TERMOPLASTİK GRANÜL EKSTRÜZYONU ESASLI PİEZOKOMPOZİT ALGILAYICLAR ÜRETİMİ İÇİN YENİ BİR 3B YAZICI TASARIMI, PROTOTİP ÜRETİMİ VE PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Sertaç MALKOÇ

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERMOPLASTİK GRANÜL EKSTRÜZYONU ESASLI PİEZOKOMPOZİT ALGILAYICILAR ÜRETİMİ İÇİN YENİ BİR 3B YAZICI TASARIMI, PROTOTİP ÜRETİMİ VE PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Sertaç MALKOÇ
ORCID No: 0000-0002-3052-0547

Prof. Dr. Murat YAZICI

(Danışman)
ORCID No: 0000-0002-8720-7594

YÜKSEK LİSANS

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2020

TEZ ONAYI

Sertaç MALKOÇ tarafından hazırlanan "TERMOPLASTİK GRANÜL EKSTRÜZYONU ESASLI PİEZOKOMPOZİT ALGILIYICILAR ÜRETİMİ İÇİN YENİ BİR 3B YAZICI TASARIMI, PROTOTİP ÜRETİMİ VE PERFORMANSININ İNCELENMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Murat YAZICI
ORCID No: 0000-0002-8720-7594

Başkan : Prof. Dr. Murat YAZICI
ORCID No: 0000-0002-8720-7594
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı
İmza

Üye : Dr.Öğr.Üyesi. Erol SOLMAZ
ORCID No: 0000-0001-9369-3552
Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı
İmza

Üye : Dr.Öğr.Üyesi. Yalçın BOZTOPRAK
ORCID No: 0000-0003-1714-7394
Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü
../../....

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

29./01./2020

Sertaç MALKOÇ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TERMOPLASTIK GRANÜL EKSTRÜZYONU ESASLI PİEZOKOMPOZİT ALGILAYICILAR ÜRETİMİ İÇİN YENİ BİR 3B YAZICI TASARIMI, PROTOTİP ÜRETİMİ VE PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Sertaç MALKOÇ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat YAZICI

Son yıllarda gelişen katmanlı imalat teknikleri ile üretim yapan makinelerin yaygınlaşması, tasarım ve üretim maliyetlerini düşürmesi, araştırmaların 3B yazıcılar üzerine yoğunlaşmasına sebep olmuştur. Bu tez kapsamında termoplastik granül esaslı piezokompozit algılayıcılar üretmek için yeni bir 3B yazıcı üzerinde çalışılmıştır. Tez çalışmaları kapsamında eriyik yığma modelleme tekniği (FDM) kullanılarak 3B yazıcı ve modüler granül ekstrüder tasarlanıp prototip imalatı yapılmıştır. Üretilen prototip üzerinde kalibrasyon yapılarak, polarizayon işlemi sonrası piezoelektrik özellik gösteren polivinilidenflorit (PVDF) malzeme ile baskı denemeleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ekstrüzyon, 3B yazıcı, Granül, Piezokompozit, Algılayıcı, PVDF
2020, ix + 62 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

A NOVEL 3D PRINTER DESIGN, PROTOTYPE MANUFACTURING AND MEASUREMENT OF THE PERFORMANCE BASED ON THERMOPLASTIC PELLET EXTRUSION FOR PIEZOCOMPOSITE SENSORS

Sertaç MALKOÇ

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Murat YAZICI

Recently, addtivive manufacturing techniques are devoloping and lower the design and production costs and time. Researchers are focusing on additive manufacturing techniques due opportunities additive manufacturing techniques present. In this thesis, a new 3D printer has been studied to produce piezocomposite sensors based on thermoplastic granules. Fused deposition modeling tecqnique based 3D printer and modular granule extruder were designed and prototype were produced. Prototype extruder was calibrated to print polyvinylidene fluoride (PVDF) which has piezoelectric properties after poling process.

Key words: Extrusion, 3D printer, Granule, Piezocomposite, Sensor, PVDF
2020, ix + 62 pages.

TEŞEKKÜR

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan, hiçbir zaman maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme, yüksek lisans eğitimim süresince bana yol gösteren, akademik olarak yetişmemde her türlü katkıyı gösteren hocam Prof. Dr. Murat YAZICI'ya teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca bu çalışma süresince vermiş olduğu destek ve göstermiş olduğu sonsuz anlayış için araştırma görevlisi Sn. Harun GÜÇLÜ'ye, Sn. Mahor Muniz Cadenas'a, Sn. Kenan Loyan'a teşekkürlerimi sunarım.

Sertaç MALKOÇ
…/…/…….

İÇİNDEKİLER

Sayfa
ÖZET....i
ABSTRACT....ii
TEŞEKKÜR....iii
İÇİNDEKİLER....iv
KISALTMALAR DİZİNİ....vi
ŞEKİLLER DİZİNİ....vii
ÇİZELGELER DİZİNİ....ix
1. GİRİŞ....1
2. KURAMSAL TEMELLER....2
2.1. 3B Yazıcıların Tarihi....2
2.2. 3B Yazıcı Çeşitleri....4
2.2.1. Fotopolimerizasyon....6
2.2.2. Malzeme ekstrüzyon....7
2.2.3. Malzeme püskürtme....8
2.2.4. Yapıştırıcı ile katmanlı imalat....9
2.2.5. Toz yataklı eritme....10
2.2.6. Direkt enerji depolama....11
2.2.7. Levha/sac laminasyon metodu....12
2.3. Katmanlı İmalat Tekniklerinde Kullanılan Malzemeler....13
2.3.1. Polimerler....13
2.3.2. Metaller....14
2.3.3. Seramikler....14
2.4. 3B Yazıcı Kullanım Alanları....15
2.4.1. Otomotiv....15
2.4.2. Uzay....17
2.4.3. Sağlık....17
2.4.4. Mühendislik....18
2.4.5. Havacılık....18
2.4.6. Endüstriyel kalıp....19
2.4.7. Eğitim....19
2.5. Granül Ekstrüzyonu....20
2.6. Piezoelektriğin Tarihçesi....22
2.7. Dielektrik Malzemeler....24
2.7.1. Dielektrik sabiti (K)....25
2.7.2. Küri sıcaklığı....26
2.7.3. Dipol momenti....27
2.7.4. Polarizasyon (Kutuplanma)....28
2.7.5. Histerizis Çevrimi....29
2.8. Piezoelektrik Etki....30
2.9. Piezoelektrik Malzemeler....31
2.9.1. Piezoelektrik kristaller....31
2.9.2. Piezoelektrik seramikler....32
2.9.3. Piezoelektrik polimerler....33
2.9.4. Piezoelektrik kompozitler....38
2.10. Piezoelektrik Malzemelerin Kullanım Alanları....39

2.10.1. Piezoelektrik jeneratörler (Üreteçler) 41
2.10.2. Piezoelektrik aktuatörler (Tetikleyiciler) 42
2.10.3. Piezoelektrik tranduserler (Dönüştürücüler) 43
2.10.4. Piezoelektrik sensörler (Algılayıcılar) 44
3. MATERYAL VE YÖNTEM 47
3.1. Granül Ekstrüder Tasarımı ve Prototip İmalatı 47
3.2. Granül Ekstrüderin 3B Yazıcıya Entegre edilmesi 50
3.3. Granül Ekstrüder için Hammadde Hazırlama 53
4. BULGULAR 55
5. TARTIŞMA ve SONUÇ 57
KAYNAKLAR 58
ÖZGEÇMİŞ 62

KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
SLA	Sterolitografi
DLP	Dijital ışık işleme
CDLP	Aralıksız dijital ışık işleme
FDM	Eriyik yığma modelleme
MJ	Malzeme püskürtme
NPJ	Nanopartikül püskürtme
DOD	İstek üzerine bırakma
BJ	Yapıştırıcı ile katmanlı imalat
MFJ	Multijet eritme
SLS	Seçici lazer sinterleme
DMLS	Direkt metal lazer sinterleme
SLM	Seçici lazer eritme
EBM	Elektron ışını ile eritme
LENS	Lazer toz şekillendirme
EBAM	Elektron ışını eklemeli imalat
LOM	Tabakalı obje üretimi
ABS	Akrilonitril bütadien stiren
PLA	Poli laktik asir
PC	Polikarbonat
PA	Poliamit
PE	Polietilen
PVDF	Polivinilidenflorit

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Katmanlı imalat ile üretilen ilk ürün patenti 2
Şekil 2.2. Charles Hull tarafından 1986 yılında üretilen yazıcı 3
Şekil 2.3. Reprap Darwin 3B yazıcı 4
Şekil 2.4. Eklemeli imalat teknolojilerinin sınıflandırılması 5
Şekil 2.5. Fotopolimerizasyon yöntemi 6
Şekil 2.6. DLP, CDLP ve SLA yöntemleri 7
Şekil 2.7. Malzeme ekstrüzyon yöntemi 8
Şekil 2.8. Malzeme püskürtme imalat yöntemi 9
Şekil 2.9. Yapıştırıcı ile katmanlı imalat yöntemi 10
Şekil 2.10. Toz yataklı eritme yöntemi 11
Şekil 2.11. Direkt enerji depolama yöntemi 12
Şekil 2.12. Levha/sac laminasyon yöntemi 13
Şekil 2.13. Polimer malzeme ile alınmış baskı örneği 14
Şekil 2.14. Metal malzeme ile alınmış baskı örneği 14
Şekil 2.15. Seramik malzeme baskı örneği 15
Şekil 2.16. Audi montaj hattında 3B yardımcı ürün kullanımı 16
Şekil 2.17. RapidFit+ kontrol fikstürü örneği 16
Şekil 2.18. NASA tarafından yapılan 3B yazıcı baskı çalışmaları 17
Şekil 2.19. 3B yazıcı ile üretilen doku örneği 18
Şekil 2.20. 3B yazıcı kullanılarak üretilen kesir pulları 20
Şekil 2.21. Filament üretimi için ekstrüzyon hattı 21
Şekil 2.22. Ekstrüder vidası 21
Şekil 2.23. Farklı ekstrüzyon vida tasarımları ve basınç değişimleri. (a) Ekstrüzyon vidası bölümleri, (b) Kauçuk ekstrüzyon vidası, (c) Ahşap matkap ucu 22
Şekil 2.24. Dielektrik malzemelerin sınıflandırılması 25
Şekil 2.25. Vakumlu ortam ve dielektrik malzeme olan iletken plakalar 26
Şekil 2.26. Dipol moment oluşumu 27
Şekil 2.27. Temaslı kutuplama ve korona kutuplama örneği 29
Şekil 2.28.a. Histerizis eğrisi (P-E Eğrisi) b.Elektrik alan-gerinim eğrisi 30
Şekil 2.29. Doğal piezoelektrik hammaddeleri 32
Şekil 2.30. Baryum titanat yapısı 33
Şekil 2.31. Polimer malzemelerde amorf ve kristalin yapı 34
Şekil 2.32. PVDF malzemenin moleküler yapısı 35
Şekil 2.33. PVDF'nin alfa, beta ve gama fazlarındaki moleküler yapıları 36
Şekil 2.34. PVDF malzemenin mekanik gerdirme ile alfa fazından beta fazına geçiş süreci 36
Şekil 2.35. PVDF için tipik ferroelektrik histerizis döngüsü 37
Şekil 2.36. Piezo elektrik malzemelerin uygulama alanları 40
Şekil 2.37. Çok katmanlı piezoelektrik seramik ile ark üretimi ve tek katmanlı piezoelektrik seramik ile şarj üretimi 41
Şekil 2.38. Piezoenjektör örneği 43
Şekil 2.39. Su altı sonar uygulaması 44
Şekil 2.40. Piezoelektrik algılayıcı örnekleri a)Eksenel algılayıcı b)Fleksör algılayıcı . 45
Şekil 2.41. Motor vuruntu sensörü 46
Şekil 3.1. Granül ekstrüder tasarımı ve prototipi 47
Şekil 3.2. Catia V5R19 tasarım programı katı modelleme modülü 48

Şekil 3.3. Granül ekstrüder kesit görüntüsü ve bileşenleri 49
Şekil 3.4. Ekstrüder için üretilen parçalar 50
Şekil 3.5. Granül ekstrüder ve 3B yazıcının montajlanmış hali 51
Şekil 3.6. 3B yazıcı ve granül ekstrüder montaj adaptörü 51
Şekil 3.7. Simplfy3D yazılımı çalışma ekranı 52
Şekil 3.8. PLA hammade örnekleri 53
Şekil 3.9. Granülatör ve PVDF çubuklardan elde edilen granül 54
Şekil 4.1. PVDF malzeme baskı örnekleri 56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. PVDF'nin mekanik,termal, elektriksel ve piezoelektrik özellikleri 38
Çizelge 2.2. Piezoelektrik kompozit malzemelerin özellikleri 39

1. GİRİŞ

Günümüzde akıllı sistemler gelişen teknoloji ve yenilikler ile beraber hayatımızın birçok alanında yer almaktadır. Geliştirilen akıllı yapıların sistem gereksinimleri dolayısıyla sistem girdilerini anlaması ve buna uygun çıktılar üretmesi gerekmektedir. Bu bağlamda akıllı sistemlere bağlı algılayıcı, aktüatör ve kontrol mekanizması bulunması gerekmektedir. Algılayıcı tarafından toplanan bilgi, kontrol mekanizması tarafından işlenir ve aktüatörler tarafından uygun çıktı üretilir.

Akıllı sistemler içerisindeki algılama ve tepki verme görevlerini yerine getiren parçalar akıllı malzemelerden oluşmaktadır. Son dönemde yaygın olarak kullanımda olan akıllı telefonlar, bileklikler, giysiler farklı özelliklerde algılayıcılar ve aktüatörler, içlerinde akıllı malzemeler barındırmaktadır.

Akıllı malzemeler ile ilgili gereklilikler gelişen teknolojiye bağlı olarak endüstri, otomotiv, havacılık, tıbbi, askeri ve ticari kaynaklı olabilmektedir. Akıllı malzemeler genel olarak piezoelektrik malzemeler, şekil hafızalı alaşımlar, elektrostriktif malzemeler, magnetostriktif malzemeler, magnetoreolojik/elektroreolojik akışkanlar ve fiber optikler olarak sınıflandırılmaktadırlar.

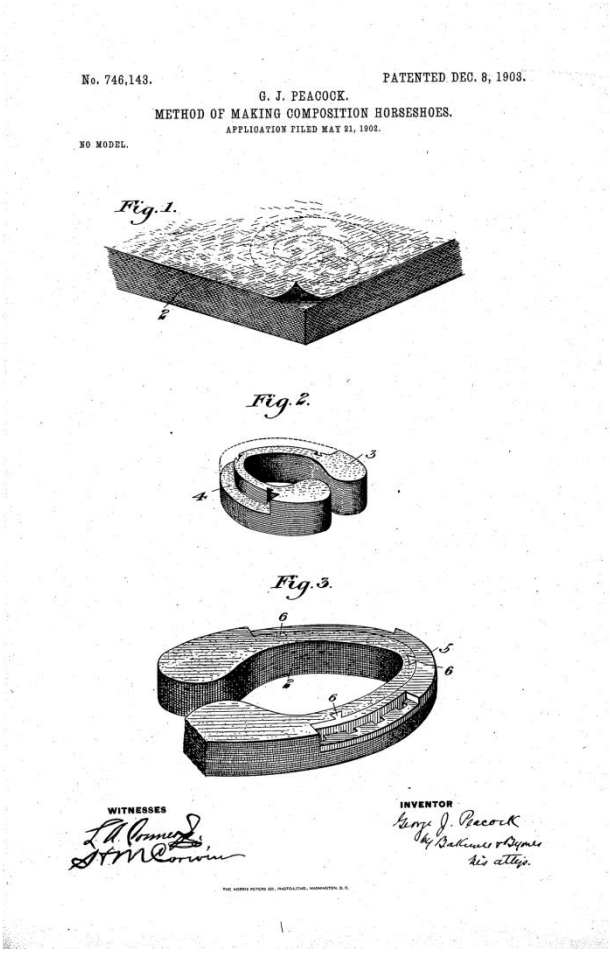
Son yıllarda gelişmekte olan bir diğer çalışma alanı ise katmanlı imalat tekniklerdir. Katmanlı imalat yapan makine kolay ifade edildiği için ‘3B yazıcı’ olarak adlandırılmaktadır. Tezin 2. bölümünde 3B yazıcılar ve piezoelektrik kavramları hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

Bu tez kapsamında termoplastik granül esaslı piezokompozit algılayıcılar üretmek için yeni bir 3B yazıcı üzerinde çalışılmıştır. Tez çalışmaları kapsamında eriyik yığma modelleme tekniği (FDM) kullanılarak 3B yazıcı ve modüler granül ekstrüder tasarlanıp prototip imalatı yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. 3B Yazıcıların Tarihi

3B yazıcıların temelini oluşturan katmanlı imalat yöntemi çok da yeni bir olgu değildir. Konuyla ilgili ilk patent 1902 yılında US746143 numarası ile alınmıştır. Bu patent dönemin ulaşım aracı olarak görülen at gibi canlılar için özel nal imalatının hızlı, ekonomik ve canlının ayak yapısına özgü olarak imal edilmesini içermektedir.



Şekil 2.1. Katmanlı imalat ile üretilen ilk ürün patenti

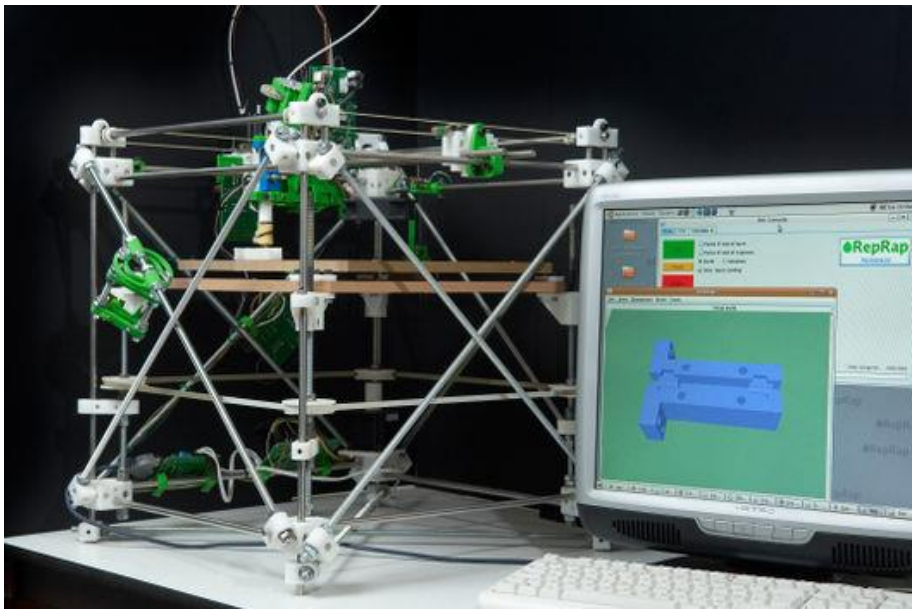
Ürünün oluşturulması için katmanlarda özel bir kumaş ve her katmanın birbiri ile birleştirilmesi için yapıştırıcı kullanılmıştır. Bu açıdan değerlendirildiğinde katmanlı imalatın ilk örneği denilebilir.

3B yazıcıların hızlı prototipleme amacı ile kullanılması Charles Hull tarafından 1984 yılında sterolitografi (SLA) tekniği kullanılarak geliştirilen cihazla başlamıştır. Bu yüzden resmi olarak 3B yazıcıların mucidi Charles Hull olarak değerlendirilmektedir. Şekil 2.2.'de üretilen ilk SLA cihazı görülmektedir.

Şekil 2.2. Charles Hull tarafından 1986 yılında üretilen yazıcı (Krassenstein, 2014)

1989 yılında Scott Crump tarafından eriyik yığma modelleme (FDM) tekniği geliştirildi. Günümüzde yaygın olarak katmanlı imalat teknikleri arasında FDM tekniği kullanılmaktadır. Özellikle patent sürelerinin dolması ile beraber bu teknik üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. 2007 yılından Reprap projesi İngiltere Bath Üniversitesi tarafından başlatılmıştır. Bu cihazların herkes tarafından ulaşılabilir olması ve maliyetlerinin düşürülmesi hedeflenmiştir. Proje açık kaynak tasarım ve açık kaynak kodu anlayışında ilerlediği için çok hızlı bir şekilde ilk yazıcılar üretilerek kullanılmaya

başlandı ve günden güne bu cihazların kullanımı artarak devam etmektedir. Proje açık kaynak koduyla başlatıldığı için sürekli olarak gelişim içerisindedir. Proje başlangıcından 12 sene sonra birçok 3B yazıcı imalatçı şirketler kurularak dev bir sektör haline gelmiştir. Şekil 2.3.'de üretilen ilk Reprap 3D yazıcı görülmektedir.

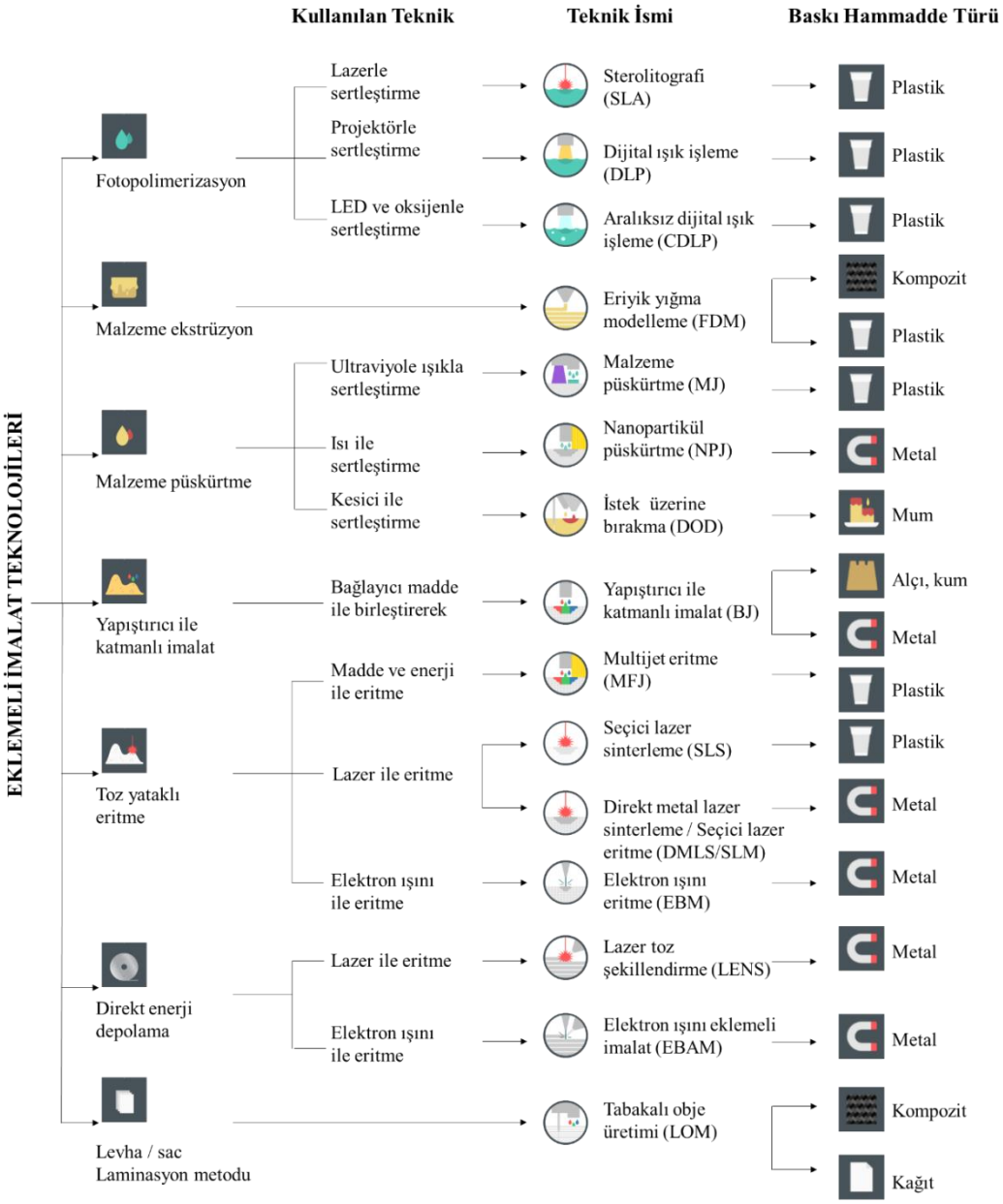


Şekil 2.3. Reprap Darwin 3B yazıcı (Anonim 2014)

2.2. 3B Yazıcı Çeşitleri

Gelişmekte olan katmanlı imalat teknikleri ve yeni yaklaşımlar sonucu, katmanlı imalat tekniklerinin sınıflandırılma ihtiyacı doğmuştur. Katmanlı imalat yapan makineler endüstride ifade edilmesi kolay olduğu için "3B yazıcı" olarak adlandırılmaktadır. Kullanılan terimlerin standartlaştırılması için 2015 yılına kadar 3B yazıcı üreticilerinin ve profesyonel kullanıcıların katılımıyla çeşitli sınıflandırmalar yapılmıştır. Ancak 2015 yılında Uluslararası Standardizasyon Teşkilatı (ISO) ve Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu tarafından üreticilerin ve profesyonel kullanıcıların da katılımıyla ISO/ASTM 52900:2015 standardı oluşturulmuştur. Bu standarda göre katmanlı imalat teknikleri 7 grup altında toplanmıştır. Gruplandırma yapılırken

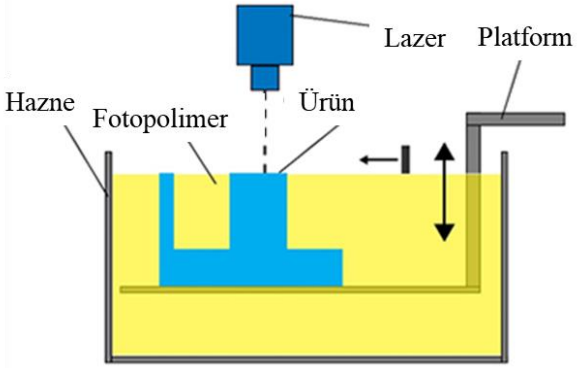
katmanların oluşturulması sırasında kullanılan teknikler baz alınmıştır. Bu teknikler Şekil 2.4.' de verilmiştir.



Şekil 2.4. Eklemeli imalat teknolojilerinin sınıflandırılması. (Anonim 2015'den değiştirilerek alınmıştır.)

2.2.1. Fotopolimerizasyon

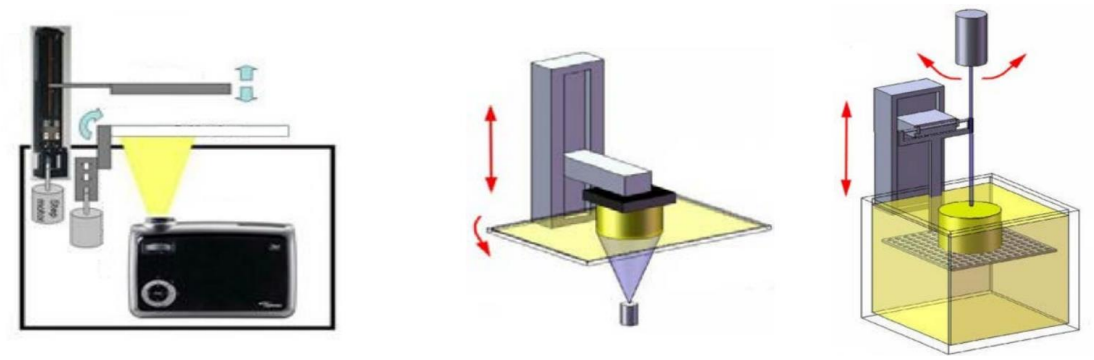
Fotopolimerizasyon yöntemi kaplama ve reklam endüstrisi gibi alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntem esnasında ultraviyole (UV) ışınlar veya lazer ışınları ile kimyasal tepkimeye giren sıvı halde fotopolimer malzemeler kullanılmaktadır (Gibson ve ark. 2015). Sıvı polimer üzerine hassas motorlar ile kontrol edilen aynalar vasıtasıyla yönlendirilen ışınlar sıvı polimerin katı hale geçmesini sağlar. Her katman için oluşturulan kesitler sırasıyla üst üste olacak şekilde katı hale dönüştürülür. Fotopolimerizasyon yöntemi ile 0,025 mm katman kalınlığı elde edilebilir (Chua ve ark. 2010). Düşük katman kalınlığı sebebiyle düşük yüzey pürüzlülüğü ve düşük ölçü toleransları içerisinde kaliteli baskılar alınabilir. Ancak işlem sonrası baskısı alınan objenin oluşturulduğu polimerden arındırılması ve desteklerin sökülmesi zaman aldığı için diğer eklemeli imalat teknolojilerine göre kullanımı ve maliyeti fazladır. Şekil2.2.'de fotopolimerizasyon yöntemi görülmektedir.



Şekil 2.5. Fotopolimerizasyon yöntemi (Anonim 2019)

Fotopolimerizasyon yöntemi kendi içerisinde üçe ayrılmaktadır (Şekil 2.4.). Bunlar Sterolitografi (SLA), direkt ışık işleme (DLP) ve sürekli ışık işleme (CDLP) yöntemleridir (Redwood 2017). Sterolitografi (SLA) yönteminde imalat platformu fotopolimer sıvı dolu bir tanka batırılmaktadır, platform üzerinde bulunan tek nokta lazer yardımıyla katmanlar sırasıyla katılaştırılarak obje oluşturulur. İşlem sonrası ultraviyole ışın kullanımıyla objenin mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir

(Redwood 2017). Direkt ışık işleme (DLP) yöntemi ile sterolitografi (SLA) yöntemi işlem mantığı olarak büyük ölçüde benzerlik göstermektedir. DLP ve SLA yöntemleri arasındaki tek fark kullanılan ışın kaynağıdır. SLA yönteminde tek nokta lazer kaynağı kullanılırken DLP yönteminde projektör kullanılmaktadır. DLP yönteminde katmanlar projektörden sağlanan ultraviyole ışınlar ile katılaştırılmaktadır. Aralarındaki bu ışın kaynağı farkı dolayısıyla SLA yöntemi DLP yöntemine gör daha hızlıdır (Aniwaa 2017). Üçüncü yöntem ise sürekli ışın işleme (CDLP) yöntemidir. CDLP yöntemi ile DLP yöntemi arasındaki tek fark imalat imalat platformunun yukarı yönde hareket etmesidir. Şekil 2.6.'de fotopolimerizasyon yöntmelerine ait şekiller gösterilmektedir.



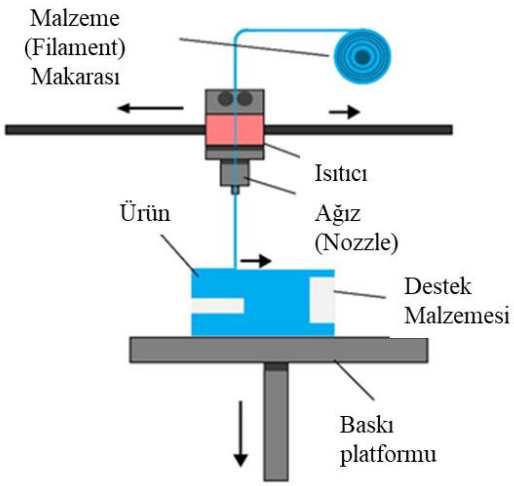
Şekil 2.6. DLP, CDLP ve SLA yöntemleri. (Aniwaa 2017)

2.2.2. Malzeme ekstrüzyon

Eriyik yığma modelleme (FDM) olarak da bilinen bu yöntem Scott Crump tarafından bulunarak, 1989 yılında US5121329A numarasıyla patentlenmiştir. Bu yöntemde filamentler kullanılmaktadır. Filamentler plastik, polimer ve kompozit malzemelerden oluşmaktadır (Anonim 2017). Filament halindeki malzeme ısıtıcı ağızdan geçirilerek sıvı hale getirilir. X ve y ekseni yönlerinde hareket kabiliyetine sahip ısıtıcı ağız eriyik malzemeyi belirlenen konumlara bırakarak katmanların oluşmasını sağlar. Her yeni katman oluşumunda ısıtıcı ağız z ekseninde yukarı veya aşağı yönde hareket ederek baskısı alınmak istenen ürünü oluşturur. Enjeksiyon kalıplamaya göre bu yöntem düşük hacimli ürünlerin üretiminde daha ekonomik bir yöntemdir (Anonim 2017). Bu yöntem ile çalışan 3B yazıcılar diğer yöntemler ile baskı alan 3B yazıcılara göre daha ucuz

olmakla beraber, hobi amaçlı ve evde kullanılan 3D yazıcıların çok büyük bir kısmı FDM yöntemini kullanmaktadır.

Bu yöntem özelinde çıkan ürün kalitesini etkileyecek birçok faktör bulunmaktadır. Bunlardan en önemlisi ısıtıcı ağızın geometrisidir. Isıtıcı ağızın kare olması çıkan ürünün yüzey kalitesine direk etkisi olduğu Chua ve ark. (2010) tarafından gözlenmiştir. FDM yöntemi ile üretilen parçanın mekanik özellikleri katman yönüne bağlı olarak anizotropik doğasından dolayı değişim göstermektedir (Redwood 2017).

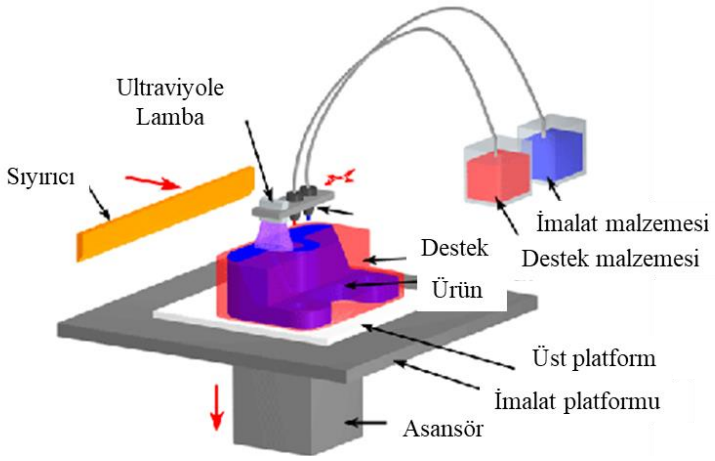


Şekil 2.7. Malzeme ekstrüzyon yöntemi (Anonim 2017)

2.2.3. Malzeme püskürtme

Malzeme püskürtme yöntemi ile baskısı alınacak ürünler, 2 boyutlu bir mürekkep püskürtmeli yazıcıların kullandığı yönteme benzer şekilde oluşturulur. Malzeme imalat platformunun üzerine sürekli olarak püskürtülerek ya da istek üzerine bırakma (DOD) şeklinde püskürtülür. İmalat platformuna boyunca yatay olarak hareket eden ağızdan püskürtülen malzeme ultraviyole (UV) ışık ile sertleştirilmektedir. Bu yöntem ile yüzey kalitesi yüksek hassas çıktılar üretmek için yazıcı üzerinde her katman üretimi sonunda sıyırıcı kullanılmaktadır. Bu yöntem ile birden fazla renkte malzeme kullanılarak renkli çıktılar alınabilirken destek malzemesi kullanımı gerekliliği dolayısıyla baskı sonrası işlem zaman ve maliyet anlamında dezavantaj yaratmaktadır.

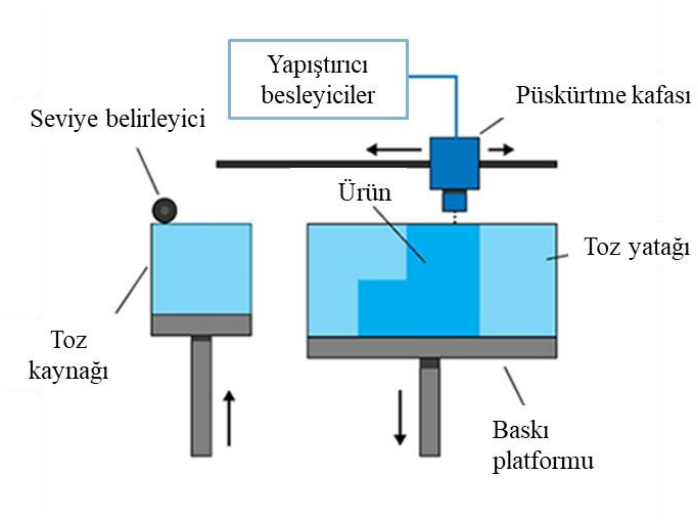
Bu yöntem ile polimer ve plastikler kullanılabilmektedir (Anonim 2017). Malzeme püskürtme yöntemi esas alınarak geliştirilen partikül püskürtme (NPJ) yöntemi ile metal çıktılar alınabilmektedir. NPJ yönteminde metal nano partiküller özel bir sıvı karışımı ile yazıcıya kartuş olarak yüklenir ve katmanlar halinde çok ince damlacıklar olarak imalat platformuna püskürtülür. Sürekli olarak püskürtme ve istek üzerine bırakma tekniklerinde olduğu gibi ultraviyole (UV) ile metal nano partikülleri içeren sıvının buharlaştırılması sağlanır. Baskı bittikten sonra mukavemetin arttırılması için ultraviyole ışığa maruz bırakılır.



Şekil 2.8. Malzeme püskürtme imalat yöntemi (Anonim 2017)

2.2.4. Yapıştırıcı ile katmanlı imalat

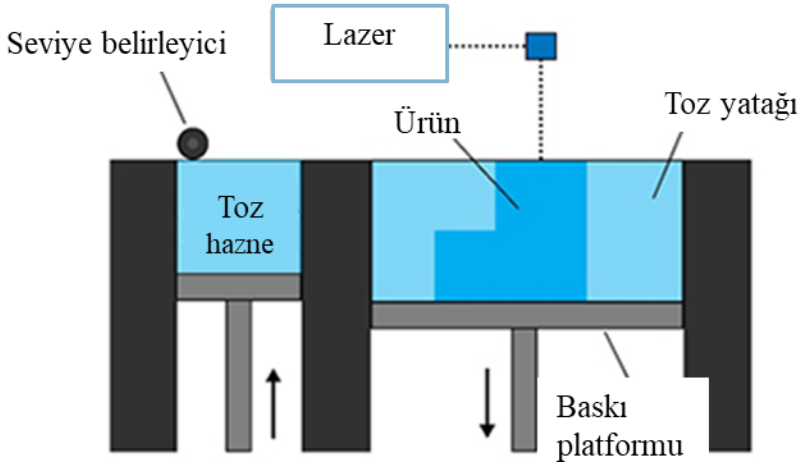
Bu yöntemde toz esaslı malzeme ve katmanlar arasında genellikle sıvı halde yapıştırıcı olarak kullanılan iki ana malzeme kullanılmaktadır. Katmanlar seviye belirleyici silindir kullanılarak baskı platformunun üzerine yayılmaktadır. Püskürtme kafası x ve y eksenlerinde her bir toz katmanı için belirlenmiş noktalara yapıştırıcıyı püskürterek tozun katılaşmasını sağlamaktadır. Her bir katman için püskürtme işlemi tamamlandıktan sonra baskı platformu z yönünde aşağıya indirilerek ürünün baskısı gerçekleştirilmektedir. Bu yöntem ile metal, seramik ve kum gibi çeşitli malzemeler farklı renk seçenekleri ile beraber kullanılabilmektedir. Ancak kullanılan yapıştırıcı malzeme özelliklerinden dolayı çıktısı alınan ürünün mekanik özellikleri yapısal parçalar için uygun olmayacaktır.



Şekil 2.9. Yapıştırıcı ile katmanlı imalat yöntemi (Anonim 2017)

2.2.5. Toz yataklı eritme

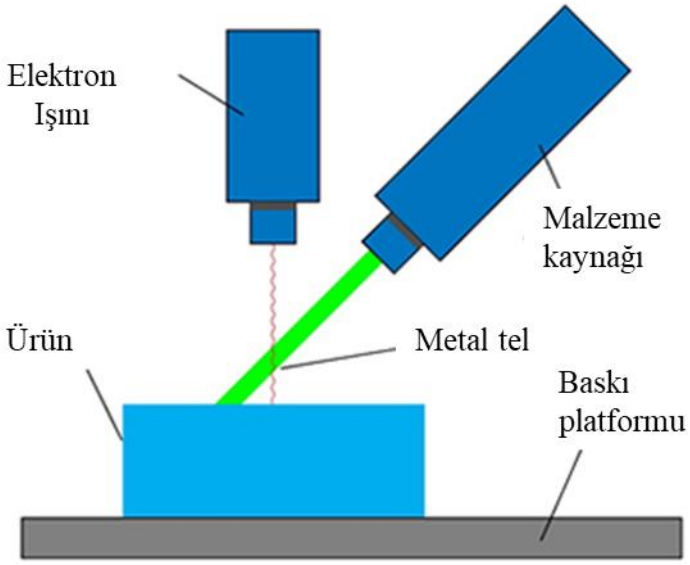
Toz yataklı eritme yöntemlerinde, lazer veya elektron ışını tozu birleştirmek veya eritmek için kullanır. Bu yöntem genel olarak kullanılan ışın kaynağı tipine göre alt gruplara ayrılmaktadır. Bunlar multijet eritme (MFJ), seçici lazer sinterleme (SLS), direkt metal lazer sinterleme (DMLS) ya da seçici lazer sinterleme (SLM), elektron ışını ile eritme (EBM) olarak sınıflandırılmaktadır (Anonim 2017). Kullanılan tüm bu yöntemlerde tozlar seviye belirleyici bir silindir vasıtasıyla 0,1 mm hassasiyetinde katman kalınlığı olacak şekilde baskı platformu üzerine yayılır. Şekil 2.10'da görüleceği üzere toz haznesinden elde edilen toz seviye belirleyici vasıtasıyla baskı platformu üzerine serilmektedir. Oluşturulacak her bir katman için toz haznesi altında bulunan platform yukarı doğru çıkarken baskı platformu aşağıya doğru inmektedir. Bu işlemler vakum altında gerçekleştirilerek her bir katman için toz katmanı serme ve sinterleme işlemi tekrarlanmaktadır (Redwood 2017).



Şekil 2.10. Toz yataklı eritme yöntemi (Anonim 2017)

2.2.6. Direkt enerji depolama

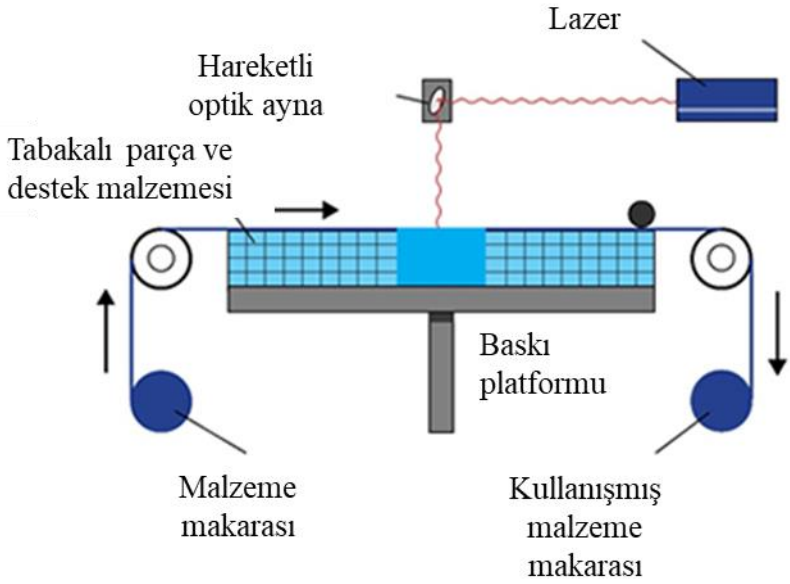
Bu yöntemde malzeme eritilerek baskı gerçekleştirilir. Bu yönüyle düşünüldüğünde malzeme ekstrüzyonu ile benzerlik gösterdiği düşünülebilir ancak malzeme ekstrüzyonundan farklı kılan nokta malzemeyi aktaran ağzın çok eksenli bir robot kol olmasıdır. Bu yöntemde malzeme toz veya tel formuna sahip polimer, metal veya seramik olabilir ancak genel olarak metal kullanılmaktadır (Redwood 2017). Malzemeyi aktaran ağzın yanında malzemenin katılaşmasını sağlayacak olan lazer ya da elektron ışın kaynağı bulunmaktadır. Çok eksenli bir robot kol kullanımı bu yöntemin bakım onarım faaliyetlerinde kullanılmasına da olanak sağlamaktadır. Hasarlı bir parça üzerine istenilen bir formda yeni eklemeler yapılabilmektedir.



Şekil 2.11. Direkt enerji depolama yöntemi (Anonim 2017)

2.2.7. Levha/sac laminasyon metodu

Bu yöntemde katmanlar levhaların laminasyonu ile oluşturulmaktadır. Şekil 2.12'de görüldüğü üzere malzeme makarası üzerinde bulunan malzeme baskı platformu üzerine sürülür ve sonrasında hareketli optik ayna sayesinde lazer ile istenilen geometride kesilerek katmanın oluşturulması sağlanır. Oluşturulan katman üzerinde sıcak merdane geçirilerek katmanın laminasyonu sağlanır. Yeni katmanı oluşturmak için baskı platformu aşağı inerek malzeme makarasından yeni bir katman için malzeme baskı platformu üzerine sürülür ve hareketli optik ayna yardımıyla istenilen ölçülerde katmanın oluşturulması sağlanır. Ürün tamamlanıncaya kadar bu işlem tekrarlanır. Bu yöntem ile kağıt ve kompozit katmanlar kullanılabilmektedir (Anonim 2017). Bu yöntem hızlı ve ucuz olmasına karşın baskı sonrası ürün üzerindeki işlem gereklilikleri mevcuttur. Ayrıca kullanılabilecek malzeme çeşitliliği az olduğu için bu yöntemin kullanım alanı diğer yöntemlere göre kısıtlı kalmaktadır.



Şekil 2.12. Levha/sac laminasyon yöntemi (Anonim 2017)

2.3. Katmanlı İmalat Tekniklerinde Kullanılan Malzemeler

Genel olarak katmanlı imalat tekniklerinde polimer kullanımı yaygın olmakla beraber, yedi grup altında toplanılan tekniklerde polimerler, seramikler ve metaller kullanılmaktadır. Kullanılan malzeme genellikle toz halinde veya filament halinde kullanıma hazır halde bulunmaktadır. Şekil 2.4.'de baskı hammadde türüne göre kullanılabilecek katmanlı imalat teknikleri görülmektedir.

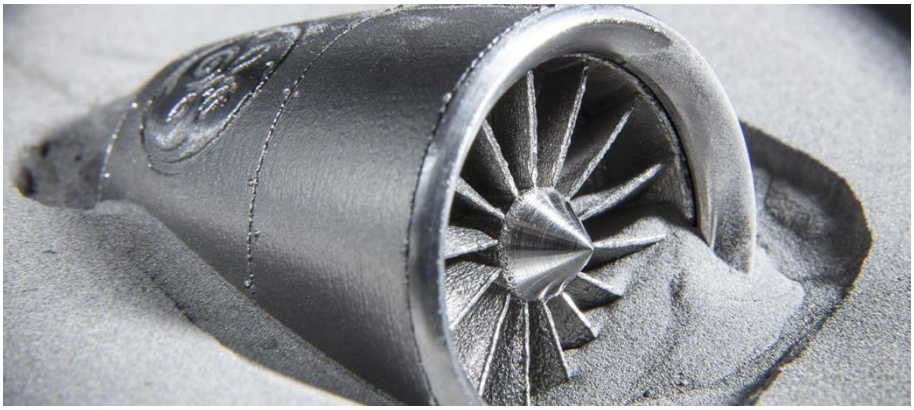
2.3.1. Polimerler

Yaygın olarak piyasada bulunan plastiklerin birçoğu katmanlı imalat teknikleri ile kullanılmakta olup akrilonitril bütadien stiren (ABS), polikarbonat (PC) ve polilaktik asit (PLA) bu malzemeler arasında ön plana çıkmaktadır. Farklı polimer ile oluşturulan yapısal ve estetik olarak ürünler oluşturulabilmektedir. Katmanlı imalat tekniklerinde genel olarak kullanılan polimerler ABS, PLA, PC, PA, epoksi reçine, mum, fotopolimer reçine olarak sıralanabilir.

Şekil 2.13. Polimer malzeme ile alınmış baskı örneği (Anonim 2019)

2.3.2. Metaller

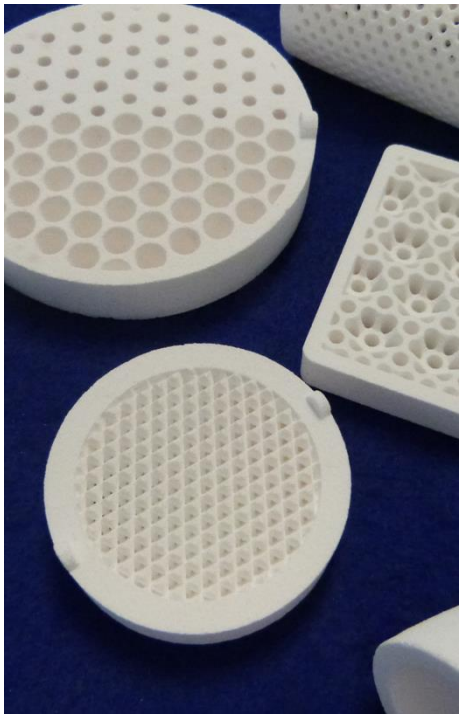
Polimer malzemelere göre yapısal özellikleri daha iyi olduğu için katmanlı imalat teknikleri içerisinde metaller de kullanılmaktadır. Kullanılan başlıca metal malzemeler çelik, titanyum, alüminyum, kobalt krom alaşımları olarak sıralanabilir.



Şekil 2.14. Metal malzeme ile alınmış baskı örneği (Anonim 2018)

2.3.3. Seramikler

Seramik malzemeler katmanlı imalat teknikleri arasında kullanımı baskı sonrası işlem gereklilikleri dolayısıyla kısıtlı olsa da gün geçtikçe kullanım alanları artmaktadır.



Şekil 2.15. Seramik malzeme baskı örneği (Anonim 2018)

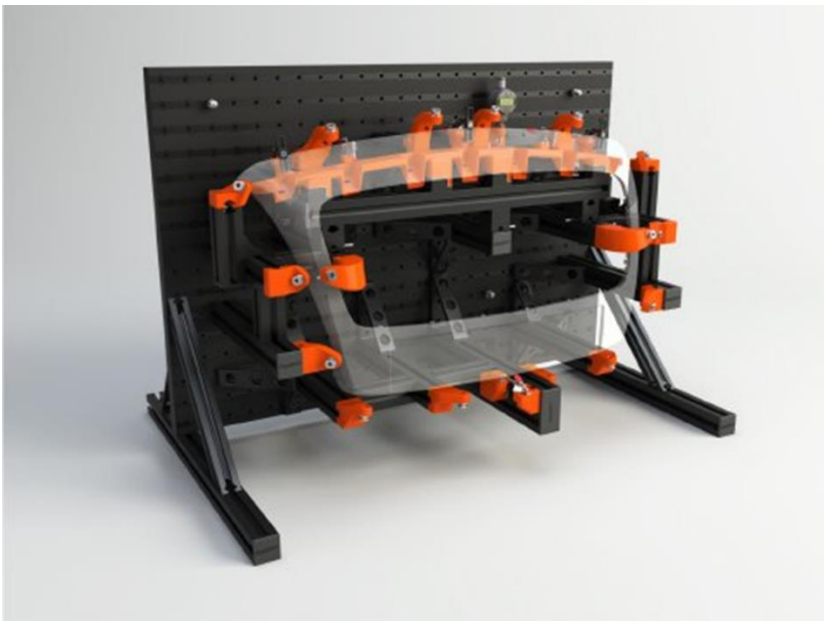
2.4. 3B Yazıcı Kullanım Alanları

2.4.1. Otomotiv

3B yazıcıların kullanımı otomotiv sektöründe gün geçtikçe artmaktadır. Otomotiv sektörünün seri üretim gereklilikleri sebebiyle her ne kadar üretim araçları için kullanıyor olmasa bile tasarım süreçlerini ve faaliyetlerini büyük ölçüde hızlandırmaktadır. Otomotiv üreticileri ve yan sanayi firmalar tasarımlarının olgunluğunu görmek ve seri üretim şartlarını deneyimlemek için prototip parçalar ile denemeler yapmaktadır. Buna ek olarak yaygın bir şekilde üretimi destekleyici aparatları ve kontrol fikstürlerinin üretiminde 3B yazıcılardan faydalanmaktadırlar. Audi firması üretim sürecinde çalışan personelinin fikirlerini daha hızlı ve daha ekonomik olarak devreye alabilmek için 3B yazıcılardan faydalanmaktadır. 3B yazıcı kullanılmadan fikirler hayata geçirilmeye çalışılsa geleneksel üretim tekniklerinin kullanılması gerekeceğinden bu da sürecin uzamasına ve maliyetin artmasına sebebiyet verecektir (Anonim 2019).

Şekil 2.16. Audi montaj hattında 3B yardımcı ürün kullanımı (Anonim 2019)

Boyutsal kontrol amaçlı kullanılan 3B yazıcılar ile üretilmiş kontrol fikstürleri de çeşitli ana sanayi otomotiv firmaları tarafından kullanılmaktadır. Bu amaçla özel üretimler yapan RapidFit+ firmasının çeşitli modüler çözümleri bulunmakla beraber ana sanayi firmalara üretim öncesindeki onay süreçlerinde hız ve zaman kazandırmaktadır.



Şekil 2.17. RapidFit+ kontrol fikstürü örneği (Anonim 2011)

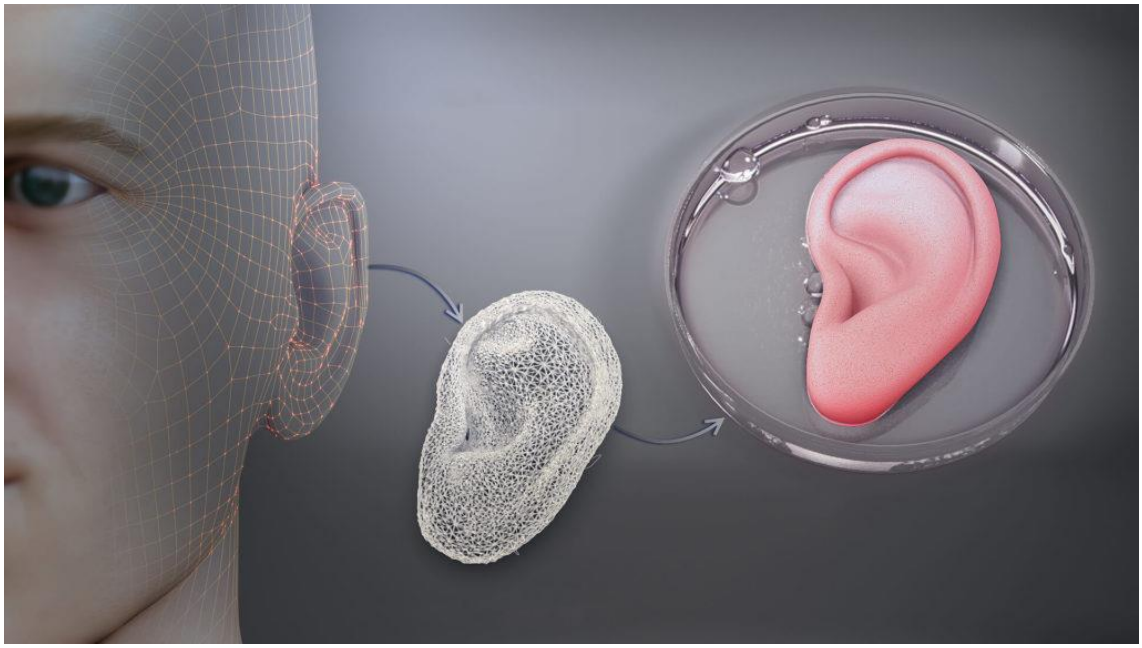
2.4.2. Uzay

3B yazıcıların uzay görevlerinde kullanılma fikri ilk olarak NASA tarafından 2014 yılında ortaya konuldu. 2014 yılının son günlerinde NASA tarafından 3B yazıcıların uzayda kullanımıyla ilgili çalışmalar başlatıldı. Baskı işlemi sırasında ortaya çıkan gazın ve yer çekimsiz ortamın baskı üzerine ne gibi etkileri olduğu araştırıldı (Sarıgül 2014). Uzun süreli uzay görevlerinde bu teknolojinin faydalı olabileceği düşünülmektedir.

Şekil 2.18. NASA tarafından yapılan 3B yazıcı baskı çalışmaları (Sarıgül 2014)

2.4.3. Sağlık

Tıp alanında 3B yazıcıların önemi diğer sektörlerde olduğu gibi sunduğu avantajlar dolayısıyla gün geçtikçe artmaktadır. Sunduğu en büyük avantajlardan bir tanesi kişiye özgü uygulamaları mümkün kılmasıdır. Kişiye özgü çözümlerin ve uygulamaların iyileşme sürecinde hızlandırıcı veya yaşam kalitesini arttırıcı etkileri olduğu bilinmektedir. Genel olarak kişiye özgü protezler hızlı bir şekilde üretilerek hastaya uygulanabilmektedir. Bunlar genel olarak uzuv ve diş olabilmektedir. Ancak bunların dışında organ, doku, damar, kemik, kişiye özgü dozajda ilaç, deri, kafatası, kalp kapakçığı da olabilmektedir (Arıkan 2017).



Şekil 2.19. 3B yazıcı ile üretilen doku örneği (Arıkan 2017)

2.4.4. Mühendislik

3B yazıcılar mühendislik alanında Ar-Ge faaliyetleri için vazgeçilmez olanaklar sunmaktadır. Ürün prototiplerinin hızlı bir şekilde üretilerek üzerinde çalışılmasına imkan sağlamaktadır. Bu şekilde maliyetler büyük ölçüde düşürülebilmektedir. Ürün üzerinde tasarım sürecinde fark edilmeyen, gözden kaçan detaylar 3B yazıcılar ile alınmış olan prototip ürünler ile kolayca fark edilebilmektedir.

2.4.5. Havacılık

Havacılık endüstrisinde seri üretim olmadığından 3B yazıcıların kullanımı daha baskındır. Özellikle titanyum alaşımlı parçaların üretilmesi hem üretim esnekliği hem de ağırlık avantajı sağlamaktadır. Bilinen büyük havacılık firmaları Boeing, Airbus, Lockheed Martin, GE gibi büyük şirketler bu teknolojinin sunduğu avantajların farkına vararak sık kullanmaya başlamıştır.

Uçak firmalarının en büyük maliyetleri arasında depolama, stok ve nakliye gelmektedir. Dolayısıyla uçak üzerinde yapısal olarak yüksek özellikler göstermesine ihtiyaç olmayan plastik parçalar 3B yazıcı teknolojisi ile ihtiyaç neredeyse üretilecek olup en

büyük maliyet unsurlarında kurtulmayı planlamaktadırlar. Bu sebeple Boeing tarafından 2015 yılında metal olmayan parçaların 3B yazıcılar ile üretimi için yedek parça ve sarf malzemeler ile alakalı patent başvurusu yapılmıştır (Krassenstein 2015).

2.4.6. Endüstriyel kalıp

Geleneksel üretim teknikleri düşünülerek değerlendirildiğinde kalıp üretimi ve tasarımı oldukça maliyetli olarak değerlendirilmektedir. Daha çok yüksek adetli üretim parçaları için endüstriyel kalıplar metallerden işlenerek üretilmektedir. Ancak gelişen 3B yazıcı teknikleri ile birlikte düşük hacimli üretim ve prototip parçalar üretmek için de düşük maliyetli katmanlı imalat teknikleri kullanılarak endüstriyel kalıplar üretmek mümkün olmaktadır. Görece düşük yatırım maliyeti gerektiği için düşük hacimli üretimler yapılabilmekle beraber tasarım esnekliği sunması dolayısıyla kalıp içerisindeki parçanın kalitesini etkileyecek değişiklikler daha kolay işlenebilir. Kaliteye etki eden en büyük unsurlardan bir tanesi kalıp soğutma kanallarıdır. 3B yazıcıların sunduğu esnek tasarım ve imalat imkanları sebebiyle kalıp içerisindeki parça etkin şekilde soğutularak hassas boyutsal ölçülerde ürün elde edilebilmektedir.

2.4.7. Eğitim

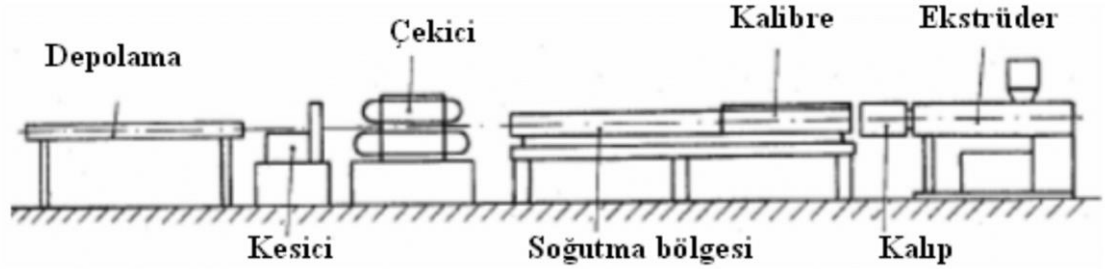
Katmanlı imalat teknolojilerinin eğitim alanında kullanılması öğrencilerin hayal güçlerini geliştirmeye katkı sağlamaktadır. Günümüzde birçok eğitim kurumu bu teknolojiyi öğrencilerine tanıtmakta ve uygulama yaptırmaktadır. Bu teknoloji öğrencilerin kendini geliştirmesine olanak sağlamakla beraber eğiticilerin de işini kolaylaştırmaktadır. Soyut olarak öğrencilerin anlamakta güçlük çektikleri konuları, detaylı somut ürünler üzerinden konuyu anlatmak eğiticiler ve öğrenciler açısından faydalıdır. Öğrencilerin bu teknoloji ile birlikte tasarım odaklı düşünme ve problemlere karşı olan yaklaşımlarının geliştiği görülmektedir (Anonim 2016).

Şekil 2.20. 3B yazıcı kullanılarak üretilen kesir pulları (Anonim 2016)

2.5. Granül Ekstrüzyonu

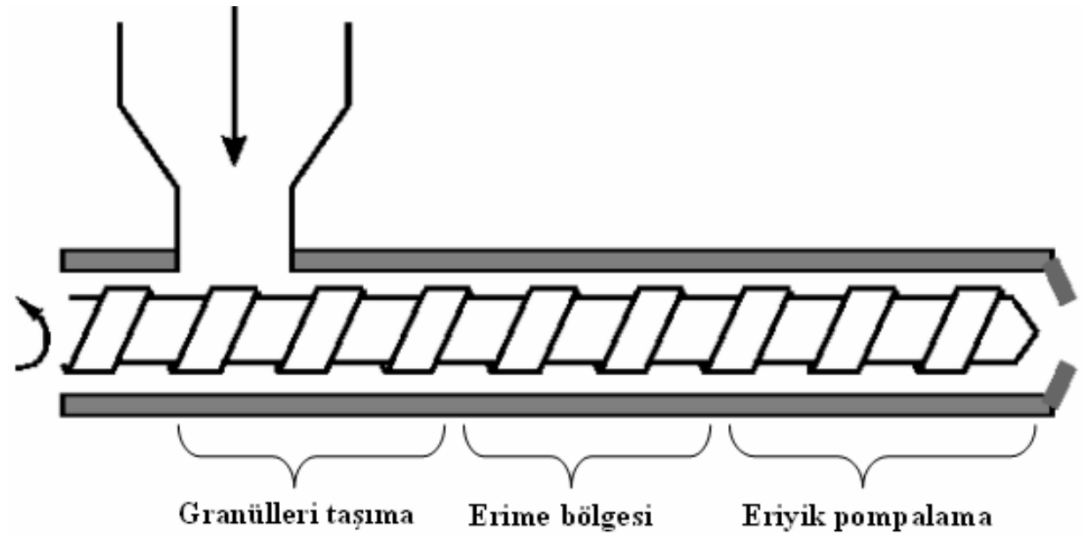
Endüstriyel alanda kullanımı yaygın olan 3B yazıcılar günümüzde bireysel kullanım artmasıyla bu teknolojiye ilginin giderek artmasına sebep olmuştur. Bireysel kullanımda eriyik yığma modelleme (FDM) tekniği yaygın olarak ön plana çıkmaktadır. FDM tekniğinde malzeme filament halinde bulunmaktadır. Filamentler PLA, ABS, PC ve PE gibi maddelerden oluşabilmektedir.

FDM 3B yazıcılarda kullanılan bu filamentler plastik ekstrüzyon makineleri ile üretilmektedir. Granül halinde besleme haznesine eklenen hammadde vidalı mil yardımıyla ısıtıcı bir ağızdan geçirilerek istenilen çapta üretilebilmektedirler. Genellikle üretilen filamentlerin çapı 1,75 mm ile 3 mm olarak değişmektedir. Şekil 2.21'de filament üretimi için ekstrüsyon hattı örneği gösterilmektedir.



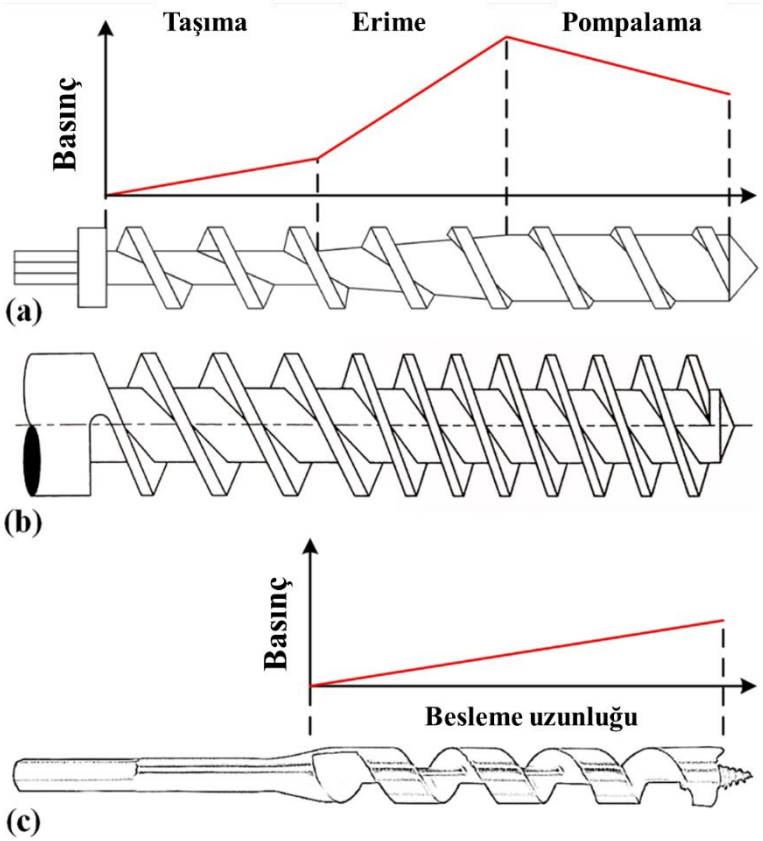
Şekil 2.21. Filament üretimi için ekstrüzyon hattı (Yılmaz 2007)

Filament üretim hattında en önemli elemanlardan bir tanesi ekstrüder vidasıdır. Çeşitli çaplarda ekstrüder vida kullanılabilmektedir. Şekil 2.2'de ekstrüder vidasının bölümleri gösterilmektedir. Bunların granül taşıma, erime bölgesi ve eriyik pompalama bölgeleridir.



Şekil 2.22. Ekstrüder vidası (Yılmaz 2017)

Şekil 2.23'de farklı ekstrüder vida çeşitleri ve ekstrüzyon sırasında basınç değişimi gösterilmiştir. Ekstrüder ağzından çıkan malzeme akışını kontrol altında tutmak için değişken vida adımı ve iç çapa sahip vidalar kullanılmaktadır.



Şekil 2.23. Farklı ekstrüzyon vida tasarımları ve basınç değişimleri. (a) Ekstrüzyon vidası bölümleri, (b) Kauçuk ekstrüzyon vidası, (c) Ahşap matkap ucu (Whyman ve ark. 2018)

Bu tez çalışması kapsamında FDM yöntemini kullanan 3B yazıcılar için granül hammadde beslemeli, 3B yazıcı üzerine modüler bir şekilde bağlanabilecek granül ekstrüder tasarımı ve prototip imalatı yapılmıştır.

2.6. Piezoelektriğin Tarihçesi

Piezoelektrik özellik 1880 yılında Pierre Curie ve Jacques kardeşler tarafından keşfedilmiştir. Curie kardeşler turmalin, kuvars gibi kristal yapılı malzemelerin belirli yönlerde kristallerin üzerine uygulanan basınca orantılı bir şekilde pozitif ve negatif yüklerin zıt kutuplara çekilerek elektrik yüklerinin oluştuğunu gördüler. Bu etki Curie kardeşler tarafından ‘kutup-elektrik’ olarak isimlendirilmiştir. Ayrıca Curie kardeşler kristal yapılı malzemelerin sıcaklık değişimi ile elektrik sinyali ürettiklerini fark

etmişlerdir. Bu etki piroelektrik olarak adlandırılmaktadır. Piroelektrik malzemelerin tümü piezoelektrik özellik göstermektedirler. Piezoelektrik malzemelerin isimlendirilmesi ilk olarak Alman fizikçi Wilhelm G. Hankel tarafından yapılmıştır. Basmak anlamında olan 'piozel' ya da 'piezin' olarak isimlendirilmiştir. 'Piro' kelimesinin kökeni ise Yunanca olup ateş anlamını taşımaktadır. 1881 yılında ise Gabriel Lippmann tarafından piezoelektrik malzemelere elektriksel alan uygulandığında malzemenin boyutsal olarak değişime uğradığını tespit etti. Daha sonrasında bu etki Curie kardeşler tarafından dolaylı piezoelektrik etki olarak tespit edilip kanıtlanmıştır (Tichy 2010).

Piezoelektrik malzemeler üzerine devam eden çalışmalar sonucunda 1890 yılında Woldemar Voight tarafından tensor analizi kullanılarak Voight teorisi formüle edilmiştir. Daha sonrasında piezoelektrik özellik gösteren kristallerin sınıflandırıldığı 'Lehrbuch der Kristallphysik' kitabı yayınlanmıştır (Tichy 2010).

İlk önemli piezoelektrik özelliğe dayanan çalışma 1917 yılında Birinci Dünya Savaşı sürecinde ultrasonik denizaltı detektörü üretmek için yapıldı. Denizaltı tespiti iki çelik levha arasına konulan kuvars kristallerinin 50khz rezonansta yaydığı sinyaller vasıtasıyla yapılmaktaydı. Engellerden yansıyan sinyaller tespit edilerek, hedef ve risk tespiti yapılıyordu. Daha sonrasında piezoelektrik kristaller çığır açan birçok uygulamada kullanılmıştır. Bunlar sonar cihazı, mikrofon, hoparlör, sonar, hız ölçer olarak sınıflandırılabilir (Korkmaz 2015).

İkinci Dünya Savaşı sırasında ise Amerikan ve Sovyet bilim adamları doğal olarak piezoelektrik özelliğe sahip kristallerden daha büyük dielektrik sabite sahip, üzerlerine yüksek elektrik alanı uygulandığında piezoelektrik özellik kazanan ferroelektrik malzemeleri keşfettiler. 1940 yılında Arthur von Hippel tarafından yapılan çalışmada dielektrik sabiti 1000'den büyük ilk sentetik seramik baryum titanat (BT) malzemesi keşfedildi. Piezoelektrik özellikleri açısından üstün özelliklere sahip olmasına karşın malzeme kırılgandı ve mekanik etki gerektiren uygulamalarda kullanılması mümkün olmayacaktı. 1954 yılında Jaffe ve arkadaşları tarafından yürütülen çalışmalar sonucunda PZT (Kurşun-Zirkonat-Titanat) malzemesi bulundu. Baryum titanata göre

daha üşütün özelliklere sahip olan bu malzeme en önemli piezoelektrik özellikli malzemelerden bir tanesidir. Günümüzde büyük bir ticari önemi mevcut olmakla beraber dönüştürücüler ve algılayıcılar gibi birçok kullanım alanı mevcuttur (Vijaya 2013).

Piezoelektrik özellik üzerinde 1940 ve 1965 yılları arasında yapılan çalışmalar neticesinde metal oksit tozlarının sinterlenmesiyle oluşturulan malzemelerin doğal kristallerden yüz kat daha fazla dielektrik sabitlere sahip oldukları görülmüştür (Vijaya 2013). BT ve PZT malzemeleri sinterlenen bu malzemelere örnek olarak gösterilebilir. Geliştirilen bu yüksek dielektrik sabitine sahip malzemeler ile günümüzde kullanımı artarak devam etmektedir.

1969 yılına kadar piezoelektrik özellik gösteren malzemeler doğal ve yapay olarak üretilen seramik kristallerden oluşmaktaydı. Ancak 1969 yılında Kawai tarafından piezoelektrik ve piroelektrik özellik gösteren polivinilidin diflorür (PVDF) malzeme keşfedilmiştir. PVDF polimer olduğu için doğal ve yapay olarak üretilen seramik kristallere göre daha esnektir (Vijaya 2013).

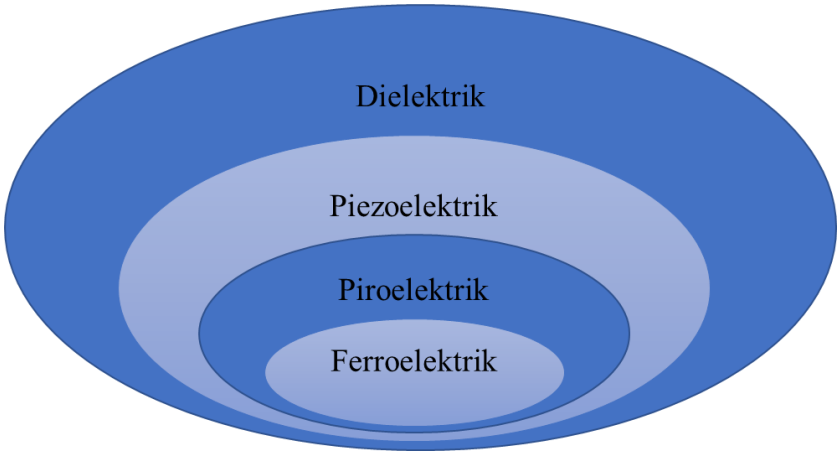
Piezoelektrik malzemeler üzerine yapılan çalışmalar günümüzde artarak devam etmektedir. Düşen piezoelektrik üretim maliyetleri neticesinde piezoelektrik malzemelerden enerji üretimi çalışmaları yürütülmektedir.

2.7. Dielektrik Malzemeler

Seramik ve polimer malzemelerde kutuplanma ve elektriksel yalıtkanlık özelliği görülmekle beraber metallerde bu özellik görülmemektedir. Elektrostatik alanlardan etkilenip elektriği iletmeyen malzemeler dielektrik malzemeler olarak isimlendirilmektedirler. Bu malzemeler yalıtkandır. Üzerlerine uygulanan elektriksel alan sonucu malzeme üzerinde yük birikmesi olarak şekil ve boyut değişikliği göstermektedirler (Akgün 2018).

Dielektrik malzemeler üzerlerine uygulanan kuvvete verdikleri karşılığa göre sınıflandırılıp piezoelektrik, piroelektrik ve ferroelektrik olarak üçe ayrılırlar. Ferroelektrik malzemeler kendiliğinden kutuplanma özelliği gösteren malzemelerdir.

Piezoelektrik malzemeler üzerlerine uygulanan kuvvet sonucu kutuplanma özelliği gösterirken piroelektrik malzemeler ise sıcaklık ile olan etkileşim sonucu kutuplanma özelliği olan malzemeleri temsil etmektedir. Piezoelektrik malzemeler mekanik, piroelektrik malzemeler termal, ferroelektrik malzemeler ise elektrik olarak şarj üretimi yapmaktadırlar (Donato 2014).



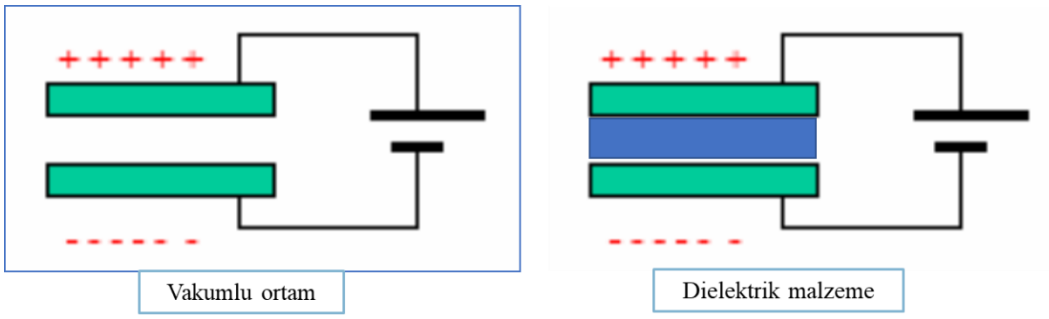
Şekil 2.24. Dielektrik malzemelerin sınıflandırılması (Donato 2014)

Tüm dielektrik malzemeler piezoelektrik özellik göstermezler. Dielektrik malzemelerin sahip oldukları özelliklere göre kullanım alanları mevcuttur. Yalıtkan özelliği yüksek olan bir malzeme kapasitör olarak kullanılabilirken piezoelektrik katsayıları yüksek bir malzeme algılayıcılarda, aktüatörlerde, dönüşütürücülerde kullanılabilmektedir. Malzemenin kristal yapısından dolayı piezoelektrik özellik ortaya çıkmaktadır. Dielektrik sabiti, küri sıcaklığı, dipol momenti, kutuplanma ve histerizis döngüsü dielektrik malzemelerin özelliklerini belirten önemli kavramlardır (Vijaya 2013).

2.7.1. Dielektrik sabiti (K)

Malzemelerin kutuplanma ya da elektrik yükü depolama yeteneği dielektrik sabiti olarak adlandırılmaktadır. Dielektrik sabiti vakumlu ortam içerisinde birbirine d mesafesinde paralel olarak yerleştirilen iki levha arasındaki tamamlanmamış açık sistem referans alınarak ölçülmektedir. Vakumlu ortamda levhalar arasında elektrik iletimi

olmamakla birlikte levhaların arasına dielektrik malzeme konulup gerilim uygulandığında plakalar elektrik yükü ile depolanmaktadır (Erdağ 2010).



Şekil 2.25. Vakumlu ortam ve dielektrik malzeme olan iletken plakalar (Erdağ 2010)

Dielektrik malzemenin yük depolama kapasitesi eşitlik 2.1'den bulunur.

$$Q=C.V \tag{2.1}$$

Formüldeki Q depolanmış yükü ifade eder, birimi coulomb'dur. V sisteme uygulanan gerilimdir, birimi volt'tur. C ise kapasitans olup, birimi Farad'dır. Dielektrik malzemelerin kapasitansı eşitlik 2.2 ile bulunmaktadır. "Ɛr" malzemenin elektrik geçirgenliğini ifade etmektedir. A ise alandır, metrekare olarak hesaba katılmalıdır.

$$C=\varepsilon_r.A/d \tag{2.2}$$

Dielektrik sabiti K ise malzemenin elektrik geçirgenliği ile vakum yapılmış ortamın elektrik geçirgenliğinin oranıdır (Erdağ 2010).

2.7.2. Küri sıcaklığı

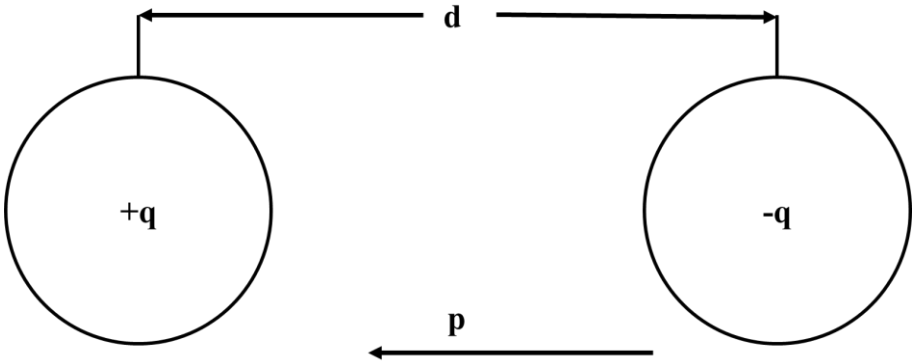
Malzemeleri oluşturan atomlar ve moleküler birbirlerine "atomlar arası bağ" denen kuvvetler ile bir arada durmaktadır. Atomlar ve moleküller farklı düzenlerde bulunabilmektedir. Bu atom düzenleri amorf yani düzensiz yapıda ya da düzenli yapıda bulunmaktadırlar. Düzenli yapılar kristal yapılar olarak da tanımlanmaktadırlar

metallerde, polimerlerde ve seramiklerde görülmektedirler. Düzensiz yapılara ise asal gazlar örnek verilebilmektedir.

Ferroelektrik malzemelerde kristalin yapıları farklı sıcaklıklarda oluşabilmektedir. Kristalin yapıların bir fazdan başka bir faza geçtiği sıcaklığa küri sıcaklığı adı verilmektedir. Küri sıcaklığı malzeme için kritik öneme sahip olmakla beraber, her malzeme için farklı bir değere sahip olan bu sıcaklık aşıldığında malzemenin kristal yapısında değişiklik olur ve piezoelektrik özelliğini kaybetmektedir (Erdağ 2010).

2.7.3. Dipol momenti

Zıt yüklü iki noktasal yükün belirli bir uzaklıkta bulunmasıyla oluşan sisteme dipol denmektedir. Dipol kelime kökeni olarak çift kutup anlamını taşımaktadır. Dipoller elektrik alan altında, elektrik alan yönüne paralel olarak maruz bırakılmalarına kutuplanma denmektedir. Elektrik alan altında dielektrik malzemelerin uygulanan elektrik alanı doğrultusunda elektrik yükleri değişmektedir. Dipol momenti ise doğrultusu ve şiddeti olan yönü negatiften pozitife olan bir vektördür. Yani zıt yüklerin arasında bir mesafe varsa ve merkezleri simetrik değilse dipol momenti oluşturmaktadırlar.



Şekil 2.26. Dipol moment oluşumu (Maksutoğlu 2010)

Elektrik dipol momenti eşitlik 2.3 teki şekliyle ifade edilmektedir. “q” yükü ifade eder, birimi coulomb’dur. “d” mesafeyi ifade eder, birimi metredir. “p” ise dipol momentini

ifade etmektedir. Eşitlikten de anlaşılacağı üzere birimi coulomb metre'dir (Vijaya 2013).

$$p=q.d \tag{2.3}$$

2.7.4. Polarizasyon (Kutuplanma)

Dielektrik malzemelerin üzerlerine elektrik alanı uygulandığında atomlar ve malzeme üzerindeki elektronlar elektrik alanı doğrultusunda yer değiştirler. Elektrik alanı doğrultusundaki dış yüzeylerde zıt yükler toplanır ve bu değişim potansiyel fark oluşuma sebep olmaktadır. Dielektrik malzemeler kalıcı elektrik dipol momente sahip ve kalıcı olmayan elektrik dipol momente sahip olarak ikiye ayrılırlar. Kalıcı olarak dipol momente sahip dielektrik malzemeler üzerine uygulanan elektrik alanı ile dipol momentleri hizalanabilir. Kalıcı olmayan dipol moment malzemeler üzerine elektrik alan uygulansa bile üzerine uygulanan elektrik alan kaldırıldıktan sonra dipol momentler eski haline dönebilmektedirler.

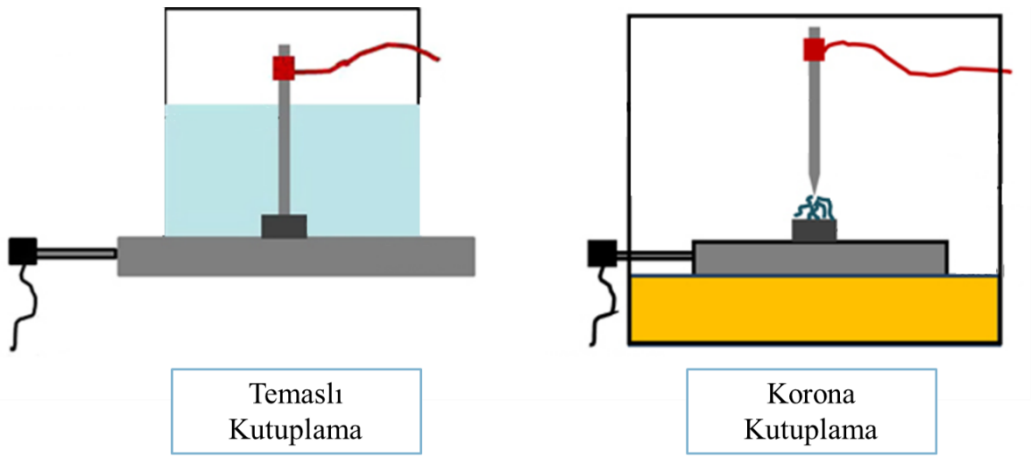
Ferroelektrik malzemelerinin atomik yapısal özelliklerinden dolayı simetrik olmayan yük merkezine sahip oldukları için birim hücrelerinde dipol momenti mevcuttur. Malzeme içerisinde bulunan dipol momentlerinin yönleri birbirinden farklıdır ve piezoelektrik özellik gösterebilmesi için elektrik alana maruz bırakılarak dipol momentlerin yönlendirilmesi sağlanır. Bu işleme kutuplanma (polarizasyon) denmektedir. Uygulanan elektrik alan büyüklüğü malzemeye göre değişmekle beraber malzeme üzerinden elektrik alan kaldırılsa bile dipol momentlerin yönü büyük ölçüde değişmez (Korkmaz 2015).

Piezoelektrik özellik ancak net dipol momenti olduğunda mevcuttur. Net dipol momentinin oluşması için malzemenin kutuplanması gerekmektedir. Dielektrik malzemenin toplam dipol momenti malzeme üzerindeki tüm dipol momentlerin toplanmasıyla elde edilmektedir. Birim yüzey alan üzerindeki yük miktarına polarizasyon denemektedir (Vijaya 2013).

Kutuplanma işleminde malzemenin sıcaklığı önemlidir. Malzemeye göre değişen küri sıcaklığı altında sabit bir sıcaklığa kadar ısıtılan malzeme elektrik alanı altında

kutuplanma işlemine malzeme kutuplanma açısından doygunluğa ulaşana kadar tabi tutulur. Böylede dipol momentleri elektrik alanı boyunca yönlenirler. Piezoelektrik malzemelerin özelliklerini gösterebilmesi için kutuplanmaları gerekmektedir.

Kutuplama işleminde yaygın olarak kullanılan iki metot bulunmaktadır. Bunlar elektrot ile kutuplama ve korona kutuplamasıdır. Elektrot ile kutuplanma işleminde, malzeme elektrot ile sürekli temas halinde olup yalıtkan bir madde içerisinde (Silikon yağ) elektrik alanına maruz bırakılır. Uzun süre yüksek voltaja maruz kalan malzeme dielektrik bozulmaya uğrayabilir. Korona kutuplama işleminde ise malzeme elektrot ile temas halinde değildir. Malzeme sıcaklığı kürü sıcaklığı altında olacak şekilde ısıtıcı bir tabla yardımıyla yükseltilerek sabit tutulur. Malzemeye temas etmeyecek şekilde elektrot izole bir ortamda yüksek gerilimler uygulanarak havanın iyonlaşması ve yüksek gerilim arasında kalan malzemenin kutuplanması sağlanır. Malzemenin kutuplanma işlemi esnasında sıcaklığının küri sıcaklığına yakın olması kutuplanma performansına olumlu etki sağlamaktadır.

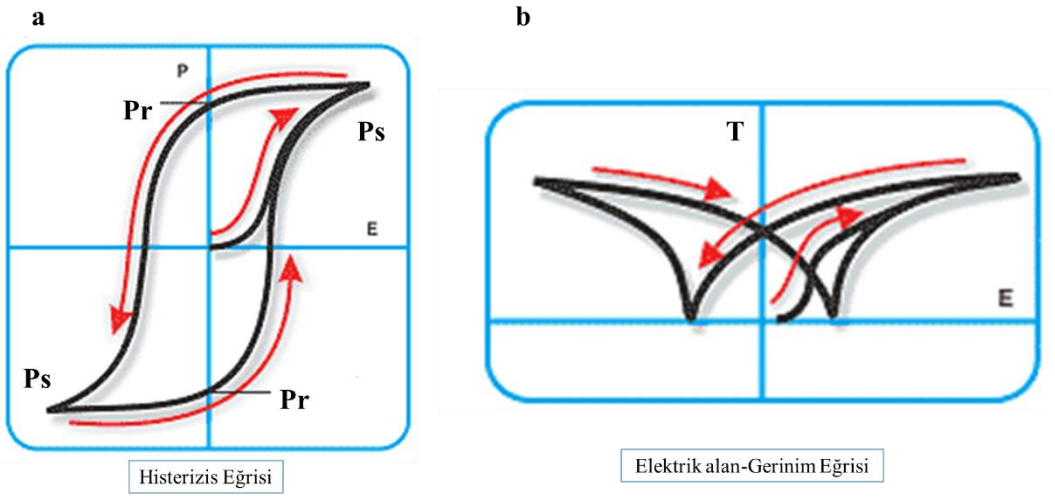


Şekil 2.27. Temaslı kutuplama ve korona kutuplama örneği (Banarjee ve ark. 2016)

2.7.5. Histerizis Çevrimi

Elektrik alan altındaki ferroelektrik malzemelerin davranışını Histerizis çevrimi göstermektedir. Malzeme elektrik alan etkisi altında kutuplanarak, elektrik alan doğrultusunda buluna zıt yüzeylerde zıt yükler oluşturur. Örnek bir histerizis eğrisi Şekil 2.25.a'da gösterilmiştir. Dikey P ekseni polarizasyonu, yatay E ekseni ise elektrik

alanı göstermektedir. Şekil 2.25.b'de ise piezoelektrik elemanın elektrik alanın uygulanması sonucu şekil değiştirmesi ve uygulanan elektrik alan kalkınca malzemenin eski haline dönmesi gösterilmiştir (Ersoy 2010).



Şekil 2.28.a. Histerizis eğrisi (P-E Eğrisi) **b.**Elektrik alan-gerinim eğrisi (Banarjee ve ark. 2017)

Ps: Maksimum doyum polarizasyonu (µ/cm²)

Pr: Kalıcı polarizasyon (µ/cm²)

T: Gerinim

E: Elekrik alan (kV/cm)

2.8. Piezoelektrik Etki

Piezoelektrik kelimesi kökeni Yunancaya dayanmakta olup 'piezo' baskı uygulamak, basınç anlamına gelmektedir. Piezoelektrik malzemeler ise üzerlerine uygulanan baskı, ivme gibi etkileri elektrik enerjisine çevirmektedir. Aynı zamanda piezoelektrik malzemelerin üzerine uygulanan elektrik enerjisi sonucunda mekanik bir çıktı üretmektedir. Bu dönüşüme piezoelektrik etki denmektedir. Piezoelektrik malzemelerin

iç yapısı kristal yapıda olup dipol momentlere sahiptir (Vijaya 2013). Piezoelektrik etki dolayısıyla piezoelektrik malzemelerin birçok kullanım alanı bulunmaktadır. Direkt piezoeelektrik etki ve dolaylı piezoelektrik etki olarak iki şekilde sınıflandırılabilir. Direkt piezoelektrik etki malzemenin üzerine basınç gibi bir etki uygulandığında şekil değiştirmesi olarak açıklanabilir. Algılayıcılarda, dönüştürücülerde ve üreteçlerde bu etki kullanılmaktadır. Dolaylı piezoelektrik etkide ise piezoelektrik malzeme üzerine elektriksel kuvvet uygulandığında şekil değiştirir (Vijaya 2013).

2.9. Piezoelektrik Malzemeler

1880 yılında Curie kardeşler tarafından keşfedilen piezoelektrik malzemelerden sonra birçok malzeme geliştirilmiştir. Bunların başında ilk üretilen kristal olan kuvars gelmektedir. Günümüzde piezoelektrik özelliklere sahip malzeme ihtiyacı büyük ölçüde yapay kristallerden karşılanmaktadır. Doğal piezoelektrik özelliği gösteren malzemelerin azalması ve ihtiyacın artması kaynaklı sentetik kristal üretimi artmıştır. Rochelle tuzu maddesinin piezoelektrik özelliği J. Valasek tarafından 1920'li yıllarda keşfedilmiştir. Bu malzeme suda çözünebildiği için kullanım alanı sınırlıdır. 1935'li yıllarda yapay olarak sentetik piezoelektrik malzemeler üretilmeye başlanmıştır. Bunlar amonyum ve potasyum tuzları (KDP), dipotasyum tartarat (DKT), etilen diamin tartarat (EDT) ve lityum sülfat monohidratdır. Yapay kuvarslar geliştirildikten sonra belirtilen bu malzemelerin birçoğu tercih edilmemektedir. Günümüzde lityum niyobat ve alüminyom fosfat tercih edilmektedir. Sentetik yapay piezoelektrik malzemelerin keşfi yeni çalışma ve uygulama alanları oluşturup piezoelektrik cihazların geliştirilmesini sağlamıştır (Tichy 2010). Piezoelektrik özellikli malzemeler 4 alt grupta incelenebilir. Bunlar piezoelektrik kristaller, piezoelektrik seramikler, piezoelektrik polimerler piezoelektrik kompozitlerdir.

2.9.1. Piezoelektrik kristaller

Kristal yapıdaki piezoelektrik malzemeler kararlı yapılarından dolayı algılayıcı sistemlerinde tercih edilmektedirler. Genel olarak kuvars, turmalin, lityum tantanat kullanılmakla beraber mikrofon uygulamalarında Rochelle tuzu kullanılmaktadır (Korkmaz 2015).

Kuvars (SiO_2): Silisyum dioksid ametal elementinin kristal hali kuvars olarak adlandırılmaktadır. Doğal olarak piezoelektrik özelliğe sahiptir. Kristalin üzerine uygulanan baskı ile kristal kutupları arasında gerilim oluşturmaktadır. Çevre şartlarından etkilenmez ve yüksek sıcaklıklara dayanabilmektedir. İyi mekanik özelliklere sahiptir (Günaydın 20017).

Turmalin: Borosilkat minerali turmalin olarak adlandırılmaktadır. Farklı renklerde bulunabilen turmalin kristali kelime anlamı olarak "renkli taş" anlamına gelmektedir. Genellikle basınç ölçer cihazlarda basınç algılayıcı sistem olarak kullanılır. Turmalin aynı zamanda piroelektrik bir malzemedir. Isıya maruz kaldığında kutuplar arasında gerilim oluşturma özelliği mevcuttur.

Şekil 2.29. Doğal piezoelektrik hammaddeleri (Günaydın 2007)

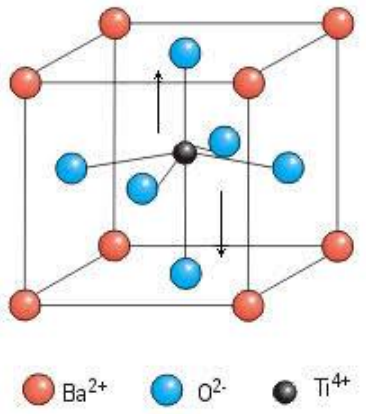
2.9.2. Piezoelektrik seramikler

Piezoelektrik seramikler genellikle aktüatör ve dönüştürücü uygulamalarında kullanılmaktadır. Toz halindeki seramik malzemelerden çeşitli şekillerde üretilebilmektedir. Kullanılan yaygın malzemeler PZT ve BT olarak belirtilebilir.

Kurşun zirkonat titanat (PZT): Günümüzde yaygın olarak elektronik cihazlarda kullanılan PZT, kurşun, zirkonat, ve titanat atomlarından oluşmaktadır. En yaygın ticari kullanıma sahip olduğu söylenebilir. 1952 yılında Tokyo Teknoloji Enstitüsü'nde geliştirilmiştir. Baryum titanat malzemeye göre daha üstün özelliklere sahip olduğu

söylenebilir. Yüksek sıcaklıklarda çalışabilir. Bu sebepli yüksek sıcaklığa sahip akışın olduğu uygulamalarda kullanılmaktadır. Otomotiv, deniz ve havacılık alanlarında algılayıcılarda kullanılmaktadır.

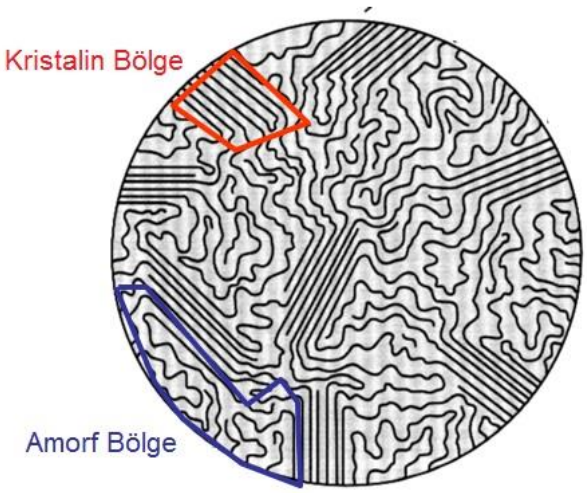
Baryum titanat: Mekanik ve kimyasal özellikleri kararlı olan baryum titanat piezoelektrik özellikleri açısından da üstün özellikler göstermektedir. Mikrofonlarda, algılayıcılarda ve aktüatörlerde kullanılmaktadırlar. Kimyasal formülü $BaTiO_3$ olarak belirtilmektedir. Erime sıcaklığı 1618℃'dir. Dielektrik sabiti 25℃'de 1350-1600'dür. Piezoelektrik özelliklerinden dolayı elektronik sanayinde yaygın şekilde kullnılmaktadır. Ancak içeriğindeki kurşun ve kurşun oksitin çevreye olan olumsuz etkilerinden dolayı son yıllarda çevre dostu malzemeler üzerine çalışmalar devam etmektedir (Kaya ve Koyuncu 2016).



Şekil 2.30. Baryum titanat yapısı (Kaya ve Koyuncu 2016)

2.9.3. Piezoelektrik polimerler

Piezoelektrik polimerler amorf ve kısmi kristalin yapıda bulunabilirler. Amorf yapıların yumuşak olmakla beraber çekme mukavemetleri ve yoğunlukları düşüktür. Kristalin yapıların çekme mukaveti, ergime sıcaklıkları amorf yapılara göre daha yüksek olup daha rijittiir. Kristalin miktarı polimerlerin piezoelektrik özelliğini belirleyici etkiye sahiptir (Gusarov 2015).



Şekil 2.31. Polimer malzemelerde amorf ve kristalin yapı (Anonim 2016)

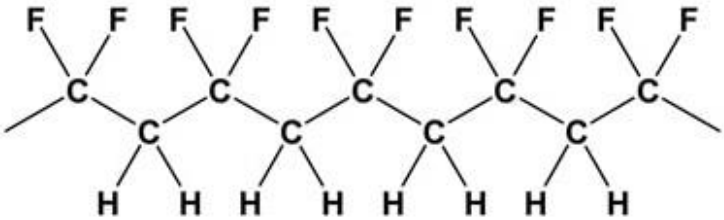
Polimer malzemeler üretim ve kullanım şartları değerlendirildiğinde seramik malzemelere göre daha avantajlı olduğundan, karmaşık şekillere sahip piezoelektrik uygulamaları için daha elverişlidir. Piezoelektrik polimer malzemeler diğer piezoelektrik malzemelerde olduğu gibi üzerine uygulanan gerilim sebebiyle şekil değiştirirler, yada üzerlerine uygulanan mekanik kuvvet neticesinde elektriksel çıktı üretirler. Piezoelektrik özellik gösteren keşfedilmiş ilk polimer polivinilidin diflorür (PVDF)'dür.

Polivinilidin diflorür (PVDF): Vinilidin diflorürün polimerizasyonu ile üretilir. Floropolimer bir malzemedir. Kimyasal çözücülere karşı dirençli bir yapısı olması dolayısıyla çeşitli kimyasallar içeren uygulamalarda membran, algılayıcı ve kaplama olarak kullnılmaktadırlar. Son yıllarda PVDF polimersi ve onun kopolimeri olan PVDF-TrFE üzerine çalışmalar yoğun şekilde yapılmakta olup dokunmatik algılayıcı, enerji hasadı ve dönüştürücü uygulamalarında yoğunlukla tercih edilmektedir.

Enerji hasadı, dokunmatik algılayıcı, ivme sensörü gibi uygulamalarda kullanılmasının sebebi polimer malzemelerin seramik malzemelere göre daha esnek ve darbelere karşı dayanaklı olmasıdır. Esnek olma özelliği sayesinde uzun süre kullanılabilirler.

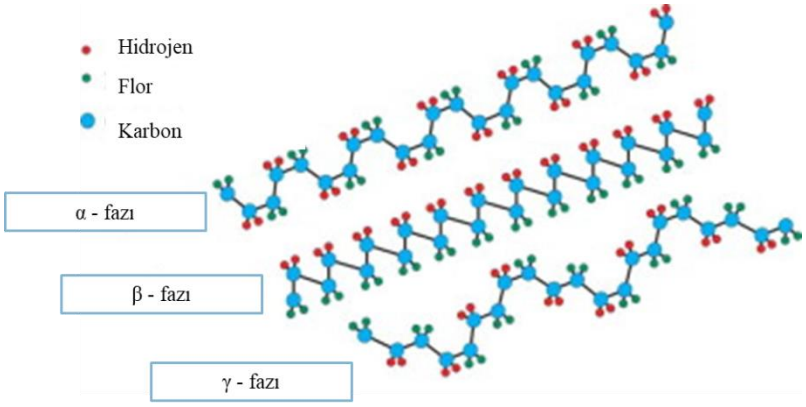
PVDF malzemesinin piezoelektrik özellikleri 1969 yılında Dr. Heiji Kawai tarafından keşfedilmiştir. 1971 yılında ise Bergman ve arkadaşları tarafından PVDF malzemenin piroelektrik özelliği keşfedilmiştir. Bu özelliklerin keşfedilmesinden sonra polimerler üzerine piezoelektrik çalışmaları artarak devam etmiştir (Vijaya 2013).

PVDF piyasada çeşitli formlarda olabilir. Bunlar toz ve pellet şeklinde olduğu gibi çubuk ve levha şeklinde de bulunabilir. PVDF malzemenin erime sıcaklığı; 170℃, küri sıcaklığı; 103℃, camsı geçiş sıcaklığı; 40℃ civarındadır (Akgün 2018). PVDF tekrarlanan bir monomer yapısı vardır. Karbon, flor ve hidrojen atomlarından oluşan bu yapı (-CF_2-CH_2-) karbon iskeleti şeklinde bir yapı oluşturmaktadır (Dargaville ve ark. 2005).



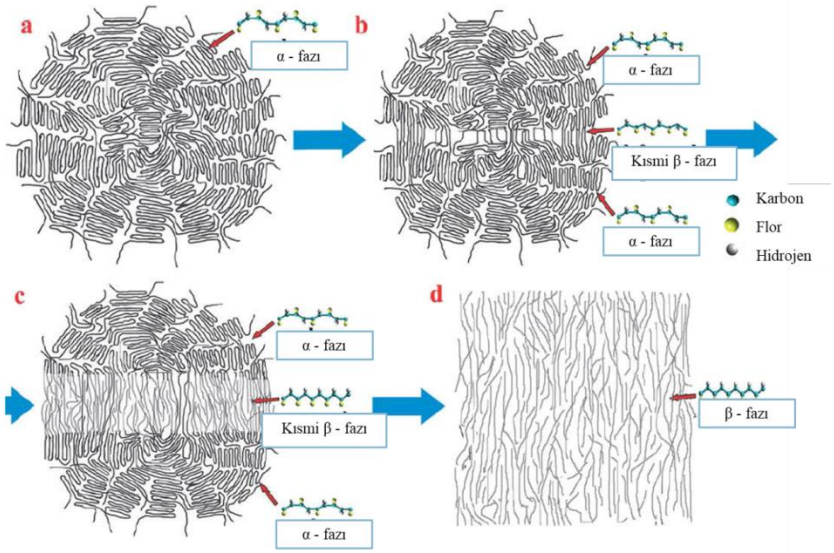
Şekil 2.32. PVDF malzemenin moleküler yapısı (Dargaville ve ark. 2005)

PVDF beş farklı kristal faz yapısında bulunabilmektedir. Bunlardan üzerinde en çok araştırma yapılanları alfa (α), beta (β), gama (γ) fazlarıdır.



Şekil 2.33. PVDF'nin alfa, beta ve gama fazlarındaki moleküler yapıları (Martins ve ark. 2013)

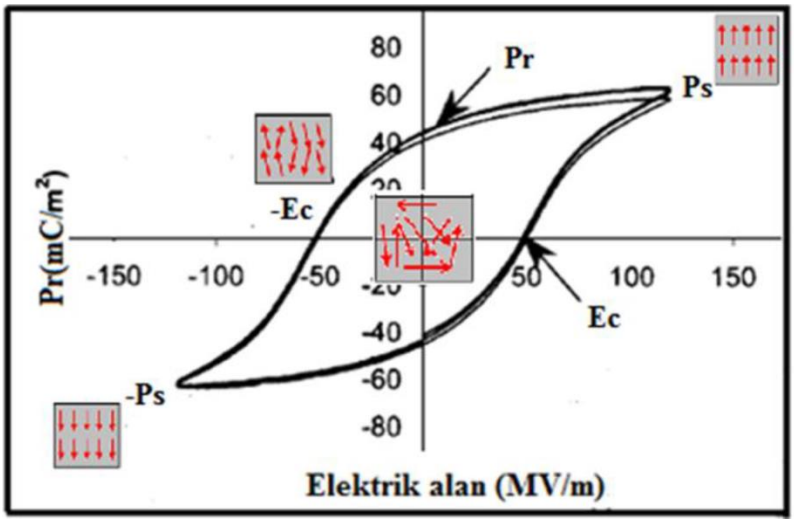
Beta, alfa ve delta fazlarında dipol momentleri mevcuttur. Molekül simetrik değildir. Dipol momentinin en yüksek olduğu faz beta fazıdır. PVDF malzemesinin piezoelektrik özellik gösterebilmesi için alfa fazı yapısında bulunan molekül diziliminin beta fazına geçmesi gerekmektedir. Bu moleküler faz dönüşümünü gerçekleştirebilmek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır ancak bunlardan en yaygın olarak kullanılanı mekanik gerdirme ile yapılan uygulamadır. Gerdirme yönünde malzeme içerisinde alfa fazındaki polimer zincirleri beta fazına geçmektedir (Gusarov 2015).



Şekil 2.34. PVDF malzemenin mekanik gerdirme ile alfa fazından beta fazına geçiş süreci (Li ve ark. 2014)

Diğer bir yöntem ise dışarıdan elektriksel alan uygulayarak malzeme içerisinde bulunan alfa fazındaki yapıların küri sıcaklığı altındaki bir sıcaklık değerinde beta fazına geçirilmesi ile mümkün olmaktadır. PVDF malzeme içim küri sıcaklığı 103℃'dir. Yapılan bu alfa fazından beta fazına dönüşüm işlemi 90℃ sıcaklık ve 50MV/m elektriksel alan altında yapılmaktadır. Bu işleme kutuplama (Polarizasyon) olarak adlandırılmaktadır. Oda sıcaklığında da kutuplama işlemi yapılabilmekle beraber çalışılan yüksek gerilim dolayısıyla malzeme silikon yağ içerisinde işleme tabi tutulmaktadır.

Polimerler için Elektrik Alan-Kutuplanma histerizis döngüsü aşağıdaki şekliyle gerçekleşmektedir. Zorlayıcı alan (Ec), Kalıcı kutuplanma (Ep) ve doygunluk kutuplanması gösterilmiştir. Bu değerler ferroelektrik polimer malzemeler arasında değişkenlik göstermekle beraber sıcaklığa ve uygulanan voltaja göre değişmektedirler. Malzeme üzerine maksimum kutuplama uygulandığında, dipol momentlerin yönü Ps noktasında aynıdır (Badalı 2015).



Şekil 2.35. PVDF için tipik ferroelektrik histerizis döngüsü (Harrison 2001)

PVDF malzemeye ait özellikler aşağıda verilmiştir.

Çizelge 2.1. PVDF’nin mekanik,termal, elektriksel ve piezoelektrik özellikleri (Gusarov 2015)

PVDF'nin mekanik, termal, elektriksel ve piezoelektrik özellikleri	
Mekanik Özellikler	
Yoğunluk	1,78 g/cm3
Gerilme direnci	20-50 Mpa
Young modülü	2000-4000 Mpa
Termal Özellikler	
Cam değişim ısısı	>-35℃
Erime noktası	175℃
Sıcaklık kararlılığı	80℃-100 ℃
Termal genleşme katsayısı	120-145 ppm / K
Elektriksel özellikler	
Dielektrik sabiti	6-13 (@ 1kHz-1MHz)
Piezoelektrik özellikler	
Gerinim katsayısı d33	15-33 pC/N
Gerinim katsayısı d31	6-23 pC/N
Gerinim katsayısı g33	0,14-0,33 Vm/N
Gerinim katsayısı g31	0,06-0,22 Vm/N
Piroelektrik katsayısı pQ	19-30 µC/m2K
Birleştirme katsayısı kt	10-15%

2.9.4. Piezoelektrik kompozitler

Piezoelektrik seramik malzemeler ve piezoelektrik polimer malzemelerin özelliklerinden faydalanarak fiziksel, kimyasal ve elektriksel açıdan üstün özellikli kompozit yapılı piezoelektrik özellikli malzemeler geliştirilebilmektedir. Polimerler, kauçuklar, epoksileri, akrilikler ve seramiklerle yapılan kompozitler üstün özellikler gösteren piezokompozit yapıların oluşturulmasında kullanılabilmektedirler. Çeşitli malzemelerin kullanıldığı kompozit yapıların d33 değerlerinde artış görülmekle beraber lutuplanma işlemi daha kolay gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede artan algılayıcı talebine daha zengin alternatifler sunulabilmektedir.

Çizelge 2.2. Piezoelektrik kompozit malzemelerin özellikleri (Baur ve ark. 2014)

Seramik	Polimer	d33
PTCa	Epoksi	22
PTCa	P(VDF-TrFE)	28
PTCa	Kauçuk	17-44
Pt	Akrilik	32
Pzt	PVDF	48
Pzt	P(VDF-TrFE)	10
(Pb,Bi)TiO3	Epoksi	41

2.10. Piezoelektrik Malzemelerin Kullanım Alanları

Elektromekanik dönüşümün olduğu her alanda piezoelektrik malzemeler kullanılabilmektedir. Basınç uygulandığında elektrik sinyali üreten piezoelektrik malzemeler elektriksel voltaj uygulandığında ise şekil değiştirip mekanik hareket üretmektedirler. Başka bir ifadeyle mekanik enerjiden elektriksel enerji, elektriksel enerjiden de şekil değişimi esaslı hareket enerjisi ürettikleri söynebilir. Piezoelektrik malzemelerin 4dört temel uygulaması vardır. Bunlar sırasıyla jeneratörler, sensörler, aktüatörler ve dösnüştürücülerdir. Piezoelektrik malzemelere doğrudan etki ile üzerine basınç, titreşim ve şok uygulandığında elektrik sinyali üretmektedir. Bu özelliği ile algılayıcılarda, jeneratörlerde ve üreteçlerde kullanılmaktadır. Dolaylı etki ile piezoelektrik malzemenin üzerine elektriksel enerji uygulandığında ise şekil değişikliği sebepli mekanik hareket elde edilir, bu bağlamda eyleyici, tetikleyici ve aktüatör olarak kullanılabilmektedir. Transduserler (dönüştürücüler) direkt ve ters piezoelektrik etki ile çalışır. Piezoelektrik malzemeler çeşitli birçok alanda uygulamaları vardır. Bunlar otomotiv, elektronik, sağlık, deniz ve hava araçları olarak sıralanabilir. Piezo elektrik malzemelerin tercih edilmesinin en büyük nedenlerinden biri istenen hızlı ve hassas algılamaya cevap verebilmesidir (Vijaya 2013).

Şekil 2.36. Piezo elektrik malzemelerin uygulama alanları

Piezoelektrik üreteçler, piezoseramikler, ark şeklinde kıvılcım oluşturan voltajlar üretebilmektedir. Genel olarak çakmaklarda, ocaklarda, sobalarda kısaca yakıt yakan cihazlarda ateşleyici olarak kullanılmaktadırlar. Piezoelektrik ateşleme sistemleri ucuz, basit ve küçüktürler. Ayrıca üretilen enerji kondansatörler aracılığıyla depolanabildiği için elektronik devrelerde kullanılabilmektedir.

Piezoelektrik algılayıcılar, basınç, kuvvet veya ivmeyi elektriksel sinyale çevribilmektedirler. Sensörler dışarıdan uygulanan elektriksel veya mekanik etkiye tepki vermektedirler.

Piezo tetikleyiciler, sistemi hareket ettiren veya kontrol eden motor olarak tanımlanabilir. Elektriksel bir sinyali harekete dönüştürür. Araç motorları üzerinde bulunan yakıt enjektörleri piezo tetikleyicilere iyi bir örnektir. Araç üzerinde bulunan elektronik kontrol ünitesinden gelen sinyale bağlı olarak motor silindirlerine gönderilecek yakıt miktarını ayarlamaktadır. Tepki süresi çok az olduğundan etkin yakıt kontrolü için enjektörler üzerinde piezo tetikleyici sistemler geliştirilmiştir.

Piezo dönüştürücüler, genellikle elektrik enerjisini ses gibi titreşim mekanik enerjiye dönüştürürler. Diğer bir yandan piezoelektrik etki dönüştürülebilir bir etki olduğundan

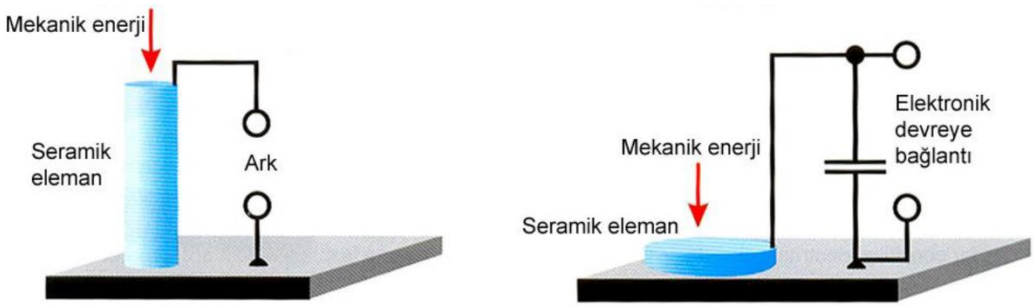
ses gibi titreşim enerjisini elektrik enerjisine de çevirebilmektedir. Buna en iyi örnek yaygın olarak kullanımda olan mikrofonlar ve hoparlör verilebilir.

Piezoelektrik etkinin en önemli uygulamaları dedektörlerde, konum ve ivme sensörlerinde, biyolojik uygulamalarda, kimyasal analizlerde, otomotivde, havacılıkta, sağlık sektöründe ve tahribatsız muayenelerdir. Piezoelektrik teknolojisinin gelişmesiyle birlikte bu malzemelerin kullanım alanı genişlemekte ve yaygınlaşmaktadır (Tichy 2010).

2.10.1. Piezoelektrik jeneratörler (Üreteçler)

Basınç, titreşim gibi mekanik etki altında piezoelektrik malzemeler elektrik enerjisi üretebilmektedir. Üzerine uygulanan etki ile gerilim üretmektedir. Üreteç olarak kullanılan piezoelektrik malzemeler basit ve küçük oldukları için elektronik devreler için oldukça avantajlıdır.

Piezoelektrik üreteçler tek katmanlı ve çok katmanlı olarak ikiye ayrılmaktadır. Tek katmanlı piezoelektrik üreteçler elektrik enerjisini hızlıca yüksek voltaj düşük akım olacak şekilde serbest bırakmaktadır. Bu yüzden ateşleme sistemleri olarak kullanılabilmektedirler. Çok katmanlı piezoelektrik üreteç sistemlerinde ise yüksek akım düşük voltaj üretilebilmektedir. Bu sebeple mikro elektromekanik sistemlerde güç kaynağı olarak elektromanyetik etkileşim olmaksızın kullanılabilmektedir.



Şekil 2.37. Çok katmanlı piezoelektrik seramik ile ark üretimi ve tek katmanlı piezoelektrik seramik ile şarj üretimi (Tıkız 2010)

Piezoelektrik üreteçler sahip oldukları elektriksel potansiyel sebebiyle bir çok alanda uygulama örnekleri geliştirilebilir. Çevredeki her türlü hareket üreteçler için kaynak olarak kullanılabilir bunlar insanların hareketi, araçların yollarda oluşturduğu titreşim gürültü olabilir.

Piezoelektrik malzemeler ile kendi enerjisini bir kısmını üretebilecek el feneri, dizüstü bilgisayarı, cep telefonu gibi cihazlar tasarlanabilir. Ayrıca trafik içerisinde yollara konulacak piezoelektrik üreteçler ile araç ve yaya trafiğinden meydana gelen titreşimler vasıtasıyla elektrik üretilmesi üzerine araştırmalar ve çalışmalar yürütülmektedir.

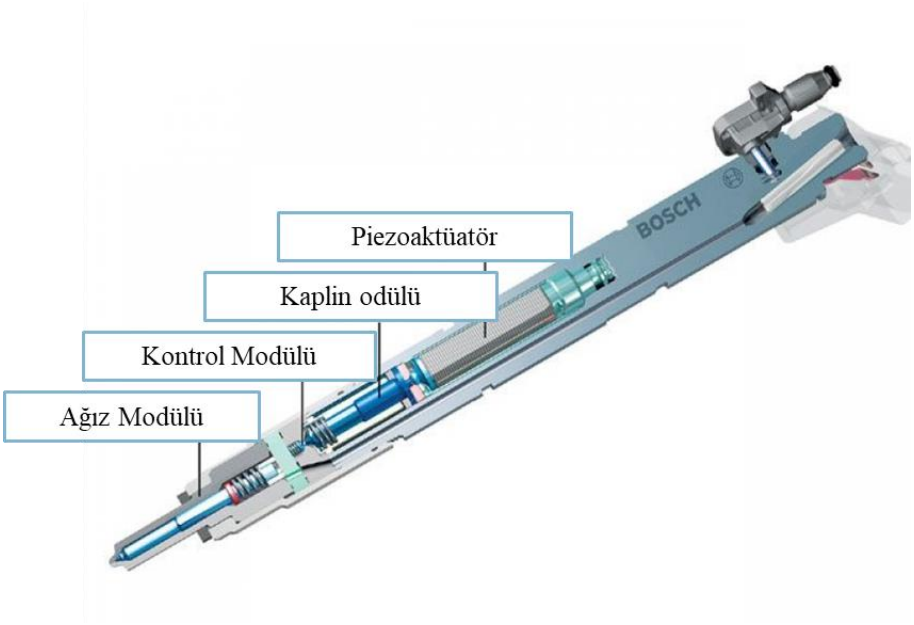
Günümüzde enerjiye olan talep sürekli arttığı için piezoelektrik özelliğe sahip üreteçlerin önemi artmaktadır. Bir anlamda geri dönüşüm olarak da değerlendirilen bu üretim şekli çeşitli yollarla harcanan bu enerjinin geri kazanımı olarak değerlendirilmektedir. Son yıllarda gündemde büyük yer tutan elektrikli araçların satış rakamları giderek artmaktadır. Bu araçların en büyük problemlerinin başında menzil yer almaktadır. Menzil ise aracın enerji deposu olan akünün kapasitesine bağlıdır. Menzilin artırılması yönünde araç ağırlığını azaltma ve batarya verimliliğini arttırma çalışmaları yapılmakla beraber harcanan enerjinin piezoelektrik üreteçler yardımıyla geri kazanımı mümkün olabileceğinden piezoelektrik üreteçler otomotiv alanında da büyük önem sarf etmektedir.

2.10.2. Piezoelektrik aktuatörler (Tetikleyiciler)

Tetikleyici olarak da adlandırılan piezoelektrik aktuatörler, üzerlerine uygulanan elektrik enerjisi ile birlikte şekil değişikliği gösterirler. Bu özelliği ile düşünüldüğünde bir tür motor olarak değerlendirilebilmektedir. Çünkü elektrik enerjisini kullanarak mekanik hareket elde etmemize olanak sağlarlar. Piezoelektrik aktüatörler yüksek hassasiyete sahip oldukları için yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda kullanılabilmektedirler. İki tip piezeelektrik aktüatör bulunmaktadır. Bunlar yığın ve şerit aktüatörler olarak adlandırılmaktadırlar.

Yapıları gereği yığın aktüatörlerde yer ve şekil değiştirme azdır ancak etki kuvveti yüksektir. Şerit aktüatörlerde ise yığın aktüatörlerin tam tersine yer ve şekil değiştirme çoktur ancak etki kuvveti düşüktür.

Piezo aktüatörler otomotiv alanında motor üzerinde bulunan yakıt sistemi parçası olan enjektörlerde kullanılmaktadır. Yüksek hassasiyet gerektiren bir uygulama olduğu için enjektörlerde piezoaktüatörler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Aracın anlık ihtiyaçlarına uygun olarak araç elektronik kontrol ünitesinden gelen bilgiyle beraber piezoaktüatör üzerine uygulanan 110-150 voltluk bir gerilimle hassas bir şekilde 0,03 mm ye kadar enjektör ucunun açıklığı kontrol edilebilmektedir. Bu hassas kontrol özelliği sayesinde araç yakıt tüketim değerleri düşürülebilmektedir. Böyle çevreye olan karbon salınım etkileri de azaltılmaktadır.



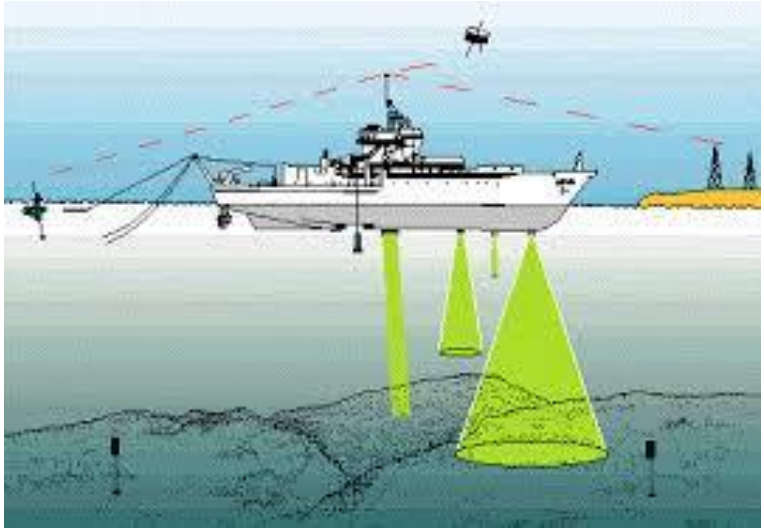
Şekil 2.38. Piezoenjektör örneği (Anonim 2017)

2.10.3. Piezoelektrik tranduserler (Dönüştürücüler)

Enerjinin bir formdan diğerine dönüştürülmesi işlemini dönüştürücüler yapmaktadır. Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine ya da elektrik enerjisinden mekanik enerjiye dönüşüm piezoelektrik dönüştürücüler yardımıyla yapılabilmektedir. Piezoelektrik dönüştürücüler elektrik enerjisinden ultrasonik titreşimler üretebildiği gibi ses

dalgalarını da elektrik enerjisine çevirebilmektedirler. Bu sayede çeşitli uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Piezoelektrik dönüştürücüler sıvıların atomize edilmesinde, plastiklerin birbirine kaynak edilmesi işleminde, medikal uygulamalarda, temizlemede kullanılmaktadır. Genellikle kurşun zirkanat titanat, kompozitlerde ve piezopolimerlerde kullanılmaktadırlar.

Ultrasonik titreşimler sonar cihazlarında yer belirleme ve mesafe ölçme işlemleri için kullanılmaktadır. Sonar cihazları denizde balık sürülerinin yerlerini, deniz altı taramasında, denizaltı tespitinde büyük önem taşımaktadır. Yüksek frekansta üretilen ses dalgaları deniz altında ilerlerken bir engel ile karşılaştığında geri yansıyarak yabancı cisim tespitine olanak sağlamaktadır. Bu şekilde deniz altı tehditlerin tespit edilmesi sağlanmaktadır. Savaş kaynaklı geliştirilen bu teknoloji sağlık alanında da ultrasonografinin gelişmesine sebep olmuştur (Silverman 2016).

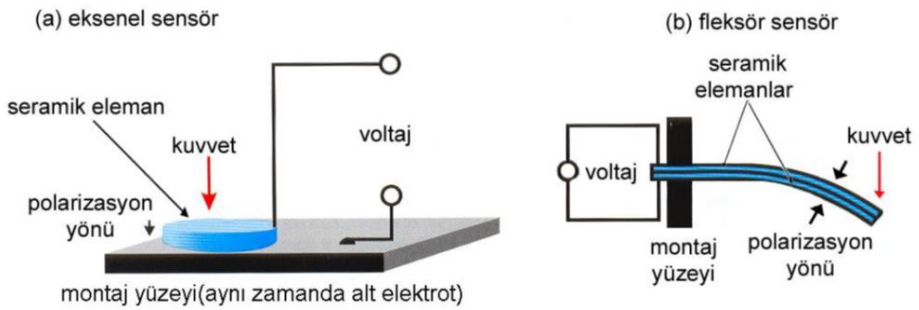


Şekil 2.39. Su altı sonar uygulaması (Anonim 2005)

2.10.4. Piezoelektrik sensörler (Algılayıcılar)

Sensör kelimesi ingilizce kökeni dikkate alınarak düşünüldüğünde algılayıcı anlamında kullanılmaktadır. Çeşitli amaçlarla kullanılan algılayıcılar olmakla beraber gün geçtikçe her alanda kullanılmaya devam etmektedir. Algılayıcılar mekanik, kimyasal, fiziksel,

termal değişiklikleri algılayarak bir çıktı üretilebilmesi için kontrol sistemine girdi sinyali sağlamaktadırlar. Gelişen teknoloji ve gereklilikler ile birlikte otomotiv sanayinde araç üzerinde birçok algılayıcı kullanılmaktadır. Vuruntu algılayıcısı, yakıt seviye algılayıcısı, hava yastığı algılayıcısı, oksijen algılayıcısı, sıcaklık algılayıcısı gibi birçok örnek verilebilir. Değişen gerekliliklere göre algılayıcılar çeşitli şekillerde bulunabilir (Küre, bar, silindir, disk.). Gün geçtikçe kullanılan algılayıcı sayısı artmaktadır. Piezoelektrik algılayıcılar doğrudan etki mantığına göre üzerlerine gelen direk mekanik etkiyi elektriksel çıktıya dönüştürürler. Oluşan bu elektriksel çıktı araç kontrol ünitesi vasıtasıyla değerlendirilerek kullanılmaktadır. Piezoelektrik algılayıcıları dört alt gruba ayırabiliriz. Eksenel kuvvet algılayıcısı, fleksör algılayıcısı, piezoelektrik ivme algılayıcısı, piezoelektrik titreşim algılayıcısı.

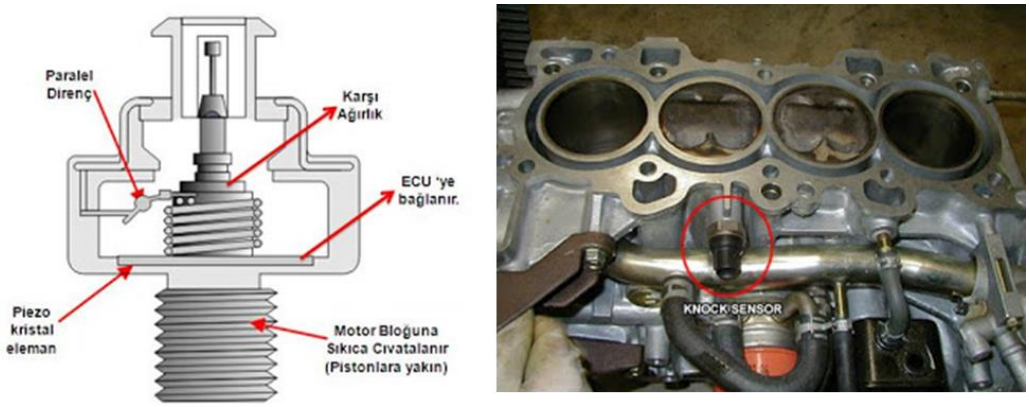


Şekil 2.40. Piezoelektrik algılayıcı örnekleri a) Eksenel algılayıcı b)Fleksör algılayıcı (Türker 2009)

Eksenel yapıdaki algılayıcılara kuvvet algılayıcıları ve ivmelenme algılayıcıları örnek verilebilir. Eksenel yapıdaki algılayıcılar kutuplanma yönündeki uygulanan kuvvetleri algılarlar ve bu yönde sinyal oluşturmaktadırlar. Bu yüzden eksenel algılayıcılar d33 algılayıcıları olarak da tanımlanmaktadır (Günaydın 2007). Yapılarına göre tek elemanlı ve çok elemanlı piezoelektrik algılayıcılar olarak ikiye ayrılmaktadırlar.

Motor devir hızı ve titreşim gibi değerlerin ölçülmesinde eksenel yapıda olan piezoelektrik algılayıcılar kullanılmaktadır. Algılayıcını yapısı genellikle yüksek yoğunluklu iki kütle arasındaki piezoelektrik elemandan oluşmaktadır. İvmelenme

esnasında kütleler dolayısıyla piezoelektrik malzeme üzerine uygulanan kuvvet ölçülür (Türker 2009). Araç üzerinde bulunan motorun sağlıklı çalışıp çalışmadığının tespiti için vuruntu algılayıcıları kullanılmaktadır. Vuruntu algılayıcıları motor üzerindeki pistonlardan herhangi birinde problem olduğunda olağan dışı titreşim algılandığı için araç kontrol ünitesine çıktı oluşturarak aracın yüksek maliyetli zarar görmesini engellemektedir.

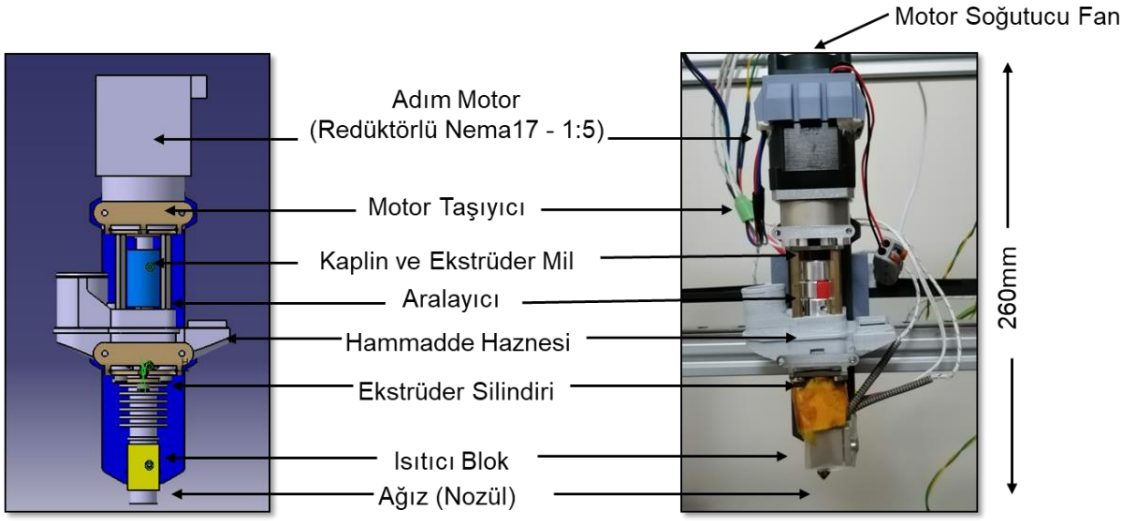


Şekil 2.41. Motor vuruntu sensörü (Anonim 2001)

3. MATERYAL VE YÖNTEM

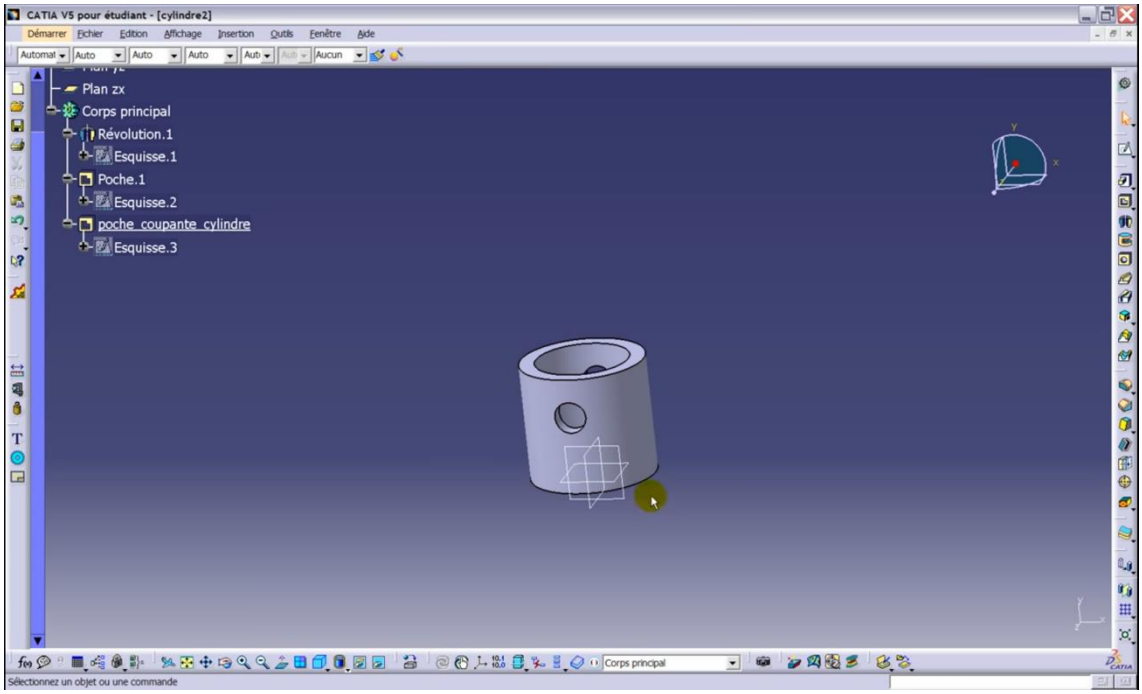
3.1. Granül Ekstrüder Tasarımı ve Prototip İmalatı

Bu tez çalışmasında 3B yazıcılar için masaüstü kullanılabilen FDM cihazları üzerine bağlanabilecek termoplastik granül ekstrüderi tasarlanıp prototip imalatı gerçekleştirilmiştir. Şekil3.1.'de model tasarımı ve prototipi görülmektedir.



Şekil 3.1. Granül ekstrüder tasarımı ve prototipi

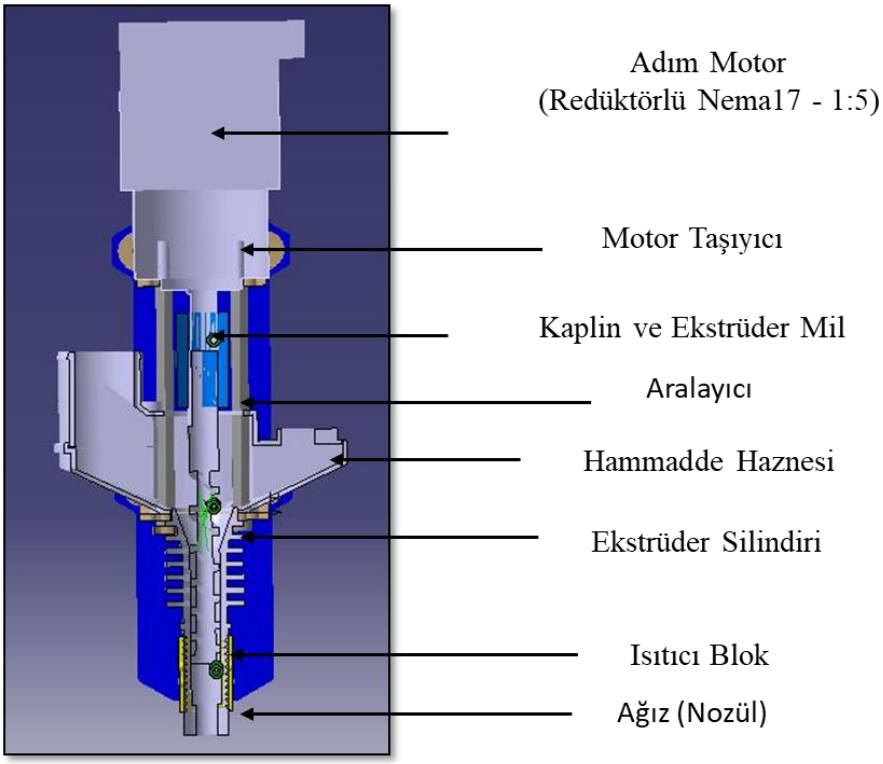
Tasarım sürecinde Dassault Systems firmasının geliştirmiş olduğu bilgisayar destekli tasarım programı 'CATIA® v5R19' kullanılmıştır. CATIA® programının tercih edilme sebebi, sahip olduğu detaylı katı modelleme özellikleri sunmasıdır. Bu program ile masaüstü 3B yazıcı üzerinde kullanılabilecek granül ekstrüder ve bağlantı parçaları tasarlanmıştır. Tasarım sürecinde programın katı modelleme modülü kullanılmıştır. Şekil 3.2.'de tasarım programı ara yüzü görülmektedir.



Şekil 3.2. Catia V5R19 tasarım programı katı modelleme modülü

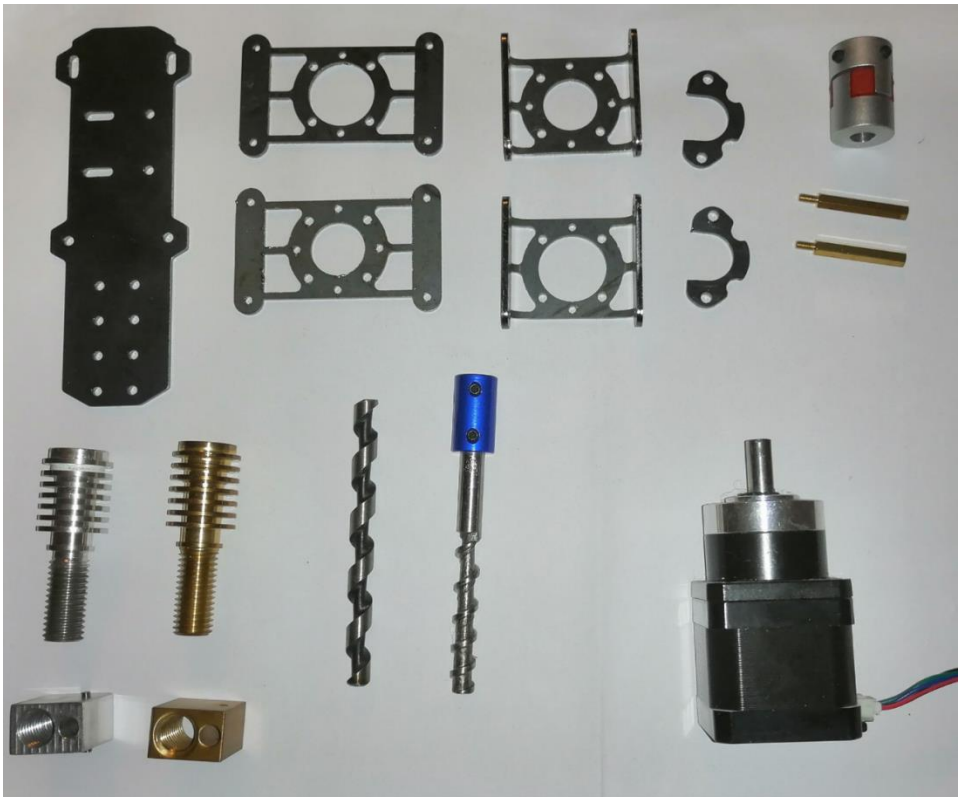
Tasarımı yapılan granül ekstrüderin, masaüstü 3B yazıcıda kullanılabilmesi için ağırlık ve boyut gibi temel kısıtlar mevcuttur. Ekstrüder tasarımı gerçekleştirilirken bu kısıtlar dikkate alınmıştır. 3B yazıcı üzerinde bulunan filament beslemeli ekstrüderin yerine tasarımı yapılan granül ektsrüderin kullanılabilmesi için 3B yazıcı üzerinde çeşitli değişikliklerin yapılması gerekmiştir. Granül ekstrüder filament beslemeli ekstrüdere göre daha ağır olduğundan, ekstrüderi taşıyan x ve z eksenleri lineer kızaklı ray ve rulman ile desteklenmiştir.

Tasarımı yapılan ekstrüderi oluşturan bileşenler ve ekstrüderin kesit görüntüsü Şekil3.3.'de görülmektedir. Bileşenler arasındaki en önemli parçalar ekstrüder silindiri ve milidir. Hammadde haznesi içerisinde bulunan granül haldeki malzeme ekstrüder mili yardımıyla silindir içerisinden sıkıştırılarak ittirilir, ısıtıcı blok yardımıyla ısıtılan silindir içerisindeki malzeme sıkıştırılarak ağız kısmında tabla üzerine bırakılmaktadır.



Şekil 3.3. Granül ekstrüder kesit görüntüsü ve bileşenleri

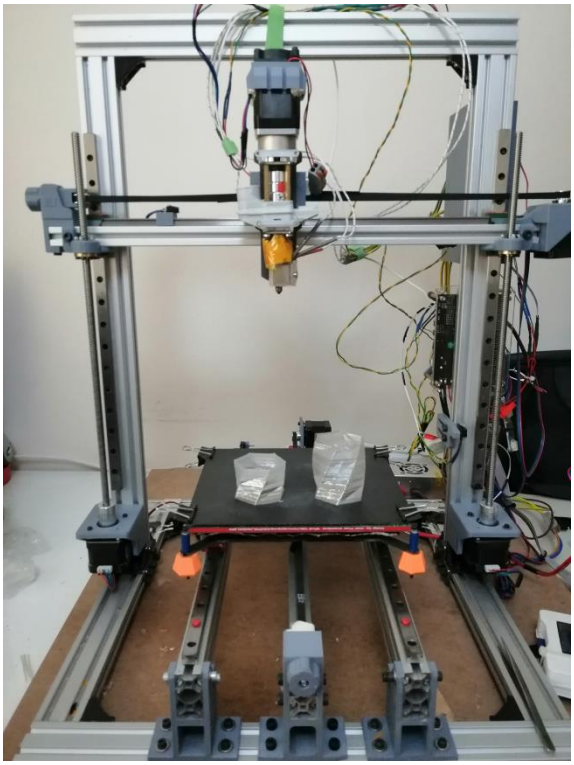
Ekstrüder üzerinde kullanılan parçalar seçilirken piyasada hazır olarak bulunabilecek parçalar dikkate alınmıştır. Özel olarak üretilen parçalar ise ekstrüder mili, ekstrüder silindiri, ısıtıcı blok ve ekstrüderin 3B yazıcı ile montajını sağlamak amaçlı saç parçalardır. Saç parçalar 3mm kalınlığında olup CNC lazer kesim ile KÖRÜSTAN A.Ş. de üretilmiştir. Isıtıcı blok, ekstrüder mil ve ekstrüder silindir ise LYN Mühendislik Şti. ‘de CNC tezgahlar ile işlenmiştir. Sistemin ufak boyutlarda olması için kullanılan ekstrüder mili 8 mm çapında işlenmiştir.



Şekil 3.4. Ekstrüder için üretilen parçalar

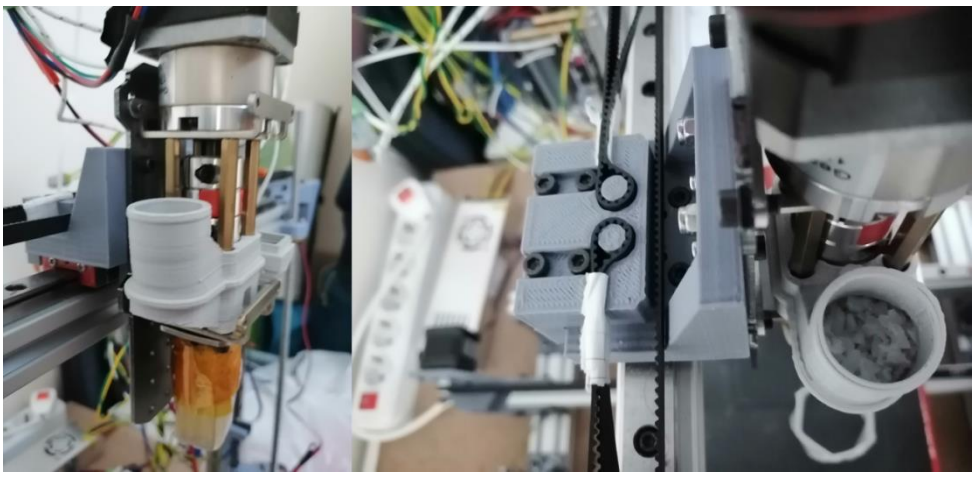
3.2. Granül Ekstrüderin 3B Yazıcıya Entegre edilmesi

Tasarımı gerçekleştirilip prototipi üretilen granül ekstrüder masaüstü 3B yazıcıya entegre edilmiştir. Granül ekstrüderin piyasada bulunan masaüstü 3B yazılarda kullanılan ekstrüderlere göre ağırlığı daha fazla olduğu için x ve z eksenlerinde lineer kızak ve rulman kullanılmıştır. Montajı tamamlanmış prototip granül ekstrüderin yaklaşık ağırlığı 1 kg dır. Granül ekstrüderin 3B yazıcının entegre edilmiş hali aşağıdaki şekilde görülmektedir.



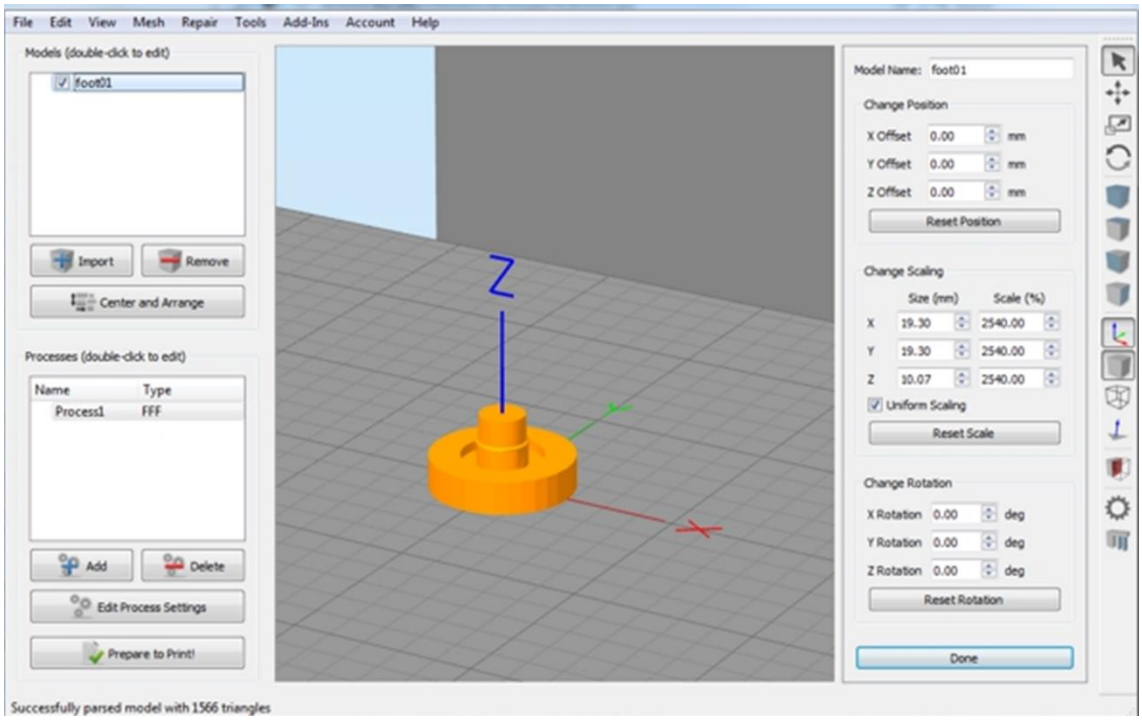
Şekil 3.5. Granül ekstrüder ve 3B yazıcının montajlanmış hali

Ekstrüderin 3B yazıcı üzerine montajı bir adaptör vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu adaptör PLA malzemeden 3B yazıcı ile üretilmiştir.



Şekil 3.6. 3B yazıcı ve granül ekstrüder montaj adaptörü

3B yazıcılar ile baskı almak için gerekli olan yazılımlar mevcuttur. Bu yazılımları iki gruba ayırabiliriz. Birinci grupta 3B yazıcının çalışmasını kontrol eden, basılacak objeye uygun makine kodlarını işleyen yazılımdır. Bu çalışmada açık kaynak kodlu olan Marlin yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım ile yazıcı donanımı ile alakalı parametreler kolaylıkla değiştirilebilmektedir. Granül ekstrüder üzerinde bulunan redüktörlü adım motoru ve ekstrüder mili kaynaklı ekstrüder ağzından çıkan birim malzeme miktarı çeşitli denemeler sonucu belirlenmiştir. Belirlenen bu çarpan Marlin yazılımı içerisinde parametreler değiştirilerek kullanılmıştır. Bu değer kullanılan adım motor sürücüsünün değerleri de göz önünde bulundurularak yaygın kullanımda olan masaüstü 3B yazıcıların kullandığı değerden 8 kat daha fazladır. İkinci grupta bulunan yazılımlar ise yazıcıdan bağımsız bilgisayar üzerinde kullanılan dilimleme programlarıdır. Bu çalışma kapsamında Simplfy3D dilimleme programı kullanılmıştır. Simplfy3D yazılımı yardımıyla, bilgisayar ortamında oluşturulan model kullanılan donanınım özelliklerine ve kullanılacak malzemeye göre modeli katmanlara ayırmaktadır. Ayrıca çıktı kalitesini etkileyebilecek başlıca özelliklerden olan ağız sıcaklığını, tabla sıcaklığını, yazım hızını, malzeme ekstrüzyon miktarını gibi temel parametrelerin ayarlanabilmektedir.



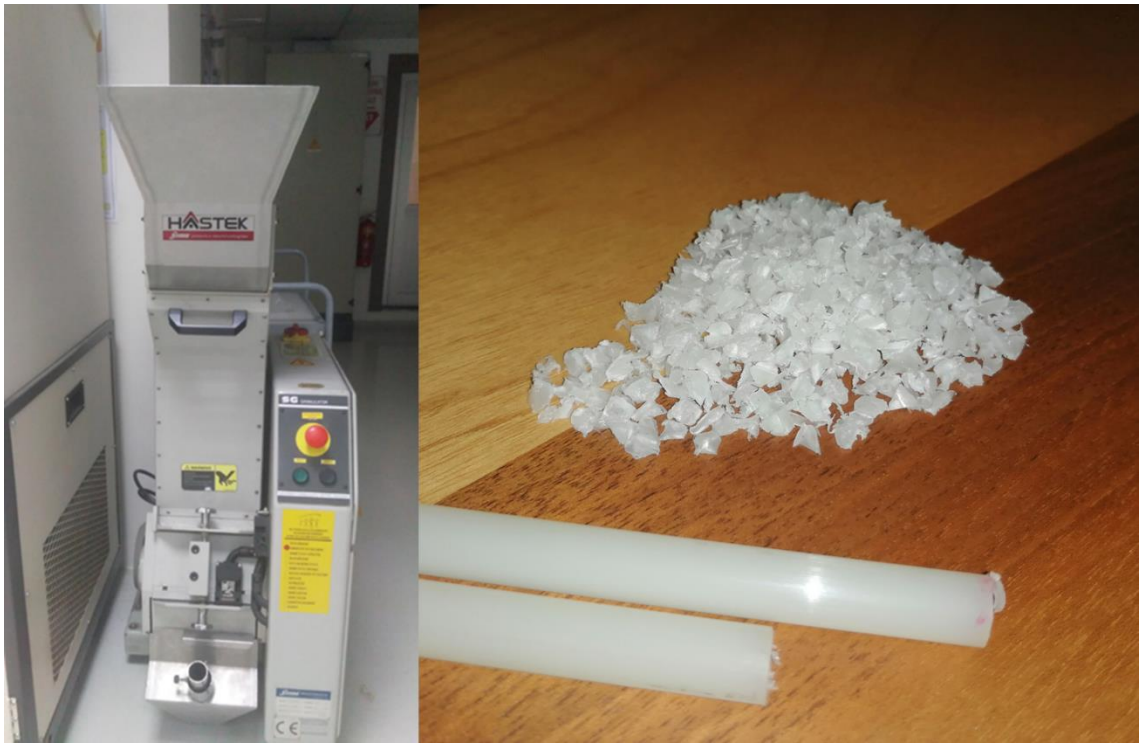
Şekil 3.7. Simplfy3D yazılımı çalışma ekranı

3.3. Granül Ekstrüder için Hammadde Hazırlama

Üretilen prototip ile ilk baskı denemeleri 1,75mm çapındaki PLA filamentin yan keski yardımıyla ufak parçalara kesilmesiyle elde edilen malzeme ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemle elde edilen parçaların boyutu 3-4 mm arasındadır. Sonrasında temin edilen PLA granülleri çalışmada kullanılmıştır. Şekil 3.7.'de kullanılan malzemeler görülmektedir.

Şekil 3.8. PLA hammade örnekleri

Daha sonrasında PVDF malzeme için piyasada bulunan PVDF çubukları, Oyak-Renault Otomobil Fabrikaları A.Ş. malzeme laboratuvarında bulunan granülatör yardımıyla elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan granülatör Şekil3.8.'de görülmektedir.



Şekil 3.9. Granülatör ve PVDF çubuklardan elde edilen granül

Granülatör vasıtasıyla işlemden geçmiş çubuklar sonrasında 3 mm genişliğinde granüller elde edilmiştir. Bu granüller üretilmiş olan prototip ekstrüder için uygun ölçüdedir.

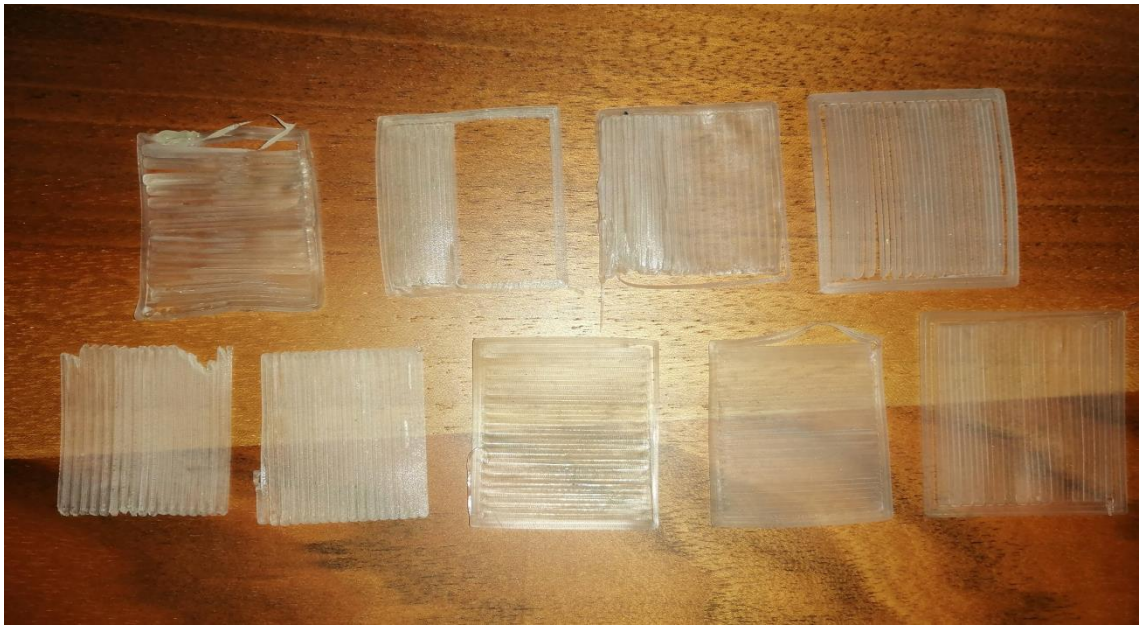
4. BULGULAR

Üretilen prototip ekstrüdere sahip 3B yazıcı ile PLA ve PVDF hammaddeleri kullanılarak baskılar alınmıştır. Üretilen prototip ekstrüder maksimum 240 °C sıcaklığa erişebilmektedir. Bu sıcaklık birçok polimerin basılmasına olanak sağlamaktadır. Eğer daha yüksek sıcaklıklara çıkılmak istenirse ekstrüder üzerinde izolasyon ve tasarım değişiklikleri yapılması gerekmektedir.

Ekstrüder üzerinde kullanılan milin dönmesini sağlayan redüktörlü adım motorun baskı sırasında ısındığı ve sıcaklığının arttığı gözlemlenmiştir. Bu sebeple motorun aktif olarak 12 volt fan ile soğutulması sağlanmıştır. Kullanılan redüktörlü motor dolayısıyla baskı hızı diğer 3B yazıcılara göre oldukça düşük kalmaktadır. Yapılan denemeler sonucu ekstrüder hareket hızı en uygun 20 mm/sn olarak tespit edilmiştir. Baskı hızının yükseltilmesi için tasarım üzerinde değişiklikler yapılmalıdır. Baskı hızını arttırmak için daha güçlü bir adım motoru ve daha uzun ekstrüder mili kullanılmalıdır.

PLA malzeme ile alınan baskılar şekil ve ölçü uygunluğu olarak tatmin edici seviyedir. Ayrıca PLA malzemenin çekme oranı genel olarak kullanılan diğer malzemelere göre düşük olmakla beraber baskı kolaylığı sağlamaktadır.

Baskı denemesi yapılan diğer bir malzeme PVDF malzeme olmakla beraber, baskı denemeleri sırasında malzemenin baskının yapıldığı ısıtıcı tabla üzerine yapışmasında problemler yaşanmıştır. PLA malzemenin aksine PVDF malzemenin çekme oranı yüksek olduğundan baskının tabla üzerine basımı sırasında kalktığı ve baskının iptal edilmesine sebebiyet verdiği görülmüştür. PVDF malzemenin çekme oranı %4 seviyesinde olmakla beraber, ısıtıcı tabla üzerine baskısını mümkün kılmak amaçlı tabla sıcaklığı 100 °C seviyesine çıkarılmıştır. Bu sıcaklık seviyesinde denemeler sonucu çeşitli baskılar alınabilmiştir. Alınan baskıların kalınları genel olarak 0,2 mm ağırlıklıdır.



Şekil 4.1. PVDF malzeme baskı örnekleri

Ancak bu tez kapsamında çalışılması planlanan piezoelektrik özelliğe sahip PVDF algılayıcı üretimi için yeterli boyut ve şekil olgunluğuna erişilememiştir. PVDF malzeme ile baskı alabilmek için tabla sıcaklığını daha yüksek sıcaklık değerlerine getirilmesi gerekmektedir. Üretilen 3B yazıcı üzerindeki ısıtıcı tablanın ulaşabileceği maksimum sıcaklık 100 °C olduğu için daha yüksek sıcaklık değerlerinde baskı denemesi yapılamamıştır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Son yıllarda oldukça yaygın kullanıma sahip olan 3B yazıcıların önemi gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle tasarım ve üretim maliyetlerini düşürmekle beraber proje zamanlarını kısaltmaktadır. Bu kapsamda otomotiv, havacılık, sağlık ve mühendislik alanlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında 3B yazıcı üzerinde kullanılabilecek granül ekstrüder tasarımı yapılıp prototip imalatı gerçekleştirilmiştir. Üretilen ekstrüder ile PLA ve PVDF malzemeleri kullanılarak baskı denemeleri gerçekleştirilmiştir. FDM tekniği kullanarak baskı yapan bu yazıcının, yaygın olarak kullanımda olan 3B yazıcılara göre daha yavaş olduğu tespit edilmiştir.

Ancak filament beslemeli ekstrüderlere göre granül beslemeli ekstrüder ağzından daha fazla malzeme çıkışı sağlanabilmektedir. Bu yönüyle üretilen prototip ekstrüderin büyük boyutlu baskılar için ideal olduğu görülmektedir.

Tez kapsamında üretilmesi planlanan algılayıcılar, 3B yazıcının kısıtları sebebiyle istenilen olgunlukta gerçekleştirilememiştir. Algılayıcı olarak kullanılması planlanan PVDF baskıların piezoelektrik özellik gösterebilmesi için polarizasyon işlemine maruz kalması gerekmektedir.

Bu çalışmanın devamında PVDF malzemenin yüksek çekme oranı dolayısıyla, 3B yazıcı ile baskı esnasında sunduğu olumsuz etkileri indirgemek için yüksek sıcaklığa çıkabilen bir ısıtıcı tabla kullanılması ön görülmektedir. Ayrıca baskısı alınan çıktıların polarizasyon işlemine tabi tutularak piezoelektrik özelliklerinin incelenmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

Akgün, M., 2018. Piezoelektrik özellikli, polimer nanokompozit malzeme geliştirilmesi ve titreşim sensörü olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi,* Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

Aniwaa, A., 2017. Categories of 3D printing technologies and processes. http://www.aniwaa.com/3d-printing-technologies-and-the-3d-printing-process/ -(Erişim tarihi: 26.09.2017)

Anonim, 2001. Vuruntu sensörü nedir? Ne işe yarar? Arızası görevi. https://otomobilteknoloji.blogspot.com/2016/03/vuruntu-sensoru-nedir-ne-ise-yarar-arizasi.html/-(Erişim tarihi: 12.06.2017)

Anonim, 2005. Sonar. https:// https://www.wikiwand.com/tr/Sonar-(Erişim tarihi: 20.03.2019)

Anonim, 2011. Rapidfit+ using 3D printing to check mass produced parts. https://i.materialise.com/blog/en/rapidfit-using-3d-printing-to-check-mass-produced-parts/-(Erişim tarihi: 14.05.2019)

Anonim, 2014. Darwin https://reprap.org/wiki/Darwin-(Erişim tarihi:17.06.2019) Manufacturing Technologies, 63-106, Springer, New York.

Anonim, 2016a. Polimer malzemelerde camsı geçiş sıcaklığı ve erime sıcaklığı. http://fforkliftt.blogspot.com/2016/12/polimerlerde-cams-gecis-scaklg-tg-ve.html-(Erişim tarihi:16.06.2019)

Anonim, 2016b. Okullarda 3 boyutlu yazıcı kullanımı. https://www.artiboyut.com/index.php/tr/bilgi-bankasi/56-okullarda-3-boyutlu-yazici-kullanimi-(Erişim tarihi: 20.07.2019)

Anonim, 2017a. About Additive Manufacturing. http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/-(Erişim tarihi: 30.06.2017)

Anonim, 2017b. Piezo enjektör. https://arabalisozluk.com/piezo-enjektör 2017n/-(Erişim tarihi: 23.05.2019)

Anonim, 2018a. Webinar: Additive manifacturing in aerospace with DMLM. https://www.ge.com/additive/webinar/metal-additive-manufacturing-aerospace-(Erişim tarihi: 24.05.2019)

Anonim, 2018b. Ceramic 3D printing: additive manufacturing. https://matthey.com/products-and-services/precious-metal-products/ceramic-additive-manufacturing-(Erişim tarihi: 22.05.2019)

Anonim, 2019a. Audi expands 3D printed production for tooling. https://3dprintingindustry.com/news/audi-expands-3d-printed-production-for-tooling-153007/-(Erişim tarihi: 15.06.2019)

Anonim, 2019b. 3D printing with polymers: All you need to know. https://amfg.ai/2019/01/17/3d-printing-with-polymers-all-you-need-to-know/-(Erişim tarihi: 25.05.2019)

Arıkan, I., 2017. Tıpta 3D printer uygulamaları. https://www.fiyatimbu.com/blog/tipta-3d-printer-uygulamalari_210-(Erişim Tarihi: 22.06.2019)

Banarjee, S. Cook, K. Chennault, A. Du, W. Sundar, U. Halim, H. Tang, A. 2016. Piezoelectric and dielectric characterization of corona and contact poled PZT-epoxy-MWCNT bulk composites, State University, Fresno, California USA, Rutgers University, Piscataway USA

Baur, C. I., Apo, D.J., Maurya, D., Priya, S., Voit, W., 2014. Advances in Piezoelectric Polymer Composites for Virational Energy Harvesting, *Materials and Devices Laboratory (BMDL), Center for Energy Harvesting Materials and Systems (CEHMS),* Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia U.S.A.

Chua, C.K., Leong, K.F. and Lim, C.S. 2010. Rapid Prototyping: Principles and Applications. 3rd edition., Singapore, 511pp.

Dargaville, T.R. Celina, M. C. Elliott, J.M. Chaplya, P.M. Gary, Jones D. Mowery, D.M. Assink R.A. Clough, R.L. Martin, J.W. 2004. Characterization, Performance and optimization of PVDF as a Piezoelectric Film for Advanced Space Mirror, *Concepts Sandia National Laboratories Albuquerque*, Sandia is a multiprogram laboratory operated by sandia Corporation, Newmexico, California

Donato, M.D. 2014. Development of composite piezoelectric materials for tactile sensing, *Phd Thesis in Physiscs,* Politecnico di Torino Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia, Torino, İtalya

Erdağ, İ. 2010. Kurşun esaslı elektronik seramiklerin dielektrik, piezoelektrik ve elektromekanik özelliklerinin karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi* Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı Gebze

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., 2015. Vat Photopolymerization Processes. Additive

Gusarov, B. 2015. PVDF piezoelectric polymers: characterization and application to thermal energy harvesting, *Master Thesis,* Universite Grenoble Alpes, Saint Martin-dHeres France

Günaydın, U., 2007. Sensörlerde kullanılabilecek polimer/pzt kompozitlerin geliştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi,* İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Harrison, J.S. Ounaies, Z. 2001. Piezoelectric Polymers, *NASA Langley Research Center Hampton,* Virginia, 43, 211422

Kaya, A. Koyuncu, M. 2016. Elektroeğirme Yöntemiyle Baryum Titanat Nanofiber ve Nanotoz Üretimi ve Karakterizasyonu, Fen Fakültesi Fen Dergisi 42 (2) ; 136-143,

Korkmaz, Z., 2015. Mems teknikleri kullanarak esnek piezoelektrik dokunsal algılayıcı dizini üretimi. *Yüksek Lisans Tezi,* Hacettepe Üniversitesi, Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı, Ankara.

Krassenstein, E., 2014. You can see the first ever 3D printer – Invented by Chuck Hull. https://3dprint.com/72171/first-3d-printer-chuck-hull/-(Erişim tarihi : 22.04.2019)

Krassenstein, B., 2015. 20,000 3D printed parts are currently used on Boeing aircraft as patent filing reveals further plans. https://3dprint.com/49489/boeing-3d-print/ -(Erişim tarihi: 12.05.2019)

Li L., Mingqiu Z., Minzhi R., Wenhong R., 2014. Studies on the transformation process of PVDF from α to β phase by stretching. *Royal Society of Chemistry,* 8(14).

Maksutoğlu, M. 2010. Perovskite yapılı mayetoelektrik Fe:SrTiO3 ve Co:BaTiO3 kompozit malzemelerin manyetik ve dielektrik özellikleri, *Yüksek Lisans Tezi,* GYTE, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Gebze

Martins, P. Lopes, A.C. Mendez-Lanceros, S. 2013. *Electroactive phases of poly(vinylidene flüoride), Determination, processing and applications, Progress in Polymer Science 39 (2014) 683-706,* International Iberian Nanotechnology Laboratory, Braga, Protugal

Redwood, B., 2017. Additive manufacturing technologies overview. https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview-(Erişim tarihi:25.09.2017).

Sarıgül, T., 2014. 3D yazıcılar uzayda. http://www.bilimgenc.tubitak.gov.tr/makale/3d-yazicilar-uzayda-(Erişim tarihi:19.06.2019)

Silverman, R.H. 2016. Focused ultrasound in ophtalmology, Department of Ophthalmology, Clinical Ophthalmology no:10 (1865-1875) Columbia University biomedical Engineering, Newyork, USA

Tıkız, S. 2010. Çevre dostu kurşunsuz piezoelektrik seamiklerin üretimi ve kullanım güvenilirliğinin karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi,* AKÜ Fen bilimleri Enstitüsü Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı, Afyon

Tichy , J., Erhart, J., Kittinger E., Privratska, J. 2010. Fundamentals of piezoelectric sensorics mechanical, dielectric and thermodynamical properties of piezoelectric materials, Springer Heidelberg Dordrecht London Newyork (1,176)

Türker, Ö., 2009. PZT/polimer esaslı aktif titreşim kontrolüne uygun akıllı kiriş tasarımı ve imalatı, *Yüksek Lisans Tezi,* İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Vijaya, M.S. 2013. Piezoelectric materials and devices applications in Engineering medical scienes magazine Newyork, USA (1,161)

Yılmaz, O., 2007. Polimer malzemelerin ekstrüzyonunun deneysel ve sayısal olarak incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi,* İstanbul Teknik üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Whyman, S., Arif, K. M., Potgieter, J. 2018. Design and Development of an extrusion system for 3D printing biopolymer pellets. *The International Journal of Advanced Mabufacturing Technology,* 2018(96):3417-3428

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sertaç MALKOÇ

Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa 02/06/1988

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Bursa Şükrü Şankaya Anadolu Lisesi, (2002-2006)

Lisans : İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü (2007-2012)

Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı (2013-2019)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve YIL :

- Magneti Marelli MAKO Elek. San. Tic. A.Ş., 2013-2016.
- TOFAŞ Türk Oto. Fab. A.Ş., 2016-2018
- OYAK-Renault Oto. Fab. A.Ş., 2018-Halen

İletişim (e-posta) : sertacmalkoc@gmail.com

Yayınları :

Yazıcı, M., Güçlü, H., Karen, İ., Türkoğlu, İ. K., Yagoup, S., & Malkoç, S. (2015). Numerical Analysis of Light Commercial Vehicle Headlamp for Pedestrian Safety, International Journal of Natural and Engineering Sciences (IJNES) E-ISSN: 2146-0086, 6(2); 34-38.