

T.C.
İSTANBUL YENİ YÜZYIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
BİYOMEDİKAL MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



**3 BOYUTLU BİYOYAZICI MODELLENMESİ VE
TASARIMININ GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

VOLKAN BAKİ

Tez Danışmanı
Doç. Dr. Kadriye KIZILBEY

**İSTANBUL
EYLÜL 2023**

T.C.
İstanbul
YENİ YÜZYIL ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Biyomedikal Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Programı çerçevesinde yürütölmüş olan bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 20/09/2023

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Kadriye KIZILBEY
Acıbadem Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Kadriye KIZILBEY
Acıbadem Üniversitesi

Prof. Dr. Serap DERMAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Şakir ALTINSOY
İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi

Etik Beyan

İstanbul Yeni Yüzyıl 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.

20/09/2023

VOLKAN BAKİ

Önsöz

Bu yüksek lisans tezinin konu seçimi ve planlanması sırasında bana rehberlik eden, yürütülmesi ve gerçekleştirilmesi süresince değerli vaktini, kıymetli bilgilerini, tecrübelerini, bana olan güvenini, takdirlerini, destek ve yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Kadriye KIZILBEY'e,

Tez çalışmamın önemli aşamalarında büyük yardımlarını gördüğüm, ürünümü ortaya çıkarma adımında atölyesini bana açarak projemi oluşturmama imkan sağlayan, imalat alanındaki mesleki tecrübe ve görüşlerini aktararak çalışmama farklı açılardan bakmamı sağlayan Sayın Mehmet EZER'e,

Tez çalışmamı, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle bilimsel temeller ışığında şekillendiren, beni cesaretlendirip moral veren ve üzerimdeki iş yükünün hafiflemesini sağlayan eşim Uzm. Dyt. Betül KALLI BAKİ'ye ve yüksek lisans öğrenimim süresince mesleki birikimlerinden çokça faydalandığım ablası Öğr. Gör. Büşra İNCE'ye,

Son olarak hayatımın her aşamasında olduğu gibi tez çalışmam boyunca da olumlu tavırlarıyla yanımda olan, sabırla ve içtenlikle hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen, tezimi bitirebilmem için beni sürekli motive eden babam Durali BAKİ'ye, kayınbabam Ömer KALLI'ye, annem Emine BAKİ'ye ve kardeşlerim Sena Nur BAKİ ile Muhammed Burak BAKİ'ye, sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

VOLKAN BAKİ

EYLÜL 2023

İçindekiler

Kabul ve Onay.....	i
Etik Beyan.....	ii
Önsöz.....	iii
Şekiller Listesi	vi
Semboller ve Kısaltmalar Listesi	ix
Özet	x
Abstract.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. ÜÇ BOYUTLU YAZICILAR.....	4
2.1. Üç Boyutlu Yazıcıların Tanımı ve Çalışma Prensipleri.....	4
2.2. Üç Boyutlu Yazıcıların Üretim Süreci	5
2.3. Üç Boyutlu Yazdırma Teknolojileri	7
2.3.1. Stereolitografi (Stereolithography-SLA)	8
2.3.2. Eriyik birikim modellemesi (Fused deposition modelling-FDM).....	10
2.3.3. Seçici lazer sinterleme (Selective Laser Sintering-SLS).....	12
2.3.4. Lamine Nesne İmalatı (Laminated object manufacturing-LOM)	14
2.3.5. Dijital ışık işleme (Digital Light Processing – DLP).....	15
2.3.6. Çoklu Püskürtme (Polyjet-PJ).....	16
2.3.7. Elektron ışınli ergitme (EBM)	18
2.3.8. Seçici Lazer Eritme (Selective Laser Melting-SLM).....	20
2.3.9. Katı Zemin Kırleme (Solid Ground Curing- SGC).....	20
2.3.10. Çok Jetli Modelleme (Multi-Jet Modelling - MJM)	21
2.3.11. Şekil Biriktirme İmalatı (Shape Deposition Manufacturing-SDM)	22
2.3.12. 3B Biyobaskı.....	23
2.4. Eklemeli İmalat Teknolojileri Avantaj ve Dezavantajları	24
2.5. Üç Boyutlu Biyoyazıcılar.....	26
2.5.1. Biyofonksiyonel Mürekkep.....	29
2.5.2. Biyomalzeme	30
2.5.3. Biyo Yazdırma Teknolojileri	31
2.6. Tıbbi Alanda 3B Tarama ve Modelleme	33
2.7. 3B Baskı Teknolojisinin Biyomedikal Alandaki Uygulamaları	35
2.7.1. Doku ve Organ Üretimi.....	36
2.7.2. Ortez-İmplant Üretimi.....	38
2.7.3. Cerrahi Uygulamalar.....	39
2.7.4. Özel İlaç Tedavileri	40
2.7.5. Tıbbi Ekipmanların Üretimi.....	41

3. MATERYAL VE METOT	43
3.1. Biyoyazıcının Tasarımı	43
3.2. Kullanılan Materyaller	44
3.2.1. Duet 2 Wi-Fi 3D yazıcı Anakart	44
3.2.2. PanelDue 5i	45
3.2.3. Step Motorlar	45
3.2.4. Meanwell LRS-350-12 Güç Kaynağı.....	46
3.2.5. Optik Limit Switch.....	47
3.2.6. Düz (Lineer) Mil	47
3.2.7. Vidalı Mil Trapez T8 ve Somun.....	48
3.2.8. Lineer Rulman.....	48
3.2.9. Çift Contalı Bilyalı Rulman	49
3.2.10. Esnek Kaplin 5x8mm.....	49
3.2.11. Kasknak ve Kayış.....	49
3.2.12. TEC1-12710 Peltier	50
3.2.13. 12V Fan.....	50
3.3. Montaj	51
4. SONUÇ.....	67
KAYNAKLAR.....	69
ÖZGEÇMİŞ	75

Şekiller Listesi

Şekil 2.1. 3B yazıcılarda katmansal üretim süreci.....	6
Şekil 2. 2. 3b baskı işlemi akış diyagramı	7
Şekil 2. 3. SLA'nın şematik çalışma ilkesi	8
Şekil 2. 4. SLA 3D yazıcı	9
Şekil 2. 5. SLA yöntemi ile üretilmiş parçalar.....	10
Şekil 2. 6. FDM sistemi çalışma prensibi	10
Şekil 2. 7. FDM 3D yazıcı	11
Şekil 2. 8. FDM yöntemi ile üretilmiş nesneler	12
Şekil 2. 9. SLS'nin şematik gösterimi	13
Şekil 2. 10. SLS ile üretilen parçalar	14
Şekil 2. 11. LOM ile üretilen parçalar.....	14
Şekil 2. 12. LOM'un çalışma prensibi	15
Şekil 2. 13. DLP yönteminin şematik gösterimi	16
Şekil 2. 14. PJ teknolojisinin çalışma prensibi	17
Şekil 2. 15. PJ ile üretilmiş parçalar	17
Şekil 2. 16. EBM sistem şematiği.....	19
Şekil 2. 17. EBM yöntemi ile üretilen parçalar	19
Şekil 2. 18. SGC sistem şematiği ve imal edilmiş parçalar	21
Şekil 2. 19. MJM tekniğinin çalışma prensibi	22
Şekil 2. 20. MJM ile üretilmiş parçalar	22
Şekil 2. 21. SDM yönteminin çalışma prensibi ve bu yöntemle üretilen parçalar.....	23
Şekil 2. 22. 2017-2018 yıllarında en çok kullanılan 3B yazıcı teknolojileri	25
Şekil 2. 23. 2018 yılında en çok kullanılan 3B baskı malzemeleri.....	26
Şekil 2. 24. 3B baskı yönteminin kullanım amaçları	26
Şekil 2. 25. 3b biyobaskı işlemi	29
Şekil 2. 26. 3B biyo yazdırma teknolojileri çalışma prensipleri.....	32
Şekil 2. 27. 3B biyobaskı prensibi	34
Şekil 2. 28. 3D baskı ile sağlık sektörünün farklı alanlarında yapılan uygulamalar .	35
Şekil 3. 1. Biyoyazıcı tasarımının SolidWorks üzerinde görünümü	43
Şekil 3. 2. Duet 2 Wi-Fi Kartı.....	44

Şekil 3. 3. PanelDue 5i.....	45
Şekil 3. 4. Step Motor	46
Şekil 3. 5. Güç Kaynağı	47
Şekil 3. 6. Optik Limit Switch	47
Şekil 3. 7. Düz (Lineer) Mil.....	48
Şekil 3. 8. Vidalı Mil ve Somun	48
Şekil 3. 9. Lineer Rulman	48
Şekil 3. 10. Çift Contalı Bilyalı Rulman.....	49
Şekil 3. 11. 5x8mm'lik Kaplin	49
Şekil 3. 12. Kasnak ve Kayış	50
Şekil 3. 13. Peltier Modülü	50
Şekil 3. 14. 12V Fan	50
Şekil 3. 15. CNC ile işleme.....	51
Şekil 3. 16. Biyoyazıcının sırasıyla yatay ve dikey yüzeyleri	51
Şekil 3. 17. Yatay ve dikey yüzeylerin montajı	52
Şekil 3. 18. Tabla taşıyıcı parçanın montajı.....	52
Şekil 3. 19. Tabla taşıyıcının taşlanma işlemi.....	53
Şekil 3. 20. Düz millerin kesilme ve segman yuvası açılma işlemleri	53
Şekil 3. 21. Düz millerin tabla taşıyıcıya montajı.....	54
Şekil 3. 22. Tablaya rulmanların takılması	54
Şekil 3. 23. Tablanın millerden geçirilerek tabla taşıyıcıya montajı.....	54
Şekil 3. 24. Düz millerin geçeceği boruların takılması.....	55
Şekil 3. 25. Vidalı milin geçeceği parçanın montajı.....	55
Şekil 3. 26. Tabla taşıyıcının yatay yüzeye montajı.....	55
Şekil 3. 27. Şırınga taşıyıcıya rulmanların montajı	56
Şekil 3. 28. Şırınga taşıyıcıya destek parçanın montajı	56
Şekil 3. 29. Şırınga taşıyıcının dikey yüzeydeki yeri	56
Şekil 3. 30. Şırınga taşıyıcının dikey yüzeye montajı.....	57
Şekil 3. 31. Epoksi parçanın yerleştirilmesi.....	57
Şekil 3. 32. Peltier, soğutucu ve fanların tablaya montajı.....	58
Şekil 3. 33. Tablanın tamamlanmış hali	58
Şekil 3. 34. Şırınga sistemindeki dişliler ve şırınganın genel görünümü	59
Şekil 3. 35. Delrin POM-C ara parçanın işlenmesi.....	59
Şekil 3. 36. Şırınga ile ara parçanın montajı.....	59

Şekil 3. 37. Geline aşamada biyoyazıcının genel görünümü	60
Şekil 3. 38. Y eksenini hareket ettirecek motor, vidalı mil ve somunun bağlantısı...	60
Şekil 3. 39. X ekseninde hareketi sağlayacak olan motor ve kayış-kasnak sistemi...	61
Şekil 3. 40. Motorların montajından sonra genel görünüm	61
Şekil 3. 41. Optik limit switch	61
Şekil 3. 42. Elektronik kart ve kabloların bağlantısı.....	62
Şekil 3. 43. Bilgisayar ile konfigürasyon ve panel arayüz ayarlamaları.....	62
Şekil 3. 44. Biyoyazıcının genel görünümü.....	62
Şekil 3. 45. Web panel üzerinden config kodlarının düzenlenmesi	62
Şekil 3. 46. Biyoyazıcının web panelindeki arayüzü	62
Şekil 3. 47. Çizim dosyasının yükleneceği sekme	62
Şekil 3. 48. Biyoyazıcı ile ekran panelinin test edilmesi	66
Şekil 3. 49. Diş macunu ile baskı denemeleri.....	66

Semboller ve Kısaltmalar Listesi

CAD	: Bilgisayar destekli tasarım
3B	: Üç boyutlu
Eİ	: Eklemeli İmalat / Additive Manufacturing
UV	: Ultraviyole
SLA	: Stereolitografi
FDM	: Eriyik Birikim Modelleme / Fused Deposition Modeling
SLS	: Seçici Lazer Sinterleme / Selective Laser Sintering
LOM	: Lamine Nesne İmalatı / Laminated Object Manufacturing
DLP	: Dijital ışık işleme / Digital Light Processing
PJ	: Çoklu Püskürtme / Polyjet
EBM	: Elektron Işınlı Ergitme
SLM	: Seçici Lazer Ergitme / Selective Laser Melting
SGC	: Katı Zemin Kürleme / Solid Ground Curing
MJM	: Çok Jetli Modelleme / Multi-Jet Modelling
SDM	: Şekil Biriktirme İmalatı / Shape Deposition Manufacturing
HA	: Hyaluronik Asit
PLA	: Polilaktik Asit
PET	: Polietilen Tereftalat
PGA	: Poliglikolik Asit
ECM	: Ekstrasellüler Matris
İnkjet	: Mürekkep Püskürtmeli
CT	: Bilgisayarlı Tomografi
MRI	: Manyetik Rezonans Görüntüleme

Özet

3 Boyutlu Biyoyazıcı Modellenmesi ve Tasarımının Geliştirilmesi

Volkan BAKİ

İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Kadriye KIZILBEY

Eylül 2023, 75 Sayfa

Üç boyutlu (3B) biyoyazıcılar, Doku Mühendisliği ve Rejeneratif Tıp alanlarında kullanılan ve birçok probleme çözümler sunan son teknoloji biyomedikal cihazlardır. Biyoyazıcılar, geleneksel doku mühendisliği tekniklerinin getirdiği kısıtlamaları aşmak amacıyla geliştirilen bir teknolojidir. Dokuların ve organların üretimi, yeni geliştirilen bir yöntem olarak baskılama veya 3B fabrikasyon teknolojilerinin kullanılması ile mümkün hale gelmiştir. Bu yaklaşım biyomalzemeler içinde hücrelerin hassas bir şekilde yerleştirilmesini sağlar. Bu çalışmada SolidWorks ile üç boyutlu biyoyazıcı tasarımı yapıp, CNC ve torna makineleri ile prototip imalatı yapılmıştır. Biyoyazıcının ekstruder dişliler sayesinde motorun dönme hareketini şırıngaya aktarmaktadır. Elektronik devrenin kontrolü için Duet3d firmasının “Duet 2” elektronik kartı ve ekran olarak “PanelDue” ürünü tercih edilmiştir. Biyoyazıcıda, eksenlerindeki hareketi sağlayan üç ve ekstruderde bir adet olmak üzere toplam dört motor bulunmaktadır. Tabladan dökülebilecek sıvıların kızaklara zarar verebileceği ihtimaline karşın X eksen hareketi kayış-kasnak sistemi ile sağlandı. Diş macunu ile denemeler yapılarak sistemin çalışması kontrol edilmiştir. Denemeler sonucunda, üretilen bu biyoyazıcının istenilen kalitede baskılar alınabilecek bir 3 boyutlu biyoyazıcı olduğu görülmüştür. Bu projede, hala gelişmekte olan biyoyazıcı teknolojisine uygun tasarlanan bu ürün sayesinde, ülkemizde geleceğin öncelikli tıbbi araştırma alanlarından biri olan Rejeneratif Tıp ve Doku Mühendisliği konusunda araştırma yapma fırsatı sunacak yerli üretim bir 3B biyoyazıcı geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: 3B yazıcı teknolojileri, 3 boyutlu biyoyazıcı, biyobaskı, doku mühendisliği, biyomedikal mühendisliği

Abstract

3 Dimensional Bioprinter Modeling and Design Development

Volkan BAKİ

İstanbul Yeni Yüzyıl University, Science and Engineering Institute

Master Thesis, Biomedical Engineering Department

Supervisor: Assoc. Prof. Kadriye KIZILBEY

September 2023, 75 Pages

Three-dimensional (3D) bioprinters are cutting-edge biomedical devices that are used in the fields of Tissue Engineering and Regenerative Medicine and offer solutions to many problems. Bioprinters are a technology developed to overcome the limitations of traditional tissue engineering techniques. The production of tissues and organs has become possible with the use of printing or 3D fabrication technologies as a newly developed method. This approach enables precise placement of cells within biomaterials. In this study, a three-dimensional bioprinter was designed using SolidWorks, and prototypes were manufactured with CNC and lathe machines. The extruder of the bioprinter transfers the rotational movement of the motor to the syringe thanks to the gears. For the control of the electronic circuit, the "Duet 2" electronic card of the Duet3d company and the "PanelDue" product as the screen were preferred. There are a total of four motors in the bioprinter, three of which provide the movement in its axes and one in the extruder. X-axis movement was provided with a belt-pulley system, in case the liquids spilled from the table could damage the slides. The operation of the system was checked by experimenting with toothpaste. As a result of the trials, it has been seen that this bioprinter is a 3D bioprinter that can print at the desired quality. In this project, a domestically produced 3D bioprinter has been developed that will offer the opportunity to conduct research on Regenerative Medicine and Tissue Engineering, one of the future medical research areas in our country.

Keywords: 3D printing technologies, 3D bioprinting, bioprinting, tissue engineering, biomedical engineering

1. GİRİŞ

Doku ve organ mühendisliği, özellikle 19. yüzyılın sonlarından itibaren yaşanan teknolojik ilerlemelerle birlikte yenilenebilir tıp uygulamalarında önemli bir rol oynamıştır. Önceki dönemlerdeki yenilenebilir tıp yaklaşımlarının karşılaştığı zorluklar, yeni teknolojilerin getirdiği olanaklarla aşılmaya başlamıştır [1].

3 boyutlu (3B) biyoyazıcı teknolojisinin sağladığı avantajlar, doku ve organ mühendisliği alanında çığır açan gelişmelere yol açmıştır. Bu teknoloji, geleneksel elektro-eğirme (elektrospinning) ve litografi tabanlı yöntemlerin aksine, biyomürekkeplerin daha kontrollü bir şekilde yerleştirilmesine ve özel olarak tasarlanmış 3B yapıların üretilmesine imkan tanır. Ayrıca, çeşitli 3B biyoyazıcılar farklı işleyiş prensipleriyle çalışır, bu da çeşitli doku ve organ mühendisliği projelerine uygun seçenekler sunar. Bu teknoloji, gelecekte daha fazla yenilik ve keşifle birlikte doku ve organ nakillerinin daha etkili ve sürdürülebilir hale gelmesine olanak sağlayacaktır [2].

Doku mühendisliği ve hızla ilerleyen 3B yazıcı teknolojisinin birleşimi, 3B biyoyazıcıları ortaya çıkarmıştır. Bu teknoloji, insanların otomobil parçaları üretmekten öte, insan sağlığı için yeni umutların ve hayallerin yeşermesine sebep olmuştur. Son yıllarda artan sağlık sorunları, binlerce insanın organ yetmezliği ile mücadele ettiği bir gerçekliği beraberinde getirmiştir. Hem yetersiz donör kaynakları hem de doku uyumsuzlukları, birçok hastanın organ nakli beklemek zorunda kaldığı uzun günler hatta aylar boyunca süren bir süreci ve sağlık durumlarının giderek kötüleşmesini getirmiştir. 3B biyoyazıcılar, kişinin ihtiyaçlarına göre özelleştirilmiş organlar üretme umudunu taşıyan bir teknoloji olmuş ve bu bağlamda birçok bilim insanını 21. yüzyılda biyoyazıcılar üzerine daha fazla çalışmaya yönlenmiştir [3].

3B yazıcı teknolojisi, genellikle yeni bir inovasyon gibi görünse de aslında ilk kez 1984 yılında ortaya çıkmıştır. Bu teknoloji, zaman içinde önemli geliştirmelere tabi tutulmuştur. 3 boyutlu yazıcılar olarak adlandırılan bu cihazlar sayesinde katmanlı üretim işlemleri başarıyla yürütülmektedir. Geleneksel üretim metotlarına kıyasla, bu teknoloji maliyet ve üretim hızı açısından önemli avantajlar sunmaktadır.

Günümüzde, 3 boyutlu yazıcılar artık evlerimizde yaygın bir şekilde kullanılabilmektedir. Kullanıcılar kendi tasarımlarını oluşturma, ihtiyaçlarına yönelik

parçalar üretme ve birçok ürünü kendi başlarına üretme konusunda yetenek kazanmaktadır. Sağlık sektöründe, 3 boyutlu yazıcı teknolojileri yapay doku üretimi ve tıp eğitimi gibi önemli alanlarda çalışmaları desteklemektedir. Otomotiv endüstrisinde, 3 boyutlu yazıcılar yedek parça üretiminin yanı sıra, araçlarda kişiselleştirilmiş parçaların kullanıcılara sunulması açısından da kullanılmaktadır. Gıda sektöründe, 3 boyutlu yazıcılar pasta ve çikolata üretiminde kullanılırken, tekstil sektöründe giysilerin tasarımı, kalıp oluşturma ve üretim süreçlerini kolaylaştırmaktadır. Savunma sanayi, havacılık ve uzay alanlarında kullanılan 3 boyutlu yazıcılar ise yedek parça üretimini hızlandırmanın yanı sıra, parçaların dayanıklı ve hafif olmasına katkı sağlamaktadır. İnşaat sektöründe ise 3 boyutlu yazıcılar, daha hızlı ve ekonomik ev inşası için kullanılmaktadır, bu da inşaat alanında önemli bir dönüşümü beraberinde getirmektedir [4].

Bugüne kadar üç boyutlu yazıcılar, biyoyumlu protezler ve vücut parçaları gibi canlı dokulara zarar vermeyen malzemeler kullanılarak üretildiğinde birçok insan için umut kaynağı olmuştur [5]. Son yıllarda, bu teknolojinin daha yaygın hale gelmesiyle birlikte, kıkırdak, deri, kalp kapakları ve aort damarı gibi canlı dokuların üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir. Biyoyazıcı teknolojisinin organ nakli ile ilgili zorlukların üstesinden gelmede (rejenere etmede) önemli bir rol oynayabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, biyoyazıcıların ilaçların test edilmesi amacıyla doku ve organların basılmasında kullanılabileceği de belirtilmiştir [6].

Bu teknoloji, vücut parçalarının üretiminin ötesinde, 3B yazıcılarla üretilen organlar ve doku modelleri ile tanı ve tedavi süreçlerine önemli katkılarda bulunmaktadır. Örneğin, vücudun iç bölgelerine yerleşen tümörlerin cerrahi olarak çıkarılması gereken durumlarda, hastanın kanserle etkilenen organının benzeri bir model oluşturulabilir. Uzmanlar, bu model üzerinden tümörün konumunu ve büyüklüğünü inceleyerek ameliyatı en ince detaylarına kadar planlayabilirler. Bu yaklaşım, ameliyat süresini kısaltmanın yanı sıra hastanın yaşam kalitesini de artırabilir [7].

Her yeni araştırma, gerçek organların biyoyazıcılar kullanılarak hızla üretilmesi ve ardından hastalara nakledilmesi sürecine bir adım daha yaklaşmamıza yardımcı oluyor. 3B biyoyazıcı teknolojisinin organ ve doku üretiminde başarıyla kullanılması durumunda, sağlık sektöründe büyük bir devrim yaşanacağına kesin gözüyle bakılmaktadır. Dünya genelinde biyoyazıcılarla ilgili çalışmalar hızla ilerlemekte

olup, istenilen doku veya organın üretilebilmesi ve kişiye özel tasarımların yapılabilmesi konusunda büyük bir umut vardır [8].

Yapılan bu çalışma, biyoyazıcı teknolojisinin temel prensiplerini anlamayı, mevcut gelişmeleri incelemeyi ve ayrıca kendi tasarladığımız bir biyoyazıcı prototipinin yapımını ve işlevselliğini açıklamayı amaçlamaktadır. Ayrıca, bu teknolojinin Türkiye'deki gelişimine katkıda bulunarak biyomedikal ve doku mühendisliği alanında literatüre değerli bilgiler sunmayı hedeflemektedir.



2. ÜÇ BOYUTLU YAZICILAR

2.1. Üç Boyutlu Yazıcıların Tanımı ve Çalışma Prensibi

3B yazıcı olarak bilinen teknoloji günümüzde yaygın olarak kullanılsa da aslında 1970'lerde hızlı prototipleme amaçlarıyla ortaya çıkmıştır. Başlangıçta, işlem tasarımların örneklerini üretme amacı taşıdığı bilinmektedir. Ancak 1980'lerin başından itibaren, gerçek parça üretimi kavramı önem kazanmaya başlamıştır. 1990'ların ortalarında ise metal ve seramik gibi malzemeler kullanılarak son kullanım için işlevsel parçaların üretilmesi amacıyla "Eklemeli İmalat" adını verdiğimiz üretim yöntemi geliştirilmiştir. Eklemeli imalat, karmaşık geometrilere sahip fiziksel parçaların katman katman oluşturulması prensibine dayalı olarak hızlı üretim yapabilen bir teknik olarak öne çıkmıştır.

Geleneksel endüstriyel üretim sürecinde bir ürünün üretilmesi için öncelikle tasarım yapılmalı, ardından kalıp oluşturulmalı ve farklı malzemeler bu kalıplara dökülmelidir. Özellikle özelleştirilmiş, ticari olarak yaygınlaşmamış ve kişiselleştirilmiş ürünlerin üretilmesi gerektiğinde, kalıp üretimi yüksek maliyetli ve büyük alanlar gerektiren bir işlem olabilir. Üç boyutlu yazıcılar, bu tür kısıtlamaları aşmada büyük bir rol oynamıştır. Bir ürün sadece bir tane gerektiğinde, geniş bir bilgisayar yazılımı kullanarak tasarım oluşturulabilir ve herhangi bir ara aşama olmadan hızlı bir şekilde üretilebilir. [9].

3B yazıcılar, bilgisayar destekli tasarım (CAD) verilerini fiziksel nesnelere dönüştüren makinelerdir. Bu yazıcılar, elektronik parçalar ve motorlar gibi bileşenlerin yanı sıra birçok mekanik parçayı da üretebilme yeteneğine sahiptirler. Genellikle kullanılan 3B yazıcılar, bir nesneyi üretmek için bilgisayar ortamındaki 3B modeli sanal olarak katmanlara ayırır ve her bir katmanı eritilen malzeme ile üst üste ekleyerek nesneyi oluşturur. 3B yazıcıların işleyişi, aşağıdaki üç temel adımda açıklanabilir: modelleme, 3B baskı ve yüzey düzeltilmesi;

Modelleme: İlk aşamada, üretilecek nesnenin 3B tasarımı, CAD yazılımları veya 3B tarama sistemleri aracılığıyla dijital bir model haline getirilir. Oluşturulan model daha sonra genellikle STL dosya formatına dönüştürülerek 3B yazıcıda kullanılabilir hale gelir.

3B Baskı: Bu aşamada, nesne katmanlar halinde inşa edilir. Günümüz teknolojilerinde bu katmanlar, plastik eritme, lazer sinterleme veya stereolitografi gibi çeşitli yöntemler

kullanılarak üretilebilir. Yazıcı, her katmanı üretirken STL dosyasındaki bilgileri kullanarak nesneyi adım adım oluşturur.

Yüzey Düzeltilmesi: 3B yazıcılarla üretilen nesneler genellikle boyutsal açıdan yüksek hassasiyete sahiptir. Ancak kritik öneme sahip nesneler için son bir yüzey düzeltilmesi, iyileştirme ve kesin ölçülere getirme işlemi uygulanabilir. Bu adım, nesnenin son halini mükemmel hale getirir ve istenilen kaliteyi sağlar.

Bu süreç, birçok endüstri ve uygulama alanında kullanılan 3D yazıcıların temel işleyişini tanımlar. 3D yazıcılar, tasarım, prototipleme, üretim ve daha birçok alanda büyük bir dönüşüm sağlamıştır. [10].

2.2. Üç Boyutlu Yazıcıların Üretim Süreci

3B yazıcılar, dijital haldeki üç boyutlu tasarımları somut nesnelere dönüştürebilen teknolojilerdir. Temel olarak, CAD dosyalarından karmaşık nesneleri üretebilen bu yazıcılar, ürettikleri fiziksel nesneleri katmanlar halinde üretme yetisine sahiptirler. [11].

Üç Boyutlu yazdırma teknolojileri kapsamında, Üç Boyutlu yazıcılar, modelleme yazılımları, tarayıcılar ve mürekkep (filament) gibi önemli bileşenler bulunmaktadır. Üç boyutlu yazıcı tasarımında Autocad, 3DS MAX, SketchUp, Thinkercad, Autodesk123D, Solid gibi yazılımlar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yazdırılacak nesnenin üç boyutlu modeli, bilgisayar destekli tasarım programları veya tarayıcılar kullanılarak oluşturulur. Oluşturulan bu model daha sonra dosya formatı olarak üç boyutlu yazıcıya aktarılır. Ardından, özel dilimleme programları aracılığıyla nesnenin katmanlarına ayrılması işlemi gerçekleştirilir. İnce tabaka olarak adlandırılan üç boyutlu mürekkep hammaddesi, dijital modelleri somut nesnelere dönüştürmek için kullanılır.

Üç boyutlu yazıcılarda kullanılan hammaddeler oldukça çeşitlidir. Bu hammaddeler arasında plastik toz, reçine, oyun hamuru, seramik, metal, yiyecek malzemeleri, biyomateryaller, çimento, cam, çeşitli metaller, metal alaşımları ve bileşik malzemeler yer almaktadır. Plastik malzeme, diğer hammaddelere göre birçok açıdan üstün özelliklere sahip bir malzeme olduğu için yaygın olarak tercih edilen bir yazdırma malzemesidir. Plastik malzeme, ince katmanlar halinde üst üste birleştirilerek nesnenin üç boyutlu modelinin oluşturulmasına olanak sağlamaktadır [12].



Şekil 2.1: 3B yazıcılarda katmansal üretim süreci [13]

3B yazıcılarla katmanlı üretim süreci oldukça önemlidir ve Şekil 2.1'de görselleştirilmiştir. Bir nesnenin 3B bilgisayar destekli tasarım modelini oluşturma süreci, üretim işleminin ilk adımını oluşturur. Tasarımcılar bu aşamada iki farklı yaklaşımı benimseyebilirler. İlk yaklaşım, üretilmesi planlanan nesnenin 3B modelleme yazılımları kullanılarak dijital ortama aktarılması ve 3B bilgisayar destekli tasarım modeline dönüştürülmesidir. İkinci yaklaşım ise, var olan bir nesnenin 3B tarayıcılar aracılığıyla dijital ortamda kullanılabilecek bir modele dönüştürülmesidir. Her iki durumda da oluşturulan bu modeller, dijital ortamda STL adı verilen bir 3B bilgisayar destekli tasarım dosyası formatında saklanır. Bu aşamadan sonra, ilgili dilimleme yazılımları kullanarak nesne katmanlarına ayrılacak şekilde dilimleme işlemi gerçekleştirilir. Son adımda ise, 3B yazıcıların sahip olduğu katmanlı üretim özelliği kullanılarak nihai nesnenin üretimi tamamlanır. [13].

Bu teknolojiyle baskı işlemi dört ana süreçten oluşur: modelleme, dilimleme, yazdırma ve tamamlama süreci.

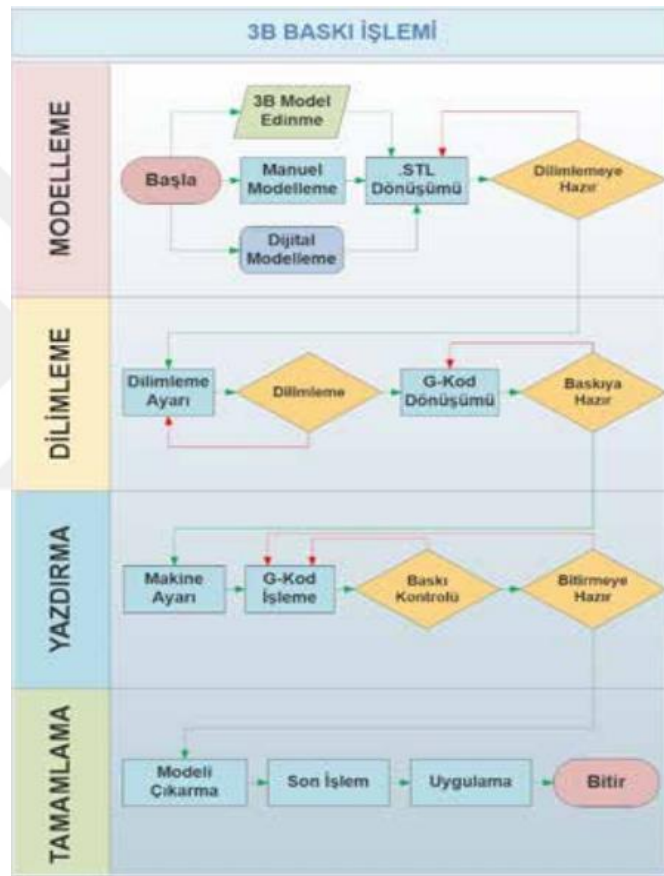
Modelleme aşamasında, bir CAD programı veya bir 3B tarayıcı kullanılarak gerçek nesnenin 3B modeli oluşturulur. Bu model, genellikle STL dosya uzantısıyla kaydedilir.

Dilimleme aşamasında, kaydedilen STL dosyası bir dilimleme algoritması kullanarak belirli kalınlıklarda enine 2B kesitlere ayrılır. Bu kesitler daha sonra G-Kod olarak adlandırılan kodlara dönüştürülür. G-Kodlar, makinenin anlayabileceği bir dilde her bir 2B katman için işlenmesi gereken malzeme ve hareket bilgilerini içerir.

Yazdırma aşamasında, 3B yazıcı G-Kodları kullanarak her bir 2B katmanı birbiri ardına sıralayarak 3B gerçek nesnenin katı modelini oluşturur. Bu katı modellerin

oluşturulmasında farklı malzemeler kullanılabilir, bunlar sıvı, toz veya katı polimer malzemeler olabilir.

Tamamlama aşamasında ise, yazdırma işlemi sonrasında oluşan katman çizgileri çeşitli yöntemlerle düzeltilir. Bu yöntemler arasında ısıt işlemler, gaz ve çözelti kullanımı gibi işlemler bulunur. Bu sayede malzeme yüzeyinin pürüzsüzleştirilmesi sağlanır. Şekil 2.2’de gösterilmekte olan 3B yazıcının baskı işlemi, aşama aşama gerçekleşmektedir. Bu teknoloji, karmaşık ve özelleştirilmiş parçaların üretiminde büyük bir potansiyele sahiptir [14].



Şekil 2.2: 3B baskı işlemi akış diyagramı [14]

2.3. Üç Boyutlu Yazdırma Teknolojileri

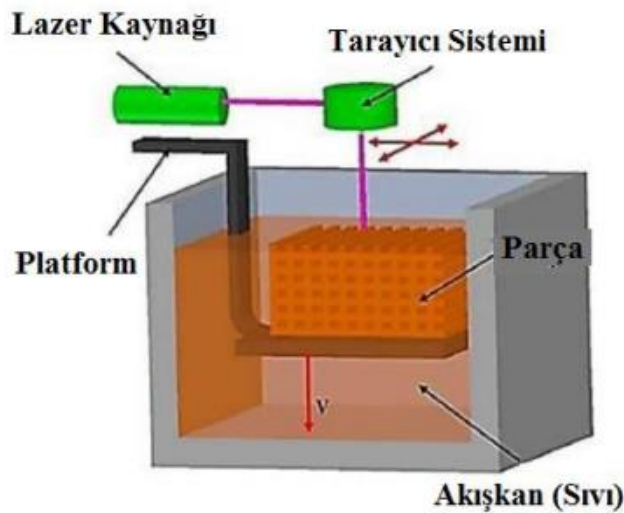
Üç boyutlu üretim olarak isimlendirilen bu teknoloji, masaüstü imalat veya eklemeli imalat (Eİ / Additive Manufacturing) olarak da bilinmektedir. 3B yazıcılar, istenilen materyali üretmek için bir dizi yatay kesiti üst üste ekleyerek malzemeyi katman katman bir araya getirirler. Oluşturulan bu katmanlar, katkı işlemleriyle veya kendiliğinden birleşerek gerçek materyali oluşturur. 3B yazıcılar, bu üretim işlemini gerçekleştirmek için çeşitli teknolojileri kullanabilirler. Bu teknolojiler arasındaki

farklılıklar genellikle katmanların nasıl oluşturulduğuyla ilgilidir. Bazı 3B yazıcılar, sıvılaştırılmış veya esnek materyalleri kullanırken, diğerleri yüksek enerjili ultraviyole (UV) lazerleri tercih ederler. Bu çeşitlilik, farklı uygulamalara ve malzemelere yönelik çözümler sunar. En sık kullanılan 3B yazıcı teknolojilerinin çalışma prensipleri ve temel özellikleri aşağıda açıklanmıştır [15,16].

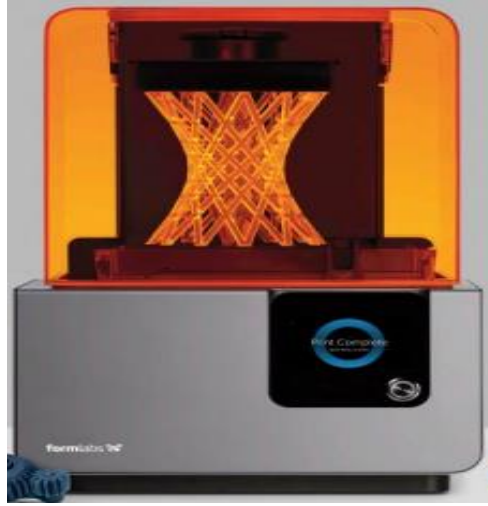
2.3.1. Stereolitografi (Stereolithography-SLA)

Oda sıcaklığında bulunan sıvı fotopolimer reçinenin, belirli bölgelerinin noktasal bir morötesi lazer ışını kullanılarak kürletildiği bir işlem olarak bilinen Stereolitografi tekniği, genellikle prototip modellerin üretilmesinde kullanılır. SLA yazıcılar, bu lazer teknolojisi sayesinde parçaları katman katman oluşturur. İşlem, bilgisayar tarafından kontrol edilen bir tarama sistemi kullanır ve parçanın geometrisine göre lazer ışınını reçine tabakası üzerinde gezdirerek ilk katmanı oluşturur. Ardından, parçanın bulunduğu platform, katman aralığı kadar aşağıya indirilir ve sıvı fotopolimer, bir kanat yardımıyla ikinci katmanın üstüne sıvanır. Bu kürleştirme işlemi, katmanlar tamamlanana kadar devam eder ve sonunda parça reçine havuzundan çıkarılır [12].

SLA tekniği, katmanlı üretim uygulamalarında büyük bir öneme sahiptir. Genellikle parçaların üretiminde termoset fotopolimer malzemeler kullanılır. Fotopolimerler, mekanik ve kimyasal özelliklerini ışığa maruz kaldığında değiştiren polimerlerdir. Bu ışık, genellikle UV veya kızılötesi gibi görünmeyen dalga boylarında kullanılır, ancak bazen görünür dalga boylarındaki ışık da kullanılabilir [17]. SLA'nın çalışma prensibi, şematik olarak Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te gösterilmiştir [16,17].

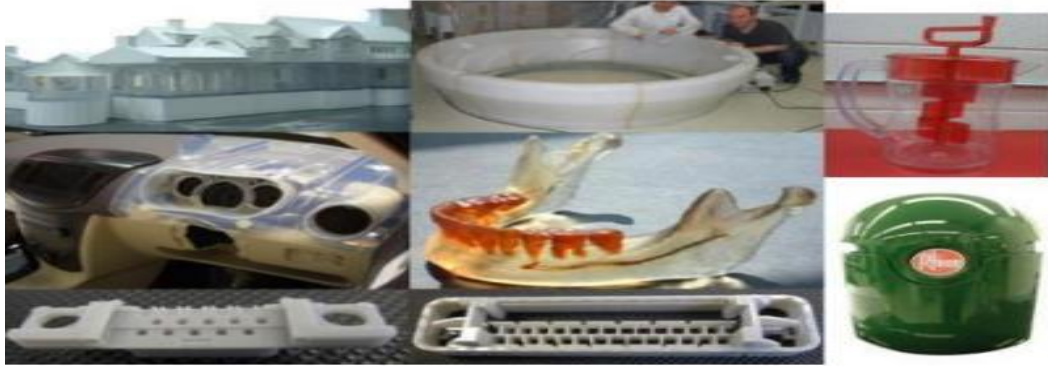


Şekil 2. 3: SLA'nın şematik çalışma ilkesi [17]



Şekil 2. 4: SLA 3D yazıcı [16]

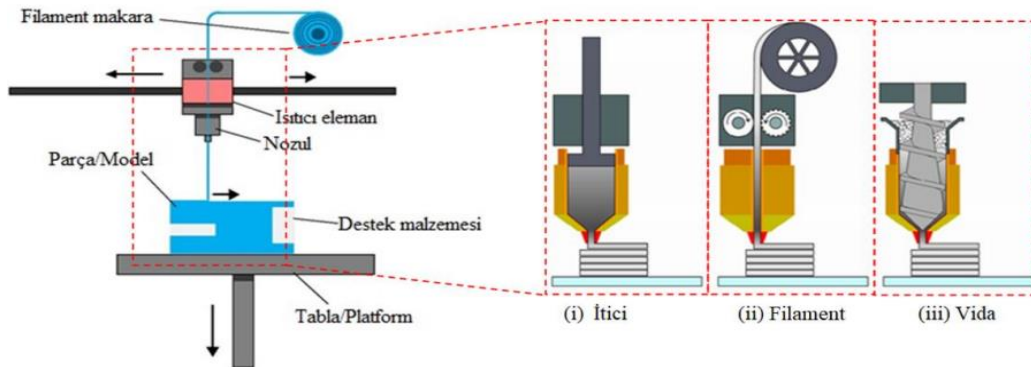
Parametreler genellikle önceden belirlenir ve üretim süreci boyunca değiştirilmez. Katmanın yüksekliği ve ışık kaynağının çözünürlüğü, nihai ürünün yüzey kalitesi üzerinde önemli etkilere sahiptir. SLA, yüksek yüzey kalitesi ve detaylı parçaların üretiminde başarılı olan bir yöntem olarak öne çıkar. Ancak, fotopolimer malzemeler kırılabilir, bu nedenle düşük darbe dayanıklılığı sorunuyla karşılaşabilirsiniz. Ayrıca, zamanla mekanik özelliklerini yitirdikleri için parçaların ömrü sınırlı olabilir. Bu tür sorunları aşmak için kaplama işlemi uygulanabilir, ancak bunun da bazı sınırlamaları vardır. Ancak, SLA'nın karmaşık parçaların üretiminde başarılı olduğunu ve destek yapıları sayesinde karmaşık geometriye sahip parçaların üretiminin mümkün olduğunu belirtmek önemlidir. Özellikle otomotiv ve ilaç sektörlerinde, doğru ölçülerde ve yüksek yüzey kalitesiyle detaylı, küçük ve karmaşık parçaların üretimi için sıkça tercih edilmektedir [18,19]. SLA, ortodonti alanında da büyük başarı elde etmiş ve özellikle özel diş implantları gibi ağız cerrahisi uygulamalarında kullanılmıştır. Bu tür uygulamaların yanı sıra, kalp-damar hastalıklarının tedavisinde, davranış ve doku etkileşim testleri ile daha iyi bir dokuya erişim sağlamaya yönelik çalışmalar, beyin cerrahisi, omurga cerrahisi ve travmatoloji gibi birçok tıbbi alanda kullanılmıştır. SLA'nın detaylı ve hassas parçalar üretme yeteneği, tıbbi cihazlar, protezler ve implantların tasarımı ve üretiminde büyük bir avantaj sağlamıştır. Bu da tıp alanında hastalara daha iyi ve özelleştirilmiş tedavi seçenekleri sunma potansiyelini artırmıştır [20]. SLA yöntemi ile üretilmiş parçalar Şekil 2.5'te gösterilmiştir [21].



Şekil 2. 5: SLA yöntemi ile üretilmiş parçalar [21]

2.3.2. Eriyik birikim modellemesi (Fused deposition modelling-FDM)

Model veya prototip oluşturma amaçlı en yaygın kullanılan 3B yazıcı teknolojilerinden biri "Eriyik Birikim Modelleme" yöntemi olarak bilinmektedir. Bu yöntemde, lif halindeki termoplastik malzeme eritilir ve katmanlar halinde bir araya getirilir. FDM, katı termoplastik filament malzemelerin kullanıldığı bir yöntemdir [22]. Bu yöntemde; filament, ısıtılmış bir nozzleden geçmekte ve nozzlenin ısıısıyla eriyen filament Şekil 2.6'te görüldüğü gibi tabla üzerine katman katman, üst üste eklenerek model oluşturulmaktadır. Sitemde yer alan nozzle, yatay olarak hareket edebildiği gibi her yeni katman eklendikten sonra dikey olarak yukarı ve aşağı hareket ederek istenilen baskının oluşturulmasını sağlamaktadır [23].



Şekil 2. 6: FDM sistemi çalışma prensibi [23]

FDM yöntemi, ısıtılmış bir yatak üzerine yerleştirilmiş ve yine ısıtılmış bir enjektörden erimiş plastik malzemenin sıkılması prensibine dayanmaktadır. Bu teknoloji, 1988 yılında Scott Crump tarafından geliştirilmiştir ve ilhamını bir çocuğun renkli macunlarla oynamasından almıştır. FDM, oldukça hassas bir şekilde çalışabilen bir yöntemdir ve katmanlarını 0,02 mm'ye kadar inceltebilir. Bu, karmaşık parçaların, çoklu parçalı ve hareketli mekanizmaların üretimini mümkün kılar. Bu sayede

karmaşık tasarımların üretimi FDM yöntemi ile kolayca gerçekleştirilebilir [22]. Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS), poliamid, polikarbonat, polietilen, polipropilen ve hassas döküm mum model malzemeleri gibi çeşitli malzemeler, bu yöntemle kullanılabilir. FDM yönteminde model üretilirken, destek malzemesi kullanılması yaygındır ve model malzemesinden farklı bir destek malzemesi kullanabilmek için sisteme ikinci bir nozul eklenmesi gerekebilir.

Bu yöntemle üretilen parçaların önemli özellikleri şunlardır:

Yüksek Dayanıklılık: FDM ile üretilen parçalar, esnemeye, bükülmeye, kırılmaya ve uzamaya karşı yüksek dayanıklılığa sahiptir. Bu nedenle endüstriyel uygulamalarda ve fonksiyonel parçaların üretiminde tercih edilir.

Kimyasal Direnç: Bu parçalar, suya ve neme karşı yüksek dirence sahiptir. Kimyasal maddelere karşı dayanıklılıkları, endüstriyel ortamlarda kullanıldığında önemlidir.

Uygun Maliyet: FDM, uygun maliyetli bir 3D baskı yöntemidir. Malzeme maliyetleri genellikle düşüktür ve seri üretim için uygundur.

Ancak bu yöntemin bazı dezavantajları da vardır. Tek bir ekstrüzyon ünitesi ile yoğunluğu yüksek parça üretimi uzun zaman alabilir ve destek yapıları gerektirebilir. Ayrıca, nozul kesiti dairesel olduğu için keskin dış köşelerin yapılması zor olabilir. SLA yazıcılarla karşılaştırıldığında, FDM prensibiyle çalışan yazıcılar daha kesin sonuçlar verir, ancak bazı durumlarda daha az doğruluk payına sahip olabilirler [24]. FDM tipi 3B Yazıcı ve FDM yöntemi ile üretilen nesneler Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de gösterilmiştir [16,21].



Şekil 2. 7: FDM 3D yazıcı [16]



Şekil 2. 8: FDM yöntemi ile üretilmiş nesneler [21]

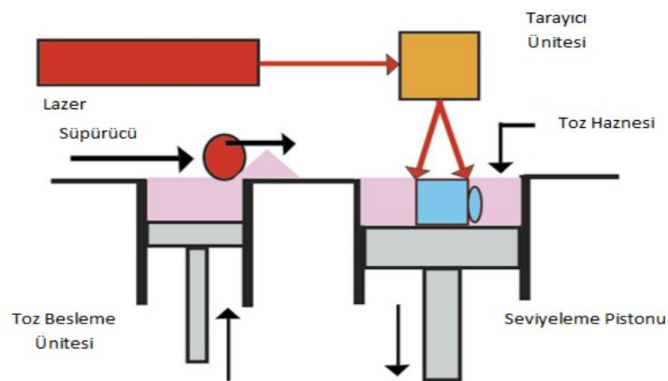
2.3.3. Seçici lazer sinterleme (Selective Laser Sintering-SLS)

Lazer sinterleme olarak da bilinen bu üretim yöntemi, toz yığma teknolojilerinin öncüsü olarak kabul edilmektedir. SLS, parça geometrisini oluşturmak için tozların sinterlenmesi prensibine dayanır ve iki ana bölümden oluşur. Birinci bölümde, toz depolanır ve besleme yapılırken, diğer bölümde sinterleme ve seviyelendirme işlemi gerçekleştirilir. İstenen parça geometrisini elde etmek için lazer ışını, tozun bulunduğu alana yönlendirilir ve sinterleme işlemi başlatılır. Katılan toz ile katmanlar oluşturulur ve platform, bir sonraki katmana geçebilmek için aşağıya indirilir. Diğer bir bölümde ise toz haznesinden süpürge yardımıyla toz transfer edilir ve bu işlem tekrarlanır. Bu yöntem, karmaşık parçaların üretiminde ve prototiplemede yaygın olarak kullanılır.

Sinterleme işlemi tamamlandıktan sonraki aşamada, sinterleme istasyonunun soğuması için belirli bir süre beklenmesi gerekmektedir. Daha sonra, parça, üretim tablasından dikkatlice çıkarılır ve tozlar, özellikle doğal destek görevi üstlenmiş olanlar olmak üzere, bir fırça veya vakumlu süpürge kullanılarak temizlenir. SLS ile üretilen parçalar, genellikle son işlemler gerektiren, örneğin kumlama veya isteğe bağlı olarak boyama gibi işlemleri kapsamaktadır. SLS sistemi, sinterleme istasyonunun dışında, kullanılmış tozun belirli bir oranını geri dönüştürmeye olanak tanıyan bir geri dönüşüm sistemi içermektedir. Bu, malzeme maliyetini azaltmaya ve sürdürülebilir bir yaklaşımı teşvik etmeye yardımcı olur.

Sinterleme işlemi sırasında tozun sabit bir konumda olması, bu yöntemin ölçüsel hassasiyetini oldukça başarılı kılar. Aynı zamanda çeşitli toz malzemelerinin kullanılabilmesi, tasarımcılara geniş bir malzeme yelpazesi sunar ve bu da yaratıcı tasarım imkanları sağlar. Sadece yeni parça üretimi değil, aynı zamanda tozun mikro çatlakları doldurarak ve bu çatlakları sinterleme işlemiyle birleştirerek tamir gibi yeniden düzenleme çalışmaları da lazer sinterleme yöntemi ile gerçekleştirilebilir. Ancak, sinterleme işlemi genellikle uzun sürdüğünden, bu yöntemle parça üretimi zaman alıcı olabilir. Ayrıca, bu yöntemin önemli bir dezavantajı, kalıntı gerilmelerin yüksek değerlere ulaşabilmesidir. Parçaların uç noktalarında çekme gerilmeleri birikirken, orta bölgelerinde baskı gerilmeleri birikebilir. Bu durum, malzemenin şekli, türü ve sinterleme yöntemi gibi faktörlere bağlı olarak kalıntı gerilim değerlerinin değişmesine neden olabilir. SLS yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.9'da verilmiştir [25,21].

SLS yöntemi, poliamid (naylon), polistren, karbon fiber ve alüminyum katkılı poliamid gibi plastik malzemeler, paslanmaz çelik, kobalt krom, nikel krom, titanyum gibi metal alaşımları ve doğrudan kalıp için kalıp kumu (alüminyum silikat) gibi seramik malzemeler gibi çeşitli malzemeleri işleyebilir. Bu yöntem, özellikle yüksek mukavemet gereksinimlerine sahip parçaların üretimi için idealdir. Dolayısıyla, konsept model üretimi, fonksiyonel parça üretimi, hızlı döküm ve hızlı kalıp üretimi gibi çeşitli uygulama alanlarında başarıyla kullanılmaktadır. SLS yöntemi ile üretilen bazı parçalar Şekil 2.10'da gösterilmiştir [21].



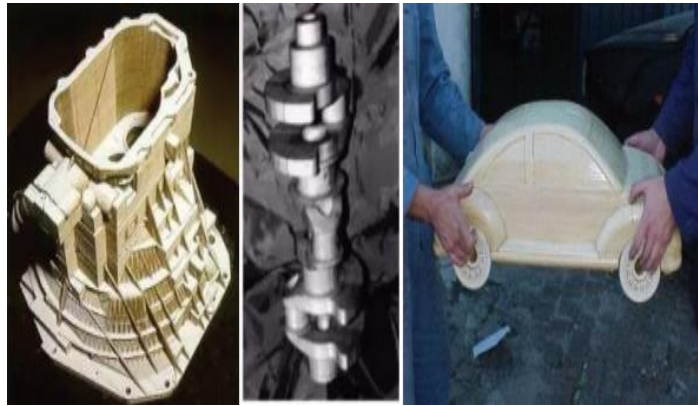
Şekil 2. 9: SLS'nin şematik gösterimi [21]



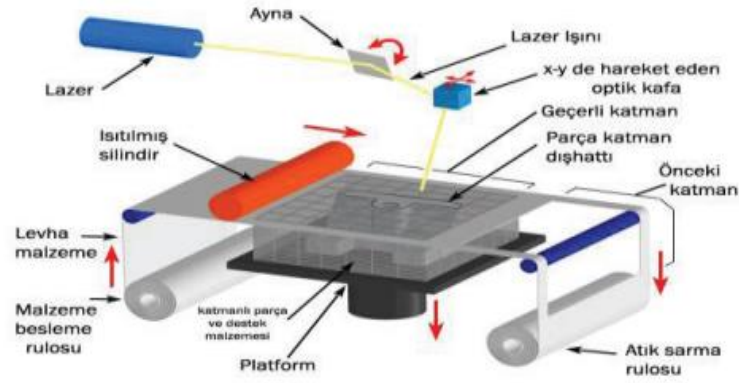
Şekil 2. 10: SLS ile üretilen parçalar [21]

2.3.4. Lamine Nesne İmalatı (Laminated object manufacturing-LOM)

Lamine nesne imalatı, hızlı prototipleme yöntemleri arasında özellikle fiyat ve zaman açısından yüksek verimliliği nedeniyle sıkça tercih edilen bir yöntemdir. Bu süreçte ince levhalar, özel bir besleme mekanizması tarafından ileriye itilir ve her tabaka, alt tabaka ile birleşmesini sağlamak için basınç ve ısı uygulayan silindir ile bir lazer tarafından şekillendirilir. Ayrıca, her tabakanın dış hatlarını kesmek için lazer kullanılır. Levhaların kesilmeden önce yapışkan bir kaplama işlemine tabi tutulur. Katmanlar birbirine kesilir ve birleştirilir, bu şekilde nesne oluşturulur. Her katmanın üretimi tamamlandığında, tabla bir katman kalınlığı kadar aşağıya iner. Bu yöntemde kullanılan ince levha kalınlığı genellikle 0,05 ila 0,5 mm arasında değişir ve parçanın tolerans hassasiyetini belirler. Üretim süreci boyunca her katmanın kesilmesi sonucu geriye kalan yan malzemeler ise üretim sürecinde parçaya destek sağlar. LOM sisteminin çalışma prensibi ve LOM yöntemi ile üretilmiş parçalar Şekil 2.11 ve Şekil 2.12’te gösterilmiştir [26].



Şekil 2. 11: LOM ile üretilen parçalar [26]



Şekil 2. 12: LOM'un çalışma prensibi [26]

Bu üretim yöntemi, geniş bir malzeme yelpazesi kullanma esnekliği sunar. Bu malzemeler arasında plastik esaslı köpükler, kağıt ve benzerleri gibi çeşitli materyaller bulunurken, aynı zamanda metal veya seramik tozu ile takviye edilmiş malzemeler de tercih edilebilir. Bu yöntemin tercih edilme sebepleri arasında düşük üretim maliyetleri ve hammadde tedarikinin kolaylığı yer almaktadır. Doğru tasarım ve üretim parametrelerinin belirlenmesi ile her ölçekte ve hassasiyette üretim gerçekleştirilebilir. Bu yöntemin diğer tekniklere göre en büyük avantajlarından biri, büyük hacimli parçaların diğer yöntemlere kıyasla daha kısa sürede üretilebilmesidir. Ayrıca, bu yöntem çevre dostu bir teknoloji olarak da öne çıkar [21].

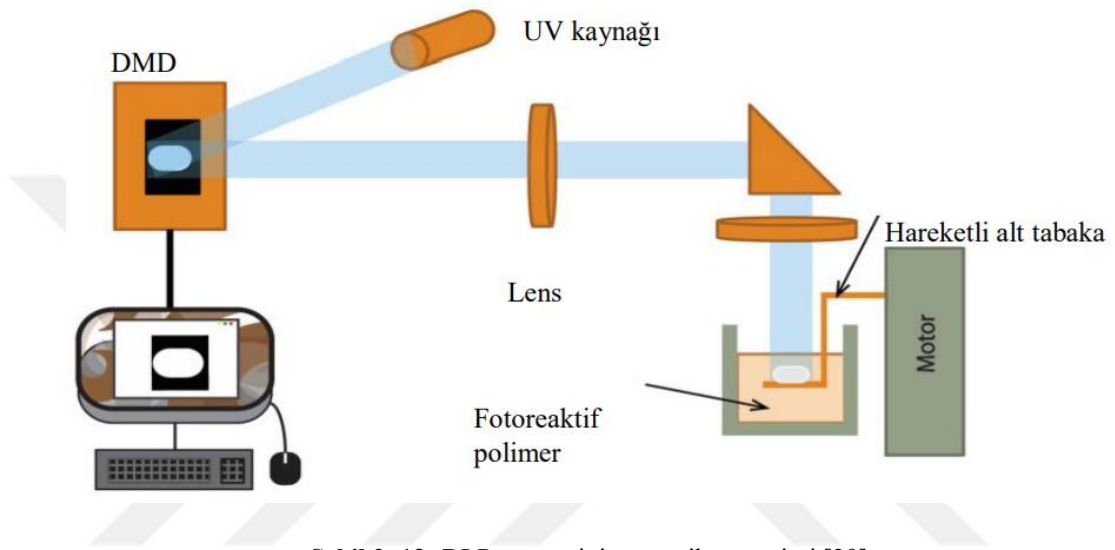
Bu tekniğin bir diğer özelliği de kalıntı gerilmeli nesneler üretilebilmesidir. Yöntemde ek katılaşmaya gereksinim duyulmaz. Üretimde malzeme olarak kağıt kullanıldığı zaman Şekil 2.12'de verilenler gibi polywood ahşap benzeri ürünler üretilebilmektedir. Ancak kağıt malzeme kullanıldığında, nem emilimini ve fazla aşınmayı önlemek amacıyla, üretim sonrasında parçalara kaplama işlemi uygulanması gerekebilir. [27].

2.3.5. Dijital ışık işleme (Digital Light Processing – DLP)

Dijital Işık İşlemeli olarak adlandırılan bu yöntem, SLP'ye benzer olarak sıvı reçine ile 3B baskı yapma tekniğini ifade eder. DLP, özellikle yüksek çözünürlüklü mikro ürünlerin üretimi için kullanılır. Bu süreçte, saydam bir reçine tabakasına milyonlarca optik UV ışığı gönderilmesi, geleneksel bir projektörün çalışma prensibine benzer. Bu sayede tüm reçine katmanını aynı anda sertleştirilir, bu da üretim süresini önemli ölçüde azaltır. DLP, geleneksel bir ışık kaynağı olan ark lambası ile sıvı kristal ekran panelinin veya deforme edilebilen bir aynanın (DMD) kullanıldığı bir sistemdir. Tek bir geçište

tüm fotopolimer reçineye uygulandığı için SLA' ya göre daha hızlıdır. DLP ile üretilen parçalar, SLA yöntemiyle üretilenler gibi yüksek çözünürlükte ve hassas olabilir [28].

DLP teknolojisi ile üretilen üç boyutlu baskılar genellikle hafif, düzgün yüzeyli ve yüksek çözünürlüklüdür. Bu özellikler, SLA ve Polijet gibi diğer polimer temelli 3B baskı teknolojilerine benzerlik göstermektedir. DLP, bir UV projektörünün kullanıldığı ve çalışma alanının tamamının seçilen bölgelerini aynı anda işleyebildiği bir sistemdir (Şekil 2.13) [29].



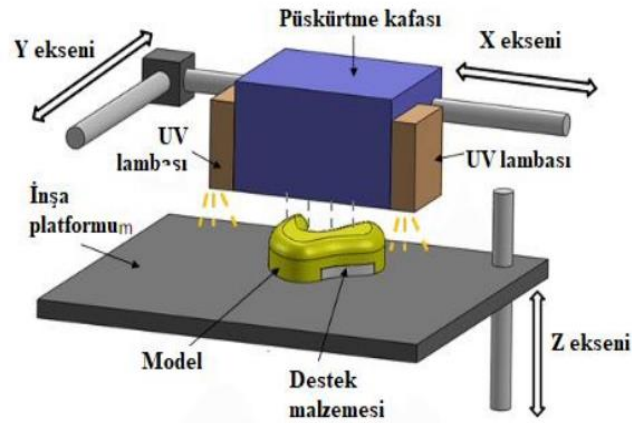
Şekil 2.13: DLP yönteminin şematik gösterimi [29]

Enerji kaynağı olarak dijital ışık kullanılan DLP baskısı, UV radyasyonu ile başlatılan ve sıvı monomerler ile oligomerleri içeren bir banyo içinde lokal fotopolimerizasyon sürecine dayanır. Bu yöntem, oldukça karmaşık 3D yapıların üretimine olanak tanır. DLP teknolojisi, düşük maliyetli ve yüksek verimli bir katmanlı üretim yöntemi olarak kabul edilir. Yüksek baskı çözünürlüğü, hızlı işlem hızı ve tasarım özgürlüğü gibi avantajlar sunan bu yöntem hassas yapıların üretiminde sıklıkla tercih edilmektedir. Gözenekli veya oyuk yapılar için destek yapılarına ihtiyaç duymaz, bu da özellikle SLA yöntemi ile karşılaştırıldığında DLP' nin karmaşık şekillerin basılmasında daha uygun olduğu anlamına gelir. Ayrıca DLP projektör lenslerinin değiştirilebilir olması, küçük ve karmaşık parçaların yüksek kalitede basılabildiğini sağlamaktadır [30].

2.3.6. Çoklu Püskürtme (Polyjet-PJ)

Fotopolimer reçine malzemesi ile 3B nesne üretiminde kullanılan başka bir yöntem ise çoklu püskürtme teknolojisidir. Bu teknoloji, mürekkep püskürtme mantığına dayanır ve renkli parçaların yanı sıra birden fazla malzemeyi aynı anda basabilme yeteneği ile

öne çıkar. Bu özellik, basılan nesnenin farklı bölgelerinin farklı sertliklere veya özelliklere sahip olmasını sağlar. Böylece tek bir parçada bile çeşitli mekanik özelliklere sahip bölgeler elde etmek mümkün olur. Bu teknoloji, pürüzsüz yüzeyli ve ayrıntılı geometrilere sahip parçaların üretimi için uygundur. Aynı zamanda, mürekkep püskürtmeli iki boyutlu yazıcıların baskı sistemi ile stereolitografi baskı teknolojisinin bir sentezi olarak düşünülebilir. Şekil 2.14'te PJ teknolojinin çalışma prensibi gösterilmiştir. Fotopolimer reçine, basım tablasına püskürtüldüğünde UV ışığı kullanılarak kürleştirilir. Ardından, diğer 3B baskı teknolojilerinde olduğu gibi katmanlar halinde biriktirilerek parça oluşturulur. PJ teknolojisi, aynı anda farklı malzemelerin kullanılmasına izin verir, bu da destek yapılarının kolayca temizlenebilir hale getirilmesine yardımcı olmaktadır. Hatta bazı durumlarda su kullanarak bu destek yapılarını çözebilirsiniz. Bu sayede temizlik işlemi zahmetsiz hale gelir ve yüzeylerde herhangi bir iz bırakmaz [31,32].



Şekil 2.14: PJ teknolojinin çalışma prensibi [26]

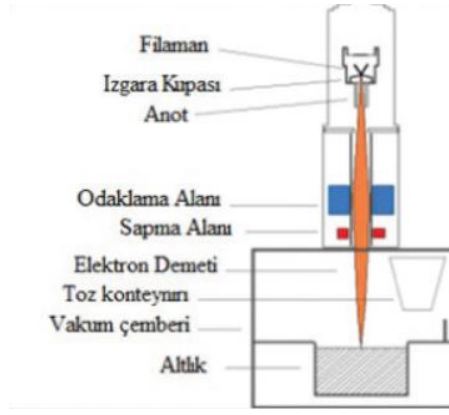


Şekil 2.15: PJ ile üretilmiş parçalar [26]

Şekil 2.15'te gösterildiği üzere PJ yöntemi sayesinde çeşitli malzemeler kullanılarak gerçeğe yakın ürünler üretilmektedir. Kauçuk gibi elastik malzemelerden, yüksek mukavemetli veya yüksek sıcaklığa dayanıklı plastiklere kadar çeşitli malzemeler kullanılarak üretim gerçekleştirilebilir. Bu teknoloji, dental veya medikal gibi birçok farklı uygulama alanında başarıyla kullanılmaktadır. Ayrıca, cihazın kullanımı oldukça basittir, bu nedenle operatörler için özel eğitim gerektirmez. Parça toleransları genellikle 0,1 ile 0,3 mm arasında değişiklik göstererek 500x400x200 mm (x, y, z) boyutlarındaki büyük parçaların üretimine imkan tanır [26].

2.3.7. Elektron ışınli ergitme (EBM)

EBM yöntemi, diğer hızlı prototipleme teknikleri gibi özel yazılımlar kullanılarak üç boyutlu parçaların üretimini gerçekleştirir. Şekil 2.16'da gösterildiği gibi, bir elektron demet tabancasını içermektedir. Bu tabanca vakum çemberinin en üst kısmında bulunur. Sistem, katot, anot ve elektromanyetik odaklama ünitelerini içermektedir. Sistem, bir elektron demetinin filamandan gönderilmesiyle başlamaktadır. Bu demetleri kontrol etmek ve taramak için bir dizi bobin kullanılır. Elektronların katot ve anot arasında hızlandırılmasıyla tozların ergimesi için gerekli enerji üretilir. Elektron tabancası ve toz yatağı, bir vakum sistemi içinde bulunur. Bu sayede son derece temiz ve kontaminasyondan uzak bir ortam sağlanmış olur. Her bir katmanın ergitilmesi, elektron demeti tarafından çok adımlı bir süreç olarak gerçekleştirilir. Elektronlar, manyetik bir alanın etkisi altında, katmanların oluşturulacağı altlığa doğru hızlandırılırlar. İlk olarak, elektron demetinin odaklanabilmesi için altlık görevi görecek olan başlangıç plakası hızlıca taranarak ısınır. Bu süreçte demetin odaklanma hızı 1000 m/s' ye ulaşabilir. İlk katmanın oluşturulması için çelik bir platform kullanılır ve 45-100 µm boyutlarındaki küresel metal tozları, hızlandırılan elektron demeti ile taranarak ergitilir. Bir katman tamamlandığında, belirlenen kalınlıkta ikinci katmanın oluşturulması için yeni tozlar eklenir. Tozların önceki katmanlara düşük ısıl gerilimle birleştirilmesini ve sinterlenmesini sağlamak amacıyla katmanlar arasında ön ısıtma yapılır. Bu döngü, CAD tasarımına bağlı olarak nihai parçanın inşa edilene kadar sürdürülür. Hazne içinde ergimeyen metal tozları, parçalara destek sağlar ve katılma sonrasında kolayca sistemden ayrılarak sonraki parçaların üretiminde yeniden kullanılabilirler [33, 34]. Bu yöntemle üretilen parçalar Şekil 2.17'de verilmiştir [34].



Şekil 2. 16: EBM sistem şematığı [34]



Şekil 2. 17: EBM yöntemi ile üretilen parçalar [34]

Vakum altında elektron demeti ile ergitme yöntemi, lazer sistemlerine göre bazı avantajlara sahiptir. Elektron demeti tabanlı sistemler, daha yüksek güç verimliliği ve üstün malzeme özellikleri sunar. Ayrıca, optik veya hareketli yansıtıcıları içermezler, bu da daha basit bir tasarımı beraberinde getirir. Lazer tabanlı sistemlerde farklı malzemeler için dalga boylarını ayarlamak gerekebilirken, elektron demeti sistemi dar bir ışın kullanarak yüksek enerji seviyelerine ulaşabilir. EBM yöntemi, parçaları hareket ettirmek zorunda kalmadan demeti saptırabilir, bu da hızlı tarama ve üretim hızlarına olanak tanır. Bu nedenle, elektron demeti ile ergitme yöntemi, endüstriyel üretim ve hassas parça imalatı gibi uygulamalarda tercih edilir [33]. EBM yöntemi bazı avantajlara sahiptir. Örneğin, elektron demetinin sınırlı bir ömrü olmadığından, kullanım sürecinde sürekli olarak kullanılabilir. Ayrıca, reaktif metaller gibi özel malzemelerin vakum altında ergitilmesine olanak tanır. Ancak başlangıç yatırım maliyeti yüksektir ve işletme sırasında X-ışını emisyonu ile ilgili güvenlik önlemleri gerekebilir. Ayrıca, vakum gereksinimi ve vakum deposunun ek maliyeti de dikkate alınmalıdır [35].

2.3.8. Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting-SLM)

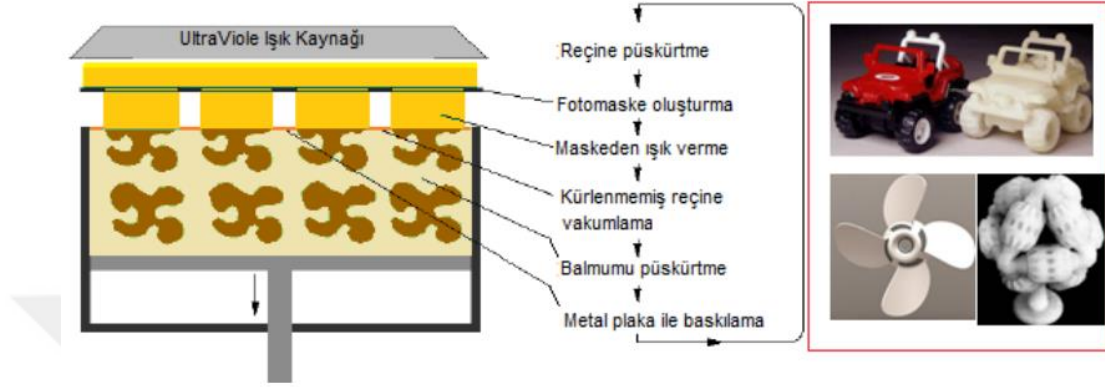
SLM yöntemi, ilk adımda hareketli bir platform üzerine ince bir toz tabakası serilerek başlar. Bu yöntemin temel çalışma prensibi, lazer tarama ile toz tabakasının şekillendirilmesine dayanır. Lazer ışını, seçilen bölgelerdeki tozu eritir. Bu sırada ergimiş toz, nesnenin temelini oluşturur ve soğumaya başladığında katılaşır. Bir katman tamamlandığında, hareketli platform aşağı doğru iner ve yeni bir toz tabakası, toz serici adı verilen bir cihaz yardımıyla serilir. Bu sayede lazer enerjisinin etkisiyle katmanlı bir yapı oluşturulur. İşlem tamamlandığında ve parça üretildiğinde, fazla tozlar temizlenir ve geri dönüşüm için ayrılır. Bu geri dönüşüm yöntemi, artık malzemenin verimli bir şekilde kullanılmasına olanak tanır [36].

SLM yöntemi, özellikle yarı kristal termoplastik tozlar gibi polimer malzemelerde tercih edilirken, metaller için de yaygın olarak kullanılan bir 3B baskı yöntemidir. SLS yöntemi ile kıyaslandığında, SLM daha çok metal malzemelerin işlenmesi için tercih edilmektedir. Toz malzemenin niteliği, boyutu ve morfolojisi, lazer enerjisi girişi, tarama stratejileri ve tarama hızı gibi bir dizi parametrenin optimize edilmesi ile SLM, diğer Elektron Işınlı (Eİ) üretim teknikleri gibi neredeyse sınırsız bir esneklik ve geometri sağlar. Ayrıca, SLM yönteminin çok sayıda farklı malzeme için kullanılabilmesi ve maliyet açısından daha rekabetçi olması gibi avantajları bulunmaktadır. SLM, özellikle ortopedik implantlar ve iskelelerin üretimi için büyük potansiyele sahiptir. Geleneksel olarak, bu tür implantlar ve iskeleler talaşlı imalat, döküm ve dövme gibi geleneksel yöntemlerle üretilir. İmplantların ve iskelelerin güvenli bir şekilde üretilmesini sağlamak için endüstri standartları mevcut olmasına rağmen, 3B baskı teknolojileri, özelleştirilmiş implantların ve iskelelerin üretim dinamiklerini büyük ölçüde değiştirerek, geleneksel yöntemlerle elde edilemeyen yeni şekiller ve içi boş yapılar gibi karmaşık ürünlerin üretimini mümkün kılmaktadır [30, 37].

2.3.9. Katı Zemin Kürleme (Solid Ground Curing- SGC)

SGC tekniğinde süreç, yüzeye ince bir fotopolimer tabakasının püskürtülmesi ile başlamaktadır. Aynı anda cihazın başka bir bölümünde elektrofotografi yöntemi ile cam bir plakaya toner ile maske oluşturulması işlemiyle eşzamanlı olarak gerçekleştirilir. Her kesit için ayrı bir maske hazırlanır ve kullanılan toner bir sonraki maske oluşturma aşamasında tekrar kullanılır. Oluşturulan maske, fotopolimer tabakasının üzerine yerleştirilir ve ardından yukarıdan güçlü bir UV ışık kaynağı ile

aydınlatılır. Bu sırada maske ile örtülmeyen alanlar kürleşir. Fotopolimerin sıvı kısmı, bir vakum başlığı ile emilir ve boşluklara destek malzemesi olarak erimiş mum püskürtülür. Mumun hızlıca sertleşmesi için ise metal bir plaka kullanılarak soğutulur. Bir sonraki işlem için yüzeyin düzeltilmesi amacıyla tüm yüzey, bir freze bıçağı ile düzeltilir. Şekil 2.18’de SGC sisteminin şematığı ve üretilmiş parçalar verilmiştir [38].

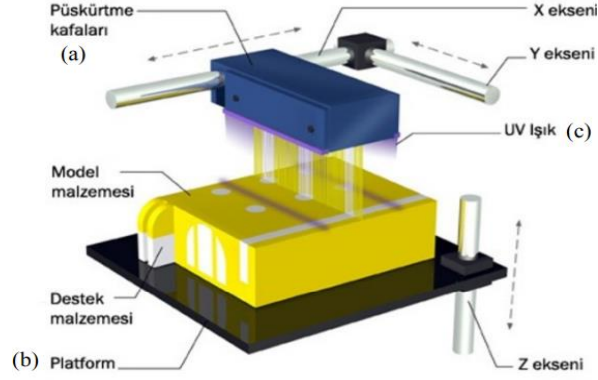


Şekil 2. 18: SGC sistem şematığı ve imal edilmiş parçalar [38]

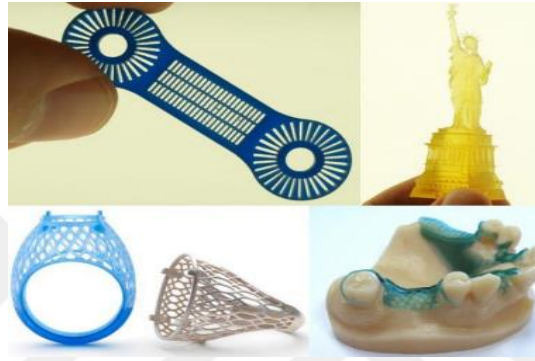
2.3.10. Çok Jetli Modelleme (Multi-Jet Modelling - MJM)

MJM yöntemi, mürekkep püskürtmeli yazıcıları anımsatan bir temel prensipte çalışır. Yüzlerce nozulu bir baskı kafasından malzemenin püskürtülüp UV ışığı ile kürleştirilmesine dayanmaktadır. MJM tekniğinde, oda sıcaklığında sıvı hâlde bulunan fotopolimer reçine, iki eksen üzerinde hareket eden bir enjeksiyon bloğuna iletilir. Bu blok üzerinde, cihaza bağlı olarak farklı sayılarda nozul bulunur. Her bir nozul, malzemenin püskürtülerek boş bir platform üzerinde bir katman oluşturmasını sağlar. Püskürtülen malzeme hemen ardından UV lambalarıyla dondurularak veya soğutma ile katılaştırılır. İlk katman tamamlandığında, platform Z ekseninde aşağıya iner ve bir sonraki katman inşa edilir. Bu işlem, istenen model tamamlanana kadar tekrarlanır. MJM tekniğinin çalışma prensibi Şekil 2.19'da gösterildiği gibidir [2].

Elde edilen modeller, oldukça basit bir şekilde işlenebilir, birleştirilebilir veya kaplanabilir. Bu yöntemle yüksek detaylı parçalar, konsept modeller ve tasarım prototipleri üretmek mümkündür. Ayrıca, bu modeli kullanarak ihtiyaç halinde vakum döküm veya benzeri üretim yöntemleri için kalıplar oluşturulabilmektedir. Bu teknoloji ile sert, elastik, saydam veya yüksek sıcaklığa dayanıklı plastik parçalar üretilmektedir. MJM yöntemi ile üretilmiş parçalar Şekil 2.20’de gösterilmiştir [21].



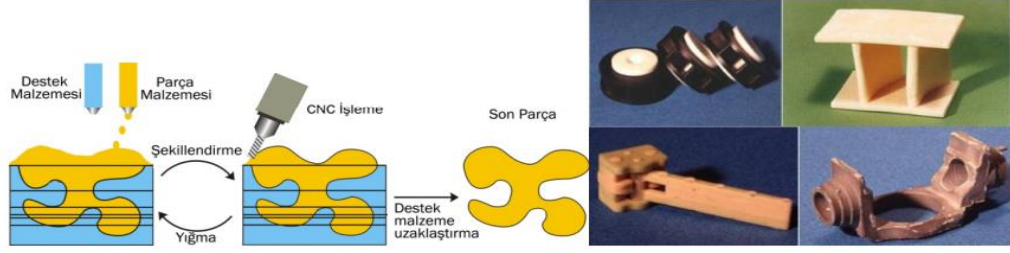
Şekil 2. 19: MJM tekniğinin çalışma prensibi [21]



Şekil 2. 20: MJM ile üretilmiş parçalar [21]

2.3.11. Şekil Biriktirme İmalatı (Shape Deposition Manufacturing-SDM)

SDM, katmanlı imalatın avantajları ile hassas malzeme işleme prosesinin faydalarını birleştiren hızlı bir prototipleme yöntemidir. Bu yöntemin çalışma prensibi ve bu yöntemle üretilen parçalar Şekil 2.21’de görülmektedir. Malzeme, yığma istasyonunda platform destek yüzeyleri arasına yerleştirilir. Bu aşamadan sonra mikrodöküm gibi bir kaynak tabanlı yığma prosesi uygulanır ve son yüzey oldukça net bir görünüme sahiptir. Daha sonra parça şekillendirme istasyonuna taşınır ve genellikle 5 eksenli bir CNC işleme merkezinde son şeklini alması için işlenir. Ardından, parça, yığılmadan ve işleme sırasında oluşan gerilmeleri gidermek üzere bilyalı dövme gibi işlemlere tabi tutulmak üzere gerilme giderme istasyonuna aktarılır. Bu proses, parça tamamlanana kadar tekrarlanır. Geçici destek malzemeleri uzaklaştırıldıktan sonra parça son şeklini alır. Destek malzemeleri eritme veya aşındırma işlemi ile modelden ayrılır. SDM teknolojisi, metal, plastik ve seramik tozlardan doğrudan kullanılabilen fonksiyonel parçalar üretme yeteneği sunar. SDM’de, mikrodöküm yığma prosesi dışında farklı malzemeleri kullanmaya imkan tanıyan çeşitli alternatif prosesler de mevcuttur [21].



Şekil 2. 21: SDM yönteminin çalışma prensibi ve bu yöntemle üretilen parçalar [21]

2.3.12. 3B Biyobaskı

Gelecekte büyük bir etki yaratacağı öngörülen 3B baskı teknolojilerinden biri, 3B biyobaskı olarak adlandırılmaktadır. Bu teknoloji, doku mühendisliği alanındaki araştırmacıların geleneksel 3B baskı teknolojisinin avantajlarından yararlanma isteğiyle ortaya çıkmıştır. 3B biyobaskı, plastik ve metal gibi geleneksel malzemelerle nesneler üreten 3B yazıcı teknolojisinin aksine, canlı hücrelerden oluşan dokuları basma amacıyla geliştirilmiştir. Bu teknoloji, özellikle rejeneratif tıp alanında doku ve organ nakilleri için potansiyel sunmaktadır. 3B biyobaskıda, dokuların basılmasında eklemeli üretim yöntemleri kullanılır. Bu yöntemler arasında termal inkjet, mikroekstrüzyon ve lazer destekli baskı gibi teknolojiler bulunur. Hangi teknolojinin kullanılacağı, kullanılan malzemenin özelliği, hücre canlılığı ve baskı yüzeyinin çözünürlüğü gibi faktörlere bağlı olarak belirlenir. Her bir teknolojinin kendine özgü avantajları ve kısıtlamaları vardır. Örneğin, termal inkjet teknolojisi, kolayca temin edilebilir, düşük maliyetli, yüksek çözünürlüklü ve hızlı baskı yapabilme yeteneği ile öne çıkar. Ancak bu teknoloji, kullanılan malzemenin likit formda olması gerekliliği gibi bazı sınırlamalara sahiptir [31]. Bunun yanı sıra bu teknolojinin düşük basım yoğunluğu gibi kısıtlamaları da bulunmaktadır. Mikroekstrüzyon tabanlı yazıcılar yüksek hücre yoğunluğu ile basabilme yeteneği ile öne çıkarlar. Ayrıca bu teknoloji, destek yapısından bağımsız doku oluşturmak için yaygın bir şekilde kullanılır. Ancak, uygulanan ekstrüzyon basıncına bağlı olarak hücrelerin hayatta kalma oranı, inkjet teknolojisine göre daha düşük olabilir. Bununla birlikte, bu teknolojiye basım hızı ve çözünürlüğünü artırmak için çalışmalar hala devam etmektedir. Lazer destekli baskı ise diğer bir biyobaskı teknolojisidir. Bu teknoloji, geniş bir viskozite aralığında basım yapabilme yeteneğine sahiptir. Ayrıca, diğer teknolojilerde sıkça görülen nozül tıkanması sorunu, lazer destekli baskıda karşımıza çıkmaz. Ancak, bu teknolojiye yüksek çözünürlüğü elde etmek için hızlı katılaşmaya ihtiyaç vardır [2].

2.4. Eklemeli İmalat Teknolojileri Avantaj ve Dezavantajları

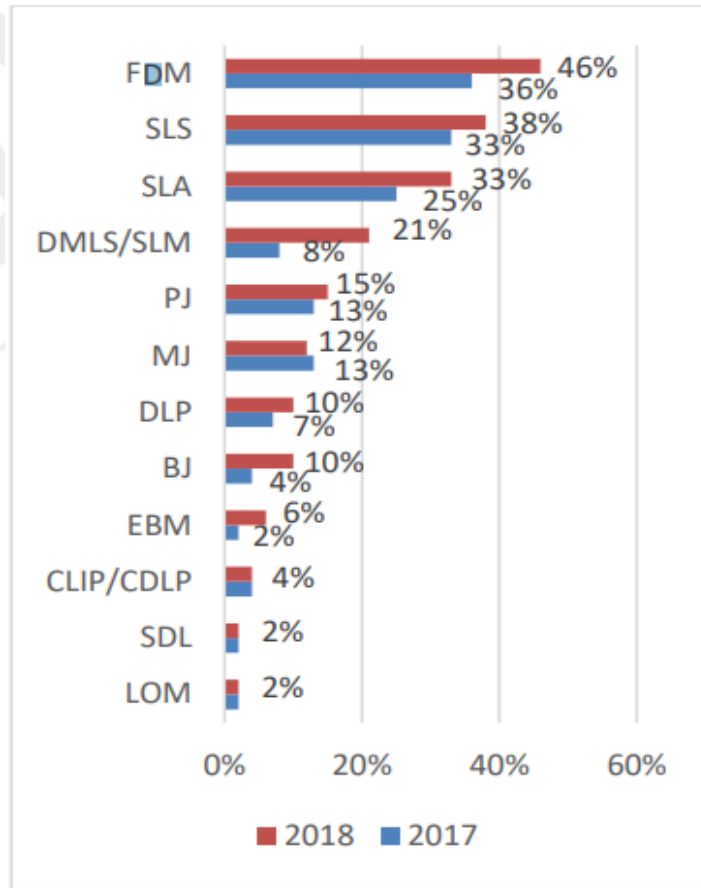
Eklemeli imalat teknolojilerinin konvansiyonel üretim teknolojilerine kıyasla birçok avantajları mevcuttur. Bu avantajlarından bazıları aşağıda verilmiştir.

- İmalat süresini ve maliyeti düşürür
- Ürün iyileştirmesi sürecini hızlandırır
- Özel tasarımlar üretilebilir
- Daha hızlı modelleme imkanı sağlar
- Zor şekilli nesneler üretilebilir
- Tasarım süresini azaltır,
- Tasarım ile üretimin uyumlu olur,
- Ürünün işlevsel olarak optimizasyonuna imkan sağlar,
- Makinaların sayısını azaltır,
- Kısa teslimat süreleri, düşük stok ihtiyacına imkan sağlar,
- Tasarım özgünlüğü sağlar,
- Kalıba gerek duyulmaz,
- Daha az malzeme harcar ve atık miktarı daha az olur,
- Lojistik imkanını kolaylaştırır [39].

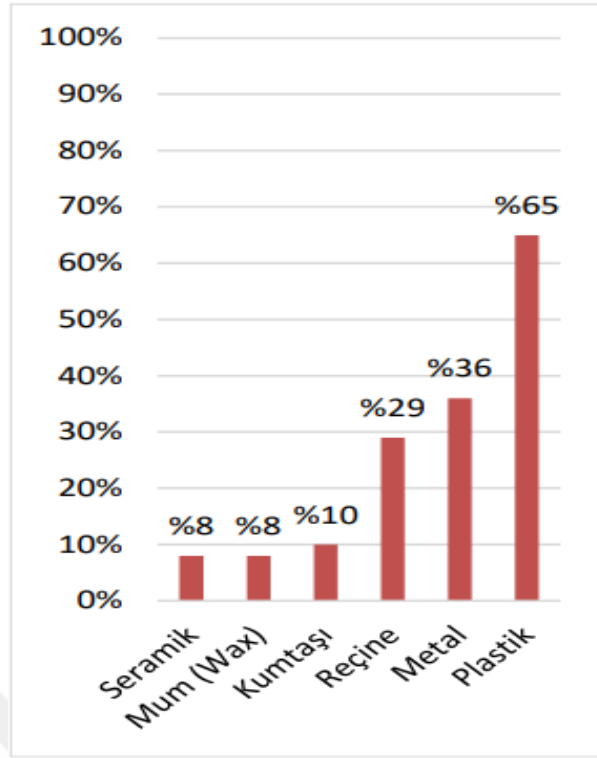
Yukarıda belirtilen avantajlarının haricinde, teknolojinin halen daha gelişmekte olması sebebiyle aşağıda belirtilmiş dezavantajları da mevcuttur;

- Yüksek hacimli imalatlara göre (örneğin plastik enjeksiyon kalıplama) maliyeti yüksektir.
- Teknolojiye uygun malzemeler ile imalat yapıldığından renk, malzeme ve yüzey işleme seçenekleri sınırlıdır.
- Diğer imalat yöntemlerine kıyasla toleransları düşüktür. Üretim sonrası parçaya ek işlem gerekebilir (Örneğin, talaşlı imalat, parlatma ve boya vb.) [40].

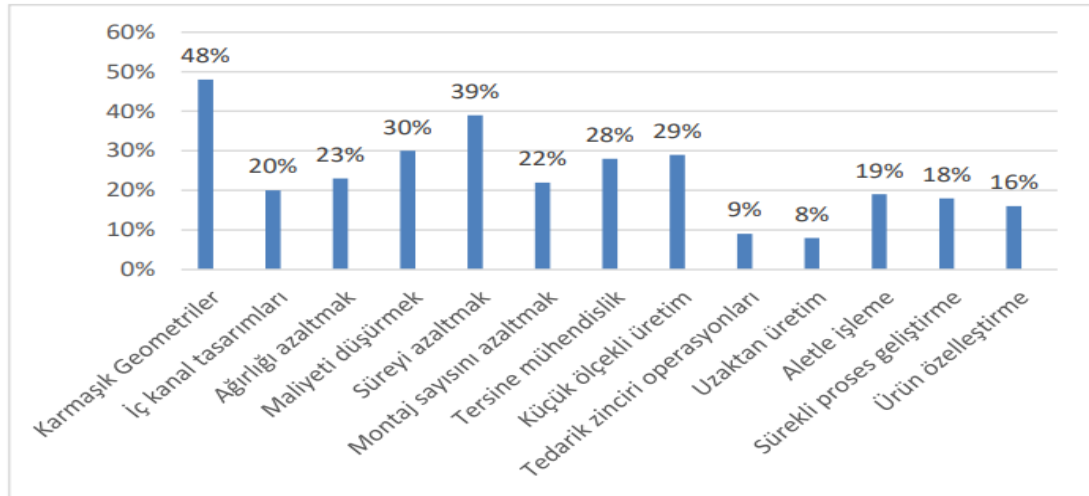
3B baskı yöntemi, endüstriyel seri üretim için genellikle maliyet açısından uygun olmayabilir. Üretilen parçanın boyutu, kullanılan 3B yazıcının fiziksel sınırlarıyla sınırlıdır ve üretim hızı bazı uygulamalarda yeterli düzeyde olmayabilir. Ayrıca, 3B baskıda kullanılabilen malzeme çeşitliliği sınırlıdır, bu nedenle farklı malzemelerin kullanımına imkan tanıyan yeni yöntemler ve teknolojiler geliştirilmektedir. Günümüzde, plastikler, metaller, kompozitler ve hatta organik malzemeler gibi farklı malzemeler, 3B baskı imalatında kullanılabilmektedir. 2018 yılında en çok tercih edilen 3 boyutlu yazıcı teknolojileri ve malzemeler sırasıyla Şekil 2.22 ve Şekil 2.23'te Scupteo'nun (2018) "The State of 3D Printing" raporuna göre düzenlenerek paylaşılmıştır. Şekil 2.24'te ise rapora göre kullanıcıların 3B baskı yöntemini hangi amaçlar için tercih ettiği gösterilmektedir [31].



Şekil 2. 22: 2017-2018 yıllarında en çok kullanılan 3B yazıcı teknolojileri [31]



Şekil 2. 23: 2018 yılında en çok kullanılan 3B baskı malzemeleri [31]



Şekil 2. 24: 3B baskı yönteminin kullanım amaçları [31]

2.5. Üç Boyutlu Biyoyazıcılar

Biyoyazıcılar, geleneksel doku mühendisliği tekniklerinin sınırlarını aşmak için geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntem, 3B kompleks dokuların ve organların üretilmesine olanak sağlar ve bu, baskılama veya 3B fabrikasyon teknolojileri kullanılarak gerçekleştirilir. Ayrıca, biyomalzemeler içindeki hücre yerleşimini kontrollü bir şekilde düzenleme yeteneği sunar. 3B fabrikasyon tekniği, CAD

izimlerinden gelen verileri okuyarak, sanal olarak tasarlanan nesnelerin katman katman inşa edilmesini temel alır [41].

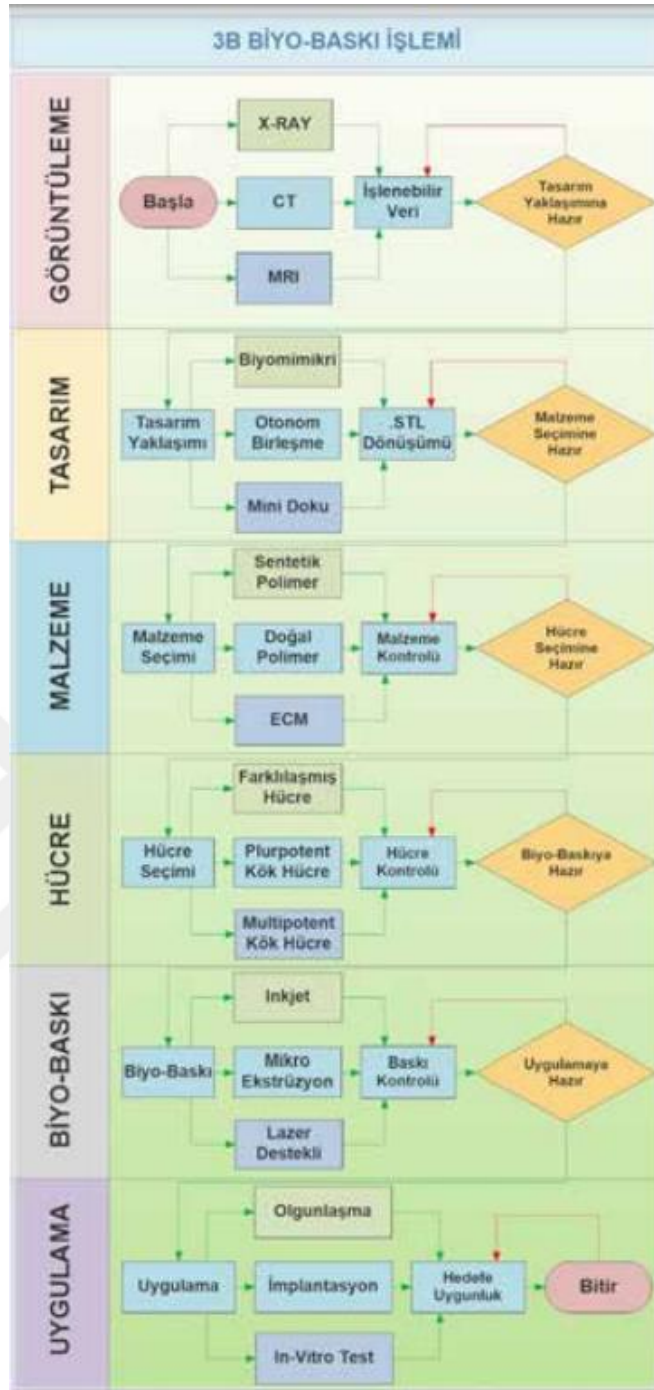
3B biyoyazıcılar, biyolojik olmayan yazıcılarla kıyaslandığında daha fazla teknik karmaşıklık içerir. Malzeme seçimi, hücre tipleri, büyüme ve farklılaşma faktörleri, canlı hücrelerin hassasiyeti ve dokuların karmaşıklığı gibi ek zorlukları ele alır. Bu karmaşıklıkların üstesinden gelmek için mühendislik, biyomalzeme bilimi, hücre biyolojisi, fizik ve tıp alanlarındaki teknolojilerin entegrasyonunu gerektirir. 3B biyoyazıcılar, cilt, kemik, vasküler greftler, trakeal arterler, kalp dokusu ve kıkırdak gibi çeşitli dokuların üretimi ve nakli için kullanılmıştır. Ayrıca kozmetik testlerden rejeneratif tıpa ve işlevsel organ değişimine kadar birçok tıbbi araştırma alanındaki ihtiyaçları karşılamak için büyük potansiyele sahiptir [2].

Biyoyazıcılar, klasik 3 boyutlu yazıcılardan mekanik olarak büyük lde ayrılmazlar. Eksen hareketleri ve birçok yazılım ayarı, her iki sistemin de benzer yönlerini korur. Bununla birlikte, klasik 3 boyutlu yazıcılar ile biyoyazıcılar arasındaki temel fark, ekstruder kısmında ortaya çıkar. Klasik 3 boyutlu yazıcılarda, filamentin eritilip itilmesini sağlayan bir sistem bulunur. Bu sistem, işlevini tam olarak yerine getirmezse, baskı işlemi ya tamamen başarısız olur ya da baskı kalitesi istenilen düzeyde olmaz. Öte yandan, 3 boyutlu biyoyazıcılar, baskı malzemesi olarak sıvı biyo mrekkeplerini kullanır. Bu malzemelerin eritilmesi veya yüksek sıcaklıklara maruz kalması gerekmez. Bunun yerine püskürtme ve itme gibi yöntemlerle çalışırlar. Bu, klasik 3 boyutlu yazıcılar ile 3 boyutlu biyoyazıcılar arasındaki belirgin farklılardan biridir [3].

Biyo-baskı, canlı hücrelerin hassas bir şekilde konumlandırılmasıyla karmaşık biyolojik yapıların (rneğin doku ve organlar) katman katman üretildiği özel bir 3B baskı yöntemidir. Biyolojik yapıların oluşturulmasında birkaç yaklaşım mevcuttur, bunlar arasında biyomimikri, otonom birleşme ve mini doku yapı blokları gibi yöntemler bulunmaktadır. “Biyomimikri yaklaşımı”, gerçek biyolojik yapıların doğasını ve işlevselliğini inceleyerek, bu yapılarla aynı özelliklere sahip yapılara odaklanır. Bu sayede hücrelerin işlem sırasında canlılığını koruyabilmesi amaçlanır. Otonom birleşme (kendiliğinden düzenlenme) yaklaşımı ise hücrelerin birbirleriyle olan etkileşimlerini inceleyerek, gerçek biyolojik yapıların yapısal özelliklerini, hücre yerleşimini ve doku işlevselliğini taklit etmeyi amaçlar. Mini doku kavramı,

yukarıdaki stratejileri birleştirerek, küçük işlevsel yapı bloklarının bir araya getirilmesiyle elde edilen doku veya organları ifade eder. Şekil 2.25'te akış diyagramı verilen 3B biyo yazdırma işlemi görüntüleme, tasarım, malzeme, hücre, biyo-baskı ve uygulama olmak üzere altı ana başlıktan oluşmaktadır.

Görüntüleme adımı, biyolojik yapıların karmaşık mimari bilgilerini elde etmek için tıbbi görüntüleme ekipmanlarının kullanılmasını içerir. Bu adımda elde edilen veriler, bilgisayar destekli tasarım ve matematiksel modelleme için kullanılacak 3B dijital çizimlere dönüştürülür. Tasarım aşamasında, hedef dokunun yapısına uygun tasarım stratejileri belirlenir ve 3B dijital çizimler, biyo-baskı işlemi için uygun kalınlıklarda iki boyutlu katmanlara bölünür. Malzeme ve Hücre adımlarında, hedef dokunun şekli ve işlevi için uygun malzeme ve hücre kaynakları seçilir. Bu aşamada genellikle sentetik ve doğal polimerler ile hücre dışı ortam kullanılır. Hücre kaynağı olarak ise allojenik veya otolog seçenekler bulunabilir. Bu bileşenler, mürekkep püskürtme, mikroekstrüzyon veya lazer destekli biyo yazıcıları içeren teknolojilere entegre edilir. Biyo-baskı adımı, seçilen malzeme ve hücre kaynakları, özgün tasarıma uygun olarak inkjet, mikroekstrüzyon ve lazer destekli yazdırma teknolojileri kullanılarak canlı yapıların üretilmesi sağlanır. Uygulama aşamasında, bazı dokuların transplantasyon öncesinde biyoreaktörde olgunlaşma sürecine ihtiyaç duyabilir. Olgunlaşma tamamlandığında, dokular hedef dokuya uygunluğunu değerlendirmek için analiz edilir [14].



Şekil 2. 25: 3B biyobaskı işlemi [14]

2.5.1. Biyofonksiyonel Mürekkep

3B biyo-baskının temel bileşenlerinden biri biyofonksiyonel mürekkeplerdir. Bu özel mürekkepler, 3B biyo-baskı süreçlerinde kullanılan biyolojik olarak basılabilir materyalleri ifade ederler. Biyofonksiyonel mürekkepler, iki ana kategoride incelenebilir: iskele tabanlı ve iskelesiz mürekkepler. İskele tabanlı biyofonksiyonel mürekkepler, hücrelerin hidrojellere, mikro taşıyıcılara veya hücresizleştirilmiş

matriks bileşenlerine yüklenerek istenilen 3B dokunun basılmasını mümkün kılarlar. Bu yöntemde, iskele biyomateryali, dokuların özel bir şekilde gelişebilmesi için uygun bir ortam sağlar. İçine yerleştirilen canlı hücreler, istenilen dokunun formunu alırken biyomalzeme zaman içinde çözünerek hücrelere yer açar. Bu sayede hücreler, doku oluşturmayı sürdürürler. İskelesiz biyofonksiyonel mürekkeplerde ise canlı hücreler, embriyonik gelişimi taklit edebilecek şekilde doğrudan basılırlar. Bu biyo-baskı sürecinde hücreler, önce neo-dokulara dönüştürülürler. Elde edilen yeni dokular daha sonra belirli kalıplarda ve modellerde daha büyük ölçekli işlevsel dokular üretmek için olgunlaştırılırlar. Doku sferoidleri, hücre toplulukları ve doku şeritleri gibi yapılar, büyük ölçekli üretim için bu yaklaşımda temel yapı taşları olarak kullanılırlar [42].

2.5.2. Biyomalzeme

Biyomalzeme, vücuda yerleştirilen tıbbi cihazların veya organların yerini alabilen, doğal veya sentetik bir madde olarak tanımlanır. Bu tür malzemeler, metaller, seramikler, polimerler ve hatta doğal dokular gibi çeşitli kaynaklardan elde edilebilirler. Biyomalzemeler, ortopedik implantlardan diş implantlarına, kalp kapaklarından kontakt lenslere, koroner stentlere ve kemik plakalarına kadar farklı tıbbi cihazların parçalarını, kaplamalarını, köpüklerini ve kumaşlarını oluşturmak için kullanılabilirler. Bu çeşitlilik, tıp alanındaki yenilikçi yaklaşımları destekler ve hastaların daha iyi tedavi edilmesine katkı sağlar [43].

Ti alaşımları, diğer metalik biyomalzeme alaşımlarına kıyasla daha düşük mutajenik özelliklere sahip olmalarıyla dikkat çeker. Bu, biyolojik uyumları ve gelişmiş korozyon dirençleri ile bir araya gelerek, çeşitli tıbbi uygulama alanlarında tercih edilmelerini sağlar. Özellikle diş implantları, omurga cerrahisi vidaları, kırık tespit plakaları gibi alanlarda yaygın bir şekilde kullanılırlar. Bu, hastaların tedavilerinin daha güvenli ve etkili bir şekilde yürütülmesine yardımcı olur.

Seramik biyomalzemeler, eklemeli imalat (Eİ) için görece yeni bir alandır. Tıbbi uygulamalarda, kalsiyum fosfatlar, biyoglass, hyaluronik asit (HA), silikatlar, karbürler, sülfidler, refrakter hidritler ve seramik kompozitler gibi farklı biyoseramikler yaygın olarak kullanılır. Bu biyomalzemeler, sağlık sektöründe tedavi ve implant uygulamalarında önemli bir rol oynarlar [44].

Biyopolimerler, doğal ve sentetik biyopolimerler olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir. Doğal biyopolimerler, doğada kendiliğinden bulunan biyopolimerlerdir ve

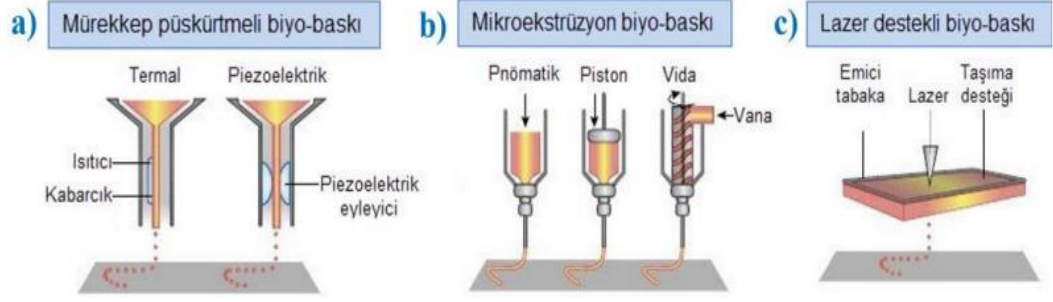
genellikle kolajen ve jelatin gibi maddeler içerir. Bu biyopolimerler, biyolojik olarak parçalanabilen ve maliyet açısından uygun olan polimerlerdir. Kolajen, doku mühendisliği iskele malzemesi olarak kullanılırken, jelatin, kontrollü ilaç salımı için yaygın olarak kullanılır. Öte yandan, Fanguero ve ekibi, kan damarlarının hasarlı bölgelerinde kan akışını yeniden sağlayabilen özellikle vasküler cerrahide kullanışlı olan PLA (polilaktik asit) ve PET (polietilen tereftalat) biyobozunur ipliklerle örülmüş vasküler protezlerin üretimini içeren bir teknoloji geliştirmişlerdir. Bu iki biyolojik uyumlu iplik, insan vücudu tarafından emilebilen PLA ile mekanik destek sağlayan PET'i bir araya getirerek yapıların oluşturulmasında kullanılmıştır. Ayrıca, Fanguero ve ekibi PLA ve PGA (poliglikolik asit) gibi materyallerden üretilen dikişlerin geliştirilmesinde de geniş bir deneyime sahiptir [44, 45].

Biyomalzeme olarak kullanılan matris malzemelerinin çoğu, ekstrasellüler matrisin (ECM) karmaşıklığını tam olarak yansıtamamaktadır. Bu, hücresel morfoloji ve doku fonksiyonlarını tam anlamıyla yeniden oluşturamayacakları anlamına gelmektedir. Biyoyazıcılar için ideal malzeme seçimine dair dikkate alınması gereken birçok önemli faktör bulunmaktadır;

- 1- Yazdırılabilirlik:** Malzeme, işleme ve depolama süreçlerinde gerekli viskoziteye, jelleşme yöntemine ve uygun reolojik özelliklere sahip olmalıdır.
- 2- Biyouyumluluk:** Malzeme, hücre yaşamını desteklemeli ve vücuda zarar vermeden kullanılabilen bir yapıda olmalıdır. Ayrıca, bu yapı, kontrol edilebilir biyolojik ve fonksiyonel özelliklere sahip olmalıdır.
- 3- Bozunma kinetiği ve yan ürünler:** Bozunma oranı, dokunun kendi ECM'sinin doğal oluşum hızına uygun olmalıdır ve bozunma sonucunda meydana gelen yan ürünler vücuda herhangi bir zarar vermemelidir.
- 4- Yapısal ve mekanik özellikler:** İstenen dokuda sahip olması gereken mekanik özelliklere benzer olmalıdır.
- 5- Malzeme biyobenzetimi:** Doku spesifik malzeme kullanımı olmalıdır [42].

2.5.3. Biyo Yazdırma Teknolojileri

Biyo yazdırma teknolojileri; mürekkep püskürtmeli(inkjet), mikroekstrüzyon ve lazer destekli yazdırma olarak sınıflandırılabilir. Şekil 2.26'da sırasıyla bu teknolojilerin çalışma prensipleri gösterilmiştir [2].



Şekil 2. 26: 3B biyo yazdırma teknolojileri çalışma prensipleri [2]

Mürekkep püskürtme tabanlı biyobaskı yöntemi, canlı hücreleri önceden belirlenmiş konumlara hassas damlacıklar halinde yerleştirmek amacıyla kartuşlar kullanarak çalışır. Doku ve organların dijital verilerini temel alarak, bilgisayar tarafından yönlendirilen hücreler ve biyomalzemelerden oluşan "biyomürekkep" ile alt bir tabaka üzerinde üretim yapar. Termal mürekkep püskürtmeli yazıcılar, baskı kafasını elektriksel olarak ısıtarak damlacıkları nozzleden çıkarmak için basınç darbeleri üretir. Bu işlem, biyolojik materyallere zarar vermediğini gösteren çalışmalarla desteklenmektedir. Ancak termal mürekkep püskürtmeli yazıcıların, ısı ve mekanik stres riski, düşük damlacık yönlendirme hassasiyeti, düzensiz damla boyutları, sık sık tıkanan nozzleler ve güvenilir olmayan hücre kaplama yetenekleri gibi 3B biyobaskı için önemli sınırlamaları vardır. Birçok mürekkep püskürtmeli yazıcı, sıvının düzenli aralıklarla damlacıklar halinde ayrılmasını sağlamak için baskı kafasında akustik bir dalga oluşturan piezoelektrik kristali içerir. Piezoelektrik malzemeye voltaj uygulanması, malzemenin titreşimini artırır ve bu sayede nozzlelerden damlacıkların çıkmasını sağlayacak basıncı üretir. Bununla birlikte, piezoelektrik mürekkep püskürtmeli yazıcılar tarafından kullanılan 15-25 KHz frekansta titreşimler, hücre zarlarına zarar verme potansiyeline sahip olduğundan dikkatle ele alınmalıdır. Bununla birlikte, mürekkep püskürtme tabanlı biyoyazıcılar düşük maliyet, yüksek çözünürlük, hızlı üretim ve birçok biyolojik materyal ile uyumlu olma avantajları sunmaktadır [46].

Mikroekstrüzyon biyoyazıcı sistemleri genellikle şu bileşenlerden oluşur: sıcaklık kontrollü malzeme işleme ünitesi, x, y, z eksen hareketlerini kontrol eden bir panel ve dağıtım sistemi için video kamerası. Gelişmiş biyoyazıcılarda ise biriktirme alanını aydınlatmak veya foto-başlatıcı ajanları etkinleştirmek için fiber optik aydınlatma veya UV kaynağı ile piezoelektrik nemlendirici gibi bileşenler eklenmiş olabilir. Bazı sistemlerde birden fazla yazma başlığı da bulunmaktadır. Endüstriyel biyoyazıcılar yüksek maliyetleri nedeniyle pahalıdır, ancak yüksek çözünürlük, hız ve kontrol

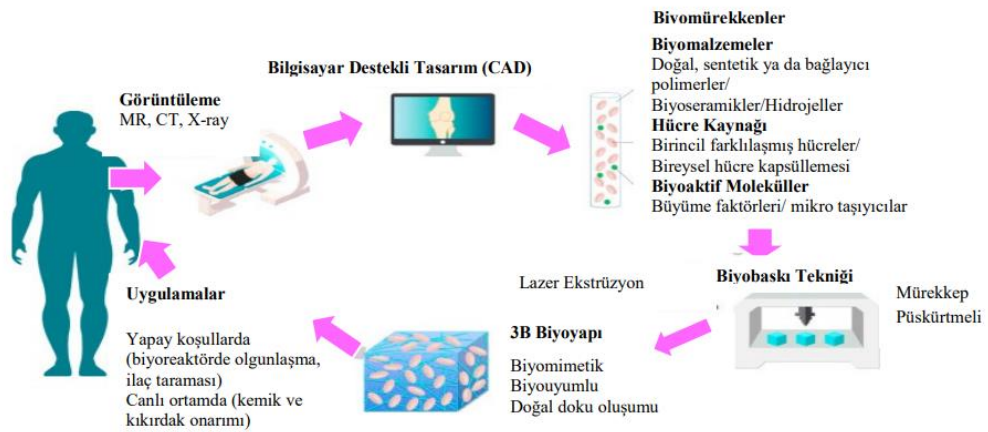
yeteneği sunarlar. Mikroekstrüzyon biyoyazıcılar, malzemenin substrat üzerine robotik olarak ekstrüde edilmesini sağlayan mikroekstrüzyon başlığı kullanılarak çalışırlar. Şırınga ucundaki piston dış etki ile itilerek hücre-polimer karışımı sürekli bir akış halinde yazdırılır. Bu yaklaşımda sıvı damlaların biriktirilmesi yerine malzeme sürekli bir akışla uygulanır. Bilgisayar destekli tasarım ve üretim yazılımı ile malzeme boyutları kolayca ayarlanabilir. Bu biyo uyumlu kopolimerler, hidrojeller, hücre küreleri gibi bir dizi bileşenin mikroekstrüzyon biyoyazıcılar aracılığıyla yazılmasını sağlar. Mikroekstrüzyon sistemlerinin ana avantajı, yüksek hücre yoğunluğunda kullanılabilmesidir. Bununla birlikte, bu sistemlerde elde edilen yapıların hücre yaşamı, ink-jet biyoyazıcılara kıyasla daha düşüktür ve %40 ile %86 arasında değişebilir. Hücre yaşam oranı, ekstrüzyon işlemi arttıkça azalırken, şırınga çapı arttıkça artar. Hücre yaşamını artırmak için daha büyük enjektör çaplarının kullanılması gerekebilir, ancak bu durumda hücreler yüksek kayma gerilimi nedeniyle daha fazla zorlanabilir ve kayba neden olabilir [42].

Lazer destekli baskı, canlı hücre kalıplarını hızlı ve son derece hassas bir şekilde petri kabı veya benzeri yüzeylere oluşturabilme kabiliyetine sahiptir. Bu yöntem, çözelti içinde süspansiyon halinde bulunan hücreleri, lazer enerjisinin odaklandığı, genellikle altın veya titanyum gibi yüzeylere aktarır. Lazerin odaklandığı noktada oluşan enerji, hücreleri toplayıcı bir substrata doğru iten şok dalgalarını üretir. Biyolojik malzemenin viskozitesi, lazer baskı hızı, lazer enerjisi ve sinyal frekansı gibi parametrelerin optimize edilmesi, mikro ölçekli hücre düzenlemesi konusunda büyük bir başarı sağlar. Lazer baskı teknolojisi, farklı tipteki hücreleri başarılı bir şekilde konumlandırma yeteneğine sahiptir. Ayrıca hidrojel fotopolimerizasyonu, iskele üretiminde de kullanılabilir. Substrat üzerinde yüksek çözünürlüklü bir şekilde düzenlenen hücreler, katmanlar oluşturarak 3B yapılar inşa edebilirler [46].

2.6. Tıbbi Alanda 3B Tarama ve Modelleme

3B baskı teknolojisinin sağlık sektöründe çeşitli kullanım alanları bulunmaktadır. Tıbbi bir modelin 3B olarak oluşturulması, genellikle birkaç temel aşamayı içerir. Bu süreç, görüntüleme, tasarım, malzeme seçimi, hücre seçimi ve biyoyazıcıda işleme gibi ana adımlardan oluşmaktadır. Şekil 2.27’de 3B biyobaskı süreci şematik olarak gösterilmektedir.

Tıbbi teşhis ve tarama alanında, özellikle bilgisayarlı tomografi (CT) ve manyetik rezonans görüntüleme (MRI) gibi görüntüleme teknolojileri, birçok hastalığın teşhis edilmesi ve tedavi süreçlerinin değerlendirilmesi için büyük bir öneme sahiptir. Klinik pratiklerde, uzmanlar genellikle tıbbi görüntülemeyi temel bir referans noktası olarak kullanmaktadır. Tıbbi görüntüleme cihazlarında meydana gelen teknolojik ilerlemeler, nesneleri veya organları daha ayrıntılı bir şekilde incelemeye, sınıflandırmaya ve tanılamaya yardımcı olmaktadır. Aynı zamanda tıbbi modellerin kullanımı da hızla artmaktadır. Eklemeli imalat, bu modelleri tıbbi görüntülerin temel verilerini kullanarak oluşturmak için kullanılmaktadır. Bu modeller daha sonra ameliyat öncesi planlama, eğitim ve cerrahi simülasyonlar gibi bir dizi alanda etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Örnek olarak, CT tarama verileri tümörlerin hacmi, şekli, konumu ve karaciğer hacmi gibi önemli bilgilere ulaşmak için kullanılmaktadır. Bu bilgiler, doktorlara hepatoselüler karsinom (karaciğer kanseri) değerlendirmesi ve tedavi planlaması yaparken büyük yardımcı olmaktadır. Ayrıca, CT ve MRI görüntülerindeki organların şekil ve doku yapısındaki anormallikler, hastalıkların teşhisi ve ilerlemesini izlemek için önemli göstergeler olarak hizmet etmektedir. Örneğin, Alzheimer hastalığı gibi nörolojik hastalıkların teşhisi için kullanılan 3B MR görüntüleri, hastanın beyin dokusundaki değişiklikleri ayrıntılı bir şekilde gözlemlemeye yardımcı olmaktadır [44].



Şekil 2. 27: 3B biyobaskı prensibi [44]

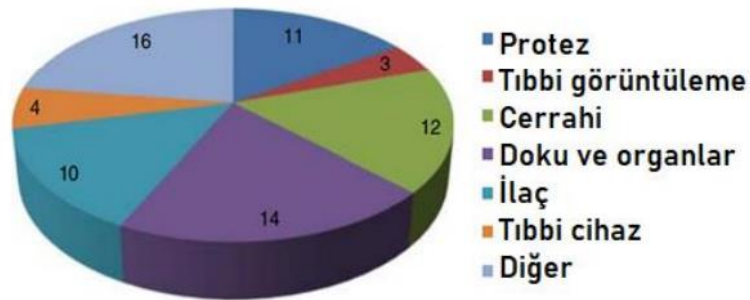
CT veya MRI taramalarından (genellikle Ducom formatında) elde edilen veriler, Mimics veya diğer 3B bilgisayar yazılımları kullanılarak 3B modellere dönüştürülmektedir. Sanal model tamamlandığında, bu veriler hızlı prototipleme için kullanılan standart üçgen (STL) formatına dönüştürülür ve bir eklemeli imalat

sistemine aktarılır. Şu ana kadar, Eİ kullanılarak bir dizi tıbbi uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalar arasında yumuşak dokuların iskeleti, insan osteosarkomu (kemik hücrelerinde oluşan bir tür tümör), kan damarları, kıkırdak dokusu, kalça eklemi, diz eklemi, kemik dokusu, yumuşak dokular ve benzerleri bulunmaktadır [47].

2.7. 3B Baskı Teknolojisinin Biyomedikal Alandaki Uygulamaları

Prototip hazırlama amacıyla geliştirilen eklemeli imalat teknolojisi, imalat sektöründe olduğu gibi tıbbi sektöre de entegre edilmiştir. Bu teknoloji, karmaşık şekilli parçaların üretimini kolaylaştırma, özelleştirilmiş tasarım seçenekleri sunma ve sağlık maliyetlerini azaltma potansiyeli taşır. Günümüzde, eklemeli imalat teknolojisi, protezler, implantlar, tıbbi cihazlar ve teşhis ekipmanlarının üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. Malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi, daha yüksek parça kalitesi, hassas boyut kontrolü ve maliyet etkinliği gibi faktörler, bu teknolojinin tıbbi alanlarda karmaşık parçaların üretimini hızlandırmış ve yaygınlaştırmıştır.

Eklemeli imalat teknolojisi, geleneksel üretim yöntemleriyle karşılaştırıldığında implant üretim süresini önemli ölçüde kısaltabilir. Ayrıca bu teknoloji, implantların kişinin anatomisine özgü olarak özel olarak üretilebileceği anlamına gelir, bu da genelde seri üretilen implantlarda görülen yaygın hataları ve buna bağlı olarak ortaya çıkan başarısızlık riskini azaltır. Bunun yanı sıra, 3B baskı teknolojileri biyomimetik yapıya sahip nesnelerin oluşturulmasını kolaylaştırır. Özellikle ortopedik ve diş implantları alanlarında karmaşık geometriler ve yapılar elde etmek, pürüzlü yüzeyler oluşturarak daha etkili kemik entegrasyonu sağlamak ve implantları her hastanın bireysel ihtiyaçlarına uygun olarak kişiselleştirmek için 3B baskıdan yararlanılabilir. 3B baskı ile sağlık sektörünün farklı alanlarında yapılan uygulamalar Şekil 2.28’de gösterilmiştir [48].



Şekil 2. 28: 3D baskı ile sağlık sektörünün farklı alanlarında yapılan uygulamalar [48]

Bu teknoloji ile yürütülen çalışmalar, genellikle ürün geliştirme projelerini kapsamakta olup, tıbbi alanda doku ve organ baskısı gibi önemli çalışmaları içermektedir. Bu 3B yazıcılar, kişiye özel cerrahi ve tıbbi cihazların yanı sıra uzuv protezleri (örneğin yüz, kol, bacak protezleri) ve işitme cihazları üretimine olanak tanır. Ayrıca, ağız ve diş sağlığı alanında dental ve implant uygulamaları ile diş düzelticileri gibi diş hekimliği uygulamalarında sıkça kullanılırlar. Bunun yanı sıra, cerrahi aletlerin üretimi, yumuşak dokuların ve hücrelerin baskısı, biyomedikal iskelet sistemleri, kadavra kullanımı ve ortopedik ayak gibi ürünlerin üretimi de 3B yazıcıların sağlık sektöründeki yaygın uygulamalarından bazılarıdır. Sağlık alanında hem yerel hem de küresel düzeyde yaygın olarak kullanılan diğer uygulamalar şunları içerir: anatomik modellerin oluşturulması, cerrahi planlama ve radyolojik görüntüleme, ortez-protez-implant üretimi, farmasötik uygulamalar, cerrahi aletlerin üretimi ve tıp eğitimi için simülasyonlar. Bu uygulamaların tıbbi alanındaki önemi giderek artmaktadır [8].

2.7.1. Doku ve Organ Üretimi

Doku mühendisliği temel olarak, canlı hücreleri biyouyumlu malzemelerle bir araya getirerek implantlar üretmeyi ve bu implantlar içinde doku yenilenmesini veya tamamen büyümesini desteklemeyi hedefler. 3B baskı teknolojisi, gözenekli implantların ve canlı hücrelerin bir araya geldiği karmaşık 3B organoidlerin üretimine olanak tanıdığı için doku mühendisliği uygulamalarına büyük bir katkı sağlar. Doku mühendisliği, canlı organizmaların içinde ve dışında geniş bir uygulama yelpazesi sunar [49].

Karaciğer, kalp, böbrek ve damar sistemi gibi canlı organlar, 3B biyobaskı teknolojisi kullanılarak üretilmekte ve ayrıca deri, kemik, kıkırdak, sinir ve benzeri doğal dokular da 3B baskı yöntemleriyle başarılı bir şekilde üretilmektedir [50]. Doku ve organ baskı süreci, biyoaktivite, biyolojik olarak parçalanabilirlik, şekil, boyut, gözeneklilik gibi farklı ihtiyaçları karşılayabilen çeşitli biyomalzemelerle başlamaktadır. Bu biyomalzemeler, hücre yapışma kabiliyetini artırmak için fiziksel değişiklikler, kimyasal modifikasyonlar ve daha etkili yüzey kaplamaları gibi üç strateji kullanmaktadır. Bu teknoloji ayrıca kalp dokularının değiştirilmesi ve hücrelerin yeniden üretilmesi amacıyla da kullanılmaktadır.

2010 yılında yapılan bir çalışmada, aljinat ve kondrosit kullanarak çeşitli geometrilere sahip 3B implantlar oluşturularak yüksek hücre canlılığına sahip yapı iskeletleri

üretilmiştir [51]. Das ve arkadaşlarının yaptığı başka bir çalışmada (2015), çok kafalı bir 3B yazıcı kullanarak termoplastik biyomalzemeleri dağıtarak çift hücre yüklü osteokondral dokular üretti [52]. Mannoer ve meslektaşları ise işlevsel elektronik bileşenleri içeren 3B yazdırılmış biyonik kulaklar geliştirerek tasarladıkları kulakları daha işlevsel hale getirdi. [53].

Türkiye'de, Sabancı Üniversitesi tarafından yürütülen "Üç Boyutlu Doku ve Organ Basımı Projesi" gibi çalışmalar, bu alandaki önemli girişimlerden birini temsil etmektedir. Bu projenin kapsamında, üç boyutlu yazıcılar kullanılarak canlı hücrelerin entegre edildiği aort damarı dokusu örneği başarıyla üretilmiştir. Bu tür doku ve organ üretimi çalışmaları Türkiye'de hala aktif bir şekilde devam etmektedir [54].

Son yıllarda organ nakli ihtiyacı arttıkça, Akpek (2017) tarafından yürütülen bir çalışmada triküspit kalp kapakçığı üretimi, 3B yazıcılarla gerçekleştirilmiştir. Bu araştırma, organların biyouyumlu yazıcılar kullanılarak üretimine yönelik bir teşvik olarak kabul edilebilir [55]. Çelebi, Tosun ve Önçağ (2017) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada ise hasarlı bir kafatasının onarılması amacıyla 3B yazıcı kullanılarak bir kafatası üretimi ve uygun bir implant tasarımı geliştirilmiştir. Bu çalışma, hastanın bilgisayarlı tomografi görüntülerini kullanarak hasarlı kafatasının 3B yazıcı ile yeniden oluşturulmasını ve hasarlı bölgeye uygun bir implantın tasarımını ve üretimini içermektedir. Bu çalışma, bilgisayarlı tomografi verileri kullanılarak 3B çıktıların üretilmesini sağlamıştır. Bu da implant tasarımı öncesi gereksiz cerrahi müdahale ihtimalini azaltabilir ve hastaların iyileşme sürecini iyileştirebilir [56].

Dai ve ekibinin (2016) çalışması, glioma tanılı beyin tümörü vakalarında 3B baskı teknolojisinin potansiyelini incelemiştir. Glioma, tedavisi zor olan bir tümör türüdür çünkü yüksek malignite, yüksek nüks oranı ve antikanser ilaçlara karşı direnç gösterir. Bu çalışmanın amacı, gliomanezin ve ilaç direncinin araştırılması için alternatif bir yöntem olarak 3B baskı teknolojisini kullanarak in vitro tümör modeli oluşturmaktır. Modifiye edilmiş 3B teknolojisi kullanılarak, ekstraselüler matrikse benzeyen bir yapıda glioma kök hücre modeli üretildi. Bu model, glioma kök hücrelerinin kemoterapi ilaçlarına karşı direncini değerlendirmek ve gliomanez ile glioma kök hücre biyolojisi hakkında daha fazla bilgi sağlamak için kullanıldı [57].

3D baskının tıbbi avantajlarına ve doku mühendisliğinin ilerlemelerine rağmen, organ üretimi gerçekleştirmek için bazı sorunların üstesinden gelinmesi gerekmektedir.

Organlar, 3D yazıcılarla taklit edilse bile orijinal işlevlerini yerine getirmek oldukça zorlu bir süreçtir. En büyük zorluk, vasküler yapıların entegrasyonunu içeren birçok doku mühendisliği teknolojisinin karşılaştığı bir sorundur. Dolaşım sistemine sahip olmayan 3D basılmış kalın dokular veya organlar, yeterli beslenme alamamak, atıkların atılması ve gaz değişimi gibi temel ihtiyaçlarını karşılamakta zorlanabilir. Bu da hücre canlılığı sorunlarına ve 3D yazıcı ile üretilen organların işlevsiz olmasına neden olabilir. Ancak, hastaya özgü hücre kaynaklarını kullanma potansiyeli ve organ reddini en aza indirmeye yeteneği gibi büyük avantajları vardır. Bazı kısıtlılıklar ve sorunlar çözüldüğünde, tıbbi alanda devrim niteliğinde yenilikler getirebilir ve birçok hayatı kurtarabilir. Bu nedenle, birçok araştırmacı, 3D yazıcılar ile organ üretimi konusunda çalışmalarını sürdürmektedir [58].

2.7.2. Ortez-İmplant Üretimi

Tıp alanında, ortopedi atelleri geleneksel üretim sürecine bağlıdır ve bu süreç, üretici kişinin becerilerine dayanır. Geleneksel üretim yöntemleri, uzun üretim süreleri ve hastaların bu atelleri kullanımında uyum sorunlarına neden olabilir. Ortopedik alçılar ve implantlar, geleneksel yöntemler olan dövme, talaşlı üretim ve döküm gibi tekniklerle üretilirken, çağdaş bir yaklaşım olan eklemeli imalat teknolojileri, tasarımda kişiselleştirme olanağı sunarak endüstri normlarını değiştirme potansiyeline sahiptir [30].

Son yıllarda, 3B yazıcılar ve 3B tarayıcılar gibi yeni nesil teknolojilerin kullanımıyla hastaların biyomekanik gereksinimlerini etkili bir şekilde karşılayabilen ortezlerin üretilmesi üzerine bir dizi çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, seçmeli lazer sinterleme, eriyik tabaka modelleme ve stereolitografi gibi çeşitli 3B baskı teknolojilerini kullanarak ortez üretimi için yöntemler geliştirmiştir. Bu çabalar sonucunda benzer üretim süreçlerine ulaşılmıştır [59].

Palousek ve arkadaşları, 3B yazıcı ve 3B tarama teknolojilerinin el-el bileği ortezi üretiminde nasıl verimli bir şekilde kullanılabileceğini ve geleneksel ortez üretim sürecinin bu teknolojilerle nasıl daha basit hale getirilebileceğini araştırmıştır. Bu çalışma, bu teknolojilerin hastaların ihtiyaçlarını ve bireysel gereksinimlerini karşılamak için nasıl uygulanabileceği konusunda bir örnek sunar. Bu, insan ortezlerinde teknoloji kullanımının önemli bir örneğini sunar ve hastalar için özelleştirilmiş ve etkili çözümler sunma potansiyeline sahiptir [60].

Kim ve arkadaşları, geleneksel alçı kalıpların yerine 3B baskı ve enjeksiyon kalıp tekniklerini birleştirerek el-el bileği ortezi üretmeyi hedeflemişlerdir. Bu yaklaşım, nispeten ağır, çıkarılması zor ve hava sirkülasyonuna izin vermeyen geleneksel alçı kalıpların yerine daha hafif, özelleştirilebilir ve kullanıcı dostu bir alternatif sunmayı amaçlamaktadır [61].

Gerrand (2014) çalışmasında, sağlık profesyonellerinin 3D baskı modeli kullanarak elde ettikleri deneyimleri aktarmıştır. Bu çalışma, pelvik kondrosarkomu teşhisi konulan bir hasta için özel olarak tasarlanmış pelvik implantın üretimine odaklanmıştır. Bulgular, hastalar için kişiselleştirilmiş implantların tasarım ve üretimindeki potansiyeli vurgularken, daha fazla hasta üzerinde çalışılmasının önemli olduğunu belirtmiştir [62].

2.7.3. Cerrahi Uygulamalar

3B baskı, cerrahi planlamada gelişmiş bir görüntüleme sistemine sahip olduğundan, cerrahların hastanın anatomik yapısını daha iyi görselleştirmesini sağlar. Ameliyat sırasında cerrahi prosedürü daha iyi yönlendirmeye, uygun açılar tahmin etmeye ve kemiğin yönü ile boyutu hakkında önceden bilgi sahibi olmaya yardımcı olan cerrahi şablonlar kullanmak, cerrahi müdahalenin başarısını artırabilir. Normal şartlarda kan akışının ve kemik yapısının ameliyat sırasında değerlendirilmesi zordur. Bu nedenle, 3B baskı teknolojisi, ameliyat sırasında doğru planlama ve kontrol sağlamak için bir rehber olarak kullanılmaktadır. Bu teknoloji, geniş bir cerrahi yelpazede kullanılmaktadır ve bu, genel cerrahi, kardiyovasküler cerrahi, ortopedik cerrahi, beyin cerrahisi ve plastik cerrahi gibi alanları içerir. Özellikle damar cerrahisi, tümör rezeksiyonları, ortopedik müdahaleler ve beyin cerrahisi gibi alanlarda 3B baskı yöntemi tercih edilmektedir. Bu alanlarda teknolojinin etkili bir şekilde kullanılması, cerrahi sonuçlarını iyileştirebilir, tıbbi hataları azaltabilir ve böylece hasta güvenliğini artırabilir. Ayrıca, bu teknolojinin tıp öğrencilerinin ve cerrahi asistanlarının eğitiminde de faydalı olabileceği düşünülmektedir. 3B yazıcıların cerrahi uygulamalarda kullanımı her geçen yıl artmaktadır ve bu teknolojinin geliştirilmesi için sürekli olarak araştırmalar yapılmaktadır. Bu sayede cerrahi müdahaleler daha iyi planlanabilir ve daha güvenli hale getirilebilir, bu da hastaların sağlık ve yaşam kalitesini artırabilir [58].

Gerçekleştirilen çalışmalardan birinde de 3B baskılı modeller ile “render” görüntülerin karşılaştırması yapılmış olup araştırma sonucunda yazıcı kullanımının hasta anatomisinin incelenmesinde bariz faydalar sağladığı görülmüştür [63].

Souzaki ve arkadaşlarının (2015) yaptığı çalışmada, cerrahi müdahale gerektiren üç yaşındaki bir çocuğun hepatoblastom tanısıyla karşı karşıya olduğu bir olgu üzerinde 3B teknolojisi kullanarak karaciğer modeli üretmişlerdir. Bu modeli kullanarak planladıkları cerrahi uygulamayı simüle etmiş ve gerçekleştirdikleri cerrahi müdahalenin başarılı sonuçlarını rapor etmişlerdir. Bu çalışma, 3B baskı teknolojisinin cerrahi planlama ve müdahalelerin daha iyi anlaşılması ve başarıyla gerçekleştirilmesi için nasıl kullanılabileceğini göstermektedir [64].

Tominaga ve arkadaşlarının (2016) gerçekleştirdiği çalışma, stomalı hastaların bakımı için 3B yazıcı teknolojisinin potansiyelini araştırmıştır. Bu çalışma çerçevesinde, hastaların anatomik yapısına uygun özel ostomi torbası yüz plakaları, Geomagic Free Form® grafikleri kullanılarak üretilmiştir. Bu 3B modeller, hastaların kendi stomalarını daha iyi anlamalarına ve stomaya yönelik bakımı daha etkili bir şekilde öğrenmelerine yardımcı olmuştur. Ayrıca, tıbbi personel için de stomayla ilgili sorunları daha iyi inceleme ve anlama fırsatı sunmuştur [65].

Van Koeveering ve arkadaşlarının (2015) yaptığı çalışma, doğum öncesi fetal anomalilerin tespiti amacıyla 3B baskı teknolojisinin kullanıldığı bir örnek sunumu içermektedir. Bu araştırmada, gebeliğin 30. haftasında ultrason ile saptanan hava yolu tıkanıklığına bağlı olarak ortaya çıkan fetal yüz deformitesi, 3B yazıcı teknolojisi kullanılarak modellenmiştir. Bu çalışma, karmaşık fetal anatomiye ayrıntılı bir şekilde incelemek için 3B modelleme ve baskı teknolojilerinin umut verici bir örnek sunmaktadır. Bu ilerlemeler, fetal anomalilerin daha iyi anlaşılması ve araştırılması konusundaki çabaları desteklemektedir [66].

2.7.4. Özel İlaç Tedavileri

Terapötik ilaçların hedeflenen bölgeye taşınması ve ardından vücut içinde güvenli bir şekilde parçalanması veya atılması amacıyla özel ilaç dağıtım sistemleri geliştirmek için 3B yazıcılar kullanılmaktadır. Glasgow Üniversitesi'nde yapılan bir araştırma, organik bileşikler ve inorganik kümeler üreten bir sistem geliştirmiştir. Bu teknolojinin, özelleştirilmiş ilaçların üretiminde uzun vadeli bir potansiyele sahip olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, daha hassas bir ilaç dağıtım sistemi oluşturmak

amacıyla antibiyotik veya kemoterapi ilaçları ile doldurulmuş tıbbi dereceli, biyolojik olarak parçalanabilir ve biyolojik olarak uyumlu PLA ve polikaprolakton (PCL) boncukları, diskleri ve filamanları geliştiren Louisiana Tech Üniversitesi'nden bir ekip tarafından tasarlanmıştır. Bu buluş, geliştirilmiş ilaç dağıtım cihazları, implantlar ve kateterler üretebilir. Bu yeni 3B baskı teknolojisi, enfeksiyonları azaltarak yerel kanseri tedavi etmeyi ve hastalığın yayılmasını önlemeyi amaçlamaktadır. Bu yöntemler, standart bir 3B yazıcı kullanarak antimikrobiyal boncuklar ve filamentler üreterek enfeksiyonları azaltır. Tasarımları, kontrollü ilaç salınımını sağlayabilen ve ayarlanabilen bir sistem üzerine odaklanmıştır. Bu tür bir sistem, enfeksiyonları önlemek ve hastalıkları tedavi etmek için çeşitli ilaçların (örneğin antibiyotikler, antifungaller, kemoterapötikler vb.) kullanılmasına olanak tanır. Bu teknoloji, tıbbi tedaviyi daha kişiselleştirmek ve ilaç dağıtımını iyileştirmek için büyük bir potansiyele sahiptir [67].

2.7.5. Tıbbi Ekipmanların Üretimi

Tıbbi ekipmanlar terimi, insan yüzü cerrahi nakillerinden protezlere, implantlara ve insan organlarına kadar geniş bir yelpazede kullanılır. Eklemeli imalat teknolojisi, tıbbi ekipmanların birçok alanında son yıllarda dikkat çeken bir üretim yöntemi haline gelmiştir. Bu özellikle geleneksel üretim yöntemlerinin karmaşıklık veya hastaya özel tasarım gerektiren tıbbi ekipmanlar için sınırlı olduğu durumlarda büyük avantajlar sunar. Eİ teknolojisi sayesinde hastanın anatomik yapısına uygun cihazlar uygun maliyetle üretilebilir. Örneğin, hastanın kulak anatomisine tam olarak uyan işitme cihazları gibi hastaya özel tıbbi ekipmanlar bu teknikle üretilebilir. Bu nedenle dünya genelinde milyonlarca işitme cihazının Eİ ile üretildiği bilinmektedir. Bu teknoloji, işitme cihazlarının hızlı bir şekilde üretilmesini sağlar. Sadece işitme cihazları değil, Eİ teknolojisi görme engelliler için özel olarak tasarlanmış göz lensleri ve gözlükler gibi diğer tıbbi cihazlar için de büyük potansiyel taşır. Bu teknoloji, tıbbi cihazların üretim maliyetini düşürebilir, hastalar için daha güvenli ve etkili cihazlar sağlayabilir ve tedavi süreçlerini iyileştirebilir. Özellikle kas-iskelet sistemi, ağız ve çene cerrahisi gibi alanlarda, Eİ teknolojisi tıbbi ekipmanların geliştirilmesinde büyük bir öneme sahiptir [30].

Eİ teknolojisi, tıbbi ekipmanların üretiminde son derece esnek bir yaklaşım sunar. Özellikle COVID-19 salgını sırasında, maske ve kişisel koruyucu ekipmanlara olan yoğun talebi karşılamak için bu teknoloji hızla devreye alınmıştır. Bu süreçte, tanı test

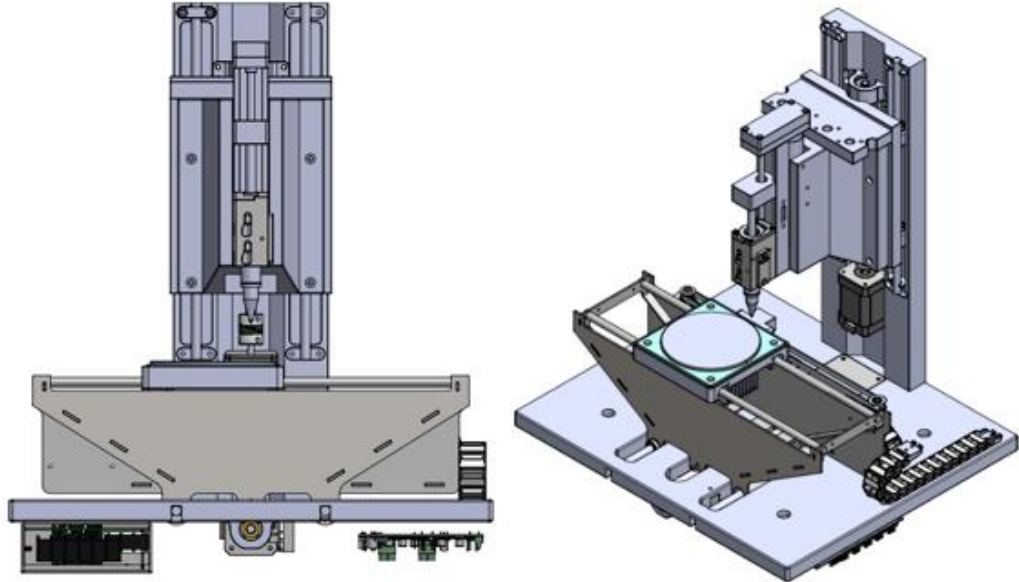
kitleri, solunum cihazları, yüz maskeleri ve yüz siperlikleri gibi bir dizi tıbbi ekipman Eİ teknolojisi kullanılarak üretilmiştir [68].

Özellikle biyomedikal mühendisliği alanında 3B yazıcıların kullanımı ile yapılacak birçok farklı çalışma olanağı bulunmaktadır. Bu olanaklar arasında mühendislik ders materyalleri – anatomi ders materyalleri vb. gibi, ortez-protez örnek prototip çalışmaları, canlı doku oluşturulması vb. gibi birçok çalışma sıralanabilir. Bu çalışmada biyoyazıcı teknolojisinin temel prensiplerini anlamak, mevcut gelişmeleri incelemek ve kendi tasarladığımız bir biyoyazıcı prototipinin yapımını ve işlevselliğini tanımlayarak; bu teknolojinin Türkiye'deki gelişimini destekleyebilecek biyomedikal ve doku mühendisliği alanında literatüre katkı sağlamak amaçlanmıştır. Farklı fonksiyonlara sahip 3B yazıcıların geliştirilmesi üzerinde yapacağımız çalışmaların yanı sıra hazırladığımız 3B yazıcı ile mühendislik çalışmalarını da kolaylıkla hazırlayabilme imkânı elde edilmiş olunacaktır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Biyoyazıcının Tasarımı

Bilgisayar destekli bir çizim programı olan SolidWorks kullanılarak Biyoyazıcının çizimleri yapılmış olup, birkaç güncellemeden sonra son halini almıştır. Biyoyazıcının metal ve plastik parçalarının birçoğu CNC makinesi ile işlenmeye uygun şekilde çizilmiş ve bu makine ile üretim işlemleri gerçekleştirilmiştir. Parçaları işlemek için kullanılan CNC makinesi Pinnacle markasının VMC 1000S modeli olup 2004 yılında üretilmiştir. Bu CNC plastik, demir, alüminyum gibi birçok parçayı dik işleme yöntemiyle işleyebilmektedir. Biyoyazıcı tasarımındaki elektronik devrenin kontrolü için Duet3d firmasının “Duet 2” elektronik kartı ve ekran olarak ise aynı firmanın “PanelDue” ürünü tercih edildi. Biyoyazıcı bir şırıngalı (nozzle) olarak tasarlanmış olsa da sonraki çalışmalarda ikinci ve daha fazla şırıngaya ihtiyaç olması durumlarında Duet 2 elektronik kartı bu imkanları sunmasıyla ve tüm ihtiyaçlarımızı karşılayacak olması sebebiyle seçilmiştir. Biyoyazıcıda X, Y ve Z eksenlerinde hareketi sağlayan birer tane ve şırıngada baskıyı aktif hale getirmek için de 1 adet olmak üzere toplam 4 adet step motor bulunmaktadır. Baskı işlemlerinde tabladan dökülebilecek sıvıların kızıklara zarar verebileceği ihtimaline karşın X eksen hareketi kayış-kasnak sistemi ile sağlandı. Eksen hareketleri 3 adet switch ile sınırlandırıldı.



Şekil 3. 1: Biyoyazıcı tasarımının SolidWorks üzerinde görünümü

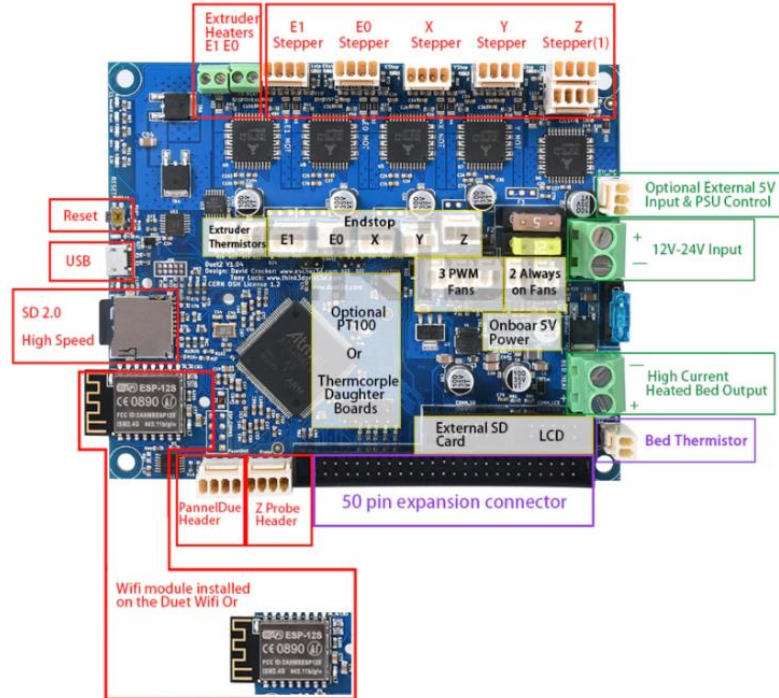
3.2. Kullanılan Materyaller

3.2.1. Duet 2 Wi-Fi 3D yazıcı Anakart

Duet 2 Wifi, 120 MHz Arm Cortex 4 çekirdekli Atmel SAM4E8E Güçlü 32 Bit işlemcisi, Nema 23 Step motorları destekleyen entegre 5 adet TMC 2660 step sürücüleri, onboard gelişmiş wifi, online konfigüre edilebilen rebrap firmware ile 3D yazıcılar ve diğer CNC makinelerinin kontrolü için en gelişmiş bir 32 bit 3D yazıcı ana kartıdır. Yazılım yüklemesi ve tüm güncellemeler, aynı ağ üzerindeki herhangi bir PC, tablet veya akıllı telefon üzerinden yerleşik web arayüzüne bağlanıp herhangi bir kod editörü kullanmadan kolayca yapılabilir.

Aşağıda Duet 2 Wi-Fi teknik özellikleri verilmiştir.

- Güçlü 32 Bit işlemci Özel Wifi modülü
- Yüksek hızlı SD kart ve gerekirse ikinci bir harici SD kart desteği.
- Ana kartta 2, genişletme kartı üzerinde 5 adet, toplam 7 ekstrüdere kadar kullanılabilir.
- Giriş voltajı DC : 12-24V
- Fan sigortasının toplam akımı: 1A
- Step Motor Sürücü Akımı : 2.4A



Şekil 3. 2: Duet 2 Wi-Fi Kartı

3.2.2. PanelDue 5i

Duet 2 Wi-Fi elektronik kart ile aynı markanın üretimi olan PanelDue 5i ekranı, aynı zamanda bir çok 3D yazıcı elektronik sistemleri ile uyumlu çalışabilmektedir. Baskı için gerekli koordinat, sıfırlama, sıcaklık ayarları, baskının başlaması ve durdurulması gibi ayarlar bu ekrandaki arayüz üzerinden kolaylıkla yapılabilmektedir.

Aşağıda PanelDue 5i teknik özellikleri verilmiştir.

- 800x480 piksel
- SD kart modülü
- Giriş Voltajı: 5V



Şekil 3. 3: PanelDue 5i

3.2.3. Step Motorlar

Step motorlar, elektrik enerjisini dönme hareketi ile fiziksel enerjiye dönüştüren ve açısal konumu adımlar halinde değiştirebilen elektromekanik aletlerdir. Birçok çeşidi bulunan step motorlar, planlanan projelerin gerektirdiği özelliklerine göre birbirinden farklı amaçlara hizmet edebilmektedir. Step motor hareketlerinde pozisyon hatası yaşanmadığı için 3D yazıcılarda kullanılması uygundur.

Aşağıda step motorun teknik özellikleri verilmiştir.

- Step açısı: 1.8°
- Voltaj: 12V
- Çalışma akımı : 1.5A
- İç direnç : 1.8 Ω

- Tutunma torku : 55 N.cm
- Rotor ataleti: 68 g.cm²
- Ağırlık: 400 gr.



Şekil 3. 4: Step Motor

3.2.4. Meanwell LRS-350-12 Güç Kaynağı

Elektronik devrelerde güç kaynaklarının temelini, AC güç kaynaklarını DC güç kaynaklarına çeviren dönüştürücüler oluşturur. SMPS'ler (Switch Mode Power Supply) ise içerisinde, verimli bir şekilde güç üretmek için anahtarlamalı regülatör bulunduran güç kaynaklarıdır. Gereken enerjiyi biyoyazıcıya düzgün ve sürekli şekilde sağlaması için bu 12V güç kaynağı uygun görüldü.

Aşağıda Meanwell LRS-350-12 güç kaynağının teknik özellikleri verilmiştir:

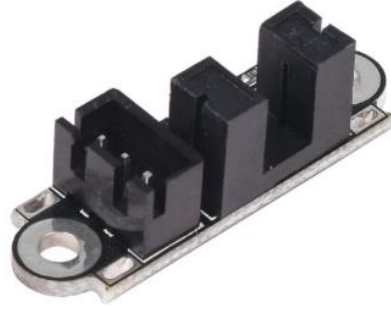
- 12V DC 29A çıkış
- AC giriş voltaj aralığı: 90 ~ 132VAC
- Güç: 348W
- Korumalar: Kısa devre / Aşırı yük / Aşırı voltaj / Aşırı sıcaklık
- Dahili soğutma fanı
- 70°C'ye kadar çalışma sıcaklığı



Şekil 3. 5: Güç Kaynağı

3.2.5. Optik Limit Switch

Optik limit switch, 3D yazıcı ve CNC uygulamaları başta olmak üzere birçok hareketli mekanizmada hareket eden parçanın konumunu öğrenmek için kullanılır. 3D yazıcı ve CNC uygulamalarında eksen hareketinin son kısmına gelip gelmediğini tespit etmek için kullanılır. Eğer eksen hareketinin son kısmına gelirse ilgili motoru durdurur. Standart mekanik limit switchlerden çok daha hızlı ve güvenilirdir. Tetikleme hassas ve sessizdir. Biyoyazıcıda toplamda 3 adet optik limit switch kullanıldı.



Şekil 3. 6: Optik Limit Switch

3.2.6. Düz (Lineer) Mil

X, Y ve Z eksenlerinde 2'şer tane olmak üzere toplamda 6 adet kullanılan bu miller, eksen hareketlerini sağlayan destekleyici millerdir. Eksenlerdeki parçaların sabit kalmasını sağlayarak doğruluğu artırmaktadır. 8 milim çapındadır.



Şekil 3. 7: Düz (Lineer) Mil

3.2.7. Vidalı Mil Trapez T8 ve Somun

Step motorlara takılan ve dönme hareketiyle Y ve Z eksenlerindeki hareketleri sağlayan vidalı millerdir. Çapı 8mm'dir.



Şekil 3. 8: Vidalı Mil ve Somun

3.2.8. Lineer Rulman

Tabla, tabla taşıyıcı ve şırınga taşıyıcı parçaları lineer rulmanlar ile millerden geçirilerek sabit kalması ve eksen hareketleri sağlandı. Biyoyazıcıda toplamda 12 adet lineer rulman kullanıldı.



Şekil 3. 9: Lineer Rulman

3.2.9. Çift Contalı Bilyalı Rulman

Bu rulman ise Y ve Z eksenindeki vidalı millerin sabit kalmasını sağlamak amacıyla Y ekseninde 1, Z ekseninde 2 adet olmak üzere toplamda 3 adet kullanıldı.



Şekil 3. 10: Çift Contalı Bilyalı Rulman

3.2.10. Esnek Kaplin 5x8mm

Motor şaftını 5mm den 8mm ye çevirmek için Y ve Z eksenlerinde kullanıldı. 5mm’lik ucu motora, 8mm’lik ucu ise vidalı mile bağlandı.



Şekil 3. 11: 5x8mm’lik Kaplin

3.2.11. Kasnak ve Kayış

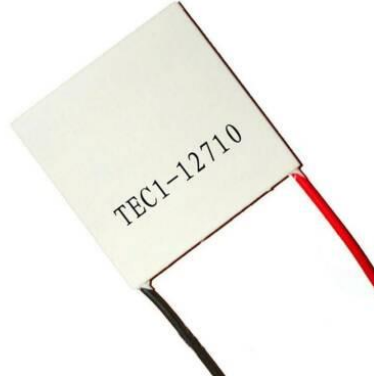
Kasnaklardan biri 5mm şaft çapı olan step motora, diğeri kayış döngüsünü sürdürebilmesi için karşısına takıldı. Tablanın X eksenindeki hareketi bu kayış-kasnak sistemi ile sağlandı.



Şekil 3. 12: Kasknak ve Kayış

3.2.12. TEC1-12710 Peltier

Termoelektrik Soğutucu 10A Peltier Modulüdür. Modül, 40mmx40mm alanda 70 °C'ye kadar çok etkili bir şekilde soğuyan ve ısıtan 127 yarı iletken çift içerir. Bu şekilde tablanın ısınıp soğumasını, istenilen sıcaklık seviyesine erişmesini sağlar.



Şekil 3. 13: Peltier Modülü

3.2.13. 12V Fan

Tabla ve Peltierin alt kısmındaki alüminyum soğutucuya hava akımı sağlaması için 2 adet fan takıldı. 12V 0.24A ile çalışmaktadır.



Şekil 3. 14: 12V Fan

3.3. Montaj

Bütün tasarım aşamaları bittikten sonra CNC ile parçaların sırasıyla işlenmesine başlandı.



Şekil 3. 15: CNC ile işleme

İlk olarak Alüminyum 6083 levhadan biyoyazıcının motorlarının, sensörlerinin, yatay ve dikeyde vidalı ve düz millerinin de takılacağı 2 yüzeyi işlendi ve sonrasında bu 2 levha yüzeyin birbirine dik olacak şekilde montajı sağlandı.



Şekil 3. 16: Biyoyazıcının sırasıyla yatay ve dikey yüzeyleri



Şekil 3. 17: Yatay ve dikey yüzeylerin montajı

Bağlı olduğu 2 adet düz 1 adet vidalı mil ile Y eksenindeki hareketi sağlarken, kendi üzerindeki 2 adet mil ile tablanın X eksenindeki hareketini sağlayacak olan parçalar ise 1 milimlik Alüminyum saçtan lazer ile kesilip sonrasında kaynak işlemiyle birleştirildi. Sonrasında iste taşlanarak kaynak ile birleştirme sonucu meydana gelen çıkıntı ve pürüzler giderildi. Bu parçadan daha sonra tabla taşıyıcı olarak bahsedilecektir.



Şekil 3. 18: Tabla taşıyıcı parçanın montajı



Şekil 3. 19: Tabla taşıyıcının taşlanma işlemi

Tabla taşıyıcının üzerine kayış yardımıyla tablayı X ekseninde hareket ettirecek olan düz (lineer) millerin montajı yapıldı. Bu millerin, mümkün olduğunca sabit kalması ve çalışma esnasında istenilen hassasiyeti sağlaması amacıyla, 2 ucundan segman ile sabitlenmesi için ilk olarak istenilen ölçüde kesilip, torna makinasında segman kanalı açıldı.



Şekil 3. 20: Düz millerin kesilme ve segman yuvası açılma işlemleri

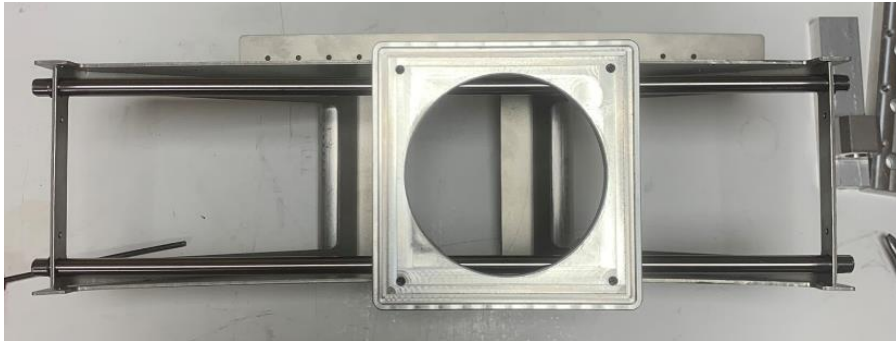


Şekil 3. 21: Düz millerin tabla taşıyıcıya montajı

Tabla taşıyıcı alt kısmında bağlı olduğu düz ve vidalı millerle Y eksenindeki hareketi sağlarken kendi üzerindeki 2 adet düz mile yerleşecek olan tablaya bağlı kayış sistemi ile de X eksenindeki hareketi sağlayacaktır. Tablanın alt 4 köşesine sabitlenen lineer rulmanlar ile bu miller üzerinde X eksenindeki hareketi sağlanacaktır.



Şekil 3. 22: Tablaya rulmanların takılması



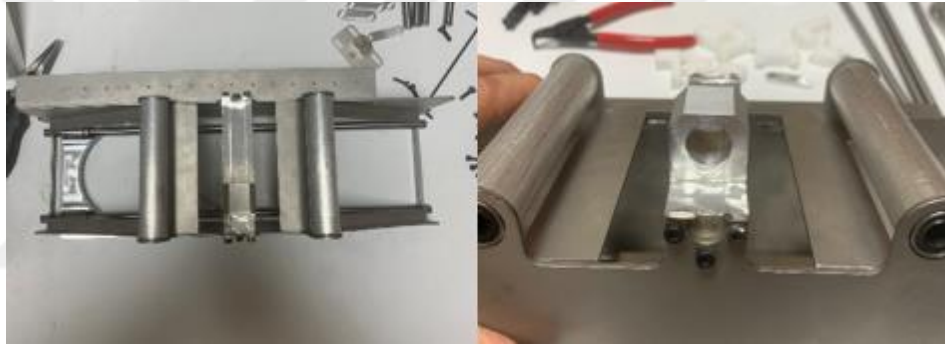
Şekil 3. 23: Tablanın millerden geçirilerek tabla taşıyıcıya montajı

Sonrasında tabla taşıyıcımızın alt kısmından geçecek olan düz millerin daha sağlıklı ve sağlam durması için bu millerin içinden geçeceği silindir borular tabla taşıyıcımızın alt kısmındaki ilgili yerlerine takıldı.



Şekil 3. 24: Düz millerin geçeceği boruların takılması

Tabla taşıyıcıyı Y ekseninde hareket ettirecek olan ve step motora bağlı olan vidalı milin içinden geçeceği parça, tabla taşıyıcının alt orta kısmına takılıp sabitlenmiştir. Bu parçaya daha sonra somun eklenerek vidalı milin iki yönlü dönmesiyle taşıyıcı tablanın hareketini sağlayacaktır.



Şekil 3. 25: Vidalı milin geçeceği parçanın montajı

Biyoyazıcının yatay yüzeyinde mil boşlukları için işlenen alana miller geçirilip uçlarından sabitlendi. Bu sayede tabla taşıyıcının biyoyazıcıya montajı sağlanmış oldu. Hareketi sağlayacak olan motora bağlı ortadaki vidalı mil ise daha sonra takılacaktır.



Şekil 3. 26: Tabla taşıyıcının yatay yüzeye montajı

Şırınga taşıyıcı parçanın montajına geçildiğinde, Z ekseninde hareketi sağlarken aynı zamanda şırıngayı taşıyacak olan bu parçanın, sağlam ve sabit durması amacıyla iki yanından geçecek düz miller için, işlenen parçalara lineer rulmanlar takıldı.



Şekil 3. 27: Şırınga taşıyıcıya rulmanların montajı

Sonrasında Şekil 3.28'deki gibi destek parçasıyla birbirine dik olacak şekilde vida yerlerinden bağlandı.



Şekil 3. 28: Şırınga taşıyıcıya destek parçasının montajı



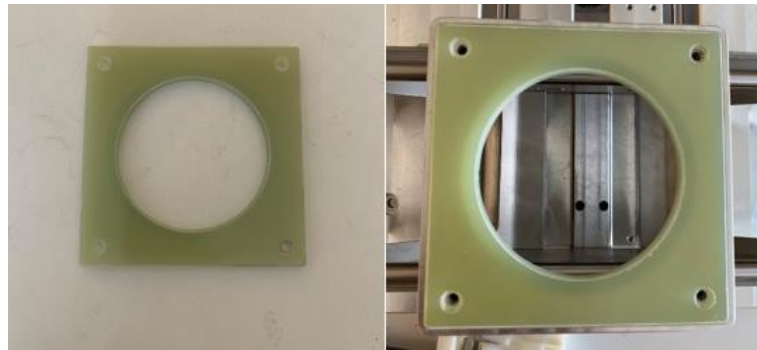
Şekil 3. 29: Şırınga taşıyıcının dikey yüzeydeki yeri

Z ekseninde hareketi sağlayacak olan, step motora bağlı olacak vidalı milin geçeceği rulmanlar da takıldıktan sonra 2 adet düz mil ile şırınga taşıyıcının montajı biyoyazıcıya yapıldı ve yukarı-aşağı hareketi istenilen şekilde yapması için bu miller sabitlendi.



Şekil 3. 30: Şırınga taşıyıcının dikey yüzeye montajı

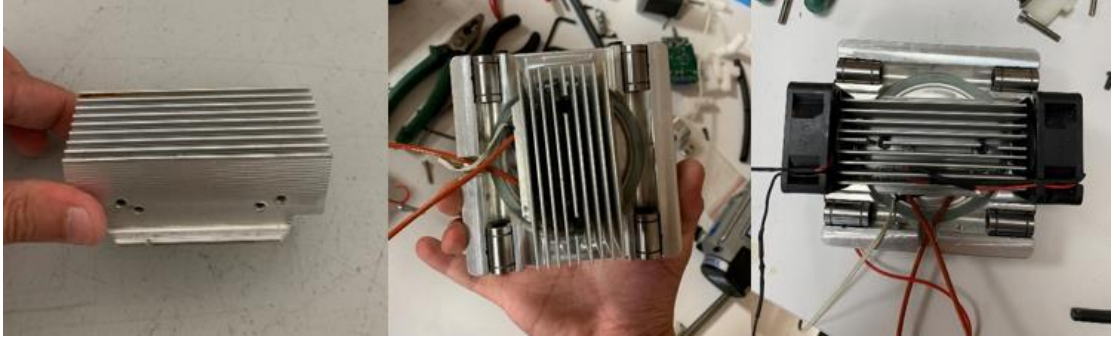
Biyoyazıcı tasarımının an itibariyle genel görünümü belli olmaya başlamış oldu. X, Y ve Z eksenlerinde hareketleri sağlayacak olan düz millerin sabitlik ve sağlamlık durumu bu aşamada kontrol edildi. Harekette sıkıntı çıkarabilecek herhangi aksaklık meydana gelmediği görüldü. Biyoyazıcının tablasında yapılacak çalışmaya ve alınacak baskıya yönelik uygun sıcaklık değerini ayarlayabilmek için tablanın alt kısmına termoelektrik peltier eklendi. Tablayı en az kayıpla bu sıcaklıkta tutmak için epoksi bir parça peltierin üst kısmına gelecek şekilde CNC yardımı ile işlendi.



Şekil 3. 31: Epoksi parçanın yerleştirilmesi

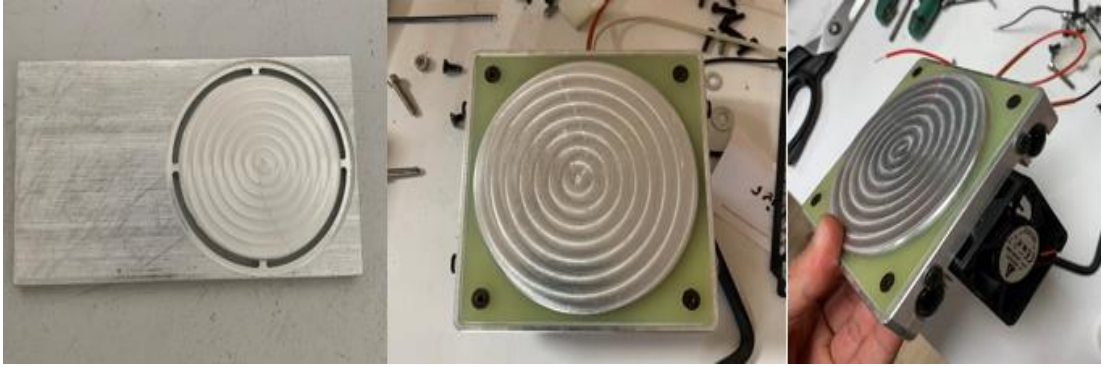
Epoksi malzeme kullanarak tabladaki sıcaklığın mümkün olduğunca muhafaza edilmesi amaçlandı. Peltierin alt kısmında ise alüminyum soğutucu kullanıldı. Bu soğutucunun 2 yanına fan eklenerek peltierin tam performans çalışması amaçlandı.

Fanlar aynı yönde hava akımı yaratmakta olup, alüminyum soğutucunun içinde hava sirkülasyonu oluşturmaktadır.



Şekil 3. 32: Peltier, soğutucu ve fanların tablaya montajı

Tabladaki yeşil epoksi parçanın içindeki yuvarlak oyuk kısmına da zemin parçası işlendikten ve ilgili yere montajından sonra biyoyazıcının tablası tam anlamıyla tamamlanmış oldu.



Şekil 3. 33: Tablanın tamamlanmış hali

Şırınga (nozzle) tasarımında ise baskının en düşük hızda dahi uyum içerisinde, düzgün bir şekilde çıkması için dişli sistemi kullanıldı. Motora direkt olarak ve şırınganın kafa kısmını hareket ettirecek vidalı mile bağlı olarak iki dişli ile bunları birleştiren bir dişli daha olmak üzere toplamda 3 dişli ile motorun dönme hareketi sayesinde şırınganın çalışması amaçlandı. Dişlilerin vidalı mile ilettiği kuvvet ile mile bağlı olan parça şırınganın pistonunu tutacak ve pistonu hareket ettirecektir.



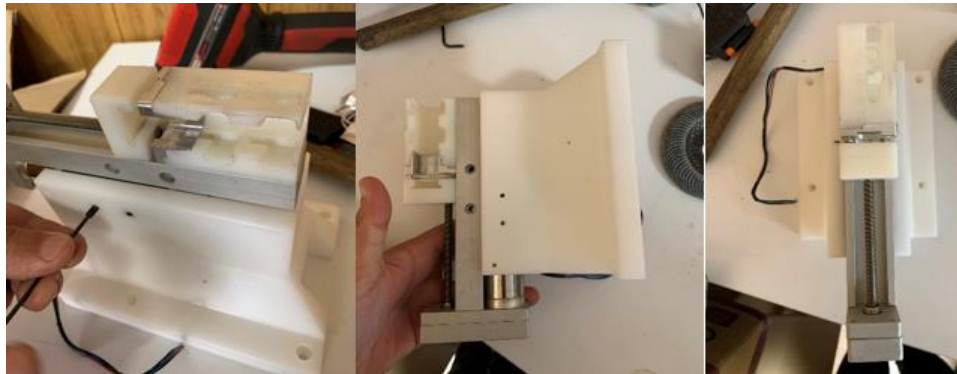
Şekil 3. 34: Şırınga sistemindeki dişliler ve şırınganın genel görünümü

Şekil 3.28’de montajı yapılan parça 2 şırıngalı yapıya uygun şekilde tasarlandığından bu parçayı söküp yerine tek şırınga yerleştirilecek parça tasarlandı. Şırınga taşıyıcı parçasına, şırınganın sisteminin takılacağı bir ara parça ihtiyacını çözmek için hafif ve daha kullanışlı olması ihtiyacından ötürü Delrin POM-C malzemesinden bir parça işlendi.



Şekil 3. 35: Delrin POM-C ara parçanın işlenmesi

İşlenen bu ara aparata, şırınga (nozzle) takılıp, şırınga taşıyıcıya montajı yapıldı.



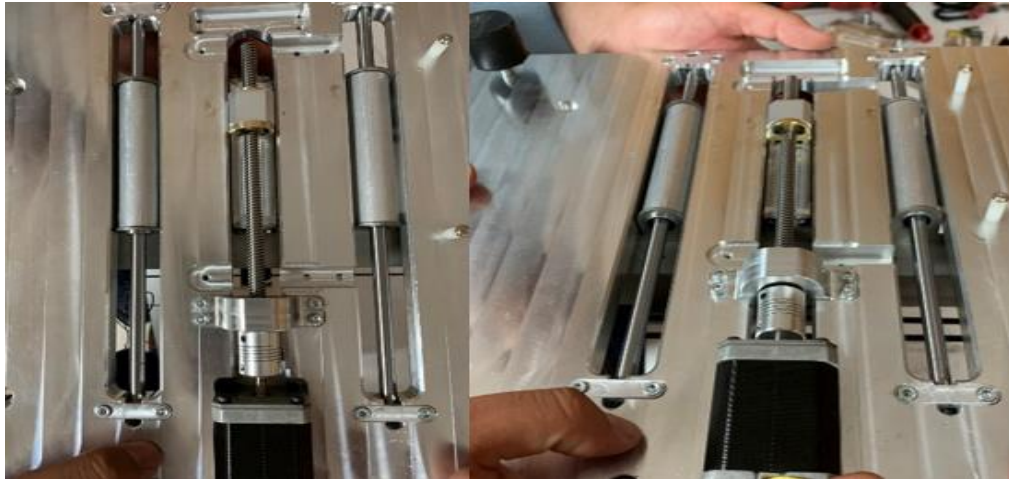
Şekil 3. 36: Şırınga ile ara parçanın montajı



Şekil 3. 37: Geline aşamada biyoyazıcının genel görünümü

Bu aşamalar doğrultusunda mekanik kısımların montajı büyük ölçüde tamamlanmış oldu. Elektronik kartın, güç kaynağının, motorların, motorlara bağlı millerin, kayışın, elektronik switchlerin ve kabloların bağlantı işlemlerine geçildi.

İlk olarak biyoyazıcının alt kısmındaki, tabla taşıyıcıyı Y ekseninde hareket ettirecek olan motor ve vidalı milin montajına başlandı. Mil aynı zamanda rulmandan geçirilerek sabitlendi. Step motor, vidalı mili döndürerek alt kısmından bağlı olduğu tabla taşıyıcıyı iki yönde hareket ettirmektedir.



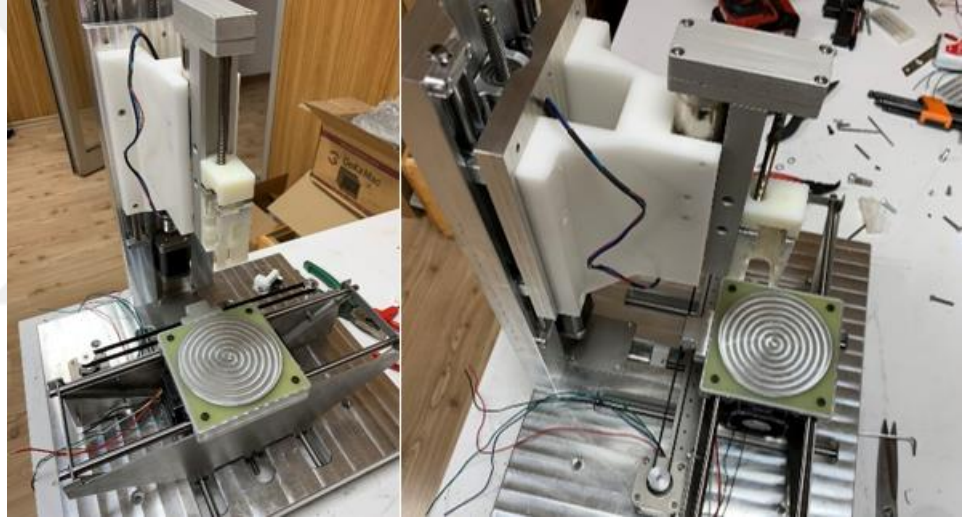
Şekil 3. 38: Y eksenini hareket ettirecek motor, vidalı mil ve somunun bağlantısı

Hemen sonrasında ise tabla taşıyıcıya takılacak ve X eksenindeki hareketi sağlayacak olan motorla birlikte kayış ile şırınga taşıyıcıyı Z ekseninde hareket ettirecek olan motorla vidalı milin montajına başlandı. Bu kayış ara bir aparat ile tabla taşıyıcıya

bağlı olduğundan, motor kayışı döndürürken, tabla iki yönde hareket etmektedir. Şırınga taşıyıcının Z ekseninde yukarı-aşağı hareketi ise vidalı mil ile sağlandı.



Şekil 3. 39: X ekseninde hareketi sağlayacak olan motor ve kayış-kasnak sistemi



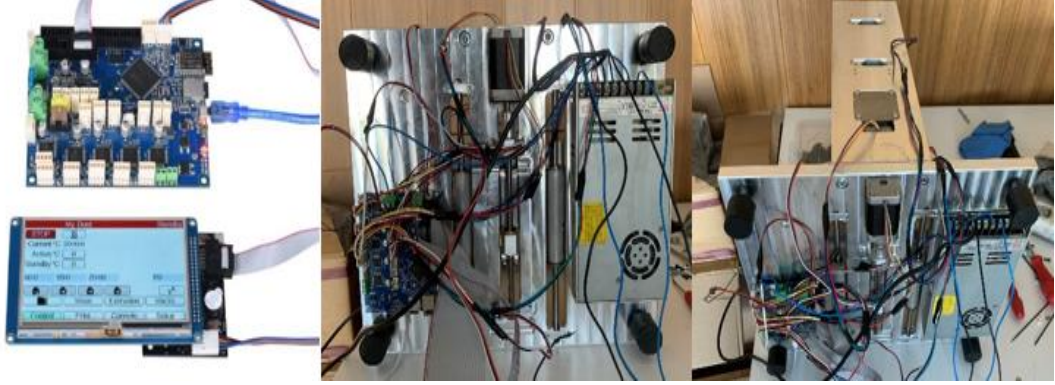
Şekil 3. 40: Motorların montajından sonra genel görünüm

Biyoyazıcıda motorların hareketlerini sınırlandırmak için 3 adet optik limit switch kullanıldı. Bu switchler, tabla taşıyıcı, tabla veya şırınga taşıyıcı belirlenen eksen aralığı dışına çıkmaya çalıştığında o motoru durduracaktır.



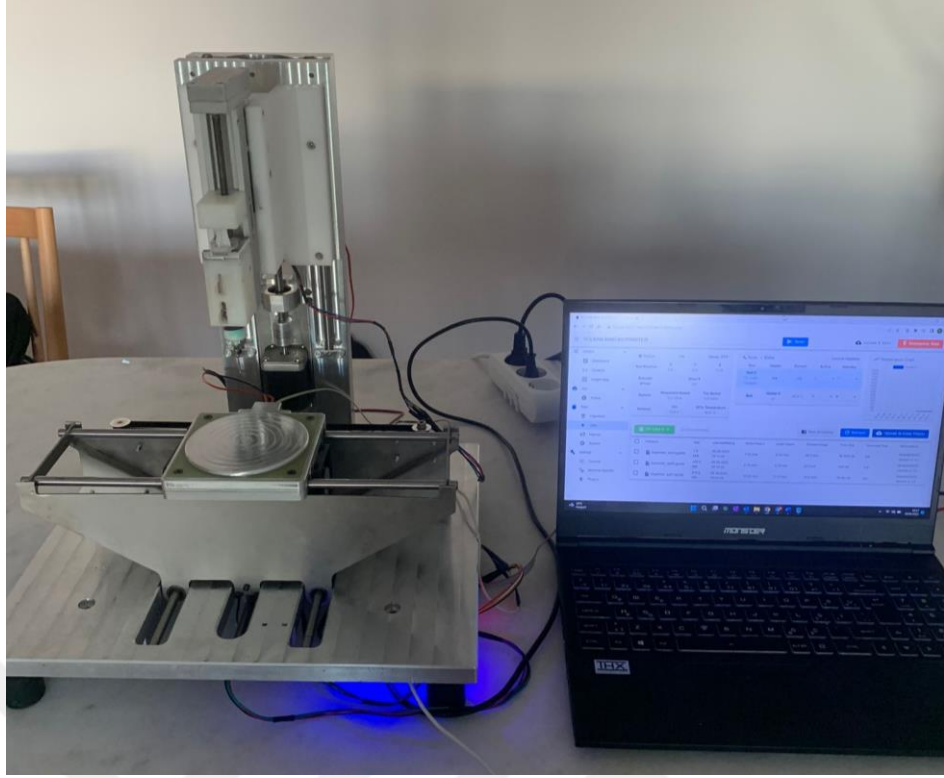
Şekil 3. 41: Optik limit switch

Duet 2 Wi-Fi elektronik kartı, biyoyazıcının alt kısmındaki yerine takıldıktan sonra motorların, switchlerin ve tablanın bağlantı kabloları elektronik karta takıldı. Aynı zamanda güç kaynağı ve ekran paneli bağlantısı da gerçekleştirildi.

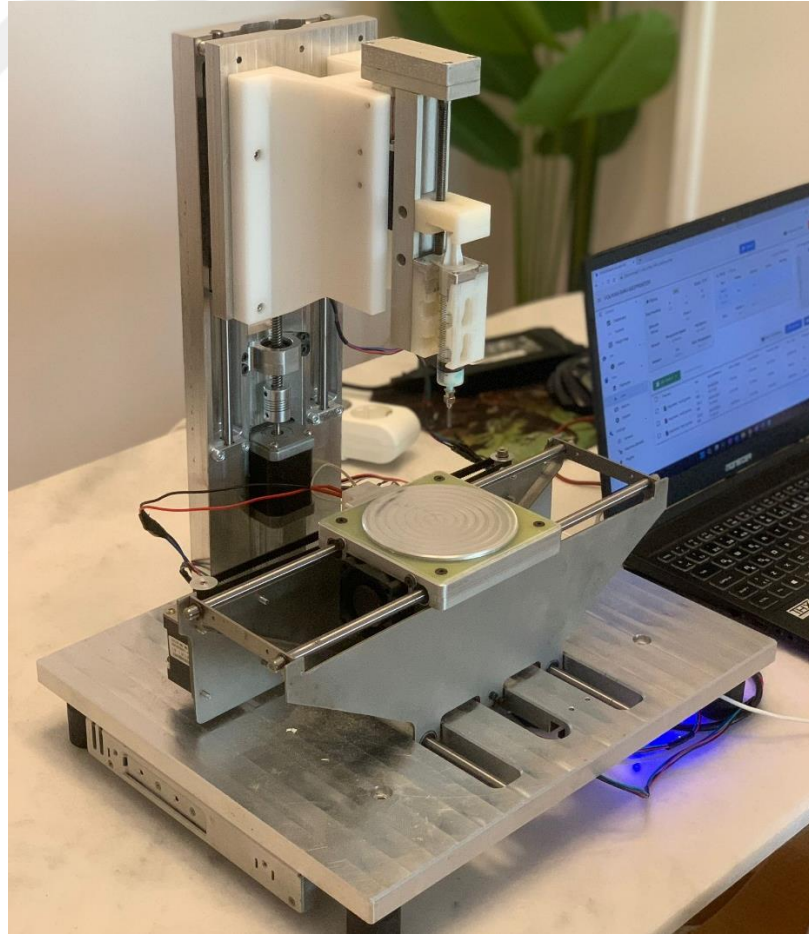


Şekil 3. 42: Elektronik kart ve kabloların bağlantısı

Son olarak elektronik kartın motor, konfigürasyon, ısıtma ve arayüz ayarlamalarına geçildi. Makine açılışında gerekli ayarlamalar config.g dosyası içerisine oluşturulan ayarlar ile gerçekleştirilmiştir. Burada çalışma alanı X, Y ve Z eksenlerinde hareket miktarı, tablanın ısıtma ve soğutma ayarları ve hem şırınga hem de eksenlerdeki motor hareketlerinin adım ve hız ayarlamaları yapılmıştır. Makine açılıştan sonra hazır hale gelmesi için ilk önce eksen sınırlarını belirleyen sensörler tarafından global koordinat sistemine göre sıfırlama alındıktan sonra tabla çalışma alanının orta merkezine gelerek yeni bir global koordinat sistemi tanımlanmıştır. Sistem başlangıçta sıcaklık ayarı olarak ısınma şeklinde konfigüre edilmiştir. Sistemin soğutma kısmına ve tekrar ısıtma kısımlarına geçebilmesi için iki farklı makro kod yazılmıştır. Bu kodlar ekran üzerinde gözükmekte ve istenildiği zaman hangi moda geçirilmek isteniyorsa seçilerek işlem başlatılmaktadır.



Şekil 3.43: Bilgisayar ile konfigürasyon ve panel arayüz ayarlamaları

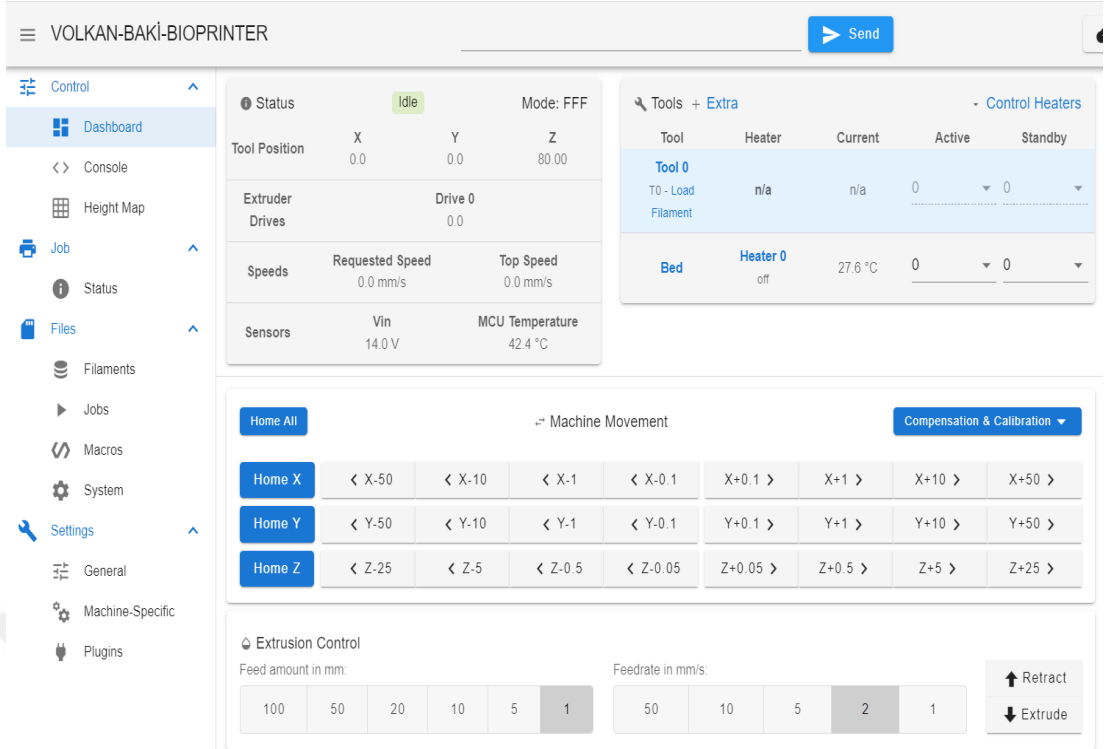


Şekil 3.44: Biyoyazıcının genel görünümü

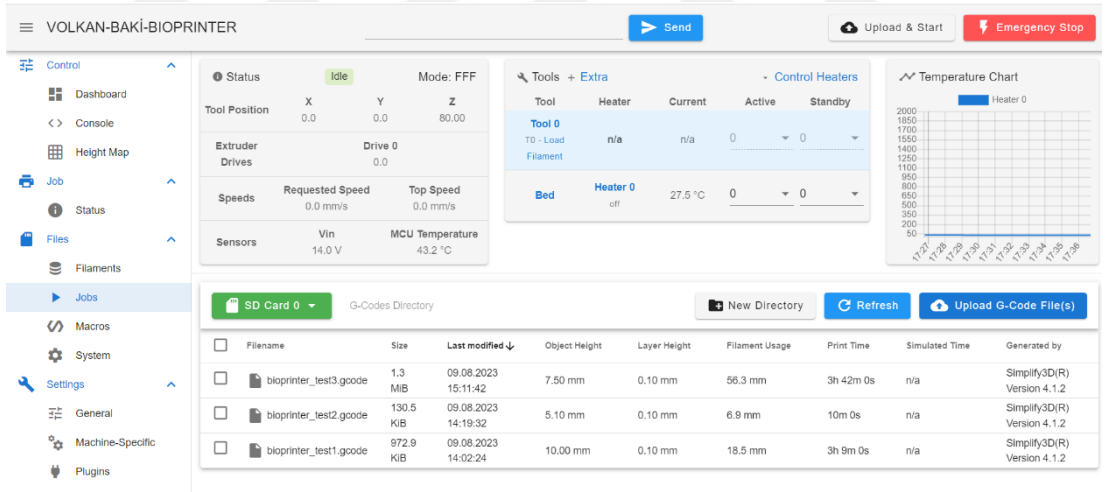
```
0:/sys/config.g.bak
7 M575 P1 S1 B57600 ; enable support for PanelDue
8 G90 ; send absolute coordinates...
9 M83 ; ...but relative extruder moves
10 M550 P"VOLKAN-BAKI-BIOPRINTER" ; set printer name
11
12 ; Network
13 M552 S1 ; enable network
14 M586 P0 S1 ; enable HTTP
15 M586 P1 S0 ; disable FTP
16 M586 P2 S0 ; disable Telnet
17
18 ; Drives
19 M569 P0 S0 ; physical drive 0 goes backwards (x)
20 M569 P1 S1 ; physical drive 1 goes forwards (y)
21 M569 P2 S1 ; physical drive 2 goes forwards (z)
22 M569 P3 S0 ; physical drive 3 goes forwards (e)
23 M584 X0 Y1 Z2 E3 ; set drive mapping
24 M350 X16 Y16 Z16 E16 I1 ; configure microstepping with interpolation
25 M92 X80.00 Y400.00 Z400.00 E62000.00 ; set steps per mm
26 M566 X900.00 Y900.00 Z60.00 E120.00 ; set maximum instantaneous speed changes (mm/min)
27 M203 X6000.00 Y6000.00 Z180.00 E12.00 ; set maximum speeds (mm/min)
28 M201 X500.00 Y500.00 Z20.00 E1.00 ; set accelerations (mm/s^2)
29 M906 X1200 Y1200 Z1200 E500 I30 ; set motor currents (mA) and motor idle factor in per cent
30 M84 S30 ; Set idle timeout
31
32 ; Axis Limits
33 M208 X-50 Y-50 Z0 S1 ; set axis minima
34 M208 X50 Y50 Z80 S0 ; set axis maxima
35
36 ; Endstops
37 M574 X1 S1 P"xstop" ; configure switch-type (e.g. microswitch) endstop for I
38 M574 Y1 S1 P"ystop" ; configure switch-type (e.g. microswitch) endstop for I
39 M574 Z2 S1 P"zstop" ; configure switch-type (e.g. microswitch) endstop for I
40
41 ; Z-Probe
42 M558 P0 H-5 F120 T6000 ; set Z probe type to unmodulated and the dive height + speed.
```

Şekil 3.45: Web panel üzerinden config kodlarının düzenlenmesi

Web panelinden config ve arayüz üzerindeki düzenlemelerden sonra kullanıma uygun son halinde, arayüzde anasayfada (dashboard) yazıcının X,Y ve Z eksenlerindeki anlık konumu, motorları manuel hareket ettirme, eksenleri sıfır konumuna getirme, tablanın sıcaklık ayarı, ektstuder pompasının şırıngaya teması gibi ayarlamalar kolaylıkla yapılabilmektedir. Sekmelerdeki “Jobs” kısmından baskı alınacak çizimin G kodları yüklenerek biyoyazıcının çalışması sağlanmaktadır.



Şekil 3.46: Biyoyazıcının web panelindeki arayüzü

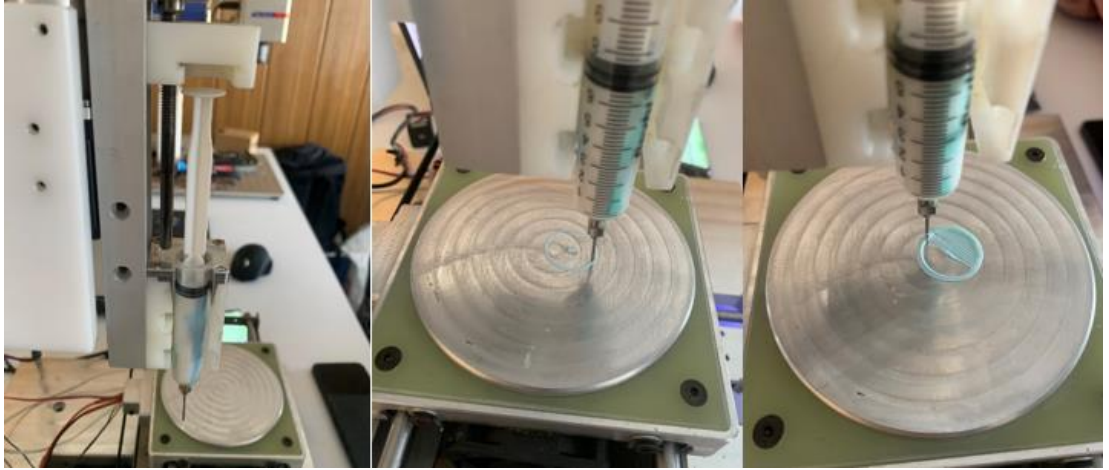


Şekil 3.47: Çizim dosyasının yükleneceği sekme



Şekil 3.48: Biyoyazıcı ile ekran panelinin test edilmesi

Çalışma denemelerinde şırıngaya diş macunu eklendi ve hazırlanan bir daire çizimi, .stl formatındaki dosyanın G kodları yüklenerek biyoyazıcının çalışması gözlemlendi.



Şekil 3.49: Diş macunu ile baskı denemeleri

4. SONUÇ

3B yazıcılar ile ilgili kapsamlı bir literatür taraması yapıldığında kullanım alanlarının sağlıktan mühendisliğe, eğlence sektöründen eğitim sektörüne, otomotiv sanayisinden savunma sanayisine kadar birçok farklı alanda kullanıldığı görülmüştür. 3B baskı teknolojilerinde en yaygın kullanım ise mühendislik ve medikal alanlarında gerçekleşmiştir. Son 30 yılda medikal teknolojide açık ameliyatlardan minimal invaziv cerrahiye, eğitimde yüksek teknoloji simülatörlerinin kullanılmasına kadar büyük ilerlemeler görülmüştür. Ancak tüm bunların yanı sıra en son yenilik 3B yazıcıların medikal teknolojide kullanılmasıyla gerçekleşmiştir.

Mikro yapıların gözenekli geometrisini gerçekleştirmek ve biyomateriyalleri kemik rejenerasyonu için doğru konuma yerleştirilmesi gerekmektedir. Kemik dokusunun hassas ve karmaşık makro ve mikro gözenekli yapısı göz önüne alındığında, 3D baskı teknolojisi şüphesiz en umut verici üretim teknolojisidir. Bu teknoloji ile geleneksel yöntemlerle üretilmesi zor olan karmaşık şekilli parçaların daha az maliyetle daha kolay ve daha hızlı üretilmesi sağlanmaktadır. Sağladığı avantajlar sayesinde özellikle biyomedikal alanında kullanılmakta ve bu alanda her gün farklı uygulamalar için tercih edilmektedir. Biyomodel cerrahi hastalıkların daha iyi anlaşılması için modelleme ve görüntüleme, tıbbi cihaz imalatı hastaya özel implant ve protez uygulamaları, doku mühendisliği uygulamaları ve biyobaskı organı olarak ilaç endüstrisindeki uygulamaları yer almaktadır. Bu mucize teknolojinin ilaç sektöründe ve biobaskı uygulamalarında kullanımı henüz yaygınlaşmamış olup test edilmeye ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Tıbbın her alanında, hastalara yüksek yaşam kalitesi ve daha uzun ömür sağlamak için 3D baskı ile desteklenen buluşlar her geçen gün artmaktadır.

Ülkemiz literatürüne bakıldığında şimdiye kadar yapılan araştırmalarda bu teknolojileri kullanan cihazlar sınırlı sayıda geliştirilmiş olup üç boyutlu yazıcı teknolojilerinin sağlık alanında umut vaat eden çözümler ürettiği dünya genelinde kabul görmüştür.

Mikroekstrüzyon biyo-baskı çalışma prensibine sahip biyoyazıcıların en temel sorunlarından bir tanesi şırınga (nozzle) ucunun hava ile teması sonucu kuruyup tıkanmasıdır. Düşük hızlarda baskı alınıyor ise bu sorun ile karşılaşılma ihtimalinin artması söz konusu olabilir. Birden fazla şırınga eklendiği durumlarda ise, şırıngalardan birinin çalışıp diğerinin çalışmaması durumu da bu tıkanmayı

tetikleyebilir. Bu sebeplerden ötürü ortam koşulları, baskı hızı ve biyomürekkep seçimi gibi faktörler için denemeler yapıp optimum şartlar altında baskı sürecine devam edilmeli ve yapılacak her farklı çalışma için gerekli denemeler yapılması gereklidir. Uygun faktörler sağlandığında bu biyoyazıcı biyo-baskı çalışmaları yapılmasına katkı sağlayabilecektir. Biyoyazıcıya fazladan şırınga ekleme işlemi mümkün olsa da mevcut ara aparatın çıkarılıp yeni bir parçanın takılması gerekmektedir. Tek bir parça üzerine birden fazla şırınganın daha basit şekilde montajının sağlanabileceği bir ara aparat tasarımı yapılması cihazın kullanımını çok daha da kolay hale getirecektir.

Bu çalışmada hala gelişmekte olan 3B biyoyazıcı teknolojisine uygun olarak tasarlanan bu ürün ile; ülkemize, geleceğin öncelikli tıbbi araştırma alanları içerisinde bulunan Biyomedikal Mühendisliği, Rejeneratif Tıp ve Doku Mühendisliği alanında araştırma imkânı sağlayacak, yerli imkânlarla üretilmiş bir 3B biyoyazıcı prototipi kazandırılması amaçlanmıştır. Bu prototip uygun çalışma ortamında uygun malzemeler ile sahip olduğu hassas hareket kabiliyeti sayesinde, gerektiğinde şırınga eklenip eş zamanlı çalışabilmesi avantajıyla, istenilen sonuçları verebilme anlamında umut vadetmektedir.

Yapılan her yeni araştırma, bizleri gerçek organların biyoyazıcılarda hızlı bir şekilde üretilmesi ve ardından hastalara nakledilmesi sürecine bir adım daha yaklaştırmaktadır. 3D biyoyazıcı teknolojisi organ, doku üretiminde ve naklinde başarıyla kullanılmaya başlandığı anda sağlık sektöründe yepyeni bir dönemin başlayacağına da kesin gözüyle bakılmaktadır. Dünya çapında biyoyazıcılarla ilgili çalışmalar devam etmekte olup istenilen dokunun/organın oluşturulması ve kişiye özgü tasarımlar için umut vaat etmektedir. Bu konuda özellikle daha fazla sayıda kapsamlı ve kanıta dayalı çalışmaların yapılmasına gereksinim duyulmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Badylak, S.F., A.J. Russell, and M. Santin, Introduction: History of Regenerative Medicine, in: Strateg. Regen. Med., Springer New York, New York, NY, 2009. p. 1-13.
2. Murphy, S.V. and A. Atala, 3D bioprinting of tissues and organs. Nature Biotechnology, 2014. 32: p. 773-785.
3. Kul, H.H., Düşük Maliyetli 3 Boyutlu Biyo Yazıcı Tasarlanıp Gelistirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara: 2021.
4. Akbaba, A. and E. Akbulut, 3 Boyutlu Yazıcılar ve Kullanım Alanları. ETÜ Sentez İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi, 2021. 3: p. 19-46.
5. Taştekin Aksu, F., 3D (üç boyutlu) yazıcılar ve geleceğimiz (Doku ve organ üretimi ile gelecekte sonsuz yaşam mümkün olabilir mi?). Akademik Akıl, 2022.
6. Pusch, K., T.J. Hinton, and A.W. Feinberg, Large volume syringe pump extruder for desktop 3D printers. HardwareX, 2018. 3(49): p. 49-64.
7. Kılıç Ekici, Ö., Üç Boyutlu Baskı Teknolojisi ile Doku ve Organ Üretimi. TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi, 2018. p. 68-73.
8. Arslan, N., et al., Sağlıkta Gelişen Teknoloji: Üç Boyutlu Yazıcılar. Uluslararası 3B Yazıcı Teknolojileri ve Dijital Endüstri Dergisi, 2018. 2(2): p. 99-110.
9. Gross, B.C., et al., Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences. Analytical Chemistry, 2014. 86(7): p. 3240-53.
10. Sanayi 4.0. Ebso Araştırma Müdürlüğü Yayını. Ege Bölgesi Sanayi Odası, 2017.
11. Olla, P., Opening Pandora's 3D printed box. Technology and Society Magazine, 2015. 34(3): p. 74-80.
12. Sönmez, S., U. Kesen, and C. Dalgıç, 3 Boyutlu Yazıcılar. 6.Uluslararası Matbaa Teknolojileri Sempozyumu, 2018. p. 471-80.
13. Kuzu Demir, E.B., et al., Üç Boyutlu Yazdırma Teknolojilerinin Eğitim Alanında Kullanımı: Türkiye'deki Uygulamalar. Ege Eğitim Dergisi, 2016.

- 17(2): p. 481-503.
14. Aydın, L., S. Küçük, and H. Kenar, Doku Ve Organ Biyo Yazdırma Amaçlı 3b Biyo Yazıcı Tasarımı Ve Geliştirilmesi. Tıp Teknolojileri Ulusal Kongresi, 2015. p. 153-7.
 15. Şahin, K. and B.O. Turan, Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojilerinin Karşılaştırmalı Analizi. Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi, 2018. 2(2): p. 97-116.
 16. Gül, M., Biyomedikal Mühendisliğinde Kullanım Amaçlı 3d Yazıcı Geliştirilmesi. Uluslararası 3B Yazıcı Teknolojileri ve Dijital Endüstri Dergisi, 2018. 2(3): p. 85-92.
 17. Tüylek, Z., Biyomedikal Alanında Hızla İlerleyen Üretim Teknolojisi: 3D Yazıcılar. A. Ateş (Ed.), Her Yönüyle Mühendislik ve Mimarlık Araştırmaları, 2023: p. 111-44.
 18. Borello, J., et al., 3D printing a mechanically-tunable acrylate resin on a commercial DLP-SLA printer. Addit Manuf, 2018. 23: p. 374-80.
 19. Robles Linares-Alvelais, J.A., et al., Hydrostatic highpressure post-processing of specimens fabricated by DLP, SLA, and FDM: an alternative for the sterilization of polymer-based biomedical devices. Materials (Basel), 2018. 11(12): p. 2540.
 20. Ni, J., et al., Three dimensional printing of metals for biomedical applications. Materials Today Bio, 2019. 3: p. 100024.
 21. Çelik, İ., et al., Hızlı Prototipleme Teknolojileri Ve Uygulama Alanları. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2013. 31: p. 53-70.
 22. Bulat, F. and F.N. Başaran, 3B Yazıcılarla Tekstil Yüzeyi Tasarımında Fdm Yöntemi. M. Yılmaz (Ed.), Güzel Sanatlarda Güncel Akademik Çalışmalar, 2018: p. 124-139.
 23. Karagöz, İ., A. Danış Bektemir, and Ö. Tuna, 3B Yazıcı Teknolojilerindeki Kullanılan Yöntemler ve Gelişmeler Üzerine Bir Derleme. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2021. 9(4): p. 1186-1213.
 24. Demir, S., H.K. Sezer, and Özdemir V, Topolojik Nesnelerin Fdm (Ergiyik Biriktirerek Modelleme) Yöntemiyle Üretimi: Klein Şişesi Örneği. Uluslararası 3B Yazıcı Teknolojileri ve Dijital Endüstri Dergisi, 2018. 2:(2) p. 76-87.
 25. Çelik, K. and A. Özkan, Eklemeli İmalat Yöntemleri ile Üretim ve Onarım Uygulamaları. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2017. 5(1): p.

107-21.

26. Çoban Özkan, D., Hızlı Prototipleme Teknolojisinin Gelişimi, Çeşitleri ve İmalat Sektöründe Sağladığı Avantajlar. Mühendis ve Makine, 2019. p. 34-41.
27. Börklü, H. R., A.K. Yıldırım, and H.K. Sezer, Hızlı Prototip Oluşturmada Karşılaşılan Problemler ve Çözüm Önerileri. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2016. 4(4): p. 309-19.
28. Felek, S.Ö., Mimari Yapılarda 3 Boyutlu Yazıcıların Kullanımı. Uluslararası 3B Yazıcı Teknolojileri ve Dijital Endüstri Dergisi, 2019. 3(3): p. 289-96.
29. Kadry, H., et al., Digital light processing (DLP) 3D-printing technology and photoreactive polymers in fabrication of modified-release tablets. Pharmetaceutical Sciences, 2019. 135: p. 60-7.
30. Bozkurt, Y., H.Ö. Gülsoy, and E. Karayel, Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Tıbbi Ekipmanların Üretiminde Kullanımı. El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi, 2021. 8(2): p. 962-80.
31. Sürmen, H.K., Eklemeli İmalat (3b Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 2019. 24(2): p. 373-92.
32. Adamidis, O., S. Alber, and I. Anastasopoulos, Investigation into 3D printing of granular media. Physical Modelling in Geotechnics, Proceedings of the 9th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. CRC Press, London, 2018.
33. Karlsson J., et al., Characterization and comparison of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti–6Al–4V powder fractions. Journal of Materials Processing Technology, 2013. 213(12): p. 2109-18.
34. Altuğ, G.S. and H.Ö. Gülsoy, Elektron Demet Ergitme Yöntemi ile Titanyum Alaşımlarının Üretimi.
35. Cansızoğlu, Ö., Mesh structures with tailored properties and applications in hip stems, Thesis of Degree of Doctor of Philosophy, North Carolina State University, 2008.
36. Kruth, J.P., et al., Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting. Journal of Rapid Prototyp, 2005. 11(1): p. 26-36.
37. Yap C.Y., et al., Rewiew of selective laser melting:Materials and applications. Applied Physics Rewievs, 2015. 2(4): p. 1-20.
38. Özsoy, K. and B. Duman, Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği. Uluslararası 3B Yazıcı Teknolojileri ve Dijital

- Endüstri Dergisi, 2017. 1(1): p. 36-48.
39. Özer, G., Eklemeli Üretim Teknolojileri Üzerine Bir Derleme. NÖHÜ Müh. Bilim. Derg. 2020. 9(1): p. 606-21.
40. Başçı, Ü.G. and R. Yamanoglu, Yeni Nesil Üretim Teknolojisi: FDM ile Eklemeli İmalat. Uluslararası 3B Yazıcı Teknolojileri ve Dijital Endüstri Dergisi, 2021. 5(2): p. 339-52.
41. Demirtaş, T.T. and A.G. Karakeçili, Gen Tedavisi, Biyoyazıcılar Ve Doku Mühendisliğinde Geleceğe Yönelik Yaklaşımlar. Türkiye Klinikleri J Plast Surg-Special Topics, 2015. 4(3): p. 77-82.
42. Akkuş, H.G.N., B.E. Günaydın, and C.B. Üstündağ, Doku Mühendisliğinde 3 Boyutlu Biyo-Baskı İçin Biyofonksiyonel Mürekkepler. Uluslararası 3B Yazıcı Teknolojileri ve Dijital Endüstri Dergisi, 2020. 4(3): p. 285-94
43. Biswal, T., S.K. BadJena, and D. Pradhan, Sustainable biomaterials and their applications, Materials Today: Proceedings, 2020. 30(2): p. 274-82.
44. Sıvacı, K., E.E. Özgüvenç, and Y. Bozkurt, Biyomedikal Uygulamalarında Eklemeli İmalat Teknolojileri. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 2022. 27(1): p. 503-22.
45. Figueiro, R., et al., Braided corrugated textile vascular prosthesis and process of producing same, 2009.
46. Bülbül, A. İ. and S. Küçük, Üç Boyutlu Biyobasıma Bir Bakış ve Organ Basımı. Türkiye Klinikleri Sağlık Bilimleri Dergisi, 2020. 5(3): p. 702-18.
47. Javaid, M. and A. Haleem, 4D printing applications in medical field. Clinical Epidemiology and Global Health, 2018. 7(3): p. 317-21.
48. Özmen, E. and C. Ertek, Biomaterials Used in Additive Manufacturing Technologies and Biomedical Applications. GU J Sci, 2022. 10(4): p. 733-47.
49. Sheoran, A.J., et al., Bio-medical applications of additive manufacturing, Procedia Manufacturing, 2020. 51: p. 663-70.
50. Matai, I., et al., Progress in 3D bioprinting technology for tissue/organ regenerative engineering, Biomaterials, 2020. 226.
51. Cohen, D.L., et al., Additive manufacturing for in situ repair of osteochondral defects, Biofabrication, 2010. 2(3).
52. Das, S., et al., Bioprintable, cell-laden silk fibroin–gelatin hydrogel supporting multilineage differentiation of stem cells for fabrication of three-dimensional tissue constructs, Acta Biomaterialia, 2015. 11: p. 233-46.

53. . Xia, Z., S. Jin, and K. Ye, Tissue and organ 3D bioprinting, SLAS Technology, 2018. 23(4): p. 301-14.
54. Demir, K., et al., 3D yazdırma teknolojilerinin eğitim alanında kullanımı: Türkiye’deki uygulamalar. Ege Eğitim Dergisi, 2016. 17(2): p. 481-503.
55. Hurson, C., et al., Rapid prototyping in the assessment, classification and preoperative planning of acetabular fractures. Injury, 2007. 10: p. 1158-62.
56. Çelebi, A., H. Tosun, and A.Ç. Önçağ, Hasarlı bir kafatasının üç boyutlu yazıcı ile imalatı ve implant tasarımı. International Journal Of 3d Printing Technologies And Digital Industry, 2017. 1(1): p. 27-35.
57. Dai, X, et al., 3D bioprinted glioma stem cells for brain tumor model and applications of drug susceptibility. Biofabrication, 2016. 8(4).
58. Tüylek, Z., 3D Baskı Yöntemleri ile Biyomedikal Uygulamalar. A. Ateş (Ed.), Her Yönüyle Mühendislik ve Mimarlık Araştırmaları, 2023: p. 77-110.
59. Sürmen, H.K., 3d Baskı Yöntemi ile Hastaya Özel Ortez İmalatı, 4. Uluslararası 3d Baskı (Eklemeli İmalat) Teknolojileri Ve Dijital Endüstrisi Kongresi, 2019. p. 1388-95.
60. Palousek, D., et al., Pilot study of the wrist orthosis design process, Rapid Prototyping Journal, 2014. 20(1): p. 27-32.
61. Kim, H. and S. Jeong, Case study: Hybrid model for the customized wrist orthosis using 3D printing. Journal of mechanical science and technology, 2015. 29(12): p. 5151-6.
62. Gerrand, C., Three dimensional printing: A clinician’s experience. The Bulletin of the Royal College of Surgeons of England, 2014. 96(7): p. 230-1.
63. Sun, Z. and D. Liu, A systematic review of clinical value of three-dimensional printing in renal disease. Quant Imaging Med Surg., 2018. 8(3): p. 311-25.
64. Souzaki, R., et al., Three-dimensional liver model based on preoperative CT images as a tool to assist in surgical planning for hepatoblastoma in a child. Pediatric Surgery International, 2015. 31(6): p. 593-6.
65. Tominaga, T., et al., Usefulness of threedimensional printing models for patients with stoma construction. Case Rep Ingastroenterol, 2016. 10(1): p. 57-62.
66. Van Koevering, K., et al., Antenatal threedimensional printing of aberrant facial anatomy. Pediatrics, 2015. 136(5): p. 1382-5.
67. Appavuravthe, E.Z., A. Altın, and K. Çetinkaya, 3 Boyutlu Baskı

Teknolojisinin Hayatımızı Değiştirdiği 10 Alan. 4. Uluslararası 3d Baskı (Eklemeli İmalat) Teknolojileri Ve Dijital Endüstrisi Kongresi, 2019. p. 1037-52.

68. Advincula, R.C., et al., Additive manufacturing for COVID-19: devices, materials, prospects, and challenges, MRS Communications, 2020. 10(3): p. 413-27.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Volkan BAKİ

Eğitim Bilgileri

Lise : Küçükçekmece Gazi Anadolu Lisesi

Lisans : Karabük Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği

Yabancı Dil ve Düzeyi : İngilizce (Intermediate)

İş Deneyimi:

Kalli Teknoloji A.Ş (2021 - Devam, Ar-Ge Mühendisi)

Seravia Aviation (2020-2021, Tarım Dronu Ar-Ge, Mühendis)

Başakşehir Çam ve Sakura Şehir Hastanesi (2020-2020, Biyomedikal Mühendisi)