



**ATIK PLASTİK MADDEDEN 3D YAZICILAR İÇİN FİLAMENT ÜRETİMİ
VE MEKANİK ANALİZİ**

Osman SAĞLAM

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak 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 herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Osman Sağlam

12/04/2023

ATIK PLASTİK MADDEDEN 3D YAZICILAR İÇİN FİLAMENT ÜRETİMİ VE MEKANİK ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Osman SAĞLAM

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2023

ÖZET

Günümüzde birçok üründe kullanılan plastik malzemeler hem üretim aşamasında hem de ürünün kullanımından sonra atık oluşturmaktadır. Bu atıklar yüzyıllar boyunca doğada çözünmeden kalabilmekte olup bunların geri dönüştürülmesi gezegenimiz için büyük önem taşımaktadır. Plastik esaslı malzemelerin önemli üretim yöntemlerinden biri plastik malzemenin eritilerek üst üste yığılmasını içeren ve 3D yazıcılarda yaygın şekilde kullanılan Eriyik Yığma Modelleme (EYM) yöntemidir. EYM yöntemi ile 3D yazıcılardan parça üretilebilmesi için filament adı verilen termoplastik hammaddeye ihtiyaç vardır. Bu çalışma kapsamında EYM yönteminde kullanılmak üzere Polilaktik Asit (Polylactic Acid, PLA) hammaddesinden üretilmiş çubuk formundaki malzemelerin kırılması ile elde edilen atık PLA malzemesi ile ham PLA malzemesi sırasıyla %100 PLA, %70 PLA - %30 atık PLA, %50 PLA - %50 atık PLA ve %30 PLA - %70 atık PLA olarak dört farklı karışım oranında homojen olarak karıştırılıp plastik granül üretimi gerçekleştirildikten sonra aynı oranlarda dört farklı filament üretilmiştir. Bu filamentlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi için Taguchi'nin standart L'16 deneysel tasarım yöntemi kullanılarak, Hammadde-Atık Oranı, Doluluk Oranı, Nozul Sıcaklığı, Tabla Sıcaklığı ve Baskı Hızı parametreleri ile TS EN ISO 571-2 5A standardına göre 3D yazıcıdan çekme testi numuneleri üretilmiş ve çekme testleri yapılmıştır. Elde edilen Elastisite Modülü, Çekme Dayanımı, Çekme Uzaması, Kopma Dayanımı ve Kopma uzaması değerleri Minitab programında analiz edilmiştir. Hammadde oranının Elastisite Modülü, Çekme ve Kopma Uzaması üzerinde en etkili parametre olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca nozul sıcaklığının ise Çekme ve Kopma Dayanımı üzerinde en etkili parametre olduğu tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 91417

Anahtar Kelimeler : PLA, Atık Plastik, Filament, Eriyik Yığma Modelleme, 3D Yazıcı

Sayfa Adedi : 109

Danışman : Dr.Öğr.Üyesi Ali ÖZGEDİK

FILAMENT MANUFACTURING AND MECHANICAL ANALYSIS FOR 3D
PRINTERS FROM WASTE PLASTIC MATERIAL

(M. Sc. Thesis)

Osman SAĞLAM

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2023

ABSTRACT

Plastic materials used in many products today create waste both during the production phase and after the use of the product. These wastes can remain undissolved in nature for centuries and their recycling is of great importance for our planet. One of the important production methods of plastic-based materials is the Fused Deposition Modeling (FDM) method, which involves melting and stacking the plastic material in a row and is widely used in 3D printers. In order to produce parts from 3D printers with the FDM, a thermoplastic raw material called filament is needed. In this study, waste and raw Polylactic Acid material obtained by breaking the dog bone materials produced from PLA raw material to use in the FDM method, plastic granules were produced by mixing homogeneously in four different mixing ratios as 100% PLA, 70% PLA - 30% waste PLA, 50% PLA - 50% waste PLA and 30% PLA - 70% waste PLA respectively. To examine the mechanical properties of these filaments, tensile test specimens were produced and tested from the 3D printer according to TS EN ISO 571-2 5A by using Taguchi's standard L'16 experimental design method, considering the Raw Material - Waste Ratio, Filling Ratio, Nozzle Temperature, Table Temperature and Printing Speed parameters. The obtained Tensile Modulus, Tensile Strength, Stress at Tensile Strength, Stress at Break and Strain at Break were analyzed in Minitab program. It was determined that the raw material ratio is the most effective parameter on Tensile Modulus, Stress at Tensile Strength and Strain at Break. In addition, it was observed that nozzle temperature is the most effective parameter on Tensile Strength and Stress at Break.

Science Code : 91417

Key Words : PLA, waste plastic, filament, fused deposition modeling, 3D Printer

Page Number : 109

Supervisor : Asst. Prof. Ali ÖZGEDİK

TEŞEKKÜR

Eğitim ve öğretim hayatım boyunca bana sonsuz destek olan aileme şükranlarımı sunarım.

Bu tez çalışması kapsamında desteğini hiç esirgemeyen danışmanım Dr.Öğr.Üyesi Ali ÖZGEDİK'e saygı, şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Tezimdeki deneysel çalışmalarda plastik hammadde konusunda bana destek olan EUROTEC MÜHENDİSLİK PLASTİKLERİ firmasına, başta Eurotec Satış Müdürü Sevgi PARLAK olmak üzere, Görkem ÜLKÜ, Can ALTIPARMAK, Esra BAŞARAN ve Tuğba GÜVEN'e emeklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Tezimdeki deneysel çalışmalarda filament üretimi konusunda desteklerinden dolayı FİLAMEX TEKNOLOJİ LTD. ŞTİ. Kurucu Ortağı Burak HORUZ ve diğer Kurucu Ortağı Murat OFLEZER'e teşekkür ederim.

Tezimdeki deneysel çalışmalarda çekme testlerinin yapılmasında bana destek veren AKWEL GEBZE TURKEY OTOMOTİV SANAYİ LİMİTED ŞİRKETİ'ne başta müdürüm Rui PORTUGAL olmak üzere; mühendislik müdürümüz Alparslan ÖZMEN'e ve kalite laboratuvar sorumlumuz Hüseyin UÇAN'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. ÜÇ BOYUTLU (3D) BASKI TEKNİĞİ	3
2.1. Üç Boyutlu (3D) Baskı Tekniği Yöntemleri.....	5
2.1.1. Eriyik yığarak modelleme (Fused Deposition Modeling-FDM)	7
2.1.2. Stereolitografi (Stereolithography-SLA)	8
2.1.3. Dijital ışık işleme (DLP).....	9
2.1.4. Çoklu püskürtme (Polyjet – PJ)	11
2.1.5. Lamine nesne imalatı (LOM)	12
2.1.6. Seçici lazer sinterleme (Selective Laser Sintering – SLS)	13
2.1.7. Direkt metal lazer sinterleme (Direct Metal Laser Sintering – DMLS) ...	14
2.1.8. Seçici lazer ergitme (Selective Laser Melting – SLM)	16
2.1.9. Elektron ışınıyla ergitme (EBM)	17
2.2. 3D Yazıcılarda Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu ve Yapılan Çalışmalar	19
3. 3D YAZICILARDA KULLANILAN FİLAMENTLER.....	23
3.1. Polilaktik Asit (PLA) Filamentleri	24
3.2. Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) Filamentleri	27

	Sayfa
3.3. Termoplastik Poliüretan (TPU) Filamentleri	28
3.4. Polyvinyl Alcohol (PVA) Filamentleri.....	29
3.5. Filamentlerin Mekanik Özellikleri ve Yapılan Çalışmalar	30
4. EKSTRÜZYON	39
4.1. Ekstrüzyon Makinesi	39
4.2. Kompaunder Makinesi.....	41
4.3. Soğutma Havuzu.....	42
4.4. Çekici	42
4.5. Sarıcı	43
5. MATERYAL YÖNTEM	45
5.1. Atık Plastik Granül Üretimi	45
5.2. Filament Üretimi.....	47
5.3. Proses Parametrelerinin Belirlenmesi	52
5.4. 3D Yazıcıda Test Numunelerinin Üretimi	56
5.5. Çekme Testlerinin Yapılması	59
5.6. Proseslere Ait Test Sonuçları.....	66
5.6.1. Proses 1	66
5.6.2. Proses 2	67
5.6.3. Proses 3	68
5.6.4. Proses 4	69
5.6.5. Proses 5	70
5.6.6. Proses 6	71
5.6.7. Proses 7	72
5.6.8. Proses 8:.....	73

	Sayfa
5.6.9. Proses 9	74
5.6.10. Proses 10	75
5.6.11. Proses 11	76
5.6.12. Proses 12	77
5.6.13. Proses 13	78
5.6.14. Proses 14	79
5.6.15. Proses 15	80
5.6.16. Proses 16	81
5.7. Minitab Analizi.....	81
5.7.1. Elastisite modülü (Et) analizi.....	82
5.7.2. Çekme dayanımı (σ_m) analizi.....	85
5.7.3. Çekme uzaması (ϵ_m) analizi	88
5.7.4. Kopma dayanımı (σ_b) analizi	90
5.7.5. Kopma uzaması (ϵ_b) analizi	93
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	97
KAYNAKLAR.....	101
ÖZGEÇMİŞ.....	109

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Üç boyutlu baskı tekniklerinin sınıflandırılması	6
Çizelge 3.1. Yaygın olan filamentlerin özellikleri	24
Çizelge 3.2. ABS ve PLA Filamentlerin mekanik özellikleri	31
Çizelge 5.1. Kullanılan plastik hammaddelerin kodu ve geri dönüşüm oranları	45
Çizelge 5.2. Üretilen plastik granüllere ait proses bilgileri	46
Çizelge 5.3. FilameX FX-20 PLUS teknik özellikleri	49
Çizelge 5.4. Üretilen filamentlere ait proses bilgileri.....	50
Çizelge 5.5. Proses parametrelerinin Taguchi L'16 ortogonal dizilimi deney tasarımı .	53
Çizelge 5.6. Cura programında proses parametrelerinin deney seti göre optimizasyonu	55
Çizelge 5.7. Creality Ender 3 Pro ürün parametreleri	57
Çizelge 5.8. Çekme testi parametreleri.....	63
Çizelge 5.9. Test sonuçları	65
Çizelge 5.10. Faktör bilgisi grafiği.....	82
Çizelge 5.11. Model özeti.....	82
Çizelge 5.12. E_t (Elastisite Modülü) sinyal gürültü oranları için etki tablosu	83
Çizelge 5.13. E_t (Elastisite Modülü) ortalamalar için etki tablosu	84
Çizelge 5.14. E_t (Elastisite Modülü) için varyans analizi	85
Çizelge 5.15. σ_m (Çekme Dayanımı) sinyal gürültü oranları için etki tablosu	86
Çizelge 5.16. σ_m (Çekme Dayanımı) ortalamalar için etki tablosu.....	86
Çizelge 5.17. σ_m (Çekme Dayanımı) için varyans analizi	87
Çizelge 5.18. ϵ_m (Çekme Uzaması) sinyal gürültü oranları için etki tablosu	89
Çizelge 5.19. ϵ_m (Çekme Uzaması) ortalamalar için etki tablosu	89

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.20. ϵ_m (Çekme Uzaması) için varyans analizi	90
Çizelge 5.21. σ_b (Kopma Dayanımı) sinyal gürültü oranları için etki tablosu.....	91
Çizelge 5.22. σ_b (Kopma Dayanımı) ortalamalar için etki tablosu	92
Çizelge 5.23. σ_b (Kopma Dayanımı) için varyans analizi.....	93
Çizelge 5.24. ϵ_b (Kopma Uzaması) sinyal gürültü oranları için etki tablosu	94
Çizelge 5.25. ϵ_b (Kopma Uzaması) ortalamalar için etki tablosu.....	94
Çizelge 5.26. ϵ_b (Kopma Uzaması) için varyans analizi	95

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. 3D Systems tarafından üretilen stereolitgrafi cihazı	3
Şekil 2.2. Üç boyutlu üretimin aşamaları	4
Şekil 2.3. Eriyik Yığarak Modelleme yönteminin şematik gösterimi	7
Şekil 2.4. SLA yönteminin şematik gösterimi (Çelik vd. 2013)	8
Şekil 2.5. Dijital ışık işleme (DLP) yönteminin şematik gösterimi	10
Şekil 2.6. Çoklu püskürtme (Polyjet – PJ) yönteminin şematik gösterimi	11
Şekil 2.7. Lamine nesne imalatı (LOM) yönteminin şematik gösterimi	12
Şekil 2.8. Seçici lazer sinterleme (SLS) yönteminin şematik gösterimi	14
Şekil 2.9. Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) yönteminin şematik gösterimi	15
Şekil 2.10. Seçici lazer ergitme (SLM) yönteminin şematik gösterimi	16
Şekil 2.11. Elektron ışınlı ergitme (EBM) yönteminin şematik gösterimi	18
Şekil 3.1. Filament üretim aşaması	23
Şekil 3.2. 3D yazıcılarda oldukça yaygın olarak kullanılan PLA	26
Şekil 3.3. Farklı renklerdeki ABS filament örnekleri.....	27
Şekil 3.4. BDO, HDI ve PEBA zincirlerinin yapıları.....	28
Şekil 3.5. TPU zincirinin yapısı	29
Şekil 3.6. PVA filament	30
Şekil 4.1. Ekstrüzyon makinesinin şematik gösterimi.....	39
Şekil 4.2. Ekstrüzyon makinesindeki silindirin yapısı	40
Şekil 4.3. Kompaunder makinesindeki bölümler	41
Şekil 4.4. Ekstrüzyon işleminde kullanılan soğutma sistemi	42
Şekil 4.5. Ekstrüzyon metodunda kullanılan bir çekici	43
Şekil 4.6. Ekstrüzyon metodunda kullanılan bir sarıcı	43

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. Üretilen plastik granüllerin vakumlu poşette muhafaza edilmesi	46
Şekil 5.2. FilameX FX-20 PLUS.....	47
Şekil 5.3. FX-20 Plus Extruder.....	47
Şekil 5.4. Cooler	48
Şekil 5.5. Spooler ve komparatör modülü	48
Şekil 5.6. Üretilen filamentler	51
Şekil 5.7. Filament üretimi sonrası artan plastik granüllerin vakumlanması	52
Şekil 5.8. TS EN ISO 527-2 5A deney numunesi tipi ve boyutları.....	54
Şekil 5.9. Solidworks ortamında çizilen TS EN ISO 527-2 5A deney tipi numunesi....	54
Şekil 5.10. Test numunesi üretiminde kullanılan Creality Ender 3 Pro yazıcı.....	56
Şekil 5.11. 25x25x25 mm küp.....	57
Şekil 5.12. Sırasıyla Estepper, Xstepper, Ystepper ve Zstepper değerlerine göre küp üzerindeki uzunluklar	58
Şekil 5.13. Üretilen numunenin proses numarası ve parça sırası	58
Şekil 5.14. Cura programında numune datasının konumlandırılması	59
Şekil 5.15. Üretilen numuneler.....	59
Şekil 5.16. Zwick Roell Z005 test cihazı	60
Şekil 5.17. Zwick Roell Z005 test cihazının bileşenleri.....	61
Şekil 5.18. Numunelerin fikstür üzerine yerleştirilmesi.....	61
Şekil 5.19. Numunelerin çenelere sabitlenmesi.....	62
Şekil 5.20. Şeritlerin kamera ve TestXpert yazılımı ile kontrolü.....	62
Şekil 5.21. TestXpert 3 yazılımında testlerin başlatılması	63
Şekil 5.22. Çekme testi sonrasında numuneler.....	63
Şekil 5.23. Elastisite Modülü (E_t), %1 uzamada dayanım (σ_x), Akma Dayanımı (σ_y)...	64
Şekil 5.24. Akma Uzaması (ϵ_y), Çekme Dayanımı (σ_m), Çekme Uzaması (ϵ_m)	64

Şekil	Sayfa
Şekil 5.25. Kopma Dayanımı (σ_b), Kopma Uzaması (ϵ_b), Kopma anındaki nominal uzama (ϵ_{tb})	64
Şekil 5.26. Proses 1'e ait Gerilme – Uzama grafiği	66
Şekil 5.27. Proses 2'ye ait Gerilme – Uzama grafiği	67
Şekil 5.28. Proses 3'e ait Gerilme – Uzama grafiği	68
Şekil 5.29. Proses 4'e ait Gerilme – Uzama grafiği	69
Şekil 5.30. Proses 5'e ait Gerilme – Uzama grafiği	70
Şekil 5.31. Proses 6'ya ait Gerilme – Uzama grafiği	71
Şekil 5.32. Proses 7'ye ait Gerilme – Uzama grafiği	72
Şekil 5.33. Proses 8'e ait Gerilme – Uzama grafiği	73
Şekil 5.34. Proses 9'a ait Gerilme – Uzama grafiği	74
Şekil 5.35. Proses 10'a ait Gerilme – Uzama grafiği	75
Şekil 5.36. Proses 11'e ait Gerilme – Uzama grafiği	76
Şekil 5.37. Proses 12'ye ait Gerilme – Uzama grafiği	77
Şekil 5.38. Proses 13'e ait Gerilme – Uzama grafiği	78
Şekil 5.39. Proses 14'e ait Gerilme – Uzama grafiği	79
Şekil 5.40. Proses 15'e ait Gerilme – Uzama grafiği	80
Şekil 5.41. Proses 16'ya ait Gerilme – Uzama grafiği	81
Şekil 5.42. E_t (Elastisite Modülü) ortalamalar için ana etki grafiği.....	84
Şekil 5.43. E_t (Elastisite Modülü) sinyal gürültüsü için ana etki grafiği	84
Şekil 5.44. σ_m (Çekme Dayanımı) ortalamalar için ana etki grafiği	87
Şekil 5.45. σ_m (Çekme Dayanımı) sinyal gürültüsü için ana etki grafiği.....	87
Şekil 5.46. ϵ_m (Çekme Uzaması) ortalamalar için ana etki grafiği.....	89
Şekil 5.47. ϵ_m (Çekme Uzaması) sinyal gürültüsü için ana etki grafiği	90

Şekil	Sayfa
Şekil 5.48. σ_b (Kopma Dayanımı) ortalamalar için ana etki grafiği	92
Şekil 5.49. σ_b (Kopma Dayanımı) sinyal gürültüsü için ana etki grafiği	92
Şekil 5.50. ϵ_b (Kopma Uzaması) ortalamalar için ana etki grafiği	95
Şekil 5.51. ϵ_b (Kopma Uzaması) sinyal gürültüsü için ana etki grafiği	95

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

°	derece
C	Santigrat
hz	Hertz
kg	kilogram
mm	milimetre
mm/s	milimetre bölü saniye
Mpa	Megapaskal
RPM	devir bölü dakika
V	Voltaj

Kısaltmalar

Açıklamalar

3D Yazıcı	3 boyutlu yazıcı
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
ANOVA	Analysis Of Variance
CAD	Computer Aided Design
DLP	Digital Light Processing
DMLM	Direct Metal Laser Melting
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Elektron ışınlıla ergitme
EYM	Eriyik Yığarak Modelleme
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
LOM	Lamine nesne imalatı
PC	Polikarbonat
PEEK	Poliariletereterketon
PETG	Polietilen tereftalat glikolle değişmiş

Kısaltmalar**Açıklamalar****PJ**

Polyjet

PLA

Polilaktik Asit

PVA

Polyvinyl Alcohol

SLA

Stereolitografi

SLM

Selective Laser Melting

SLS

Selective Laser Sintering

STL

Standard Triangle Language

TPU

Termoplastik Poliüretan

UV

Ultraviyole

1. GİRİŞ

Günümüzde kullanılan imalat yöntemlerinden birisi eklemeli imalat olan 3D yazıcı ile imalat yöntemidir. 3D yazıcılar, hızlı prototipleme yapabilmesi ve ikinci operasyona ihtiyaç duyulmadan numune üretilmesi nedeniyle hızla yaygınlaşmaktadır. 3D yazıcılar üretim yapabilmesi için hammaddeye ihtiyaç duyarlar. Bu hammaddeler kullanıldıktan sonra atık oluşturmakta olup bu atıklar çevreye zarar vermektedir. Atık, üretim sırasında ve ürün oluşması sonucunda meydana gelen ve üretenin işine yaramayan, çevreye ve insan sağlığına zarar verecek şekilde doğrudan veya dolaylı bir biçimde ortama verilen sakıncalı maddelerdir (Aral, 2009). Hammadde kaynaklarının sınırsız olmaması ve atık oluşumunun önüne geçilebilmesi için hurda olarak adlandırılan üretim sonrasındaki bu maddelerin güzel bir şekilde istiflenmesi ya da tekrar üretimde kullanılması çevreye vereceğimiz zararın azaltılmasında ve kaynakların daha verimli kullanılabilmesi konusunda büyük önem taşımaktadır. 3D yazıcılardan parça üretmek için kullanılan yöntemlerden bir tanesi eriyik yığarak modellemedir. Üç boyutlu parçanın modeline göre termoplastik polimerleri biriktirerek üç boyutlu geometrileri katman katman oluşturan ekstrüzyon tabanlı bir eklemeli üretim yöntemidir. Bu üretim yönteminde filament adı verilen hammadde kullanılır. Filamentler, temel prensibi granül haldeki polimer (termoplastik) ve katkı malzemelerinin yalnız veya birlikte eritilip nozullar sayesinde yeniden şekillendirme ile üretilir. Günümüzde 3D yazıcılar için kullanılan filamentlerden biri de Polilaktik Asit (Polylactic Acid, PLA) filamentlerdir. PLA filamentler, yüksek dayanıklılık, hafif esnek bir yapıya sahip olma, yüksek kullanım kolaylığı, 190°C – 220°C baskı sıcaklığı, 50°C – 65°C tabla sıcaklığı, soğuma sürecindeki çatlama ve bükülme sorunlarının yaşanmaması sebebiyle çok tercih edilmektedir (Çömez, 2019).

Bu tez çalışması kapsamında 3D yazıcılar için atık hammaddelerden filament üretilerek bu filamentlerin tekrar üretimde kullanılması konusu çalışıldı. Farklı karışım oranlarındaki plastik hammaddeler homojen olarak karıştırılmak suretiyle yeni granül plastik üretildi. Bu granüllerden sırasıyla %100 PLA, %70 PLA - %30 atık PLA, %50 PLA - %50 atık PLA ve %30 PLA - %70 atık PLA olarak dört farklı filament üretimi gerçekleştirildi. Bu filamentlerden Hammadde-Atık Oranı, Doluluk Oranı, Nozul Sıcaklığı, Tabla Sıcaklığı ve Baskı Hızı parametreleri gözetilerek 3D yazıcıda parçalar üretilip bu parçaların mekanik

analizleri yapıldı. Atık plastiklerin üretimde kullanılarak kaynakların daha verimli kullanılması sağlandı.

2. ÜÇ BOYUTLU (3D) BASKI TEKNİĞİ

Günümüzde daha kısa sürede daha az emek ve para harcanarak üretimlerin gerçekleştirilmesi amacıyla imalat sektöründe farklı teknikler geliştirilmiştir (Singh ve Chhabra, 2017). Bu tekniklerden biri de 3D baskı tekniğidir (Uygunoğlu ve Barlas Özgüven 2021). Bu teknik ardışık katmanlara malzeme eklenmesi sonucu ürün oluşturma işlemidir (Aguilar-Duque vd. 2019; Chua, Leong, ve Lim 2010; Ngo vd. 2018). Üç boyutlu modellemeler yardımıyla ortaya çıkarılan ürünler yüksek yüzey kalitesi ve ölçüsel doğruluğa sahip olup, modellenen ürünlerin montaj kabiliyeti ve kullanışlılığı oldukça fazladır. Ayrıca bu yöntem, yapılan modeller ile birlikte olası modelleme ve montaj kusurlarının kolayca ortaya çıkarılmasıyla nihai ürünün geliştirilmesine yardımcı olmaktadır (Oktay, 2015).

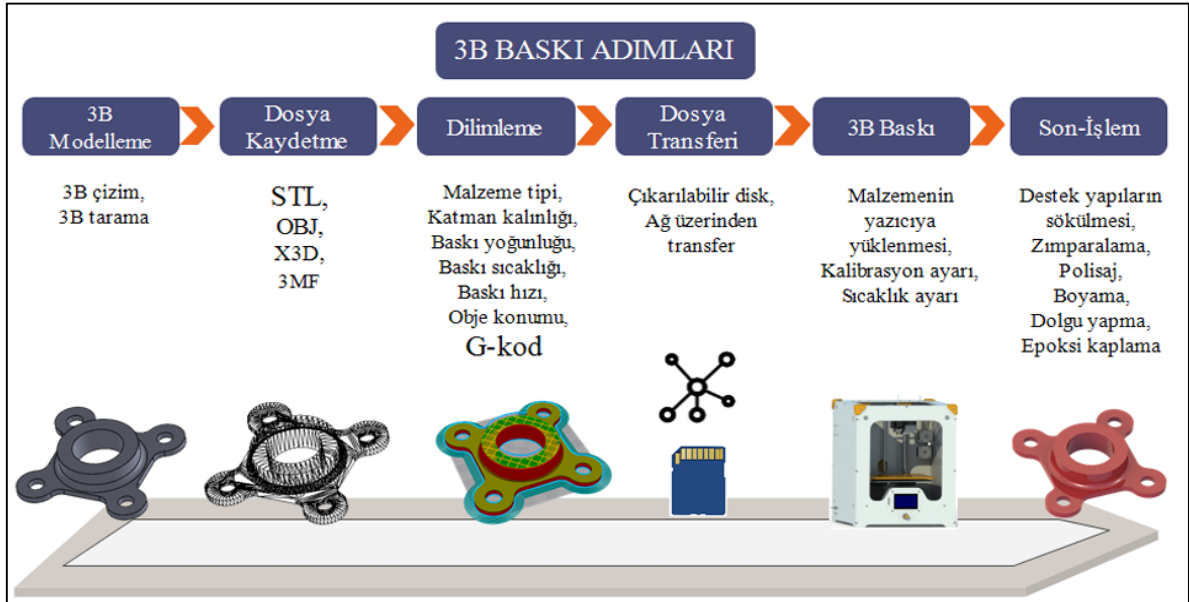
İlk olarak üç boyutlu parça üretimi Charles Hull tarafından fotopolimerin lazer ışınları ile kürleştirilerek katman katman katının oluşturulmasının keşfedilmesiyle ortaya çıkmıştır (Oktay, 2015). 1984 yılında ise Murutani, Andre ve Hull birbirine oldukça yakın teknikler için patent başvurusunda bulunmuşlardır. Başvuruda bulunulan bu patentlerin ortak noktaları bir ürünün üç boyutlu olarak üretilmesi için malzemenin katmanlar halinde eklenmesiyle oluşturulmasıdır. Üç boyutlu yazıcı teknolojisinde Şekil 2.1’de gösterilen stereolitografi adı verilen cihaz ile ilk ticari girişimi başarıyla gerçekleştiren şirket 3D Systems olarak bilinmektedir (Diksu, 2021; Gibson, Rosen, ve Stucker, 2014).



Şekil 2.1. 3D Systems tarafından üretilen stereolitografi cihazı (Gibson vd. 2014)

1986 yılında seçici lazer sinterleme tekniği ile DTM şirketi, lamine nesne imalatı ile Helisys şirketi ve katı zeminde kütleme ile Cubital şirketi patent almıştır. Günümüzde sadece DTM şirketi 2001 yılında 3D Systems şirketi içerisinde faaliyetini sürdürmektedir. 1989 yılında Scott Crump eriyik biriktirme tekniğinde patent alarak Stratasys şirketi kurulmuştur. Ayrıca aynı sene içerisinde MIT’de 3DP (üç boyutlu yazdırma) bir grup araştırmacı tarafından patenti alınmıştır. Bu araştırmacılar patentlerini şirket kurmaya değil imalat sektörü ile ilgilenmekte olan şirketlere lisanslamışlardır. 1994 yılına gelindiğinde mürekkep püskürtme yöntemi Sanders tarafından icat edilmiştir. 2001 senesinde ise reçineyi damlalar halinde püskürten bir yazdırma işlemi Objet şirketi tarafından kullanıma sunulmuştur. 2010 senesinde ise bu alandaki patentlerin sürelerinin bitmesi ile teknolojiye yöntemlerin gelişimi hızlanmış ve kullanıcıların artmasına sebep olmuştur (Diksu, 2021; Gibson vd. 2014).

Üç boyutlu üretim işleminde kalıp ihtiyacı ve hat kurulumuna gereksinim duyulmaz ve istenilen geometrinin doğrudan üretilmesi için Şekil 2.2’deki adımlar izlenir (Sürmen, 2019).



Şekil 2.2. Üç boyutlu üretimin aşamaları (Sürmen, 2019)

Sırasıyla bu adımlar; istenen parçanın üç boyutlu modelinin modelleme programları yardımıyla dijital olarak oluşturulması, oluşturulan model dosyasının katmanlara ayırmak için uygun bir dosya formatına dönüştürülmesi, modelin katmanlara ayrılması için yazılıma

aktarılarak katmanlara ayrılması, G kodlarının elde edilmesi, çıkarılan G kodlarının taşınabilir bir disk yardımıyla cihaza yüklenmesi, yüklenen G kodları ile üretimin başlatılıp katı modelin elde edilmesi ve son olarak parçadaki destek yapılarının uzaklaştırılmasıdır (Sürmen, 2019).

Üç boyutlu baskı tekniklerinin avantaj ve dezavantajları sıralanacak olursa;

- Geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha karmaşık tasarımların üretilmesine olanak sağlamak,
- Gözenekli ve düşük ağırlıklı parçaların üretimindeki zorlukları aşmak,
- Nihai geometrinin kolayca kalıp gibi yardımcı elemanlara ihtiyaç duymadan üretilmesini sağlamak, atık miktarını azaltmak ve talaşlı imalata elverişli olmayan alaşımların üretimini gerçekleştirmek,
- Üretim sonrası işlemlere gerek kalmadan tek seferde nihai ürünün elde edilmesini sağlamak gibi birçok avantaja,
- Üretim hacminin sınırlı olması ve üretilecek büyük hacimlerde sürelerin uzaması,
- Üretim sayısı çoğaldıkça maliyetin artması,
- Parça yerleşimine göre farklı destek yapılarına ihtiyaç duyması ve daha sonra bu yapıların yüzey işlemleriyle parçadan ayrılması gerekliliği,
- Üretimde meydana gelen yöne bağımlılık ve %99,9 yoğunluğa sahip ürünler elde edilmesine rağmen ürünlerde boşluk ile orantılı mekanik özelliklerin farklılığı gibi birçok dezavantaja sahiptir (Hacısalıhoğlu, 2020).

2.1. Üç Boyutlu (3D) Baskı Tekniği Yöntemleri

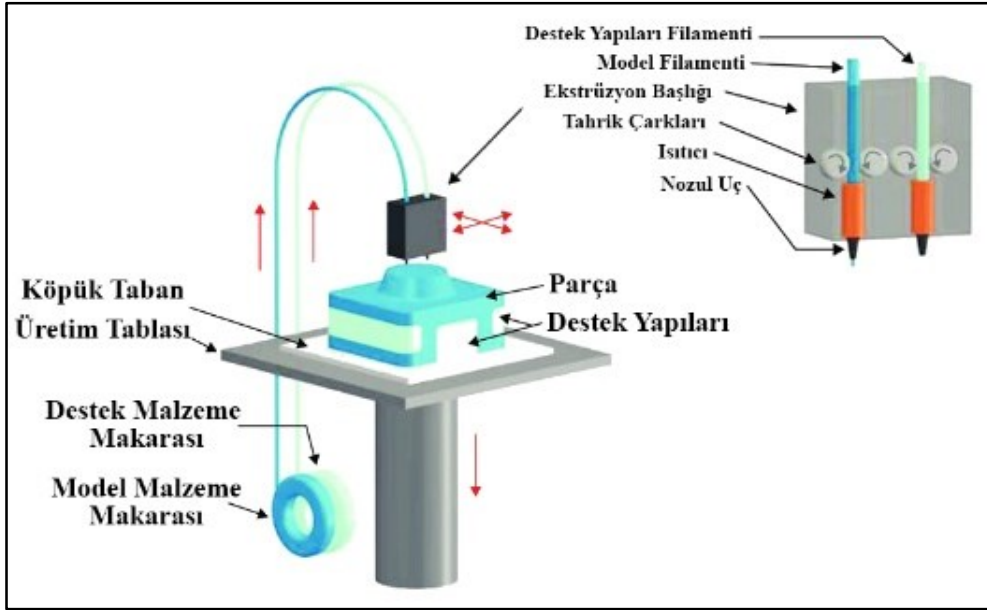
Gelişen teknoloji ve zamanla farklı yöntemlerin keşfedilmesiyle üç boyutlu baskı teknikleri günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu noktada geçmişten günümüze birçok farklı üç boyutlu baskı teknikleri geliştirilmiştir. Bu teknikler dört ana temel üzerine inşa edilmiş olup, bunlar malzeme ekstrüzyonu, bağlayıcı püskürtme, fotopolimerizasyon ve toz füzyonu yöntemleridir (Diksu, 2021). Günümüzde sıklıkla kullanılan üç boyutlu baskı tekniği yöntemleri Çizelge 2.1’de ayrıntılı olarak verilmiş ve karşılaştırılmıştır (Asadollahi-Yazdi, Gardan, ve Lafon 2016; Calignano vd. 2017; International 2012; Sürmen, 2019).

Çizelge 2.1. Üç boyutlu baskı tekniklerinin sınıflandırılması (Sürmen, 2019)

TİP	KATEGORİ	YÖNTEM	TEKNOLOJİ	MALZEME	GÜÇ KAYNAĞI	ÖZELLİKLER
SIVI	Eriyik	Malzeme ekstrüzyonu	FDM	Termoplastik	Termal Enerji	- Düşük yazıcı maliyeti - Çoklu malzeme ile baskı - Yüksek mukavemet - Düşük parça çözünürlüğü - Zayıf yüzey iş-sonu - Düşük baskı hızı
	Polimerize edilebilir.	Fotopolimerizasyon	SL (SLA)	Fotopolimer, Seramik	UV Işını	- Yüksek baskı hızı - Yüksek parça çözünürlüğü - Yüksek detay - Malzeme maliyeti yüksek
			DLP		Projeksiyon	- Yüksek baskı hızı - Çözünürlük projeksiyonun piksel boyutuyla sınırlıdır
		Malzeme Püskürtme	PJ	Fotopolimer, WAX	Uv ışını	- Çoklu malzeme ile baskı - İyi yüzey iş-sonu - Yüksek doğruluk - Yüksek detay
KATI	Yapışık Objeler	Sac laminasyon	LOM	Kâğıt, Plastik film, Metalik sac, Seramik bant	Lazer Işını	- İyi yüzey iş-sonu - Yazıcı, malzeme, proses maliyeti düşük - Büyük boyutlu malzeme basabilme - Dikey yönde zayıf mukavemet
TOZ	Eritme	Toz yataklı eritme	SLS	Poliamid, Polimer	Yüksek-Güçlü Lazer Işını	- Yüksek doğruluk - Yüksek detay - Tam dolu parça üretimi - Yüksek mukavemet - Destek yapıları gerekmez
			DMSL	Metal tozu, Seramik tozu		
			SLM			
			EBM			
	Direkt enerji depolama		LENS	Erimiş metal tozu	Lazer Işını	- Hasarlı ve aşınmış parçaları tamir edebilme - Son-işlem gerektirir
			EBAM			
Yapıştırma	Yapıştırıcı püskürtme	BJ	Seramik tozu, Metal tozu, Kum	Termal Enerji	- Renkli obje baskısı - Destek yapıları gerekmez - Geniş malzeme seçeneği - Yüksek baskı hızı - Son-işlem için infiltran malzeme gerektirir - Düşük dayanım - Yüksek gözeneklilik	

2.1.1. Eriyik yığarak modelleme (Fused Deposition Modeling-FDM)

Eriyik yığarak modelleme (FDM), üç boyutlu parçanın modeline göre termoplastik polimerleri biriktirerek üç boyutlu geometrileri katman katman oluşturan ekstrüzyon tabanlı bir eklemeli (üç boyutlu) imalat yöntemidir. Fused Filament Fabrication (FFF) diye de bilinen bu teknolojiye makaralara sarılmış, genelde PLA, ABS ve karbon fiber malzemelerden elde edilmiş filamentler kullanılır.



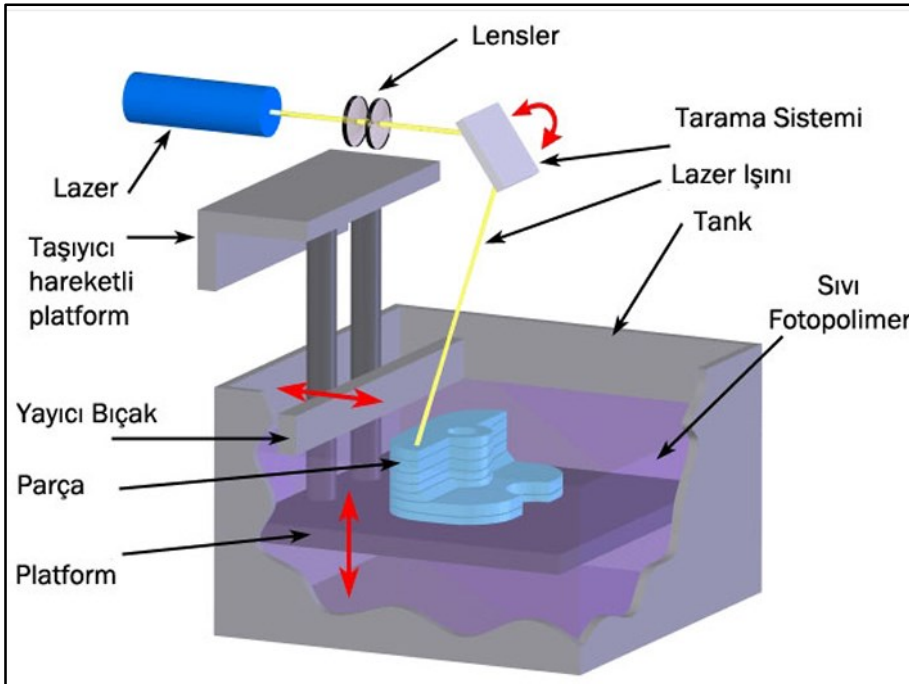
Şekil 2.3. Eriyik Yığarak Modelleme yönteminin şematik gösterimi (Cailleaux vd. 2021)

Yarı erimiş termoplastik malzemenin biriktirilmesi, sıcaklık kontrollü bir ekstrüzyon başlığı tarafından uygulanır (Boschetto, Giordano, ve Veniali 2013; Chua vd. 2010; Tseng vd. 2018). FDM teknolojisi, parçadaki desteklerin kolay ayrılabilmesi, minimum malzeme sarfiyatı ve basit uygulama prosedürü ile karmaşık geometrilerin üretilmesine olanak sağlar. Teknoloji, havacılık, otomotiv ve biyomedikal alanlarında prototip ve kalıp üretimi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Nadiren nihai ürünlerin imalatında da kullanılır, çünkü FDM ile üretilen parçaların boyutsal doğruluğu ve yüzey kalitesi hala tartışmalı bir konu olup, üzerinde çalışmalar devam etmektedir. Prosesin geliştirilmesi ile nihai ürün olarak fonksiyonel parçaların oluşturulması amaçlanmaktadır (Ingole vd. 2009; Ivanova, Williams, ve Campbell 2013; Sağbaş, 2016; Singh vd. 2017).

2.1.2. Stereolitografi (Stereolithography-SLA)

Fotopolimer malzemeler 1960'lı yılların sonlarına doğru geliştirildi. Fotopolimer malzemeler ultraviyole ışınlarına maruz bırakıldıklarında kürleşebilen malzemelerdir. 1980'li yıllarda Charles Hull fotopolimer malzemelerin lazer ışınları ile katılaşmasını destekleyen deneysel çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmaların sonucunda fotopolimer malzemeler ile 3D (üç boyutlu) katı parçalar üretmeyi başarmıştır. Üretilmek istenen parça katmanlar halinde olup bir katmanı diğer bir katmanın üzerine katılaştırılarak elde edilmiştir. Bu çalışmanın sonucunda ise stereolitografi (SLA) teknolojisi başlamıştır. Charles Hull bu çalışma için 1984 yılında patent başvurusunda bulunmuştur. Prototipler üretmek, üretim parçaları üretmek ve modeller yapmak için 3D Systems şirketini kurmuştur.

SLA teknolojisinin esas çalışma prensibi bir bilgisayar programı ile tasarlanan veriye uygun olarak fotopolimer reçine dolu bir hazneye ultraviyole ışınlar göndererek reçineyi kürleştirmek ve istenilen şeklin katı olarak oluşmasını sağlamaktır. Katılaşma işlemi ise tabaka tabaka gerçekleştirilir. Ultraviyole ışınlar (UV) ile bir tabakanın katılaşması tamamlandıktan sonra platform bir tabaka kalınlığında konumunu değiştirerek yeni tabakanın katılaşması tamamlanan tabaka üzerine gerçekleştirir. SLA cihazının şematik gösterimi Şekil 2.4'te verilmiştir (Gibson vd. 2021).



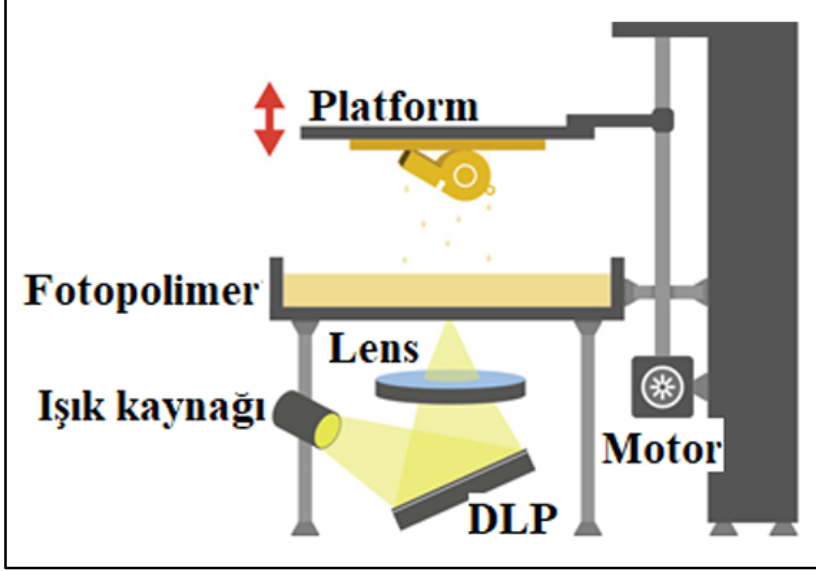
Şekil 2.4. SLA yönteminin şematik gösterimi (Çelik vd. 2013)

Bu yöntemde kullanılan polimer reçineler çapraz bağlara sahiptir. Bu yüzden yeniden kullanılması için eritilemezler. Diğer polimerlere göre daha az stres gevşemesi meydana gelir. SLA’da ilk kullanılan reçineler 1989-1990 yılları arasında patenti almıştır. Bu patenti alınan reçineler akrilatlardan üretilmiştir. Basılan parçaların dayanımları daha düşüktür. 1988’li yıllarda Japonya’da SLA teknolojisi için epoksi reçineler üretilmiştir. Bu reçinelerin kullanımıyla akrilat reçinelere göre daha sert parçalar elde edilmiştir. Elde edilen bu parçaların doğruluğu daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Akrilat reçinelerin kullanıldığı parçalarda %5- %20 arasında bir büzülme gözlenmiştir. Bunun dışında epoksi reçinelerin kullanımı sonucunda meydana gelen büzülme oranı ise %1- %2 arasındadır. Bu epoksi reçinelerin kürleşme hızı düşüktür. Ayrıca epoksi reçinelerle üretilen parçalar daha gevrek bir yapıya sahiptir. Ancak epoksi reçineleri kullanmadan önce akrilat reçine eklenmesiyle bu gevrek yapının biraz daha azaltılması sağlanabilir. Bunun sonucunda da günümüzde kullanılan SLA reçinelerin birçoğu akrilat reçinelerin belirli oranlarda eklendiği epoksi reçinelerdir. Bu karma reçinelerin kullanımı üretilen parçaların dayanım özelliğini iyileştirmiştir. Epoksi reçinelerde bir diğer dezavantaj ise neme karşı gösterdikleri hassasiyetleridir. Parça için kullanılan malzeme aynı zamanda destek yapıları için de kullanılır. Bu yöntemde parçalar çok ince katmanlar halinde üretildiğinden diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında yüzey kaliteleri ve doğrulukları daha iyidir. Günümüzde fotopolimer malzemeler, geçmişte kullanılanlarla kıyaslandığında oldukça yüksek mekanik ve fiziksel özelliklere sahiptirler. Malzeme teknolojilerinde ilerleme ile birlikte daha yüksek sıcaklık direnci, süneklik ve mukavemet özelliği sunan fotopolimer malzemeler geliştirilmeye devam etmektedir. Bu malzemelerin dezavantajı ise herhangi bir UV ışını koruyucu kaplamalar ile kaplanmazlarsa parçalarda deformasyonlar görülebilir. Seramik veya metal malzemelerin solüsyonları da tıpkı polimer bazlı malzemeler gibi SLA cihazlarının türevlerinde kullanılarak üretim yapılabilir. Bu yöntem endüstride özellikle tasarımcılar tarafından prototiplerin üretiminde ve tıp alanında modelleme işlemlerini gerçekleştirmek üzere kullanılmaktadır (Diksu, 2021).

2.1.3. Dijital ışık işleme (DLP)

Stereolitografi işlemi ile oldukça benzer olan dijital ışık işleme yönteminde de fotopolimerler kullanılır. Bu yöntem, Şekil 2.5’te görüldüğü gibi fotopolimer dolu bir havuza UV ışını gönderir. Polimer havuzunun altında yerleşik bir projektör bulunur ve bu projektör üretilecek geometrinin dilimlenmiş görüntüsünü reçine dolu havuzun katmanlarına

yansıtır (Wu vd. 2016). UV ışığı gönderilen polimer katmanı ışığın etkisi altında kalarak sertleşir ve bu işlem üretim bitinceye kadar devam eder.

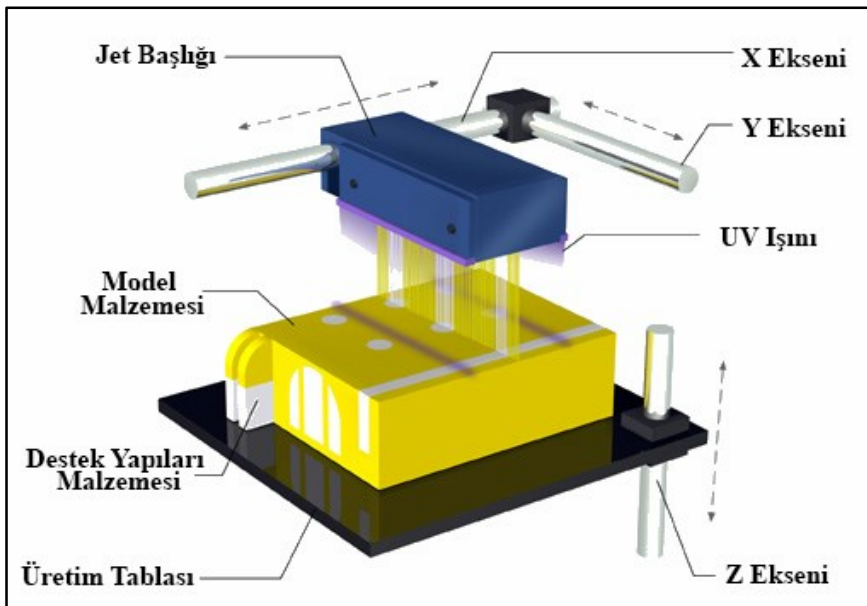


Şekil 2.5. Dijital ışık işleme (DLP) yönteminin şematik gösterimi (Sürmen, 2019)

Dijital bir projeksiyon tek DLP katmanının görüntüsünü senkronize olarak tüm reçine üzerine yansıtır. Bu yöntemin bir diğer temel bileşeni de dijital mikro ayna cihazıdır. Bu cihaz içerisinde, önceden tasarlanan 3D CAD modelin ya da tasarımın katmanını reçineye UV kaynağından gelen ışını yönlendirerek yansıtmak için birçok alüminyum mikro ayna içerir. Çözünürlüğü yüksek olan bir yapı üretmek üzere, katman kalınlığı, katmanların sertleşme süresi ve UV ışınlarının yoğunluğu gibi parametrelerin ayarlanması gerekir. DLP’de ultraviyole ışık kaynağı değişmez ve tek seferde reçinenin tüm katmanlarını işler, SLA’da da ışık kaynağı tabaka geometrisini noktadan noktaya hareket ettirerek oluşturur. Bu reçinenin sertleşmesi noktadan noktaya yapıldığından dolayı SLA üç boyutlu (3D) baskı, DLP üç boyutlu (3D) baskıya göre kalitesi daha iyidir ve ve daha doğrudur. Fakat, DLP 3D yazıcı hızlı çalışır ve yazdırma süresi önemli ölçüde azalmış olur. DLP 3D yazıcıda, UV ışık kaynağının yoğunluğu incelenebilir ve bu sayede reçine üstündeki etkisi kontrol edilebilir. SLA’da lazer ışınının yoğunluğunu ayarlamak zordur ve çeşitli reçine etkisi için lazer ışınının tümüyle değiştirilmesi gerekir. DLP bir seferde karmaşık ve küçük parça oluşturulması daha uygunken, SLA’da ise bir seferde birkaç kompleks parçanın oluşturulması daha uygundur (Olam, 2021).

2.1.4. Çoklu püskürtme (Polyjet – PJ)

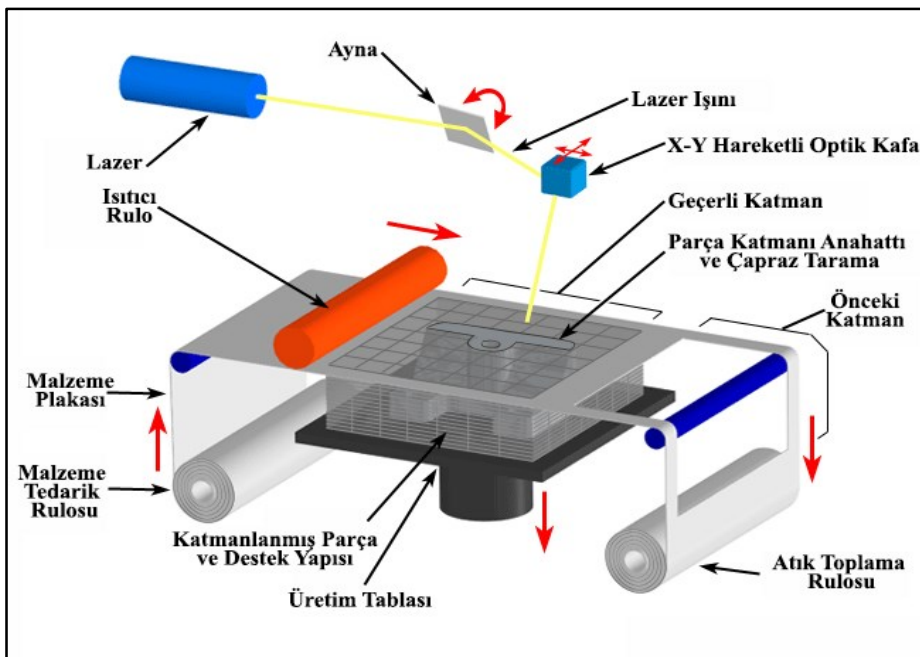
Fotopolimer malzeme kullanarak katı cisim üreten bir diğer üç boyutlu baskı yöntemi de çoklu püskürtme (polyjet) yöntemidir. Senkronize olarak bir veya birden fazla malzemeyi basabilen ve inkjet teknolojisi ışığında çalışan bu yöntemle renkli parçaların da hızlı bir şekilde üretilmesi mümkündür (Wong ve Hernandez, 2012). Nesnenin istenen kısımları bu teknoloji sayesinde gevrek veya sünek olarak ayarlanabilir. Bu sayede tek bir parçada farklı mekanik özellikler içeren bölümler oluşturulabilir. Bu yöntem özellikle detaylı geometrilere ve pürüzsüz yüzeylere sahip parçaların üretiminde idealdir. Temel olarak çoklu püskürtme sistemi, SL baskı teknolojisi ile mürekkep püskürtmeli iki boyutlu yazıcıların birleştirilmiş haline benzer (Sürmen, 2019). Basım Şekil 2.6’da gösterildiği gibi tablaya püskürtülen reçineye UV ışını kullanılarak kürleştirme işi yapılır ve diğer 3 boyutlu baskı teknolojilerinde yapıldığı gibi benzer süreç dahilinde oluşturulan tabakanın üzerine diğer tabaka eklenerek parçanın üretimi tamamlanmış olur. Farklı malzemelerin kullanılabildiği Polijet imalat teknolojisi ile destek yapıları rahatlıkla temizlenebilen ve suyla çözülebilen formda hazırlanabilmektedir (Adamidis, Alber, ve Anastasopoulos, 2018). Bu destek kısımların temizlenmesi problemsiz bir şekilde olmakta ve temizleme işleminin sonucunda dış yüzeyde iz kalmamaktadır. Bu durumda da imalat sonrasında destek malzeme kaynaklı yüzey hataları en az derecede tutulmaktadır (Çetin, 2022).



Şekil 2.6. Çoklu püskürtme (Polyjet – PJ) yönteminin şematik gösterimi
(www.cadimensions.com)

2.1.5. Lamine nesne imalatı (LOM)

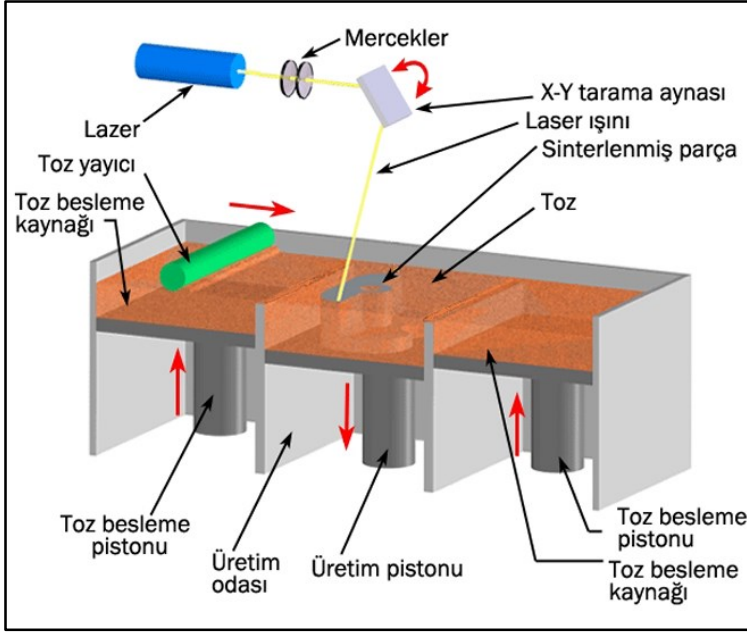
Lamine nesne imalatı (LOM) eklemeli imalat süreci Beaman tarafından ortaya atılmış olup, DiMatteo tarafından 1974 yıllarında patenti alınarak ticarileştirilmiştir. Alınan bu patent ile tek tabaka malzemeden tabakalar halinde iki boyutlu yüzey geometrinin parçalarını kesebilmek için bilgisayar ile çalışan bir araç sunulmuştur. Her işlem adımında parçalar devamlı olarak birbirine yapıştırılmış olan bir yığının en üst tabakasından kesilmesi ile üretilir. Lazer bir parçanın her tabakasının dış çizgisini keser ve kesim olduktan sonra, platform tabaka kalınlığına (0.002-0.020 inç) eşdeğer bir şekilde iner. Daha önceden bırakılmış olan tabakaların üstüne farklı bir tabaka plaka besleme sistemi ile sürülür. Daha sonra platform yavaşça yükselir ve ısıtılmış silindir yeni tabakaya basınç uygulayarak bir önceki tabakaya yapıştırır. Katman kesildikten sonra ise yapı esnasında parçaya destek sağlamak için atık malzeme yerinde sabit kalır. Bu şekilde pervaneler, prototip nesneler veya havacılık için kanat profilleri için fazlasıyla karmaşık geometriler elde edilebilir (Olam, 2021). Lamine nesne üretiminin (LOM) Şekil 2.7’de şematik olarak gösterimi verilmiştir.



parça üretimine ve çok olan malzemenin destek yapıları olarak kullanılmasına izin verir veya tabakalar önce kesilir daha sonra lamine edilebilir. Özetle LOM prosesine göre hızlı bir prototipleme tekniği gibi üretim prosesidir. Diğer eklemeli imalat yöntemlerinde olduğu gibi parça üretimi CAD programı ile tasarlanmaktadır. CAD datası STL formatına çevrilir (Diksu 2021). Bir kesme aparatı veya lazer ışını kullanılarak parça oluşturmak için katı bir nesne kesilir ve CAD diyagramındaki geometrik koordinatlarda yollarını kesebilir. İmalat işlemi esnasında katı nesne tabakalı bir biçimde birleştirilmiş plastik veya metal lamineye yapıştırılmış olan tabaka olabilir. LOM, diğer prototip oluşturma tekniklerinden daha hızlı ve ucuza taslak modeller oluşturmayı mümkün kılmaktadır (Çetin 2022; Dermeik ve Travitzky, 2020).

2.1.6. Seçici lazer sinterleme (Selective Laser Sintering – SLS)

Katı cismi oluşturmak üzere CAD geometrik model üzerinde kalan alanlardaki tozun her seferinde katman katman olarak eriterek birleştirmek için lazer ışını kullanan bir yöntemdir. Tozların birbirine kolayca yapışması ve nihai ürünlerdeki hataların giderilmesi için erime yapılan noktaların hemen altındaki bir sıcaklığa önceden ısıtılması gerekir. Ayrıca bu işlem lazerle ergitme işleminde kullanılacak güç miktarının da düşüşüne olanak tanır. Tozlar kademeli bir şekilde katman katman olarak CAD parça geometrisini meydana getiren katı bir cisme bağlanır. Bu yöntemde katman kalınlığı yaklaşık olarak 0,075- 0,50 mm'dir. Metaller gibi oksidasyona karşı direnci düşük olan tozlarla seçici lazer sinterleme işlemi yapılırken, üretilecek parçanın hasara uğramasının en aza indirgenmesi için vakuma alınmış ortama azot gazı doldurularak gerçekleştirilir (Groover, 2012).



Şekil 2.8. Seçici lazer sinterleme (SLS) yönteminin şematik gösterimi

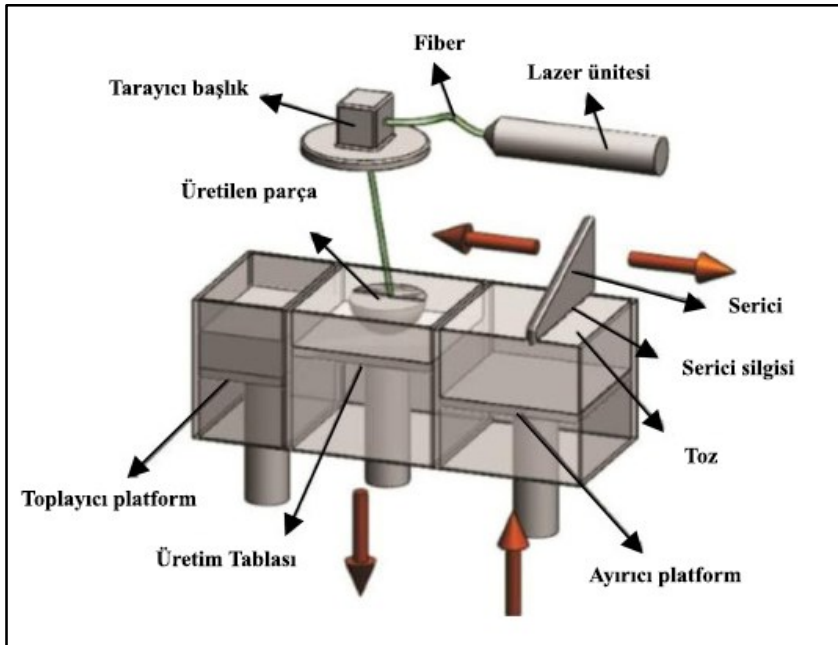
Seçici lazer sinterleme yönteminin, erimiş tozlardan bir havuz oluşturan DMD, LENS ve LMD yöntemlerinden farkı besleme yatağında bulunan tozların diğer tarafa serilmesidir. Parça üzerinde önceden sinterlenmiş ve katılaşmış katman üzerine bir rulo yardımıyla ince bir katman oluşturularak kendinden önceki katmana tozların kaynaştırılması sağlanır. İşlem bu sırayı takip ederek parça geometrisinin tamamı oluşturulur. Şekil 2.8’de SLS tekniği şematik olarak gösterilmiştir (Subbiah, 2015).

2.1.7. Direkt metal lazer sinterleme (Direct Metal Laser Sintering – DMLS)

Direkt metal lazer sinterlemenin (DMLS) 1990’lı yıllar arasında Leuven Üniversitesi’nde ilk çalışmaları yapılmıştır. DMLS yöntemi isminden de anlaşılacağı üzere metal tozlarını lazer ışınlarıyla sinterleyen eklemeli bir imalat yöntemidir. Direkt metal lazer sinterleme katkı üretiminin en verimli biçimlerinden biri kabul edilmiş olan 3D baskı teknolojisidir. Bu sinterleme prosesi seçtiğiniz ortamdaki parçacıkların beraber birleştikleri noktaya kadar ısıtılarak oluşur. Bu işlem birçok farklı metal alaşımlardan parçalar oluşturmada kullanılır. Polimer bazlı malzemeler ve belirli metal alaşımları ile çalışmak için tasarlanmış olan başka birçok 3D baskı tekniğinden daha yaygın bir hale getirmektedir. Havacılık veya otomotiv endüstrileri gibi yüksek basınçlı ortamda kullanılacak olan parçaları hatasız bir şekilde oluşturma yeteneğine sahiptir. Direkt metal lazer sinterlemenin ihtiyaç duyulan parçaları oluşturabilmek için metal alaşımları kullanmasına rağmen, cam, SLS seramik, birçok sayıda

plastik türü ve farklı metal malzemelerden parçalar oluşturmak için kullanılmaktadır. Hem SLS hem de DMLS teknolojisinin maliyeti düşük olmasına rağmen, her iki üretimin de parça yelpazesi oldukça geniştir. Şekil 2.9’da da görüldüğü üzere DMLS ve SLS yazıcılar bir parça oluşturulmasında benzer 3D baskı teknolojilerini kullanır (Toth, Hudak, ve Zivcak, 2014). Fakat, DMLS yöntemi daha çok yapısal olarak daha düşük mukavemete sahip ve daha fazla detaylı parçaların üretiminde rol almaktadır (Olam, 2021).

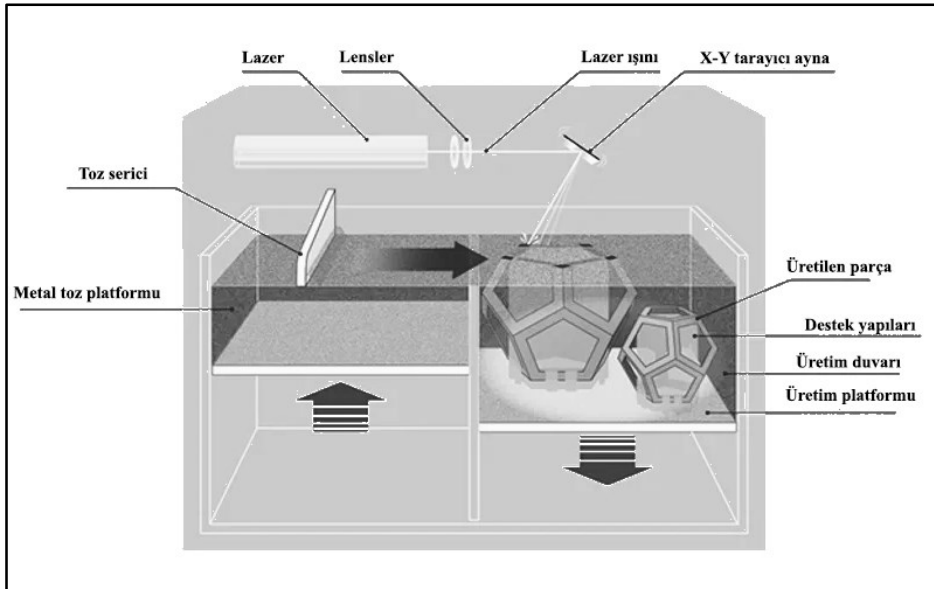
Tüm eklemeli imalatlı üretimlerde olduğu gibi bu üretimde de çizimi hazırlanan parça önce STL formatına çevrilir, daha sonra bir yazılım aracıyla STL dosyası katmanlara ayrılır. Katmanlara ayrılan parça cihaz içerisinde bir yere konumlandırılır ve konumu belirlenen yerlere lazer ışını vurarak tozu eritir. Her katman arasında bir rulo yardımıyla katman kalınlığı kadar toz serilir ve lazer ışını sıradaki katman için tekrar belirli bölgeleri tarar. Bu işlem parça üretilinceye kadar devam eder. Bu işlemde kullanılan başlıca toz partikülleri paslanmaz çelik, alüminyum ve titanyumdur. Bu tozlar DMLS yöntemi ile kimyasal açıdan değişikliğe uğrar (Tokdemir, 2022). Ayrıca bu işlemde yüksek lazer güçlü başlıklar kullanılmasına rağmen malzeme olarak sadece metal tozu üretilebilir (Hıra, 2019).



Şekil 2.9. Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) yönteminin şematik gösterimi

2.1.8. Seçici lazer ergitme (Selective Laser Melting – SLM)

Eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan Seçici Lazer Eritme (SLM) yöntemi, toz halindeki malzemenin lazer ile tamamen eritilmesi ve kontrollü katılaştırma prensibine dayanmaktadır (Kruth vd. 2010). İlk kez 1980’li yılların sonlarında kullanılmaya başlanan ve son yıllarda karmaşık şekillerin üretimi ile birçok endüstriyel alanda yaygınlaşan SLM yöntemi, özellikle otomotiv, medikal, havacılık ve askeri alanlarda dikkat çekmektedir. (Guo vd. 2017; Thompson vd. 2015; Yan vd. 2014). Bu yöntem, nihai ürüne yakın geometriler sağlamada, ürün geliştirmeyi giderek hızlandıran ve farklı tasarımların hızlı üretimini sağlayan, atık malzeme miktarını azaltan ve üretim süresini azaltan çevre dostu bir yaklaşımdır (Ahn 2011; ElMaraghy vd. 2013; Ford ve Despeisse 2016; Ituarte vd. 2015; Kaya vd. 2021; Levy, Schindel, ve Kruth 2003; Piili vd. 2015). Bu yöntemde lazer ışınının katman katman serilen toz üzerine yönlendirilerek seçici olarak tozun eritilmesi yardımıyla istenilen geometri elde edilir. Lazer ışını sayesinde bir eritilen toz bir eriyik havuzu oluşturur ve eriyik havuzu hızla katılaşarak soğur. Soğuyan katman üzerine tekrar toz serilir ve tekrar lazer vuruşu yapılır. Bu işlem istenilen geometrideki parçanın üretimi bitinceye kadar devam eder. Özellikle %100’e yakın doluluk oranına sahip parçaların üretildiği bu yöntem üretim sonrası ikincil işlemlere duyulan ihtiyacı azaltırken zamandan da tasarruf sağlayan Şekil 2.10’da şematik olarak gösterilen toz yatak esaslı bir eklemeli imalat yöntemidir (Gençoğlu, 2021).

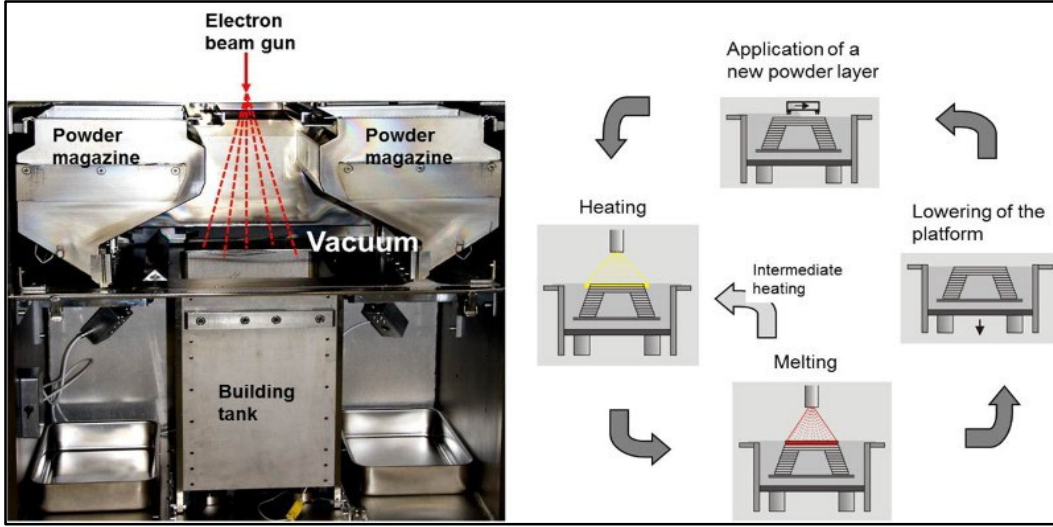


Şekil 2.10. Seçici lazer ergitme (SLM) yönteminin şematik gösterimi
(www.additively.com)

Günümüzde kullanılan en önemli üç boyutlu baskı teknolojilerinden biri olan seçici lazer ergitme hem seri hem de hızlı prototip imalatında yer alır. Metal katkılı üretim türlerinden biri olan seçici lazer ergitme aynı zamanda doğrudan metal lazer ergitme (DMLM) olarak da adlandırılmaktadır. Seçici lazer sinterleme ile arasındaki en büyük fark tozların düşük ergime noktalarına getirilmeden doğrudan toz malzeme ile üretim yapması olarak bilinmektedir. Bir diğer farkı ise seçici lazer sinterlemede kullanılan lazerin seçici lazer ergitme işleminde kullanılabileceğine göre daha düşük güçte olmasıdır. Bu üretim yöntemi ile üretilen malzemelerde en büyük sorun yüksek sıcaklıklardan dolayı meydana gelen artık gerilmelerdir. Üretim sırasında aşırı sıcaklık farkı dolayısıyla ortaya çıkan bu artık gerilmeler parçalar üzerinde bozulmalara neden olur. Fakat malzemeyi oda içerisindeki sıcaklığı yüksek ve sabit bir seviyede tutmak ya da malzemeyi önceden ısıtmak bu gerilmelerin azalmasına yardımcı olur (Bian, Shamsaei, ve Usher, 2017).

2.1.9. Elektron ışıyla ergitme (EBM)

Metal tozundan doğrudan yoğun üç boyutlu parçalar oluşturmak üzere bilgisayar kontrollü elektron tabancası kullanan en son teknoloji eklemeli imalat yöntemlerinden biri de elektron ışıyla ergitme yöntemidir (Marrey vd. 2019). Diğer eklemeli imalat yöntemlerine paralel bir şekilde katman katman olarak parçaları oluşturur. 1997 senesinde İsveç'te bulunan Arcam AB şirketi tarafından ilk kez kullanılan EBM makineleri, otomotiv, havacılık ve tıp alanında oldukça yaygın kullanılmaktadır. Bu teknolojiye temel prensip, vakum altında bulunan farklı toz katmanlarının bir elektron ışını yardımıyla seçici olarak eritilerek üç boyutlu nesnelerin üretilmesidir. Şekil 2.11'de gösterildiği üzere bir tungsten filamanından yayılan elektron ışını enerji kaynağı olarak kullanılır ve ışının konum ile çapı manyetik bir bobin tarafından kontrol edilir (Azam vd. 2018; Olam, 2021).



Şekil 2.11. Elektron ışınıyla ergitme (EBM) yönteminin şematik gösterimi (Körner, 2016)

EBM yöntemi toz sinterleme esnasında elektron ışınının enerjisini kullanmanın bir yöntemidir (Çetin, 2022). Bu ergitme süreci SLM'ye çok benzemektedir. Fakat, bu iki süreç arasında bazı farklılıklar vardır. Toz parçacıkların eritilebilmesi ve füzyonu için lazer ışınının yerine elektron ışını kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıkta tutulan toz yatağı üretimden sonra soğuması için belirli sürenin geçmesi gerekmektedir.

Elektron ışınıyla ergitme süreci ışın tarama hızı, ışın gücü, ışın hattı aralığı, ışın çapı, ön ısıtma sıcaklığı, plaka sıcaklığı, tarama stratejisi gibi süreç parametreleri kapsar. Proses parametrelerinin optimizasyonu SLM prosesinden çok daha zordur ve EBM yalnızca sınırlı malzemelerde kullanılır. Örneğin, Ti6Al4V, CoCrMo, Ti grade 2, Inconel 718'dir. Bu proses süreci çok yavaştır ve bu yüzden parçaları oldukça pahalı hale getirir. Buna ek olarak hem kafes yapısı hem de parçaların boyutu bir hücrenin en düşük boyutu açısından sınırlamalar mevcuttur. Ayrıca üretim platformunun alt yüzeyinden daha büyük parçalar ilk katmanların boyu üretim platformunun alt yüzeyinden küçük olması koşuluyla üretilebilir. SLM'ye göre EBM işleminde üretim sırasında atıl atmosfer yerine vakum ortamı kullanılarak parçaların oksitlenmesi engellenir. Aynı zamanda bu vakum ortamı toz partikülleri tarafından absorbe edilen gazların gözenek oluşturmasını engelleyecektir. Uçucu bileşenlere sahip olan Mg, Bi, Zn, Pb gibi alaşımların üretimi bu yöntemde tercih edilmektedir (Çetin, 2022; Konda Gokuldoss, Kolla, ve Eckert, 2017).

2.2. 3D Yazıcılarda Üretim Parametrelerinin Optimizasyonu ve Yapılan Çalışmalar

3D yazıcılar ürün kalitesini ve malzemenin mekanik özelliklerini değiştiren çok sayıda parametreye sahiptir. Özellikle filamentlerin kullanıldığı FDM yazıcılarda parçaların yüzey kalitesi, doluluk oranı ve mekanik özellikleri üzerinde işlem parametrelerinin önemli bir etkisi vardır. Bu parametreler tarama açısı, hava boşluğu, yoğunluk, inşa oryantasyonu, besleme hızı, katman kalınlığı ve tarama genişliğidir. Finiş işlemleri ve FDM proses parametre optimizasyonu ile ortaya çıkan ürünün yüzey kalitesinin artırılması için birçok araştırma yapılmıştır. Finiş işlemleri zaman alıcı ve maliyetli olduğundan yüzeylerin daha iyi olabilmesi için eklemeli imalat proseslerinde parametre optimizasyonu gereklidir (Singh vd. 2017).

Literatür incelendiğinde üretilen parçadaki yüzey kalitesini en çok etkileyen FDM parametresinin katman kalınlığı olduğu görülmüştür. Aynı zamanda parçanın inşa oryantasyonu, iz genişliği, biriktirme hızı ve ekstrüder sıcaklıkları gibi parametreler FDM ile yazılan parçaları yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir (Akan, 2015; Anitha, Arunachalam, ve Radhakrishnan 2001; Vasudevarao vd. 2000).

Ahn ve arkadaşları, katman kalınlığının ve kesit şeklinin katmanlar arasındaki örtüşme ve yüzey açısının oluşturulan parçanın yüzey kalitesi üzerindeki etkisini incelemek üzere bir model geliştirmişlerdir (Ahn, Kim, ve Lee, 2009).

Martinez ve arkadaşları FDM ile üretilmiş nihai ürünlerin yüzey kalitesinin artırılması için en iyi proses parametrelerini seçmek üzere Taguchi deneysel tasarımı ve ANOVA analizi yapmıştır (Martínez vd. 2012).

Diksu tarafından yapılan bir çalışmada katkı malzemeleri kullanılarak üretilen kompozit ABS ile katkısız bir şekilde üretilen ABS filamentinin mekanik özellikleri ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. ABS filamentinin akma dayanımını artırmak amacıyla katkı olarak karbon fiber tozu eklenmiştir. Yüzde uzama miktarını artırmak için de TPU katkısı eklenmiştir. Bu filamentlerin mekanik özellikleri, çekme mukavemeti testi uygulanarak karşılaştırılmıştır. Uluslararası standartlarda polimer malzemelerin çekme testi için en yaygın olarak uygulanan çekme testi ASTM D638 TİP 1 için yapılmıştır. Karbon fiber tozunun üç farklı yüzdesinin eklendiği tüm filamentlerin akma dayanımında ve çekme

dayanımında bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %20 ve %30 TPU ilave edilen ABS filamentinin akma dayanımı saf ABS filamente göre azaldığı görülmüştür. Buna karşılık ağırlıkça %10 TPU ilave edilen ABS filamentinin akma dayanımı saf ABS filamente göre arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Aynı durum filamentlerin çekme mukavemeti için de meydana geldi. Elastisite modülleri incelendiğinde, %10 katkı ile filament modülünde artış olurken, %20 ve %30 katkı ile filament modülünde azalma görülmüştür. Yüzde uzamalar karşılaştırıldığında, her katkı oranında filamentin yüzde uzamasında bir artış gözlemlendi. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, karbon fiber toz katkısı ile daha yüksek akma dayanımı ve daha rijit kompozit ABS filament üretilmiştir. TPU eklenmiş ABS filamentleri incelendiğinde, daha yüksek uzama yüzdesine sahip daha esnek filamentlerin üretildiği sonucuna varılmıştır (Diksu, 2021).

Sencer tarafından yapılan bir çalışmada polilaktik asitten (PLA) yapılan FFF ile üretilen parçaların mekanik özellikleri üzerinde tavlamanın etkisini araştırılmıştır. Üretilen numuneler amorf bir yapı sergilerken, 24 saat boyunca 80°C ila 140°C arasında değişen yüksek sıcaklıklarda tavlama, farklı kristal fazların oluşmasına neden oldu. 100°C'de 24 saat tavlama, süneklik ve mukavemet iyileştirmesi açısından en iyi sonuçları verdiği görülmüş; çekme mukavemetinin %6.5 ve kopma uzamasının %33 arttığı gözlemlenmiştir. Tavlama sıcaklığındaki ilave bir artış, mukavemet ve süneklikte bir azalma ile sonuçlanmıştır. Ayrıca farklı dolgu oranları için tavlamanın etkisi incelenmiştir. 100 °C tavlama ile %60 dolgu oranı durumu en iyi normalleştirilmiş mekanik özellikleri göstermiştir. Sonuç olarak, mikro yapının mekanik özellikler üzerindeki etkisinin oldukça önemli olduğu görülmüş ve FFF ile üretilen parçaların proses ve özellik optimizasyonu için tavlamanın uygulanabilirliği gösterilmiştir (Aydın, 2021).

Tokdemir tarafından yapılan bir çalışmada 3D, FDM (füzyon biriktirme modelleme) yazıcılar için ahşap bazlı biyo-filamentler üretilmiştir. Matris olarak PLA (polilaktik asit) ve bio TPU (termoplastik poliüretan) kullanılmış, matrislere lignin (L) ve arboform (ARB) ağırlıkça %10 oranında eklenmiştir. Elde edilen biyokompozitlerin ve 3D baskılı numunelerin yoğunluk, su emme ve boyutsal stabilizasyonu, baskı doğruluğu, çekme mukavemeti, termal özellikleri (DSC ve TGA/DTA), SEM analizleri ve biyobozunma özellikleri incelenmiştir. Testler sonucunda L ve ARB katkılarının saf PLA ve TPU'ya göre termal bozunma sıcaklıklarını azalttığı tespit edilmiştir. L katkısı, hem enjeksiyon işleminden elde edilen numunelerde hem de basılı numunelerde PLA matrisinin erime

sıcaklığını düşürmüştür. Mekanik özelliklerde azalmaya neden oldukları, özellikle L katkısının TPU matris numunelerinde zayıf TPU L arayüz bağından dolayı değerleri önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Her iki matriste de en yüksek mekanik değerlerin düşük baskı hızında ve düşük baskı sıcaklıklarında elde edildiği görülmüştür. SEM mikrograflarında PLA matris numunelerinde dolgu geometrisi ile çevre arasında hem tabakalar arası yapışmanın hem de tabakalar arası yapışmanın verimli bir şekilde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak hem PLA hem de TPU matris numunelerinde basılan numunelerin özelliklerinin enjeksiyonla kalıplanmış numunelerle karşılaştırılabilir olduğu tespit edilmiştir (Tokdemir, 2022).

Çetin tarafından yapılan bir çalışmada, PEEK malzemesinin işlenmesi ve imal edilecek test numunelerinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Daha sonra geri dönüştürülmüş PEEK malzemesi ekstrüde edilemediğinden, termoplastik performans ABS granül malzeme kullanılarak üretilen test numunesinin özelliklerini belirlemek için çekme testi ve test numunesi ASTM D638 Tip-1 standardına uygun olarak çekme test numuneleri üretilmiştir. Test numunelerinin Çekme Testleri ve DSC testleri Taguchi L9 formatı ile gerçekleştirilmiş ve varyans analizi ile bulgular analiz edilmiştir. Deneysel çalışmalar incelendikten ve üç boyutlu yazıcı optimize edildikten sonra üretilen numunelerde iyileştirilmiş farklılıklar gözlemlenmiş ve taneli malzeme için en uygun parametreler belirlenmiştir (Çetin, 2022).

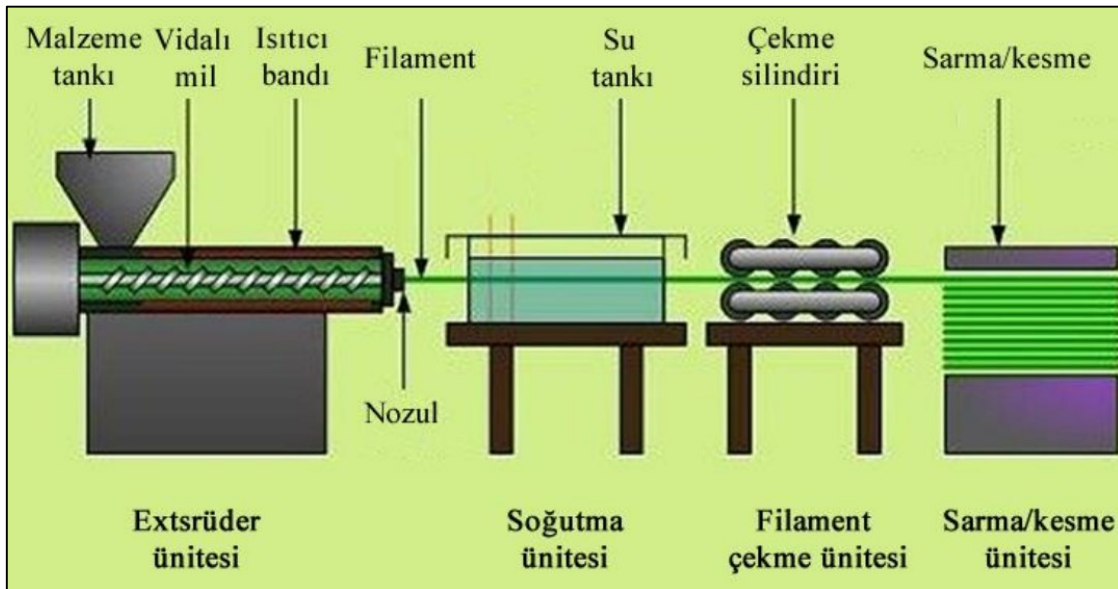
Sağbaş tarafından yapılan bir çalışmada Polilaktik Asit (PLA) parçalarının yüzey kalitesini iyileştirmek için kabuk sayısı, dolgu yüzdesi, dolgu geometrisi ve katman kalınlığı gibi FDM proses parametrelerini optimize etmek amaçlanmıştır. Numunelerin imalatında L9 (34) standart Taguchi deney tasarımı uygulanmıştır. Üretilen yüzeyler mekanik profilometre ile incelenerek 2 boyutlu yüzey profilleri elde edilmiş ve istenen değerden sapmanın belirlenmesi için sonuçlar Ra ve Rq yüzey pürüzlülük parametreleri için dönüştürülerek kalite karakteristiği olarak sinyal-gürültü oranları hesaplanmıştır. Test parametrelerinin önemini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Her deneyde "Kabuk sayısı", "Dolgu yüzdesi", "Dolgu geometrisi" ve "Tabak kalınlığı" olmak üzere dört farklı parametre üç seviyeli olarak uygulanmıştır. Sonuç olarak, tanımlanan parametrelerin FDM ile üretilen yüzeylerin yüzey pürüzlülük özelliği için optimal parametreler olarak kabul edilebileceği olduğu görülmüştür (Sağbaş, 2016).

Günay ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada eritilmiş biriktirme yöntemi (FDM) tabanlı 3B yazıcı kullanılarak üretilen PLA+ numunelerinin mekanik özellikleri, baskı hızı, doluluk oranı ve raster açısının etkileri açısından detaylı olarak incelenmiştir. Bu amaçla Taguchi L18 deney tasarımına göre 3 boyutlu yazıcı ile standart çekme test numuneleri hazırlanmıştır. Proses parametrelerinin (baskı hızı, dolum oranı ve raster açısı) gerilme mukavemeti üzerindeki etkileri, varyans analizi (ANOVA) ile belirlenmiş olup, Taguchi metodolojisi uygulanarak çekme mukavemeti için proses parametreleri optimize edilmiştir. Sonuç olarak, çekme mukavemeti üzerinde en etkili parametre dolgu oranı iken, sırasıyla raster açısı ve baskı hızı diğer önemli parametreler olarak belirlenmiştir (Günay vd. 2019).

Yapılan bir diğer çalışmada da yine baskı hızı, tabla sıcaklığı, dolum yüzdesi, katman kalınlığı ve meme sıcaklığı gibi FDM üretim parametrelerinin ürünün yüzey pürüzlülüğüne etkilerini araştırma için Taguchi deney tasarımı ve ANOVA analizi uygulanmıştır (Kartal, 2017). Yüksek yüzey kalitesi ve boyut doğruluğu ile nihai ürün elde etmek için FDM prosesinin geliştirilmesi için çalışmalar hızla devam etmektedir (Günay vd. 2019).

3. 3D YAZICILARDA KULLANILAN FİLAMENTLER

FDM teknolojisinde 3D yazıcıların baskıları için kullanılan hammaddeye filament adı verilir. Bu filamentler polimer bazlı bir hammaddeye sahiptir. Filamentlerin temel prensibi granül haldeki polimer (termoplastik) ve katkı malzemelerinin yalnız veya birlikte Şekil 3.1’de gösterilen yöntemle eritilip çapı 1.7 ile 3 mm olan nozullar sayesinde yeniden şekillendirme ilkesine dayanmaktadır. Monomer olarak isimlendirilen birbirleriyle sistemli bir şekilde birleşen çoğu tekrarlanan birimden oluşan büyük moleküller polimer olarak adlandırılır. Günlük yaşamda esnek, dayanıklı, ucuz, çok yönlülük ve hafif olması sebebiyle en çok kullanılan malzemelerden biri plastiktir Eğitim, savunma sanayi ve endüstri gibi birçok alanların yanı sıra hastane gibi sağlık alanında da plastikler kullanılmaktadır.



Şekil 3.1. Filament üretim aşaması (Olam, 2021)

Bugünkü plastikler selüloz, tuz, doğalgaz, ham petrol ve tuz gibi saf hammaddeler kullanılarak üretilmektedir. Plastiklerin çoğu maliyetinden dolayı ve üretim kolaylığından ötürü fosil yakıtlardan elde edilmektedir Plastikler termoset ve termoplastik olmak üzere 2 ana gruba ayrılır Termoplastikler ısıtıldığı zaman mevcut ve yeni ürünler yeniden ısıtılarak ergiyik hale getirilerek yeniden şekil verilmektedir. Fakat termosetlerin sıvı hali sadece bir kez katı hale dönüştüğünde termoplastik malzemeler ısıtılarak yeniden kullanılamazlar. Termoplastikler filament üretiminde sıklıkla yer almaktadır. Özellikle son yıllarda yaygın olarak ABS, PLA, PC, PETG, HIP, PVA, Naylon gibi filamentler

kullanılmakta olup aynı zaman da bu filamentlerin karışımları da üç boyutlu yazıcılarda kullanılmaktadır. ABS, HIP, PVA ve PLA filamentleri diğer filamentlere göre daha yaygın olup, Çizelge 3.1’de bu filamentlerin ana özellikleri gösterilmiştir (Olam, 2021).

Çizelge 3.1. Yaygın olan filamentlerin özellikleri (Olam, 2021)

Filament	Güçlü Yanı	Uygunluk	Baskı Sıcaklığı (°C)	Yatak Sıcaklığı (°C)	Baskı Kolaylığı
PLA	Tamamen doğal ve doğada çözünür.	Prototipleme ve diğer ürünler	200-235	50-65	Çok iyi
ABS	Güçlü ve dayanıklı	Son kullanım parçaları ve koruyucu kutular	240-260	80-100	Orta
PETG	Son derece dayanıklı ve esnek	Yüksek darbe ve yüksek gerilimli parçalar	245-265	70-80	İyi
Antibakteriyel	Bakteri barındırmayan formül	Sağlık araç gereçleri ve protezler	195-205	50-65	Zor
Ahşap	Ahşap dokusu	Moda, dekor ve aksesuar	195-220	40-50	Orta
Esnek PLA	Oldukça esnek polimer	Esnek ve dayanıklı parçalar	235-255	60-70	Orta
Karbon Fiber	ABS’den daha güçlü ve sert	Fonksiyonel parçalar	255-275	100-110	Zor
PC(Polikarbonat)	Sert, dayanıklı ve kırılmaya dayanıklı	Rijit (bükülmez) parçalar ve cama alternatif güç	280-300	90-100	Orta
Naylon	Son derece dayanıklı, esnek ve düşük sürtünme yüzeyi	Yüksek darbeli veya yüksek gerilimli parçalar	255-275	100-110	Orta
HIPS	Yüksek darbe direnci ve çözünebilir destek	ABS’ye alternatif ve limonen ile çözünebilir destek yapısı	230-240	80-100	Orta
PVA	Suda çözünen destek	Suda kolayca çözünür	190-210	50-65	Zor

3.1. Polilaktik Asit (PLA) Filamentleri

Günümüzde geleneksel petrol bazlı polimerlerin sebep olduğu çevresel risklerden dolayı sürdürülebilir ve biyolojik olarak parçalanabilir biyopolimerlerin kullanımında artma meydana gelmiştir (Matos vd. 2019). Biyopolimerler, mikrobiyal kaynaklar, tarım ve biyokütleleri de kapsayan yenilenebilir kaynaklardan üretilir. Aynı zamanda biyopolimerlerin bozunması esnasında tehlikeli ve toksik maddeler ortaya çıkmaz. Bundan dolayı, petrol bazlı olan polimerler biyopolimerlerle değiştirilmesiyle ilgili çok fazla çalışma vardır (Tokdemir, 2022). PLA, mısır, nişasta, patates, pekmez, şeker kamışı gibi yenilenebilir kaynaklardan imal edilen alifatik bir polyester biyopolimerdir (Çetin, 2022). Bu gibi yenilenebilir kaynakların fermentasyonundan elde edilen laktik asit, direkt olarak

yoğunlaşma polimerizasyonu vasıtasıyla PLA'yı sentezlemesi için monomer olarak kullanılır. Buna ek olarak, ticari ürünlerin birçoğu laktik dimerlerin polimerizasyonuna odaklanmıştır çünkü direkt olarak yoğunlaştırma tekniğinde çok az ölçüde suyun olması PLA'nın istenen moleküler ağırlığının üretimini kısıtlar. Laktik asit 2 türdür. Bunlardan biri D (+) laktik asit diğeri ise L (-) laktik asit, laktik asidin en doğal ve yaygın olan şeklidir. PLA'nın özelliklerini etkileyen temel faktörler işlem yöntemi, bileşen izomerleri ve moleküler ağırlığıdır. PLA, tamamen amorf ve yarı kristal yapıda olabilir. PLA'nın kristalleşme kinetiğini D-laktik asit birimlerinin en uygun hale getirdiği bildirilmektedir. D içeriği ~%10'dan daha fazla olan PLA filamentleri amorf yapı olmaya meyilli iken, daha düşük optik saflığa sahip olan kristalindir. PLA optik olarak etkin enantiyomerlerin birleşimine bağlı olarak, cam geçiş sıcaklığı (T_g), erime sıcaklığı (T_m) ve bariyer özellikleri üzerinde aktif birçok formda kristalleşebilir.

PLA çevre dostu özelliklerinin yanı sıra, mükemmel optik, bariyer ve yüksek mekanik özelliklerine sahiptir. Bunlardan dolayı PLA çoğu alanda düşük yoğunluklu polietilen (LDPE), poliamid (PA), polipropilen (PP) ve polistiren (PS) gibi geleneksel petrol bazlı olan polimerlerin yerini almak üzere akademik ve endüstriyel ilgi çekmiştir. Plastik çatal-bıçak takımlarında ve market poşetlerinde, uzun kullanımlı suluklarda ve hesap makinesinde kullanılmaktadır. Ayrıca PLA, düşük erime özelliği ve yavaş kristalleşme hızından kaynaklanan düşük tokluk ve yüksek kırılgenlik, zayıf işlem yeteneği, düşük servis sıcaklığı ve köpüklenme gibi birçok dezavantaja sahiptir. Şekil 3.2'de sıkça kullanılan PLA türü gösterilmiştir.



Şekil 3.2. 3D yazıcılarda oldukça yaygın olarak kullanılan PLA (Çömez, 2019)

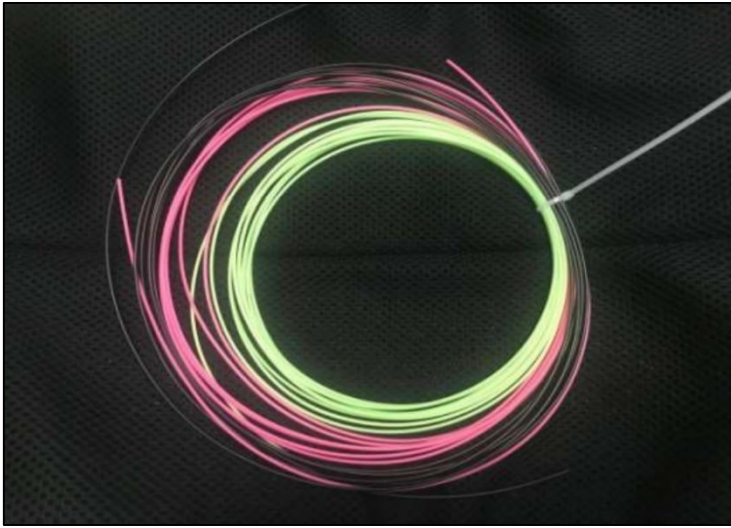
Son yıllarda bu dezavantajların üstesinden gelmek için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda önerilenler kopolimerizasyon, katı dolguların eklenmesiyle kompozit geliştirme, plastikleştirme, diğer polimerlerle harmanlama ve kimyasal modifikasyonlardır. Sonunda PLA, termal olarak kristalize edilme, doldurma, darbe modifiye etme, kopolimerize etme, gerilimle indüklenen kristalize edilme ve bir çok polimer işleme ekipmanında işlenebilme yeteneğinden dolayı yaygın olarak kullanılan bir polimerdir. Doğal ortamda PLA doğal ortamda su, humus ve karbondioksitte bozunabilen bir polimerdir. PLA biyobozunur ve yenilenebilir kaynaklardan üretildiği için petrol bazlı plastiklere bağlılığı ve atık yönetimi problemlerini biraz daha azaltmak için çözüm yöntemi olabilir (Tokdemir, 2022).

PLA filamentlerinin ana özellikleri şöyledir;

- Sert bir yapıya sahip olup ABS'ye kıyasla basımı daha basittir.
- ABS kadar olmasa bile darbelere karşı mukavemetlidir.
- Hafif esnek bir yapıya sahiptir fakat kırılgandır.
- Asetonla çözülmesi zordur.
- Basım sıcaklığı çoğunlukla 190°C – 220°C arasındadır.
- Soğuma işlemi sırasında ABS' deki gibi çatlama ve kalkma gibi sorunlar yaşanmaz (Çömez, 2019).

3.2. Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) Filamentleri

ABS malzeme, dayanıklılık ve mukavemeti bakımında PLA'ya göre petrol bazlı ve çok yüksek bir termoplastiktir. Ayarlanabilir tabla ısıtıcısına sahip 3D yazıcısı ABS baskı üretebilir. 3D yazıcılar eğer tamamen kapalı bir yapıya sahip ise yüksek kaliteli ve sorunsuz baskılar üretebilirsiniz. Ayrıca, en çok ABS filament türünün tercih edildiği yerler asansör parçaları, LEGO parçaları, paneller, atık boruları ve bazı araba parçaları çok yüksek basma ve çekme dayanımı gerektirmeyen yerlerdir. Şekil 3.3'te ABS filamentlerin farklı renkleri görülmektedir (Çömez, 2019).



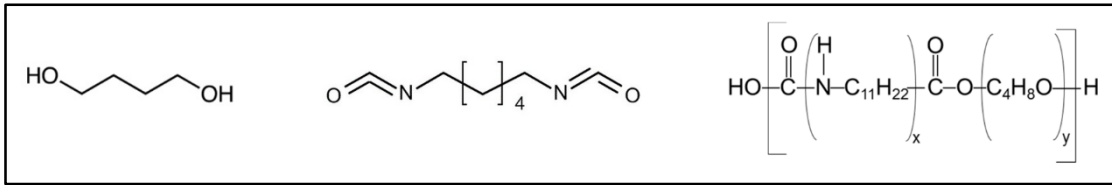
Şekil 3.3. Farklı renklerdeki ABS filament örnekleri

ABS filamentlerinin ana özellikleri şöyledir;

- PLA' dan daha dayanıklı ve darbelere karşı daha mukavemetlidir.
- Esneklik payının düşük olmasından dolayı daha kararlı bir duruşa sahiptir.
- Yüzey işlemesi daha kolaydır ve asetonla çözünebilme yeteneğine sahiptir.
- Yapısının plastik olmasından dolayı yiyecek veya içeceklerle etkileşimi önerilmez.
- Basım sıcaklığı sıklıkla 230 °C ile 250 °C arasındadır yani PLA'ya göre yüksektir.
- İşlem ve soğuma esnasında çatlama, kalkma ve kötü koku sorunlarına rastlamamak için 3D yazıcıda kapalı sisteme sahip olanlar tercih edilir.
- Basılan çıktıların daha düzgün olabilmesi için kalibrasyon ve sıcaklık ayarlarının hassas ve titiz bir şekilde yapılması gerekir.
- PLA' ya kıyasla basımı çok daha güçlüdür (Çömez, 2019).

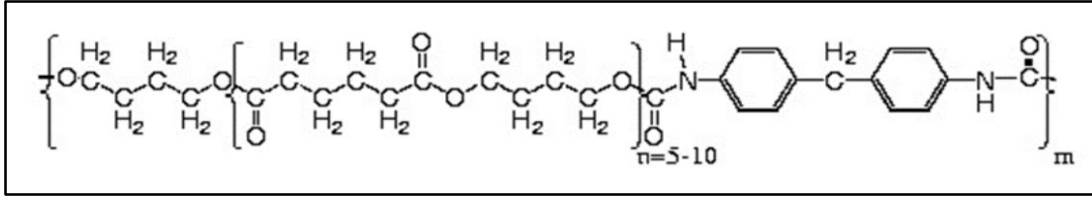
3.3. Termoplastik Poliüretan (TPU) Filamentleri

PCL ve PLA bazlı medikal filamentlere alternatif olabilecek malzemeler, uygun şekilde tasarlanmış termoplastik poliüretanlardır (TPU'lar) Poliüretan, Alman bilim insanı Otto Bayer ve arkadaşları tarafından 1937 yıllarında diizosiyanatlarla diollerin birbirleriyle reaksiyona girmesi sonucunda ortaya çıkmıştır (Tokdemir, 2022). Termoplastik poliüretan sıcaklık arttığı zaman yumuşayan, düşürüldüğünde ise sertleşebilen yapıya sahiptir. Literatüre göre biyouyumluluk ve hemouyumluluk sergilerler (Kucinska-Lipka vd. 2017). Ayrıca TPU'larda bozunma hızı da kontrol edilebilir (Cauich-Rodríguez vd. 2013). Biyostabil TPU'lar yaygın olarak bilinir ve tıpta protezler, implantlar, yapay kan damarları veya gen taşıyıcıları olarak kullanılır (Davis ve Mitchell 2008). Dahası, TPU'lar doku mühendisliği iskelesi (Kucińska-Lipka vd. 2018), sinir kılavuz kanalları (Borkenhagen vd. 1998), meme implantları, diyaliz membranları veya aort greftleri (Lamba, Woodhouse, ve Cooper, 2017) olarak literatürde başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Enjeksiyon ve ekstrüzyon gibi plastik işleme metotlarında kullanılabilir. TPU'nun özellikleri arasında yüksek çekme dayanımı, dış ortamdaki maddelere karşı dirençli olma, yüksek aşınma direnci, yüksek sönümlenme kapasitesi ve düşük sıcaklıklarda iyi esnekliğe sahiptir Termoplastik poliüretan 2 aşamalı polimerizasyon işlemleriyle elde edilir. Sentezlenme esnasında kullanılan BDO,HDI ve PEBA zincirlerinin yapıları Şekil 3.4'teki gibidir (Diksu, 2021).



Şekil 3.4. BDO, HDI ve PEBA zincirlerinin yapıları (Clarizia vd. 2018; Diksu, 2021)

Bu 2 aşamalı işlemten sonra Şekil 3.5'teki yapıya sahip olan termoplastik poliüretan sentezi oluşur. Termoplastik poliüretan seçimi sertlik değeriyle gerçekleşmektedir. Termoplastik poliüretanın uygulama alanları boru, kablo, kılıflar, tekerlek, kar zincirleri ve ayakkabı tabanı bulunmaktadır (Diksu, 2021).



Şekil 3.5. TPU zincirinin yapısı

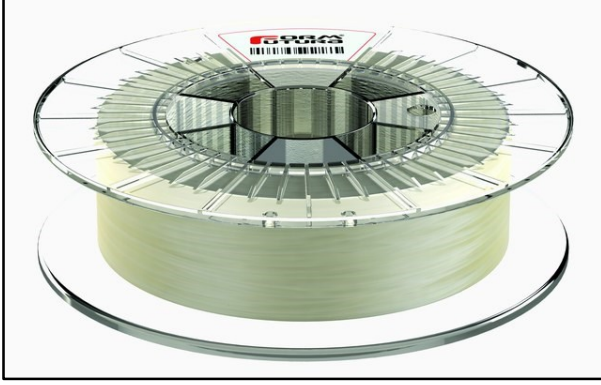
3.4. Polyvinyl Alcohol (PVA) Filamentleri

Çift ekstrüzyon özelliğine sahip bir yazıcıda, diğer memeden ekstrüde edilen yapı malzemesi tarafından oluşturulan çıkıntılarının altındaki boşluğu doldurmak için bir memeden bir destek malzemesi ekstrüde edilebilir. İnşa tamamlandıktan sonra, parça suya veya başka bir uygun çözücü maddeye yerleştirilebilir ve destek malzemesi, parçanın yüzeyine zarar vermeden veya çıkarılması için fazla çaba gerektirmeden çözülebilir. İdeal olarak, bu teknik, karmaşık yapıların tasarımına ve prototiplenmesine izin verebilir (Duran vd. 2015).

PVA, PLA ve ABS parçalar için destek malzemesi olarak kullanılabilen petrol bazlı ve suda çözünür bir termoplastiktir (Şekil 3.6). PVA için önerilen çözücüler, su ve glikoller (sıcak), gliserol (sıcak), piperazin, metilendiamin, formamid, dimetil sülfoksit ve tetrahidrofuran gibi kimyasallardır. Biyouyumluluk yapısı, suda yüksek çözünürlüğü ve kimyasal direnci nedeniyle PVA, tıbbi cihazlarda ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Baker vd. 2012). Ancak, bildiğimiz kadarıyla, düşük maliyetli masaüstü 3D baskısında bir destek malzemesi olarak PVA'nın faydası ve PVA'yı yazdırmak için optimal teknikler bugüne kadar resmi olarak bildirilmemiştir. Ayrıca PVA neme karşı son derece hassastır ve havadaki nemi emmesini önlemek için kuru bir ortamda saklanmalıdır. Yumuşatılmış PVA, nozuldan ekstrüzyonu zorlaştırır ve ekstrüde edilen plastikte hava kabarcıklarının oluşmasına neden olabilir. Bu nedenle, bu çalışmanın odak noktası, ABS için bir destek malzemesi olarak PVA'yı basmak için ideal teknikleri ve koşulları belirlemektir. Birkaç özel hedef şunlardır:

- sudaki PVA çözünürlüğünün tutarlılığını incelemek;
- PVA destek malzemesinin çözülmesi için optimum su sıcaklığını ve çalkalama oranını belirlemek;
- PVA yüzey alanı ile PVA çözünürlük oranı arasındaki ilişkiyi incelemek; ve

- deneysel 3D yazıcılar kullanarak ABS-PVA yazdırmanın güvenilirliğini analiz etmek (Duran vd. 2015).



Şekil 3.6. PVA filamenti (www.sigmaaldrich.com)

3.5. Filamentlerin Mekanik Özellikleri ve Yapılan Çalışmalar

İstenilen performans ve kullanım alanına bakıldığında üç boyutlu yazıcılar ile üretilen parçaların mekanik özellikleri oldukça önemlidir. Bu özelliklerin tanımlanmış etki parametresinin makineye, kullanılan malzemeye ve fiziksel olaylara bağlı olduğu görülmüştür. Farklı parametrelerle üretilen parçaların akma dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü, kayma gerilmesi, yorulma dayanımı, basma dayanımı ve darbe dayanımı gibi mekanik özelliklerindeki değişimleri görmek için çok sayıda test yapılmıştır. Bu testler ışığında filamentlerin mekanik özellikleri değerlendirilmiştir (Ersoy, 2021).

Özellikle FDM yönteminde kullanılan en önemli filamentler ABS ve PLA malzemelerinden yapılır. Bu filamentlerin mekanik özellikleri karşılaştırılacak olursa; PLA büküldüğünde kırılma eğilimi gösteren yüzeyi sert ve kolay kırılabilen bir malzemedir. Bu malzeme ile üretilen üç boyutlu modeller taşlanabilir, kesilebilir, törpülenebilir, güçlü yapıştırıcılar (Vodabond 2K, Evobond 502) ile yapıştırılabilir ve boyanabilir. Üretilen parçaların yüzeyindeki pürüzleri gidermek amacıyla aseton kullanılamaz.

ABS filamentler ile darbeye karşı daha dirençli ve güçlü üç boyutlu modeller üretilir. Göstermiş olduğu bu mekanik özelliklerinden dolayı değişken hava koşullarında çalışmakta olan parçalarda ve mekanik parçalarda kullanılması önerilir. PLA'ya göre daha esnek bir

yapıya sahip olan ABS malzemeleri basınca maruz bırakıldığında daha iyi dayanım sergiler. Bu malzemeler ile üretilen parçalar yine PLA malzemelerde olduğu gibi taşlanabilir, kesilebilir, törpülenebilir, güçlü yapıştırıcılar (Vodabond 2K, Evobond 502) ile yapıştırılabilir ve boyanabilir. Ancak ABS malzeme ile üretilen parçaları parlak ve pürüzsüz hale getirmek için aseton ile işlem yapılabilir.

Son yıllarda üç boyutlu yazıcılar için geliştirilen yeni bir ürün olan PLA Plus ise ABS malzemesine yakın bir dayanıklılığa sahip olup, PLA ile karşılaştırıldığında ise kopma uzama miktarı yaklaşık 4 kat daha yüksektir. Ayrıca yine yeni geliştirilen bir malzeme olan ABS Plus termoplastik bir malzeme olup, laboratuvar şartlarında yapılan testlerde ABS malzemesine göre daha dayanıklıdır ve ABS malzemesine göre yaklaşık 4 kat kopma uzaması değerine sahiptir (www.artiboyut.com).

Çizelge 3.2. ABS ve PLA Filamentlerin mekanik özellikleri (www.artiboyut.com)

Mekanik Özellikler	PLA	PLA Plus	ABS	ABS Plus
Tensile Strength (MPa)	65	60	41	39.4
Elongation at Break (%)	7.5	29	8.2	30
Bending Strength (Mpa)	97	87	63	68
Bending Modulus (MPa)	3600	3672	2200	2443

Rajpurohit ve Dave tarafından yapılan bir çalışmada, filament üretimi sırasındaki üç işlem parametresinin mekanik özelliklere etkisi ölçülmüştür. Açık kaynaklı bir 3B yazıcı kullanarak FFF baskılı PLA'nın raster açısı, katman yüksekliği ve raster genişlikleri değiştirilerek çekme testleri uygulanmış aynı zamanda gerilme özelliklerindeki değişim de izlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda raster açısının, raster genişliğinin ve katman yüksekliği ile raster genişliğinin etkileşiminin çekme özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Gerilme testi sonuçları, 0° tarama açısında yazdırılan parçaların, 90° tarama açısına kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti sergilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, proses değişkenlerinin hasar modları üzerindeki etkisini belirlemek için yüksek hassasiyetli bir ölçüm mikroskobu kullanılarak çekme numunesi üzerinde fraktografi analizi gerçekleştirilmiştir. Raster açısı ile hasar modu arasında yakın bir ilişki gözlemlenmiş ve eleştirel olarak tartışılmıştır (Rajpurohit ve Dave, 2019).

Ning ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, karbon fiber ve ABS'den ekstrüzyon prosesleri ile CFRP kompozit filamentler hazırlanmıştır. ABS plastiğine karbon fiber (farklı içerik ve uzunluk) eklemenin FDM ile üretilmiş parçaların mekanik özelliklerinin iyileştirilip iyileştirilemeyeceğine dair deneysel araştırmalar yapılmıştır. Numunelerin çekme özellikleri (gerilme mukavemeti, Young modülü, tokluk, akma mukavemeti ve süneklik dahil) ve eğilme özellikleri (eğilme gerilimi, eğilme modülü, eğilme tokluğu ve eğilme akma mukavemeti dahil) üzerindeki etkiler incelenmiştir. Çekme testi ve eğilme testi sonrasında CFRP kompozit numunelerinin kırılma arayüzü, taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gözlemlenmiş ve analiz edilmiştir. Saf plastik ile FDM işlemi yapılan filamentlerle karşılaştırıldığında, karbon fiber eklenmesi Young modülünün ve gerilme mukavemetinin artmasına yol açtığı, ancak tokluk, akma mukavemeti ve sünekliği azalttığı görülmüştür (Ning vd. 2015).

Tekinalp ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, 3B eklemeli imalatın geniş çapta uygulanması için hem teknikler hem de hammadde malzemeleri, yük taşıyan bileşenlerin mekanik gereksinimlerini karşılamak amacıyla işlenebilirlikleri, mikro yapıları ve mekanik performansları açısından hammadde olarak kısa elyaf (0,2–0,4 mm) takviyeli akrilonitril-bütadien-stiren kompozitleri araştırılmıştır. Farklı oranlarda karbon elyafı içeren ABS reçine hammaddesi hazırlanmış ve bu hammadde malzemeleri hem FDM baskı hem de sıkıştırma kalıplama işlemleriyle başarılı bir şekilde kompozit numuneler üretmek için kullanılmıştır. Kalıplama yapılan numunelerde gözle görülür bir gözeneklilik veya boşluk gözlenmezken, FDM baskılı numunelerde önemli gözeneklilik gözlemlenmiştir. Artan lif içeriği ile FDM baskılı tane içindeki boşluklar artarken taneler arasındaki boşlukların azaldığı görülmüştür. FDM baskısı uygulanan numunelerin tane yapısında daha iyi bir hizalama ve baskı yönünde yüksek fiber oryantasyona sahip olduğu görülmüştür. Sonuç olarak karbon fiber takviyesi ile elde edilen hammadde ile FDM baskı yapılan numunelerin gerilme mukavemetinin ve modülünün sırasıyla ~%115 ve ~%700 arttığını gözlemlemişlerdir (Tekinalp vd. 2014).

Vakharia ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, karbon fiber ve karbon nanotüp takviyeli ve takviyesiz farklı tipte ABS malzemeleri, çoklu baskı katmanlı yükseklikleriyle basılmıştır. 3 boyutlu baskısı yapılan malzemelerin mikro yapısı, elastik davranışı, gerilme davranışı ve kırılma tokluğu karakterize edilmiştir. 0,1 mm'lik düşük bir baskı katmanlı yüksekliğinde yazdırılan ABS malzeme sistemleri, 0,2 mm'lik daha büyük bir yükseklikte yazdırılanlardan daha iyi performans gösterdiği bildirilmiş ve karbon nanotüp takviyeleri,

ABS malzemelerinin mukavemetinde ve elastik modülünde önemli bir gelişme sağladığı görülmüştür. Karbon nanotüplerle desteklenmiş ABS'nin 34,18 MPa'lık bir nihai güce ulaştığı gözlemlenirken birinci sınıf bir ABS'nin, aynı baskı katman yükseklikleriyle basıldığında 28,75 MPa'ya ulaştığı gözlemlenmiştir. Karbon elyafı ABS numunelerinde ise gözeneklerin bulunduğu ve bu gözeneklere bağlı olarak 27,25 MPa'lık nihai bir mukavemet gösterdiği izlenmiştir. Dinamik ve mekanik yöntemlerle ölçülen elastik modüller ve kırılma tokluğu, katman yüksekliğinin bir fonksiyonu olarak benzer eğilimler göstermiştir. Farklı malzemelerin, takviyelerin ve baskı parametrelerinin mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak tartışılmıştır (Vakharia vd. 2022).

Drummer ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, bir FDM makinesi ile üretilen parçaların işleme koşulları ve performansı (örneğin mekanik özellikler) değerlendirilmiştir. FDM ile işleme için PLA'nın genel uygunluğu değerlendirilmiş ve malzemeye özgü etkiler (örneğin, kristalleşme ve büzülme) gösterilmiştir. Bu nedenle, termal, mekanik ve mikroskobik analizlerle yarı kristal biyolojik olarak parçalanabilen malzemenin karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. İşleme sıcaklığının etkisini belirlemek ve kısa süreli çekme testi ile değerlendirmek için numuneler üç farklı nozul sıcaklığında üretilmiştir. Modellenen tüm çekme numuneleri, yeterli bir E-modülü sunmuş olup, en iyi mekanik performansla sonuçlanan nozul sıcaklığı 225 °C olduğunu belirtmişlerdir. İşleme sıcaklığı ile morfoloji arasında dikkate değer bir ilişki bulunmuş ve nozul sıcaklığı arttığında parçaların daha yüksek bir kristallığa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Gözlemlenen bu kristal yapı önceden bağlanmış katmanlar komşu filamentler tarafından tekrar ısıtıldığında ölçülen yeniden kristalleşmeden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca parça boyutu ile numunenin mekanik özellikleri arasında da doğrudan bir etkileşim olduğu bulunmuş olup, daha büyük çekme numunelerinde daha yüksek sertliğe, daha fazla çekme mukavemetine ve kopmada uzamaya sahip olduğu görülmüştür. TCP ile doldurulmuş PLA'nın pvT ölçümleri, tipik bir yarı kristal termoplastik davranışı göstermiştir. Öte yandan, TCP'siz polimer, amorf bir termoplastik davranışı sergilediği görülmüş ve yalnızca TCP ile doldurulmuş PLA, piyasada bulunan bir FDM makinesi tarafından iyi bir doğrulukla işlenebilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Drummer, Cifuentes-Cuéllar, ve Rietzel, 2012).

Rankouhi ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, erimiş biriktirme modellemesi (FDM) kullanılarak akrilonitril bütadien stirenden (ABS) üretilen parçaların mekanik özellikleri ile katman kalınlığı arasındaki korelasyon araştırılmıştır. Ayrıca, çekme

numuneleri üzerinde yapılan kapsamlı deneysel çalışmanın bulgularını genelleştirmek için tipik bir kafes yapısı üzerinde örnek olay incelemesi yapılmıştır. Katman kalınlığının hasar modları üzerindeki etkilerini belirlemek için bir taramalı elektron mikroskobu aracılığıyla çekme numuneleri üzerinde fraktografi analizleri gerçekleştirilmiştir. Katman kalınlığının ve tarama yönünün mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu istatistiksel olarak kanıtlanmış ve çekme testi sonuçları, 0,2 mm katman kalınlığı ile basılan numunelerin, 0,4 mm katman kalınlığı ile karşılaştırıldığında daha yüksek elastisite modülü ve maksimum çekme mukavemeti sergilediği görülmüştür (Rankouhi vd. 2016).

Xu ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, FDM teknolojisi ile üretilen PLA (Polilaktik Asit) numunelerinin mekanik performansı üzerindeki tufal etkisi incelenmiştir. Polimerlerin çekme testi için ASTM standardında önerilen boyutların %30'u, %50'si ve %100'ü olmak üzere üç farklı ölçekte toplam 15 adet test numunesi üretilmiştir. Akma gerilimi, maksimum çekme mukavemeti, Young modülü, Poisson oranı ve uzama dahil olmak üzere mekanik özellikler, tek eksenli çekme testleriyle belirlenmiş ve analiz edilmiştir. Ayrıca, numunelerin yüzeyindeki tam alan yer değiştirmesini ve gerinimlerini izlemek için 2D dijital görüntü korelasyon (DIC) yöntemi de kullanılmıştır. Ayrıca, test edilen numunelerin kırılma mekanizmalarını değerlendirmek için optik mikroskop kullanılarak kırılma yüzeyleri analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, küçültülmüş oranlara sahip numunelerin hem maksimum çekme mukavemetini hem de maksimum uzamayı azalttığı görülmüştür. Ayrıca, ölçek daha düşük olduğunda, ilk katman kalitesinin ve artık gerilimin veri belirsizliği üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğundan dolayı, hasar anında uzamanın standart sapması, ölçek küçültme sırasında arttığı gözlemlenmiştir (Xu, Fostervold, ve Razavi, 2021).

Elmrabet ve Siegkas tarafından yapılan bir çalışmada, dolgu yüzdesinin Ultimaker-3 3D yazıcı ile üretilen PLA ve TPU numunelerinin basma ve çekme özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. %20, %60 ve %100 dolgu ayarları altında yapılan numuneler analiz edilmiş ve çekme numuneleri, ISO standart tavsiyeleri izlenerek yapılmıştır. PLA ve TPU baskılı numunelerin mekanik tepkisini belirlemek için testler yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda üç boyutlu olarak yazdırılan parçaların basma ve çekme özelliklerinin dolgu yüzdesi ayarlarına ve boyutlarına bağlı olarak önemli ölçüde değişebileceği, dolgu yüzdesi ayarları sabit tutulduğunda ise elde edilen malzeme özelliklerinin numunenin boyutuna bağlı olarak değişebildiği görülmüştür (Elmrabet ve Siegkas, 2020).

Kung ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, polilaktik asit (PLA) malzemesi kullanılarak çekme testi numuneleri bir RepRap 3D yazıcıda basılmıştır. Numunelerin çekme dayanımı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için duvar sayısı, raster açısı ve numune boyutu incelenmiştir. Daha sonra üretilen numunelere ASTM-D638-02a standartlarında çekme testi yapılmıştır. 45° ile oluşturulmuş numunenin çekme dayanımının 0° ile oluşturulmuş olanlardan daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Daha küçük numuneler, tam boyutlu numunelerin muadillerinden daha fazla güce sahip olduğu ve ayrıca 3 dış duvar katmanına sahip numunenin en düşük çekme dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, üçten öte dış duvar sayısı arttıkça mukavemetin arttığı görülmüştür (Kung, Kuan, ve Kuan, 2018).

Vălean ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, FDM baskı yoluyla elde edilen 3D numunelerin gerilme özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Oryantasyon yönünün (0°, 45°, 90°) ve boyut etkisinin (farklı kalınlık) mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tüm çekme testleri için polilaktik asit (PLA) dogbone çekme numunesi örnekleri kullanılmıştır. Deneysel testler, ISO 527-1 Standardına göre oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Oryantasyonun Young modülü üzerinde daha az etkiye sahip olduğu ve çekme dayanımı üzerinde daha yüksek etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Ayrıca katman sayısının artması hem Young modülünün hem de çekme dayanımının azalmasına neden olduğu sonucuna varılmıştır (Vălean vd. 2020).

Sola ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, 2022 yılına kadar yapılan farklı özelliklere sahip filamentlerinin mekanik özellikleri konusunda yayımlanmış makaleler derlenmiştir. Bu derlemeden elde edilen sonuçların desteklenmesi için farklı standartlara göre (ASTM D638 tip I ve ASTM D3039) ve farklı boyutlarda basılan polilaktik asit (PLA) FFF numunelerinin gerilme özelliklerinin istatistiksel analizi gerçekleştirilerek doğrulanması amaçlanmıştır. Deneysel sonuçlarla desteklenen literatür taraması, özel standartlar mevcut olana kadar çekme testi için mevcut standartların FFF'ye ihtiyatlı bir şekilde uygulanması gerektiğini göstermiştir. Konvansiyonel standartlarda belirtilmemekle birlikte, sonuçların tekrarlanabilirliğini sağlamak için kurulum ve baskı parametreleri tam olarak rapor edilmesi gerektiği, numunelerde erken hasarın önlenmesi için dikdörtgen geometriler ve halter benzeri olanlara tercih edilmesi ve numunelerin keyfi olarak değiştirilmemesi gerektiğini belirtmişlerdir (Sola vd. 2023).

Bardiya tarafından yapılan bir çalışmada, proses parametrelerinin (katman kalınlığı, dolgu ve oryantasyon) eğilme mukavemeti, çekme mukavemeti ve FFF tarafından hem eğilme hem de çekme testi numunesinin üretilmesi için geçen süre üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Açık kaynaklı bir 3D yazıcı olan Prusa i3, tüm numuneleri herhangi bir destek malzemesi kullanmadan PLA'dan üretilmiştir. En yüksek eğilme mukavemetine sahip olan numune parametre seti, 0,2 mm katman kalınlığı, 30° oryantasyon ve %80 dolgu oranına sahip parametrede elde edilmiştir. Bunun yanı sıra en yüksek çekme mukavemeti ise 0,3 mm katman kalınlığı, 0° oryantasyon ve %80 dolgu parametresine sahip numunede elde edilmiştir. Hızlı imalatın amacı, düşük sürede yüksek mukavemete sahip parçalar üretmek olduğundan, hem eğilme hem de çekme testi numuneleri için en düşük süreyi üreten parametreler 0,3 mm tabaka yüksekliği, 0° parça oryantasyonu ve %80° parametresi optimum parametre olarak belirlenmiştir (Bardiya, Jerald, ve Satheeskumar, 2020).

Çiçek tarafından gerçekleştirilen çalışmada, EYM yöntemiyle PLA ve ABS malzemelerden yüzde 25, 50, 75 ve 100 dolgu oranlarına göre üretilmiş olan numunelerin mekanik özelliklerine etkisi ISO 527 standardına göre incelenmiştir. ABS için en fazla çekme dayanımı %100 dolgu oranında, en fazla gerinim ise %25 dolgu oranında tespit edilmiş ve PLA için en fazla çekme dayanımı %75 dolgu oranında, en fazla gerinim %50 dolgu oranında gözlemlenmiştir (Çiçek, 2019).

Apak'ın çalışmasında PLA filamentinden dolgu oranı %20, %60 ve %100, dolgu deseni Çizgi, Kafes ve Orta Merkezli, üretim hızı 20 mm/sn, 40 mm/sn ve 60 mm/sn olacak şekilde parametreler ile Taguchi L27 metoduna göre üretim yapılmış ve ASTM D638-14 standardına göre test edilmiştir. Test sonuçlarına göre dolgu oranındaki artış, çekme mukavemetinin artmasına neden olmuştur. En fazla çekme değeri %100 doluluk oranı, çizgi dolgu deseni ve 40 mm/sn üretim hızına sahip olan numunede gözlemlenmiştir. Dolgu deseni ve üretim hızının, çekme mukavemeti açısından büyük bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Doluluk oranının artması ve üretim hızının düşmesi ise uzama değerlerinin azalmasına sebep olmuştur. En fazla uzama gösteren numune %20 doluluk oranı, 60 mm/sn üretim hızı ve kafes dolgu desenine sahip olan numune olmuştur (Apak, 2019).

Çömez'in çalışmasında atık malzemelerden üretilen PLA filamentinin ve piyasadan hazır halde alınan filamentin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Kopma kuvveti 46,7 N/mm² ile piyasa filamentinde en yüksek olarak ölçülmüştür. Uzama değerinde ticari firmanın

filamenti %1,85 ve kendi ürettikleri filamentte ise %1,48 olarak ölçülmüştür. Uzama ve kopma değerindeki en iyi sonuç piyasa filamentinde gözlemlenmiştir (Çömez, 2019).

Elmas tarafından yapılan çalışmada PLA numuneleri 3D yazıcıda EYM yöntemi ile altı farklı konumlamada üretilmiştir. Elastisite modülü, çekme dayanımı, eğilme modülü ve eğilme dayanımı için XZY ile YZX ikilisinde en yüksek değerler gözlemlenmiştir (Elmas, 2021).

Koç tarafından yapılan çalışmada geri dönüştürülmüş PLA filamentlerinden basılan parçaların mekanik özellikleri, doluluk oranı %30, %50 ve %70, dolum şekli Çizgi Kafes ve Bal Peteği, katman kalınlığı 0,15 mm, 0,20 mm ve 0,25 mm parametreleriyle üretilerek ISO 527 Tip 4 standardına göre incelenmiştir. Test sonuçlarına göre PLA'nın çekme dayanımı, tüm katman kalınlıkları ve doluluk oranları için Geri Dönüşümlü PLA'dan yüksek çıkmıştır (Koç, 2022).

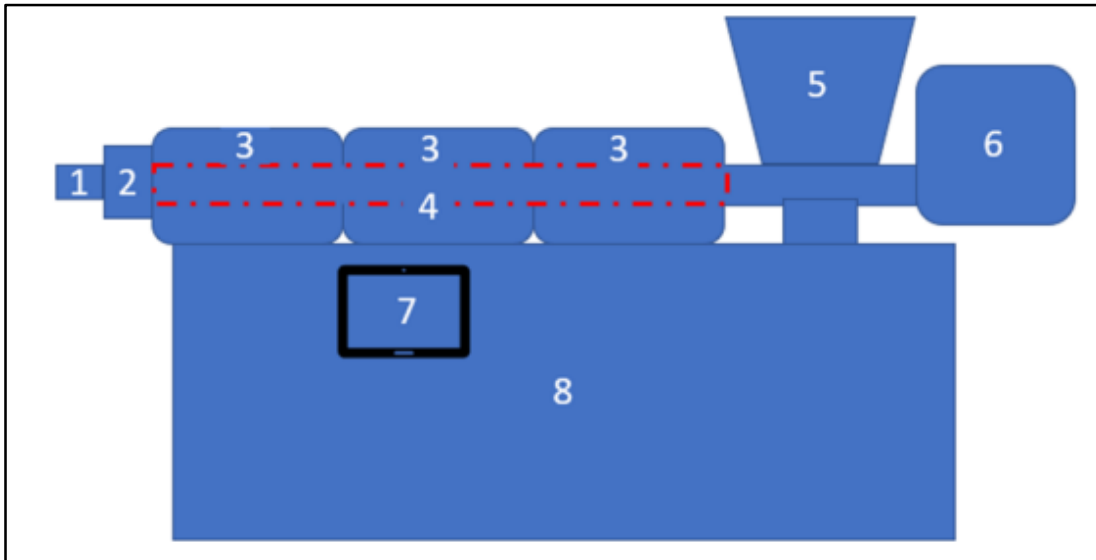
Yeşiloğlu tarafından yapılan çalışmada PLA filamentinden 3B yazıcıda dolgu yoğunluğu %50, %30, %20 ve geometrisi Octet, Gyroid ve Cross numunelerin mekanik özellikleri araştırılmıştır ve ASTM-D638 Tip1 standardına göre test edilmiştir. Genellikle, yoğunluğun artmasıyla tüm dolgu geometrilerinde mekanik özelliklerin kötüleştiği görülmüştür. En yüksek çekme dayanımı Octet dolgulu numunede, en fazla şekil değişimi Cross dolgulu numunede görülmüştür. Kopma dayanımı ise büyükten küçüğe doğru doğru Octet, Gyroid ve Cross olarak gözlemlenmiştir (Yeşiloğlu, 2022).

4. EKSTRÜZYON

Toz ve granül haldeki polimer hammaddenin bir ekstrüzyon makinesinde uygulana basınç ve ısı aracılığıyla eritilerek kullanılan kalıptan daimî bir şekilde geçirilerek şekillendirme süreci ekstrüzyon olarak adlandırılır. Eş kesite ve istenilen uzunluklara sahip olan boru, levha, film, profil ve folyo gibi nihai ürünlerin üretilmesinde kullanılmış olan bir imalat yöntemidir. Üretim ekstrüzyon makinesinde 3 aşamada gerçekleşmektedir. İlk adımda toz veya polimer granül haldeki hammadde sıcaklık veya basınç yardımıyla ergiyik hale getirilerek akışkanlık elde edilir. Daha sonra akışkan halde olan malzeme ekstrüderdeki vidanın dönmesiyle ilerlemesini sağlamasıyla birlikte akışkan halde olan malzeme kalıptan geçirilerek şekillendirilir. Son olarak ise kalıptan çıkarılan sıcak polimer malzeme soğutulması için en son şekil alırken ihtiyaç duyulan kalibrasyonlarda yapılmış olur. Ekstrüzyon işlemiyle filament üretiminde kullanılan yöntemler; kompaunder makinesi, sarıcı, ekstrüzyon makinesi ve soğutma havuzudur (Diksu, 2021).

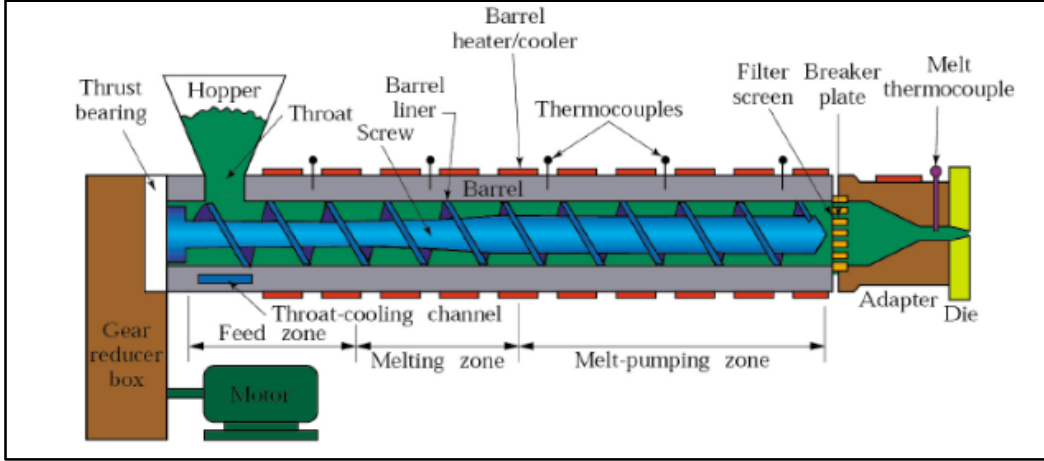
4.1. Ekstrüzyon Makinesi

Ekstrüzyon makineleri genel olarak Şekil 4.1’de gösterildiği gibi farklı yöntemlerin yapıldığı birden fazla bölümden oluşmaktadır.



Şekil 4.1. Ekstrüzyon makinesinin şematik gösterimi (Diksu, 2021)

Bu bölümler sırasıyla kalıp (1), ekstrüzyon kafası (2), ısıtıcı silindirler (3), vida (4), besleme hunisi (5), vidayı döndüren elektrik motoru (6), kontrol paneli (7) ve ekstrüzyon cihazının şasisidir (8). Ekstrüzyon makinesinin ana bölümleri silindirler ve vidadır. Üretilcek parçanın biçimine göre değişen yardımcı bölüm kalıp olarak adlandırılır.

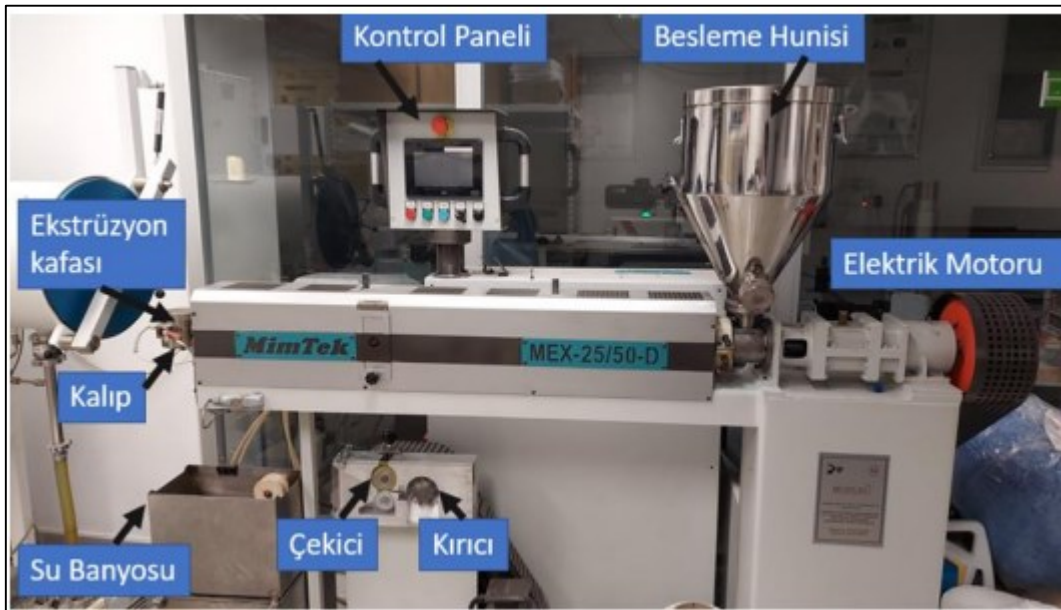


Şekil 4.2. Ekstrüzyon makinesindeki silindirin yapısı (<https://docplayer.biz.tr>)

Şekil 4.2 de gösterilen ekstrüzyon makinesinde bulunan silindirlerin iç çapı 25 ile 150 mm aralığında değişmektedir. Bu makinede kullanılan vida uzunluğun çapa oranıdır. Bu oran L/D şeklinde gösterilir ve 10 ile 30 arasında bir değere sahiptir. Termoplastik malzemeler daha yüksek bir orana sahipken elastomerler için daha düşük değerler seçilir. Besleme hunisine yerleştirilen hammadde besleme bölümünde ekstrüzyon sırasında elektrik motoru yardımıyla vidayı döndürerek ısıtır ve ilerletir. Basınç bölümünde ise ilerletilen malzeme ısıtıcı rezistansların yardımıyla silindir içerisinde sıcaklık ve vidanın içerisinde sürtünme ve basınç kuvveti sonucu açığa çıkan sıcaklık malzemeyi eritir ve akışkan özelliği kazandırır. Daha sonra şekillendirme bölümü adı verilen bölümde ergiyik homojen hale getirilir ve ergiyik hale getirilen malzeme kalıplara doldurulur. Homojenize edilmiş ve vidanın dönme hareketiyle ilerleyen akışkanlık kazandırılan malzeme kalıptan geçirilir. Malzemenin kalıptan daha rahat bir şekilde geçirilebilmesi ve ani soğutmaya uğramasını önlemek amacıyla kalıbın üstünde de ısıtıcı bir rezistans bulunmaktadır. Ekstrüder makinesinin kalıba bağlandığı yere ekstrüder kafası denir. Yine bu bölgede akışın rahatça hareket edebilmesi için ısıtıcı bir rezistans yardımıyla ısıtılmaktadır (Diksu, 2021).

4.2. Kompaunder Makinesi

Kompaunder makinesi bileşik oluşturma makine olarak da isimlendirilmektedir. Bu makine daha çok polimer malzemeye bileşen katılması amacıyla kullanılmaktadır. Ekstrüzyon makinesi ile aynı ilkeye sahip olan kompaunder makinesi ekstrüzyon cihazından farklı olarak iki adet vidaya sahiptir. Bu vidalar ile malzemelerin daha homojen bir şekilde karıştırılması bir avantaj olarak öne çıkmaktadır. Toz ve granül halde besleme hunisine yerleştirilen malzeme iki vidanın da yardımıyla huniden ayrılarak iletilir. Ekstrüderle aynı süreçten geçen malzemeler kalıptan çıkarılırken su banyosundan geçerek çekiciyle çekilir ve kırıcıdan geçerler. Malzemeler kırıcıdan geçerken granül biçiminde yeniden elde edilir. Bu altı farklı ısıtıcı kovana sahiptir. Böylelikle malzemedeki ergiyik hale gelmesi homojen ve kontrollü bir şekilde elde edilir. Bütün bölgelerin sıcaklığı ya deneysel bir şekilde optimizasyon yapılarak ya da malzemenin özellik tablosundan ayarlanarak sıcaklık değerleri elde edilir. Üretim sırasında diğer önemli parametreler ise çekicinin çekim hızı ve motor devir hızı olup, malzeme özelliğine göre seçilir. Malzeme kırıcı bölgesinde ise enjeksiyon, ekstrüzyon ve diğer plastik işleme metotlarında kullanılmak üzere granül hale getirilir. Şekil 4.3'te bileşik oluşturma makinesi ile bölümleri gösterilmiştir. Cihaz özellikle laboratuvar ortamına göre dizayn edilmiştir.



Şekil 4.3. Kompaunder makinesindeki bölümler (Diksu, 2021)

4.3. Soğutma Havuzu

Kalıptan çıkarılan şekil almış olan polimerler oda sıcaklığına maruz bırakılarak soğutulur. Soğumanın aniden olmaması için üretilmiş olan malzemeye daha uygun bir soğutma havuzu kullanılır. Yağ, su ve buna benzer malzemeler soğutma havuzlarında kullanılır. Bu gibi sıvılar kullanılan malzeme ve üretilecek olan ürün türüne göre soğutma havuzunda belirlenen sıcaklığa kadar ısıtılır ve üretim bitinceye kadar bu sıcaklıkta kalmaları sağlanır. Bu havuzlarda soğutma işlemi kademeli olarak yapılması malzemenin çarpılmaması açısından oldukça önemlidir. Ayrıca ürünün çekim işlemi devam ederken malzeme iç yapısında meydana gelen oryantasyonun oluşmasını etkilerler. Böylece üretilecek parçanın nihai şekle daha yakın ve toleranslarda üretilebilirler. Şekil 4.4'te soğutma havuzu gösterilmiştir (Diksu, 2021).



Şekil 4.4. Ekstrüzyon işleminde kullanılan soğutma sistemi (www.turkiyeplastik.com)

4.4. Çekici

Sürekli olarak kalıptan geçirme işlemi ekstrüzyon yöntemindeki en önemli işlemlerden biridir. Bu işlemin devamlılığının sağlanması için en önemli kısımlardan biri ekstrüzyon kafasının basmış olduğu malzemeyi kalıptan devamlı olarak çekmeye çalışan çekicidir. Üretilen malzemenin özelliklerine göre değişik hızlarda çalıştırılabilirler. Hız, üretilecek malzemenin çapına, kalınlığına ve malzemenin fiziksel özelliğine göre çekme hızı optimize

edilir. Böylece üretilmek istenen çap ve kalınlıkta parçalar üretilir. Ayrıca çekici ile kalıptan çıkarılan malzemenin soğutma havuzu içerisinde geçmesi de gerçekleştirilir. Çekim işlemi haddeme, bobine sarma, kesme ve istifleme gibi yan işlemlerle desteklenir. Şekil 4.5'te ekstrüzyon yönteminde kullanılan bir çekici gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Ekstrüzyon metodunda kullanılan bir çekici (MEB 2011)

4.5. Sarıcı

İstifleme veya kesme gibi yan işlemlerle çekilen malzeme kullanım amacına göre son ürün haline gelir. Üç boyutlu yazıcılar için kullanılan filament üretiminde nihai ürün yardımcı işlemlerden biri olan bobine sarma işlemi kullanılır. Ekstrüde edilen malzeme istenilen çapta bir sarıcı üretilen filamenti bobine sararak nihai ürüne ulaştırır. Şekil 4.6'da ekstrüzyon edilen bir filamentin sarıcıya sarılması gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Ekstrüzyon metodunda kullanılan bir sarıcı (www.boyutkat.com)

5. MATERYAL YÖNTEM

5.1. Atık Plastik Granül Üretimi

Tez kapsamında, filament üretebilmenin ön aşaması ekstrüzyon besleme hunisinden atık plastiklerin girdi olarak beslenmesi aşamasıdır. Dolayısıyla atık plastiklerden oluşan bir plastik granül ihtiyacı bulunmaktadır. Plastik granüllerinin temin edilebilmesi için Eurotec Mühendislik Plastikleri firması ile ortak bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Dört farklı hammadde olacak şekilde PLA üretimi yapılmıştır (Çizelge 5.1.). Atık plastiklerin üretimi için orijinal PLA hammaddesinden aynı proseste ve özelliklerde olacak şekilde çekme çubukları basılıp bu çekme çubukları kırma makinasında kırılmıştır. Daha sonra bu kırılan atık plastikler aşağıdaki çizelgedeki oranlara göre orijinal PLA hammaddesi ile homojen olacak şekilde karıştırılıp yeni granüllerin üretilmesi sağlanmıştır. Plastik hammaddeler üretim sonunda poşetlerle vakumlanarak ortamdan nem almaması sağlanmıştır (Şekil 5.1.).

Çizelge 5.1. Kullanılan plastik hammaddelerin kodu ve geri dönüşüm oranları

Hammadde Kodu	PLA Oranı	Atık Plastik Oranı
RM1	%100	-
RM2	%70	%30
RM3	%50	%50
RM4	%30	%70

RM1, %100 PLA granülü içermekte olup içerisinde herhangi bir katkı veya atık malzeme içermemektedir.

RM2, %70 PLA granülü içermektedir. Geriye kalan %30'luk kısmında atık plastik kullanılmıştır.

RM3, %50 PLA granülü içermektedir. Geriye kalan %50'luk kısmında atık plastik kullanılmıştır.

RM4, %30 PLA granülü içermektedir. Geriye kalan %70'luk kısmında atık plastik kullanılmıştır.



Şekil 5.1. Üretilen plastik granüllerin vakumlu poşette muhafaza edilmesi

Eurotec Mühendislik Plastikleri firmasının ürettiği orijinal (RM1 - %100 PLA) hammaddesine ait proses parametreleri Çizelge 5.2’de verilmiştir. RM2, RM3 VE RM4 hammaddelerinde de aynı parametrelerin kullanılabileceği bilgisi paylaşılmıştır.

Çizelge 5.2. Üretilen plastik granüllere ait proses bilgileri

Hammadde Kodu	Açıklama	MFI (190 °C - 2.16 kg)	Tg (°C)	Tm (°C)
RM1	%100 PLA	3,00	60	175
RM2	%70 PLA - %30 atık-PLA	4,75	-	-
RM3	%50 PLA - %50 atık-PLA	4,06	-	-
RM4	%30 PLA - %70 atık-PLA	4,20	-	-
Extrusion	Ekstrüzyon	Nominal Value Unit (Nominal Değer Birimi)		
Drying Temperature	Kurutma Sıcaklığı	100 °C		
Drying Time	Kuruma zamanı	4 - 6 saat		
Hopper Temperature	Hazne Sıcaklığı	20 - 40 °C		
Melt Temperature	Erime sıcaklığı	180 - 190 °C		
Die Temperature	Kalıp Sıcaklığı	190 - 210 °C		

5.2. Filament Üretimi

Plastik hammaddelerden filament üretiminin yapılması için FİLAMEX TEKNOLOJİ LTD. ŞTİ. ile ortak bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Filament üretimi için FilameX FX-20 PLUS (R&D Full Kit) makinesi kullanıldı. Ölçüm mekanizması olarak komparatör modülü kullanılmıştır (Şekil 5.2).

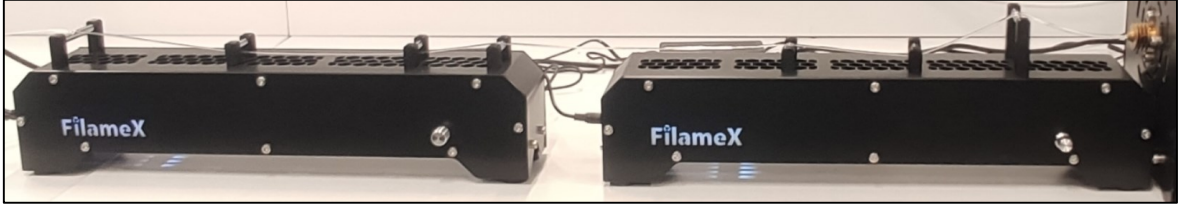


Şekil 5.2. FilameX FX-20 PLUS (R&D Full Kit)

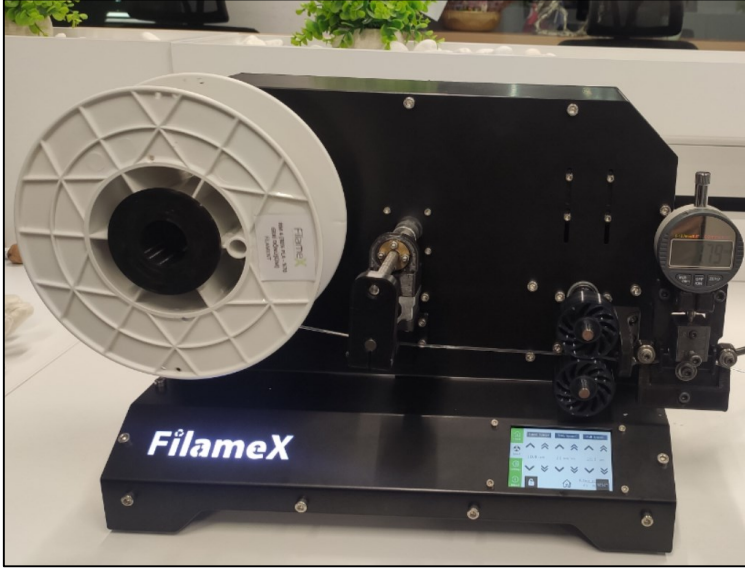
Bu makinede plastik granüller FX-20 Plus Extruder üzerindeki besleme hunisine aktarılmış ve hammaddeye uygun olacak şekilde besleme bölgesi ve ekstrüzyon bölgesinin ısı sıcaklık proses parametreleri ayarlanmış ve üretim hızı optimize edilmiştir. Plastik malzeme ekstrüderde işlendikten sonra nozul ucundan ısı değeri ile ekstrüde edilmiştir (Şekil 5.3.). Daha sonra Cooler olarak adlandırılan iki adet hava ile soğutma havuzundan geçirilmiştir (Şekil 5.4.). Filament, Spooler üzerindeki ölçüm bölgesine gelerek sarma ve toplarlama bölgelerinde optimize edilen çekme değerleri ile makaraya sarılmıştır (Şekil 5.5.).



Şekil 5.3. FX-20 Plus Extruder



Şekil 5.4. Cooler



Şekil 5.5. Spooler ve komparatör modülü

FilameX FX-20 PLUS (R&D Full Kit) makinesine ait teknik özellikler Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. FilameX FX-20 PLUS teknik özellikleri (www.3dfilamex.com)

Fx-20 Teknik Özellikleri	
Ekstrüzyon Sıcaklığı:	0 – 400°C
Motor Hızı:	2 – 55 RPM
Motor Torku:	20 Nm
Nozul Çapı:	0.5 mm – 3.00 mm
Enerji Tüketimi:	~ 600 Watt
Besleme Haznesi:	4 Kg
Kontrol Paneli:	3.2 inch Dokunmatik Ekran
Mil Çapı:	20 mm
Mil Uzunluğu:	400 mm
Ölçüler:	650L x 200W x 400H mm
Güç Girişi:	220 V 50 Hz

Spooler Teknik Özellikleri	
Sarma Hızı Aralığı:	0 – 60 Rpm
Filament Çap Aralığı:	0.5 mm – 3 mm (1.75 mm filament için tasarlanmıştır. 2.85 mm filament için özelleştirilebilir.)
Desteklenen Makara Genişliği:	30 – 80 mm
Desteklenen Makara İç Çapı:	50 – 120 mm
Filament Çap Sensörü Hassasiyeti:	0.01 mm (opsiyonel)
Güç Tüketimi:	100 Watt
Güç Girişi:	220V 50Hz Ac
Ölçüler:	400L x 220W x 300H mm

Cooler Teknik Özellikleri	
Fan Sayısı:	5 Adet
Fan Hız Aralığı:	200 – 2500 Rpm
Gürültü Seviyesi:	Yaklaşık 50dB (Max Hızda)
Güç Tüketimi:	Max. 50 Watt
Güç Girişi:	220V 50Hz Ac
Ölçüler:	500L x 100W x 160H mm

Filament üretimlerine ait proses parametreleri çizelge 5.4'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Üretilen filamentlere ait proses bilgileri

Hammadde	Üretim Teknik Bilgiler					
	1. Isıtma Bölgesi (Ekstrüzyon Bölümü)	2. Isıtma Bölgesi (Sıkıştırma Bölümü)	Ortalama Vida Hızı	Soğutma türü	Soğutma hat sayısı	Filament üretimine uygunluk (İyi/Orta/Az)
RM1 (%100 PLA)	195 °C	170 °C	22 RPM	Hava	2	İyi
RM2 (%70 PLA - %30 Atık Plastik)	195 °C	175 °C	30 RPM	Hava	2	Orta
RM3 (%50 PLA - %50 Atık Plastik)	195 °C	147 °C	30 RPM	Hava	2	Az
RM4 (%30 PLA - %70 Atık Plastik)	185 °C	150 °C	30 RPM	Hava	2	Az

Filament üretimi sonrasında proseslere ait değerlendirmeler aşağıda verilmiştir.

RM1: Hammadde filament üretimine uygundur. Malzeme kararlı davranmaktadır. Üretimde çap dalgalanmasına rastlanmadı. Hammadde soğuma eğilimi kararlıdır. 3 boyutlu yazıcıda, ekstrüzyon bölgesi sıcaklık değerinin 5 - 15 °C fazlası kullanılarak baskı yapılabilir.

RM2: Hammadde filament üretimine uygundur. Malzeme kararlıya yakın davrandı. Üretimde çap dalgalanmasına çok az rastlandı. Hammadde soğuma eğilimi kararlıdır. 3 boyutlu yazıcıda, ekstrüzyon bölgesi sıcaklık değerinin 5 - 15 °C fazlası kullanılarak baskı yapılabilir.

RM3: Hammadde filament üretimine kısmen uygundur. Malzeme kararlı davranmamakta olup geliştirme gerekmektedir. Üretimde çap dalgalanmasına rastlandı ancak toleranslar içerisinde. Hammadde soğuma eğilimi kararlıya yakın bir performans sergiledi. 3 boyutlu yazıcıda, ekstrüzyon bölgesi sıcaklık değerinin 5 - 15 °C fazlası kullanılarak baskı denenebilir.

RM4: Hammadde filament üretimine kısmen uygundur. Malzeme kararlı davranmamakta olup geliştirme gerekmektedir. Üretimde çap dalgalanmasına rastlandı ancak toleranslar içerisinde. Hammadde soğuma eğilimi kararlıya yakın bir performans sergiledi. 3 boyutlu yazıcıda, ekstrüzyon bölgesi sıcaklık değerinin 10 - 30 °C fazlası kullanılarak baskı denenebilir.

Filament üretimi tamamlandıktan sonra makaralar nem tutucular ile vakumlanarak hammadde kodları ve karışım oranları makaraların ve kutuların üzerine yazılmıştır (Şekil 5.6). Artan plastik granüller vakumlu poşetlere aktarılmıştır (Şekil 5.7). Plastik granüllerin renklerinin RM1’de (%100 PLA) daha beyaz renkli iken atık plastik oranı arttıkça renginin koyu bir hal aldığı görülmüştür.



Şekil 5.6. Üretilen filamentler



Şekil 5.7. Filament üretimi sonrası artan plastik granüllerin vakumlanması

5.3. Proses Parametrelerinin Belirlenmesi

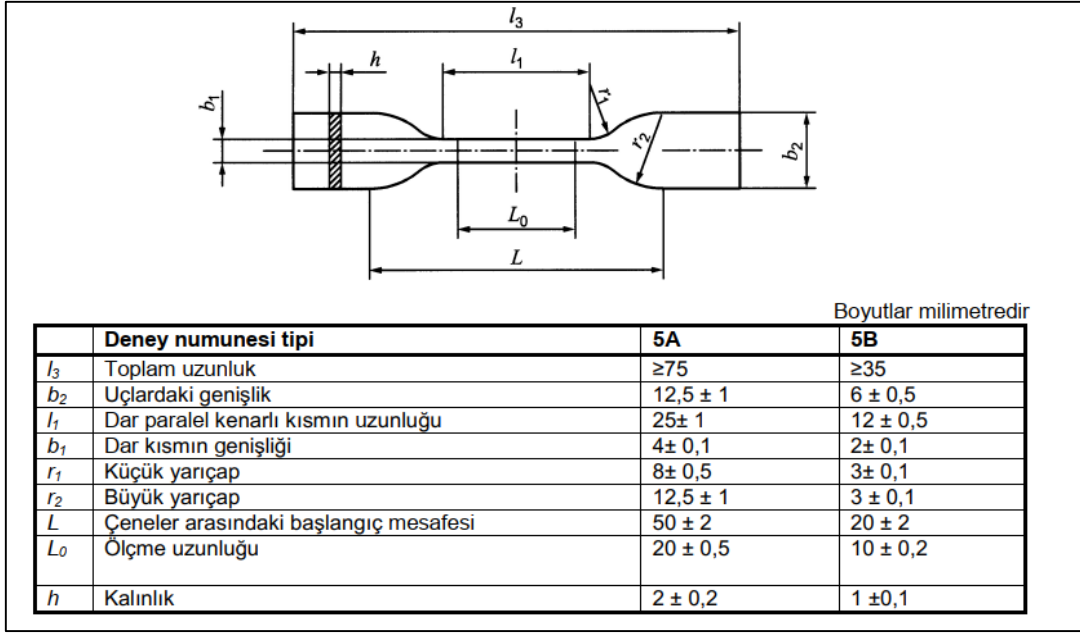
Proses tasarımı yapabilmek için 3D yazıcının proses parametrelerinin iyi bilinmesi gerekir. Nozul sıcaklığı, baskı hızı, doluluk oranı, tabla sıcaklığı, üretim yönü, katman kalınlığı, tarama açısı gibi parametreler baskı süresini, kalitesini ve ürünün mekanik özelliklerini etkileyecektir. Klasik yöntem ile yapılan deney tasarımlarında her seferinde bir parametre değiştirilmekte olup diğer bağımsız parametreler sabit tutulmaktadır. Dolayısıyla sistemin parametrelerinin arasında o anda değiştirilen parametrenin bir etkisi olup olmadığı araştırılır. Bu yöntem yüksek malzeme maliyeti, uzun zaman ve kaynak gerektiren bir yöntemdir. Toplam deney sayısının minimumda tutulması, daha kısa zamanda üretimin gerçekleştirilebilmesi ve parça maliyetlerinin azaltılması açısından Taguchi metodu kullanılması daha uygundur. Proses parametrelerini oluştururken parametre ve seviyelerin iyi tanımlanması gerekir. 4 farklı hammadde çeşidi olduğu için dört farklı seviye olmaktadır. Taguchi ortogonal dizilerinde 4 farklı seviye için L'16 ortogonal dizisi ile minimum adette deney gerçekleştirilmesi mümkündür. Yapılan bu çalışmada bu dizi parametre olarak 4 veya 5 parametre seçebilme imkanı sunmaktadır. Bu çalışmanın yapılabilmesi için $P=5$ ve $S=4$

olacak şekilde Taguchi L'16 ortogonal dizisi kullanılmıştır. İlgili parametreler Hammadde Oranı, Nozul Sıcaklığı, Baskı Hızı, Doluluk Oranı ve Tabla Sıcaklığı olarak belirlenmiştir (Çizelge 5.5.).

Çizelge 5.5. Proses parametrelerinin Taguchi L'16 ortogonal dizilimi deney tasarımı

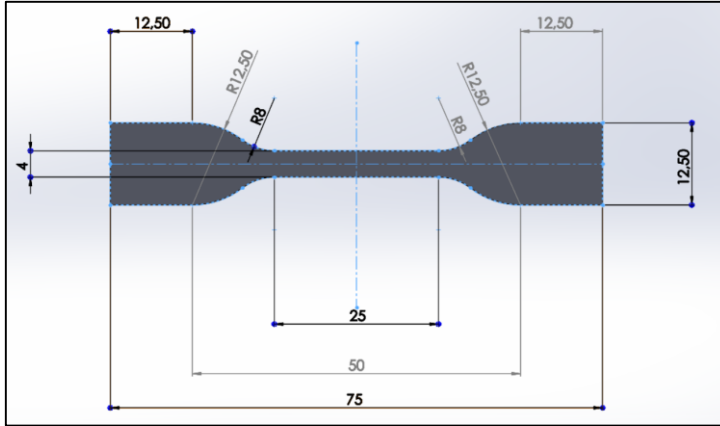
L'16 Taguchi						
Deney No	Parametere (Level)					
	Hammadde Kodu	Karışım Oranı	Nozul Sıcaklığı (°C)	Baskı Hızı (mm/s)	Doluluk Oranı (%)	Tabla Sıcaklığı (°C)
1	RM1	1,00	195	40	40	50
2	RM1	1,00	200	50	60	55
3	RM1	1,00	205	60	80	60
4	RM1	1,00	210	70	100	65
5	RM2	0,70	195	50	80	65
6	RM2	0,70	200	40	100	60
7	RM2	0,70	205	70	40	55
8	RM2	0,70	210	60	60	50
9	RM3	0,50	195	60	100	55
10	RM3	0,50	200	70	80	50
11	RM3	0,50	205	40	60	65
12	RM3	0,50	210	50	40	60
13	RM4	0,30	195	70	60	60
14	RM4	0,30	200	60	40	65
15	RM4	0,30	205	50	100	50
16	RM4	0,30	210	40	80	55

Üretilen parçaların mekanik özelliklerinin tayin edilebilmesi için parçaların TS EN ISO 527 standardına göre çekme numunelerinin test edilmesi gerekmektedir. Standartta her bir proses için minimum test numune sayısının 5 olduğu belirtilmektedir. Ayrıca, farklı boyutlardaki numuneler için farklı kodlarda çekme çubukları tanımlıdır. Örneğin, TS EN ISO 527-2'ye göre çekme çubuğunun uzunluğu 170 mm ise 1A, 150 mm ve üzerindeyse 1B deney numunesi tipi kullanılır. 16 farklı proses göz önünde bulundurularak deney yapılması gerektiğinden ve her bir proses için de minimum 5'er adet numune üretilmesi gerektiğinden dolayı çekme çubuklarının deneyi tipi numunesi TS EN ISO 527-2 5A olarak belirlenmiştir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. TS EN ISO 527-2 5A deney numunesi tipi ve boyutları

SolidWorks 2013'te 5A deney tipi numunesi göre katı model çizildi (Şekil 5.9.).



Şekil 5.9. Solidworks ortamında çizilen TS EN ISO 527-2 5A deney tipi numunesi

5A numunesine ait katı model .STL formatına dönüştürülerek Ultimaker Cura 5.2.1 programında 3D yazıcı parametrelerinin ayarlanması için kullanılmıştır. Cura programında proses parametreleri Çizelge 5.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 5.6. Cura programında proses parametrelerinin deney seti göre optimizasyonu

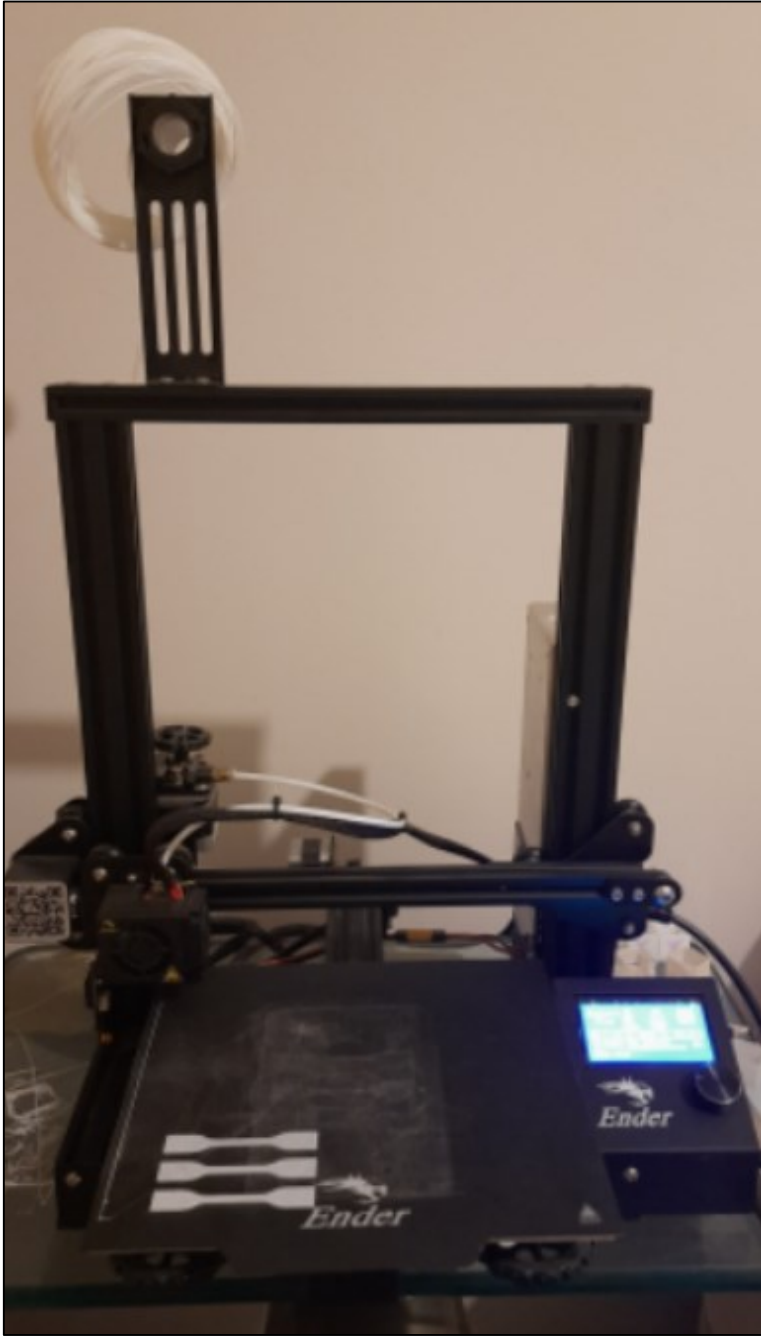
Parametre	Birim	Deney No															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Kalite																	
*Katman Yüksekliği	mm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
*İlk Katman Yüksekliği	mm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
*Hat Genişliği	mm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
**Duvar Hattı Genişliği	mm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
***Dış Duvar Hattı Genişliği	mm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
***İç Duvar(lar) Hattı Genişliği	mm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
**Üst/Alt Hat Genişliği	mm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
**Dolgu Hattı Genişliği	mm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Duvarlar																	
*Duvar Kalınlığı	mm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
**Duvar Hattı Sayısı		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
*Yatay Büyüme	mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Üst/Alt																	
*Üst/Alt Kalınlık	mm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
**Üst Kalınlık	mm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
***Üst Katmanlar		99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
**Alt Kalınlık	mm	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
***Alt Katmanlar		99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99
Dolgu																	
*Dolgu Yoğunluğu	%	40	60	80	100	80	100	40	60	100	80	60	40	60	40	100	80
*Dolgu Şekli		Çizgile	Çizgile	Çizgile	Çizgile	Çizgile	Çizgile	Çizgile	Çizgile	Çizgile	Çizgile	Çizgile	Çizgile	Çizgile	Çizgile	Çizgile	Çizgile
Malzeme																	
*Yazdırma Sıcaklığı	°C	195	200	205	210	195	200	205	210	195	200	205	210	195	200	205	210
*Yapı levhası Sıcaklığı	°C	50	55	60	60	65	60	55	50	55	50	65	60	60	65	50	55
Hız																	
*Yazdırma Hızı	mm/s	40	50	60	70	50	40	70	60	60	70	40	50	70	60	50	40
**Dış Duvar Hızı	mm/s	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
*İlk Katman Hızı	mm/s	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
**İlk Katman Yazdırma Hızı	mm/s	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
**İlk Katman Hareket Hızı	mm/s	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Hareket																	
*Geri Çekmeyi Etkinleştir		evet	evet	evet	evet	evet	evet	evet	evet	evet	evet	evet	evet	evet	evet	evet	evet
*Geri Çekildiğinde Z sıçraması		hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır
Soğuma																	
*Yazdırma Soğutmayı Etkinleştir		evet	evet	evet	evet	evet	evet	evet	evet	evet	evet	evet	evet	evet	evet	evet	evet
*Fan Hızı	%	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Destek																	
*Oluşturma Desteği		hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır	hayır
Yapı Levhası Yapıştırması																	
*Yapı Levhası Türü		hiçbiri	hiçbiri	hiçbiri	hiçbiri	hiçbiri	hiçbiri	hiçbiri	hiçbiri	hiçbiri	hiçbiri	hiçbiri	hiçbiri	hiçbiri	hiçbiri	hiçbiri	hiçbiri

Katman kalınlığının, parametreye dahil edilmesi istenmesine rağmen 4 farklı katman kalınlığında parça üretimi gerçekleştirmek, test edilecek numunelerin kalınlıklarındaki nominal değer in yakalanmasını zorlaştırmıştır. Örneğin, katman kalınlığı değerleri sırasıyla 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm ve 0,4 mm olarak ayarlandığında; 0,3 mm ve 0,4 mm olan katman kalınlıklarında üretilecek test numunelerine ait 2 mm olması gereken kalınlık değerleri tolerans içinde sağlanamadı. 0,4 mm katman kalınlığında gerçekleştirilen baskılarda et kalınlıkları 2,4 mm olarak ölçülmüştür. Katman kalınlığı 0,1 seçildiğinde ise numunelerin

üretimi daha uzun sürmüştür. Bu durum değerlendirildiğinde katman kalınlıklarının her proses için 0,2 mm olarak sabitlenmesinin daha uygun olacağına karar verilmiştir.

5.4. 3D Yazıcıda Test Numunelerinin Üretimi

Test numunelerinin üretimi için Creality Ender 3 Pro yazıcı kullanılmıştır (Şekil 5.10.). Yazıcıya ait üretici firma teknik bilgileri Çizelge 5.7’de gösterilmektedir.

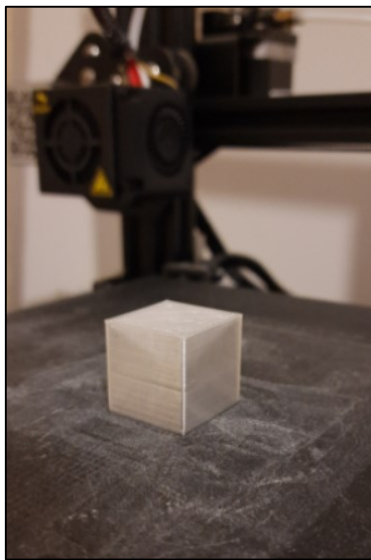


Şekil 5.10. Test numunesi üretiminde kullanılan Creality Ender 3 Pro yazıcı

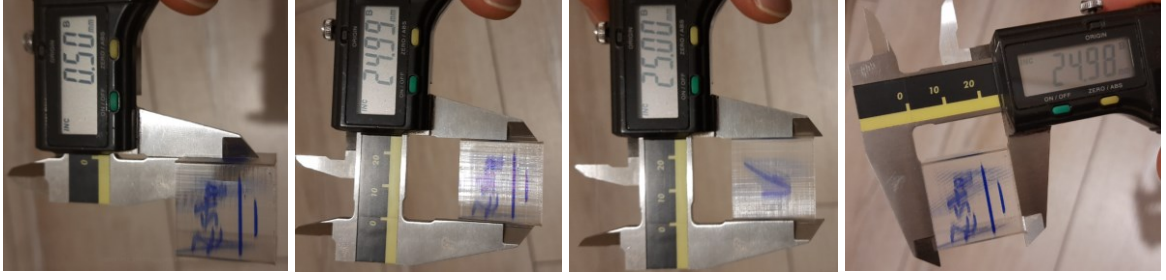
Çizelge 5.7. Creality Ender 3 Pro ürün parametreleri (www.creality.com)

Product Parameters (Ürün Parametreleri)		
Machine model	Makine modeli	Ender-3 Pro
Molding technology	Kalıplama teknolojisi	FDM (Fused Deposition Molding)
Printing size	Baskı boyutu	220*220*250 mm
Printing speed	Baskı hızı	≤180 mm/s, normal 30-60 mm/s
Printing precision	Baskı hassasiyeti	±0.1 mm
Nozzle diameter	Nozul çapı	standart 0.4 mm, can be in 0.3 or 0.2 mm
Hotbed temperature	Tabla sıcaklığı	≤100°C
File transfer	Dosya aktarımı	Online or SD card offline
File format	Dosya biçimi	STL, OBJ, AMF
Slicing software	Dilimleme yazılımı	Cura / Repetier-Host / Simplify3D
Power supply	Güç kaynağı	input: AC 100-120V / 6.8A 200-240V / 3.4A 50/60 Hz output: DC 24V 270W
Filament	Filament	PLA, ABS, TPU, wood, copper, gradient, etc.
N.W. (Net weight)	Net ağırlık	6.98 kg
Machine size	Makine boyutu	440*420*465mm
G.W. (Gross weight)	Brüt ağırlık	9kg
Packaging size	Ambalaj boyutu	600*505*175mm

Test numunelerinin üretimine başlamadan önce baskılara ait boyutsal doğrulamalar yapılmıştır. RM1 filamenti ile 25x25x25 mm'lik küp basılmıştır (Şekil 5.11). Mitutoyo kumpas ile ölçülerek doğruluk kontrolü yapılmıştır. Yapılan kontrollerin ardından stepper ayarları optimize edilmiştir (Şekil 5.12).



Şekil 5.11. 25x25x25 mm küp

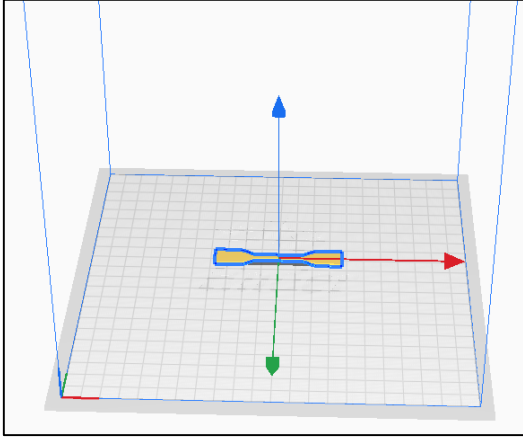


Şekil 5.12. Sırasıyla Estepper, Xstepper, Ystepper ve Zstepper değerlerine göre küp üzerindeki uzunluklar

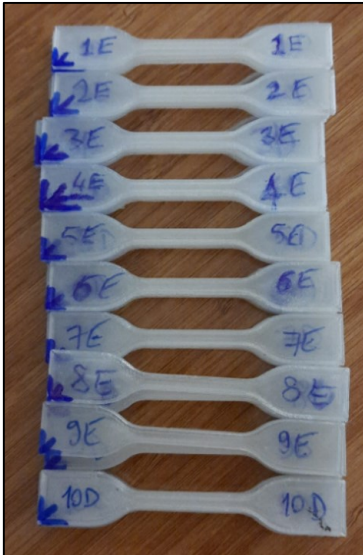
Çizelge 5.6’da gösterilen her proses için 5’er adet çekme test numunesi üretildi. Üretilen numunelerin yazıcıya göre sol alt kısımlarına ok işareti koyulmuştur. Sağ ve sol taraflarına proses numarası yazılmıştır. Her prosten 5 adet numune ise A, B, C, D, E olarak tanımlanmıştır (Şekil 5.13.). Ok işaretinin amacı ise Cura programında orijinin o bölgede olması ve 3D yazıcıda Home Axis’in o bölgede olmasıdır (Şekil 5.14.). Şekil 5.15’te 11. prosese kadar basılmış parçalar gösterilmektedir. RM3 ve RM4 hammaddeleri ile üretilen ilk numunelerde 3D yazıcının hotend bölgesinde malzeme donması olmuştur. Filament sıcaklığı 250 °C’ye çıkarıldıktan sonra nozul ucundan iğne ile tıkanıklık giderildi ve sonrasında prosesler ayarlanarak üretime devam edilmiştir.



Şekil 5.13. Üretilen numunenin proses numarası ve parça sırası



Şekil 5.14. Cura programında numune datasının konumlandırılması



Şekil 5.15. Üretilen numuneler

Üretilen numunelere ait kalınlık (h) ve dar kısmın genişliği (b_1) ölçüleri üç farklı noktadan Mitutoyo kumpas ile ölçüldü ve ortalama değerleri kayıt altına alınmıştır.

5.5. Çekme Testlerinin Yapılması

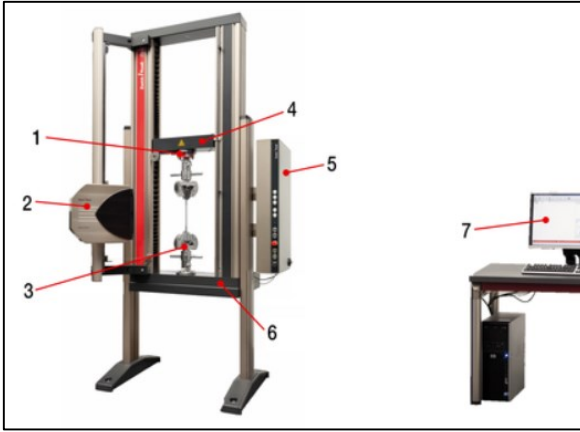
Basılan numunelerin çekme testleri AKWEL GEBZE TURKEY OTOMOTİV SANAYİ LİMİTED ŞİRKETİ kalite laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri Zwick Roell Proline Z005 cihazında gerçekleştirilmiş ve TestXpert 3 programı kullanılmıştır.



Şekil 5.16. Zwick Roell Z005 test cihazı (www.zwickroell.com)

Çekme test cihazına ait tipik bileşenler Şekil 5.17’de gösterildi. Bu bileşenlere ait işlevler aşağıda tanımlanmaktadır (www.zwickroell.com).

- 1- Yük Transdüser: çekme kuvvetini ölçülebilir bir elektrik sinyaline dönüştürür.
- 2- Extensometre: gerinim ölçer olarak da adlandırılmaktadır. İşlevi bir numunenin gerinimini ölçmektir. Gerinim ölçümü, ASTM ve ISO gibi standartlarda gerekli olmaktadır.
- 3- Çeneler: çekme test cihazı ile numune arasında bir mekanik bağlantı oluşturarak travers hareketini numuneye iletir ve numunedeki test kuvvetini yük hücresine aktarır.
- 4- Hareketli Travers: yukarı veya aşağı hareket etmeyi sağlar. Test cihazının travers hızı, numune üzerindeki gerinim oranı ile doğrudan ilişkilidir.
- 5- Elektronik: test cihazındaki hareketli parçaların kontrol edilmesini sağlamaktadır. Traversin yükleme hızı, servo kontrolördeki (motor, geri besleme cihazı ve kontrolör) bir mikroişlemci tarafından kontrol edilebilir.
- 6- Sürüş Sistemi: tahrik sistemi olarak da adlandırılan bu sistem, çekme test cihazının motorunu farklı seviyelerde akım ve frekans ile besleyerek motor hızını ve torkunun kontrol edilmesine yardımcı olur.
- 7- Yazılım: test yazılımı, testi gerçekleştiren kişilerin test sistemini kurmasına, testleri yapılandırmasına, çalıştırmasına ve sonuçların ekran aktarılmasına yardımcı olur.



Şekil 5.17. Zwick Roell Z005 test cihazının bileşenleri

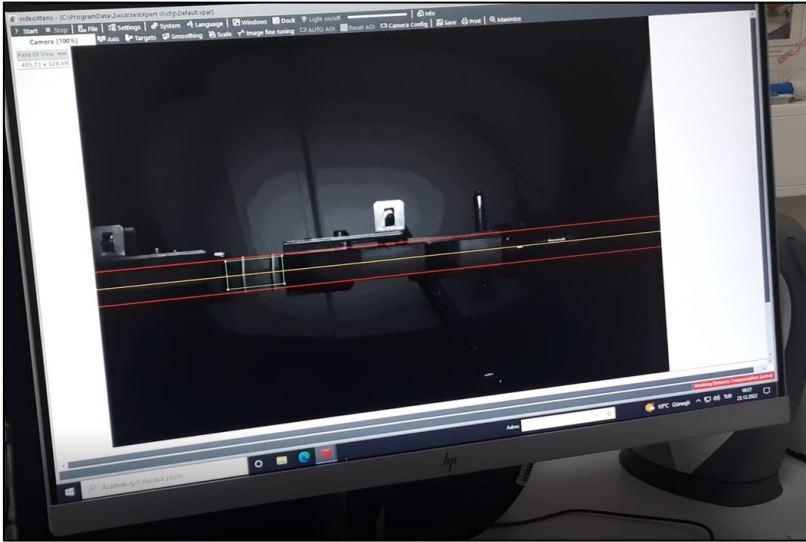
TestXpert 3 yazılımı başlatıldıktan sonra ekstansometre üzerindeki kamera çenelerin arasını görecektir şekilde ayarlanmış ve ışık açılmıştır. Basılan numune parçalarının hepsinin orijin olarak ok işareti ile belirtilmiş kısımları aynı olacak şekilde 20 mm'lik fikstür üzerine yerleştirilmiştir. Bu fikstür üzerine siyah ve beyaz iki rengi bulunan şeritler siyah bölgeleri orijine bakacak şekilde yapıştırılmıştır (Şekil 5.18.). Ardından çenelere yerleştirilmiştir (Şekil 5.19.). Kamera yapıştırılan şeritleri görecektir şekilde ayarlandı ve yazılımda yeşil çerçeve içerisinde kontrolü sağlanmıştır (Şekil 5.20.). Programda test standardı DIN EN ISO 527-1 olarak seçilmiştir. Test hızı 1 mm / dk olarak ayarlanmıştır. Numuneye ait kalınlık (h) ve dar kısmın genişliği parametreleri (b1) ölçüleri programda girilerek test başlatılmıştır (Şekil 5.21.). Test parametrelerine ait rapor bilgileri Çizelge 5.8'de gösterilmektedir.



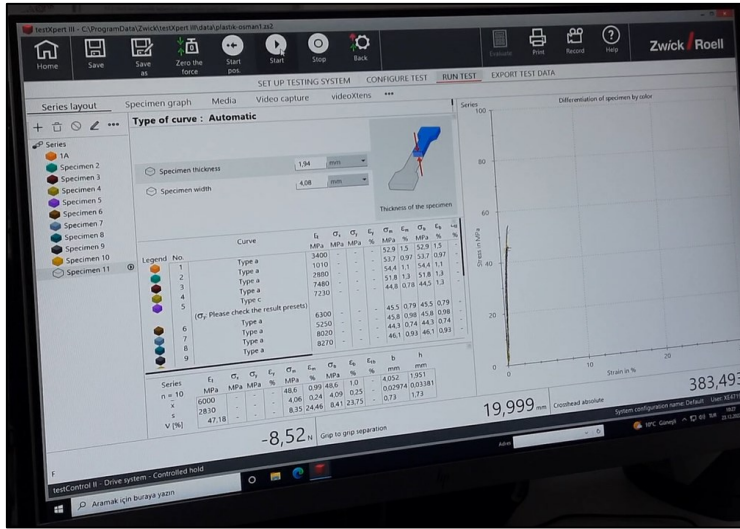
Şekil 5.18. Numunelerin fikstür üzerine yerleştirilmesi



Şekil 5.19. Numunelerin çenelere sabitlenmesi



Şekil 5.20. Şeritlerin kamera ve TestXpert yazılımı ile kontrolü



Şekil 5.21. TestXpert 3 yazılımında testlerin başlatılması

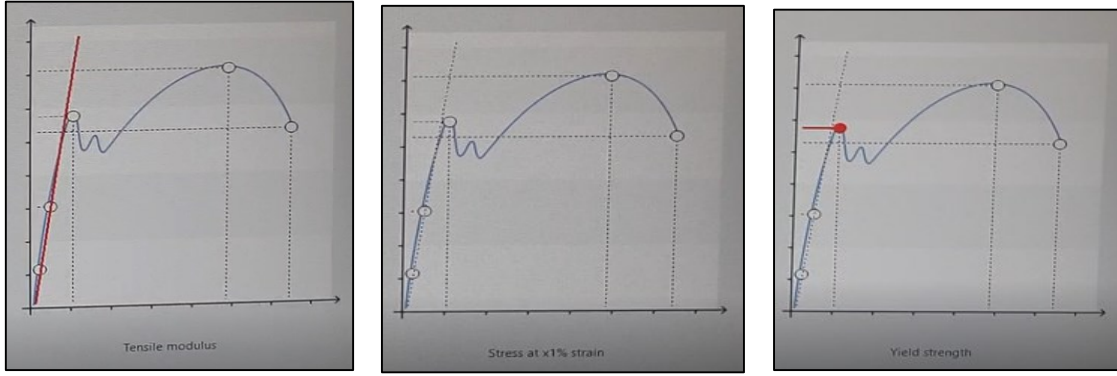


Şekil 5.22. Çekme testi sonrasında numuneler

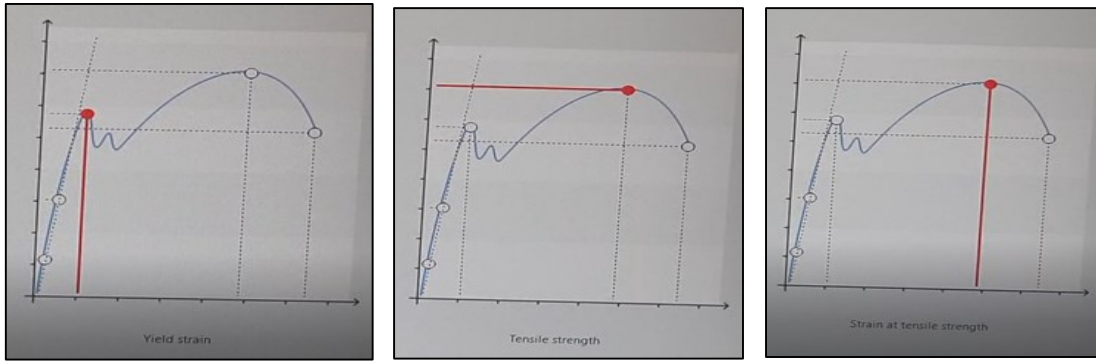
Çizelge 5.8. Çekme testi parametreleri

Zwick / Roell TEST REPORT		
Test standard	DIN EN ISO 527-1	
Pre-load	0,1	MPa
Speed, tensile modulus	1	mm/min
Test speed	1	mm/min
Grip to grip separation at the start position	20	mm
Gage length, standard travel	20	mm

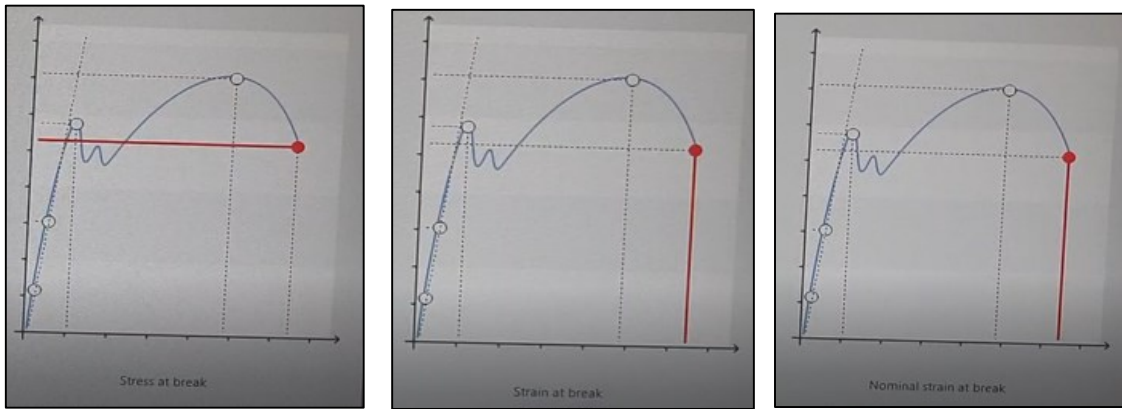
TestXpert 3 yazılımındaki kısaltmalara ait grafikler aşağıda gösterilmektedir (Şekil 5.23 – 5.25). Proses parametrelerine göre çekme testine ait sonuçlar Çizelge 5.9’da gösterilmektedir.



Şekil 5.23. Elastisite Modülü (E_t), %1 uzamada dayanım (σ_x), Akma Dayanımı (σ_y)



Şekil 5.24. Akma Uzaması (ϵ_y), Çekme Dayanımı (σ_m), Çekme Uzaması (ϵ_m)



Şekil 5.25. Kopma Dayanımı (σ_b), Kopma Uzaması (ϵ_b), Kopma anındaki nominal uzama (ϵ_{tb})

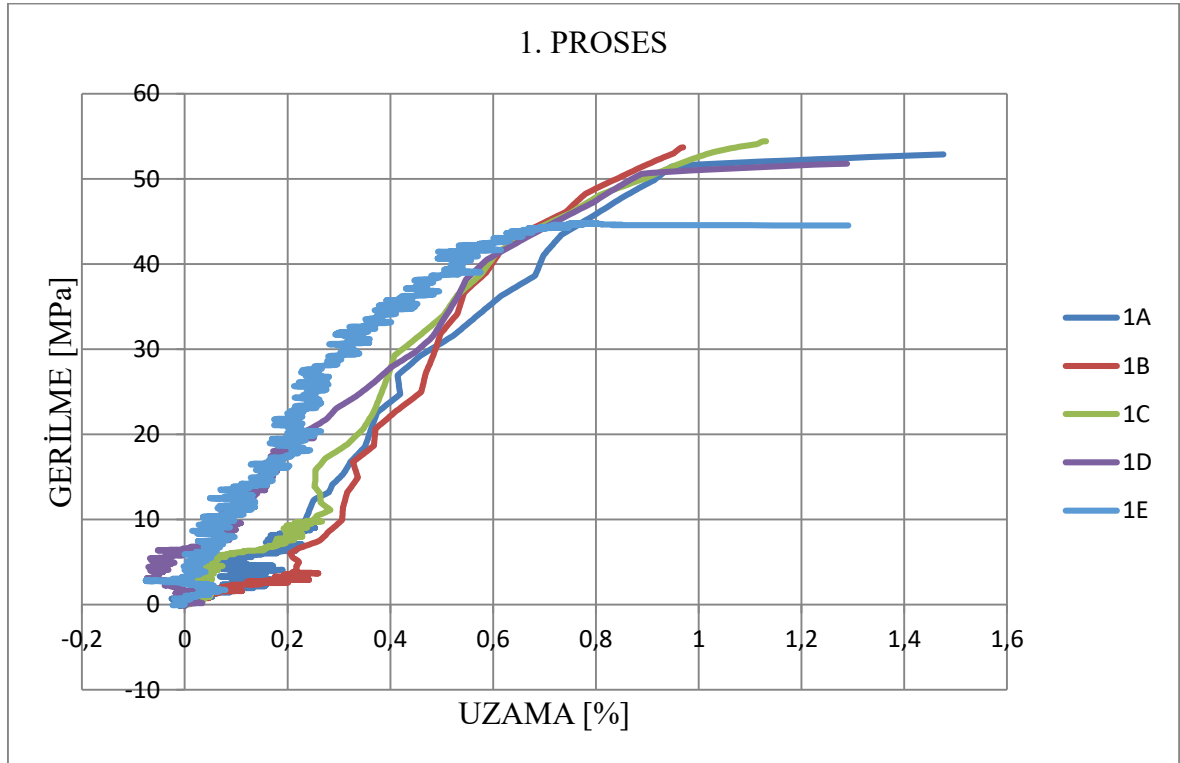
Çizelge 5.9. Test sonuçları

Numune Kodu	Ham madde Kodu	Ham madde Oran	Doluluk Oranı (%)	Nozul Sıcaklığı (°C)	Tabla Sıcaklığı (°C)	Baskı Hızı (mm/s)	E _t	σ _m	ε _m	σ _b	ε _b	b	h	Ortalama				
							MPa	MPa	%	MPa	%	mm	mm	E _t	σ _m	ε _m	σ _b	ε _b
							Tensile Modulus	Tensile strength	Stress at tensile strength	Stress at break	Strain at break	Numundeki en dar kısmın genişliği	Numunedeki kalınlık					
							Elastisite Modülü	Çekme Dayanımı	Çekme Uzunması	Kopma Dayanımı	Kopma Uzunması							
1A	RM1	1,0	40	195	50	40	3397,94	52,88	1,48	52,88	1,48	4,06	1,98	4399	51,53	1,13	51,47	1,23
1B	RM1	1,0	40	195	50	40	1008,60	53,71	0,97	53,71	0,97	4,04	1,96					
1C	RM1	1,0	40	195	50	40	2881,47	54,43	1,13	54,43	1,13	4,02	2,01					
1D	RM1	1,0	40	195	50	40	7478,74	51,81	1,29	51,81	1,29	4,08	1,93					
1E	RM1	1,0	40	195	50	40	7230,47	44,80	0,78	44,53	1,29	4,01	1,93					
2A	RM1	1,0	60	200	55	50	6303,20	45,48	0,79	45,48	0,79	4,08	1,93	7594	45,71	0,85	45,71	0,85
2B	RM1	1,0	60	200	55	50	5248,35	45,84	0,98	45,84	0,98	4,08	1,89					
2C	RM1	1,0	60	200	55	50	8022,24	44,32	0,74	44,32	0,74	4,09	1,97					
2D	RM1	1,0	60	200	55	50	8267,01	46,12	0,93	46,12	0,93	4,02	1,94					
2E	RM1	1,0	60	200	55	50	10130,61	46,80	0,81	46,80	0,81	4,04	1,97					
3A	RM1	1,0	80	205	60	60	956,19	47,74	2,74	47,74	2,74	4,1	1,93	1680	45,84	2,53	44,62	3,16
3B	RM1	1,0	80	205	60	60	1025,12	44,14	3,07	40,93	3,56	4,05	1,81					
3C	RM1	1,0	80	205	60	60	1192,13	41,25	2,72	38,36	5,36	4,06	1,87					
3D	RM1	1,0	80	205	60	60	3229,54	48,75	2,17	48,75	2,17	4,07	1,91					
3E	RM1	1,0	80	205	60	60	1994,58	47,31	1,98	47,31	1,98	4,1	1,9					
4A	RM1	1,0	100	210	65	70	3692,72	47,59	2,00	47,59	2,00	4,09	1,87	2881	48,66	2,14	48,19	2,56
4B	RM1	1,0	100	210	65	70	1937,94	48,23	1,92	47,99	3,28	4,09	1,92					
4C	RM1	1,0	100	210	65	70	3816,10	48,62	2,18	48,62	2,18	4,1	1,94					
4D	RM1	1,0	100	210	65	70	1211,80	49,97	2,46	49,97	2,46	4,04	1,97					
4E	RM1	1,0	100	210	65	70	3747,66	48,89	2,15	46,77	2,89	4,05	1,94					
5A	RM2	0,7	80	195	65	50	4655,53	50,55	2,26	47,10	3,69	4,1	2,02	3099	51,20	2,30	48,89	3,12
5B	RM2	0,7	80	195	65	50	3045,06	51,29	2,15	49,10	2,90	4,05	1,95					
5C	RM2	0,7	80	195	65	50	3360,07	49,71	2,22	49,71	2,22	4,08	1,91					
5D	RM2	0,7	80	195	65	50	3444,81	52,28	2,22	52,28	2,22	4,06	1,85					
5E	RM2	0,7	80	195	65	50	989,22	52,17	2,63	46,23	4,55	4,04	1,91					
6A	RM2	0,7	100	200	60	40	1226,55	49,44	2,18	49,44	2,18	4,1	1,91	1898	49,90	2,34	45,83	3,34
6B	RM2	0,7	100	200	60	40	1837,05	50,00	2,49	41,04	4,57	4,09	1,96					
6C	RM2	0,7	100	200	60	40	2575,99	47,46	2,32	47,46	2,32	4,09	1,99					
6D	RM2	0,7	100	200	60	40	2237,83	51,35	2,41	45,39	4,01	4,08	1,96					
6E	RM2	0,7	100	200	60	40	1613,04	51,24	2,31	45,81	3,62	4,07	1,96					
7A	RM2	0,7	40	205	55	70	1327,30	51,28	2,42	45,79	3,76	4,06	1,82	2021	50,27	2,29	48,34	2,85
7B	RM2	0,7	40	205	55	70	2302,30	49,19	2,59	49,19	2,59	4,09	1,93					
7C	RM2	0,7	40	205	55	70	2101,44	52,08	2,34	47,92	3,78	4,07	1,92					
7D	RM2	0,7	40	205	55	70	1105,91	51,47	2,46	51,47	2,46	4,1	1,89					
7E	RM2	0,7	40	205	55	70	3266,00	47,34	1,66	47,34	1,66	4,04	1,91					
8A	RM2	0,7	60	210	50	60	917,83	51,17	2,48	51,17	2,48	4,06	1,98	1554	50,93	2,37	48,15	3,21
8B	RM2	0,7	60	210	50	60	1098,14	51,83	2,34	49,36	3,46	4,09	2,06					
8C	RM2	0,7	60	210	50	60	725,13	50,61	2,40	50,61	2,40	4,08	2,14					
8D	RM2	0,7	60	210	50	60	4193,39	50,12	2,16	41,16	4,02	4,1	2,14					
8E	RM2	0,7	60	210	50	60	835,43	50,93	2,49	48,44	3,70	4,1	2,12					
9A	RM3	0,5	100	195	55	60	2051,81	51,43	2,30	46,60	4,60	4,07	1,94	1852	49,45	2,25	46,85	3,10
9B	RM3	0,5	100	195	55	60	700,30	51,09	2,28	45,34	3,45	4,1	1,83					
9C	RM3	0,5	100	195	55	60	2065,47	47,55	2,22	45,13	2,97	4,06	1,88					
9D	RM3	0,5	100	195	55	60	1156,17	47,38	2,34	47,38	2,34	4,01	1,98					
9E	RM3	0,5	100	195	55	60	3284,87	49,82	2,12	49,82	2,12	4,02	2,1					
10A	RM3	0,5	80	200	50	70	3733,41	49,75	1,88	45,33	2,96	4,03	2,12	3033	48,85	2,10	45,95	2,95
10B	RM3	0,5	80	200	50	70	5398,88	48,41	1,66	48,41	1,66	4,07	2,15					
10C	RM3	0,5	80	200	50	70	2986,23	50,03	2,25	50,03	2,25	4,04	2,15					
10D	RM3	0,5	80	200	50	70	976,82	46,22	2,28	39,93	4,24	4,06	2,17					
10E	RM3	0,5	80	200	50	70	2067,51	49,85	2,45	46,07	3,66	4,08	1,98					
11A	RM3	0,5	60	205	65	40	807,20	49,87	2,49	48,50	3,25	4,04	1,96	1490	49,38	2,52	48,57	2,93
11B	RM3	0,5	60	205	65	40	1233,68	49,17	2,67	49,17	2,67	4,02	1,92					
11C	RM3	0,5	60	205	65	40	1963,77	48,79	2,36	48,79	2,36	4,07	1,9					
11D	RM3	0,5	60	205	65	40	1493,90	50,51	2,55	48,66	3,44	3,97	1,87					
11E	RM3	0,5	60	205	65	40	1950,59	48,57	2,52	47,73	2,93	4,05	1,88					
12A	RM3	0,5	40	210	60	50	1125,96	49,87	2,56	49,87	2,56	3,96	1,85	1935	49,83	2,25	49,83	2,25
12B	RM3	0,5	40	210	60	50	2152,17	50,23	2,25	50,23	2,25	3,91	1,88					
12C	RM3	0,5	40	210	60	50	3745,29	49,03	2,00	49,03	2,00	3,99	2,02					
12D	RM3	0,5	40	210	60	50	143,13	48,05	2,17	48,05	2,17	4	2,05					
12E	RM3	0,5	40	210	60	50	2509,46	51,97	2,28	51,97	2,28	3,92	1,97					
13A	RM4	0,3	60	195	60	70	3305,21	48,73	2,28	48,73	2,28	3,97	2,13	2479	51,42	2,36	49,95	2,79
13B	RM4	0,3	60	195	60	70	1028,57	52,15	2,53	52,15	2,53	4,07	2,1					
13C	RM4	0,3	60	195	60	70	3232,69	53,26	2,51	50,64	3,26	3,95	2,05					
13D	RM4	0,3	60	195	60	70	2020,36	51,90	2,24	51,90	2,24	3,97	2,02					
13E	RM4	0,3	60	195	60	70	2806,08	51,04	2,22	46,33	3,66	3,99	2,02					
14A	RM4	0,3	40	200	65	60	2060,80	54,82	2,76	54,82	2,76	3,92	1,98	1671	48,02	2,67	44,05	3,36
14B	RM4	0,3	40	200	65	60	2391,16	51,22	2,62	51,22	2,62	4,08	1,89					
14C	RM4	0,3	40	200	65	60	1982,01	48,68	2,54	40,00	3,75	3,99	1,85					
14D	RM4	0,3	40	200	65	60	955,32	43,62	2,66	35,93	3,63	4,03	1,86					
14E	RM4	0,3	40	200	65	60	968,18	41,76	2,75	38,28	4,04	4,04	1,88					
15A	RM4	0,3	100	205	50	50	1135,40	39,42	2,37	37,11	3,47	3,96	1,92	1229	46,67	2,50	43,68	3,86
15B	RM4	0,3	100	205	50	50	878,03	49,40	2,56	44,83	5,25	3,99	1,94					
15C	RM4	0,3	100	205	50	50	2739,18	48,79	2,56	40,75	5,60	4,09	2,03					
15D	RM4	0,3	100	205	50	50	898,33	48,54	2,43	48,54	2,43	4,07	2,17					
15E	RM4	0,3	100	205	50	50	491,81	47,18	2,56	47,18	2,56	4,05	2,19					
16A	RM4	0,3	80	210	55	40	2201,38	52,91	2,56	52,91	2,56	4,1	2,03	1684	49,65	2,48	49,11	2,71
16B	RM4	0,3	80	210	55	40	1661,90	47,87	2,08	47,87	2,08	4	2,19					
16C	RM4	0,3	80	210	55	40	2115,39	48,59	2,36	48,59	2,36	4,01	1,88					
16D	RM4	0,3	80	210	55	40	862,08	49,08	2,65	49,08	2,65	4,04	1,89					
16E	RM4	0,3	80	210	55	40	1580,72	49,79	2,74	47,09	3,92	4,03	1,97					

5.6. Proseslere Ait Test Sonuçları

5.6.1. Proses 1

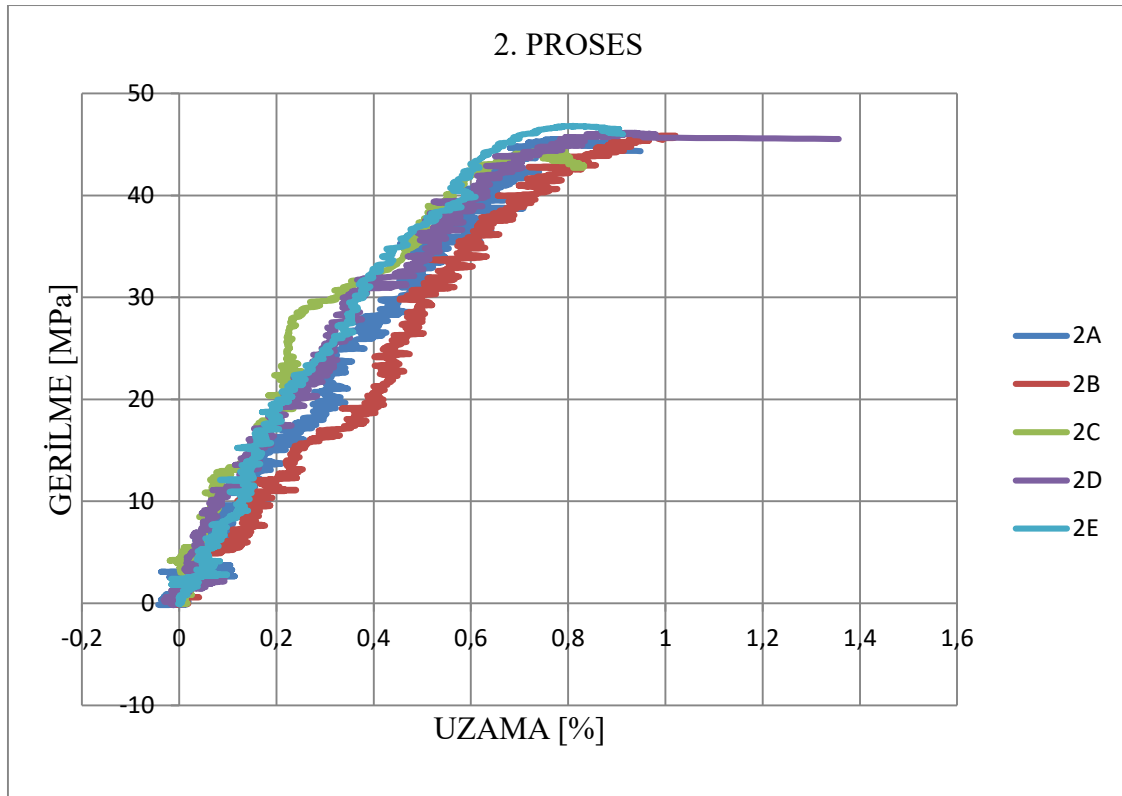
RM1 filamentinden dolgu yoğunluğu %40, yazdırma sıcaklığı 195 °C, tabla sıcaklığı 50 °C ve yazdırma hızı 40 mm/s olacak şekilde 5 adet numune baskısı 3D yazıcıda üretilmiştir. Bu numunelerin elastisite modülü 1008-7479 Mpa aralığında (ortalaması 4399 Mpa), çekme dayanımı 44,80-54,43 Mpa aralığında (ortalaması 51,53 Mpa), çekme uzaması %0,78-1,48 aralığında (ortalaması %1,13), kopma dayanımı 44,53-54,43 Mpa aralığında (ortalaması 51,47 Mpa), kopma uzaması %0,97-1,48 aralığında ve ortalaması %1,23 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.26. Proses 1'e ait Gerilme – Uzama grafiği

5.6.2. Proses 2

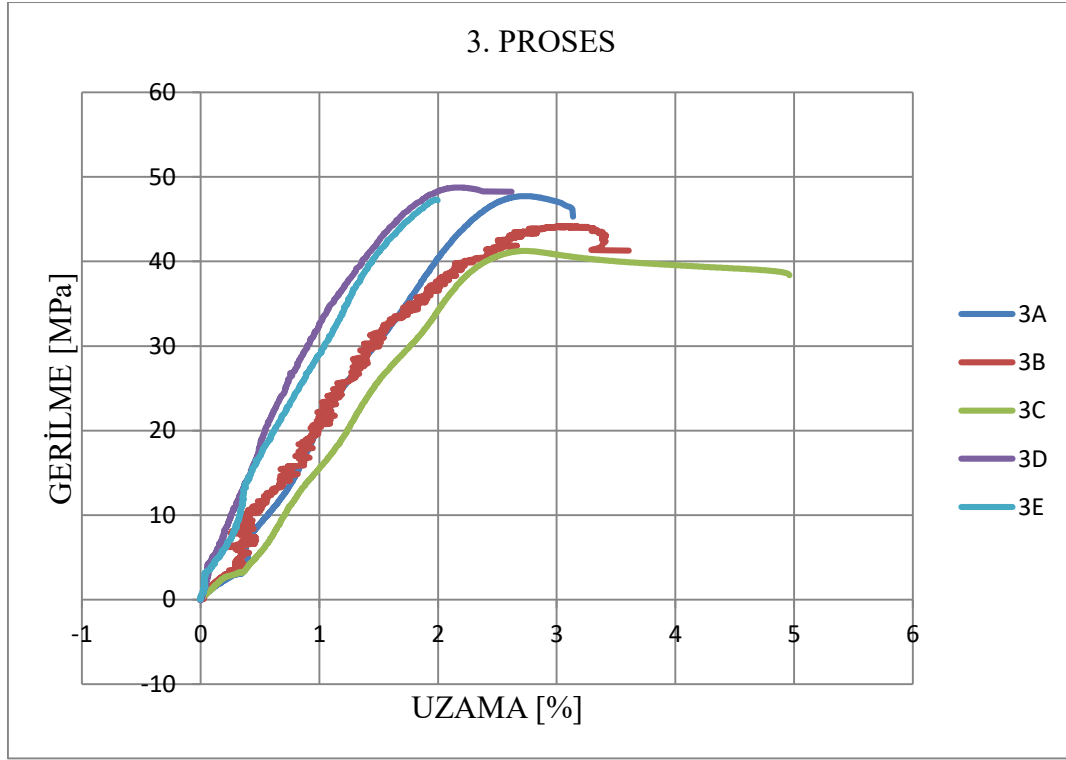
RM1 filamentinden dolgu yoğunluğu %60, yazdırma sıcaklığı 200 °C, tabla sıcaklığı 55 °C ve yazdırma hızı 50 mm/s olacak şekilde 5 adet numune baskısı 3D yazıcıda üretilmiştir. Bu numunelerin elastisite modülü 5248-10130 Mpa aralığında (ortalaması 7594 Mpa), çekme dayanımı 44,32-46,80 Mpa aralığında (ortalaması 45,71 Mpa), çekme uzaması %0,79-0,98 aralığında (ortalaması %0,85), kopma dayanımı 44,32-46,80 Mpa aralığında (ortalaması 45,71 Mpa), kopma uzaması %0,74-0,98 aralığında ve ortalaması %0,85 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.27. Proses 2'ye ait Gerilme – Uzama grafiği

5.6.3. Proses 3

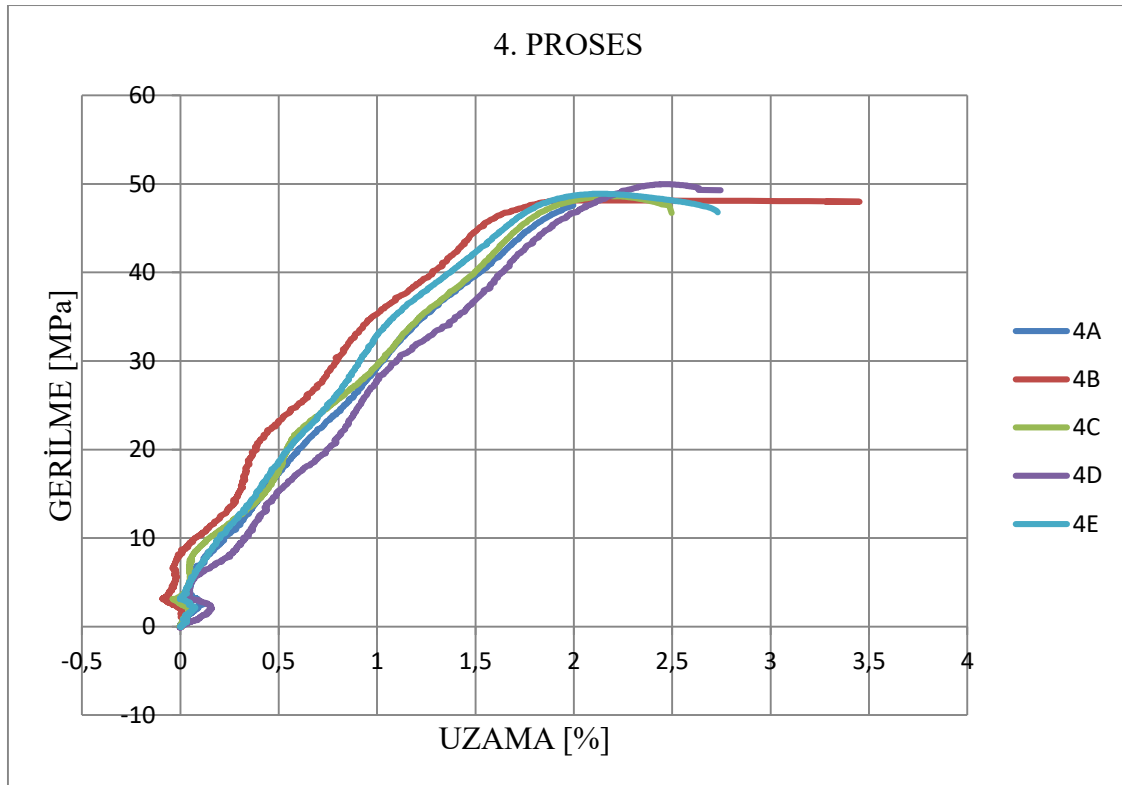
RM1 filamentinden dolgu yoğunluğu %80, yazdırma sıcaklığı 205 °C, tabla sıcaklığı 60 °C ve yazdırma hızı 60 mm/s olacak şekilde 5 adet numune baskısı 3D yazıcıda üretilmiştir. Bu numunelerin elastisite modülü 956-3230 Mpa aralığında (ortalaması 1680 Mpa), çekme dayanımı 41,25-48,75 Mpa aralığında (ortalaması 45,84 Mpa), çekme uzaması %1,98-3,07 aralığında (ortalaması %2,53), kopma dayanımı 38,36-48,75 Mpa aralığında (ortalaması 44,62 Mpa), kopma uzaması %1,98-5,36 aralığında ve ortalaması %3,16 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.28. Proses 3’e ait Gerilme – Uzama grafiği

5.6.4. Proses 4

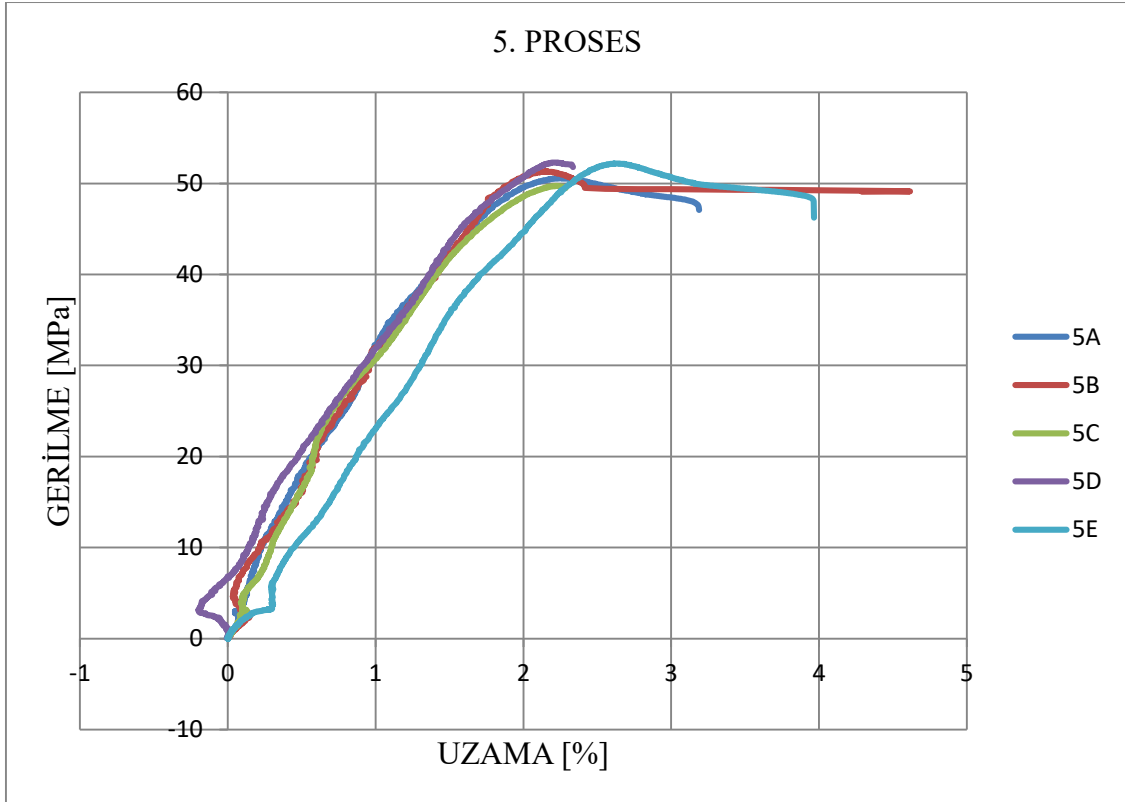
RM1 filamentinden dolgu yoğunluğu %100, yazdırma sıcaklığı 210 °C, tabla sıcaklığı 65 °C ve yazdırma hızı 70 mm/s olacak şekilde 5 adet numune baskısı 3D yazıcıda üretilmiştir. Bu numunelerin elastisite modülü 1212-3816 Mpa aralığında (ortalaması 2881 Mpa), çekme dayanımı 47,59-49,97 Mpa aralığında (ortalaması 48,66 Mpa), çekme uzaması %1,92-2,46 aralığında (ortalaması %2,14), kopma dayanımı 46,77-49,97 Mpa aralığında (ortalaması 48,19 Mpa), kopma uzaması %2,00-3,28 aralığında ve ortalaması %2,56 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.29. Proses 4'e ait Gerilme – Uzama grafiği

5.6.5. Proses 5

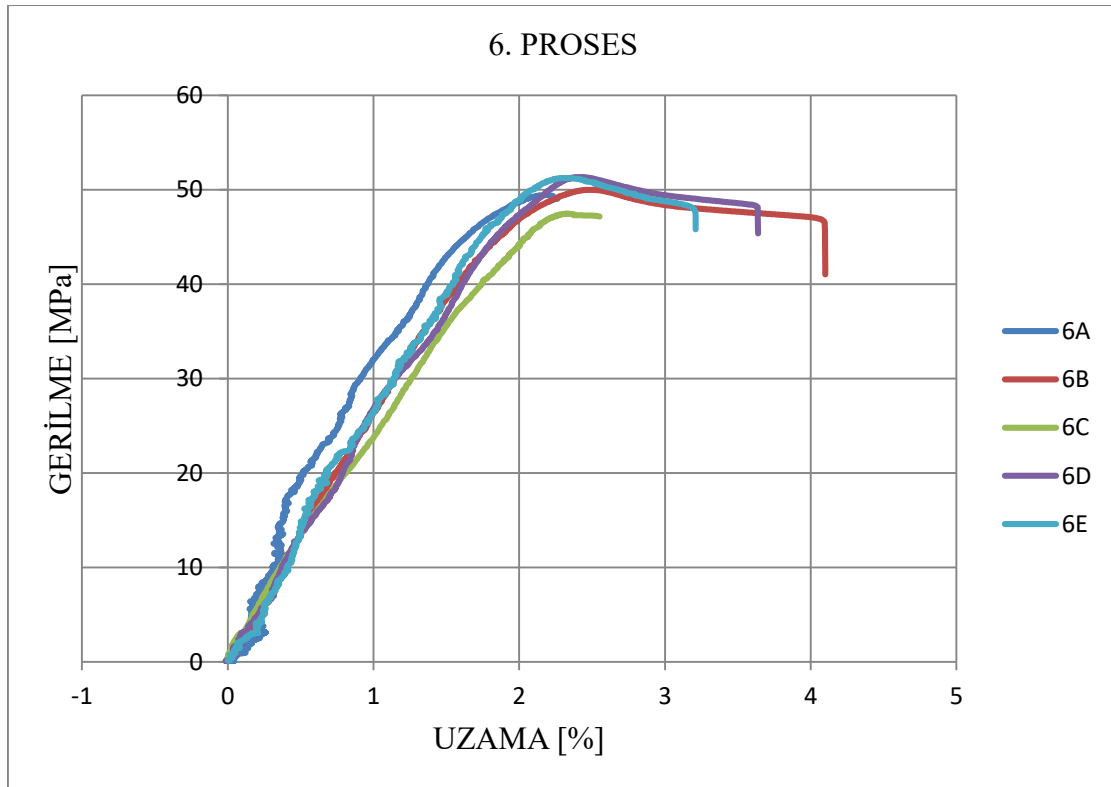
RM2 filamentinden dolgu yoğunluğu %80, yazdırma sıcaklığı 195 °C, tabla sıcaklığı 65 °C ve yazdırma hızı 50 mm/s olacak şekilde 5 adet numune baskısı 3D yazıcıda üretilmiştir. Bu numunelerin elastisite modülü 990-4656 Mpa aralığında (ortalaması 3099 Mpa), çekme dayanımı 49,71-52,28 Mpa aralığında (ortalaması 51,20 Mpa), çekme uzaması %2,15-2,63 aralığında (ortalaması %2,30), kopma dayanımı 46,23-52,28 Mpa aralığında (ortalaması 48,89 Mpa), kopma uzaması %2,22-4,55 aralığında ve ortalaması %3,12 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.30. Proses 5'e ait Gerilme – Uzama grafiği

5.6.6. Proses 6

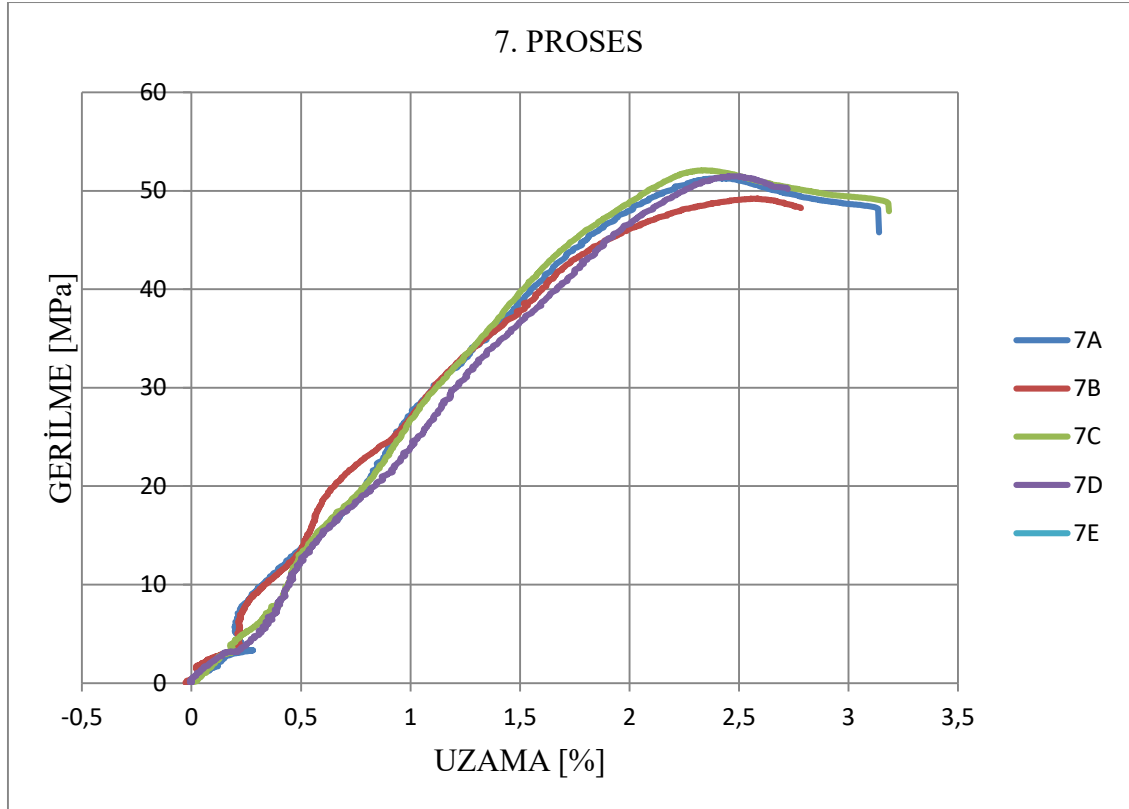
RM2 filamentinden dolgu yoğunluğu %100, yazdırma sıcaklığı 200 °C, tabla sıcaklığı 60 °C ve yazdırma hızı 40 mm/s olacak şekilde 5 adet numune baskısı 3D yazıcıda üretilmiştir. Bu numunelerin elastisite modülü 1227-2576 Mpa aralığında (ortalaması 1898 Mpa), çekme dayanımı 47,46-51,35 Mpa aralığında (ortalaması 49,90 Mpa), çekme uzaması % 2,18-2,49 aralığında (ortalaması %2,34), kopma dayanımı 41,04-49,44 Mpa aralığında (ortalaması 45,83 Mpa), kopma uzaması %2,18-4,57 aralığında ve ortalaması %3,34 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.31. Proses 6'ya ait Gerilme – Uzama grafiği

5.6.7. Proses 7

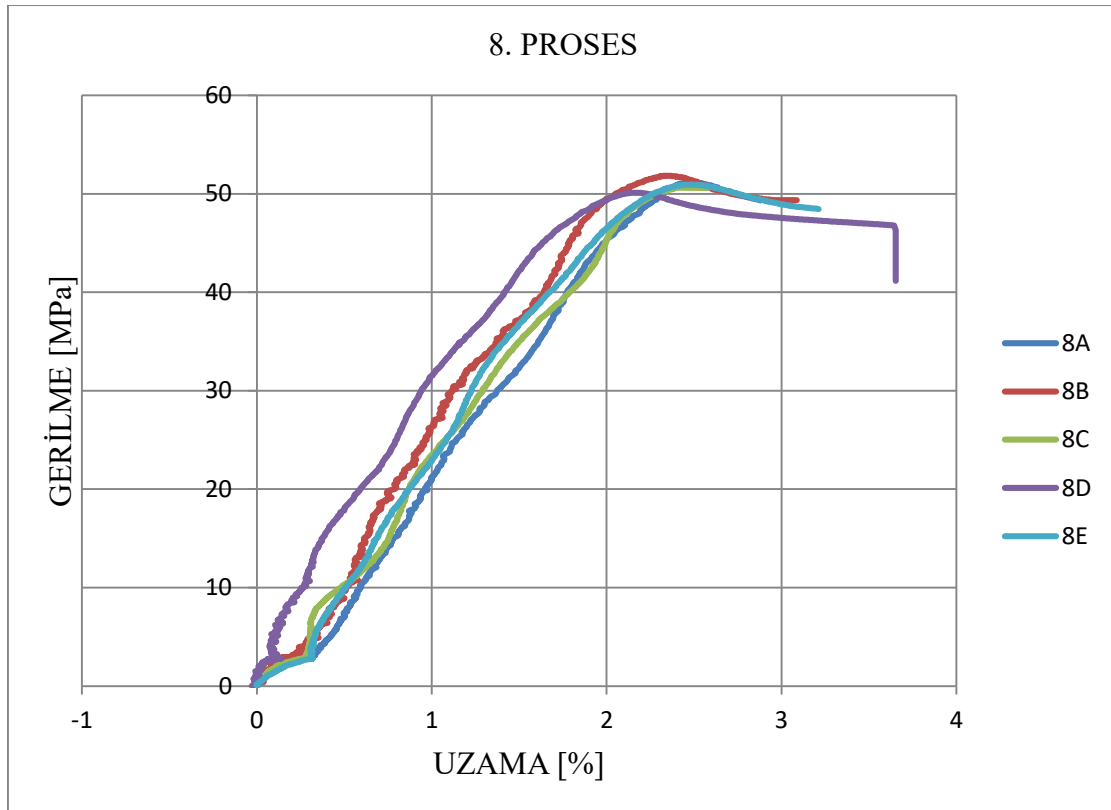
RM2 filamentinden dolgu yoğunluğu %40, yazdırma sıcaklığı 205 °C, tabla sıcaklığı 55 °C ve yazdırma hızı 70 mm/s olacak şekilde 5 adet numune baskısı 3D yazıcıda üretilmiştir. Bu numunelerin elastisite modülü 1106-3266 Mpa aralığında (ortalaması 2021 Mpa), çekme dayanımı 47,34-52,08 Mpa aralığında (ortalaması 50,27 Mpa), çekme uzaması %1,66-2,59 aralığında (ortalaması %2,29), kopma dayanımı 45,79-51,47 Mpa aralığında (ortalaması 48,34 Mpa), kopma uzaması %1,66-3,78 aralığında ve ortalaması %2,85 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.32. Proses 7'ye ait Gerilme – Uzama grafiği

5.6.8. Proses 8

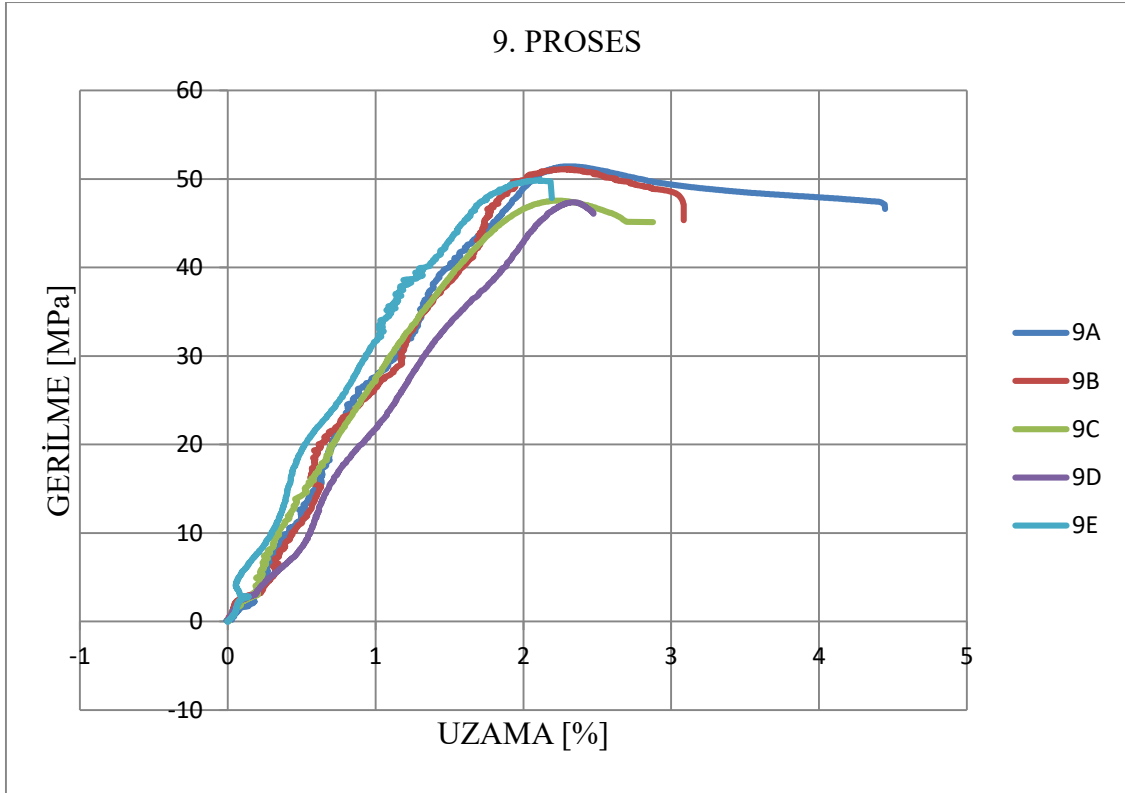
RM2 filamentinden dolgu yoğunluğu %60, yazdırma sıcaklığı 210 °C, tabla sıcaklığı 50 °C ve yazdırma hızı 60 mm/s olacak şekilde 5 adet numune baskısı 3D yazıcıda üretilmiştir. Bu numunelerin elastisite modülü 725-4193 Mpa aralığında (ortalaması 1554 Mpa), çekme dayanımı 50,12-51,83 Mpa aralığında (ortalaması 50,93 Mpa), çekme uzaması %2,16-2,49 aralığında (ortalaması %2,37), kopma dayanımı 41,16-51,17 Mpa aralığında (ortalaması 48,15 Mpa), kopma uzaması %2,40-4,02 aralığında ve ortalaması %3,21 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.33. Proses 8'e ait Gerilme – Uzama grafiği

5.6.9. Proses 9

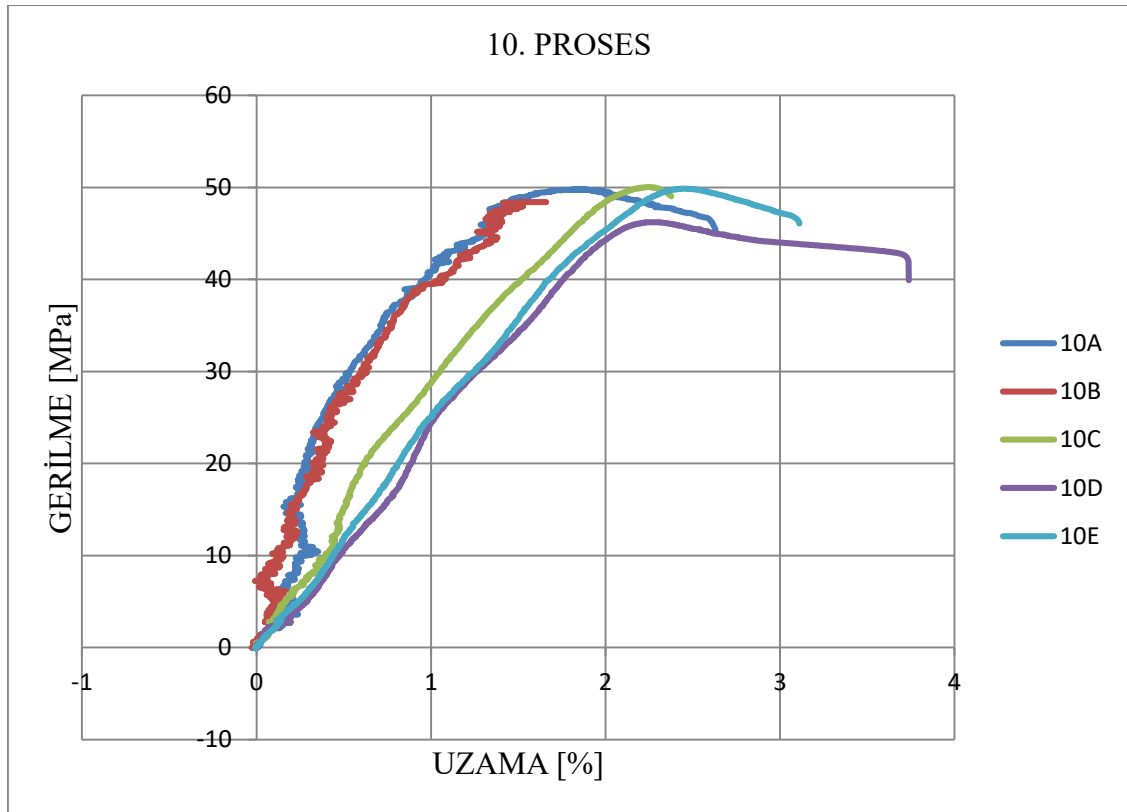
RM3 filamentinden dolgu yoğunluğu %100, yazdırma sıcaklığı 195 °C, tabla sıcaklığı 55 °C ve yazdırma hızı 60 mm/s olacak şekilde 5 adet numune baskısı 3D yazıcıda üretilmiştir. Bu numunelerin elastisite modülü 700-3285 Mpa aralığında (ortalaması 1852 Mpa), çekme dayanımı 47,38-51,43 Mpa aralığında (ortalaması 49,45 Mpa), çekme uzaması %2,12-2,34 aralığında (ortalaması %2,25), kopma dayanımı 45,13-49,82 Mpa aralığında (ortalaması 46,85 Mpa), kopma uzaması %2,12-4,60 aralığında ve ortalaması %3,10 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.34. Proses 9'a ait Gerilme – Uzama grafiği

5.6.10. Proses 10

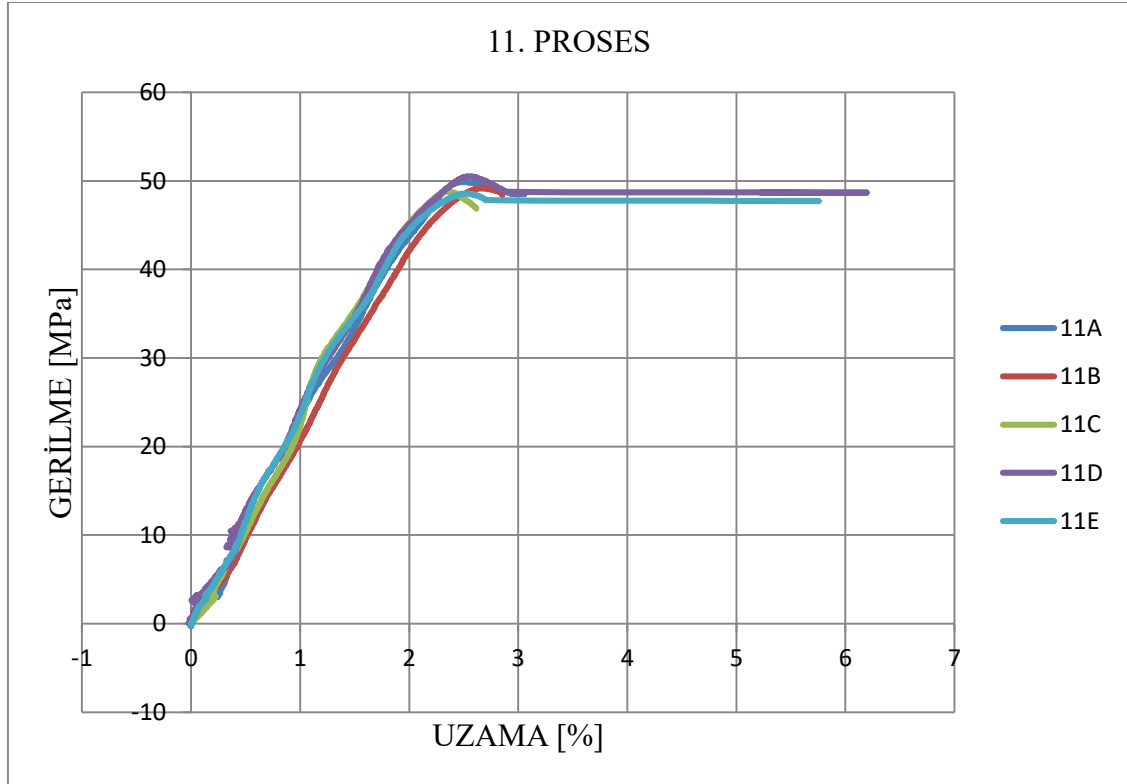
RM3 filamentinden dolgu yoğunluğu %80, yazdırma sıcaklığı 200 °C, tabla sıcaklığı 50 °C ve yazdırma hızı 70 mm/s olacak şekilde 5 adet numune baskısı 3D yazıcıda üretilmiştir. Bu numunelerin elastisite modülü 977-5399 Mpa aralığında (ortalaması 3033 Mpa), çekme dayanımı 46,22-50,03 Mpa aralığında (ortalaması 48,85 Mpa), çekme uzaması %1,66-2,45 aralığında (ortalaması %2,10), kopma dayanımı 39,93-50,03 Mpa aralığında (ortalaması 45,85 Mpa), kopma uzaması %1,66-4,24 aralığında ve ortalaması %2,95 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.35. Proses 10'a ait Gerilme – Uzama grafiği

5.6.11. Proses 11

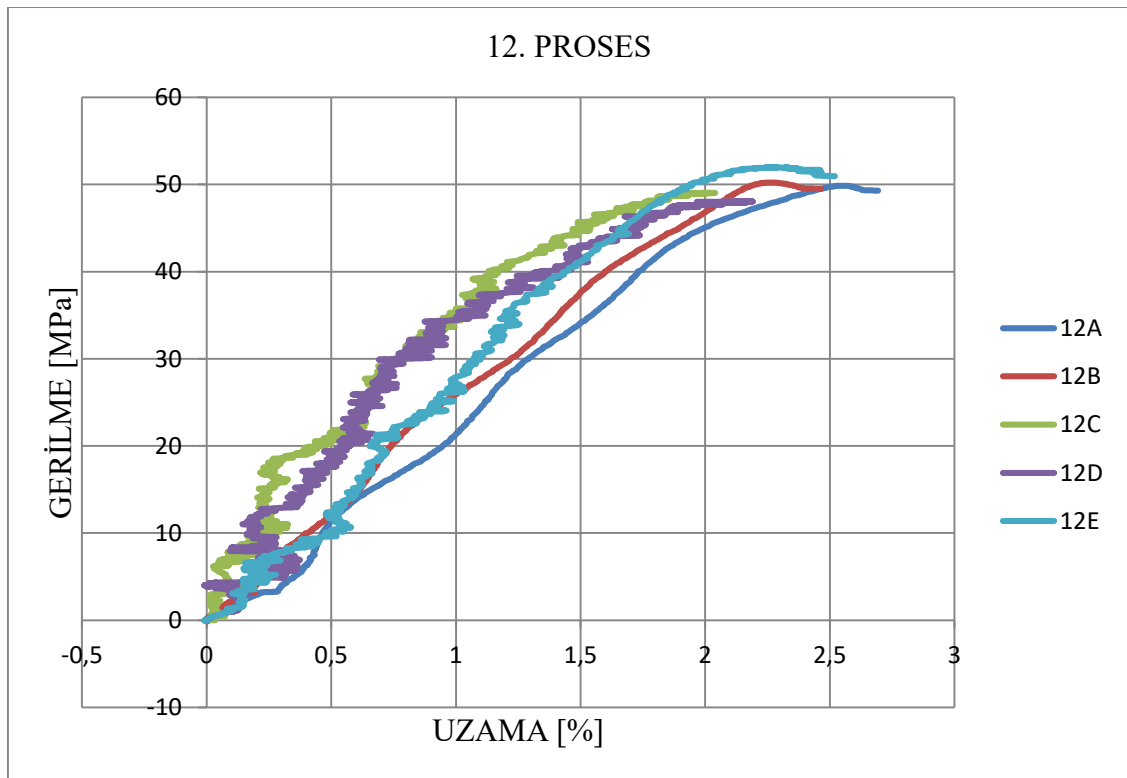
RM3 filamentinden dolgu yoğunluğu %60, yazdırma sıcaklığı 205 °C, tabla sıcaklığı 65 °C ve yazdırma hızı 40 mm/s olacak şekilde 5 adet numune baskısı 3D yazıcıda üretilmiştir. Bu numunelerin elastisite modülü 1234-1964 Mpa aralığında (ortalaması 1490 Mpa), çekme dayanımı 48,57-50,51 Mpa aralığında (ortalaması 49,38 Mpa), çekme uzaması %2,36-2,67 aralığında (ortalaması %2,52), kopma dayanımı 47,73-49,17 Mpa aralığında (ortalaması 48,57 Mpa), kopma uzaması %2,36-3,44 aralığında ve ortalaması %2,93 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.36. Proses 11'e ait Gerilme – Uzama grafiği

5.6.12. Proses 12

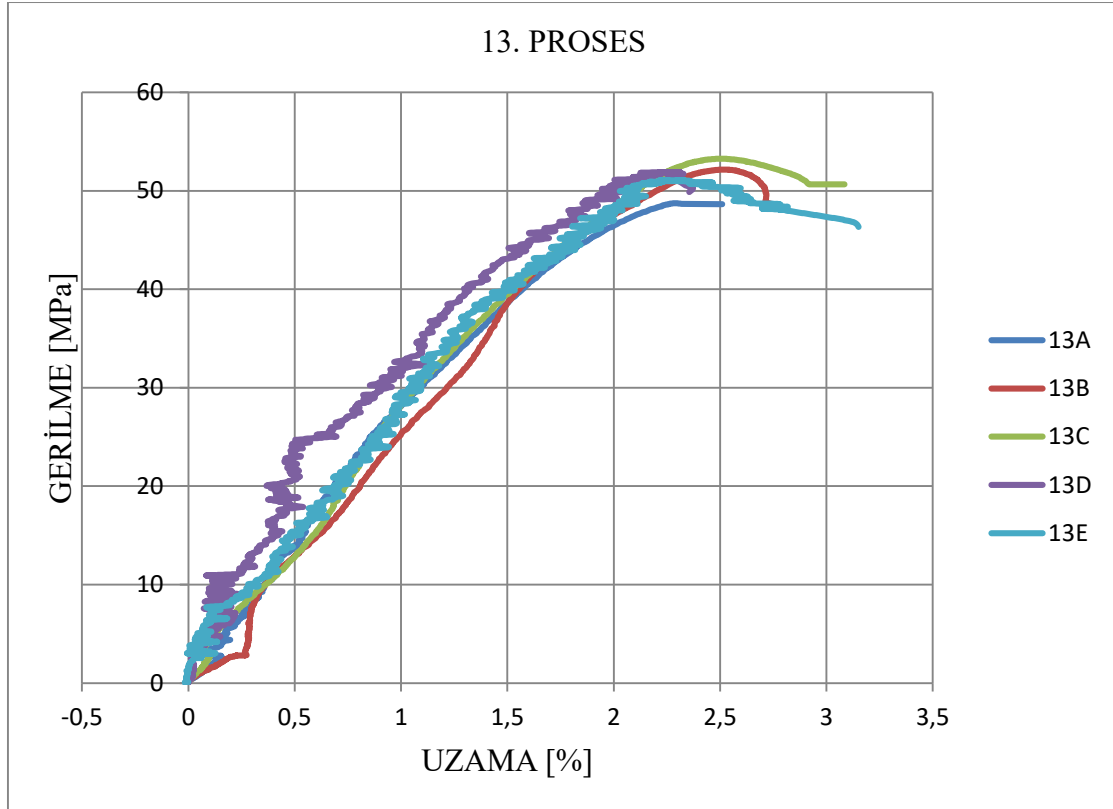
RM3 filamentinden dolgu yoğunluğu %40, yazdırma sıcaklığı 210 °C, tabla sıcaklığı 60 °C ve yazdırma hızı 50 mm/s olacak şekilde 5 adet numune baskısı 3D yazıcıda üretilmiştir. Bu numunelerin elastisite modülü 143-3745 Mpa aralığında (ortalaması 1935 Mpa), çekme dayanımı 48,05-51,97 Mpa aralığında (ortalaması 49,83 Mpa), çekme uzaması %2,00-2,56 aralığında (ortalaması %2,25), kopma dayanımı 48,05-51,97 Mpa aralığında (ortalaması 49,83 Mpa), kopma uzaması %2,00-2,56 aralığında ve ortalaması %2,25 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.37. Proses 12'ye ait Gerilme – Uzama grafiği

5.6.13. Proses 13

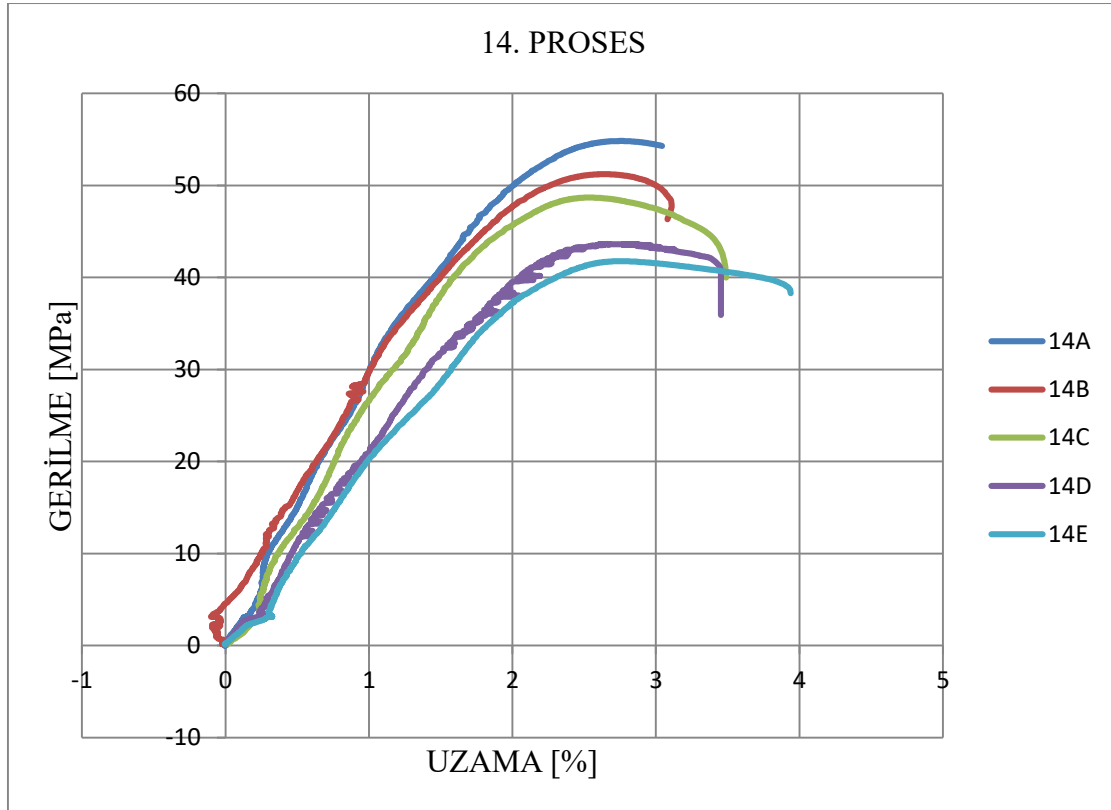
RM4 filamentinden dolgu yoğunluğu %60, yazdırma sıcaklığı 195 °C, tabla sıcaklığı 60 °C ve yazdırma hızı 70 mm/s olacak şekilde 5 adet numune baskısı 3D yazıcıda üretilmiştir. Bu numunelerin elastisite modülü 1028-3305 Mpa aralığında (ortalaması 2479 Mpa), çekme dayanımı 48,73-53,26 Mpa aralığında (ortalaması 51,42 Mpa), çekme uzaması %2,22-2,53 aralığında (ortalaması %2,36), kopma dayanımı 46,33-52,15 Mpa aralığında (ortalaması 49,95 Mpa), kopma uzaması %2,24-3,66 aralığında ve ortalaması %2,79 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.38. Proses 13'e ait Gerilme – Uzama grafiği

5.6.14. Proses 14

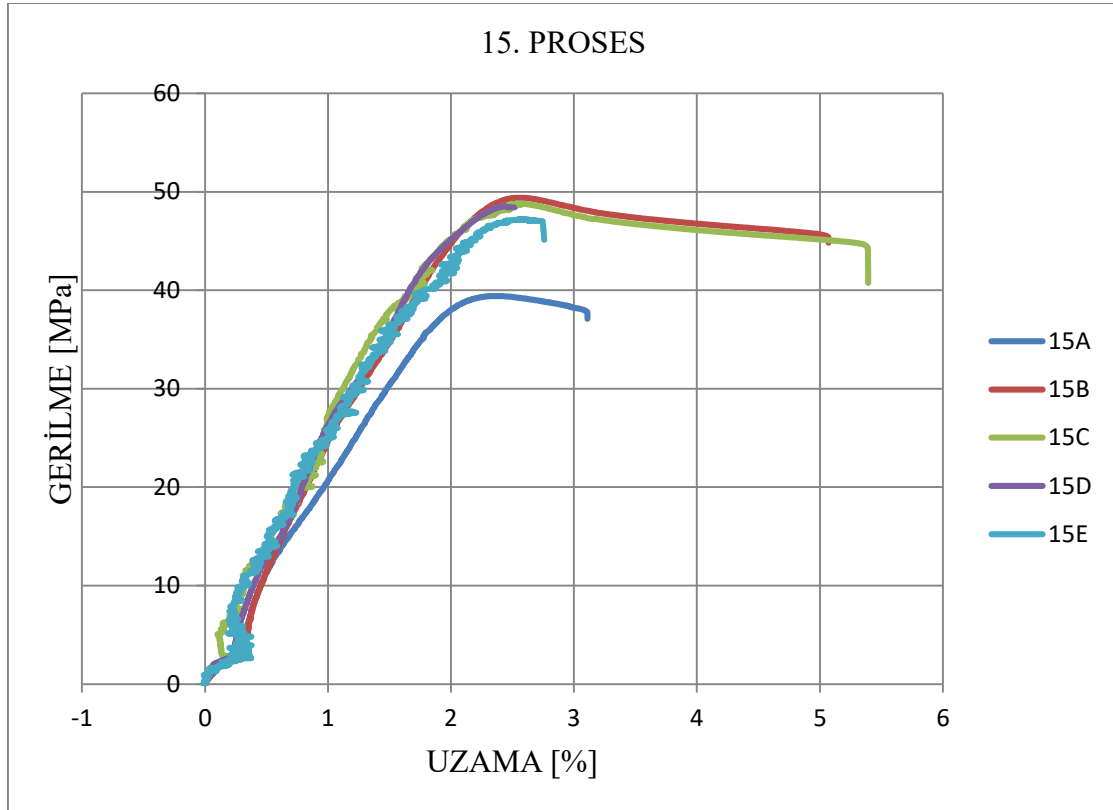
RM4 filamentinden dolgu yoğunluğu %40, yazdırma sıcaklığı 200 °C, tabla sıcaklığı 65 °C ve yazdırma hızı 60 mm/s olacak şekilde 5 adet numune baskısı 3D yazıcıda üretilmiştir. Bu numunelerin elastisite modülü 955-2391 Mpa aralığında (ortalaması 1671 Mpa), çekme dayanımı 41,76-54,82 Mpa aralığında (ortalaması 48,02 Mpa), çekme uzaması %2,54-2,76 aralığında (ortalaması %2,67), kopma dayanımı 35,93-54,82 Mpa aralığında (ortalaması 44,05 Mpa), kopma uzaması %2,62-4,04 aralığında ve ortalaması %3,36 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.39. Proses 14'e ait Gerilme – Uzama grafiği

5.6.15. Proses 15

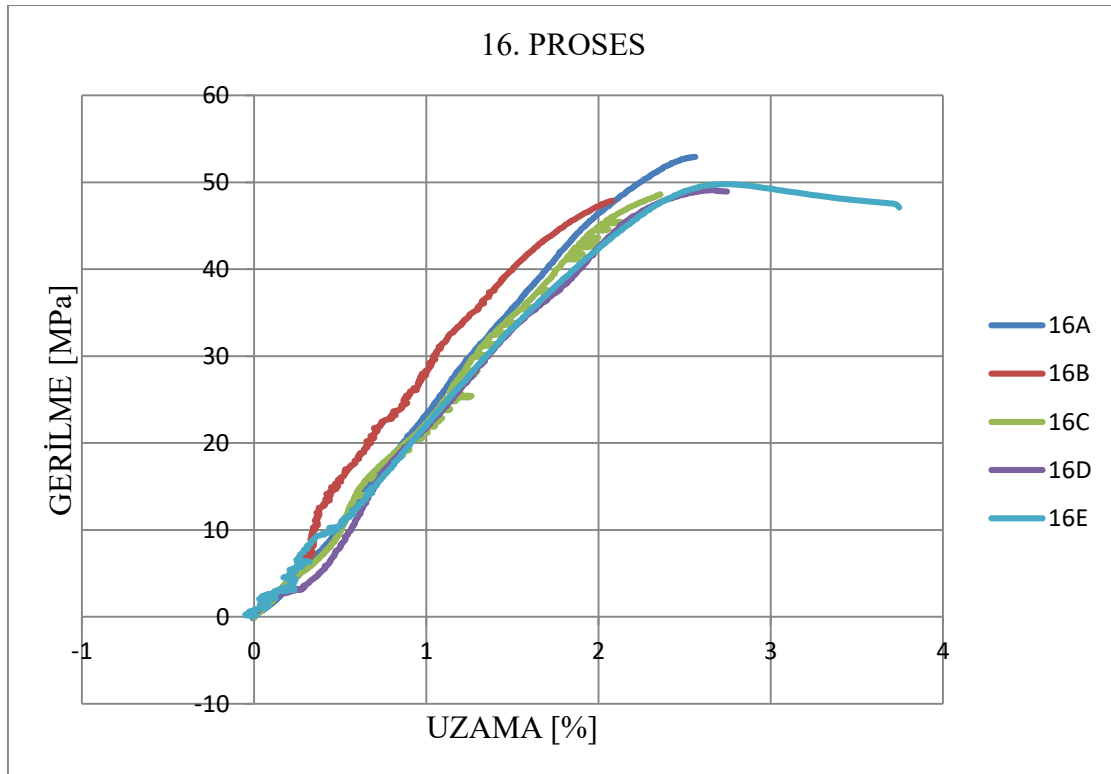
RM4 filamentinden dolgu yoğunluğu %100, yazdırma sıcaklığı 205 °C, tabla sıcaklığı 50 °C ve yazdırma hızı 50 mm/s olacak şekilde 5 adet numune baskısı 3D yazıcıda üretilmiştir. Bu numunelerin elastisite modülü 492-2739 Mpa aralığında (ortalaması 1229 Mpa), çekme dayanımı 39,42-49,40 Mpa aralığında (ortalaması 46,67 Mpa), çekme uzaması %2,37-2,56 aralığında (ortalaması %2,50), kopma dayanımı 37,11-48,54 Mpa aralığında (ortalaması 43,68 Mpa), kopma uzaması %2,43-5,60 aralığında ve ortalaması %3,86 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.40. Proses 15'e ait Gerilme – Uzama grafiği

5.6.16. Proses 16

RM4 filamentinden dolgu yoğunluğu %80, yazdırma sıcaklığı 210 °C, tabla sıcaklığı 55 °C ve yazdırma hızı 40 mm/s olacak şekilde 5 adet numune baskısı 3D yazıcıda üretilmiştir. Bu numunelerin elastisite modülü 862-2201 Mpa aralığında (ortalaması 1684 Mpa), çekme dayanımı 47,87-52,91 Mpa aralığında (ortalaması 49,65 Mpa), çekme uzaması %2,08-2,74 aralığında (ortalaması %2,48), kopma dayanımı 47,87-52,91 Mpa aralığında (ortalaması 49,11 Mpa), kopma uzaması %2,08-3,92 aralığında ve ortalaması %2,71 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.41. Proses 16'ya ait Gerilme – Uzama grafiği

5.7. Minitab Analizi

Minitab 19 programında ortalama Elastisite Modülü (E_t), Çekme Dayanımı (σ_m), Çekme Uzaması (ϵ_m), Kopma Dayanımı (σ_b) ve Kopma Uzaması (ϵ_b) değerlerine göre sinyal gürültü oranları için etki tablosu, ortalamalar için etki tablosu, ortalamalar için ana etki grafiği, sinyal gürültüsü için ana etki grafiği, faktör bilgi grafiği, varyans analizi grafiği ve model

özeti grafiği çıkarılmıştır. %95 güven aralığında gerçekleştirilen ANOVA analizi için faktör bilgisi grafiği (Çizelge 5.10.) ve model özeti grafiği (Çizelge 5.11.); Elastisite Modülü (E_t), Çekme Dayanımı (σ_m), Çekme Uzaması (ϵ_m), Kopma Dayanımı (σ_b) ve Kopma Uzaması (ϵ_b) değerleri için aynıdır. Gerçekleştirilen testlerde bütün değerlerin elde edilmesinden dolayı model özeti %100 modelimizi açıkladığı görülmüştür.

Çizelge 5.10. Faktör bilgisi grafiği

Factor Information		
Factor	Type	Levels Values
Hammadde Oranı	Fixed	4 1; 0.7; 0.5; 0.3
Nozul Sıcaklığı	Fixed	4 195; 200; 205; 210
Baskı Hızı	Fixed	4 40; 50; 60; 70
Doluluk Oranı	Fixed	4 40; 60; 80; 100
Tabla Sıcaklığı	Fixed	4 50; 55; 60; 65

Çizelge 5.11. Model özeti

Model Summary						
S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)	AICc	BIC
* 100,00%	*	*	*	*	*	*

5.7.1. Elastisite modülü (E_t) analizi

Yüksek elastisite modülü sağlayan filamentler sırasıyla RM1, RM2, RM3 ve RM4 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.43). En yüksek elastisite modülü RM1 filamentinden üretilen numunelerde görülmüştür. RM2 ve RM3 birbirine yakın değerler vermiş ve elastisite modülünün en düşük değeri hammadde RM4'te elde edilmiştir.

Elastisite modülünün yüksek olması için nozul sıcaklığının en uygun olduğu sıcaklıklar sırasıyla 200°C, 195°C, 210°C ve 205°C olarak tespit edilmiştir. En ideal nozul sıcaklığı 200°C olarak tespit edilmiştir. 205°C nozul sıcaklığı yüksek elastisite modülü açısından en düşük etkiye sahip olmuştur.

Baskı hızı en uygun parametreler sırasıyla 50 mm/s, 70 mm/s, 40 mm/s ve 60 mm/s olarak tespit edilmiştir. 50 mm/s ve 70 mm/s birbirine yakın ideal baskı hızları olarak tespit

edilmiştir. 60 mm/s baskı hızı yüksek elastisite modülü açısından en düşük etkiye sahip olmuştur.

Doluluk oranının en uygun olduğu parametreler sırasıyla %60, %40, %80 ve %100 olarak tespit edilmiştir. En yüksek etki %60'ta görülürken, %40 ve %80 birbirine yakın etkiye sahip olmuş ve en düşük elastisite modülü %100 doluluk oranında görülmüştür.

Tabla sıcaklığı açısından en uygun parametreler sırasıyla 55°C, 50°C, 65°C ve 60°C olarak tespit edilmiştir. Tabla sıcaklığının yüksek elastisite modülü açısından en yüksek etkisi 55°C iken en düşük etki 60°C'de olmuştur.

Mevcut parametreler içerisinde elastisite modülünün en yüksek değere ulaşabilmesi için hammadde RM1, nozul sıcaklığı 200°C, baskı hızı 50 mm/s, doluluk oranı %60 ve tabla sıcaklığı 55°C seçilmesi uygun olacaktır.

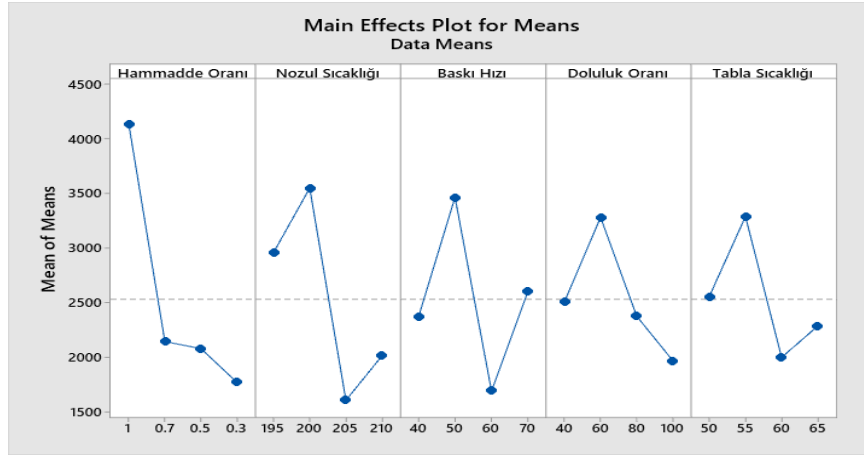
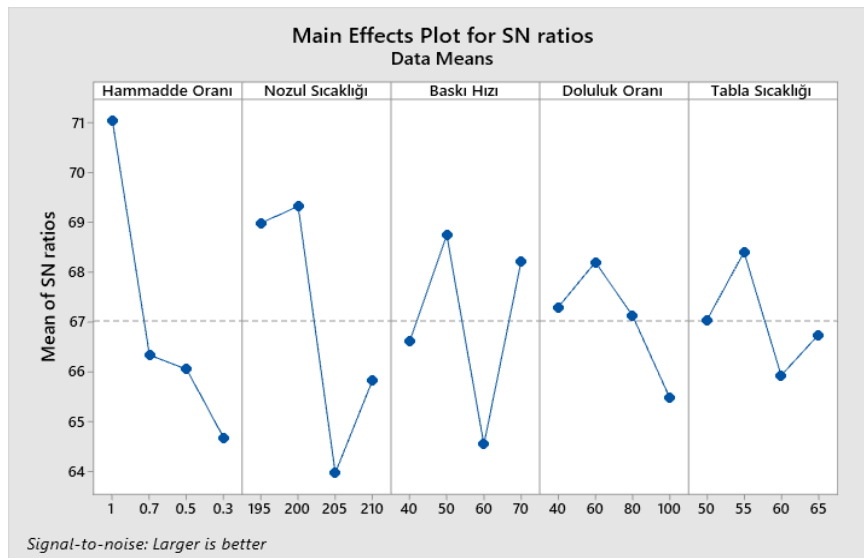
Çizelge 5.14'teki varyans analizi sonuçlarına göre elastisite modülünün yüksek olmasındaki en büyük etken %38,08 ile hammadde oranı olmuştur. Ardından %32,73 ile nozul sıcaklığı gelmiştir. Baskı hızının etkisi %17,60, doluluk oranının etkisi %6,35 ve tabla sıcaklığının etkisi ise %5,25 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 5.12. E_t (Elastisite Modülü) sinyal gürültü oranları için etki tablosu

Response Table for Signal to Noise Ratios					
Larger is better					
Level	Hammadde Oranı	Nozul Sıcaklığı	Baskı Hızı	Doluluk Oranı	Tabla Sıcaklığı
1	71,04	68,98	66,61	67,29	67,03
2	66,33	69,32	68,74	68,20	68,40
3	66,05	63,97	64,54	67,12	65,92
4	64,67	65,82	68,21	65,47	66,74
Delta	6,38	5,35	4,20	2,72	2,48
Rank	1	2	3	4	5

Çizelge 5.13. E_t (Elastisite Modülü) ortalamalar için etki tablosu

Response Table for Means					
Level	Hammadde Oranı	Nozul Sıcaklığı	Baskı Hızı	Doluluk Oranı	Tabla Sıcaklığı
1	4139	2957	2368	2507	2554
2	2143	3549	3464	3279	3288
3	2077	1605	1689	2374	1998
4	1766	2014	2603	1965	2285
Delta	2373	1944	1775	1314	1290
Rank	1	2	3	4	5

Şekil 5.42. E_t (Elastisite Modülü) ortalamalar için ana etki grafiğiŞekil 5.43. E_t (Elastisite Modülü) sinyal gürültüsü için ana etki grafiği

Çizelge 5.14. E_t (Elastisite Modülü) için varyans analizi

Analysis of Variance							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Hammadde Oranı	3	92,60	38,08%	92,60	30,868	*	*
Nozul Sıcaklığı	3	79,59	32,73%	79,59	26,531	*	*
Baskı Hızı	3	42,80	17,60%	42,80	14,265	*	*
Doluluk Oranı	3	15,43	6,35%	15,43	5,144	*	*
Tabla Sıcaklığı	3	12,76	5,25%	12,76	4,254	*	*
Error	0	*	*	*	*		
Total	15	243,19	100,00%				

5.7.2. Çekme dayanımı (σ_m) analizi

Yüksek çekme dayanımı sağlayan filamentler sırasıyla RM2, RM3, RM4 ve RM1 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.45). En yüksek çekme dayanımı RM2 filamentinden üretilen numunelerde görülmüştür. RM3 ve RM4 birbirine yakın değerler vermiş ve çekme dayanımının en düşük değeri hammadde RM1’de elde edilmiştir.

Çekme dayanımının yüksek olması için nozul sıcaklığının en uygun olduğu sıcaklıklar sırasıyla 195°C, 210°C, 200°C ve 205°C olarak tespit edilmiştir. En ideal nozul sıcaklığı 195°C olarak tespit edilmiştir. 205°C nozul sıcaklığı çekme dayanımı açısından en düşük etkiye sahip olmuştur.

Baskı hızı en uygun parametreler sırasıyla 40 mm/s, 70 mm/s, 60 mm/s ve 50 mm/s olarak tespit edilmiştir. 40 mm/s ve 70 mm/s birbirine yakın ideal baskı hızları olarak tespit edilmiştir. 50 mm/s baskı hızı yüksek çekme dayanımı açısından en düşük etkiye sahip olmuştur.

Doluluk oranının en uygun olduğu parametreler sırasıyla %40, %60, %80 ve %100 olarak tespit edilmiştir. Çekme dayanımının yüksek olmasındaki en yüksek etki %40 doluluk oranında görülmüştür. %60 ve %80 doluluk oranı ardından gelmiş ve en düşük çekme dayanımı %100 doluluk oranında iken görülmüştür.

Tabla sıcaklığı açısından en uygun parametreler sırasıyla 50°C, 65°C, 60°C ve 55°C olarak tespit edilmiştir. Tabla sıcaklığının yüksek çekme dayanımı açısından en yüksek etkisi 50°C iken en düşük etki 55°C’de olmuştur.

Mevcut parametreler içerisinde çekme dayanımının en yüksek değere ulaşabilmesi için hammadde RM2, nozul sıcaklığı 195°C, baskı hızı 40 mm/s, doluluk oranı %40 ve tabla sıcaklığı 50°C seçilmesi uygun olacaktır.

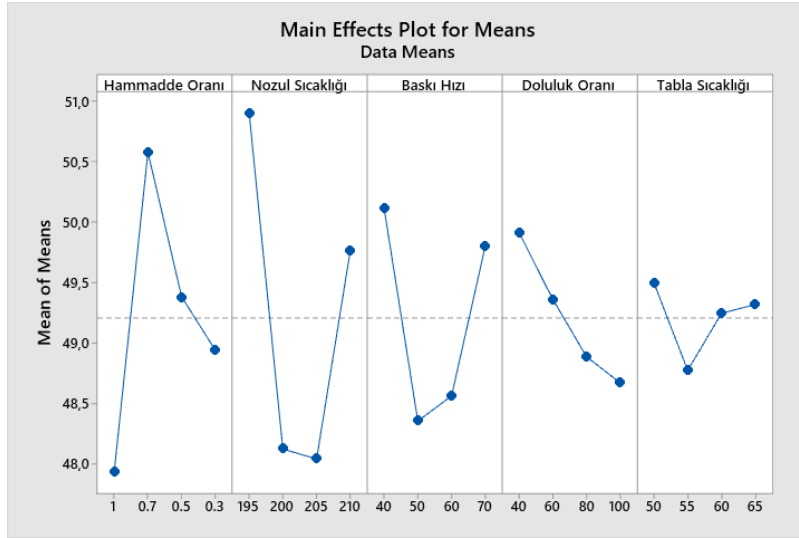
Çizelge 5.17’deki varyans analizi sonuçlarına göre çekme dayanımının yüksek olmasındaki en büyük etken %43,91 ile nozul sıcaklığı olmuştur. Ardından %28,49 ile hammadde oranı gelmiştir. Baskı hızının etkisi %18,45, doluluk oranının etkisi %6,96 ve tabla sıcaklığının etkisi ise %2,20 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 5.15. σ_m (Çekme Dayanımı) sinyal gürültü oranları için etki tablosu

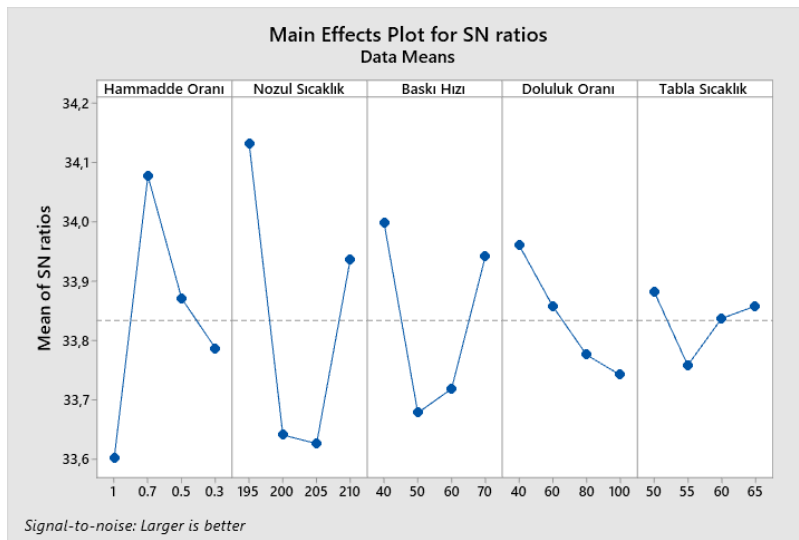
Response Table for Signal to Noise Ratios					
Larger is better					
Level	Hammadde Oranı	Nozul Sıcaklığı	Baskı Hızı	Doluluk Oranı	Tabla Sıcaklığı
1	33,60	34,13	34,00	33,96	33,88
2	34,08	33,64	33,68	33,86	33,76
3	33,87	33,63	33,72	33,78	33,84
4	33,79	33,94	33,94	33,74	33,86
Delta	0,48	0,51	0,32	0,22	0,13
Rank	2	1	3	4	5

Çizelge 5.16. σ_m (Çekme Dayanımı) ortalamalar için etki tablosu

Response Table for Means					
Level	Hammadde Oranı	Nozul Sıcaklığı	Baskı Hızı	Doluluk Oranı	Tabla Sıcaklığı
1	47,93	50,90	50,11	49,91	49,50
2	50,58	48,12	48,35	49,36	48,77
3	49,38	48,04	48,56	48,89	49,24
4	48,94	49,77	49,80	48,67	49,32
Delta	2,64	2,86	1,76	1,24	0,72
Rank	2	1	3	4	5



Şekil 5.44. σ_m (Çekme Dayanımı) ortalamalar için ana etki grafiği



Şekil 5.45. σ_m (Çekme Dayanımı) sinyal gürültüsü için ana etki grafiği

Çizelge 5.17. σ_m (Çekme Dayanımı) için varyans analizi

Analysis of Variance						
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value P-Value
Hammadde Oranı	3	0,46807	28,49%	0,46807	0,15602	* *
Nozul Sıcaklığı	3	0,72134	43,91%	0,72134	0,24045	* *
Baskı Hızı	3	0,30303	18,45%	0,30303	0,10101	* *
Doluluk Oranı	3	0,11427	6,96%	0,11427	0,03809	* *
Tabla Sıcaklığı	3	0,03606	2,20%	0,03606	0,01202	* *
Error	0	*	*	*	*	
Total	15	1,64276	100,00%			

5.7.3. Çekme uzaması (ϵ_m) analizi

Yüksek çekme uzaması sağlayan filamentler sırasıyla RM4, RM2, RM3 ve RM1 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.47). En yüksek çekme uzaması RM4 filamentinden üretilen numunelerde görülmüştür. RM2 ve RM3 birbirine yakın değerler vermiş ve çekme uzamasının en düşük değeri hammadde RM1’de elde edilmiştir.

Çekme uzamasının yüksek olması için nozul sıcaklığının en uygun olduğu sıcaklıklar sırasıyla 205°C, 210°C, 195°C ve 200°C olarak tespit edilmiştir. En ideal nozul sıcaklığı 205°C olarak tespit edilmiştir. 200°C nozul sıcaklığı çekme uzaması açısından en düşük etkiye sahip olmuştur.

Baskı hızı en uygun parametreler sırasıyla 60 mm/s, 70 mm/s, 40 mm/s ve 50 mm/s olarak tespit edilmiştir. 60 mm/s baskı hızı en yüksek etkiye sahip olmuş ve 70 mm/s baskı hızı ardından gelmiştir. 50 mm/s baskı hızı çekme uzaması açısından en düşük etkiye sahip olmuştur.

Doluluk oranının en uygun olduğu parametreler sırasıyla %80, %100, %40 ve %60 olarak tespit edilmiştir. Çekme uzaması açısından en yüksek etki %80 doluluk oranında görülürken, %100 doluluk oranı buna yakın olmuştur. %40 ve %60 doluluk oranı ardından gelmiş ve en düşük çekme uzaması %60 doluluk oranında iken görülmüştür.

Tabla sıcaklığı açısından en uygun parametreler sırasıyla 65°C, 60°C, 50°C ve 55°C olarak tespit edilmiştir. Tabla sıcaklığının yüksek çekme uzaması açısından en yüksek etkisi 65°C iken 60°C buna yakın bir etkiye sahip olarak ardından gelmiştir. 50°C ve 55°C birbirine yakın etkiye sahip olup en düşük etki 55°C’de olmuştur.

Mevcut parametreler içerisinde çekme uzamasının en yüksek değere ulaşabilmesi için hammadde RM4, nozul sıcaklığı 205°C, baskı hızı 60 mm/s, doluluk oranı %80 ve tabla sıcaklığı 65°C seçilmesi uygun olacaktır.

Çizelge 5.20’deki varyans analizi sonuçlarına göre çekme uzamasının yüksek olmasındaki en büyük etken %42,78 ile hammadde oranı olmuştur. Ardından %16,58 ile nozul sıcaklığı

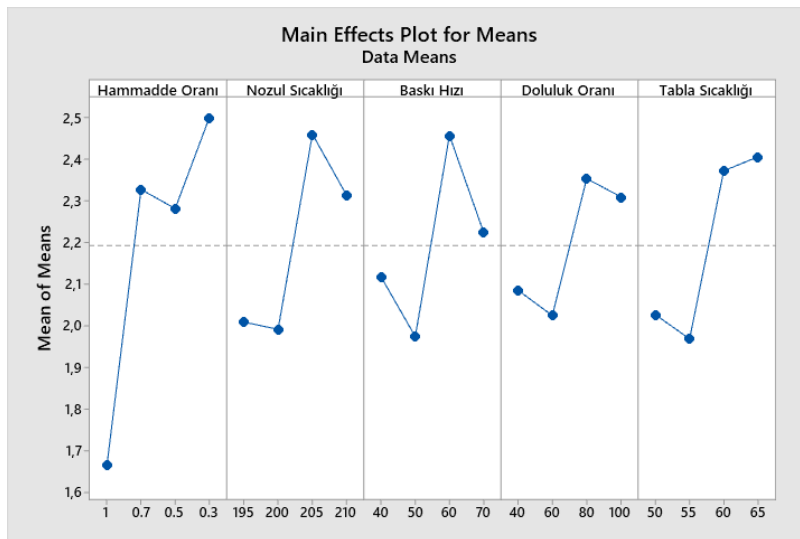
ve %16,40 ile tabla sıcaklığı gelmiştir. Baskı hızının etkisi %13,56, doluluk oranının etkisi %10,68 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 5.18. ϵ_m (Çekme Uzaması) sinyal gürültü oranları için etki tablosu

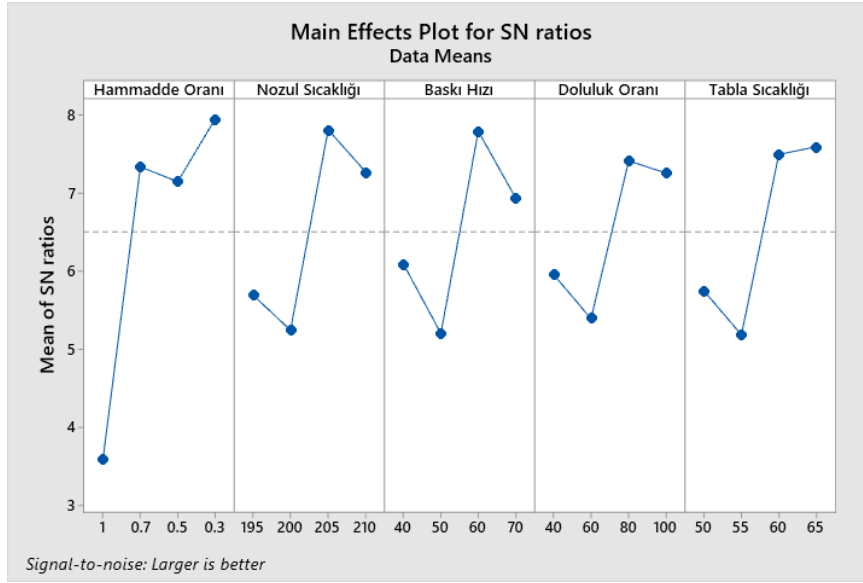
Response Table for Signal to Noise Ratios					
Larger is better					
Level	Hammadde Oranı	Nozul Sıcaklığı	Baskı Hızı	Doluluk Oranı	Tabla Sıcaklığı
1	3,585	5,695	6,088	5,960	5,745
2	7,336	5,242	5,201	5,390	5,183
3	7,146	7,812	7,791	7,411	7,494
4	7,949	7,267	6,935	7,255	7,594
Delta	4,363	2,570	2,590	2,021	2,411
Rank	1	3	2	5	4

Çizelge 5.19. ϵ_m (Çekme Uzaması) ortalamalar için etki tablosu

Response Table for Means					
Level	Hammadde Oranı	Nozul Sıcaklığı	Baskı Hızı	Doluluk Oranı	Tabla Sıcaklığı
1	1,664	2,009	2,117	2,085	2,026
2	2,327	1,991	1,974	2,024	1,968
3	2,281	2,460	2,457	2,353	2,372
4	2,500	2,312	2,224	2,309	2,405
Delta	0,835	0,469	0,483	0,329	0,437
Rank	1	3	2	5	4



Şekil 5.46. ϵ_m (Çekme Uzaması) ortalamalar için ana etki grafiği



Şekil 5.47. ϵ_m (Çekme Uzaması) sinyal gürültüsü için ana etki grafiği

Çizelge 5.20. ϵ_m (Çekme Uzaması) için varyans analizi

Analysis of Variance							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Hammadde Oranı	3	46,84	42,78%	46,84	15,612	*	*
Nozul Sıcaklığı	3	18,15	16,58%	18,15	6,051	*	*
Baskı Hızı	3	14,85	13,56%	14,85	4,949	*	*
Doluluk Oranı	3	11,69	10,68%	11,69	3,898	*	*
Tabla Sıcaklığı	3	17,95	16,40%	17,95	5,984	*	*
Error	0	*	*	*	*		
Total	15	109,48	100,00%				

5.7.4. Kopma dayanımı (σ_b) analizi

Yüksek kopma dayanımı sağlayan filamentler sırasıyla RM2 (sinyal gürültü oranı:33,5859), RM3 (sinyal gürültü oranı:33,5844), RM1 ve RM4 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.49). En yüksek kopma dayanımı RM2 ve RM3 filamentinden üretilen numunelerde görülmüştür. RM1 ardından gelmiş ve kopma dayanımının en düşük değeri hammadde RM4'te elde edilmiştir.

Kopma dayanımının yüksek olması için nozul sıcaklığının en uygun olduğu sıcaklıklar sırasıyla 195°C, 210°C, 205°C ve 200°C olarak tespit edilmiştir. En ideal nozul sıcaklığı 195°C olarak tespit edilmiştir. 200°C nozul sıcaklığı kopma dayanımı açısından en düşük etkiye sahip olmuştur.

Baskı hızı en uygun parametreler sırasıyla 40 mm/s, 70 mm/s, 50 mm/s ve 60 mm/s olarak tespit edilmiştir. 40 mm/s baskı hızı en yüksek etkiye sahip olmuş ve 70 mm/s baskı hızı ardından gelmiştir. 60 mm/s baskı hızı kopma dayanımı açısından en düşük etkiye sahip olmuştur.

Doluluk oranının en uygun olduğu parametreler sırasıyla %40, %60, %80 ve %100 olarak tespit edilmiştir. Kopma dayanımının yüksek olmasındaki en yüksek etki %40 doluluk oranında görülürken, %60 doluluk oranı buna yakın olmuştur. %80 ve %100 doluluk oranı ardından gelmiş ve en düşük kopma dayanımı %100 doluluk oranında iken görülmüştür.

Tabla sıcaklığı açısından en uygun parametreler sırasıyla 60°C (sinyal gürültü oranı:33,5332), 55°C (sinyal gürültü oranı:33,5312), 65°C ve 50°C olarak tespit edilmiştir. Tabla sıcaklığının yüksek kopma dayanımı açısından en yüksek etkisi 60°C iken 55°C buna çok yakın bir etkiye sahip olmuştur. 65°C ve 50°C ardından takip etmiş ve en düşük etki 50°C’de olmuştur.

Mevcut parametreler içerisinde kopma dayanımının en yüksek değere ulaşabilmesi için hammadde RM2 veya RM3, nozul sıcaklığı 195°C, baskı hızı 40 mm/s, doluluk oranı %40 ve tabla sıcaklığı 60°C veya 55°C seçilmesi uygun olacaktır.

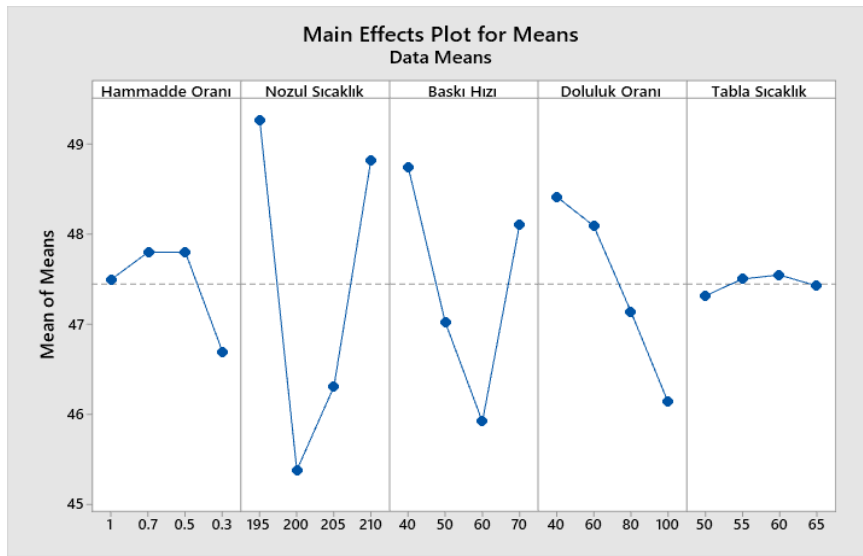
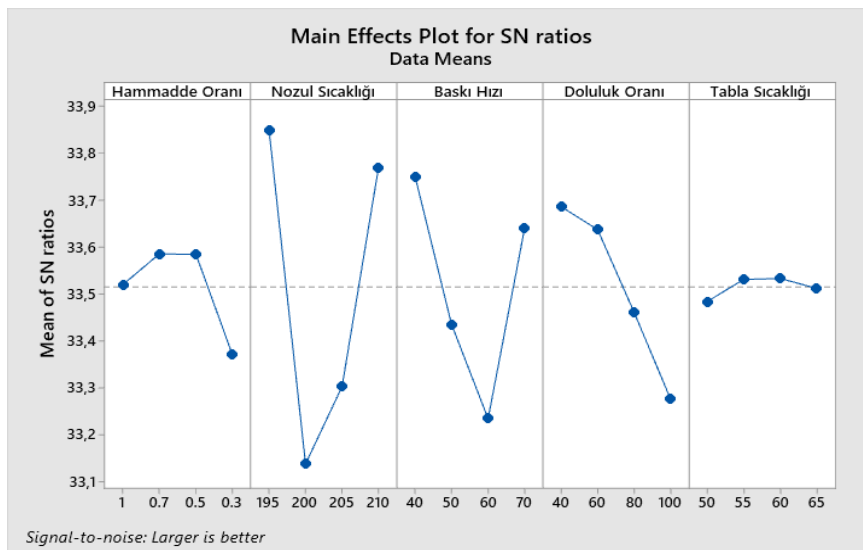
Çizelge 5.23’teki varyans analizi sonuçlarına göre kopma dayanımının yüksek olmasındaki en büyük etken %55,40 ile nozul sıcaklığı olmuştur. Ardından %23,78 ile baskı hızı ve %15,89 ile doluluk oranı gelmiştir. Hammadde oranının etkisi %4,69, tabla sıcaklığının etkisi %0,24 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 5.21. σ_b (Kopma Dayanımı) sinyal gürültü oranları için etki tablosu

Response Table for Signal to Noise Ratios					
Larger is better					
Level	Hammadde Oranı	Nozul Sıcaklığı	Baskı Hızı	Doluluk Oranı	Tabla Sıcaklığı
1	33,52	33,85	33,75	33,69	33,48
2	33,59	33,14	33,44	33,64	33,53
3	33,58	33,30	33,23	33,46	33,53
4	33,37	33,77	33,64	33,28	33,51
Delta	0,22	0,71	0,52	0,41	0,05
Rank	4	1	2	3	5

Çizelge 5.22. σ_b (Kopma Dayanımı) ortalamalar için etki tablosu

Response Table for Means					
Level	Hammadde Oranı	Nozul Sıcaklığı	Baskı Hızı	Doluluk Oranı	Tabla Sıcaklığı
1	47,50	49,29	48,74	48,42	47,31
2	47,80	45,39	47,03	48,10	47,50
3	47,80	46,30	45,92	47,14	47,56
4	46,70	48,82	48,11	46,14	47,42
Delta	1,10	3,90	2,83	2,29	0,24
Rank	4	1	2	3	5

Şekil 5.48. σ_b (Kopma Dayanımı) ortalamalar için ana etki grafiğiŞekil 5.49. σ_b (Kopma Dayanımı) sinyal gürültüsü için ana etki grafiği

Çizelge 5.23. σ_b (Kopma Dayanımı) için varyans analizi

Analysis of Variance							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Hammadde Oranı	3	0,12383	4,69%	0,12383	0,041277	*	*
Nozul Sıcaklığı	3	1,46258	55,40%	1,46258	0,487526	*	*
Baskı Hızı	3	0,62784	23,78%	0,62784	0,209279	*	*
Doluluk Oranı	3	0,41961	15,89%	0,41961	0,139869	*	*
Tabla Sıcaklığı	3	0,00629	0,24%	0,00629	0,002098	*	*
Error	0	*	*	*	*		
Total	15	2,64014	100,00%				

5.7.5. Kopma uzaması (ϵ_b) analizi

Yüksek kopma dayanımı sağlayan filamentler sırasıyla RM4 (sinyal gürültü oranı:9,9652), RM2 (sinyal gürültü oranı:9,8963), RM3 ve RM1 olarak tespit edilmiştir (Şekil 5.51). En yüksek kopma uzaması RM4 ve RM2 filamentinden üretilen numunelerde görülmüştür. Kopma uzamasının en düşük değeri hammadde RM1’de elde edilmiştir.

Kopma uzamasının yüksek olması için nozul sıcaklığının en uygun olduğu sıcaklıklar sırasıyla 205°C, 210°C, 195°C ve 200°C olarak tespit edilmiştir. En ideal nozul sıcaklığı 205°C olarak tespit edilmiştir. 200°C nozul sıcaklığı kopma uzaması açısından en düşük etkiye sahip olmuştur.

Baskı hızı en uygun parametreler sırasıyla 60 mm/s, 70 mm/s, 40 mm/s ve 50 mm/s olarak tespit edilmiştir. 60 mm/s baskı hızı en yüksek etkiye sahip olmuş ve 70 mm/s baskı hızı ardından gelmiştir. 50 mm/s baskı hızı kopma uzaması açısından en düşük etkiye sahip olmuştur.

Doluluk oranının en uygun olduğu parametreler sırasıyla %100, %80, %40 ve %60 olarak tespit edilmiştir. Kopma uzamasının yüksek olmasındaki en yüksek etki %100 doluluk oranında görülürken, %80 doluluk oranı buna yakın olmuştur. %40 ve %60 doluluk oranı ardından gelmiş ve en düşük kopma uzaması %60 doluluk oranında iken görülmüştür.

Tabla sıcaklığı açısından en uygun parametreler sırasıyla 65°C, 60°C, 50°C ve 55°C olarak tespit edilmiştir. Tabla sıcaklığının kopma uzaması açısından en yüksek etkisi 65°C iken

60°C buna yakın bir etkiye sahip olarak ardından gelmiştir. 50°C ve 55°C birbirine yakın etkiye sahip olup en düşük etki 55°C’de olmuştur.

Mevcut parametreler içerisinde kopma uzamasının en yüksek değere ulaşabilmesi için hammadde RM4 veya RM2, nozul sıcaklığı 205°C, baskı hızı 60 mm/s, doluluk oranı %100 ve tabla sıcaklığı 65°C seçilmesi uygun olacaktır.

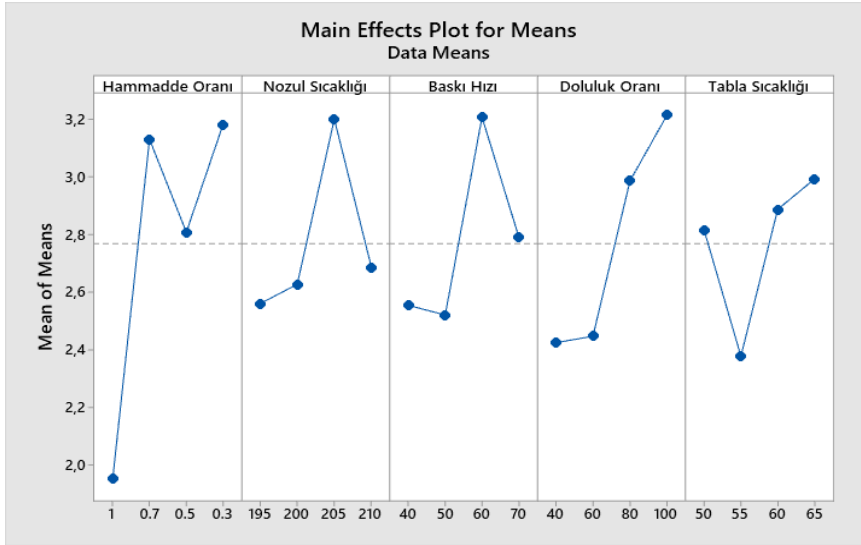
Çizelge 5.26’daki varyans analizi sonuçlarına göre kopma uzamasının yüksek olmasındaki en büyük etken %43,82 ile hammadde oranı olmuştur. Ardından %19,00 ile doluluk oranı ve %14,72 ile baskı hızı gelmiştir. Tabla sıcaklığının etkisi %11,79, nozul sıcaklığının etkisi %10,67 olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 5.24. ϵ_b (Kopma Uzaması) sinyal gürültü oranları için etki tablosu

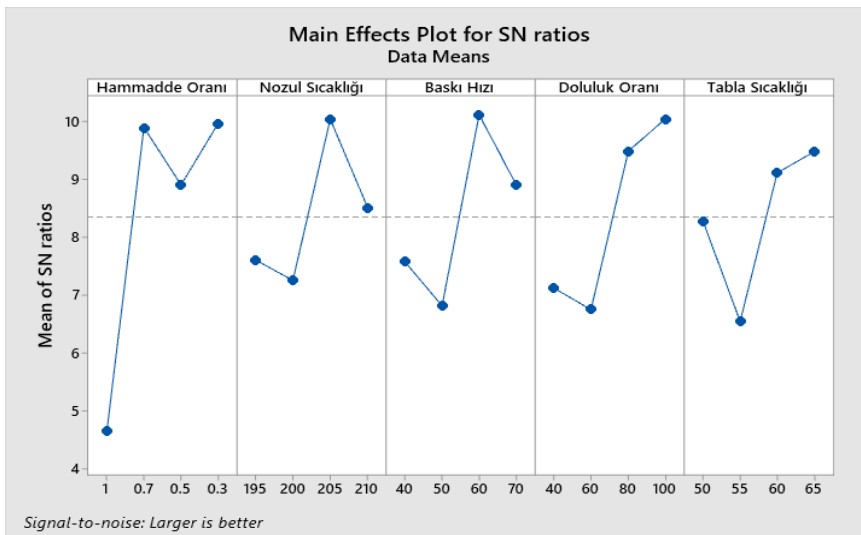
Response Table for Signal to Noise Ratios					
Larger is better					
Level	Hammadde Oranı	Nozul Sıcaklığı	Baskı Hızı	Doluluk Oranı	Tabla Sıcaklığı
1	4,641	7,605	7,572	7,122	8,272
2	9,896	7,251	6,811	6,746	6,542
3	8,902	10,039	10,119	9,487	9,112
4	9,965	8,509	8,902	10,050	9,478
Delta	5,324	2,789	3,307	3,305	2,936
Rank	1	5	2	3	4

Çizelge 5.25. ϵ_b (Kopma Uzaması) ortalamalar için etki tablosu

Response Table for Means					
Level	Hammadde Oranı	Nozul Sıcaklığı	Baskı Hızı	Doluluk Oranı	Tabla Sıcaklığı
1	1,951	2,559	2,554	2,424	2,815
2	3,130	2,627	2,520	2,446	2,377
3	2,807	3,200	3,207	2,986	2,887
4	3,183	2,685	2,790	3,215	2,992
Delta	1,231	0,641	0,687	0,791	0,615
Rank	1	4	3	2	5



Şekil 5.50. ϵ_b (Kopma Uzaması) ortalamalar için ana etki grafiği



Şekil 5.51. ϵ_b (Kopma Uzaması) sinyal gürültüsü için ana etki grafiği

Çizelge 5.26. ϵ_b (Kopma Uzaması) için varyans analizi

Analysis of Variance							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Hammadde Oranı	3	76,25	43,82%	76,25	25,416	*	*
Nozul Sıcaklığı	3	18,57	10,67%	18,57	6,191	*	*
Baskı Hızı	3	25,62	14,72%	25,62	8,540	*	*
Doluluk Oranı	3	33,07	19,00%	33,07	11,022	*	*
Tabla Sıcaklığı	3	20,51	11,79%	20,51	6,837	*	*
Error	0	*	*	*	*		
Total	15	174,02	100,00%				

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında PLA hammaddesi ve atıklarından dört farklı karışım oranlarında plastik granüller üretilmiştir. Üretilen bu plastik granüllerden dört farklı filament imalatı gerçekleştirilmiştir. Bu filamentlerden 3D yazıcıda EYM yöntemi ile farklı Doluluk Oranı, Nozul Sıcaklığı, Tabla Sıcaklığı ve Baskı Hızı parametreleri ile test numuneleri basılmış ve numuneler test edilmiştir. Elde edilen Elastisite Modülü, Çekme Dayanımı, Çekme Uzaması, Kopma Dayanımı ve Kopma Uzaması değerleri Taguchi L'16 ortogonal dizisi kullanılarak Minitab programında analiz edilmiştir. Mevcut parametreler içerisindeki en iyi mekanik özelliklere sahip ürünün elde edilmesi için gerekli olan hammadde oranı, nozul sıcaklığı, baskı hızı, doluluk oranı ve tabla sıcaklığı değerleri belirlenmiştir.

Üretim sırasında RM1, RM2, RM3 ve RM4 hammaddelerinde atık miktarı artışı ile renkte koyulaşma olduğu tespit edilmiştir. RM1, RM2, RM3 ve RM4 hammaddeleri filament üretimine uygun olduğu tespit edilerek bu hammaddelerden dört farklı filament üretimi gerçekleştirilmiştir. RM1 ve RM2 filament üretimi esnasında kararlı bir yapıda davranmıştır. RM3 ve RM4 filamentlerinin üretimi sırasında malzemenin toleranslar içinde olmak üzere çaplarında dalgalanmalar tespit edilmiştir.

3D yazıcı ile yapılan baskılarda ise RM1 ve RM2 filamentlerinden test numunelerinin baskıları alındığında herhangi bir problem ile karşılaşılmamıştır. Ancak RM3 ve RM4 ile gerçekleştirilen 9. ve 13. Proseslerde 3D yazıcının hotend bölgesinde donma olduğu gözlemlenmiştir. Bu proseslerde yazdırma sıcaklıklarının 195 °C olması ve atık miktarının %50 ve %70 olmasının bu probleme neden olduğu anlaşılmıştır. Yazdırma sıcaklığının artırılması ile RM3 ve RM4 filamentlerinin kullanıldığı proseslerde donma problemi ile karşılaşılmamıştır.

Mevcut parametreler içerisinde elastisite modülünün en yüksek değere ulaşabilmesi için hammaddenin %100 PLA, nozul sıcaklığının 200°C, baskı hızının 50 mm/s, doluluk oranının %60 ve tabla sıcaklığının 55°C olması gerektiği tespit edilmiştir. Elastisite modülünün en düşük değere ulaşabilmesi için hammaddenin %30 PLA - %70 Atık PLA, nozul sıcaklığının 205°C, baskı hızının 60 mm/s, doluluk oranının %100 ve tabla sıcaklığının 60°C olması gerektiği tespit edilmiştir. Elastisite modülünün yüksek olması için

etken oranları sırasıyla hammadde oranı %38,08, nozul sıcaklığı %32,73, baskı hızı %17,60, doluluk oranı %6,35 ve tabla sıcaklığı %5,25 olarak tespit edilmiştir.

Mevcut parametreler içerisinde çekme dayanımının en yüksek değere ulaşabilmesi için hammaddenin %70 PLA - %30 Atık PLA, nozul sıcaklığının 195°C, baskı hızının 40 mm/s, doluluk oranının %40 ve tabla sıcaklığının 50°C olması gerektiği tespit edilmiştir. Çekme dayanımının en düşük değere ulaşabilmesi için hammaddenin %100 PLA, nozul sıcaklığının 205°C, baskı hızının 50 mm/s, doluluk oranının %100 ve tabla sıcaklığının 55°C olması gerektiği tespit edilmiştir. Çekme dayanımının yüksek olması için etken oranları sırasıyla nozul sıcaklığı %43,91, hammadde oranı %28,49, baskı hızı %18,45, doluluk oranının %6,96 ve tabla sıcaklığı %2,20 olarak tespit edilmiştir.

Mevcut parametreler içerisinde çekme uzamasının en yüksek değere ulaşabilmesi için hammaddenin %30 PLA - %70 Atık PLA, nozul sıcaklığının 205°C, baskı hızının 60 mm/s, doluluk oranının %80 ve tabla sıcaklığının 65°C olması gerektiği tespit edilmiştir. Çekme uzamasının en düşük değere ulaşabilmesi için hammaddenin %100 PLA, nozul sıcaklığının 200°C, baskı hızının 50 mm/s, doluluk oranının %60 ve tabla sıcaklığının 55°C olması gerektiği tespit edilmiştir. Çekme uzamasının yüksek olması için etken oranları sırasıyla hammadde oranı %42,78, nozul sıcaklığı %16,58, tabla sıcaklığı %16,40, baskı hızı %13,56 ve doluluk oranının %10,68 olarak tespit edilmiştir.

Mevcut parametreler içerisinde kopma dayanımının en yüksek değere ulaşabilmesi için hammaddenin %70 PLA - %30 Atık PLA veya %50 PLA - %50 Atık PLA, nozul sıcaklığının 195°C, baskı hızının 40 mm/s, doluluk oranının %40 ve tabla sıcaklığının 60°C veya 55°C olması gerektiği tespit edilmiştir. Kopma dayanımının en düşük değere ulaşabilmesi için hammaddenin %30 PLA - %70 Atık PLA, nozul sıcaklığının 200°C, baskı hızının 60 mm/s, doluluk oranının %100 ve tabla sıcaklığının 50°C olması gerektiği tespit edilmiştir. Kopma dayanımının yüksek olması için etken oranları sırasıyla nozul sıcaklığı %55,40, baskı hızı %23,78, doluluk oranının %15,89, hammadde oranı %4,69 ve tabla sıcaklığı %0,24 olarak tespit edilmiştir.

Mevcut parametreler içerisinde kopma uzamasının en yüksek değere ulaşabilmesi için hammaddenin %30 PLA - %70 Atık PLA veya %70 PLA - %30 Atık PLA, nozul sıcaklığının 205°C, baskı hızının 60 mm/s, doluluk oranının %100 ve tabla sıcaklığının 65°C

olması gerektiği tespit edilmiştir. Kopma uzamasının en düşük değere ulaşabilmesi için hammaddenin %100 PLA, nozul sıcaklığının 200°C, baskı hızının 50 mm/s, doluluk oranının %60 ve tabla sıcaklığının 55°C olması gerektiği tespit edilmiştir. Kopma uzamasının yüksek olması için etken oranları sırasıyla hammadde oranı %43,82, doluluk oranının %19,00, baskı hızı %14,72, tabla sıcaklığı %11,79, ve nozul sıcaklığı %10,67 olarak tespit edilmiştir.

Gerçekleştirilen bu çalışmada 3D yazıcılar için belirlenen parametreler ile üretilen numunelerin mekanik özellikleri Taguchi L16 ortogonal dizisi kullanılarak incelenmiştir. İleride yapılabilecek çalışmalar açısından mevcut deneysel sonuçların daha kapsamlı ve daha yüksek hassasiyete ulaştırılabilmesi için parametre sayısı 6 ve seviye sayısı 5 olan ve daha fazla deney olanağı sunan Taguchi L25 ortogonal dizisi seçilebilir. 3D yazıcılarda parça üretimine etki eden katman kalınlığı, duvar kalınlığı, dolgu şekli gibi diğer proses parametreleri eklenerek bunların etkileri daha geniş kapsamda incelenebilir. Taguchi L25 dizisi seçilirse deney seti 16'dan 25'e çıkarılır ve toplamda 80 adet yerine 125 adet numune üretilmesi gerekir. Bu durum üretim ve test zamanlarının artmasına ve maliyetlerin yükselmesine neden olur. Ayrıca, bu tez çalışmasında elde edilen test sonuçlarına göre mekanik özelliklerin yüksek olmasında etkili olan optimum parametreler ile tekrar bir üretim gerçekleştirilip test edildikten sonra sonuçlar karşılaştırılabilir. Ardından, bu çalışmada tercih edilen Nozul Sıcaklığı, Baskı Hızı, Doluluk Oranı ve Tabla Sıcaklığı gibi optimum parametreler sabit tutularak ve katman kalınlığı, dolgu şekli gibi sabit tutulan parametrelerin değiştirilmesiyle üretilcek olan yeni numuneler test edilerek klasik deney tasarımı yöntemi ile diğer parametrelerin etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Adamidis, O., Alber, S., Anastasopoulos, I. (2018). Investigation into 3D printing of granular media. *Physical Modelling In Geotechnics*, 113-118.
- Aguilar-Duque, J. I., Hernández-Arellano, J. L., Avelar-Sosa, L., Amaya-Parra, G., Tamayo-Pérez, U. J. (2019). Additive manufacturing: fused deposition modeling advances. *Best Practices in Manufacturing Processes: Experiences From Latin America*, 347-366.
- Ahn, D., Kim, H., Lee, S. (2009). Surface roughness prediction using measured data and interpolation in layered manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2), 664-671.
- Ahn, D. G. (2011). Applications of laser assisted metal rapid tooling process to manufacture of molding forming tools - state of the art. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12(5):925-938.
- Akande, S. O. (2015). Dimensional accuracy and surface finish optimization of fused deposition modelling parts using desirability function analysis. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(4):196-202.
- Anitha, R., Arunachalam, S., Radhakrishnan, P. (2001). Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. *Journal of Materials Processing Technology*, 118(1-3), 385-388.
- Apak, K. (2019). *Pla Malzemesinden Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Ürünlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta.
- Aral, N. (2009). *Tekstil Atıklarından Oluşturulan Kompozitlerin Performans Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Asadollahi-Yazdi, E., Gardan, J., Lafon, P. (2016). Integrated Design in Additive Manufacturing Based on Design for Manufacturing. *ICMEM 2016: International Conference on Mechanical Engineering and Manufacturing*.
- Aydın, S. (2021). *Effect of annealing on the mechanical properties of pla parts produced by fused filament fabrication*. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Azam, F. I., Rani, A. M. A., Altaf, K., Rao, T. V. V. L. N., Zaharin, H. A. (2018). An in-depth review on direct additive manufacturing of metals. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 328(1), 012005.
- Baker, M. I., Walsh, S. P., Schwartz, Z., Boyan, B. D. (2012). A review of polyvinyl alcohol and its uses in cartilage and orthopedic applications. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 100(5), 1451-1457.

- Bardiya, S., Jerald, J., Satheeshkumar, V. (2021). The impact of process parameters on the tensile strength, flexural strength and the manufacturing time of fused filament fabricated (FFF) parts. *Materials Today: Proceedings*, 39, 1362–1366.
- Bian, L., Shamsaei, N., Usher, J. M. (Eds.). (2017). *Laser-Based Additive Manufacturing of Metal Parts: Modeling, Optimization, and Control of Mechanical Properties*. Boca Raton: CRC Press.
- Borkenhagen, M., Stoll, R. C., Neuenschwander, P., Suter, U. W., Aebischer, P. (1998). In vivo performance of a new biodegradable polyester urethane system used as a nerve guidance channel. *Biomaterials*, 19(23), 2155-2165.
- Boschetto, A., Giordano, V., Veniali, F. (2013). 3D roughness profile model in fused deposition modelling. *Rapid Prototyping Journal*, 19(4), 240-252.
- Cailleaux, S., Sanchez-Ballester, N. M., Gueche, Y. A., Bataille, B., Soulairol, I. (2021). Fused Deposition Modeling (FDM), the new asset for the production of tailored medicines. *Journal of Controlled Release*, 330, 821-841.
- Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E. P., Biamino, S., Lombardi, M., Atzeni, E., Fino, P. (2017). Overview on additive manufacturing technologies. *Proceedings of the IEEE*, 105(4), 593-612.
- Cauich-Rodríguez, J. V., Chan-Chan, L. H., Hernandez-Sánchez, F., Cervantes-Uc, J. M. (2013). Degradation of polyurethanes for cardiovascular applications. *Advances in Biomaterials Science and Biomedical Applications*, 51-82.
- Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C., Duysak, A. (2013). Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, 031, 53-70.
- Çetin, M. (2022). *Granül Termoplastik Malzemelerin Ekstrüzyon Esaslı Eklemeli İmalat Şartlarının İncelenmesi ve Optimizasyonu*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Chua, C. K., Leong, K. F., Lim, C. S. (2010). *Rapid prototyping: principles and applications (with companion CD-ROM)*. World Scientific Publishing Company.
- Clarizia, G., Bernardo, P., Gorrasi, G., Zampino, D., & Carroccio, S. C. (2018). Influence of the preparation method and photo-oxidation treatment on the thermal and gas transport properties of dense films based on a poly (ether-block-amide) copolymer. *Materials* 11(8).
- Çiçek, Ö. Y. (2019). *Eriyik Yığılma Modelleme İle Üretilen Abs Ve Pla Parçaların Mekanik Özelliklerinin Değişken Dolgu Oranlarında Karakterizasyonu Ve Sayısal Modellemesi*. Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Çömez, M. (2019). *Yalın Üretim Teknikleriyle İmal Edilen Malzemelerin Artıkları İle Üretilen Granüllerden Elde Edilen Yeni Pla Filamentinin Özelliklerinin İncelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Antalya.
- Davis, F. J., Mitchell, G. R. (2008). Polyurethane based materials with applications in medical devices. *Bio-materials and Prototyping Applications in Medicine*, 27-48.
- Dermeik, B., Travitzky, N. (2020). Laminated object manufacturing of ceramic-based materials. *Advanced Engineering Materials*, 22(9), 2000256.
- Diksu, S. (2021). *Eklemeli İmalat Teknolojisi Eriyik Biriktirme Modelleme Yöntemi İçin Kompozit Abs Filament Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Drummer, D., Cifuentes-Cuéllar, S., Rietzel, D. (2012). Suitability of PLA/TCP for fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 18(6), 500-507.
- Duran, C., Subbian, V., Giovanetti, M. T., Simkins, J. R., Beyette Jr, F. R. (2015). Experimental desktop 3D printing using dual extrusion and water-soluble polyvinyl alcohol. *Rapid Prototyping Journal*, 21(5), 528-534.
- ElMaraghy, H., Schuh, G., ElMaraghy, W., Piller, F., Schönsleben, P., Tseng, M., Bernard, A. (2013). Product variety management. *Cirp Annals*, 62(2), 629-652.
- Elmas, B. S. (2021). *Üç boyutlu (3D) yazıcıda üretilen polilaktik asit (PLA) numunelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Elmrabet, N., Siegkas, P. (2020). Dimensional considerations on the mechanical properties of 3D printed polymer parts. *Polymer Testing*, 90, 106656.
- Ersoy, S. C. (2021). *Erimiş filament fabrikasyonu süreç parametrelerinin, üretilen latis yapıların etkin elastik malzeme özelliklerine etkisinin deneysel incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ford, S., Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573-1587.
- Gençoğlu, U. (2021). *Seçici lazer ergitme yöntemi ile değişken üretim parametreleri kullanılarak üretilen 316L paslanmaz çeliğin yapısal ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi*. Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. (2014). Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, 498 Springer. *New York*, 2.

- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Khorasani, M., Gibson, I., Rosen, D., Khorasani, M. (2021). Design for additive manufacturing. *Additive Manufacturing Technologies*, 555-607.
- Groover, M. P. (2012). Metal forming and sheet metalworking. *Fundamental of Modern Manufacturing Materials, Processes and System. 5th ed. Hoboken, NJ: John Wiley Sons*, 493-503.
- Günay, M., Gündüz, S., YILMAZ, H., Yaşar, N., Kaçar, R. (2020). PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu. *Politeknik Dergisi*, 23(1), 73-79.
- Guo, P., Zou, B., Huang, C., Gao, H. (2017). Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, 240, 12-22.
- Hacısalıhoğlu, İ. (2020). *Seçici Lazer Ergitme Yöntemi İle Ti-6Al-4V ELI Alaşımından Üretilen Farklı Kafes Yapıların Yapısal-Mekanik Özelliklerinin DeneySEL ve Teorik Olarak İncelenmesi*. Yayımlanmamış Doktora Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Hıra, O. (2019). *Filament Beslemeli 3 Boyutlu Yazıcılarda İmalat Parametrelerinin Optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sahebrao, I. D., Madhusudan K, A., Thakare, S. B., Talankar, A. S. (2009). Rapid prototyping—a technology transfer approach for development of rapid tooling. *Rapid Prototyping Journal*, 15(4), 280-290.
- International, ASTM. (2012). *ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies*.
- Ituarte, I. F., Coatanea, E., Salmi, M., Tuomi, J., Partanen, J. (2015). Additive manufacturing in production: a study case applying technical requirements. *Physics Procedia*, 78, 357-366.
- Ivanova, O., Williams, C., Campbell, T. (2013). Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: promises and challenges. *Rapid Prototyping Journal*, 19(5), 353-364.
- İnternet: Karabulut, İ. (2015). Polimerlerin Üretim Yöntemleri. URL: <https://docplayer.biz.tr/11587878-12-polimerlerin-uretim-yontemleri.html> / Son Erişim Tarihi: 01.02.2023
- İnternet: Merck. (2022). *PVA Filament. Sigma-Aldrich*. URL: <https://www.sigmaaldrich.com/TR/en/product/aldrich/901029> / Son Erişim Tarihi: 01.02.2023.

- İnternet: Laminated Object Manufacturing (LOM). URL: <https://www.custompartnet.com/wu/laminated-object-manufacturing> / Son Erişim Tarihi: 01.02.2023.
- İnternet: SLA vs. PolyJet: What You Need to Know. URL: <https://www.cadimensions.com/sla-vs-polyjet-need-know> / Son Erişim Tarihi: 01.02.2023.
- İnternet: Filament Geri Dönüşüm. URL: [https://www.boyutkat.com/3d-yazici-filament-filament-geri-donusum](https://www.boyutkat.com/3d-yazici-filament/filament-geri-donusum) / Son Erişim Tarihi: 01.02.2023.
- İnternet: Plastik Ekstruzyon Makineleri. URL: https://www.turkiyeplastik.com/plastik-ekstruzyon-makineleri_206.htm / Son Erişim Tarihi: 01.02.2023.
- İnternet: Filamentler Hakkında Genel Bilgiler. URL: <https://www.artiboyut.com/index.php/tr/bilgi-bankasi/39-3d-yazici-filament-ozellikleri> / Son Erişim Tarihi: 01.02.2023.
- İnternet: Selective Laser Melting. URL: <https://www.additively.com/en> / Son Erişim Tarihi: 01.02.2023.
- İnternet: FX Plus Serisi Filament Üretim Hattı - Masaüstü Filament Üretimi. URL: <https://www.3dfilamex.com/filamex-fx-plus-serisi-filament-uretim-hatti> / Son Erişim Tarihi: 01.02.2023.
- İnternet: Ender-3 pro 3D Printer. URL: <https://www.creality.com/products/ender-3-pro-3d-printer> / Son Erişim Tarihi: 01.02.2023.
- İnternet: Çekme Test Cihazları. URL: <https://www.zwickroell.com/tr/ueruenler/statik-malzeme-test-cihazlari/statik-uygulamalar-icin-ueniversal-malzeme-test-cihazlari/cekme-test-cihazlari> / Son Erişim Tarihi: 01.02.2023.
- Kartal, F. (2017). Taguchi Metodolojisi ile Eriyik Yiğma Modelleme Süreci Parametrelerinin Optimizasyonu. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1(1), 49-56.
- Kaya, G., Ergüder, T. O., Hacısalihoğlu, İ., Mandev, E., Manay, E., Yıldız, F. (2021). Wear and Thermal Behavior of TiAlN Thin Films onto Ti6Al4V Alloy Manufactured by Selective Laser Melting Method. *3D Printing and Additive Manufacturing*.
- Koç, H. B. (2022). *Üç Boyutlu Yazıcılarda Kullanılmak Üzere Geri Dönüştürülmüş pla Filamentle Basılan Parçaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Konda Gokuldoss, P., Kolla, S., Eckert, J. (2017). Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting—Selection guidelines. *Materials*, 10(6), 672.
- Körner, C. (2016). Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting—a review. *International Materials Reviews*, 61(5), 361-377.

- Kruth, J. P., Badrossamay, M., Yasa, E., Deckers, J., Thijs, L., Van Humbeeck, J. (2010). Part and material properties in selective laser melting of metals. *Proceedings of the 16th International Symposium on Electromachining*, Shanghai Jiao Tong Univ Press, (ISEM XVI), 3-14.
- Kucinska-Lipka, J., Gubanska, I., Strankowski, M., Cieśliński, H., Filipowicz, N., Janik, H. (2017). Synthesis and characterization of cycloaliphatic hydrophilic polyurethanes, modified with L-ascorbic acid, as materials for soft tissue regeneration. *Materials Science and Engineering: C*, 75, 671-681.
- Kucińska-Lipka, J., Gubanska, I., Pokrywczynska, M., Ciesliński, H., Filipowicz, N., Drewa, T., Janik, H. (2018). Polyurethane porous scaffolds (PPS) for soft tissue regenerative medicine applications. *Polymer Bulletin*, 75, 1957-1979.
- Kung, C., Kuan, H. C., Kuan, C. F. (2018, July). Evaluation of tensile strength of 3D printed objects with FDM process on RepRap platform. In *2018 1st IEEE International Conference on Knowledge Innovation and Invention (ICKII)*, 369-372.
- Lamba, N. M., Woodhouse, K. A., Cooper, S. L. (1997). *Polyurethanes in biomedical applications*. Florida, CRC press.
- 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.
- Marrey, M., Malekipour, E., El-Mounayri, H., Faierson, E. J. (2019). A framework for optimizing process parameters in powder bed fusion (PBF) process using artificial neural network (ANN). *Procedia Manufacturing*, 34, 505-515.
- Martínez, J., Diéguez, J. L., Pereira, A., Pérez, J. A. (2012, April). Modelization of surface roughness in FDM parts. *American Institute of Physics Conference Proceedings* 1431,(1), 849-856.
- Matos, B. D. M., Rocha, V., da Silva, E. J., Moro, F. H., Bottene, A. C., Ribeiro, C. A., Silva Barud, H. D. (2019). Evaluation of commercially available polylactic acid (PLA) filaments for 3D printing applications. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, 137, 555-562.
- MEB. (2011). *Plastik Teknolojisi Ekstrüzyon Makinelerinde Üretim*. Ankara.
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196.
- 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.

- Oktay, K. (2015). *Ergitmeli Yığma Yöntemiyle Üretim Yapan 3d Yazıcılarda Çift Filament Süren Ekstruder Tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Olam, M. (2021). 3D Yazıcılar için Polimer Esaslı Kompozit Filament Üretimi. Yayınlanmamış Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Piili, H., Happonen, A., Väistö, T., Venkataramanan, V., Partanen, J., Salminen, A. (2015). Cost estimation of laser additive manufacturing of stainless steel. *Physics Procedia*, 78, 388-396.
- Rajpurohit, S. R., Dave, H. K. (2019). Analysis of tensile strength of a fused filament fabricated PLA part using an open-source 3D printer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101, 1525-1536.
- Rankouhi, B., Javadpour, S., Delfanian, F., Letcher, T. (2016). Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 16, 467-481.
- Sağbaş, B. (2018). Surface texture characterization and parameter optimization of fused deposition modelling process. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(4), 1028-1037.
- Singh, R., ve Chhabra, M. (2017). Three-dimensional printing. *Journal of Interdisciplinary Medicine*, 2(1), 50-53.
- Singh, R., Singh, S., Singh, I. P., Fabbrocino, F., Fraternali, F. (2017). Investigation for surface finish improvement of FDM parts by vapor smoothing process. *Composites Part B: Engineering* 111, 228-234.
- Sola, A., Chong, W. J., Simunec, D. P., Li, Y., Trinchi, A., Kyrtzsis, I. L., Wen, C. (2023). Open challenges in tensile testing of additively manufactured polymers: A literature survey and a case study in fused filament fabrication. *Polymer Testing*, 107859.
- Subbiah, S. (2015). *Handbook of manufacturing engineering and technology*. Springer, London, 787-810.
- Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli İmalat (3B Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-392.
- 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.
- Thompson, S. M., Bian, L., Shamsaei, N., Yadollahi, A. (2015). An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics. *Additive Manufacturing*, 8, 36-62.

- Tokdemir, V. (2022). *3d Yazıcılar İçin Ahşap Biyo-Kompozit Filament Üretimi ve Bazı Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
- Toth, T., Hudak, R., Zivcak, J. (2015). Dimensional verification and quality control of implants produced by additive manufacturing. *Quality Innovation Prosperity*, 19(1), 9-21.
- Tseng, J. W., Liu, C. Y., Yen, Y. K., Belkner, J., Bremicker, T., Liu, B. H., Wang, A. B. (2018). Screw extrusion-based additive manufacturing of PEEK. *Materials Design*, 140, 209-221.
- Uygunoğlu, T., Barlas Özgüven, S. (2021). Extrudability of mortars designed for 3d printers. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 8(1):410–420.
- Vakharia, V. S., Singh, M., Salem, A., Halbig, M. C., Salem, J. A. (2022). Effect of Reinforcements and 3-D Printing Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Polymer Composites. *Polymers*, 14(10), 2105.
- Vălean, C., Marşavina, L., Mărghitaş, M., Linul, E., Razavi, J., Berto, F. (2020). Effect of manufacturing parameters on tensile properties of FDM printed specimens. *Procedia Structural Integrity*, 26, 313-320.
- Vasudevarao, B., Natarajan, D. P., Henderson, M., Razdan, A. (2000). Sensitivity of RP surface finish to process parameter variation 251. *2000 International Solid Freeform Fabrication Symposium*.
- Wong, K. V., Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *International scholarly research notices*, 2012.
- Wu, C., Yi, R., Liu, Y. J., He, Y., & Wang, C. C. (2016, October). Delta DLP 3D printing with large size. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2155-2160.
- Xu, Z., Fostervold, R., Razavi, S. M. J. (2021). Scale effect on the mechanical behavior of PLA specimens fabricated via Fused Deposition Modeling. *Procedia Structural Integrity*, 33, 564-570.
- Yan, C., Hao, L., Hussein, A., Young, P., Raymont, D. (2014). Advanced lightweight 316L stainless steel cellular lattice structures fabricated via selective laser melting. *Materials Design*, 55, 533-541.
- Yeşiloğlu, R., (2022). *Eklemeli İmalat İle Üretilen Farklı Dolgu Geometrisi Ve Yoğunluğa Sahip PLA Esaslı Yapıların Mekanik Davranışlarının DeneySEL Olarak Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.



Gazili olmak ayrıcalıktır