish and dimensional accuracy of FDM parts after cold vapor treatment. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(4), 522–529. doi:10.1080/10426914.2015.1070425
- [24] Karaman, E., & Çolak, O. (2020). Eriyik biriktirme yönteminde üretim parametrelerinin mekanik özelliklere ve parçaların iç yapısına etkisinin incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 617-630.
- [25] Vanek, J., Galicia, J. A. G., & Benes, B. (2014, August). Clever support: Efficient support structure generation for digital fabrication. In *Computer graphics forum* (Vol. 33, No. 5, pp. 117-125).
- [26] Fernandez-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S., & Conejero, A. (2016). Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing. *3D printing and additive manufacturing*, 3(3), 183-192.

- [27] Shafer, C. S., Siddel, D. H., Elliott, A. M. (2017). Cleated print surface for fused deposition modeling. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, 7(1).
- [28] Park, J. H., Lyu, M. Y., Kwon, S. Y., Roh, H. J., Koo, M. S., Cho, S. H. (2016). Temperature analysis of nozzle in a FDM type 3D printer through computer simulation and experiment. *Elastomers and Composites*, 51(4), 301-307.
- [29] Kaygusuz, B., & Özerinç, S. E. Z. E. R. (3). 3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen PLA Bazlı Yapıların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 16(1), 1-6.
- [30] Huang, B., Singamneni, S. (2015). Raster angle mechanics in fused deposition modelling. *Journal of Composite Materials*, 49(3), 363-383.
- [31] Wu, W., Geng, P., Li, G., Zhao, D., Zhang, H., Zhao, J. (2015). Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS. *Materials*, 8(9), 5834-5846.
- [32] Jiang, J., Lou, J., Hu, G. (2019). Effect of support on printed properties in fused deposition modelling processes. *Virtual and Physical Prototyping*, 1-8.
- [33] MADEN, H., & KAMBER, Ö. Ş. (2018). FDM teknoloji ile üretilen prototip parçalarının hataları ve hataların önlenmesi. *International journal of 3D printing technologies and digital industry*, 2(1), 40-51.
- [34] Singh, S., Ramakrishna, S., & Singh, R. (2017). Material issues in additive manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 25, 185-200.
- [35] Gafurzade F., Çolak O. (2021) İnsansız Hava Araçlarına Ait Termoplastik Kompozit Yapısal Parçaların Topoloji Optimizasyonu Yöntemi İle Tasarımı ve Eklemeli İmalat Metodu İle Üretim Şartlarının İncelenmesi XI. *Ulusal Havacılık ve Uzay Mühendisliği Kurultayı kitabı*, 67-73
- [36] Top, N., Gökçe, H., & Şahin, İ. (2019). Eklemeli İmalat İçin Topoloji Optimizasyonu: El Freni Mekanizması Uygulaması. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 18(1), 1-13.
- [37] Brackett, D., Ashcroft, I., & Hague, R. (2011, August). Topology optimization for additive manufacturing. In *2011 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. University of Texas at Austin.
- [38] Kahraman, F., & Küçük, M. (2020). Otomotiv endüstrisinde topoloji optimizasyonu ile ağırlık azaltma uygulaması üzerine bir araştırma. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (20), 623-631.
- [39] Zhong, W., Li, F., Zhang, Z., Song, L., Li, Z. (2001). Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling. *Materials Science and Engineering: A*, 301(2), 125-130.

- [40] Ziemian, C., Sharma, M., Ziemian, S. (2012). Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling. In *Mechanical engineering. InTechOpen*, 159-180.
- [41] Ning, F., Cong, W., Hu, Y., Wang, H. (2017). Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: Effects of process parameters on tensile properties. *Journal of Composite Materials*, 51(4), 451-462.
- [42] Choi, Y. H., Kim, C. M., Jeong, H. S., Youn, J. H. (2016). Influence of bed temperature on heat shrinkage shape error in FDM additive manufacturing of the ABS-engineering plastic. *World Journal of Engineering and Technology*, 4(3), 186-192.
- [43] Ning, F., Cong, W., Hu, Y., Wang, H. (2017). Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: Effects of process parameters on tensile properties. *Journal of Composite Materials*, 51(4), 451-462.
- [44] Rezaie, R., Badrossamay, M., Ghaie, A., & Moosavi, H. J. P. C. (2013). Topology optimization for fused deposition modeling process. *Procedia Cirp*, 6, 521-526.
- [45] Park, J. H., Goo, B., & Park, K. (2019). Topology optimization and additive manufacturing of customized sports item considering orthotropic anisotropy. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20(8), 1443-1450.
- [46] Abasov, A. (2022). *Kompozitlerin kullanıldığı ekstrüzyon esaslı eklemeli imalatta ürün özelliklerinin etkisinin hesaplamalı olarak incelenmesi* (Master's thesis, Eskişehir Teknik Üniversitesi).
- [47] Sauer, M. J. (2018). Evaluation of the mechanical properties of 3D printed carbon fiber composites. *South Dakota State University*.
- [48] Stuchebrov, S. G., Miloichikova, I. A., Melnikov, A. L., & Pereverzeva, M. A. (2016). Numerical simulation of the microtron electron beam absorption by the modified ABS-plastic. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 671, No. 1, p. 012036). IOP Publishing.
- [49] Patan, Z.Y. (2019). Karbon fiber takviyeli abs kompozitlerin fdm 3b yazıcı ile üretimi ve ansys ile modellenmesi, *Doctoral dissertation, Onsekizmart Üniversitesi*.
- [50] Baich, L., & Manogharan, G. (2015). Study of infill print parameters on mechanical strength and production cost-time of 3D printed ABS parts. In *2014 International Solid Freeform Fabrication Symposium*. University of Texas at Austin.
- [51] Letcher, T., Rankouhi, B., & Javadpour, S. (2015, November). Experimental study of mechanical properties of additively manufactured ABS plastic as a function of layer parameters. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and*

Exposition (Vol. 57359, p. V02AT02A018). American Society of Mechanical Engineers.

- [52] Dudescu, C., & Racz, L. (2017). Effects of raster orientation, infill rate and infill pattern on the mechanical properties of 3D printed materials. *ACTA Univ. Cibiniensis*, 69(1), 23-30.
- [53] Abdullah, A. M., Mohamad, D., Rahim, T. N. A. T., Akil, H. M., & Rajion, Z. A. (2019). Effect of narrow infill density gap on the compressive properties of 3D printed carbon fibre reinforced acrylonitrile butadiene styrene. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 33(5), 2339-2343.
- [54] Iyer, S. S. G., & Keles, O. (2022). Effect of raster angle on mechanical properties of 3D printed short carbon fiber reinforced acrylonitrile butadiene styrene. *Composites Communications*, 32, 101163.

http-1: https://www.statista.com/topics/1969/additive-manufacturing-and-3d-printing/#topicHeader__wrapper (Erişim Tarihi 15.10.2021)

http-2: 3D Yazıcı - Basım Yapılırken Dikkat Edilmesi Gerekenler - ArtıBoyut (artiboyut.com) (Erişim Tarihi 11.08.2020)

http-3: 3D Baskı Parametreleri Nelerdir? (tridi.co) (Erişim Tarihi 20.05.2022)

http-4: Ricoh 3D - Help Centre - Layer Thickness In 3D Printing (ricoh-europe.com) (Erişim Tarihi 06.01.2020)

http-5: <https://3dprint.com/139029/made-for-me-abs-3d-printing/> (Erişim Tarihi 20.07.2016)

http-6: https://www.globalsources.com/product/agriculture-drone_1169144850f.htm (Erişim Tarihi 10.07.2022)

http-7: <https://www.szasta.com/agl-30.html> (Erişim Tarihi 15.03.2022)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Fikrat GAFURZADE

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2014 – 2018 , Azerbaycan Milli Havacılık Akademisi / Havacılık ve Uzay Fakültesi / Makine Mühendisliği
- 2019 – 2022 , Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- Gafurzade F.,Çolak O.(2021) İnsansız Hava Araçlarına Ait Termoplastik Kompozit Yapısal Parçaların Topoloji Optimizasyonu Yöntemi İle Tasarımı ve Eklemeli İmalat Metodu İle Üretim Şartlarının İncelenmesi *XI. Ulusal Havacılık ve Uzay Mühendisliği Kurultayı kitabı*,67-73