T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEVRE BASKISI İÇİN 3 BOYUTLU YAZICI TASARIMI

Ali TOPRAK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ali Rıfat BOYNUEĞRİ

Temmuz, 2021

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEVRE BASKISI İÇİN 3 BOYUTLU YAZICI TASARIMI

Ali TOPRAK tarafından hazırlanan tez çalışması 01.07.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Ali Rıfat BOYNUEĞRİ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Ali Rıfat BOYNUEĞRİ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Ozan ERDİNÇ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Sıtkı GÜNER, Üye
Eskişehir Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ali Rıfat BOYNUEĞRİ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Baskı Devre Tasarımı için 3 Boyutlu Yazıcı Tasarımı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ali TOPRAK

İmza

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmasının hazırlanması için, bana her zaman destek olan, önerileri, bilgi, birikim, deneyimleriyle yol gösteren ve ışık tutan danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali Rıfat BOYNUEĞRİ' ye çok teşekkür ederim.

Ayrıca, kalıp tasarım ve hesaplama konusunda destek veren Sayın Makine Mühendisi Tahir Utku NOĞAY'a teşekkürlerimi sunarım

Son olarak da bu tezin tamamlanmasında bana desteğini esirgemeyen aileme, manevi destek veren Sayın Plt. Tğm. Ferhat ODABAŞI'ya, Sayın Müh. Tğm. Mehmet KARAMAN'a en içten sevgi, saygı ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Ali TOPRAK

İÇİNDEKİLER

KISALTMA LİSTESİ vii

ŞEKİL LİSTESİ ix

TABLO LİSTESİ xii

ÖZET xiii

ABSTRACT xv

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1

1.2 Tezin Amacı 2

1.3 Hipotez 3

2 PCB ÜRETİM PROBLEMLERİ, GÖRÜNTÜ İŞLEME VE 3BY TEKNOLOJİSİ 5

2.1 3BY, PCB Üretim Metotları, İletken, Deri Etkisi ve Lehim Problemleri 5

2.1.1 İletken Mürekkep 8

2.1.2 İnk Jet Yazıcı 12

2.1.3 Deri Etkisi 13

2.1.4 Soğuk Lehim Problemleri 14

2.2 Görüntü İşleme ve Renk Uzayı 16

2.2.1 RGB Renk Uzayı 17

2.2.2 HSV Renk Uzayı 17

2.2.3 PCB Yaklaşımı 18

2.2.4 Piksel Noktası 19

2.2.5 Öklid Mesafesi 20

2.3 Üç Boyutlu Yazıcı Üretim Teknikleri 21

2.3.1 Vat Fotopolimerizasyon 22

2.3.2 Malzeme Ekstrüzyonu 24

2.3.3 Malzeme Jeti 24

2.3.4 Bağlayıcı Jeti 25

2.3.5 Levha Laminasyon 26

2.3.6 Toz Yatağı Füzyonu (TYF) 26
2.3.7 Yönlendirilmiş Enerji Birikimi (YEB) 29
2.3.8 Kaynaştırılmış Birikim Modelleme (KBM) 30
2.4 Üç Boyutlu Yazıcı Ham Maddeleri 31
2.4.1 ABS 31
2.4.2 PLA 32
2.4.3 PVA 32
2.5 Üç Boyutlu Yazıcı Endüstrisinde Kullanılan Malzemeler 32
2.5.1 Metaller 33
2.5.2 Polimerler 33
2.5.3 Seramikler 34
2.5.4 Kompozitler 35
2.5.6 Akıllı Malzemeler 35
2.5.7 Özel Malzemeler 35
2.6 Üç Boyutlu Yazıcının Üretim Teknolojisindeki Uygulama Alanları 36
2.6.1 Uzay Endüstrisi 36
2.6.2 Otomotiv Endüstrisi 36
2.6.3 Gıda Endüstrisi 37
2.6.4 Sağlık ve Medikal Endüstrileri 38
2.6.5 Mimarlık ve İnşaat Endüstrisi 39
2.3.6 Kumaş ve Moda Endüstrisi 39
2.3.7 Elektrik-Elektronik Endüstrisi 40
3 ÜÇ BOYUTLU YAZICI TASARIMININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ 41
3.1 Üç Boyutlu Yazıcı Tasarım Kriterleri 41
3.1.1 Yöntem 41
3.1.2 Mekanik Seçimler 42
3.1.3 Elektronik ve Mekanik Ekipmanlar 43
3.1.4 Mekanik Tasarımın Planlanması 48
3.1.5 Görüntü İşleme 55
4 DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE TEST SONUÇLARI 59
4.1 Üç Boyutlu Yazıcı ile Baskı Devre Tasarımı 59
4.2 Ayarlanmış Dirençli Yol Tasarım, Analizi ve Karşılaştırılması 63

4.2.1 Deney Tanıtımı 66
4.2.2 Deneysel Sonuçlar 68
5 SONUÇ VE ÖNERİLER **86**
KAYNAKÇA **89**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **107**

KISALTMA LİSTESİ

ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
cPDMS	Karbon Polidimetilsiloksan
Dİİ	Dijital Işık İşleme
DMLS	Doğrudan Metal Lazer Sinterleme
EIE	Elektron Işınlı Ergitme
EÜ	Eklemeli Üretim
GP	Gruplandırılmış Planlama
İDM	İşlevsel Dereceli Malzemeler
KBM	Kaynaştırılmış Birikim Modelleme
KFÜ	Kaynaştırılmış Filament Üretimi
LNİ	Laminasyonlu Nesne İmalatı
PCB	Printed Circuit Board
PDMS	Polidimetilsiloksan
PE	Polietilen
PEEK	Polietereterketon
PETG	Polietilen Tereftalat
PLA	Polilaktit
PMMA	Polimetil Metakrilat
PP	Polipropilen
PVA	Polivinil Alkol
RGBA	Renkli Görüntü Bölümleme Algoritması
SBP	Sıraya Bağlı Planlama
SLA	Stereolitografi
SSAÜ	Sürekli Sıvı Arayüz Üretimi
SLE	Seçici lazer Ergitme
SLS	Seçici Lazer Sinterleme
SLSİ	Stereolitografik Seramik İmalatı
TYF	Toz Yatağı Füzyonu
UKİ	Ultrason Katkılı İmalat
YBM	Yapı Bilgi Modellemesi
YEB	Yönlendirilmiş Enerji Birikimi
YEP	Yüksek Etkili Polistiren
YYA	Yüksek Yoğun Ara bağlantı

YYP	Yüksek Yoğun Polietilen
3BY	3 Boyutlu Yazıcı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1 RGB renk küpü ve köşe koordinatları 17
Şekil 2. 2 HSV renk uzayı ve koni üzerindeki açısal konumları 18
Şekil 2. 3 PCB görüntüsü üzerinden PCB resim dosyası oluşturma akışı 19
Şekil 2. 4 Çözünürlüğe bağlı RGB dağılımı 20
Şekil 2. 5 Üç boyutlu yazıcı üretim teknikleri 21
Şekil 2. 6 Stereolitografi düzeneği 22
Şekil 2. 7 Dijital ışık işleme düzeneği 23
Şekil 2. 8 Sürekli sıvı arayüz üretimi düzeneği 24
Şekil 2. 9 Malzeme ekstrüzyonu düzeneği 24
Şekil 2. 10 Bağlayıcı jeti düzeneği 25
Şekil 2. 11 Levha laminasyonu düzeneği 26
Şekil 2. 12 Toz yatağı füzyonu düzeneği 27
Şekil 2. 13 SLS düzeneği 27
Şekil 2. 14 DMLS düzeneği 28
Şekil 2. 15 SLE düzeneği 29
Şekil 2. 16 EIE düzeneği 29
Şekil 2. 17 YEB düzeneği 30
Şekil 2. 18 KBM düzeneği 30
Şekil 3. 1 3BY Kontrol kartı 43
Şekil 3. 2 3BY'nin x, y, z eksenlerine ait step motorlar 44
Şekil 3. 3 Eksenel sınır anahtarı 45
Şekil 3. 4 Isıtıcı yatak ve mekanik oturtma yeri 45
Şekil 3. 5 Sıcaklık kontrolü termistörü 46
Şekil 3. 6 Fonksiyonel LCD ekran 47
Şekil 3. 7 Step motor sürücü kartı 47
Şekil 3. 8 Güç kaynağı mekanik kalıp tasarımı 48
Şekil 3. 9 3BY'nin bilgisayar destekli tasarımı 48
Şekil 3. 10 Rod, eksenel miller, mekanik iskelet yapısı 50
Şekil 3. 11 Step motor ve yatak yeri 51
Şekil 3. 12 Z eksen milleri 52
Şekil 3. 13 Rulmanlar ve yatak üzerine yerleşimi 53

Şekil 3. 14 Triger kayışı 54
Şekil 3. 15 32 dişli kasnak tasarımı 55
Şekil 3. 16 Ekstruderin üç boyutlu tasarımı 55
Şekil 3. 17 Görüntü yakalama, işleme ve .Gcode veri gönderimi akış diyagramı ... 57
Şekil 4. 1 Görüntü işleme adımı 59
Şekil 4. 2 3BY ile PCB tasarım adımları blok şeması 60
Şekil 4. 3 3BY ile tasarlanan batarya şarj devresi kartı 60
Şekil 4. 4 İletken yollar arasındaki referans uzaklıklar 62
Şekil 4. 5 3BY ile tasarlanan gümüş iletken ve ayarlanmış karbon dirençli yollar 63
Şekil 4. 6 Deney düzeneği 66
Şekil 4. 7 Frekans, sıcaklığa bağlı empedans ve direnç ölçümleri blok şeması 67
Şekil 4. 8 Frekansa bağlı empedans değişimi 69
Şekil 4. 9 Frekansa bağlı 0-1 kHz arasındaki direnç değişimleri 69
Şekil 4. 10 Frekansa bağlı endüktif ve kapasitif reaktans değişimi 70
Şekil 4. 11 1 kHz- 10MHz arası empedans ve endüktif reaktans değişimi..... 70
Şekil 4. 12 1 kHz- 10MHz arası direnç ve kapasitif reaktans değişimi 71
Şekil 4. 13 100 Ω, 1 kΩ ve 100 kΩ referans değerlerine göre direnç değişimi 72
Şekil 4. 14 0 Hz ve 10 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi 73
Şekil 4. 15 50 Hz ve 10 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi..... 73
Şekil 4. 16 100 Hz ve 10 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi 74
Şekil 4. 17 5 kHz ve 10 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi..... 74
Şekil 4. 18 100 kHz ve 10 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi.... 75
Şekil 4. 19 10 MHz ve 10 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi..... 75
Şekil 4. 20 0 Hz ve 100 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi..... 76
Şekil 4. 21 50 Hz ve 100 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi 76
Şekil 4. 22 100 Hz ve 100 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi ... 77
Şekil 4. 23 5 kHz ve 100 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi 77
Şekil 4. 24 100 kHz ve 100 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi. 78
Şekil 4. 25 10 MHz ve 100 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi .. 79
Şekil 4. 26 0 Hz ve 1 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi 79
Şekil 4. 27 50 Hz ve 1 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi..... 80
Şekil 4. 28 100 Hz ve 1 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi 80
Şekil 4. 29 5 kHz ve 1 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi..... 81

Şekil 4. 30 100 kHz ve 1 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi.... 81
Şekil 4. 31 10 MHz ve 1 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi..... 82
Şekil 4. 32 0 Hz ve 100 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi 83
Şekil 4. 33 50 Hz ve 100 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi.... 83
Şekil 4. 34 100 Hz ve 100 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi. 84
Şekil 4. 35 5 kHz ve 100 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi.... 84
Şekil 4. 36 100 kHz ve 100 kΩ referans değerindeki direnç değişimi 85
Şekil 4. 37 10 MHz ve 100 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi 85

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Polimer bazlı gümüş ve karbon mürekkebin direnç değerleri 8
Tablo 2.2 İletken polimerlerin katkı malzemelerine göre iletkenlik değerleri 11
Tablo 4.1 Ayarlanmış direnç tasarımı kriterleri..... 67

ÖZET

Devre Baskısı için 3 Boyutlu Yazıcı Tasarımı

Ali TOPRAK

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali Rıfat BOYNUEĞRİ

3 Boyutlu Yazıcı (3BY) teknolojisi diğer endüstrilerde olduğu gibi Elektrik-Elektronik endüstrisinde de kullanılarak ilgi çekici bir teknoloji haline gelmiştir. Elektronik sektörünün ilerlemesi, 3BY ile Elektronik sektörü arasında güçlü bir bağın oluşmasına zemin hazırlamıştır. Oluşturulan bu bağ, elektronik sektörüyle 3BY'nin karşılıklı gelişimlerini hızlandırmıştır. Bu gelişim sürecinde 3BY'ler elektronik cihazların üretiminde rol almıştır. Bu üretimlerin dışında elektronik komponentlerinin üretimlerinde de çalışmalar yapılmaktadır. Fakat bu çalışmalar tek başına yeterli olmamıştır. Çünkü cihazların içerisinde elektronik devre kartları bulunmaktadır. Bu elektronik devre kartları cihazın çalışmasını ve belli bir görevi gerçekleştirmesini sağlamaktadır. Elektronik kartlar üzerinde devre yolları ve komponentler bulunmaktadır. Bundan dolayı tek başına komponent üretimi bir elektronik kartın çalışması için yeterli olmamıştır. Bu yüzden komponent üretim sürecinden önce bu komponentleri, uygun bir baskı devre tasarımı kartına yerleştirilmesi gerekmektedir. Devamında baskı devre tasarımının oluşturulması fikri ortaya çıkmıştır. Bu ihtiyacı gidermek için baskı devre tasarımı için 3BY tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu tezde 3BY teknolojisi ile baskı devre tasarımı gerçekleştirilmiştir. 3BY ile iki farklı deney yapılarak deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Birinci deneyde üretilen 3BY ile örnek test devresi olarak seçilen batarya

şarj devresi imal edilmiştir. Bu devre üzerindeki yolların hassasiyeti değerlendirilmiştir. Ayrıca düğüm noktalarında oluşan sıcaklık oluşumundan bahsedilmiştir. İkinci deneyde ise ayarlanmış dirençli yol tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde karbon, gümüş bazlı iletken ve konvansiyonel yollar ile üretilen devre yolları iki farklı üretim tekniği olan konvansiyonel ve 3BY üretim tekniği açısından karşılaştırılmıştır. Ayarlanmış karbon direnç tasarımında deri etkisine karşı 71% performans sağlanmıştır. Ayrıca direnç dizgi esnasında hem üretim süresinden hem de direnç maliyetinden tasarruf sağlanmıştır. 10 ohm referans direnç değerinde konvansiyonel iletken ile direnç farkı 0,05 ohm olup ihmal edilebilecek seviyeye düşürülmüştür. 1 MHz 'de gümüş bazlı iletken konvansiyonel sisteme göre 55,4 ohm daha düşük dirence indirgenmiştir. Tasarlanan 3BY sayesinde prototip baskı devre tasarımı üretim süresi ve maliyeti azaltılmış olup konvansiyonel sistemlerde oluşan lehim problemleri, gerber dosyasının aktarılması gibi zorluklara karşı çözümler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: 3BY, PCB hızlı prototipleme, Ayarlanmış direnç tasarımı, İletken baskı, 3BY teknolojisi.

ABSTRACT

Three Dimensional Printer Design for Printing Circuit Board Design

Ali TOPRAK

Department of Electrical Engineering

Master of Science Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Ali Rıfat BOYNUEĞRİ

Three-Dimensional Printer (3DP) technology has become an interesting technology by being used in the Electrical-Electronics industry as well as in other industries. The progress of the electronics industry has paved the way for a strong bond between 3DP and the Electronics industry. This bond created has accelerated the mutual development of the electronics industry and 3DP. In this development process, 3DPs have played a role in the production of electronic devices. Apart from these productions, studies are also carried out on the production of electronic components. But these studies alone were not enough. Because there are electronic circuit boards inside the devices. These electronic circuit boards enable the device to work and perform a certain task. There are circuit paths and components on electronic cards. Therefore, the production of components alone was not sufficient for the operation of an electronic card. Therefore, these components must be placed on a suitable printed circuit board before the component manufacturing process. Subsequently, the idea of creating a printed circuit design emerged. To meet this need, 3DP design was carried out for printed circuit design. In this thesis, a printed circuit design was carried out with 3DP technology. Experimental results were obtained by performing two different experiments with a 3DP. The battery charging circuit selected as the sample test circuit was manufactured with the 3DP produced

in the first experiment. The sensitivity of the paths on this circuit is evaluated. In addition, the temperature formation at the nodes is mentioned. In the second experiment, tuned resistive path design was carried out. In this experiment, circuit paths produced with carbon, silver-based conductor and conventional paths were compared in terms of conventional and 3DP production techniques, which are two different production techniques. The resistance difference between the conventional conductor and the 10-ohm reference resistance value is 0.05 ohm and it has been reduced to a negligible level. At 10 MHz, the silver-based conductor is reduced to 55.4 ohms lower resistance than the conventional system. Thanks to the designed 3BY, the production time and cost of prototype printed circuit design have been reduced and solutions have been presented against difficulties such as soldering problems and transferring gerber files in conventional systems.

Keywords: 3DP, PCB rapid prototyping, Adjusted resistance design, Conductive printing, 3D printing technology.

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

3BY teknolojisindeki ilerlemeler birçok endüstriye yön vermektedir. Bu endüstriler inşaat, elektrik-elektronik, kumaş, moda, biyomedikal, diş ve tıp endüstrileridir. Bu endüstrilerde 3BY üzerinde kullanım alanına göre üretim tekniği ve metotları bakımından bir takım yapısal değişiklikler yapılarak endüstriyel amaçlara uygulanabilir. Uygulama alanı değişikliklerinde eksik kalan prosesler geçmişteki uygulama tekniklerinden faydalanılarak üzerine eklenebilir. Eklemeli yöntemler ile üretilen teknolojiler önceki teknolojilere göre birçok malzemeyi bir arada baskı sonucu tutabilir. 3BY teknolojisi geçmiş yıllarda basit bir düzenek iken günümüz teknolojisinde kompleks geometriler basılabilir hale gelmiştir. Bu sayede daha hassas katmanların üretilebilme yeteneği arttırılmıştır. 21.yy' nin başlarında hem elektronik endüstrisinin hızlı bir şekilde ilerlemesi hem de üretim maliyetinin düşmesi ile 3BY teknolojisi altın zamanlarını yaşamıştır. Endüstriyel teknolojik kullanım alanlarında metal ve polimer bazlı malzemeler ön plana çıkarak kalıp üretimlerine katkıda bulunulmuştur. Ayrıca 20.yy'da yapılan çalışmalardaki çoklu proses ve çoklu aşamalar günümüz üretim proseslerin de çoklu proses tek aşamada birleştirilmiştir. Bu noktada farklı türdeki malzemeler birleştirilerek yeni bir model ortaya çıkarılabilir. Üretim proseslerindeki malzemelerin 3BY teknolojisine uygulanabilirliği kullanılan hammaddeye göre şekillendirilebilir. Bu sebepten ötürü malzeme biliminin gelişimi 3BY teknolojisine ışık tutmaktadır. Elektrik elektronik sektöründe baskı devre tasarımı fikri yakın zamanda ortaya atılmıştır . Fakat bu devre tasarımında metal ergitme yöntemi kullanılmıştır. Konvansiyonel sistemlerde oluşan deri etkisi, lehim, gerber dosyasının aktarımı sırasında oluşan problemler baskı devre tasarımı için önemli kriterlerdir. Literatürde deri etkisini en aza indirecek üretim deseni belirlenmiştir. Üretim deseni katmanlı içi boş yapıdır. Bu desen 3BY teknolojisi baskı devre tasarımı doğrultusunda araştırılmıştır. Ayrıca iletken mürekkebin biriktirilebilme özelliğine sahip olması açısından gümüş nano

parçacığın uygulanabilir olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Konvansiyonel baskı devre tasarımlarında oluşan lehim problemleri irdelenmiştir. Lehim problemlerinin devre üzerindeki komponentlerin nominal çalışma koşullarını etkilediğinden konvansiyonel baskı devre tasarımları yetersiz kalmıştır. Konvansiyonel sistem ile oluşturulan baskı devre metotları ile önceki araştırmalardaki üretim metotlarının eksiklikleri belirlenmiştir. Önceki metotlarda daha çok üretim prosesi ve yazılım algoritması uzun sürmekteyken konvansiyonel sistemlerde proseslerin uzun süren aşamaları ve gerber dosyasının her prosese aktarılması gibi zorlukların meydana gelmesi gibi problemler meydana gelmektedir. Literatürde gerber dosyasının aktarımı esnasında oluşan problemlere çözüm olarak sunulan görüntü işleme tekniği araştırılmıştır. Bu teknikte renkler katmanlara ayrılarak incelenmiştir. Her bir renk tonunun farklı bir renk kodu vardır. Bu renk kodları sayesinde herhangi bir piksel noktasındaki rengin bilgileri yakalanabilir. Yakalanan piksel noktalarının konumları birleştirilerek vektörel olarak saklanılabilir. 3BY teknolojisinin hızlı gelişimi endüstri 4.0'ı daha ileri seviyelere taşıyarak elektronik endüstrisindeki baskı devre tasarımını ve komponent üretimini birleştirerek prototip üretimlerinin bütünleşmesini sağlar.

1.2 Tezin Amacı

Konvansiyonel elektronik devre kart tasarımları için belirlenen işlemler oldukça uzun süreç almaktadır. Ayrıca konvansiyonel üretim teknikleri ile üretilen bu kartlar seri üretime geçiş aşamasına kadar yüksek maliyetlere ulaşmasına neden olmaktadır. Bu yöntem ile üretilen kartlar deney imkânı açısından tekrarlanabilir olma koşulunu sağlamadığından üretim sürecine tekrar girmesine neden olup fazladan bir maliyetin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Deney imkânının kısıtlılığı vakit kaybına ve devamında teknolojik ilerlemenin yavaşlamasına neden olmaktadır.

3BY teknolojisi birçok endüstriyel alanda kullanılmaktadır. Bu kullanım elektronik teknolojisinin ilerlemesine katkıda bulunmuştur. Fakat günümüzde elektronik kart üretimi oldukça uzun işlemler sürecinden geçmektedir. Bu işlemler zaman kaybına neden olduğundan hızlı prototipleme için bu tezde 3BY teknolojisi ile elektronik kart tasarımı üreten bir cihaz üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu cihazın ürettiği kart

tasarımlarının deneysel analizleri ve doğruluk payları incelenmiştir. Örnek test devresi olarak batarya şarj devresi seçilerek kartın çalıştırılması sağlanmıştır. Elektronik kart üretiminin her aşaması 3BY ile oluşturulmuştur. Deneysel analizler ise empedans analizörü ve thermocouple ölçüm cihazları kullanılarak yapılmıştır. Ayarlanmış dirençli yol tasarımında ise başlangıçta üretilen devredeki yollardan referans yol seçilerek direnç tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu yolların testinde empedans analizörü kullanılarak empedans değerleri ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümünde ise thermocouple kullanılarak frekans sabit tutulup sıcaklık değişimine bağlı direnç değişimleri ölçülmüştür. Deneylerin gerçekleştirilmesinde konvansiyonel ve 3BY üretim teknikleri arasında karşılaştırma yapılarak üretim modellerinin avantajları ve dezavantajları karşılaştırılmıştır. Tezin amacı doğrultusunda yapılan bu çalışmalar ile hem 3BY tarafından üretilen bu kartlar hem de 3BY'nin güvenirliliği, maliyeti ve verimliliği test edilmiştir.

1.3 Hipotez

Literatürde konvansiyonel baskı devre tasarımlarında ve üretim hatlarında birçok problem mevcuttur. Başlıca problemler, prototip üretim süresi uzun olması, buna bağlı olarak deneysel çalışmaların ve teknolojinin yavaş ilerlemesi, ilk basım maliyetlerinin oldukça pahalı olması, deri etkisi ve sıcaklık problemleri, üretim aşamalarının uzun olması buna bağlı hataların meydana gelmesi, ilgili proseslerdeki lehim havuzunda oluşan ağlar, sıçramalar, soğuk lehim, lehim taşı gibi sorunların oluşması , gerber dosyasının ilgili proseslere aktarılma zorluğu, dizgi esnasında direnç maliyeti ve dizgi süresinin uzaması gibi problemler vardır. Çoklu üretim aşamalarını birleştirerek tek aşamalı çoklu prosesli bir 3BY tasarlayarak baskı devre tasarımında üretim süresini düşürmeyi amaçlıyoruz. Ayrıca 3BY ile baskı devre tasarımında gümüş nano parçacık hammadde kullanarak baskı devredeki elektriksel bağlantılar kullanarak hem iletkenliği hem de tamamen lehim olmadan ısıtma ile komponentlerin tutunmasını ve bu bağlantıların sıcaklık açısından test ederek bord malzemesi olarak ilk etapta Polilaktikasit (PLA) sonrasında yüksek sıcaklıkta Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) kullanmayı planlıyoruz. Ayarlanmış karbon direnç tasarlayarak komponent maliyetinden, dizgi süresinden tasarruf etmeyi amaçlıyoruz. Konvansiyonel sistemlerde oluşan gerber dosyasının aktarılması problemini ise dijital ortamda oluşturulan görsel formatta olan devre

kartı üzerinde görüntü işleme tekniği ve bilgisayar ile 3BY arasında seri haberleşme protokolü veri aktarımını kullanarak çözmeyi planlıyoruz.

2

PCB ÜRETİM PROBLEMLERİ, GÖRÜNTÜ İŞLEME VE 3BY TEKNOLOJİSİ

2.1 3BY, PCB Üretim Metotları, İletken, Deri Etkisi ve Lehim Problemleri

3BY, Charles Chuck Hull tarafından 1986 yılında keşfedilmiştir. Keşfedilen bu yazıcı Stereolitografi (SLA) makinesidir [1]. 1989 yılında ise Scott Crump tarafından Kaynaştırılmış Birikim Modelleme (KBM) icat edilmiştir [2]. Scott Crump'ın eşi Lisa Crump 1989 yılında Stratasys Co. Ltd. kurarak eşi Scott Crump ile 3BY ile hızlı prototipleme alanında yoğunlaşmışlardır [3]. Diğer bir yöntem olan Seçici Lazer Sinterleme (SLS) Carl Deckard tarafından 1988 yılında icat edilmiş olup U.S patent 5,597,589 olarak yayımlatılmıştır[4]. Seçici Lazer Eritme (SLE) 2007 yılında Reprap projesinde ortaya çıkmıştır [5]. Kaynaştırılmış Filament Üretimi (KFÜ) üretim tekniğinde kendi parçalarını üretip kendisinin aynısını oluşturabilen bir üç boyutlu yazıcı üretebilmektedir. KFÜ yasal gerekçeler nedeniyle Stratasys' in icat ettiği KBM işleminin ismine farklı bir seçenek olarak verilmiş bir isimdir [6].

3BY'ler piyasaya 1995 yılında sürüldü. İlk kez yüksek kalitedeki çözünürlüğe sahip ürünler üreten üç boyutlu yazıcı 1996 yılında Z Corporation tarafından tasarlandı. 21. yüzyıldaki teknolojik gelişmelerin üretim maliyetlerindeki düşüş sebebiyle 3BY'ler geniş bir pazara ulaşmıştır. Açık kaynak kodlara sahip olan yazıcılar Regrap ismiyle 2007 yılında ilk kez piyasaya sürülmüştür. Kodların açık kaynaklı olması 3BY'lerin gelişmesinde ciddi rol oynamıştır. 2008 yılında Object Geometries şirketi eş zamanlı olarak farklı tür malzemeler kullanarak ürün üretebilen Connex500 cihazını üretmeyi başardı [7,8]. 2009 yılında ve sonrasında ilk etaplarda sanayi ağırlıklı kullanılmasına rağmen üç boyutlu yazıcılar Makerbot ve 3D Systems şirketlerinin geliştirmiş olduğu Cubify modelleriyle evlerde de kullanılabilir duruma gelmiştir [9,10]. 2020 yılında 3BY'lerde kendi türünün ilk yazıcısı olan Nano Dimension şirketinin üretmiş olduğu Dragonfly üç boyutlu yazıcısı, 3 boyutlu baskıyı metal ve polimerleri birleştirerek baskı devre tasarımı (PCB) kartları üretebilmektedir. Bu uygulamada Eklemeli Üretim (EÜ) teknolojisi kullanılmıştır

[11,12]. Ayrıca PCB üzerindeki iletken yollar için AgCite tabanlı gümüş nano parçacıklardan oluşturulan iletken mürekkep kullanılmıştır [13,14]. 3BY'lerde diğer bir üretim olan Voxel8 Dr. Jennifer A. Lewis liderliğinde üretilmiştir [15,16]. 3 Boyutlu elektronik yazıcı olan Voxel8 dünyanın ilk, birden çok malzemeyi birleştirerek ürün üretebilen yazıcısıdır. Ayrıca birbirleriyle ilişiği olmayan çift ekstruder'e sahiptir. Bu sayede aynı anda iki ekstruder kullanılarak Polilaktit (PLA) filamenti ve gümüş tabanlı iletken mürekkep kullanılabilmektedir [17].

Gelişen teknoloji beraberinde 3BY'lerin uygulama alanlarını geniş bir ölçüde arttırmaktadır. 3BY havacılık, uzay ve otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır [18]. Bu alanlarda kullanılmasının nedeni bu teknolojilere hızlı prototip oluşturabilme imkânı sağlamasıdır. 3BY baskı devre kart tasarımında da teknolojiye katkı sağlamaktadır. 3 boyutlu elektronik yazıcılarda iletken filament kullanılarak baskı devre tasarımı oluşturulabilir [19]. Aynı zamanda pasif devre elemanları olan endüktans iletken direnç ve kondansatör gibi komponentlerin oluşturulmasında iletken mürekkep filament haline getirilerek kullanılabilir. Bu sayede 3BY ile devre elemanlarının ve devre kartının basılması sağlanabilir [20,21]. Bu teknolojik üretim seviyelerinin bir kısmını yapabilen 3BY 2016 yılında Voltera V-One modeli ile üretilmiştir. Bu 3BY devre kartı üzerinde yol katmanlarını ve delikler arası bağlantı yapabilmektedir. Kart tasarımlarında Polietilen Tereftalat (PETG) substratı devre kartında bord kullanılmıştır. Kartın yüzey yapısını bozmayan, bir saatte ortalama sıcaklık 100°C olarak belirtilmiştir [23].

1920 yıllarında yaygınlaşan prototip PCB tasarımları, bu dönemde yalıtkan üzerine iletken mürekkep kullanılmasıyla elektrik bağlantıları gerçekleştirilmiştir [24]. Fakat bu teknikte tek katmanlı PCB tasarlanabildiğinden devre tasarımlarında yeterli olmamıştır. 1940'lı yıllarında bakır folyo kullanılarak kaplanmış deliklere sahip çift taraflı PCB'ler üretilerek uygulama aralığı genişletilmiştir [25]. Bu PCB yapısında board olarak cam kullanıldığından yapısal olarak daha basit projeler için kullanılabilirdir. Kompleks projelerde kullanılmak üzere, 1950 ve 1960 yılları arasında hantal olan PCB yapısını daha rijit zemine oturtturmak için taban malzemesi olarak çeşitli reçineler ve diğer uyumlu malzemeler eklendi [26]. Baskı plakası olarak prototip üretimlerde çinko levha ofset baskı makinesi kullanıldı. Fakat bu yöntemlerde katman yapısı yeterli değildi.1960'lı yılların başında çok

katmanlı PCB yapısına geçildi [27]. Bu PCB oluşturulurken devre iletken yolları vellum yöntemi ile üretildi. Bu tasarımda ilk defa sıcak hava lehimleme yöntemi kullanıldı. Bu tasarımın prototipi iki saatte uzman kişiler tarafından tamamlandı.1980'lerde katmanların artışından dolayı PCB boyutunun küçültülmesi üzerine gidilerek alandan ve üretim süresinden kazanç sağlandı [28]. Sonrasında, Gerber dosyasının aktarımı ilk olarak RS-274-D, sonrasında ve günümüz dünyasında en yaygın olarak kullanılan RS-274-X formatı ile sağlandı [29]. RS-274-X'in dezavantajı ise PCB tasarımın tamamını, tasarım alanından üretim alanına aktarma kabiliyetine sahip olmamasıdır. 1990'larda PCB katmanlarının artması nedeniyle sertlik özelliği belirmişti bu durumu engellemek için esnek PCB'ler Yüksek Yoğun Ara bağlantı (YYA) yöntemiyle mikro yol teknolojisi kullanılarak tasarlanmaya başlandı [30].2000'li yıllardan itibaren PCB endüstrisi hızla gelişim kaydederek 2010 yılından itibaren her katman ara bağlantısı prosesi ile katmanlar arası ara bağlantılar artmış, yollar arası mesafeler daha azalmış ve çok katmanlı kompleks devreler için kullanılabilir bir hal almıştır. PCB tasarımlarının üretim hattı ile ilgili metotları sırasıyla Gruplandırılmış Planlama (GP), ve Sıraya Bağlı Planlama (SBP), konvansiyonel metottur [31]. GP metodu ile PCB tasarımları ikiye gruplandırılır ve ilk grupta ortak bileşenler ayrılır. İkinci grupta ise üretim süreci dört aşamada gerçekleşir. Bunlar; ortak bileşenlerin kurulması, gruptaki tüm PCB'ler üzerinde ortak bileşenlerin montajı, artık bileşenlerin kurulması ve artık bileşenlerin her bir PCB üzerinde ayrı ayrı montajı şeklindedir [32]. Bu metottaki problem üretim süresinin uzun olmasıdır. SBP metodunda sezgisel verimliliği arttırmak için güçlü bir algoritma geliştirilmiştir [33]. Ayrıca iki makine sürecini tek makineye indirgenmesi sağlanmıştır. Algoritma desteği örtük numaralandırma, tamsayılı doğrusal programlama, dinamik programlama, dal ve sınırlandırma problemlerinin çözümüne yöneliktir. Bu algoritma ile altı aşamadan oluşan PCB üretimi takip edilmektedir. Bu metotta optimum çözüm sağlanabilmesi için bilgisayarın işletim sisteminin cevap vermesi çok uzun sürmektedir [34]. Prototipleme açısından konvansiyonel metot diğer metotlardan daha hızlı PCB üretimi sağlar. PCB üretiminden sonra tamamen makine durdurulur, tüm bileşenler boşaltılır, ortak bileşenler bırakılır. Her üç metotta da prototip çalışmaları için

sistem de tüm aşamalar devreye alınırken üretim maliyeti ve üretim süreleri üzerinde tasarruf sağlanması gerektiği düşünülmektedir.

2.1.1 İletken Mürekkep

Günümüzde PCB tasarımı ile 3BY'nin ayrı programlar altında çalışmasının yerine iki programı bir araya getirip optimum şartlara göre çalışması sağlanması hedeflenmektedir. Bu sayede tek program altında veri ağı toplanması sağlanacaktır [35]. 3BY'den nozul üzerinden mürekkebin PCB ye dağıtılması doğrudan bir pnömatik sistemden de verilebilir. Bu teknikle mürekkebin PCB üzerine hangi oranda katılacağı ayarlanabilmektedir. Geçmişten günümüze kadar gümüş [36,37,38–39], bakır bazlı iletken mürekkepler [40,41], karbon nanotüpler [42,43] ve iletken polimerler, bilim insanları ve araştırmacılar tarafından [44] büyük ilgi gördü. Gümüş, bakır ve altından daha mükemmel bir iletkenliğe sahiptir. Bunun haricinde diğer en önemli özelliğinden biri de oksidasyon önleyici olmasıdır. Bu sebeplerden dolayı gümüş bazlı mürekkepler bilim adamlarının dikkatini çekmektedir. Bu tür mürekkepler ikiye ayrılır bunlardan birincisi Si gümüş nano parçacıklar ikincisi İse AgNO3 içeren parçacık içermeyen mürekkeptir ya da organik gümüş bileşiği olarak da bilinmektedir [45]. Ayrıca iletken mürekkep olarak, polimer bazlı gümüş mürekkeplerin SLA için başarılı bir şekilde KBM [46, 47, 48] basılı nesneler üzerinde kanıtlanmış olduğu [49, 50], gösterilmektedir. PCB üzerine çizilen yolların homojen olması ve iletkenliği yüksek olması gerekmektedir. Edilen bazı test sonuçlarına göre 25 cm uzunluğunda 120um genişliğinde eşit olarak alınan karbon, reaktif gümüş ve nano parçacık olan gümüşün yol olarak bir kâğıda çizildiğinde reaktif gümüş mürekkebin diğerlerine göre daha yüksek iletkenliğe sahip olduğu görülmektedir. Bu testte inkjet printing methodu kullanılmıştır [51].

Tablo 2.1 Polimer bazlı gümüş ve karbon mürekkebin direnç değerleri

Test Edilmiş Mürekkep	$R_1^{C\ H}$ [Ω]	$R_{10}^{C\ F}$ [Ω]	R^{PET} [Ω]
Reaktif Gümüş Mürekkep	5±1	4±1	13±1
Gümüş nanopartikül	24±3	10±4	33±7
Karbon Mürekkep (x10^{-4})	87±1	76±2	65±7

İyi bir iletken yol mürekkeple oluşturmak istersek bunun için belli kriterleri sağlaması gerekmektedir. Bunlar; hidrofobik ya da hidrofilik dengesi, mürekkebin

yüzey gerilimi, mürekkebin formülü ve substratı arasındaki optimizasyonu koruması gerekmektedir [52]. Ayrıca Deng ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada [53] grafen ve indirgenmiş gümüşün 400℃'de 30 dakika tavlanması sonucu düşük bir direnç değeri birim kare başına $20 \pm 1\ \Omega$ elde edilmiştir. Bakır iletken mürekkeple gümüş iletken mürekkebi karşılaştırdığımızda bakır iletken mürekkep daha düşük maliyetli olmasına rağmen bakırın oksidasyonu yüksektir [54]. Dolayısıyla bakırın iletkenliği zamana bağlı olarak azalmaktadır. Gümüş iletken oksidasyon olması gümüşün iletkenliğini düşürmemekte bu yüzden mürekkep iletken olarak kullanılabilmektedir [55]. Bu bağlamda mürekkebin iletkenliği mürekkebi oluşturan dolgu malzemesinin miktarına, bağlayıcı yüzdesine ve iletkenin büyüklüğüne bağlıdır buna ek olarak mürekkebin uzun süre kurutulması da iletkenliğini arttırmaktadır [56]. İletkenlikle yapılan diğer bir çalışmada iki ayrı A ve B türü iletken mürekkep testinde farklı hacimlerde içlerine gümüş nano iletken malzeme doldurulmuştur. Kullanılan malzeme gümüş nano parçacıkları olup test edilmiştir. Test sonucuna göre nano parçacıkların yüksek miktarda olduğunda bağlar arasında kopmalar meydana geldiği aradaki boşluklar nedeniyle de direnç değerinin arttığı gözlenmektedir. Yapılan diğer bir deneyde ise 100℃'de 5 saatte bekletilen parçacıkların 80℃'deki 5 saate göre daha iyi iletkenliği olduğu tespit edilmiştir [57]. İletken mürekkep ile PCB tasarımında iletken, devrenin kararlı ve kayıpsız çalışmasından dolayı önemlidir. Dr. Suchitra Khoje ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada mini bir yazıcı yardımıyla circuit makerdan sipariş edilen iletken mürekkepli kalemle EAGLE® programı üzerinden alınan .Gcode uzantılı dosyaya göre iletken mürekkeple devre tasarımı gerçekleştirmişlerdir [58]. Bu tasarım da kullanılan iletken mürekkepli kalem gümüş mürekkeplidir. İletken mürekkep ile PCB tasarımına ek olarak üçü bir arada son kullanıcıya PCB devre tasarımı ve kalıbı hazır olarak verilmesi mümkün gözükmektedir. Bu uygulama EÜ teknolojisi ile daha da uygulanabilir hal almıştır. Devrenin elektrik bileşenli SL fabrikasyon substrat ve enjeksiyon kısmı yaklaşık olarak 5 gün sürmektedir. Bu teknoloji şu an da ticari faaliyet olarak ilk alıcısına teklif olarak sunulmaktadır. 3BY baskısı kullanılarak bu sistem imal edilmiştir. İki katmanlı PCB tasarımları da EÜ tekniği kullanılarak yapılabilir [59]. Çok katmanlı PCB de önce yüzey 3 boyutlu olarak çizilir daha sonra yapısal olarak 2D katman dosyası üretilir alınacak komponentlerin

ölçülerine göre boşluklar bırakılır son olarak da iletken alanlar 2B dosyasına dönüştürülür.

Baskı devre tasarımı teknolojinin bir parçasıdır. Çünkü birçok makinenin elektronik cihazların belli bir algoritma düzeninde çalışmasını sağlamaktadır. Geçmişten günümüze kadar ve hatta gelecek teknolojisine yön verme anlamında ciddi derecede vazgeçilmezdir. Elektronik devre tasarımı X, Y düzleminde ve birçok katmanlı somut bir kart yapısı olduğundan belli bir hacme yerleştirilmesi ve bunun için çalışmalar yapılması gerekmektedir. Ayrıca bu sistem veri aktarım hızlarını da etkilemektedir. Bu yüzden kullanılan bu PCB tekniğinin daha da geliştirilmesi gerekmektedir [60,61]. PCB tasarımında kullanılan tellerin, epoksi, viyaların, lehim ve konnektörlerin empedans uyumsuzluğuna buna ek olarak PCB deki yolların keskin dönüşlerin olması parazittik harmonik ve elektromanyetik etkilere neden olmaktadır [62,63]. 3BY tekniği ile PCB üretimi sayesinde bu sorunlar giderilebilir. 3BY kullanıcıların CAD programında tasarlamış olduğu devre prototipi üzerinde parça değiştirmelerine imkân tanımaktadır [64].

Elektronik iletken mürekkep türleri 3 grupta incelenir. Bunlar çözüme dayalı, nano parçacık bazlı ve katalizör bazlı iletken mürekkep türleridir. Çözüme dayalı iletken mürekkep türleri İletken mürekkepler ilk olarak iletken polimerlerin çözülmesiyle formülleştirilmiştir. Poli Polistiren Sülfatlı (PEDOT: PSS) ya da karbon gibi bir element verebilecek bir çözücünün içine ileten 10^2 S/m düşük iletkenliğe sahip filmlerdir [65]. Düşük iletkenliğe sahip olduklarından dolayı bu tür çözüm tabanlı iletken mürekkepler elektronik cihazlarda kullanılamaz. Nano parçacık bazlı gümüş iletkenler düşük seviyede işlenebilen yüksek iletken mürekkeplerden bazıları polimer ve organik substratlar için yeterli sıcaklığa sahip olup metalik gümüş nanoparçacıktır. Bu iletkenlerin sertleşme sıcaklıkları ile 10^7S/m üzerindeki iletkenliklere ulaşan dispersiyonları 250°C'nin altındadır [66]. Nano ölçekli parçacıklar erime noktasının düşmesi iletkenlik açısından çok önemli özellik sergilemektedir. Buradaki T_0, toplu erime sıcaklığı σ, metalin termal iletkenliği ile ilgili ve r, parçacığın yarıçapıdır. Eşitlik denklemi aşağıdaki gibidir.

$$T_m(r) = T_0(1 - \frac{\sigma}{r}) \tag{2.1}$$

Bu özellikten yararlanılarak, yapılan son çalışmalar gümüş nano parçacığın iletkenliğini göstermektedir. Nano parçacıkların iletkenliği $1{,}2 \times 10^7 (\mathrm{S/m})$ dir. Bütün bir gümüşe göre 5 kat daha düşük (30-50 nm) boyutlarından daha küçük bir boyutlara indirilmesi özel kürleme teknikleri kullanılarak yapılabilir [67]. Nano parçacık mürekkepleri kürlenme sırasında oksidasyondan etkilenmemesi için gümüş ve altından oluşturulabilir. Katalizör bazlı iletken mürekkepler bakır gibi metaller oksidasyon sebebiyle sinterleme esnasında nano parçacıklar kullanılarak rahat bir şekilde biriktirilemez ama birçok uygulamada bakır tercih edilir, çünkü gümüşten çok daha ucuzdur ve daha yüksek iletkenliğine sahiptir. Asil olmayan metallerin biriktirilmesinin önündeki engelleri aşmak için, katalizör bazlı mürekkepler biriktirilecek metal için bir katalizör bırakacak şekilde geliştirilmiştir. Substrat daha sonra, katalizörü dökme bir metalizasyon ile kaplayan bir kaplama banyosuna yerleştirilir. Bu süreç iletkenlikte eşdeğer filmlerin asil olmayan metal kullanılarak depolananlara biriktirilmesine olanak tanır. Büyük bir maliyet azaltmada bu metalik nano parçacıklar kullanılmaktadır. Çözüm tabanlı modelleme de nozul tıkanma problemlerini aşmak için asil metal parçacık bazlı işlemlerle mürekkepler üretilir bu sayede maliyet düşer [68]. Aşağıdaki şekilde bazı malzemelerin iletkenlikleri ve isimleri belirtilmiştir.

Tablo 2.2 İletken polimerlerin katkı malzemelerine göre iletkenlik değerleri

Organik İletken Polimer	Katkı Malzemeleri	İletkenlik (S/cm)	Ref.
Polianilin	Grafin	0,29-3,67	[69]
Polianilin	APS/DBSA	0,004-0,03	[70]
Polipirol	Surfaktantları	0,69-4,95	[71]
Polipirol	Grafit oksit	12,50-22,22	[72]
Poli(3,4-etilendioksitiofen)	Polisitren sülfonat	400-600	[73]
Poli(3,4- etilendioksitiofen)	Trietilen Glikol (TEG)	~900	[74]
Polisitren sülfonat	DMSO, Etilen Glikol (EG)	389-1418	[75]

Yukarıdaki şekle baktığımızda iletken polimerlere eklenen katkı maddeleri sonucu iletkenlik değerleri arasındaki değişim en fazla polistrensülfonat da olduğu gözükmektedir. Yaklaşık olarak iletkenlik 1329 (S/cm) artmıştır. En az artış ise APS/DBSA üzerinde gerçekleşmiştir ve yaklaşık olarak 0,026 (S/cm) artmıştır.

2.1.2 İnk Jet Yazıcı

Malzeme bilimciler tarafından yapılan çalışmalarda kullanılmak üzere geliştirilen Serigrafi [76] veya mürekkep püskürtmeli baskı gibi üretim teknikleri [77] uzman olmayan kişilerin laboratuvar ortamında prototip esnek elektronik devreler ortaya çıkarma amacına uygun olmakla beraber son zamanlarda, eğilip bükülebilir nesnelerin üzerinde elektronik devreler kurma amacına yönelik çalışmalar artmaktadır [78]. Örnekleri; kapasitif sensörler, yakınlık sensörleri ve EL göstergeleridir. Bu sensörlerde, Polidimetilsiloksan (PDMS) silikon üzerine basılmış ve kaplanmış PEDOT: PSS iletken mürekkep [79] veya karbon siyahı parçacıkları (cPDMS) [80] ile enjekte edilmiş olup bu bireysel sensörler gerilebilir olsa da bunları kontrol eden, işleyen ve güç sağlayan sert devre kartının daha fazla gerilmesine imkân vermemektedir. İnk-Jet (püskürtmeli baskı) teknolojisinin kontrollü ve çok yönlü olarak kontrol edilebilmesi için çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Collins ve arkadaşları [81], damlacık yarıçapı için üç farklı ölçeklendirme rejimini ve bu mürekkebin iletkenliğine etkisini araştırmaktadır. Park ve arkadaşları [82] ise hem pozitif hem de İnk-jet teknolojisini kullanarak negatif yüklü potansiyel iyonları olan nano ölçekli elektrikle çalışan sıvı püskürtücüler üzerinde çalışmalar yapmaktadır. Bu özellikleri kontrol etmek için silikon nanomembran transistor kullanılmaktadır. Birbirinden 15μm uzakta ve pozitif-negatif yüklü iyonlar bulundurularak inkjet baskı tekniği kullanılarak bırakıldı. Mishra ve ark. [83] sabit ve kontrol edilebilir damlacık ebadı ile yüksek hızda saniyede 1000 damlacık baskı rejimi göstermekle birlikte fotoğraflardaki mürekkebi 3x6 μm seviyesinde iyileştirerek fotoğrafın daha canlı çıkmasını sağlamıştır. Choi ve arkadaşları [84] elektro hidrodinamik olarak indüklenmiş mürekkeplerin basit ölçeklendirme yasalarını ve İnk-jet yazıcının ince nozulunun uçlarındaki gerçek titreşimleri kullanmıştır. Bu tasarımı yapmak için literatürden dört farklı veri seti kullanmıştır. Ayrıca deneysel sonuçlar sonucunda yazarlar nabız frekansının uygulanan elektrikle orantılı olduğu sonucuna varmıştır. Elektrik alan kuvveti yaklaşık 1,5 N değerindedir. Jetin çapı uygulanan elektrik alanla ters orantılı, nozul çapının karekköküne ise orantılıdır. Yudistira ve ark. [85] iletken veya dielektrik substrat kullanarak ince iletken mikro desenler ile PCB devre kartlarını imalat için tasarlamışlardır. Youn ve arkadaşları [86] bu tekniğe yakın ilgili alanlara elektro hidrodinamik tekniğini tanıttı. Bu teknikte yüksek yoğunluklu

ve iletken desenler elde etmek için eğik çıkış nozulu ile İnk-jet baskı gerçekleştirilmiştir. Baskı üzerindeki çizgi genişliği gümüş mürekkep kullanıldığında 6μ'dan daha düşük olabilmektedir. Yu ve diğ. [87] Gümüş nano parçacıkların viskozitesinin, baskılı çizgi genişlikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Yüksek viskoziteli mürekkep malzemesinin, daha az viskoz olanlara kıyasla daha ince çizgilerle sonuçlandığını bildirmişlerdir. Ayrıca dökme gümüş ile karşılaştırıldığında, termal kürlemeden sonra oldukça kayda değer bir gelişme göstermektedir. Çok katmanlı PCB yapısında bazı sınırlamalar vardır; örneğin, karbon bazlı iletken mürekkebin iletkenliği düşük olduğundan dolayı temas direnci ve temas noktası zayıftır. Bu sebepten dolayı karbon bazlı iletkenler daha çok tek katmanlı yapılarda kullanılabilir. Örneğin kâğıda kolayca yazdırılabilmektedir [88-89]. İnk-jet püskürtme teknolojisine benzer fakat teknik bakımından farklı olarak kullanılan bir diğer teknoloji elektro hidrodinamik mürekkep püskürtmeli elektro hidrodinamik yöntemdir. Daha yüksek çözünürlük ve daha iyi damlalar elde etmek için kullanılmaktadır çalışma prensibinin temelinde elektrik alan vardır. Sözde elektro hidrodinamik mürekkep püskürtmeli elektro hidrodinamik baskı teknolojisi sıvı mürekkepleri, dışarı itmek yerine ağızlıktan dışarı çeker. Sonuç olarak, elektro hidrodinamik inkjet süper ince mürekkep damlacıkları üretme yeteneğine sahiptir. Hızlı enjeksiyon hızında nozul ebatından [90] daha küçük ebatlarda damlacıkların büyüklüğü ~1/10 çapında veya hacimde 1/1000 olabilir. Rogers ve diğ. [91] 2007 yılında böyle bir sistem tasarladı. Bu sistemden daha gelişmiş olan cihaz, süper inkjet teknolojisi olarak adlandırılan daha ileri endüstriyel sistem aynı zamanda Ulusal İleri Endüstri Bilimleri Enstitüsü tarafından geliştirilmiştir [92].

2.1.3 Deri Etkisi

Silindirik iletken kesitinden geçen DC akım yüzeye homojen olarak dağılır. İletken silindirik olmadığı zamanda da DC akım homojen olarak paylaştırılmaz. Her ikisinde de iletkenin şeklinin önemi yoktur. Zamana karşı değişen bir akım mevcut değildir [93]. Alternatif akımın zamanla değişen bir akım olması nedeniyle silindirik elektrik iletkeni çevresinde manyetik alan üretir. Akımın büyüklüğündeki değişim manyetik alanın da büyüklüğünde değişkenlik oluşturur. Değişim sonucunda elektrik alanı, varyasyonu dengeleyen ikincil bir zaman değişken girdap akımı ve devamında buna karşı elektromanyetik kuvvet oluşturur [94, 95]. Elektromanyetik indüksiyon

yüzeyi zorlar iletken yüzeyinde ve iletken içinden akacak akım iletkenden geçen akımın yoğunluğunu iletkenin deri yüzeyinde daha yoğun hale getirir. Bu yoğunluk frekansa bağlı yüzeyde deri etkisini ortaya çıkarır [96]. Salınım sayısı ne kadar yüksekse, iletken üzerinde deri etkisi derinliği artar ve iletkenin direnç artışına neden olur [97]. Deri etkisi, mevcut bir elektrik iletkeninin iletim kesitini azaltır. Yaklaşık 1000 kHz'lik yüksek frekanslarda, iletken kalınlığının 0,1 mm'den daha düştüğü deri derinliği iletimi için mevcuttur [98]. Elektrik enerjisinin yüksek frekanslarda ve büyük kesitli iletkenler aracılığıyla iletilmesi durumunda verimli çalışmayı engeller ve deri etkisini arttırır. Bu sorunu çözmek için ticari olarak araştırılan ve keşfedilen iletkenler içi boş silindirik, dikdörtgen iletken kullanımı üzerinedir. Bu metodolojinin iletişim hattı uygulamaları için radyo frekansında etkili olduğu kanıtlanmıştır. Temel çalışma prensibi, tamamen yalıtkanlığı ortadan kaldırmaya çalışmaktır. Ancak, esnek içi boş iletkenler yapmanın üretimi nispeten çok pahalıdır, taşınması, kurulması zor ve uzun mesafe için mekanik bütünlükten yoksundur.

2.1.4 Soğuk Lehim Problemleri

Lehimlemenin kalitesi, PCB ‘nin genel kalitesi üzerinde muazzam bir etkiye sahiptir. Lehimleme yoluyla, PCB ‘nin düzgün çalışması ve amacına hizmet etmesi için PCB ‘nin farklı parçaları diğer elektrikli bileşenlere bağlanır. Endüstri profesyonelleri elektronik bileşenlerin ve cihazların kalitesini değerlendirirken, değerlendirmelerindeki en önemli faktörlerden biri lehimleme işinin kalibresidir. Tüm lehim bağlantılarını tek bir kapsamlı tanımda toplamak zordur. Lehim tipine, kullanılan PCB‘ ye veya PCB ‘ye bağlanan bileşene bağlı olarak, ideal lehim bağlantıları büyük ölçüde değişebilir. Yine de mükemmel lehim bağlantılarının şu özelliklere sahiptir; tam, pürüzsüz, katı-ıslak ve parlak bir yüzey, düzgün bir içbükey dolgu, Surface Mount Device (SMD) lehim bağlantısı veya açık delikli lehim bağlantısı olup olmadığına bakılmaksızın, ideal bir lehim bağlantısı elde etmek için, doğru miktarda lehim, doğru sıcaklığa ısıtılmış uygun bir lehim ucu ve kaldırılmış bir oksit tabakası ile önceden hazırlanmış bir PCB teması kullanmak için gereklidir. Lehim Köprüleri; PCB'ler ve elektronik bileşenler gittikçe küçülmektedir bu da özellikle lehimlemeye çalışılırken PCB etrafında manevra yapmayı zorlaştırır. Lehim köprüsü, lehimleme malzemesinin iki veya daha fazla PCB konektörünü birbirine

bağlamasıdır. Bu oldukça tehlikelidir ve tespit edilmezse kartın kısa devre yapmasına ve yanmasına neden olabilir. PCB 'de bir büyüme gibi görünmenin yanı sıra, lehim bağlantısının işlevsel olup olmadığını anlamak da zor olabilir. Bu lehim topunun altında yatan nedenler bulunmaktadır. En iyi uygulama, lehimi konservatif kullanmak ve gerekirse ihtiyaç miktarı doğrultusunda ekleme yapılabilmektedir. Soğuk bağlantılar, havya optimum sıcaklığın altında olduğunda veya eklemin ısınma süresi çok kısa olduğunda meydana gelir. Soğuk derzler donuk, dağınık, çukurlu bir görünüme sahiptir. Ek olarak, daha kısa ömürleri vardır ve daha az güvenilirdirler. Soğuk bir bağlantının akım altında iyi performans gösterip göstermeyeceğini veya PCB 'nin işlevselliğini sınırlayıp sınırlamayacağını değerlendirmek de zordur. Yanık bağlantılar, soğuk bağlantıların tam tersidir. Lehim havyasının optimumdan daha yüksek bir sıcaklıkta çalıştığı, lehim bağlantısının PCB'yi çok uzun süre ısınmaya maruz bıraktığı veya PCB üzerinde hala bir oksit tabakası bulunduğu ve optimum ısı transferini önlediği barizdir. Eklem yanmış bir görünüme sahiptir ve eğer pedler eklemlerde kalkmışsa, PCB tamir edilemeyecek şekilde hasar görebilir. PCB 'ye transistörler ve kondansatörler gibi elektronik bileşenleri bağlamaya çalışırken genellikle lehim taşları oluşur. Bileşenin tüm kontakları pedlere düzgün bir şekilde bağlanırsa ve lehimlenirse, bileşen net olacaktır. Lehimleme işlemi için gerekli sıcaklığa ulaşılamaması, bir veya daha fazla tarafın kalkmasına neden olarak lehim taşı benzeri bir görünüm oluşturabilir. Lehim taşı, lehim bağlantısının uzun ömürlülüğünü etkiler ve PCB 'nin termal performansını olumsuz etkileyebilir. Yeniden akış lehimleme işlemi sırasında kaldırmaya neden olan en sık karşılaşılan sorunlardan biri, yeniden akış fırında lehimin erken ıslanmasına neden olabilecek düzensiz ısınmadır. Yetersiz Islatma; kötü bir şekilde ıslatılmış bir bağlantı, PCB lehim pedleri PCB 'ye lehimle bağlanan elektronik bileşenler arasında düzgün bir bağlantı yapmak için gerekenden daha az lehim içerir. Yetersiz ıslatılmış bağlantılar, elektrikli cihazın performansını sınırlayacak veya bozacaktır, zayıf güvenilirlik ve uzun ömürlülükten yoksundur ve hatta PCB 'ye zarar verebilecek bir kısa devreye neden olabilir. İşlemde kullanılan lehim yetersiz olduğunda da sıklıkla meydana gelirler. Robotların bileşenlerini PCB'lere lehimledikleri fabrikada lehim atlamaları meydana gelebilir. Bir insan operatörünün konsantrasyon eksikliğinden kaynaklanabilir. Benzer şekilde, kötü yapılandırılmış robotlar bir eklemi veya

eklemin bir bölümünü kolayca atlayabilir. Bu, devreyi açık bırakır ve belirli alanları veya tüm PCB'yi işlevsiz hale getirir. Kaldırılmış Pedler; lehim bağlantılarında kaldırılan pedler, lehimleme sırasında PCB 'ye uygulanan aşırı kuvvet veya aşırı ısı nedeniyle oluşur. Pedler, PCB yüzeyinden kalktığında tüm kartın yollarını bağlantılarını işlevsiz hale getirebilecek potansiyel bir kısa devre tehlikesidir. PCB üzerinde kart lehimleme sürecini etkileyen faktörlerden biri de PCB kartı kirleticilerle kirlendiğinde veya flukslama maddesinin yetersiz kullanımı nedeniyle PCB üzerinde ağlar ve sıçramalar, meydana gelir. PCB 'nin dağınık görünümünün yanı sıra, ağlar ve sıçramalar, karta potansiyel olarak zarar verebilecek büyük bir kısa devre tehlikesidir.

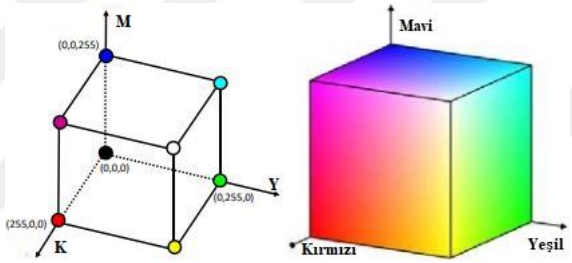
2.2 Görüntü İşleme ve Renk Uzayı

Renk uzayı, araştırmacıların birçok farklı şekilde renklerin tanımlanmasına ve analiz etmesine imkân verir [99]. Görüntü işlemede yeni renk alanlarının oluşturulması ve geliştirilmesini etkileyen renk faktörlerinden biri de tam görünür ışık spektrumunun çözümlenmesidir. Görünür ışık spektrumu 380 nm ile 700nm dalga boyları arasında olup kırmızı ~ 625-740 nm, yeşil ~ 500-565 nm, mavi ~ 450-485 nm, mor ~ 380-440 nm'dir [100]. Bu elektromanyetik dalga aralıkları insan gözü tarafından değişen renkler olarak algılanır. İnsan gözünün hassasiyeti cevap verebilir her renk dalga boyunda farklıdır. İnsan gözü hassas hücrelerden oluşan foto reseptörler içerir normalde sarı-yeşile (uzun dalga boyu), orta dalga boyu ve mavi-mor (kısa dalga boyu) renkler, 564 nm, 534 nm ve 420 nm civarında dalga boylarına denk gelir [101]. Gelen dalga boyu sinyalleri arasındaki fark bu üç renk türü beynin çok çeşitli renkleri yorumlamasına izin verir. İnsanların gerçek hayatta gördükleri renkleri kullanmak yerine tam sürekli görünür dalga boyu, dijital ekranların kombinasyonlarını kullanır. Renk üretmek için insan foto reseptörlerine en duyarlı dalga boyları dijital ekranları oluşturabilmek için insan foto reseptörleri ve köpekler üzerinde çalışılmıştır. Farklı foto reseptör hassasiyet aralıklarına sahip olan kediler dijital ekranlarda renklerin gerçek temsilini göremezler. Renkleri sayısal olarak temsil etme yeteneği, görüntü işlemenin önemli bir parçasıdır. Bir renk modeli, bir renk alanı kullanarak renklerin temsilini sayısal olarak tanımlar ve ilişkilendirir. Sayısı mevcut renk alanı modelleri kapsamlıdır ve belirli işlevler için benzersiz olabilir. Tipik olarak renk alanı modelinin bilgileri görüntüyü temsil

etmek için kullanılan renk alanı modeline bağlı olarak koordinat sisteminde iki, üç ve hatta dört boyutlu olarak saklanabilir. Bu noktada kırmızı, yeşil, mavi (RGB), renk tonu ve doygunluğa göre koordinat sistemlerinde üç boyutlu olarak gösterilebilir.

2.2.1 RGB Renk Uzayı

Görünür bölge ışık spektrumunda kırmızı, yeşil, mavi (RGB) renk alanı, bir dizi rengi temsil etmenin temelini oluşturur. RGB renk alanı için ek bir işlem uygulanır. Bu süreçte, belirli bir çıktı rengi elde etmek için kırmızı, yeşil ve mavi ışık yoğunluklarının yüzdeleri eklenir. RGB renkli bir görüntüdeki pikseller tipik olarak kırmızı, yeşil ve maviyi temsil eden üç ana kanal içerir. Gerekirse, RGB renkli görüntüler üç ana kanala bölünebilir. Çeşitli görüntü analizi türlerinin gerçekleştirilmesinde faydalı olabilir. Tam görünür ışık RGB renk uzayında temsil edilen spektrum, kartezyen formda çizilir, buna karşılık gelen sonuç Şekil 2.1' de ki gibi benzer bir kübik şekil oluşturacaktır.



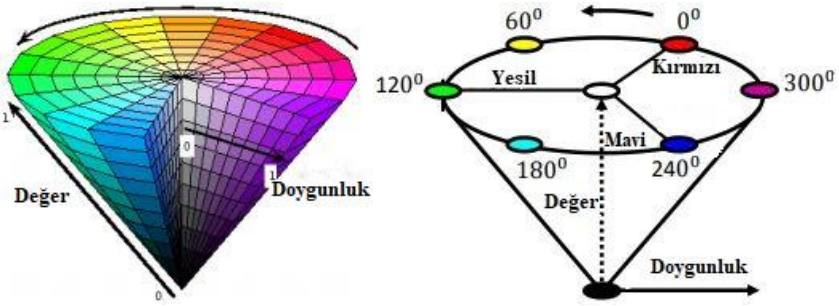
Şekil 2. 1 RGB renk küpü ve köşe koordinatları

Şekil 2.1 'de sol resim çeşitli renk kombinasyonunu gösterirken sağdaki resim ana renklerin yanı sıra diğer renk küpünün köşesinde bulunan birincil ve ikincil renkler tüm renk gölgelerinin konumunu gösterir . Bu durumda giriş görüntüsünün her eksen aralığının değeri 8-bit formatında olup 0 ile 255 arasındadır [102].

2.2.2 HSV Renk Uzayı

Görünür ışık spektrumundaki renk tonu, doygunluk, değer (HSV), görüntü hakkında bilgi verir. HSV renk alanı, renkleri tanımak için sezgisel bir yoldur. Çeşitli görüntü düzenleme yazılımları HSV renk uzayını kullanarak renklerin düzenlenmesine izin verir. RGB renginin aksine HSV renk uzayındaki renkler üç boyutlu kutuplu koordinatlarda temsil edilir ve bazen RGB sisteminde görünmeyen özellikleri ortaya çıkarır. Ek olarak, çeşitli diğer özellikler HSV renk uzayını dijital görüntü grafik uygulaması için mükemmel hale getirir. Aynı özellikler HSV'yi görüntü işleme ve

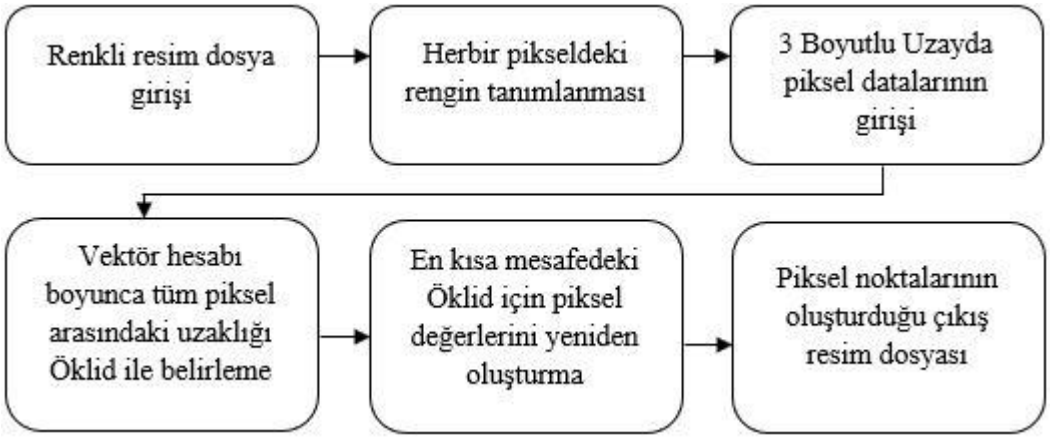
analiz görevleri için kullanmayı daha karmaşık hale getirir. HSV renk uzayı Şekil 2.2'de gösterildiği gibi konik bir şekil oluşturur, "renk tonu" koninin dairesinin çevresi boyunca değişir, "doygunluk" dikey eksen etrafında bir açı olarak gösterilir, radyal mesafe boyunca değişir [103].



Şekil 2. 2 HSV renk uzayı ve koni üzerindeki açısal konumları

2.2.3 PCB Yaklaşımı

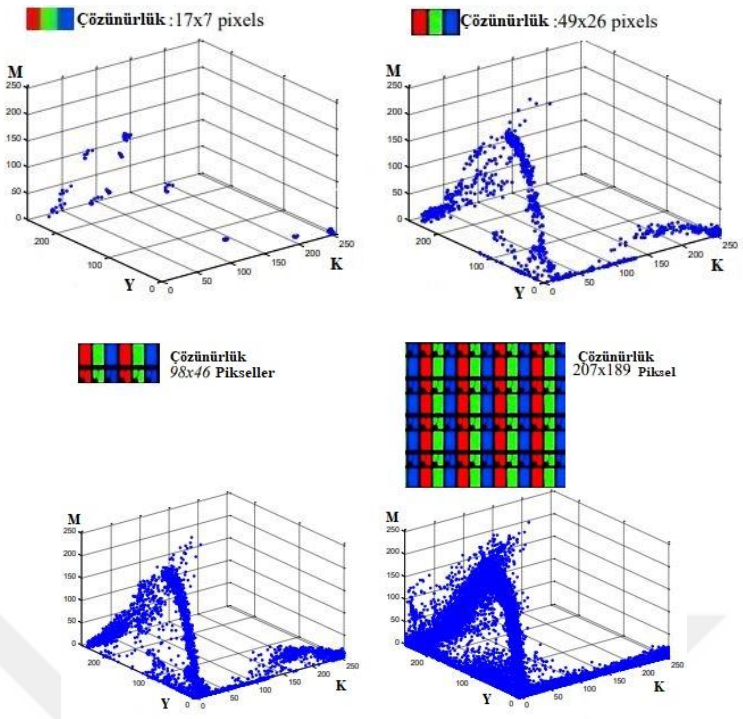
Bir görüntü verisinden PCB görüntüsü segmentlere ayrılarak çözüme dayalı bir algoritma verilmiştir. Geliştirilen algoritmanın amacı doğrultusunda görüntü üzerinde bölümlere ayrılmış özellikleri ve tersine mühendislik olanağı sunabilmektir. Bu algoritmada giriş renkli görüntü verilerini işlemek için kullanılan yaklaşım şunlardır: RGB görüntü piksellerini bir üç boyutlu alanda çizmek, minimum Öklid mesafesini belirlemek ve Öklid mesafesine göre piksel noktalarının değerlerini bulma ve yeniden atamaktır. Bu yöntem vektör değerli bir teknik olmak üzere vektörler renk bilgilerini içermektedir [104]. Geliştirilen algoritmanın yeteneği, sonuçtaki değerleri ayrım seviyesini belirleyerek değerlendirir. Giriş renkli görüntü verilerinin piksel değerleri ve karşılık gelen kanallar, birbirleriyle ne kadar yakından ilişkili olduklarını göstermek için üç boyutlu alanda çizilir. Renkli Görüntü Bölümleme Algoritması RGBA'nın bir girişten birden fazla özelliği bölümlere ayırmada izlediği yöntemi gösterir Şekil 2.3; giriş rengini yükleme, görüntü renklerini belirleme, piksel üzerinden bölümle ilgi noktaların seçimi, giriş görüntü verilerinin grafiğini çizme, piksel noktalarının üç boyutlu arasındaki mesafeyi Öklid ile belirleme ve piksel değerlerini yeniden atama şeklindedir [105].



Şekil 2. 3 PCB görüntüsü üzerinden PCB resim dosyası oluşturma akışı

2.2.4 Piksel Noktası

Görüntü verileri üzerinde piksel bazında analiz yapmak için, üç kanal bir görüntünün (kırmızı, yeşil ve mavi değerleri) farklılaştırılması ve bir dizide depolanması gerekir. Bu sayede görüntünün üç boyutlu alanda çizilmesi elverişli hale getirilir. Her giriş görüntü pikseli, üç boyutlu grafikte gösterilir. Kırmızı, yeşil ve mavi değerlerin koordinat noktası 8 bitlik bir tamsayı tek kanallı görüntü pikseli için tutulur. Bu nedenle, her çizim ekseninin değeri değişebilir. Üç kanallı bir renkli piksel sonuç olarak üç tamsayıyı saklamak için 24-bit kullanır. Piksel değerlerini çizerken negatif sayılar olmadığından, tüm veri noktaları her üç eksenin pozitif çeyreğinde temsil edilir. Kanal sayısı ve değeri her piksel için otomatik olarak tanımlanır. Tek tek kanalların piksel değerleri önce birbirinden ayrılır sonrasında tek sıralı diziye dönüştürülür. Üç tek sıralı dizi renkli görüntü kırmızı, yeşil ve mavi değerlerine karşılık gelen üç boyutlu veri noktalarının oluşturmuş olduğu veri kümesidir. Çoğunlukla piksellere karşılık gelen bir grup veri noktası benzer renk değerleri bir arada kümelenmiş olarak görülür. Piksel sayısı küçükse ve yalnızca bir giriş görüntüsünde birkaç renk varyasyonu varsa piksel noktası kümeleri kolayca kullanıcıya göre görsel olarak gruplandırılabilir. Şekil 2.4'te farklı boyutta renkli görüntüler üç boyutlu olarak ortaya konulmuştur.



Şekil 2. 4 Çözünürlüğe bağlı RGB dağılımı

2.2.5 Öklid Mesafesi

Piksel noktası analizini gerçekleştirmenin büyük bir kısmı, Öklid ile sağlanır. Seçilen piksel noktalarına göre her bir piksel noktası arasındaki uzaklık giriş rengine göre belirlenir. Aynı renge sahip olan renkler için ayrı ayrı mesafe hesaplanır. RGBA'nın belirlemiş olduğu ideal pikseller ile ilişkilendirilir. Bir anlamda giriş piksellerin yaklaşık merkezleri olarak da düşünülebilir. Giriş piksel arasındaki uzaklıklara herhangi bir kısıt isteğe göre konulabilir. Ayrıca isteğe göre de pikseller gruplandırma yapılabilir. Pikseller arasındaki mesafeler Öklid mesafesi kullanılarak hesaplanır. Tüm giriş bilgilerinden alınan görüntü verileri bir dizide bilgi olarak toplanır [106].

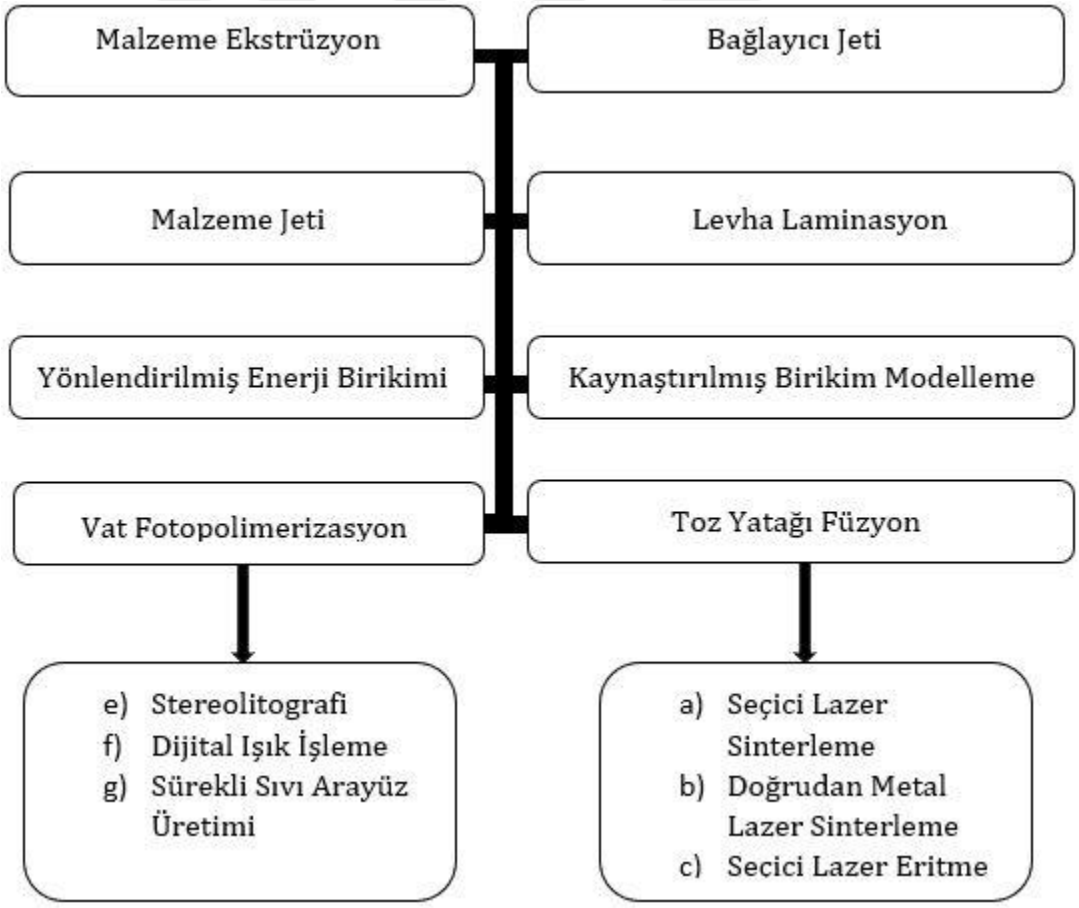
$$\mathrm{d}_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^{n} (a_{ik} - x_{jk})^2} \tag{2.2}$$

Öklid mesafesini hesaplamak için geçen süre, doğrudan giriş görüntüsünün boyutuyla ilgilidir. Giriş görüntüsü çözünürlüğü ya da piksel sayısı ne kadar büyükse, RGBA'nın sonucu hesaplaması daha uzun sürer. RGBA'dan elde edilen sonuçların, özellikle PCB baskı devrelerinde ve tersine mühendislikte faydalı olduğu

kanıtlanmıştır. Bir PCB görüntü prosedüründe, katman bilgisi renkli görüntü verisi olarak saklanır. RGBA, görüntü analiz yazılımı devreye girmeden önce, mevcut renklere dayalı olarak renkli görüntü verileri girilir. Bu senaryoda, RGBA, girdi rengini optimize eden bir filtre görevi görür. Görüntü tanıma yazılımında daha iyi sonuç oluşturmaya katkıda bulunur. Pix2Net gibi görüntü tanıma yazılımı, daha öncesinde renkli görüntüyü gri tonlamaya dönüştürür. Renkli bir görüntüyü basitçe görüntü işleme için gri tonlama ile dönüştürmenin dezavantajı kontrast kaybının oluşmasıdır. Bu yüzden gri tonlama yöntemi çok kullanışlı değildir.

2.3 Üç Boyutlu Yazıcı Üretim Teknikleri

3BY'lerde kimyasal malzemeleri bağlama, metalleri kaynaştırma, hammaddeleri katmanlı bir şekilde birleştirerek yeni 3 boyutlu tasarım oluşturma, kompleks geometriye sahip olan kalıpları tasarlama, elektrot üretme gibi fonksiyonel özelliklere sahip üretim teknikleri Şekil 2.5' te verilmiştir.



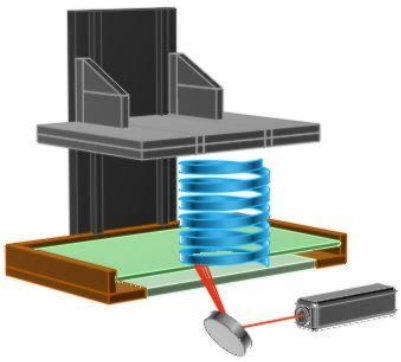
Şekil 2. 5 Üç boyutlu yazıcı üretim teknikleri

2.3.1 Vat Fotopolimerizasyon

Sıvı dolu bir kap içerisinde foto reaktif polimer olarak bulunan katmanlara lazer ya da UV ışık gönderilmesiyle kürleştirme yöntemidir [107]. Bu yöntem ile yapılan çalışmalar uygulama esnasında farklılık gösterebilir. Bu çalışmalarda uygulanan teknikler ise SLA, Dİİ, SSAÜ gibi tekniklerdir. SLA malzemesi aynı zamanda bir UV emici özelliğine sahiptir [108]. Işık kaynağı ile SLA'ler çalışabilir fakat geçiş esnasında fotopolimer malzemenin yüzeyi SLA'lerden daha hareketlidir [109]. Vat fotopolimerizasyon yöntemindeki bazı önemli parametreler şunlardır; malzemenin UV ya da lazer ışığına bırakılma süresi, dalga boyu ve dalgaların gücü parametreleridir. İlk olarak kullanılan malzemelerin bulunma hali sıvıdır. Bu yüzden UV ışığına maruz kalması sonucunda sertleşebilmektedir. Fotopolimerizasyon ile ayrıntılı tasarımlar ve oluşturulacak ürünün yüzeyin kalitesini arttırmak için uygulanabilirdir [110]. Bu bağlamda Vat fotopolimerizasyon yöntemlerinde SLA, Dİİ, SSAÜ teknikleri geliştirilmiştir.

a) Stereolitografi (SLA)

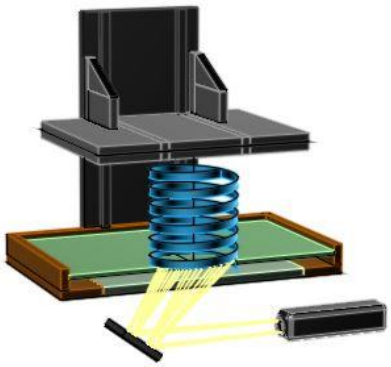
En çok kullanılan teknolojik yöntemlerden biri olan Stereolitografi (SLA)'de [111, 112] fotopolimer reçine ve lazer kullanılır Şekil 2.6. Oluşturulacak her katman için lazer ışını sıvı reçinenin yüzeyindeki parçaların sadece bir kesitini izleyerek baskı yapılabilir. UV lazer ışığına maruz kalınması sonucunda reçine üzerinde izlenen kalıbı sertleştirir ve katılaştırır. Oluşturulan bu nesne sertlik derecesine göre sınıflandırılabilir [113].



Şekil 2. 6 Stereolitografi düzeneği

b) Dijital Işık İşleme (Dİİ)

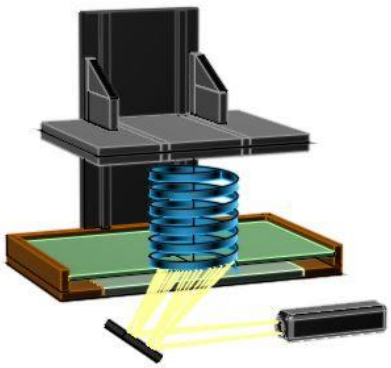
Dİİ 1987 yılında Larry Hornbeck tarafından geliştirilmiştir [114]. 3 boyutlu baskılı katı model ilk olarak 1981 yılında fotopolimer teknolojisi kullanılarak Nagoya Belediye Endüstriyel Araştırma Enstitüsü'nden Hideo Kodama tarafından yayınlanmıştır [115]. Dİİ, Dijital Mikro ayna Cihazı adı verilen bir yarı iletken çip üzerindeki bir matrise yerleştirilmiş dijital mikro aynaları kullanır Şekil 2.7. Her ayna görüntü için görüntüdeki bir pikseli temsil eder. 3 boyutlu tasarım yazıcıya gönderildikten sonra, sıvı polimer güvenlik ışığı koşulları altında bir Dİİ projektöründen gelen ışığa maruz bırakılır. Dİİ projektör, 3 boyutlu tasarımı sıvı polimerde görüntüler. Maruz kalan sıvı polimer sertleşir ve yapı plakası aşağı iner daha sonra sıvı polimer tekrar Dİİ projektörden gelen ışığa maruz kalır. Bu işlem, tüm 3 boyutlu tasarım ve katı ürünün ortaya çıkarılmasına kadar tekrarlanır. Dİİ 3 boyutlu yazdırma yöntemi hızlı olup ürünleri yüksek çözünürlükte basılmasını sağlayabilir. Dİİ yazıcılara örnekleri şunlardır; Yüksek Çözünürlüğe sahip MiiCraft Envision, Tec Ultra ve Lunavast XG2'dir. Bu yazıcılar film projektörlerinde, cep telefonlarında ve bazı 3BY teknolojilerinde kullanılabilir [116].



Şekil 2. 7 Dijital ışık işleme düzeneği

c) Sürekli Sıvı Arayüz Üretimi (SSAÜ)

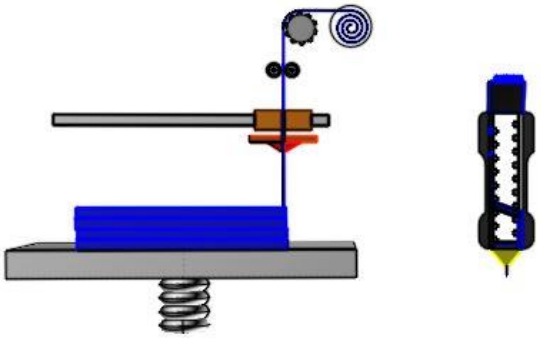
Üç boyutlu yazıcılarda teknolojik yöntemlerinden biri de Sürekli Sıvı Arayüz Üretimi yöntemidir Şekil 2.8. Bu teknolojide, güçlü ve renksel geri verimliliği yüksek olan bir LED'den gelen ışık UV ile sertleştirilen reçinenin 3 boyutlu baskıdan çıkarılan ürünün görüntüsünü ortaya çıkarır [117]. Bu işlem esnasında oksijen tarafından reçine üzerinden yayılan ışınların saçılması önlenir. Bu bölge ölü bölgedir. Ölü bölgenin üst kısımlarında ise UV ışınları bu bölgenin dışında kaldığı için oluşturulan parçaların katılaşmasını ve daha net bir şekil almasını sağlayabilir .



Şekil 2. 8 Sürekli sıvı arayüz üretimi düzeneği

2.3.2 Malzeme Ekstrüzyonu

Malzemenin bir nozul tarafından dağıtıldığı eklemeli üretim yöntemidir Şekil 2.9. Malzeme ekstrüzyon yönteminde ana ham madde olarak genelde polimer bir malzeme ekstrüzyon kafasında eritilerek nozul tarafından seçici olarak baskı yüzeyinin üzerine dökülebilir yahut bu hareket baskı alanını üzerinde bulunduran tablanın x-y düzlemi doğrultularında hareket etmesiyle de sağlanabilir [118]. Bu yöntemde bir katman tamamlanıp sonrasında baskı alanının aşağıya doğru hareket etmesi ya da ekstrüzyon başlığının hareket etmesi sağlanır. Bu sayede oluşacak yeni katman bir önceki katmanın üstünü doldurarak sistemin çalışması sağlanmaktadır. Bu yöntemde hammadde olarak termoplastik filament kullanılmaktadır [119].



Şekil 2. 9 Malzeme ekstrüzyonu düzeneği

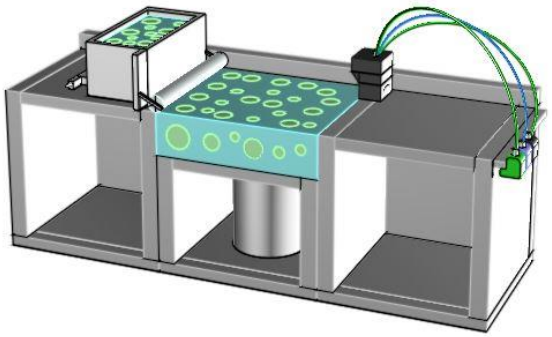
2.3.3 Malzeme Jeti

Malzeme Jeti teknolojisi de inkjet teknolojisinde kullanılan püskürtme başlığı gibi uç başlık kullanılarak malzemelerin damlalar halinde dökülmesi prosesine dayanmaktadır[120]. Damlalar bir veya çift başlık kullanılarak baskı alanı üzerinde hareket ederek basımı sağlayabilir. Malzeme ham maddesi olarak foto polimer bir

malzeme ya da hassas dökümlerde kullanabilmek için daha önceden üretilmiş mum tabanlı bir malzeme kullanılmaktadır. Bu yöntem 3BY'lerde en sık kullanılan yöntemlerden biridir. Ekstrüzyon nozulun içerisinde bulunan açma kapama sistemi ile malzeme akışı ayarlanabilmektedir. Nozul, üzerinden malzeme eritilerek baskı oluşması için gerekli akışkanlıklar sağlanmış olur. Bu yöntemin kullanılmasının nedeni kullanılan malzemenin ucuz ve maliyeti düşük olmasıdır [121].

2.3.4 Bağlayıcı Jeti

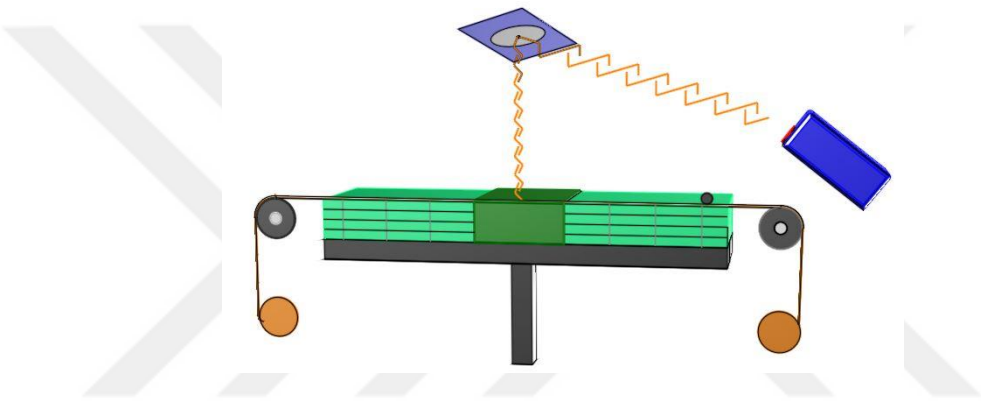
Bağlayıcı Jeti yöntemi, sıvı halde bulunan birleştirici malzemenin herhangi bir inkjet başlığındaki nozullardan toz halindeki malzemenin üzerine seçici olarak damlatılıp bir araya getirilmesi yöntemiyle çalışmaktadır Şekil 2.10 [122]. Bu yöntem, inkjet başlığıyla birlikte malzemeyi dağıttığından dolayı yöntem olarak malzeme jeti teknolojisi ile benzer özelliklere sahiptir. Bu yöntemin Malzeme jeti yöntemi ile arasındaki farkı, bağlayıcı Jeti teknolojisinde baskı başlığından dağıtılmış olan malzeme tasarım için kullanılan malzeme değil toz halindeki ham madde malzemesini bir araya getirmek için kullanılan sıvı halde bulunan yapıştırıcı malzeme türüdür. Bu yöntemde iki farklı tür malzeme kullanılır. Bunlar toz bazlı malzeme ve bir sıvı bağlayıcıdır. Bu yönteme göre tasarımın oluşturulduğu yerde toz eşit katmanlar halinde yüzeye yayılır ve toz parçacıklarını birbirine bağlamak için yapışkan bir malzeme nozullar tarafından püskürtülür [123]. Baskı bittikten sonra geri kalan tozlar temizlenir ve bir sonraki nesneyi 3BY'de basmak için kullanılır. Bu teknoloji ilk olarak 1993 yılında Massachusetts Institute of Technology'de geliştirilmiş olup 1995 yılında Z Corporation şirketi tarafından lisansı alınmıştır [124,125].



Şekil 2. 10 Bağlayıcı jeti düzeneği

2.3.5 Levha Laminasyon

ASTM tanımına göre Levha Laminasyon, malzeme tabakaları bağlanarak bir nesnenin parçasını üretmek için yapılan 3 boyutlu baskı işlemidir [126] Şekil 2.11. Bu tekniğin kullanıldığı işlemler Laminasyonlu Nesne İmalatı (LNİ) ve ultrason katkılı imalattır (UKİ) [127]. Bu tekniğin avantajları şunlardır; tam renkli baskılar yapabilir, nispeten ucuzdur, malzeme kullanımı kolaydır ve fazlalık malzeme geri dönüştürülebilir. LNİ, daha düşük imalat maliyeti ve daha az işletim süresi ile karmaşık geometrik parçalar üretme yeteneğine sahiptir [128]. UKİ, özelliksiz folyo stoğundan çekilmiş metal katmanlarını birleştirmek için sesi kullanan yenilikçi proses teknolojisidir.

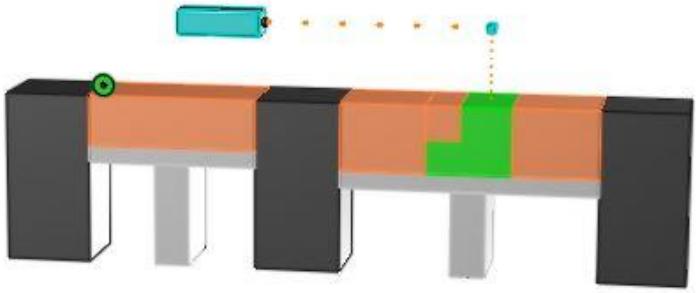


Şekil 2. 11 Levha laminasyonu düzeneği

2.3.6 Toz Yatağı Füzyonu (TYF)

TYF prosesi termal enerjinin, toz yatağı üzerinde seçili alanlar üzerine nüfuz etmesiyle çalışmaktadır Şekil 2.12. Bu enerji ile toz halindeki malzemenin eritilmesiyle malzemeler tekrardan bir araya getirilir sonrasında oluşan baskı parçası soğuyarak katı ve sert bir şekil alır. Bu tür katmanlı üretim yöntemlerinde kullanılan teknikler şunlardır: Seçici Lazer Sinterleme, Doğrudan Metal Lazer Sinterleme, Elektron Işınlı Ergitme, Doğrudan Metal Lazer Sinterleme [129]. 3BY teknolojilerinde SLS metodu; seramik, plastik veya cam tozlarının küçük parçacıklarını istenilen üç boyutlu şekle sahip bir kütle ile kaynaştırmak için yüksek güçlü lazer olarak kullanılabilir. Lazer, toz halindeki bir baskı yüzeyi üzerindeki 3 boyutlu modelleme programı tarafından oluşturulan kesitleri ya da katmanları tarayarak toz haline getirilen malzemeyi, seçici olarak kaynaştırabilir. Her bir kesit taranıldıktan sonra, tozlu tabaka bir tabaka kalınlığında azaltılarak işlem

sağlanabilir. Sonrasında bu tabakanın üstüne farklı bir malzeme tabakası eklenir ve ürün oluşana kadar yapılan işlemler tekrarlanır [130,131].



Şekil 2. 12 Toz yatağı füzyonu düzeneği

a) Seçici Lazer Sinterleme (SLS)

3BY Teknolojilerinden biri olan SLS metodu, plastik, seramik veya cam tozlarının küçük parçacıklarını istenen üç boyutlu şekle sahip bir kütleye kaynaştırmak için yüksek güçlü bir lazer kullanır [132] Şekil 2.13. Lazer, toz halindeki bir yatağın yüzeyi üzerindeki 3D modelleme programı tarafından oluşturulan katmanları tarayarak toz haline getirilen malzemeyi seçici olarak kaynaştırabilir. Her bir katman taranıldıktan sonra, toz tabaka bir tabaka kalınlığında azaltılır. Daha sonra üstüne yeni bir malzeme tabakası eklenir ve nesne tamamlanana kadar işlem tekrarlanır [133].

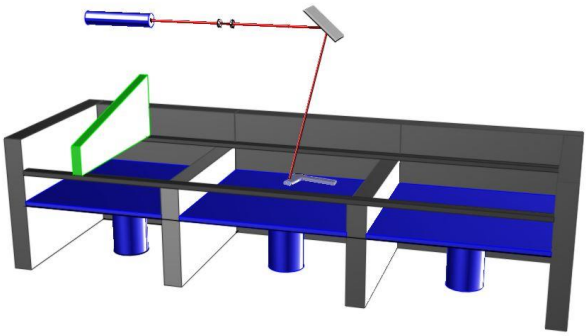


Şekil 2. 13 SLS düzeneği

b) Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS)

DMLS tekniği üretim nesnesi açısından diğer konvansiyonel üretim tekniklerine göre hammaddelere ve şekillere esneklik verebilme potansiyeline sahiptir [134].

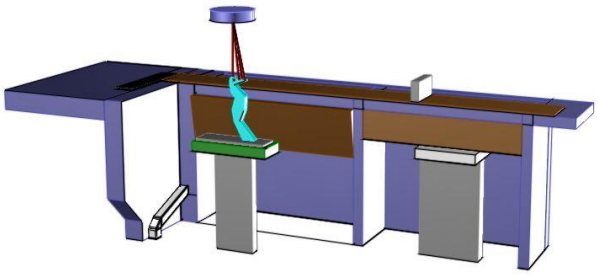
DMLS temel olarak SLS ile benzerdir fakat üretimde kullanılan plastik, seramik veya cam yerine metal de kullanılabilir. DMLS tekniği, metalik parçacıkları birbirine bağlamak için sıvı faz sinterleme işlemi uygular [135] Şekil 2.14. Herhangi bir yere temas etmemiş metalik tozlar bulunduğu yerde kalır ve her nesne için bir destek yapısı olur. Bu yüzden SLS ve SLA'ya göre avantajı, herhangi bir destek yapısına ihtiyacı olmamasıdır. Aynı zamanda bu yöntemde kullanılmayan tozlar bir sonraki baskı için kullanılabilirdir [136].



Şekil 2. 14 DMLS düzeneği

c) Seçici Lazer Ergitme (SLE)

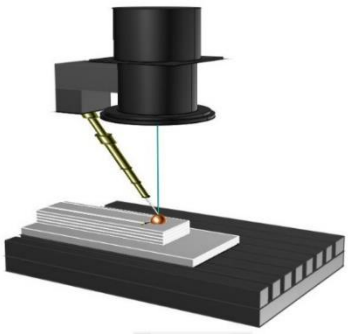
Lazerle Sinterleme metodundan faklı olarak bu yöntemde toz parçacıklarının eriyip birbirine tutunması ile ergitme işlemin gerçekleştirilmesidir [137,138]. SLS metodunda lazer kaynağın ergime olayının toz parçacıklarının birbiri ile bağını oluşturmaya yönelikken, SLE'de tam ergime yapılarak saf metal elementler elde edilir [139,140,141]. Tam yoğunluklu malzeme üretimi için SLE metodu kullanılabilir. Bu yöntemlerin kullanıldığı tezgahlar SLS tezgahlarına benzerdir Şekil 2.15. Sistemden herhangi bir gaz çıkışı yapılmasıyla yanıcı gazların oluşması engellenebilir veya Ti ve Mg gibi koruyucu malzemeler eklenebilir [142,143]. Tabakadaki katmanların kalınlığı 1- 5 µm olup duvar kalınlığı 30 µm, lazer odaklama çapı ise 20 µm 'den düşük olduğundan dolayı SLE'nin hassasiyeti düşüktür. Bu yüzden de maliyeti oldukça yüksektir [144].



Şekil 2. 15 SLE düzeneği

d) Elektron Işınlı Ergitme (EIE)

Toz halinde bulunan metalleri ısıtarak ergitme ve birleştirme mantığıyla oluşan yönteme Elektron Işınlı Ergitme denir [145,146] Şekil 2.16. Bu yönü ile SLS yöntemi ile benzerdir. Fakat EIE prosesinde yoğunluğu yüksek olan metal parçaları, güçlü bir elektron ışınına maruz bırakılarak metal parçalarının basımı yapılır. EIE 3 boyutlu tasarım programında katmanlar halinde sıralı olarak modellenir. 1000°C sıcaklıkta vakumda bulunan hareketli tabla yüzeyine dağıtılan metal tozlar tasarım programı üzerinden kontrol edilerek elektron bombardımanına maruz bırakılarak 0,1 mm kalınlığa sahip tabakalar oluşturulabilir [147]. Yaklaşık olarak 28000°C'de elektronlar hızlandırılıp sonrasında ışık hızının yarı değeri ile toza çarpıtılır. Çarpan elektronların kinetik enerjisi metali ergitme potansiyeline sahiptir. Ergitme sonrasında tabla dikey olarak konumlandırılıp farklı bir tozlu tabaka ergitilmek için kullanılır .

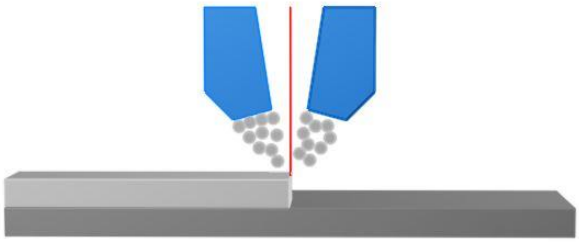


Şekil 2. 16 EIE düzeneği

2.3.7 Yönlendirilmiş Enerji Birikimi (YEB)

Bu yöntem termal enerji kullanılarak ham maddenin ergitilmesiyle ve tekrardan bir araya getirilmesi prensibine dayanan eklemeli üretim tekniğidir [148] Şekil 2.17. Bu yöntem 'Lazer Kaplama' ya da 'Üflemeli Toz Eklemeli Üretim' olarak da adlandırılır

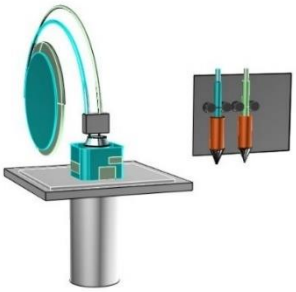
[149,150,151]. Uygulama alanlarına bakıldığında yüksek teknolojinin gerektiği alanlarda, metal sektöründe, seri üretim uygulamalarında kullanılmaktadır [152]. 3BY aksamlarının yanında metali eritmek için bir enerji kaynağı gerekmektedir. Bunlar; elektron ışını, lazer ve plazma arkıdır [153].



Şekil 2. 17 YEB düzeneği

2.3.8 Kaynaştırılmış Birikim Modelleme (KBM)

Kaynaştırılmış Birikim Modelleme [154], 1989 yılında Stratasys tarafından geliştirilen 3BY teknolojisindeki en yaygın ve en basit tekniktir. Kaynaştırılmış Birikim Modelleme tekniğinde ABS, naylon, PLA ve bunların karışımları gibi geniş bir termoplastik yelpazesi kullanılır [155]. KBM işlemi, termoplastik bir filaman erime noktasının üzerindeki bir sıcaklıkta bir sıvılaştırıcıda eritildiğinde ve daha sonra belirli bir çaptaki bir nozuldan itildiğinde başlar Şekil 2.18. Meme hareket ettikçe, erimiş termoplastik filament, ısıtılmış bir yatak üzerinde yatay yönde katmanlar biriktirilir . İlk katman basıldıktan sonra, nozul ikinci katmanı önceki katmanın üstüne yazdırmaya başlar ve nesnelerin tamamlanmasına kadar devam eder.



Şekil 2. 18 KBM düzeneği

2.4 Üç Boyutlu Yazıcı Ham Maddeleri

3BY'lerde en çok kullanılan filament türleri ABS ve PLA olmak üzere kullanılan başka tür filamentlerde mevcuttur [156]. Bunlar Yüksek Etkili Polistiren (YEP), PETG, Polivinil Alkol (PVA) gibi filamentlerdir [157]. PLA'lar başka tür malzemelerle birleştirilerek sıcaklık ya da ışığa dayanıklı filamentlere dönüştürülebilir. Katkı malzemesi olarak bronz, bakır, pirinç kullanılabilirdir. PLA'lar gibi aynı özeliğe sahip olan filamentlerde karbon ve anti bakteriyel filamentlerdir. Bu filamentler özel olarak hazırlanabilir. Bu tür malzemeler PLA ile karıştırılarak oluşturulabilir. Karbon filamentlerin karışım oranı, çoğunluğu PLA olmak üzere karışım oranı genelde %30 ile %40 arasında değişmektedir [158]. Dünya da bu malzemelerin üretildiği birçok şirket vardır. Bu şirketlerden biri olan Amerika Birleşik Devletlerin' de bulunan Makergeeks firmasının ürettiği örnek PLA malzemeleri şunlardır; Easyfil PLA Filaments, Ninjaflex PLA türleridir [159]. Farklı tür yazıcı hammaddesi üreten şirketlerden biri ise Çin'de bulunan Esun3D şirketidir. Bu şirketin 3BY için ürettiği filament türleri şunlardır; ABS, PETG, PLA, PVA, Luminous (Parlak) malzeme türleridir [160]. Diğer bir şirket olup Hollanda'da çalışmalarını sürdüren "formfutura" şirketinin ürettiği malzeme türleri şunlardır; Easyfil PLA, Premium PLA, Easyfil ABS, ABSpro, Premium ABS, ClearScent ABS, FlexiFil-Flexible TPC (Esnek TPC), Easyfil HIPS [161].

2.4.1 ABS

ABS kalıba döküldükten sonra enjeksiyon sisteminden geçirilip elde edilen petrol bazlı olması nedeniyle biyolojik olarak parçalanmayan bir termoplastik türüdür [162]. ABS ile Yüksek Yoğun Polietilen (YYPE) karşılaştırıldığında ABS'nin mekanik özelliklerinin daha iyi olduğu görünmektedir. ABS ile PLA karşılaştırıldığında ise ABS'nin PLA 'ya göre daha az kırılgan yapıya sahip olduğu ayrıca sürtünme katsayısının düşük olması nedeniyle daha düşük mukavemete ihtiyacı olduğu saptanmaktadır. ABS'nin diğer avantajları ise maliyetinin düşük olması, 3 Boyutlu baskının sağlam olması, esnek ve hafif olması, 3BY üzerinde bulunan ekstruder girişine kolayca giriş yapabilmesidir. Dezavantajları ise ekstruder 'den yüksek sıcaklıkla istenilen şekle geçiş yapabilmesidir. ABS baskıları için gerekli olan standart sıcaklık değeri 220℃-240°C arasında ve nozul erime sıcaklığı 230°C

civarlarındadır [163]. ABS işlem esnasında kötü kokular çevreye yayabilir [164]. ABS'nin yoğun olarak kullanıldığı alanlar şunlardır; 3 Boyutlu baskıda oluşturulan otomotiv parçalarında, mutfak eşyalarında ve çocuk oyuncaklarında kullanılabilmektedir. [165].

2.4.2 PLA

Polilaktit Asit mısır nişastası, şeker kamışı gibi biyolojik malzemelerden oluşan bir tür bioplastiktir [166,167]. İnsan sağlığına çok fazla olumsuz bir etkisi bulunmamaktadır. Ayrıca biyolojik olarak kolayca parçalanabilir. Genelde 195°C ile 210°C derece arasında baskı işlemi için kullanılabilir [168]. Erime sonrasında hızlıca soğuyabilir ve esnek bir oluşum sağlayabilir. ABS ile PLA ısı toleransı özelliği bakımından karşılaştırıldığında 60°C'ye geldiğinde PLA ortama daha çok kötü kokular yaymaya başlayacaktır ABS ise daha yüksek sıcaklıklarda bu olumsuz özelliği ortaya çıkarmaya başlayacaktır. Fakat PLA 'ya farklı malzemeler eklenerek sert PLA elde edilebilir. Bu sayede kırılganlık oluşumun önüne geçilmiş olunabilir. Maliyetinin düşük olması ve diğer kullanılan hammaddelere göre kolay bir şekilde 3BY'nin baskı alanına yapışabilmesi nedeniyle 3BY'lerde kullanılabilirliği artmaktadır [169].

2.4.3 PVA

PVA sıvılarda çözünebilme özelliğiyle 3BY'lerde baskı sırasında destek malzemesi olarak ya da soğuk suya karıştırılarak elde edilmesi istenen parçayı ayırmak için kullanılan bir tür sentetik polimerdir [170]. PVA'nın erime noktası 200°C derece civarında olup biyolojik olarak parçalanabilir ve çevreye zararlı etkisi oldukça azdır [171].

2.5 Üç Boyutlu Yazıcı Endüstrisinde Kullanılan Malzemeler

Diğer endüstriyel üretim süreçlerinde olduğu gibi 3BY baskılarında kullanılan malzemelerin basım için kaliteli ve uygulanabilir olması gerekmektedir. Aynı şekilde 3BY'nin de basımı kaliteli gerçekleştirebilmesi için 3BY'nin mekanik aksamları ve elektronik altyapısının da iyi olması gerekmektedir. Kaliteli bir basım, tedarikçinin son kullanıcıya sağlayacağı malzeme ile ilgilidir. Bu bağlamda ürün ve 3BY birbiriyle bütünleşmiş olup basım kalitesini üst seviyeye çıkarabilir. Aynı

zamanda baskı kalitesini seçilen malzeme de düşürebilmektedir. 3BY teknolojisinde kullanılan malzemeler seramik, metalik, polimerler dâhil olmak üzere birçok farklı tür malzeme kullanılabilmektedir. Bu malzemeler 3BY'nin extruderlerinde hibrit bir ürün ortaya çıkarabilmektedir bu ürün herhangi bir işlevsel parça olabilir ya da üretilen bu ürün İşlevsel Dereceli Malzemeler (İDM) fonksiyonel olarak malzeme oranları derecelendirilmiş olabilir [172].

2.5.1 Metaller

Metal üç boyutlu baskı teknolojisinin havacılık, otomobil, tıbbi uygulama ve imalat sanayi gibi alanlarda kullanılması teknolojik açıdan oldukça avantajlıdır [173,174]. Metal malzemelerin mükemmel fiziksel özellikleri karmaşık baskı teknolojileri için uygulanabilirdir [175]. Bu uygulamaların örnekleri yapay insan organları ve uzay parçalarıdır. Bu alanlarda kullanılan metal bazlı malzemeler alüminyum alaşımları [176], kobalt bazlı alaşımlar [177], nikel bazlı alaşımlar [178], paslanmaz çelikler [179] ve titanyum alaşımlarıdır [180,181]. Kobalt bazlı alaşımlar 3BY teknolojisinde diş çalışmaları için kullanılabilirdir. Bu çalışmalarda uygulanabilir olmasının nedeni, yüksek özgül sertliği, esnekliği, yüksek geri kazanım kapasitesi, uzaması ve ısıl işlem şartları olmasıdır [182]. Ayrıca, 3 boyutlu baskı teknolojisinde, nikel alaşımlar kullanılarak havacılık endüstrisinde kullanılan parçalar üretilebilmektedir [183]. Üretilen bu parça yüksek korozyon direncine sahiptir. Basılan bu ürün 1200°C'ye kadar sıcaklığın yoğun olduğu ortamlarda kullanılabilirdir. Diğer bir alaşım olan Titanyum 3BY teknolojisi kullanılarak baskı çıktısı alınabilir. Titanyum alaşımı yüksek korozyon ve oksidasyon direncine sahip olmasıyla birlikte aynı zamanda düşük yoğunluğa sahiptir. Üretilen bu parçalar havacılık endüstrisinde, biyomedikal endüstrisinde, yüksek çalışma sıcaklıklarının bulunduğu alanlarda ve yüksek gerilimlerde kullanılmaktadır. [184,185].

2.5.2 Polimerler

3BY teknolojisinde polimer bazlı malzemeler karmaşık geometrili prototip uygulamalarında kullanılmaktadır [186]. KBM kullanarak bir 3 boyutlu tasarım oluşturabilir. 3 boyutlu bir tasarım extruder ile termoplastik filament tabakalar PLA, Polipropilen (PP), Akrilonitril Bütadien Stiren, polietilen (PE) biriktirme ile basılabilmektedir [187]. Son yıllarda Polietereterketon (PEEK) ve Polimetil

Metakrilat (PMMA) termoplastikler gibi daha yüksek erime sıcaklıklara sahip olan filamentler 3BY teknolojisinde kullanılmaktadır [188]. 3 boyutlu polimer baskı malzemeleri sıvı halde veya daha düşük erime noktasına sahip olması, düşük maliyet, hafif olması ve baskı esnasında esneklik payının yüksek olması 3BY endüstrisinde kullanılabilirliğini arttırmaktadır [189]. Polimerler kullanım alanı olarak ortopedik implantlar da mekanik destek sağlamak amacıyla, biyomateryaller de ve tıbbi cihazlarda kullanılmaktadır [190].

2.5.3 Seramikler

Günümüzdeki 3 boyutlu baskı teknolojisi, seramik ve betonarme kalıplarını parçalar halinde üretebilir. Bu baskı esnasında üründe herhangi bir çatlak ve gözenek oluşmaması için mekanik özelliklerinin parametrelerinin optimizasyonu iyi bir şekilde ayarlanmalıdır. [191]. Seramik yapısı sağlam olup aynı zamanda yüksek sıcaklıklara dayanabilmektedir. Seramikler henüz katı halde bulunmadan önce oluşturulacak inşaat ve binaların geometrisine uygulanabilir niteliktedir [192]. Seramik malzemeler diş ve havacılık endüstrisinde kullanılabilirdir. Bu materyallerin örnekleri alümina (Alüminyum oksit) [193], biyoaktif camlar [194] ve zirkonyadır [195]. Alümina tozu 3BY basımındaki süreçlere uygundur. Alümina çok geniş bir uygulama alanına sahip ve bir seramik oksittir. Seramikler katalizörlerde, absorbanlarda (İlaç veya zehirli madde moleküllerinin yüzeyine bağlanarak onların emilmesini engelleyen madde), mikro elektronikte, kimyasallarda, havacılık endüstrisinde kullanılmaktadır [196]. Alümina mükemmel kürlenmeye sahiptir [197]. 3 boyutlu basım ve sinterleme sonrasında alümina parçaları yüksek yoğunluğa sahip olmaktadır. SLA seramik ve biyoaktif camlarının dönüşümünde kullanılabilir. Bu kullanılan malzeme camların bükülme mukavemetini arttırmaktadır. Stereolitografik Seramik İmalatı (SLSİ) kaliteli bir baskı esnasında döküm için kullanılabilir potansiyele sahiptir. Bu üretim homojen mikro yapıya, yüksek sıkıştırma mukavemeti ve eğilmeye sahiptir [198]. Zirkonya (Zirkonyumdioksit) nükleer enerji sektörlerindeki ana yapı malzemelerinde kullanılmaktadır [199]. Hafniyum içermeyen zirkonyum ise daha çok radyasyona karşı düşük duyarlılığı ve düşük termal nötronu olduğu için bu uygulamalarda kullanılabilirdir.

2.5.4 Kompozitler

Kompozit malzemeler birçok özelliğe sahiptir. Bunların en önemlilerinden birkaçı düşük ağırlığa sahip ve boyanabilir olmasıdır. Bu yüzden endüstri sektöründe kullanılabilirliği giderek artmaktadır. Kompozit malzemelerden bazıları şunlardır; güçlendirilmiş karbon fiberler, polimer kompozitler ve cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerdir [200]. Karbon fiber takviyeli polimerler kompozit yapılar yüksek sertlikleri, mukavemetlerinin iyi olması nedeniyle havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [201]. Ayrıca, korozyon direnci yüksektir. Aynı zamanda cam elyaf takviyeli polimer kompozitler 3 boyutlu baskı uygulamasındaki çeşitli uygulamalar için yaygın olarak kullanılmaktadır [202]. Fiberglas yüksek ısı iletkenliğine ve düşük termal genleşme katsayısına sahiptir. 3 boyutlu basım uygulamalarındaki üretim aşamalarında yüksek sertleştirme sıcaklıkları olması nedeniyle fiberglas gibi malzemeler kullanılabilmektedir [203].

2.5.6 Akıllı Malzemeler

Akıllı malzemelerin özelliği herhangi bir dış koşul ile örneğin; ısı veya su etkisiyle malzemenin geometrisini ve şeklini değiştirebilme yeteneğine sahip olmasıdır. [204]. 3BY ile bastırılmış malzemeler daha çok robot sistemi gibidir. Akıllı malzemeler 4 boyutlu sınıfında yer almaktadır. Akıllı malzemelerden biri de şekil bellekli malzeme baskılarıdır [205]. Polimerler [206], Nikel-titanyum gibi bazı şekil hafızalı alaşımlar mikro elektromekanik sistemlerde ve biyomedikal implantlarda kullanılabilmektedir [207]. 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanılarak karmaşık şekil belleğine sahip polimer uygun bir şekilde üretilebilmektedir. Akıllı malzemeler ile üretilen ürünün kalitesi ve şekil hafıza belleği boyutsal doğruluk, yüzey pürüzlülüğü ve parça yoğunluğuna göre değerlendirilebilir [208].

2.5.7 Özel Malzemeler

Günümüz teknolojisinde 3BY'lerin baskı kabiliyeti olması nedeniyle gıda, Lumar tozu ve tekstil alanlarında da kullanılabilmektedir. 3BY teknolojisi gıda malzemelerinin hammaddesini kullanıp istenen boyutlarda ve geometride gıda ürününü üretebilir. Bunlardan birkaçı şunlardır; Çikolata, pizza, et, şeker, sos, spagetti vb. [209]. 3BY teknolojisi bu uygulaması ile üretim süresini azaltıp ürün bileşenlerini istenen orana göre seçebilme imkânı sunabilmektedir [210]. Lumar

tozu 3 boyutlu baskı işleminde doğrudan çok katmanlı parçalı ürünler üretebilme yeteneğine sahiptir [211]. 3BY'lerin kullanım alanlarından biri de tekstil endüstrisidir. Herhangi bir CAD programında çizilen tasarım diğer 3BY'lerde olduğu gibi arayüz programı desteği ile yazıcının desteklediği (. Gcode, .stl, .evrensel) formatlardan birine dönüştürülerek yazıcıya aktarılıp ve kullanılması planlanan malzeme yazıcıya eklenerek üretim yapılabilir. Polyester pamuk kompozit malzemeler bu üretimlerde kullanılabilir. Bu kompozit malzemeler ilk olarak sıvı hale dönüştürülüp cam elyaf üretiminin sağlanması için elektro spin yöntemi uygulanarak tekstil lifi halinde ürün oluşturulabilir. Tekstil endüstrisinde mücevher ve giyim alanlarında 3BY'nin kullanılmasıyla üretim işlemleri daha hızlı ve kısa sürede gerçekleştirilebilir. Ayrıca ürün ambalajlarının üretim maliyetlerinin düşürülmesi sağlanabilir [212].

2.6 Üç Boyutlu Yazıcının Üretim Teknolojisindeki Uygulama Alanları

2.6.1 Uzay Endüstrisi

3BY teknolojisi ile özgün üretim sağlanabilir. 3BY'ler Havacılık ile Uzay Endüstrisinde kullanılan hafif parçaları ve geliştirilmiş karmaşık geometrilere sahip parçaları üretebilme potansiyeline sahiptir. Bu endüstrilerde kullanılmasının avantajları vardır. Havacılık sektörü için enerji ihtiyacının azaltılmasını ve aynı zamanda kullanılan malzemeyi azalttığından yakıt tasarrufu sağlayabilir [213]. Ayrıca 3 boyutlu baskı teknolojisi, motorlar gibi bazı havacılık sektöründe kullanılan parçaları üretebilmek için yaygın olarak kullanılabilmektedir. Örneğin; Motorun herhangi bir parçası kolayca hasar görebilir, bu yüzden hasar gören parçaların düzenli olarak değiştirilmesi gerekmektedir. Bu sorunların üstesinden gelebilmek için 3BY teknolojisinin kullanımı yedek parçaların üretimi için iyi bir seçenek olarak gözükmektedir. Bu sayede yedek parça endüstrisinin üretimi 3BY sektörü ile şekillenebilecektir [214,215].

2.6.2 Otomotiv Endüstrisi

3BY baskı teknolojisi gelişmesi ile otomotiv sektöründeki üretim yöntemi değişikliklerine yön vermektedir. Otomotiv sektöründe 3BY tekniği üretiminde parıltı, hafif ve hızlı olması kullanılan teknolojinin tercih edilebilirliğini

arttırmaktadır. 3 boyutlu baskı teknolojisi ile sadece otomobil üretimi değil motorların üretiminde de etkin rol alarak uygulama alanlarının genişletilmesi sağlanabilmektedir. 3 boyutlu baskı ile üretilen otobüs OLLI'dir. OLLI sürücüsüz, akıllı ve elektrikli bir otobüstür. Ford 3 boyutlu baskı teknolojisi kullanarak prototip motor parçaları üretebilmektedir [216]. Diğer bir şirket olan BMW, otomotiv sektöründe test ve montaj proseslerinde kullanılan el aletlerini bu teknoloji ile üretebilmektedir. 2017 yılında, SLM Solution Group ve AUDI ile AG iş birliği yaparak yedek parça ve prototip üretme çalışmalara başladılar [217]. 3BY teknolojisi otomotiv endüstrisine birçok fayda sağlamıştır. Şirketlerin ürün geliştirme konusunda farklı bir üretim tekniği sunarak iyileştirmelere ve üst donanımlara sahip otomotiv üretime yönlendirmektedir. Kullanılan malzemelerin kullanımını ve tüketimini azaltmaktadır. Ayrıca teknoloji maliyetlerini ve üretim sürecini azaltıp oluşturulan yeni tasarımların hızlı bir şekilde test edilmesini sağlayabilmektedir. [218].

2.6.3 Gıda Endüstrisi

3BY teknolojisinin uzay endüstrisinde kullanımın yanı sıra gıda endüstrisinde kullanılabilmesidir. Gıda sektöründe sporcuların, çocukların, hamile kadınların, hastaların ve kişiye özelleştirilmiş diyet yiyeceklerinin geliştirilmesinde kullanılabilmesi 3BY'lerin önemini giderek arttırmaktadır. Bu sektörde besinlerin bileşenlerinin oranı değiştirilerek vakaya uygun bir program hazırlanabilir. Bu sayede vakaya verilecek olan besinlerin sağlıklı bileşenleri arttırılabilir [219]. Bu özelleştirilen gıdaların kişiye uygulanabilmesi için gereken besin parametrelerinin üzerinde ayrıntılı çalışma gerekmektedir. Bu besinler 3BY tarafından katmanlar halinde biriktirme yöntemi ile işlenerek elde edilebilir. Besinlerin tasarımı için 3BY'ye uygun evrensel bir CAD programı kullanılabilir [220]. 3BY teknolojisi ile belirli özelliğe sahip malzemeler karıştırılıp şekil ve içerik bakımından karmaşık geometriye sahip yapılar oluşturulabilir [221]. Bu teknoloji sayesinde çikolata, şeker, pizza ve püre gibi gıdalar tasarlanabilir. Ayrıca bu teknoloji kaliteli basım ve düşük maliyette üretim yeteneğine sahip olması gıda sektöründeki enerji verimliliğini arttırabilmektedir. 3BY teknolojisi dengeli beslenmeye dolaylı olarak insan hayatının iyileşmesine katkı sağlayabilir. Günlük egzersizlerin yanında daha etkileyici bir besin tasarım programı hazırlanarak egzersizlerin zamanı

düşürülebilir. Sağlık sektöründe doktorların belirttiği diyet takvimleri ve içerikleri 3BY'nin konseptine uygulanabilir bu sayede gıda ve sağlık sektörleri daha da işbirlikçi çalışmalarda bulunabilir [222].

2.6.4 Sağlık ve Medikal Endüstrileri

3 boyutlu baskı teknolojisi sağlık ve medikal alanlarda da kullanılabilir. Yanık derilerin düzeltilmesi için 3 boyutlu deri [223], ilaç oluşumlarını sağlamak maksadıyla ilaç araştırmalarında [224], insanların uzuvlarının kırıldığı ya da hasarlı olduğu bölgelerde kemik ve kıkırdak olarak [225], yedek dokularda [226], organlarda, kanser araştırmalarında [227] ve sağlık sektöründeki görsel eğitimlerde kullanılabilir. 3BY teknolojisinin biyomedikal sektöründe de kullanımının avantajları vardır. Bunlardan birincisi cildin doğal yapısını daha düşük maliyette çoğaltarak çıkarabilmesidir. İkinci olarak, 3BY ile çıkarılan deri kozmetik, ilaç ve kimyasal ürünleri test etmek için kullanılabilir. Bu ürünleri test etmek için gereksiz yere hayvan derileri kullanılmayarak ekolojik dengeye dolaylı olarak katkı sağlayabilir. Araştırma geliştirme bilim adamlarının doğru ve pratik sonuç almasına yarar sağlayabilmektedir [228]. İlaç teknolojisinde kompleks ilaçların dozlarının miktarlarını düşük ve yüksek olarak basımı sağlanabilir [229]. 3BY ile travma veya hastalık sonucunda oluşan kemik veya kıkırdaktaki boşlukları değiştirmek için kullanılabilir [230]. Bu tedavi yöntemi oto-greft ve allogreft kullanmaktan farklı seçeneklerdir. Bu tedaviler kemik yapısının oluşumunu ve işlevini geliştirmeye yöneliktir. 3BY teknolojisi, dokuların işlevinin değiştirilmesi, kaybedilen özelliklerinin geri kazanılması, dokunun bakımını yapmak veya geliştirmek için de kullanılabilir. 3BY teknolojisi ile üretilmiş olan yedek dokular birbirlerine bağlı gözenek ağına sahiptir. Ayrıca bu dokular biyo uyumlu, uygun yüzey kimyasına ve iyi mekanik özelliklere sahiptir. 3BY teknolojisi hastalık, kazalar ve doğum kusurları gibi sorunlardan kaynaklanan organ yetmezliğini önlemek için de kullanılabilir. 3BY teknolojisi kanser dokularının modellerinin oluşturulmasında da kullanılabilir [231]. Bu sayede kanser araştırmalarının hastalar üzerindeki çalışmaları daha güvenli ve sağlıklı bir şekilde ilerlemesine katkı sağlayabilir. Beyin cerrahları klinik eğitimlerde beynin 3BY çıktısı ile eğitim verebilir [232]. Bu sayede hastalıkların hızlı tanısında ve tedavisinde kullanılabilir. Bu süreçte patolojik bulgular için de ön çalışmalar yapılabilir.

2.6.5 Mimarlık ve İnşaat Endüstrisi

3 boyutlu baskı teknolojisi inşaat sektöründe de bir devrim yapabilme potansiyeline sahiptir. Karmaşık mimari model yapılarından ve bu modeldeki inşaatın ham madde malzemeleri birleştirilerek 3 boyutlu basım sağlanıp gerçek yapı ortaya çıkarılabilir [233]. Diğer endüstrilerde olduğu gibi inşaat endüstrisinde kullanılan standartlar doğrultusunda bileşenler oransal olarak hazırlanabilir. Ayrıca araştırmalar yapılarak deprem bölgeleri için uygun bina modelleri ortaya konulabilir [234]. Dijital ortamlarda 3BY teknoloji alt yapısı ile binaların yapımı merkezi bir ağ üzerinden başlatılarak daha güvenli ve standartlarının sağlanabilmesi gerçekleştirilebilir [235]. Bilgisayar üzerindeki program üzerinden Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) Bina bilgi modellemesi çıktı olarak alınabilir [236]. Bina Bilgi Modellemesi ile 3BY üzerinden binanın fiziksel özellikleri hakkında bilgi verebilir. Bu bağlamda binanın yapım işleminden gerektiği yerde yıkım işlemine kadar karar verebilme mekanizma sürecinin yönetilmesini sağlayabilir. Bu sayede teknolojik olarak binaların daha güvenli ve sağlıklı bir şekilde yapılması sağlanabilir [237]. 3 Boyutlu inşaat teknolojisi mühendisler ve müşteri arasında daha etkin bir rol alabilir. Tasarlanan gerçekçi veriler sayesinde ikili anlaşmaların daha güçlü ve net verilerle sağlanması bu teknolojinin yenilikçi yönünü arttırabilir. Ayrıca CAD programı ile tasarlanan Mimari modelin yapım süresi hesaplanabilir. Daha önce tarihte farklı yöntemlerden biri kâğıt kalem yöntemidir [238]. Mimari model bu yöntemle ortaya çıkarılır. 3 boyutlu baskı örnekleri ise Rusya'daki Apis Cor Basım Evi ve Amsterdam'daki Canal Evi'dir [239].

2.3.6 Kumaş ve Moda Endüstrisi

3 Boyutlu baskı teknolojisi kumaş ve moda sektöründe de kullanılabilmektedir. Mücevher [240] yapımında, ayakkabı baskılarında ve giyim [241] sektöründe uygulanabilirdir. Dünyada 3 boyutlu basım teknolojisi kullanım olarak gerçekliği giderek artmaktadır. 3 Boyutlu baskı ayakkabılarının seri üretimlerini geliştirmeye çalışan şirketler vardır. Bunlar; Nike, New Balance ve Adidas'tır [242]. Günümüzde, 3 Boyutlu baskı ayakkabı sipariş üzerine üretilmektedir [243]. Ayrıca, 3BY teknolojisi moda tasarımı için yenilikçi tasarım imkanları sunabilmektedir. Bu endüstride herhangi bir kalıba ihtiyaç duyulmadan üretim yapılabilmektedir. Moda

endüstrisinde, 3 Boyutlu baskı teknolojisi kullanılarak giysiler ve tekstil süsleri basılabilir. Bu sektörde ek olarak mücevher, saatçilik aksesuarları vb. üretimlerde de kullanılabilir [244]. Moda endüstrisinde 3BY teknolojisi ile tüketicinin isteğine göre kendine özgün tasarımlar üretilebilir. Ayrıca mevcut tasarımlar üzerinde eklemeler yapılarak ürünlerin iyileştirilmesinde kullanılabilir [245]. Bu teknolojinin kullanılmasıyla beraberinde getirmiş olduğu avantajlar şunlardır; ürünün isteğe bağlı olarak üretebilmesi, maliyeti düşürmesi, ürünlerin üretilme süresinin düşürülmesi ve az miktarlarda basılabilmesidir [246].

2.3.7 Elektrik-Elektronik Endüstrisi

3BY teknolojisi diğer endüstrilerde olduğu gibi Elektrik-Elektronik endüstrisinin de gelişimine katkıda bulunmaktadır. Elektronik sektörünün ilerlemesiyle 3BY'ler kendi gelişiminin yanı sıra elektronik cihazlarda nesne üretimi için de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [247]. Ayrıca elektronik komponentlerinin basılması için çalışmalar yapılmaktadır. Elektrot üretimlerinde iletken yolların kartın yüzeyine basımı ile üretimleri sağlanabilir. Bu uygulamalarda özelleştirmeler yapılabilir [248]. 3BY biriktirme modeliyle elektrot üretimindeki avantajları şunlardır; düşük maliyetli olması ve hızlı bir şekilde üretimin gerçekleştirilmesidir. Bu teknoloji ile 30 dakikada 8 elektrot basılabilir. 3BY ile elektrot yüksek hassasiyette basılabilir [249]. Ayrıca elektronik endüstrisinde çığır açacak teknoloji olan 3BY ile transistörler, silikon kontrollü doğrultucular, ışık yayan diyotlar, operasyonel amplifikatörler, piller vb. aktif ve pasif devre elemanları üretilebilir [250]. Bu teknolojinin uygulanabilirliği diğer endüstrilerde olduğu gibi çok hassas oranlar ve kimyasal bileşenler kullanılarak yapılabilir.3 boyutlu baskı teknolojisi, elektronik sektöründe daha yenilikçi yaklaşımlar ve tasarımlar sunarak uzay endüstrisinde de etkin bir rol oynayabilir [251]. Elektronik cihazların 3BY teknolojisi ile düşük üretim maliyeti, yüksek güvenilirlik, üretim sürecinin düşürülmesi sağlanabilir ve diğer taraftan üretilen kartların ömrünü tamamlaması halinde geri dönüşüme kazandırılabilir [252].

3

ÜÇ BOYUTLU YAZICI TASARIMININ GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

3.1 Üç Boyutlu Yazıcı Tasarım Kriterleri

3BY tasarımı yazılım, donanım ve mekanik içerikler içermektedir. Tüm sistemin birbiri ile uyumlu çalışması gerekmektedir. Aynı zamanda ortaya çıkarılan cihazın malzeme ile ilgili uyumu da önemlidir. Üretim sürecine bağlı donanımsal ya da yazılımsal tasarımlar değişiklik gösterebilir. Bu üretim süreci adım adım ilerlemektedir. İlk olarak kullanılan malzemenin ilgili parametreleri seçilmelidir. Bu parametreler sıcaklık, malzeme türü, akışkanlık gibi vb. parametrelerdir. Sonrasında eksenel hareketler için uygun parametreye sahip motorlar seçilir. Seçilen malzemelerin tasarım kolaylığı olması için de mekanik şase ile de uyum gösterecek ve aynı zamanda maliyet açısından sistemin işlevsel optimizasyonuna uygun olmalıdır. Motorlar, ekstruder, ısıtıcı yatak ile ilgili parametreler de sistemin sorunsuz bir şekilde çalışabilmesi için girilmesi gereken parametrelerdir. Motorlarda hız kontrolü ve ısıtma işlemlerinde kullanılan extruder ısıtıcısı geri beslemeli olarak çalışması gerekmektedir. Bu sayede oluşacak ürünün baskı kalitesi ve oluşturulacak ürünün baskı süresi yüksek doğruluk derecesine sahip olabilir. Sonuç olarak Tüm sistemin mekanik ekipmanlar, elektronik ve yazılımın uygun parametreler doğrultusunda baskı ürününün oluşturulması sağlanmış olur.

3.1.1 Yöntem

3BY'lerde kullanılan ham madde doğrudan üretim prosesine etkide bulunabilir. 3BY'nin tarihçesinde olduğu gibi yeni teknolojik gelişmeler ile üretim teknikleri oluşturulmuştur. 3BY ile gerçekleştirilmesi düşünülen tasarımda KBM en uygun seçim gözükmektedir. Çünkü 3BY'nin maliyeti düşük olması ve kapasitesi tasarım için uygulanabilir olmasıdır. Kullanım olarak KBM yöntemi sağlıklı ve çevresel açıdan kararlı olmasıdır. Aynı şekilde bu yöntem ile karmaşık geometrilere sahip ürünler şekiller çizildiği gibi elektronik devre kart tasarımları için de uygulanabilirdir. Devre kartları üzerinde yeterince z ekseni olmadığı için sabit bir

yükseklik ile devre tasarımları gerçekleştirilebilir. Bu sayede z ekseni boyunca oluşan titreşimler daha çok engellenebilir. Aynı zamanda KBM yönteminde sistemden alınan. Gcode formatındaki veriler alınarak extruder başlığının hareket etmesi sağlanabilir. 3BY elektronik devre kartından aldığı verileri kullanarak extruder nozulunda iletkenin viskozitesini ayarlar yani bu iletken akışkan meme tarafından ısıtılarak daha fazla sıvılaştırılır. İletken extruder başlığından çıktıktan sonra ısıtıcı yatak bu iletkenin yapışması yani tutunması için bir miktar ısıtılır. Bu ısıtma ile iletkenin substrata tutunması sağlanır. Isıtıcı yatak için gerekli değerler. Gcode formatında bulunan kaynak kodunun içerisinde bulunmaktadır. Bu komutlarda ısıtıcı tablayı aç, beklet ve istenilen sıcaklığa ayarlanabilme parametreleri bulunmaktadır. İletken yollar çizilirken gerekli olan yol kalınlıkları da extruder çıkışında ayarlanabilmektedir. Yol kalınlığı parametresi de Gcode formatında saklanmaktadır. Çizim işlemi sağlanırken öncesinde yapılan kalibrasyon ayarları da yapılması gerekmektedir. Kalibrasyon ayarlanırken parametreler inç, mm vb. olabilmektedir. Seçilen parametreye göre iletkenin değeri bulunabilmektedir. Test aşamasında bu parametreler uygulanıp daha sonrasında deneysel çalışmalar yapılabilmektedir. Bu sayede deneylerin sonuç doğruluğu artmaktadır.

3.1.2 Mekanik Seçimler

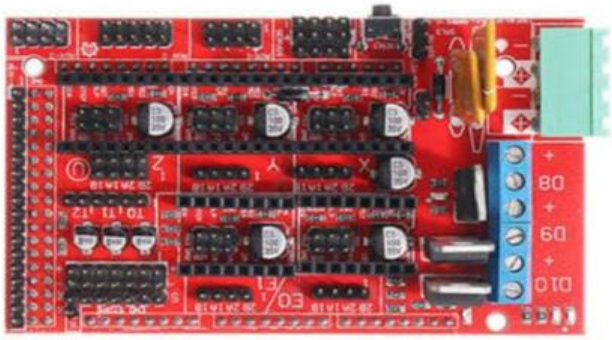
Elektronik baskı devre tasarımı için kartezyen model kullanılması yetersiz bir durum olabilir. Çünkü z ekseninde baskı için yeterli yükseklik ayarı yapılması imkânsız olurdu. Bu yüzden 3BY'lerin mekanik iskeletinin oluşturulması için gerekli aksamlara sahip olması gerekmektedir. Bu aksamlar mil, taşıyıcı, dişli, rulman, vidalar, kaplin ve şase gibi temel aksamlardır. Bu aksamlar bir araya getirilmeden önce mekanik sistemin en kötü şartlar için gerekli tasarımsal hesaplamalar yapıldı. Bu hesaplamalarda gerekli olan somun, vida, rulman, taşıyıcı gibi aksamların seçimi yapıldı. 3BY tasarımında X, Y eksenleri ısıtıcı tablada Z ekseni için de ekstruder hareketi sağlamak amacıyla tasarlandı. Isıtıcı tabla vidalarla mekanik şase yatağına konumlandırıldı. Kaplin 'in içerisinden miller geçirilerek ısıtıcı tabla ile kaplin arasında vidalar ile bağlantı sağlandı. Bu sayede ısıtıcı tablanın yatay pozisyonlarda hareketi sağlanabilir hale getirildi. Sonrasın da motorlar şase üzerinde bulunan yataklara yerleştirilip kayışlar eklenip gerekli bağlantılar oluşturuldu. Sistemin

mekanik olarak X, Y, Z eksenlerinde hareketi manuel olarak test edildi. Ayrıca seçilen malzemeler ile maliyeti arasında optimize yapıldı.

3.1.3 Elektronik ve Mekanik Ekipmanlar

3.1.3.1 Kontrol Kartı Seçimi

3BY'ler de motorların, ısıtıcı yatağın ve fanın kontrol edilmesinde kontrol kartları kullanılmaktadır. Kontrol kartı .gcode, .stl ve .dxf uzantıya sahip gelen ara yüz üzerinden dosyaları okumaktadır. Kontrol kartı motorlarla gelen bilgiyi iki şekilde dinler. Birincisi konum bilgisi diğeri ise hız bilgisidir. Gelen veriye bağlı olarak PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu) kontrol kartı darbe genişlik modülasyonu üretir. Motorların kontrolü bu sayede frekans ile kontrol edilebilmektedir. Konum bilgisi ise kontrol kartı üzerinde bulunan sürücülerin X, Y ve Z konumları için devreye girmesi ile ayarlanabilmektedir. Kullanılan kontrol kartı üzerindeki mikroçip ise ATMEGA 2560'tır. Bu işlemci 4 adet 16 bit zamanlayıcı, 4 adet USART, 5 adet SPI, I2C, 4 adet 8 bit PWM kanalı ve 16 adet 10 bit ADC'ye sahiptir. Tüm giriş çıkışların bağlantısı Şekil 3.1'deki Ramps 1.4 kontrol kartı üzerinden gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3. 1 3BY Kontrol kartı

3.1.3.2 Step Motor Seçimi

Step motorlar olarak Şekil 3.2'deki NEMA17 tip motorlar kullanılmıştır. Bu motorların sahip olduğu elektriksel ve mekaniksel parametreler şu şekildedir. Şaft tipi D sınıfı olup 5mm'dir. Devir başına adım sayısı 200(1,8°) olup 1200mA çalışma akımına sahiptir. Çalışma gerilimi 4V, faz direnci 3.3Ω, faz başına endüktans değeri ise 2,8mH'dir. 6 adet çıkış kablosuna sahiptir. Genelde kullanılan DC motorlar yüksek hızlarda kullanıldığında çok fazla torka sahip olamazlar. Step motorlar ise düşük hızlarda kullanıldığında maksimum torka sahip olabilirler. Bu yüzden yüksek

hassasiyet gereken 3BY ile baskı devre tasarımında step motorların kullanılması uygulanabilirdir. Step motorların kontrol edilmesi ise sürücüler tarafından gerçekleştirilir. Bağlantıda olduğu sürücü kontrol kartı tarafından gelen sinyallerle ara bağlantıyı sağlar. Bu sayede motorlar ile yatak taşıyıcıları ve eksenler kontrol edilebilmektedir. Bu tasarımda 4 adet step motor kullanılmıştır. Bu step motorların 2'si kayış üzerinden X, Y eksenlerinin kontrolünü sağlarken Z ekseni kontrolü ise mil üzerinden 3. Motor üzerinden kontrol ediliyor. 4. Motor ise extruder üzerinden malzeme geçişi esnasında dişlilerin kontrolünü sağlamaktadır.



Şekil 3. 2 3BY'nin x, y, z eksenlerine ait step motorlar

3.1.3.3 Sınır Anahtarı Seçimi

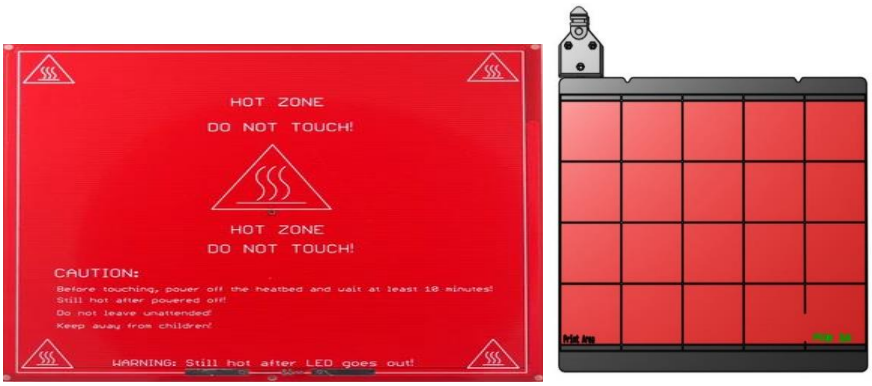
Sonlandırıcı (Sınır anahtarı) eksenel hareketlerde bitiş noktalarına gelindiğinde sistemi durdurma işlemi yapar. 3BY tasarımında Şekil 3.3'teki sınır anahtarı tipi kullanılmıştır. Eksenlerde çalışma sınırlarını belirler. Ayrıca çalışma alanı olan tablanın çalışma sınırlarını belirler. Sınıra geldiğinde mekanik kilitleme yapar ve çalışmayı durdurur. Bu sayede çalışma alanın dışına çıkılmaması için güvenli bir üretim ortamı oluşturur. Eksenlere göre bir ya da iki adet her eksen için bulundurulabilir. Bu şekilde çift yönlü kontrol sağlanabilir. Sınır anahtarı ısıtıcı yatağın temas etmesi ile sınır anahtarı sinyal çıkışı verir kontrol kartı tarafından algılanan bu sinyal sonucunda sistemin kontrollü olarak çalışması sona erdirilir. Sonuç olarak sınır anahtarı sensörü 3BY'ler için alınmış olan bir tür güvenlik önlemidir.



Şekil 3. 3 Eksenel sınır anahtarı

3.1.3.4 Isıtıcı Yatak Seçimi

Isıtıcı yatak 3BY'lerde baskının üzerine yapıldığı tabladır. Sıcaklık parametreleri ile ısı kontrolü sağlanmaktadır. 3BY ile baskı problemlerini ortadan kaldırabilmek için ısıtıcı yatağın vidalar ile iyi sıkıştırılmış olması, ekstruderin iletken çıkışı ile arasındaki mesafenin en aza indirilmiş olması gerekmektedir. Bu sayede iletkenin tablaya etkin sıcaklıkta tutunabilmesi sağlanabilir. Hatta ısıtıcı yatağın 4 köşe noktaları referans alınarak extruder ile arasındaki mesafeye göre yatak kalibrasyonu yapılabilir. Evrensel formatta gelen kodlarda ısıtıcı yatağı açma, kapama, zamansal olarak istenen sıcaklığa ayarlanabilme imkânı sunmaktadır. Elektriksel olarak 12-24 [V] ile çalışabilme yeteneğine ve ebat olarak 214*214*1,8 mm özelliğine sahip Şekil 3.4'teki ısıtıcı yatak kullanılmıştır.



Şekil 3. 4 Isıtıcı yatak ve mekanik oturtma yeri

3.1.3.5 Termistör Seçimi

3BY'de Şekil 3.5'teki termistör tipinden iki adet kullanılmıştır. Termistörlerin biri ısıtıcı yatağa diğeri ise extrudere bağlıdır. Temas eden uçlardaki sıcaklık bilgileri kontrol kartı tarafından hafızada tutulur. Bu sayede ısıtıcı tabla ile extruder sıcaklık durumları hakkındaki veriler ile iki uç nokta arasında oluşan sıcaklık farkı tespit edilebilmektedir. Termistörler bu farkı algılayarak bir direnç gösterir. Aşırı ısınma

ya da soğumayı engelleyebilir. Termistörün istenilen sıcaklıkta uzun süre direnç gösterebilmesi termistörün kalitesi ile ilgilidir. 3BY tasarımında 100k NTC termistörü kullanılmıştır. Bu tür Termistörler 300°C' de 100Ω' kadar düşebilmektedir. Germanyum, silikon ve metal oksit gibi maddelerden üretilebilmektedir. Bu tür sistemlerde extruder ile ısıtıcı yatak arasında bir sıcaklık farkı oluşmaktadır. Bu sıcaklık farkını engellemek için yani hatayı en aza indirebilmek için PID kontrolü yapılmaktadır. PID kontrolü ile extruder üzerinde bulunan termistörden sıcaklık bilgisi ve ısıtıcı yatak üzerinden alınan sıcaklık bilgisi alınarak fark en aza indirilebilir. Kontrol parametreleri olan K_p, K_i, K_d değerleri ile termistör kalibrasyonu yapılabilmektedir. Bu değerler kullanılarak istenilen sıcaklık değeri için sisteme girilebilir. Sonuç olarak termistör 3BY'ler için sistemde sıcaklık kontrolünün sağlanması için gerekli bir komponenttir.



Şekil 3. 5 Sıcaklık kontrolü termistörü

3.1.3.6 LCD Kontrol Paneli Seçimi

3BY'nin tasarımında Şekil 3.6'da kullanılan LCD ekran akıllı LCD ekran olup üzerinde SD kart okuyucu ve potansiyometreye sahiptir. Ramps ile arasında iletişim kurularak ekranda veriler gözükmektedir. 128 x 64 tipindedir. PC olmadan bile üzerindeki hafıza kartına .gcode formatına sahip dosya kaydedilmesi ile baskı yapılabilmektedir. Ayrıca kalibrasyon ayarları eksen kullanılmadan LCD ekran üzerinde bulunan potansiyometre üzerinden yapılabilmektedir. LCD ekran eksen konumları (X, Y, Z), sıcaklık, fan durumu, kalan baskı süresi gibi parametreleri gösterge ekranında gösterilebilmektedir. Sonuç olarak LCD ekran bir nevi kalibrasyon kontrol paneli ve gösterge paneli olarak kullanılması mümkündür.



Şekil 3. 6 Fonksiyonel LCD ekran

3.1.3.7 Step Motor Sürücüsü Seçimi

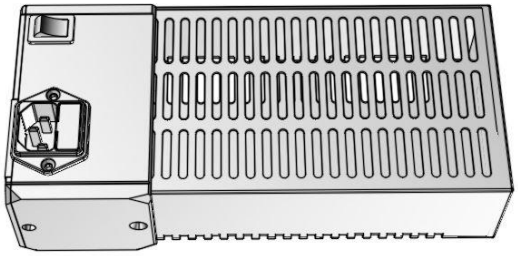
Step motor sürücüsü olarak Şekil 3.7'deki A4988 model motor sürücü kartı kullanılmıştır. Bu sürücü kartı ile motorlara istenilen konuma gitmeleri için kontrol kartından gelen sinyaller doğrultusunda motorların yönü ve süresi belirlenmektedir. Bu projede 4 adet sürücü kullanılmıştır. Bu sürücüler X, Y, Z eksenlere ait motorların sürücüleri ve Extruder motor sürücüsüdür. A4988 sürücüsü aşırı akım koruması, aşırı sıcaklık koruması ve mikro adım çözünürlüğüne sahiptir. Ayrıca bobin başına maksimum 2 amper ile sınırlandırılmıştır. 8-35 volt arası çalışma gerilimine sahiptirler. Bağlantı noktaları ise RAMPS üzerindeki soketler üzerinden gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3. 7 Step motor sürücü kartı

3.1.3.8 Güç Kaynağı Seçimi

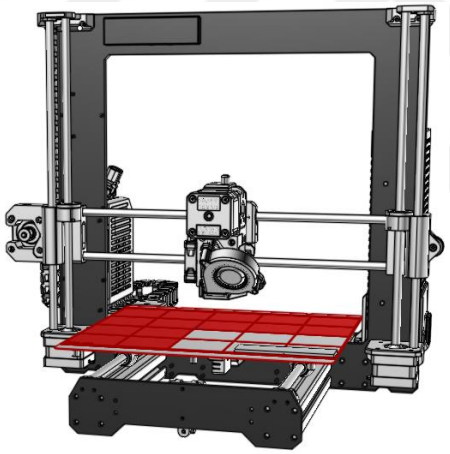
3BY tasarımında ise 12 volt 30 ampere sahip Şekil 3.8'deki güç kaynağı kullanılmıştır. 3BY'nin maksimum şartlarda çalışması durumunda bile gerekli olan güce sahiptir. Şebeke elektriğinde 220 volt tam regülasyonu sağlar. Çalışma gerilim aralığı 100-240 volt arası olup Aşırı akım koruma, Kısa devre koruma, gürültü önleyici filtreye sahiptir. Anahtarlamalı güç kaynaklarına göre daha karmaşık devre yapısına sahiptir. DC gerilime dönüştürülmesinde yüksek verimlidir. Sonuç olarak 360 Watt DC güç kaynağı kullanımı bu sistem için yeterlidir.



Şekil 3. 8 Güç kaynağı mekanik kalıp tasarımı

3.1.4 Mekanik Tasarımın Planlanması

Mekanik olarak sistemin tasarımı üretim yapılacak platform için Şekil 3.9'daki gibi sınırları belirlenmelidir. Tasarım esnasında motorun seçimi, rod ayarı, taşıyıcıların seçimi yapılmalıdır. Bu ekipmanların tasarım boyutları, sistemdeki taşınacak ağırlık sistemdeki kuvvet vektörleri parametreleri ile bulunabilir. İlk etapta X, Y, Z eksen motorların seçimi yapılmalıdır. Daha sonra maksimum seğim formülü ile rod ayarı yapılır. Baskı hacmi 200x220x220 mm^3 hacmindedir.



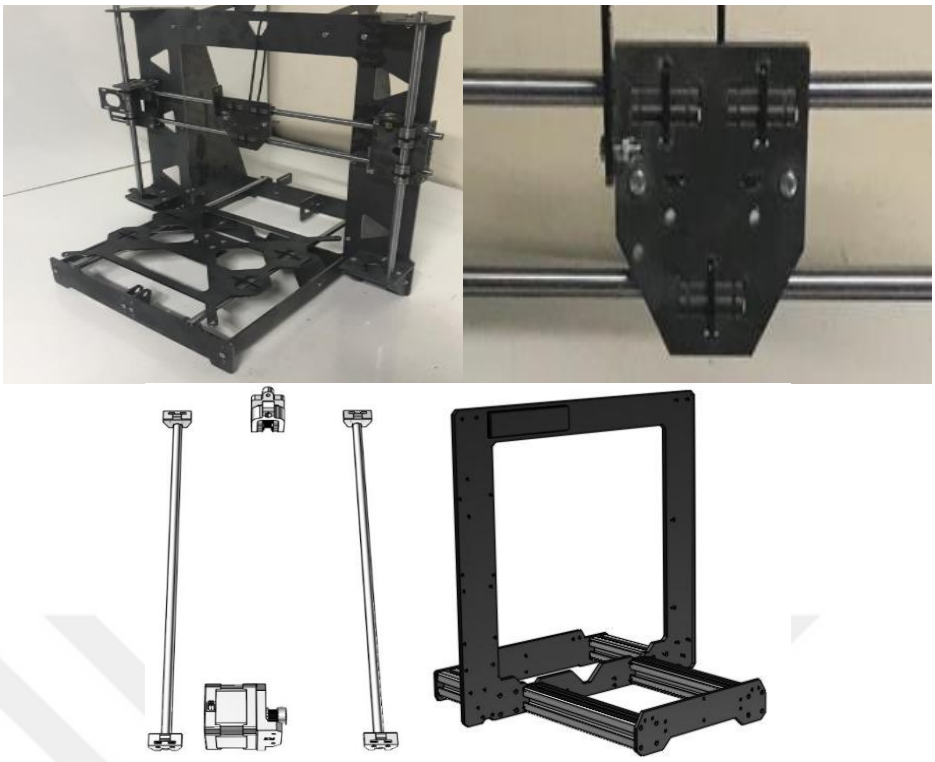
Şekil 3. 9 3BY'nin bilgisayar destekli tasarımı

Sistemdeki mekanik gürültülerin önlenmesi için vida seçimi de yapılmalıdır. Herhangi bir zamanda yani ileriki zamanlarda dâhil olmak üzere makine üzerinde deforme olma olasılığı en aza indirilmesi için sistemdeki problemler tespit edilip önüne geçilebilir. Sistemde motorların bazıları triger kayışını döndürerek eksenel hareketleri sağlamaktadır. Bu tür sistemde olası problemlerin önüne geçebilmek için kayış tasarım hesaplamaları yapılarak önüne geçilmiş olacaktır. Bu sayede kayışın deforme olması ve soncunda motorun boş adımlar ile dönmesinin önüne

geçilecektir. Sonuç olarak mekaniksel tasarımlar 3BY'nin kararlı olarak çalışmasına katkıda bulanabilecektir.

3.1.4.1 X Ekseni Motorunun Seçimi ve Rod Ayarı

Şekil 3.10' da hareket mekanizması aşağıda gösterilmiştir. Bu hareket mekanizması kasnaklar, triger kayışı, silindirik çubuklar ve şaseden oluşmuştur. Motorun dönmesi ile Y ekseninde doğrusal kayma hareketi oluşmaktadır. Bu doğrusal hareket triger kayışı ile kasnak bağlantısı flanş yatağına iletir. Extruder de bulunan meme yazıcının ana baskı aksamıdır. Bu meme hareketi yatayda sağlanır. Extruder memesinde herhangi bir şekilde çalışmama ya da kararsız çalışması durumunda 3BY'nin baskı esnasında dengesiz veya baskının olağandışı istenmeyen bir geometrik şeklin ortaya çıkmasına sebep olabilecektir. Bu yüzden bu tür problemlerin oluşmaması için taşıyıcı kısım iki tane silindirik şekildeki çubuklar ile tasarlanıp denge şartı sağlanmıştır. Şekil 3.10'daki taşıyıcı sistem üzerinde rulman bulunan silindir ile yatay yönde kayması sağlanabilir. Sistemde mevcut olan triger kayışı motor tarafından tahrik edilen bir kasnağa montajı sağlamıştır. Taşıyıcı, diğer alt triger kayışının hareketini sağlamak amacıyla montajı yapılmıştır. Motor saat yönünde dönmesi ile taşıyıcı sağdan sola saat yönünün tersine döndüğünde ise soldan sağa hareket etmektedir. Denge şartından yola çıkılarak extruder meme ağırlığı ve taşıyıcı ağırlığı silindirik çubuklara ağırlıkları eşit olarak dağıtılmaktadır. Motor seçiminde gerekli olan parametre dakika başına devir sayısı 390 [rpm] ve kuvvet 40 [N]'dur. Rod seçiminde rod hesabı parametreleri şu şekildedir; uzunluğu 320mm, toplam ağırlık 0,64 [kg], atalet momenti 200 mm^4 , youngs modül katsayısı 200 [MPa]'dir. Denklem (3.1)'e göre açısal hız bilgisinden yarıçap daha sonrasında denklem (3.3)'e göre tork formülünden motorun torku bulunur. Bulunan tork 0,382 [Nm]'dir. Nema17 model step motor 0,4 [Nm]'ye yani daha üst torka sahip olan motorun torku seçileceğinden yeterlidir. Rod ayarında ise rod çapı denklem (3.6)'ya göre 7,99 [mm] bulunduğundan standart olarak 8 [mm] seçilmiştir. Maksimum seğim ise denklem (3.7)'ye göre 10,92 [µ] bulunmuştur.



Şekil 3. 10 Rod, eksenel miller, mekanik iskelet yapısı

$$\frac{390\ rpm}{60\ m} = 6{,}5\ [rps]$$

$$v = r \times \omega \tag{3.1}$$

$$\omega = \frac{2 \times \pi \times N}{60} = 40{,}82\ [rad/s] \tag{3.2}$$

$$390 = r \times 40{,}82$$

$$r = 9{,}554\ [mm]$$

$$T = F \times r \tag{3.3}$$

$$T = 40 \times 9{,}554 \times 10^{-3}$$

$$T = 0{,}382\ [Nm]$$

$$\sum F_Y = 0 \tag{3.4}$$

$$R_1 + R_2 = 10$$

$$\sum M_T = 0 \tag{3.5}$$

$$10 \times (L_1 + L_2) - (R_2 \times L_1) = 0$$

$$L_1 = -2 \times L_2$$

$$I = \frac{\pi \times d^4}{64} \tag{3.6}$$

$$d = 7{,}99\ [mm]$$

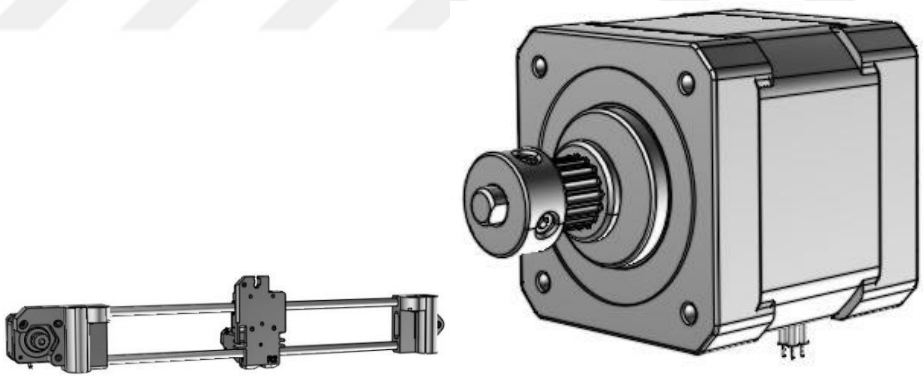
$$Y_{max} = \frac{(1 \times W \times L^3)}{48 \times E \times I} \tag{3.7}$$

$$Y_{max} = \frac{(1 \times 0{,}64 \times 320^3)}{48 \times 200 \times 200}$$

$$Y_{max} = 10{,}92\ [\mu]$$

3.1.4.2 Y Ekseni Motorunun Seçimi ve Rod ayarı

Şekil 3.11'de gösterilen Y ekseninin hareket mekanizması için kullanılmış bir motor tipidir. Eksen hareketleri için rulmanlar, silindirik çubuklar, taşıyıcı, kasnaklar ve kayışlar kullanılmıştır. X ekseninin de gerçekleşen hareket mekanizması Y ekseni için de aynı şekildedir. Ayrıca X ekseni için gerekli olan motor seçimi de aynı şekilde bulunabilmektedir. X ekseni motor seçim parametreleri doğrultusunda seçilen motor 0,4 [Nm] torka sahip Nema17 tip motordur. Rod çapı ve rod ayarında gerekli olan parametreler şunlardır; toplam kuvvet 32,3 [N], youngs modül katsayısı 200 [MPa], rod uzunluğu 300[mm], atalet momenti 3000 mm^4'tür. Rod çapı 15,72 [mm] bulunduğundan standart olarak 16 [mm] seçilebilir. Rod maksimum seğimi ise 30,281 [µ] olarak bulunmuştur.



Şekil 3. 11 Step motor ve yatak yeri

$$\frac{390\ rpm}{60\ m} = 6{,}5\ [rps]$$

$$v = r \times \omega \tag{3.8}$$

$$\omega = \frac{2 \times \pi \times N}{60} = 40{,}82\ [rad/s] \tag{3.9}$$

$$390 = r \times 40{,}82$$

$$r = 9{,}554\ [mm]$$

$$T = F \times r \tag{3.10}$$

$$T = 40 \times 9{,}554 \times 10^{-3}$$

$$T = 0{,}382\ [Nm]$$

$$I = \frac{\pi \times d^4}{64} \tag{3.11}$$

$$d = \sqrt[4]{\frac{3000 \times 64}{\pi}}$$

$$d = 15{,}72\ [mm]$$

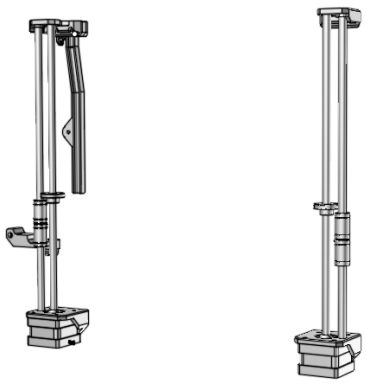
$$Y_{max} = \frac{(1 \times F \times L^3)}{48 \times E \times I} \tag{3.12}$$

$$Y_{max} = \frac{(1 \times 32{,}3 \times 300^3)}{48 \times 200 \times 3000}$$

$$Y_{max} = 30{,}281\ [\mu]$$

3.1.4.3 Z Ekseni Vida Seçimi

Z ekseni için gerekli olan vida çapı için gerekli olan parametreler şunlardır; düşey kuvvet 3500 [N], tork 3 [Nm], sürtünme katsayısı 0,17, vida dış çapı 2 mm'dir. Bu bağlamda vida çapı 9,85 [mm] olup standart değer olarak 12 [mm] seçilmiştir. Şekil 3.12'de kullanılan vida türü gösterilmiştir.



Şekil 3. 12 Z eksen milleri

$$T = F \times \frac{D_m}{2} \times \frac{L + \mu \times \pi \times D_m}{\pi \times D_m - \mu \times L} \quad (3.13)$$

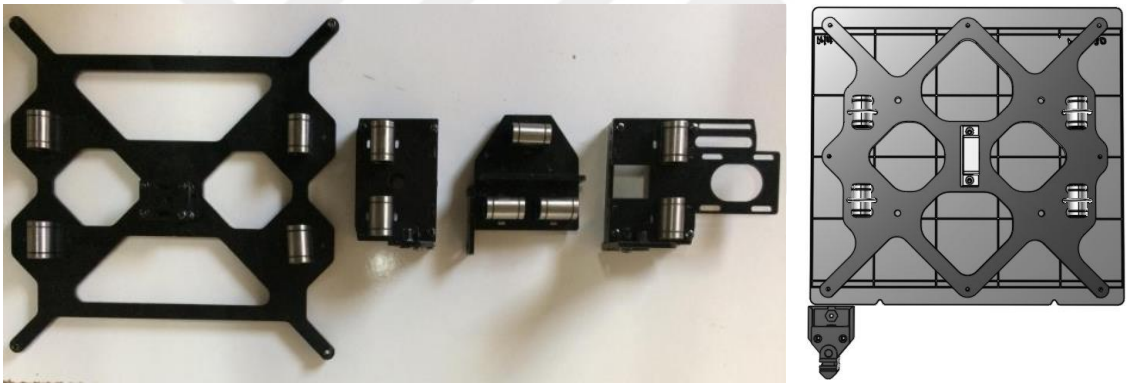
$$3 = 3500 \times \frac{D_m}{2} \times \frac{0{,}002 + 0.17 \times \pi \times D_m}{\pi \times D_m - 0.17 \times 0{,}002}$$

$$D_m = 9{,}85\ [mm]$$

$$D_{std} = 12\ [mm]$$

3.1.4.4 Rulman Seçimi

Mekanik tasarımda Şekil 3.13'te görüldüğü üzere 11 adet lineer rulman kullanılmıştır. Bu rulmanlardan bir kısmının platform bağlantısı var iken diğer rulmanların ise kasnak üzerinde silindir ile hareketli bağlantıları vardır. Bu lineer rulmanın parametreleri şu şekildedir; delik çapı 8 [mm], dış çapı 15 [mm], genişlik 24 [mm]'dir. Lineer rulmanların seçimi silindirik çubukların dış çapına göre seçilmiştir.



Şekil 3. 13 Rulmanlar ve yatak üzerine yerleşimi

3.1.4.5 X, Y, Z, Eksenlere Triger Kayışı Seçimi

Kayış mekanik olarak güç aktarımı için bu sistemde kullanılmaktadır. Sistemde kayış bir kasnak üzerinden motor mil eksenine bağlı olarak hareket etmektedir. Hareket süreci tur motor devir süresi ile ilgilidir. Kayış tahriki ise motor mili üzerinden gerçekleşmektedir. Kayış seçiminden öncesi gerekli olan parametreler şunlardır; kasnak çapı 20 [mm], iki kasnak merkezi arasındaki uzaklık 450[mm]'dir. Denklem (3.9)'a göre yazıldığında kayış uzunluğu 90,6 [cm] bulunmaktadır. Kayış üzerindeki stres yani youngs modül değeri 5,17 [MPa]'dir. Motordan gelen kuvvet 40 [N]'dur. Bu bağlamda denklem (3.11)'e göre kayışın alanı $uzun\ kenar \times kısa\ kenar$ formülünden kısa kenar çekilerek sonuç 8,532 [mm] olarak bulunur.

Standart olarak 9 [mm] seçilebilir. Şekil 3.14'teki kayışın görseli projede kullanılmıştır.



Şekil 3. 14 Triger kayışı

$$L = \frac{\pi}{2}\,(D + d) + \sqrt{4 \times c^2 + D^2 + d^2} \tag{3.14}$$

$$L = \frac{\pi}{2}\,(0{,}002 + 0{,}002) + \sqrt{4 \times 0{,}45^2 + 0{,}002^2 + 0{,}002^2}$$

$$L = 90{,}6\ [cm]$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{3.15}$$

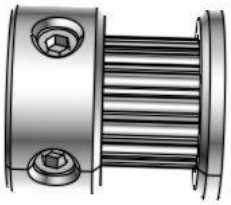
$$A = \frac{F}{\sigma} = \frac{40}{5{,}17} = 7{,}73\ [mm^2]$$

$$A = Width \times Hight \tag{3.16}$$

$$Width = \frac{A}{Hight} = \frac{7{,}73}{906} = 8{,}532\ [mm]$$

3.1.4.6 X, Y Eksenleri İçin Kasnak Tasarımlarının Gerçekleştirilmesi

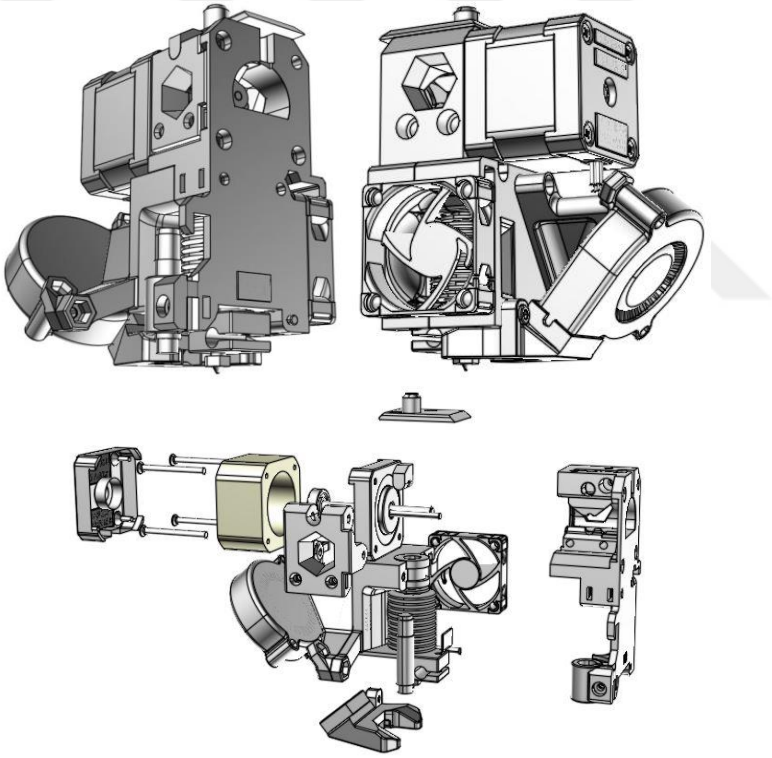
3BY'lerde kasnaklar hareketi mekanik olarak kayışlara ileten aksamdır. Etrafının bir kısmı kayış ile bağlantılıdır. İçerisinde bir tekerlek bulunmaktadır. Bu tekerlekler sayesinde hareketi gerçekleştirmektedir. Hareketli kasnak bu projede eksenel olarak gücü ileterek bir nevi taşıma, indirme hareketleri de sağlamaktadır. Kasnağın parametreleri 32 dişli ve kasnak çapı 10[mm] olan kasnak tipi kullanılmıştır. Kasnak seçimi triger kayışı ile de ilgilidir kayışın genişliğine seçilen kasnak uygun olmalıdır. Kullanılan kasnağın çapı triger kayışın genişliğinden uzun olduğu için kullanılması mümkündür. X, Y eksenleri için kullanılan kasnak tipi aşağıdaki Şekil 3.15' te gösterilmiştir.



Şekil 3. 15 32 dişli kasnak tasarımı

3.1.4.7 Ekstruder

Extruder erimiş halde hammaddeyi nozula ileten ve meme tarafından çıkış miktarı ayarlanabilen motor sayesinde iletimi sağlayan 3BY aksamıdır. Extruder üzerinde termistör bulunmaktadır. PID kontrol ile ısıtıcı yatak arasında sıcaklık farkı korunmaktadır. Kullanılan extruder 100 [µ] hassasiyetindedir. 3BY tasarımın da Şekil 3.16' de gösterilen extruder tipi seçilmiştir.



Şekil 3. 16 Ekstruderin üç boyutlu tasarımı

3.1.5 Görüntü İşleme

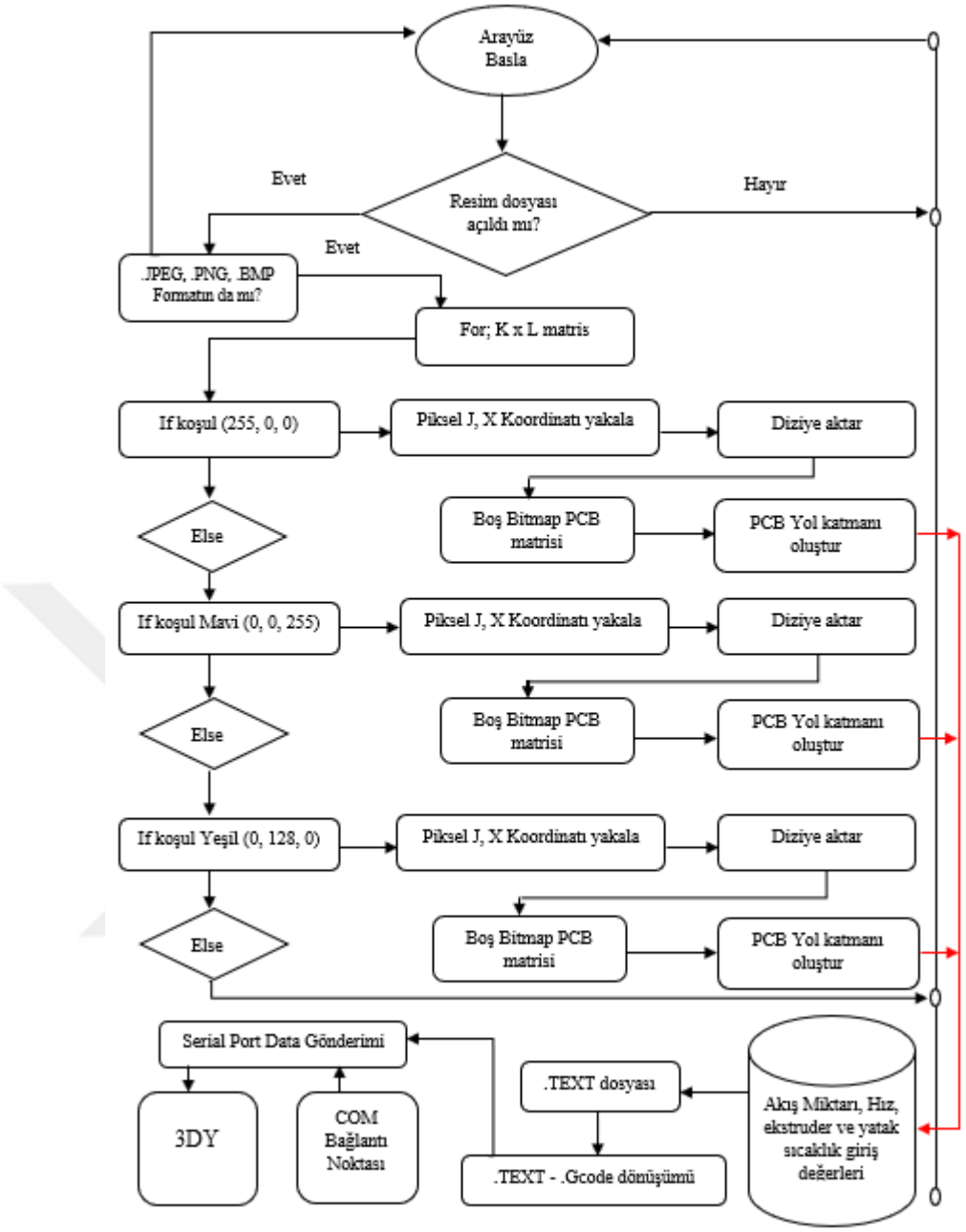
Görüntü işlemede görüntü yakalama işlemi, devamlı bir görüntü fonksiyonu aracılığıyla eşit aralıklı x- ekseni boyunca K adet örnek ve y- ekseni boyunca L adet örnek alınarak oluşturulabilir. K x L piksele sahip iki boyutlu sayısal bir görüntü, K satır ve L sütundan oluşmuş bir matris olarak düşünülebilir. Matrisin bileşenleri,

satır ve sütunların kesiştiği her bir noktadaki bu noktalar sayısal görüntünün en küçük parçası olan pikseli temsil eder pozitif tamsayı değerlerine sahiptir. Bu matris teki noktaların kırmızı seviye içeren görüntüleri için bu değer 0 – 255 aralığındaki tamsayılardan oluşur. RGB renk kodları yardımı ile piksel renk kodları yakalanıp işlenebilir. Bu çalışmada piksel 8 bit ile kodlanmıştır. Her piksel 2^8 = 256 farklı renk tonu ile oluşturulur.

$$\text{Boş PCB görüntü matrisi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 255 \\ 0 & 1 & \dots & 255 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 255 \end{bmatrix}$$

256 satır

Bu matrisin her bir satır ve sütunu ile oluşturulan pikseller üzerinde renk kodu bulundurur. Hex ve desimal kodları sırasıyla, Kırmızı için FF0000, rgb(255,0,0), mavi için #0000FF, rgb(0,0,255), yeşil için #008000, rgb(0, 128, 0) şeklindedir. Görüntü işleme ve yakalamanın algoritması Şekil 3.17'deki gibidir.



Şekil 3. 17 Görüntü yakalama, işleme ve .Gcode veri gönderimi akış diyagramı

Arayüz programı başladıktan sonra resim dosyası seçimi yapılır. Bu noktada istenen dosya uzantısı .JPEG, .PNG ve .BMP formatlarında olabilir. Bu dosya uzantıları haricindeki resimler kabul edilmez. Daha sonrasında herhangi bir içeriği sahip olmayan boş .BMP dosyası oluşturulur. Çünkü bu dosya üzerine pikseller yerleştirilmesi gerekiyor. Bu yüzden uzantı olarak .BMP seçildi. Fakat başka resim dosyası uzantıları da seçilebilir. K x L matrisine sahip olan PCB resim dosyası satır ve sütunlarındaki pikseller renk koduna göre taranır. İstenen renk kodları yakalanıp bir dizide koordinat bilgileri tutulur. Oluşturulan yeni Bitmap dosyasına bu

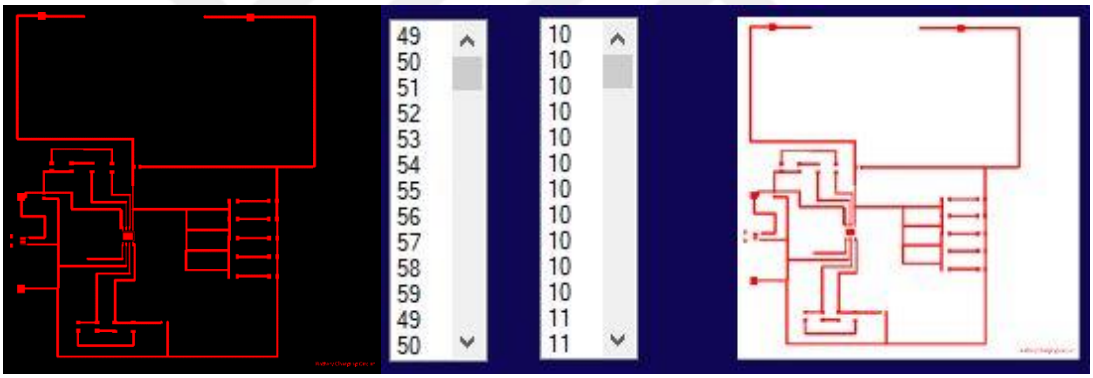
koordinatlar aktarılır ve nihai PCB devre görüntüsündeki yollar ortaya çıkarılır. Program arayüzünde bulunan akış miktarı, ekstruder ve yatak sıcaklık gibi ilgili parametreleri ile piksel konum bilgileri .TEXT dosyasında birleştirilir. Daha sonrasında .Gcode dosyasına dönüştürülür. Aynı anda Bilgisayar ve 3BY arasındaki bağlantıyı sağlamak için ilgili COM port bağlantısı ile bağlantı kurulur. Oluşturulan veriler 8 bit halinde seri port iletişimi kurularak 250000 baud hızı ile 3BY'ye gönderilir. Makineye gönderilen .Gcode yazılım üzerinden hafızada tutulması gerekmektedir. Bu hafıza işletim sistemindeki salt okunur bellekte ROM'da tutulmaktadır. Bu sistemde CPU ile seri haberleşme protokolü kullanılmaktadır. Gelen veriler mikro denetleyicinin işlem önceliği sırasına göre algoritmadan geçer. Daha sonrasında hafızada tutulan komutlar ile makineyi yönlendirir. Bu işlemler bir dizi sıradan geçer öncesinde sıcaklık, konum bilgisi, motor hızı ve bu tezde belirtilen mekanik aksamların tümünün geri beslemeli olarak kontrol edilebilmesi için gerekli tüm parametreler doğrultusunda sinyaller gönderilir ve sinyaller alınır. Bu sinyaller analog ya da dijital olabilir. Analog okumalarda genelde sıcaklık verilerini okumada dijital PWM sinyalleri ise anahtarlama için kullanılmaktadır. Sistemin tamamını kontrol etmek için yazılım kütüphanesi olarak mikro denetleyicinin yazılımında Marlin kütüphanesi kullanılmıştır. Marlin kütüphanesi genel olarak 3BY tasarımında genel olarak mikro denetleyici yazılımında kullanılmaktadır. Mikroişlemci Marlin kütüphanesi ile yazılımsal olarak desteklenmektedir. Marlin yazılımı içerik olarak sıcaklık, butonlar, step motor sürücüleri, LCD ekran, sensörler, ana kart kütüphanelerini bulundurmaktadır. Ayrıca SD kart veri depolama haberleşme komutlarını da kütüphanesinde bulunabilirdir. Marlin yazılımı ile iletişim .Gcode üzerinden yapılmaktadır. Bir tasarımı Marlin üzerinden yönetmek için öncelik olarak dilimleme programında .Gcode formatında dosya oluşturulmuştur. Verilerin hızlı bir şekilde gönderilip alınabilmesi için haberleşme baud hızı 250000 olarak girilmiştir. Extruder motorlarının dönüş yönleri açısal olarak girildi. LCD üzerinden haberleşme I2C olarak ayarlandı. X, Y, Z eksen motorlarının maksimum ve minimum konum bilgileri sınırlandırılmıştır. X, Y ve Z eksenleri için ayrı ayrı 200 mm maksimum, 0 mm minumum hareket miktarı, servo hareket miktarı ise 90°'dir.

4

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE TEST SONUÇLARI

4.1 Üç Boyutlu Yazıcı ile Baskı Devre Tasarımı

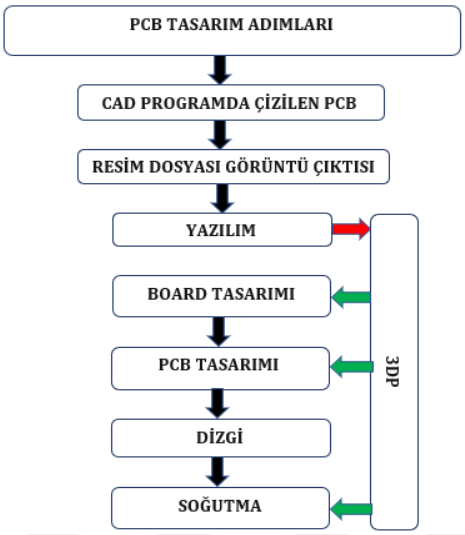
Bu çalışmada PCB tasarımı 3BY aracılığı ile gerçekleştirildi. PCB tasarımı üç adımda sırasıyla tamamlandı. Bu adımlar malzeme seçimi, görüntü işleme ve tasarlanana devrenin basımı şeklindedir. 3BY basım öncesinde dijital ortamda çizilen devre kartının görüntüsü hazırlanan PCB görüntü işleme ilk adımda dosya yolu üzerinden aktarılır. Daha sonrasında görüntü üzerindeki yol konum pozisyonları Şekil 4.1'de tespit edilir ve gerber dosyasına dönüştürülür. Bilgisayar ile seri haberleşme protokolü üzerinden dosyadan 8 bitlik veriler halinde 3BY'ye veri transferi gerçekleştirilir.



Şekil 4. 1 Görüntü işleme adımı

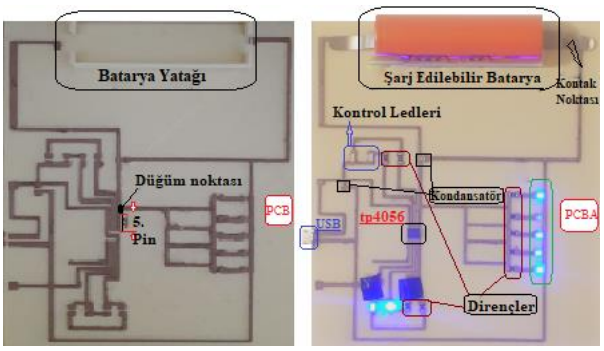
Baskı devre tasarımı adımları şekil 4.2'de verilmiştir. Basımın ilk adımında PLA kullanılarak board yapısı oluşturulmuştur. Daha sonra iletken yollar bu zeminin üzerine basılmıştır. Sıcaklık, akış miktarı gibi gerekli olan parametrelerin değerleri her bir malzemenin yazdırılabilmesi için ara yüz programına ayrı ayrı girilmiştir. Baskı devre tasarımının yapılması için gerekli olan sıcaklık, motor hız-pozisyon bilgileri extruder sıcaklık değerleri deneysel doğrulamalar ile uygun değerlere getirilmiştir. Bu değerlerin yanı sıra bord malzemesi olarak kullanılan PLA ve gümüş nano parçacık iletken için 3BY tasarımı ile basılması deneyinde uygun sıcaklık değerleri tespit edilmiştir. PLA için basım sıcaklığı 200℃ ve iletken için 160℃'dir. Burada PLA PCB board materyali olarak kullanılırken iletken ise devre yolu olarak

kullanılmıştır. Kullanılan iletken bir çalışma da gümüş nano parçacık bazlı bileşen içermekte iken diğerinde gümüş nano parçacık bazlı bileşenlere ek olarak direnç değerini istediğimiz değere çıkarabilmek için karbon bazlı yollar da kullanılmıştır.



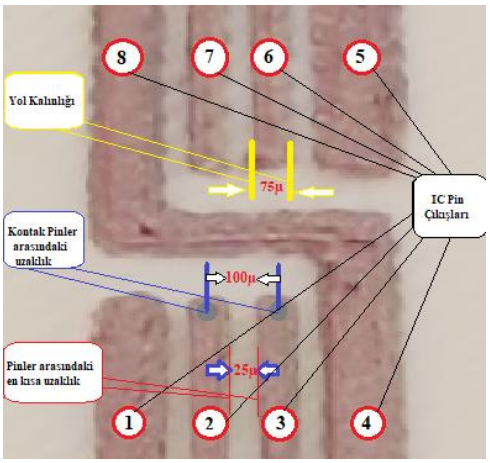
Şekil 4. 2 3BY ile PCB tasarım adımları blok şeması

Baskı devre tasarımında test devresi olarak batarya şarj devresi seçilmiştir. Bu devrenin üzerindeki yollar Şekil 4.3'te 3BY tekniği ile basılırken devre elemanlarının montajı manuel olarak yapılmıştır. Devre üzerinde 2 adet kontrol LED'i, 5 adet SMD yük LED'i, 1kΩ SMD direnç, 100nF kondansatör, 1 adet TP4056 şarj entegresi ve şarj edilebilir 3,7V 2500 mAh li-on bataryası kullanılmıştır. Batarya 250 mA ile şarj oluyorken kontrol LED'leri sönük halde, batarya tamamen şarj olduğunda ise kontrol LED'leri tamamen yanmıştır. Devrede kullanılan devre elemanlarının PCB 'ye montajı esnasında gerekli olan ısıtıcı yatağın sıcaklık değeri 80℃'dir. Bu sayede dizginin montajı kolaylaşmıştır.



Şekil 4. 3 3BY ile tasarlanan batarya şarj devresi kartı

Baskı devre tasarımında en önemli kriterlerden biri de her bir kontak noktası arasındaki uzaklıktır. Bu devredeki entegrenin bacaklarının bulunduğu kontaklar arasındaki uzaklıklar oldukça küçük olduğu için testler için referans seçilmiştir. Çünkü devredeki en yakın yolların bulunduğu dolayısıyla elektronların en çok atlama yapabileceği kontak noktalarıdır. Entegrenin her bir kontak merkezleri arasındaki uzaklık Şekil 4.4'te 100µm, 2 ve 3 numaralı kontaklar arasındaki en kısa mesafe 25µm ve yol genişliği en düşük olan 6 numaralı bacak olup 75µm'dir. Şarj akımına bağlı olarak devre üzerinde güç kayıpları oluşmuştur. Konvansiyonel sistem ile oluşturulan baskı devre tasarımında oluşan güç kaybı 0,29 W, devre girişindeki toplam güç 1,1 W, üretilen toplam güç 1,4 W iken 3BY ile oluşturulan baskı devre tasarımında en fazla güç kaybı 0,39W'tır. Devre üzerinde kullanılan güç 1,1W ve devre girişinde üretilen toplam güç yaklaşık 1,5W civarındadır. Yük LED'leri 50mA'lik akım çekerken toplam akım 300mA olup batarya şarj süresi 10 saat sürmektedir. Konvansiyonel sistemler ile karşılaştırıldığında şarj süresi olarak 5% lik bir zaman farkı vardır. Bu sonuç gösteriyor ki 3BY ile tasarlanan baskı devre tasarımı konvansiyonel sistemler ile güç kaybı açısından hemen hemen eşit, şarj süresi bakımından ise kayda değer bir fark yoktur. Diğer bir önemli kriter olan entegre bacaklarının devamındaki düğüm noktalarıdır. Kısa zamanlı devre çalışmasından daha çok uzun periyottaki çalışmaları incelediğimizde entegrede sıcaklık problemleri oluşmaktadır. Bu problem ise alüminyum malzeme kullanılarak giderilmiştir. Devrenin çalışma performansını incelemek için düğüm noktasında oluşabilecek maksimum sıcaklık değeri açısından kullanılan iletkenin Watt başına sıcaklığı kabul alınarak 150℃/W ve denklem (4.1)'e göre iletkenin sıcaklığı 86,5℃ hesaplanmıştır. 3BY ile tasarlanan bu devre kullanılan hammaddelerin erime sıcaklığının yüksek oluşundan dolayı hesap edilen sıcaklık değeri bu devrenin nominal çalışma sıcaklık değerinin altında kaldığından devrenin çalışma performansını etkilememiştir.



Şekil 4. 4 İletken yollar arasındaki referans uzaklıklar

$$T_A = 145°\text{C} - (V_{cc} - V_{BAT}) \times I_{TOT} \times \Theta_{IA} \quad (4.1)$$

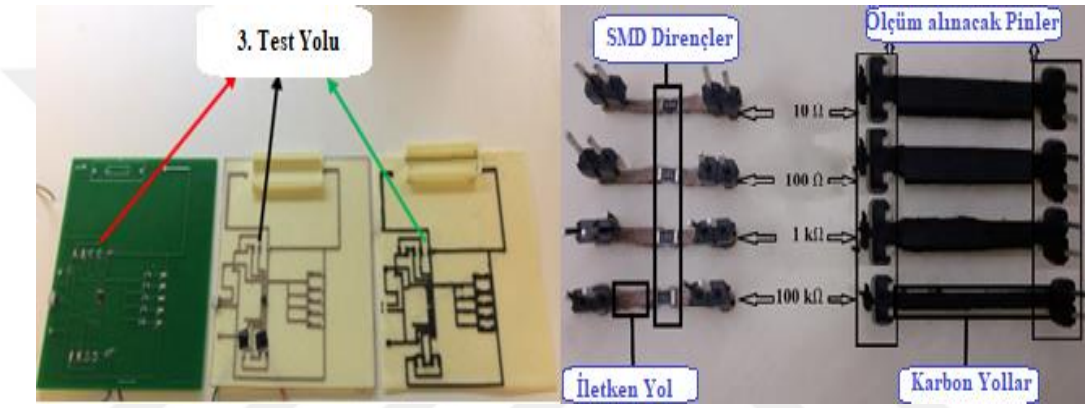
$$T_A = 145°\text{C} - (5V - 3{,}7V) \times (300mA) \times 150(°\text{C}/W)$$

$$T_A = 145°\text{C} - 58{,}5°\text{C} = 86{,}5°\text{C}$$

3BY ile yapılan bu çalışmada yol katmanları basılırken belli bir prensibe göre tasarlanmıştır. Basım şekilleri üçgen, sarmal ve lineer boyunca biriktirme şeklidir. Burada yol direncinin belirlenmesinde çok önemli bir unsurdur. Çünkü basım şekline göre yol direncinin değeri ve toleransı değişmektedir. Katmanların birbirinden ayrı olması da ayrıca direnç değerine etki eden faktörlerden biridir. Direnç değerini en az değiştiren ve katman bağlantılı tasarım için lineer örme şeklini seçtik. Lineer örme şeklinde basılan yolların direnç değerinin diğer örme şekillerine göre 0,1% farklılık göstermiştir. Direnç değerlerinde gerçek ölçüm değerlerini etkileyen diğer en önemli faktörlerden biri de pad temas direncidir. Fiziksel olarak temas oluşturulduğunda bu noktadaki temas direncini arttırmaktadır. Fakat normal şartlarda basım esnasında yapılan padler ile tasarım söz konusu olduğunda bu direnç değeri minimum değere düşmektedir. Sonuç olarak baskı devre tasarımının 3BY ile gerçekleştirilmesi deneysel olarak ortaya çıkarılmıştır. Yapılan bu çalışmada basım esnasında direnç değerindeki değişimlerinden, malzeme basım kriterlerinden, yolların toleransından ve devre yollarındaki sıcaklık değerinin etkisinden bahsedildi. Daha sonraki yapılan çalışmada devredeki yollar üzerinde elektriksel ve sıcaklık parametreleri açısından daha ayrıntılı bir çalışma sunulmuştur.

4.2 Ayarlanmış Dirençli Yol Tasarım, Analizi ve Karşılaştırılması

Üç Boyutlu Yazıcıların hızla gelişmesiyle elektronik devre prototiplerinin önemi artmaktadır. Bu çalışmada Baskılı Devre Kartı (PCB) üretimi için üç yöntem Şekil 4.5'te karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada bahsedilen PCB üretim yöntemlerinden ikisi 3BY ile geliştirilmiştir. Ayarlanmış karbon direnç tasarımı yapmadan önce, önceki deneyde hazırlanmış olan batarya şarj devresi referans devre olarak seçildi. Seçilen bu devre ile farklı malzemeden oluşturulan karbon ve konvansiyonel devreler ortaya çıkarılmıştır. Bu devrelerden toplamda malzemeye bağlı olarak 3 adet devre oluşturulmuştur.



Şekil 4. 5 3BY ile tasarlanan gümüş iletken ve ayarlanmış karbon dirençli yollar

Oluşturulan karbon ve iletken malzeme devreleri 3BY ile basılırken konvansiyonel PCB CNC tezgahında üretilmiştir. Buradaki devrelerde iletken malzeme gümüş bazlı olup konvansiyonel PCB ise FR-4 tabanlıdır. FR-4, epoksi reçinenin alkali içermeyen cam elyaf kumaşla yüksek sıcaklık ve yüksek basınç altında bastırılarak elde edilmesiyle elde edilen bir laminat levhadır. Karbon ve iletken devrelerde bord malzemesi olarak PLA kullanılmıştır. Hazırlanan bu devrelerden referans test yolu olarak 3 numaralı yol seçilmiştir. Bu yollardaki ilk ölçümler sırasıyla empedans, endüktif-kapasitif reaktans ve direnç ölçümleri frekansa bağlı olarak empedans analizörü ile gerçekleştirilmiştir. İkinci ölçüm türünde ise direnç değerleri sıcaklığa bağlı olarak termometre ile ölçülmüştür. Konvansiyonel metot ile yapılan prototip çalışmalarında PCB üretim süresi uzun sürmekteydi. Bu süreyi daha minimize hale getirmek için PCB tasarımı 3BY metodu ile gerçekleştirildi. 3BY metodunda kullanılan teknik KBM'dir. Bu metotla malzeme akışı oransal olarak kontrol edilir. Ayrıca ekstruder içerisindeki dişli motorlar sayesinde malzeme akış hassasiyeti

belirlenebilir. Bu teknikten yararlanarak devre iletken yollarının hassasiyeti ve verimliliği arttırılarak, devre yollarında ekstra maliyeti önlemek için ayarlanmış direnç tasarımı yapılarak PCB üretimi geliştirildi. Bu çalışmada, PCB devresindeki iletken yollar oluşturulurken kullanılan malzeme gümüş bazlı mürekkeptir. Gümüş bazlı bir iletken türünü kullanılmasının sebebi konvansiyonel devrelerde kullanılan bakırın iletkenlik değerinden daha düşük olmasıdır bu bağlamda ρ, iletken mürekkebin öz direnci, $\rho_{Ag(part.)}$ öz direnci oluşturan gerçek nano parçacıklar, $\rho_{(Tutucu\ Malzeme)}$ gümüş nano parçacıkları birbirine bağlayan tutucuların özdirencidir. l, iletken yolun santimetre başına uzunluğudur. S, devre yolunun kesit alanıdır. R, direnç formülünün iletken yolda açıklandığı devre yolları için direnç değeridir.

$$R = \rho \frac{l}{S} \tag{4.2}$$

$$\rho_{Ag(part.)} + \rho_{(Tutucu\ malzeme)} \approx \rho_{cu} \tag{4.3}$$

Normal şartlarda, gümüşün iletkenlik değeri 1.58 μΩ cm'dir. Fakat gümüş toplu halde bu iletkenliği sağlamaktadır. İletkende kullanılan gümüş nano parçacıklar olup birbirlerine tutunması diğer tutucu malzemeler ile sağlanmıştır. Bu yüzden toplam iletkenlik değeri normal gümüş iletkenlik değerinden biraz daha yüksek bakırın iletkenliğine (1,67 μΩ cm) çok yakın olması beklenmektedir. Bu sayede devredeki güç kayıpları korunmaktadır. PCB tasarımlarında devre yolu üzerinde iletken yollar arasında SMD direnç kullanılabilir. Fakat bu durum konvansiyonel metot da PCB üretiminde üç dezavantaj oluşturur. Birincisi, devre komponentlerinin yüzeye baskı esnasında soğuk lehimlerin meydana gelmesidir. Bir başka ihtimal ise konvansiyonel sistemlerde lehim havuzundan çıkarıldıktan sonra PCB devresi üzerinde komponentlerin bağlantı noktalarında kısa devrelerin oluşması ihtimalidir. İkinci dezavantaj ise PCB üretiminde komponentlerin dizgisi nedeniyle ekstra zaman kaybı oluşmasıdır. Üçüncüsü de konvansiyonel sistemlerde iletken olarak bakır kullanılır. Bu durum yüksek frekanslı devrelerde deri etkisine bağlı olarak yüksek direnç artışına neden olur. Tüm bu dezavantajları gidermek için sunulan 3BY ile PCB prototipi üretiminde devre iletkeni olarak gümüş bazlı iletken kullanılmıştır. Deri etkisi derinliği şu şekilde gösterilir;

$$\delta_{s(_{Konv.,\text{Karbon ve İletken}})} = \sqrt{\frac{2.\rho}{2.\pi.f.\mu_0.\mu_r}} \quad (4.4)$$

δ_s yüzey derinliğidir, ρ iletken mürekkep için elektriksel direncin toplu direncidir ve konvansiyoneldir, f bu yöntemler için gönderme frekansıdır, geçirgenlik sabiti ve ortamın nispi geçirgenliği sırasıyla μ_0, μ_r 'dir. Konvansiyonel ve iletkendeki bağıl manyetik geçirgenlik yaklaşık 10^{-2} mertebesinden olup ve 100 Hz'e kadar deri etkisinin derinliğine izin verir.

Diğer bir deyişle, frekans ile deri etkisi derinliği arasında frekansın karekökü ile ters orantılı bir ilişki vardır. Frekans miktarı bu eşik frekans değerini aştığında deri etkisi derinliği yüzeye taşınacak ve yüzeyde deri etkisi miktarı artmaya başlayacaktır. Bu noktada yüksek frekanslara ulaşıldığında yüzeydeki derinlik sonsuza kadar azalacak ve deri etkisi hızla artacaktır. Deri etkisinin derinliği azaldıkça, akımın geçtiği enine kesit yol direncini düşürür. Gümüş tabanlı iletken içerisinde gümüş nano parçacıkları bir arada tutan yarı iletken tutucuların olması ve 3BY ile Litz bir kablo gibi katman-katman üretildiğinden deri etkisinden etkilenmemektedir. Ancak gümüş iletken pahalı olduğundan maliyet yükselmektedir. Bu çalışmada hem gümüş tüketimini azaltarak maliyeti düşürmek, smd direnç montajı sırasında oluşacak etkileri azaltmak hem de üretim süresini hızlandırmak amacı ile PCB yolları o yol üzerine konulması planlanan direncin değerine göre üretilmiştir. Böylelikle istenilen direnç değeri hiçbir devre ekipmanı kullanılmadan doğrudan yol direnci ile elde edilmiştir. Ayrıca bu sayede yol boyunca gümüş yerine karbon kullanılmasından dolayı üretim maliyeti de oldukça azaltılmıştır. Karbon, konvansiyonel ve iletken tabanlı devreler karşılaştırıldığında, rezonans frekansı 100 Hz. civarında oluşur. Bu durumu önlemek için 10Ω'dan yüksek dirençlerde karbon bazlı mürekkep kullanmak daha uygundur. Çünkü deri etkisindeki artışa bağlı olarak karbonda en az endüktans artışı vardır. Frekansa bağlı olarak direnç değerindeki artışlar veya azalışlar değişmektedir. Ayrıca yapılan analiz çalışmasında deri etkisinin yollar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Karbon, iletken ve konvansiyonel yollar için teorik formüller ile yolların elektriksel karakteristikleri değerlendirilmiştir. Deri etkisindeki artışa bağlı olarak karbonda en az endüktans artışı olduğu için L iletkenin endüktansı, S ise iletken çapına bağlı olan iç çekirdek

alanıdır. Ancak konvansiyonel veya iletken yollar enine kesite sahiptir. Karşılaştırma için iletken çapı durumunda kesit alınabilir. Endüktans formülü, iletken yolda şu şekilde açıklanır:

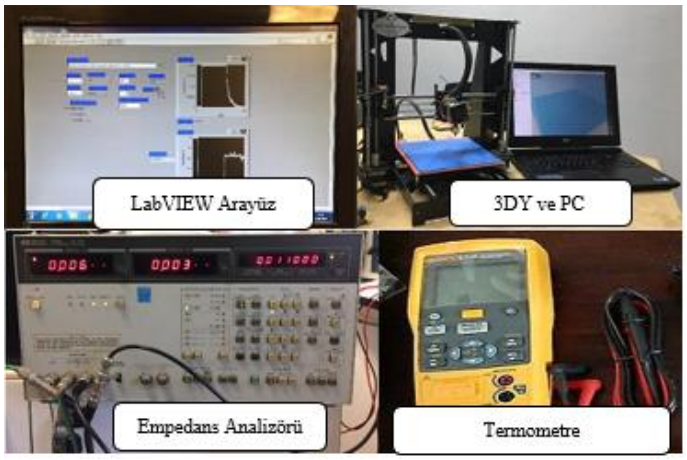
$$L = \frac{\mu . N^2 . l}{S} \tag{4.5}$$

Yüksek frekanslara ulaşıldığında, frekansa bağlı olarak konvansiyonel yöntemle oluşturulan katmanda empedans değeri artar. Aslında, frekans artışından dolayı deri etkisinin derinliği iletken yüzeye taşınması konvansiyonel yoldan geçen akımın kesiti yüzeyin üzerinde olduğu için azalmıştır. Yani deri etkisi frekansa bağlı olarak direnci arttırır. Konvansiyonel yol için empedans ilişkisi şu şekilde tanımlanır;

$$Z_{Konv..} = \sqrt{(X_{L(Konv.)} - X_{C(Konv.)})^2 + R_{Konv.}{}^2} \tag{4.6}$$

4.2.1 Deney Tanıtımı

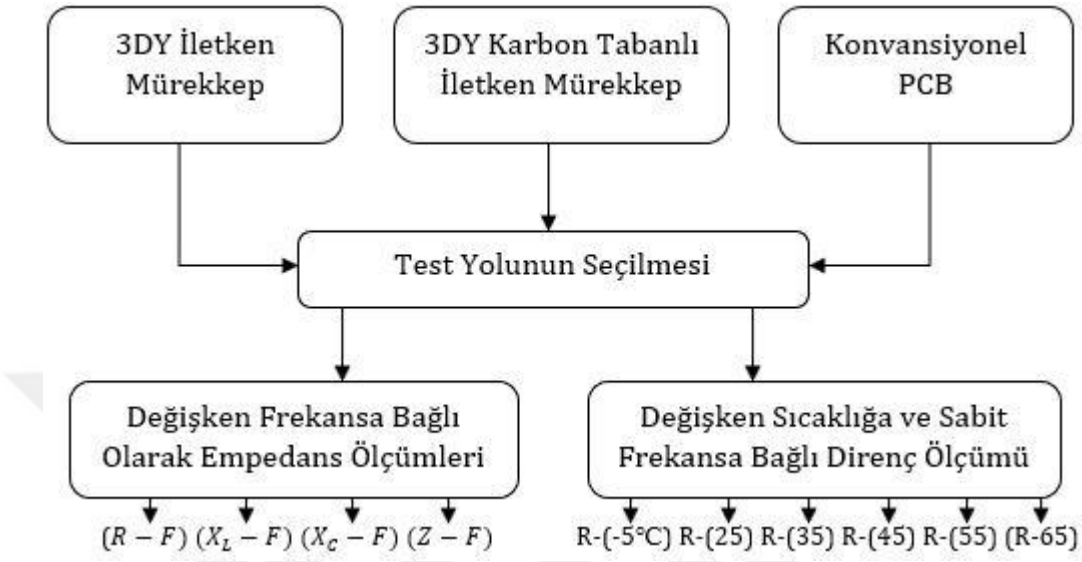
Direnç olarak kullanılan ayarlanmış karbon yol direnci tasarımının ve 3BY tarafından oluşturulan PCB üzerinde iletken olarak kullanılan gümüş bazlı mürekkebin doğruluğunu kanıtlamak için Şekil 4.6'daki test düzeneği kullanıldı.



Şekil 4. 6 Deney düzeneği

Deneysel adımların blok şeması Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Bu blok şemasında, uygulamaya başlamadan önce, önerilen yöntemlerin testi batarya şarj devresi seçilmiştir. Üç devre kartından ikisi 3BY ile oluşturulmuş olup bunlar ile gümüş iletken mürekkep ve karbon bazlı mürekkep yolları tasarlandı. Diğer üretilen kart

ise konvansiyonel PCB üretim yöntemleriyle üretilmiş olup üretilen bu devreler ayarlanmış karbonlu direnç tasarımı ve iletkenlik açısından test edildi. Test yolu, karşılaştırılacak referans yolu olarak seçildi. Daha sonra, bu yolların değişken frekansa bağlı empedans ve sıcaklığa bağlı direnç ölçümleri yapıldı.



Şekil 4. 7 Frekans, sıcaklığa bağlı empedans ve direnç ölçümleri blok şeması

Tablo 4.1 Ayarlanmış direnç tasarımı kriterleri

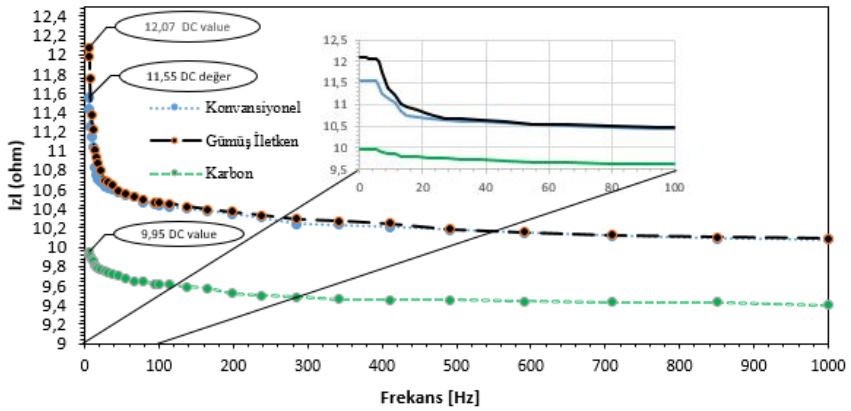
	Oda koşulları sıcaklığı [25°C]			Gönderilen Frekans [Hz]	Referans direnç değerleri [Ω]
PCB Türü	Konvansiyonel	İletken	Carbon		
Başlangıç Frekansı [Hz]	0	0	0	0	10-100-1k-100k
Durdurma Frekansı [kHz]	1	1	1	50	10-100-1k-100k
OSC Sinyali [V]	1	1	1	100	10-100-1k-100k
Başlangıç Frekansı [kHz]	1	1	1	5000	10-100-1k-100k
Durdurma Frekansı [MHz]	10	10	10	100000	10-100-1k-100k
OSC Sinyali [V]	1	1	1	10000000	10-100-1k-100k

Test kartlarının belirtilen yollarında temas direncinden etkilenmeden toplam direnç değerini ölçmek için kontaklar monte edilmiş kontak uçlarından alınır. Kontak uçları ile iletken katmanlar arasındaki temas direncini azaltmak için üretim sürecinde yolun sıcaklığı 80 °C'ye yükseltilmiştir. Bu, gümüş parçacıkların kontaklara sıkıca yapışmasını sağlamıştır. Ayarlanan bu direnç değerleri, konvansiyonel ve gümüş tabanlı iletkenlerle oluşturulan yolların direnç değerleri ile karşılaştırılmıştır. Devre yollarının frekansa bağlı olarak empedans, endüktif kapasitif reaktans ve direnç

değerleri empedans analizörü tarafından 10 Ω, 100 Ω, 1 kΩ, 100 kΩ için ölçülür. LabVIEW® yazılımı, empedans analizörü ile PC arasındaki bilgi alışverişini kontrol etmek için kullanılır. Ölçümler iki farklı frekans değer aralığında yapılmaktadır. Bu aralıklar 0-1 kHz ve 1 kHz-10 MHz ve ölçümler 1 V sinyal gönderilerek yapılır. Tablo 4.1'de ayarlanan direnç tasarımı hakkında ve deney programına girilen detaylı parametre bilgileri verilmiştir.

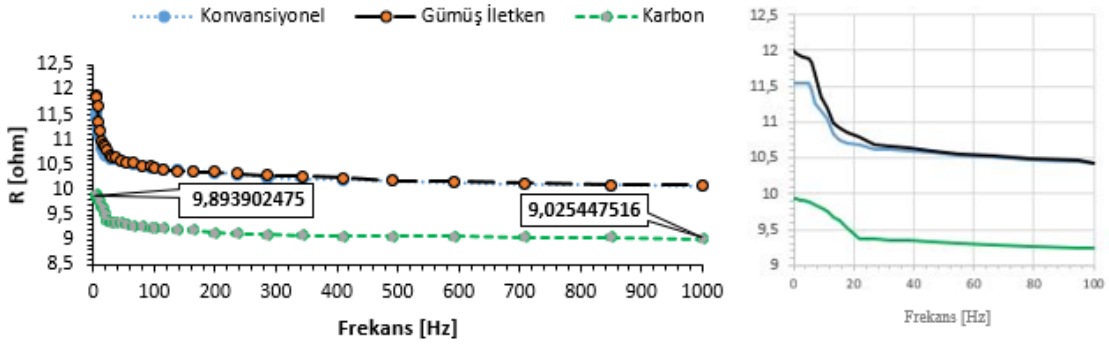
4.2.2 Deneysel Sonuçlar

Ayarlanmış karbon direnç tasarımının iletken yol üzerinde direnç kullanılabilmesi amacıyla oda koşulları altında frekansa bağlı olarak empedans testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca iletken mürekkebin bu testlerde iletken olarak kullanılabilmesi için konvansiyonel sistem ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.8'de iletken gümüş bazlı mürekkep ve karbon tabanlı mürekkep kullanılarak 3BY tarafından üretilmiş PCB'ler ile konvansiyonel PCB 'nin oda sıcaklığındaki direnç değerlerinin frekans değişimine bağlı olarak değişimi verilmiştir. Empedans testleri, ayarlanan karbon direnç tasarımının iletken yolundaki direncin kullanım frekansına bağlı olarak oda koşullarında gerçekleştirilir. Ayrıca iletken mürekkep, bu testlerde iletken olarak kullanılabilmesi için konvansiyonel sistemle karşılaştırılmıştır. DC empedanslarına baktığımızda, gümüş iletken yol ve konvansiyonel bakır yol için referans olarak 10 ohm'luk ayarlanmış direnç değeri eklendiğinde sırasıyla, dc yolunun empedansı referans değerden 1,55Ω-15,5% ve 2,07Ω-20,7% artmıştır. Karbon yolunda direnç olmadan sadece yol direnci ölçüldüğünde, 10 ohm'luk ayarlanmış direnç referans alındığında normal dc empedans değerinden negatif yönde 0,05Ω -0,5% kaymaktadır. Bu yöntemde istenilen değere ulaşılmasının sebebi ise diğer yöntemde yol ve temas direncinin ihmal edilmesinden kaynaklanmaktadır. Karbon bazlı mürekkepli yolun istenilen değere başarılı bir şekilde ayarlanmıştır. Frekansa bağlı olarak her malzemenin empedans değeri azalır. 0 Hz. ile 100 Hz. arasındaki düşüşler, üç yöntemde hızla azalır. 100 Hz. ile 1 kHz arasında, bu azalışlar başlangıçtaki düşüşlerden daha azdır.



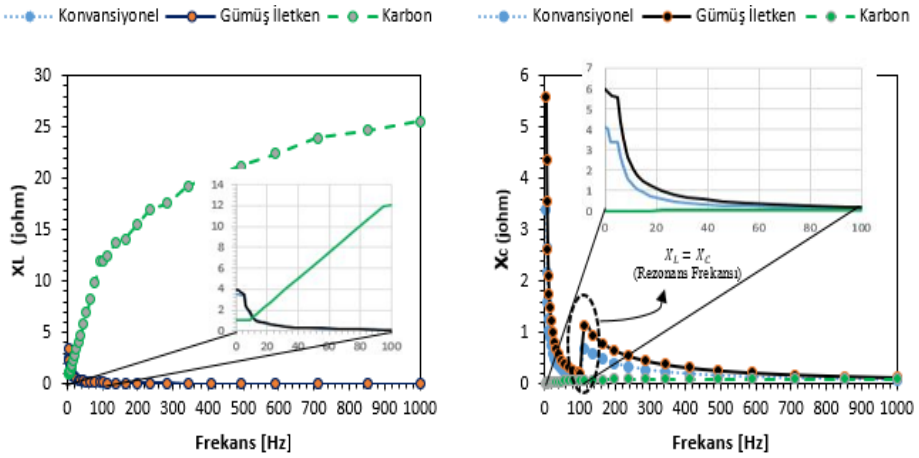
Şekil 4. 8 Frekansa bağlı empedans değişimi

Yaklaşık 100 Hz'de, konvansiyonel ve gümüş bazlı iletken için sapmalar sırasıyla 0,16Ω-16,6% ve 0,16Ω-16,6% olup nominal değerden daha düşüktür. 0-1 kHz arasındaki karbon değerindeki toplam değişim Şekil 4.9'da negatif yönde yaklaşık 0,088Ω-8,8%'dir.



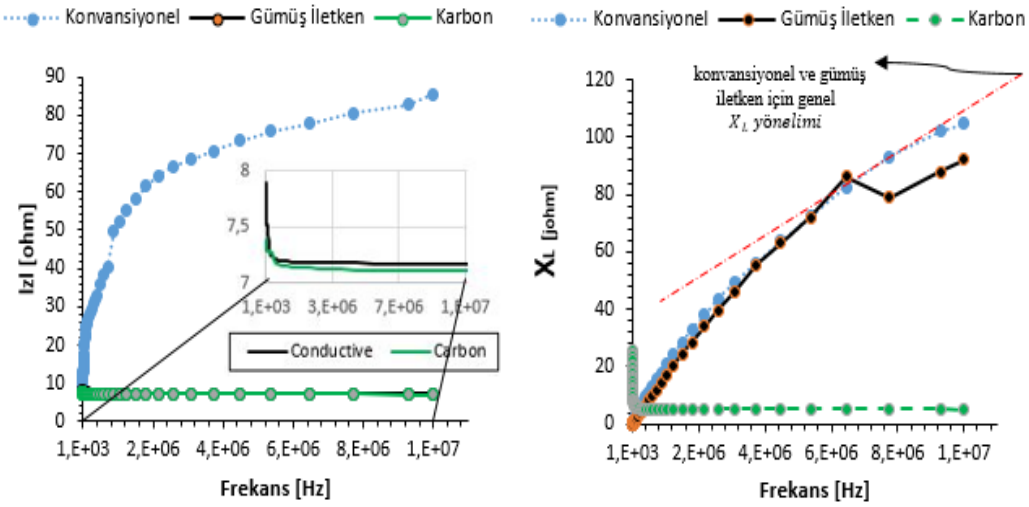
Şekil 4. 9 Frekansa bağlı 0-1 kHz arasındaki direnç değişimleri

0 Hz. ile 1 kHz arasında Şekil 4.10'da karbon endüktif bir karakteristiğe sahiptir. 100 Hz konvansiyonel ve gümüş iletken için bir rezonans frekansıdır. Fakat karbon bazlı iletkenin bu frekansta rezonans frekansı oluşmaması endüktif karakteristiğinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4. 10 Frekansa bağlı endüktif ve kapasitif reaktans değişimi

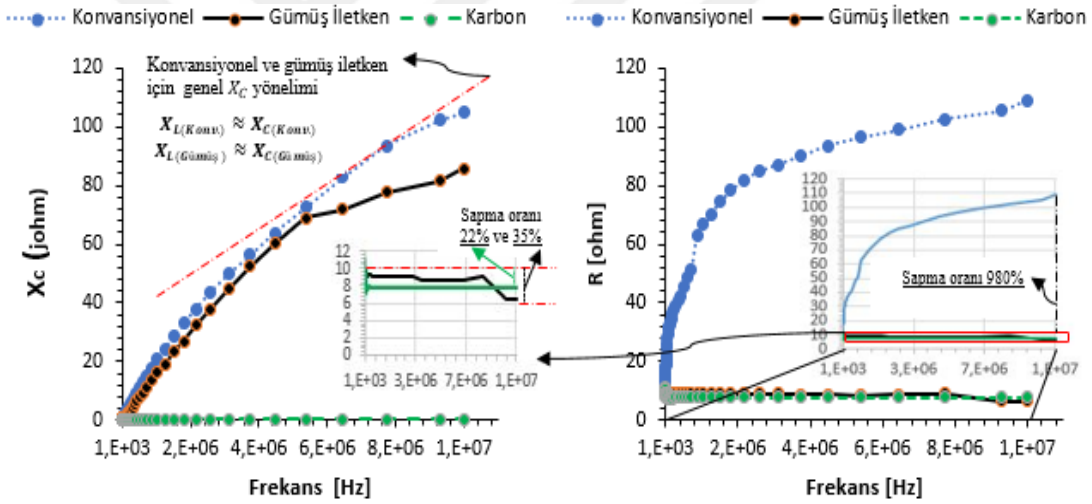
Şekil 4.11'de 1 kHz ile 10 Mhz arasındaki karbon iletkenin endüktif reaktansındaki değişim 20 johm ve 80%, gümüş iletkenin endüktif reaktansındaki değişim 85 johm ve 85%, konvansiyonel sistemdeki değişim ise 100 johm ve 105% şeklindedir. 1 kHz ile 10 Mhz arasındaki karbon iletkenin empedansındaki değişim 0,88 ohm ve 8,8%, gümüş iletkenin empedansındaki değişim 0,89 ohm ve 8,9%, konvansiyonel sistemdeki değişim ise 78,9 ohm ve 789% şeklindedir. Empedans sonuçları gösteriyor ki karbon yoldaki değişim en az konvansiyonel yoldaki değişim en yüksek olup frekans artışı konvansiyonel yol üzerinde gürültülere ve ısınmalara neden olur.



Şekil 4. 11 1 kHz- 10MHz arası empedans ve endüktif reaktans değişimi

Şekil 4.12'de yüksek frekanslarda konvansiyonel, gümüş iletken, karbon mürekkebin direncindeki ve kapasitif reaktansındaki değişim incelenmiştir. 1 kHz ile 10 Mhz arasındaki karbon iletkenin kapasitif reaktansındaki değişim 2,2 johm ve

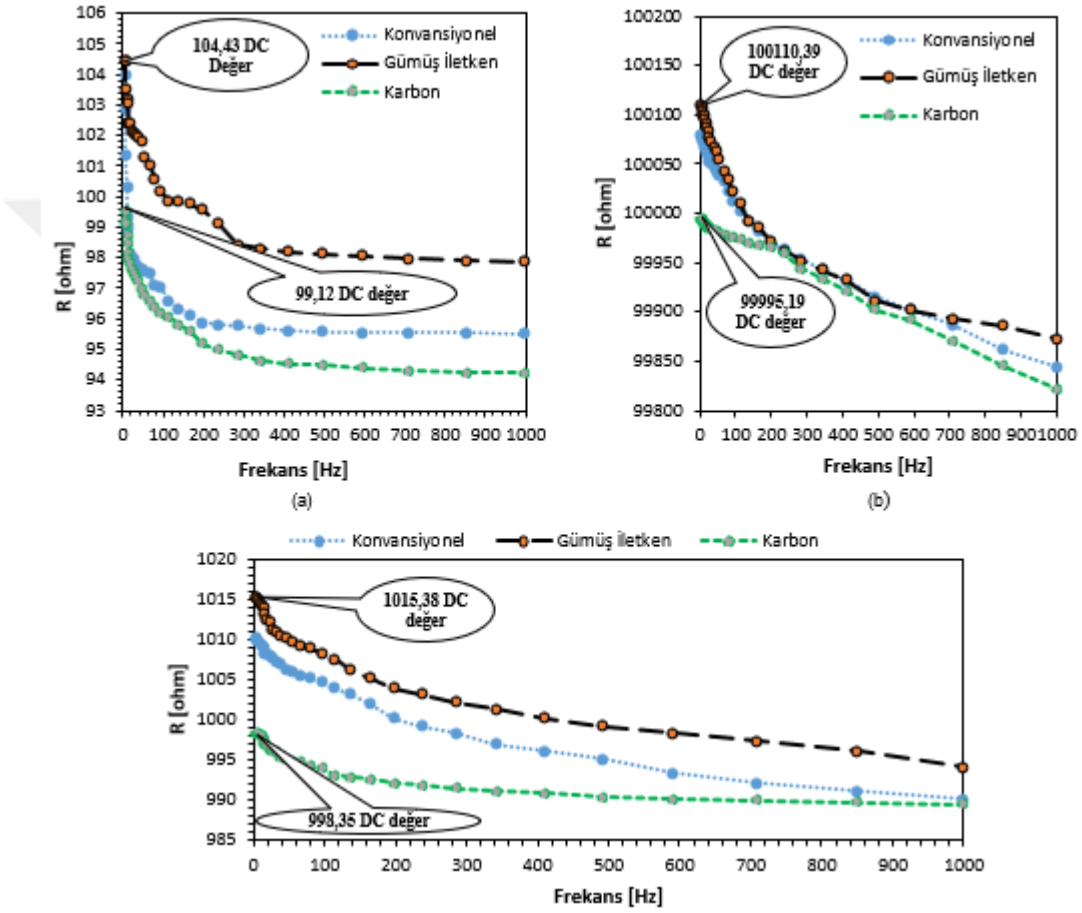
22%, gümüş iletkenin kapasitif reaktansındaki değişim 83 johm ve 83%, konvansiyonel sistemdeki değişim ise 104,4 johm ve 104,4% şeklindedir. 1 kHz ile 10 Mhz arasındaki karbon iletkenin direncindeki değişim 0,88 ohm ve 8,8%, gümüş iletkenin direncindeki değişim 0,83 ohm ve 8,3%, konvansiyonel yolun direncindeki değişim ise 105,8 ohm ve 1058% şeklindedir. Direnç değişimlerinin sonuçları gösteriyor ki karbon yoldaki değişim en az konvansiyonel yoldaki değişim en yüksek olup frekans artışı konvansiyonel yol üzerinde direnç artışına, güç kayıplarına ve devrenin verimini düşürmesine neden olur. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'deki endüktif ve kapasitif reaktanslar yaklaşık olarak eşit olduğundan devre yolları üç iletken için de omik karakterlidir. Dolayısıyla empedans artışı direnç artışına bağlıdır. Bu noktada gümüş iletken ile karbon mürekkepli yol karşılaştırıldığında 0-1 kHz aralığında gümüş iletken mürekkep ayarlanmış karbon direnç tasarımına göre 0,5% daha iyi performans sağlar.



Şekil 4. 12 1 kHz- 10MHz arası direnç ve kapasitif reaktans değişimi

Şekil 4.13'te görüldüğü üzere referans direnç artışına bağlı olarak her bir sistemdeki direnç değişim miktarları incelenmiştir. 0 Hz. ile 1 kHz arasında 100 ohm için karbon iletkenin direncindeki değişim 4,86 ohm ve 4,86%, gümüş iletkenin direncindeki değişim 9,96 ohm ve 9,5%, konvansiyonel yolun direncindeki değişim ise 5,8 ohm ve 5,5% şeklindedir. 0 Hz. ile 1 kHz arasında 1 kohm için karbon iletkenin direncindeki değişim 4,2 ohm ve 0,43%, gümüş iletkenin direncindeki değişim 7.42 ohm ve 0,75%, konvansiyonel yolun direncindeki değişim ise 16,8 ohm ve 1,69% şeklindedir. 0 Hz. ile 1 kHz arasında 100 kohm için karbon iletkenin

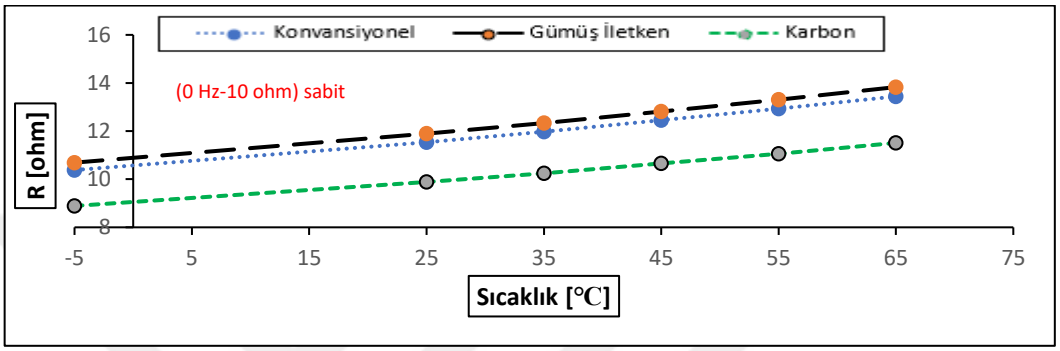
direncindeki değişim 145 ohm ve 0,144%, gümüş iletkenin direncindeki değişim 150 ohm ve 0,15%, konvansiyonel yolun direncindeki değişim ise 151 ohm ve 0,15% şeklindedir. Konvansiyonel yol direncindeki değişim gümüş iletken yoldaki direnç değişimi ile hemen hemen aynıdır. Bu farklar ihmal edilebilir değerdedir. Ayarlanmış karbon direnç tasarımı sırasıyla 100 ohm, 1 kohm ve 100 kohm referans direnç değerlerine göre performansı referans direnç değeri artışına bağlı olarak artmıştır.



Şekil 4. 13 100 Ω, 1 kΩ ve 100 kΩ referans değerlerine göre direnç değişimi

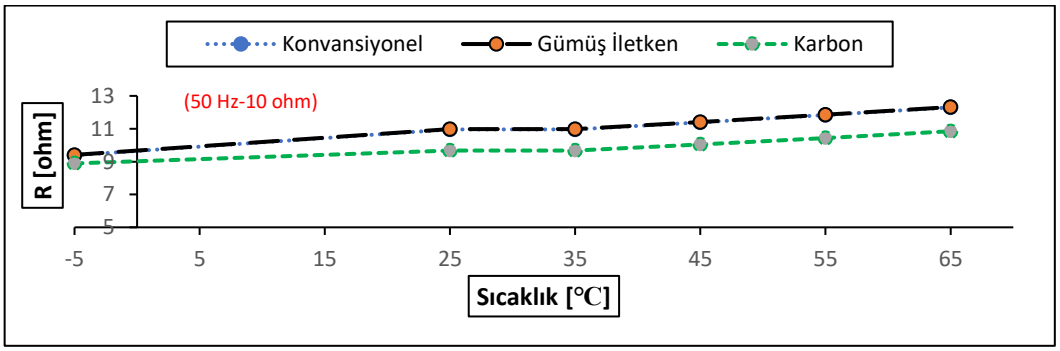
Çeşitli çalışma sıcaklıkları altında önerilen PCB devrelerinin çalışma performanslarını konvansiyonel PCB yapısı ile karşılaştırmak için sıcaklık ölçüm düzeneğinde 10 ohm referans direnç değerindeki yollar için farklı sıcaklıklar altında direnç değerinin değişimleri gözlenmiştir. Her sıcaklık değerinde direnç değeri ölçülürken frekans miktarı sabit tutulmuştur. Yolların test edildiği sıcaklık değerleri sırasıyla -5°C, 25°C, 35°C, 45°C, 55°C ve 65°C'dir. Bu sıcaklıklarda sıcaklık değeri sabit tutulurken, empedans analizöründen uygulanan frekans değerleri 0 Hz, 50 Hz, 100 Hz, 5

kHz, 100 kHz, 10 Mhz olarak değiştirilmiş ve sonuçlar kaydedilmiştir. Konvansiyonel, gümüş iletken ve karbon mürekkepli yolların sıcaklık artışına bağlı olarak direnci artmıştır. Ayrıca DC direnç değerleri -5°C minimum ve 65°C maksimumdur. Şekil 4.14'te 0 Hz'de 10 ohm sabit referans değeri olup -5°C- ile 65°C arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 2,4 ohm 24%, gümüş iletken yol için 2,41 ohm 24,1%, konvansiyonel iletken yol için 2,5 ohm 25% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak 1%'lik farkla değişim en fazla konvansiyonel yol üzerinde olmuştur.



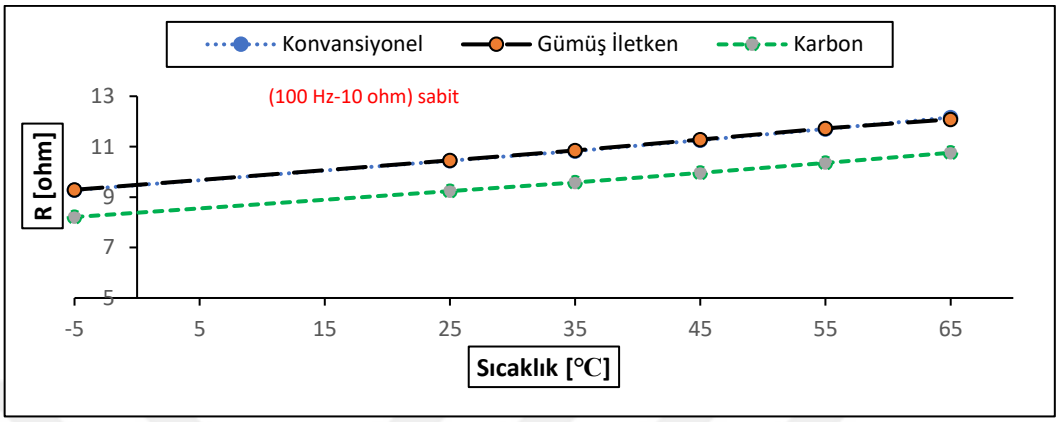
Şekil 4. 14 0 Hz ve 10 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

Şekil 4.15'te 50 Hz'de 10 ohm sabit referans değeri olup -5°C- ile 65°C arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 1,5 ohm 15%, gümüş iletken yol için 2,2 ohm 22%, konvansiyonel iletken yol için 2,2 ohm 22% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak 7%'lik farkla değişim en fazla konvansiyonel yol üzerinde olmuştur. Bu noktada konvansiyonel yol ile gümüş iletken yol arasındaki sıcaklık değerleri açısından farklar ihmal edilebilir oranlardadır.



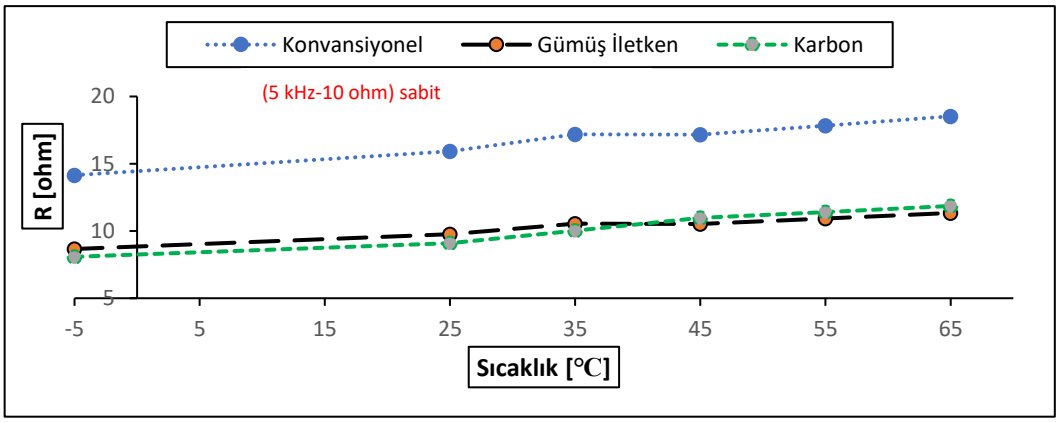
Şekil 4. 15 50 Hz ve 10 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

Şekil 4.16'da 100 Hz de 10 ohm sabit referans değeri olup -5°C- ile 65°C arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 2,3 ohm 23%, gümüş iletken yol için 2,3 ohm 23%, konvansiyonel iletken yol için 23 ohm 23% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak üç yöntemde de benzer oranda sıcaklık değişimi mevcuttur.



Şekil 4. 16 100 Hz ve 10 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

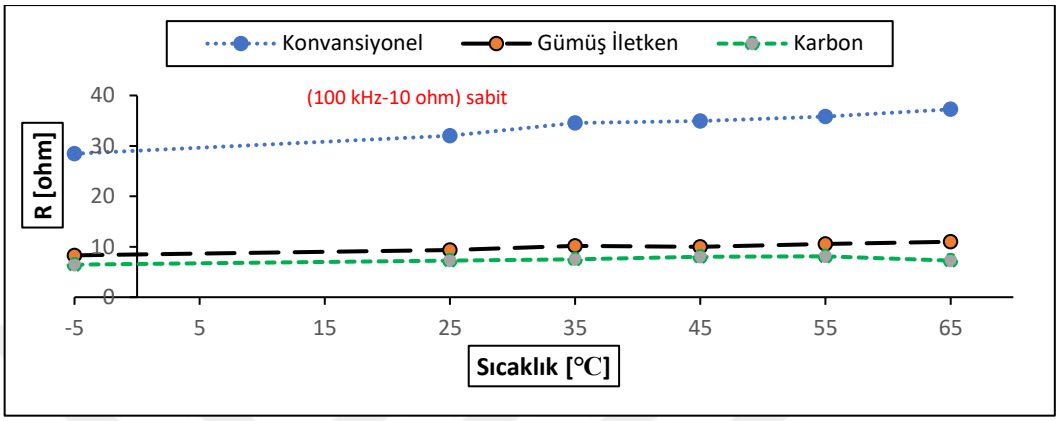
Şekil 4.17'de 5 kHz de 10 ohm sabit referans değeri olup -5°C- ile 65°C arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 2,1 ohm 21%, gümüş iletken yol için 2 ohm 20%, konvansiyonel iletken yol için 2,35 ohm 23,5% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak konvansiyonel sistemdeki değişim 2,5% karbon yol direncindeki değişimden daha yüksektir. Gümüş iletken yol ise sıcaklık artışına karşı bu frekansta en iyi performansı göstermiştir. Bu frekansta en iyi performans göstermesinin sebebi tutucu malzemelerin yalıtkan özelliğini kaybetmesinden kaynaklanır.



Şekil 4. 17 5 kHz ve 10 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

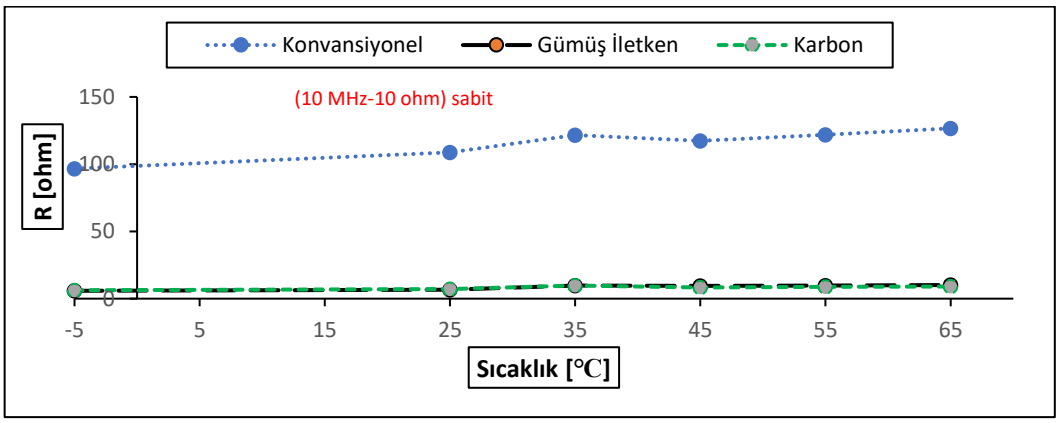
Şekil 4.18'de 100 kHz de 10 ohm sabit referans direnç değeri olup -5°C- ile 65°C arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 0,1 ohm 1%, gümüş iletken yol için 1,5 ohm 15%, konvansiyonel iletken yol için 6 ohm 19,75% artış

gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak konvansiyonel sistemdeki değişim 19,65% karbon yol direncindeki değişimden daha yüksektir. Karbon iletken yol sıcaklık artışına karşı bu frekansta en iyi performansı göstermiştir. Bu frekansta en iyi performans göstermesinin sebebi karbon iletkendeki gümüş bazlı parçacıkların oransal olarak yüksek frekansta karbon parçacıklardan daha az olmasıdır.



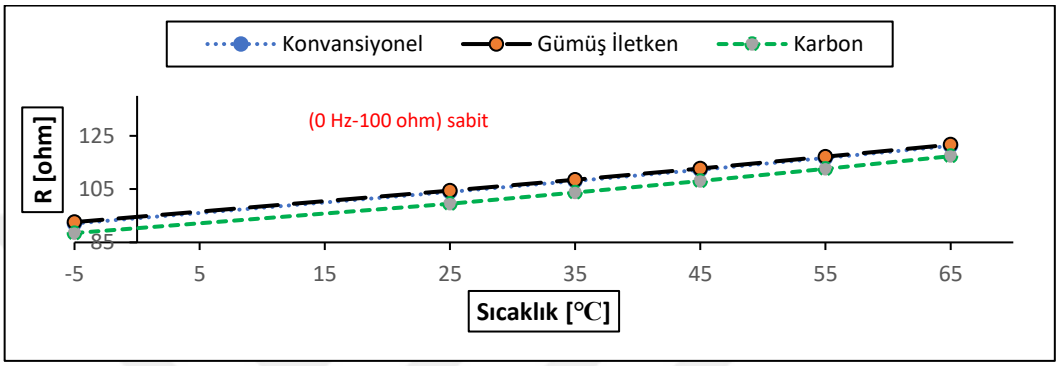
Şekil 4. 18 100 kHz ve 10 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

Şekil 4.19'da 10 MHz de 10 ohm sabit referans direnç değeri olup -5°C- ile 65°C arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 0,08 ohm 0,8%, gümüş iletken yol için 1 ohm 10%, konvansiyonel iletken yol için 25 ohm 150% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak konvansiyonel sistemdeki değişim 150% ile gümüş bazlı iletken yol direncindeki değişimden daha yüksektir. Gümüş bazlı iletken yol sıcaklık artışına karşı bu frekansta konvansiyonel sistemden daha iyi bir performans göstermiştir. Bu frekansta konvansiyonel sistemde yüksek ısınmalar ve sıcaklığın etkisiyle fazladan bir direnç artışı oluşmuştur.



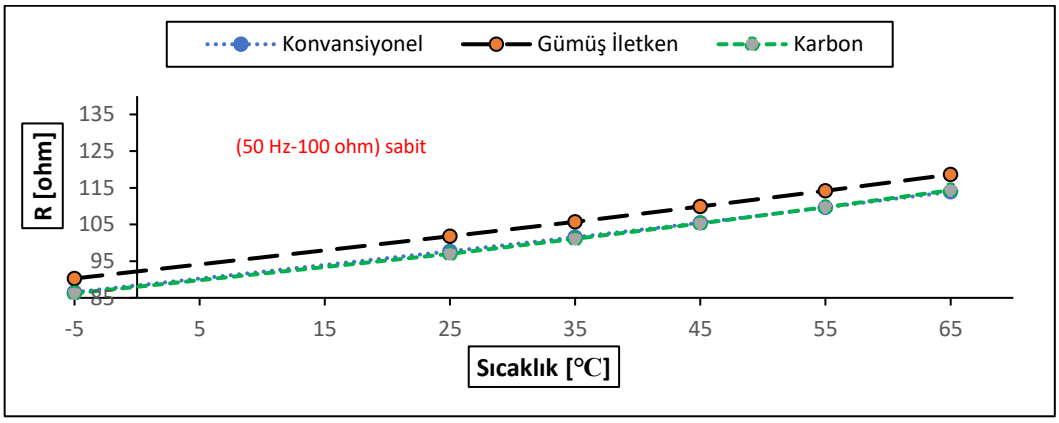
Şekil 4. 19 10 MHz ve 10 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

Şekil 4.20'de 0 Hz. de 100 ohm sabit referans direnç değeri olup -5℃- ile 65℃ arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 15 ohm 15%, gümüş iletken yol için 16 ohm 16%, konvansiyonel iletken yol için 16,2 ohm 16,2% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak konvansiyonel sistemdeki değişim 16,2% ile gümüş bazlı iletken yol direncindeki değişimden 0,1% daha yüksektir. Karbon bazlı iletken yol sıcaklık artışına karşı 0 Hz. de konvansiyonel sistemden 1,2% daha iyi bir performans göstermiştir.



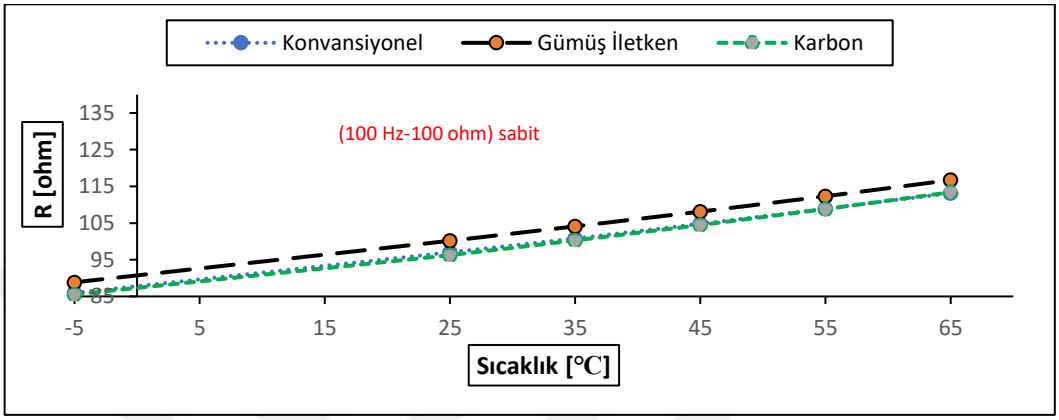
Şekil 4. 20 0 Hz ve 100 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

Şekil 4.21'de 50 Hz. de 100 ohm sabit referans direnç değeri olup -5℃- ile 65℃ arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 23 ohm 23%, gümüş iletken yol için 27 ohm 27%, konvansiyonel iletken yol için 27 ohm 27% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak konvansiyonel sistemdeki değişim 27% ile karbon bazlı iletken yol direncindeki değişimden 4% daha yüksektir. Gümüş bazlı iletken yol sıcaklık artışına karşı 50 Hz. de konvansiyonel sistemle 1,2% eşit performans göstermiştir.



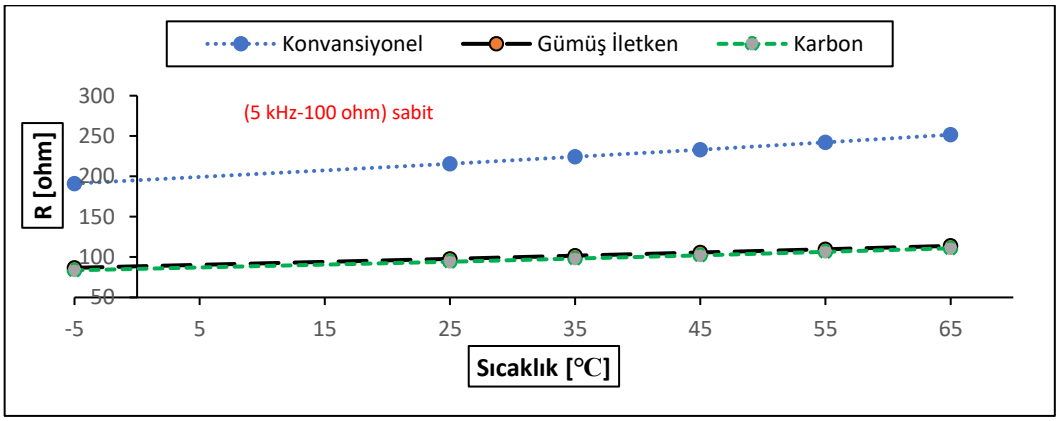
Şekil 4. 21 50 Hz ve 100 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

Şekil 4.22'de 100 Hz. de 100 ohm sabit referans direnç değeri olup -5°C- ile 65°C arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 20 ohm 20%, gümüş iletken yol için 22 ohm 22%, konvansiyonel iletken yol için 22 ohm 22% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak konvansiyonel sistemdeki değişim 22% ile karbon bazlı iletken yol direncindeki değişimden 2% daha yüksek olup, gümüş bazlı iletken değişimi ile eşittir.



Şekil 4. 22 100 Hz ve 100 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

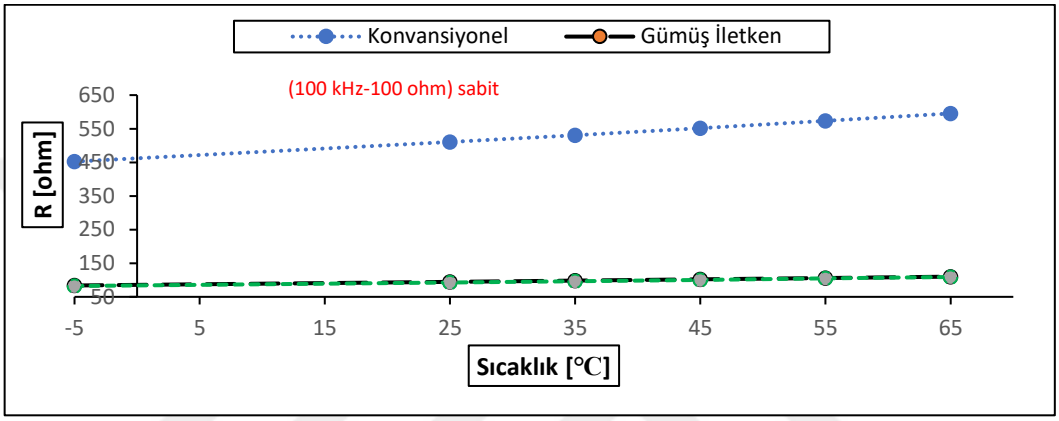
Şekil 4.23'te 5 kHz de 100 ohm sabit referans direnç değeri olup -5°C- ile 65°C arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 15 ohm 15%, gümüş iletken yol için 15,5 ohm 15,5%, konvansiyonel iletken yol için 25 ohm 25% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak konvansiyonel sistemdeki değişim 25% ile karbon bazlı iletken yol direncindeki değişimden 9,5% daha yüksektir. Karbon bazlı iletken yol sıcaklık artışına karşı 5 kHz de diğer iletken yollara göre en iyi performansı göstermiştir.



Şekil 4. 23 5 kHz ve 100 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

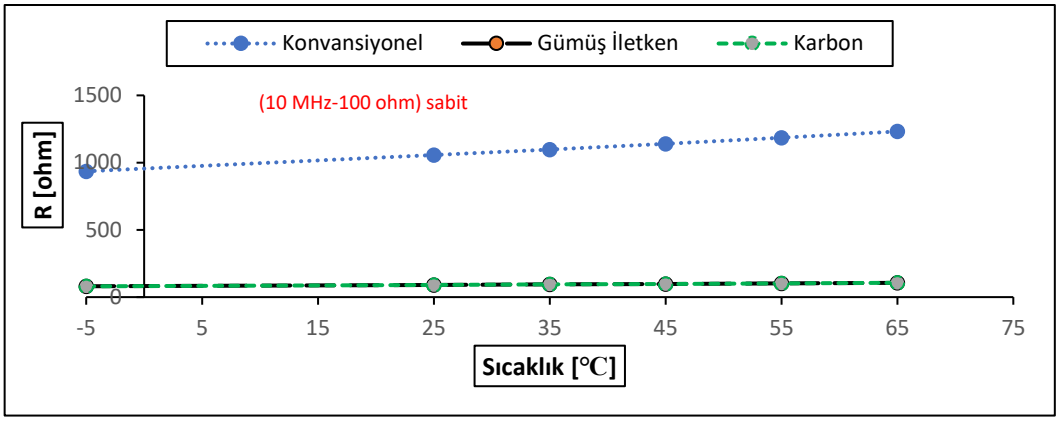
Şekil 4.24'te 100 Hz. de 100 ohm sabit referans direnç değeri olup -5°C- ile 65°C arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 5 ohm 5%, gümüş iletken

yol için 5,3 ohm 5,3%, konvansiyonel iletken yol için 21 ohm 21% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak konvansiyonel sistemdeki değişim 21% ile karbon bazlı iletken yol direncindeki değişimden 16% daha yüksek olup, gümüş bazlı iletken değişiminden 15,7% daha yüksektir. Bu sonuçlar gösteriyor ki frekans artışına bağlı direnç artışı vardır bu direnç artışı konvansiyonel sistemlerde normal sıcaklık artışının eklenmesiyle direnç artışında önemli artışlar olmuştur. Fakat gümüş bazlı iletken ve karbon bazlı mürekkeplerde sıcaklık artışı direnç artışını konvansiyonel sistemlere göre daha az etkilemiştir.



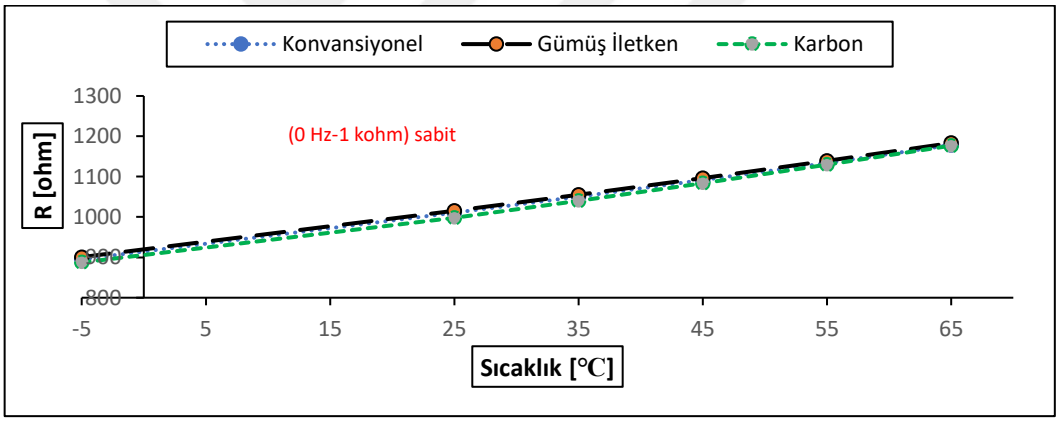
Şekil 4. 24 100 kHz ve 100 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

Şekil 4.25'te 10 MHz de 100 ohm sabit referans direnç değeri olup -5℃- ile 65℃ arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 3,2 ohm 3,2%, gümüş iletken yol için 3,2 ohm 3,2%, konvansiyonel iletken yol için 19 ohm 19% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak konvansiyonel sistemdeki değişim 19% ile karbon bazlı iletken yol direncinden ve gümüş bazlı iletken değişimden 15,8% daha yüksektir. Bu sonuçlara bağlı olarak frekans arttıkça sıcaklık değişiminden kaynaklanan direnç artışı karbon ve gümüş bazlı iletkende azalmıştır.



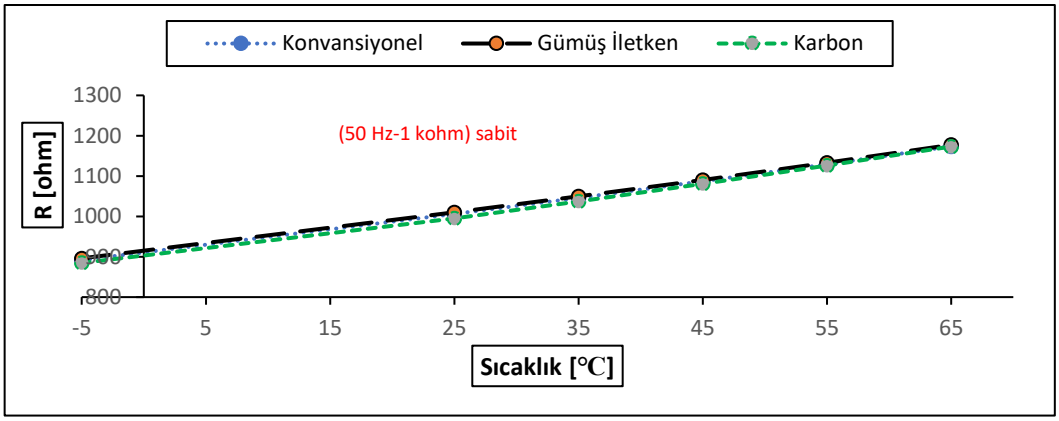
Şekil 4. 25 10 MHz ve 100 Ω referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

Şekil 4.26'da 0 Hz. de 1 kohm sabit referans direnç değeri olup -5°C- ile 65°C arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 18 ohm 18%, gümüş iletken yol için 18 ohm %, konvansiyonel iletken yol için 18 ohm 18% artış gerçekleşmiştir. Bu sonuçlara göre üç sistemde değişim miktarları eşittir.



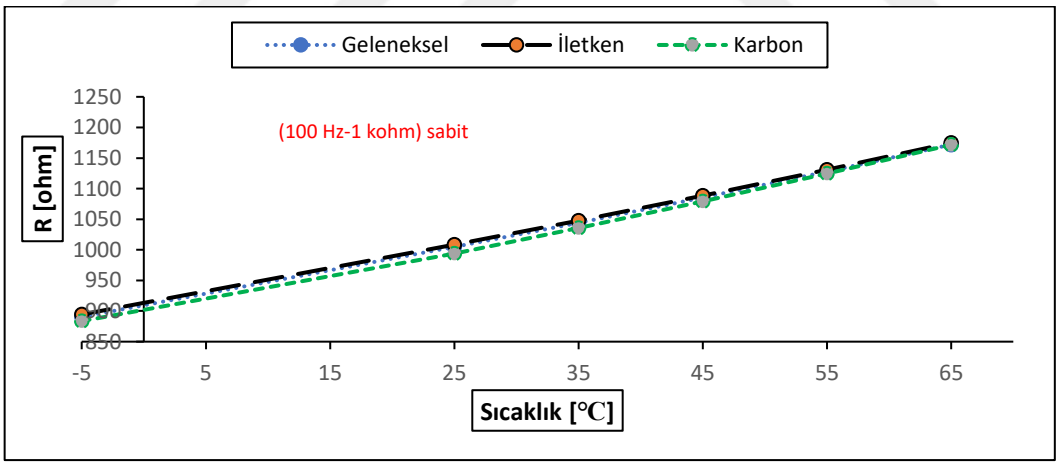
Şekil 4. 26 0 Hz ve 1 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

Şekil 4.27'de 50 Hz. de 1 kohm sabit referans direnç değeri olup -5°C- ile 65°C arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 181 ohm 18,1%, gümüş iletken yol için 180 ohm 18%, konvansiyonel iletken yol için 180 ohm 18% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak konvansiyonel sistemdeki değişim 18% ile gümüş bazlı iletken yol direnci ile eşit değişimi göstermiş olup, karbon mürekkepten 0,1% daha az değişim göstermiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak 50 Hz. de sıcaklık arttıkça sıcaklık değişiminden kaynaklanan direnç artışı gümüş bazlı iletkende karbon mürekkepten daha azdır.



Şekil 4. 27 50 Hz ve 1 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

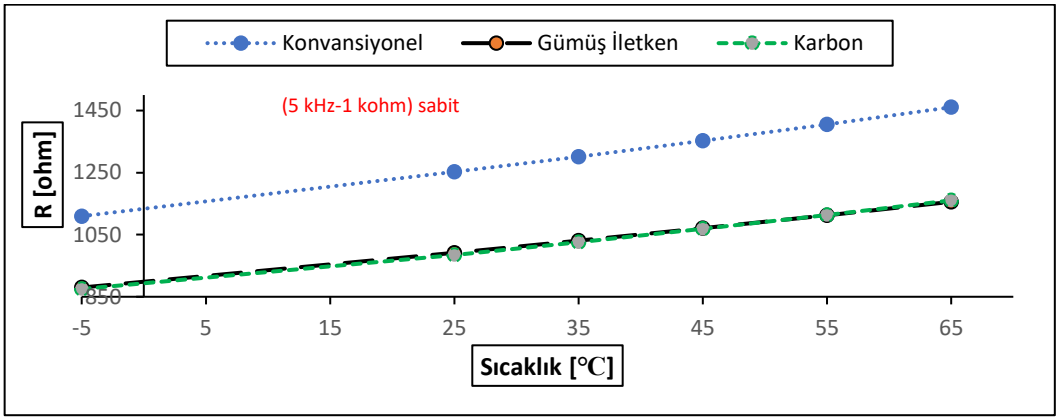
Şekil 4.28'de 100 Hz. de 1 kohm sabit referans direnç değeri olup -5°C- ile 65°C arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 182 ohm 18,1%, gümüş iletken yol için 180 ohm 18%, konvansiyonel iletken yol için 180 ohm 18% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak konvansiyonel sistemdeki değişim 18% ile gümüş bazlı iletken yol direnci ile eşit değişimi göstermiş olup, karbon mürekkepten 0,2% daha az değişim göstermiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak 100 Hz. de sıcaklık arttıkça sıcaklık değişiminden kaynaklanan direnç artışı gümüş bazlı iletkende karbon mürekkepten daha azdır.



Şekil 4. 28 100 Hz ve 1 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

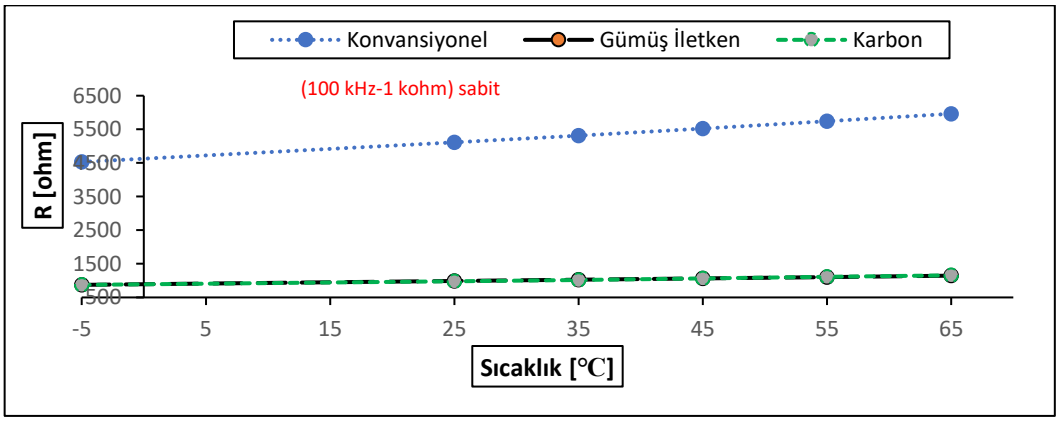
Şekil 4.29'da 5 kHz'de 1 kohm sabit referans direnç değeri olup -5°C- ile 65°C arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 179 ohm 17,9%, gümüş iletken yol için 179 ohm 17,9%, konvansiyonel iletken yol için 355 ohm 35,5% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak konvansiyonel sistemdeki değişim 35,5% ile gümüş bazlı iletken yol direnci ve karbon iletken mürekkepten 17,6% daha yüksek bir değişime neden

olmuştur. Bu sonuçlara bağlı olarak 5 kHz' de sıcaklık arttıkça sıcaklık değişiminden kaynaklanan direnç artışı karbon mürekkepte konvansiyonel sistemlerdeki değişiminim hemen hemen yarısı kadarıdır.



Şekil 4. 29 5 kHz ve 1 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

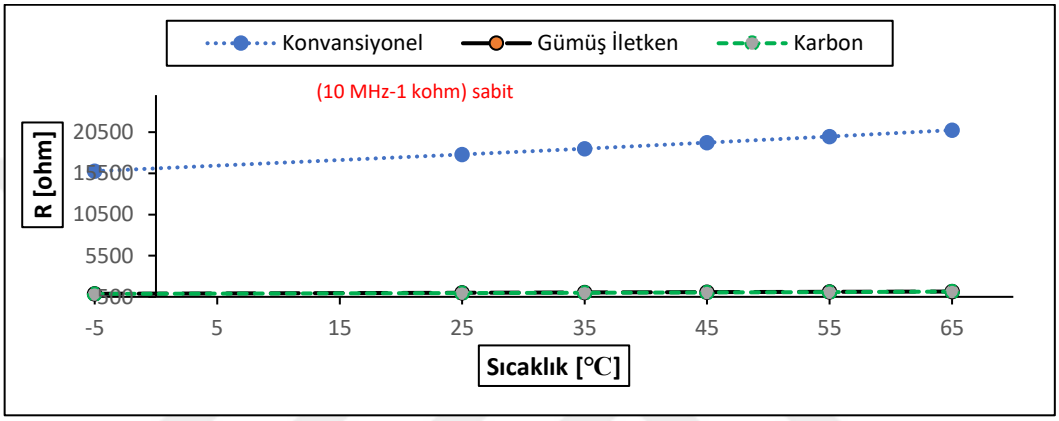
Şekil 4.30'da 100 kHz'de 1 kohm sabit referans direnç değeri olup -5°C- ile 65°C arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 33 ohm 3,3%, gümüş iletken yol için 33 ohm 3,3%, konvansiyonel iletken yol için 1045 ohm 16,8% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak konvansiyonel sistemdeki değişim 16,8% ile gümüş bazlı iletken yol direnci ve karbon iletken mürekkepten 13,5% daha yüksek bir değişime neden olmuştur. Bu sonuçlara bağlı olarak 100 kHz' de sıcaklık arttıkça sıcaklık değişiminden kaynaklanan direnç artışı gümüş bazlı iletken ile karbon bazlı iletkende eşit olmasına rağmen konvansiyonel sistemlerdeki değişim diğer frekans değerlerinde olduğu gibi çok yüksektir.



Şekil 4. 30 100 kHz ve 1 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

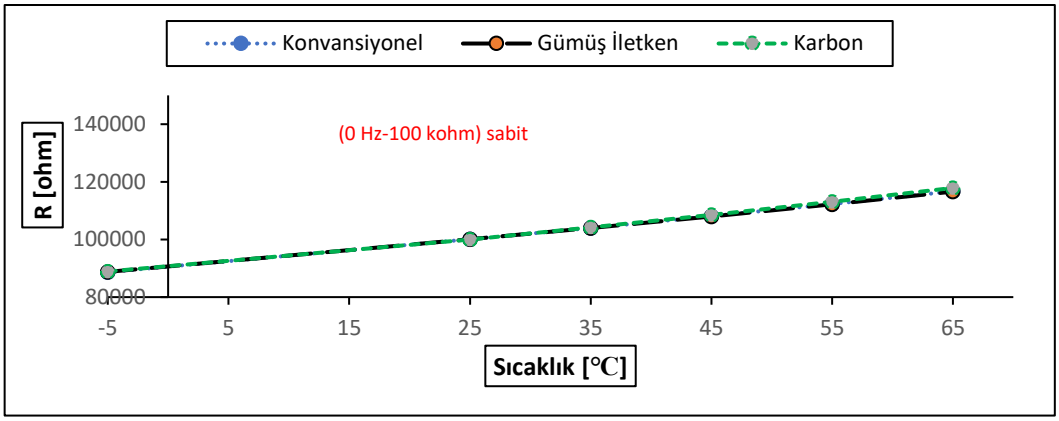
Şekil 4.31'de 10 MHz' de 1 kohm sabit referans direnç değeri olup -5°C- ile 65°C arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 10 ohm 1%, gümüş

iletken yol için 10 ohm 1%, konvansiyonel iletken yol için 3650 ohm 18,5% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak konvansiyonel sistemdeki değişim 18,5% ile gümüş bazlı iletken yol direnci ve karbon iletken mürekkepten 17,5% daha yüksek bir değişime neden olmuştur. Bu sonuçlara bağlı olarak 10 MHz' de sıcaklık arttıkça sıcaklık değişiminden kaynaklanan direnç artışı gümüş bazlı iletken ile karbon bazlı iletkende eşit olmasına rağmen konvansiyonel sistemlerdeki değişim yüksek frekans değerlerindeki sıcaklığın artması göz önünde bulundurulduğunda karbon ve gümüş bazlı iletkende azalırken konvansiyonel sistemlerde artmaktadır.



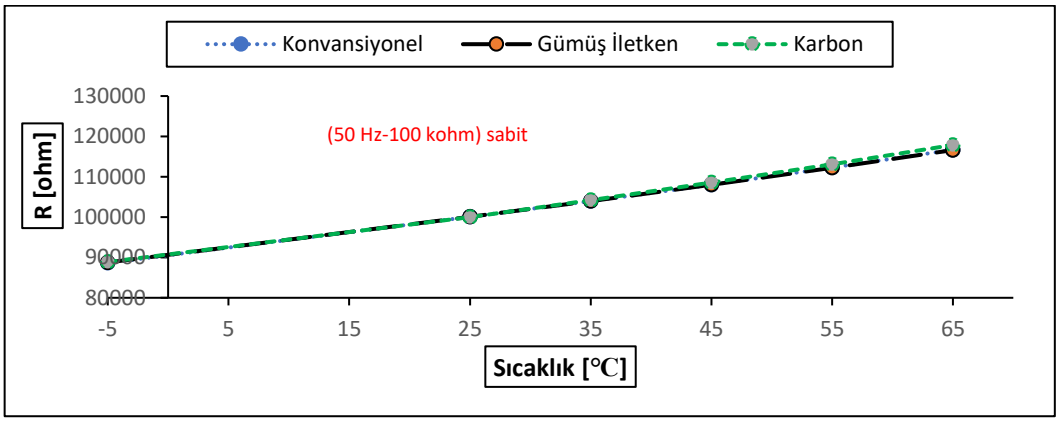
Şekil 4. 31 10 MHz ve 1 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

Şekil 4.32'de 0 Hz' de 100 kohm sabit referans direnç değeri olup -5℃- ile 65℃ arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 10 ohm 1%, gümüş iletken yol için 10 ohm 1%, konvansiyonel iletken yol için 3650 ohm 18,5% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak konvansiyonel sistemdeki değişim 18,5% ile gümüş bazlı iletken yol direnci ve karbon iletken mürekkepten 17,5% daha yüksek bir değişime neden olmuştur. Bu sonuçlara bağlı olarak 0 Hz' de sıcaklık arttıkça sıcaklık değişiminden kaynaklanan direnç artışı gümüş bazlı iletken ile karbon bazlı iletkende eşit olmasına rağmen konvansiyonel sistemlerdeki değişim yüksek frekans değerlerindeki sıcaklığın artması göz önünde bulundurulduğunda karbon ve gümüş bazlı iletkende azalırken konvansiyonel sistemlerde artmaktadır.



Şekil 4. 32 0 Hz ve 100 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

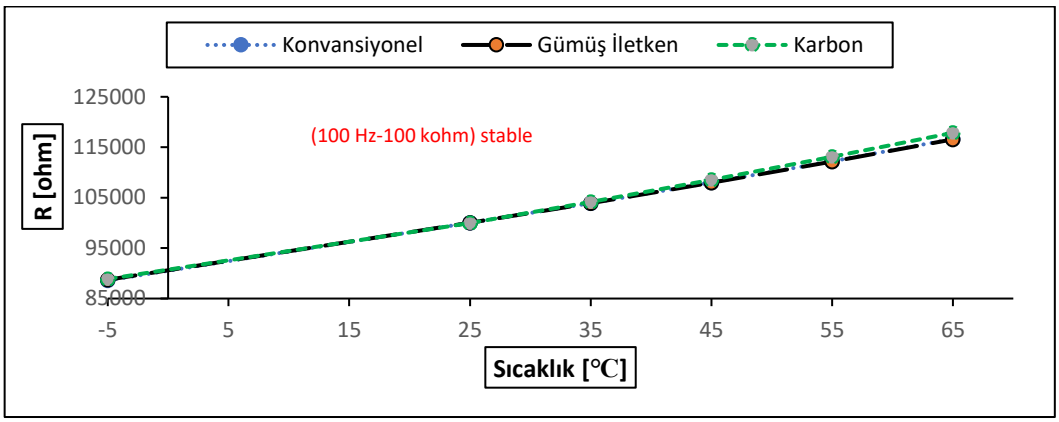
Şekil 4.33'te 50 Hz' de 100 kohm sabit referans direnç değeri olup -5°C- ile 65°C arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 16225 ohm 19,36%, gümüş iletken yol için 15840 ohm 18,9%, konvansiyonel iletken yol için 15840 ohm 18,9% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak karbon mürekkepteki sistemde değişim 19,36% ile gümüş bazlı iletken yol direnci ve karbon iletken mürekkepten 0,46% daha yüksek bir değişime neden olmuştur. Bu sonuçlara bağlı olarak 50 Hz' de sıcaklık arttıkça sıcaklık değişiminden kaynaklanan direnç artışı gümüş bazlı iletken ile konvansiyonel iletkende eşit olmasına rağmen karbon bazlı mürekkepte değişim daha yüksektir.



Şekil 4. 33 50 Hz ve 100 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

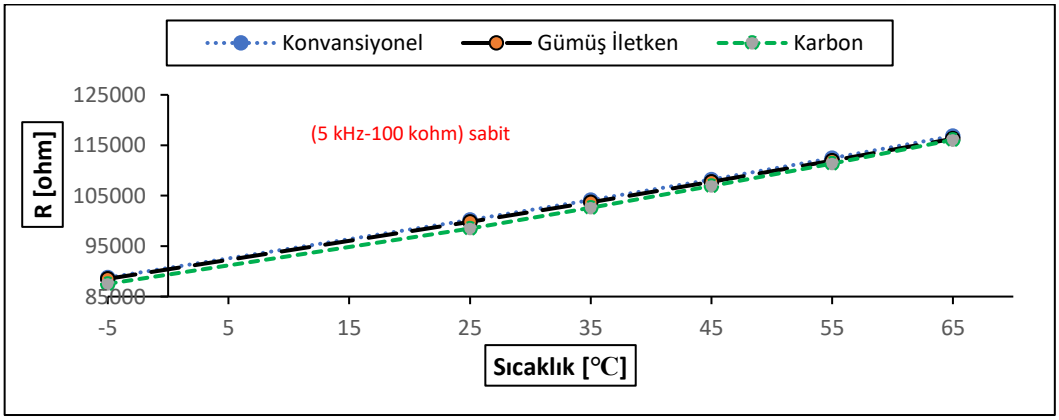
Şekil 4.34'te 100 Hz' de 100 kohm sabit referans direnç değeri olup -5°C- ile 65°C arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 16548 ohm 19,37%, gümüş iletken yol için 15845 ohm 18,9%, konvansiyonel iletken yol için 15845 ohm 18,9% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak karbon bazlı iletken sistemde

değişim 19,37% ile gümüş bazlı iletken yol direnci ve karbon iletken mürekkepten 0,47% daha yüksek bir değişime neden olmuştur.



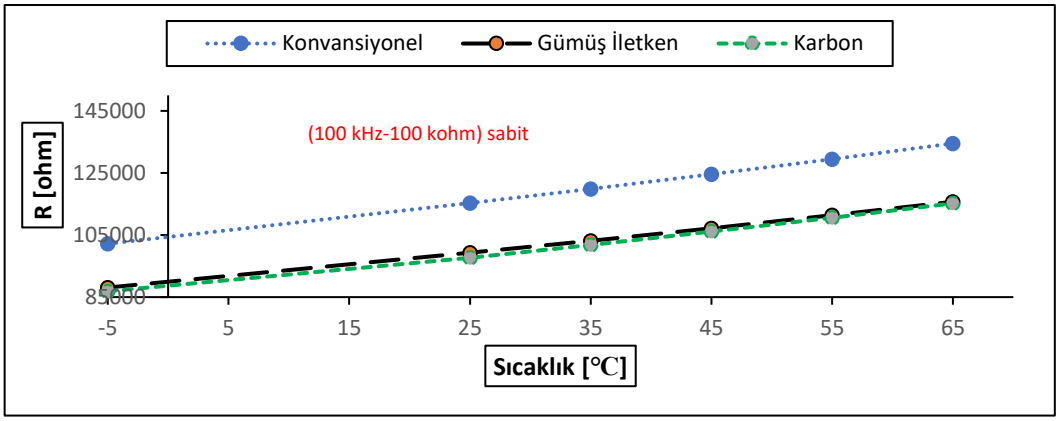
Şekil 4. 34 100 Hz ve 100 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

Şekil 4.35'te 5 kHz' de 100 kohm sabit referans direnç değeri olup -5°C- ile 65°C arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 16780 ohm 19,37%, gümüş iletken yol için 15920 ohm 18,9%, konvansiyonel iletken yol için 15920 ohm 18,9% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak karbon bazlı iletken sistemde değişim 19,37% ile gümüş bazlı iletken yol direnci ve karbon iletken mürekkepten 0,47% daha yüksek bir değişime neden olmuştur.



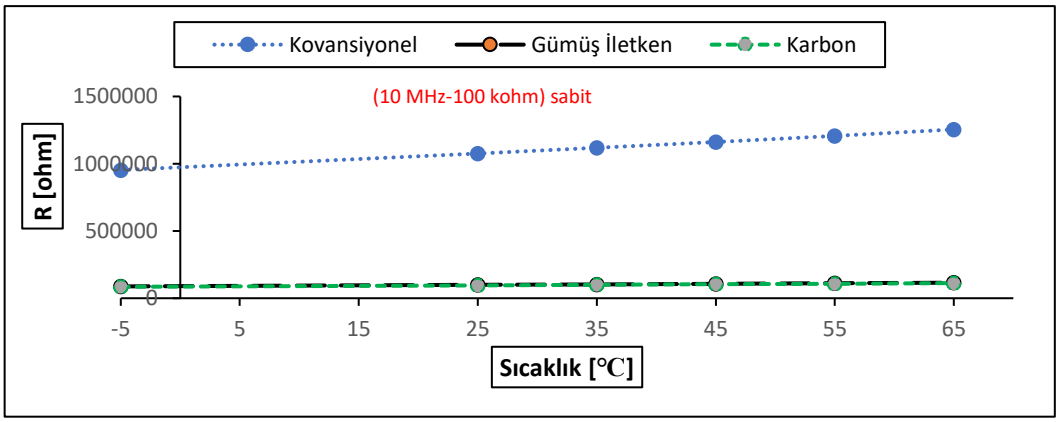
Şekil 4. 35 5 kHz ve 100 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

Şekil 4.36'da 100 kHz' de 100 kohm sabit referans direnç değeri olup -5°C- ile 65°C arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 16240 ohm 19,16%, gümüş iletken yol için 15920 ohm 18,9%, konvansiyonel iletken yol için 15920 ohm 18,9% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak karbon bazlı iletken sistemde değişim 19,16% ile gümüş bazlı iletken yol direnci ve karbon iletken mürekkepten 0,26% daha yüksek bir değişime neden olmuştur.



Şekil 4. 36 100 kHz ve 100 kΩ referans değerindeki direnç değişimi

Şekil 4.37'de 100 kHz' de 100 kohm sabit referans direnç değeri olup -5°C- ile 65°C arasındaki direnç değişimi sırasıyla karbon mürekkepli yol için 13250 ohm 15,6%, gümüş iletken yol için 15920 ohm 18,9%, konvansiyonel iletken yol için 15920 ohm 18,9% artış gerçekleşmiştir. Sıcaklık artışına bağlı olarak konvansiyonel sistemde değişim 18,9% ile karbon iletken mürekkepten 3,3% daha yüksek bir değişime neden olmuştur. Bu sonuçlar gösteriyor ki karbon iletken mürekkep sıcaklık değişimine göre en az etkilenen sistemdir. Gümüş bazlı iletken yol ise ikinci olarak en iyi performansı ortaya koymuştur. Konvansiyonel sistemler ise genel olarak düşük performanslıdır. Özellikle düşük dirençli referans yollarda sıcaklığa bağlı yüksek direnç değişimi meydana gelmektedir. Bu yüzden sıcaklığın yüksek olduğu frekanslarda konvansiyonel sistem kullanmak devre üzerinde fazladan direnç artışına neden olur.



Şekil 4. 37 10 MHz ve 100 kΩ referans değerinde sıcaklığa bağlı direnç değişimi

5
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde devre baskısı için 3BY tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan yazıcı için baskı devre tasarımı doğrultusunda örnek devre üzerinden görüntü işleme tekniği kullanılarak devre yollarının koordinatları bulunmuştur. Bu koordinatlara FDM yöntemi ile baskı malzemeleri basılmıştır. Oluşturulan devrenin çalışması birinci deneyde gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise ayarlanmış dirençli yol oluşturulup yolların elektriksel testleri yapılmıştır. 3BY ile hazırlanmış gümüş bazlı iletken, karbon ve konvansiyonel yol tasarımları yapılmıştır. 3BY ile gümüş iletken ve karbon yollarının hazırlanması ve ayarlanmış yol direnç tasarımı literatüre katkı sağlamıştır. Konvansiyonel, gümüş iletken ve karbon yolları için analizler tamamlanmıştır. Farklı direnç değerleri için yol tasarımı yapılmış ve istenilen direnci elde edecek şekilde 3BY ile üretilmiştir. Yol tasarımlarında, konvansiyonel ve iletkenler için sadece hazır SMD dirençleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yani, sadece konvansiyonel ve gümüş iletken yolun elektriksel iletkenlikleri karşılaştırılmıştır. Ancak karbonda tamamen ayarlanmış dirençli yol tasarımı tercih edilmiştir. Bu dirençli yol tasarımları için 10-100 ohm ve 1 kohm-100 kohm dört farklı ayarlanmış dirençli yol tasarımı oluşturulmuştur. Daha sonra konvansiyonel, gümüş iletken ve karbon yollar, empedans analizöründen gönderilen frekansa ve termokupl üzerindeki sıcaklığa bağlı olarak test edilmiştir. Yüksek frekanslı deri etkilerinin tasarlanan yollar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca kullanılan malzemeye bağlı olarak test sonuçlarıyla da desteklenmiştir. Test sonuçlarına göre elde edilen sonuçlar şu şekildedir;

- DC frekansta konvansiyonel sistem ile gümüş bazlı iletken arasındaki direnç farkı 0,05 ohm olup ihmal edilebilecek değerdedir.
- 1 MHz' de gümüş bazlı iletken yol konvansiyonel sistem ile oluşturulan yol direncinde 55,4 ohm daha düşük dirence sahiptir. Bu sonuç gösteriyor ki yüksek frekanslı devrelerde karbon mürekkep yolun kullanımı konvansiyonel sitemlere göre daha uygundur.

- 10 MHz' de gümüş bazlı iletken 105,6 ohm daha konvansiyonel sistemlerden daha düşük dirence sahiptir.
- Ayarlanmış karbon direnci DC değerde 98,99% oranında referans değere yakın olduğundan konvansiyonel sistemlere göre daha mükemmeldir .
- Ayarlanmış karbon direncindeki değişim gümüş iletken ve konvansiyonel sistemden 10 ohm referans değerinde daha düşüktür.
- Ayarlanmış karbon direnci deri etkisini 71% oranında düşürerek konvansiyonel sisteme göre daha iyi bir çözüm sunar.
- Sıcaklık deneyi kısmında tüm değişkenler sabit frekans arttığında genel olarak konvansiyonel sistemlerin direnç değeri artarken gümüş iletken ve karbon bazlı yolun direnci yavaş artar ve daha sonra sabitleşir.
- Gümüş bazlı iletkende smd direnç vardır fakat ayarlanmış karbon direnç tasarımında yoktur. Ayarlanmış direnç tasarımında dizgi olmadığından üretim süresinin düşürülmesini sağlar. Ayrıca DC frekansta istenilen direnç değeri üretilebildiğinden direnç maliyeti tasarrufuna katkıda bulunur.
- Konvansiyonel sistemlerde devre kartı üretimi 3-20 USD iken 3BY ile pcb üretimlerinde 5-8 USD, ayarlanmış karbon direnç tasarımları da eklendiğinde 3-5 USD arasında devre maliyeti vardır.
- Hassasiyet açısından konvansiyonel sistemlerde devre yolları arasındaki uzaklık genelde 120µ iken 3BY ile yapılan tasarımlarda 25µ civarındadır.
- Konvansiyonel sistemler ile dakikada 100 pcb kartı basılabilirken 3BY ile üretilen devre kartı 4-5 adet arasındadır. Fakat prototip açısından 3BY daha avantajlıdır.
- Konvansiyonel sistemlerde lehim problemleri oluşurken 3BY 'de ısıtıcı yatağı sayesinde sıcaklık kontrolü ile malzemelerin pedlere tamamen yapışması sağlanır.
- Konvansiyonel sistemlerde gerber dosyasının aktarımı sırasında oluşan problemler ise görüntü işleme tekniği kullanılarak giderilmiştir.

- 3BY tasarımı ile prototip devre maliyeti ve direnç maliyetinden tasarruf sağlanmıştır. Konvansiyonel sistemlerdeki gibi geniş alan gerektirmez. Hızlı prototipleme ile üretim süresi düşürülmüştür. Deri etkisine karşı 71% performans sağlanmış olup lehim problemleri tamamen ortadan kaldırılmıştır.

KAYNAKÇA

[1] S.H. Huang, P. Liu, A. Mokasdar, and L. Hou, “Additive manufacturing and its societal impact: a literature review,” Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 67, no. 8, pp. 1191–1203, 2013.

[2] D. Helena, A. Ramos, T. Varum, and J. N. Matos, "Antenna Design Using Modern Additive Manufacturing Technology: A Review," IEEE Access, vol. 8, pp. 177064-177083, 2020.

[3] P. Parandoush, D. Lin, “A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites,” in Composite Structures, vol. 182, pp. 36-53, 2017.

[4] C. Deckard, “Apparatus for producing parts by selective sintering,” in U.S. Patent 5 597 589, 1997.

[5] H. Bikas, P. Stavropoulos, and G. Chryssolouris, “Additive manufacturing metots and modelling approaches: a critical review,” Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 83, 2015, pp. 389–405.

[6] C. Camposeco-Negrete, “Optimization of printing parameters in fused deposition modeling for improving part quality and process sustainability,” Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 108, pp. 2131–2147, 2020.

[7] M. Shellabear, J. Lenz, and V. Junior, “E-manufacturing with Laser Sintering—to Series Production and Beyond,” Proceedings of the Fourth Laser Assisted Net Shape Engineering, vol. 1, pp. 435–444, 2004.

[8] A. Joshi, A. Patnaik, B. Gangil and S. Kumar, "Laser assisted rapid manufacturing technique for the manufacturing of functionally graded materials," 2012 Students Conference on Engineering and Systems, Allahabad, India, 2012, pp. 1-3.

[9] T. Rayna, L. Striukova, and J. Darlington, “Co-creation and user innovation: The role of online 3D printing platforms,” Journal of Engineering and Technology Management, vol. 37, pp. 90-102, 2015.

[10] J. Alcisto, A. Enriquez, H. Garcia, S. Hinkson, T. Steelman, E. Silverman, P. Valdovino, H. Gigerenzer, J. Foyos, J. Ogren, J. Dorey, K. Karg, T. McDonald, and O.S. Es-Said, “Tensile Properties and Microstructures of Laser- Formed Ti-6Al-4V,” Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 20, no. 2, pp. 203–212, 2011.

[11] J. Hoerber, Glasschroeder, M. Pfeffer, J. Schilp, M. Zaeh, and J. Franke, “Approaches for additive manufacturing of 3D electronic applications,” Procedia CIRP, vol. 17, pp. 806–811, 2014.

[12] A. Zolfagharian, A. Kaynak, M. Bodaghi, A. Z. Kouzani, S. Gharaie, and S. Nahavandi, “Control-Based 4D Printing: Adaptive 4D-Printed Systems,” Applied Sciences, vol. 10, no. 9, pp. 1-19, 2020.

[13] M. Li, Y. Yang, F. Iacopi, J. Nulman, and S. Chappel-Ram, "3D-Printed Low-Profile Single-Substrate Multi-Metal Layer Antennas and Array with Bandwidth Enhancement," IEEE Access, vol. 8, pp. 217370-217379, 2020.

[14] M. Ghahremani, M. Latifi, and M. Babaei, "Simulation of conductivity made by inkjet-printed silver tracks in E-textiles with different weave patterns," Journal of Industrial Textiles, vol. 47, no.2, pp. 173-196, 2017.

[15] J. Mueller, J. R. Raney, K. Shea, and J. A. Lewis, "Architected Lattices with High Stiffness and Toughness via Multicore–Shell 3D Printing," Advanced Materials, vol. 30, no. 12, pp. 1705001, 2018.

[16] N. I. Jaksica, and P. D. Desai, "Characterization of 3D-printed capacitors created by fused filament fabrication using electrically-conductive filament," Procedia Manufacturing, vol. 38, pp. 33-41, 2019.

[17] J. Wang, Y. Liu, Z. Fan, W. Wang, B. Wang, and Z. Guo, "Ink-based 3D printing technologies for graphene-based materials: a review," Advanced Composites and Hybrid Materials, vol. 2, pp. 1-33, 2019.

[18] T. Campbell, C. Williams, O. Ivanova, and B. Garrett, "Could 3D printing change the world, Tech., Potential Implic. Addit. Manuf.," Atlantic Council, Washington, DC, 2011.

[19] H. Watschke, K. Hilbig, and T. Vietor, "Design and Characterization of Electrically Conductive Structures Additively Manufactured by Material Extrusion," Applied Sciences, vol. 9, no. 4, pp. 779, 2019.

[20] P.F. Flowers, C. Reyes, S. Ye, M.J. Kim, B.J. Wiley, "3D printing electronic components and circuits with conductive thermoplastic filament," Addit. Manuf., vol. 18, pp. 156-163, 2017.

[21] D.W. Callister Jr., "Materials Science and Engineering, An Introduction", 5th ed., Wiley, New York, 2000.

[22] K. Chun, D. Hack, I. Medan, M. Rudolf, R. Sidley, "PCB PROTOTYPING," in Santa Clara University, 2016.

[23] Y. Dong, X. Min, and W. S. Kim, "A 3-D-Printed Integrated PCB-Based Electrochemical Sensor System," IEEE Sensors Journal, vol. 18, no. 7, pp. 2959-2966, 2018.

[24] C. Ducas, "Electrical apparatus and method of manufacturing the same," US Patent 1563731, 1925.

[25] Y. Crama, J. van de Klundert, and F.C. Spieksma, "Production planning problems in printed circuit board assembly," Discrete Applied Mathematics, vol. 123, no. 1, pp. 339-361, 2002.

[26] T.F. Carmon, O.Z. Maimon, and E.M. Dar-El, "Group set-up for printed circuit board assembly," The International Journal of Production Research, vol. 27, no. 10, pp. 1795–1810, 1989.

[27] M.W. Jawitz, "Printed Circuit Board Materials Handbook," McGraw Hill Professional, 1997.

[28] J. Vanfleteren, M. Gonzalez, F. Bossuyt, Y.-Y. Hsu, T. Vervust, I. De Wolf, and M. Jablonski," Printed circuit board technology inspired stretchable circuits," MRS Bulletin, vol. 37, no. 3, pp. 254–260, 2012.

[29] A. M. Ɓaez, G. M. Léon, E. G. Doḿınguez, and C. S. Gallardo, "Processing Gerber files for manufacturing printed circuit boards," Procedia Engineering, vol. 35, pp. 240–244, 2012.

[30] V. da Silva, R. D. Oliveira, D. Watts, and E. van der Bij, “An innovative “Chemical Via” process for the production of high density interconnect printed circuit boards," Circuit World, vol. 30, no. 4, pp. 27–33, 2004.

[31] G. Bhaskar, and TT. Narendran, “Grouping PCBs for set-up reduction: a maximum spanning tree approach,” International Journal of Production Research, vol. 34, pp. 621–632, 1996.

[32] K. Alzameli, and D. R. Alwerfalli, "Researches Review of Optimization of Assembly Line of Printed Circuit Board for Improvement," International Journal of Scientific & Engineering Research, vol. 7, no. 6, pp. 755-773, 2016.

[33] M. Salomon, M. M. Solomon, L. N. Van Wassenhove, Y. Dumas, and S. D. Peres, "Solving the discrete lotsizing and scheduling problem with sequence dependent set-up costs and set-up times using the traveling salesman problem with time windows," European Journal of Operational Research, vol. 100, no. 1, pp. 494–513, 1997.

[34] X. Zhu, and W. E. Wilhelm, "Scheduling and lot sizing with sequence-dependent setup: A literature review," IIE Transactions, vol. 38, no. 11, pp. 987–1007, 2006.

[35] P. V. Marsden, “Network data and measurement,” Annu. Rev. Sociol., 1990.

[36] K.J. Lee, B.H. Jun, T.H. Kim, and J. Joung, “Direct synthesis and inkjetting of silver nanocrystals toward printed electronics,” Nanotechnology, vol. 17, pp. 2424-2428, 2006.

[37] K.J. Lee, B.H. Jun, J. Choi, Y.I. Lee, J. Joung, and Y.S. Oh, “Environmentally friendly synthesis of organic-soluble silver nanoparticles for printed electronics,” Nanotechnology, vol. 18, pp. 335601, 2007.

[38] S.F. Jahn, T. Blaudeck, and R.R. Baumann, “Inkjet printing of conductive silver patterns by using the first aqueous particle-free MOD ink without additional stabilizing ligands,” Chemistry of Materials, vol. 22, pp. 3067–3071, 2010.

[39] Y.L. Tai, Z.G. Yang, and Z.D. Li, “A promising approach to conductive patterns with high efficiency for flexible electronics,” Applied Surface Science, vol. 257, pp. 7096–7100, 2011.

[40] S. Jeong, H.C. Song, W.W. Lee, S.S. Lee, Y. Choi, W. Son, E.D. Kim, C.H. Paik, S.H. Oh, and B.H. Ryu, “Stable aqueous based Cu nanoparticle ink for printing welldefined highly conductive features on a plastic substrate,” Langmuir, vol. 27, pp. 3144–3149, 2011.

[41] Y. Akihiro, A. Norzafriza, and Y. Manabu, “Low-temperature synthesis of copper conductive film by thermal decomposition of copper–amine complexes,” Thin Solid Films, vol. 519, pp. 6530-6533, 2011.

[42] J. Vaillancourt, H.Y. Zhang, P. Vasinajindakaw, H.T. Xia, X.J. Lu, X.L. Han, D.C. Janzen, W.S. Shih, C.S. Jones, M. Stroder, M.Y. Chen, H. Subbaraman, R.T. Chen, U. Berger, and M. Renn, "All ink-jet-printed carbon nanotube thin-film transistor on a polyimide substrate with an ultrahigh operating frequency of over 5 GHz," Applied Physics Letters, vol. 93, pp. 243301, 2008.

[43] K. Kordás, T. Mustonen, G. Tóth, H. Jantunen, M. Lajunen, C. Soldano, S. Talapatra, S. Kar, R. Vajtai, and P.M. Ajayan, "Inkjet printing of electrically conductive patterns of carbon nanotubes," Small, vol. 2, pp. 1021–1025, 2006.

[44] M. Pudas, J. Hagberg, and S. Leppävuori, "Gravure offset printing of polymer inks for conductors," Progress in Organic Coatings, vol. 49, pp. 324-335, 2004.

[45] J. Perelaer, C.E. Hendriks, A.W.M. De Laat, and U.S. Schubert, "One-step inkjet printing of conductive silver tracks on polymer substrates," Nanotechnology, vol. 10, pp. 165303, 2009.

[46] T. Casalini, F. Rossi, A. Castrovinci, and G. Perale, "A Perspective on Polylactic Acid-Based Polymers Use for Nanoparticles Synthesis and Applications," Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, vol. 7, pp. 259, 2019.

[47] C. Gutierrez, R. Salas, G. Hernandez, D. Muse, R. Olivas, E. Mac-Donald, M. D Irwin, R. Wicker, K. Churck, M. Newton, and Brian Zufelt, "CubeSat Fabrication through Additive Manufacturing and Micro-Dispensing," Proceedings from the IMAPS Symposium, 2011.

[48] F. Wasserfall, "Embedding of SMD populated circuits into FDM printed objects," in Proceedings of the 26th International Solid Freeform Fabrication Symposium, vol. 26, pp. 180– 189, 2015.

[49] E. De Nava, M. Navarrete, A. Lopes, M. Alawneh, M. Contreras, D. Muse, S. Castillo, E. Macdonald, and R. Wicker, "Three-Dimensional Off-Axis Component Placement and Routing for Electronics Integration using Solid Freeform Fabrication," Proceedings of the 19th International Solid Freeform Fabrication Symposium, pp. 362-369, 2008.

[50] A. J. Lopes, E. MacDonald, and R. B. Wicker, "Integrating stereolithography and direct print technologies for 3D structural electronics fabrication," Rapid Prototyping Journal, vol. 18, pp. 129–143, 2012.

[51] L. Joshua, A. C. Glavan, and S. B. Walker, C. Keplinger, J. A. Lewis, and George M. Whitesides, "Inkjet Printing of Conductive Inks with High Lateral Resolution on Omniphobic 'R F Paper' for Paper-Based Electronics and MEMS," Advanced Materials, vol. 26, no. 27, pp. 4677–4682, 2014.

[52] T. S. Tran, N. K. Dutta, and N. R. Choudhury, "Graphene inks for printed flexible electronics: Graphene dispersions, ink formulations, printing techniques and applications," in Advances in Colloid and Interface Science, vol. 261, pp. 41-61, 2018.

[53] D. Deng, S. Feng, M. Shi, and C. Huang, "In situ preparation of silver nanoparticles decorated graphene conductive ink for inkjet printing," Mater Sci Mater Electron, vol. 28, pp. 15411, 2017.

[54] A. Pekarovicova, and V. Husovska, “3 Printing Ink Formulations,” in Elsevier Inc., 2016.

[55] C. C. Raya, Z. Z. Denchev, S. F. Cruz, and J. C. Viana, “Chemistry of solid metal-based inks and pastes for printed electronics – A review,” in Elsevier, 2019.

[56] S. Joshi, “valuation of silver/graphite ink blends for use in printed electronics,” Kalamazoo:Western Michigan University.,2010.

[57] S. Merilampi, T. L. Ma, and P. Ruuskanen, “The characterization of electrically conductive silver ink patterns on flexible substrates” in Elsevier., Microelectronics Reliability, vol. 49, pp. 782-790, 2009.

[58] P. Kamble, S. Khoje, and J. Lele, “Implementation of Paper PCB using Conductive Ink 2D Plotter”, in IEEE., 2018.

[59] K. H. Church, H. Tsang, R. Rodriguez, P. Defembaugh, and R. Rumpf, “Printed Circuit Structures, the Evolution of Printed Circuit Boards,” in the IPC APEX EXPO Conference, 2013.

[60] S. He, E. Zhang, and J.I Chen. “New Halogen free & Low Loss Material for High Frequency PCB Application,” Microsystems, Packaging, Assembly & Circuits Technology Conference, 2008.

[61] P. Miller, “A tale of four substrates-EMI and thermal comparisons of different PCB materials," Electromagnetic Compatibility international Conference, 1997.

[62] A.R. Ramos, M. Jimenez, "Analytical models for estimating parasitic components in power electronics PCBs," Circuits and Systems, 48th Midwest Symposium, vol. 2, pp. 1235-1238, 2005.

[63] Q. Tang, Y. Wang, C. Christopoulos, "Simulation and Research of the PCB Vias Effects," Natural Computation, vol. 5, pp. 110-114, 2007.

[64] J. Jainschigg, “Just Build It: 3D Fabrication for Every Budget,” Smarter Technology, 2010.

[65] T. Kawase, H. Sirringhaus, R.H. Friend, and T. Shimoda, “Inkjet printed via-hole interconnections and resistors for all-polymer transistor circuits,” Advanced Materials, vol. 13, no. 21, pp. 1601, 2001.

[66] J.B. Szczecha, C.M. Megaridisa, D.R. Gamotaaand, and J. Zhanga, “Manufacture of microelectronic circuitry by drop-on-demand dispensing of nano-particle liquid suspensions,” in MRS Proceedings, 2000.

[67] B.S. Cook, and A. Shamim, “Inkjet printing of novel wideband and high gain antennas on low-cost paper substrate,” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 60, no. 9, 2012.

[68] B.S. Cook, B. Tehrani, J.R. Cooper, S. Kim, and M.M. Tentzeris, “Integrated printing for 2D/3D flexible organic electronic devices”, in Handbook of Flexible Organic Electronics Inkjet-Flex, 2013.

[69] Y. Xu, I. Hennig, D. Freyberg, A. J. Strudwick, M. G. Schwab, T. Weitz, and K. C. Pei Cha, “Inkjet-Printed Energy Storage Device Using Graphene/Polyaniline Inks,” Journal of Power Sources, vol. 248, pp. 483-488, 2014.

[70] O. Ngamna, A. Morrin, A. J. Killard, S. E. Moulton, M. R. Smyth, and G. G. Wallace, "Inkjet printable polyaniline nanoformulations," Langmuir, vol. 23, pp. 8569-8574 2007.

[71] B. Weng, R. Shepherd, J. Chen, and G. G. Wallace, "Gemini surfactant doped polypyrrole nanodispersions: an inkjet printable formulation," J. Mater. Chem., vol. 21, no. 6, pp. 1918-1924, 2011.

[72] H. Feng, B. Wang, L. Tan, N. Chen, N. Wang, and B. Chen, "Polypyrrole/hexadecylpyridinium chloride-modified graphite oxide composites: Fabrication, characterization, and application in supercapacitors," J. Power Sources, vol. 246, pp. 621-628, 2014.

[73] N. Rozlosnik, "New directions in medical biosensors employing poly(3,4-ethylenedioxy thiophene) derivative-based electrodes," Anal. Bioanal. Chem., vol. 395, no. 3, pp. 637-645, 2009.

[74] L. Fan, N. Zhang, and K. Sun, "Flexible patterned micro-electrochemical capacitors based on PEDOT," Chem. Commun., vol. 50, pp. 6789-6792, 2014.

[75] Y. H. Kim, C. Sachse, M. L. Machala, C. May, L. M¨uller-Meskamp, and K. Leo, "Highly Conductive PEDOT: PSS Electrode with Optimized Solvent and Thermal Post-Treatment for ITO-Free Organic Solar Cells," Adv. Funct. Mater., vol. 21, pp. 1076-1081, 2011.

[76] J. Dillon, N. Paparone, and L. Jenison, "Print Liberation: Screen Printing Primer.," North Light Books, 2008.

[77] Y. Kawahara, S. Hodges, B. S. Cook, C. Zhang, and G. D. Abowd, "Instant Inkjet Circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices," In Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, New York, NY, USA, 2013.

[78] M. Wessely, T. Tsandilas, and W. E. Mackay, "Stretchis: Fabricating Highly Stretchable User Interfaces," in Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, New York, NY, USA, 2016

[79] S. Nagels, R. Ramakers, K. Luyten, W. Deferme, "Silicone Devices: A Scalable DIY Approach for Fabricating Self-Contained Multi-Layered Soft Circuits using Microfluidics," Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 2018.

[80] M. Weigel, T. Lu, G. Bailly, A. Oulasvirta, C. Majidi, and J. Steimle, "Skin: Flexible, Stretchable and Visually Customizable On-Body Touch Sensors for Mobile Computing," in Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15), New York, NY, USA, 2015.

[81] R.T. Collins, K. Sambath, M.T. Harris, and O.A. Basaran, "Universal scaling laws for the disintegration of electrified drops," Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol. 110, no. 13, pp. 4905-4910, 2013.

[82] J. U. Park, S. Lee, S. Unarunotai, Y. Sun, S. Dunham, T. Song, P. M. Ferreira, A. G. Alleyene, U. Paik, and J. A. Rogers, "Nanoscale, electrified liquid jets for high-

resolution printing of charge," Department of Materials Science and Engineering, vol. 10, no. 2, pp. 584-591, 2010.

[83] S. Mishra, K.L. Barton, A.G. Alleyne, P.M. Ferreira, and J. A. Rogers, "High-speed and drop-on-demand printing with a pulsed electrohydrodynamic jet," Journal Of Micromechanics and Microengineering, vol. 20, no. 9, 2010.

[84] H.K. Choi, J.U. Park, O.O. Park, P. M. Ferreira, J. G. Georgiadis, and J. A. Rogers, "Scaling laws for jet pulsations associated with high-resolution electrohydrodynamic printing," Applied Physics Letters, vol. 92, no. 12, 2008.

[85] H. T. Yudistira, A. P. Tenggara, V. D. Nguyen, T. T. Kim, F. D. Prasetyo, C. Choi, M. Choi, and D. Byun, "Fabrication of terahertz metamaterial with high refractive index using high-resolution electrohydrodynamic jet printing," Applied Physics Letters, vol. 96, no. 2, 2010.

[86] D.H. Youn, S. H. Kim, Y. S. Yang, S. C. Lim, S. J. Kim, S.H. Ahn, H.S. Sim, S.M. Ryu, D.W. Shin and J. B. Yoo, "Electrohydrodynamic micropatterning of silver ink using near-field electrohydrodynamic jet printing with tilted-outlet nozzle," Applied physics A, vol. 96, pp. 5262-5268, 2009.

[87] J. Yu, S. Kim, and J. Hwang, "Effect of viscosity of silver nanoparticle suspension on conductive line patterned by electrohydrodynamic jet printing," Appl. Phys. A, vol. 89, pp. 157–159, 2007.

[88] A. Abadian, S. S. Manesh, and S. J. Ashtiani, "Hybrid paper-based microfluidics: combination of paper-based analytical device (μPAD) and digital microfluidics (DMF) on a single substrate," Microfluid. Nanofluid, vol. 21, pp. 989-995, 2017.

[89] N. Kurra, and G.U. Kulkarni, "Pencil-on-paper: electronic devices," Lab on a Chip, vol. 13, no. 15, pp. 2866-2873, 2013.

[90] Y. Huang, N. Bu, Y. Duan, Y. Pan, H. Liu, Z. Yin, and Y. Xiong, "Electrohydrodynamic direct-writing," Nanoscale, vol. 5, no. 24, pp. 12007-12017, 2013.

[91] J.U. Park, M. Hardy, S. J. Kang, K. Barton, K. Adair, D.K. Mukhopadhyay, C. Y. Lee, M. S. Strano, A. G. Alleyne, J. G. Georgiadis, P. M. Ferreira, and J. A. Rogers, "High-resolution electrohydrodynamic jet printing," Nat. Mater., vol. 6, no. 10, pp. 782-789, 2007.

[92] S.P. Chen, H.L. Chiu, P.H. Wang, and Y.C. Liao, " Inkjet Printed Conductive Tracks for Printed Electronics, " in ECS Journal of Solid State Science and Technology, vol. 4, no. 4, pp. 3026-3033, 2015.

[93] P. Zoya and P. Branko, "Chapter 20 - The Skin Effect," in Modern Introductory Electromagnetics, New Jersey, Prentice Hall, pp. 382-392, 2000.

[94] W. Contributors, "Wikipedia, The Free Encyclopedia.," 26 August 2014. [Online].Available:http://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect?oldid=622879604. [Accessed 11 October 2014].

[95] Electrical4u, "Skin Effect in Transmission Lines," Electrical4u, 16 July 2010. [Online]. Available: http://www.electrical4u.com/skin-effect-in-transmission-lines/. [Accessed 10 October 2014].

[96] T. R. Kuphaldt, "More on the “skin effect”," in Lessons In Electric Circuits Design Science License, vol. 2, p. 77, 2007.

[97] IET “Labs Inc, Application Note - Skin Effect on Wirea," IET Labs Inc, New York, 2012.

[98] T. R. Pearson, "Methods and Apparatus for Reduction of Skin Effect Losses in Electrical Conductors," Belvidere, IL (US) Patent US 2012/0125651 A1, 2012.

[99] J. Zwinkels, “Light, Electromagnetic Spectrum,” Encyclopedia of Color Science and Technology, pp. 843-849, 2015.

[100] A. Frebel, "A Little Lexicon of Light," in Searching for the Oldest Stars: Ancient Relics From The Early Universe, New Jersey, Princeton University Press, p. 156, 2015.

[101] D. Mihai and E. Strajescu, "From Wavelength to RGB Filter," UPB Scientific Bulletin Series D, vol. 69, no. 2, pp. 77-84, 2007.

[102] M. Loesdau, S. Chabrier, A. Gabillon, “Hue and Saturation in the RGB Color Space,” Image and Signal Processing, vol. 8509, pp. 203–212, 2014.

[103] T. Acharya and A. R. Ray, "RGB to HSV Color Space Transformation," in Image Processing: Principles and Applications, p. 44, 2005.

[104] A. Koschan and M. Abidi, "Detection and Classification of Edges in Color Images," IEEE Signal Processing Magazine, vol. 22, no. 1, pp. 64-73, 2005.

[105] J. Machaj and P. Brida, "Performance Comparison of Similarity Measurements for Database Correlation Localization Method," in Intelligent Information and Database Systems, Daegu, Korea, 2011.

[106] M. O. Ngadi, and L. Liu, “Hyperspectral Image Processing Techniques,” Hyperspectral Imaging for Food Quality Analysis and Control, pp. 99–127, 2010.

[107] T. T. Wohlers, and T. Caffrey, "Wohlers report 2015 : 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report," Fort Collins, Colo: Wohlers Associates, 2015.

[108] W. Li, L. Zhang, C. Wang, X. Li, M. Xu, and G. Zhang, "Dielectric Properties and 3D Printing Fesibility of UV Curable Polymer Composites," IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Athens, Greece, pp. 1-4, 2018.

[109] S. Zakeri, M. Vippola, and E. Levänen, "A comprehensive review of the photopolymerization of ceramic resins used in stereolithography" Additive Manufacturing, vol. 35, pp. 101177, 2020.

[110] V. Basile, M. Grande, V. Marrocco, D. Laneve, S. Petrignani, F. Prudenzano, and I. Fassi, “Design and manufacturing of super-shaped dielectric resonator antennas for 5G applications using stereolithography,” IEEE Access, vol. 8, pp. 82929 - 82937, 2020.

[111] C. C. Kai, L. K. Fai, and L. Chu-Sing, "Rapid Prototyping: Principles and Applications," 2nd Edition on World Scientific.

[112] T. M. Barker, W. J. S. Earwaker, and D. A. Lisle, "Accuracy of stereolithographic models of human anatomy," Australasian Radiology, vol. 38, pp. 106-111, 1994.

[113] J. Li, C. Guo, L. Mao, J. Xiang, G. Huang, and T. Yuan, "Monolithically 3-D Printed Hemispherical Resonator Waveguide Filters with Improved Out-of-Band Rejections," IEEE Access, vol. 6, pp. 57030-57048, 2018.

[114] L. J. Hornbeck, "Keynote 3: DLP Technology: Extreme Versatility," in 23rd International Conference on VLSI Design, 2010.

[115] Romli, D. Seprianto, D.P. Putra, Zamheri and M. Rasid, "The Effect of Parameters on the Process of Making Objects with Rapid Prototyping Digital Light Processing Technology on the Bending Stress," Journal of Physics Conference Series, 2019.

[116] V. K. Jaiswal, "Vishal Kumar Jaiswal" United International Journal for Research & Technology, vol. 2, no. 1, 2020.

[117] D.E. Düzgün, K. Nadolny, "Continuous liquid interface production (CLIP) metot for rapid prototyping," Journal of Mechanical and Energy Engineering, vol. 42, No. 1, pp. 5-12, 2018.

[118] J. W. Stansbury, and M. J. Idacavage, "3D Printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities," Dental Materials, vol. 32, pp. 54-64, 2016.

[119] L. Y. Yee, S.E.T. Yong, K.J.T. Heang, K.P. Zheng, Y. L. Xue, Y. Y. Wai, C. H. T. Siang, and L. Augustinus, "3D Printed Bio-models for Medical Applications," Rapid Prototyping Journal, vol. 23, no. 2, pp. 227-235, 2017.

[120] Y. L. Yap, Wang, S. L. Sing, V. Dikshit, W. Y. Yeong, and J. Wei, "Material jetting additive manufacturing: An experimental study using designed metrological benchmarks," Precision Engineering, vol. 50, pp. 275–285, 2017.

[121] N. S. M. El-Tayeb, "Development and characterisation of low-cost polymeric composite materials," Materials and Design, vol. 30, no. 4, pp. 1151-1160, 2009.

[122] L. Ze-Xian, T.C. Yen, M. R. Ray, D. Mattia, I.S. Metcalfe, and D. A. Patterson, "Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques," Journal of Membrane Science, Vol 523, No.1, pp. 596-613, 2016.

[123] M. Ziaee, and N. B. Crane, "Binder Jetting: A Review of Process, Materials, and Metots," Additive Manufacturing, vol. 28, pp. 781-801, 2019.

[124] E. Sachs, M. Cima, P. Williams, D. Brancazio, and J. Cornie, "Three-dimensional printing: rapid tooling and prototypes directly from a CAD model," J. Inst. Eng., vol. 114, pp. 481–488, 1992.

[125] N.-T. Nguyen, "MEMS-Micropumps: A Review," American Society of Mechanical Engineers, vol. 124, pp. 384, 2002.

[126] N. Shahrubudin, T. C. Lee, and R. Ramlan, "An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications," Procedia Manufacturing, vol. 35, pp. 1286–1296, 2019.

[127] A. M. T. Syed, P. K. Elias, B. Amit, B. Susmita, O. Lisa, and C. Charitidis, "Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities," Materials Today, vol. 1, pp. 1-16, 2017.

[128] S. Vikayavenkataraman, Y.H.F. Jerry, and F.L. Wen, "3D Printing and 3D Bioprinting in Pediatrics," Bioengineering, vol. 4, no. 63, pp. 1-11, 2017.

[129] "Wohler Report:3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry," Annual Worldwide Progress Report, pp. 18-182, 2015.

[130] S.K. Tiwari, S. Pande, S. Agrawal, and S. M. Bobade, "Selection of selective laser sintering materials for different applications," Rapid Prototyping Journal, vol. 21, No. 6, pp. 630-648, 2015.

[131] C. L. Ventola, "Medical Application for 3D Printing: Current and Projected Uses," Medical Devices, vol. 39, no.10, pp. 1-8, 2014.

[132] J. Griffey, "The types of 3-D printing," Library Technology Reports, vol. 50, pp. 8-12, 2014.

[133] I. Paoletti, and L. Ceccon, "The Evolution of 3D Printing in AEC: From Experimental to Consolidated Techniques," 3D Printing on Chapter 3rd, 2018.

[134] T. Grünberger, and R. Domröse, "Optical in-process monitoring of direct metal laser sintering (DMLS)," Laser Tech. J., vol. 11, no. 2, pp. 40-42, 2014.

[135] J. Nandy, H. Sarangi, and S. Sahoo, "A Review on Direct Metal Laser Sintering: Process Features and Microstructure Modeling," Lasers in Manufacturing and Materials Processing, vol. 6, no. 3, pp. 280-316, 2019.

[136] M. W. Khaing, J. Y. Fuh, and L. Lu, "Direct metal laser sintering for rapid tooling: processing and characterisation of EOS parts," J. Mater. Process. Technol., vol. 113, no. 1, pp. 269–272, 2001.

[137] M. Rombouts, J.P. Kruth, L. Froyen, and P. Mercelis, "Fundamentals of selective laser melting of alloyed steel powders," Manufact. Technol., vol. 55, pp. 187–92, 2006.

[138] T. Vilaro, V. K. Rexerodt, M. Thomas, C. Colin, P. Bertrand, L. Thivillon, S. Abed, V. Ji, P. Aubry, P. Peyre, and T. Malot, "Direct Fabrication of a Ti-47Al-2Cr-2Nb Alloy by Selective Laser Melting and Direct Metal Deposition Processes," Advanced Materials Research, vol. 89, pp. 586-591, 2010.

[139] T. Vilaro, C. Colin, and J.D. Bartout, "As-fabricated and heat-treated microstructures of the Ti–6Al–4V alloy processed by selective laser melting," Metall. Mater. Trans., vol. 42A, no. 10, pp. 3190-3199, 2011.

[140] L. Facchini, E. Magalini, P. Robotti, A. Molinari, S. Hoges, and K. Wissenbach, "Ductility of a Ti–6Al–4V alloy produced by selective laser melting of prealloyed powders," Rapid Prototyp. J., vol. 16, pp. 450–459, 2010.

[141] K.A. Mumtaz, and N. Hopkinson, "Selective laser melting of thin wall parts using pulse shaping," J. Mater. Process. Technol., vol. 210, pp. 279-287, 2010.

[142] D.D. Gu, Y.C. Hagedorn, W. Meiners, G.B. Meng, R.J.S. Batista, K. Wissenbach, and R. Poprawe, "Densification behavior, microstructure evolution, and wear performance of selective laser melting processed commercially pure titanium," Acta Mater., vol. 60, pp. 3849–3860, 2012.

[143] H. Attar, K.G. Prashanth, A.K. Chaubey, M. Calin, L.C. Zhang, S. Scudino, and J. Eckert, "Comparison of wear properties of commercially pure titanium prepared by selective laser melting and casting processes," Mater. Lett., vol. 142, pp. 38-41, 2015.

[144] G. Kasperovich, J. Haubrich, J. Gussone, and G. Requena, "Correlation between porosity and processing parameters in TiAl6V4 produced by selective laser melting," Materials and Design, vol. 105, pp. 160-170, 2016.

[145] X. Gong, T. Anderson, and K. Chou, "Review on powder-based electron beam additive manufacturing technology," Manuf. Rev., vol. 1, no. 2, pp. 507-515, 2014.

[146] C. Körner, "Additive manufacturing of metallic components by selective electron beam melting : a review," International Materials Reviews, vol. 61, no. 5, pp. 361-377, 2015.

[147] L. M. S. Kolbus, E. A. Payzant, P. A. Cornwell, T. R. Watkins, S. S. Babu, R. R. Dehoff, M. Lorenz, O. Ovchinnikova, and C. Duty, "Comparison of Residual Stresses in Inconel 718 Simple Parts Made by Electron Beam Melting and Direct Laser Metal Sintering," Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci., vol. 46, pp. 1419-1432, 2015.

[148] A. Dass, and A. Moridi, "State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design," Coatings, vol. 9, no. 7, 2019.

[149] S. Liu, Y. Zhang, and R. Kovacevic, "Numerical simulation and experimental study of powder flow distribution in high power direct diode laser cladding process," Lasers Manuf. Mater. Process., vol. 2, pp. 199-218, 2015.

[150] A. J. Pinkerton, W.U.L. Haq Syed, and L. Li, "An experimental and theoretical investigation of combined gas- and water-atomized powder deposition with a diode laser," J. Laser Appl., vol. 18, pp. 73-80, 2006.

[151] Y. C. Shin, N. Bailey, C. Katinas, and W. Tan, "Predictive modeling capabilities from incident powder and laser to mechanical properties for laser directed energy deposition," Comput. Mech., vol. 61, no. 5, pp. 617-636, 2018.

[152] A. Saboori, A. Aversa, G. Marchese, S. Biamino, M. Lombardi, and P. Fino, "Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair," Applied Sciences, vol. 9, no. 16, 2019.

[153] J. O. Milewski, "Lasers, Electron Beams, Plasma Arcs," Springer Series in Materials Science, pp. 85–97, 2017.

[154] O. S. Carneiro, A. F. Silva, and R. Gomes, "Fused deposition modeling with polypropylene," Materials and Design, vol. 83, pp. 768-776, 2015.

[155] Z. Weng, J. Wang, T. Senthil, and L. Wu, "Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing," Materials and Design, vol. 102, pp. 276-283, 2016.

[156] R. Kumar, R. Singh, I. Farina, "On the 3D printing of recycled ABS, PLA and HIPS thermoplastics for structural applications," PSU Research Review, vol.2, no. 2, pp. 115-137, 2018.

[157] A. D. Squires, R. A. Lewis, "Feasibility and Characterization of Common and Exotic Filaments for Use in 3D Printed Terahertz Devices," Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, vol. 39, no. 7, pp. 614-635, 2018.

[158] H. Ren, Y. Zhang, H. Zhai, and J. Chen, "Production and evaluation of biodegradable composites based on polyhydroxybutyrate and polylactic acid reinforced with short and long pulp fibers," vol. 49, pp. 641-652, 2015.

[159] İnternet: Üç Boyutlu Yazıcı Malzemeleri, "3D Filament", www.makergeeks.com (2014).

[160] İnternet: Üç Boyutlu Yazıcı Malzemeleri, "3D Filament", www.esun3d.net (2014).

[161] D. Çelik, and K. Çetinkaya, "Üç Boyutlu Yazıcı Tasarımları, Prototipleri ve Ürün Yazdırma Karşılaştırmaları," Journal of Advanced Technology Sciences, vol. 5, no. 2, pp. 151-163.

[162] M. A. Salim, Z. H. Termiti, and A. M. Saad, "Mechanical Properties on ABS/PLA Materials for Geospatial Imaging Printed Product using 3D Printer Technology," Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2019.

[163] P. S. Amphorn, C. Abeykoon, A. Fernando, "Optimization of Fused Deposition Modeling Parameters for Improved PLA and ABS 3D Printed Structures," International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, vol. 3, pp. 284-297,2020.

[164] "3D Printer Safety," Concordia University.

[165] S. Olivera, H. B. Muralidhara, K. Venkatesh, K. Gopalakrishna, C. S. Vivek, "Plating on acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) plastic: a review," Journal of Materials Science, vol. 51, no. 8, pp. 3657–3674, 2016.

[166] M. Singhvia, and D. Gokhale, "Biomass to biodegradable polymer (PLA)," RSC Advances, no. 3, pp. 13558-13568, 2013.

[167] D. R. Perinelli, M. Cespi, G. Bonacucina, and G. F. Palmieri, "PEGylated polylactide (PLA) and poly (lactic-co-glycolic acid) (PLGA) copolymers for the design of drug delivery systems," J. Pharm. Investig., vol. 49, pp. 443-458, 2019.

[168] L. T. Sin, and B. S. Tueen, "Injection Molding and Three-Dimensional Printing of Poly (Lactic Acid)," Polylactic Acid, pp. 325–345, 2019.

[169] M. Murariu, and P. Dubois, "PLA composites: From production to properties," Advanced Drug Delivery Reviews, vol. 107, pp.17-46, 2016.

[170] M. A. Azad, D. Olawuni, G. Kimbell, A. Z. M. Badruddoza, M. S. Hossain, and T. Sultana, "Polymers for Extrusion-Based 3D Printing of Pharmaceuticals: A Holistic Materials–Process Perspective," pharmaceutics: Review, 2020.

[171] M. Angjellari, E. Tamburri, L. Montaina, M. Natali, D. Passeri, M. Rossi, and M. Terranova, “Beyond the concepts of nanocomposite and 3D printing: PVA and nanodiamonds for layer-by-layer additive manufacturing,” Materials and Design, vol. 119, pp.12-21, 2017.

[172] G. H. Loh, E. Pei, D. Harrison, and M.D. Monzón, "An Overview of Functionally Graded additive manufacturing," Additive Manufacturing, vol. 23, pp. 34-44, 2018.

[173] C. Buchanan, and L. Gardner, "Metal 3D printing in construction: A review of metots, research, applications, opportunities and challenges," Engineering Structure, vol. 180, pp. 332–348, 2019.

[174] D.J. Horst, C.A. Duvoisin, and R.A. Viera, “Additive manufacturing at Industry 4.0: a review,” International Journal of Engineering and Technical Research, vol. 8, no. 8, pp. 1-8, 2018.

[175] M. R. Skorski, J. M. Esenther, Z. Ahmed, A. E. Miller, and M. R.Hartings, "The chemical, mechanical, and physical properties of 3D printed Materials composed of TiO2-ABS nanocomposites," Science and Technology of Advanced Materials, vol. 17, no. 1, pp. 89–97, 2016.

[176] J.H. Martin, B. D. Yahata, J. M. Hundley, J. A. Mayer, T. A. Schaedler, and T. M. Pollock, “3D Printing of high-strength aluminium alloys,” Nature, vol. 549, no. 7672, pp. 356-369, 2017.

[177] L. Hitzler, F. A. Segbaya, P. William, B. Heine, M. Heitzmann, W. Hall, M. Merkel, and A. Ochner, “Additive manufacturing of cobalt based dental alloys: analysis of microstructure and physicomechanical properties,” Advances in Materials Science and Engineering, vol. 8, pp. 1-12, 2018.

[178] L. E. Murr, “Frontiers of 3D Printing/Additive Manufacturing: from Human Organs to Aircraft Fabrication,” Journal of Materials Sciences and Technology, vol. 3, no. 10, pp. 987-995, 2016.

[179] T. DebRoy, H. L. Wei, J. S. Zuback, T. Mukherjee, J. W. Elmer, J. O. Milewski, A. M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, and W. Zhang, “Additive manufacturing of metallic components-Process, structure and properties,” Progress in Materials Science, vol. 92, pp. 112-224, 2018.

[180] E. Uhlmann, R. Kersting, T. B. Klein, M. F. Cruz, and A. V. Borille, “Additive manufacturing of titanium alloy for aircraft components,” Procedia CIRP, vol. 35, pp. 55-60, 2015.

[181] F. Trevisan, F. Calignano, A. Aversa, G. Marchese, M. Lombardi, S. Biamino, D. Ugues, and D. Manfredi, “Additive manufacturing of titanium alloys in the biomedical field: processes, properties and applications,” Journals Indexing and Metrics, vol. 16, no. 2, 2018.

[182] J. Ni, H. Ling, S. Zhang, Z. Wang, Z. Peng, C. Benyshek, R. Zan, A.K. Miri, Z. Li, X. Zhang, J. Lee, K.-J. Lee, H.-J. Kim, P. Tebon, T. Hoffman, M.R. Dokmeci, N. Ashammakhi, X. Li, and A. Khademhosseini, “Three-dimensional printing of metals for biomedical applications,” Materials Today Bio, vol. 3, pp. 100024, 2019.

[183] J. Najmon, S. Raeisi, and A. Tovar, "Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry," Additive Manufacturing for the Aerospace Industry, pp. 7–31, 2019.

[184] S. C. Joshi, and A. A. Sheikh, "3D printing in aerospace and its long-term sustainability," Virtual and Physical Prototyping, vol. 10, no. 4, pp. 175–185, 2015.

[185] E. Uhlmann, R. Kersting, T. B. Klein, M. F. Cruz, and A. V. Borille, "Additive Manufacturing of Titanium Alloy for Aircraft Components," Procedia CIRP, vol. 35, pp. 55–60, 2015.

[186] M. A. Caminero, J. M. Chacon, I. Garcia-Moreno, and G. P. Rodriguez, "Impact damage resistance of 3D printed continues fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling," Composite Part B: Engineering, vol. 148, pp. 93-103, 2018.

[187] E. Iunolainen, "Suitability of recycled PP for 3D printing filament," Degree Thesis Plastics Technology, 2017.

[188] J. R.C. Dizon, A. H. E. Jr, Q. Chen, and R. C. Advincula, "Mechanical characterization of 3d-printed polymers," Additive Manufacturing, vol. 20, pp. 44-67, 2018.

[189] W. Xin, J. Man, Z. Zuowan, G. Jihua, and H. David, "3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective," Composites Part B, vol. 110, pp. 442-458, 2017.

[190] R. Zamborsky, M. Kilian, P. Jacko, M. Bernadic, and R. Hudak, "Perspectives of 3D printing technology in orthopaedic surgery," Bratislava Medical Journal, vol. 120, no. 7, pp. 498–504, 2019.

[191] F. Baldassarre, and F. Ricciardi, "The Additive Manufacturing in the Industry 4.0 Era: The Case of an Italian FabLab," Journal of Emerging Trends in Marketing and Management, vol. 1, No.1, pp. 1-11, 2017.

[192] D. Owen, J. Hickey, A. Cusson, O. I. Ayeni, J. Rhoades, D. Yifan, W. Limmin, P. Hye-Yeong, H. Nishant, P. P. Raikar, Yeon-Gil, and Z. Jing, "3D printing of ceramic components using a customized 3D ceramic printer," Progress in Additive Manufacturing, vol 1, pp. 1-7, 2018.

[193] A. Zocca, P. Lima, and J. Günster, "LSD-based 3D printing of alumina ceramics," Journal of Ceramic Science and Technology, vol. 8, No. 1, pp. 141-148, 2017.

[194] R. Gmeiner, U. Deisinger, J. Schonherr, and B. Lenchner, "Additive manufacturing of bioactive glasses and silicate bioceramics," Journal of Ceramics Science and Technology, vol. 6, No. 2, pp. 75-86, 2015.

[195] T. Lanko, S. Panov, O. Sushchyns'ky, M. Pylypenko, and O. Dmytrenko, "Zirconium Alloy Powders for manufacture of 3D printed particles used in nuclear power industry," Problems of Atomic Science and Technology, vol. 1, No. 113, pp. 148-153, 2018.

[196] T. Xueyuan, and Y. Yuxi, "Electrospinning preparation and characterization of alumina nanofibers with high aspect ratio," Ceramics International, vol. 41, No. 8, pp. 9232–9238, 2017.

[197] W. Haoa, Y. Liua, H. Zhouc, H. Chenb, and D. Fangb, “Preparation and characterization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermosetting composite,” Polymer Testing, vol. 65, pp. 29–34, 2018.

[198] R. Gmeiner, G. Mitteramskogler, J. Stampfl, and A. R. Boccaccini, "Stereolithographic Ceramic Manufacturing of High Strength Bioactive Glass," International Journal of Applied Ceramic Technology, vol. 12, no. 1, pp. 38–45, 2014.

[199] J.P.H. Williamson, "Zircon," Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials, 2012.

[200] T. P. Sathishkumar, S. Satheeshkumar, and J. Naveen, “Glass fiber-reinforced polymer composites – a review,” Journal of Reinforced Plastics and Composites, vol. 33, no.13, pp. 1-14, 2014.

[201] Z. S. Toor, "Space Applications of Composite Materials," Journal of Space Technology, vol. 8, no. 1, 2018.

[202] I. Blanco, "The Use of Composite Materials in 3D Printing," Journal of Composites Science, vol. 4, no. 42, 2020.

[203] Z. Liu, L. Zhang, E. Yu, Z. Ying, Y. Zhang, X. Liu, and W. Eli, “Modification of Glass Fiber Surface and Glass Fiber Reinforced Polymer Composites Challenges and Opportunities: From Organic Chemistry Perspective,” Current Organic Chemistry, vol. 19, no.11, pp. 991-1010, 2015.

[204] L. J. Yuan, A. Jia, and K. C. Chee, “Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials,” Applied materials today, vol 7, pp. 120-133, 2017.

[205] H. J. Van, “Additive manufacturing of shape memory alloy,” Shape memory and superelasticity, vol. 4, no. 2, pp. 309-312, 2018.

[206] Y. Yang, Y. Chen, Y. Wei, and Y. Li, “3D Printing of shape memory polymer for functional part fabrication,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 84, no. 9, pp. 2079-2095, 2015.

[207] M. Zainal, S. Sahlan, and M. Ali, "Micromachined Shape-Memory-Alloy Microactuators and Their Application in Biomedical Devices," Micromachines, vol. 6, no. 7, pp. 879–901, 2015.

[208] B.-Q. Li, Z. Li, P. Bai, B. Liu, and Z. Kuai, "Research on Surface Roughness of AlSi10Mg Parts Fabricated by Laser Powder Bed Fusion," Metals, vol. 8, no. 7, 2018.

[209] L. Lili, M. Yuanyuan, C. Ke, and Z. Yang, “3D Printing Complex Egg White Protein Objects: Properties and Optimization,” Food and Bioprocess Technology, vol. 1, pp 1-11, 2018.

[210] P. Singh, and A. Raghav, “3D Food Printing: A Revolution in Food Technology,” Acta Scientific Nutritional Health, vol. 2, no.2, pp. 1-2, 2018.

[211] A. Goulas, and R. J. Friel, “3D printing with moondust,” Rapid Prototyping Journal, vol. 22, no. 6, pp. 864-870, 2016.

[212] M. D. Ugur, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, “The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0,” Procedia Manufacturing, vol. 11, pp. 545-554, 2017.

[213] L. A. Verhoef, B. W. Budde, C. Chockalingam, B. García Nodar, and A. J. M. V. Wijk, "The effect of additive manufacturing on global energy demand: An assessment using a bottom-up approach," Energy Policy, vol. 112, pp. 349–360, 2018.

[214] W. Yu-Cheng, C. Toly, and Y. Yung-Lan, “Advanced 3D printing technologies for the aircraft industry: a fuzzy systematic approach for assessing the critical factors,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 3, no. 3, pp. 1-10, 2018.

[215] A. Uriondo, M. E. Miguez, and S. Perinpanayagam, “The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects,” Journal of Aerospace Engineering, vol. 229, no.11, pp. 1-14, 2015.

[216] V. Sreehitha, “Impact of 3D printing in automotive industry,” International Jurnal of Mechanical and Production Engineering, vol. 5, no. 2, pp. 91-94, 2017.

[217] M. Petch, “Audi gives update on use of SLM metal 3D printing for the automotive industry,” 3D Printing Industry, 2018.

[218] R. Maghnani, “An Exploratory Study: The impact of Additive Manufacturing on the Automobile Industry,” International Journal of Current Engineering and Technology, vol. 5, no. 5, pp. 1-4, 2015.

[219] I. Dankar, M. Pujola, F. E. Omar, F. Sepulcre, and A. Haddarah, “Impact of Mechanical and Microstructural Properties of Potato Puree-Food Additive Complexes on Extrusion-Based 3D Printing,” Food and Bioprocess Technology, vol. 1, pp. 1-11, 2018.

[220] J. Sun, W. Zhou, L. Yan, D. Huang, and L. Lin, "Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control," Journal of Food Engineering, vol. 220, pp. 1–11, 2018.

[221] Z. Liu, M. Zhang, B. Bhandari, and Y. Wang, “3D printing: Printing precision and application in food sector,” Trends in Food Science & Technology, vol. 2, no 1, pp. 1-36, 2017.

[222] T. Rayna, and L. Striukova, "From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation," Technological Forecasting and Social Change, vol. 102, pp. 214–224, 2016.

[223] D. Pai, “3D-Printing skin is real: Here’s what you need to know,” Allure News. 2017.

[224] J. Norman, R.D. Madurawe, C. M. V. Moore, M. A. Khan, and A. Khairuzzaman, “A new chapter in pharmaceutical manufacturing: 3D Printed drug products,” Advance Drug Delivery Review, vol. 108, pp. 39-50, 2018.

[225] A. D. Mori, M. P. Fernández, G. Blunn, G. Tozzi, and M. Roldo, “3D Printing and Electrospinning of Composite Hydrogels for Cartilage and Bone Tissue Engineering,” Polymers, vol. 10, no. 285, pp. 1-26, 2018.

[226] L. Yigong, Q. Hamid, J. Snyder, W. Chengyang, and S. Wei, “Evaluating fabrication feasibility and biomedical application potential of in situ 3D printing technology,” Rapid Prototyping Journal, vol. 22, no. 6, pp. 947 – 955, 2016.

[227] S. Knowlton, S. Onal, Yu, H. S. Chu, J. Zhao, and S. Tasoglu, “Bioprinting for cancer research,” Trends in biotechnology, vol. 133, no.9, pp. 504-513, 2015.

[228] Y. Qian, D. Hanhua, S. Jin, H. Jianhua, S. Bo, W. Qingsong, and S. Yusheng, “A Review of 3D Printing Technology for Medical Applications,” Engineering, vol. 4, no. 5, pp. 729-742, 2018.

[229] W. Jamróz, J. Szafraniec, M. Kurek, and R. Jachowicz, "3D Printing in Pharmaceutical and Medical Applications – Recent Achievements and Challenges," Pharmaceutical Research, vol. 35, no. 9, 2018.

[230] R. Bogue, “3D printing: the dawn of a new era in manufacturing,” Assembly Automation, vol. 33, no. 4, pp. 307-311, 2013.

[231] W. Kang, M. S. Sampaio, E. Huang, S. Bunnapradist, “Association of pretransplant skin cancer with posttransplant malignancy, graft failure and death in kidney transplant recipients,” Transplantation, vol. 101, no. 6, 2017.

[232] K. J. Shah, J. C. Peterson, and R. Chamoun, "3D Printed Models in Neurosurgical Training," Comprehensive Healthcare Simulation, pp. 47–64, 2018.

[233] S.H. Ghaffar, J. Corker, and M. Fan, "Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution," Automation in Construction, vol. 93, pp. 1–11, 2018.

[234] M. Yossef, and A. Chen, "Applicability and Limitations of 3D Printing for Civil Structures," Civil, Construction and Environmental Engineering Conference Presentations and Proceedings, vol. 35, 2015.

[235] M. A. Hossain, A. Zhumabekova, S. C. Paul, and J. R. Kim, "A Review of 3D Printing in Construction and its Impact on the Labor Market," Sustainability, vol. 12, no. 20, 2020.

[236] R. Volk, J. Stengel, and F. Schultmann, "Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs," Automation in Construction, vol. 38, pp. 109–127, 2014.

[237] M. Sakin, and Y. C. Kiroglu, “3D printing of buildinga: construction of the sustainable houses of the future by BIM,” Energy Procedia, vol. 134, pp. 702-711, 2017.

[238] I. Hager, A. Golonka, and R. Putanowicz, “3D printing of building components as the future of sustainable construction,” Procedia Engineering, vol. 151, pp. 292-299, 2016.

[239] S. L. Leonard, "Evaluating 3-D Printing with Concrete at The Alachua County Public Defender’s Office in Gainesville, Fl," University of Florida, 2017.

[240] Tess, “Indian jewelry brand Isharya unveils ‘Infinite Petals’ 3D printer jewelry collection,” 3D Printer and 3D Printing News, 2017.

[241] L. Gaget, “3D printed clothes: Top 7 of the best projects,” Sculpteo, 2018.

[242] Z. Chen, "The Influence of 3D Printing on Global Container Multimodal Transport System," Complexity, pp. 1-19, 2017.

[243] S. Horaczek, “Nike hacked a 3D printer to make its new shoe for elite marathon runners,” Popular Sciences, 2018.

[244] A. Richardot, “3D printed fashion: Why is additive manufacturing interesting for fashion,” Sculpteo, 2018.

[245] A. Vanderploeg, S. E. Lee, and M. Mamp, “The application of 3D printing technology in the fashion industry,” International Journal of Fashion Design, Technology and Education, vol. 10, no. 2, pp. 170-179, 2017.

[246] M. Attaran, “The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing,” Business horizon, vol. 1, pp. 1-12, 2017.

[247] H. Yang, W. R. Leow, X. Chen, "3D Printing of Flexible Electronic Devices," small metots, vol. 2, no. 1, 2018.

[248] L. Jeongwoo, K. H. Chan, C. J. Won, and H. L. A. In, “A review on 3D printed smart devices for 4D printing,” International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, vol. 4, no. 3, pp. 373-383, 2018.

[249] Y. F. Chuan, N. L. Hong, M. A. Mahdi, M. H. Wahid, and M. H. Nay, “Three-Dimensional Printed Electrode and Its Novel Applications in Electronic Devices,” Scientific Report, vol. 1, pp. 1-11, 2018.

[250] N. Saengchairat, T. Tran, and C. C. Kai, “A review: additive manufacturing for active electronic components,” Virtual and Physical Prototyping, vol. 12, no. 1, pp. 1-16, 2016.

[251] K. Ni, Y. Liu, Z. Mei, T. Wu, Y. Hu, H. Wen, and Y. Wang, "Electrical and Electronic Technologies in More-Electric Aircraft: A Review," IEEE Access, vol. 7, pp. 76145 - 76166, 2019.

[252] A. Toprak and A. R. Boynuegri, "Printed Circuit Board Rapid Prototyping with Three-Dimensional Printer," 2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Istanbul, Turkey, 2020, pp. 1-7.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Printed Circuit Board Rapid Prototyping with Three-Dimensional Printer (2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)-IEEE, 17 November, 2020, İSTANBUL).