

T.C.
ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ
MAKİNE VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**BÜYÜK HACİMLİ 3 BOYUTLU YAZICI TASARIMI VE ERİYİK
BİRİKTİRME YÖNTEMİ İLE ABS POLİMER MATRİSLİ
KARBON FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM
PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ**

Efecan KARAMAN

Danışman
Doç. Dr. Oğuz ÇOLAK

ISPARTA – 2019



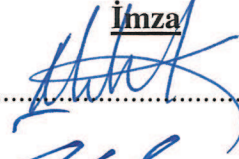
© 2019 [Efecan KARAMAN]

TEZ ONAYI

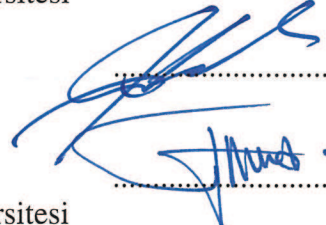
BÜYÜK HACİMLİ 3 BOYUTLU YAZICI TASARIMI VE ERİYİK BİRİKTİRME YÖNTEMİ İLE ABS POLİMER MATRİSLİ KARBON FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

Efecan KARAMAN tarafından hazırlanan bu tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

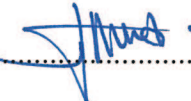
Başkan Prof. Dr. Melek USAL
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

İmza


Üye Doç. Dr. Oğuz ÇOLAK
Eskişehir Teknik Üniversitesi



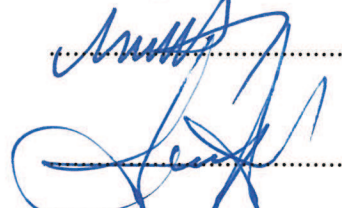
Üye Doç. Dr. Fatih TAYLAN
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



Üye Dr. Öğr. Üyesi İsmail TOPCU
Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi



Üye Dr. Öğr. Üyesi Lokman YÜNLÜ
Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi



Yukarıdaki Jüri kararı Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun / /
tarih ve / sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof.Dr. Yusuf UÇAR
Enstitü Müdürü

ETİK BEYANI

İsparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak ve bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın hazırladığım bu tez çalışmada;

Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

31/07/2019

Efecan KARAMAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Eklemeli İmalat.....	5
1.2. Eklemeli İmalat Teknolojileri.....	11
1.2.1. Eriyik biriktirme yöntemi	18
1.2.2. Eriyik biriktirme yönteminde üretim parametreleri	23
1.2.2.1. Katman kalınlığı.....	24
1.2.2.2. Üretim açısı.....	26
1.2.2.3. Doluluk oranı	26
1.2.2.4. Kabuk genişliği	27
1.2.2.5. Nozul sıcaklığı	29
1.2.2.6. Tabla sıcaklığı.....	31
1.2.2.7. Üretim hızı	31
1.2.2.8. Dolgu deseni	32
1.2.3. Eriyik biriktirme yönteminde kullanılan malzemeler	33
1.2.4. Eriyik biriktirme yönteminde tasarım kriterleri.....	39
1.2.5. Eklemeli imalatta topoloji optimizasyonu	44
1.2.6. Eklemeli imalatta kullanılan üç boyutlu yazıcılar ve uygulama alanları	50
1.3. Malzemelerin Mekanik Özellikleri	55
1.4. Taguchi Deney Tasarımı	57
2. KAYNAK ÖZETLERİ	60
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	74
3.1. Büyük Baskı Hacmine Sahip Eklemeli İmalat Sisteminin Tasarımı Ve İmalatı	74
3.2. Deney Numunelerinin Üretimi	86
3.3. Taguchi Deney Tasarımı	92
3.4. Topoloji Uygulaması.....	93
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	97
4.1. Üretim Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkisi	97
4.2. Taguchi Deney Tasarımı	109
4.3. Kırık Yüzeylerde SEM Bulguları	114
4.4. Topoloji Optimizasyonu.....	125
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	132
KAYNAKLAR.....	137
ÖZGEÇMİŞ.....	150

ÖZET

Doktora Tezi

BÜYÜK HACİMLİ 3 BOYUTLU YAZICI TASARIMI VE ERİYİK BİRİKTİRME YÖNTEMİ İLE ABS POLİMER MATRİSLİ KARBON FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

Efecan KARAMAN

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Oğuz ÇOLAK

Bu çalışmada, büyük baskı hacmine sahip eriyik biriktirme yöntemi esaslı üretim yapacak parametre değişikliğine imkân tanıyan modüler bir eklemeli imalat sisteminin imalatı, yöntemde bulunan farklı üretim parametrelerinin termoplastik ve polimer matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi, Sistemin ideal üretim parametrelerinin belirlenmesi ve eklemeli imalatta topoloji optimizasyonu ile tasarlanan parçaların üretilebilirliğinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu amaçla çalışmada ilk olarak, büyük boyutlu parçaların yüksek boyutsal hassasiyette üretilebileceği 1000x1000x1000 mm baskı hacmine sahip üç boyutlu yazıcının tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Bu sistemde termoplastik malzemeler ve karbon fiber takviyeli ABS kompozitlerinin üretimi için beş farklı üretim parametresi ve her parametre için üç farklı seviye belirlenmiş, çekme test numunelerinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Test numunelerinin üretiminde, üç farklı üretim açısı (30/-60°, 45/-45°, 90/0°), üç farklı doluluk oranı (%20, %60, %100), üç farklı üretim hızı (20, 40, 60 mm/s), üç farklı nozul sıcaklığı (235, 255, 265 °C) ve üç farklı tabla sıcaklığı (70, 95, 110 °C) kullanılmış ve Taguchi deney tasarımı yapılarak elde edilen mekanik değerlere göre optimal üretim parametreleri tespit edilmiştir.

Sonuç olarak en iyi mekanik özellikler; %100 doluluk oranı, 30/-60° üretim açısı, 20 mm/s üretim hızı, 255 °C nozul sıcaklığı ve 110 °C tabla sıcaklığında elde edilmiştir. Farklı üretim parametrelerinin parçaların iç yapılarına etkileri, kırık yüzeylerden alınan taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ile değerlendirilmiştir. Karbon fiber takviyeli kompozit numunelerde yoğun miktarda gözeneklilik oluşumu ve matris fiber arayüzünde zayıf bağlanma sonucu fiber ayrılmalarının meydana geldiği görülmüştür. Üretimde kullanılan farklı parametrelerin, parçaların katman yapısını, mekanik özelliklerini ve malzeme davranışını önemli oranda etkilediği görülmüştür. Karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerden üretilen numunelerde takviyesiz numunelere kıyasla malzemenin çekme dayanımında %12 oranında düşüş görülürken, elastisite modülü %70 oranında artış göstermiştir. Üretim parametreleri ve deneyler sonucu elde edilen mekanik değerler kullanılarak bir kanat kaburga parçasında belirlenen sınır şartları altında topoloji optimizasyonu sonucu 0.71 kg'lık

kütle 0.36 kg'a inerek %48.12 oranında kütle azaltımı gerçekleştirilmiştir. Topoloji optimizasyonu yapılmış kanat kaburga parçasının üretimi, karbon fiber takviyeli kompozit malzeme kullanılarak imalatı yapılan büyük baskı hacimli eklemeli imalat sisteminde gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eriyik biriktirme yöntemi, Büyük baskı hacimli eklemeli imalat sistemi, Karbon fiber takviyeli polimer kompozit, üretim parametreleri, Taguchi deney tasarımı, Topoloji optimizasyonu.

2019, 151 sayfa



ABSTRACT

Ph.D. Thesis

BIG VOLUME 3 DIMENSIONAL PRINTER DESIGN AND INVESTIGATION OF PRODUCTION PARAMETERS OF ABS POLYMER MATRIX CARBON FIBER REINFORCED COMPOSITES BY FUSED DEPOSITION MODELING

Efecan KARAMAN

**Isparta University of Applied Sciences
The Institute of Graduate Education
Department of Mechanical and Manufacturing Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

The aim of this study was manufacturing of a modular additive manufacturing system with a large build volume, which allows parameter changes to be made based on fused deposition modeling, investigation of the effects of different process parameters on mechanical properties of thermoplastic and polymer matrix composite materials, determination of the ideal process parameters according to the system and investigation of the fabricability of topology optimized parts in fused deposition modeling.

With this aim firstly, the design and manufacture of a three dimensional printer with a build volume of 1000x1000x1000 mm, in which large sized parts can be produced with high dimensional accuracy, was realized. In the production of thermoplastic materials and carbon fiber reinforced ABS composites, five different process parameters and three different levels for each parameter were determined and test samples were produced for tensile testing. In the production of test specimens, three different build angles (30 /-60°, 45 /-45°, 90/0°), three different infill density (20%, 60%, 100%), three different print speeds (20, 40, 60 mm/s), three different nozzle temperatures (235, 255, 265 °C) and three different table temperatures (70, 95, 110 °C) were used and optimum process parameters were identified according to the mechanical values obtained by Taguchi experimental design.

Consequently, best mechanical properties were obtained at 100% infill density, 30/-60° build angle, 20 mm/s print speed, 255 °C nozzle temperature and 110 °C table temperature. The effects of different process parameters on the internal structure of the parts were evaluated by scanning electron microscopy images from the fracture surfaces. It was seen that carbon fiber reinforced composite samples had a large amount of pores. It was also found that from the micrographs the adhesion between the fiber and matrix was insufficient, which led to fiber pull out from the matrix material. It was observed that the process parameters significantly affect the layer structure of the parts, mechanical properties and material behaviors. In the samples produced from carbon fiber reinforced composite materials, the tensile strength decreased by 12% compared while the modulus of elasticity increased by 70% compared to the non-reinforced samples. As a result of topology optimization under the boundary conditions determined on a wing rib by using process parameters and

mechanical values, the mass decreased from 0.71 kg to 0.36 kg and the mass reduced by 48.12%. Topology optimized wing rib was fabricated by big build volume additive manufacturing system with using carbon fiber reinforced composite materials.

Key Words: Fused deposition modeling, Big build volume additive manufacturing system, Carbon fiber reinforced polymer composites, Process parameters, Taguchi design of experiments, Topology optimization.

2019, 151 pages



TEŞEKKÜR

Bu çalışma boyunca yardımını ve desteğini esirgemeyen, güncel bir konuda çalışma olanağı sunan değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Oğuz ÇOLAK'a, tez izleme komitesinde bulunarak tezime katkı sağlayan değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Melek USAL ve Sayın Doç. Dr. Fatih TAYLAN'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Makinenin imalat aşamasında bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak destek sağlayan meslektaşlarım Kıvanç BAYKAN ve Ali İhsan ÜNAL'a, deney tasarımları sürecinde katkı sağlayan Öğr. Gör. Dr. İlayet Burcu TOPRAK'a teşekkür ederim. Tezimin hazırlanması sürecinde gösterdikleri anlayış ve sağladıkları desteklerden dolayı aynı kurumda çalıştığım değerli hocalarıma teşekkür ederim. 1605F440 No'lu proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu'na ayrıca teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında ve aldığım tüm kararlarda yanımda olup desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen çok değerli ailem, aile büyüklerim ve kıymetli eşime sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Efecan KARAMAN
ISPARTA, 2019

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Eklemeli imalat teknolojileri kullanım oranları	6
Şekil 1.2. Eklemeli imalat teknolojileri dünya geneli pazar payı	7
Şekil 1.3. Eklemeli imalat teknolojileri uygulama alanları ve pazar payı dağılımı.....	7
Şekil 1.4. Üç boyutlu modelin üçgensel bölgelere ayrılması	10
Şekil 1.5. Eklemeli imalat üretim süreci	11
Şekil 1.6. Eklemeli imalat teknolojileri	12
Şekil 1.7. Eriyik biriktirme yöntemi	19
Şekil 1.8. Eriyik biriktirme yönteminde destek yapıları	22
Şekil 1.9. Farklı katman kalınlıkları	25
Şekil 1.10. Farklı katman kalınlıkları, yüzey kalitesi ve üretim süreleri	25
Şekil 1.11. Üretim açısı	26
Şekil 1.12. Farklı doluluk oranları	27
Şekil 1.13. Farklı kabuk genişlikleri, (a) iki kabuk genişliği, (b) üç kabuk genişliği, (c) dört kabuk genişliği	28
Şekil 1.14. Kabuk oluşumu (a), kabuk genişliği (b)	28
Şekil 1.15. Malzeme ekstrüzyonu ve nozul sıcaklık dağılımı	30
Şekil 1.16. Farklı dolgu desenleri	33
Şekil 1.17. Eklemeli imalat fiber takviyeli kompozitler	39
Şekil 1.18. T parçası yönlenimi, (a) fazla destek ihtiyacı, (b) daha az destek ihtiyacı, (c) destek ihtiyacı olmadan üretim, (Siyah: parça, Yeşil: destek)	40
Şekil 1.19. Eriyik biriktirme yönteminde merdiven etkisi	40
Şekil 1.20. Elyaf yönüne paralel yükleme (a), elyaf yönüne dik yükleme (b), katman yapısı sonucu gerilme yığılması oluşması	42
Şekil 1.21. Boyut optimizasyonu (a), şekil optimizasyonu (b), topoloji optimizasyonu (c)	45
Şekil 1.22. Problem tanımı ve topoloji optimizasyonu	46
Şekil 1.23. Tasarım alanı ve sınır koşulları	46
Şekil 1.24. Sentinel anten destek parçası topoloji optimizasyonu	50
Şekil 1.25. Büyük baskı hacimli eklemeli imalat teknolojileri, (a) BAAM, (b) SLAM	53
Şekil 1.26. EBY ile üretilen insansız hava araçları Aurora (a) ve Thor (b)	54
Şekil 1.27. Aurora kanat yapısı	54
Şekil 3.1. Büyük baskı hacimli eklemeli imalat sistemi katı model tasarımı	75
Şekil 3.2. Üç boyutlu yazıcı gövdesi	76
Şekil 3.3. Üç boyutlu yazıcının orta gövde montajı	76
Şekil 3.4. Vidalı mil montajı	80
Şekil 3.5. Orta köprü y eksen hareketi	80
Şekil 3.6. Orta köprü x eksen hareketi	81
Şekil 3.7. Ekstruder bağlantı parçası	81
Şekil 3.8. Ekstruder montajı	83
Şekil 3.9. Pano bağlantısı	84
Şekil 3.10. Deneysel amaçlı büyük hacimli eriyik biriktirme esaslı eklemeli imalat sistemi	85
Şekil 3.11. ASTM D638 Tip-1 numune ölçüleri	87
Şekil 3.12. Yığılan katman genişliği ve elyaf yönelmesi	88

Şekil 3.13. (a) 30°/-60° üretim açısı, (b) 45°/-45° üretim açısı ve (c) 90°/0° üretim açısı	89
Şekil 3.14. Farklı doluluk oranlarında test numuneleri (a) %20 doluluk oranı, (b) %60 doluluk oranı ve (c) %100 doluluk oranı	90
Şekil 3.15. Deneme parçaları	91
Şekil 3.16. Deney numuneleri üretimi (a), üretilmiş numuneler (b), çekme testleri (c), kopma yüzeyleri (d).....	92
Şekil 4.1. %20 doluluk oranında 30/-60° üretim açısında gerilme-şekil değiştirme diyagramı.....	97
Şekil 4.2. %20 doluluk oranında 45/-45° üretim açısında gerilme-şekil değiştirme diyagramı.....	98
Şekil 4.3. %20 doluluk oranında 90/-0° üretim açısında gerilme-şekil değiştirme diyagramı.....	98
Şekil 4.4. %20 doluluk oranı ve farklı üretim açılarında elastisite modülleri.....	99
Şekil 4.5. %60 doluluk oranında 30/-60° üretim açısında gerilme-şekil değiştirme diyagramı.....	100
Şekil 4.6. %60 doluluk oranında 45/-45° üretim açısında gerilme-şekil değiştirme diyagramı.....	101
Şekil 4.7. %60 doluluk oranında 90/-0° üretim açısında gerilme-şekil değiştirme diyagramı.....	101
Şekil 4.8. %60 doluluk oranı ve farklı üretim açılarında elastisite modülleri.....	103
Şekil 4.9. %100 doluluk oranında 30/-60° üretim açısında gerilme-şekil değiştirme diyagramı.....	104
Şekil 4.10. %100 doluluk oranında 45/-45° üretim açısında gerilme-şekil değiştirme diyagramı	104
Şekil 4.11. %100 doluluk oranında 90/-0° üretim açısında gerilme-şekil değiştirme diyagramı	105
Şekil 4.12. %100 doluluk oranı ve farklı üretim açılarında elastisite modülleri	106
Şekil 4.13. %20 doluluk oranında farklı üretim açılarının karşılaştırılması	108
Şekil 4.14. %60 doluluk oranında farklı üretim açılarının karşılaştırılması	108
Şekil 4.15. %100 doluluk oranında farklı üretim açılarının karşılaştırılması	109
Şekil 4.16. Çekme mukavemeti için S/G oranları	111
Şekil 4.17. σ_c için deney sonuçları ve tahmin değerlerinin karşılaştırılması	113
Şekil 4.18. Karbon fiber takviyeli filament iç yapısı (a), Takviyesiz termoplastik filament iç yapısı (b).....	114
Şekil 4.19. Karbon fiber takviyeli filament çapı ve karbon fiber çap dağılımı	115
Şekil 4.20. Karbon fiber takviyeli filament iç yapısında gözeneklilik oluşumu	116
Şekil 4.21. %20 doluluk oranında katman yapısı (a), %60 doluluk oranında katman yapısı (b), %100 doluluk oranında katman yapısı (c).....	117
Şekil 4.22. %100 doluluk oranında 90/0° (a), 45/-45° (b) ve 30/-60° (c) üretim açılarında üretilen karbon fiber takviyeli numunelerde fiber yönlenmesi	118
Şekil 4.23. %60 doluluk oranında karbon fiber dağılımı (a), %100 doluluk oranında karbon fiber dağılımı (b).....	119
Şekil 4.24. Ortalama fiber uzunlukları.....	120
Şekil 4.25. 30/-60° üretim açısında görülen fiber ayrılması ve fiber kopması dağılımı (a), fiber ayrılması (b), fiber kopması (c).....	121
Şekil 4.26. 45/-45° üretim açısında görülen fiber ayrılması (a), fiber kopması (b).....	121
Şekil 4.27. 90/0° üretim açısında görülen fiber ayrılması (a), fiber kopması (b).....	122
Şekil 4.28. Üretilen numunelerde elde edilen katman kalınlıkları	122

Şekil 4.29. 20 mm/s (a), 40 mm/s (b) ve 60 mm/s (c) üretim hızlarında katman yapıları	123
Şekil 4.30. 235°C nozul sıcaklığı (a), 255°C nozul sıcaklığı (b) ve 265°C nozul sıcaklığında (c) katman yapısı.....	124
Şekil 4.31. Statik analiz sonucu gerilme dağılımı	125
Şekil 4.32. Statik analiz sonucu şekil değiştirme dağılımı.....	126
Şekil 4.33. Optimizasyon bölgesinin belirlenmesi	126
Şekil 4.34. Topoloji optimizasyonu sonucu elde edilen model.....	127
Şekil 4.35. Topoloji sonrası gerilme dağılımı	127
Şekil 4.36. Topoloji sonrası şekil değiştirme dağılımı	128
Şekil 4.37. Normal kanat modeli	128
Şekil 4.38. Normal kanat üzerinde gerilme dağılımı	129
Şekil 4.39. Normal kanat üzerinde şekil değişimi	129
Şekil 4.40. Optimize kanat modeli	129
Şekil 4.41. Optimize kanat üzerinde gerilme dağılımı	130
Şekil 4.42. Optimize kanat üzerinde şekil değişimi	130
Şekil 4.43. Eriyik biriktirme yönteminde termoplastik matrisli karbon fiber takviyeli kompozit kanat profili üretimi	131

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 1.1. Eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılan malzemeler, katman oluşturma teknikleri ve uygulama alanları	13
Çizelge 3.1. Üretilen sistem ve mevcut sistemlerin teknik özellikleri.....	86
Çizelge 3.2. Üç boyutlu yazıcı parametreleri	88
Çizelge 3.3. Üretim parametreleri	89
Çizelge 3.4. İlk deney grubu üretim planı	89
Çizelge 3.5. Deneme parçaları baskı ölçüleri	91
Çizelge 3.6. Deney parametreleri ve seviyeleri.....	93
Çizelge 3.7. Taguchi L ₉ ortogonal deney tasarımı	93
Çizelge 4.1. %20 doluluk oranında elde edilen mekanik değerler	100
Çizelge 4.2. %60 doluluk oranında elde edilen mekanik değerler	103
Çizelge 4.3. %100 doluluk oranında elde edilen mekanik değerler	107
Çizelge 4.4. Üretilen numunelerin Taguchi deney tasarımı sonuçları.....	109
Çizelge 4.5. Çekme mukavemeti için S/G yanıt tablosu.....	110
Çizelge 4.6. Çekme mukavemeti için ANOVA bulguları	111
Çizelge 4.7. Regresyon modeli ile tahmin edilen σ_c değerleri.....	113
Çizelge 4.8. Optimizasyon öncesi ve sonrası sonuçlar	128
Çizelge 4.9. Normal kanat ve optimize kanat	131

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Alan
ABS	Akrilonitril bütadien stiren
Al_2O_3	Alüminyum oksit
ASME	Amerikan makine mühendisleri odası
ASTM	Amerikan malzeme ve test derneği
B	Katman genişliği doğrusal kısım
CAD	Bilgisayar destekli tasarım
CF	Karbon fiber
CNC	Bilgisayar destekli nümerik kontrol
d	Nozul çapı
DLP	Dijital ışık işleme
DMLS	Direkt metal lazer sinterleme
E	Elastisite modülü
EBM	Elektron ışınli ergitme
f	Filament besleme hızı
F	Kuvvet
F_D	Sürükleme kuvveti
EBY	Eriyik biriktirme yöntemi
F_k	Flambaj kuvveti
F_l	Taşıma kuvveti
GE	General electric
GPa	Gigapaskal
HCN	Hidrojen siyanür
I_x	x eksenine göre atalet momenti
I_p	Polar atalet momenti
i	Atalet yarıçapı
kg	Kilogram
L	Çubuk boyu
LENS	Lazer ile net şekillendirme
L_k	Kritik çubuk boyu
LOM	Tabakalı parça imalatı
M_e	Eğilme momenti
MJM	Multijet modelleme
m	Metre
mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
Nm	Newton metre
p	Hatve
PA	Poliamit
PC	Polikarbonat
PEI	Polieterimit
PETG	Polietilen tereftalat
PLA	Polilaktik asit
PP	Polipropilen
PPSF	Polifenilsülfen
PVA	Polivinil alkol
S/G	Sinyal/Gürültü
SDL	Seçici tabaka yığma

SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SGC	Katı tabaka kürleme
SLA	Fotopolimer kürleme
SLM	Seçici lazer ergitme
SLS	Seçici lazer sinterleme
STL	Standart üçgen dili
M_b	Döndürme momenti
T	Sıcaklık
T_t	Tabla sıcaklığı
T_n	Nozul sıcaklığı
t	Katman kalınlığı
TiO_2	Titanyum oksit
TPU	Termoplastik poliüretan
v	Üretim hızı
V	Hacim
W	Katman genişliği
W_A	Harcanan iş
W_e	Eğilme mukavemet momenti
W_N	Faydalı iş
W_b	Kesitin burulma mukavemet momenti
ZrO_2	Zirkonyum oksit
3D	Üç boyutlu
3DP	Üç boyutlu yazıcı
$^{\circ}C$	Santigrat derece
α	Eğim açısı
δ	Sehim
η	Vidalı mil verimi
θ	Üretim açısı
μ	Mikron
ρ	Yoğunluk
ρ'	Sürtünme açısı
σ_{φ}	Çekme mukavemeti
σ_e	Eğilme gerilmesi
τ	Burulma gerilmesi
λ	Narinlik derecesi
v_E	Ekstrüzyon hızı
v_F	Hareket hızı

1. GİRİŞ

İmalat, insanların yaşam kalitesinin iyileştirilmesi ve ihtiyaçlarının karşılanması için temel gerekliliklerden birisidir. İnsan, başlarda doğal kaynakları kullanarak bu gereklilikleri yerine getirmekte iken zamanla gereksinimler artmış, mevcut kaynaklar yetersiz geldiği için yeni kaynak arayışına ihtiyaç duymuştur. Bu gereksinimler sonucu farklı imalat yöntemleri ortaya çıkmıştır. İmalat yöntemleri ihtiyaçları karşılamak üzere sürekli gelişme göstermiştir. Bu gelişme sürecinde, bilim de etkili olmuş ve teknoloji olarak adlandırılmıştır. Teknoloji, insanlığa daha iyi bir hayat sürmesi için gerekli olan ürünleri sağlamaktadır. Dolayısıyla bu ürünlerin temini imalat yoluyla gerçekleşmektedir. Teknolojiyi mümkün kılan temel faktör imalat olarak adlandırılabilir. Teknoloji, artan ihtiyaçlar, kalite, maliyet ve zaman gibi kavramların da etkisi ile sürekli gelişerek devam etmektedir (Groover, 2010).

İmalat teknolojileri geleneksel ve geleneksel olmayan imalat teknolojileri olarak sınıflandırılabilir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan geleneksel imalat yöntemlerinde üretim hedef parçanın, kesme, delme, oyma, çıkarma ve şekillendirme gibi çeşitli işlemlerle bir hammadde üzerinden farklı şekil ve büyüklüklerde talaş kaldırılması ile oluşturulmasına dayanmaktadır. Bu teknikleri kullanan üretim, eski dönemlerde elle ve çeşitli kesici aletlerin kullanımı ile yapılmakta iken günümüzde bilgisayar kontrollü torna, freze gibi tezgâhlar sayesinde gerçekleştirilmektedir. Ancak 1980'li yıllarda alışılan imalat yöntemlerinin dışına çıkıp farklı bir metoda dayalı üretim yapan bir imalat yöntemi doğmuştur. Eklemeli imalat olarak adlandırılan bu yöntemde üretim, geleneksel imalat yöntemlerinde olduğu gibi hammadde üzerinde talaş kaldırılarak malzeme eksiltme suretiyle değil tam tersine üretimde kullanılacak hammaddenin katman katman birbiri üzerine eklenmesi ile gerçekleşmektedir. Dolayısıyla yöntem, hammaddenin efektif ve verimli bir biçimde kullanımına imkân sağlayarak, artık malzeme miktarını minimuma indirmekte, gerekli miktarda malzeme kullanımı ile hedef parça üretimi gerçekleştirilmektedir (Kruth vd., 1998; Levy vd., 2003; ASTM, 2012).

Eklemeli imalat yöntemleri doğduğu ilk yıllarda, kullanım alanı olarak nihai ürün öncesi prototip oluşturma üzerine odaklanmıştır. Prototip oluşturma, tasarımın fonksiyonelliğinin, boyutsal özelliklerinin, uygunluk kontrollerinin yapılabildiği ve oluşan hataların düzeltilebilmesine imkân sağlayan imalat aşamasından önceki ürün

geliştirme ve üretim döngüsünde gerekli olan adımı oluşturmaktadır. Bu nedenle ilk yıllarda, eklemeli imalat terimi, mühendislik ve bilim toplulukları arasında hızlı prototipleme olarak tabir edilmiştir. Hızlı prototiplemede amaç, hammaddenin imalat süreci öncesinde hızlı bir şekilde prototip veya temel modelini oluşturmaktır. Burada vurgulanan kısım modelin hızlı bir şekilde oluşturulması olmaktadır. İlk yıllarda, mevcut malzeme çeşitliliği, hızlı prototipleme yönteminin kullanımını sınırlamıştır. Ancak yıllar geçtikçe malzeme çeşitliliğindeki artış, yöntemde elde edilen sonuçların doğruluğu ve ürünlerin kalitesi, bu yöntemin daha fazla uygulamada hatta nihai ürün üretiminde kullanımını mümkün kılmış, “hızlı prototipleme” terimi yöntemin sundukları karşısında yetersiz bir terim haline gelmiştir. Bu nedenle teknik komiteler tarafından yeni bir terminolojinin benimsenmesi gerektiğine karar verilmiştir. Bunun üzerine 2009 yılında Amerikan Malzeme ve Test Derneği (ASTM) ile Amerikan Makine Mühendisleri Odası (ASME) işbirliğinde standardizasyon prosedürlerinin oluşturulmasına başlanarak “Eklemeli İmalat Teknolojileri için Standart Terminoloji” adı altında ASTM F2792 standardı oluşturulmuş ve standartlarda bu yöntem “Eklemeli İmalat” olarak adlandırılmıştır (ASTM, 2012). ASTM F2792 standardına göre Eklemeli İmalat, “Geleneksel imalat yöntemlerinin aksine üç boyutlu model verileri kullanılarak objeler üretmek için genellikle katman üzerine katman ilavesi ile malzeme eklenmesi süreci” olarak tanımlanmıştır (ASTM,2012).

Geleneksel imalat yöntemleri, imalat aşamasında hangi araçların ve işlemlerin kullanılması gerektiği, işlemlerin hangi sırayla uygulanacağı, parçanın tamamlanması için hangi ek donanımların gerekli olabileceğini belirlemek için parça geometrisinin dikkatli ve ayrıntılı bir analizini gerektirmektedir. Ancak eklemeli imalatın temel prensibi, bilgisayar destekli tasarım (CAD) verisinden üç boyutlu objelerin direkt olarak üretilmesidir. Bu nedenle, üretim aşamasında geleneksel imalat yöntemlerinde olduğu gibi herhangi bir ek ekipmana, kesici takıma ve kapsamlı bir süreç planlamasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Eklemeli imalatta üretim için, temel boyutsal detaylar, üretimde kullanılacak malzeme ve eklemeli imalat yönteminin çalışma prensibini anlamak yeterli olmaktadır.

Eklemeli imalat yönteminde süreç, üretilmesi planlanan üç boyutlu objenin katı modelinin, bilgisayar destekli tasarım programları kullanılarak veya tarama ya da farklı görüntüleme teknolojileri kullanılarak oluşturulması ile başlayıp modelin

dilimlere ayrılması ve malzemenin katman katman birbiri üzerine eklenmesiyle nihai ürünün elde edilmesi şeklinde sonlanmaktadır. Eklemeli imalat yöntemini kullanan tüm teknolojilerde üretim, katman oluşumu temellidir. Bu teknolojileri birbirinden ayıran en önemli özellikler; teknolojilerin kullandığı malzemeler, katmanların nasıl oluşturulduğu ve katman birleşiminin nasıl sağlandığıdır. Ayrıca parçanın ne kadar sürede üretilebildiği, gerektirdiği son işlem miktarı, kullanılan eklemeli imalat makinesinin baskı boyutları, üretimde kullanılan malzemenin ve işlemin maliyeti gibi faktörler de teknolojileri birbirinden ayırmaktadır (Gibson vd., 2014).

Eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılan cihazlar ve yöntemlerde kullanılan malzemeler günümüzde yoğun ilgi gören konuların başında gelmektedir. Eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılan malzemeler genel itibariyle sıvı esaslı, toz esaslı ve katı esaslı malzemeler olarak üç ana gruba ayrılabilir. Bu malzemelerin kullanımı ile üretim yapan teknolojilerin başlıcaları; Fotopolimer kürleme (SLA), Seçici lazer sinterleme (SLS) ve Eriyik biriktirme yöntemi (EBY) olarak patentlenmiş ve ticarileştirilmiştir (Fernandez vd., 2016). İlerleyen süreçte oluşan yeni fikirler ve gelişmeler ile bu teknolojiler çeşitlenmiş ve sayıları daha da artmıştır.

Eklemeli imalat teknolojileri, karmaşık yapıdaki parçaların kolaylıkla üretilebilmesi, daha az miktarda atık malzeme oranı gibi avantajlar sunmakta iken mevcut sistemlerin baskı hacimlerinin sınırlı olması ve kullanılabilir malzeme çeşidinin kısıtlı olması gibi çeşitli dezavantajlar oluşturmaktadır. Bu durum eklemeli imalat teknolojilerinde uygulama alanlarını nispeten kısıtlamaktadır. Bu dezavantajların giderilmesine yönelik yapılan çalışmalar ilk olarak malzeme çeşitliliğinin artırılması üzerine olmuştur. Teknolojilerde kullanılan temel malzemeler esas alınarak, malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi, farklı malzemelerin sahip olduğu karakteristik özelliklerin birleştirilerek daha iyi özellikler sunması amacıyla yeni malzemelerin geliştirilmesi, eklemeli imalat teknolojilerinde bu malzemelerin kullanılabilirliğinin incelenmesi üzerine yapılan çalışmalar her geçen gün artmakta ve malzeme çeşitliliği anlamında elde edilen sonuçlar, eklemeli imalat teknolojilerin kullanımının gittikçe yaygınlaşacağını göstermektedir.

Havacılık, otomotiv, medikal ve dental gibi sektörlerde, üretilecek parçalarda kullanılan malzemeler ve özelliklerinin yanı sıra üretilen ürünlerin mümkün oldukça hafif ve az parçadan oluşması maliyet tasarrufu, temin süresinin kısılması, ağırlık

kazancı, düşük yakıt sarfıyatı ve artan enerji verimliliği gibi avantajlar ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle hafif ve fonksiyonel ürünlerin üretilebilirliği bu tip sektörlerde önemli bir yere sahiptir. Ayrıca parça tasarımlarının yapılmasında topoloji optimizasyonu gibi yöntemlerin bilgisayar destekli yazılım modülleri kullanılarak parçalara uygulanması ürün tasarımında kolaylık sağlamaktadır. Eklemeli imalat teknolojileri, bu tip sektörlerde kullanılan karmaşık yapıdaki parçaların imalatını, herhangi bir takıma ihtiyaç duymadan, malzeme ve maliyet tasarrufu sağlayarak ayrıca üretim sürelerini de kısaltarak gerçekleştirmekte dolayısıyla bu tip sektörlerde geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla daha fazla tercih edilmeye başlamaktadır.

Eklemeli imalat teknolojileri kullanılarak üretilen havacılık ve uzay araçları parçalarından, oyuncak araç yapımına kadar geniş çapta ürün çeşitliliğine bakıldığında hemen hemen tüm sektörler dâhil olabilecek bir teknoloji olduğu görülmektedir. Ancak bu teknolojilerin kullanım alanını daha da yaygınlaştıracak olan kullanılan cihaz maliyetlerinin azaltılması, sınırladığı boyutsal ölçülerin ve kullanılabilecek malzeme çeşitliliğinin artırılması olacaktır (AMFG, 2019).

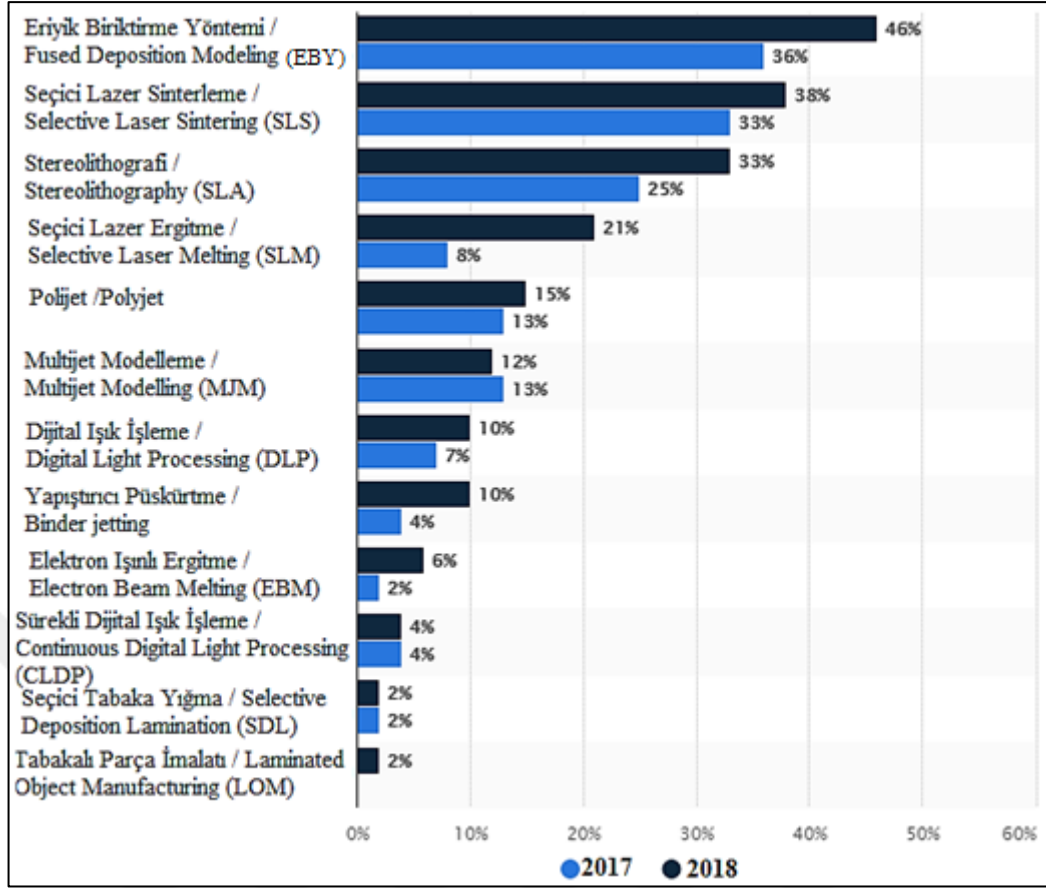
Bu tez çalışmasında, eklemeli imalat teknolojileri arasında ve termoplastik esaslı ürünlerin üretiminde en yaygın kullanılan teknoloji olan eriyik biriktirme yöntemine göre çalışan bir sistemin tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Piyasada bulunan cihazlardaki düşük baskı boyutları, tasarım esnekliğini ve cihazların uygulama alanlarını kısıtlamaktadır. Bu kısıtları önlemek amacıyla ilk olarak endüstriyel uygulamalarda kullanılabilecek boyutlarda 1000x1000x1000 mm baskı hacmine sahip bir eklemeli imalat sisteminin tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. İmalatı gerçekleştirilen büyük baskı hacimli sistemde malzeme çeşitliliğini arttırmak amacıyla karbon fiber takviyeli termoplastik malzemelerin kullanımı incelenmiştir. Eklemeli imalat sisteminde, kompozit malzemelerin kullanımına yönelik en iyi üretim parametrelerinin belirlenmesi için, malzeme özellikleri ve sistemin tasarım parametreleri dikkate alınarak farklı parametrelerin kullanımı ile deney tasarımları gerçekleştirilmiş ve ilgili parametrelere göre deney numuneleri üretilerek mekanik testleri yapılmıştır. Büyük baskı hacimli eklemeli imalat sisteminde karbon fiber takviyeli termoplastik parçaların üretimine yönelik en iyi üretim parametreleri tespit edilmiştir. Bir insansız hava aracı kaburga destek parçasının topoloji optimizasyonu

ile kütle hafifletme çalışmaları yapılmış ve tasarlanan kaburga parçası, büyük boyutlu eklemeli imalat sisteminde, en iyi üretim parametreleri kullanılarak üretilmiştir.

1.1. Eklemeli İmalat

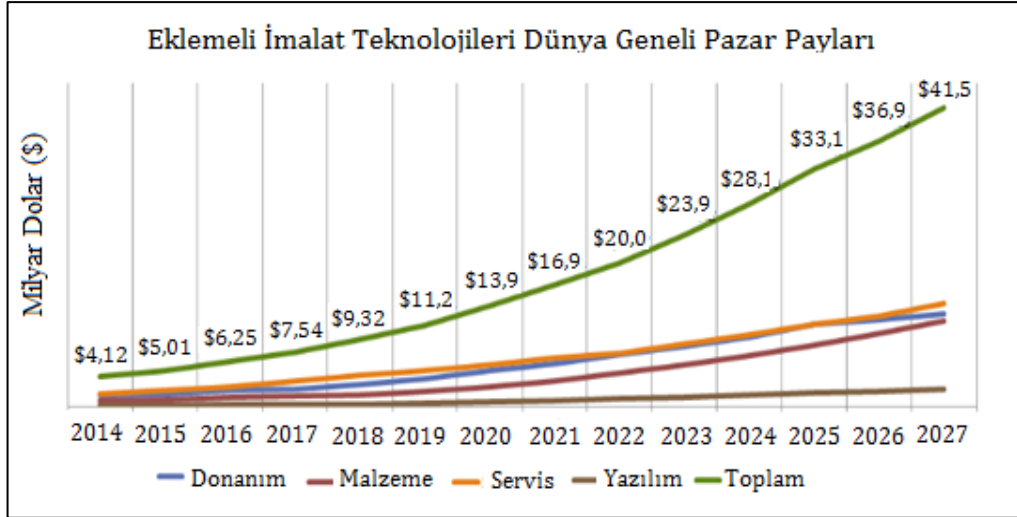
Eklemeli imalat, 1980’li yılların başında parça imalatının daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi amacıyla ortaya çıkan bir yöntemdir. İlk yıllarda bu yöntem, hızlı prototipleme adıyla anılarak, üretim öncesinde nihai ürünlerin kontrollerinin yapılabilmesi amacıyla üç boyutlu modellerinin oluşturulması için kullanılmıştır. Hızlı prototipleme teknolojisinin temelleri 1980 yılında Dr. Kodama tarafından atılmış ancak patentlenememiştir. Bu nedenle bilinen ilk patent, 1986 yılında Stereolithografi (SLA) yöntemi ile Charles (Chuck) Hull’a aittir. Charles Hull 1988 yılında 3D Systems şirketini kurarak yöntemi ticarileştirmiştir. Yöntem temel olarak, sıvı haldeki fotopolimer reçinenin lazer ışınları ile kürlenmesi sonucu katı hale getirilmesi pensibine göre çalışmaktadır. Charles Hull dünyada bilinen ilk eklemeli imalat sistemini icat ederek imalat alanında yeni bir dönem başlatmıştır. Bu dönem, 1988 yılında Carl Deckard tarafından Seçici lazer sinterleme (SLS) yöntemi ve Scott Crump tarafından Eriyik Biriktirme Yönteminin (EBY) bulunması ile devam etmiştir. İmalatta yeni bir dönem başlatan bu üç yöntem, mucitleri tarafından kurulan firmalar ile ticarileştirilmiş ve pazara sunulmuştur. Daha sonraki yıllarda, geliştirilen farklı yöntemlerin de sunulması ile eklemeli imalat teknolojilerinde bulunan yöntemler ve bu yöntemlerde kullanılan malzemeler çeşitlilik kazanmıştır (Gibson vd., 2014).

Tüm eklemeli imalat yöntemlerinde üretim esası hammaddenin birbiri üzerinde farklı prensiplerde birleştirilmesine dayanmaktadır. Bu birleşim katmanları, katmanlar ise parçayı oluşturmaktadır. Bu metoda dayalı her geçen gün farklı teknolojiler oluşmakta ve eklemeli imalatın kullanım alanı yaygınlaşmaktadır. Genel olarak mevcut eklemeli imalat teknolojilerinin her geçen yıl artan kullanım oranlarına bakıldığında, gelecekte de eklemeli imalat teknolojilerine olan ilginin süreceği ve kullanımının giderek yaygınlaşacağı söylenebilmektedir (şekil 1.1).



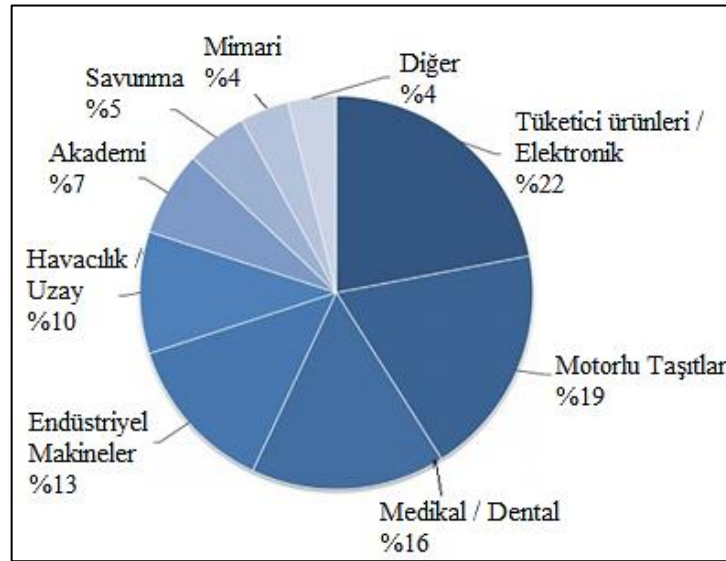
Şekil 1.1. Eklemeli imalat teknolojileri kullanım oranları (Statista, 2019)

Yapılan bir başka istatistik çalışmasında bulunan dünya genelinde eklemeli imalat teknolojilerinin market büyüklüğüne bakıldığında, 2014 yılında 4.1 milyar dolar olan yazılım, donanım, malzeme ve servis hizmetlerinin, 2018 yılında 9.3 milyar dolara ulaşarak önemli oranda artış gösterdiği ve eklemeli imalatın pazarda gittikçe büyüyen bir yer aldığı sergilenmiştir. Aynı çalışmada bulunan, gelecek 10 yıl içindeki tahmin verilerine bakıldığında ise eklemeli imalat pazarının dünya genelinde 41 milyar dolara ulaşması beklenmektedir (Şekil 1.2) (SmarTech, 2019).



Şekil 1.2. Eklemeli imalat teknolojileri dünya geneli pazar payı (SmarTech, 2019)

Günümüzde eklemeli imalat teknolojilerinin en büyük pazar payı tüketici ürünleri ve elektronik ürünlerden oluşmakta iken otomotiv, havacılık, medikal/dental sektörlerinin de eklemeli imalat uygulamalarına önem verdiği görülmektedir. Gelecek on yıl içerisinde eklemeli imalat teknolojilerinin tüm endüstrilerce kabul edileceği dolayısıyla eklemeli imalata olan ilgi ve kullanım oranlarının giderek artacağı beklenmektedir. 2025 yılına kadar havacılık, otomotiv ve medikal sektörlerinin eklemeli imalat pazarının %51'ini oluşturacağı öngörülmektedir (Verhoef vd., 2018). Eklemeli imalat teknolojilerinin uygulama alanları Şekil 1.3'te verilmiştir.



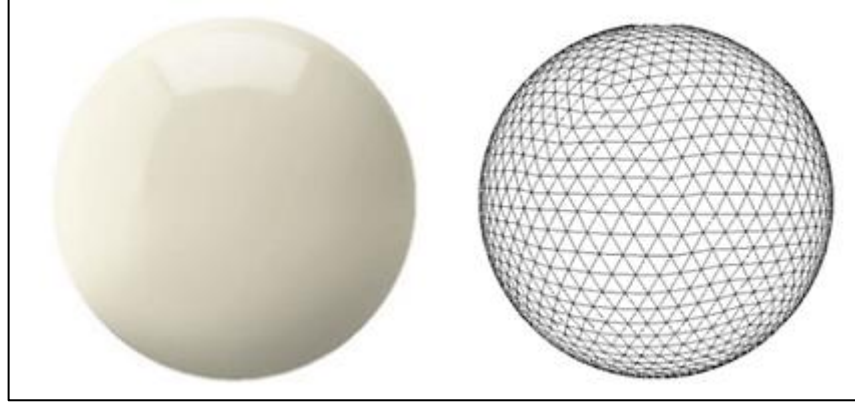
Şekil 1.3. Eklemeli imalat teknolojileri uygulama alanları ve pazar payı dağılımı (Verhoef vd., 2018)

Eklemeli imalat teknolojilerinin uygulama detaylarına bakıldığında, medikal alanda Siemens firması, işitme cihazlarında bulunan dış kovanların, kişiye özel kulak görüntüsünü laser ile taradıktan sonra oluşturulan katı model verilerinden toz yataklı sistemler kullanarak naylon ve polyamid malzemelerden üretmektedir. Günümüzde işitme cihazların dış kovanlarının %90'ının eklemeli imalat teknolojileri kullanılarak üretildiği öngörülmektedir. Align teknoloji, diş telleri üretmek amacıyla hazırladığı kalıpları stereolithografi yöntemini kullanarak üretmektedir. Nike firması futbolcular için tasarladığı Vapor Laser Talon model ayakkabılarının, sporcunun hız performansını iyileştirmek amacıyla tabanlarında oluşturdukları kafes yapıları eklemeli imalat sistemlerinde üreterek piyasaya sürmektedir. Havacılık sektöründe de eklemeli imalat teknolojisinin büyük bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir. Boeing, Airbus, Lockheed Martin, Rolls-Royce ve GE gibi şirketler bu teknolojiyi oldukça sık kullanmaya başlamıştır. Günümüzde polimer malzeme kullanılarak üretilmiş yaklaşık 20000 adet parça, Boeing uçaklarında kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra F-18 jetlerinde bulunan gövde parçaları, havalandırma kanalları gibi 150 farklı parçanın lazer sinterleme yöntemi kullanılarak üretildiği belirtilmektedir (Yılmaz, 2015). Eklemeli imalat teknolojilerinin, hava araçlarında kullanılan parça ve malzeme üretiminde etkili olmasının temel nedenleri arasında hız, ağırlık ve dayanıklılık faktörleri olmaktadır. GE tarafından üretilen yakıt enjektörlerinin eklemeli imalat teknolojileri kullanılarak, %25 oranda daha hafif ve 5 kat daha dayanıklı üretildiği belirtilmektedir. Bunun yanı sıra, SAAB insansız hava araçlarında bulunan anten kutularını eklemeli imalat teknolojilerini kullanarak üretmektedir. Renault firmasına ait formula araçlarında bulunan elektrikli gövdeler, kamera bağlantıları, aerodinamik parçalar eklemeli imalat teknolojileri kullanılarak üretilmektedir. Bentley, BMW gibi otomotiv firmaları fikstür ve kalıp üretimi yanı sıra döşeme bileşenlerinde bulunan farklı birçok parçayı eklemeli imalat teknolojilerini kullanarak üretmektedir.

Eklemeli imalatta fiziksel bir parçanın üretim süreci bazı adımlar içermektedir. Bu teknolojiler üretimde üç boyutlu model verileri kullanmaktadır. Bu nedenle ilk olarak bir katı model verisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç doğrultusunda üretilmesi amaçlanan parçanın, herhangi bir katı modelleme programı (CAD) kullanarak veya lazer ya da optik bir tarayıcı yardımı ile tersine mühendislik yaparak üç boyutlu modeli oluşturulmaktadır. Üretimi hedeflenen parçanın tasarımı yapılırken, parçanın

boyutsal sınırları, iç ve dış yüzeyleri katı modelde bulunmalıdır. Hedef parçanın üç boyutlu modeli oluşturulduktan sonra bu modelin eklemeli imalat sistemine transfer edilmesi gerekmektedir.

Veri transferini sağlamak amacıyla eklemeli imalat yöntemlerinde sıklıkla stl. dosya formatı kullanılmaktadır. Bu format 1980'li yılların sonlarında 3D Systems firmasına ait ilk eklemeli imalat teknolojisi olan SLA yönteminde, katı model verisi ile eklemeli imalat sistemi arasında veri aktarımı sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Stl formatının tam tanımı için farklı görüşler mevcuttur. Bir kısım stereolithografi tekniğinden türediğine vurgu yaparken diğer görüşler tarafından “Standart Üçgen Dili (Standart Triangle Language)” veya “Standart Tarama Dili (Standart Tessellation Language)” şeklinde ifade edilmektedir (Chakravorty, 2019). Stl formatı günümüzde Solidworks, Rhino, Fusion 360, Sketchup, Autocad, Inventor, Siemens NX gibi birçok modelleme programında kullanılan formatlardan birisidir. Katı modelleme programı ile eklemeli imalat sistemi arasında veri transferi sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Katı modelleme programında oluşturulan üç boyutlu model kayıt esnasında stl formatına dönüştürülerek eklemeli imalat sistemine aktarılmaktadır. Bu formatın amacı, hazırlanan üç boyutlu katı modelin yüzey geometrisini üçgensel bölgelere bölerek kodlamaktır. Bir başka deyişle üç boyutlu objeyi üçgensel olarak tanımlamaktır. Mantıksal bir dizi içerisinde oluşan her üçgen kendi normali ve üç noktayla temsil edilmektedir. Bu nedenle bir stl dosyası içinde, üçgenleri oluşturan noktaların koordinatları ve normalleri bulunmaktadır. Üçgensel bölgeler, katı modelin yüzey geometrisini temsil etmektedir. Modeli daha detaylı, daha iyi çözünürlükte tanımlayabilmek için üçgen sayılarının arttırılması gerekmektedir. Ancak artan üçgen sayısı aynı zamanda dosya boyutunu da önemli oranda arttırmaktadır. Stl dosya formatının kullanım kolaylığı tercih edilme oranını arttırmaktadır. Mevcut açık kaynak kodlu dosyalar veya internet ortamında bulunan birçok dosya stl uzantısı kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılması nedeniyle hemen hemen tüm üç boyutlu yazıcılar stl formatını desteklemektedir. Eklemeli imalat teknolojilerinde stl dosya formatına dönüştürme, oluşturulan katı modelin üretim parametrelerinin belirlenmesi için dilimleme programına aktarılmasından önceki adımdır (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. Üç boyutlu modelin üçgensel bölgelere ayrılması (Chakravorty, 2019)

Stl formatına dönüştürülen model daha sonra eklemeli imalat sistemine aktarılarak üretim parametreleri belirlenmektedir. Bunun için ilk olarak parçanın tabla üzerindeki pozisyonlaması belirlenmektedir. Daha sonra dilimleme programı içerisinde bulunan çeşitli üretim parametreleri belirlenerek stl dosyaları dilimlere ayrılmaktadır. Dilimleme aşaması modelin katmanlara ayrılması aşamasıdır. Bu nedenle eklemeli imalat, katman katman üretim mantığına dayanmaktadır. Genellikle ticari firmalarda bulunan eklemeli imalat teknolojilerinde firmaya ait dilimleme yazılımları kullanılmakta ve satış yapılan eklemeli imalat sistemi yanında bu dilimleme programları kullanıcıya sunulmakta iken açık kaynak kodlu üç boyutlu yazıcılar için ücretsiz erişime açık dilimleme programları bulunmaktadır. Bu programlardan bazıları; Slicer, Cura, Skeinforge, Simplify3D, Octoprint olarak verilebilir.

Eklemeli imalat teknolojisinde kullanılan makinenin özelliklerine ve hedef parçadan istenen fonksiyonlara bağlı olarak birçok farklı üretim parametresi mevcuttur. Üretilen parçada istenen hassasiyete göre katman kalınlıkları, eklemeli imalat sisteminde üretim için takım yollarının belirlenmesi için üretim açıları, oluşturulacak parçadan istenen özelliklere göre doluluk oranları, kullanılacak malzeme özellikleri ve parça baskı hızı gibi birçok farklı parametre belirlenerek model dilimlere ayrılmaktadır. Her dilim modelin ilgili kesit alanını temsil etmektedir. Belirlenen katman kalınlığına göre modelde bir dilim kalınlığı iki kesit arasındaki mesafeyi temsil etmektedir. Dilimleme yapılırken aynı zamanda takım yolları da hesaplanmaktadır. Birbirinden bağımsız ancak ardışık bir şekilde devam eden çeşitli tarama yöntemleri kullanılarak takım yolları hesaplanır. Belirli bir eksene veya modelin herhangi bir kenarına paralel veya açılı bir şekilde birbirine paralel

yollardan oluşan veya modelin dış konturları referans alınarak merkez noktasına doğru devam eden hatlardan oluşan tarama şekilleri mevcuttur. Ancak genelde hepsinin ortak noktası, dış konturu takip eden bir hatla çevrelendikten sonra arada kalan boşluğun belirlenen üretim açısında tamamlanmasıdır. Üretim tüm dilimlerin birbirini takip eden adımlarla devam etmesi ile tamamlanmaktadır. Üretim süreci bilgisayar destekli nümerik kontrollü (CNC) tezgahlarda olduğu gibi G kodları ile temsil edilmektedir. Dilimleme sonrası eklemeli imalat makinesinin üretim için izleyeceği yollar G kodlar sayesinde belirlenmektedir. Daha sonraki süreçte üretimi tamamlanan parça tabladan uzaklaştırılarak kullanıma hazır hale gelmektedir. Bazı eklemeli imalat yöntemlerinde son işlem gerekebilmektedir. Son işlem gereken durumlarda parça yüzeyi çeşitli ekipmanlarla temizlenerek kullanıma hazır hale getirilmektedir. Eklemeli imalat teknolojilerindeki genel üretim süreci Şekil 1.5'te verilmiştir.

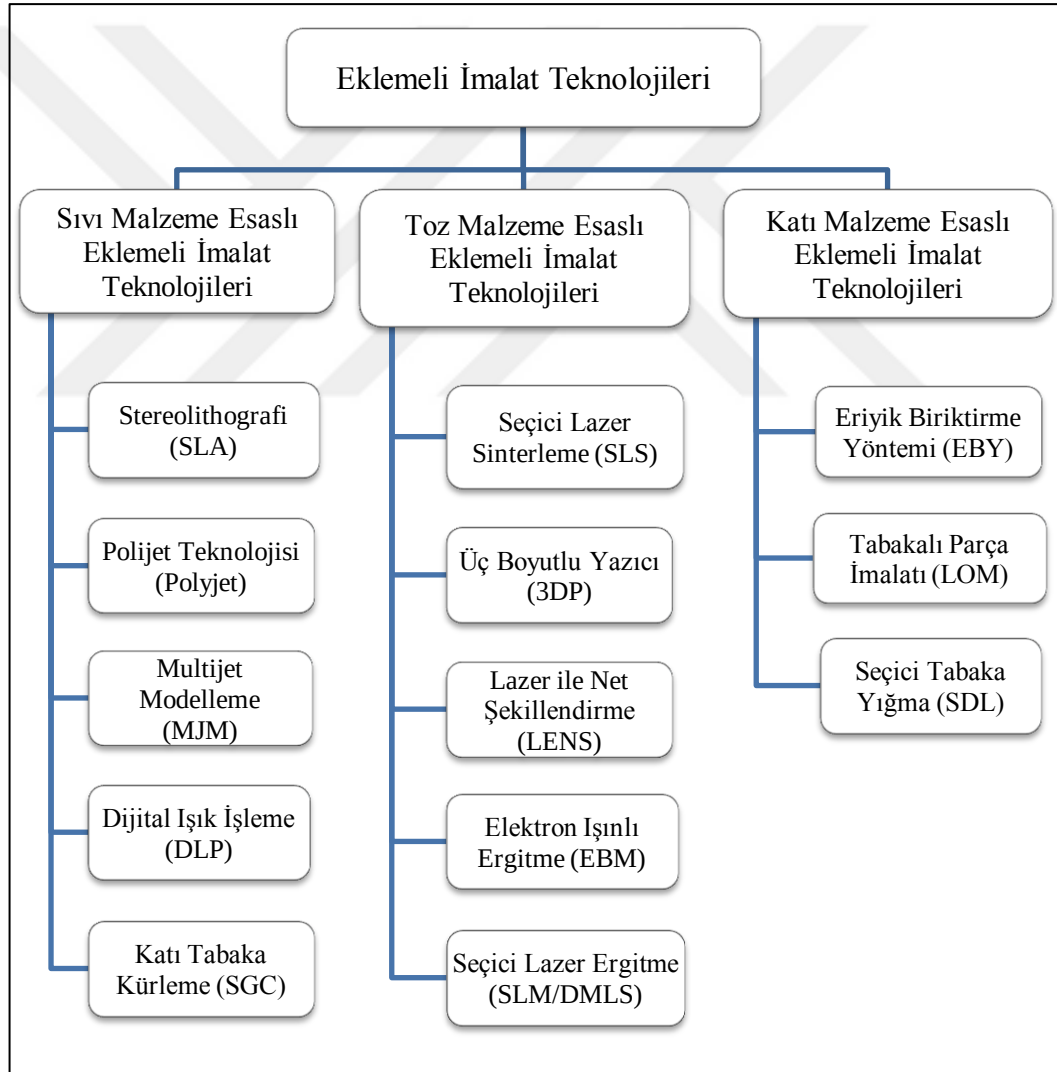


Şekil 1.5. Eklemeli imalatta üretim süreci (Gibson vd., 2014)

1.2. Eklemeli İmalat Teknolojileri

Eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılan katman oluşturma teknikleri ve kullanılan malzemeler çeşitlenerek farklı teknolojilerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Ayrıca aynı teknolojileri kullanarak farklı isimlerle ticarileştirilmiş yöntemler de bulunmaktadır. Eklemeli imalat teknolojilerini, genel olarak yöntemde kullanılan

malzemelerin başlangıç durumlarını esas alarak sınıflandırmak mümkündür. Buna göre başlangıçta sıvı esaslı malzemelerin kullanıldığı, katı esaslı malzemelerin kullanıldığı veya toz esaslı malzemelerin kullanıldığı yöntemler olarak genel bir tanımlama yapılmaktadır (Gibson vd., 2014). Farklı bir sınıflandırma ise, malzemeler yerine katman oluşumunda kullanılan teknolojiler temel alınarak yapılmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre eklemeli imalat teknolojileri; Fotopolimerizasyon, Malzeme ekstrüzyonu, Toz yataklı ergitme, Malzeme püskürtme, Yapıştırıcı püskürtme, Direkt enerji depolama, Levha laminasyonu olarak gösterilebilmektedir (Verhoef vd., 2018). Bu çalışmada eklemeli imalat teknolojileri, üretimde kullanılan malzemeler baz alınarak sınıflandırılmış ve açıklanmıştır (Şekil 1.6) (Çizelge 1.1).



Şekil 1.6. Eklemeli imalat teknolojileri

Çizelge 1.1. Eklemeli imalat teknolojilerinde kullanılan malzemeler, katman oluşturma teknikleri ve uygulama alanları

Başlangıç malzemesi	Eklemeli imalat teknolojisi	Katman oluşturma yöntemi	Yöntemde kullanılan malzemeler	Katman kalınlığı / Tolerans	Cihaz boyutları	Uygulamalar
Sıvı	Stereolithografi (SLA)	UV lazer ışını ile noktasal kürleme	Fotopolimer reçine	0.12-0.75 mm/ ±0.2 mm	1500x750x550 mm (ProX 950)	Prototip üretimi, Yüksek ısı uygulamaları, Kalıp modelleri, Yüksek detay parçaları
	Dijital ışık işleme (DLP)	Projektör ile katman kürleme	Fotopolimer reçine	0.025-0.2 mm/ ±0.05 mm	128x120x100 mm (SolFlex 650)	Prototip üretimi, Fonksiyonel parçalar, Karmaşık geometriler, Yüksek detay parçaları
	Polijet teknolojisi (Polyjet)	Nozuldan malzeme püskürtme	Fotopolimer reçine	0.01-0.03 mm/ ±0.2 mm	260x260x200 mm (Objet Eden260V)	Prototip, Yüksek detay parçaları, Kuyumculuk uygulamaları, Kalıp modelleri
Toz	Seçici lazer sinterleme (SLS)	Lazer ışını ile eritme	Termoplastik, seramik, kompozit	0.12 mm	700x380x380 mm (Eos P810)	Prototip üretimi, Fonksiyonel parçalar, Kalıp üretimi, Yüksek ısı uygulamaları, Medikal ve Havacılık uygulamaları
	Elektron Işınli Ergitme (EBM)	Elektron ışınıyla eritme	Metal	0.014 mm	350x350x380 mm (Arcam Q20 Plus)	Prototip üretimi, İşlenebilir parçalar, Fonksiyonel parçalar, Medikal ve Havacılık uygulamaları
	Direkt metal lazer sinterleme/ Seçici lazer eritme (DMLS/SLM)	Lazer ışını ile eritme	Metal	0.09 mm	400x400x400 mm (Eos M400)	Prototip üretimi, Fonksiyonel parçalar, Kalıp üretimi, Yüksek ısı uygulamaları, Medikal ve Havacılık uygulamaları, İşlenebilir parçalar
	Üç boyutlu yazıcı (3DP)	Bağlayıcı püskürtme	Polimer, metal, seramik	0.02mm	508x508x305 mm (Mimaki 3DUJ-553)	Prototip, Konsept modeller, Tüketici ürünleri, renkli endüstriyel tasarım uygulamaları
Katı	Eriyik biriktirme yöntemi (EBY)	Ekstrüzyon ve yığma	Termoplastik, kompozit	0.1-0.5 mm/ ±0.1 mm	914x609x914 mm (Fortus 900mc)	Prototip, Fonksiyonel parçalar, Kalıp üretimi, Detay gerektiren küçük parçalar, Yüksek ısı uygulamaları,
	Tabakalı parça imalatı (LOM)	Tabakaların yapıştırıcı ile bağlanması	Kağıt, Plastik	0.1-1.0 mm/ ±0.1 mm	762x610x610 mm (SLCOM-1)	Prototip, Detay parçaları, Kalıp modelleri

Sıvı esaslı eklemeli imalat sistemlerinde malzemenin sisteme gelişi sıvı haldedir. Işık, lazer ya da ısıyla malzemenin kürlenmesi sonucu katı tabaka oluşturulmaktadır. Bu kategoriye giren başlıca sistemler; Stereolithografi (SLA), Polijet teknolojisi, Dijital ışık işleme (DLP) ve Katı tabaka kürleme (SGC) olarak verilebilmektedir.

Stereolithografi, tarayarak ışıkla kürleme tekniğini kullanarak üretim gerçekleştiren bir eklemeli imalat teknolojisidir. Bu teknoloji, 1988 yılında 3D systems firması tarafından ticarileştirilerek kullanıcıya sunulan tarihteki ilk eklemeli imalat teknolojisi olarak bilinmektedir. Teknolojide, sıvı esaslı ve termoset özellikli epoksi veya akrilat tipi fotopolimer reçineler, mor ötesi (ultraviyole) ışınlar altında kimyasal tepkime göstererek katı hale getirilmektedir. Ultraviyole ışınlar üretim aşamasında katı modelde belirlenmiş bölgelere noktasal olarak uygulanması sonucu katmandaki belirli bölgeler kürlenerek katılaştırılmaktadır. Lazer ışını platform üzerinde x-y konturlarını tarayarak sıvı reçineyi katılaştırmaktadır. Katman katılaşması gerçekleşikten sonra üretim platformu katman kalınlığı kadar aşağı inerek yeni katmanın lazer ışını ile kürlenmesi sağlanmaktadır. Stereolithografi yönteminde katman kalınlıkları kullanılan makinenin özelliklerine de bağlı olmakla birlikte 50-100 mikron arasında değişmektedir. Katılaşma sırasında sıvı reçineyi oluşturan monomer karbon zincirleri, ultraviyole ışın etkisiyle aktive edilmekte ve birbirleri arasında güçlü kovalent bağlar oluşturarak bağlanmaktadır. (Gibson vd., 2014). Yöntemde destek yapılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Parçanın tabla üzerindeki konumu desteğin yerini ve miktarını belirlemektedir. Destek yapılarında kullanılan malzeme parça üretiminde kullanılan malzeme ile aynıdır. Üretim sonrası destek yapıları parça üzerinden el ile çıkarılmaktadır. Destek yapıları parça yüzeyinde belirli izler bırakmaktadır bu nedenle görsel olarak kritik destek yapılarıyla temas etmemesi için parça konumlamasının dikkatli bir şekilde belirlenmesi gerekir (Gebhardt, 2011). SLA teknolojisinde meydana gelen en büyük problemlerden biri üretilen parçalarda çarpılma oluşmasıdır. Fotopolimer reçineler ışık kaynağına maruz kaldığında bir miktar çekme meydana gelmektedir. Çekme büyük oranda meydana geldiğinde ise yeni katman ile önceden katılaşan katman arasında büyük iç gerilmeler meydana gelerek parçaların çarpılmasına neden olmaktadır. Bu teknoloji ile üretilen parçalarda iyi yüzey kalitesi, yüksek boyutsal hassasiyet ve yüksek ayrıntıya sahip parçalar üretilmektedir.

Dijital ışık işleme (DLP) yönteminde, SLA yönteminde olduğu gibi fotopolimer reçineler kullanılarak kürlleme işlemi yapılmaktadır. Aralarındaki en büyük fark kürlleme işlemi için SLA yönteminde ultraviyole ışın kullanılırken, Dijital ışık işleme teknolojisinde bir ışık kaynağı olarak projektör kullanılmaktadır. Stereolithografi yönteminde noktasal kürlleme yapılırken, DLP yönteminde ışık kaynağı tek geçişte bütün fotopolimer reçine üzerine uygulanmaktadır. Tek geçişte tüm katman katılaştığı için hızlı kürlleme gerçekleştirilmektedir. Yöntemde üretilen parçalar SLA yöntemiyle benzer özelliklere sahiptir bu nedenle endüstriyel tasarım ürünleri, döküm, dental, hassas ve yüksek detay gerektiren uygulamalarda kullanılabilir.

Polijet teknolojisi, Stereolithografi yöntemini temelinde barındıran ancak mürekkep püskürtmeli baskı tekniklerini de içeren kombine bir teknolojidir. Yöntemde katmanları oluşturmak için malzeme püskürtten nozullar bulunmaktadır. Üretim esnasında oluşturulacak katman için üretim tablası üzerine nozullardan fotopolimer reçineler püskürtülmektedir. Püskürtülen reçineler eş zamanlı olarak ultraviyole ışını ile kürlenerek katılaşmakta ve katman oluşumu gerçekleşmektedir (Çelik vd., 2013). Katman yüzeyi katılaştırdıktan sonra üretim tablası z ekseninde bir katman kalınlığı kadar hareket ederek sonraki katman için nozullardan malzeme püskürtülmektedir. Yöntemde kullanılan makine özelliklerine bağlı olarak 10-30 mikron katman kalınlıkları kullanılabilir. Polijet teknolojisi ince detayda parçaların, döküm kalıplarının, medikal ürünlerin, karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesinde kullanılabilir (Poligon, 2019).

Toz esaslı eklemeli imalat sistemlerinde kullanılan toz malzeme, genellikle katı halde olmasına rağmen tozun tanecikli yapıdaki formundan dolayı katı esaslı yöntemlerden ayrılmaktadır. Bu teknolojilerde toz taneciklerinin birbirine tutunması, tanelerin temas alanlarının eritilmesiyle ya da bir bağlayıcı veya yapıştırıcı eklenmesi ile sağlanmaktadır (Çelik vd., 2013). Bu teknolojilerden bazıları; Seçici lazer sinterleme (SLS), Üç boyutlu yazıcı (3DP), Lazer ile net şekillendirme (LENS), Seçici lazer ergitme (SLM)/Direkt metal lazer sinterleme (DMLS) ve Elektron ışınli ergitme (EBM) olarak verilebilir.

Seçici lazer sinterleme yöntemi 1992 yılında DTM firması ile ticarileştirilerek kullanıcıya sunulmuştur. Yöntemde paslanmaz çelik, titanyum, nikel, krom, nikel krom, kobalt gibi metal tozlarının yanı sıra poliamit, polistren gibi plastik malzeme

tozları veya seramik tozları kullanılabildiği gibi alüminyum katkı poliamit, karbon katkı poliamit gibi kompozit tozları da kullanılabilmektedir. Seçici lazer sinterleme yönteminde, tüm eklemeli imalat sistemlerinde olduğu gibi katı model verisi dilimlenerek katmanlara ayrıştırılmakta ve sinterleme işlemini yapacak olan CO₂ lazerin hareket yolu belirlenmektedir. Toz malzeme, bir mekanizma ile ince ve düzlemsel halde katman kalınlığı kadar üretim tablası üzerine serilmektedir. Yöntemde kullanılan katman kalınlıkları kullanılan makine özelliklerine bağlı olarak 100-120 mikron aralığındadır. Serili toz tabakası üzerinde belirlenen bölgeler lazer ışını ile taranmaktadır. Lazer ışını tozları sinterleyerek birbiri ile kaynaşmasını sağlar ve bu sayede katman oluşumu gerçekleşmektedir. Katman oluşumu sonrası üretim platformunun katman kalınlığı kadar z ekseninde aşağı yönlü hareketiyle yeni toz tabakası platform üzerine serilmekte ve lazer ışını ile belirlenen bölgeler tekrar sinterlenmektedir. Süreç parça oluşana kadar tekrar etmektedir (Xometry, 2019). Sinterlenmemiş bölgelerde bulunan tozlar parça üzerinde destek oluşturduğu için ek destek yapılarına ihtiyaç duyulmamaktadır. Üretimi tamamlanan model, üretim tablası içinde sinterlenmemiş tozlarla birlikte bulunmaktadır. Bu nedenle parça üretim tablasından çıkarılırken, tozlardan vakum yardımıyla temizlenmektedir. Yöntemde mukavemetli ve fonksiyonel ürünlerin üretimi mümkündür. Ancak üretilen parçalarda gözenekli bir yüzey meydana gelmekte ve ek kaplama işlemleri ile gözenekler kapatılabilmektedir. Küçük çaplı üretimler için ideal bir eklemeli imalat teknolojisidir (Btech, 2019).

Seçici lazer ergitme ya da direkt metal lazer sinterleme olarak adlandırılan teknolojiler seçici lazer sinterleme yönteminin alt kategorisi olarak kabul edilmektedir. Yöntemlerde mikron seviyesindeki metal tozları yüksek güçte lazer ışını ile sinterlenmekte veya eritilmektedir. Direkt metal lazer sinterleme yönteminde neredeyse tüm metal alaşımları kullanılırken seçici lazer ergitme yönteminde belirli metal tozları kullanılmaktadır. Direkt metal lazer sinterleme yönteminde üretim 20-100 mikron katman kalınlıklarında gerçekleştirilir. Üretim haznesine beslenen metal tozu yüzey boyunca hareket eden lazer ile sinterlenerek birbirine bağlanmaktadır. Seçici lazer ergitme yönteminde ise tozların eritilmesi ile yapışma sağlanmaktadır. SLM yönteminde tozların tamamen erimesi için yüksek enerjiye ihtiyaç duyulduğundan üretilen parçaların yoğunluğu daha yüksek olmaktadır (CustomPartNet, 2019).

Üç boyutlu yazıcı teknolojisi, tarihte ilk olarak Massachusetts Teknoloji Enstitüsü tarafından geliştirilen eklemeli imalat teknolojilerinden birisidir. Günümüzde eklemeli imalat genel olarak üç boyutlu üretim ve üretimde kullanılan makineler de üç boyutlu yazıcı adıyla anıldığı için bu teknoloji farklı teknolojilerle karıştırılabilmektedir. Üç boyutlu yazıcı teknolojisi tozların bağlanması mantığına göre seçici lazer sinterleme yöntemine benzer şekilde üretim yapmaktadır. Ancak bu yöntemde malzemeler lazer yerine bir yazıcı kafasından püskürtülen sıvı yapıştırıcı sayesinde birbirine bağlanmaktadır. Üç boyutlu yazıcı teknolojisinde üretim, üretim tablası üzerine serilen plastik, metal, seramik veya üretimde kullanılması planlanan tozların yazıcı kafasından dilimleme programında belirlenen alana yapıştırıcı püskürtülerek birbirine bağlanması ile gerçekleştirilmektedir. İlk katman oluşumu sonrası üretim tablası katman kalınlığı kadar z ekseninde aşağı yönde hareket ederek, katman kalınlığı kadar toz malzeme, besleyici yardımıyla üretim tablası üzerine beslenmekte ve yazıcı kafasından gerekli bölgelere yapıştırıcı püskürtülmektedir. Üretilmesi planlanan parça katman katman tozların birbirine yapışması ile tamamlanmaktadır. Üç boyutlu yazıcı teknolojisi genellikle hızlı prototipleme yada konsept modellerin üretiminde kullanılmaktadır (CustomPartNet, 2019).

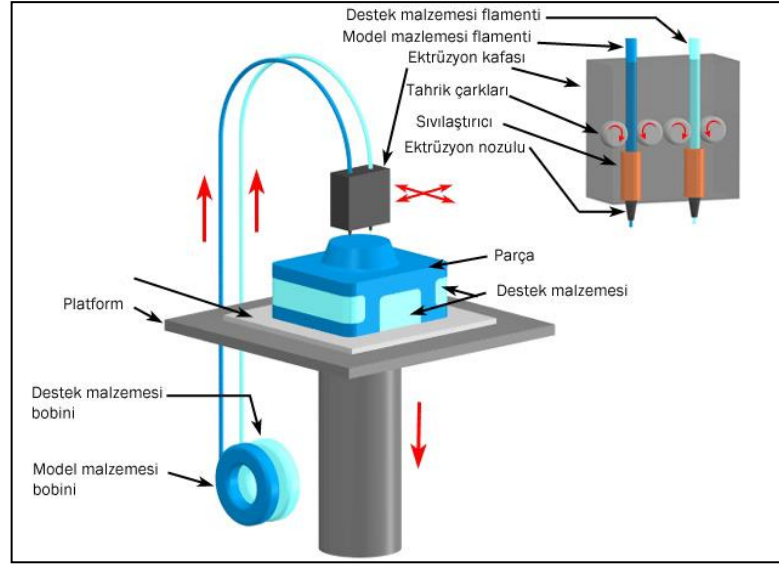
Katı esaslı eklemeli imalat sistemlerinde kullanılan malzemeler toz haricindeki rulo, filament halinde tel, granül formundaki katı malzemelerden oluşmaktadır [36]. Bu teknolojilerde üretim, katı formadaki malzemelerin eriyik hale getirilerek yapışması, kesilerek bir bağlayıcı yardımıyla yapıştırılması ya da birleştirilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Katı esaslı malzemeler kullanılarak üretim yapan teknolojilerden bazıları; Eriyik Biriktirme Yöntemi (EBY), Tabakalı Parça İmalatı (LOM) ve Seçici Tabaka Yığılma (SDL) olarak gösterilebilmektedir. Bu bölümde eklemeli imalat teknolojilerinde sıvı, katı ve toz esaslı malzemelerin kullanıldığı başlıca teknolojiler incelenmiştir.

Tabakalı parça imalatı teknolojisi tabaka halindeki malzemelerin kesilmesi ve yapıştırılması mantığına dayanan bir eklemeli imalat yöntemidir. Yöntemde genellikle tabaka halinde bağlayıcı kaplı kağıt, plastik veya metal tozu emdirilmiş malzemeler kullanılmaktadır. Yöntem diğer eklemeli imalat teknolojilerinde olduğu gibi katı model verilerinin dilimlenmesi ile üretim yapmaktadır. Bağlayıcı bulunan tabaka şeklindeki malzemeler üretim platformuna beslenir ve önceden ısıtılmış

silindir, tabakaların üzerine basınç uygulayarak birbirine yapışmasını sağlamaktadır. Yapışma sağlandıktan sonra model geometrisine göre lazer ışını veya kesici bir bıçak yardımıyla katmana tekabül eden kesitteki profil elde edilecek şekilde kesilmektedir. Kesme işlemi tamamlandıktan sonra üretim platformu z ekseninde bir katman kalınlığı kadar aşağıya inerek yeni katman tabakası serilmekte ve süreç aynı şekilde parça tamamlanana kadar devam etmektedir (Gebhardt, 2011). Katman kalınlıkları yöntemde kullanılan makinenin özelliklerine bağlı olarak genellikle 0.1-0.5 mm aralığında bir kağıt kalınlığı kadardır. Tabakalar parça geometrisine göre kesildikten sonra artık malzeme üretim platformunda kalarak parçaya destek görevi görmektedir. Parça üretimi tamamlandığında dikdörtgen bir blok içerisinde olan parçadaki destek malzemeleri temizlenmektedir. Yöntemde malzemenin kolay ve ucuz temin edilebilirliği avantaj sağlamaktadır. Ayrıca büyük hacimli parçaların yüksek hızda üretilebilmesi mümkün olmaktadır. Tasarım ve parametrelerin doğru seçilmesiyle işlevsel modellerin üretimi mümkündür (Revolvy, 2019).

1.2.1. Eriyik biriktirme yöntemi

Eriyik biriktirme yöntemi, eklemeli imalat teknolojileri tarihindeki ilk yöntemlerden birisidir. 1988 yılında Scott Crump tarafından geliştirilen teknoloji, Stratasys isimli firmayı kurmasıyla ticarileştirilmiştir. Eriyik biriktirme yönteminde üretim, termoplastik esaslı malzemelerin özelliklerine göre yarı eriyik hale gelene kadar ısıtılması ile gerçekleşmektedir. Yöntemde kullanılan, makara üzerine sarılı halde olan ince tel şeklindeki termoplastik malzemeler filament olarak adlandırılmaktadır. Yöntem genel olarak termoplastik esaslı filament formundaki malzemelerin bir ısıtıcı bloktan geçerek yarı eriyik hale getirilmesi ve ısıtıcı blok ucunda bulunan nozul uçtan belirlenen oranlarda üretim tablasına aktarılması ile gerçekleşmektedir. Tüm eklemeli imalat teknolojilerinde olduğu gibi eriyik biriktirme yönteminde de üretim katı model verileri kullanılarak yapılmaktadır. Parça dilimlendikten sonra, yarı eriyik haldeki malzeme ekstruder tarafından x ve y eksenlerinde parça geometrisini oluşturacak şekilde üretim tablasına aktarılmaktadır. İlk katman kalınlığında parça geometrisi oluşturulduktan sonra üretim tablasının bir katman kalınlığı kadar aşağı inmesi ya da ekstruderin bir katman kalınlığı kadar yukarı çıkmasıyla yeni katman oluşturulmaktadır. Malzemenin katman katman nozul uçtan tablaya aktarılmasıyla parça oluşana kadar süreç devam etmektedir (Şekil 1.7).



Şekil 1.7. Eriyik biriktirme yöntemi (Tian vd., 2016)

Üretimde tabla ya da ekstruder hareketli olabilmektedir. Tabla hareketli olan sistemlerde ekstruder olarak adlandırılan yazıcı kafası x ve y eksenlerinde hareket ederken, üretim tablası z ekseninde katman kalınlıkları kadar aşağı hareket etmektedir. Ekstruderin hareketli olduğu sistemler ise kendi içinde ikiye ayrılmaktadır. Bu sistemler, tablanın sabit olduğu ve tablanın hareketli olduğu sistemler olarak tanımlanabilmektedir. Tablanın sabit olduğu sistemlerde, üretim tablası hareketsiz iken ekstruder, x, y ve z eksenlerinde hareket etmektedir. Sabit olan üretim tablası üzerine termoplastik malzeme x ve y eksenlerinde geometriyi oluşturacak şekilde kesit alanını oluşturduktan sonra bir katman kalınlığı kadar yukarı çıkarak üretime devam etmektedir. Tablanın hareketli olduğu sistemlerde ise tabla tek ekseninde, genellikle y ekseninde hareket ederken, ekstruder x ve z eksenlerinde hareket etmektedir.

Eriyik biriktirme yönteminde üretim bir nozul uçtan termoplastik malzemenin üretim tablasına aktarılmasıyla gerçekleşmektedir. Üretimde kullanılan nozul uçlar genellikle 0.1-1.2 mm aralığındadır. Üretimde kullanılan nozul uçların çaplarına göre katman kalınlıkları ayarlanabilmekte ve üretilecek ürünlerin yüzey kalitesi belirlenebilmektedir. Katman kalınlıkları uygulamada genellikle nozul çapının %25 ile %80 aralığında belirlenmektedir (Griffey, 2014). Ancak uygulamada kullanılan katman kalınlıkları çoğunlukla nozul çapının yarısı baz alınarak oluşturulmaktadır. Bu nedenle eriyik biriktirme yönteminde kullanılan katman kalınlıkları genellikle 0.05 ile 0.6 mm arasında değişmektedir. Dilimleme programlarında, belirlenen

katman kalınlıklarına göre eritilecek malzeme miktarı, ekstrüzyon katsayısı olarak adlandırılan bir parametre ile ayarlanabilmektedir. Bu parametrede belirlenen katsayıya göre akış oranı belirlenerek, nozul uçtan malzeme üretim tablasına aktarılmaktadır. Yöntemde katman kalınlığı, üretim tablasına aktarılan bir katmanın yüksekliğini ifade etmektedir. Katman genişliği ise üretim tablasına aktarılan bir katmanın yatay olarak genişliğini ifade etmektedir. Katman genişlikleri de katman kalınlıkları gibi yöntemde kullanılan nozul uçların çapları ile orantılı olarak değişmektedir. Genellikle bir katman genişliği yöntemde kullanılan nozul ucunun çapı kadar olmaktadır. Yöntemde kullanılan nozul uçların çoğu yüksek ısı iletimine sahip olan pirinç malzemeden yapılmaktadır. Yöntemde kullanılan malzemeler termoplastikler olduğu için pirinç malzemeye sahip nozullara herhangi bir zarar vermeden hızlı bir şekilde eriyerek akmaktadır. Ancak günümüzde işlevsel ürünlerin oluşturulmasında fiber takviyeli termoplastik esaslı malzemelerde üretilmeye başlamıştır. Fiber takviyeli termoplastikler, kullanılan nozul uçtan akıtılırken fiber içeriklerinden dolayı zamanla nozul ucunun deforme olmasına ve üretilen parçalarda boyutsal hassasiyetin düşmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle fiber takviyeli termoplastik malzemelerle paslanmaz çelik veya sertleştirilmiş çelik malzemelerden yapılan nozul uçlar kullanılabilir. Bu malzemeler daha sert bir yapıya sahip olduklarından pirinç malzeme kadar kolay deforme olmamaktadır. Ancak bu tür malzemeler pirinç malzeme kadar hızlı ısınmadığından üretim öncesi istenen sıcaklık aralığına gelmesi için belirli bir süre beklemek gerekmektedir.

Eriyik biriktirme yönteminde kullanılan malzemeler filament formuna getirilmiş olan termoplastik esaslı polimerlerdir. Bu malzemeler ekstrüzyon yöntemiyle üretilmektedir. Ekstrüzyon yönteminde üretim, termoplastik malzemelerin granül halinde sisteme beslenmesi, sistemde malzemelerin kimyasal özelliklerine göre belirli sıcaklık aralıklarında ısıtılarak eritilmesi ve eriyik malzemenin bir vidalı mil yardımıyla sistemin ucundaki nozula aktararak nozul ucun çapına göre sistemden iplik şeklinde çıkması ile gerçekleşmektedir (Aydın vd., 2018). Eriyik biriktirme yönteminde kullanılan filamentler genellikle 1.75 mm ile 2.85 mm arasında değişmektedir (Raja vd., 2007). Termoplastik malzemeler tekrar ısıtılarak eritilebilmekte ve filament formuna getirilerek tekrar kullanılabilir. Eriyik biriktirme yönteminde birçok termoplastik malzeme üretimde kullanılabilir. Uygulamada sıklıkla kullanılan termoplastik malzemeler; Akrlonitril bütadien stiren

(ABS) ve Polilaktik asittir (PLA). Bu malzemelerin yanı sıra; Poliamit (PA), Polikarbonat (PC), Polivinil alkol (PVA), Polietilen tereftalat (PETG), Polipropilen (PP), Polifenilsülfen (PPSF), Termoplastik poliüretan (TPU) gibi birçok termoplastik malzeme kullanılabilir.

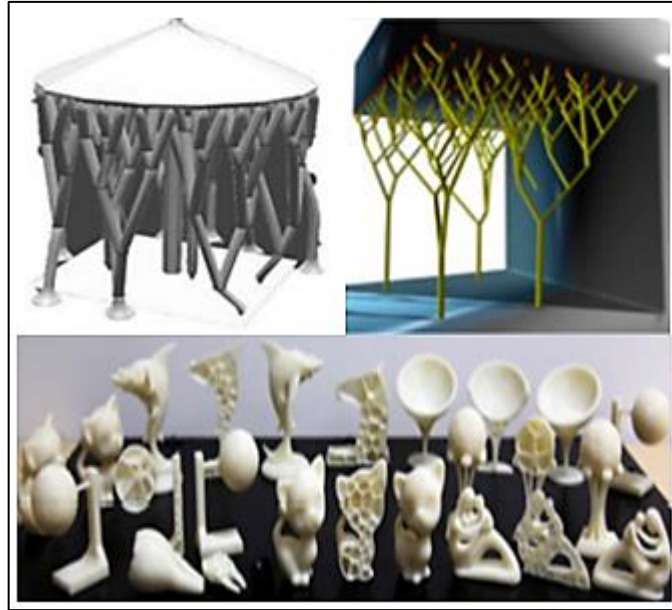
Eklemeli imalat teknolojilerinde gerekli görüldüğünde ilave destek yapıları kullanılarak üretim gerçekleştirilmektedir. Destek yapıları, parça tasarımlarına göre özellikle eğimli ve delikli bölgelerin veya parçanın zayıf olduğu bölgelerin üretimi esnasında devreye girerek, oluşabilecek hataları önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Üretim sonrası destek yapıları parçadan çeşitli yollarla uzaklaştırılarak nihai ürün elde edilmektedir (Das vd., 2015). Eriyik biriktirme yönteminde de destek yapıları kullanılabilir. Genellikle 45° üzerindeki açılarda ve alt katman bulunmayan boşluklu yapılarda eriyik haldeki termoplastik malzemede yerçekimi etkisiyle malzeme sarkması gibi sorunlar meydana gelmekte dolayısıyla parçanın hatasız bir şekilde katman katman imalatı zorlaşmaktadır (Jiang vd., 2018).

Eriyik biriktirme yönteminde kullanılan ekstruder sistemine bağlı olarak destek yapıları iki farklı şekilde oluşturulmaktadır. Tek ekstrudere sahip sistemlerde destek yapıları gerçek parça ile aynı malzemeden oluşmaktadır. Bu durumda parça üretimi tamamlandıktan sonra destek yapılarını parçadan uzaklaştırmak için kırma, kesme gibi işlemler yapılması gerekmektedir. Eriyik biriktirme yönteminde parça imalatı sürekli bir süreçtir. Parça imalatı esnasında üretimi belirli bir süre bekletme veya durdurma gibi bir işlem yapılamamaktadır. Süreç devamlı olduğu için parça oluşana kadar makaradan ekstrudere sürekli olarak filament beslemesi yapılmaktadır. Bu nedenle tek ekstruderli sistemlerde tek bir nozul ucu bulunduğu için tek bir malzeme eriyik hale getirilerek hem destek yapısı hem de hedef parça üretilmektedir. Çift ekstruderli sistemlerde ise sistemde iki ayrı ekstruderin bulunması, aynı esnada iki farklı ürünün üretilmesine imkân tanımaktadır. Sistemde bulunan her ekstruder birbiri ile eş zamanlı olarak çalışmakta ve destek malzemesi gereken yerlerde ikinci ekstruder sayesinde nihai ürüne destek oluşturulmaktadır.

Destek yapıları parça üretimi için gereken süreyi ve atık malzeme miktarını önemli oranda artırmaktadır. Bu nedenle destek yapıları oluşturulurken genelde iki yöntem kullanılır. Bu yöntemlerden biri, orjinal parçayı değiştirmeden kolay ayrılabilir veya su, limonen, izopropil alkol, potasyum hidroksit çözeltisi gibi çözücüler içinde

    nebilir destek yapıları oluşturulması ya da parçanın tabla üzerindeki konumunun değiştirilmesidir. Parça oryantasyonunun üretim tablası üzerindeki planlaması, destek ihtiya ını azaltabilmekte, yüzey kalitesi, üretim süresi ve maliyet üzerinde etkili olmaktadır. Diğer yöntemde ise parça geometrisi topoloji optimizasyonu yapılarak iyileştirilebilmekte ve destek ihtiya ı duyulmayan geometriler oluşturulabilmektedir (Leary vd., 2014).

Destek yapısına ihtiyaç duyulan uygulamalarda, bu yapılar, parçaların çarpılmasını önleyecek, hedef parça ile teması mümkün olduğunca az olacak, üründen kolay ayrıştırılabilecek şekilde tasarlanmalı, ürün geometrisine zarar vermeden üretim süresi, malzeme tüketimi ve maliyeti azaltabilecek şekilde optimize edilmelidir (Jiang vd., 2018). Destek yapılarının oluşturulmasında, düşük hacim oranları nedeniyle genellikle gözenekli yapılar tercih edilmektedir. Gözenekli yapıların boşluklu yapıda olması fazla malzeme tüketimini azaltmakta ve gerçek parça ile olan temas yüzeyini azaltarak kolay ayrıştırılabilmesini sağlamaktadır. Eriyik biriktirme yöntemine uyarlanabilen, bal peteği destekler (Lu vd., 2014), dalsı yapıda destekler (Wei vd., 2016), ağaç benzeri dendroid destekler (Vanek vd., 2014), köprü destekler (Shen vd., 2016) kullanılarak hedef parça ile olan temas yüzeyi azaltılabilmektedir (şekil 1.8). Eriyik biriktirme yönteminde destek yapılarını Slicer, Cura gibi dilimleme programlarını kullanarak oluşturmak mümkün olmaktadır.



şekil 1.8. Eriyik biriktirme yönteminde destek yapıları (Lu vd., 2014; Vanek vd., 2014)

SLS, SLA gibi eklemeli imalat teknolojilerinde aynı anda çoklu üretim yapmak mümkündür. Eş zamanlı olarak çoklu üretim süre ve maliyet üzerinde etkili olurken EBY yönteminde aynı parçanın eş zamanlı olarak çoklu üretimi süre ve maliyet üzerinde etki etmemektedir ve bir ürünün üretim süresi, artan ürün sayısı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Ancak yöntemin kolaylığı ve düşük maliyetli olması, üretim için ek ekipmana ihtiyaç duymaması, yöntemde kullanılabilen malzeme çeşitliliğinin fazla olması, ek işlem ihtiyacının az olması, üretilen ürünlerde mekanik özelliklerin iyi olması yöntemin kullanım alanını yaygınlaştırmaktadır. Eriyik biriktirme yöntemi günlük hayatta ihtiyaç duyulan kişisel ürünlerin üretilmesinde kullanılabildiği gibi gıda, giyim, otomotiv, uçak, sağlık gibi farklı sektörlerde de son kullanıma uygun parçaların üretilmesinde tercih edilmektedir. Yöntemin avantaj ve dezavantajları genel olarak aşağıda maddeler halinde belirtilmiştir.

Avantajlar:

- Karmaşık geometrilerin üretilebilirliği
- Tasarım özgürlüğü ve tasarım değişikliğinin üretime kolay adapte edilebilmesi
- Üretimde parça bileşen sayısının azaltılabilmesi
- Geleneksel yöntemlere kıyasla üretim kısıtları olmadan direkt üretim
- Erişim ve kullanım kolaylığı
- Düşük atık malzeme oranları

Dezavantajlar:

- Düşük üretim hızları
- Yüksek makine ve malzeme maliyeti
- Farklı birçok üretim parametresinin bulunması sebebiyle üretim öncesi kapsamlı bilgi gereksinimi
- Tek seferde tek parça üretimi, seri üretim elverişli olmama
- Küçük baskı hacimleri, kısıtlı parça boyutları

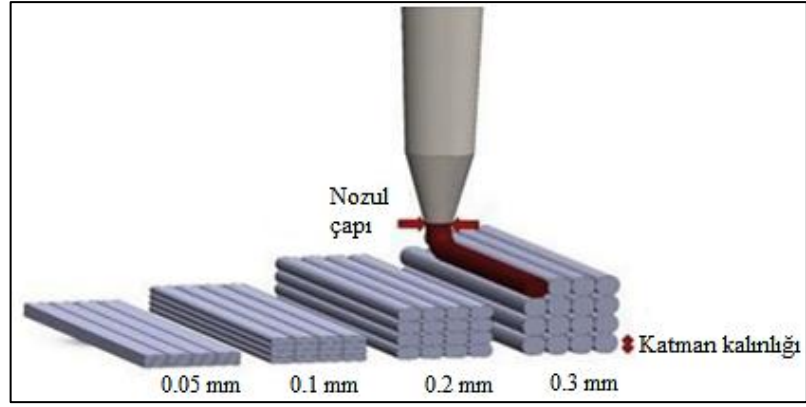
1.2.2. Eriyik biriktirme yönteminde üretim parametreleri

Eriyik biriktirme yönteminde üretilen parçalarda boyutsal hassasiyet, yüzey kalitesi ve çekme mukavemeti en önemli karakteristik özellikler olarak kabul edilmektedir (Galantucci vd., 2009). Parça için karakteristik olan özellikler, süreç veya üretim parametreleri olarak adlandırılan parametreler ile belirlenmektedir. Üretim parametrelerinin başlıcaları; üretim açısı, nozul sıcaklığı, doluluk oranı, katman kalınlığı, kabuk genişliği, üretim hızı olarak verilebilmektedir. Üretim

parametrelerinde belirlenen değerler farklı malzemelere göre değişiklik gösterebilmektedir (Zarko vd., 2017). Üretimde kullanılacak malzemelere uygun üretim parametrelerinin belirlenmesi ve uygulama alanlarına göre çeşitli yükler altında parçaların göstereceği mekanik özelliklerin belirlenmesi yöntemin kullanılabilirliği için gereklidir. Bu nedenle eriyik biriktirme yönteminde kullanılan malzemeler ve parçaların mekanik özelliklerinin incelenmesi, ilgi odağı olan araştırma konularından birisidir (Fodran vd., 1996). Bu çalışmalarda, eriyik biriktirme yöntemi kullanılarak farklı malzemeler ve üretim parametrelerine göre üretilen numuneler üzerinde mekanik testler yapılmakta ve üretim parametrelerinin mekanik özelliklere olan etkileri incelenmektedir (Zhao vd., 2018).

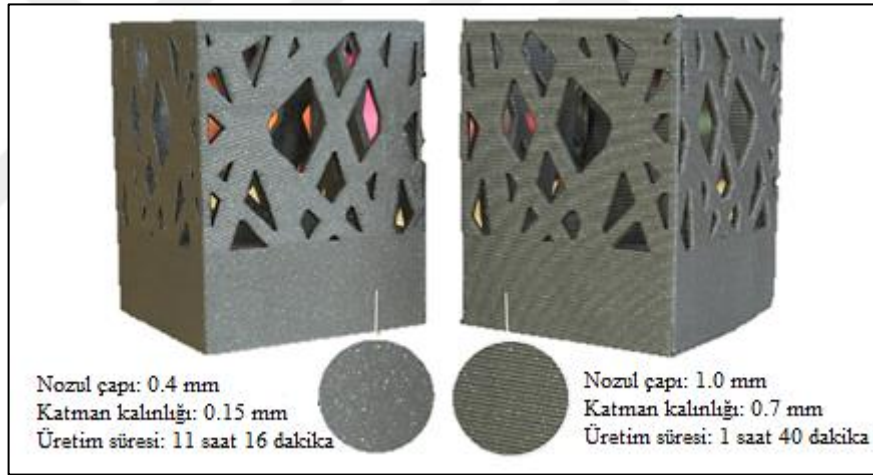
1.2.2.1. Katman kalınlığı

Katman kalınlığı, eriyik biriktirme yönteminde z eksenindeki çözünürlük olarak tanımlanmaktadır. Eklemeli imalat sistemi belirlenen katman kalınlığı kadar z ekseninde hareket etmekte ve kullanılan yönteme bağlı olarak belirlenen katman kalınlığı kadar malzeme üretim tablasına beslenmektedir. Katman kalınlığı üretim sonrası modellerden elde edilecek yüzey kalitesi üzerinde önemli rol oynayan bir parametredir. Eriyik biriktirme yönteminde, üretimde kullanılacak katman kalınlıkları kullanılan nozul uçların çapları ve kullanılan malzeme tipi ile orantılı olarak değişmekte iken bazı eklemeli imalat teknolojilerinde katman kalınlıkları sistemin sahip olduğu özelliklere göre sabit olarak kalmaktadır. Katman kalınlıkları uygulamada kullanılan nozul çaplarına bağlı olarak belirlenmektedir. Eklemeli imalatla, parça üretimi ilk katmandan başlamaktadır. Bu nedenle ilk katmanın üretim platformuna iyi yapışması gerekmektedir. İyi yapışmayı sağlamak ilk katman kalınlığının seçimi ve ilk katman için beslenecek malzeme miktarının belirlenmesi ile gerçekleşmektedir. Aksi halde kullanılan malzeme özelliklerine ve genellikle zayıf yapışmaya bağlı olarak ilk katmandan başlayan malzeme çarpılması parça üretiminin tamamlanmasına engel olmaktadır. İlk katman yapışması sağlandıktan sonra diğer katmanlar belirlenen katman kalınlıklarında malzeme beslenmesi ile tamamlanmaktadır. Kullanılan katman kalınlıkları, parçanın üretim süresi, fiziksel ve görsel özellikleri üzerinde önemli oranda değişiklik göstermektedir (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Farklı katman kalınlıkları (Ayrılmis, 2018)

Katman kalınlığını düşürmek daha detaylı bir ürün elde etmek anlamına gelsede bir yandan z ekseninde belirli bir yüksekliğe sahip parçanın tamamlanması için daha fazla katman oluşturulması anlamına gelmekte dolayısıyla daha fazla üretim süresi gerektirmektedir (Şekil 1.10).



Şekil 1.10. Farklı katman kalınlıkları, yüzey kalitesi ve üretim süreleri (Prusa, 2019)

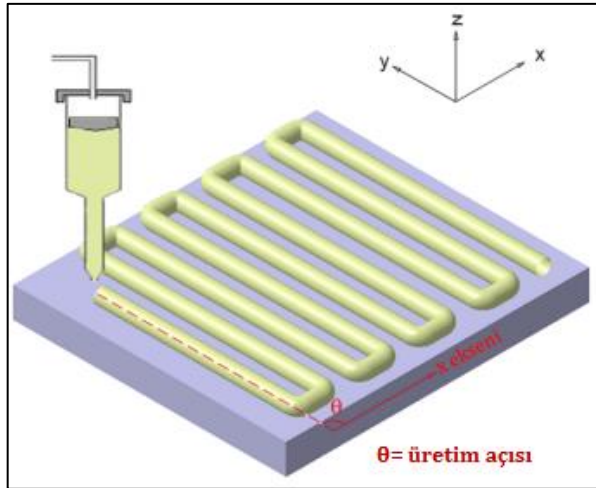
Genellikle üretim için en uygun maksimum katman kalınlığı kullanılan nozul çapının %80'sini geçmeyecek şekilde minimum katman kalınlığı ise nozul çapının %25'inden az olmayacak şekilde önerilmektedir (Tyson, 2017; Zuza, 2018). Kullanılan katman kalınlığına bağlı olarak üretim süresi, üretilen parçanın hacmi, nozul çapı, filament besleme hızı ve katman kalınlıkları ile Denklem 1.1'de olduğu gibi hesaplanmaktadır (Tran vd., 2017).

$$\text{Üretim süresi} = \frac{V}{d \cdot f \cdot t} \quad (1.1)$$

Burada, V üretilen parçanın hacmi, d kullanılan nozul çapı, f filament besleme hızı ve t kullanılan katman kalınlığını göstermektedir.

1.2.2.2. Üretim açısı

Üretim açısı eriyik biriktirme yönteminde ekstruder sisteminin eriyik malzemeyi üretim tablasına aktarırken kullandığı yolun x eksenine göre yaptığı açığı temsil etmektedir (Şekil 1.11). Dilimleme programlarında 0° ile 90° aralığında belirlenebilen üretim açılarına göre katmanlar oluşturulurken tercihe göre tüm katmanlar yalnızca tek bir açı kullanılarak da üretilebilmektedir. Tek açılı üretimlerde ekstruderin ileri ve geri hareketinde her katman yalnızca belirlenen açıda oluşturulurken, birden fazla açılı üretimlerde ekstruder bir katmanı belirlenen açıda, diğer katmanı ise bir önceki açıya dik olacak şekilde oluşturmaktadır. Bazı ticari üç boyutlu yazıcılarda üretim parametrelerinin değiştirilmesi kısıtlanarak kullanıcının, üretim açılarını değiştirmesine imkân tanınmamakta ve genellikle 45° üretim açısında katmanlar oluşturulmaktadır. Böyle durumlarda, üç boyutlu yazıcı kontrol programlarından, üretim tablası üzerinde konumlanacak olan parçanın oryantasyonu değiştirilerek, farklı üretim açılarını elde etmek mümkündür (Huang ve Singamneni, 2015).



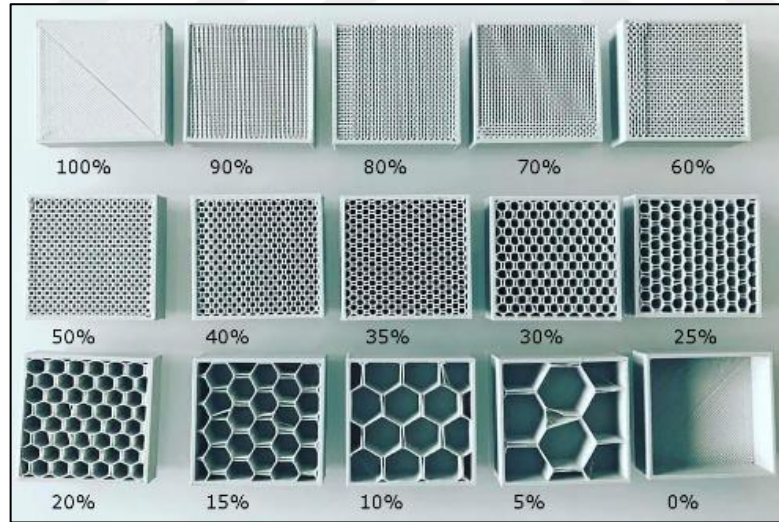
Şekil 1.11. Üretim açısı (Wu vd., 2015)

1.2.2.3. Doluluk oranı

Eklemeli imalatta üretilecek parçaların tamamen dolu (katı) olarak üretilmeleri fazla malzeme kullanımına neden olmaktadır. Diğer yandan tamamen katı obje oluşturma fazla maliyet ve süre kaybına da neden olmaktadır. Bu nedenle eriyik biriktirme

yönteminde, üretilecek parçanın iç bölgesinde malzeme yoğunluğu belirlenebilmekte ve içyapıda farklı oranlarda dolgu oluşturulabilmektedir. Doluluk oranları dilimleme programları ile belirlenebilmektedir. Belirlenen doluluk oranlarına göre ekstruder sistemi, katman oluşumu için seçilen örgü desenini üretim tablasına aktarmaktadır. Uygulamada doluluk oranları %0 (boş) ve %100 (dolu) aralıklarında bir değer alabilmektedir (Şekil 1.12).

Eklemeli imalatın avantajlarından bir tanesi de parçanın iç bölgesini doldurmadan yalnızca dış kabuklardan oluşan bir üretim yapılabilmesidir. Bu amaçla doluluk oranı %0 seçilerek yalnızca dış kabuk oluşturma ile bir parça üretilebilmektedir. Ancak doluluk oranları parçaların mukavemetine etki etmektedir. Doluluk oranlarındaki artış fazla malzeme tüketimine neden olsa da parçanın iç bölgesindeki boşluk oranını azaltarak mukavemetini artırmaktadır (Rodriguez-Panes vd., 2018; Aw vd., 2018). Doluluk oranı parçanın dış kabuğunu herhangi bir değişikliğe uğratmadan yalnızca kabuktan arta kalan iç bölgede malzeme oluşturmak için kullanılmaktadır. Bu nedenle görsel amaca yönelik ürünlerin iç doluluk oranları düşük seçilebilirken fonksiyonellik aranan ürünlerde doluluk oranlarını arttırmak mümkün olmaktadır.

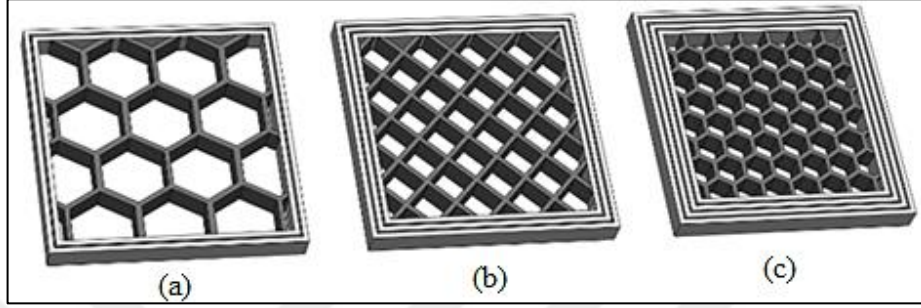


Şekil 1.12. Farklı doluluk oranları (3D Print Pro, 2019)

1.2.2.4. Kabuk genişliği

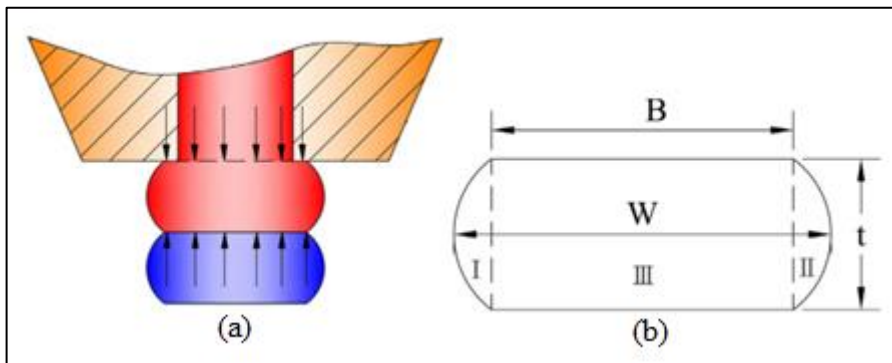
Kabuk genişliği eriyik biriktirme yönteminde üretilecek parçanın dış hatlarını belirleyen katman sayısını ifade etmektedir. Uygulamada kabuk genişlikleri nozul çapları ile orantılı olarak belirlenmektedir (Kuznetsov vd., 2018). Örneğin yöntemde

kullanılan nozul çapı 0.4 mm olarak seçildiğinde, tek kabuk genişliği 0.4 mm olurken iki kabuk genişliği 0.8 mm olarak ifade edilmektedir. Dilimleme programlarında kabuk genişliklerini değiştirme imkânı bulunmaktadır. Bazı dilimleme programları kabuk genişliklerini sayı ile ifade ederken bazılarında kabuk genişlikleri nozul çapı ile orantılı olarak uzunluk birimleri şeklinde ifade edilmektedir. Farklı kabuk genişliklerine sahip parçalar Şekil 1.13'te verilmiştir.



Şekil 1.13. Farklı kabuk genişlikleri, (a) iki kabuk genişliği, (b) üç kabuk genişliği, (c) dört kabuk genişliği (3D Prototypes and Models, 2019)

Yöntemde kullanılan nozul uçların dairesel kesite sahip olması, yığılan malzemenin dairesel kesitli olarak nozul uçtan çıkmasına neden olmaktadır. Katman oluşumu sırasında nozul ucun hareketi ile uygulanan basınç sonucu, basınca maruz bölgeler ve önceki katman ile birleşen bölgelerde yassılaşıma oluşmakta iken soğuma esnasında meydana gelen çekme sonucu kabuk kenarlarında eliptik form oluşmaktadır (Şekil 1.14).



Şekil 1.14. Kabuk oluşumu (a), kabuk genişliği (b) (Zhao vd., 2018)

Dolayısıyla uygulamada kabuk genişlikleri üretimde kullanılan nozul uçların çapları ile orantılı olarak belirlenirken gerçekte genişlikleri etkileyen birden fazla parametre

bulunmaktadır. Bu parametreler; nozul çapı, katman kalınlığı, ekstrüzyon hızı ve üretim hızı olmakla birlikte Denklem 1.2’de olduğu gibi hesaplanabilmektedir.

$$W = B + \frac{t^2}{B} \quad (1.2)$$

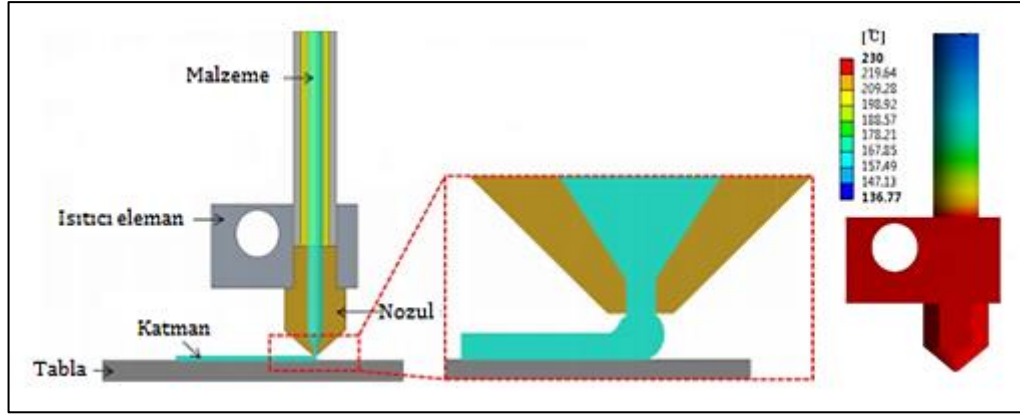
$$B = \frac{\lambda^2 - t^2}{2\lambda} \quad (1.3)$$

$$\lambda = \frac{\pi d^2 v_E}{2t v_F} \quad (1.4)$$

Burada, W toplam katman genişliği, B katman genişliğinin doğrusal bölümü, t katman kalınlığı, v_E ekstrüzyon hızı, v_F hareket hızı, d ise nozul iç çapını göstermektedir (Zhao vd., 2018). Kabuk genişliği üretimde, doluluk oranını değiştirmeden yani kullanılan malzeme miktarını artırmadan daha dayanıklı parçalar üretmekte kullanılabilmektedir (Rodriguez vd., 2018). Ancak ek kabuk genişliği üretim süresinin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca eklemeli imalatla parça üretiminden sonra kimyasal ya da zımparalama gibi ek işlem uygulanması gereken durumlarda parça yüzeyinin kalınlığı azalacağından uygulamada kabuk genişliğini artırmak fayda sağlamaktadır.

1.2.2.5. Nozul sıcaklığı

Eriyik biriktirme yönteminde kullanılan üretim parametrelerinden biri nozul sıcaklıklarıdır. Yöntemde üretilen parçaların kalitesi, kullanılan malzeme ve bu malzemelerin işlem parametreleri ile bağıntılı olmaktadır. Eriyik biriktirme yönteminde termoplastik esaslı malzemeler kullanılmaktadır. Malzemeler, nozulun bağlı olduğu ısıtıcı eleman yardımıyla camsı geçiş sıcaklıklarının üzerindeki sıcaklıklara ısıtılarak yarı eriyik hale getirilmekte ve üretim tablasına aktarılmaktadır. Malzeme ekstrüzyonu esnasında ekstruder içinde meydana gelen sıcaklık değişimi ve yarı eriyik hale gelen malzemenin nozul uçtan üretim tablasına aktarılması Şekil 1.15’de gösterilmiştir.



Şekil 1.15. Malzeme ekstrüzyonu ve nozul sıcaklık dağılımı (Park vd., 2016)

Malzemelerin uygun sıcaklıklarda eriyik hale getirilmesi katmanlar arasındaki yapışma kabiliyeti üzerinde büyük öneme sahiptir (Bellehumeur vd., 2004; Zekavat vd., 2019). Yarı eriyik hale getirilen malzeme katman oluşumu esnasında hızlı soğuma nedeniyle katı forma dönüşmektedir. Bu faz değişimi esnasında parçada hacimsel değişim meydana gelmekte, bu durum katmanların birbirine yapışmasında ve gözenekli bir yapı oluşmasında etkili olmaktadır (Christiyan vd., 2016). Katmanlar arasındaki yapışmanın iyi sağlanması katmanların birbirine tutunmasını artırmaktadır. Bu durum parçaların mekanik özelliklerine etki etmektedir (Yang, 2018). Bu nedenle üretim öncesi kullanılan malzemenin özelliklerine göre nozul sıcaklığının iyi belirlenmesi gerekmektedir. Üretim esnasında malzemenin mümkün olan en düşük sıcaklıkta akışkan hale gelerek nozuldan geçmesi istenir. Termoplastikler, doğrusal olarak dizilmiş uzun zincirli moleküllerden oluşur ve bu doğrusal zincirler birbirine kovalent bağlar ile bağlanmaktadır. Isıtma işlemi sonrası zincirler arasındaki kuvvet zayıflamakta, doğrusal molekül zincirleri birbiri üzerinde hareket ederek sıvı hal almakta dolayısıyla akışkan bir özellik kazanmaktadır. Ancak ısıtma işlemi belirli bir seviyeyi aştığında molekül zincirleri kopmakta ve malzeme özelliklerinde yıpranma oluşmaktadır. Bu durumda yanma gerçekleşmektedir. Yanık malzeme artık olarak nozul içerisinde birikmektedir. Bu durum, nozulun belirli bir süre sonra tıkanıp işlevini yerine getirememesine sebep olmaktadır. Ayrıca eriyik haldeki malzeme içine artık malzeme karışması, katman kalitesinin bozulmasına yol açmaktadır (Gibson vd., 2014). Bu nedenle üretim esnasında kullanılan nozul sıcaklıklarının, uygun akışı ve ekstrüze edilen filamentin katılaşma karakteristiğini iyi sağlayacak şekilde seçilmesi önemlidir.

1.2.2.6. Tabla sıcaklığı

Eriyik biriktirme yöntemi, ekstrüzyon temelli bir eklemeli imalat yöntemidir. Yöntemde katı haldeki termoplastik malzemeler ısıtma sürecine girdiği için üretimde kullanılan nozul ve tabla sıcaklıkları önemli rol oynamaktadır. İlk basılan katmanın tablaya yapışma kabiliyeti bir parçanın oluşturulabilmesinde ve mekanik özellikleri üzerinde önem arz etmektedir (Spoerk vd., 2018). Yetersiz yapışma, üretim esnasında malzemenin hızlı soğuması nedeniyle nesnenin kayması, bükülmesi veya bozulması gibi sonuçlar meydana getirerek düşük kaliteli ürünler oluşmasına ya da hedef ürünün elde edilememesine sebep olmaktadır. Bu nedenle ekstrüze edilen polimer ile üretim tablası arasındaki yapışma, nesneyi üretim sırasında yerinde tutacak kadar yüksek olmalıdır (Shafer vd., 2017). Isıtma özelliğine sahip tablalar kullanılarak, polimerin hızlı katılaşması engellemek ve tablaya tutunmasını arttırmak mümkündür. Ancak kullanılan tabla sıcaklıklarının, baskıdan sonra üretilen parçaya ve parçanın üretim tablasından kolayca uzaklaştırılabilmesine imkân vermelidir (Gonzalez vd., 2017). Bu nedenle uygun tabla sıcaklığının üretimde tespit edilmesi gerekmektedir.

Eriyik biriktirme yönteminde kullanılan üretim tablaları genellikle alüminyum malzemeden yapılmaktadır. Pürüzsüz bir alt yüzey elde edebilmek amacıyla cam veya pleksi levhalar bu tablalar üzerine eklenebilmektedir. Eriyik hale gelen malzemelerin tablaya yapışması için yalnızca ısıtma yeterli olmamaktadır. Bu nedenle ilk katmanın yüzeye yapışmasını artırmak amacıyla tablanın ısıtılmasının yanı sıra tabla yüzeyindeki yağ ve kalıntıların uzaklaştırılması için yüzeyin izopropil alkol vb. yardımcı elemanlarla temizlenmesi gerekmektedir. Üretim tablasının nozul uç ile arasındaki mesafenin ilk katman kalınlığı kadar ayarlanması dolayısıyla tabla seviyeleme işleminin yapılması, üretim tablası yüzeyinin yapışmayı artırıcı film ve bant benzeri elemanlarla kaplanması ya da polieterimit (PEI) benzeri levhalarla desteklenmesi, üretimde kullanılan malzemeden tabla yüzeyinde bir tabaka oluşturulması ve bu tabaka üzerine nihai ürünün üretilmesi, yüzeye yapışmayı arttırıcı yöntemler olarak verilebilmektedir.

1.2.2.7. Üretim hızı

Üretim hızı, eriyik biriktirme yönteminde parça üretimi esnasında ekstruderin hareket hızını tanımlamaktadır. Sistemde bulunan ekstruder üzerinde metal soğutucu

blok, soğutmaya yardımcı fan, seramik ısıtıcı, ısıtıcı blok ve nozul uç bulunmaktadır. Makaradan beslenen filament formundaki malzeme dişli mekanizması ile sürülerek nozul uca doğru iletilmektedir. Ekstrudere giren parçanın ısıtıcı bloğa gelene kadar ergimesi istenmez. Erken ergime, malzemenin soğutucu bloktan ısıtıcı bloğa geçişine engel olmakta ve üretimi engellemektedir. Normal ergime sürecinde, soğutucu bloktan beslenen malzeme ısıtıcı bloğa girmekte ve blokta bulunan seramik ısıtıcı yardımıyla belirlenen sıcaklığa kadar ısıtılmaktadır. Bu süreç üretim boyunca sürekli olarak devam etmekte ve ekstruder hareket hızına göre beslenen malzeme miktarı ve üretim süresi değişiklik göstermektedir. Yüksek üretim hızları ile parça üretimi için gereken süre kısaltmakta iken katmanlarda ısıya maruz kalma süresi de kısaltılmaktadır. Dolayısıyla katılaşma hızlı olmaktadır. Düşük üretim hızlarında ise üretim süresi artarken, katmanlar daha fazla süre ısıya maruz kalmakta ve hızlı katılaşma önlenmektedir. Bu durum yüksek üretim hızına göre difüzyon derecesinin artması anlamına gelmektedir (Jiang vd., 2019).

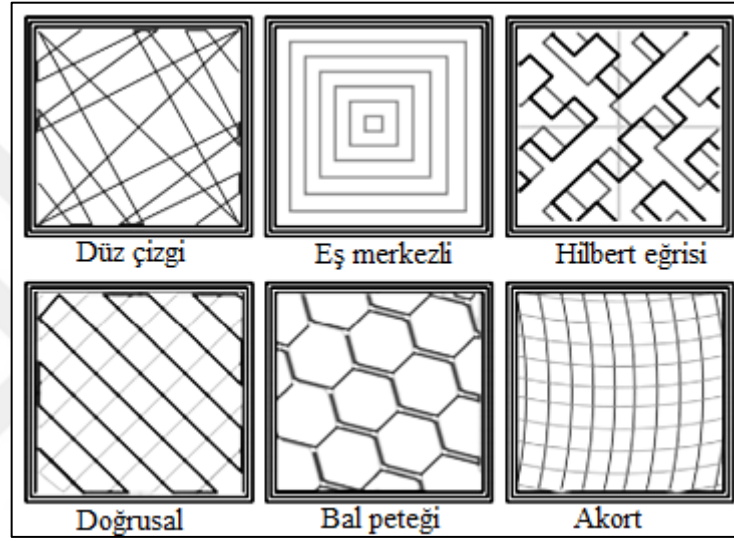
Eriyik biriktirme yönteminde üretim, genellikle önce parça dış konturlarının oluşturulması daha sonra ise parça iç bölgesinin malzeme ile doldurulması ile tamamlanmaktadır. Dilimleme programlarında ekstruderin hareket hızı üretim bölgesine göre değiştirilebilmektedir. Parça dış çeperinin oluşturulmasında kullanılacak dış duvar hızı, alt katmanların ve üst katmanların üretiminde kullanılacak katman hızları, iç bölgenin doldurulmasında kullanılacak iç dolgu hızı gibi çeşitli hız parametreleri bulunmaktadır. Bu nedenle üretimde kullanılacak hız parametreleri üretilcek parça özelliklerine etki etmektedir.

1.2.2.8. Dolgu deseni

Eriyik biriktirme yönteminde, parçalar her zaman içi dolu katı model olarak üretilmemektedir. Uygulamanın amacına yönelik olarak parça iç bölgeleri belirlenen doluluk oranlarında malzeme ile doldurularak üretim yapılabilir. Bu sayede kullanılan malzeme miktarı ve üretim süresi üzerinde tasarruf sağlanabilmektedir (Patel, 2017; Dudescu ve Racz, 2017).

Üretimde parçanın iç hatları oluşturulurken belirlenebilen doluluk oranlarının yanı sıra bu dolguların oluşturulmasında kullanılan farklı dolgu desenleri bulunmaktadır. Üretimde kullanılan dilimleme programlarında, dolgu desenleri belirlenerek üretim

gerçekleştirilmektedir. Üretimde kullanılabilecek dolgu desenleri; bal peteği deseni, doğrusal çizgiler, paralel çizgiler, spiral, eş merkezli çizgiler olmak üzere birçok farklı şekilde olabilmektedir (Şekil 1.16). Belirlenebilen bu dolgu desenleri sayesinde herhangi bir şekil ve yapıdaki karmaşık geometriler oluşturulabilmekte, model içerisindeki dolgu deseni değiştirilerek baskı süresi azaltılabilmektedir. Ayrıca kullanılan dolgu desenleri üretimde gerekli malzeme miktarını belirlemekte, modelin mekanik özellikleri üzerine etki etmekte, özelleştirilmiş veya tek nesnelerin üretimi için uygun olabilmektedir (Patel, 2017).



Şekil 1.16. Farklı dolgu desenleri (Comotti vd., 2017)

1.2.3. Eriyik biriktirme yönteminde kullanılan malzemeler

Eriyik biriktirme yönteminde filament formunda kullanılabilecek birçok malzeme çeşidi bulunmaktadır. Filamentler, granül şeklindeki hammaddenin ekstrüzyon yöntemi ile belirli sıcaklık aralıklarında eriyik hale gelmesi ve bir nozuldaki iplik şeklinde çekilmesi sırasında katılaşması ile oluşmaktadır. Bu nedenle filament malzemeler kullanıma başlamadan önce katı halde bulunmaktadır. Ancak eriyik biriktirme yönteminde parça üretimi esnasında filament malzemeler tekrar eriyik hale gelmekte ve üretim bu şekilde gerçekleşmektedir. Malzemede oluşan bu erime ve katılaşma döngüsü filament üretim aşamasından, eriyik biriktirme yönteminde nihai parçanın üretimine kadar devam etmektedir. Bu nedenle eriyik biriktirme yönteminde yalnızca tekrar ısıtılarak şekillendirilebilen ve tekrar kullanıma imkân tanıyan termoplastik esaslı polimer malzemeler kullanılabilmektedir.

Eriyik biriktirme yönteminde kullanılan en yaygın termoplastik malzeme ABS'dir. Plastik enjeksiyon uygulamalarında da sıklıkla kullanıldığı için eriyik biriktirme yönteminde kullanılmak üzere filament formuna getirilen ve ticari olarak temin edilebilen ilk filament malzemelerinden birisidir. ABS plastiği arilonitril, bütadien ve stiren monomerlerinden oluşan bir termoplastik malzemedir. İçeriğindeki Akrilonitril malzemenin ısıl dayanımını arttırarak çevre koşullara karşı direnç göstermesini sağlamakta, bütadien içeriği malzemenin düşük ortam sıcaklıklarında dayanımını arttırmayı sağlamakta, stiren ise malzemeye rijitlik ve sertlik kazandırmaktadır. Bu üç monomer belirli oranlarda birleşerek ABS termoplastiğini oluşturmaktadır. ABS plastiğinin tok, rijit yapısının yanı sıra yüksek darbe dayanımı, yüksek mekanik özellik gösteren bir malzeme olması ve kolay işlenebilir olması çeşitli sektörlerde kullanımını yaygınlaştırmaktadır. Ancak gevrek bir özellik gösterdiğinden dolayı uzama katsayısı düşüktür ve esneklik göstermez. Petrol bazlı yapısı gereği erime esnasında ortama hidrojen siyanür (HCN) gazı açığa çıkardığı için eriyik biriktirme yönteminde kullanılırken ortamın havalandırılması gerekmektedir. Eriyik biriktirme yönteminde ABS malzemenin kullanım sıcaklıkları 220-260°C aralıklarında olmakta ve uygulamada katman oluşumuna göre bu sıcaklıklar farklılaşabilmektedir. ABS, eriyik biriktirme yönteminde yüksek sıcaklıkta işlem gören termoplastiklerden birisidir. Bu nedenle parçaların çarpılmasını önlemek amacıyla tabla ısıtmasına ihtiyaç duymaktadır. ABS termoplastiğinin camsı geçiş sıcaklığı 105-110°C aralığındadır. Uygulamada, üretim tablaları bu sıcaklıklara kadar ısıtılarak ABS malzemenin tablaya tutunması ve çarpılmanın önlenerek sağlıklı bir üretim yapması sağlanabilmektedir. ABS termoplastiği sahip olduğu yüksek mekanik özellikler nedeniyle eriyik biriktirme yönteminde fonksiyonel ürünlerin üretilmesinde sıklıkla tercih edilmektedir.

Eriyik biriktirme yönteminde sıklıkla kullanılan termoplastik malzemelerden diğeri Polilaktik asittir (PLA). PLA, nişasta içeren ürünlerden elde edilen organik ve geri dönüştürülebilir bir malzemedir. Bu nedenle medikal sektöründe implant ve protezlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Malzemenin organik yapısının yanı sıra biyoçözünür bir malzeme olması gıda sektöründe de tercih edilmesine neden olmaktadır. PLA'nın eriyik hale getirilmesi kullanım esnasında herhangi bir toksik atık ortaya çıkarmamaktadır. Eriyik biriktirme yönteminde, daha düşük sıcaklıklarda üretim sıcaklıklarına sahip olması nedeniyle PLA malzemenin kullanımı ABS'ye

kıyasla çok daha kolaydır. PLA malzeme için eriyik biriktirme yönteminde kullanım sıcaklıkları genellikle 190-220°C aralığındadır ancak uygulamada katman oluşumuna göre değerler değişiklik gösterebilmektedir. Düşük üretim sıcaklıklarına sahip olması, üretilecek parçalarda çarpılma riskini ortadan kaldırmaktadır. Üretimde ısıtıcı tablaya ihtiyaç duyulmaz ancak ısıtıcı tabla kullanılması durumunda tablanın çok düşük sıcaklıklarda ısıtılması üretim için yeterli olmaktadır. PLA malzemelerde düşük sıcaklık aralığında çalışma özelliği yüksek üretim hızlarında çalışabilme imkanı sağlamaktadır. PLA malzeme gevrek bir yapıya sahiptir ve ABS'ye kıyasla daha düşük mekanik özellikler gösterir. Bu nedenle fonksiyonel ürünlerin üretiminde genellikle tercih edilmez. Ancak ABS'ye oranla daha parlak bir görüntüye sahiptir. Bu nedenle görsel ürünlerin üretiminde tercih edilme oranı yüksektir.

Günümüzde eriyik biriktirme yönteminde kullanılan termoplastik malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla yapılan geliştirme çalışmaları bulunmaktadır. Bu çalışmalarda mevcut malzemeler optimize edilerek daha iyi baskı kabiliyeti ve daha yüksek mekanik özellikler elde edilmeye çalışılmaktadır. Esun firması tarafından geliştirilen ve ticari olarak kullanımına sunulan PLA Plus ve ABS Plus filamentleri bu malzemelere örnek olarak gösterilebilmektedir (Esun, 2019). Bu tür malzemelere ek olarak dayanım istenen yerlerde Naylon, Polikarbonat, esneklik istenen yerlerde Termoplastik poliüretan, şeffaf bir ürün ihtiyacında Polietilen terftalat, destek yapılarının üretiminde Polistiren, Polivinil alkol, ısıl eğilmeye direnç ihtiyacında Polifenilsülfon gibi birçok farklı malzeme filamentleri kullanılabilmektedir.

Eriyik biriktirme yönteminde kullanılan ısıtıcı elemanların ve standart nozulların çalışma sıcaklıklarının maksimum 300°C civarında olması, yöntemde yüksek sıcaklıkta eriyen malzemelerin kullanımını kısıtlamaktadır (Salem vd., 2016). Bu tür yüksek sıcaklık malzemelerinin kullanılabilmesi için ekstruder sisteminin yüksek sıcaklıkta kullanılabilecek ekipmanlardan oluşacak şekilde yeniden tasarlanması gerekmektedir. Eriyik biriktirme yönteminde kullanılan malzeme çeşitliliğini artırmak amacıyla son yıllarda diğer eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılan malzemelerin termoplastikler ile birlikte kullanılabilirliği ve yöntem üzerindeki etkilerini araştırmaya yönelik çalışmalar bulunmaktadır (Popescu vd., 2018). Bu çalışmalarda farklı malzeme içerikleri ile kompozit malzemeler üretilmeye çalışılmakta ve bu malzemelerin eriyik biriktirme yönteminde mekanik özellikleri

incelenmektedir (Patel vd., 2018). Eriyik biriktirme yönteminde kompozit malzemeler, termoplastiklerin farklı formdaki katı, toz vb. malzemeler ile birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Eriyik biriktirme yönteminde kullanılan kompozitler genellikle termoplastik matris içinde takviye elemanı olarak bulunan metal, seramik veya fiber takviyeleri ile oluşturulmaktadır. Polimer matris içerisinde dağılan takviyelerin partikül büyüklükleri, geometrisi, yönlenmesi, yapısı ve parça üretiminde kullanılan üretim parametreleri mekanik özelliklere etki etmektedir. Kompozit malzemelerden üretilen parçalarda, parçaya gelen yüklerin takviye elemanlarına iletilebilmesi, matris ve takviye elemanı arayüzey bağının kuvvetine bağlı olmaktadır. Kuvvetli bir ara yüzey bağının oluşması ise kompozit malzemeyi oluşturacak matris ve takviye elemanlarının uygun seçimine, bileşenlerin uyumuna, takviye elemanlarının matris içinde homojen dağılması gibi faktörler ile gerçekleşmektedir (Şahin, 2000).

Polimer matrisli kompozitlerde, polimer malzemeler matris malzemesi olarak kullanılmakta iken çoğunlukla toz haldeki metal malzemeler takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozitlerde, iletkenlik, esneklik, işlem kabiliyeti, tokluk ve mukavemet gibi özellikler matris ve takviye elemanlarının bileşimlerine bağlı olmaktadır. Polimer matrisli kompozitlerin oluşturulmasında metal tozlarının viskozite üzerindeki etkilerinden dolayı sınırlamalar bulunmaktadır. Ancak plastikleştirici ve yüzey etkinleştirici malzemeler kullanılarak polimer malzemeler ile metal tozlar arasındaki bileşim oranı arttırılabilmektedir (Postiglione vd., 2015). Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan takviye elemanları çoğunlukla alüminyum ve demir tozları iken matris malzemeleri ABS, Polipropilen, Polyamit'tir. Polimer matrisli kompozitlerde metal malzemelerin yanı sıra seramik malzemeler de takviye elemanı olarak kullanılabilir. Seramikler, yüksek dayanımlı, düşük yoğunluklu, yalıtkan ve sert olmalarının yanı sıra kimyasal ve termal etkilere karşı yüksek direnç göstermektedir. Ancak oldukça gevrek bir yapıya sahiptirler. Titanyum oksit (TiO_2), Alüminyum oksit (Al_2O_3), Zirkonyum dioksit (ZrO_2), PA, PP ve PLA gibi termoplastiklerde takviye elemanı olarak kullanılabilir (Mohan vd., 2017). Eriyik biriktirme yönteminde termoplastik malzemelere nano boyuttaki partiküllerin ilavesi ile kompozit malzemeler oluşturulabilir (Salem vd., 2016). Polimer malzemelere yapılan nanokatılarda genellikle nano boyutlardaki karbon, seramik ve metal partikülleri

kullanılmaktadır (Haq vd., 2014; Tsiakatouras vd., 2014). Nanokompozitler, en az biri nano boyutta olan iki veya daha fazla malzemenin biraraya getirilmesiyle oluşturulmaktadır. Ancak mikro boyuttaki partiküllerden nano boyutlu partiküller oluşturulurken mekanik özelliklerde farklılıklar meydana gelmektedir. Nano boyuttaki malzemelerin yüzey alanları geniştir dolayısıyla kimyasal veya fiziksel özellikler yüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir. Polimer malzemelere yapılan nano katkılarda nano partiküller ile polimer malzeme arasındaki etkileşimin az olması ve düşük yapışmadan dolayı elde edilen kompozitlerde kırılma artabilmekte ve bu durum mekanik özelliklere etki edebilmektedir.

Eriyik biriktirme yönteminde bir diğer kompozit malzeme oluşturma yöntemi matris malzemesine fiber katkılarının eklenmesidir. Teknolojik olarak en önemli kompozit çeşidi, takviye elemanı olarak fiberlerin kullanıldığı fiber takviyeli kompozitler olarak gösterilebilmektedir (Callister ve Rethwisch, 2007). Fiber takviyesinin amacı genellikle düşük ağırlıkla birlikte yüksek dayanım ve/veya yüksek elastisite modülü elde etmektir. Fiber takviyeli kompozitlerde kullanılan fiberler, uzunluklarına göre sürekli veya süresiz olarak ayrılmaktadır. Kompozit malzemeler oluşturulurken kullanılan fiber özellikleri ve bu fiberlerin eriyik biriktirme yöntemiyle üretiminde kullanılan üretim parametreleri mekanik özelliklerin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Fiber yönelmesi ve yerleşimi, yoğunluğu ve dağılımı gibi faktörler fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerini etkilemektedir. Fiber boyu arttıkça, fiberlerin takviye etkisi artmaktadır. Bu nedenle sürekli fiberlerde daha yüksek mekanik özellikler elde edilebilmektedir. Ancak kısa fiberler düşük maliyet ve imalat süreleri ile daha çok tercih edilmektedir. Fiberler, yöneldiği doğrultularda yüksek rijitlik ve mukavemet gösterirler. Bu nedenle fiber takviyelerinde etkinliğin artırılması amacıyla fiber içeriğinin belirlenen oryantasyonlarda yönelmesi gerekir.

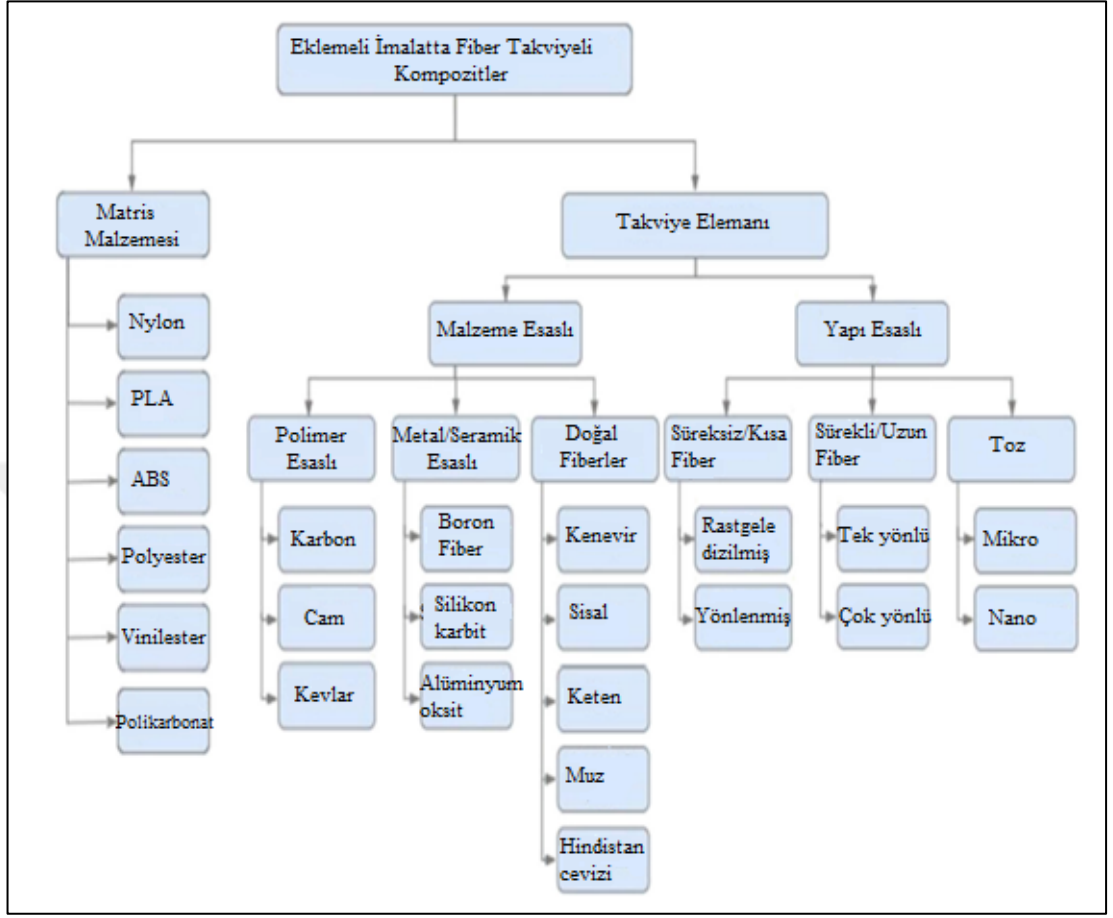
Fiber takviyeli kompozitlerde mekanik özellikler, fiber özelliklerinin yanı sıra kullanılan matris fazı özelliklerine de bağlıdır. Matris fazının uygulanan yükü fibere iletmesi beklenir, bu yük aktarımı matris ve fiber fazları arasındaki yüzey bağ kuvvetinin büyüklüğü ile orantılı olmaktadır (Phillips, 1989). Eriyik biriktirme yönteminde kullanılan fiber takviyeleri, matris malzemesi ile birleşimi ve şekil verme yeteneğinin yüksek olmasından dolayı çoğunlukla süresiz fiberlerdir. Süresiz fiberler genellikle 0.5-6 mm uzunluğunda ve 1-7 mikron çaplarında

üretilmektedir. Filament haline gelmeden önce matris malzemesi içinde kullanılacak fiberlerin homojen bir şekilde dağılması amaçlanır. Bu nedenle çeşitli karıştırma işlemlerinden geçen kompozit malzeme daha sonra ekstrüzyon yöntemiyle filament formuna getirilmektedir. Filament üretim sürecinde bulunan ekstrüzyon sisteminde helezonlar yardımı ile malzeme granülleri ve katkı maddeleri harmanlanmaktadır. Harmanlama esnasında meydana gelen kırılma nedeniyle fiber boyutlarında azalmalar görülebilmektedir.

Kompozit üretiminde kullanılan bazı fiber malzemeleri; karbon, cam, kevlar, bazalt, aramid olarak gösterilebilir. Fiber takviyeleri çeşitli yöntemlerde polyester, vinil ester, epoksi, alüminyum oksit, alüminyum ve titanyum alaşımları gibi matris malzemelerinde kompozit oluşturmak için kullanılabilirken, eriyik biriktirme yönteminde termoplastik malzemeler ile birlikte kullanılmaktadır (Fidan vd., 2019). Fiber takviyeli plastik kompozitlerin eriyik biriktirme yönteminde hammadde olarak kullanılabilir olması yöntemin endüstrideki uygulama alanlarını arttırmaktadır. Fiber takviyeli polimer kompozitler yüksek aşınma ve korozyon direnci, hafif yapılar, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve yüksek boyutsal stabilite gibi özelliklere sahiptir. Ancak bu malzemelerin biyouyumlu olmaması ve geri dönüşümleri çevresel sorunlar doğurmaktadır. Doğal fiberlerin düşük maliyeti, düşük aşındırıcı özellikleri, kolay kullanılabilir olması ve biyouyumlu olması gibi avantajları tahta, bambu, jüt, keten gibi doğal fiberlerin eriyik biriktirme yönteminde kullanılmasına yönelik çalışmaları arttırmaktadır (Mohan vd., 2017).

Karbon fiberlerin, yüksek rijitlik, düşük esneklik, yüksek sıcaklıklara dayanım, düşük özgül ağırlık, düşük ısı genleşme katsayısı, yüksek kimyasal direnç gibi özellikleri takviye elemanı olarak kullanımını arttırmaktadır. Havacılık, otomotiv, nükleer, savunma ve inşaat sektörleri karbon fiberlerin tercih edildiği başlıca alanlardır. Fiber takviyeli termoplastik esaslı filament üretimi amacıyla yapılan çalışmalar ticari olarak filament üreten firmalara ilham kaynağı olmuş ve bu firmalar kendi fiber katkılı filamentlerini üretmeye başlamışlardır. Filament üretiminde sıklıkla kullanılan PETG, PC, Nylon, PEI, PLA, ABS gibi termoplastiklere karbon ve cam fiber takviyesi yapılarak EBY yönteminde kullanılmak üzere 1.75-3 mm çaplarda filamentler ticari olarak bulunmaktadır (3dxtech, 2019; Oo-kuma, 2019;

Colorfabb, 2019). Genel olarak eklemeli imalatatta kullanılan kompozit malzemeler Şekil 1.17’de verilmiştir.

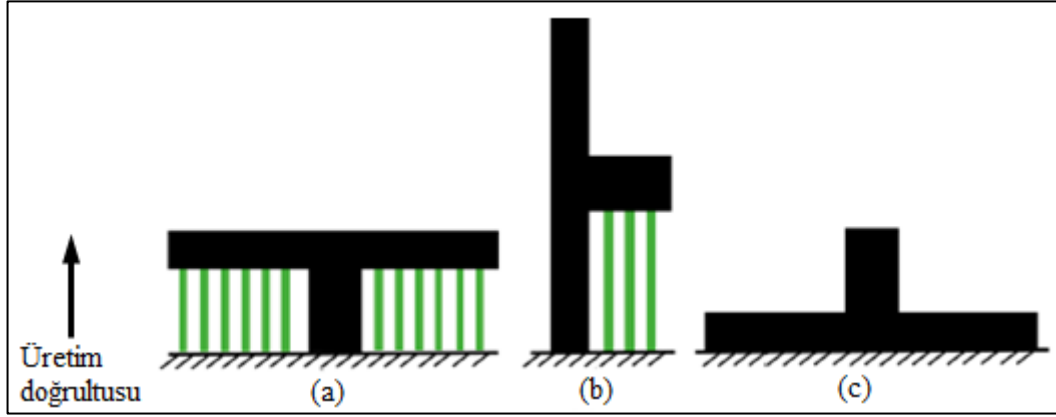


Şekil 1.17. Eklemeli imalatatta fiber takviyeli kompozitler (Fidan vd., 2019)

1.2.4. Eriyik biriktirme yönteminde tasarım kriterleri

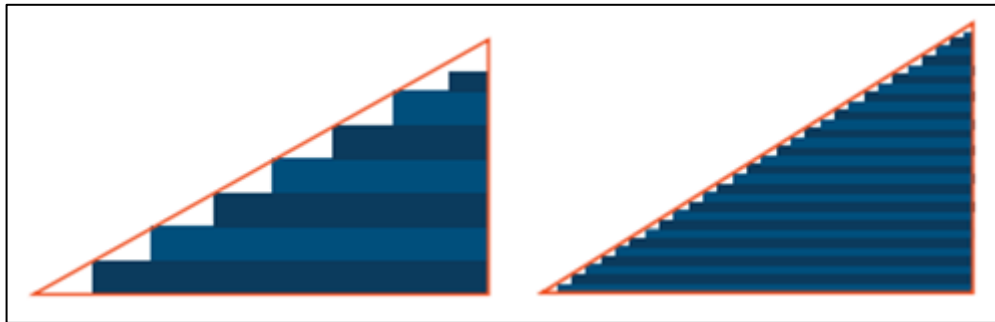
Eklemeli imalat teknolojileri, serbest biçimli geometrileri prizmatik ve simetrik geometriler kadar kolay üretebilmekte dolayısıyla tasarımcıların, fonksiyonel geometri ve arayüzler tasarlarken standart doğrusal veya dairesel şekilli geometrilerle sınırlı kalmasını önlemektedir. Tasarım özgürlüğü, eklemeli imalatı fonksiyonel parçaların hızlı üretimi için tercih edilen bir teknoloji haline getirmiştir. Eklemeli imalat teknolojileri arasında en çok tercih edilen yöntemlerden birisi eriyik biriktirme yöntemidir. Tüm imalat yöntemlerinde olduğu gibi eriyik biriktirme yönteminde üretim yaparken dikkat edilmesi gereken tasarım kriterleri bulunmaktadır. Eriyik biriktirme yönteminde dikkate alınması gereken en önemli tasarım kriterlerinden biri parça oryantasyonudur. Parçanın, üretim tablası üzerindeki yönelimi üretimde kullanılacak malzeme miktarını, üretim süresini, destek yapılarının gerekli olup

olmadığını belirlemektedir. Bu nedenle tasarımda makine özellikleri de dikkate alınarak parça konumunun iyi analiz edilmesi gerekmektedir (Şekil 1.18).



Şekil 1.18. T parçası yönlenimi, (a) fazla destek ihtiyacı, (b) daha az destek ihtiyacı, (c) destek ihtiyacı olmadan üretim, (Siyah: parça, Yeşil: destek) (Jiang vd., 2018)

Üretilmesi planlanan parçanın x-y düzleminde yönlenmesi parça mukavemetine etki etmekte ayrıca üretim süresini kısaltmaktadır. Çünkü çoğu eriyik biriktirme sistemi x-y düzleminde daha hızlı hareket etmekte ve malzeme yığılabilmektedir. Eriyik biriktirme yönteminde her katman x-y düzleminde oluşturulup bu katmanlar birbiri üzerine z ekseninde yığılmaktadır. Katı modeller üretim öncesi dilimlenerek katmanlar belirlenir. Belirlenen katmanların üretiminde izlenen takım yolları kavisli ve eğimli bölgeleri dolduramaz yalnızca yatay hareket eder. Bu nedenle özellikle parçaların eğri ve eğimli yüzeylerinde yüzey kalitesi düşmektedir. Bu durum eklemeli imalatta merdiven etkisi olarak tanımlanmaktadır. Merdiven etkisi, katman kalınlıkları mümkün olduğunca düşük tutularak minimuma indirilebilmektedir (Şekil 1.19).



Şekil 1.19. Eriyik biriktirme yönteminde merdiven etkisi (Stratasys, 2018)

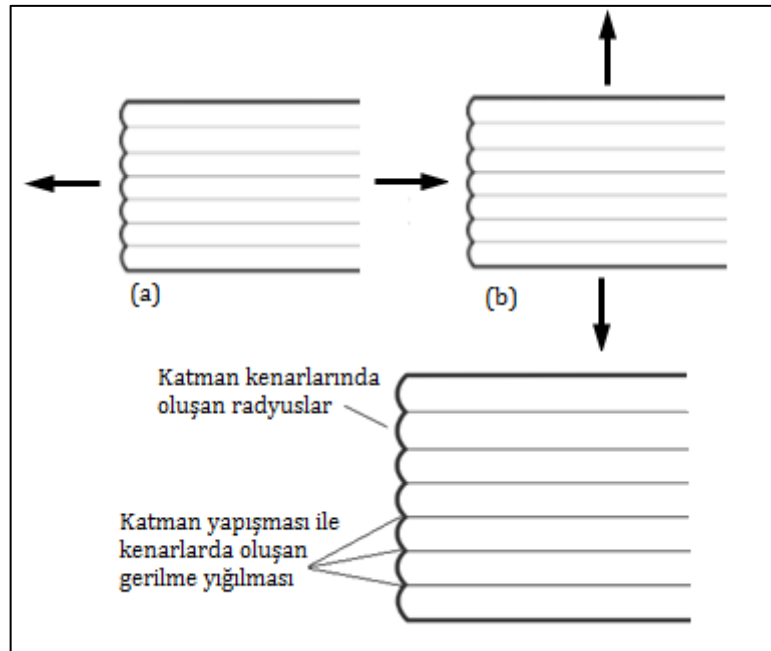
Destek malzemesinin kullanılması gereken durumlarda desteklerin parçadan uzaklaştırılması esnasında zarar görebilecek yapılar meydana gelebileceğinden, tasarım esnasında parça konumu, destek malzemesinin nasıl oluşturulacağı ve hassas detay aranan kısımlara destek malzemelerinin denk gelmemesine dikkat edilmelidir. Delikli yapıların yönlenmesi mümkün olduğunca x-y düzleminde ve yatay olmalıdır. Dikey yani z eksenine doğrultusunda olan deliklerin üretiminde, katmanlar birbiri üzerine z ekseninde yığılmakta dolayısıyla oluşan merdiven etkisi durumundan dolayı deliklerin çözünürlüğü düşük olmaktadır. Üretim yönüne dik olmayan delikli yapıların üretiminde çözülebilen destek malzemeleri kullanılmadığında, tasarımda deliklere pah vermek destek yapılarının ürüne zarar vermeden çıkarılmasını sağlamaktadır. Bileşen içinde boşluklar veya çıkıntılı bölgeler bulunduğu ve üretimde destek yapıları gereken tasarımlarda, bileşenleri parçalara ayırarak montaj özellikleri eklemek, destek yapılarına olan ihtiyacı azaltabilmektedir. Dolayısıyla destek yapılarının üretimi için gereken ek süre ve malzeme, oluşan kaba yüzeyler için gereken ek işlemler azaltılmaktadır. Üretim yönüne dik olacak, 45°'lik açıya kadar olan yapıların üretiminde destek kullanımına ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu durum üretim süresi ve maliyeti etkilemektedir.

Montaj bileşenlerinin tasarımında, bileşenler arasında geçme yuvaları veya delik pim çiftleri arasında en az bir katman kalınlığı kadar tolerans aralıkları verilmelidir. Parçadaki katman genişliklerinin az ya da fazla olması parça duvar kalınlıklarını etkilemektedir. Bu durum termoplastiklerde, soğuma esnasında parça kalınlığıyla orantılı olarak kıvrılma veya büzülme meydana getirmektedir. Bu nedenle tasarım esnasında parça kabuk kalınlıklarına dikkat edilmelidir ve ince kabuk olması gereken bölgelere giriş yapıları eklenerek çarpılmalar önenebilmektedir.

Üretimde önemli noktalardan biri de katı model ile üretim yolları belirlenen model arasında, takım yolundan dolayı oluşan farklılıklardır. Takım yollarında meydana gelen düzensizlikler katı modelde dolu olması gereken kısımlarda, boşluklar meydana getirebilmektedir. Bu nedenle üretilen parçanın tasarlanan parçaya benzerliğini kontrol etmenin yolu parça üretiminde harcanacak malzemenin, katı model hacmine oranının, %95 oranına eşit veya yüksek olmasıdır, aksi taktirde boşluk oranlarını azaltmak için takım yolları değiştirilebilmektedir (Urbanic ve Hedrick, 2016). Eklemeli imalatla geleneksel yöntemlerde bulunan parçalarda takım

apına uygun radyus vermek gibi bir zorunluluk bulunmamaktadır ancak parçadaki gerilme yığılmalarını önlemek ve mukavemeti arttırmak için kullanılabilmektedir.

Eriyik biriktirme yönteminde parça katmanların birbiri üzerine eklenmesi ile oluşmaktadır. Bu durum üretilen parçaların anizotropik özellik göstermesine neden olmaktadır. Tasarım sürecinde parçaların fonksiyonelliğini optimize etmek için anizotropinin dikkate alınması gereklidir. Mukavemetli parçaların oluşturulması için katman sayılarını azaltmak ve katman kalınlığını arttırmak tavsiye edilmektedir. Eriyik biriktirme yönteminde katmanlar x-y düzleminde elyafların yan yana yığılması ile oluşur ve bu yığılan tabakaya katman adı verilmektedir. Her bir katman oluştuktan sonra ise birbiri üzerine z ekseninde yığılır. Elyafların yönüne paralel doğrultuda mukavemet yüksek iken elyaf yönüne dik doğrultuda mukavemet daha zayıf olmaktadır. Bu zayıflığa sebep, elyaflar yığılırken sürekliliğinin sağlanamaması ve her katmanın birbiri üzerine eklenmesi sonucu oluşan gerilme yığılması olarak açıklanabilir (Stratasys, 2018). Malzeme dairesel çapta bir nozul uçtan çıkar bu nedenle yığılan malzeme dairesel formda olur, katman oluşumu sonrası kenarlarda dairesel malzeme yığılması nedeniyle girintiler oluşmaktadır. Bu girintiler gerilme yığılması meydana getirerek elyaf yönüne dik doğrultuda mukavemeti zayıflatır (şekil 1.20).



şekil 1.20. Elyaf yönüne paralel yükleme (a), elyaf yönüne dik yükleme (b), katman yapısı sonucu gerilme yığılması oluşması

Eriyik biriktirme yöntemindeki kısıtlardan biri üretimde kullanılan makinelerin düşük baskı hacmine sahip olmasıdır. Bu nedenle tasarımda üretilebilecek maksimum parça boyutları göz önüne alınarak tasarım yapılmalıdır. Düşük baskı hacimleri, üretilmesi amaçlanan parçanın alt parçalara bölünmesini gerektirebilir. Böyle durumlarda üretim sürecine montaj parçası oluşturma adımlarını da eklemek gerekmektedir. Tasarım sürecinde parça kalitesini etkileyecek birçok unsurun analizi yapılmalıdır. Detay istenen ürünlerin tasarımında, düşük katman kalınlıkları düşük nozul çapları, düşük üretim hızlarının kullanılması ve ideal malzeme sıcaklığının tespit edilmesi göz önünde bulundurulmalıdır. Eriyik biriktirme yönteminde üretim maliyeti, tasarım sürecinde dikkate alınması gereken bir diğer konudur. Eriyik biriktirme yönteminde maliyeti etkileyen en önemli faktör üretimde veya destek yapılarında kullanılan malzeme ve üretim esnasında harcanan enerjidir. Üretimde kullanılan malzeme miktarını azaltma yöntemleri; parçanın optimizasyonu, ısıtıcı tabla kullanarak parçada meydana gelebilecek çarpımları ve katman kalkmalarını önlemek amacıyla ilk katmandan önce kullanılan destek yapılarının engellenmesi ve üretimde kullanılacak parametreler ile azaltılabilir (Qattawi ve Ablat, 2017).

Eriyik biriktirme yönteminde tasarım sürecinde dikkate alınması gereken bir diğer konu, üretilecek parçanın gereksinimleri karşılayabilmesini sağlamaktır. Yöntemde üretilecek parçaların tasarımında bilgisayar destekli mühendislik yazılımları kullanılarak parçadan beklenen gereksinimler belirlenebilmektedir. Eriyik biriktirme yönteminde kullanılan mühendislik yazılımlarına, SolidWorks, ANSYS, nTopology, solidThinking Inspire ve Altair OptiStruct örnek olarak gösterilebilir. Bu yazılımlar eriyik biriktirme yönteminde olduğu gibi diğer eklemeli imalat teknolojilerinde de üretilecek parçaların tasarım ve analizlerinde kullanılabilir. Bu yazılımlarda sonlu elemanlar analizi kullanılarak, sistem matematiksel olarak ifade edilmekte tasarlanan parçaların belirlenen dış etkiler ve yük koşulları altında göstereceği davranışlar ve çalışma şartları analiz edilmektedir. Analizi yapılacak parçalar çok sayıda sonlu elemanlara bölünüp, elemanlar düğümler ile birbirine bağlanmaktadır. Her eleman, belirlenen şartlara göre matematiksel olarak çözülüp, elde edilen çözüm birleştirilerek parçanın genel davranışı tahmin edilmektedir. Sonlu elemanlar analizi, malzeme özelliklerinin ve analiz yapılacak parçanın tanımı ile başlamaktadır. Tasarımda sınır değerleri girilerek parça sonsuz sayıda bileşenden, sonlu sayıda noktalara bölünerek indirgenmektedir. Analiz tipi, sınır şartları, uygulanacak yükler

belirlenerek her noktanın matematiksel olarak çözümü gerçekleştirilmektedir. Çözümler sonucu ortaya çıkan sonuçlar görsel olarak ve grafiklerle yorumlanmakta, elde edilen çözüm optimize edilmektedir. Bu optimizasyon sonucu tasarım sürecinde hedef parçanın sahip olacağı mekanik özellikler hakkında yaklaşık bilgi sahibi olunabilmektedir.

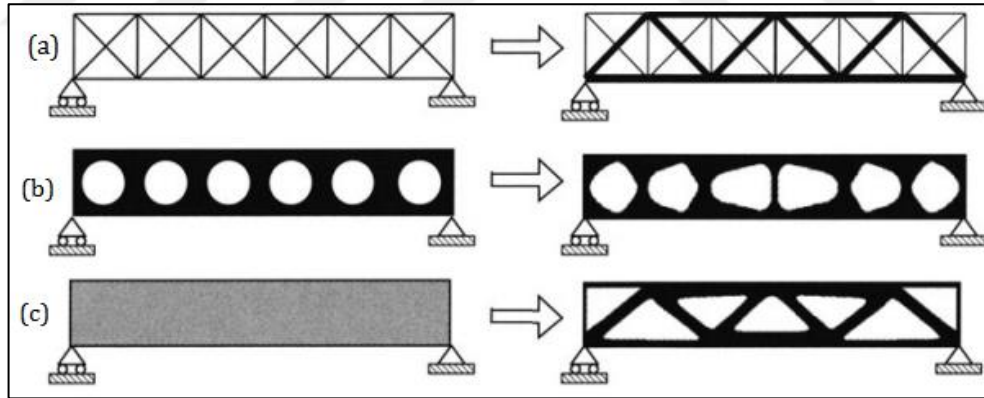
1.2.5. Eklemeli imalatla topoloji optimizasyonu

Havacılık ve otomotiv gibi maliyeti yüksek sektörlerde kullanılan parçaların tasarımı sürecinde, malzemelerin verimli bir şekilde kullanılması büyük önem arz etmektedir. Kavramsal tasarım sürecinde parçalarda kütle azaltımı sağlamak, üretim sonrası malzeme tasarrufu, üretim maliyetlerinin düşmesi, taşıtlarda yakıt verimliliği, sürat artışı, daha fazla yük taşıyabilme kabiliyeti, düşük karbon tüketimi gibi avantajlar oluşturacaktır. Yapısal optimizasyon yöntemleri bu aşamada tasarım araçları olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapısal optimizasyon süreci üretilebilirlik, kütle, maliyet, mukavemet gibi amaç fonksiyonlarının; boyut, emniyetli gerilme, mesnet noktaları, maksimum kütle ve hacim kısıtları gibi yapısal sınır koşullarını sağlayacak şekilde optimize edilmesidir. Böylece, parçada sınır şartları ve çalışma koşullarına uygun olarak, en iyi hal oluşturulmaya çalışılmaktadır. Yapısal optimizasyon yöntemleri, tasarlanan geometrinin tanımlanması için kullanılan tasarım değişkenlerinin tiplerine göre sınıflandırılabilir. Bu yöntemler genel olarak, boyut optimizasyonu, şekil optimizasyonu ve topoloji optimizasyonu olarak üç gruba ayrılmaktadır (Lee vd., 2007).

Boyut optimizasyonunda, tasarıma ait şekil ve topolojide herhangi bir değişiklik yapılmaksızın sadece boyutsal ölçülerde değişiklik yapılarak, en iyi yapısal davranışı sergileyen tasarımın boyutlarını ifade eden kalınlık, genişlik, yükseklik gibi değişkenlerin belirlenmesi amaçlanmaktadır (Lee vd., 2007). Şekil optimizasyonunda ise, yapının tasarım topolojisi sabit tutularak geometrisi en iyi olan optimum yapısal tasarıma ulaşmak hedefidir. Bu nedenle tasarım değişkenleri, tasarımın şeklini ve geometrisini belirlemektedir. Şekil optimizasyonunda genel anlamda yapının dış sınırları ve yapıda bulunan deliklerin geometrisi yani şekli değiştirilmektedir. Şekil optimizasyonu, yüzeyler üzerinde ve eğri hatlar üzerinde tanımlanabildiği için boyut optimizasyonu kapasitesinin genişletilmiş hali olarak ifade edilebilir. Boyut ve şekil optimizasyonu yöntemlerinde tasarım topolojisi yani

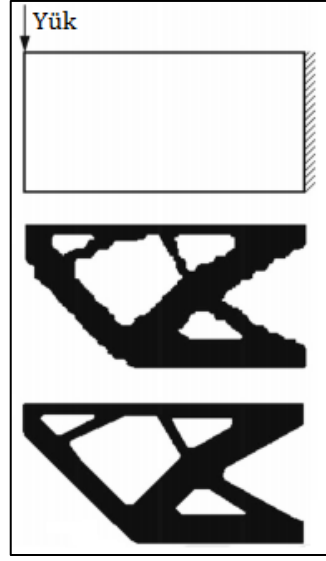
delik sayısı, çubuk bağlantıları, kiriş sayıları gibi yapısal sınırlar önceden belirlenmiştir. Bu yöntemlerde yalnızca konfigürasyonu önceden belirlenmiş yapılar üzerinde boyut ve şekil değişikliği yapılarak optimum yapının bulunması amaçlanmaktadır. Bu nedenle mevcut tasarım sınırlarında değişiklik yapmak ya da yeni topolojilerin eklenmesi mümkün değildir. Elde edilen sonuçlar mevcut tasarım üzerinden elde edildiği için optimum olmaktan uzaklaşmaktadır. Bu yöntemlerde etkin sonuçlar elde etmek için, optimizasyon işlemine en iyi topolojiye sahip tasarım ile başlanıp, sonraki süreçte boyut ve şekil optimizasyonlarından faydalanmak gerekmektedir (Bendsoe ve Sigmund, 2013).

Topoloji optimizasyonunda ise süreç daha farklıdır. Optimizasyon işlemi bir tasarım alanı içerisinde gerçekleşerek, belirlenen şartlara göre optimum malzeme dağılımının sağlanması amaçlanmaktadır (Şekil 1.21). Topoloji optimizasyonu problemlerinde bilinenler; uygulanan yükler, sınır koşulları, inşa edilecek yapının hacmi, malzemede bulunan ve bulunmayan noktalar. Belirli olan bu koşullar altında yapının mukavemetinin maksimize edilmesi ya da belirlenen sınır koşullarına göre hacmin veya kütlenin minimize edilmesi için çalışılmaktadır (Bendsoe ve Sigmund, 2013).



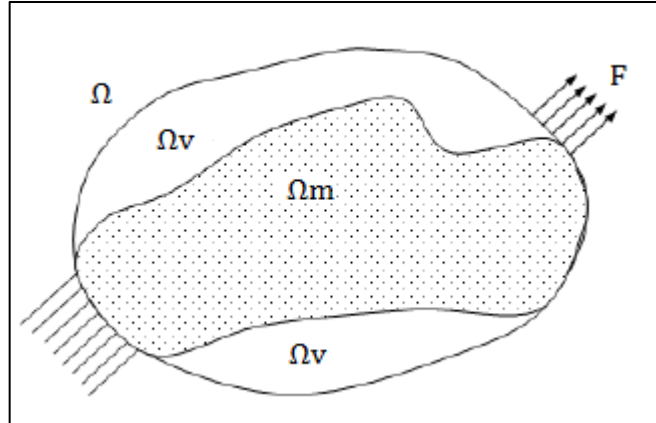
Şekil 1.21. Boyut optimizasyonu (a), şekil optimizasyonu (b), topoloji optimizasyonu (c) (Bendsoe ve Sigmund, 2013)

Topoloji optimizasyonunda işlem süreci şu şekilde gerçekleşmektedir. İlk olarak bir tasarım alanı içinde problemin tanımı yani gelecek dış yükler ve sınır şartlarının tanımı yapılarak problem belirlenir. Daha sonra hedef kriterlerinin belirlenmesi ile amaç fonksiyonu oluşturulur. Belirlenen amaca yönelik problem çözümü gerçekleştirilir. Elde edilen sonuçların üretime göre optimize edilmesi ile süreç tamamlanmaktadır (Şekil 1.22) (Steinbuch ve Gekeler, 2015).



Şekil 1.22. Problem tanımı ve topoloji optimizasyonu (Görür, 2018)

Topoloji optimizasyonu problemlerinin çözümünde, önceden tanımlanmış bir Ω referans alanı içindeki malzeme dağılımlarının belirlenmesi araştırılmaktadır (Şekil 1.23). Yani, R^2 ya da R^3 içinde bulunan Ω toplam referans alanında, sınırlı hacim, kütle gibi kısıtlar veya sınır koşullar altında rijitliği maksimum ya da yapısal kompliyansı minimum yapan amaç fonksiyonu $f(a)$ 'yı sağlayan Ω_m alt kümesi bulunmaktadır. Bu noktada temel formülasyon Denklem 1.5'deki gibi ifade edilmektedir.



Şekil 1.23. Tasarım alanı ve sınır koşulları (Zheng vd., 2009)

$$\int_{\Omega} a dv \leq \bar{V} \quad a(v) = 0 \text{ ya da } a(v) = 1, \quad \forall v \in \Omega \quad (1.5)$$

Burada, $a(v)$ Ω alanında bulunan yoğunluk dağılımı, $\bar{V}$ katı hacmin en üst sınırıdır. Şekil 1.23'de bulunan Ω_m (malzeme bulunan alan) içinde $a(v) = 1$ iken, Ω_v

(malzeme bulunmayan alan) içinde $a(v) = 0$ olmaktadır. Katı alanın şekli nedeniyle optimizasyon probleminin analitik yöntemler ile çözümü oldukça zordur. Bu nedenle nümerik hesaplama yöntemleri yaklaşık sonuçlar elde etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu durumda ilk olarak, Ω referans alanı N adet sonlu elemanlara ayrılır. Daha sonra her bir sonlu elemana a_i tasarım değişkeni atanır. Tüm tasarım değişkenlerini içeren tasarım değişkeni vektörü a tasarım alanı içindeki malzeme dağılımını gösterir. N adet sonlu elemana bölünmüş olan optimizasyon problemi Denklem 1.6'daki gibi ifade edilir.

$$\sum_i^N a_i v_i \leq \bar{V}, \quad a_i = 0 \text{ ya da } a_i = 1, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1.6)$$

Burada v_i i. elemanın hacmini belirtmektedir. Sonlu elemanlara bölme yöntemi denklemi basitleştirmede topoloji optimizasyonu problemlerini ayırmak için başka sayısal yöntemlerde kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en popüler olanı Solid Isotropic Material with Penalization (SIMP) metodudur. SIMP metodu kullanılarak optimizasyon problemlerini çözerken iki farklı çözüm yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemler, yoğunluk yöntemi ve homojenizasyon yöntemi olarak adlandırılmaktadır.

Homojenizasyon yönteminde malzeme yoğunluğu, çok sayıda küçük boşluk içeren kompozit malzemeye benzeyen bir mikroyapı olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntemde içinde dikdörtgensel veya karesel boşluklar bulunan mikroyapılar kullanılmaktadır. Her bir elemanın tasarım değişkeni boşlukların genişliği, derinliği ve doğrultusudur. Dolayısıyla yapının topolojisi boşluk, gözenek ve katı mikroyapılarının dağılımını içeren çoklu değişkenler ile gösterilmektedir. Bu değişkenler malzemenin elastisite ve yoğunluk özelliklerini belirler. Yöntemde, eleman yoğunluğu Denklem 1.7'de olduğu gibi ifade edilir.

$$\rho = 1.0 - (1.0 - a)(1.0 - b) \quad (1.7)$$

Burada, $(1.0-a)(1.0-b)$ boşluk elemanın hacmini temsil etmektedir. $a=b=0$ iken elemanda malzeme olmadığı, $a=1$ ya da $b=1$ iken elemanın malzeme ile dolu olduğu varsayılmaktadır. Eğer a ve b ara değerler alırsa, bu durum gerçek olmayan malzeme özelliklerini göstermektedir. Optimizasyon sürecinde mikro yapılar katı yani malzeme ile dolu olan (1) ve boşluk yani malzeme ile dolu olmayan şeklinde (0) değişen sürekli değerler olarak varsayılır.

Buna göre homojenizasyon yönteminde amaç fonksiyonu olarak rijitlik maksimizasyonu yani kompliyansın minimizasyonu ve kısıtlayıcı fonksiyon olarak malzeme azalması seçilerek belirlenen uygun yapısal alan içinde ideal malzeme dağılımının bulunması amaçlanmaktadır (Yıldız vd., 2003).

Yoğunluk yönteminde, tasarım alanı küçük düğensel elemanlara ayrılıp, ayrılan her eleman içinde malzeme özelliklerinin sabit ve izotropik olduğu kabul edilmektedir. Her elemanın malzeme yoğunluğu doğrudan tasarım değişkeni olarak kabul edilir ve malzeme sertliğinin yoğunluğa doğrusal olarak bağı olduğu kabul edilir (Denklem 1.8, Denklem 1.9).

$$E_{ijkl}(x) = \rho(x^p)E_{ijkl}^0 \quad p > 1 \quad (1.8)$$

$$\int \rho(x)d\Omega \leq V \quad 0 \leq \rho(x) \leq 1, x \in \Omega \quad (1.9)$$

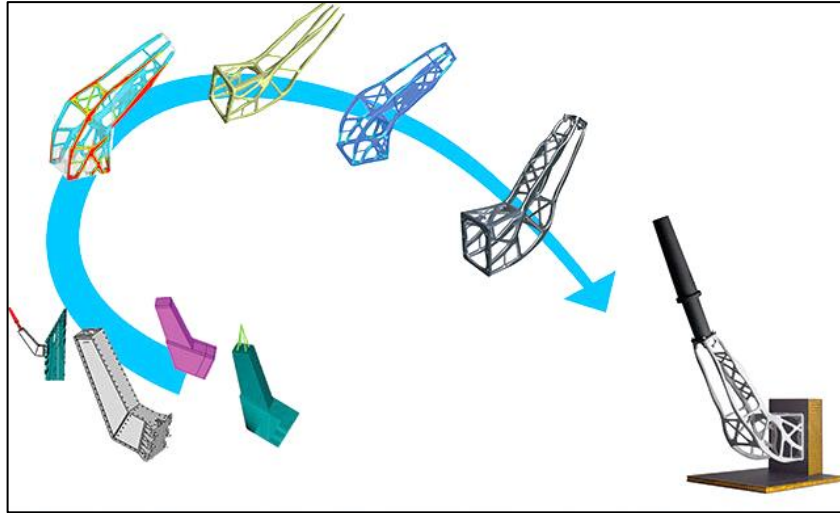
Burada, E_{ijkl}^0 izotropik malzeme özelliğini, $\rho(x^p)$ yoğunluk fonksiyonunu, p ceza faktörünü ve V malzemenin toplam hacmini belirtmektedir. Yoğunluk yönteminde, her bir elemanın malzeme yoğunluğu 0 ve 1 arasında değişen tasarım değişkeni olarak kullanılmaktadır. 0 değişkeni malzemenin tasarım alanından uzaklaştırılacağını, 1 değişkeni malzemenin tasarım alanında kalacağını ifade etmektedir. Yoğunluk yöntemi ile topoloji tasarımında amaç, tasarım değişkeni olarak belirlenen malzeme yoğunluğunun ideal dağılımını hesaplamaktır. Bu yöntemde eleman yoğunluğu ile malzeme arasındaki ilişki Denklem 1.10'da verilmiştir.

$$\frac{E_i}{E_0} = \rho^p \quad (1.10)$$

Denklemlerde belirtilen E_i ve E_0 sırasıyla ara ve gerçek malzeme elastisite modülünü, ρ eleman yoğunluğunu ve p ceza katsayısını ifade etmektedir. Yoğunluğun 0 ile 1 arasında bir değer alması beklenir, bu değerler dışında yoğunluk cezalandırılır ve 0 ile 1 arasında bir değer almaya zorlanır. Yoğunluk yönteminde de homojenizasyon yöntemine benzer şekilde topoloji tasarımı için amaç rijitliğin maksimum olmasına karşılık hacmin veya kütlenin minimizasyonudur (Yıldız vd., 2003).

Homojenizasyon yöntemi ve yoğunluk yöntemi karşılaştırıldığında, homojenizasyon yönteminde çok fazla tasarım değişkeninin kullanılması, çoklu yükleme ve kısıtlara sahip olması, problem yapısını daha karmaşık hale getirmekte ve çözüm için gerekli işlem hacmini arttırmaktadır. Malzeme yoğunluğu yönteminde daha az tasarım değişkeni bulunmakta ve daha genel bir yapıya sahip olmaktadır. Bu nedenle genel uygulanabilirlik ve verimlilik dikkate alındığında yazılım programlarında ağırlıklı olarak malzeme yoğunluğu yöntemi kullanılmaktadır.

Topoloji optimizasyonu sonucu elde edilen tasarım, genellikle karmaşık yapıli geometrilere oluşmaktadır. Bu tür geometrilerin geleneksel imalat yöntemleri ile üretilmesi oldukça zordur. Bu nedenle oluşan geometri üzerinden kullanılacak imalat yöntemi kısıtları göz önüne alınarak yeniden tasarım yapılmaktadır. Ancak eklemeli imalat teknolojilerinin, karmaşık geometrileri herhangi bir kısıtlama olmadan üretebilme kabiliyetleri sayesinde bu imalat kısıtları ortadan kalkmakta ve topoloji optimizasyonu ile tasarlanan geometrilerin endüstriyel uygulamalarda kullanımına potansiyel oluşturmaktadır. Topoloji optimizasyonu birçok araştırmaya konu olmakta ve havacılık endüstrisi, medikal implant sektörü gibi değerli, özel parçalar gerektiren sektörlerde, hafif parçaların tasarımı aşamasında kullanılmaktadır. Örneğin, Ruag firmasına ait Sentinel-I uydusu anten destek parçalarında topoloji optimizasyonu sonucu %40 üzerinde kütle tasarrufu öngörölmüş ve tasarlanan parçaların üretimi eklemeli imalat teknolojileri ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.24). 1.6 kg'lık kütleyle sahip parçanın topoloji optimizasyonu sonrası kütlesi 940 g'a inmiştir (Eos, 2018). Airbus A380 tipi yolcu uçaklarında kullanılan kanat destek kaburgalarında topoloji optimizasyonu sonucu elde edilen geometriye boyut ve şekil optimizasyonu uygulanması sonucu uçak başına 500 kg'lık bir kütle tasarrufu sağlanmıştır. Bu durum, yakıt verimliliği ve yük taşıma kapasitesinin artmasını sağlamıştır.



Şekil 1.24. Sentinel anten destek parçası topoloji optimizasyonu (Eos, 2018)

Airbus bir başka uygulamasında, A320 uçaklarında bulunan menteşe tutucu parçalarına topoloji optimizasyonu uygulamış ve tasarlanan yeni parçaların üretimini eklemeli imalat teknolojileri ile gerçekleştirmiştir. Elde edilen sonuçlarda, 918 g olan menteşe tutucu kütlelerinin %64 oranında azaltılarak 326 g'a indiği belirtilmiştir (Tomlin ve Meyer, 2011). Bunun yanısıra A350 uçağına ait bir başka bağlantı parçasında topoloji optimizasyonu sonucu %26 oranında kütle tasarrufu sağlanırken, bir uçakta bulunan 120 adet parçadan toplam 85 kg'lık bir kütle tasarrufu sağlandığı belirtilmiştir. Topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalatın sağladığı avantajlar sonucu, bir filo ya ait yaklaşık 600 uçağıın bulunduğu varsayıldığında ve her uçaktan yalnızca 1 kg'lık kütle tasarrufu sağlandığında, yılda toplam 90000 lt'lik yakıt tasarrufu ve karbondioksit salınımında 230 tonluk azalma sağlanacağı belirtilmektedir. Dolayısıyla topoloji optimizasyonu ve eklemeli imalatın havacılık sektöründe öneminin gün geçtikçe artacağını söylemek mümkündür (Yılmaz, 2015).

1.2.6. Eklemeli imalatta kullanılan üç boyutlu yazıcılar ve uygulama alanları

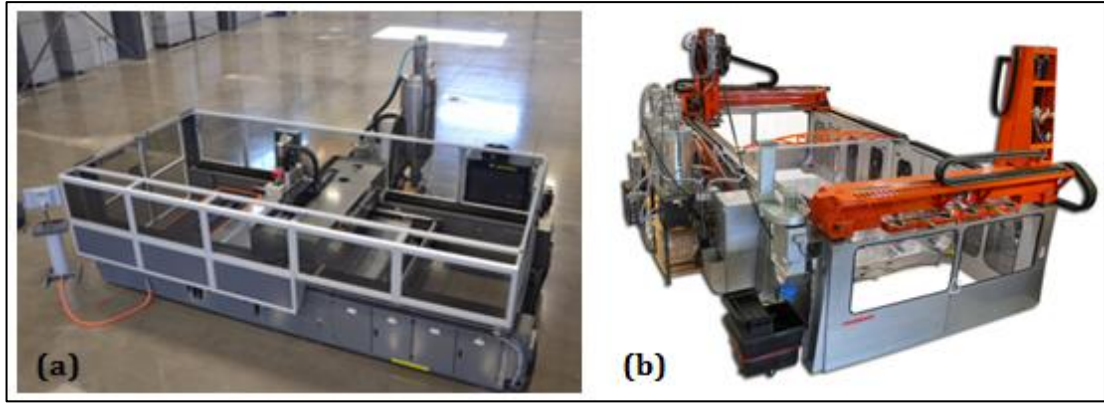
Dünya genelinde en yaygın kullanılan eklemeli imalat teknolojisi eriyik biriktirme yöntemidir (Verhoef vd., 2018). Mucidi Scott Crump tarafından oyuncak üretimi amacıyla oluşturulan yöntem, yıllar içinde fonksiyonel parçaların üretilbildiği bir teknoloji haline gelmiştir. Diğer eklemeli imalat teknolojileri gibi eriyik biriktirme yönteminin ortaya çıkması geleneksel yöntemlerde üretimi zor olan karmaşık yapıları parçaların herhangi bir takım ihtiyacı olmadan üretilbilmesine olanak sağlamıştır. Yöntemde kullanılan malzeme çeşitliliğinin diğer yöntemlere göre fazla olması,

kolay ulaşılabilirliği, üretilen parçaların iyi mekanik özellikler göstermesi ve fonksiyonel parçaların düşük maliyetlerde üretilebilir olması bu teknolojiye olan ilgiyi daha da arttırmıştır. Polimer esaslı malzemeler kullanılarak üretim yapılabilen eklemeli imalat teknolojileri arasında en mukavemetli parçalar eriyik biriktirme yöntemi kullanılarak üretilmektedir (Gibson vd., 2014). Eriyik biriktirme yönteminde kullanılan cihazlar Stratasys firması ile erişilebilir duruma gelmiştir. Dolayısıyla üç boyutlu yazıcıların gelişimi Stratasys firmasının ürettiği cihazlardan esinlenerek ilerlemiştir. Gelişen teknoloji ve artan imkânlar ile farklı firmalar bu teknolojiye erişerek kendi markalarını oluşturmuş ve piyasaya sunmuştur. Ticari olarak erişilen üç boyutlu yazıcılarda kullanılabilen malzeme çeşidi ve üretimde kullanılan parametreler genellikle kısıtlanmaktadır. Bu sistemlerdeki diğer belkide en büyük dezavantaj ise düşük baskı boyutları nedeniyle tasarım esnekliğinin olmamasıdır. Sektörlerde eklemeli imalatın yer bulması ve sunduğu avantajlar farklı boyutlardaki sistemler üzerine çalışma ihtiyacı oluşturmuştur. Bu nedenle büyük hacimli katmanlı üretim sistemleri farklı teknolojilerde geliştirilmeye başlanmıştır.

Eklemeli imalat teknolojilerinde, kişiselleştirilmiş ürünlerin büyük boyutlarda üretimi, hassas kalıpcılık teknolojileri için kompleks kalıp modellerinin imalatı, digital tasarım verisinden daha az malzeme ve daha düşük maliyet ile modellerin çıkarılabilmesi için büyük hacimli eklemeli imalat üretim sistemleri oluşturulmaya başlanmıştır (MacDonald vd., 2017). Bu çalışmalara örnek olarak, metal parçaların büyük hacimde üretilebilmesini sağlayan toz yataklı sistemlerde, laser ergitme metodu kullanarak 1100x1100x300 mm boyutlarında üretim sistemleri GE Atlas programı kapsamında geliştirilerek havacılık ve imalat endüstrisine tanıtılmıştır (GE Additive, 2019). Büyük hacimli eklemeli imalat sistemleri tasarım avantajının verdiği esneklik ile yeni nesil turboprop jet motorlarının üretiminde 855 ayrı parçayı yalnızca 12 parçaya düşürerek, parça kütlesinde 45 kg'lık düşüş, %20 yakıt tasarrufu, %10 daha fazla güç üretim avantajı ve bakım kolaylığı sağlamıştır (Kellner, 2018). Metal eklemeli imalat sistemlerinin büyük hacimde üretimin bir diğer örneğinde laser depozisyon yöntemi ile metal tozlarının eritilerek parça üretiminde artık kabul görmüş bir üretim metodu olmasıdır. Bu teknoloji ile Boeing 787 Dreamliner uçağına ait büyük yapısal parçalar, Norsk firması tarafından geliştirilen hızlı plazma depozisyon yöntemi ile Ti6Al4V malzemeler kullanılarak, standartlara uygun parçalar üretilmeye başlanmıştır (Norsk Titanium, 2017). Malzeme teknolojilerindeki

gelişmelerde büyük hacimli katmanlı üretim teknolojileri tarafından farklı özelliklere sahip ürünlerin üretilebilmesini sağlamıştır. Lockheed Martin, uydularda kullanılan yakıt tanklarını elektron ışınli ertitme teknolojisini kullanarak üretmiş ve geleneksel yöntemlere kıyasla iki yıl süren teslim süresini üç aya indirerek, malzemede %80 tasarruf sağlamıştır.

Özellikle bu çalışmanın kapsamında da yer alan termoplastik malzemelerin yapısal parçalarda kullanımı gibi kompozit kalıplar ve model yapımlarında da eriyik biriktirme yöntemi kullanılarak üretilen ürünler bulunmaktadır. Örneğin, Dassult Falcon jetlerinde karbon fiber katkıli kompozit kalıpların üretimi üzerine yapılan bir çalışmada ultem malzeme kullanarak, geleneksel talaşlı imalat metotları ile 10-14 hafta süren 68 kg'lık bir kompozit kalıbı, eriyik biriktirme yöntemi ile 40 saat ve 15 kg'a düşürmüştür. Büyük hacimli eklemeli imalat sistemleri aynı zamanda maliyet ve üretim süreci açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Termoplastik esaslı malzemelerin büyük hacimli sistemlerde kullanılabilmesi fikri, ORNL Laboratuvarı tarafından geliştirilen büyük baskı hacimli eklemeli imalat sistemi ile gerçek olmuştur. BAAM (Big Area Additive Manufacturing) olarak adlandırılan bu üç boyutlu yazıcı, 3556x1651x1828 mm baskı hacmi ve pelet ekstruder sistemi ile eriyik biriktirme yöntemini kullanarak üretim yapan en büyük baskı hacmine sahip üç boyutlu yazıcı olarak ticarileştirilmiştir. Bu sistemi bünyesine katan Local Motors dünya tarihinde %75 oranında üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş ilk elektrikli araç Strati'yi tanıtmıştır (Love, 2015). Bu gelişme ile büyük boyutlu parçaların eriyik biriktirme teknolojisinde üretilebilirliği ve ürünlerin fonksiyonel olarak kullanılabilirliği gösterilmiştir. Büyük boyutta üretim yapan bu üç boyutlu yazıcıda üretim hızını ve yığılan malzeme miktarını arttırmak amacıyla büyük çaplı nozullar kullanılması (2.5-7.6mm), sistemde üretilen parçaların yüzey kalitesini düşürmektedir (Chesser vd., 2017). Yüzey kalitesini arttırmak için üretilen parçaların talaşlı imalat yöntemleri ile işlenmesi gerekmektedir. Bu sorunu ortadan kaldırmak amacıyla Thermwood firması, büyük ölçekli eklemeli imalat (LSAM- Large Scale Additive Manufacturing) olarak adlandırdığı sistemi geliştirmiş ve ticarileştirmiştir (Şekil 1.25). Sistem, eriyik biriktirme yöntemine göre üretim yapmakta ve entegre baskı kafaları sayesinde parça tabladan uzaklaştırılmadan yüzeyler talaşlı imalat ile işlenerek iyileştirilmektedir (Thermwood, 2019).



Şekil 1.25. Büyük baskı hacimli eklemeli imalat teknolojileri, (a) BAAM, (b) SLAM (Cincinnati, 2019; Thermwood, 2019)

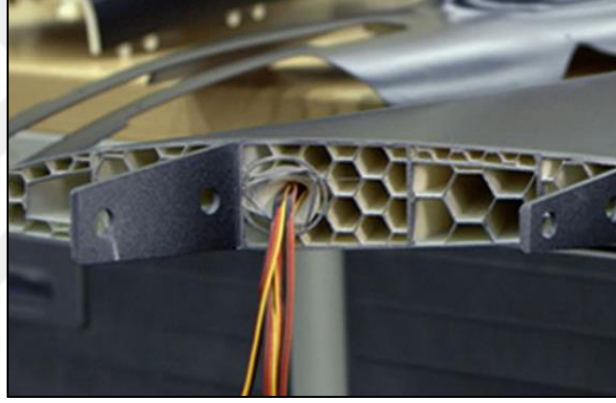
Büyük boyutlu parçaların üç boyutlu üretimi, geleneksel imalat yöntemlerinin sağlayamadığı karmaşık geometriler, düşük maliyetli ürünler ve esnek çözümler getirmektedir. Havacılık sektörleri büyük boyutlu üretimlerin ve eklemeli imalat teknolojilerinin önemini vurgulamaktadır. Bell havacılık firması helikopterinde kullanılan pervane kalıplarını LSAM sistemlerini kullanarak termoplastik malzemelerden üretmekte, gelecekte günlük ulaşımda kullanılacak olan şahsi hava taksilerinin üretimi için büyük boyutlu eklemeli imalat sistemlerinin ideal imalat yöntemi olacağını vurgulamaktadır. Bunun yanı sıra, Local motors kuracağı fabrikalarda yalnızca BAAM sistemleri kullanarak özel üretim model araçlar üretmeyi planlamaktadır. Ayrıca otomotiv sektörünün ileride ulaşacağı noktaya değinen Local Motors, her markaya ait eklemeli imalat sistemleri ile mikrofabrikalar kurulup tüketicinin bu mikrofabrikaları ziyaret ederek kendi araçlarını tasarlama ve üretme imkânına sahip olacağını belirtmiştir (Wright, 2016).

Boeing firması, uçaklarında kullanılan parçaların birçoğunu eklemeli imalat ile üretilen parçalarla yer değiştirmeyi planladığını belirterek başlıca imalat yöntemi olarak eklemeli imalatı kullanacağını belirtmiştir (Yılmaz vd, 2015). Aurora ve Stratasys işbirliğinde yeni nesil jet motorlu insansız hava araçlarının üretiminde eriyik biriktirme yöntemi kullanılmaya başlanmış, gövde ve kanatları tamamen termoplastik malzeme kullanılarak üretilen insansız hava uçaklarında tasarım ve üretim süresi % 80 oranında azaltılmıştır. Bunun yanı sıra, Boeing firması elektrik aksamı dışındaki parçalarının tamamını eriyik biriktirme yöntemi kullanılarak ürettiği Şekil 1.26'da gösterilen Thor isimli insansız hava aracını tanıtmış ve eriyik

biriktirme yönteminin, insansız hava araçlarının üretiminde karmaşık tasarımlara izin veren düşük maliyetli ve en uygun imalat yöntemi olduğunu vurgulamıştır.



Şekil 1.26. EBY ile üretilen insansız hava araçları Aurora (a) ve Thor (b) (Stratasys, 2019; Airbus, 2016)



Şekil 1.27. Aurora kanat yapısı (Stratasys, 2019)

Mevcut uygulamalarda görüldüğü üzere eklemeli imalat sistemleri havacılık ve uzay gibi önemli sektörlerle adapte olmuş ve parça üretiminde aktif olarak kullanılmaya başlamıştır. Şekil 1.27’de görüldüğü gibi eriyik biriktirme yöntemi ile bütünleşik kanat yapıları topolojik tasarıma uygun olarak yapılabilir. Gittikçe artan uygulama alanlarına rağmen büyük boyutlu sistemlerin yüksek maliyetleri, ağır rekabetin olduğu diğer sektörlerle girmesini engellemektedir. Bu nedenle ihtiyaca yanıt oluşturabilecek ancak daha düşük maliyetli kolay erişime imkân sağlayan büyük baskı boyutlarında üç boyutlu sistemlerin geliştirilmesine ihtiyaç olduğu düşünülmektedir.

1.3. Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Eklemeli imalatla önemli konulardan biri malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesidir. Endüstriye yeni adapte olmayan başlayan bu teknolojilerde, henüz yöntemlere göre belirli standartların oluşmaması uygulamalarda kullanılacak amaca yönelik malzeme seçimlerinde mekanik özelliklerin belirlenmesini gerekli kılmaktadır. Bu amaçla eriyik biriktirme yönteminde üretilen parçaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan deneylerden biri çekme deneyidir. Yöntem termoplastik esaslı malzemeleri kullanarak üretim yapmakta dolayısıyla mekanik özelliklerin belirlenmesinde, plastik esaslı malzemelerin mekanik davranışlarının belirlenmesinde kullanılan standartlardan faydalanılmaktadır. Takviyeli ve takviyesiz plastik malzemelerin çekme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan standartlardan biri ASTM D638 standardıdır (ASTM, 2015). Standartta belirtilen ölçülere ve şekillere uygun hazırlanan test numuneleri, standartta belirtilen test hızları altında parçada kopma meydana gelene kadar çekme işlemine maruz bırakılmaktadır. Çekme deneyi ile parçanın, maksimum gerilme dayanımı, şekil değiştirme oranları, elastisite modülü, akma dayanımı gibi karakteristik özellikleri belirlenebilmektedir. Çekme deneyi, numunenin çekme cihazına bağlanması ve değişken miktarlarda kuvvet uygulanması sonucu bu kuvvete karşılık gelen uzamanın kaydedilmesiyle gerçekleştirilmektedir.

Malzeme üzerine etki eden kuvvet ve şekil değiştirme arasındaki ilişki malzemenin hangi koşullar altında çalışabileceğini göstermektedir. Düşük kuvvet seviyelerinde uzama miktarı uygulanan kuvvet ile doğru orantılı olmaktadır. Malzeme elastik davranış göstermekte yani kuvvet kaldırılınca eski haline dönmektedir. Elastik davranış belirli bir noktadan sonra sona ermekte ve bu noktada parçada kalıcı deformasyonlar meydana gelmektedir. Bu durumda kuvvet kaldırılınca malzeme eski haline dönememekte ve belirli miktarda deformasyon malzemede kalıcı olmaktadır. Malzemeye uygulanan yük daha da arttırıldığında malzeme maksimum gerilme noktasına ulaşmakta ve bu noktada malzeme kesitinde daralmalar başlamaktadır. Bu duruma boyun verme adı verilir. Bu nokta üzerinde malzeme bir süre daha gerilmeye maruz kalabilir ancak taşıyabileceği yük miktarı azalmaktadır. Yük belirli bir noktaya geldiğinde malzeme gelen yükü karşılayamayacak duruma gelmekte ve kopma oluşmaktadır. Malzeme üzerinde meydana gelen bu davranış kuvvet uzama eğrisi olarak görüntülenebilmektedir. Kuvvet ve uzama değerleri parçanın ilk kesit

alanı ve uzunluğuna bölündüğünde, gerilme birim şekil değiştirme eğrisi elde edilebilmektedir. Mühendislik gerilmesi (σ) ve şekil değiştirmesi (ϵ), Denklem 1.11 ve Denklem 1.12’de verilmiştir.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1.11)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1.12)$$

Burada, F çekme kuvveti, A_0 ölçüm bölgesinin kesit alanı, L_0 ölçüm bölgesinin başlangıç uzunluğu, ΔL ölçüm bölgesindeki değişimdir ($L-L_0$). Kuvvet uzama yerine gerilme şekil değiştirme eğrisi kullanılmasının avantajı, gerilme gerinme eğrisinin numune boyutlarından bağımsız olmasıdır. Başka ifadeyle, A kesitine ve L uzunluğuna sahip bir çubuğa F yükü uygulandığında δ kadar deformasyon meydana geliyorsa, δ kadar deformasyon oluşturmak için 2A kesitindeki bir çubuğa 2F kuvveti gerekmektedir. Ancak F yükü ve A kesitinde ancak 2L uzunluğundaki bir çubuğa uygulandığında 2δ deformasyon ortaya çıkar. İki halde de deformasyonun, çubuk boyuna oranı sabit olup δ/L ’ye eşittir. Bu gözlem ile şekil değiştirme kavramı tanımlanırsa, eksenel yük altındaki bir çubukta normal şekil değiştirme, çubuğun birim uzunluğunda meydana gelen deformasyon olmaktadır (Denklem 1.13) (Hibbeler, 2013).

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (1.13)$$

Böylece gerilme şekil değiştirme diyagramı çizilirken kullanılan numunenin boyutlarına bağlı olmayan karakteristik malzeme özelliklerini veren bir eğri elde edilebilir. Şekil değiştirme diyagramlarındaki bazı özelliklere göre malzemeleri gevrek veya sünek olarak ikiye ayırmak mümkündür. Sünek malzemeler, akma dayanımından sonra uygulanan yükteki artışa bağlı olarak büyük oranda deformasyona uğrarken, gevrek malzemeler belirgin bir uzama göstermeden kırılmaları ile karakterize edilirler. Bu nedenle kopma anındaki şekil değiştirmeleri sünek malzemelere oranla düşüktür. Bir malzemenin sünekliğinin standart ölçüsü yüzde uzamadır ve Denklem 1.14’deki gibi tanımlanır.

$$\%uzama = \frac{L - L_0}{L_0} * 100 \quad (1.14)$$

Burada, L_0 numunenin ilk boyu, L ise kopma sırasındaki numune boyudur. Mühendislik gerilmesi ve şekil değişirmesi hesaplanırken numunenin ilk kesit alanı ve ilk boyu kullanılmaktadır. Ancak çekme testi esnasında malzeme boyunda ve kesit alanında anlık değişimler meydana gelmektedir. Bu durum mühendislik değerlerinde hatalara yol açar. Bu nedenle anlık değişimler kullanılarak elde edilen değerlere gerçek gerilme ve gerçek şekil değiştirme adı verilir. (Denklem 1.15, Denklem 1.16).

$$\sigma_g = \frac{F}{A_i} \quad (1.15)$$

$$\varepsilon_g = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (1.16)$$

Burada, σ_g gerçek gerilme, A_i kesit alanında meydana gelen anlık değişim, dL/L birim şekil değiştirmedeki artıştır. Malzemeye kuvvet uygulandığında, meydana gelen uzamalar elastik sınırlar içinde gerilmelerle orantılıdır. Bu orantı Hooke Yasası olarak bilinmektedir. Elastisite modülü, malzemenin elastik bölgede şekil değiştirmesi için gerekli gerilme miktarını ifade etmektedir (Denklem 1.17).

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1.17)$$

Burada, σ çekme gerilmesi, E elastisite modülü ve ε birim şekil değişimidir. Elastisite modülünün yüksek olması, malzemenin elastik olarak zor esnediğini gösterirken, düşük olması nispeten daha kolay esnediğini gösterir. Dolayısıyla elastisite modülü malzemeye özgü karakteristik bir özelliktir ve malzemenin rijitliğinin göstergesidir.

1.4. Taguchi Deney Tasarımı

Taguchi yöntemi üründe ve proseste, değişkenliği oluşturan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerinin en uygun kombinasyonunu seçerek, ürün ve prosesteki değişkenliği en aza indirmeye çalışan bir deneysel tasarım yöntemidir (Ross, 1995). Taguchi yöntemi, kaliteyi arttıran, maliyeti düşüren ve araştırma geliştirme faaliyetlerini hızlandırmaya yarayan bir tekniktir. Yöntemde geliştirilen metodoloji üç temel kavramdan oluşmaktadır. Bu kavramlar sistem tasarımı, parametre tasarımı ve tolerans tasarımıdır. Sistem

tasarımı, eldeki verilerin değerlendirilmesi, mevcut yeniliklerin araştırılması ve sistemde kullanılabilirliği üzerine fizibilitesinin yapılması aşamasıdır. Parametre tasarımı aşamasında, geliştirilecek olan ürünün özelliklerinin en iyi seviyeye getirilebilmesi için üretimde kullanılan parametrelerin iyileştirilmesi sağlanır ve bu aşama süreç iyileştirmedeki en önemli aşamadır. Tolerans tasarımı aşaması ise, parametre tasarımında elde edilen nominal değerler için kabul edilebilir değişkenlik aralığının belirlenmesi aşamasıdır (Taguchi vd., 2005). Taguchi yönteminin uygulama adımları şu şekildedir;

- Üretim faktörlerinin seçimi ve etkileşimlerinin belirlenmesi
- Üretim faktörlerine ait seviyelerin belirlenmesi
- Ortogonal diziler seçilerek, faktör ve seviyelerin matrise atanması
- Deneylerin yapılması
- Faktörlerin en uygun seviyelerinin belirlenmesi ve istatistiksel analizlerin yapılması
- Doğrulama deneylerinin yapılması

Üretime yönelik olası tüm faktör ve seviyelerin belirlenmesi çok sayıda deneysel veri ortaya çıkarmakta, zaman ve maliyeti artırmaktadır. Bu durumu önlemek adına ortogonal diziler geliştirilmiştir. Ortogonal diziler kullanılarak faktör seviyeleri teker teker değiştirilmek yerine, eş zamanlı olarak değiştirilmekte ve faktörler minimum sayıda test ile değerlendirilebilmektedir.

Taguchi yöntemine göre oluşturulan deney tasarımından elde edilen sonuçlar sinyal/gürültü (S/G) oranına dönüştürülerek değerlendirilmektedir. Sinyal, sistemden alınan ve ölçülmek istenen gerçek değeri belirtirken, gürültü ölçülen değer içerisindeki kontrol edilemeyen, istenmeyen faktörleri ifade etmektedir. Sinyal/gürültü oranı, kontrol edilen faktörler üzerinde gürültü faktörlerinin etkilerini ölçerek, kalitedeki değişimin duyarlılığını göstermekte ve bu orana göre deney tasarımından en iyi koşullar belirlenebilmektedir. Uygulamada amaca yönelik üç farklı tipte fonksiyon vardır. Bunlar, sonucun en küçük en iyi olduğu durum, en büyük en iyi olduğu durum ve nominal değer en iyi olduğu durumdur (Gökçe ve Taşgetiren, 2009).

En küçük en iyi olduğu durumda:

$$S/G = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1.18)$$

En büyük en iyi olduğu durumda:

$$S/G = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1.19)$$

Nominal en iyi olduğu durumda:

$$S/G = 10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right) \quad (1.20)$$

Burada, y_i performans karakteristiğinin i . gözlem değeri, n bir denemede test sayısı, $\bar{y}$ gözlem değerlerinin ortalaması, S^2 gözlem değerlerinin varyansını ifade etmektedir. Değerlendirmede kullanılan tüm yaklaşımlarda amaç S/G oranını maksimize etmektir. Dolayısıyla deneylerde ele alınan faktörlerinin seviyeleri içerisinde en yüksek S/G oranına sahip olan değerler en iyi performansı vermektedir. Deney sonuçlarında performansı etkileyen faktörlerin etki seviyelerinin belirlenmesinde varyans analizi (ANOVA) kullanılmaktadır. Varyans analizinde amaç incelenen faktörlerin, kaliteyi ölçmek için seçilen çıkış parametreleri üzerindeki etki oranlarının ve farklı seviyelerin sebep olduğu değişkenlik oranlarının belirlenmesidir (Savaşkan vd., 2004).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde eriyik biriktirme yönteminde kullanılan termoplastik malzemeler ve fiber takviyeli termoplastik kompozitlerin üretiminde kullanılan farklı üretim parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini araştıran ve kanat kaburga profillerinde topoloji optimizasyonu içeren çalışmalar incelenmiştir.

Zhong vd. (2001), EBY teknolojisinde ABS polimeri ile kısa cam fiber takviyeli ABS kompozit malzeme üretimi üzerine çalışma yapmışlardır. İlk olarak ABS polimeri ve cam fiber takviyesine doğrusal düşük yoğunluklu polietilen (LLDPE) süneklik ve esnekliği sağlamak için eklenmiştir. Çalışmada kullanılan cam fiber takviyesinin ağırlıkça oranı %18 olarak ayarlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, cam fiberin polimer malzemeye takviye olarak eklenmesi kompozitin boyuna yükleme altında daha yüksek bir basma mukavemetine sahip olduğunu göstermiştir. Ancak ABS malzemeye sünekleştirici ve uyumlaştırıcılar kullanılmadan eklenen kısa cam fiber takviyesinin katmanlar arasındaki yapışmayı azalttığı belirtilmiştir.

Ziemian vd. (2012), ABS malzemelerden dört farklı üretim açısında üretilen numuneleri, çekme ve eğme koşullarında incelemişlerdir. Kullanılan üç üretim açısında ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$) tüm katmanlar tek yönde üretilirken, diğer açı ($45^\circ/-45^\circ$) birbirine dik olacak şekilde belirlenmiştir. Yükleme eksenine paralel olan 0° üretim açısında, 25.72 MPa ve 38.1 MPa ile sırasıyla en yüksek çekme mukavemeti ve eğilme mukavemeti elde edilirken 90° üretim açısında çekme için 14.56 MPa ve basma için 20.8 MPa ile en düşük mukavemet değerleri elde edilmiştir. 0° üretim açısında katman oluşumu çekme doğrultusuna paralel olması moleküllerin yük eksenine boyunca dağılmasını sağlamış ve çekme yüküne karşı dayanımını arttırdığını, eğilme düzlemine paralel olan 0° üretim açısının katmanlarda daha uzun fiberlere sahip olması nedeniyle yükün daha fazla dağıtılabilmesini sağladığını dolayısıyla eğilme direncini arttırdığını belirtmişlerdir. 45° ve 90° üretim açılarındaki katmanlarda bulunan fiber uzunluklarının kısa olması nedeniyle gelen yükleri taşıma kabiliyetinin azaldığı tespit edilmiştir.

Tmyrak vd. (2014), eriyik biriktirme yönteminde ABS ve PLA malzemeler kullanarak, farklı üretim açısı ve farklı katman kalınlıklarının mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. İki farklı üretim açısı ($0/90^\circ$, $45/-45^\circ$) ve üç farklı katman

kalınlığında (0.4, 0.3, 0.2 mm), ASTM D638 standardına göre ürettikleri numunelerde %100 doluluk oranı kullanmışlardır. Mekanik özellikleri incelemek amacıyla yapılan çekme testleri sonuçlarında, ABS malzemelerde 0.2 mm katman kalınlığı ve 45/-45° üretim açısında en yüksek çekme mukavemeti elde edilirken, 0.4 mm katman kalınlığı ve 90/0° üretim açısında en yüksek elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. ABS malzemeler için elde edilen en yüksek çekme mukavemeti 29.7 MPa, elastisite modülü ise 1.875 GPa olarak bulunmuştur. Üretilen ürünlerdeki mekanik özellikler üzerinde, üretimde kullanılan filament kalitesinin, üretimde kullanılan nozul sıcaklığı ve kullanılan cihaz özelliklerinin etkisi olduğu belirtilmiştir.

Savvakis vd. (2014), eriyik biriktirme yönteminde, farklı üretim parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemiştir. ABS-plus malzeme kullanılarak iki farklı katman kalınlığı (0,17 ve 0,25 mm) ve üç farklı üretim açısında (0°, 90°, 45°) çekme numuneleri üretilmiştir. En yüksek çekme mukavemeti, 0,25 mm katman kalınlığı ve 90° üretim açısında 20,68 MPa bulunurken en düşük mukavemet değeri 0,17 mm katman kalınlığı ve 0° üretim açısında 18,58 MPa olarak bulunmuştur.

Tekinalp vd. (2014), süreksiz karbon fiber (0.2-0.4 mm) ile takviye edilmiş ABS kompozitlerini mikroyapı ve mekanik performans açısından geleneksel basınç kalıplama ile üretilmiş kompozit malzemelerle karşılaştırmıştır. Ağırlıkça dört farklı oranda (%10, 20, 30, 40) süreksiz karbon fiber takviyeli malzemeler kullanılarak çekme testleri yapılmıştır. Çalışmada nozul sıcaklığı (205°C), tabla sıcaklığı (85°C), katman kalınlığı (0.2mm) ve üretim açısı (0°) parametreleri sabitlenmiştir. Ağırlıkça %10-30 oranına kadar karbon içeriklerinde karbon takviyesinin mekanik özellikleri arttırdığı tespit edilmiştir. Mekanik özellikler üzerinde, ortalama fiber uzunluğu ve matris içindeki fiber dağılımının etkili olduğu belirtilmiştir.

Love vd. (2014), kısa karbon fiber takviyeli ABS kompozit malzemelerin farklı üç boyutlu yazıcılarda mekanik özelliklerini incelemiştir. %13 oranında karbon fiber takviyesinin çekme mukavemetini ve elastisite modülünü arttırdığı ayrıca katkısız ABS termoplastığına kıyasla karbon fiber katkısının termoplastiklerin ısıl genleşme katsayısını düşürdüğü bu nedenle parçalarda çarpılma ve büzülme oranlarının azaldığı belirtilmiştir.

Huang vd. (2015), farklı üretim açılarının mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Çalışmada kullanılan üretim açıları (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90°) tek yönlü üretim açıları olarak seçilmiş ve nozul her açı seçeneğinde katmanların iç bölgelerini yatayla aynı açıyı yaparak oluşturmuştur. En yüksek çekme mukavemeti 0° üretim açısında 30.96 MPa olurken en düşük çekme mukavemeti 90° üretim açısında 10.08 MPa olarak tespit edilmiştir. Üretim açılarının artmasıyla çekme mukavemetlerinin azaldığını belirtmişlerdir.

Nunez vd. (2015), ABS-Plus malzeme kullanarak iki farklı katman kalınlığı (0,178 mm ve 0,254 mm) ve iki farklı doluluk oranında (%10, %100) üretilen ürünlerin boyutsal davranışlarını incelemiştir. En iyi boyutsal davranış 0.254 mm katman kalınlığı ve %100 doluluk oranında elde edilmiştir. Doluluk oranının artması ve katman kalınlığının azalmasının boyutsal doğruluğu arttırdığı belirtilmiştir.

Afroze vd. (2015), eriyik biriktirme yönteminde farklı üretim parametrelerin yorulma dayanımı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Test numuneleri üretiminde kullanılan üretim açıları (0° , 45° , 90°) olarak belirlenmiş, katman kalınlığı (0.2 mm) ve doluluk oranı (%100) sabit parametreler olarak kabul edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda 45° üretim açısında en iyi yorulma ömrü elde edilirken çekme mukavemeti için en yüksek değerler 0° üretim açısında 38.7 MPa olarak bulunmuştur.

Ning vd. (2015), sabit olarak belirledikleri 0.2 mm katman kalınlığı, 230°C nozul sıcaklığı, 25 mm/s üretim hızı ve $45/-45^\circ$ üretim açısında süreksiz karbon fiber takviyeli ABS malzemeler ile deney numuneleri hazırlayarak farklı karbon içeriklerinin mukavemete etkisini incelemişlerdir. %0, 3, 5, 7.5, 10, 15 oranında karbon içeriklerindeki çekme deneylerinde en iyi sonucu, %5 karbon içeriğine sahip numunelerde 42 MPa çekme mukavemeti, 2.5 GPa elastisite modülü olarak elde etmişlerdir. %5 içerikten sonra numunelerdeki çekme mukavemeti 32 MPa, elastisite modülü ise 1.9 GPa olarak bulunmuş ve ABS malzemedan elde edilen 34 MPa'dan daha düşük mukavemet değerleri elde edilmiştir. Karbon fiber içeriği ağırlıkça %10 oranını geçtikten sonra porozite oluşumu ve etkileşimin azalması sebebiyle kırılabilirliğin artacağı ve ABS malzemedan daha düşük mukavemet değerleri elde edileceği belirtilmiştir.

Nidagundi vd. (2015), eriyik biriktirme yönteminde katman kalınlığı, üretim açısı ve oryantasyon açısının mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Üç farklı parametre için üç farklı seviye belirlenmiş ve Taguchi deney tasarımı oluşturulmuştur. Üretilen test numuneleri ile çekme ve basma deneyleri yapılmıştır. Varyans analizi sonuçlarında çekme dayanımı için optimal parametreler, 0.1 mm katman kalınlığı, 0° üretim açısı ve 0° oryantasyon açısı olarak belirtilmiştir.

Shubham vd. (2016), farklı katman kalınlıklarında ABS termoplastik filamentleri kullanılarak üretilen deney numunelerinin mekanik özelliklere etkisini araştırmıştır. 0.075, 0.1, 0.25 ve 0.5 mm'lik katman kalınlıklarında üretilen numunelerde 0.075 mm katman kalınlığında 27.5 MPa'lık en yüksek çekme mukavemeti elde edilirken, 0.5 mm katman kalınlığında 19.2 MPa ile en düşük çekme mukavemeti elde edilmiştir. Çekme mukavemeti yanı sıra katman kalınlıkları artışıyla ters orantılı olarak düşen yüzde uzama miktarları meydana gelmiştir. Bu durumu katman kalınlıklarındaki artışla meydana gelen katmanlar arası yapışmanın zayıf olması ile açıklamışlardır.

Vicente vd. (2016), masaüstü üç boyutlu yazıcılarda üretim süresini ve malzeme tüketimini azaltmak amacıyla kullanılan örgü deseni ve doluluk oranı parametresinin, ABS malzeme kullanılarak üretilen parçaların mekanik özelliklerine olan etkisini incelemek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. %20, %50 ve %100 doluluk oranlarında bal peteği olarak adlandırılan altıgen hücreler, düz çizgi ve dikdörtgensel çizgi desenleri kullanılarak test parçaları üretilmiştir. Çekme deneyleri sonucunda %20 ile %50 doluluk oranları arasında mekanik özelliklerde artış meydana gelirken, en belirgin artışın 36.4 MPa ile %100 doluluk oranında ve dikdörtgensel çizgi örgü desenlerinde oluştuğunu belirtmişlerdir. Bu durumu doluluk oranları arttıkça katman içerisinde birbiri ile etkileşimde olan elyaf miktarının artması sebebiyle elyaflar arasındaki bağların daha kuvvetli olduğu ve gelen yükleri daha fazla absorbe edebildiği şeklinde açıklamışlardır. Ayrıca kırık yüzeyleri incelediklerinde artan doluluk oranlarının parçalarda gevrek bir yapı oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Örgü desenlerinin farklılaşması ile mekanik özelliklerin %5'den daha az oranlarda değiştiğini en büyük değişimin doluluk oranlarındaki artışla meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

Basavaraj vd. (2016), katman kalınlığı, üretim açısı ve kabuk kalınlıklarının eriyik biriktirme yönteminde çekme mukavemeti, boyutsal hassasiyet ve üretim süresi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Üretim parametrelerinde üç farklı seviye belirlenerek deney tasarımı oluşturulmuştur. Kullanılan üretim açıları 0°, 15° ve 30°, katman kalınlıkları 0.1, 0.2 ve 0.3 mm olarak seçilirken kabuk kalınlıkları 0.4 mm nozul çapına göre 0.4, 0.8 ve 1.2 mm olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlarda, 30° üretim açısı, 0.1 mm katman kalınlığı ve 1.2 mm kabuk genişliğinde yani 0.4 mm nozul çapı kullanılarak oluşturulan üç kabuk sayısında en iyi çekme mukavemeti elde edilirken boyutsal hassasiyet dikkate alındığında 0.8 mm kabuk genişliğinin ve en uygun üretim süresi için ise 0.4 mm kabuk genişliğinin kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Choi vd. (2016), üretim tablası sıcaklık değişiminin eriyik biriktirme yönteminde üretilen parçaların şekil değişimi üzerine etkisini incelemişlerdir. ABS termoplastik filamentleri kullanılarak yapılan üretimlerde nozul sıcaklığı ve üretim hızı sabit tutularak, 50°C, 70°C, 90°C ve 110°C olmak üzere dört farklı tabla sıcaklığında parçalarda meydana gelen büzülme miktarları ölçülerek % hata hesabı yapmışlardır. 110°C tabla sıcaklığında ABS malzemenin camsı geçiş sıcaklığına (105°C) yaklaşıldığı için üretilen parçalarda meydana gelen büzülme oranları %90'da %3 seviyelerine inmiş ve belirgin olarak azalmıştır.

Vairis vd. (2016), eriyik biriktirme yönteminde ABS-Plus malzeme kullanarak farklı üretim parametrelerinin mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Çalışmada iki farklı katman kalınlığında (0.17, 0.25 mm) ve %100 doluluk oranında üretilen numunelerin üç farklı çekme hızında (5, 10, 20 mm/s) testleri yapılmıştır. En yüksek çekme mukavemeti değeri, 5 mm/s çekme hızında ve 0.17 mm katman kalınlığında 29 MPa olarak elde edilmiştir.

Tian vd. (2016), EBY teknolojisi ile karbon fiber takviyeli termoplastik kompozit malzemelerin kullanımına yönelik çalışma yapmışlardır. Çalışmada takviye elemanı olarak karbon fiber ve matris fazı olarak PLA termoplastığı kullanmış ve eğilme deney numuneleri üretilmiştir. Termoplastik malzemenin cinsine göre erime sıcaklığında farklılıklar meydana geldiğinden, en uygun çalışma sıcaklığını bulmak için 180-240°C nozul sıcaklığı aralıklarında testler yapılmıştır. 180°C sıcaklık değerinde yeterli erimenin gerçekleşmediği dolayısıyla karbon fiber ile etkileşimin

gerçekleşmediği görülmüştür. 240°C sıcaklık değerinde ise aşırı erime meydana gelmiş ve yerçekimi etkisiyle nozuldan akma başlamıştır. Bu nedenle nozul sıcaklığı 230°C olarak sabitlenmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, 200-230°C’de karbon fiber ile termoplastik matris arasındaki etkileşimin arttığı tespit edilmiştir. 230°C nozul sıcaklığı, 0.4 mm katman kalınlığı ve %27 karbon oranında en yüksek eğilme mukavemeti 335 MPa olarak elde edilmiştir. Çalışmada nozul sıcaklığının mekanik özellikler üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir.

Alvarez vd. (2016), doluluk oranının ABS malzemeden üretilmiş parçalar üzerinde mekanik özelliklere olan etkisini incelemiştir. Doluluk oranları %5 doğrusal artışla %0-100 aralığında belirlenmiştir. Üretimde, nozul sıcaklığı (250°C), tabla sıcaklığı (125°C), üretim hızı (90 mm/s), kabuk sayısı (2), katman kalınlığı (0.2 mm) ve dolgu deseni (altıgen) parametreleri sabit olarak belirlenmiştir. Artan doluluk oranlarında etkileşim oranının artması ile mekanik özelliklerde iyileşme gözlenmiş ve en yüksek çekme mukavemeti %100 doluluk oranında 34.57 MPa olarak elde edilmiştir.

Hernandez vd. (2016), EBY yöntemi ile ABS malzemelerden üretilen parçalarda farklı üretim parametrelerinin mekanik özelliklere olan etkisini incelemiştir. Üretim parametresi olarak üç farklı üretim açısı (0°, 45°, 90°) belirlenmiş ve deney numuneleri üretilmiştir. Deney sonuçlarında en iyi çekme dayanımı 90° üretim açısında üretilen numunelerde 10.8 MPa olarak elde edilirken, eğme ve basma dayanımları 0° üretim açısında 122 MPa ve 59 Mpa olarak elde edilmiştir. Çalışmada farklı üretim açılarının eğme ve basma mukavemetleri üzerinde etkisi gözlenirken, çekme dayanımları üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı belirtilmiştir.

Griffiths vd. (2016), eriyik biriktirme yönteminde üretim parametrelerinin performans ve etkinlik üzerindeki etkilerini belirlemek için deney tasarımı oluşturmuştur. Deney parametreleri, doluluk oranı (%60, 100), kabuk sayısı (1, 4) ve katman kalınlığı (0.15, 4 mm) olarak belirlenmiştir. Üretimlerde katmanlar çekme doğrultusuna paralel şekilde oluşturulmuştur. Etkinlik analizi üretim zamanı, enerji tüketimi, parça boyutları ve artık oranları üzerinde yapılmıştır. Performans analizi, çekme mukavemeti ve elastisite modülü değerleri üzerinden yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, doluluk oranı ve kabuk sayısının çekme dayanımı üzerinde en etkin parametreler olduğu, etkinlik analizinde optimal parametrelerin katman kalınlığını arttırmak ve doluluk oranını düşürmek olduğu belirtilmiştir.

Christiyan vd. (2016), magnezyum silikat katkılı ABS filamentlerin farklı üretim parametrelerinde mekanik özelliklerini incelemiştir. Üç farklı katman kalınlığı (0.2, 0.25, 0.3 mm) ve üç farklı üretim hızında (30, 40, 50 mm/s) üretilen numunelerin çekme testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda üretim hızlarını artırmanın mekanik özelliklerde düşüş meydana getirdiği tespit edilmiştir.

Dul vd. (2016), eriyik biriktirme yönteminde, ABS matris malzemesine grafen nano taneciklerinin eklenmesi ve mekanik özelliklerin incelenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Ağırlıkça %2, 4, 6, 8 oranlarında grafen ekleyerek mekanik özellikleri incelemiştir. Grafen malzemenin eklenmesi elastisite modülünde artış meydana getirirken çekme mukavemetinde ve kopma uzaması değerlerinde düşüş meydana getirmiştir.

Francis vd. (2016), nano partiküllerin filament üretiminde kullanılabilirliği amacıyla ABS matris malzemesine nano kil katkısının etkisini ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Ağırlıkça %5-10 oranında nanopartikül takviyesi ile üretilen filamentlerin mekanik özelliklerinde iyileşme görülürken %10 katkı üzerinde mekanik özelliklerin düştüğü tespit edilmiştir.

Sukindar vd. (2017), eriyik biriktirme yönteminde kullanılan üretim parametrelerinin çekme mukavemetine etkisini incelemiştir. PLA filamentleri kullanılarak üretilen test numunelerinde üç farklı kabuk genişliği (0.4, 0.8, 1.2 mm), üç farklı katman kalınlığı (0.2, 0.3, 0.4 mm) ve üç farklı üretim hızı (30, 60, 90 mm/s) kullanılarak hazırlanan deney tasarımından elde edilen sonuçlarda, katman kalınlığı ve üretim hızlarının her seviyesinde 1.2 mm kabuk genişliği kullanılarak üretilen parçalarda en yüksek çekme mukavemeti elde edilmiştir. Deney sonuçları, varyans analizi ile yorumlandığında, çekme dayanımına en yüksek etkiyi kabuk genişliği parametresinin verdiği, diğer iki parametrenin ise çekme mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı belirtilmiştir.

Ning vd. (2017), karbon fiber takviyeli ABS kompozit malzemesi ile %100 doluluk oranında ve farklı üretim parametrelerinde çekme numuneleri üreterek, üretim parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemiştir. 0/90° üretim açısında üretilen numunelerin 45/-45° üretim açısında üretilen numunelerden yüksek mukavemet değerlerine sahip olduğu tespit edilmiş ve 0/90° üretim açısı üretimde

sabit olarak kabul edilmiştir. 15-35 mm/sn üretim hızları aralığında yapılan testlerde en iyi değerler, 25 mm/s üretim hızında 32.3 MPa çekme mukavemeti, 0.85 GPa elastisite modülü olarak elde edilirken en düşük değerler 35 mm/s üretim hızında elde edilmiştir. Üretim hızının karbon- matris arasındaki etkileşimi ve katman yapışmasını etkilediği belirtilmiştir. 200-240°C aralığında değişen nozul sıcaklıklarında yapılan üretimlerde, en iyi mekanik özellikler 220°C nozul sıcaklığında 32.3 MPa çekme mukavemeti ve 0.85 GPa elastisite modülü olarak elde edilmiştir. Daha düşük ve daha yüksek sıcaklıklarda düşük mukavemet değerleri elde edildiği belirtilmiştir. 0.15- 0.35 mm aralığında değişen katman kalınlıklarında yapılan üretimlerde ise en iyi mukavemet değeri, 0.15 mm katman kalınlığında 36.8 MPa çekme mukavemeti, 1.1 GPa elastisite modülü olarak elde edilmiş ve katman kalınlığı arttıkça mukavemette düşüş meydana geldiği belirtilmiştir.

Mahmood vd. (2017), dört farklı üretim parametresi ve ABS filamentleri kullanarak ürettikleri parçalarda, üretim parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemiştir. Parça genişliği (10, 15, 20 mm), parça kalınlığı (4, 6, 8 mm), kabuk sayısı (1, 2, 3) ve doluluk oranı (%25, 50, 75) olmak üzere her üretim parametresinden üç farklı seviye belirlenerek Taguchi deney tasarımı oluşturulmuştur. En büyük en iyi yaklaşımı ile analiz edilen sonuçlarda, kabuk sayısı ve doluluk oranının artmasıyla, parça kalınlığı ve genişliğinin azalmasıyla çekme dayanımının arttığı tespit edilmiş ve en yüksek çekme dayanımı 20.3 MPa olarak ölçülmüştür. Çalışmada kabuk sayısı ve doluluk oranlarındaki artışın, parçada kalın kesit ve artan yüzey etkileşimi meydana getirdiği ve mekanik özellikleri iyileştirdiği belirtilmiştir.

Jiang ve Smith (2017), eriyik biriktirme yönteminde karbon takviyeli polimer kompozit malzemeler kullanarak dört farklı üretim açısında (0°, 45°, 45/-45°, 90°) çekme numuneleri üretmiştir. Karbon takviyeli ABS kompozitlerinin üretiminde doluluk oranı %100, nozul sıcaklığı 230°C, tabla sıcaklığı 110°C ve üretim hızı 45 mm/s parametreleri sabit parametreler olarak kabul edilmiş ve farklı üretim açılarının mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. En yüksek çekme mukavemeti ve elastisite modülü, 0° üretim açısında 50.9 MPa ve 7.15 GPa olarak elde edilirken üretim açısı arttıkça mekanik özelliklerin kötüleştiği belirtilmiştir.

Ning vd. (2017), ABS matris malzemesinde iki farklı takviye elemanının mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. %5 oranında karbon fiber ve grafit takviyesi yapılan ABS filamentleri ile iki farklı üretim açısında ($90/0^\circ$, $45/-45^\circ$) deney numuneleri üretilerek çekme testleri yapılmıştır. En iyi mekanik özellikler ($90/0^\circ$) üretim açısında, 32.4 MPa çekme mukavemeti, 0.85 GPa elastisite modülünde görülmüştür. Grafit katkılı kompozitler incelendiğinde üretim açısının mekanik özellikler üzerinde belirgin bir değişim göstermediği belirtilmiş, 24.3 MPa çekme mukavemeti ve 0.55 GPa elastisite modülü elde edilmiştir. Elde edilen diğer sonuçlarda, karbon ya da grafit katkısının ABS matris malzemesinin camsı geçiş sıcaklığında belirgin bir artış göstermediği, karbon katkılı numunelerde porozite oranının grafit katkılı numunelere oranla daha yüksek olduğu buna rağmen karbon katkısının grafit katkısına oranla daha iyi mekanik özellikler gösterdiği belirtilmiştir.

Tanikella vd. (2017), ABS, Nylon vb. termoplastik malzemeler ile belirledikleri standart üretim parametrelerinde çekme numuneleri üreterek çekme deneyleri yapmışlardır. Belirledikleri üretim parametreleri, 230°C nozul sıcaklığı, %100 doluluk oranı olarak belirlenmiştir. Çekme deneyleri sonucunda ABS malzemede %100 dolulukta 28.75 MPa çekme mukavemeti elde edilmiştir.

Chacon vd. (2017), eriyik biriktirme yönteminde farklı üretim açısı, katman kalınlığı ve üretim hızı parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada kullanılan üretim açıları parçanın tabla üzerindeki konumuna göre yani tabla üzerinde yatay, tabla üzerinde parça uzun kenarı üstünde ve tabla üzerinde parça kısa kenarı üzerinde dikey şekillerde belirlenmiştir. Üretimlerde katman kalınlıkları 0.06, 0.12, 0.18, 0.24 mm olarak ve üretim hızları 20, 50 ve 80 mm/s olarak belirlenmiştir. Üretim hızları ve katman kalınlıklarının azalması ile çekme dayanımı artarken eğilme mukavemeti azalmıştır. Üretim için optimum parametreler, maksimum çekme için yatay üretim, maksimum eğilme için yüksek katman kalınlığı ve düşük üretim hızları önerilmiştir.

Ahmed vd. (2017), karbon fiber takviyesinin termoplastik malzemelerin elastisite modüllerine olan etkisini incelemiştir. İki farklı ABS ve PLA termoplastik malzeme, karbon fiber takviyeli olanlar ile karşılaştırılmıştır. Saf ABS ve PLA malzemelerde elde edilen elastisite modülleri sırasıyla 1.18 GPa ve 2.22 GPa olurken karbon fiber

takviyeli ABS ve PLA malzemelerde elastisite modülleri sırasıyla 1.79 GPa ve 4.66 GPa olarak elde edilmiştir.

Coogan ve Kazmer (2017), eriyik biriktirme yönteminde farklı üretim parametreleri kullanarak, bu parametrelerin parçaların yapışma kabiliyeti üzerindeki etkilerini incelemiştir. Tabla sıcaklığı (100, 125, 150°C), nozul sıcaklığı (230, 255, 280°C) üretim hızı (16, 33, 66 mm/s), katman genişliği (0.4, 0.6, 0.8 mm) ve katman kalınlığı (0.15, 0.3, 0.45 mm) olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, katmanların yapışma kabiliyetinde en önemli parametrenin nozul sıcaklığı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca katman genişliğini arttırmanın yapışma kabiliyeti üzerinde katman kalınlığına oranla daha fazla etki ettiği belirtilmiştir.

Akande vd. (2017), eriyik biriktirme yönteminde farklı üretim parametrelerinin ürünlerin kalitesi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deney numuneleri iki farklı katman kalınlığı (0.25, 0.5 mm), iki farklı doluluk oranında (%20, %100) ve iki farklı hız parametresinde numuneler üretilmiştir. Ek olarak üç farklı x, y ve z düzleminde %100 doluluk oranına sahip parça üretilerek üretim açısının mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Üretim açısının parçaların mekanik özellikleri üzerinde önemli etkisi olduğu, en düşük mekanik özelliklerin z oryantasyonunda üretilen numunelerde elde edildiği ve katman kalınlığı düştükçe porozite oluşumunun azalarak parça kütlesinin arttığı belirtilmiştir.

Dorigoto vd. (2017), ABS matris malzemesine nano katkılar ilave ederek, elde edilen kompozit malzemenin mekanik ve elektriksel özelliklerini incelemiştir. ABS matrisine nano malzeme katkısının %4 içerik sonrası elastisite modülü ve çekme mukavemetini arttırdığı, kopma uzamasını azalttığı ancak nano malzeme içeriğinin en önemli etkisinin elektriksel özelliklerde meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

Ferreira vd. (2017), eriyik biriktirme yönteminde kısa karbon fiber katkılı PLA ve katkısız PLA filamentleri kullanarak üretilen numunelerde üretim açısının mekanik özelliklere olan etkisini incelemiştir. Üretimde %100 doluluk oranı sabit parametre olarak belirlenirken 0°, 90° ve 45°/-45° üretim açıları değişken parametreler olarak belirlenmiştir. Her iki malzeme ile çekme ve kayma deney numuneleri üreterek test etmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda, karbon fiber takviyesinin kayma modülünü 1.2 kat, elastisite modülünü ise yaklaşık 2 kat oranda artırdığı görülürken çekme

dayanımında düşüş meydana geldiği belirtilmiştir. Şekil değiştirme oranları incelendiğinde karbon fiber takviyeli numunelerde, katkısız numunelere göre daha düşük yüzde uzama değerleri elde edilmiş ve takviye ile malzemenin gevrek bir davranış gösterdiği belirtilmiştir. Taramalı elektron mikroskopuyla kırık yüzeyler incelendiğinde, çekme dayanımındaki düşüşe matris malzemesi ile karbon fiber arasında zayıf yapışmanın neden olduğu belirtilmiştir.

Kuznetsov vd. (2018), PLA malzemedan ürettikleri test numunelerinde kabuk genişliğini 2.4 mm olacak şekilde 0.4, 0.6 ve 0.8 mm'lik üç farklı nozul çapında üretmişlerdir. Belirtilen kabuk genişliği oluşturmak için nozul çaplarına göre 3, 4 ve 6 döngü oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlarda nozul çapının artmasının katman genişliğini azalttığı dolayısıyla katmanlar arasındaki boşluk oluşumunun azaldığı ve mukavemette artış meydana geldiği tespit edilmiştir.

Spoerk vd. (2018), eriyik biriktirme yönteminde üretilen parçaların yapışma sürecini optimize eden bir çalışma yapmıştır. Üretimde yaygın olarak kullanılan ABS ve PLA termoplastiklerinin tabla yüzeyine yapıştırılmasında, değişen tabla sıcaklıklarının etkisini incelemişlerdir. Cam ve kapton poliamid filmlerden oluşan baskı tablasına yerleştirilen ölçüm cihazı ile üretilen her numune tabladan sökülürken yapışma kuvvetleri ölçülmüştür. PLA malzemedan 60°-70°C aralığında, ABS malzemedan 100-120°C aralığında yapılan ölçümlerde sıcaklık arttıkça yapışma kuvvetinin arttığı tespit edilmiştir. Sıcaklık artışıyla poliamid baskı tablasında artan yapışma kuvveti her iki malzemenin de polimer esaslı olmasından kaynaklı camsı geçiş sıcaklığında artan molekül hareketliliği sebebiyle gerçekleşmiştir. Camsı geçiş sıcaklığı üzerinde ise polimer zincirleri birbiri üzerinde hareket etmeye başlayıp vizkos özelliğini kaybetmektedir. Bu nedenle poliamid baskı tablasına yapışma kabiliyeti azalmaktadır. Yapılan çalışmada en uygun baskı çalışma sıcaklığının, malzemelerin camsı geçiş sıcaklıklarının bir miktar üzerinde olması gerektiği vurgulanmıştır.

Qattawi (2018), eriyik biriktirme yönteminde mekanik özelliklere etki eden parametreleri incelemiştir. Çalışmada doluluk oranı (%20, 60, 100), dolgu deseni (doğrusal, üçgensel, altıgen), katman kalınlığı (0.2, 0.3, 0.4 mm) ve nozul sıcaklığı (190, 200, 210°C) değişken parametreler olarak belirlenmiş ve Taguchi L9 deney tasarımı oluşturulmuştur. Test numunelerinin üretiminde, üretim hızı 50 mm/s, kabuk sayısı 2, katman genişliği 0.5 mm olarak sabit kabul edilmiştir. Üretilen numuneler

çekme deneylerine tabi tutulmuştur. En büyük en iyi yaklaşımı ile yapılan analiz sonuçlarında elde edilen bulgular şu şekildedir; Nozul sıcaklığını arttırma sonucunda katmanlar arası etkileşimin arttığı ve parçalarda mekanik özelliklerini iyileştirdiği belirtilmiştir. Katman kalınlıkları incelendiğinde katman kalınlığını arttırmanın parçanın toplam katman sayısını azalttığı ve böylece katmanlar arası kopma oranının azaldığı tespit edilmiştir. Dolgu desenlerinin, parçaların rijitliği üzerinde minimum etki gösterdiği doğrusal desenin elastisite modülünü diğer desenlere göre bir miktar arttırdığı tespit edilmiştir. Parçaların mekanik özellikleri üzerinde en önemli etkinin doluluk oranlarındaki artışla meydana geldiği görülmüş ve %100 doluluk oranı, 210°C nozul sıcaklığı, 0.3 mm katman kalınlığı ve üçgensel desenin optimal üretim parametreleri olduğu belirtilmiştir.

Quan vd. (2018), eriyik biriktirme yönteminde üretim parametrelerinin mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Çalışmada değişken parametreler olarak parçaların tabla üzerindeki konumu, x eksenine paralel, x eksenine 45° açılı ve z eksenine paralel şekilde 45/-45° üretim açısında olmak üzere numuneler üretilmiş, nozul sıcaklığı, tabla sıcaklığı, doluluk oranı, üretim hızı ve katman kalınlığı değerleri sabit olarak alınmıştır. Basma yönüne paralel ve açılı üretilen numunelerin deneyleri sonucunda, karbon katkılı ABS numunelerde, karbon takviyesinin etkisiyle yüksek elastisite modülleri elde edilirken basma doğrultusunda yani z yönünde 80 MPa değerinde bir basma dayanımı elde edilmiştir.

Blok vd. (2018), MarkOne üç boyutlu yazıcısını kullanarak sürekli karbon fiber takviyeli Nylon termoplastik kompozitleri ile hazır olarak temin edilen %6 oranında kısa fiber takviyeli nylon kompozitleri incelemişlerdir. Sürekli fiber takviyeli kompozitlerde elde edilen 986 MPa'lık çekme mukavemeti kısa fiber takviyeli filamentlerden elde edilen 33 MPa'lık çekme mukavemeti ile karşılaştırıldığında sürekli fiber takviyesinin mukavemet üzerinde önemli etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Ancak sürekli fiberlerin eriyik biriktirme yönteminde şekil alma kabiliyetlerinin düşük olması ve ana yapının nylon matrisinden üretilerek yalnızca dış çeperlerin veya belirli bölgelerin üretiminde karbon fiberlerin kullanılabilmesi, karmaşık geometrilerin üretiminde ise sürekli fiberlerin kullanımının kısıtlanacağı belirtilmiştir.

Nor vd. (2018), eriyik biriktirme yönteminde katman kalınlığı ve üretim açısı parametrelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini belirlemek için Taguchi deney tasarımı oluşturmuştur. Değişken parametreler, katman kalınlığı (0.18, 0.25, 0.31 mm) ve üretim açıları (30°, 45°, 90°) olarak belirlenmiştir. Taguchi L9 ortogonal dizisi, iki parametre ve her parametrede üç seviye için oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlarda yüksek çekme dayanımı için ABS numunelerde katman kalınlığı, karbon fiber takviyeli numunelerde ise üretim açısının en etkin parametreler olduğu tespit edilmiştir. Sinyal gürültü oranlarına göre kontrol seviyeleri elde edilmiş ve her iki malzeme için 0.18 mm katman kalınlığı ve 90° üretim açısının optimal üretim parametreleri olduğu belirtilmiştir.

Vishwas vd. (2018), eriyik biriktirme yönteminde üretim parametrelerinin Taguchi yöntemi ile optimizasyonunu incelemiştir. Üç farklı katman kalınlığı (0.1, 0.2, 0.3 mm), üç farklı üretim açısı (0°, 15°, 30°) ve üç farklı katman genişliğinde (0.4, 0.8, 1.2 mm) oluşturulan deney tasarımında en etkin seviyeler belirlenmiştir. ABS ve Nylon malzeme kullanılarak yapılan üretimlerde, ABS malzemenin çekme dayanımı için optimal parametreler 0.2 mm katman kalınlığı, 15° üretim açısı ve 1.2 mm katman genişliği, boyutsal doğruluk için 0.2 mm katman kalınlığı, 30° üretim açısı ve 0.8 mm katman genişliği olarak tespit edilmiştir. Çekme dayanımına etki eden en etkin parametrelerin, üretim açısı ve katman genişliği olduğu belirtilmiştir.

Zekavat vd. (2019), eriyik biriktirme yönteminde üretilen parçaların mekanik özelliklerinin nozul sıcaklığı ile değişimini incelemiştir. 180-260°C aralığında nozul sıcaklıkları 10°C artırarak üretimler yapılmıştır. Üretilen parçaların içyapıları x-ışını bilgisayarlı tomografi ile incelendiğinde 180°C ve 190°C sıcaklıklarda üretilen numunelerin kütlelerinin diğer sıcaklıklarda üretilen numunelere göre daha az olduğunu dolayısıyla düşük sıcaklıklarda tutarsız yığılma gerçekleştiğini ve malzeme miktarında eksiklik olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca 180°C ve 190°C sıcaklıklarda tutarsız yığılma sebebiyle parçada bazı bölgelere malzeme yığılamadığı ve parça kalitesinin oldukça düşük olduğu gözlenmiştir. 180-260°C sıcaklık aralığında üretim sıcaklığı arttıkça, içyapıdaki porozite oranının %12'den %3 oranlarına indiği ve parçanın çekme mukavemetini 25.77 MPa'dan 37.79 MPa değerine yükselttiği belirtilmiştir.

Kanat kaburga parçalarına topoloji optimizasyonu uygulanmasına yönelik yapılan çalışmalar aşağıda incelenmiştir.

Walker vd. (2015), NACA 23015 kanat profiline sahip Van's RV-4 tipi uçak kanadı kaburga destek parçasına topoloji optimizasyonu uygulamıştır. 2024 Al. malzeme ataması yapılan kaburga destek parçası üzerine, 94.8 m/s hız ve 3000 m irtifada uçuş koşullarında sürüklenme ve kaldırma kuvvetleri uygulanmıştır. Hacmin %30'dan daha az olması hedeflenerek yapılan optimizasyon sonucu, %38 oranında hacim minimizasyonu elde edilmiştir.

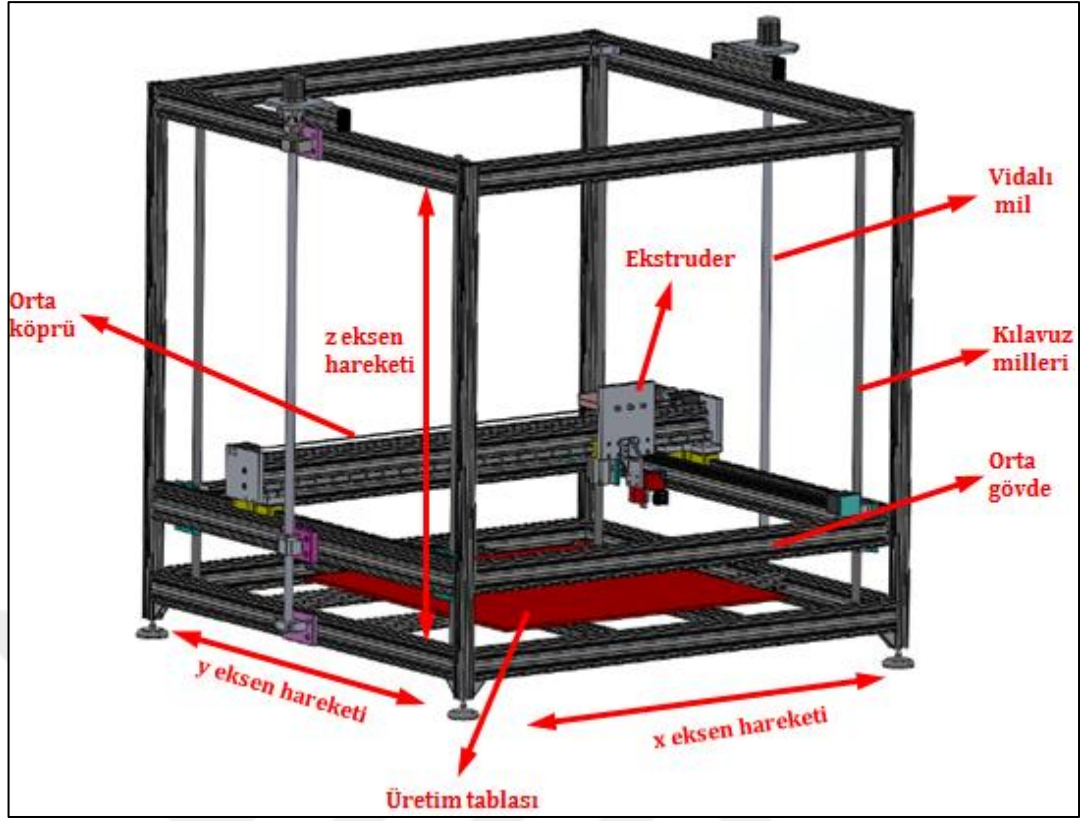
Soundarya vd. (2018), NACA 4412 kanat profiline sahip kaburga destek parçasına topoloji optimizasyonu uygulayarak, kütle azaltımı sağlamayı amaçlamışlardır. Alüminyum 7075 malzeme ataması yapılarak oluşturulan model üzerinde kaburga üst profilinden aşağı yönlü basınç uygulanmış ve deformasyonlar incelenmiştir. Kaburga üzerinde tasarım bölgeleri belirlenerek optimizasyon çalışması yapılmıştır. Normal durumda 21.8 kg olan model üzerinde 3.34 mm şekil değiştirme ve 299 MPa'lık gerilme değeri elde edilirken topoloji optimizasyonu sonrası 15 kg kütleye inen model üzerinde 6.0 mm şekil değiştirme ve 390 MPa gerilme değerleri elde edilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışması dört ayrı bölümden oluşmaktadır. İlk olarak büyük baskı hacmine sahip eriyik biriktirme yöntemine göre üretim yapan eklemeli imalat sisteminin tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. İmalatı gerçekleştirilen sistemin üretim kontrolleri yapılarak çalışması kontrol edilmiştir. Bu sistemde karbon fiber katkılı ABS kompozitlerinin üretim parametreleri incelenmiş ve en iyi sonucu veren üretim parametreleri Taguchi deney tasarımı ile optimize edilmiştir. Üretim modeli olarak seçilen bir parçanın sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak topoloji optimizasyonu yapılmıştır. Topoloji optimizasyonu tamamlanan modelin büyük baskı hacmine sahip eklemeli imalat sisteminde üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde çalışma kapsamında gerçekleştirilen bu dört aşama incelenmiştir.

3.1. Büyük Baskı Hacmine Sahip Eklemeli İmalat Sisteminin Tasarımı Ve İmalatı

Çalışmanın ilk aşamasında, büyük boyutlu parçaların üretilebilmesine imkân tanıyan ve aynı zamanda eklemeli imalat teknolojileri arasında en çok tercih edilen yöntemlerden olan eriyik biriktirme yöntemi esasına dayalı üretim yapan 1000x1000x1000 mm baskı hacmine sahip üç boyutlu yazıcının tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Tasarım sürecinde, ilk olarak sistemin hareket mekanizması kararlaştırılmış ve kartezyen koordinatlarda hareket edecek bir sistem tasarımına gidilmiştir. Sistemin x eksenindeki hareketi, ekstruder montajı yapılan ve çalışmada orta köprü olarak adlandırılan bir profil üzerinde gerçekleşirken, y eksenindeki hareketi, kayış kassak mekanizması ile hareketi sağlanan orta köprünün iki adet birbirine paralel profil üzerinde lineer ray ve araba bağlantısı kullanılarak taşınmasıyla gerçekleştirilmiştir. Üretim tablası, büyük boyutlarda olacağı için, boyutsal doğruluğu sağlamak ve ısıtma sonrası çarpılmayı önlemek amacıyla, otomotiv ve havacılık endüstrisinde sıklıkla kullanılan yüksek mukavemet ve iyi korozyon direncine sahip 10 mm kalınlıklı taşlanmış 5083 serisi alüminyum alaşımı malzemeden seçilmiştir. Levha kütlelerinin yüksek olması sebebiyle üretim hızının kısıtlanabileceği ve hareket esnasında parçada meydana gelebilecek deformasyonları önlemek amacıyla tabla hareketi engellenmiştir. Bu nedenle z eksenindeki hareket, orta gövdenin vidalı miller yardımıyla yukarı aşağı hareketi ile gerçekleştirilmiştir. (Şekil 3.1). Cihazın dış ölçüleri 1690x1690x1690 mm'dir. Kullanılan üretim tablası boyutları büyütülerek üretim hacminin artırılmasına imkân sağlanmıştır.



Şekil 3.1. Büyük baskı hacimli eklemeli imalat sistemi katı model tasarımı

Makine şase bağlantıları, mukavemetli konstrüksiyonlar, otomasyon prosesleri ve pnomatik bağlantılı gövdelerde hafif ve rijit yapıları sebebiyle sıkça tercih edilen sigma profiller, üretilen üç boyutlu yazıcının gövdesini oluşturmaktadır. Gövde yan bağlantıları ve orta profil, 45x90mm ölçülerinde 6063 serisi alüminyum ağır sigma profiller kullanılarak, diğer kısımlar ise 45x45mm ölçülerinde ağır sigma profiller kullanılarak oluşturulmuştur. Profil uygulamalarında 90°'lik bağlantı oluşturma imkânı sağlayan ve köşe birleşimlerini sabitleştirmede kullanılan köşe bağlantı elemanları, taban profillere eklenerek profillerin dikliği sağlanmıştır ve baskı tablası için eğimsiz bir alt yüzey oluşturulmuştur. Üretim tablası montajı için alt gövde orta kısımda bulunan profiller parçalara ayrılarak merkezleme yapılmıştır. Gövdenin yer ile teması mafsallı ve yükseklik ayarı yapılabilen krom kaplı ayaklar ile sağlanmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Üç boyutlu yazıcı gövdesi

Tasarlanan sistemde, z eksen hareketi, iki adet yüksek hassasiyete (C7) sahip vidalı mil aracılığıyla orta gövdeyi oluşturan profillerin hareketi ile sağlanmıştır. Gövdeye kılavuzluk etmesi, orta profil rijitliğini ve eş zamanlı hareketi sağlamak amacıyla indüksiyonlu kromlu miller dört köşeye eklenmiştir. Kromlu miller, alt ve üst profillere mil tutucular kullanılarak sabitlenmiştir. Hareket, lineer rulmanlar aracılığıyla kılavuz milleri üzerinden eş merkezli olarak sağlanmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Üç boyutlu yazıcının orta gövde montajı

Vidalı millerin dönme hareketinin doğrusal harekete dönüştürülmesi orta profile montajlanan bilyalı somun çifti ile sağlanmıştır. Mil uzunluğunun fazla olmasından dolayı çap tayini burkulma emniyetine göre yapılmıştır. Ø25 mm çap, 5 mm hatveye sahip Ck15 yüzeyi sertleştirilmiş sementasyon çeliği malzemeden yapılmış vidalı miller, z eksen hareketini sağlaması için seçilmiştir. Vidalı millerin bağlantısı alt profile vidalı mil ucu sabit yatak ile üst profile vidalı mil ucu hareketli yatak ile sağlanmıştır.

Sabit yataklar vidalı milin radyal yönde yataklanmasını sağlarken eksenel olarak serbest çalışmaya olanak tanımakta olup, mil boyu ayarlama problemini ortadan kaldırmaktadır. Hareketli yataklarda, vidalı mil, kontra somun ile yatağa sabitlenerek radyal ve eksenel yükler karşılanmaktadır. Aynı zamanda hareket esnasındaki hassas konumlama bu tip yataklar tarafından gerçekleştirilmektedir. Orta profilin vidalı mil ile bağlantısı bilyalı somun ve somun gövdesi çifti ile sağlanmıştır. Somun gövdesi orta profile, bilyalı somun ise somun gövdesine sabitlenmiştir. Vidalı mil üzerinde bilyalı somunun hareketi ile dönme hareketi doğrusal harekete çevrilmektedir. Orta gövde montajında 4 adet 45x90 Alüminyum sigma profil kullanılmış ve gövde birleştirilmiştir. Orta gövde üzerinde kullanılan bir başka 45x90 sigma profil ile orta köprü oluşturulmuştur. Vidalı mil ve sigma profillerde gerilme kontrolleri yapılarak orta gövde montajı yapılmıştır.

$$F_k = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_p}{L_k^2} \quad (3.1)$$

$$I_p = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (3.2)$$

$$\lambda = \frac{L_k}{i} \quad (3.3)$$

$$i = \sqrt{I/A} \quad (3.4)$$

Burada, E elastisite modülü, F_k flambaj kuvveti, L_k kritik çubuk boyu, I_p polar atalet momenti, d mil çapı, i atalet yarıçapı, λ narinlik derecesini ifade etmektedir. Vidalı mil çap tayininde Denklem 3.1 ve 3.2'den kullanılarak seçilmesi gereken vidalı mil çapının en az 17 mm olması gerektiği görülmüştür.

Firma kataloglarında bulunan standart çaplar araştırılmış, ömür ve verim de dikkate alınarak 25 mm çaplı vidalı miller seçilmiştir. Seçilen vidalı mil çap emniyet kontrolü Denklem 3.3 ve 3.4'e göre yapılmış ve vidalı mil çaplarının burkulmaya karşı emniyetli olduğu görülmüştür. Vidalı milin çap tayini yapıldıktan sonra burulma kontrolü yapılmıştır.

$$\tau = \frac{M_b}{W_b} \quad (3.5)$$

$$W_b = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \quad (3.6)$$

Burada, τ burulma gerilmesi, M_b döndürme momenti, W_b kesitin burulma mukavemet momenti, d mil çapını ifade etmektedir. Ekstruderin x eksenindeki hareketi orta gövdeye montajlanan orta köprü üzerinden lineer ray ve araba bağlantısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ekstruder bağlantısı, ekstruder sistemi değişikliğine gidildiğinde farklı ekipmanların bağlantısına imkân verecek şekilde tasarlanmış olan alüminyum tabla üzerine montajlanmış ve alüminyum tablanın orta köprüdeki hareketine göre iki mesnetli münferit yükte sehim ve açısal şekil değiştirme kontrolü yapılmıştır (Denklem 3.7, 3.8).

$$\delta = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot I_x} \quad (3.7)$$

$$\alpha = \frac{F \cdot L^2}{16 \cdot E \cdot I_x} \quad (3.8)$$

Burada, δ sehim, F kuvvet, L ubuk boyu, E elastisite modülü, α eğim açısı, I_x x eksenine göre atalet momentini ifade etmektedir. Vidalı millerin bağlı olduğu sigma profillerde eğilme kontrolü yapılmıştır (Denklem 3.9, 3.10).

$$\sigma_e = \frac{M_e}{W_e} \quad (3.9)$$

$$W_e = \frac{I}{e} \quad (3.10)$$

Burada, σ_e eğilme gerilmesi, M_e eğilme momenti, W_e eğilme mukavemet momentidir. Motor seçiminde, ilk olarak vidalı mil verimi tayin edilmiştir. Daha sonra standartta bulunan motorlar incelenerek, kataloglardan ihtiyaç duyulan torka uygun motor seçimi yapılmıştır.

$$\eta = \frac{W_N}{W_A} \quad (3.11)$$

$$W_N = F \cdot p \quad (3.12)$$

$$W_A = T \cdot 2\pi \quad (3.13)$$

$$W_A = F \cdot \frac{d}{2} \cdot \tan(a + \rho') \cdot 2\pi \quad (3.14)$$

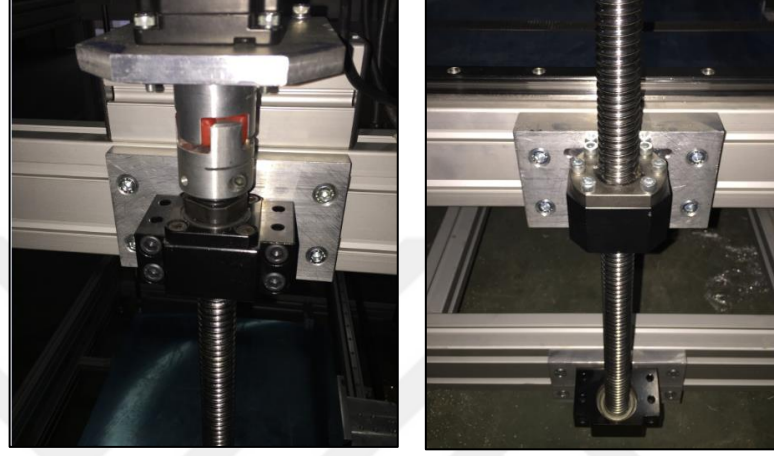
$$\eta = \frac{F \cdot p}{F \cdot \frac{d}{2} \cdot \tan(a + \rho') \cdot 2\pi} \quad (3.15)$$

$$\tan a = \frac{p}{\pi \cdot d} \quad (3.16)$$

$$\eta = \frac{\tan a}{\tan(a + \rho')} \quad (3.17)$$

Burada, η vidalı mil verimi, W_N faydalı iş, W_A harcanan iş, p hatve, ρ' sürtünme açısını ifade etmektedir. Sistemde kullanılan vidalı millerin verimi %86 olarak hesaplanmıştır (Denklem 3.17). Tasarlanan sistemde orta gövdede bulunan sigma profiller ve bağlantı elemanlarının toplam ağırlığı 60 kg'dır. Gerekli motor torku 1.54 Nm olarak hesaplanmış ancak sistemin ilk hareket anındaki sürtünmesi, vidalı milin kütle ataleti ve ileride yapılabilecek parça veya ekipman değişimlerinde meydana gelebilecek kütle artışı dikkate alınarak 3 Nm'lik iki adet motor seçilmiştir. z eksen hareketinin hassasiyeti üretilen ürünlerin kalitesinde büyük öneme sahiptir. Bu nedenle taşınacak yükü paylaştırarak, yüksek eksen hassasiyeti sağlamak ve elde edilen torku arttırmak amacıyla, z eksenindeki vidalı millerin hareketi iki adet servo motor kullanılarak sağlanmıştır. Ortaya çıkabilecek herhangi bir sorunda sistemin güvenli çalışması önemlidir. Sistem güvenliğini sağlamak amacıyla, z eksen hareketinde, frenli servo motorlar tercih edilmiştir. Vidalı millerin motor ile montajında doğru kavramayı seçmek sistemin hassasiyeti bakımından önem arz etmektedir. Hassasiyet sağlanabilmesi amacıyla, vidalı miller ve motorlar arasındaki

bağlantılarda servo kaplinler kullanılmıştır (Şekil 3.4). Servo kaplinler üç parçadan oluşmaktadır. İki yanda alüminyum çene ve ortada gelen yükleri sönümleyen elastomer malzeme bulunmaktadır. Montajı yapılacak iki farklı uç için çeneler işlenmekte ve boşluksuz bağlantısı sağlanmaktadır. Çenelerde bulunan vida mekanizması sayesinde zamanla oluşabilecek aşınma kaynaklı boşluk oluşumları giderilebilmektedir.



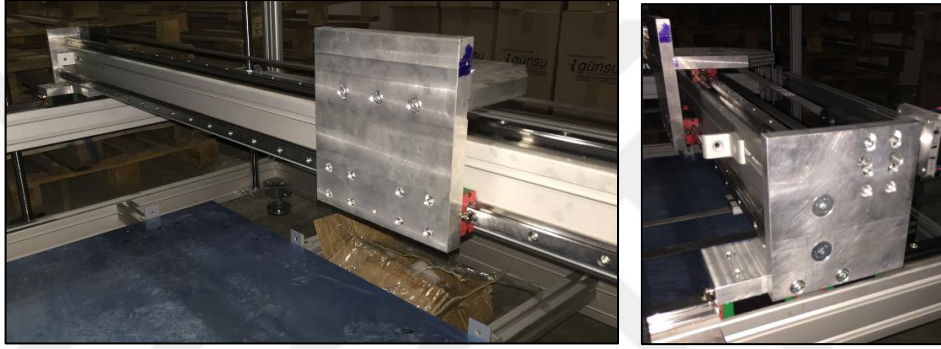
Şekil 3.4. Vidalı mil montajı

Sistemin y eksenindeki hareketi, orta gövdede bulunan profillere sabitlenen lineer ray bağlantısı üzerinde, orta köprüye sabitlenen lineer arabaların hareketiyle sağlanmıştır (Şekil 3.5). Lineer ray ve araba çifti, tıpkı vidalı mil somun çifti gibi içerisinde yer alan bilyalı sistem sayesinde sürtünmeyi en aza indirerek hareketi sağlamaktadır. Gövde hareketi ise orta köprüye montajlanan kayış kasnak mekanizması ile hibrit adım motor tarafından sağlanmıştır. Eksen hareketlerinin son bulacağı noktalara limitleyici butonlar eklenerek eksen hareketleri sınırlandırılmıştır.



Şekil 3.5. Orta köprü y eksen hareketi

Sistemin x eksenindeki hareketi orta köprü üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sistemin y eksenindeki hareketine benzer şekilde, kayış kasnak mekanizması ile x ekseninde bulunan köprünün hareketi sağlanmıştır. Sistemin, x ve y eksenlerindeki hareketleri 2.8 Nm torka sahip hibrit adım motorlar kullanılarak sağlanmıştır. Köprü üzerinde ekstruder bağlantısının yapılacağı ek parça bulunmaktadır. Bu ek parça y ekseninde olduğu gibi lineer ray ve araba bağlantısıyla köprü üzerinde taşınmaktadır. Motorun dönme hareketi kasnak tarafından ek parçaya bağlanan kayışa iletilmekte ve doğrusal harekete dönüştürülmektedir. Ek parçanın x eksenindeki hareketi, orta köprüde bulunan sigma profile montajı yapılan iki adet lineer ray üzerinde parçaya bağlı lineer arabalar yardımıyla sağlanmıştır.



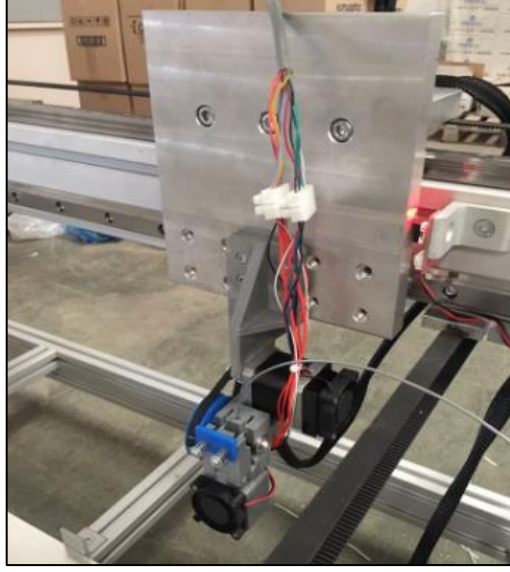
Şekil 3.6. Orta köprü x eksen hareketi

Sistemde x ve y eksen hareketleri, kaplinler aracılığıyla kasnaklara iletilen dönme hareketinin, kayışlar vasıtasıyla doğrusal harekete dönüştürülmesiyle sağlanmıştır. Ekstruder bağlantısı yapılacak parça, yazıcıya uyarlanabilecek deneysel amaçlı farklı ekstruder sistemlerine izin verecek şekilde alüminyum levhadan oluşturulmuş, lineer raylara bağlantısı 3 ayrı lineer araba kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Ekstruder bağlantı parçası

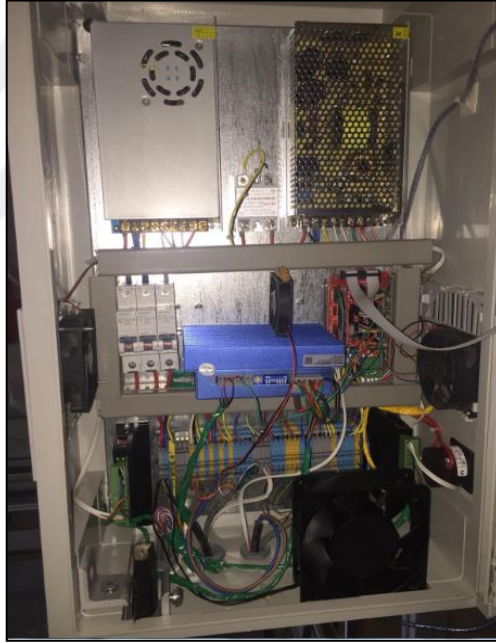
Eriyik biriktirme yönteminde önemli bileşenlerden birisi ekstruderdir. Ekstruder sayesinde malzeme yarı eriyik hale dönüştürülerek üretim tablasına yığılmaktadır. Filament formundaki malzeme, motor miline bağlanan üzerinde çizgisel kanallar olan bir civata ve karşısında bulunan bir rulman arasında sıkıştırılmakta ve motordan alınan hareket ile ekstruder ucuna sürülmektedir. Filament ekstrudere girdikten sonra ilk olarak soğutucu radyatörle karşılaşmaktadır. Soğutucu radyatör filamentin ısıtıcı bloğa gelmeden önce erimesini önleyerek, filamentin ısıtıcı bloğa girişine kadar formunu korumasını sağlamaktadır. Radyatör ve ısıtıcı blok birbirine boğaz adı verilen iki ucu vidalı bir mil ile bağlanmaktadır. Radyatörden boğaz ile ısıtıcı bloğa iletilen malzeme burada ısıtılmaktadır. Isıtıcı blok içerisinde sıcaklık sensörleri ve ısıtıcı rezistans bulunur. Filament ısıtıcı rezistansa girdiğinde sensörler aracılığıyla kontrol edilen sıcaklık aralığında ısıtılarak yarı eriyik hale geçmekte ve nozul uçtan üretim tablasına aktarılmaktadır. Dolayısıyla eriyik biriktirme yönteminde kullanılan ekstruderler, filament besleme mekanizması, soğutucu radyatör, çelik boğaz, ısıtıcı blok ve nozul uç parçalarının birleşiminden meydana gelmektedir. Sistemde kullanılacak ekstruder montajı tamamlandıktan sonra, orta köprüde bulunan alüminyum levha üzerine, bir başka yazıcıda üretilen ek bağlantı parçası kullanılarak montajlanmıştır (Şekil 3.8). Ekstruderde filament beslemesi Nema 17 adım motoru kullanılarak sağlanmıştır. Sistemde kullanılan ekstruderde bulunan nozul 280°C sıcaklığa kadar ısıtılmakta ve termoplastik esaslı malzemelerin üretiminde kullanılabilir. Sistemde ekstrudere filament beslemesi, üst gövdede bulunan iki adet karşılıklı sigma profil arasında indüksiyonlu kromlu mil bağlantısı ile karşılanmış ve mil üzerinde bulunan filament makarasından ekstrudere malzeme aktarımı yapılmıştır.



Şekil 3.8. Ekstruder montajı

Eriyik biriktirme yönteminde üretim tablası sistemin önemli parçalarından birisidir. Tablanın boyutsal hassasiyetinin yüksek ve iyi yüzey kalitesine sahip olması, malzeme yığılırken gerekli katman kalınlıklarının korunmasını sağlamakta, parçanın tabla üzerinde tutunmasını arttırmakta ve üretilen parçalarda iyi yüzey kalitesi elde edilebilmekte iken eksen seviyeleme işlemini de kolaylaştırmaktadır. Eriyik biriktirme yönteminde kullanılan filament malzemesinin özelliklerine bağlı olarak parçanın tablaya tutunmasını arttırmak amacıyla ısıtmalı tabla ihtiyacı oluşmaktadır. Özellikle büyük boyutlu parçalarda eriyik haldeki malzemenin hızlı soğuması parçada büzölmeye ve kenarlarda çarpılma gibi sorunların oluşmasına neden olmakta bu problem parçaların üretimini engellemekte, boyutsal hassasiyeti ve yüzey kalitesi düşük parçaların oluşmasına neden olmaktadır. Çalışmada imalatı gerçekleştirilen üç boyutlu yazıcının üretim tablası, 1100x1100x10 mm boyutlara sahip taşlanmış alüminyum levha kullanılarak oluşturulmuştur. Üretimde kullanılacak ısıtmalı tablada zamanla ısınma ve soğuma etkilerinden dolayı meydana gelebilecek şekil değişimini önlemek amacıyla 10 mm kalınlıkta tabla kullanılmıştır. Üretim tablasının ısıtılması silikon rezistanslar kullanılarak sağlanmıştır. Sistemde 300x450 mm boyutlarında 1300 Watt güç özelliğine sahip emniyet termostatl silikon rezistanslar kullanılmıştır. Silikon rezistanslar içine termokupllar yerleştirilerek sıcaklık kontrolünün sağlanması amaçlanmıştır. Ayrıca alüminyum levha üzerinde, üretimde pürüzsüz bir yüzey ve boyut doğruluğu elde edebilmek amacıyla yüksek sıcaklığa dayanıklı 3 mm kalınlığında temperlenmiş cam levha kullanılmış ve üretim tablası

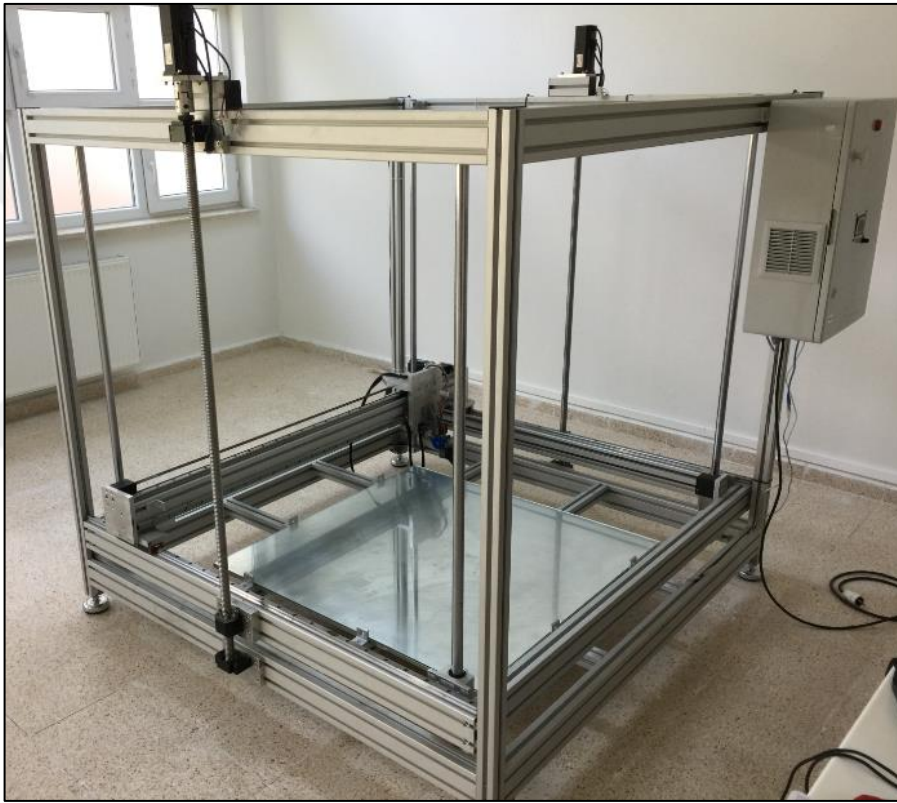
parçaları montajlanarak gövdeye yerleştirilmiştir. Manuel olarak eksen hareketlerinin kontrolü yapıldıktan sonra elektronik aksamların bağlantılarına geçilmiştir. Eksen hareketleri her ekseninde birer adet olmak üzere x ve y ekseninde üretim baskı alanı 1000x1000 mm olacak şekilde limitleyici butonlar kullanılarak sınırlandırılmıştır. z ekseninde emniyetli bölgeye limitleyici buton eklenerek orta gövdenin maksimum inebileceği nokta belirlenmiş ve ekstruder bağlantısının bu noktadan aşağı inmesi engellenmiştir. Pano da iki adet güç kaynağı, bir adet solid state röle, eksen motorları için üç ayrı sürücü, arduino mega ve ramps kartları, LCD ekran ve hava akışını sağlamak amacıyla dört adet fan bulunmaktadır (Şekil 3.9). Yazıcıdaki tüm bağlantıların kablolama işlemleri yapılarak pano içerisinde toplanmış ve LCD ekran ise pano dışına montajlanmıştır. LCD ekran sayesinde sistemde manuel kontrol, eksen hareketleri kontrolü yapılabilmektedir.



Şekil 3.9. Pano bağlantısı

Üretimi tamamlanan büyük baskı hacmine sahip üç boyutlu yazıcının hareket kontrolü Arduino ile yapılmış ve marlin yazılımı kullanılarak kodlar üretilen üç boyutlu yazıcıya göre uyarlanmıştır. Yazıcıyı, usb bağlantısı ile uzaktan kontrol edebilmeyi sağlayan, üretim için gerekli parametrelerinin belirlenebildiği ve model dilimleme işlemlerinin yapıldığı Slicer, Cura gibi yazılımları içeren ve üretim için g-kod komut dosyalarının oluşturulduğu Repetier host programı tasarımı yapılan modellerin üretilmesi aşamasında kullanılmıştır. Üretimi tamamlanan üç boyutlu

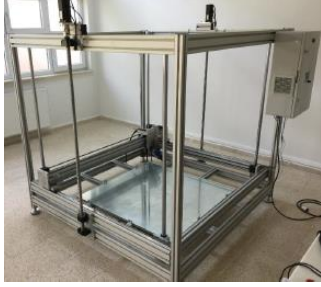
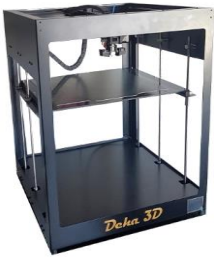
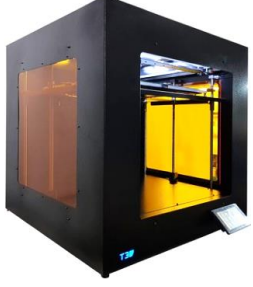
yazıcının eksen hareketleri, hız kontrolü, motor ve bağlantı parçalarının kontrolleri, ekstruder ve tabla testleri yapılarak çalışması kontrol edilmiştir. Çalışmada imalatı gerçekleştirilen eriyik biriktirme yöntemi esasına dayalı üretim yapan sistem 1000x1000x1000 mm baskı boyutlarına sahiptir. Ürüne ait kontrol yazılım ve donanım birbiri ile uyumludur. Yazılım açık kaynak kodlu olup parametreler üzerinde değişiklik yapabilme imkanı tanımaktadır. Yazıcı üzerinde 9 farklı noktadan z eksen sıfırlaması yapılarak kalibrasyon özelliği aktif edilmiştir. Üretim yapılmadan önce nozul prob görevi görmekte ve 9 farklı noktadan tabla üzerinde eksen sıfırlaması olarak kalibrasyon tamamlandıktan sonra üretim yapılabilir.



Şekil 3.10. Deneysel amaçlı büyük hacimli eriyik biriktirme esaslı eklemeli imalat sistemi

Yapılan araştırmalarda Türk firmaları tarafından aktif olarak üretilen ve ticari olarak mevcut büyük baskı hacmine sahip üç boyutlu yazıcılar ile çalışma kapsamında üretimi yapılan sisteme ait teknik özellikler ve aralarındaki farklılıkla incelenmiş ve Çizelge 3.1’de verilmiştir.

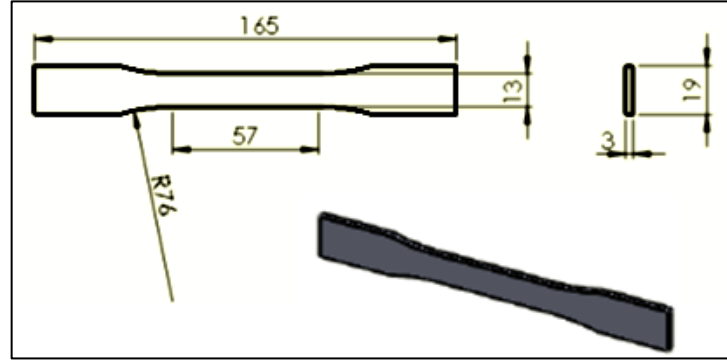
Çizelge 3.1. Üretilen sistem ve mevcut sistemlerin teknik özellikleri

	Üretilen 3B yazıcı	Deha 3D Max	CoreMax 600 Pro
			
Baskı Alanı	1000x1000x1000 mm	500x500x500 mm	600x600x480 mm
Malzeme	ABS, ABS+ Karbon fiber kompozit, PLA vb.	ABS, PLA, PVA	PLA, ABS, PETG
Platform	Maksimum 140°C ısıtmalı, 120°C’de çalıştırıldı	Isıtmalı	Maksimum 150°C ısıtmalı
Baskı Hızı	Max 200 mm/s	Belirtilmemiş	Max. 300 mm/s
Motor	2.8 Nm adım motorlar, 3 Nm servo motorlar	Belirtilmemiş	Adım motor
Kalibrasyon	9 farklı noktadan z eksenı sıfırlaması	Otomatik	Otomatik
Hareket Sistemi	Lineer ray, lineer araba ve vidalı mil (Hiwin)	Endüstriyel mil ve arabalı	Lineer ray, araba ve vidalı mil
Yazılım	Açık kaynak	Açık kaynak	Belirtilmemiş
Çalışma sistemi	Kartezyen koordinat	Kartezyen koordinat	Core xy
Gövde	45x90 Alüminyum sigma profil rijit yapı	Belirtilmemiş	Sac kaplama
Baskı Hassasiyeti	0.1-0.2 mm	0.05-0.3 mm	0.05 mm

3.2. Deney Numunelerinin Üretimi

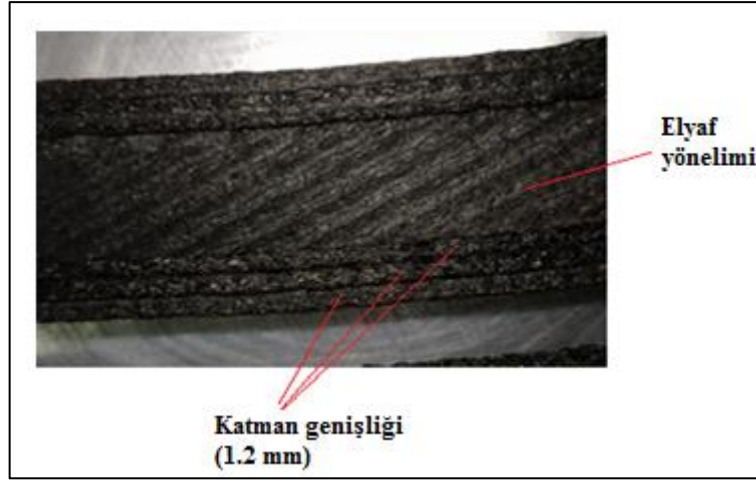
Çalışma kapsamında üretilen üç boyutlu yazıcı kullanılarak farklı üretim parametrelerinde deney numuneleri üretilmiştir. Deney numunelerinin üretiminde, Esun firmasına ait ABS Plus filamentleri ile Oo-Kuma firmasına ait olan ağırlıkça %10 oranında, 0.6 mm uzunluğunda ve 7 mikron çapında karbon fiber içeren ABS

filamentleri kullanılmıştır. Test numuneleri, ASTM D638 Tip-I standardına uygun boyutlarda ve 3 mm kalınlıkta üretilmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. ASTM D638 Tip-1 numune ölçüleri

Eriyik biriktirme yönteminde kullanılan birçok farklı üretim parametresi mevcuttur. Bu çalışmada iki farklı test grubu oluşturulmuştur. İlk test grubunda üretim açısı, doluluk oranı parametreleri incelenirken ikinci deney grubundan üretim hızı, nozul sıcaklığı ve tabla sıcaklığı parametreleri üzerinde durulmuştur. Test numunelerinin üretiminde 0.4 mm çapa sahip paslanmaz çelik malzemeden yapılmış nozul uçlar kullanılmıştır. Numunelerin üretiminde kullanılan termoplastik filamentlerde bulunan karbon katkısının aşındırıcı özelliği nedeniyle nozul uçlarda meydana getireceği çapta aşınma ve bozulma sonucu katman kalınlığı ve yığılan malzeme miktarının değişmemesi amacıyla her üretim sonrası nozul uçları değiştirilmiştir. Katman kalınlıkları 0.2 mm olarak belirlenmiş, her numunede kullanılan katman sayısı, ilk katman ve diğer katman kalınlıkları sabit tutulmuştur. Parçanın et kalınlığını belirleyen ve katman genişliği olarak ifade edilen üretim parametresi her test numunesi için 3 adet döngü olacak şekilde ve her döngüde katman genişliği nozul çapına bağlı olarak 1.2 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Üretimlerde kullanılan dolgu deseni, üretim açılarının değiştirilebilmesine imkan tanınması amacıyla doğrusal desen olarak belirlenmiştir. Doğrusal desen kullanılarak yapılan üretimlerde, yığılan elyaflar arasında birbirine göre dik açılı bir nozul hareketiyle malzeme yığılması gerçekleştirilmektedir. Test numunelerinin üretiminde kullanılan dolgu deseni ve katman genişliği Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12. Yığılan katman genişliği ve elyaf yönelmesi

Nozul ucundan akan malzemenin akışkanlığı ve katmanın tablaya yapışma kabiliyeti dikkate alınarak üretimde kullanılan nozul ve tabla sıcaklığı sırasıyla 235°C ve 70°C olarak belirlenmiştir. Üretimde kullanılan sabit parametreler sırasıyla Çizelge 3.2’de verilmiştir. Test numunelerinin üretiminde mekanik özelliklere etkisini araştırmak amacıyla ilk grupta doluluk oranları ve üretim açıları değişken üretim parametreleri olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.2. Üç boyutlu yazıcı parametreleri

Parametre	Değer
Nozul Çapı (mm)	0.4
Katman Kalınlığı (mm)	0.2
İlk Katman Kalınlığı (mm)	0.2
Katman Genişliği (mm)	1.2
Dolgu Deseni	Doğrusal
Nozul Sıcaklığı (°C)	235
Tabla Sıcaklığı (°C)	70
Üretim Hızı (mm/s)	40

Değişken parametreler için üç farklı seviye belirlenerek test numuneleri üretilmiştir. Üretim parametreleri ve bu parametrelerin değerleri Çizelge 3.3’te, ilk deney grubunda oluşturulan üretim planı Çizelge 3.4’te verilmiştir.

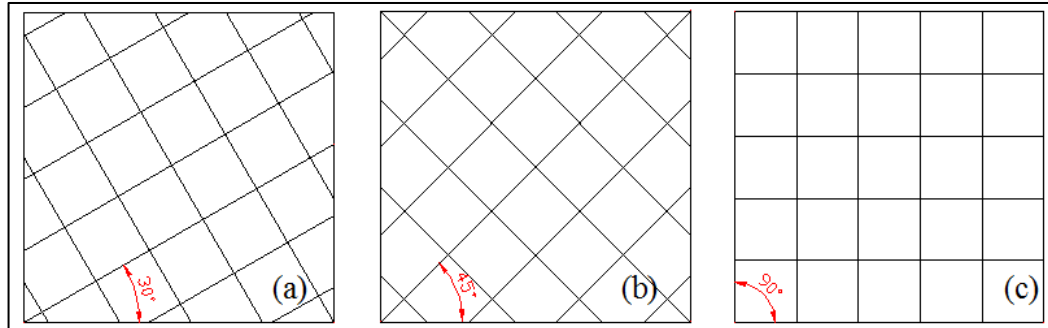
Çizelge 3.3. Üretim parametreleri

Parametre	Değer		
Doluluk Oranı (%)	20	60	100
Üretim açısı (°)	30/-60	45/-45	90/0

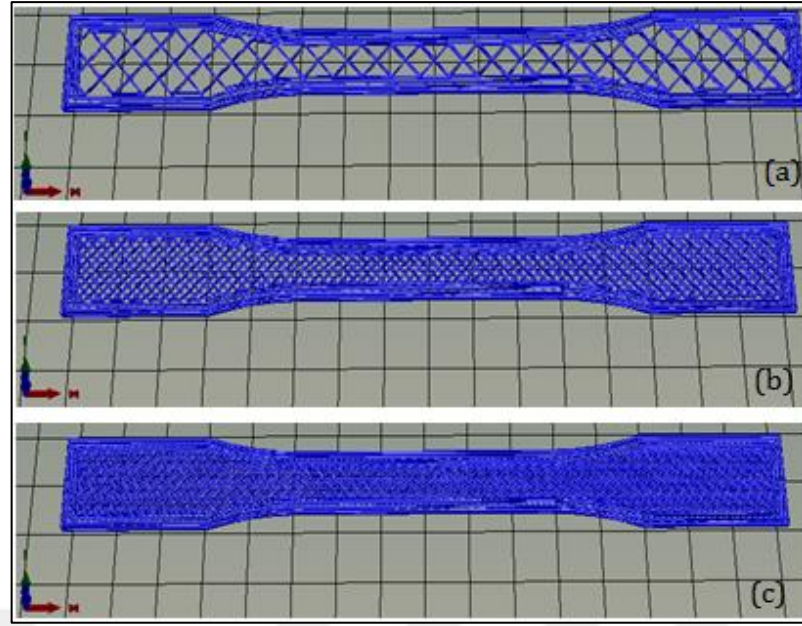
Çizelge 3.4. İlk deney grubu üretim planı

Deney No.	Doluluk oranı (%)	Üretim açısı (°)
1	20	30/-60
2	20	45/-45
3	20	90/0
4	60	30/-60
5	60	45/-45
6	60	90/0
7	100	30/-60
8	100	45/-45
9	100	90/0

Çalışmada, numuneler ilk olarak üç farklı dilimleme programı Slicer, Cura ve Simplify3d kullanılarak üretilmiş ancak üretilen parçalardaki yüzey kaliteleri dikkate alınarak Slicer dilimleme programında en iyi sonuç alınmış ve üretimler Slicer dilimleme programı kullanılarak yapılmıştır. Her test numunesi 15 adet katmandan oluşmuş ve tüm katmanlar belirlenen üretim açılarında üretilmiştir. Her deney planında bulunan üretim parametrelerine göre 5'er adet test numunesinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Test numunelerinin üretiminde kullanılan üç farklı üretim açısı ve doluluk oranları Şekil 3.13 ve 3.14'te gösterilmiştir.

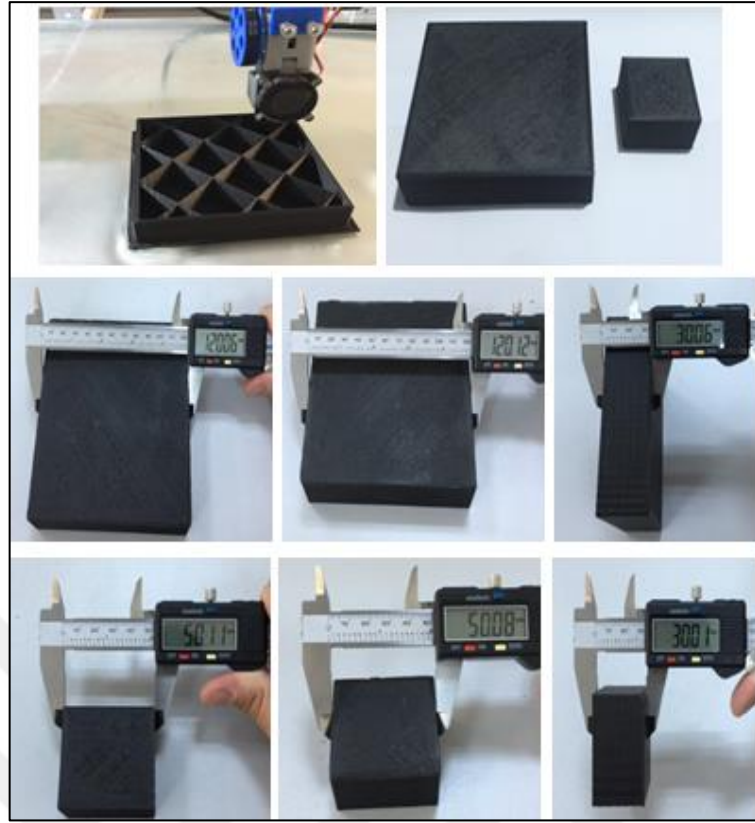


Şekil 3.13. (a) 30°/-60° üretim açısı, (b) 45°/-45° üretim açısı ve (c) 90°/0° üretim açısı



Şekil 3.14. Farklı doluluk oranlarında test numuneleri (a) %20 doluluk oranı, (b) %60 doluluk oranı ve (c) %100 doluluk oranı

Test numunelerinin üretimine geçilmeden önce üç boyutlu yazıcıda farklı boyutlarda küp numuneler üretilerek üç boyutlu yazıcının ürettiği parçalarda boyutsal doğruluklar incelenmiştir. Parça üretiminde 235°C nozul sıcaklığı 70°C tabla sıcaklığı, 0.4 mm nozul çapı, 0.2 mm katman kalınlığı ve 40 mm/s üretim hızı kullanılmış, 50x50x30 mm ve 120x120x30 mm boyutlarında üçer adet küp numune üretilmiş ve boyutsal kontrolleri yapılmıştır (Şekil 3.15). Parçalarda ± 0.2 mm boyutsal hassasiyet elde edilmiş ve test numunelerinin üretimine geçilmiştir (Çizelge 3.5). Deneylerde üretilen tüm test numuneleri ASTM D638 standardına uygun olarak üretilmiştir. Tip-I numune boyutlarında kemik şekilli test numuneleri oluşturulan tüm deney gruplarında tüm kombinasyonları içerek şekilde her grup ve her malzeme için beşer adet olmak üzere üretilmiştir.



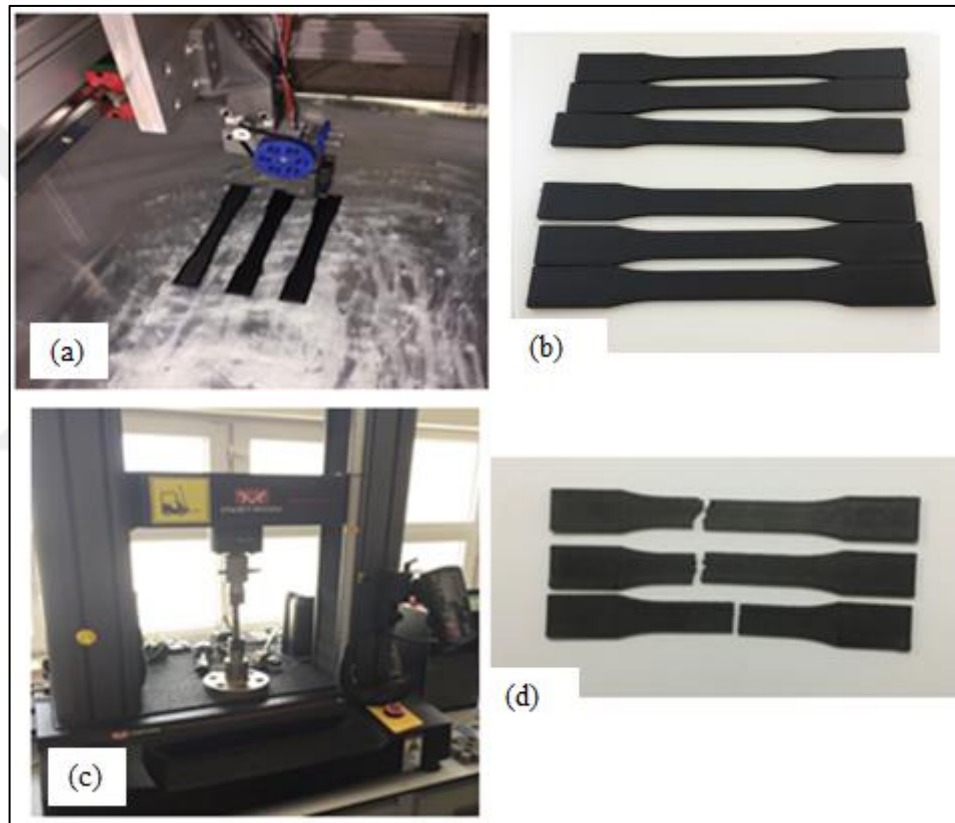
Şekil 3.15. Deneme parçaları

Çizelge 3.5. Deneme parçaları baskı ölçüleri

Numune No.	Model ölçüleri (mm)	Üretilen parça ölçüleri (mm)	Hata payı yüzdesi (%)
1	50x50x30	50.08x50.11x30.01	%0.16-%0.22-%0.03
2	50x50x30	50.14x50.15x29.96	%0.28-%0.3-%0.13
3	50x50x30	50.16x50.12x30.05	%0.32-%0.24-%0.16
4	120x120x30	120.06x120.12x30.06	%0.05-%0.1-%0.2
5	120x120x30	120.16x120.18x29.93	%0.13-%0.15-%0.23
6	120x120x30	120.13x120.15x29.96	%0.1-%0.12-%0.13

Belirlenen parametrelere göre deney numunelerinin üretimi tamamlandıktan sonra her bir numuneye çekme testi uygulanmıştır. Çekme deneyleri, Instron marka 30 kN yük kapasitesine sahip çekme test cihazında yapılmıştır. Üretilen numunelere uygun çene olmaması nedeniyle test numunesine uygun ölçülerde çekme çenelerinin imalatı yapılmıştır. ASTM D638 standardına göre test hızı 5 mm/dk'ya ayarlanmış ve veriler 0,1 sn aralıklarla kayıt edilmiştir. Standartta belirlenen boyutsal ölçülere uygun olarak üretilen numunelerin çenelere yerleşimi de ASTM D638 standardı kriterlerine uygun olarak yapılmıştır. Çekme kafaları arasındaki mesafe 115 mm, ölçüm boyu 50

mm'dir. Deneylere başlamadan önce tüm numunelerin 3 farklı noktadan kalınlık ve genişlik ölçümleri alınmıştır. Alınan ölçümlerin ortalaması her deney numunesi için mukavemet hesabında kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen veriler Instron çekme cihazının bağlantılı olduğu bilgisayarda bulunan Bluehill yazılımında kayıt altına alınmış ve hesaplamalarda kullanılmıştır. Deney numunelerinin üretimi ve çekme testleri Şekil 3.16'da verilmiştir. Farklı üretim parametrelerine göre üretilen test numunelerinin deneyleri sonrası üretim parametrelerinin iç yapıda meydana getirdiği değişimler kırık yüzeylerden alınan taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ile değerlendirilmiştir.



Şekil 3.16. Deney numuneleri üretimi (a), üretilmiş numuneler (b), çekme testleri (c), kopma yüzeyleri (d)

3.3. Taguchi Deney Tasarımı

Belirlenen ilk üretim parametrelerine göre çekme testleri yapılmış ve mekanik özellikler incelenmiştir. İkinci deney grubunda, üretim hızı, nozul sıcaklığı ve tabla sıcaklığı değişken parametreler olarak belirlenmiş ve her parametreden üç farklı seviye seçilmiştir. Belirlenen deney parametreleri ve seviyeleri Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Deney parametreleri ve seviyeleri

Parametre Seviye	Üretim Hızı (mm/s)	Nozul Sıcaklığı (°C)	Tabla Sıcaklığı (°C)
1	20	235	70
2	40	255	95
3	60	265	110

Çizelge 3.6’da verilen deney parametreleri ile Taguchi L₉ ortogonal dizisi kullanılarak deney tasarımı oluşturulmuştur. Minitab 17 yazılımı ile hazırlanan Taguchi L₉ deney tasarımı, Çizelge 3.7’de gösterilmiştir. Deney tasarımında belirlenen koşullara göre deney numuneleri üretilmiş ve çekme deneyleri yapılmıştır.

Çizelge 3.7. Taguchi L₉ ortogonal deney tasarımı

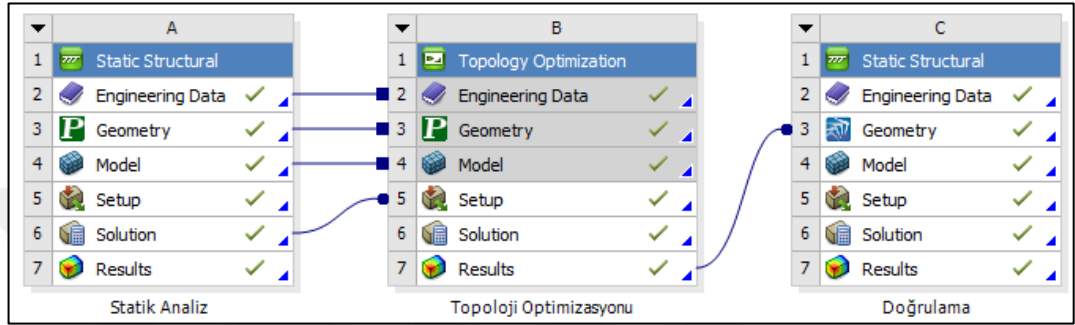
Durum	Parametre	Hız (mm/s)	Nozul Sıcaklığı (°C)	Tabla Sıcaklığı (°C)
1		20	235	70
2		20	255	95
3		20	265	110
4		40	235	95
5		40	255	110
6		40	265	70
7		60	235	110
8		60	255	70
9		60	265	95

İlk deney setinde kullanılan üretim açıları ve doluluk oranlarını içeren üretim parametreleri ile ikinci deney setinde bulunan üretim hızı, nozul sıcaklığı, tabla sıcaklığı üretim parametreleri, büyük baskı boyutlu eriyik biriktirme sisteminde karbon fiber takviyeli kompozit numunelerin kullanımına yönelik en iyi üretim parametrelerinin tespit edilmesi amacıyla kullanılmıştır.

3.4. Topoloji Uygulaması

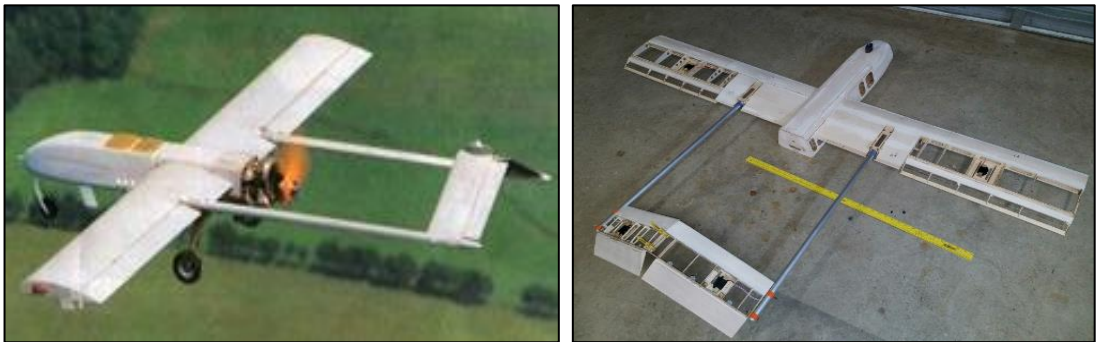
Topoloji optimizasyonunda amaç, uygulanan yükler ve belirlenen kısıtlar altında, belirli bir bölgede yapı içindeki en uygun malzeme dağılımını tespit etmektir. Bu nedenle uygulama yapılacak parçanın dış boyutlarında herhangi bir değişiklik

olmadan, parça rijitliğini bozmayacak şekilde belirli bölgelerden malzeme boşaltılması amaçlanmaktadır (Yıldız vd., 2003). Bu çalışmada bir insansız hava aracı kanat kaburga parçası kullanılarak topoloji optimizasyonu uygulaması, ANSYS Workbench 18.1 programı kullanılarak yapılmıştır. Topoloji optimizasyonu, statik analizlerin yapılması, topoloji optimizasyonu ile tasarım modelinin oluşturulması ve yeni tasarımın doğrulama işleminin yapılması olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır (Şekil 3.17).



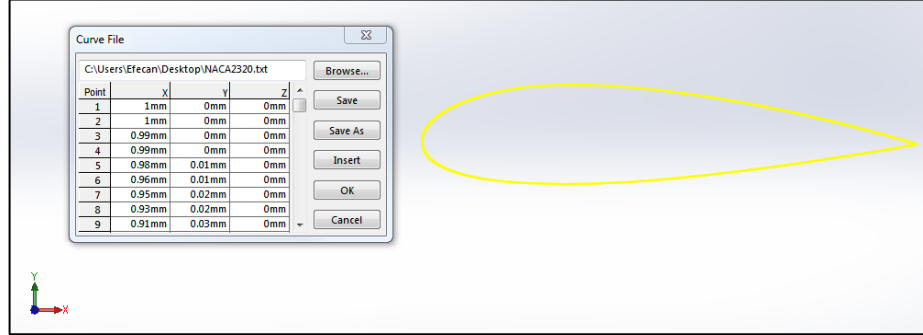
Şekil 3.17. Topoloji optimizasyonu aşamaları

Statik analiz aşamasında ilk olarak, deneyler sonucu kompozit malzeme için en iyi üretim parametrelerinde elde edilen mekanik özellikler kullanılarak ANSYS malzeme kütüphanesinde yeni malzeme oluşturularak destek parçası için malzeme ataması yapılmıştır. Geometri tanımlaması aşamasında, dikdörtgensel kanada sahip ve kanat geometrisi kesit boyunca sabit olan AAI RQ-7 insansız hava aracı örnek olarak alınmış ve kanat kaburga profili, NACA 2320 tipi uçak kanadı profili kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 3.18).



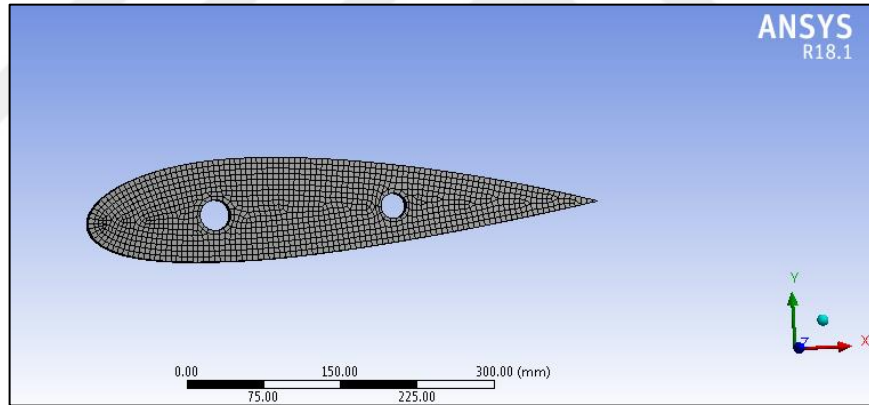
Şekil 3.18. AAI RQ-7 insansız hava uçağı

NACA2320 kanat profiline ait kalınlık, kamburluk oranı gibi değerler ile kanat geometrisine ait 100 adet nokta oluşturulmuş ve Solidworks programına aktarılmış, katı model oluşturulmuştur (şekil 3.19).



şekil 3.19. NACA 2320 kanat geometrisi

Katı modeli oluşturulan model ANSYS programına aktarılarak geometri tanımlaması yapılmıştır. Daha sonra eleman büyüklüğü 3 mm olan 26726 adet eleman ve 122759 adet düğüm noktasına sahip ağ yapısı oluşturulmuştur (şekil 3.20).



şekil 3.20. Modelde ağ yapısının oluşturulması

Ağ yapısı oluşturulan modelde statik analiz için kaburga üzerine etkiyecek yükler belirlenmiştir. Kanat profiline etkiyen sürükleme kuvveti ve kaldırma kuvveti hesaplanırken, ANSYS hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsü kullanılmıştır. Giriş serbest akım hızı için 75 km/h ve 1000 m irtifada sıkıştırılmaz akış koşulları kabul edilmiştir. ıkış koşulları için atmosfer basıncı seçilmiş ve basıncı tabanlı çözüm yapılmıştır. Kanat profili akış boyunca sabit, kanat etrafında oluşturulan hava bölgesi serbest akım hızı ile x eksenini boyunca hareket ettirilmiştir. Akış boyunca ideal gaz kabul uygulanmış ve analizler k-epsilon türbülans modeli kullanılarak zdrlmştur. zm sonuçlarından 370 N'luk sürükleme kuvveti ve 2490 N'luk

kaldırma kuvveti elde edilmiştir. Elde edilen sürüklenme kuvveti ve kaldırma kuvveti değerleri statik analiz aşamasında kullanılmış ve gerilme dağılımları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar topoloji optimizasyonu modülü ile birleştirilmiş ve topoloji optimizasyonu aşamasına geçilmiştir.

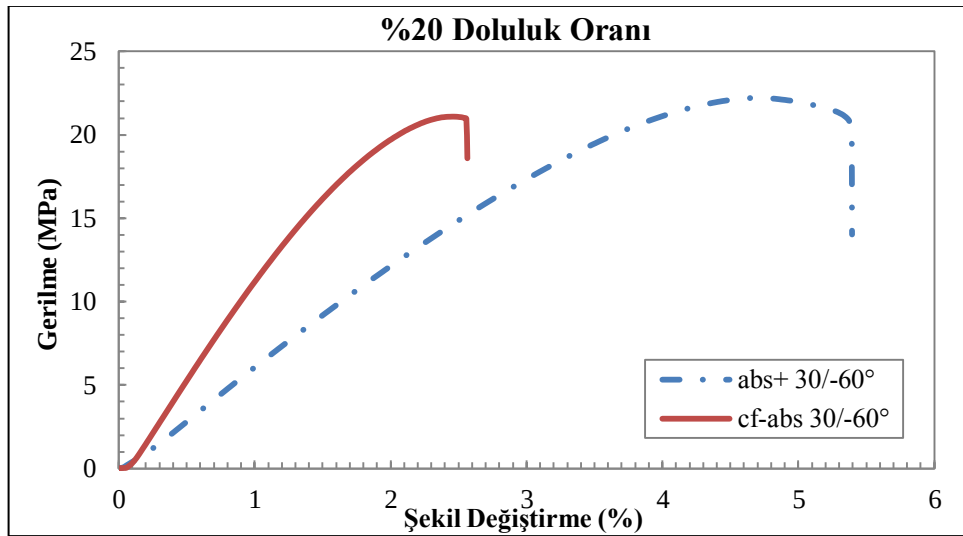
Topoloji optimizasyonu aşamasında amaç kompliyansın minimize edilmesi yani rijitliğin maksimizasyonu olarak belirlenmiş ve kısıtlayıcı olarak kütle azaltım oranı belirlenmiştir. Topoloji optimizasyonu çözdürüldükten sonra doğrulama aşamasına geçilmiştir. Doğrulama aşamasında topoloji optimizasyonu sonucu elde edilen yeni tasarım SpaceClaim programı kullanılarak düzenlenmiş ve katı model olarak tekrar tanımlanmıştır. Yeni tasarım geometrisi üzerinde statik analizler tekrarlanarak tasarım modeli üzerinde gerilme ve deformasyon dağılımları belirlenmiştir. Topoloji optimizasyonu sonucu elde edilen kaburga destek modeli kullanılarak kanat montajı yapılmıştır. Kanat modelinin oluşturulmasında AAI RQ7 tipi insansız hava aracında bulunan dikdörtgen şekilli ve kanat geometrisi kesit boyunca sabit olan 3.9 m kanat uzunluğuna sahip model kullanılmıştır. Kanat geometrisi simetrik özellikte olup statik analiz aşamasında tek tarafta bulunan kanat geometrisi kullanılmıştır. Kanat içerisine 6 adet topoloji optimizasyonu uygulanmış destek kaburgası eşit aralıklarla yerleştirilmiştir. Kaburga destek parçaları, karbon fiber takviyeli termoplastik malzemelerden oluşturulurken, kanat dış kaplaması uçaklarda sıklıkla kullanılan Al. 7075 malzeme kullanılarak oluşturulmuştur. Normal kaburga destek parçası ve topoloji optimizasyonu yapılmış kaburga destek parçaları kullanılarak oluşturulan kanat üzerinde statik analizler tekrarlanarak optimizasyon öncesi ve sonrası gerilme, deformasyon ve kütle farkları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar araştırma bulguları kısmında incelenmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

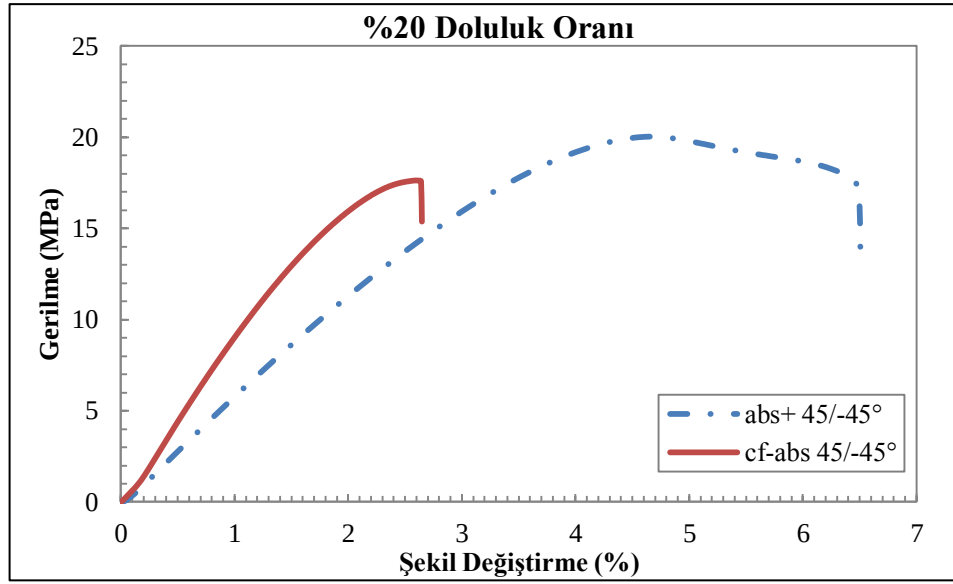
Bu bölüm, eriyik biriktirme yönteminde üretilen deney numunelerinde kullanılan üretim parametrelerinin mekanik özelliklere etkilerinin incelenmesi, Taguchi deney tasarımı ile ideal üretim parametrelerinin belirlenmesi, elde edilen en iyi mekanik özellikler kullanılarak kanat kaburga parçasına topoloji optimizasyonu uygulanması sonucu elde edilen tasarımın eklemeli imalat sisteminde üretilmesi aşamalarında elde edilen bulguları incelemek üzere dört bölümden oluşmaktadır. Çalışmada, farklı üretim parametrelerinde üretilen numunelerden elde edilen mekanik özellikler incelenmiş ve en iyi mekanik özellikleri gösteren parametreler Taguchi deney tasarımı ile belirlenmiştir. En iyi mekanik sonuçlar yazılımda termoplastik esaslı kompozit malzeme ataması aşamasında kullanılmış ve kanat kaburga parçasına topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Optimizasyon sonucu elde edilen tasarım, en iyi üretim parametreleri kullanılarak eklemeli imalat sisteminde üretilmiştir.

4.1. Üretim Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkisi

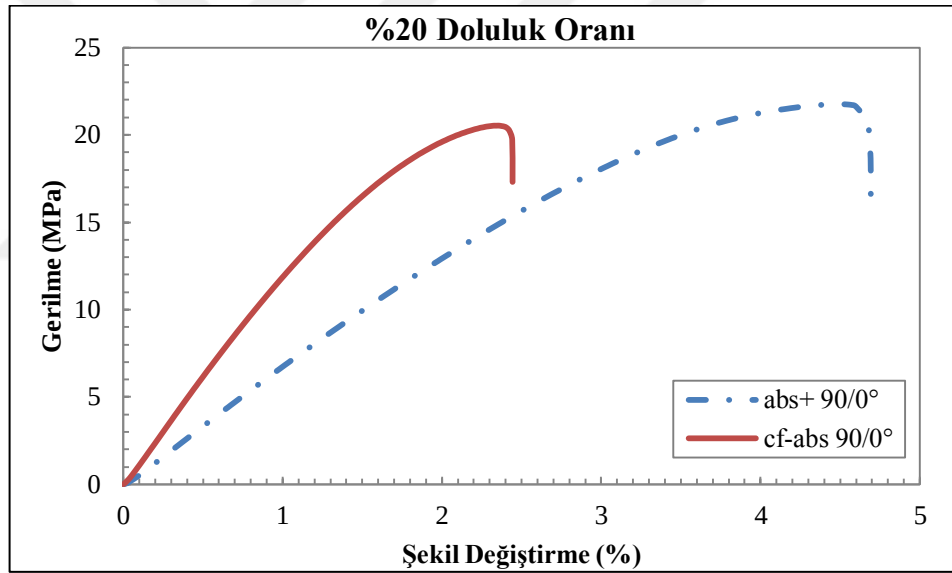
Deney grubunun ilk aşamasında ele alınan farklı doluluk oranları (%20, %60, %100) ve farklı üretim açılara (30/-60°, 45/-45°, 90/0°) göre test numuneleri üretilmiş ve çekme testleri yapılmıştır. Deneyler sonucu her numuneye ait farklı doluluk oranı ve üretim açısına göre elde edilen değerler kullanılarak gerilme şekil değiştirme diyagramları oluşturulmuştur. Malzemelerin farklı doluluk oranları ve üretim açılarında elde edilen değerler ayrıca çizelge olarak belirtilmiştir.



Şekil 4.1. %20 doluluk oranında 30/-60° üretim açısında gerilme-şekil değiştirme diyagramı



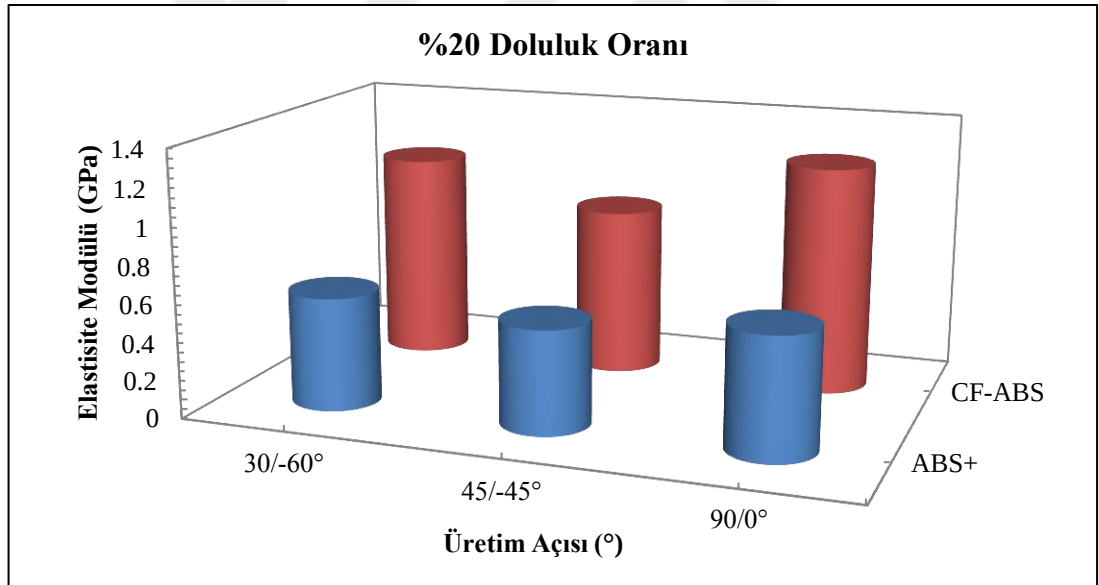
Şekil 4.2. %20 doluluk oranında 45/-45° üretim açısında gerilme-şekil değiştirme diyagramı



Şekil 4.3. %20 doluluk oranında 90/-0° üretim açısında gerilme-şekil değiştirme diyagramı

%20 doluluk oranında ve farklı üretim açılarında üretilen numunelerin mekanik özellikleri incelendiğinde üretim açılarının tümünde ABS malzemeden elde edilen çekme mukavemeti değerleri karbon katkılı ABS malzemeden üretilen numunelere göre yüksek ölçülmüştür. Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilen grafiklerden, %20 doluluk oranında karbon fiber katkısının parça mukavemetine etki etmediği görülmektedir. Düşük doluluk oranlarında katman içerisindeki boşluk oluşumuna bağlı olarak elyaflar arasında yeterli kuvvet iletimi gerçekleşmemiştir. %20 doluluk oranında elde edilen en yüksek çekme mukavemeti, Şekil 4.1'de görüldüğü gibi 30°/-

60° üretim açısında abs malzemede 22 MPa iken karbon katkılı ABS malzemede bu değer 30/-60° üretim açısında 21 MPa'dır. Şekil değiştirme oranları incelendiğinde, en yüksek yüzde uzama, her iki malzeme içinde 45/-45° üretim açısında elde edilirken abs malzemede %6.42, karbon takviyeli ABS malzemede %58 oranında düşüş ile %2.65 olarak bulunmuştur. Gerilme şekil değiştirme diyagramları incelendiğinde, ABS malzemeden üretilmiş numuneler karbon fiber katkılı ABS malzemeye kıyasla nispeten sünek davranış gösterirken, karbon fiber takviyeli ABS malzemeden üretilen numunelerde belirgin bir akma görülmeden kopma oluşmuş ve gevrek davranış elde edilmiştir. Karbon katkısı ile malzemelerde oluşan rijit yapıdan dolayı esneme kabiliyeti azalmış ve şekil değiştirme oranları yarı yarıya düşmüştür. %20 doluluk oranına sahip tüm üretim açılarında karbon takviyesi ile elastisite modülleri önemli oranda artmıştır. En yüksek elastisite modülü abs malzemede 90/0° üretim açısında 0.64 GPa iken karbon fiber takviyeli ABS malzemelerden üretilen numunelerde %89 artarak 1.21 GPa olarak bulunmuştur (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. %20 doluluk oranı ve farklı üretim açılarında elastisite modülleri

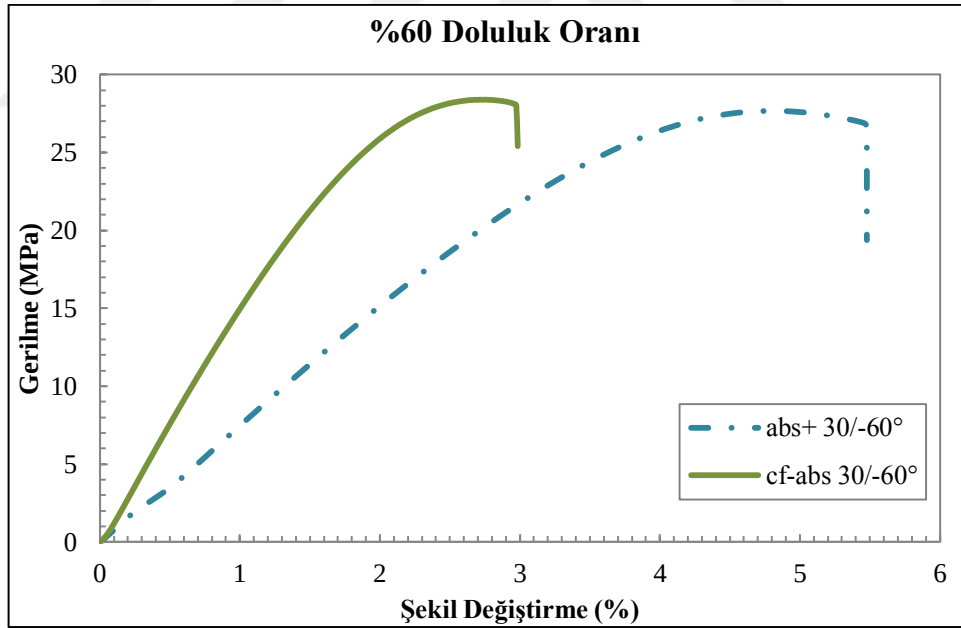
%20 doluluk oranında her iki malzeme içinde, en düşük çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri 45/-45° üretim açısında, en düşük yüzde uzama ise 90/0° üretim açısında elde edilmiştir. %20 doluluk oranında dahi karbon fiber takviyesi ile malzemenin rijitliği belirgin bir şekilde artarken gevrek davranış sergilemesi yüzde uzama miktarlarında önemli düşüşe sebep olmuştur. Vicente vd. (2016) %20 doluluk oranında oluşturulan desende parça iç bölgesinde yığılan malzeme miktarının az

olmasından kaynaklı boşluk oranının fazla olmasının mukavemeti arttırmaya yetmediğini belirtmiştir. %20 doluluk oranında elde edilen mekanik değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

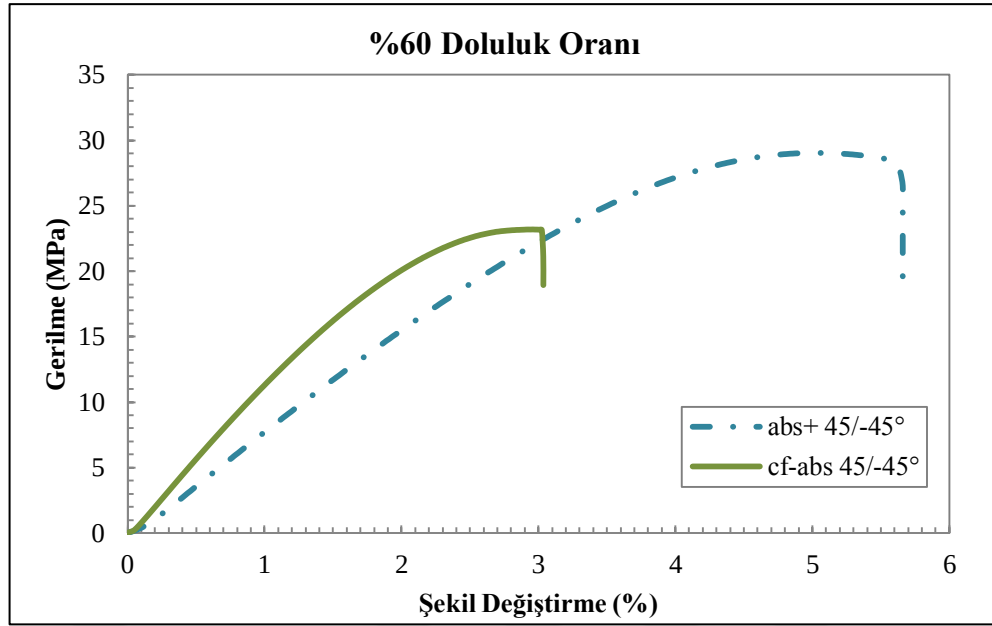
Çizelge 4.1. %20 doluluk oranında elde edilen mekanik değerler

Malzeme	Doluluk Oranı	Üretim Açısı	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Birim Şekil Değiştirme (mm/mm)
ABS+	%20	30°/-60°	22.19±0.13	0.60±0.01	0.0545
CF-ABS	%20	30°/-60°	21.08±0.12	1.10±0.09	0.0257
ABS+	%20	45°/-45°	19.90±0.17	0.55±0.01	0.0642
CF-ABS	%20	45°/-45°	17.62±1.53	0.89±0.08	0.0265
ABS+	%20	90°/0°	21.76±0.14	0.64±0.02	0.0481
CF-ABS	%20	90°/0°	20.76±0.27	1.21±0.008	0.0245

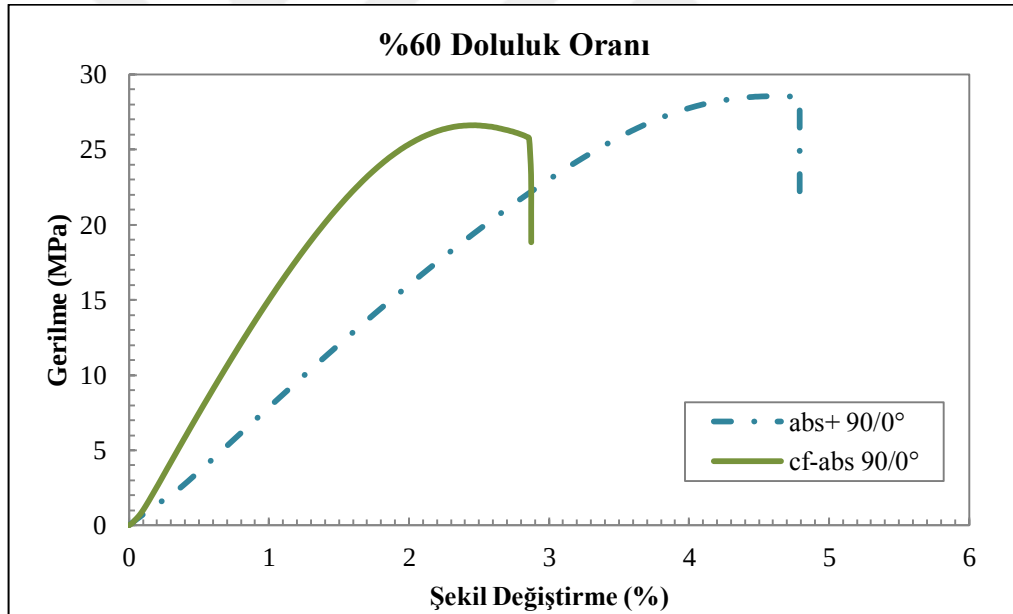
%60 doluluk oranında ve farklı üretim açılarında üretilen deney numunelerinin gerilme-şekil değiştirme diyagramları Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.5. %60 doluluk oranında 30°/-60° üretim açısında gerilme-şekil değiştirme diyagramı



Şekil 4.6. %60 doluluk oranında 45/-45° üretim açısında gerilme-şekil değiştirme diyagramı

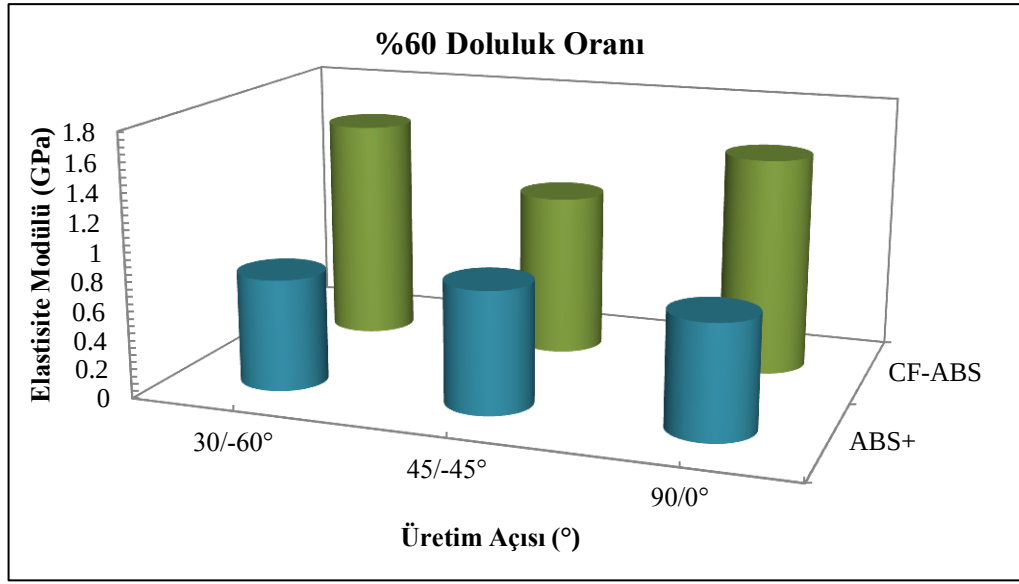


Şekil 4.7. %60 doluluk oranında 90/0° üretim açısında gerilme-şekil değiştirme diyagramı

%60 doluluk oranında üretilen numunelerde doluluk oranının artması ile parça iç bölgesindeki boşluk oranı azalmakta bu nedenle dolgu deseni daha fazla miktarda malzeme yığılmasıyla oluşturulmaktadır. Vicente vd. (2016) yaptıkları çalışmada, doluluk oranının artması ile hacimce daha az boşluk meydana geldiğinden bağlar arasında tutunmanın arttığı ve tüm numunelerde mukavemet artışının meydana geldiği sonucuna ulaşmışlardır. %60 doluluk oranında abs malzeme için en yüksek

çekme mukavemeti, 45/-45° üretim açısında 29 MPa iken karbon takviyeli numunelerde 30/-60° üretim açısında 28.44 MPa olarak bulunmuştur. Doluluk oranının artmasıyla yığılan malzeme miktarı artmakta dolayısıyla malzemedeki karbon fiber miktarı da artmaktadır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri incelendiğinde, artan karbon fiber miktarı ile içyapıda bulunan fiber matris arayüzündeki boşluk miktarında da artış görülmüştür (Şekil 4.23). Bu nedenle, çekme dayanımında görülen düşüşe içyapıda artan boşluk oluşumunun sebep olduğu düşünülmektedir. Elde edilen mekanik değerler incelendiğinde, abs numunelerden farklı üretim açılarında elde edilen mekanik değerler ortalama %4 değişim gösterirken, karbon fiber takviyeli numunelerde elde edilen mekanik değerlerde farklı üretim açılarına göre ortalama %20 oranında değişim gözlenmiştir. Karbon fiber takviyesiyle matris malzemesi anizotropik özellik göstermekte ve karbon fiber yönelimine göre farklı üretim açılarında mekanik özelliklerde değişim meydana gelmektedir.

%60 doluluk oranında elde edilen elastisite modülü değerleri incelendiğinde yığılan malzeme miktarının artması, her iki malzemenin elastisite modüllerini artırmıştır. %60 doluluk oranında abs malzemedeki en yüksek elastisite modülü 45/-45° üretim açısında 0.84 GPa iken karbon fiber takviyeli abs numunede 30/-60° üretim açısında %83 artışla 1.54 GPa olarak bulunmuştur. Elde edilen verilere bakılarak, karbon fiber takviyesinin mekanik özellikler üzerindeki en belirgin etkisinin elastisite modülü üzerinde olduğu görülmektedir. %20 ve %60 doluluk oranları karşılaştırıldığında doluluk oranının artması ile karbon fiber takviyeli abs numunelerin elastisite modülleri ortalama %38.5 oranında artış göstermiştir. Üretim açılarına göre elastisite modüllerinde görülen değişim Şekil 4.8’de verilmiştir.



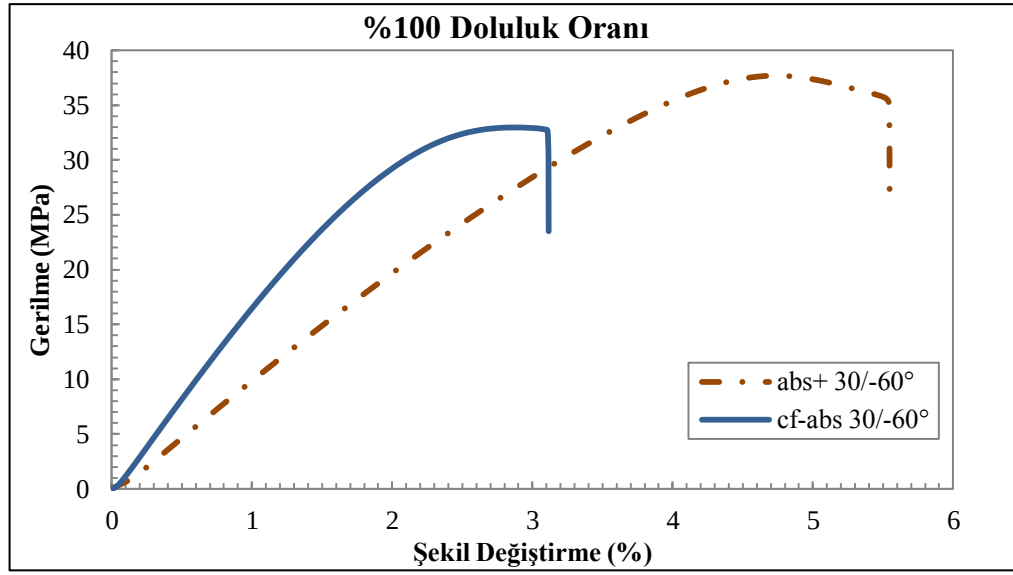
Şekil 4.8. %60 doluluk oranı ve farklı üretim açılarında elastisite modülleri

Şekil değiştirme oranları incelendiğinde, %20 doluluk oranlarında olduğu gibi %60 doluluk oranında da en fazla yüzde uzama 45/-45° üretim açısında elde edilirken en düşük uzama değerleri 90/0° üretim açısında elde edilmiştir. En fazla yüzde uzama abs malzemede %5.66 iken karbon fiber takviyeli kompozit numunede %46 düşüşle %3.04 olarak elde edilmiştir. %60 doluluk oranında elde edilen değerler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

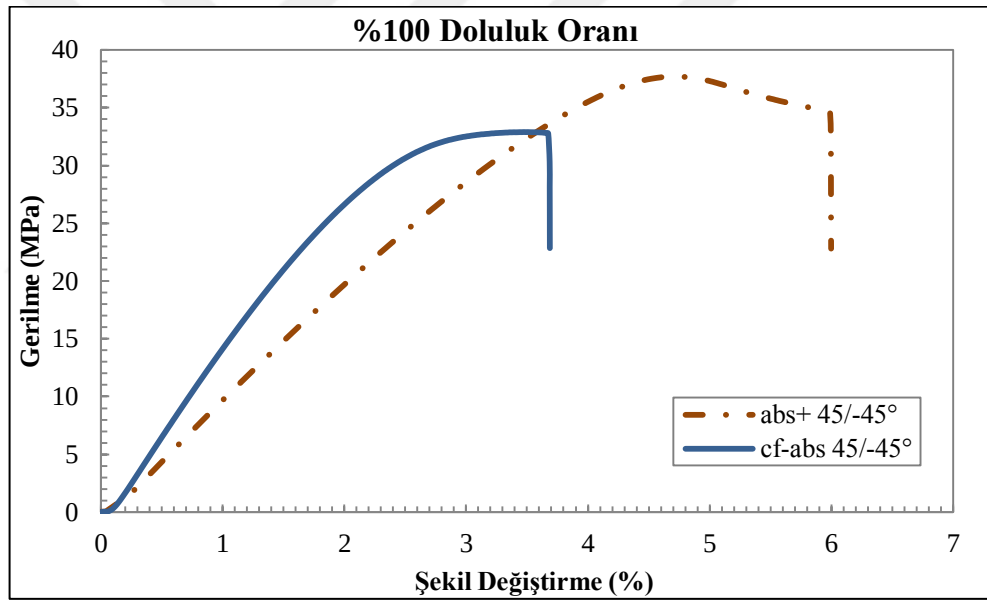
Çizelge 4.2. %60 doluluk oranında elde edilen mekanik değerler

Malzeme	Doluluk Oranı	Üretim Açısı	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Birim Şekil Değiştirme (mm/mm)
ABS+	%60	30°/-60°	27.93±0.31	0.77±0.01	0.0547
CF-ABS	%60	30°/-60°	28.44±0.19	1.54±0.03	0.0291
ABS+	%60	45/-45°	29.03±0.04	0.84±0.13	0.0566
CF-ABS	%60	45/-45°	23.19±0.48	1.12±0.09	0.0304
ABS+	%60	90°/0°	28.17±3.3	0.78±0.04	0.0479
CF-ABS	%60	90°/0°	26.22±0.52	1.50±0.002	0.0287

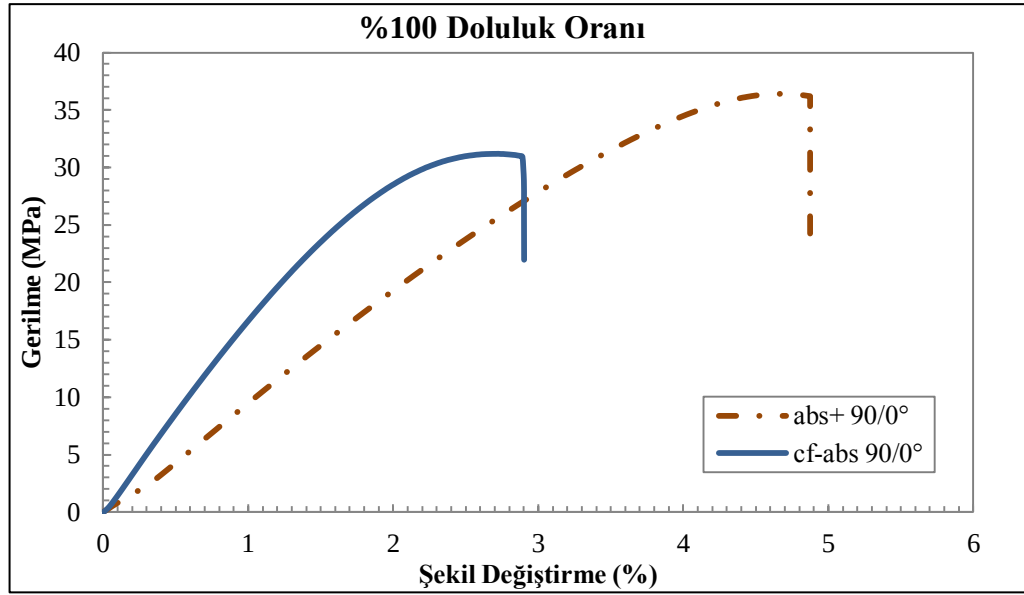
%100 doluluk oranında ve farklı üretim açılarında üretilen numunelerin gerilme-şekil değiştirme diyagramları Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.9. %100 doluluk oranında 30/-60° üretim açısında gerilme-şekil değiştirme diyagramı



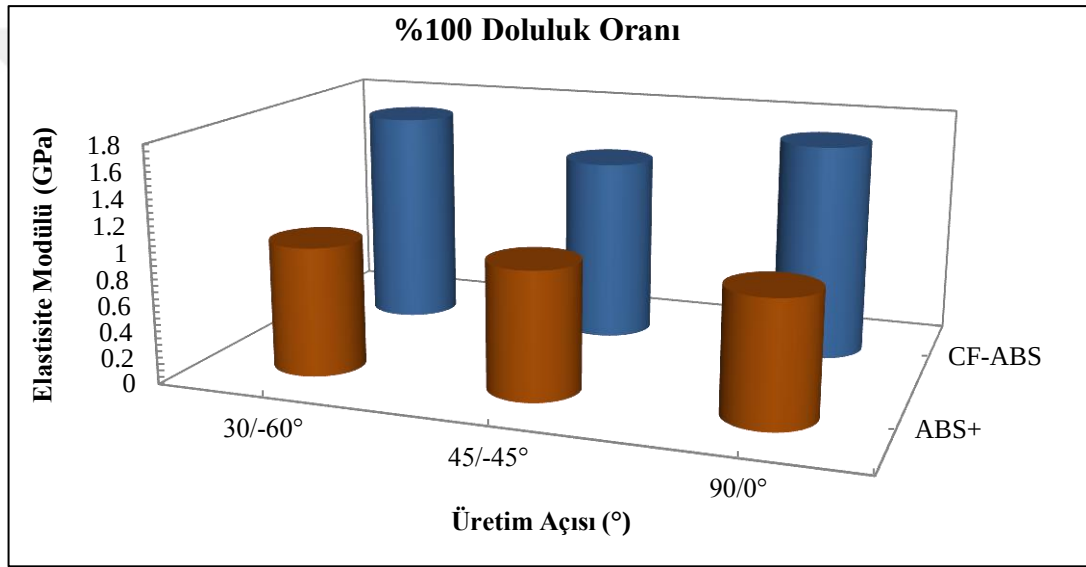
Şekil 4.10. %100 doluluk oranında 45/-45° üretim açısında gerilme-şekil değiştirme diyagramı



Şekil 4.11. %100 doluluk oranında 90/-0° üretim açısında gerilme-şekil değiştirme diyagramı

%100 doluluk oranında üretilen numunelerin gerilme şekil değiştirme diyagramları incelendiğinde, tüm üretim açılarında mekanik özelliklerde artış meydana geldiği tespit edilmiştir. %100 doluluk oranında yani tam dolu numunelerde yığılan malzeme miktarı arttıkça katmanlar arası yapışma ve bağlanmanın arttığı, gelen yükleri taşıma kabiliyetinin iyileştiği görülmektedir. %20 doluluk oranından %100 doluluk oranına geçildiğinde tüm numunelerdeki çekme mukavemeti değerleri, ortalama %70 oranında artış göstermiştir. %100 doluluk oranında en iyi dayanım değerleri her iki malzeme içinde 30/-60° üretim açısında elde edilmiştir. ABS malzeme için en yüksek çekme dayanımı 37.67 MPa iken karbon takviyeli kompozit malzemede bu değer %12 oranında düşüş ile 32.82 MPa olarak bulunmuştur. Tüm üretim açılarında abs malzemede elde edilen çekme dayanımları, karbon katkılı kompozit numunelere kıyasla daha yüksek olmuştur. Karbon katkısının, termoplastik malzemenin çekme mukavemetinde belirgin bir artış meydana getirmemesi, matris malzemesi ile takviye elemanı arasındaki yük iletiminin zayıf olduğuna işaret etmekte dolayısıyla yükün çoğunlukla matris malzemesi tarafından karşılandığını göstermektedir. Buna sebep olarak literatürde benzer sonuçlarda belirtilen, içerikte bulunan karbon fiber uzunluklarının düşük olması ve karbon fiber takviyesi ile matris içerisinde oluşan gözenekli yapıdan dolayı matris fiber arayüzündeki düşük yapışma gösterilebilir (Ning vd., 2015; Blok vd., 2018). Yapılan çalışmalarda, fiber uzunluğunun artması ile artan yüzey alanının, matris malzemesi ile fiber arasındaki tutunmayı iyileştirdiği

ve mukavemeti arttırdığı gözlenirken, fiber miktarındaki artışla artan matris fiber arayüzündeki porozitenin mukavemeti düşürdüğü belirtilmektedir (Tekinalp vd., 2014; Ning vd., 2015). %100 doluluk oranında elde edilen elastisite modülü değerleri incelendiğinde karbon fiber takviyeli kompozitlerin farklı üretim açılarında, abs malzemeye kıyasla elastisite modüllerinde yaklaşık %70 oranda artış görülmüştür. %100 doluluk oranında en yüksek elastisite modülü 30/-60° üretim açısında abs malzemede 0.99 GPa iken karbon takviyeli abs malzemede 1.67 GPa olarak bulunmuştur. Dolayısıyla karbon fiber takviyesinin malzeme rijitliğini önemli oranda etkilediği görülmektedir. %100 doluluk oranında elde edilen elastisite modülü değerleri Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. %100 doluluk oranı ve farklı üretim açılarında elastisite modülleri

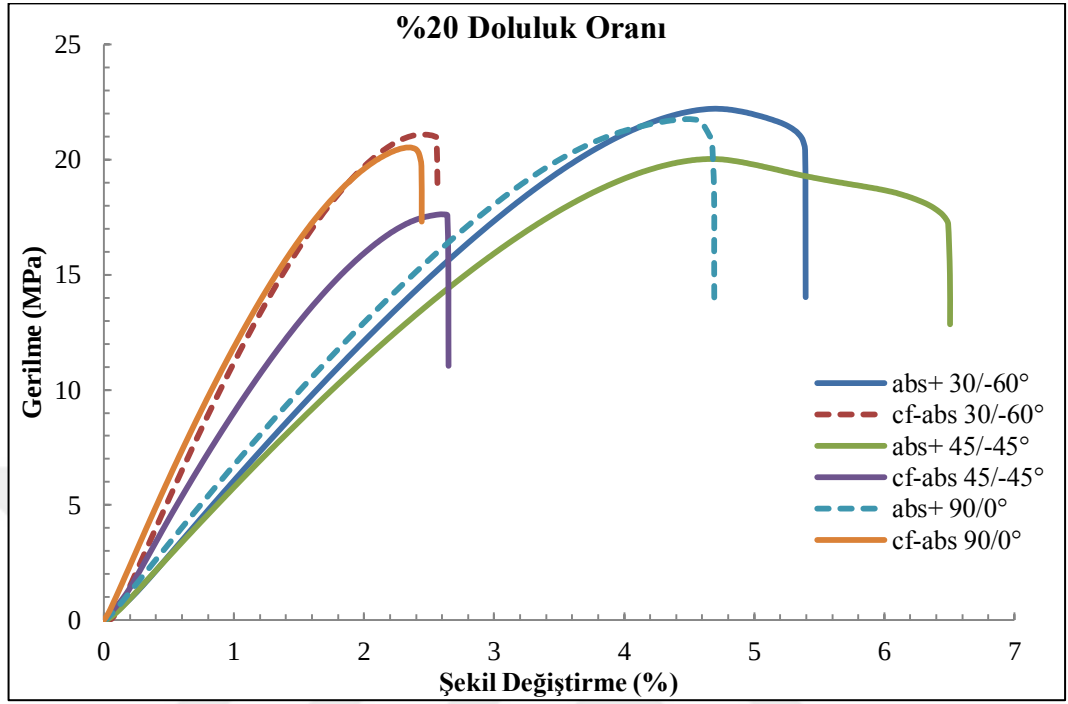
%100 doluluk oranında elde edilen şekil değiştirme oranları incelendiğinde, en fazla yüzde uzama 45/-45° üretim açısında %6 ile abs malzemede görülürken, karbon fiber takviyesi ile şekil değiştirme oranının, diğer doluluk oranlarına benzer şekilde yarı yarıya düşüş gösterdiği görülmektedir. Dolayısıyla karbon fiber takviyesi tüm doluluk oranlarında ve üretim açılarında malzemeye gevrek özellik kazandırmıştır. Karbon fiber takviyeli numunelerde elde edilen en fazla yüzde uzama 45/-45° üretim açısında %3.6 olarak ölçülmüştür. %100 doluluk oranında elde edilen mekanik özellikler Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. %100 doluluk oranında elde edilen mekanik değerler

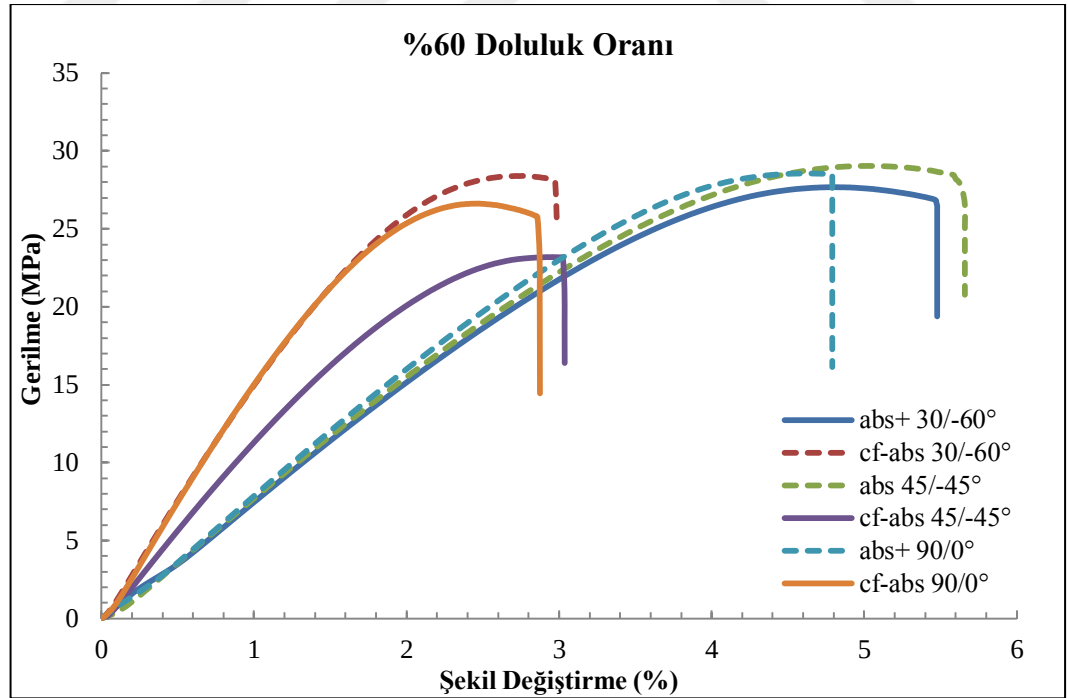
Malzeme	Doluluk Oranı	Üretim Açısı	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Birim Şekil Değiştirme (mm/mm)
ABS+	%100	30°/-60°	37.67±0.10	0.99±0.02	0.0578
CF-ABS	%100	30°/-60°	32.82±0.14	1.67±0.02	0.0308
ABS+	%100	45°/-45°	37.57±0.57	0.98±0.06	0.0602
CF-ABS	%100	45°/-45°	32.78±0.84	1.41±0.04	0.0363
ABS+	%100	90°/0°	36.28±0.32	0.95±0.05	0.0487
CF-ABS	%100	90°/0°	31.76±1.26	1.66±0.11	0.0294

İlk deney grubunda elde edilen sonuçlar incelendiğinde, doluluk oranının ve üretim açılarının mekanik özelliklere etki ettiği tespit edilmiştir. Doluluk oranı arttıkça, yığılan malzeme miktarı artmaktadır. Bu durum dolgu deseni arasındaki elyaf sıklığını artırmakta dolayısıyla parça iç bölgesindeki boşluk oranı azalmaktadır. Boşluk oluşumunun azalması ile katmanlar arasındaki bağlanma artmış ve mekanik özellikler iyileşmiştir. %20 doluluk oranında en yüksek çekme dayanımı, 30°/-60° üretim açısında abs malzeme için 22 MPa, karbon takviyeli abs numuneler için 21 MPa iken doluluk oranı %100'e çıktığında 30°/-60° üretim açısında abs için 37 MPa ve karbon takviyeli abs numuneler için 32 MPa değerlerine ulaşmıştır. Karbon takviyesi ile matris malzemesinin çekme dayanımında %12 oranında düşüş elde edilmiştir. Doluluk oranının artması ile elastisite modülünde artış meydana gelirken, karbon takviyeli abs numunelerde meydana gelen artışın abs malzemeye kıyasla daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Karbon takviyesinin en önemli etkisinin malzeme rijitliği üzerinde olduğu görülmüştür. %20 doluluk oranında en yüksek elastisite modülü değerleri 90°/0° üretim açısında abs malzeme için 0.64 GPa ve karbon takviyeli abs malzeme için 1.21 GPa iken %100 doluluk oranında en yüksek elastisite modülü değerleri 30°/-60° üretim açısında abs malzeme için 0.99 GPa ve karbon takviyeli abs malzeme için 1.67 GPa olarak bulunmuştur. Şekil değiştirme oranları incelendiğinde, karbon takviyesinin matris malzemesine gevrek özellik kazandırdığı ve yüzde uzama oranlarını %50 oranında düşürdüğü görülmüştür. En yüksek yüzde uzama %20 doluluk oranında 45°/-45° üretim açısında abs malzeme için %6.42 ve karbon takviyeli abs malzeme için %2.65 iken %100 doluluk oranında 45°/-45° üretim açısında abs malzeme için %6.02 ve karbon takviyeli abs malzeme için %3.63 olarak bulunmuştur. Üç farklı üretim açısı ve doluluk oranlarına göre

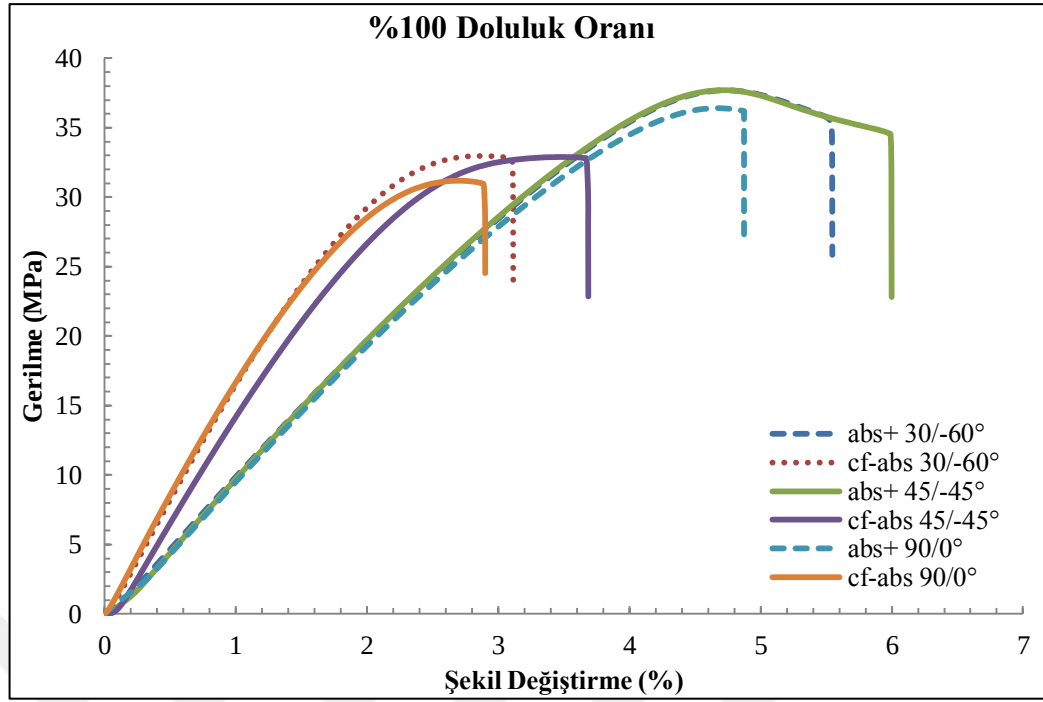
oluşturulan karşılaştırmalı grafikler Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de verilmiştir.



Şekil 4.13. %20 doluluk oranında farklı üretim açılarının karşılaştırılması



Şekil 4.14. %60 doluluk oranında farklı üretim açılarının karşılaştırılması



Şekil 4.15. %100 doluluk oranında farklı üretim açılarının karşılaştırılması

4.2. Taguchi Deney Tasarımı

İlk deney gruplarında %100 doluluk oranı ve 30/-60° üretim açısında üretilen numunelerin en iyi mekanik sonuçları vermesi sonucu, bu doluluk oranı ve üretim açısı parametreleri ikinci deney grubunda sabit parametreler olarak kabul edilmiştir. İkinci deney grubunda, üretim hızı (20, 40, 60 mm/s), nozul sıcaklığı (235, 255, 265°C) ve tabla sıcaklığı parametreleri (70, 95, 110°C) değişken parametreler olarak belirlenmiş ve Taguchi deney tasarımına göre üretilen numunelerin test sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Üretilen numunelerin Taguchi deney tasarımı sonuçları

Deney No.	Hız (mm /s)	Nozul Sıcaklığı (°C)	Tabla Sıcaklığı (°C)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Şekil Değiştirme (mm/mm)
1	20	235	70	33.76±0.82	1.75±0.16	0.0274
2	20	255	95	34.35±0.64	1.81±0.03	0.0283
3	20	265	110	34.99±0.39	1.67±0.04	0.0287
4	40	235	95	29.23±0.68	1.48±0.09	0.0309
5	40	255	110	34.73±0.41	1.79±0.08	0.0307
6	40	265	70	33.10±0.92	1.75±0.04	0.0296

Çizelge 4.4. Taguchi deney tasarımı sonuçları (devam)

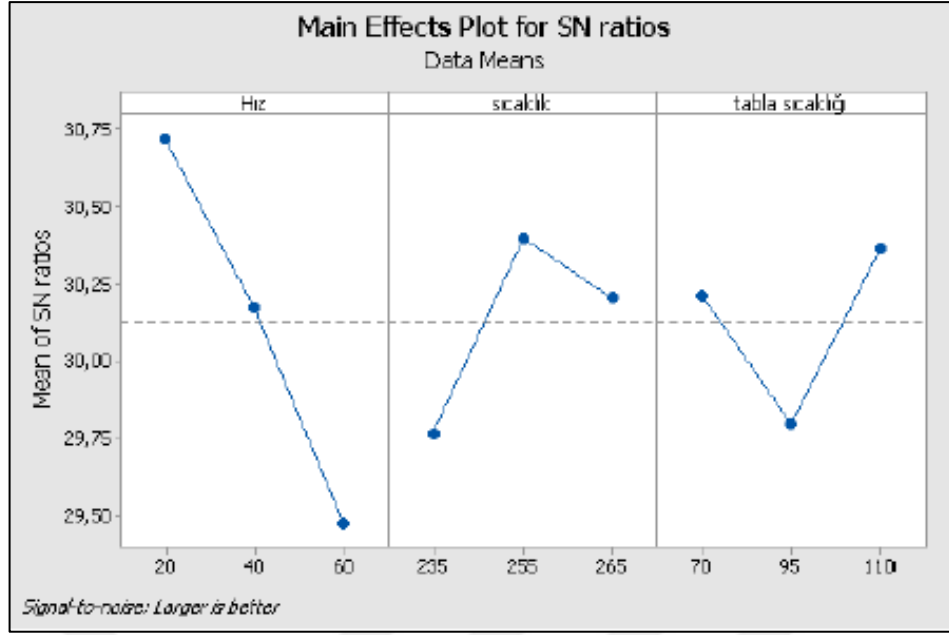
7	60	235	110	29.53±0.63	1.38±0.08	0.0336
8	60	255	70	30.43±0.69	1.58±0.05	0.0334
9	60	265	95	29.34±0.55	1.49±0.07	0.034

Taguchi deney tasarımı yönteminden elde edilen deney sonuçları, Sinyal/Gürültü (S/G) oranına çevrilerek değerlendirilmektedir. S/G oranı değeri, küçük değer iyi, büyük değer iyi veya nominal değer iyi olarak kalite değerlerinin hedeflendiği değere göre farklı şekillerde hesaplanmakta ve analiz edilmektedir (Toprak, 2013). Deney sonuçlarında her bir kontrol faktörünün (üretim hızı, nozul sıcaklığı, tabla sıcaklığı) çekme mukavemeti üzerindeki etkisinin analizi bir S/G yanıt tablosu ile gerçekleştirilmiştir. Çekme mukavemeti için, S/G yanıt tablosu Çizelge 4.5'te verilmiştir. Taguchi metodu kullanılarak oluşturulan bu tablo, en yüksek çekme mukavemeti elde etmek için optimal kontrol seviyelerini göstermektedir. Çizelgede koyu yazı tipinde yazılmış olan parametreler, çekme mukavemeti için kontrol faktörlerinin ideal seviyelerini göstermektedir.

Çizelge 4.5. Çekme mukavemeti için S/G yanıt tablosu

Seviye	Hız	Nozul Sıcaklığı	Tabla Sıcaklığı
1	30,72 / (20 mm/s)	29,76	30,21
2	30,18	30,40 / (255°C)	29,79
3	29,47	30,21	30,37 / (110°C)
Sonuç	1	2	3

Çizelge 4.5'te verilen çekme mukavemeti için kontrol faktörlerinin seviye değerleri, Şekil 4.16'da grafik formunda gösterilmiştir. Çekme mukavemetini en yüksek değere çıkarmak için gerekli kontrol faktörlerinin işlem parametreleri bu grafik kullanılarak kolayca belirlenebilmektedir.



Şekil 4.16. Çekme mukavemeti için S/G oranları

Çalışmada çekme mukavemetinin en yüksek olması istenildiği için, en büyük en iyi yaklaşımına göre hesaplanan S/G oranı dikkate alınmıştır. Her faktör için hesaplanan S/G oranının en yüksek olduğu değer, teorik olarak en iyi deney sonucunu göstermektedir. Deney parametrelerinin S/G yanıt oranlarının maksimum olduğu koşullarda yani üretim hızı için ilk seviye 20 mm/s, nozul sıcaklığı için ikinci seviye 255°C ve tabla sıcaklığı için üçüncü seviye 110°C deney şartlarında çekme mukavemeti en iyi sonucu vermesi gerekmektedir. Çizelge 4.6'da deneyler sonucu elde edilen çekme mukavemetine ait ANOVA bulguları verilmiştir.

Çizelge 4.6. Çekme mukavemeti için ANOVA bulguları

	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
Üretim Hızı	2	31,904	15,9522	17,66	0,054	64,71
Nozul Sıcaklığı	2	8,588	4,2941	4,75	0,174	17,42
Tabla Sıcaklığı	2	7,001	3,5004	3,87	0,205	14,20
Hata	2	1,807	0,9035			3,67
Toplam	8	49,301				100

Anova sonuçlarından çekme mukavemetini etkileyen en önemli parametrenin üretim hızı olduğu görülmektedir. Korelasyon katsayısı, -1 ile +1 arasındaki bir değer almaktadır. Değişkenler arasındaki ilişkinin düzeyini, rakamların mutlak büyüklüğü, yönünü ise rakamların pozitif ya da negatif olması yani işareti belirlemektedir. Korelasyon katsayısının pozitif olması değişkene ilişkin verilerin artması durumunda diğerinin de artması veya bir değişkene ilişkin verilerin azalması durumunda diğerinin de azalması anlamındadır ve değişkenler arasındaki doğru yönlü bir ilişki vardır şeklinde yorumlanmaktadır. Korelasyon katsayısının negatif olması bir değişkene ilişkin verilerin azalması durumunda diğerinin artması anlamına gelmekte ve değişkenler arasında ters yönlü bir ilişki ortaya çıkmaktadır.

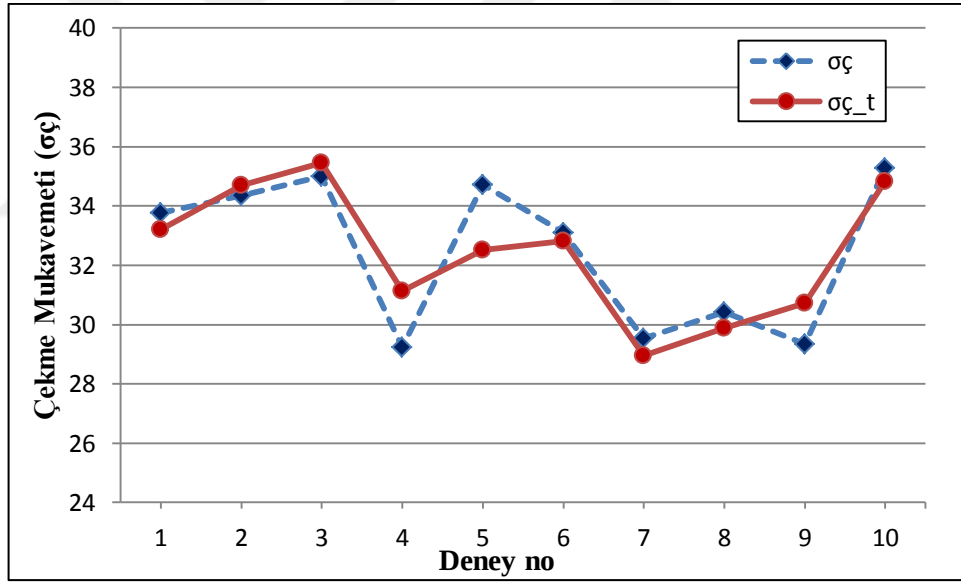
Değişkenler arasındaki ilişki düzeyi, korelasyon katsayısının 0-0.25 arasında olması durumunda çok zayıf, 0.26-0.49 arasında olması durumunda zayıf, 0.50-0.69 arasında olması durumunda orta, 0.70-0.89 arasında olması durumunda kuvvetli ve 0.90-1 arasında olması durumunda çok kuvvetli şeklinde yorumlanabilmektedir (Toprak, 2013). Minitab ile yapılan korelasyon analizi sonucu korelasyon katsayısı -0.802 ($p=0.009$) olarak bulunmuştur. Bu durum üretim hızı ile çekme mukavemeti arasında ters yönlü ve kuvvetli bir ilişki olduğunu yani üretim hızı arttıkça çekme mukavemetinin azaldığını göstermektedir. Çekme mukavemeti (σ_c) için üretim parametrelerine bağlı oluşturulan lineer regresyon modeli Denklem 4.1’de verilmiştir.

$$\sigma_c = 20.0 - 0.1150 (v) + 0.0634 (T_n) + 0.0087(T_t) \quad (4.1)$$

Burada, v üretim hızını, T_n nozul sıcaklığı ve T_t tabla sıcaklığını ifade etmektedir. Modelde çekme dayanımındaki değişimin %76.17’si bağımsız değişkenler tarafından açıklanabilmektedir. Oluşturulan regrasyon modeliyle tahmin edilen σ_c değerleri Çizelge 4.7’de verilmiştir. Şekil 4.17’de tahmin edilen değerler ile deneyler sonucu elde edilen değerlerin karşılaştırılması gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. Regresyon modeli ile tahmin edilen σ_c değerleri

Deney No.	v (mm/s)	T _n (°C)	T _t (°C)	σ_c (MPa)	σ_{c_tahmin} (MPa)
1	20	235	70	33,76	33,208
2	20	255	95	34,35	34,694
3	20	265	110	34,99	35,458
4	40	235	95	29,23	31,126
5	40	255	110	34,73	32,524
6	40	265	70	33,10	32,810
7	60	235	110	29,53	28,956
8	60	255	70	30,43	29,876
9	60	265	95	29,34	30,727
10	20	255	110	35,29	34,824



Şekil 4.17. σ_c için deney sonuçları ve tahmin değerlerinin karşılaştırılması

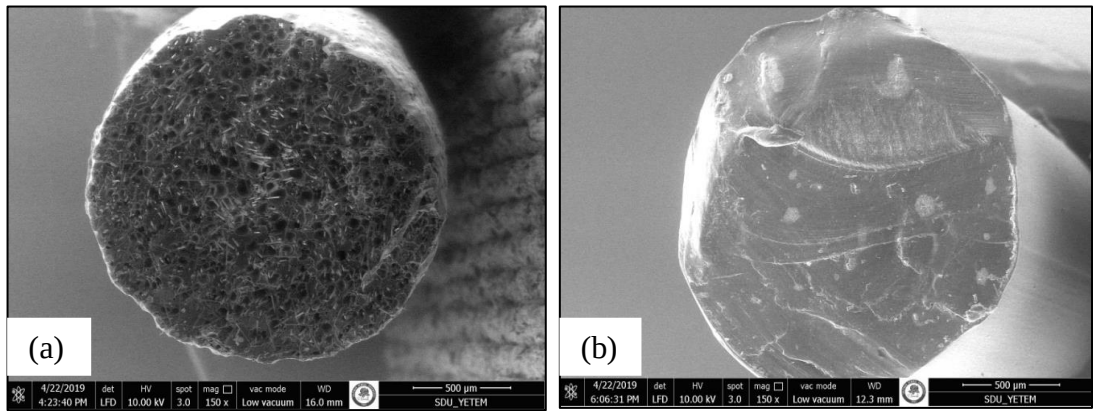
Oluşturulan regresyon modeli ile tahmin edilen σ_c değerleri arasındaki korelasyon 0.873 olarak hesaplanmıştır. Teorik olarak elde edilen ideal üretim parametrelerini doğrulamak için bir adet doğrulama deneyi yapılmıştır. Yapılan doğrulama deney sonucu elde edilen çekme mukavemeti değeri 35.29 MPa, elastisite modülü 1.82 GPa ve kopma uzaması 0.027 mm olarak bulunmuştur. Maksimum çekme mukavemeti değeri Taguchi tahmini ile 36.30 MPa (%2.86 hata) ve lineer regresyon ile 34.82 MPa (%1.3 hata) olarak hesaplanmıştır. Maksimum çekme mukavemetini elde etmek

için ideal deney şartlarında teorik olarak hesaplanan dayanım değeri (35.29 MPa), doğrulama testi sonucu elde edilen dayanım değerine (36.30 MPa) oldukça yakın olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalarda, kabul edilebilir analiz oranlarının %20 hata oranının altında olması gerektiği belirtilmektedir (Çetin vd., 2011). Bu nedenle elde edilen değerlerdeki hata oranlarına bakılarak doğrulama testinden elde edilen sonuçların başarılı olduğu söylenebilmektedir.

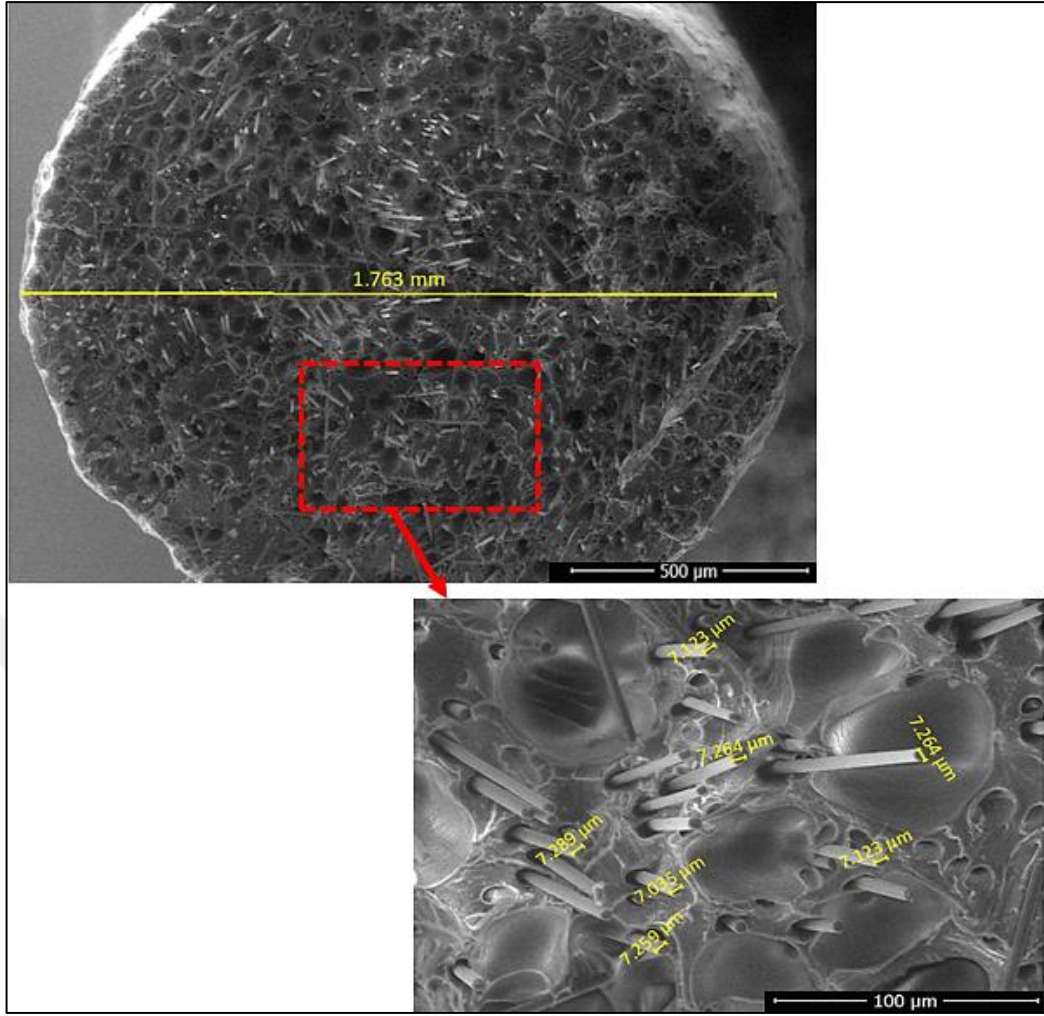
4.3. Kırık Yüzeylerde SEM Bulguları

Eriyik biriktirme yönteminde farklı üretim parametreleri kullanılarak üretilen test numunelerinin kırık yüzeylerinden kesitler alınarak, doluluk oranı, üretim açısı, nozul sıcaklığı ve üretim hızı parametrelerinin içyapıda meydana getirdiği değişimler taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ile incelenmiştir.

Üretimde kullanılan iki farklı filament malzemesinin kesitleri incelendiğinde, termoplastik filament iç yapısında boşluk oluşumu gözlenmezken karbon katkılı filamentlerin iç yapısında önemli oranda boşluk oluşumu gözlenmiştir. Her iki filament dış yüzeyi incelendiğinde abs filamenti pürüzsüz bir yüzeye sahipken karbon katkılı filament dış yüzeyinin pürüzlü bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. ABS malzeme filament ortalama çapı 1.701 mm olarak ölçülürken, karbon katkılı filamentin ortalama çapı 1.763 mm olarak ölçülmüştür. Karbon katkılı filamentlerde bulunan karbon fiber çapı ortalama 7.19 μm civarında olduğu görülmüştür. Her iki filamentte ait SEM görüntüleri Şekil 4.18 'de verilmiştir. Karbon fiber takviyeli filament içindeki karbon fiber çap dağılımı Şekil 4.19'da verilmiştir.

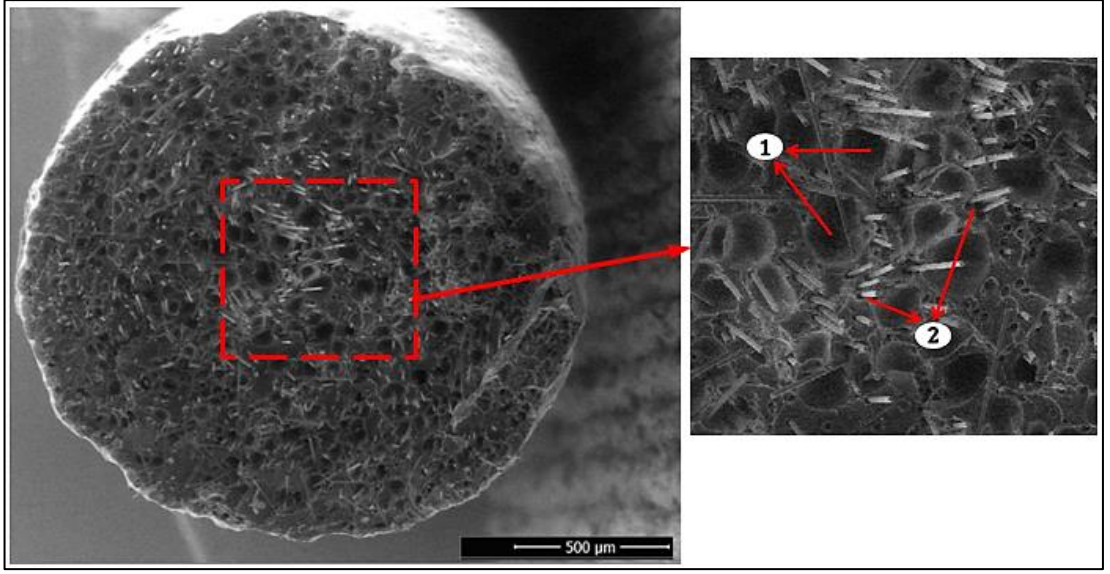


Şekil 4.18. Karbon fiber takviyeli filament iç yapısı (a), Takviyesiz termoplastik filament iç yapısı (b)



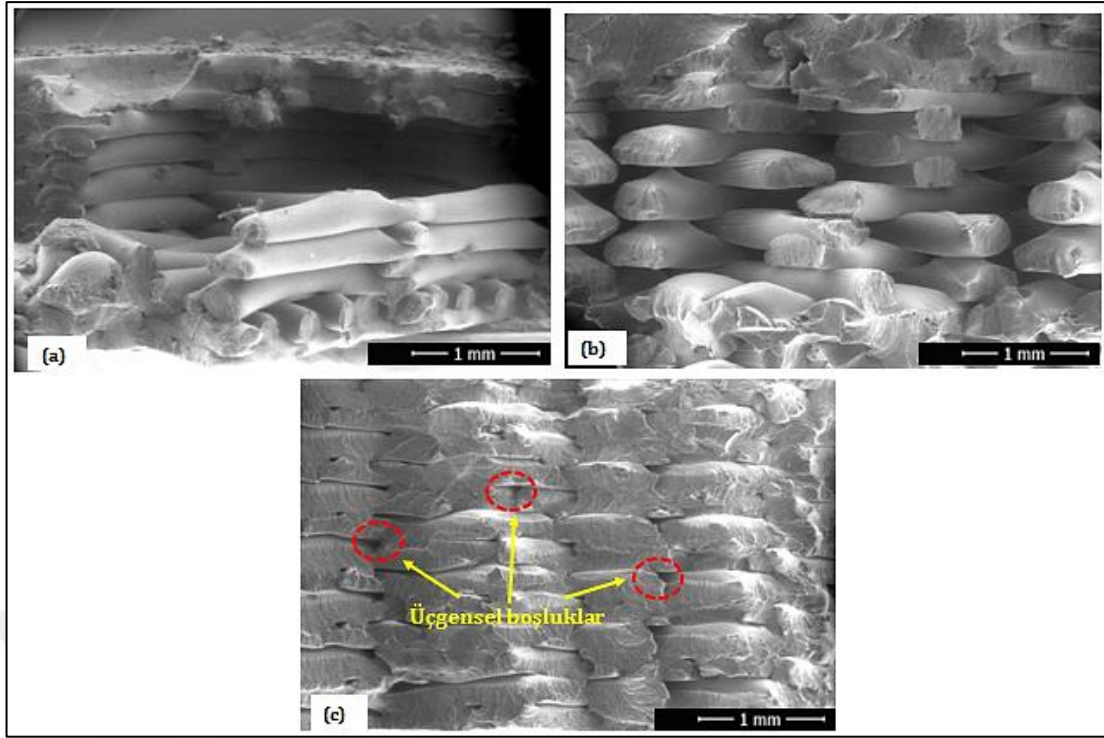
Şekil 4.19. Karbon fiber takviyeli filament çapı ve karbon fiber çap dağılımı

Şekil 4.20’de verilen karbon fiber takviyeli filament içyapısı incelendiğinde, iki farklı tipte boşluk oluşumu görülmektedir. Karbon fiber katkılı filament iç yapısında oluşan (1) numaralı boşluk tipi, filament üretiminde kullanılan ekstrüzyon yöntemi esnasında farklı sıcaklık geçişleri ve soğutma adımları sonucu oluşan gaz sıkışmasından kaynaklanırken, (2) numaralı boşluk tipi karbon fiber ile matris malzemesi arasındaki faz ayrımından dolayı zayıf bağlanma sonucu oluşmaktadır. Bu boşluk tipi, çekme işlemi sonucu oluşan kopma yüzeyinde bulunan karbon fiber takviyesinin matris malzemesinden ayrılması ile daha belirgin olmaktadır. Ning vd. (2015) ve Lopes vd. (2018), karbon takviyeli filament iç yüzeylerini inceleyerek aynı tipte boşluk oluşumları gözlemlendiğini belirtmiştir.



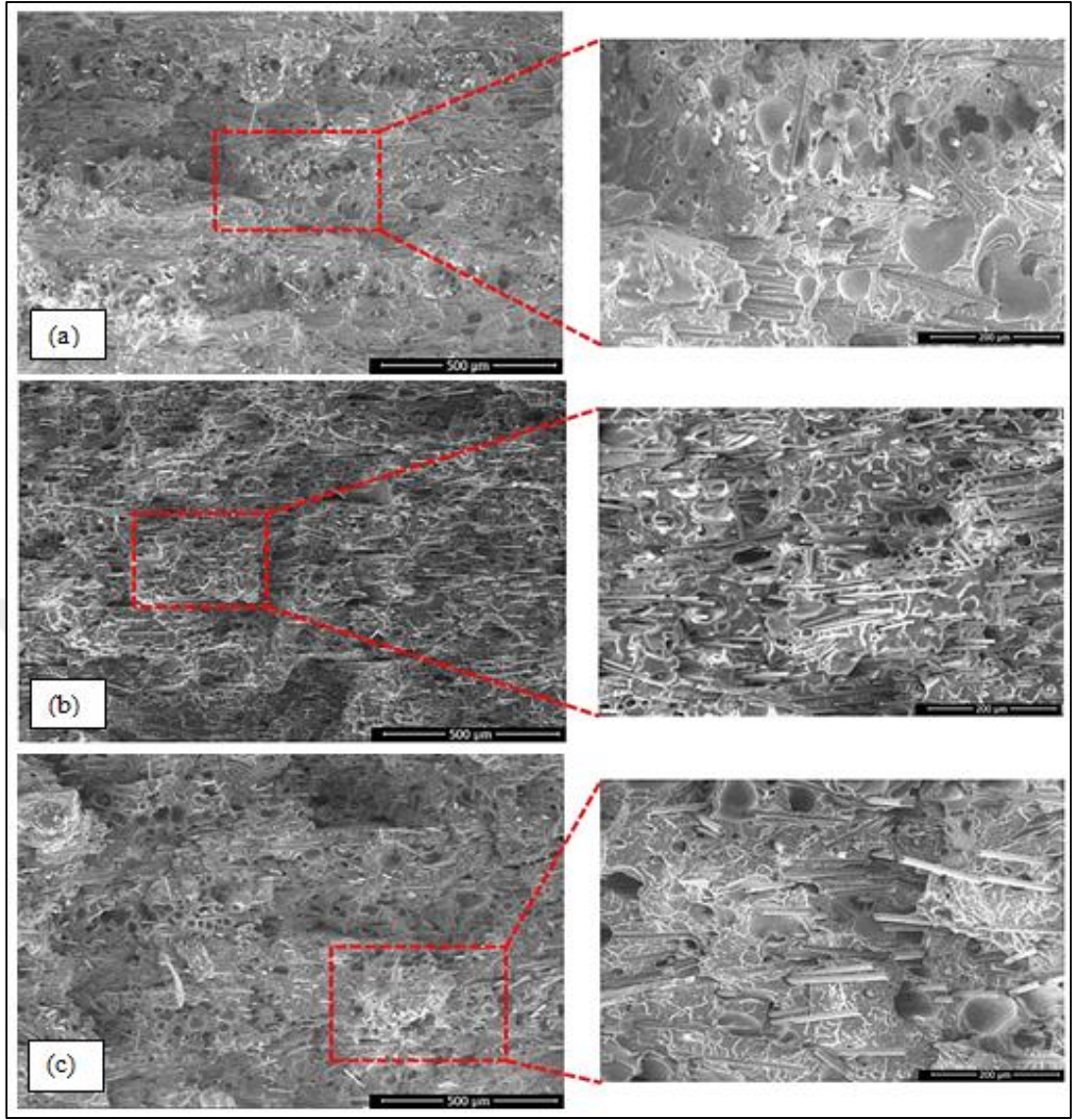
Şekil 4.20. Karbon fiber takviyeli filament iç yapısında gözeneklilik oluşumu

Farklı doluluk oranlarında (%20, %60, %100) üretilen test numunelerinin doluluk oranlarının katman yapısına etkisi Şekil 4.21’de verilmiştir. Şekil 4.21 (a)’da bulunan %20 doluluk oranında üretilen numunelerin kırık yüzeyleri incelendiğinde, doluluk oranına bağlı parça iç bölgesindeki boşluk oranının fazla olduğu görülmekte iken doluluk oranı arttıkça boşluk oluşumu azalmıştır. Boşluk oluşumunun azalması ile katmanlar arası bağlanmanın iyileştiği görülmüştür. Dolayısıyla katman yapışmasındaki artış ile tüm numunelerde çekme dayanımı artmıştır. Şekil 4.21 (c)’de bulunan %100 doluluk oranı incelendiğinde katmanlar arasında bulunan üçgensel boşluklar görülmektedir. Eriyik biriktirme yönteminde kullanılan nozul uçların dairesel kesite sahip olması yığılan malzemeninde dairesel kesitli olarak nozul uçtan çıkmasına sebep olmaktadır. Katman oluşumu esnasında yarı eriyik haldeki filament, nozul ucun uyguladığı basınç ile eliptik form almakta ve yığılırken önceki katman ile birleşen alt bölgelerde yassılaşma oluşmaktadır. Malzeme alt bölgesi bir önceki katmana doğrusal şekilde yığılıp katılırken, üst bölgedeki katılma eliptik şekilde oluşmaktadır. Eriyik biriktirme yönteminde üretim süreci periyodik olarak katmanların birbiri üzerine yığılması esasına dayandığı için her katman birleşiminde, malzeme alt bölgesinin düzgün şekilli olması ve üst bölgenin eliptik şekilli olmasından kaynaklı aşağı yönlü üçgensel boşluklar oluşmaktadır.



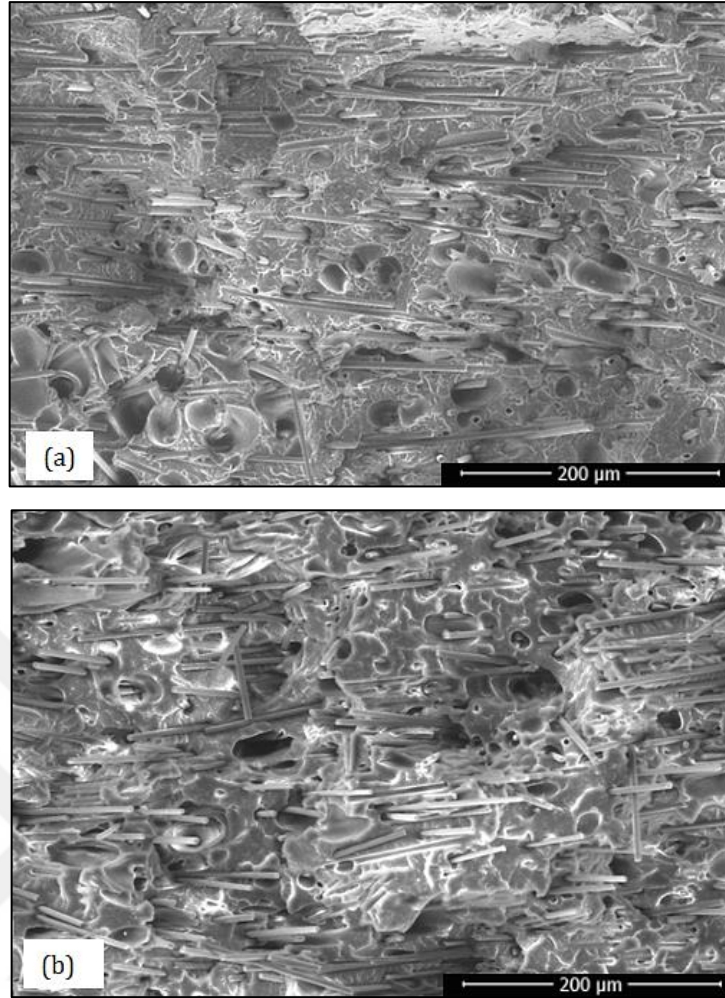
Şekil 4.21. %20 doluluk oranında katman yapısı (a), %60 doluluk oranında katman yapısı (b), %100 doluluk oranında katman yapısı (c)

Farklı üretim açılarında ($30/-60^\circ$, $45/-45^\circ$, $90/0^\circ$) üretilen numunelerde katman oluşumları ve karbon fiber takviyesinin üretim açılarına göre yönelimi Şekil 4.22’de incelenmiştir. Tüm üretim açılarında karbon fiber takviyeli numunelerde filament üretimi esnasında gaz sıkışması kaynaklı boşlukların önemli oranda olduğu görülürken abs numunelerde bu tür boşluklara rastlanmamıştır. Karbon fiber takviyeli abs numunelerde oluşan bu boşlukların katman içindeki malzeme yoğunluğunu azalttığı dolayısıyla mukavemeti olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir. Karbon katkılı numunelerin kırık yüzeyleri incelendiğinde, fiberlerin çoğunlukla üretim açılarına göre yönlendiği tespit edilmiştir. Ancak tüm üretim açılarında matris ile fiber yüzeyleri arasında boşluk oluşumunun meydana geldiği ve fiber ayrılmalarının olduğu görülmektedir. Bu durum matris fiber yapışma kabiliyetinin düşük olduğunu göstermektedir. Zayıf yapışma sonucu matris ile fiber arasında yük iletimi sağlanamamış dolayısıyla oluşan porozite yoğunluğunun da etkisiyle katkısız termoplastik malzemeye kıyasla fiber takviyeli termoplastik malzemenin çekme dayanımlarında düşüş gözlenmiştir.



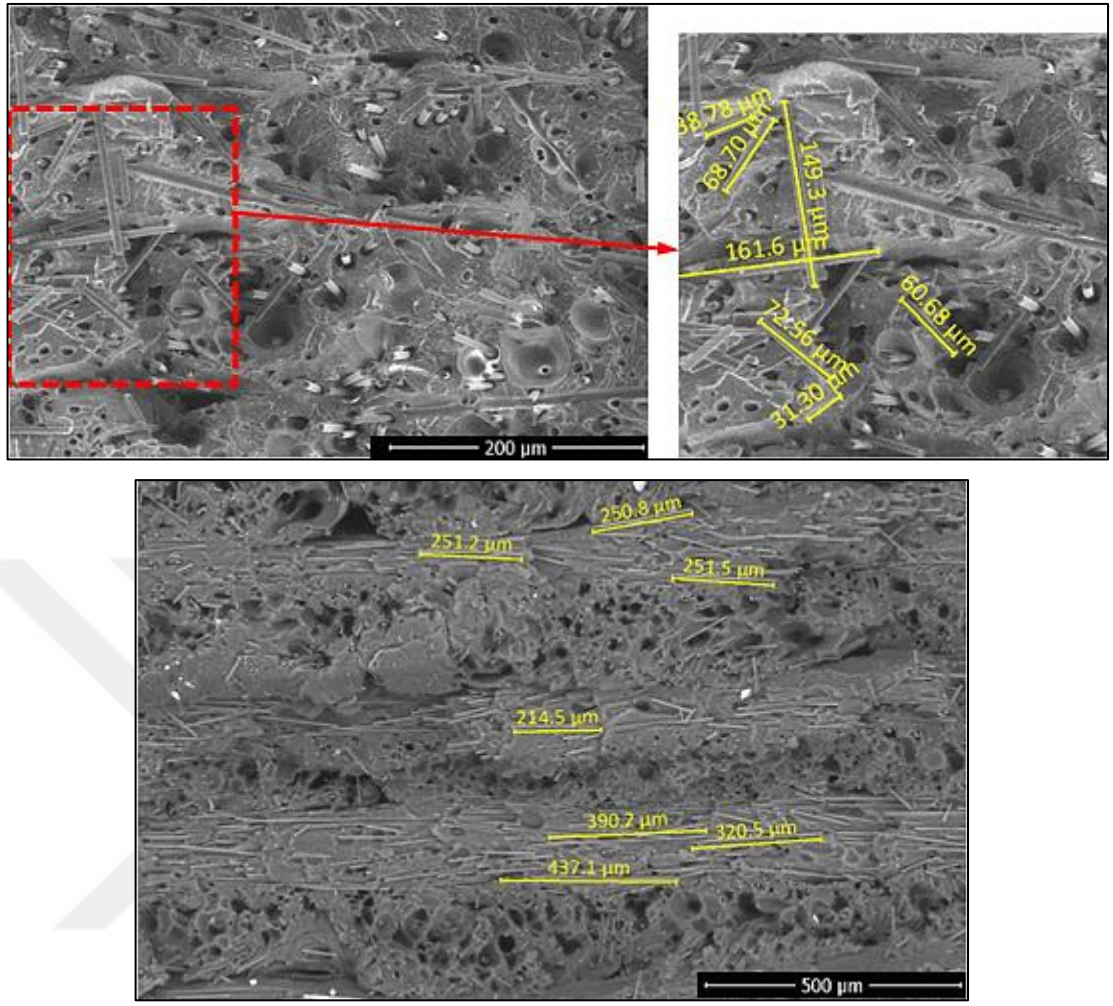
Şekil 4.22. %100 doluluk oranında 90/0° (a), 45/-45° (b) ve 30/-60° (c) üretim açılarında üretilen karbon fiber takviyeli numunelerde fiber yönlmesi

Şekil 4.23'te verilen karbon fiber takviyeli numunelerin kırık yüzeyleri incelendiğinde, % doluluk oranı arttıkça yığılan malzeme miktarı artmış ve birim alandaki karbon fiber miktarında da artış olduğu görülmüştür.



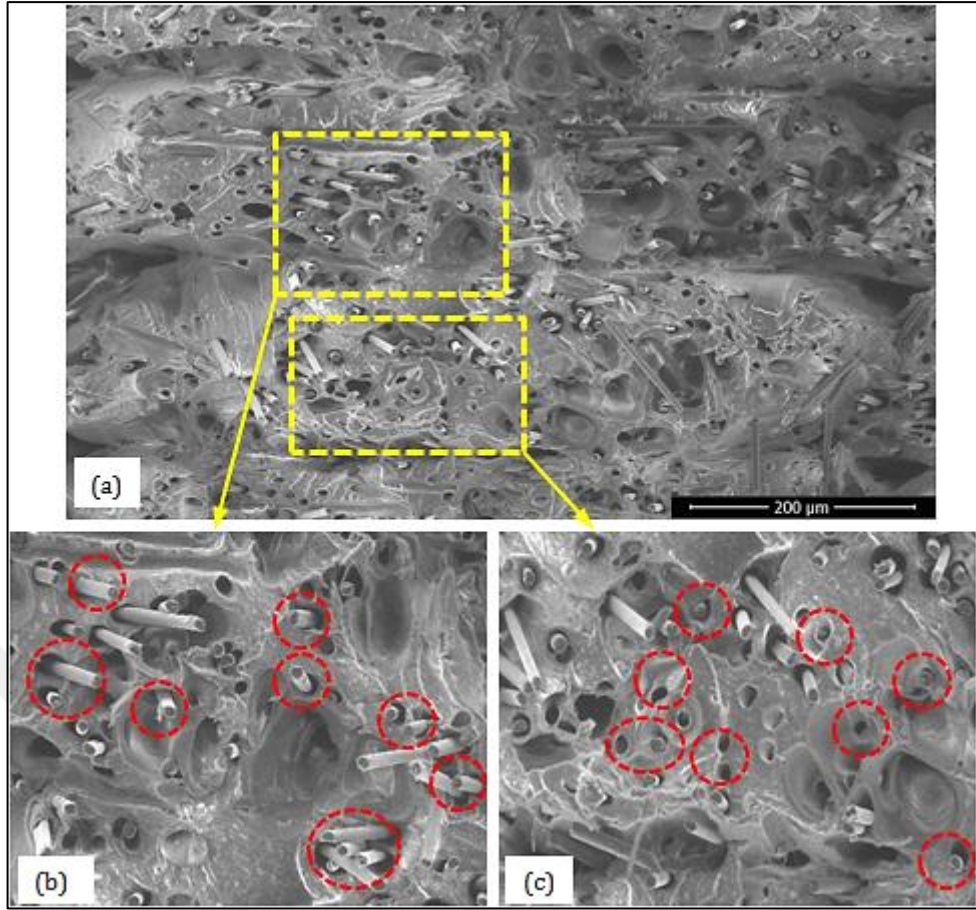
Şekil 4.23. %60 doluluk oranında karbon fiber dağılımı (a), %100 doluluk oranında karbon fiber dağılımı (b)

Şekil 4.24'te %100 doluluktaki numunelerin kırık yüzeylerinde bulunan karbon fiberler üzerinden uzunluk ölçümleri alınmıştır. Ölçümlerde, maksimum fiber uzunluğu 437.1 µm iken minimum fiber uzunluğu 31.3 µm olarak bulunmuştur. Dolayısıyla içyapılar incelendiğinde, içerikte bulunan karbon fiberlerin eşit uzunluklarda olmadığı tespit edilmiştir. Bu durum, filament üretimi sürecinde matris malzemesi içinde karbon fiber takviyesinin homojen dağılmasını sağlamak amacıyla yapılan karıştırma işlemi sırasında oluşmaktadır. Fu vd. (1999; 2000) çalışmalarında fiber uzunluklarında meydana gelen bu düzensizliğin, matris malzemesi içinde fiber takviyesinin homojen olarak dağıtılabilmesi amacıyla yapılan karıştırma işlemi sırasında, karıştırma ekipmanı ile fiber etkileşimi, fiberlerin birbiri ile etkileşimi ve fiber matris etkileşimi sonucu meydana geldiğini belirtmiştir. Ferreira vd. (2017), çalışmalarında fiber uzunluğunun azalması ile düşen yüzey alanı sonucu matris fiber yapışmasının zayıfladığı ve takviye verimliliğinin azaldığını belirtmiştir.

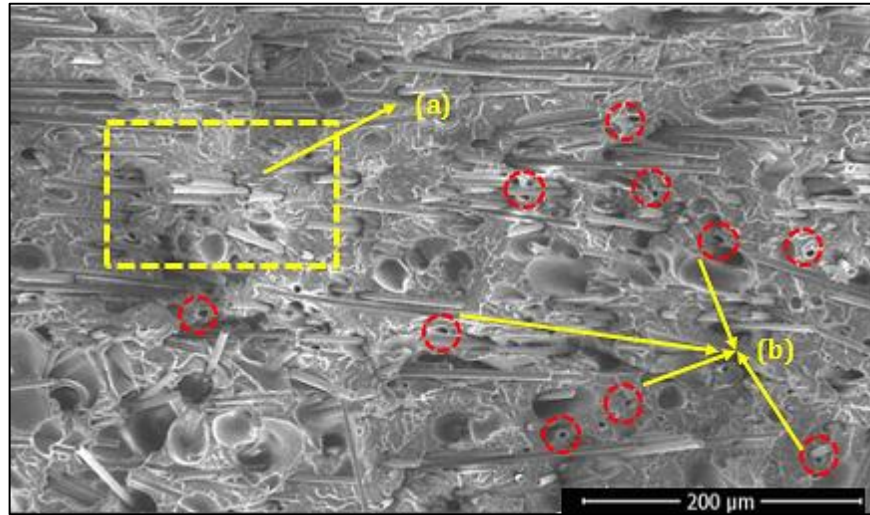


Şekil 4.24. Ortalama fiber uzunlukları

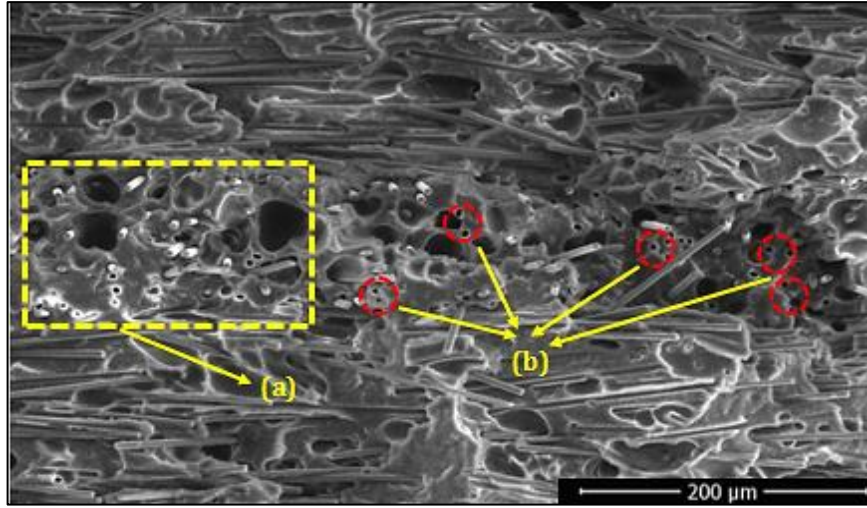
Kırık yüzeyi incelenen bazı numunelerde, belirli bölgelerde dairesel şekilli ve fiber çapına benzer boşluklar görülmektedir. Bu boşluklar numunenin yüke maruz kalması esnasında fiberin matris arayüzeyi içinde koptuğunu göstermektedir. Bu durum, o bölgelerde matris fiber bağlanmasının iyi olduğu ve fiberlerin yük taşınmasında matris malzemesine katkıda bulunduğunu belirtmektedir. Fiber kopmasıyla oluşan boşluk türü en sık 30/-60° üretim açısında üretilen numunelerde görülürken en az 90/0° üretim açısında üretilen numunelerde görülmüştür. Ancak genel yapıya bakıldığında fiber ayrılması kaynaklı oluşan boşluk türünün, fiber kopması sonucu oluşan boşluk türünden daha sık olduğu görülmüştür.



Şekil 4.25. 30/-60° üretim açısında görülen fiber ayrılması ve fiber kopması dağılımı (a), fiber ayrılması (b), fiber kopması (c)

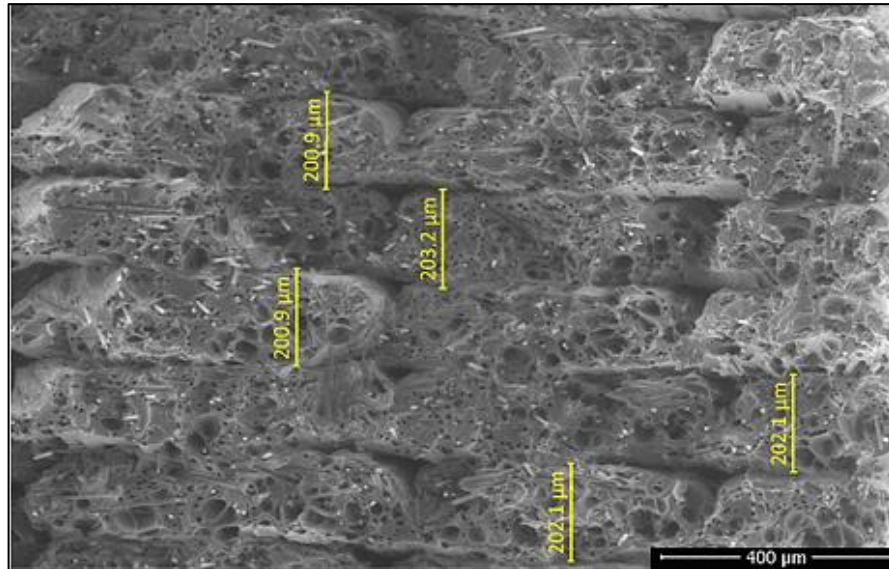


Şekil 4.26. 45/-45° üretim açısında görülen fiber ayrılması (a), fiber kopması (b)



Şekil 4.27. 90/0° üretim açısında görülen fiber ayrılması (a), fiber kopması (b)

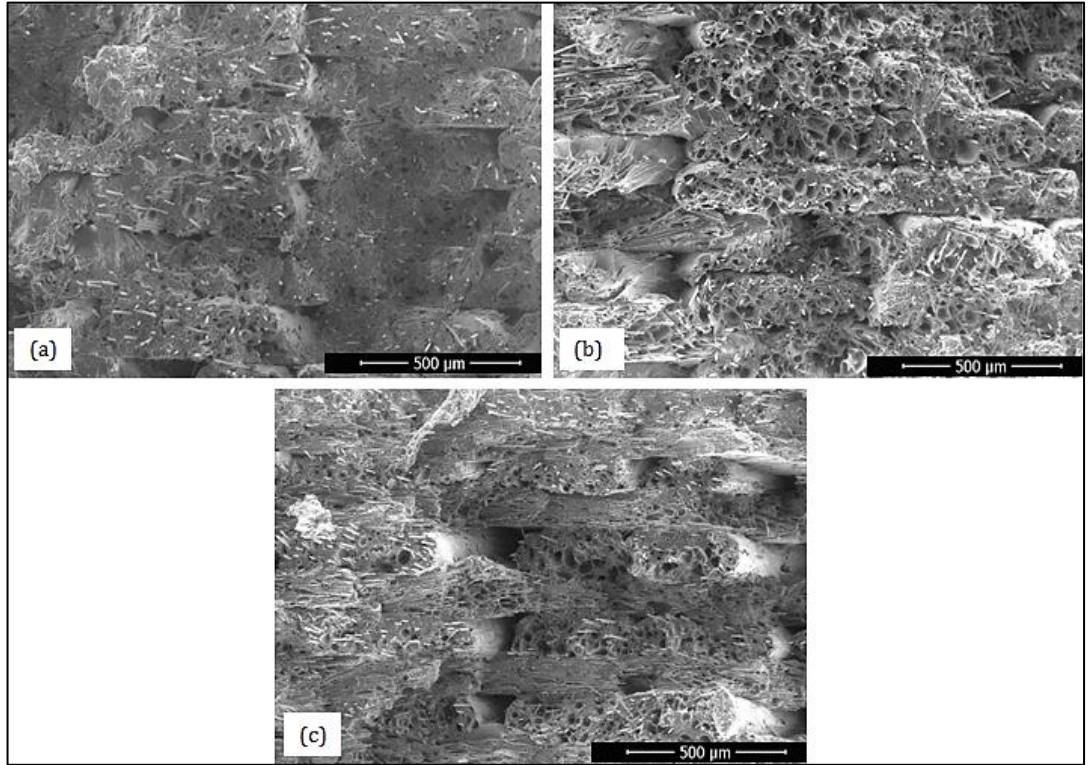
Şekil 4.28’de numunelerin kırık yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri ile elde edilen katman kalınlıkları incelenmiştir. Üretimde kullanılacak parametreler belirlenirken, katman kalınlıkları 0.2 mm olarak ayarlanmış ve üretimler bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Kırık yüzeyler incelendiğinde üretim öncesi belirlenen katman kalınlıklarının üretilen numunelerdeki katman kalınlıklarıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Kırık yüzey üzerinde beş farklı noktadan katman kalınlıklarının ölçümü alınmış ve ortalama katman kalınlığı değeri 0.2 mm olarak bulunmuştur.



Şekil 4.28. Üretilen numunelerde elde edilen katman kalınlıkları

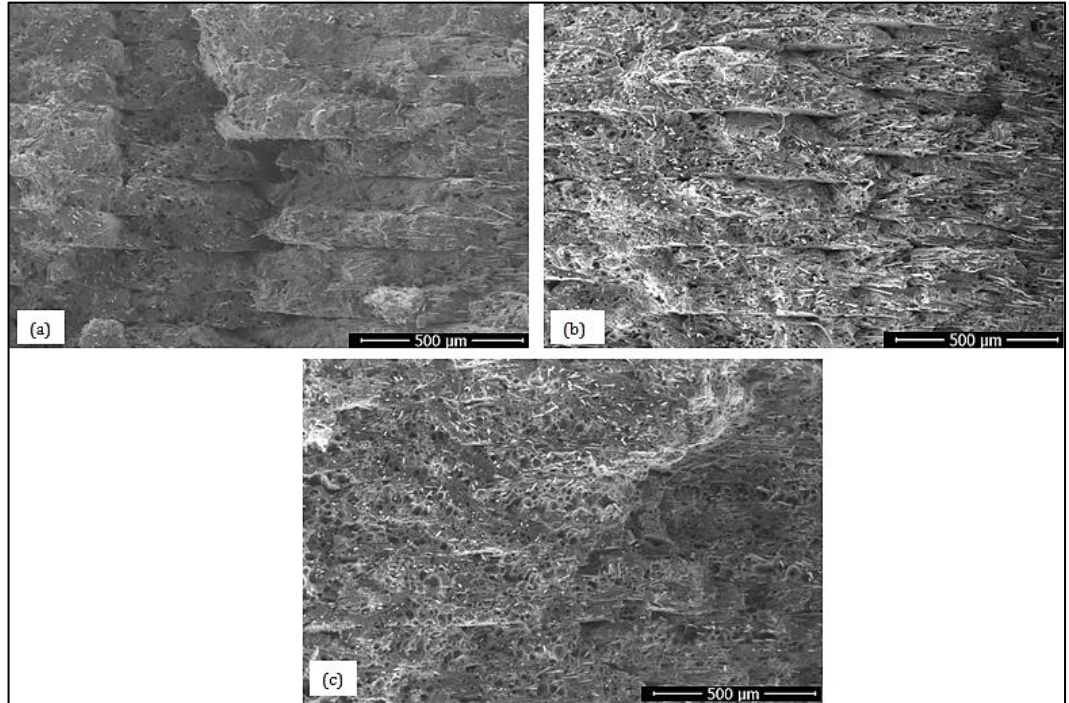
Farklı üretim hızlarında (20 mm/s, 40 mm/s, 60 mm/s) üretilen numunelerde, üretim hızlarının katman oluşumuna etkisi Şekil 4.29’da incelenmiştir. %100 doluluk

oranında 30/-60° üretim açısında ve 20 mm/s üretim hızında üretilen numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde, eriyik biriktirme yönteminde katman katılaşması esnasında oluşan üçgensel boşlukların azalarak, katman yüzeyleri arasındaki temas alanının arttığı tespit edilmiştir. Bu durum, üretim hızının düşmesiyle azalan nozul hareket hızının, yığılan malzeme üzerinde nozul tarafından uygulanan basıncı arttırması ve malzemenin ısıya daha uzun süre maruz kalması nedeniyle katmanlar arasında artan difüzyon sonucu olduğu düşünülmektedir. Ayrıca 20 mm/s üretim hızında matris ile fiber takviyesi arasındaki bağlanmanın arttığı ve yük esnasında fiberlerin çoğunlukla matris yüzeyinde koparak yük iletimine katkıda bulunduğu gözlenmiştir. 40 mm/s ve 60 mm/s üretim hızlarında üretilen numunelerin kırık yüzeyleri incelendiğinde, katmanlar arasındaki boşluk oluşumunun giderek arttığı ve katman yapısının artan boşluk oluşumuna bağlı olarak bozulmaya başladığı görülmüştür. Üretim hızı arttıkça matris fiber arasındaki bağlanma zayıflamış ve fiber ayrılmalarında artış görülmüştür. Ning vd. (2015), Christiyan vd. (2016), çalışmalarında farklı üretim hızlarını incelemiş ve artan üretim hızlarında katmanları oluşturan elyaflar arasında zayıf yapışma sonucu mekanik özelliklerin düştüğünü belirtmiştir.



Şekil 4.29. 20 mm/s (a), 40 mm/s (b) ve 60 mm/s (c) üretim hızlarında katman yapıları

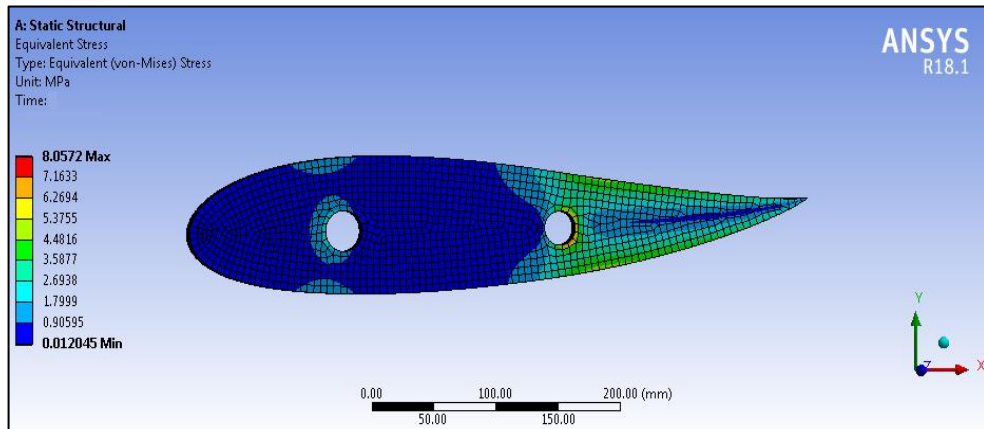
Üretimde kullanılan farklı nozul sıcaklıklarının (235°C , 255°C , 265°C) katman oluşumuna etkisi Şekil 4.30'da incelenmiştir. %100 doluluk oranı ve 235°C nozul sıcaklığında üretilen numunelerin kırık yüzeyi incelendiğinde katmanlar arasında etkileşim olduğu görülmekte iken üçgensel boşluk oluşumun gözlenmesi katmanlar arası bağlanmanın tam anlamıyla gerçekleşmediğini dolayısıyla boyun oluşumunu engelleyecek yeterli sıcaklığa ulaşılmadığı tespit edilmiştir. 255°C nozul sıcaklığında üretilen numunelerin kırık yüzeyleri incelendiğinde ise, katmanlar arasındaki üçgensel boşlukların boyutlarında küçülmeler olduğu tespit edilmiştir. Nozul sıcaklığının artması ile malzeme viskozitesi azalmış ve yığılan katman genişliği artarak katmanların birbiri ile etkileşimi artmıştır. Dolayısıyla katmanlar arasındaki bağlanmanın 235°C 'ye kıyasla çok daha iyi olduğu gözlenmiştir. 265°C nozul sıcaklığında üretilen numunelerin kırık yüzeyleri incelendiğinde, sıcaklık etkisiyle katman ayrımlarını belirtilen katman çizgilerinin ayırt edilemeyecek seviyeye ulaştığı ve en küçük boyutlarda üçgensel boşlukların olduğu bir içyapı gözlenmiştir. 265°C üretim sıcaklığında katmanlar arasındaki bağlanmanın en üst seviyeye ulaştığı görülmüştür. Ancak artan nozul sıcaklığı ile içyapıdaki gözeneklilik miktarında artış ve gözenek boyutlarında büyüme tespit edilmiştir.



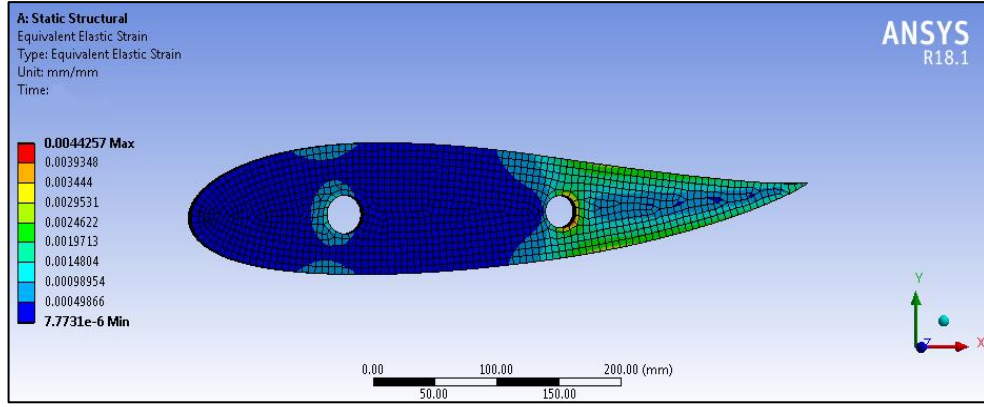
Şekil 4.30. 235°C nozul sıcaklığı (a), 255°C nozul sıcaklığı (b) ve 265°C nozul sıcaklığında (c) katman yapısı

4.4. Topoloji Optimizasyonu

Bu çalışmada, ANSYS programı kullanılarak kanat kaburga parçası üzerinde topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. ANSYS programı ile topoloji optimizasyonu, modele etkiyen yükler ve sınır koşullarının belirlenerek statik analizlerin yapılması ile başlamaktadır. Statik analiz için gerekli adımlar, model tanımlanması ile başlayıp, kullanılacak geometriye ait malzeme ataması yapılması ve malzeme atanan modelde ağ yapısı oluşturulup, parçaya etkiyen yüklerin ve kısıtların belirlenerek analiz edilmesi ile sonuçlanmaktadır. Çalışmada kullanılan kanat kaburga parçasına ait katı model, ANSYS programına aktararak geometri tanımlaması yapılmıştır. Termoplastik kompozit malzemelerden farklı üretim hızları, doluluk oranları, üretim açıları, nozul sıcaklıkları parametreleri kullanılarak eriyik biriktirme yönteminde üretilen deney numunelerinin çekme testleri sonucunda elde edilen mekanik özellikler ile ideal üretim parametreleri belirlenmiştir. İdeal üretim parametreleri kullanılarak üretilmiş numunelerin çekme deneyleri sonucu elde edilen çekme mukavemeti (35.29 MPa), elastisite modülü (1821 MPa), akma mukavemeti (32.09 MPa), malzeme yoğunluğu (1.08 g/cm^3) değerleri, malzeme kütüphanesinde eklemeli imalat parametrelerine göre belirlenen malzeme seçeneği bulunmaması nedeniyle yeni malzeme olarak atanmıştır. Model üzerinde ağ yapı oluşturulmuş, profile etkiyecek yükler ve destek bölgeleri belirlenerek statik analiz yapılmıştır. Statik analiz sonucu, oluşan deformasyon ve gerilme dağılımları Şekil 4.31 ve 4.32’de verilmiştir.

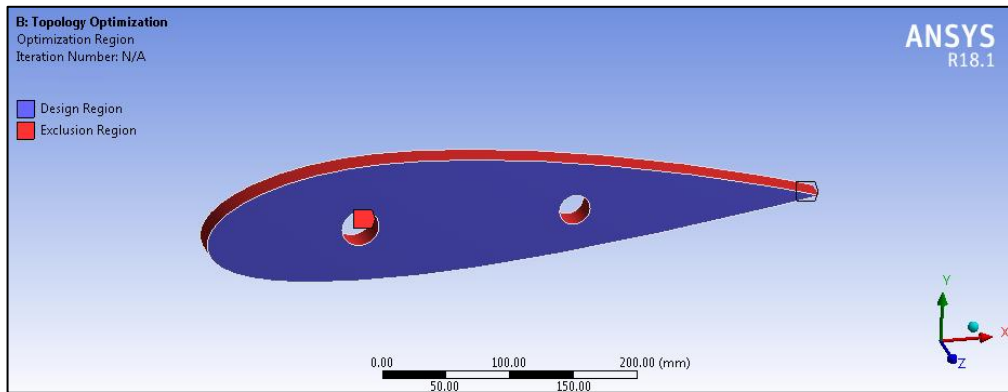


Şekil 4.31. Statik analiz sonucu gerilme dağılımı



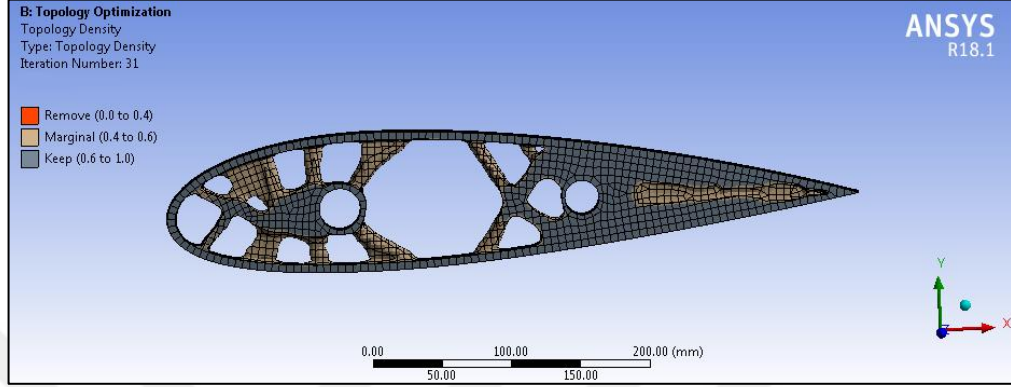
Şekil 4.32. Statik analiz sonucu şekil değiştirme dağılımı

Statik analiz sonucu elde edilen şekil değiştirme miktarı ve gerilme değerlerinin malzeme özelliklerinin sınır şartlarına uygun olduğu tespit edilmiş ve topoloji optimizasyonu aşamasına geçilmiştir. Topoloji optimizasyonu aşamasında analizi yapılan parçanın belirlenen kısıtlar ve sınır şartlarına göre hacmin minimize edilmesi amaçlanmaktadır. Dolayısıyla belirlenen şartlar altında parça içinde ideal malzeme dağılımı yapılarak kütle azaltımı da gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, optimizasyon aşamasında gerçekleştirilen adımlar şu şekildedir; İlk olarak geometri üzerinde optimize edilmesi istenen bölgeler belirlenmiştir. Model üzerinde ideal malzeme dağılımının gerçekleştirilmesi yani optimizasyon işleminin yapılması istenen bölgeler tasarım alanı olarak tanımlanırken, optimizasyon işleminin uygulanmayacağı yani korunması istenen bölgeler ise tasarım dışı alan olarak tanımlanmaktadır. Çalışmada, topoloji optimizasyonu yapılacak modelin dış yüzeyi ve destek noktaları tasarım alanı dışında bırakılarak kısıtlanmıştır. Bu bölge dışında kalan alanlar ise Şekil 4.33'te görüldüğü gibi tasarım alanı olarak tanımlanmış ve optimizasyon bölgesi olarak belirlenmiştir.



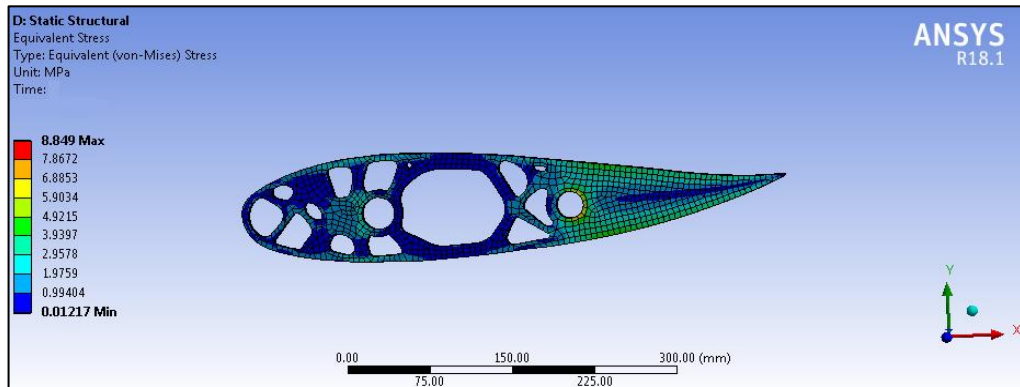
Şekil 4.33. Optimizasyon bölgesinin belirlenmesi

Optimizasyon bölgesi belirlendikten sonra topoloji optimizasyonunda kütle azaltımı çalışma için amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Kütlenin minimize edilmesi için sınır koşulları kütlenin %40 oranda korunması şeklinde belirlenmiştir. Optimizasyon belirlenen koşullarda çözdürülmüş ve tasarım modeli oluşturulmuştur (Şekil 4.34).

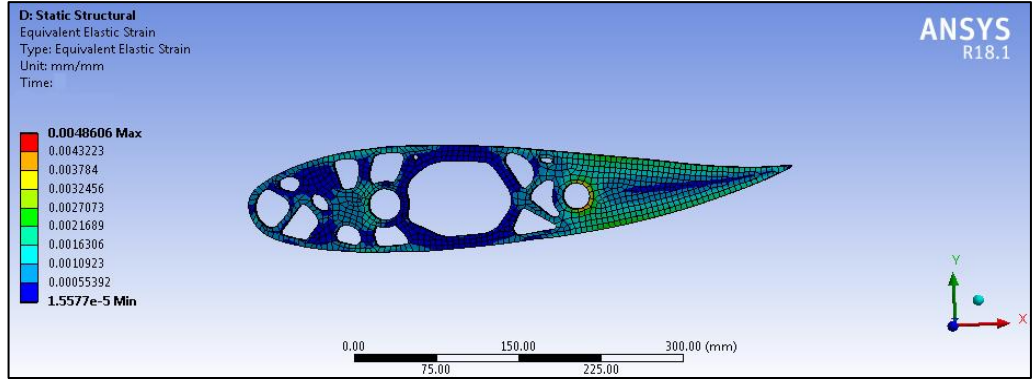


Şekil 4.34. Topoloji optimizasyonu sonucu elde edilen model

Topoloji optimizasyonu sonucu elde edilen model, SpaceClaim programında katı modele dönüştürülmüş ve veri doğrulama işlemi için kullanılmıştır. Veri doğrulama işleminde, topoloji optimizasyonu öncesi, statik analiz sürecinde uygulanan adımlar yeni tasarım üzerinde tekrar uygulanarak gerilme dağılımları incelenmiştir. Optimizasyon sonucu oluşturulan yeni tasarım için gerilme ve şekil değiştirme dağılımları Şekil 4.35 ve Şekil 4.36’da verilmiştir.



Şekil 4.35. Topoloji sonrası gerilme dağılımı



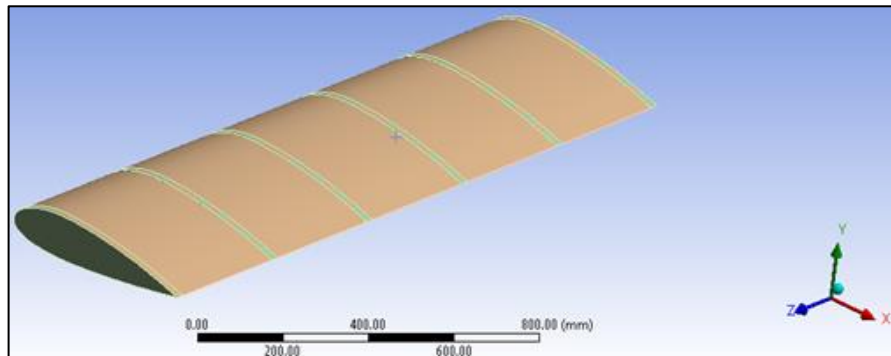
Şekil 4.36. Topoloji sonrası şekil değiştirme dağılımı

Topoloji optimizasyonu sonucu elde edilen yeni tasarımın, başlangıç şartlarına göre kütlesi %48.12 oranında azalmış ve maksimum gerilme değeri %9.81 artmıştır. Kanat profili ile ilgili optimizasyon öncesi ve sonrası elde edilen sonuçlar, Çizelge 4.8’de verilmiştir.

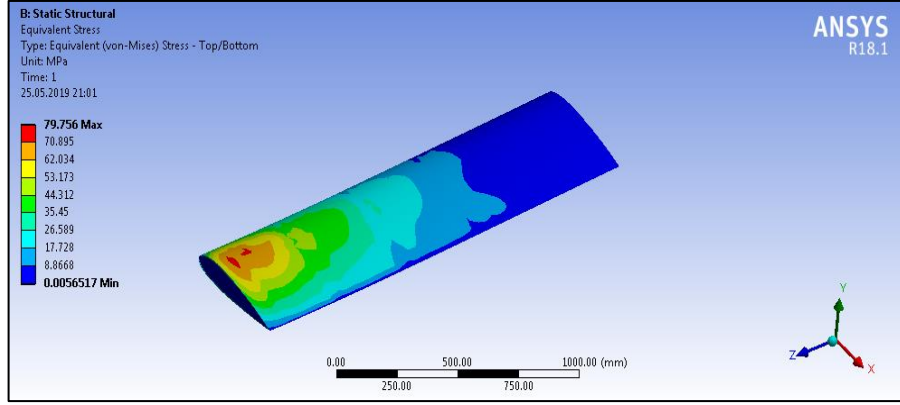
Çizelge 4.8. Optimizasyon öncesi ve sonrası sonuçlar

	Optimizasyon öncesi	Optimizasyon sonrası	% değişim
Kütle (kg)	0.71018	0.36845	%48.12
Maksimum Gerilme (MPa)	8.05	8.84	%9.81
Maksimum Şekil Değiştirme (mm/mm)	0.00442	0.00486	%9.95

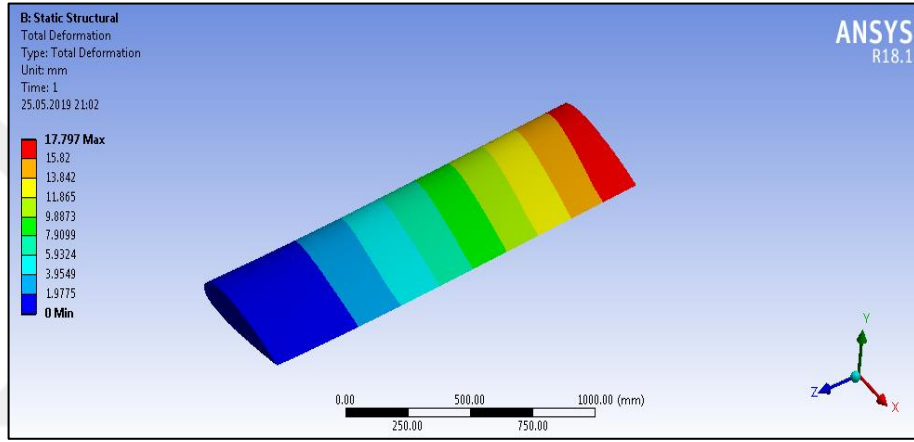
Normal kaburga destekleri ve topoloji optimizasyonu sonucu elde edilen kaburga destekleri kullanılarak oluşturulan kanat modelleri üzerinde meydana gelen gerilme ve şekil değiştirme dağılımları, Şekil 4.37, 4.38, 4.39, 4.40, 4.41, 4.42’de verilmiştir.



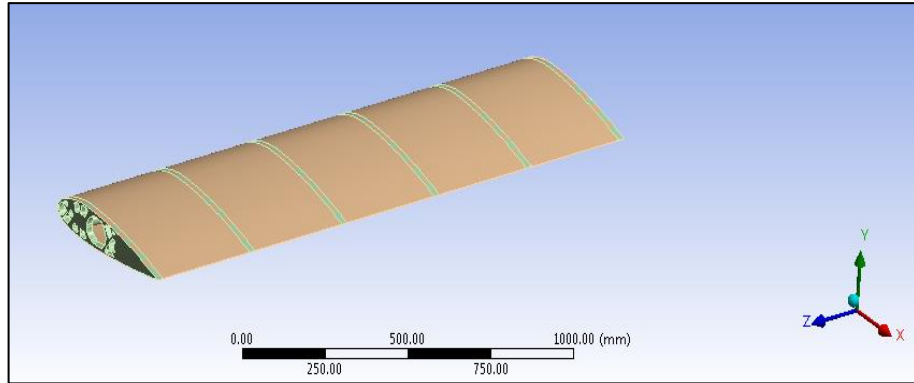
Şekil 4.37. Normal kanat modeli



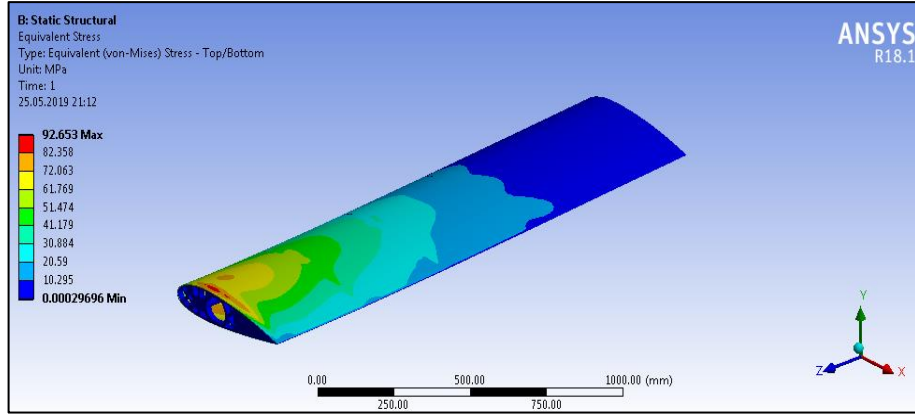
Şekil 4.38. Normal kanat üzerinde gerilme dağılımı



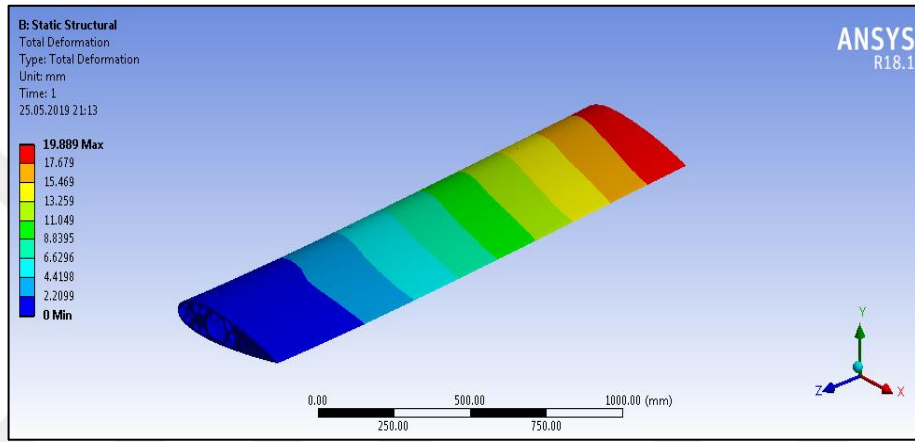
Şekil 4.39. Normal kanat üzerinde şekil değişimi



Şekil 4.40. Optimize kanat modeli



Şekil 4.41. Optimize kanat üzerinde gerilme dağılımı



Şekil 4.42. Optimize kanat üzerinde şekil değişimi

Kanat katı modelleri, kaburga destek parçaları, spar destekleri ve kanat dış kaplamasından oluşturulmuştur. Normal kanat modeli oluşturulurken, model içinde bulunan tüm parçalarda Al. 7075 malzeme ataması yapılmıştır. Statik analiz sonucu normal kanat modelinde meydana gelen maksimum gerilme değeri kanat bağlantı noktasında 79 MPa iken maksimum şekil değiştirme miktarı kanat uç noktasında 17 mm olarak ölçülmüştür. Alüminyum malzeme kullanılarak oluşturulan tek taraflı kanat parçası 32.6 kg'lık bir kütleye sahiptir. Optimize kanat modeli oluşturulurken kaburga destek profillerinde karbon fiber takviyeli termoplastik malzeme ve dış kaplamada Al. 7075 malzeme kullanılmıştır. Statik analiz sonucunda optimize kanat üzerinde maksimum gerilme 92 MPa iken şekil değiştirme 19 mm olmuştur (Şekil Optimize edilen kanat kütlesi incelendiğinde 20.6 kg'lık kütleye sahip olduğu görülmüştür. Dolayısıyla normal kanat ile kıyaslandığında tek kanat üzerinde %36.8 oranında kütle azaltımı sağlanmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Normal kanat ve optimize kanat

Kanat	Malzeme	Şekil Değişirme	Gerilme	Kütle
Normal Kanat	Kaburga destek- Al. 7075 Dış kaplama- Al. 7075	17.797 mm	79.756 MPa	32.661 kg
Optimize kanat	Kaburga destek- karbon fiber takviyeli termoplastik Dış kaplama- Al. 7075	19.889 mm	92.653 MPa	20.636 kg

Topoloji optimizasyonu gerçekleştirilen model, deneyler sonucunda belirlenen en iyi üretim parametreleri kullanılarak tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen büyük baskı hacmine sahip üç boyutlu yazıcıda üretilmiştir. Model aktarımı ve G kod komut dosyası oluşturulması sonrası üretim, 160390 mm filament kullanımı ve 14 saatlik üretim süresi ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.43. Eriyik biriktirme yönteminde termoplastik matrisli karbon fiber takviyeli kompozit kanat profili üretimi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmanın birinci aşamasında, eriyik biriktirme yönteminin kullanım alanlarını artırmak ve mevcut üç boyutlu yazıcılara alternatif oluşturmak amacıyla, 1000x1000x1000 mm boyutlara sahip parçaların üretimini yüksek boyutsal hassasiyette yapabilecek ve farklı katmanlı üretim amaçları için modüler olarak tasarlanmış olan eklemeli imalat sisteminin imalatı gerçekleştirilmiştir. Üretilen üç boyutlu yazıcının gövdesi 45x90 mm ve 45x45 mm alüminyum sigma profillerden oluşturularak rijit ve hafif bir yapı elde edilmiştir. Sistemde x ve y eksen hareketleri, yüksek hassasiyete sahip lineer ray ve araba bağlantıları ile oluşturulmuştur. 2.8 Nm torka sahip iki adet adım motor ile eksen hareketleri sağlanmıştır. Sistemde z eksen hareketi, C7 hassasiyete sahip iki adet vidalı mil ve 3 Nm torka sahip iki adet servo motor ile sağlanmıştır. Üretimlerde boyutsal hataları en aza indirmek amacıyla 10 mm kalınlığa sahip taşlanmış 5083 alüminyum tabla kullanılmış ve 300x450 mm boyutlara sahip rezistanslar kullanılarak tablada ısıtma özelliği sağlanmıştır. Üretim tablası, maksimum 140°C sıcaklık emniyetine sahip olup 120°C çalışma sıcaklığına ulaşabilmektedir. Isıtıcı tabla özelliği sayesinde, üretimde kullanılabilecek malzeme çeşidi arttırılmıştır. Sistemde kompozit malzemelerin kullanımına imkan vermek amacıyla ekstruder ve nozul uçlarda paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Sistem kontrolü açık kaynak kodlu yazılımlar kullanılarak yapılmıştır. Dolayısıyla ayar parametreleri üzerinde düzenleme yapılabilmektedir. Tabla kalibrasyonu, nozul ucun prob görevi görmesi ve 9 farklı noktadan seviyeleme işlemi yapmasıyla gerçekleştirilmiştir. Sistem, kalibrasyon parçalarında elde edilen ± 0.2 mm boyutsal hassasiyet ile hassas üretim yapabilmekte, 1690x1690x1690 mm gövde boyutları ve rijit gövde elemanları ile deneysel amaçlı farklı sistemlerin entegre edilebilmesine, farklı tabla boyutları ile baskı hacminin arttırılabilmesine imkân sağlamaktadır.

Çalışmanın ikinci aşamasında, imalatı yapılan üç boyutlu yazıcı kullanılarak %10 karbon fiber takviyeli abs kompozit ve abs+ malzemelerin üretim parametreleri ve parametrelerin mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney numuneleri beş farklı üretim parametresi ve her parametrede üç farklı seviye belirlenerek üretilmiş ve test edilmiştir. Üç farklı doluluk oranı (%20, %60, %100) kullanılarak üretilen numunelerin çekme testleri sonucu elde edilen değerler incelendiğinde, tüm numunelerde doluluk oranının artmasıyla çekme dayanımı ve elastisite modülü değerlerinde artış tespit edilmiştir. Numunelerin kırık yüzeyleri

incelendiğinde, %20 doluluk oranında üretilen parçaların iç bölgelerinde boşluk oluşumuna bağlı olarak katman yapısının oldukça zayıf olduğu görülmüştür. Ancak doluluk oranının artmasıyla parça iç bölgesindeki malzeme yoğunluğu artarak katmanlar arasındaki etkileşim artmıştır. Tüm numunelerde, katman yapısı ve mekanik özellikler en iyi sonuçları %100 doluluk oranında vermiştir.

Farklı üretim açılarındaki eriye biriktirme yönteminde mekanik özellikleri etkileyen parametrelerden biri olduğu tespit edilmiştir. En iyi mekanik özellikler her iki malzeme içinde %100 doluluk oranında ve 30/-60° üretim açısında elde edilirken, en düşük değerler 90/0° üretim açısında elde edilmiştir. Kompozit malzemelerin abs+ malzeme oranla tüm üretim açılarında çekme dayanımı ortalama %12 oranda düşmüş ancak elastisite modülleri ortalama %70 oranda artmıştır. Karbon fiber takviyesi ile malzeme rijitliğinin önemli oranda arttığı tespit edilmiştir. Kompozitlerin çekme dayanımında meydana gelen düşüşe neden olan etkenler kırık yüzeyler incelenerek belirlenmiştir.

Numunelerin kırık yüzeyleri incelendiğinde, karbon fiber takviyeli numunelerin iç yapısında ekstrüzyon aşamasında ve düşük fiber matris yapışması sonucu yoğun miktarda boşluk oluşumu meydana geldiği tespit edilmiştir. Boşluk oluşumu katmanlar arasındaki bağlanmayı azaltmakta ve mekanik özellikleri düşürmektedir. Bunun yanı sıra kompozit numunelerdeki fiber uzunluklarının, 30µm ile 430µm arasında değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Bu etkenler sonucu çekme dayanımında %12'lik bir düşüş elde edilmiştir.

Eriye biriktirme yönteminde üretim hızının mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelendiğinde, tüm numunelerde en iyi mekanik özellikler 20 mm/s üretim hızında elde edilmiştir. Üretim hızındaki düşüş ile yığılan malzeme üzerine uygulanan basınç artmakta ve katmanlar arasındaki bağlanma iyileşmektedir. Kırık yüzeyler incelendiğinde, üretim hızının artmasıyla katman yapısının bozulmaya başladığı görülmüştür. Konturu oluşturan elyaflar arasında seyrekleşme başlamış ve katmanlar arasındaki boşluk oluşumu artmıştır. Eriye biriktirme yönteminde üretim hızı, parça imalatı için gereken süreyi de etkileyen faktörlerden biridir. Ancak elde edilen sonuçlara göre yüksek üretim hızları mekanik özelliklerin düşmesine neden olmaktadır.

Farklı nozul sıcaklıklarının mekanik özelliklere etkisi incelendiğinde, nozul sıcaklığının artmasıyla mekanik özelliklerin iyileştiği tespit edilmiştir. Kırık yüzeyler incelendiğinde artan nozul sıcaklığına bağlı olarak viskozitenin düşmesiyle katman ayrımları belirginliğini yitirmiştir. 265° nozul sıcaklığında katman yapışması en üst seviyeye ulaşırken malzeme iç yapısında sıcaklığa bağlı gözenek boyutları ve miktarlarında artış meydana gelmiştir.

Üretim hızı, nozul sıcaklığı ve tabla sıcaklığı parametrelerinin çekme dayanımı için optimum deney parametreleri Taguchi L₉ deney tasarımı oluşturularak bulunmuştur. Taguchi optimizasyonu sonucu, maksimum çekme dayanımı için elde edilen optimum deney parametreleri %100 doluluk oranı ve 30/-60° üretim açısında, (20 mm/s üretim hızı, 255°C nozul sıcaklığı ve 110°C tabla sıcaklığı) deney parametreleri kullanılarak yapılan deney sonucu çekme dayanımı 35.29 MPa ve elastisite modülü 1.82 GPa olarak bulunmuştur. Doğrulama deneyi yapılarak taguchi optimizasyonunun uygulamada %2.86 hata ile başarı gösterdiği görülmüştür. Varyans analizi ile deney parametrelerinin çekme dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Varyans analizinde bu üç parametre arasından çekme dayanımı için en etkili parametrenin üretim hızı olduğu sonucuna varılmıştır.

Genel olarak malzemeler karşılaştırıldığında, abs+ malzemeye oranla karbon fiber takviyeli termoplastik kompozitlerin çekme dayanımlarında düşüş meydana geldiği görülürken malzeme rijitliğinin önemli oranda arttığı görülmüştür. Ayrıca karbon fiber takviyesi malzemeye gevrek özellik kazandırmış ve şekil değiştirme miktarlarında %50 oranda düşüş meydana gelmiştir. Bu durum karbon fiber takviyesinin malzemeye kazandırdığı katılık sonucu oluşmuştur.

Çalışmanın üçüncü ve dördüncü aşamasında kompozit malzeme için belirlenen en iyi üretim parametreleri kullanılarak NACA2320 tipi kanat profiline sahip kanat kaburga parçasına topoloji optimizasyonu uygulanmıştır. Başlangıç şartlarında 0.71 kg olan kütle topoloji optimizasyonu sonucu %48.12 oranında azaltılarak 0.36 kg'a inmiştir. Başlangıç durumunda maksimum gerilme 8.05 MPa ve şekil değişimi 0.00442 mm iken topoloji sonrası ortalama %10 artışla maksimum gerilme 8.84 MPa ve şekil değişimi 0.00486 mm olmuştur. İmalatı gerçekleştirilen üç boyutlu yazıcı ile elde edilen en iyi üretim parametreleri kullanılarak tasarlanan geometrinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Geleneksel imalat yöntemleri ile böyle bir parçanın üretimi için plastik parça kalıbı

imal edilmesi gerekmektedir. Kalıp üretimi aşamasında tasarımdan imalata farklı birçok sürecin bulunması, kalıp malzemesi, parça malzemesi, çalışan, makine gibi faktörlerin devreye girmesi maliyeti önemli oranda arttırmakta ve süreci karmaşıktırmaktadır. Ancak eriyik biriktirme yönteminde farklı proseslerin bulunmaması parçaların direkt modelden üretilebilir olması, üretim için ek ekipmana ve çalışana ihtiyaç duyulmaması süreci kolaylaştırmakta, düşük makine ve malzeme maliyetleri yöntemin avantajlarını arttırmaktadır.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar özetlenecek olursa;

- 1000x1000x1000 mm baskı hacmine sahip, yüksek boyutsal hassasiyette parça üretimi gerçekleştirebilecek, eriyik biriktirme yöntemi esaslı modüler eklemeli imalat sisteminin tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir.
- İlk deney grubu sonuçlarında üretilen parçalarda en iyi mekanik özellikler, %100 doluluk oranı ve 30/-60° üretim açısında elde edilmiştir.
- İkinci deney grubunda incelenen parametrelerden elde edilen sonuçlarda, karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özelliklerinin, 20 mm/s üretim hızı, 255°C nozul sıcaklığı ve 110°C tabla sıcaklığında iyileştiği görülmüştür. Düşük üretim hızı ve yüksek nozul sıcaklığı katman yapısını iyileştirmiştir.
- Eriyik biriktirme yönteminde karbon fiber takviyeli polimer kompozit malzemeler kullanılarak üretilen numunelerin kırık yüzeyleri incelendiğinde fiberlerin çoğunlukla üretim açılara göre yönlendiği, matris içinde karbon fiberlerin eşit uzunlukta olmadığı, matris ve fiberler arasındaki bağlanmanın zayıf olduğu ve takviye ile içyapıda gözenek oluşumunun arttığı görülmüştür.
- ABS+ malzemeden üretilen numunelerde kopma uzaması ve çekme dayanımı değerlerinin karbon fiber takviyeli polimer kompozitlere kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Karbon fiber takviyesi ile malzeme rijitliği önemli oranda artmıştır.
- Karbon fiber takviyeli kompozit malzeme kullanılarak tasarlanan kanat kaburga parçasına, topoloji optimizasyonu uygulanması sonucu kütlesi %48.12 oranında azaltılmış ve karmaşık yapıya sahip geometrinin üretimi büyük hacimli eklemeli imalat sisteminde gerçekleştirilmiştir.

Gelecekte yapılabilecek çalışmalar için öneriler:

- Eriyik biriktirme yöntemi farklı üretim parametrelerinin bulunduğu ve plastik esaslı malzemeler ile üretim yapılan bir eklemeli imalat teknolojisidir. Bu çalışmada, üretim hızı, nozul sıcaklığı, üretim açısı, doluluk oranı, tabla sıcaklığı gibi mekanik özellikler üzerinde etkisi olan parametreler ile çalışılmıştır. Sonraki çalışmalarda, katman genişliği, katman kalınlığı, farklı üretim açıları gibi üretim parametreleri ile mekanik özellikler incelenebilir.
- Çalışmada karbon fiber takviyeli abs malzeme ve optimize edilmiş abs+ malzemeler kullanılmıştır. Farklı malzemelerin eriyik biriktirme yönteminde kullanılmasının incelenmesi ve bu malzemelerde kullanılacak farklı parametrelerin, mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenebilir.
- Elde edilen farklı mekanik özelliklerde amaca yönelik parça üretim çalışmaları yapılabilir. Farklı termoplastik kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin eklemeli imalat şartlarına göre belirlenmesi, farklı endüstriyel uygulamaların geliştirilmesine imkân sağlayabilir.
- Eklemeli imalat yöntemleri kullanılarak elde edilen mekanik özelliklere yönelik topoloji optimizasyonu yazılımlarının veri kütüphanelerinde yeterince malzeme tanımlaması bulunmamaktadır. Yapılacak yeni çalışmalar ile elde edilecek özellikler, bu yazılımların eklemeli imalata uygun yeni yapısal parçaların tasarımında kullanılmasına fayda sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- Abdullah, Z., Ting, H. Y., Ali, M. A. M., Fauadi, M. H. F. M., Kasim, M. S., Hambali, A., Handoko, F. (2018). The Effect Of Layer Thickness And Raster Angles On Tensile Strength And Flexural Strength For Fused Deposition Modeling (FDM) Parts. *Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 12(4), 147-158.
- Afrose, M. F., Masood, S. H., Iovenitti, P., Nikzad, M., Sbarski, I. (2016). Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material. *Progress in Additive Manufacturing*, 1(1-2), 21-28.
- Ahmed, M., Islam, M., Vanhooose, J., Rahman, M. (2017). Comparisons of Elasticity Moduli of Different Specimens Made Through Three Dimensional Printing. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 4(2), 105-109.
- Akande, S. O., Dalgarno, K., Munguia, J. (2017). Process control testing for fused filament fabrication. *Rapid Prototyping Journal*, 23(2), 246-256.
- Alvarez, C., Kenny, L., Lagos, C., Rodrigo, F., Aizpun, M. (2016). Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts. *Ingeniería e Investigación*, 36(3), 110-116.
- 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)
- ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing, 2012. Standard terminology for additive manufacturing technologies. ASTM, Philadelphia.
- ASTM D638-14, 2015. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Aw, Y., Yeoh, C., Idris, M., Teh, P., Hamzah, K., Sazali, S. (2018). Effect of printing parameters on tensile, dynamic mechanical, and thermoelectric properties of FDM 3D printed CABS/ZnO composites. *Materials*, 11(4), 466.
- Aydın, M., Güler, B., Çetinkaya, K. (2018). Dikey Ekstrüzyon (Filament) Sistemi Tasarım Ve Prototip İmalatı. *International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry*, 2(1), 1-10.
- Ayrilmis, N. (2018). Effect of layer thickness on surface properties of 3D printed materials produced from wood flour/PLA filament. *Polymer Testing*, 71, 163-166.
- Basavaraj, C. K., Vishwas, M. (2016). Studies on effect of fused deposition modelling process parameters on ultimate tensile strength and dimensional accuracy of nylon. In *IOP conference series: materials science and engineering*, 149(1).

- Behzadnasab, M., Yousefi, A. A. (2016). Effects of 3D printer nozzle head temperature on the physical and mechanical properties of PLA based product. In 12th International Seminar on Polymer Science and Technology, 2-5 November 2016, Iran.
- Bellehumeur, C., Li, L., Sun, Q., Gu, P. (2004). Modeling of bond formation between polymer filaments in the fused deposition modeling process. *Journal of Manufacturing Processes*, 6(2), 170-178.
- Bendsøe, M. P., Sigmund, O. (2013). *Topology optimization: theory, methods and applications*. Springer-Verlag, 370p, Berlin.
- Blok, L. G., Longana, M. L., Yu, H., Woods, B. K. (2018). An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites. *Additive Manufacturing*, 22, 176-186.
- Btech (2019). Metal 3d Printing: EBM- DMLS Teknik Karşılaştırması. <https://www.btech.com.tr/metal-3d-printing-ebm-dmls-teknikkarsilastirmasi/>. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)
- Callister, W. D., Rethwisch, D. G. (2007). *Materials science and engineering: an introduction*. John Wiley & Sons, 720p, New York.
- Cetin, M. H., Ozcelik, B., Kuram, E., Demirbas, E. (2011). Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method. *Journal of Cleaner Production*, 19(17-18), 2049-2056.
- Chacón, J. M., Caminero, M. Á., García-Plaza, E., Núñez, P. J. (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*, 124, 143-157.
- Chakravorty, D. (2019). STL File Format (3D Printing)- Simply Explained. <https://all3dp.com/>. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)
- Chesser, P., Post, B. K., Lind, R., Lloyd, P., Love, L. J. (2017). Changing Print Resolution On Baam Via Selectable Nozzles. *Solid Freeform Fabrication*, 1684-1695.
- 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.
- Christiyan, K. J., Chandrasekhar, U., Venkateswarlu, K. (2016). A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite. *Materials Science and Engineering*, 114(1).

- Chuang, K. C., Grady, J. E., Draper, R. D., Shin, E. S. E., Patterson, C., Santelle, T. D. (2015). Additive manufacturing and characterization of Ultem polymers and composites. Camx Conference Proceeding, 29-29 October 2015, Dallas.
- Cincinnati (2019). <https://www.e-ci.com/baam>. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)
- ColorFabb (2019). <https://colorfabb.com/>. (Erişim Tarihi: 08.05.2019)
- Comotti, C., Regazzoni, D., Rizzi, C., Vitali, A. (2017). Additive manufacturing to advance functional design: an application in the medical field. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 17(3).
- Coogan, T. J., Kazmer, D. O. (2017). Bond and part strength in fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 23(2), 414-422.
- CustomPartNet (2019). 3D Printing. <https://www.custompartnet.com/>. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)
- Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C., Duysak, A. (2013). Hızlı Prototipleme Teknolojileri Ve Uygulama Alanları. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (031), 53-70.
- Das, P., Chandran, R., Samant, R., Anand, S. (2015). Optimum part build orientation in additive manufacturing for minimizing part errors and support structures. *Procedia Manufacturing*, 1, 343-354.
- Dorigato, A., Moretti, V., Dul, S., Unterberger, S. H., Pegoretti, A. (2017). Electrically conductive nanocomposites for fused deposition modelling. *Synthetic Metals*, 226, 7-14.
- Drummer, D., Cifuentes-Cuéllar, S., Rietzel, D. (2012). Suitability of PLA/TCP for fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 18(6), 500-507.
- Dudescu, C., Racz, L. (2017). Effects of raster orientation, infill rate and infill pattern on the mechanical properties of 3d printed materials. *ACTA Universitatis Cibiniensis*, 69(1), 23-30.
- Dul, S., Fambri, L., Pegoretti, A. (2016). Fused deposition modelling with ABS-graphene nanocomposites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 85, 181-191.
- Duty, C. E., Kunc, V., Compton, B., Post, B., Erdman, D., Smith, R., Love, L. (2017). Structure and mechanical behavior of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) materials. *Rapid Prototyping Journal*, 23(1), 181-189.
- EOS (2018). Aerospace: Ruag-additive manufacturing of satellite components. https://www.eos.info/case_studies/additive-manufacturing-of-antenna-bracket-for-satellite. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)

- Esun (2019). <http://www.esun3d.net/Products/3D-Filament>. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)
- 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.
- Ferreira, R. T. L., Amatte, I. C., Dutra, T. A., Bürger, D. (2017). Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers. Composites Part B: Engineering, 124, 88-100.
- Fidan, I., Imeri, A., Gupta, A., Hasanov, S., Nasirov, A., Elliott, A., Nanami, N. (2019). The trends and challenges of fiber reinforced additive manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1-18.
- Fodran, E., Koch, M., Menon, U. (1996). Mechanical and dimensional characteristics of fused deposition modeling build styles. Solid Freeform Fabrication, 419-442.
- Francis, V., Jain, P. K. (2016). Experimental investigations on fused deposition modelling of polymer-layered silicate nanocomposite. Virtual and Physical Prototyping, 11(2), 109-121.
- Fu, S. Y., Hu, X., Yue, C. Y. (1999). Effects of fiber length and orientation distributions on the mechanical properties of short-fiber-reinforced polymers. Journal of the Society of Materials Science, 48, 74-83.
- Fu, S. Y., Lauke, B., Mäder, E., Yue, C. Y., Hu, X. (2000). Tensile properties of short-glass-fiber-and-short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 31(10), 1117-1125.
- Galantucci, L. M., Lavecchia, F., Percoco, G. (2009). Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts. CIRP annals, 58(1), 189-192.
- General Electric Additive (2019). <https://www.ge.com/additive/additivemanufacturing/machines/project-atlas>. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)
- Gebhardt, A. (2011). Understanding additive manufacturing. Hanser Publications, 167p, Ohio.
- Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B. (2014). Additive manufacturing technologies. Springer, 498p, New York.
- Girdis, J., McCaffrey, M., Proust, G. (2016). Additive Manufacturing of Carbon Fiber and Graphene – Polymer Composites using the technique of Fused Deposition Modelling. Solid Freeform Fabrication, 864-870.

- Gonzalez-Gutierrez, J., Duretek, I., Holzer, C., Arbeiter, F., Kukla, C. (2017). Filler Content and Properties of Highly Filled Filaments for Fused Filament Fabrication of Magnets. Proceedings of the ANTEC.
- Gökçe, B., Taşgetiren, S. (2009). Kalite için Deney Tasarımı. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6(1), 71-83.
- Görür, H. (2018). Eklemeli İmalat Yöntemi İçin Topoloji Optimizasyonu Kullanılarak Yapısal Bir Motor Parçasının Hafifletilmiş Tasarımı. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 107s, İstanbul.
- Griffey, J. (2014). 3-D printers for libraries. American Library Association, 32p.
- Griffiths, C. A., Howarth, J., Rowbotham, G. D. A., Rees, A. (2016). Effect of build parameters on processing efficiency and material performance in fused deposition modelling. Procedia CIRP, 49, 28-32.
- Groover, M. P. (2010). Principles of Modern Manufacturing. New York. John Wiley & Sons, 1024p.
- Haq, R. H. A., Wahab, B., Saidin, M., Jaimi, N. I. (2014). Fabrication process of polymer nano-composite filament for fused deposition modeling. In Applied Mechanics and Materials, 465, 8-12.
- Hernandez, R., Slaughter, D., Whaley, D., Tate, J., Asiabanpour, B. (2016). Analyzing the tensile, compressive, and flexural properties of 3D printed ABS P430 plastic based on printing orientation using fused deposition modeling. Solid Freeform Fabrication Symposium, 8-10 August 2016, Texas, 939-950.
- Hibbeler, R. C. (2013). Statics and mechanics of materials. USA. Pearson, 912p.
- Huang, B., Singamneni, S. (2015). Raster angle mechanics in fused deposition modelling. Journal of Composite Materials, 49(3), 363-383.
- Jiang, D., Smith, D. E. (2017). Anisotropic mechanical properties of oriented carbon fiber filled polymer composites produced with fused filament fabrication. Additive Manufacturing, 18, 84-94.
- Jiang, J., Lou, J., Hu, G. (2019). Effect of support on printed properties in fused deposition modelling processes. Virtual and Physical Prototyping, 1-8.
- Jiang, J., Stringer, J., Xu, X., Zhong, R. Y. (2018). Investigation of printable threshold overhang angle in extrusion-based additive manufacturing for reducing support waste. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 31(10), 961-969.
- Jiang, J., Xu, X., Stringer, J. (2018). Support Structures for Additive Manufacturing: A Review. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2(4), 64.

- Kellner, T. (2018). Fired Up: GE Successfully Tested Its Advanced Turboprop Engine With 3D-Printed Parts. <https://www.ge.com/reports/ge-fired-its-3d-printed-advanced-turboprop-engine/>. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)
- Krog, L., Tucker, A., Rollema, G. (2002). Application of topology, sizing and shape optimization methods to optimal design of aircraft components. 3rd Altair UK HyperWorks Users Conference.
- Kruth, J. P., Leu, M. C., Nakagawa, T. (1998). Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *Cirp Annals*, 47(2), 525-540.
- Kuo, C. C., Liu, L. C., Teng, W. F., Chang, H. Y., Chien, F. M., Liao, S. J., Chen, C. M. (2016). Preparation of starch/acrylonitrile-butadiene-styrene copolymers (ABS) biomass alloys and their feasible evaluation for 3D printing applications. *Composites Part B: Engineering*, 86, 36-39.
- Kuznetsov, V., Solonin, A., Urzhumtsev, O., Schilling, R., Tavitov, A. (2018). Strength of PLA components fabricated with fused deposition technology using a desktop 3D printer as a function of geometrical parameters of the process. *Polymers*, 10(3), 313.
- Leary, M., Merli, L., Torti, F., Mazur, M., Brandt, M. (2014). Optimal topology for additive manufacture: A method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures. *Materials & Design*, 63, 678-690.
- Lee, S. L., Lee, D. C., Lee, J. I., Han, C. S., Hedrick, K. (2007). Integrated process for structural-topological configuration design of weight-reduced vehicle components. *Finite elements in analysis and design*, 43(8), 620-629.
- Levy, G. N., Schindel, R., Kruth, J. P. (2003). Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. *CIRP annals*, 52(2), 589-609.
- Long, H., Wu, Z., Dong, Q., Shen, Y., Zhou, W., Luo, Y., Dong, X. (2019). Mechanical and thermal properties of bamboo fiber reinforced polypropylene/polylactic acid composites for 3D printing. *Polymer Engineering & Science*, 59, 247-260.
- Lopes, B. J., D'almeida, J. R. M. (2018). Development And Characterization Of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics–Part B: Mechanical Properties And Microstructural Analysis. 4th Brazilian Conference on Composite Materials, 22-25 July 2018, Rio de Janeiro.
- Love, L. J. (2015). Utility of big area additive manufacturing (BAAM) for the rapid manufacture of customized electric vehicles. Report No. ORNL/TM-2014/607, 11p.

- Love, L. J., Kunc, V., Rios, O., Duty, C. E., Elliott, A. M., Post, B. K., Blue, C. A. (2014). The importance of carbon fiber to polymer additive manufacturing. *Journal of Materials Research*, 29(17), 1893-1898.
- Lu, L., Sharf, A., Zhao, H., Wei, Y., Fan, Q., Chen, X., Chen, B. (2014). Build-to-last: strength to weight 3D printed objects. *ACM Transactions on Graphics*, 33(4), 97.
- MacDonald, E., Burden, E., Walker, J., Kelly, J., Conner, B., Patterson, C., Bader, A. (2017). Spatial Frequency Analysis for Improved Quality in Big Area Additive Manufacturing (BAAM). *ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 3-9 November 2017, Florida.
- Mahmood, S., Qureshi, A. J., Goh, K. L., Talamona, D. (2017). Tensile strength of partially filled FFF printed parts: experimental results. *Rapid Prototyping Journal*, 23(1), 122-128.
- Masood, S. H., Song, W. Q. (2004). Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using fused deposition modelling. *Materials & design*, 25(7), 587-594.
- Mohan, N., Senthil, P., Vinodh, S., Jayanth, N. (2017). A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(1), 47-59.
- Nidagundi, V. B., Keshavamurthy, R., Prakash, C. P. S. (2015). Studies on parametric optimization for fused deposition modelling process. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 1691-1699.
- 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.
- Ning, F., Cong, W., Hu, Z., Huang, K. (2017). Additive manufacturing of thermoplastic matrix composites using fused deposition modeling: A comparison of two reinforcements. *Journal of Composite Materials*, 51(27), 3733-3742.
- Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., Wang, S. (2015). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*, 80, 369-378.
- Nor, S. M. M., Sudin, M. N., Razali, M. F. B. (2018). Application of Taguchi Method in Investigating The Effect of Layer Thickness and Fill Angle on FDM Parts. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 409(1).

- Norsk Titanium (2017). Norsk Titanium to Deliver the World's First FAA-Approved, 3D-Printed, Structural Titanium Components to Boeing. <https://www.norsktitanium.com/media/press/norsk-titanium-to-deliver-the-worlds-first-faa-approved-3d-printed-structural-titanium-components-to-boeing/>. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)
- Nuñez, P. J., Rivas, A., García-Plaza, E., Beamud, E., Sanz-Lobera, A. (2015). Dimensional and surface texture characterization in fused deposition modelling (FDM) with ABS plus. *Procedia Engineering*, 132, 856-863.
- Oo-kuma (2019). <https://www.oo-kuma.com.tr/>. (Erişim Tarihi: 08.05.2019)
- 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.
- Patel, D. (2017). Effects of infill patterns on time, surface roughness and tensile strength in 3D printing. *Int. J. Eng. Dev. Res*, 5, 566-569.
- Patel, N. A., Shah, J. R., Thanki, S. J. (2018). A Comprehensive Review on 3D Printer Composite Filament Used in Fused Deposition Modeling, *IJCRT*, 6(2), 1244-1254.
- Phillips, L. N. (1989). *Design with Advanced Composite Materials*. Berlin. Springer.
- Poligon Mühendislik (2019). Polyjet. <https://www.poligonmuhendislik.com/>. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)
- Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baci, F., Marinescu, R. (2018). FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing*, 69, 157-166.
- Postiglione, G., Natale, G., Griffini, G., Levi, M., Turri, S. (2015). Conductive 3D microstructures by direct 3D printing of polymer/carbon nanotube nanocomposites via liquid deposition modeling. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 76, 110-114.
- Qattawi, A. (2018). Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method. *Journal of Manufacturing Processes*, 36, 164-174.
- Qattawi, A., Ablat, M. A. (2017). Design consideration for additive manufacturing: fused deposition modelling. *Open Journal of Applied Sciences*, 7(06), 291.
- Qattawi, A., Alrawi, B., Guzman, A. (2017). Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: a design-for-manufacturing approach. *Procedia Manufacturing*, 10, 791-803.

- Quan, Z., Suhr, J., Yu, J., Qin, X., Cotton, C., Mirotznik, M., & Chou, T. W. (2018). Printing direction dependence of mechanical behavior of additively manufactured 3D preforms and composites. *Composite Structures*, 184, 917-923.
- Raja, V., Fernandes, K. J. (2007). *Reverse engineering: an industrial perspective*. London: Springer, 260p.
- Rajpurohit, S. R., Dave, H. K. (2018). Effect of process parameters on tensile strength of FDM printed PLA part. *Rapid Prototyping Journal*, 24(8), 1317-1324.
- Ramkumar, J. (2017). *Additive Manufacturing*. <http://home.iitk.ac.in/>. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)
- Revolvvy (2019). Solid Ground Curing. <https://www.revolvvy.com/page/Solid-ground-curing>. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)
- Rodríguez-Panes, A., Claver, J., Camacho, A. (2018). The influence of manufacturing parameters on the mechanical behaviour of pla and abs pieces manufactured by fdm: a comparative analysis. *Materials*, 11(8), 1333.
- Ross, P. J. (1995). *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. Singapore. McGraw-Hill, 329p,
- Salem Bala, A., Bin Wahab, S. (2016). Elements and materials improve the FDM products: A review. In *Advanced Engineering Forum*, Trans Tech Publications, 16, 33-51.
- Savaşkan, M., Taptık, Y., Ürgen, M. (2004). Deney Tasarımı Yöntemi İle Matkap Uçlarında Performans Optimizasyonu. *İtÜdergisi/d*, 3(6), 117-128.
- Savvakis, K., Petousis, M., Vairis, A., Vidakis, N., Birkmeyer, A. T. (2014). Experimental determination of the tensile strength of fused deposition modeling parts. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 14-20 November 2014, Canada.
- 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).
- Shen, Z. H., Dai, N., Li, D. W., Wu, C. Y. (2016). Bridge support structure generation for 3D printing. In *Materials, Manufacturing Technology, Electronics and Information Science (MMTEI2015)*, 141-149.
- Shubham, P., Sikidar, A., Chand, T. (2016). The influence of layer thickness on mechanical properties of the 3D printed ABS polymer by fused deposition modeling. In *Key Engineering Materials*, 706, 63-67.

- Singh, R., Singh, S., Fraternali, F. (2016). Development of in-house composite wire based feed stock filaments of fused deposition modelling for wear-resistant materials and structures. *Composites Part B: Engineering*, 98, 244-249.
- SmarTech Analysis (2018). 2019 Additive Manufacturing Market Outlook And Summary Of Opportunities. <https://www.smartechanalysis.com/reports/2019-additive-manufacturing-market-outlook/>. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)
- Soundarya, S., Sathiyavani, S., Arun, K. K. (2018). Topology optimization of wing ribs in cessna citation. *International Journal of Research in Aeronautical and Mechanical Engineering*, 6(3), 7-17.
- Spoerk, M., Gonzalez-Gutierrez, J., Sapkota, J., Schuschnigg, S., Holzer, C. (2018). Effect of the printing bed temperature on the adhesion of parts produced by fused filament fabrication. *Plastics, Rubber and Composites*, 47(1), 17-24.
- Statista (2019). Most used 3D printing technologies 2017-2018. <https://www.statista.com/statistics/560304/worldwide-survey-3d-printing-top-technologies/>. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)
- Steinbuch, R., Gekeler, S. (2015). *Bionic Optimization in Structural Design: Stochastically Based Methods to Improve the Performance of Parts and Assemblies*. Berlin. Springer-Verlag, 160p.
- Stratasys (2018). Design Considerations for FDM Additive Manufacturing Tooling. <https://www.stratasys.com/resources/search/resource-guides/design-considerations>. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)
- Sukindar, N. A. B., Ariffin, M. K. A. B. M., Baharudin, B. H. T. B., Jaafar, C. N. A. B., Ismail, M. I. S. B. (2017). Analysis on the impact process parameters on tensile strength using 3d printer repetier-host software. *ARNP J. Eng. Appl. Sci*, 12, 3341-3346.
- Şahin, Y. (2000). *Kompozit malzemelere giriş*. Ankara. Gazi kitabevi, 436s.
- Taguchi, G., Chowdhury, S., Wu, Y. (2005). *Taguchi's quality engineering handbook*. New Jersey. Wiley, 1696p.
- Tanikella, N. G., Wittbrodt, B., Pearce, J. M. (2017). Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing. *Additive Manufacturing*, 15, 40-47.
- Tekinalp, H. L., Kunc, V., Velez-Garcia, G. M., Duty, C. E., Love, L. J., Naskar, A. K., Ozcan, S. (2014). Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 105, 144-150.
- Thermwood (2019). <http://www.thermwood.com/>. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)

- Tian, X., Liu, T., Yang, C., Wang, Q., Li, D. (2016). Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 88, 198-205.
- Tomlin, M., Meyer, J. (2011). Topology optimization of an additive layer manufactured (ALM) aerospace part. 7th Altair CAE technology conference, 10 May 2011, Warwickshire, 1-9.
- Toprak, İ. B. (2013). Karmaşık yüzeylerin işlenmesinde çok sensörlü çevrimiçi durum izleme ve kontrol. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 100s, Isparta.
- Tran, N. H., Nguyen, V. N., Ngo, A. V., Nguyen, V. C. (2017). Study on the Effect of Fused Deposition Modeling (FDM) Process Parameters on the Printed Part Quality. *Int. J. Eng. Res. Appl.(IJERA)*, 7, 71-77.
- Tsiakatouras, G., Tsellou, E., Stergiou, C. (2014). Comparative study on nanotubes reinforced with carbon filaments for the 3D printing of mechanical parts. *World Transactions on Engineering and Technology Education*, 12(3), 392-396.
- Tymrak, B. M., Kreiger, M., Pearce, J. M. (2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials & Design*, 58, 242-246.
- Tyson, E. (2017). What 3D Printer Nozzle Size Should I Use. The Pros and Cons. <https://rigid.ink/blogs/news/what-3d-printer-nozzle-size-should-i-use-the-pros-and-cons>. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)
- Urbanic, R. J., Hedrick, R. (2016). Fused deposition modeling design rules for building large, complex components. *Computer-Aided Design and Applications*, 13(3), 348-368.
- Vairis, A., Petousis, M., Vidakis, N., Savvakis, K. (2016). On the strain rate sensitivity of abs and abs plus fused deposition modeling parts. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(9), 3558-3565.
- Vanek, J., Galicia, J. A. G., Benes, B. (2014). Clever support: Efficient support structure generation for digital fabrication. In *Computer graphics forum*, 33(5), 117-125.
- 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.
- Vishwas, M., Basavaraj, C. K., Vinyas, M. (2018). Experimental investigation using taguchi method to optimize process parameters of fused deposition Modeling for ABS and nylon materials. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 7106-7114.

- Walker, D., & Liu, D. (2015). Topology optimization of an aircraft wing. In 56th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference.
- Wei, X. R., Geng, G. H., Zhang, Y. H. (2016). Steady And Low Consuming Supporting For Fused Deposition Modeling. *Acta Automatica Sinica*, (1), 9.
- Wright, I. (2016). How Big Area Additive Manufacturing is Enabling Automotive Microfactories. <https://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/12363/How-Big-Area-Additive-Manufacturing-is-Enabling-Automotive-Microfactories.aspx>. (Erişim Tarihi: 07.05.2019).
- Wu, P., Ma, Q., Luo, Y., Tao, C. (2016). Topology optimization design of automotive engine bracket. *Energy and Power Engineering*, 8(04), 230.
- 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.
- Xometry (2019). Design Guide: Selective Laser Sintering (SLS). https://cdn2.hubspot.net/hubfs/340051/Design_Guides/Xometry_DesignGuide_SLS.pdf. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)
- Yang, T. C. (2018). Effect of extrusion temperature on the physico-mechanical properties of unidirectional wood fiber-reinforced polylactic acid composite (WFRPC) components using fused deposition modeling. *Polymers*, 10(9), 976.
- Yıldız, A. R., Kaya, N., Öztürk, F. (2003). Taşıt elemanlarının optimum topoloji yaklaşımı ile tasarımı. *Mühendis ve Makina*, 44(516).
- Yılmaz, D. (2015). Katmanlı İmalat Teknolojileri ve Havacılık Uygulamaları. STM, Sektör Değerlendirme Raporu, 21s.
- Žarko, J., Vladić, G., Pál, M., Dedijer, S. (2017). Influence of printing speed on production of embossing tools using FDM 3D printing technology. *Journal of graphic engineering and design*, 8(1), 19.
- Zekavat, A. R., Jansson, A., Larsson, J., Pejryd, L. (2019). Investigating the effect of fabrication temperature on mechanical properties of fused deposition modeling parts using X-ray computed tomography. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(1-4), 287-296.
- Zhao, H. M., He, Y., Fu, J. Z., Qiu, J. J. (2018). Inclined layer printing for fused deposition modeling without assisted supporting structure. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 51, 1-13.

- Zheng, B., Chang, C. J., Gea, H. C. (2009). Topology optimization with design-dependent pressure loading. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 38(6), 535.
- 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.
- Zhu, J. H., Zhang, W. H., Xia, L. (2016). Topology optimization in aircraft and aerospace structures design. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 23(4), 595-622.
- Ziemian, C., Sharma, M., Ziemian, S. (2012). Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling. In *Mechanical engineering*. InTechOpen, 159-180.
- Zuza, M. (2018). Everything about nozzles with a different diameter. <https://blog.prusaprinters.org/everything-about-nozzles-with-a-different-diameter/>. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)
- 3D Prototypes and Models (2019). <http://3dprototypesandmodels.com.au/3d-printing-terminology-specifications/>. (Erişim Tarihi: 07.05.2019)
- 3Dxtech (2019). Carbon Fiber Filaments. <https://www.3dxtech.com/carbon-fiber/>. (Erişim Tarihi: 08.05.2019).

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Efecan KARAMAN
Doğum Yeri ve Yılı : Antalya, 1991
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : efecan.karaman@hotmail.com

Eğitim Durumu

Lise : Antalya Lisesi, 2009
Lisans : SDÜ, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2013
Yüksek Lisans : Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 2018
Bütünleşik Doktora : Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı,

Mesleki Deneyim

UTAŞ Savunma A.Ş.	2016-2017
Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü	2017-2018
Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	2018-

Yayınlar

Karaman, E., Çolak, O. (2019). Eriyik Biriktirme Yönteminde Farklı Üretim Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkisi. ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi, 1(2), 90-99.

Rende, H., Karaman, E., & Altındal, E. (2017). Hurdaya Ayrılmış Bir Aracın Elektrikli Araca Dönüştürülmesi. Engineer & the Machinery Magazine, 58(688).

- Karaman, E., Rende, H., Akşahin, M. F. (2019). Motor Seslerine Göre Otomobillerin Tanınması. *Engineer & the Machinery Magazine*, 60(695).
- Karaman, E., Çolak, O. (2018). Investigation of Mechanical Properties of ABS-Plus Materials Produced by Fused Deposition Modeling Method in Different Infill Rates and Orientation Angles. *3'rd International Symposium on Industrial Design & Engineering*, 22-24 Kasım 2018, Antalya, 103-103.
- Karaman, E., Çolak, O. (2018). Large Build Volume 3D Printer Design and Manufacturing. *3'rd International Symposium on Industrial Design & Engineering*, 22-24 Kasım 2018, Antalya, 104-104.

