

**GRANÜL TERMOPLASTİK MALZEMELERİN EKSTRÜZYON ESASLI
EKLEMELİ İMALAT ŞARTLARININ İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU**

MUSTAFA ÇETİN

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Nisan 2022

ÖZET

GRANÜL TERMOPLASTİK MALZEMELERİN EKSTRÜZYON ESASLI EKLEMELİ İMALAT ŞARTLARININ İNCELENMESİ VE OPTİMİZASYONU

MUSTAFA ÇETİN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Nisan 2022

Danışman: Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

Eklemeli imalat, karmaşık yapıları geometrilerin limit olmadan kısa sürede ve uygun maliyetle, malzemelerin birbirine eklenmesi suretiyle üretildiği bir imalat teknolojisidir. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Dijital Tasarım ve Dijital İleri İmalat araştırma laboratuvarında gerçekleştirilen doktora çalışması ile filament bazlı malzemelerin eriyik ergitme metoduyla üretim yapabilen büyük hacimli Ar-Ge ve test amaçlı üç boyutlu yazıcı imal edilmiştir. Üç boyutlu yazıcının granül bazlı malzemeleri işleyebilmesi için yüksek lisans çalışması ile de granül beslemeli ekstrüzyon sistemi kurulmuştur.

Bu tez çalışmasında PEEK malzemeyi işleyebilmek ve imal edilecek test numunelerinin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini belirlemek için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Devamında geri dönüşümlü PEEK malzeme ekstrüde edilemediği için termoplastik performans ABS granül malzemesi kullanılarak üretilen test numunesinin özelliklerini belirlemede çekme deneyi ve test numunesi ASTM D638 Tip-1 standardına istinaden çekme test numuneleri imal edilmiştir. Taguchi L9 formatı ile test numunelerinin Çekme Deneyleri, DSC testleri yapılmış ve Varyans analizi ile bulgular incelenmiştir. Deneysel çalışmaların incelenmesi ve üç boyutlu yazıcı optimizasyonu sonrası imal edilmiş numunelerde iyileştirilmiş farklar gözlemlenmiş ve granül malzeme için en uygun parametreler belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Eklemeli İmalat, Peek, Abs, Vidalı Ekstruder, Granül, Büyük Hacimli 3D Yazıcı

ABSTRACT

INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF EXTRUSION BASED ADDITIVE MANUFACTURING CONDITIONS OF GRANULAR THERMOPLASTIC MATERIALS

MUSTAFA ÇETİN

Department of Mechanical Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, April 2022

Supervisor: Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK

Additive manufacturing is a manufacturing technology in which complex geometries are produced by adding materials to each other in a short time and cost-effectively. With the doctoral study carried out in Eskişehir Technical University, Mechanical Engineering Digital Design and Digital Advanced Manufacturing research laboratory, a large-volume R&D and test-purpose three-dimensional printer capable of producing filament-based materials by melt melting method was produced. In order for the three-dimensional printer to process granule-based materials, a granule-fed extrusion system was established with a graduate study.

In this thesis, experimental studies were carried out to process PEEK material and to determine the physical, chemical and mechanical properties of the test samples to be manufactured. Afterwards, since the recycled PEEK material cannot be extruded, tensile test specimens were produced in accordance with the tensile test and test specimen ASTM D638 Type-1 standard to determine the properties of the test specimen to be produced using the thermoplastic performance ABS granule material. Tensile Tests and DSC tests of the test specimens were performed with Taguchi L9 format, and the findings were analyzed by analysis of variance. After examining the experimental studies and optimizing the three-dimensional printer, improved differences were observed in the manufactured samples and the most suitable parameters for the granular material were determined.

Keywords: Additive manufacturing, Peek, Abs, Screw extruder, Granular, Big Area 3D
Printer

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca bilgisi, tecrübesi, sabrı ve yardımları ile beni yönlendiren, değerli vaktini hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Sayın Prof. Dr. Oğuz ÇOLAK'a saygı, şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmanın tüm aşamalarında yardımlarından ve fedakârlıklarından dolayı kıymetli çalışma, iş ve üniversite arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim. Testlerin yapılması ve analizlerin doğrulanmasında yol gösteren Doç. Dr. Hande ÇELEBİ, Araş. Gör. Gökhan DEMİRCAN'a ve Yüksek Mühendis Serhat ÇİFTÇİ' ye yardımları için teşekkür ederim.

Hayatımın her sürecinde yanımda olarak beni destekleyen, en iyi şekilde yetiştiren, fikir veren, kendi ihtiyaçlarını erteleyerek benim için maddi, manevi emek harcayan aileme ve yeğenlerime sadece bu tez kapsamında değil tüm hayat boyunca sonsuz teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

MUSTAFA ÇETİN

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

MUSTAFA ÇETİN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLolar DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
GÖRSELLER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Eklemeli İmalat	3
1.2. Eklemeli İmalat Yöntemleri	5
1.3. Sıvı Esaslı Eklemeli İmalat Yöntemleri	5
1.3.1. Stereolithografi	6
1.3.2. Polijet.....	7
1.3.3. Multijet	8
1.3.4. Dijital ışık izleme	9
1.3.5. Katı tabaka kütleme	10
1.4. Toz Malzeme Esaslı Eklemeli İmalat Yöntemleri.....	11
1.4.1. Seçici lazer sinterleme	12
1.4.2. Üç boyutlu yazıcı	13
1.4.3. Lazer ile net şekillendirme.....	13
1.4.4. Elektron ışınli ergitme.....	14
1.4.5. Seçici lazer ergitme.....	16
1.5. Katı Malzeme Esaslı Eklemeli İmalat Yöntemleri.....	17

1.5.1. Eriyik biriktirme yöntemi.....	17
1.5.1.1. Katman kalınlığı	20
1.5.1.2. Üretim açısı	21
1.5.1.3. Doluluk oranı.....	21
1.5.1.4. Kabuk genişliği	22
1.5.1.5. Nozul sıcaklığı.....	22
1.5.1.6. Tabla sıcaklığı.....	23
1.5.1.7. İmalat hızı	24
1.5.1.8. Dolgu deseni.....	24
1.5.2. Tabakalı parça imalat yöntemi	25
1.5.3. Seçici tabaka yığma yöntemi	26
1.6. Plastikler	27
1.7. Termosetler	28
1.8. Termoplastikler	29
1.8.1. Termoplastik türleri.....	30
1.8.1.1. Polietilen (PE).....	31
1.8.1.2. Polivinilklorür (PVC)	32
1.8.1.3. Poliamid (PA).....	32
1.8.1.4. Polikarbon (PC).....	33
1.8.1.5. Akrilonitril bütadien stiren (ABS).....	33
1.8.1.6. Polietilen tereftalat (PET)	34
1.8.1.7. Polilaktik asit (PLA)	34
1.8.1.8. Ultem 9085	35
1.8.1.9. Polieter Eter Keton (Peek).....	35
1.9. Taguchi Deney Tasarımı ve Varyans Analizi	39
2. LİTERATÜR ÖZETLERİ.....	43
2.1. Eriyik Biriktirme Yöntemi İle Vidalı Ekstruder Kullanılarak İmalatı Yapılan Parçalar	43
2.2. ASTM D638 Standartlı Termoplastik Ve Kompozit Termoplastik Malzemeli Numunelerin Çekme Deneyi Sonucu Mekanik Testlerin Analizi	46

2.3. 3D Yazıcı Ve Granül Bazlı Malzemelerin Kimyasal, Fiziksel Ve Mekanik Etkenleri	48
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	51
3.1. 3D Yazıcının Modifikasyonu ve İmalata Hazırlanması.....	52
3.1.1. Mevcut 3D yazıcının eksikliklerinin tespiti ve giderimi.....	57
3.2. Geridönüşüm PEEK Malzemenin Eklemeli İmalat İle Üretilirliğinin Test Edilmesi	74
3.3. Taguchi L9 Deney Tasarımı.....	77
3.4. ASTM D638 Test Numunelerinin İmalatı ve Çekme Testi	85
4. BULGULAR.....	95
4.1. Çekme Test Bulguları	95
4.2. Taguchi L9 Tasarım Bulguları	103
4.3. Anova Analizi	106
4.4. Boyutsal Doğrulama Testleri	108
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	115
KAYNAKÇA.....	118
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1.1. Termoset malzemelerin özellikleri (Ekrem, 2006)	28
Tablo 1.2. Genel amaçlı mühendislik plastikleri (Beşergil, 2010)	30
Tablo 1.3. Yüksek performanslı mühendislik plastikleri (Beşergil, 2010)	30
Tablo 1.4. Termal dirençli mühendislik plastikleri (Beşergil, 2010)	31
Tablo 1.5. Farklı PEEK polimerlerinin camlaşma ve erime noktaları (Hearle, 2001), (Vegt, 2002)	36
Tablo 3.1. Ekstruder genel parametreleri	54
Tablo 3.2. Ekstrudera ait Nema 34 step motorun teknik özellikleri	59
Tablo 3.3. Nema 34 step motora ait sürücü kartı teknik özellikleri	61
Tablo 3.4. X ve y eksenlerdeki Nema 34 step motorun teknik özellikleri	69
Tablo 3.5. Nema 34 step motora ait sürücü kartlarına ait teknik özellikleri	71
Tablo 3.6. Peek malzeme baskı parametreleri	78
Tablo 3.7. Taguchi analizi için kontrol parametreleri ve seviyeleri	78
Tablo 3.8. L9 ortogonal dizisi kullanılan deneysel plan	79
Tablo 3.9. Geridönüşüm Peek talaşına uygulanan ısı işlem, birinci deney	81
Tablo 3.10. Atık Peek talaşına uygulanan ısı işlem, ikinci deney	82
Tablo 3.11. Cura'daki sabit parametreler	86
Tablo 3.12. Taguchi L9 için kontrol parametreleri ve seviyeleri	87
Tablo 3.13. Seviye 3 için deneysel çalışma parametreleri	87
Tablo 3.14. Seviye 2 için deneysel çalışma parametreleri	88
Tablo 3.15. Seviye 1 için deneysel çalışma parametreleri	88
Tablo 3.16. L9 ortogonal dizisi için kullanılacak deneysel plan	91
Tablo 3.17. L9 ortogonal dizisi	91
Tablo 4.1. Gerilme-gerinim grafiğindeki mekanik değerler	103
Tablo 4.2. Sinyal/Gürültü yanıt tablosu	104
Tablo 4.3. Anova analizi	106
Tablo 4.4. Regresyon denklemi	107
Tablo 4.5. Regresyon ile tahmini çekme mukavemeti değerleri	107
Tablo 4.6. Kalibrasyon parçası imal ölçüleri	111
Tablo 4.7. Kalibre edilen kalibrasyon parçası imal ölçüleri	112

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Üç Boyutlu İmalatın Proses Adımları (Sürmen, 2019)	4
Şekil 1.2. Eklemeli imalat yöntemlerinin ana şeması.....	5
Şekil 1.3. Sıvı malzeme esaslı eklemeli imalat yöntemleri şeması	6
Şekil 1.4. Toz malzeme esaslı eklemeli imalat yöntemleri şeması	12
Şekil 1.5. Katı malzeme esaslı eklemeli imalat yöntemleri şeması.....	17
Şekil 1.6. Eriyik biriktirme yöntemindeki üretim parametreleri	20
Şekil 1.7. Polimer bazlı ürünlerin genel sınıflandırma şeması	28
Şekil 1.8. Amorf ve kristalin bölge (Mazumdar, 2002).....	30
Şekil 1.9. Taguchi yönteminin genel adımları.....	41
Şekil 3.1. ASTM D638 Tip-1 standartına uygun test numunesinin cad tasarımı (ASTM D638-14, 2014).....	52
Şekil 3.2. Nema 34 step motora ait data-sheet	60
Şekil 3.3. X ve y eksenindeki Nema 34 step motora ait data-sheet.....	70
Şekil 4.1. A1 çekme test numunesinin gerilme-gerinim grafiği.....	96
Şekil 4.2. A2 çekme test numunesinin gerilme-gerinim grafiği.....	97
Şekil 4.3. A3 çekme test numunesinin gerilme-gerinim grafiği.....	98
Şekil 4.4. A4 çekme test numunesinin gerilme-gerinim grafiği.....	98
Şekil 4.5. A5 çekme test numunesinin gerilme-gerinim grafiği.....	99
Şekil 4.6. A6 çekme test numunesinin gerilme-gerinim grafiği.....	100
Şekil 4.7. A7 çekme test numunesinin gerilme-gerinim grafiği.....	101
Şekil 4.8. A8 çekme test numunesinin gerilme-gerinim grafiği.....	101
Şekil 4.9. A9 çekme test numunesinin gerilme-gerinim grafiği.....	102
Şekil 4.10. Gerilme - birim şekil değiştirme karşılaştırma grafiği	103
Şekil 4.11. Sinyal/Gürültü oranları.....	105
Şekil 4.12. Gerçek ve tahmin çekme mukavemeti kıyaslaması	107
Şekil 4.13. Doğrulama test numunesinin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği	108

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 1.1. SLA makinesi ve bölümleri (Ryan, 2019).....	7
Görsel 1.2. Polijet makinesi ve bölümleri (Additive-3D, 2014)	8
Görsel 1.3. Multijet imalat prosesi (Manufactur3D, 2018).....	9
Görsel 1.4. Dijital ışık izleme parçaları (Reddy, 2016)	10
Görsel 1.5. SGC baskı cihazı parçaları (Micheal, 2018).....	11
Görsel 1.6. Covid-19'e karşı Daimler'e ait maskenin Sls imalatı (Daimler, 2020).....	13
Görsel 1.7. 3DP inkjet proses ve parçaları (Xia & Sanjayan, 2016).....	13
Görsel 1.8. Lens sisteminin prosesi ve parçaları (Baranowski, ve diğerleri, 2019).....	14
Görsel 1.9. EBM sisteminin prosesi ve parçaları (Körner, 2016)	15
Görsel 1.10. SLM prosesi ve parçaları (Leinenbach, 2018)	17
Görsel 1.11. FDM yöntemi ile parça imalatı (Texas Prototype, 2019).....	18
Görsel 1.12. FDM yöntemi kullanılan Peek malzemenin nozuldaki gösterimi (Wang, Zou, Xiao, Ding, & Huang, 2019)	19
Görsel 1.13. Farklı katman kalınlığına ve baskı süresine sahip ürünler (Dağ, 2021)	21
Görsel 1.14. 3D yazıcı ile farklı doluluk oranlarında imal edilmiş ürünler (Tridi, 2019)	22
Görsel 1.15. 3D yazıcı ile imal edilmiş farklı kabuk sayılarına sahip ürünler (Tridi, 2019).....	22
Görsel 1.16. Kapalı ortam 3D yazıcılarda tabla sıcaklığına bağlı çarpma ve çatlama gösterimi (Boxed, 2017).....	24
Görsel 1.17. Farklı dolgu desenlerinin gösterimi (3Dörtgen, 2019)	25
Görsel 1.18. LOM prosesi ve parçaları (Dermeik & Travitzky, 2020).....	26
Görsel 1.19. SDL imalat yöntemi ile imalat yapabilen Mcor Arke yazıcısı (Additive-X, 2016).....	26
Görsel 1.20. Termoplastik ürünler (Talın, 2020)	29
Görsel 1.21. Yüksek performanslı ve kompozit termoplastikler (Intamsys, 2018)	31
Görsel 1.22. PE düz ambalaj shrink film (Patel, 2013).....	32
Görsel 1.23. PVC tesisat borusu (Erkulah, 2018)	32
Görsel 1.24. Poliamid partikülleri (Tetraco, 2011)	33
Görsel 1.25. Şeffaf polikarbon koruma gözlüğü (3M, 2013).....	33

Görsel 1.26. ABS tesisat boru parçaları (Bors, 2010).....	34
Görsel 1.27. PET şişe ürünleri (Eshragh , 2020).....	34
Görsel 1.28. PLA hammaddesi (Pressreader, 2019)	35
Görsel 1.29. ULTEM 9085 ürünü (Stratasys, 2017)	35
Görsel 1.30. PEEK malzeme ürünü (Filiz, 2015)	36
Görsel 1.31. Livrea Yacht’a ait 3d yazıcı ile imal edilen yelkenli bot (Lehvoss, 2018)	38
Görsel 3.1. Büyük baskı hacimli üç boyutlu yazıcı (Karaman, 2019)	53
Görsel 3.2. Büyük baskı hacimli eklemeli imalat sisteminin katı model tasarımı (Karaman, 2019)	53
Görsel 3.3. Eklemeli imalat makinasına montajı yapılan ekstruder (Çiftçi, 2020).....	55
Görsel 3.4. 2, 4 ve 8 mm çaplarında imal edilmiş nozulların teknik resmi	56
Görsel 3.5. 1 mm çaplı imal edilmiş nozulun teknik resmi	56
Görsel 3.6. 1 mm çaplı ve pirinç malzeme ile imal edilmiş nozul	57
Görsel 3.7. Fan montajı yapılmış ekstruder	58
Görsel 3.8. Nema 34 step motorun montajı	59
Görsel 3.9. Tekpan marka yeni panonun iç kısmının üst bölümü.....	62
Görsel 3.10. Akım genişletme kartı eklenmiş kontrol kartı	63
Görsel 3.11. Tekpan marka yeni pano	64
Görsel 3.12. X ve Y ekseninde montajı yapılmış kablo kanalları.....	65
Görsel 3.13. Nema 34 step motorun montajı için alüminyum 5000 serisi braket tasarımı.....	66
Görsel 3.14. Nema 34 step motorun montajı için imal edilen alüminyum 5000 serisi braketin ön yüzü	66
Görsel 3.15. Nema 34 step motorun montajı için imal edilen alüminyum 5000 serisi braketin arka yüzü	67
Görsel 3.16. ASTM D638 standartına uygun olmayan çekme test numunesi - 1	68
Görsel 3.17. ASTM D638 standartına uygun olmayan çekme test numunesi - 2.....	68
Görsel 3.18. ASTM D638 standartına uygun olmayan çekme test numunesi – 3	68
Görsel 3.19. X ve y eksenlerdeki Nema 34 step motorun montajı	69
Görsel 3.20. X ve y eksen Nema 34 step motorun montajı için alüminyum 5000 serisi braket tasarımı	71

Görsel 3.21. X ve Y eksenindeki Nema 34 step motorun montajı için imal edilen alüminyum 5000 serisi braketter.....	72
Görsel 3.22. ASTM D638 standartına uygun çekme test numunesi 4 ve 5	72
Görsel 3.23. ASTM D638 standartına uygun ABS malzeme ile parça imalatı.....	73
Görsel 3.24. Termal kamera ile sıcaklık kontrolleri	74
Görsel 3.25. Geri dönüştürülecek Peek malzemeler	75
Görsel 3.26. Benli Geri Dönüşüm firmasına ait geri dönüşüm parçalama makinesi	76
Görsel 3.27. Geri dönüşümü tamamlanmış Peek malzeme ve parçalara ayrılmış atık Peek talaşı	77
Görsel 3.28. Geridönüşüm PEEK malzemenin ekstruderdeki akış hatası	80
Görsel 3.29. Geridönüşüm PEEK malzemenin DSC analizi	81
Görsel 3.30. Kamara tip ısıtma işlem fırını.....	82
Görsel 3.31. Isıl işlem uygulanarak birleştirilmiş geri dönüşümlü Peek talaşı.....	83
Görsel 3.32. Peek malzemenin ekstruder akış sorunu.....	84
Görsel 3.33. OO-Kuma marka termoplastik performans ABS granülü	85
Görsel 3.34. Ekstrüde edilmiş Abs filament ve ölçümü	86
Görsel 3.35. Seviye 1'deki deney 3 için eksik malzeme akış hatalı ASTM D638 çekme test numunesi	89
Görsel 3.36. Seviye 3'deki deney 3 için fazla malzeme akış hatalı ASTM D638 çekme test numunesi	90
Görsel 3.37. L9 ortogonal dizisi dikkate alınarak imal edilen çekme test numunesi ölçümü.....	92
Görsel 3.38. Instron marka çekme test cihazı	93
Görsel 3.39. Çekme testine maruz kalarak kopmuş numune ve çekme testi aşaması.....	94
Görsel 4.1. Kalibrasyon parçası imalat aşamaları	109
Görsel 4.2. Kalibrasyon parçası imalat hataları	109
Görsel 4.3. Z ekseninde ekstruderin dalış yaparak bozduğu kalibrasyon parçaları	110
Görsel 4.4. Ultimaker Cura 3D yazıcı ayarlar ekranı.....	111
Görsel 4.5. %20 doluluk oranlı kalibrasyon parçası imalat prosesi	112
Görsel 4.6. Kalibre edilen 1 numaralı kalibrasyon parçası	113
Görsel 4.7. Kalibre edilen 2 numaralı kalibrasyon parçası	113

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

3B, 3D	: Üç boyutlu
3DAM	: Digital Design and Digital Advanced Manufacturing (Dijital Tasarım ve Dijital İleri İmalat)
ABS	: Akrilonitril bütadien
ANOVA	: Analysis of variance (Varyans analizi)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Malzeme Ve Test Derneği)
BAAM	: Big area additive manufacturing (Büyük hacimli eklemeli imalat)
CAD	: Computer aided design (Bilgisayar destekli tasarım)
ÇM	: Çekme mukavemeti
DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetre
DMA	: Dinamik mekanik analiz
E	: Elastisite modülü
EBM	: Elektron ışınla ergitme
F	: Kuvvet
FDM	: Eriyik biriktirme yöntemi
GE	: General Electric Company
GPa	: GigaPaskal
IR	: Termal kamera
ISS	: International Space Station (Uluslararası Uzay İstasyonu)
Kg	: Kilogram
kN	: KiloNewton
LVDT	: Lineer değişken diferansiyel transformatör
M	: Metre
Mm	: Milimetre
MPa	: MegaPaskal
NASA	: National Aeronautics and Space Administration (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)
Nm	: Newton metre
PA	: Poliamid

PAI	: Poliamidimid
PC	: Polikarbon
PCL	: Polikaprolakton
PE	: Polietilen
PEEK	: Polietereterketon
PEEKK	: Polyetheretherketoneketone
PEI	: Polieterimit
PEKEKK	: Polyetherketoneetherketoneketone
PEKK	: Polieterketonketon
PES	: Poliersülfon
PI	: Polimid
PLA	: Polilaktik asit
PP	: Polipropilen
PPS	: Polifenilensülfid
PS	: Polistren
PVC	: Polivinil klorür
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SLA	: Stereolithografi yöntemi
SLS	: Seçici lazer sinterleme
STL	: Stereolithography
Tg	: Camı geçiş sıcaklığı (°C)
Tm	: Erime sıcaklığı
TMA	: Termo-mekanik analiz
TUA	: Türkiye Uzay Ajansı
W	: Watt

1. GİRİŞ

Üretim, yaşam kalitesinin iyileştirilmesi ve her türlü ihtiyaçlarının karşılanması için temel gereksinimdir. İnsan, ilk zamanlarda doğal kaynaklardan faydalanarak bu gereksinimlerini yerine getirmektedirken zamanla ihtiyaçlar artmış, kaynaklar yetersiz geldiği zamanda yeni hammadde arayışına girişmiştir. Bu arayışlar sonucu zamanla gelişen teknoloji ile farklı üretim yöntemleri gelişmiştir. Teknoloji, yaşam kalitesinin artması için ihtiyaç duyulan ürünleri sağlamaktadır. Teknoloji, kalite, maliyet ve zaman gibi kavramların etkisi ile gelişerek devam etmektedir (Groover, 2010).

1980’li yıllarda alışılan imalat yöntemlerinden farklı olarak üretim yapan bir imalat yöntemi kullanılmaya başlanmıştır. Eklemeli İmalat olarak adlandırılan üretim yöntemi, standart üretim yöntemlerindeki gibi hammadde üzerinde talaş kaldırılarak malzeme eksiltme ile olmamakla beraber üretimde kullanılacak hammaddenin üst üste ve birbirine eklenmesi ile gerçekleşmektedir. Dolayısıyla katmanlı imalat, hammaddenin etkili bir şekilde kullanımını mümkün kılarak, atık malzemeyi minimuma düşürmekte, gerektiği kadar malzeme kullanımı ile istenilen parça üretimi yapabilmektedir. (ASTM, 2012; Kruth vd, 1998; Levy vd., 2003)

Eklemeli imalatın ilk yıllarında, prototip oluşturma ve modelleme üzerine kullanılmaktaydı. Prototip oluşturma ve modelleme, tasarımın kullanılabilirliği, uygunluk kontrollerinin yapılabildiği ve hataların düzeltilebilmesi mümkün kılan imalat aşamasından önce ürün geliştirme ve üretim sürecinde gerekli olan adımı oluşturmaktadır. Bu sebeple, katmanlı imalat mühendislik kapsamı arasında hızlı prototipleme olarak anılmıştır. Hızlı prototipleme ’de malzeme kısıtlılığı mevcut olduğu için kullanımını sınırlı olarak düşünülmüştür. Lakin zamanla malzeme çeşitliliğindeki artış daha fazla uygulamada ve nihai ürün imalatını mümkün kılmıştır. Hızlı prototipleme terimi ise yöntemin gelişmesi ile içeriği yansıtmayan bir terim olmuştur. Bu nedenle ulusal bir kavram ihtiyacın doğrultusu ile 2009 yılında Amerikan Malzeme ve Test Derneği (ASTM) ile Amerikan Makine Mühendisleri Odası (ASME) işbirliği ile standardizasyon oluşturulmasına başlanarak “Eklemeli İmalat Teknolojileri için Standart Terminoloji” adıyla ASTM F2792 standardı oluşturulmuş ve “Eklemeli İmalat” olarak adlandırılmıştır. ASTM F2792-12A standardı için Eklemeli İmalat terimi ise “Geleneksel imalat yöntemlerinin aksine üç boyutlu model verileri kullanılarak objeler üretmek için

genellikle katman üzerine katman ilavesi ile malzeme eklenmesi süreci” şeklinde tanımlanmıştır. (ASTM, 2012).

Hızlı prototipleme, üç boyutlu baskı ve katmanlı imalat adlarıyla bilenen eklemeli imalat, serbest formlu ve karmaşık geometrili objelerin üretilmesine imkan sağlayan imalat metodudur. Günümüzde 3D baskı olarak bilenen yöntem, birden fazla teknolojiyi içermektedir. Ürünlerde kullanılan malzeme ve geometrik özelliklerinden dolayı farklı eklemeli imalat yöntemleri geliştirilmiş ve ticarileştirilerek otomotiv, havacılık, biyomedikal, gıda ve eğlence gibi farklı sektörlerde kullanılmaktadır (Sürmen, 2019).

Eklemeli İmalat yöntemlerinin dezavantajlarından biri baskı malzemesi olarak filament kullanmasından ve küçük makineler olmasından dolayı kısıtlı baskı hacimlidir. Bu nedenle maksimum parça boyutlarına göre tasarım yapılmaktadır. Bu dezavantajı sahip olunan 3D yazıcı ile avantaja çevirmek amacı ile filament esaslı üretimden granül esaslı üretim yapılabilecek bir teknoloji geliştirilmiştir. Eskişehir Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Dijital Tasarım ve Dijital İleri İmalat araştırma laboratuvarında (3DAM - Digital Design and Digital Advanced Manufacturing) gerçekleştirilen doktora ve yüksek lisans çalışmaları ile eriyik ergitme metodu ile üretim yapabilen büyük hacimli 3D yazıcı profesyonelce imal edilmiş Ar-Ge ve test amaçlı bir yazıcıdır. Cihazın dış ölçüleri 1690 mm x 1690 mm x 1690 mm’dir. Üç boyutlu yazıcılardaki kısıtlı baskı boyutları, tasarım çeşitlilik ve uygulama alanları için dezavantaj oluşturmaktadır. Bu dezavantajı önlemek için kullanılan 3D yazıcı büyük hacimli eklemeli imalat uygulamalarında kullanılabilecek 1000 mm x 1000 mm x 1000 mm baskı hacmine ve boyutuna sahiptir.

Tez çalışmasında, herhangi bir 3D yazıcının termoplastik PEEK malzemesini işleyebilir şartlara dönüştürülmesi için gerekli sahip olması gereken minimum şartlar belirlenmiş (üretim parametreleri, ekstruder sıcaklıkları, malzeme besleme oranları, meydana gelebilecek fiziksel, kimyasal hatalar ve hataları giderme yöntemleri, tabla sıcaklığının ve ortam sıcaklığının uygunluğu vb.) ve 3D yazıcı bu şartlar doğrultusunda modernize edilmiştir. Eklemeli imalat teknolojilerinde, eriyik biriktirme yöntemine göre üretim yapabilen 3D yazıcı ile talaş şeklindeki PEEK malzeme baz alınarak vidalı ekstruder aracılığı ile imalatlar gerçekleştirilmeye çalışılmış lakin başarılı olunamamıştır. Bu optimizasyon süreci ve karşılaşılan hatalar ve çözümler birer birer işlenmiştir. Mevcutta bulunan termoplastik malzeme granül performans Abs malzemesi kullanılarak

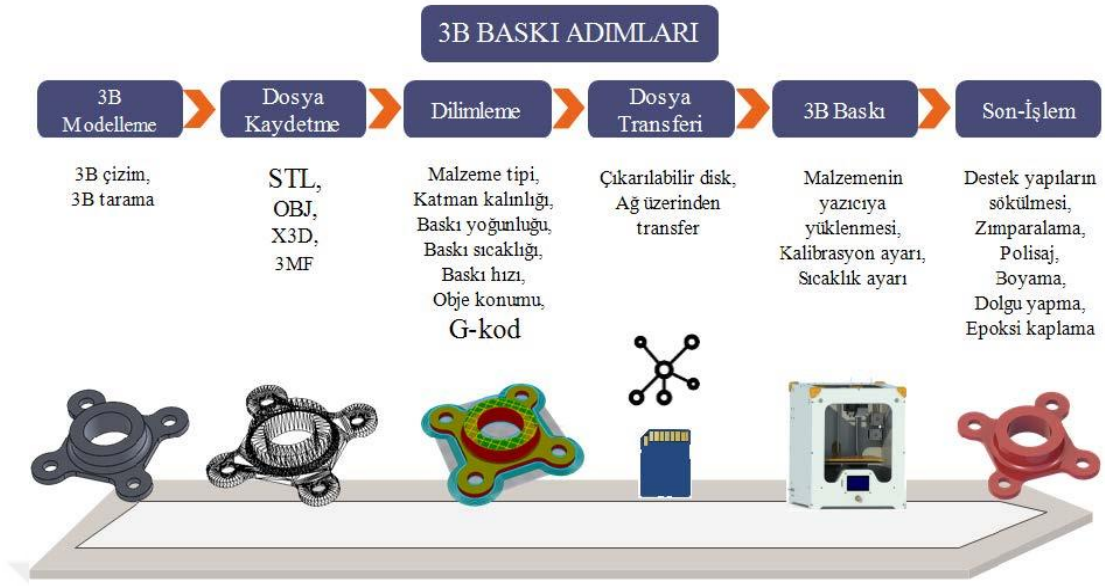
ASTM D638 standartına uygun imal edilmiş test numunesine etki eden kuvvet ve şekil değiştirme ilişkisi ile hangi koşullar ve parametrelerde çalışabileceği tespit edilmiştir. Eriyik biriktirme yöntemiyle üretilen granül termoplastik Abs esaslı parçaların boyutsal hassasiyet, yüzey kalitesi ve çekme mukavemeti gibi en önemli karakteristik özellikleri belirlenmiş ve diğer çalışmalar ile kıyaslanmıştır. Granül esaslı Abs malzemelerin kullanımına yönelik, tasarım ve üretim parametreleri incelenmiş, parametrelerin mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin tespit edilmiştir. Elde edilen mekanik özelliklere istinaden ideal ve en uygun imalat parametrelerinin belirlenmesi adına kullanılan malzeme özellikleri ve üç boyutlu yazıcının tasarım parametreleri dikkate alınarak farklı parametreler deney tasarımları oluşturulmuş ve oluşturulmuş parametreler dikkate alınarak deney numuneleri üretilmiş ve çekme testi gibi mekanik testleri yapılmıştır. Mekanik testler sonucunda çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir.

1.1. Eklemeli İmalat

Üç boyutlu model verisinden objeler imal etmek için ana malzemeyi azaltarak günümüzde kullanılan imalat teknolojisinin tersine, malzemeleri genellikle kat kat birleştirmeyi baz alan eklemeli imalat veya daha çok bilinen adıyla 3 boyutlu baskı teknolojisi ASTM F2792-12A standardında 7 kategoride değerlendirilmektedir. Bunlar; fotopolimerizasyon, malzeme püskürtme, bağlayıcı püskürtme, malzeme çekme, toz yatağı füzyonu, tabaka laminasyonu, direkt enerji yayılımı olarak sınıflandırılmaktadır (ASTM, 2012).

Eklemeli imalat, mühendislik dizayn dosyalarını tamamen fonksiyonel objelere dönüştürmek için 3 boyutlu baskı yöntemini kullanmaktadır. Bir tabakanın partikülleri birbirleri ile yapıştırılır yapıştırılmaz yeni tabaka eklenmekte ve yapıştırma işlemi tekrarlanmaktadır. Her tabakanın CAD modeldeki geometriyi oluşturacak şekilde eritildiği bu teknolojiye, takım veya fikstür kullanılmadan ve atık malzeme fazlaca çıkmadan oldukça karmaşık yapılara sahip parçaların imalatını mümkün kılmaktadır (Kara, 2013).

Eklemeli imalat süreci parçanın istenen ölçülerde tasarlanmasından nihai ürünün ortaya çıkışına kadar olan adımları altı temel procesten oluşmaktadır. Bu proses herhangi bir kalıp maliyeti, kullanılamayan malzeme atığı vb. eski tip imalatın dezavantajları sayılan konuları tasarımdan direkt olarak üretime başlanarak avantaja çevirmektedir. 3D baskı adımları Şekil 1.1’de detaylı bir şekilde gösterilmektedir.



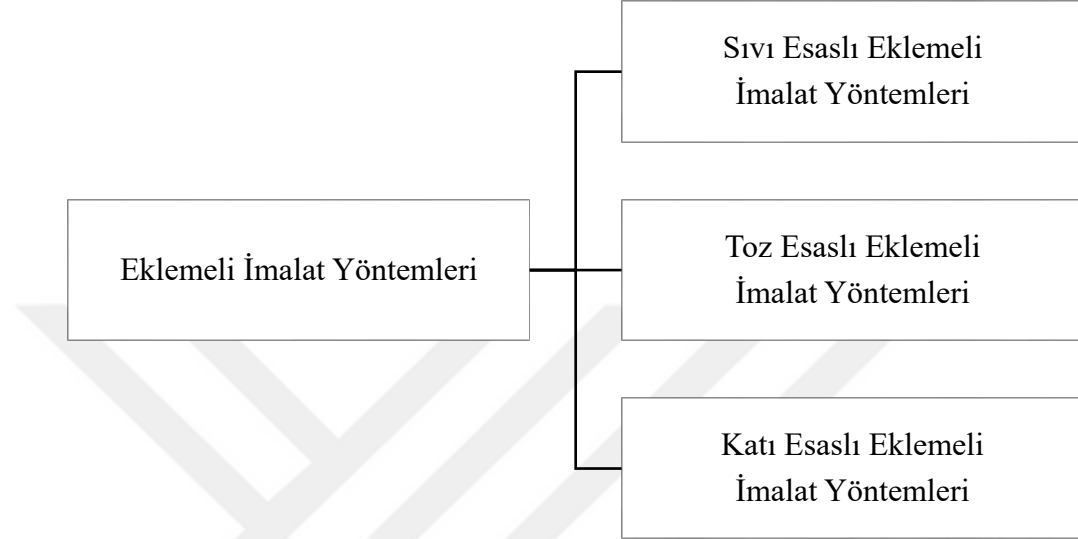
Şekil 1.1. Üç Boyutlu İmalatın Proses Adımları (Sürmen, 2019)

Baskı adımlarını açıklamak gerekirse; üretilmek istenen üçboyutlu katı modelinin dijital olarak çizilmesi, dosyasının dilimleme yazılımları için uygun bir formata dönüştürülmesi, modelin dilimleme yazılımında katmanlara ayrılması ve G-kodlarının oluşturulması, elde edilecek G-kodların üç boyutlu yazıcıya aktarılması, baskı işlemi için üç boyutlu yazıcının hazırlanması ve imalatın başlatılıp istenen objenin elde edilmesi ve elde edilen objenin destek yapılarından ayrılarak ve son işlem adımlarının uygulanmasıdır (Sürmen, 2019).

Üç boyutlu olarak herhangi bir CAD programında modellenen nesne “.STL (Stereolithography)” formatında kaydedilir. Üç boyutlu model oluşturma aşamasından sonra modelin üç boyutlu yazıcıya transferi için programa aktarılması gerekmektedir. Üç boyutlu basılacak ürünün doluluk oranı, dolgu geometrisi, katman yüksekliği gibi yazdırma parametreleri operatör tarafından belirlenebilmektedir. Genellikle tescilli ve ticarileştirilerek markalaşmış üç boyutlu yazıcılar, tasarlanmış ara yüz programları ile satışa sunulmaktadırlar. Açık kaynaklı yazıcılar için de ücretli ve ücretsiz farklı ara yüz programları mevcuttur. Skeinforge, RepRap Host, SuperSkein, Slicer, Cura, Repetier Host ücretsiz açık kaynaklı programlara örnek verilebilir (Evlen, Özdemir, & Çalışkan, 2019).

1.2. Eklemeli İmalat Yöntemleri

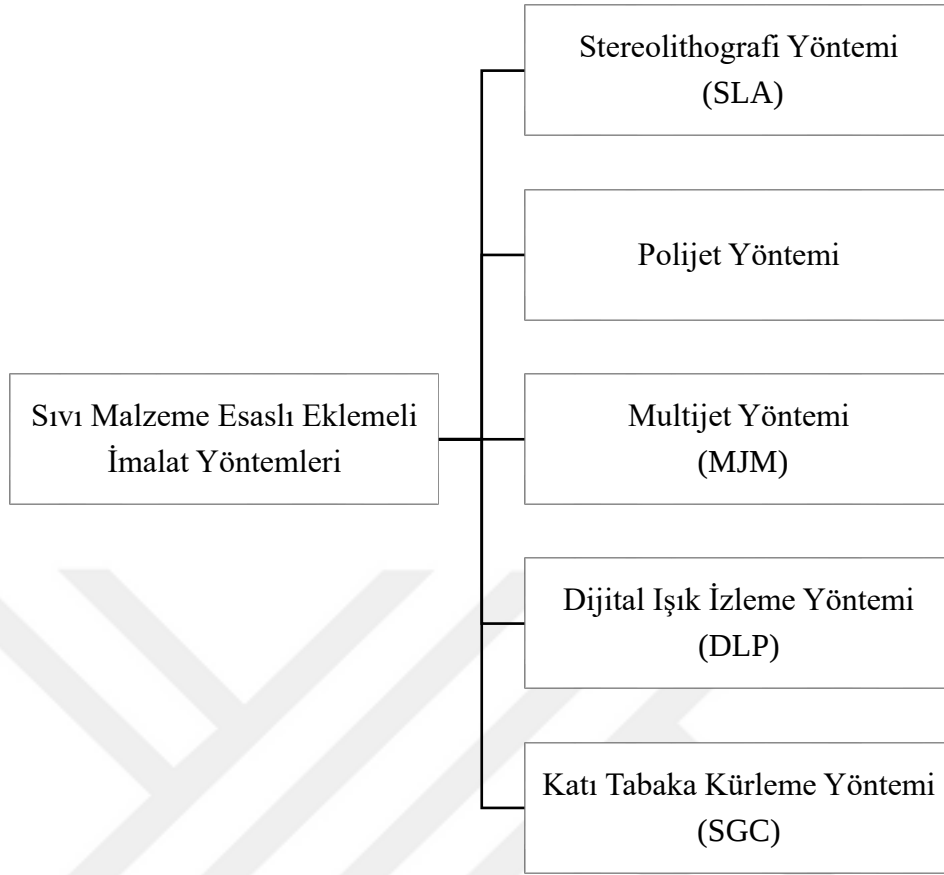
Eklemeli imalat yöntemleri imalatı yapılacak ürün ve ürün grupları için kullanılacak malzeme dikkate alınarak 3 farklı ana şekilde gruplandırılabilir. Şekil 1.2 ‘de malzeme dikkate alınarak gruplandırılmış ana şema aşağıda yer almaktadır.



Şekil 1.2. Eklemeli imalat yöntemlerinin ana şeması

1.3. Sıvı Esaslı Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eklemeli imalat yöntemleri imalatı yapılacak ürün ve ürün grupları için kullanılacak malzeme dikkate alınarak gruplandırıldığı bilgisi paylaşılmıştır. İmalat yapılacak ürüne yönelik sıvı esaslı malzeme kullanımlarında bu yöntem kullanılan hammadde, imalat süreci, kullanılan teknoloji vb. sebepler doğrultusunda 5 farklı gruptan oluşmaktadır. Şekil 1.3. ‘de malzeme dikkate alınarak gruplandırılmış şema aşağıda yer almaktadır.



Şekil 1.3. Sıvı malzeme esaslı eklemeli imalat yöntemleri şeması

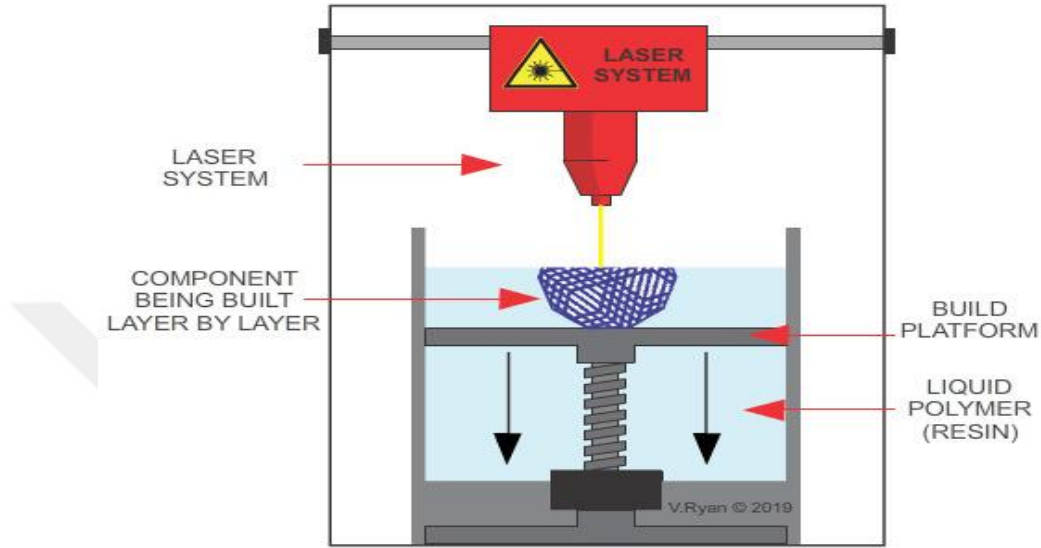
1.3.1. Stereolithografi

SLA, oda sıcaklığında sıvı halde bulunan fotopolimer reçine tabakasının ultraviyole lazer ışını vasıtasıyla geometrik şekle göre belirlenmiş olan bölgelerinin küreleştirilmesi temeline dayanır ve Stereolithografi, 1984-1986 yılları arasında Charles Hull tarafından patentlenen ilk ekipman ve 1988'de 3D Systems şirketi tarafından geliştirilen ilk ticari makine ile 3D baskının arkasındaki süreç olarak kabul edilmektedir (USA Patent No. US4575330A, 1986). Küreleştirme, üç boyutlu yazıcı teknolojilerinin esasını oluşturan eklemeli imalat mantığına göre yapılır. Bu veriler doğrultusunda hareket eden lazer ışını reçine tabakasını tarayarak küreleştirme işlemini yapar. İlk katman katılaştırıldıktan sonra inşa platformu bir katman yüksekliği kadar hareket eder ve üstüne reçine katmanı sıvanır ve küreleştirme işlemi tekrarlanır (Sürmen, 2019).

Katmanlar üst üste birleştirilerek obje imal edilir. belirli bir geometriye sahip olmayan sıvı haldeki reçineden çok ayrıntılı geometrilere sahip üç boyutlu objeler elde edilebilmektedir. Yüksek doğruluk derecesine sahip, pürüzsüz yüzeylerin elde

edilebildiği bu üç boyutlu baskı teknolojisi birçok alanda detaylı objelerin üretimine imkan sağlamaktadır. (Chartier & Chaput, 2007).

Görsel 1.1.'de SLA teknolojisine ait makine ve ana parçalarını detaylı bir şekilde gösterilmektedir.



Görsel 1.1. SLA makinesi ve bölümleri (Ryan, 2019)

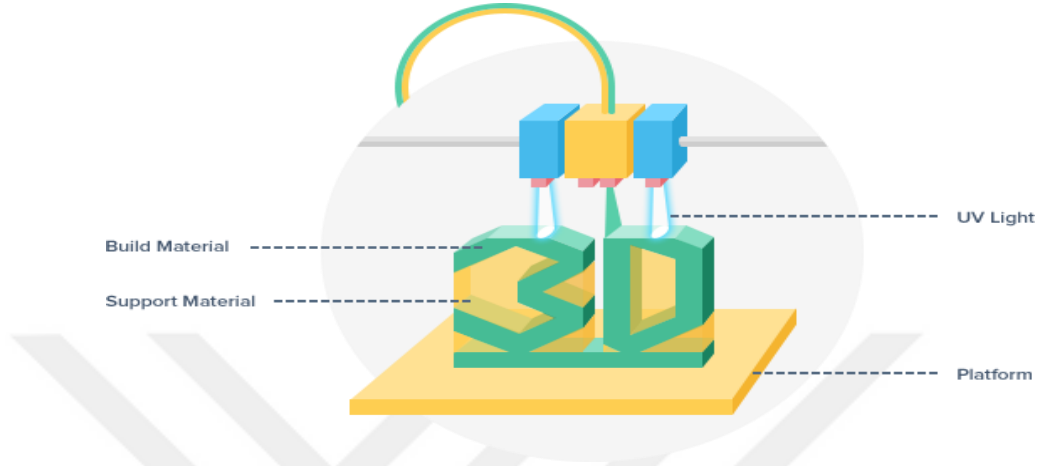
1.3.2. Polijet

Polyjet yönteminin çevirisi baz alınmıştır.

Fotopolimer reçine malzemesi ile üç boyutlu nesne üretiminde kullanılan diğer bir üç boyutlu baskı teknolojisi de çoklu püskürtmedir. İnkjet teknolojisi mantığıyla çalışan bu teknoloji renkli parçalar üretmek için kullanılabilmesinin yanı sıra aynı anda birden fazla malzemeyi basabilen üstün özelliklere sahip ve baskı hızı yüksek bir teknolojidir (Wong & Hernandez, 2012). Bu özellik sayesinde basılan nesnenin istenen kısımları sert veya yumuşak olarak ayarlanabilir. Böylece tek parça üzerinde farklı mekanik özelliklere sahip kısımlar elde edilebilir. Pürüzsüz yüzeyli, detaylı geometrilere sahip parçaların üretiminde ideal olan bu teknoloji mürekkep püskürtmeli iki boyutlu yazıcıların baskı sistemi ile SL baskı teknolojisinin birleştirilmiş hali gibidir. (Sürmen, 2019).

Reçine basım tablasına püskürtülürken UV ışını kullanılarak kürleştirme işlemi yapılır ve diğer üç boyutlu baskı teknolojilerinde olduğu gibi aynı süreç dahilinde oluşturulmuş katmanın üzerine diğer katman eklenerek parçanın üretimi tamamlanır. Farklı malzemelerin kullanılabildiği Polijet imalat teknolojisi ile destek yapıları rahatlıkla temizlenebilen ve suyla çözülebilen formda hazırlanabilmektedir (Adamidis, Alber, &

Anastasopoulos, 2018). Destek kısımlarının temizlenmesi sorunsuz bir şekilde yapılmakta ve temizleme işlemi sonunda dış yüzeyde iz bırakılmamaktadır. Bu durum ise imalat sonrası destek malzemesinden kaynaklı yüzey hataları vb. minimum seviyede tutmaktadır.



Görsel 1.2. Polijet makinesi ve bölümleri (Additive-3D, 2014)

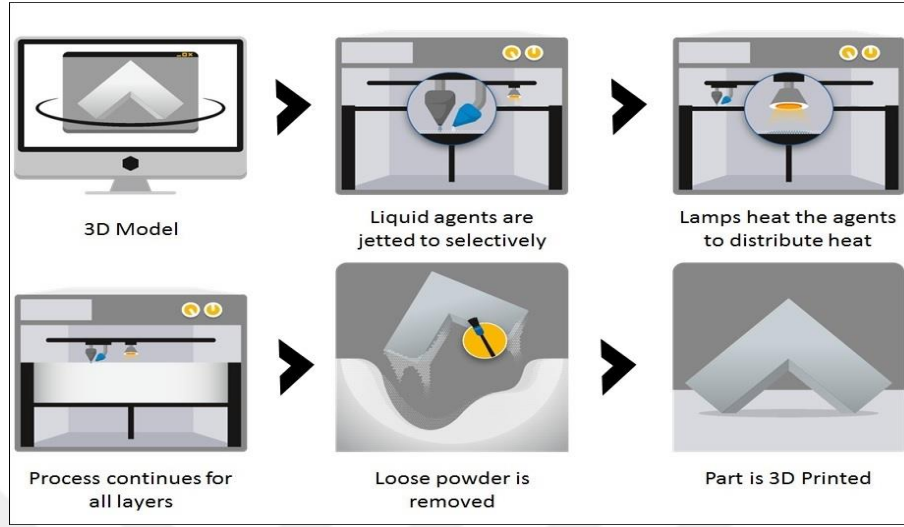
1.3.3. Multijet

Multi Jet Modelling yönteminin çevirisi baz alınmıştır. Kısaltma olarak MJM kullanılmaktadır.

Stereolitografiye benzer şekilde, yüksek kaliteli 3D yazıcı Multijet işlemleri bir fotopolimeri çapraz bağlamak için bir UV ışığı kullanılır. Buna ek olarak katmanları iyileştirmek için bir lazeri taramak yerine bir yazıcı kafası ile fotopolimerin küçük damlacıklarını birinci katman şeklinde püskürtür. Yazıcı kafasına takılan UV ışını polimeri çapraz bağlar ve tabakanın şeklini yerinde sabitler. Yapı platformu daha sonra bir katman kalınlığını düşürür ve daha fazla malzeme doğrudan önceki katmana biriktirilir. Bu işlem, parçanın yazdırılması tamamlanana kadar tekrar edilir.

Multijet özellikli üç boyutlu yazıcılar, ince özelliklere sahip oldukça karmaşık ve yüksek çözünürlüklü parçalar üretebilir lakin SLS ve FDM parçalarının gücünden yoksundur. Belirli konsantrasyonlarda ve mikro yapılarda iki veya üç malzemeyi bir araya getiren bu teknoloji, değişen yarı saydamlık, sertlik, termal direnç veya renge sahip bir dizi malzeme üretmeye olanak tanır. Bu işlemi kullanarak tek bir parça, kauçuk benzeri esneklikten ABS benzeri sertliğe kadar çeşitli fiziksel ve mekanik özelliklere sahip malzemeler içerebilir. SLA'ya benzer şekilde, fotopolimer güneş ışığına ve ısıya karşı hassastır ve malzeme zamanla sürebilir. Multijet baskı, tamamen monte edilmiş

prototipler ve çoklu malzeme özelliklerine sahip karmaşık ve ayrıntılı geometriler geliştirmek için harika bir süreçtir (Sculpteo, 2017).

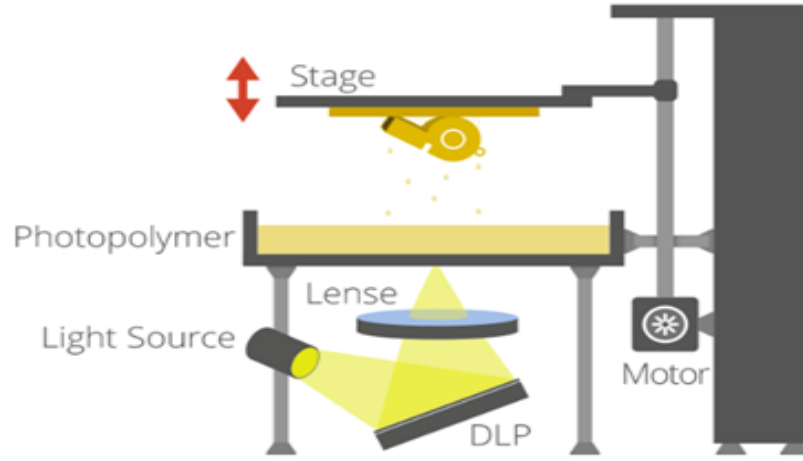


Görsel 1.3. Multijet imalat prosesi (Manufactur3D, 2018)

1.3.4. Dijital ışık izleme

Digital Light Processing yönteminin çevirisi baz alınmıştır. Kısaltma olarak DLP kullanılmaktadır.

Dijital Işık İşleme, Stereolitografiye benzeyen üç boyutlu eklemeli imalat işlemidir. DLP, 1987 yılında Texas Instruments'tan Larry Hornbeck tarafından ticarileştirilmiş ve projektörde popülerleşmiştir. Üç boyutlu baskı için DLP ve SLA foto polimerler ile çalışır. Ancak SLA ve DLP süreçlerini birbirinden benzersiz kılan ışık kaynağıdır. Baskı için malzeme, reçine kabında bulunan sıvı plastik reçinedir. Reçine, ışıktan etkilendiği için hızla sertleşir. Yazdırma hızı oldukça fazladır. İstenen malzeme, birkaç saniye içinde oluşturulabilir. Katman üretimi bittiğinde, yukarı yönlü taşınır ve sıradaki katmanda işlenmeye başlar. DLP'nin SL'e göre avantajı, detaylı üretim için kullanılacak az malzemedir, haliyle bu avantaj düşük maliyet ve atık sağlamaktadır (Marsis, 2020).



Görsel 1.4. Dijital ışık izleme parçaları (Reddy, 2016)

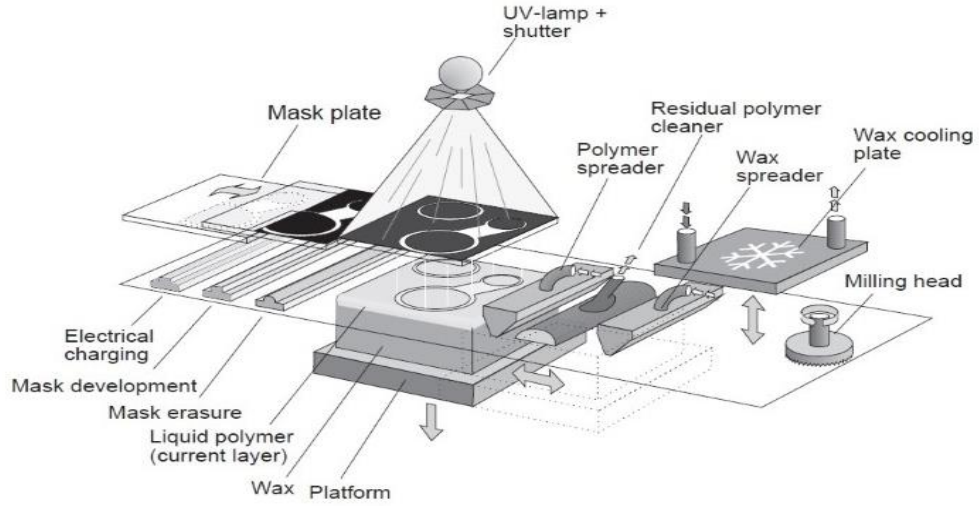
1.3.5. Katı tabaka kürleme

Solid Ground Curing yönteminin çevirisi baz alınmıştır. Kısaltma olarak SGC kullanılmaktadır.

Katı tabaka kürleme (SGC), modeller, örnekler ve oluşturma parçaları sunmak için kullanılan fotoğraf polimer tabanlı ilave madde montajı ve üç boyutlu baskı yeniliğidir. Güçlü zemin kürlemenin temeli, modelin her katmanının bir kapaktan ışık için yöntemlerle sunulması olduğundan, bir katmanın yaşı için hazırlık süresi katmanın doğasından bağımsızdır.

Solid Ground Curing (SGC) 1986 yılında Cubital Ltd. tarafından Solider Framework seçmeli adıyla üretilmiş ve pazarlanmıştır.

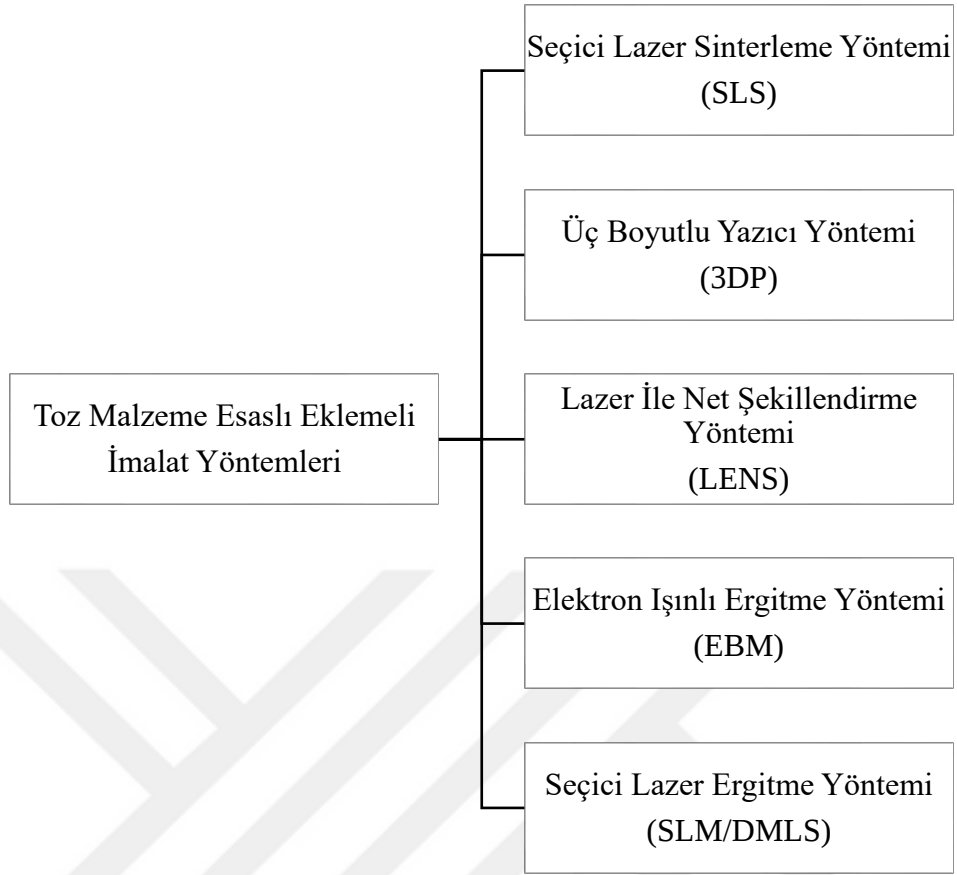
Katı zemin kürleme, istisnai olarak düzenlenmiş maskeler kullanarak tüm yüzeyin tüm aydınlatması ve katılaştırılmasıyla foto polimerlerin pıhtılaşmasına yönelik yaygın tekniği kullanır. SGC işleminde, modelin her katmanı lazerle kontrol yerine ultraviyole (UV) ışık verilerek kürlemektedir (Micheal, 2018).



Görsel 1.5. SGC baskı cihazı parçaları (Micheal, 2018)

1.4. Toz Malzeme Esaslı Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eklemeli imalat yöntemleri imalatı yapılacak ürün ve ürün grupları için kullanılacak malzeme dikkate alınarak gruplandırıldığı bilgisi paylaşılmıştır. İmalat yapılacak ürüne yönelik toz esaslı malzeme kullanımlarında bu yöntem kullanılan hammadde türü, imalat süreci, kullanılan teknoloji vb. sebepler doğrultusunda 5 farklı gruptan oluşturmaktadır. Şekil 1.4.'de malzeme dikkate alınarak gruplandırılmış şema aşağıda yer almaktadır.



Şekil 1.4. Toz malzeme esaslı eklemeli imalat yöntemleri şeması

1.4.1. Seçici lazer sinterleme

Selective Laser Sintering yönteminin çevirisi baz alınmıştır. Kısaltma olarak SLS kullanılmaktadır.

Toz şeklinde hazneye konulan malzeme, lazer ışını ile belirlenmiş geometri dâhilinde sinterlenir. Lazerin aynaya iletmesi, aynanın hareket ederek lazer ışınını parça geometrisine uygun şekilde tablaya yansıtması ile sinterleme başlanır. Sinterleme işlemi sonrası alt kademeye geçilir ve üst üste yerleşimi yapılan katmanlar ile üç boyutlu malzeme imal edilir. Lazer sinterlemeyi özelliği ise eklemeli imalat yöntemlerine kıyasla hızlı olmasıdır (Gibson & Shi, 1997).

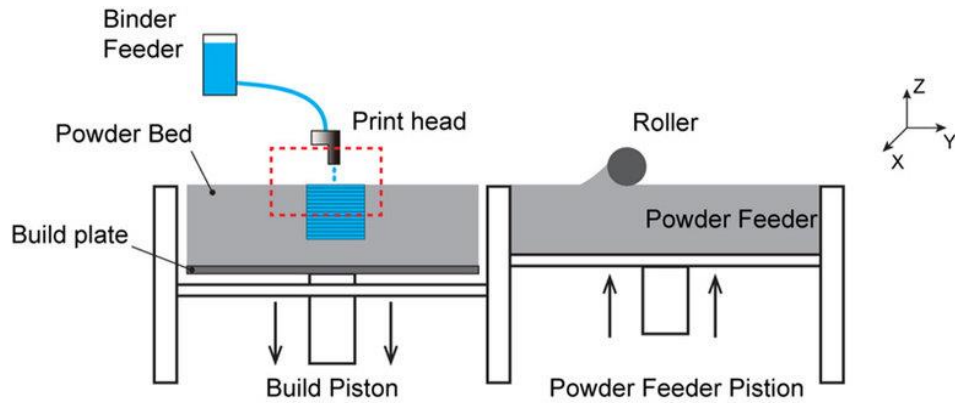


Görsel 1.6. Covid-19'e karşı Daimler'e ait maskenin Sls imalatı (Daimler, 2020)

1.4.2. Üç boyutlu yazıcı

3D Printer yönteminin çevirisi baz alınmıştır. Kısaltma olarak 3DP kullanılmaktadır.

3DP, CAD çiziminden verileri yazdırmak için sıvı bağlayıcının nişasta temelli toz üzerine bir jetle sağlandığı MIT lisanslı işlemidir. Toz parçacıkları kafeste bulunur ve püskürtüldüğünde birbirine yapıştırılır. Bu işleme, kağıda iki boyutlu baskı için kullanılan inkjet baskı işlemine benzerliği nedeniyle 3DP denir. (Wong & Hernandez, 2012).

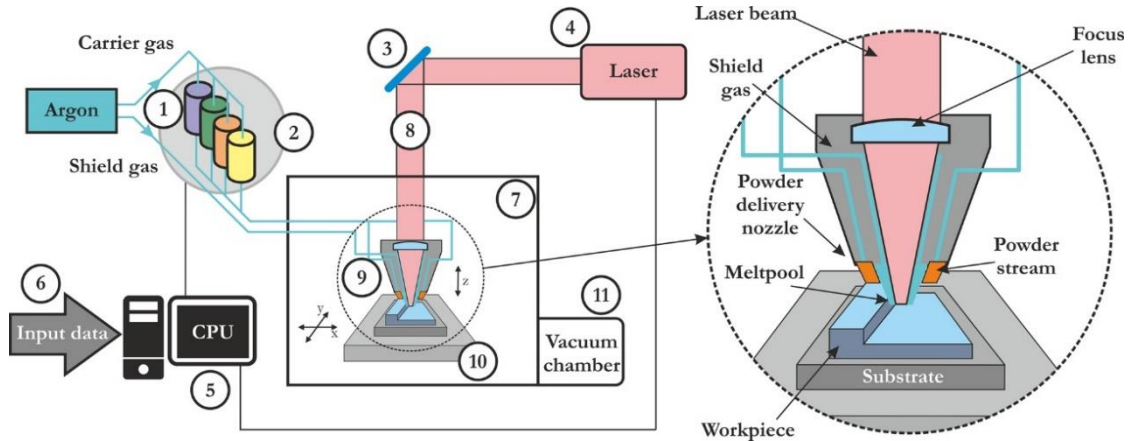


Görsel 1.7. 3DP inkjet proses ve parçaları (Xia & Sanjayan, 2016)

1.4.3. Lazer ile net şekillendirme

Laser Engineered Net Shaping yönteminin çevirisi baz alınmıştır. Kısaltma olarak LENS kullanılmaktadır.

Lazer tabanlı malzeme işleme, ticari lazerlerin gücünün ve verimliliğinin hızla arttığı 1970'lerde önemli bir gelişme alanıydı. Lazer kaplama ilk olarak Gnanamuthu tarafından California'daki Rockwell International Corporation'da kullanılmıştır. Birleşik Krallık, Imperial College'dan Steen ve Weerasinghe ayrıca lazer kaplama teknolojisi üzerinde kayda değer bir etkiye sahipti ve toz enjeksiyon kullanarak lazer kaplamayı sunmuşlardır. Powell (1983) ayrıca bu toz lazer kaplama tekniğini araştırmıştır ve 1988'de önceden yerleştirilmiş lazer kaplama tekniği için teorik bir model ve analiz tekniği geliştirmiştir. 1990'ların sonlarında, hızlı prototipleme için lazer kaplama tanıtıldı. University of Illinois at Urbana-Champaign 'de, Mazumder araştırma grubu, daha sonra doğrudan metal biriktirme ve DED olarak adlandırılan hızlı prototipleme için bir yöntem geliştirmiştir. Bu araştırma grubu yapı parçalarını bir ve iki boyutta değerlendirmiştir. Diğer birçok araştırma ve geliştirme grubu, toz enjeksiyonla lazer kaplamaya dayalı metalik parçaların prototiplenmesine yönelik yöntemleri araştırdı. Lockheed Martin Corporation firması tarafından işletilen ve ABD Enerji Bakanlığı tarafından finanse edilen Sandia Ulusal Laboratuvarı'nda net şekle yakın bir lazer üretim yönteminin geliştirilmesi çalışmasını yürütmüşlerdir. LENS olarak adlandırılan bu eklemeli imalat prosesi Optomec Inc. şirketi tarafından 1998 yılında ticarileştirilmiştir ve günümüzde daha fazla gelişim elde edilerek kullanılmaktadır (Izadi, Farzaneh, Mohammed, Gibson, & Rolfe, 2020).

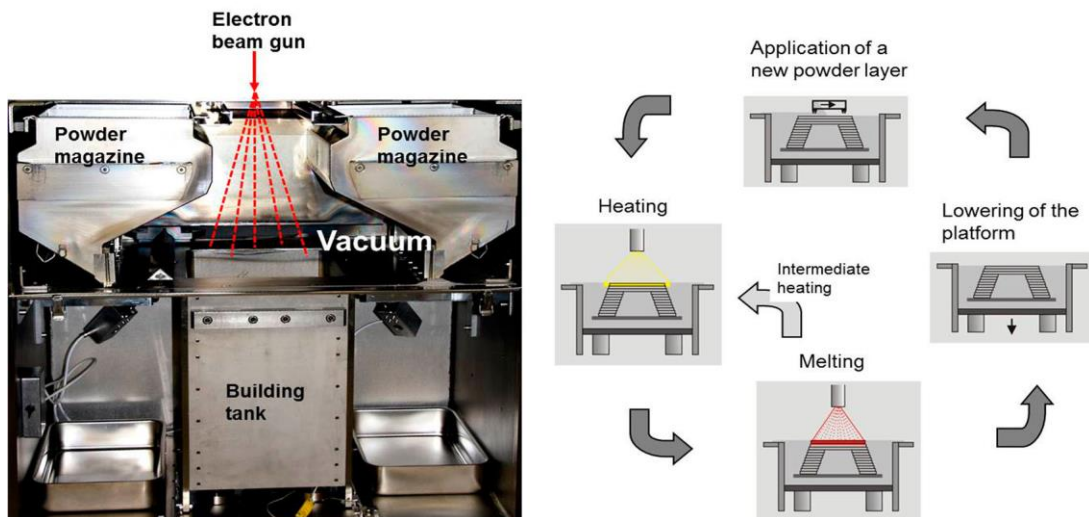


Görsel 1.8. Lens sisteminin prosesi ve parçaları (Baranowski, ve diğerleri, 2019)

1.4.4. Elektron ışınlı ergitme

Elektron Işın Ergitme yöntemi (EBM Electron Beam Melting) toz sinterleme sürecinde electron ışınının enerjisini kullanan bir metoddur.

Elektron ışınlı ergitme, teknoloji üzerinde çalışan SLM sürecine çok benzemektedir. Ancak EBM süreci, SLM süreci ile karşılaştırıldığında bazı farklılıklara sahiptir. Toz parçacıklarının eritilmesi ve füzyonu için lazer ışını yerine bir elektron ışını kullanılmaktadır. Toz yatağı yüksek sıcaklıklarda tutulur ve inşa işinin tamamlanmasından sonra toz yatağını soğutmak için soğutma süreleri gerekir. EBM süreci ışın gücü, ışın tarama hızı, ışın odağı, ışın çapı, ışın hattı aralığı, plaka sıcaklığı, ön ısıtma sıcaklığı (ışın tekrarları, hızı ve gücü) kontur ve tarama stratejisi dahil olmak üzere fazla süreç parametresi içerir. Proses parametrelerinin optimizasyonu SLM prosesinden bile daha zordur ve bu nedenle EBM'de sadece sınırlı malzemeler kullanılmaktadır. Bunlara örnek verecek olursak; Ti grade 2, Ti6Al4V, Inconel 718, CoCrMo. Proses işlemi oldukça yavaştır ve parçaları çok pahalı hale getirir. Ek olarak, hem parçaların boyutu hem de bir kafes yapısı/petek içindeki bir hücrenin minimum boyutu açısından kısıtlamalar mevcuttur. Bununla birlikte, alt tabaka plakasından daha büyük boyutlara sahip parçalar oluşturulabilir. Ancak, bir parçanın ilk katmanlarının boyutu, alt tabaka plakasının boyutundan daha küçük olmalıdır. EBM imalat işlemi, SLM imalat işlemi sırasındaki atıl atmosferden farklı olarak bir vakum atmosferi altında gerçekleşir. Bu nedenle, parçaların oksidasyonu genellikle önlenir. Ayrıca toz partiküllerinin yüzeyi boyunca absorbe edilen gazlar EBM prosesinde gözenek oluşumuna yol açmayacaktır. Zn, Mg, Pb, Bi, vb. gibi uçucu bileşenlere sahip alaşımların işlenmesi tavsiye edilmemektedir (Gokuldoss, Kolla, & Eckert, 2017).

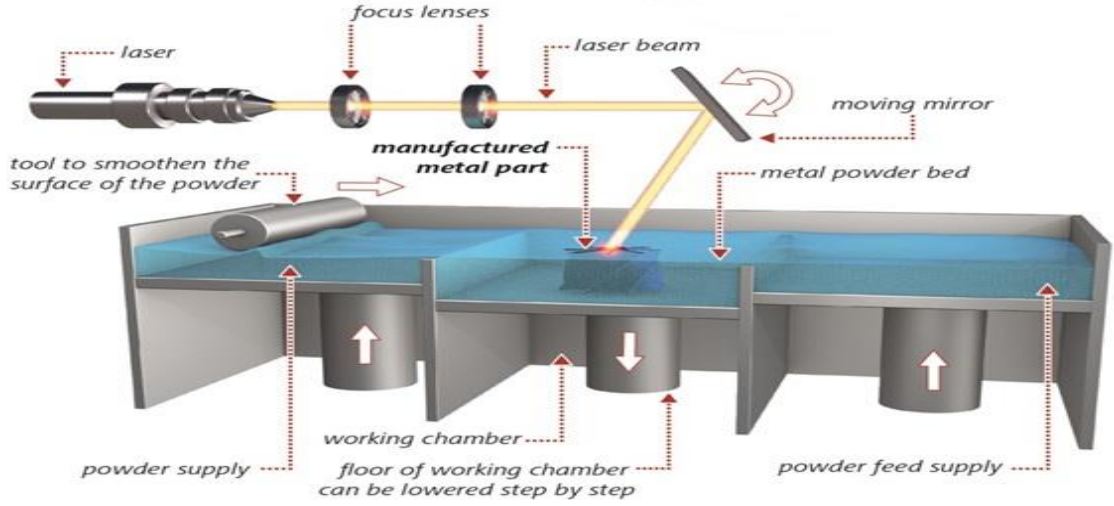


Görsel 1.9. EBM sisteminin prosesi ve parçaları (Körner, 2016)

1.4.5. Seçici lazer eritme

Selective Laser Melting yönteminin çevirisi baz alınmıştır. Kısaltma olarak SLM/DMLS kullanılmaktadır.

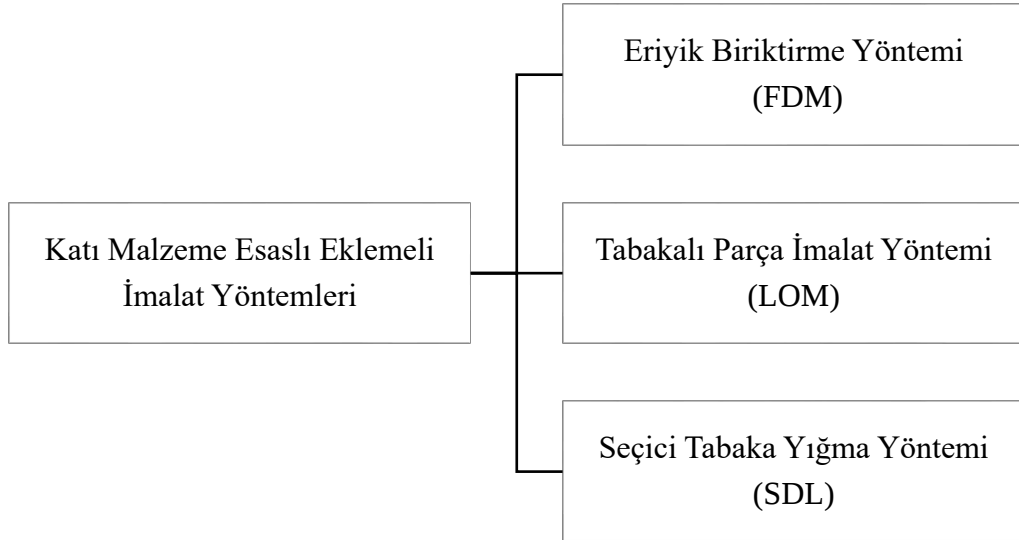
Seçici Lazer Eritme (SLM), F&S Stereolithographie-technik GmbH şirketinden Dr. M. Fockele ve Dr. D. Schwarze tarafından Dr. Meiners, Dr. Wissenbach ve Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT şirketinden ise Dr. Andres ile birlikte Metalik tozlardan metal bileşenler üretmek için geliştirilen bir eklemeli üretim sürecidir. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) verilerine göre, tozun seçici bölgelerini katman katman eritmek ve kaynaştırmak için bir enerji kaynağı olarak yüksek yoğunluklu lazer kullanan bir toz yatağı füzyon işlemidir. Bu teknolojinin patenti ilk olarak 1997 yılında Alman Patent ve Ticari Marka Ofisine uygulanmış ve 1998 yılında yayınlanmıştır. 2001 yılında, Das ve Beaman tarafından doğrudan seçici lazer sinterleme (SLS) konusundaki öncü çalışmalarına dayanarak patent başvurusu yapılmıştır. Proses süreci, imal odasındaki bir alt tabaka plakasına ince bir metal tozu tabakası sermekle başlamaktadır. Toz serildikten sonra, işlenmiş verilere göre seçilen bölgeleri eritmek ve kaynaştırmak için yüksek enerji yoğunluklu bir lazer kullanılır. Lazer tarama tamamlandığında oluşan yapı platformu alçaltılır ve üstüne bir sonraki toz tabakası bırakılır. Bırakılan toz tabakasında lazer yeni bir tabaka tarar. İşlem daha sonra gerekli bileşenler tamamen inşa edilene kadar ardışık toz katmanları için tekrarlanır. SLM eklemeli imalat işlemi sırasında, ısıtılmış metal parçaları oksidasyona karşı korumak ve atmosfer sağlamak için imalat odası genellikle nitrojen gazı veya argon gazı ile doldurulur. Ayrıca, bazı SLM makineleri ya alt tabaka plakasına ya da tüm imal odasına ön ısıtma sağlayabilmektedir. SLM' nin toz malzemeyi tamamen eritebildiğini, parçaların ve desteklerin alt tabaka plakasından çıkarılması dışında son işlemeye gerek kalmadan tamamen yoğun net şekilli bileşenler üretebildiğini literatürlerden anlaşılmaktadır (Yap, ve diğerleri, 2015).



Görsel 1.10. SLM prosesi ve parçaları (Leinenbach, 2018)

1.5. Katı Malzeme Esaslı Eklemeli İmalat Yöntemleri

Eklemeli imalat yöntemleri imalatı yapılacak ürün ve ürün grupları için kullanılacak malzeme dikkate alınarak gruplandırıldığı bilgisi paylaşılmıştır. İmalat yapılacak ürüne yönelik katı esaslı malzeme kullanımlarında bu yöntem kullanılan hammadde türü, imalat süreci, kullanılan teknoloji vb. sebepler doğrultusunda 3 farklı gruptan oluşturmaktadır. Şekil 1.5.'de malzeme dikkate alınarak gruplandırılmış şema aşağıda yer almaktadır.



Şekil 1.5. Katı malzeme esaslı eklemeli imalat yöntemleri şeması

1.5.1. Eriyik biriktirme yöntemi

FDM (Fused Deposition Modelling), 1988 yılında ABD’de bulunan Stratasys Company tarafından sunulan bir kaynaşmış katman işlemi için tescilli, korunan bir ticari

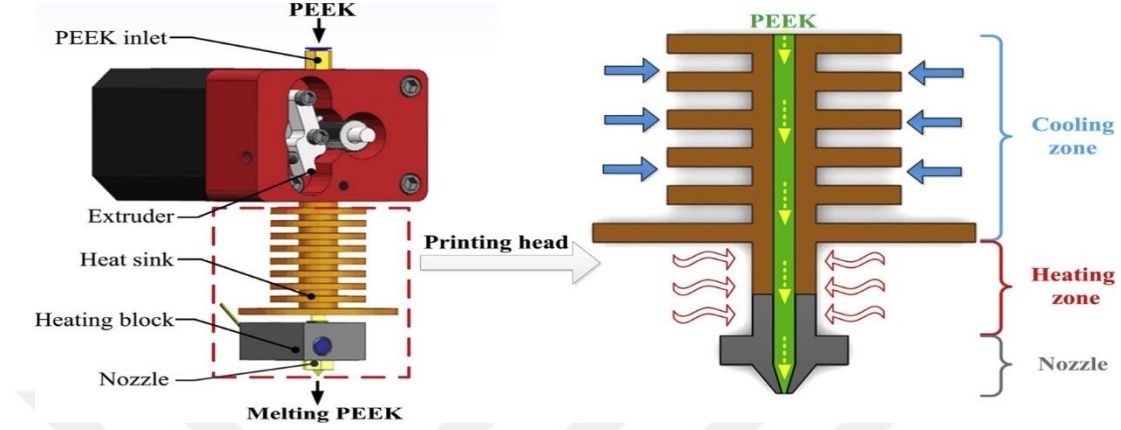
addır. Dünya çapında ilk ticarileştirilmiş FLM süreci olduğu için FDM adı genel bir ad olarak bile FLM ile eş anlamlı olarak kullanılır. FDM eklemeli imalat makinesi ana hatlar olarak bir ekstrüzyon kafası ve bir yapı platformu ile donatılmış, ısıtılmış (ABS plastik işleme için yaklaşık 80 °C) bir yapı odasından oluşur. FDM eklemeli imalat makinesinde parça imalatı için lazer kullanılmamaktadır. Ekstrüzyon kafası gerçek katmanın konturuna göre x-y kartezyen sistemine göre malzeme birikimini sağlar. Temel yapı malzemesi, sarılmış ve sürekli olarak ekstrüzyon kafasına beslendiği bir kartuşta saklanan prefabrike bir filamenttir. Kartuş, makinenin malzeme yönetim sistemi ile iletişim kuran yerleşik bir sensöre sahiptir. Başlıkta, malzeme bir elektrikli ısıtma sistemi ile kısmen eritilir ve katman kalınlığına neredeyse eşit olan tel çapını tanımlayan bir ısıtılmış uçtan ekstrüde edilir. Filamentlerin çapları 0,1 mm ile 0,25 mm arasında değişmektedir. Platform z yönünde hareket eder ve malzeme kısmen tamamlanmış parçanın üstüne sıkıştırıldığından katman kalınlığını tanımlar. İmalat edilen ürüne göre destek malzemesine ihtiyaç duyulabilir. Yapı malzemesiyle aynı anda başka bir plastik destek malzemesini ekstrüde eden ikinci bir nozul tarafından yapılmaktadır. İki malzemenin aynı anda işlenmesi FLM işleminin temelde çok malzemeli baskı kafalarını işleme kapasitesine sahip olduğunu gösterir (Gebhardt, 2011).



Görsel 1.11. FDM yöntemi ile parça imalatı (Texas Prototype, 2019)

FDM eklemeli imalat teknolojisini kullanıldığı alanlar; otomotiv sektörü, aydınlatma, tüm plastik parçala, aksesuar ve mekanik parçalar, elektronik ürün kutuları, silah sistemleri, son kullanıcı ürünleri, prototipler, üretime yardımcı aparat ve fiyestürler, kompozit parça üretimlerinde kullanılmak üzere çözülebilir maça üretimleri gibi bir çok örnek verilebilmektedir (Dijital 3B, 2020).

FDM eklemeli imalatındaki yerini öncelikle filament kullanarak almıştır. Görsel 1.12.' ise FDM eklemeli imalat yöntemi kullanılarak imal edilecek parçanın nozul içerisindeki sıcaklık farklılıkları, akışı, yazıcı parçaları gösterilmiştir.

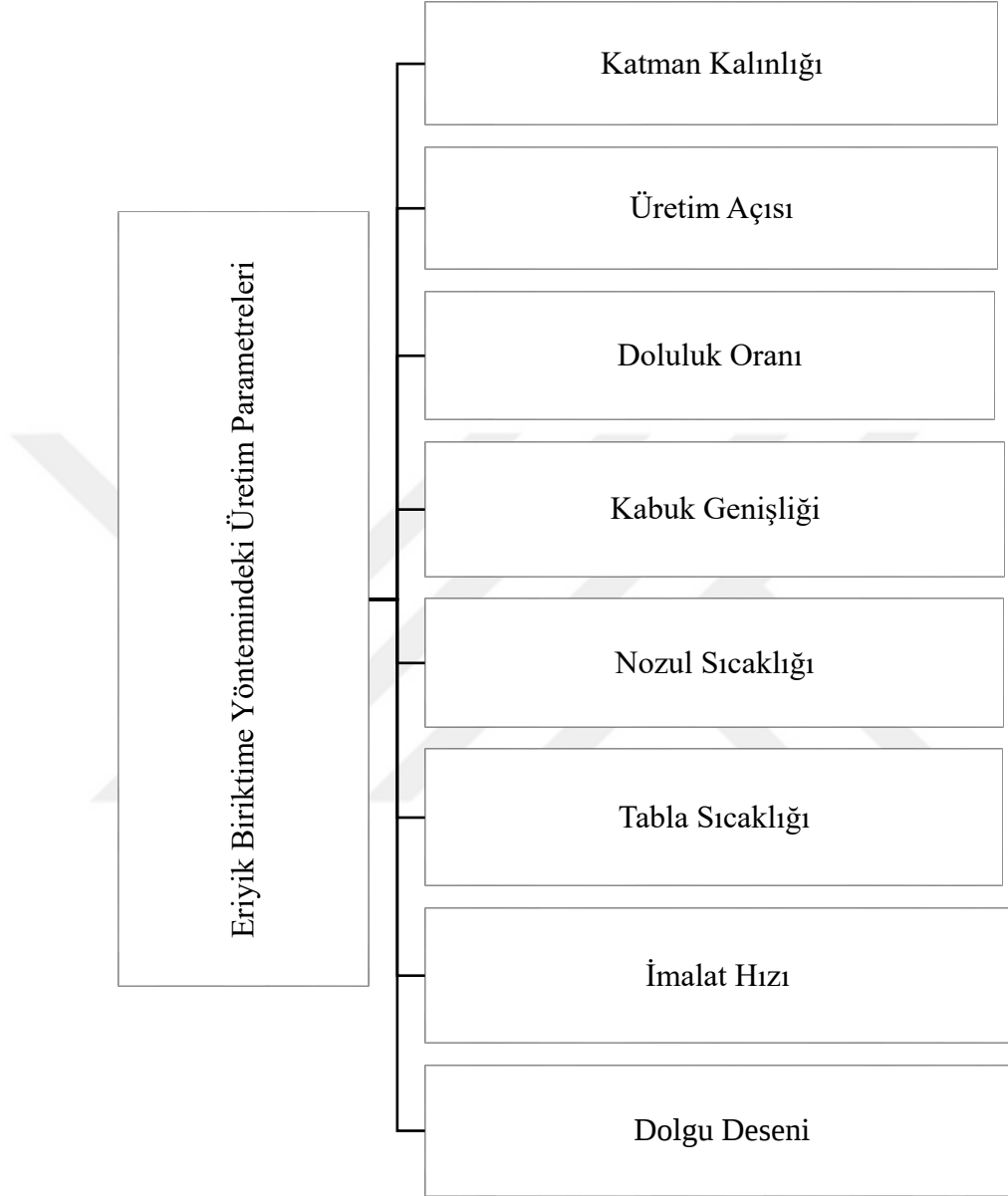


Görsel 1.12. FDM yöntemi kullanılan Peek malzemenin nozuldaki gösterimi (Wang, Zou, Xiao, Ding, & Huang, 2019)

İmalat endüstrisindeki zorlukların üstesinden gelmek için, RP (hızlı prototipleme) süreçlerinin optimizasyonu alanındaki gelişmeleri desteklemek için uygun metodolojilerin geliştirilmesi esastır. FDM, en yaygın olarak kullanılan RP tekniklerinden biridir. Yüksek mukavemetli sağlam prototipler üretmede kanıtlanmış güçlü yönleri vardır. FDM Maxum ve FDM Titan gibi eski modelleyicilerden günümüzün ticari Mojo, uPrint SE, uPrint SE plus, Fortus 250mc, Fortus 360mc, Fortus 400mc ve Fortus 900 mc modelleyicilere kadar çok çeşitli modelleyiciler yani 3D yazıcılar sunar. ABS plusP430, ABSi, ABS-ESD7, ABS-M30, ABS-M30i, PC-ABS, PC-ISO, PC, Nylon 12, ULTEM-9085 ve PPSF PPSU dahil olmak üzere model yani 3D yazıcı malzemelerinin seçimi de ABS M30 için 35,85 MPA, ULTEM-9085 için 71,63 MPA etkileyicidir. FDM model malzemeleri için iyi bir uzama mukavemeti, ısıl sapma, eğilme gerilmesi, darbe mukavemeti ve diğer benzersiz malzeme özellikleri mevcuttur (Srivastava, Maheshwari, Kundra, & Rathee, 2017).

Eriyik biriktirme yöntemi ile imalat yapıldığında farklı ürünler için farklı parametreler kullanılmaktadır. Bunun asıl sebebi malzemeyi en az şekilde kullanarak sürenin minimuma indirmeye yani maliyeti azaltmadır. Bu kapsamda istenen ürün için daha kaliteli, daha ucuz, daha hafif ve daha kullanışlı parça imalatı eklemeli imalatın hedeflerindendir.

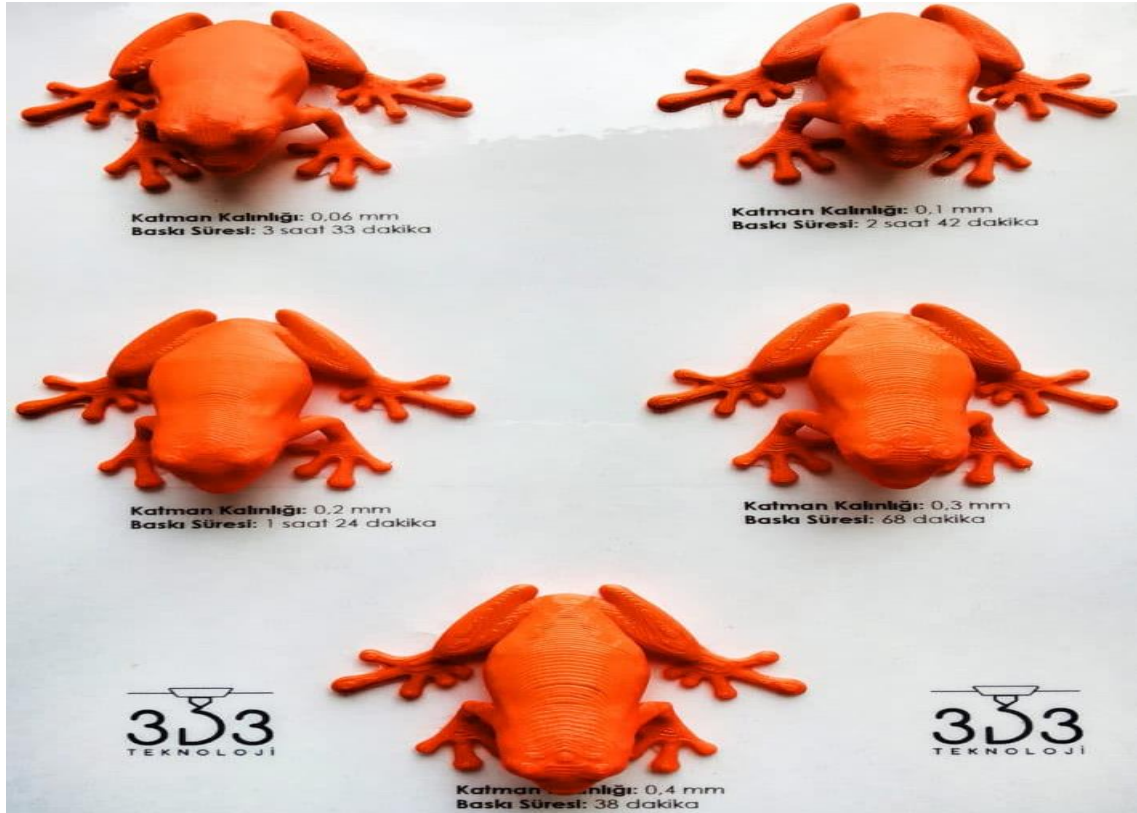
Aşağıdaki Şekil 1.6.'da FDM yani eriyik biriktirme yönteminin parametreleri verilmiştir.

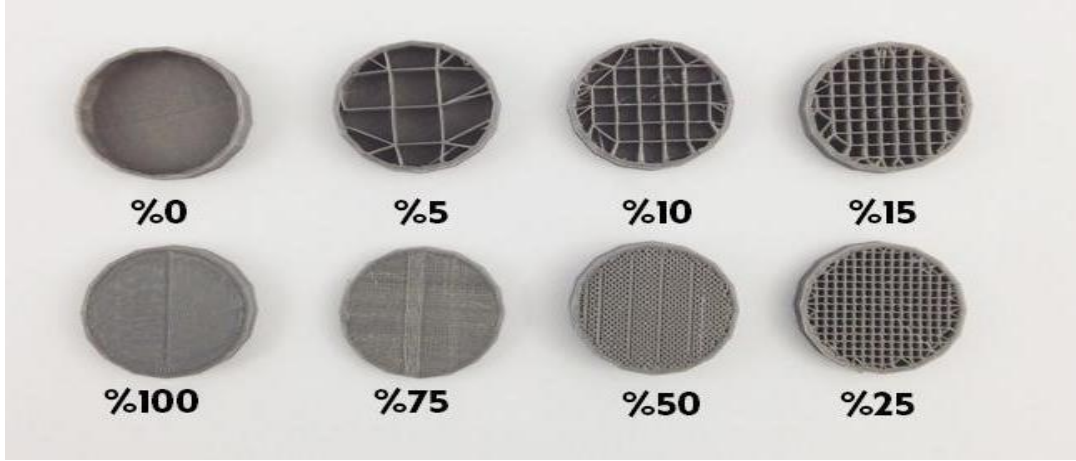


Şekil 1.6. Eriyik biriktirme yöntemindeki üretim parametreleri

1.5.1.1. Katman kalınlığı

Üç boyutlu yazıcılarda üretimde en kritik ve etkili parametrelerden birisi parçanın katman kalınlığıdır. 3 boyutlu modelin yüzeyin kalitesini belirleyen parametrelerden biri olarak bilinmektedir. Katman kalınlığı ne kadar az olursa üç boyutlu modelin yüzey çözünürlüğü o kadar net ve pürüzsüz olacaktır. Fakat yüksek yüzey çözünürlüğü gerekiyorsa baskı imalat süresinin artacağı bilinmektedir. Katman kalınlığı, ince olursa üç boyutlu katmanların üst üste basıldığında baskı süresi bu oranda uzamaktadır.

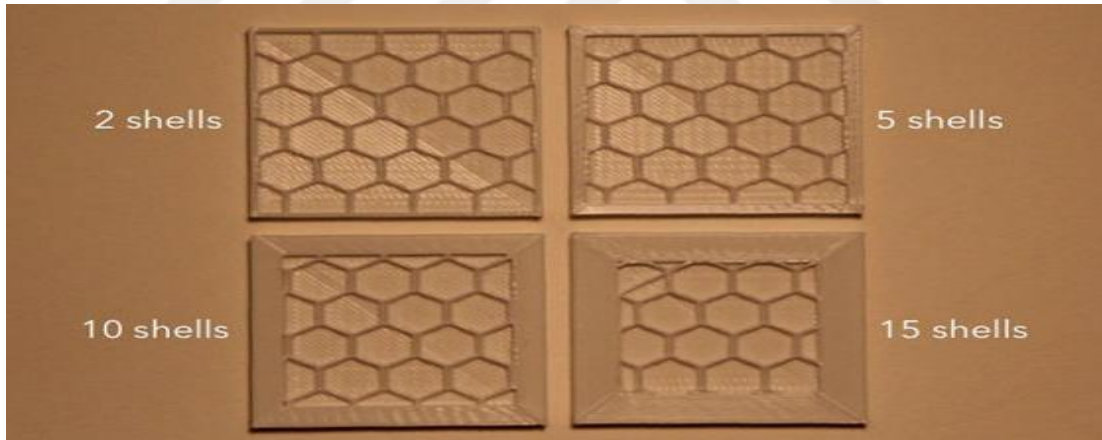




Görsel 1.14. 3D yazıcı ile farklı doluluk oranlarında imal edilmiş ürünler (Tridi, 2019)

1.5.1.4. Kabuk genişliği

Baskı ürününün dış çerçevesini oluşturan kabukların sayısı ve genişliğidir. Kabuk sayısı veya genişliği doluluk oranındaki gibi parçanın mekanik özelliklerine etki eder. Birçok üç boyutlu yazıcının ara yüzünde "Kabuk Sayısı / Number of Shells", varsayılan olarak 2'ye ayarlanmış bulunmaktadır (Tridi, 2019).



Görsel 1.15. 3D yazıcı ile imal edilmiş farklı kabuk sayılarına sahip ürünler (Tridi, 2019)

1.5.1.5. Nozul sıcaklığı

Plastikler ısıtılırken erimekte dirler ancak bu erime hemen olmamakla beraber süreç gerektirmektedir. Gerçekte, süreç karmaşık olsa da basitçe 3 farklı ısıda aşağıdaki şekilde açıklanabilmektedir:

Soğuktan ılığa: Plastik, malzeme olarak katı halde bulunur. Cam geçiş sıcaklığına kadar bu halde kalır.

Ilıktan sıcağa: Plastik bu sıcaklıktan sonra yapışkan ve sünek bir durumdadır. Erime noktasına ısıtılınca kadar ise bu şekilde kalmaktadır.

Sıcaktan erimeye: Plastik, eriyik hale gelmektedir ve baskı için kullanıma uygundur.

Tüm bunlar nozul sisteminin tasarımından parça imalatına kadar ayrı önem taşımaktadır ve göz önünde bulundurulmak zorundadır. Cam geçiş ve erime sıcaklıkları arasındaki noktalar filament veya granül baskı tablasını ve baskı sıcaklıklarını doğrudan etkilemektedir. Bu etki ise her plastik malzeme için farklıdır. Ana düşünce, baskı işlemine etki etmemek ve optimal soğuma için tabla sıcaklığı cam geçiş sıcaklığından fazlaca altında olmalıdır. Filamentin/granülün eriğini sağlamak için, erime sıcaklığının çok üstünde basılmalıdır. Her ürüne göre nozul sıcaklığı değiştirmektedir çünkü her granül/filament kimyasal olarak birbirlerinden çok farklıdır. Örneğin PLA filamenti nişastadan bazlı iken ABS filament petrole bazlıdır (BoyutKat, 2019).

Termoplastiğin kimyasal yapısı, cam geçiş sıcaklığını doğrudan etkilemektedir. Hatasız baskılar için bu sıcaklık dikkate alınır ve her farklı plastik farklı cam geçiş sıcaklığına sahip olduğundan dolayı filamentler farklı bir sıcaklıkta basılmaktadır. Bazı üç boyutlu yazıcı filamentleri ani bir şekilde soğuduğunda büzülür ve tablaya yapışmazlar. Bu büzülme ve yapışma malzemede bazı kusurlara sebep olmaktadır. Isıtılmış bir baskı tablası filamentlerin ekstrüzyon sırasında yavaş soğumasını sağlayarak büzülmeyi minimize etmektedir. Yani kusurları minimize etmek amaçlanır. Isıtılmış bir baskı tablası, ürünün ilk katmanının yapışmasını ve baskı sırasında yataktan ayrılmamasını sağlar. (BoyutKat, 2019).

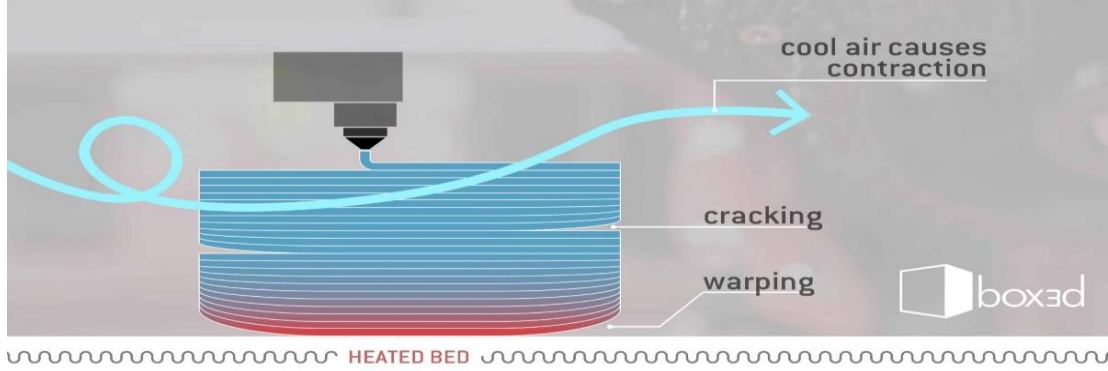
1.5.1.6. Tabla sıcaklığı

Üç boyutlu yazıcılarda tabla sıcaklığı, üzerinde parametre belirlenen en büyük etkenlerden biridir. Nozuldan eriyik şekilde akan plastik malzemenin tablaya yapışmasındaki ana etkeni temsil etmektedir.

Üç boyutlu baskılı malzemenin ortam sıcaklığındaki değişiklikler nedeniyle baskı hataları meydana gelmektedir ve bu hataları minimize etmek ya da önlemek için ısıtılabilir baskı tablaları kullanılır. Tabla ısıtması, silikon yapışkanlı rezistanslar ile yapılmaktadır.

Genel olarak, PLA malzemesinin baskı süresi boyunca bükülme olasılığı erime sıcaklığı özelliklerine bağlı olarak daha düşüktür ve ısıtılmış bir tablaya ihtiyaç

duyulmamaktadır. Lakin ABS, diğer petrol bazlı malzemeler ve termoplastikler gibi eriyik haldeki malzemelerin yatağa yapışması, bükülmeyi önlemesi ve katmanlar arasında çatlama meydana gelmemesi için belirli bir tabla sıcaklığına ihtiyaç duymaktadır.



Görsel 1.16. Kapalı ortam 3D yazıcılarda tabla sıcaklığına bağlı çarpma ve çatlama gösterimi (Boxed, 2017)

1.5.1.7. İmalat hızı

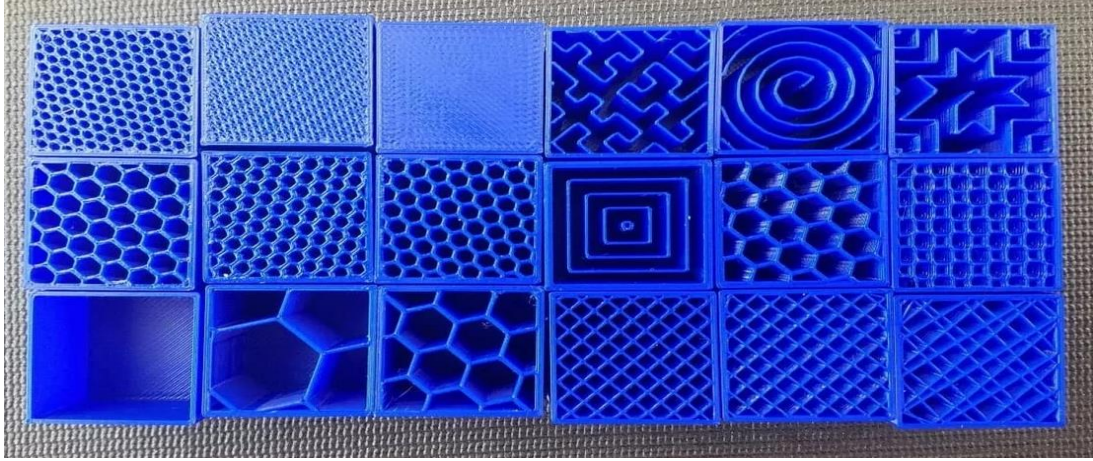
Üç boyutlu yazıcıların baskısında filamentin ve granül ekstrüzyonu esnasında yazıcı ekstruderin sahip olduğu hızdır. Düşük hız, kaliteli baskı sonucuna yüksek hız ise kötü baskı sonucuna yol açar. Yüksek hız baskı süresini azaltırken, düşük hız baskı süresini çoğaltmaktadır. Bu parametreler FDM teknolojisi ile çalışan üç boyutlu yazıcılar için önem taşımaktadır. Bu parametreler birbiri ile uygun oranlanarak, başarılı baskılar elde edebilmektedir. (Tridi, 2019).

Her plastik malzeme ve imal edilecek numuneye göre baskı hızları değişiklik göstermektedir.

1.5.1.8. Dolgu deseni

Eklemeli imalatla baskı alınacak modellerin içinde kalan kısmın doldurulmasına dolgu denmektedir. Dolgu oranı, yüzde oranlar ile %0'dan (boş), %100'e (dolu, katı) kadar farklı oranlarda ayarlanabilmektedir. Farklı yoğunluklarda doluluk ve desenlerle de ayarlanabilmektedir.

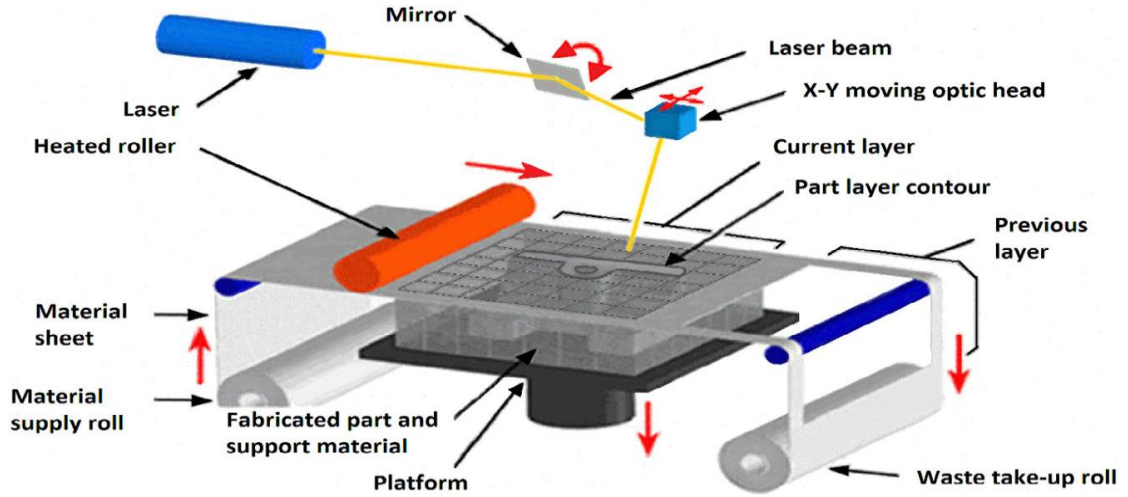
Görsel 1.17.'de farklı türlerdeki dolgu desenleri bulunmaktadır. Cura olarak adlandırılan dilimleme yazılımında 13 farklı dolgu deseni mevcuttur. Baskısı düşünülen ürününün ne amaçla kullanılacağına göre dolgu deseni değişmektedir. Dolgu desenleri; çizgiler, ızgara, üçgenler, üçlü altıgen, kübik, kübik alt bölüm, gyroid, çapraz vb. olarak ayrılmaktadır (3Dörtgen, 2019).



Görsel 1.17. *Farklı dolgu desenlerinin gösterimi (3Dörtgen, 2019)*

1.5.2. Tabakalı parça imalat yöntemi

LOM (Laminated Object Manufacturing) eklemeli imalat prosesi Beaman tarafından ortaya konduğu gibi lamine nesne imalatının (LOM) tarih, 1974 yılında DiMatteo patentiyle ticarileştirilmiştir. Bu patent ile bir tabaka malzemeden katmanlar halinde 2 boyutlu şekilleri kesmek için bilgisayarla çalışan bir araç sunulmuştur. Her işleme adımında şekiller, sürekli olarak birbirine yapıştırılmış olan bir levha yığınının en üst katmanından kesilmiştir. Bu şekilde havacılık için kanat profilleri, pervaneler veya prototip nesneler için oldukça karmaşık geometriler elde edilebilmektedir. DiMatteo patentinde malzeme türünü belirtmemiştir. Bununla birlikte, tarihsel olarak yaygın tabaka malzemeleri kâğıt veya balmumu tabakalarıydı. LOM işleminde, katmanlar ya önce lamine edilip sonra kesilebilir bu da daha az hataya açık parça üretime ve fazla malzemenin destek yapıları olarak kullanılmasına izin verir ya da katmanlar önce kesilip sonra lamine edilebilmektedir. Kısacası LOM prosesi bir hızlı prototipleme tekniği gibi ilave bir üretim prosesidir. Lazer ışını veya bir kesme aparatı kullanılarak şekil oluşturmak için katı nesne kesilir ve CAD diyagramının geometrik koordinatlarında yollarını keser. Katı nesne, imalat işlemi sırasında katmanlı bir biçimde birleştirilmiş metal veya plastik lamineye yapıştırılmış tabaka olabilir. LOM, diğer prototip oluşturma tekniklerinden daha hızlı ve ucuza taslak modeller oluşturmayı mümkün kılmaktadır. (Dermeik & Travitzky, 2020)



Görsel 1.18. LOM prosesi ve parçaları (Dermeik & Travitzky, 2020)

1.5.3. Seçici tabaka yığma yöntemi

Seçici tabaka yığma (SDL, Selective Deposits Layer), malzeme olarak kağıt kullanılan bir eklemeli imalat baskı işlemidir. İmalat süreci, Lamine Nesne İmalatı (LOM) hızlı prototipleme yöntemine benzemektedir. İşlem, ısıtılmış bir rulo ile art arda yapıştırılan ve bir lazer kesici ile katman katman şekillendirilen yapışkan kaplı kağıt katmanlarını (veya plastik veya metal laminatları) içermektedir. Malzeme içeren bir silindir, her yeni malzeme tabakasını sonuncusunun üzerine taşır ve ürün imalatı tamamlanana kadar işlemi tekrarlar. Bu işlemi kullanarak üç boyutlu yazdırılacak malzemeler, herhangi bir ofis mağazasında hazır fotokopi kâğıdı kullanabileceğiniz için diğer eklemeli imalat yöntemleri ve makinelerine nispeten düşük maliyetlidir. Kağıttan 3D baskılı modeller ahşap benzeri özelliklere sahip olduğundan, bazı ahşap kaplama teknikleri kullanılarak daha fazla ürün işlenebilirler (Sculpteo, 2017).



Görsel 1.19. SDL imalat yöntemi ile imalat yapabilen Mcor Arke yazıcısı (Additive-X, 2016)

1.6. Plastikler

Polimer zincirlerinden oluşan bir malzemeye ısı olarak enerji verildiğinde, polimer zincirlerinin hareketliliğinde, enerji ile doğrultulu şekilde artış meydana gelir. Bu hareketlilik, zincirleri bozarak kaymaya başlayacak ve katı hali ergiyerek akış yapabilecektir. Plastik, kullanıma istinaden tekrardan ısıtılıp eritilebilir ve soğutulup katılaştırılabilmektedir. Kimyasal olmayıp fiziksel ve tersinir olan dönüşüm tekrarlanabilmektedir. Bu tür plastiklere "termoplastik" denmektedir. Çok yaygın kullanılan polimerler (PE, PVC, PS gibi) termoplastiktir (Ekrem, 2006).

Isı ile bir kez şekil verdikten sonra tekrar ısıtıldıklarında bozulma yaşan polimerlere “termoset” olarak adlandırılır. Termosetler ısıtıldıklarında tekrar yumuşamaz ve ergimezler. Polimer zincirlerindeki bağlar, ısıtılmaya karşı direnebilir. Belli sıcaklıklara ulaşıldığında bağlar kopabilir ve bozunarak tersinmez şekilde tepkime vermektedir. Termoset plastikler, ısıtılıp soğutulularak şekillendirilemezler. Özel olarak şekillendirilecekleri kalıpta kimyasal tepkimeye sokularak termoset malzeme üretimi sağlanabilir (Ekrem, 2006).

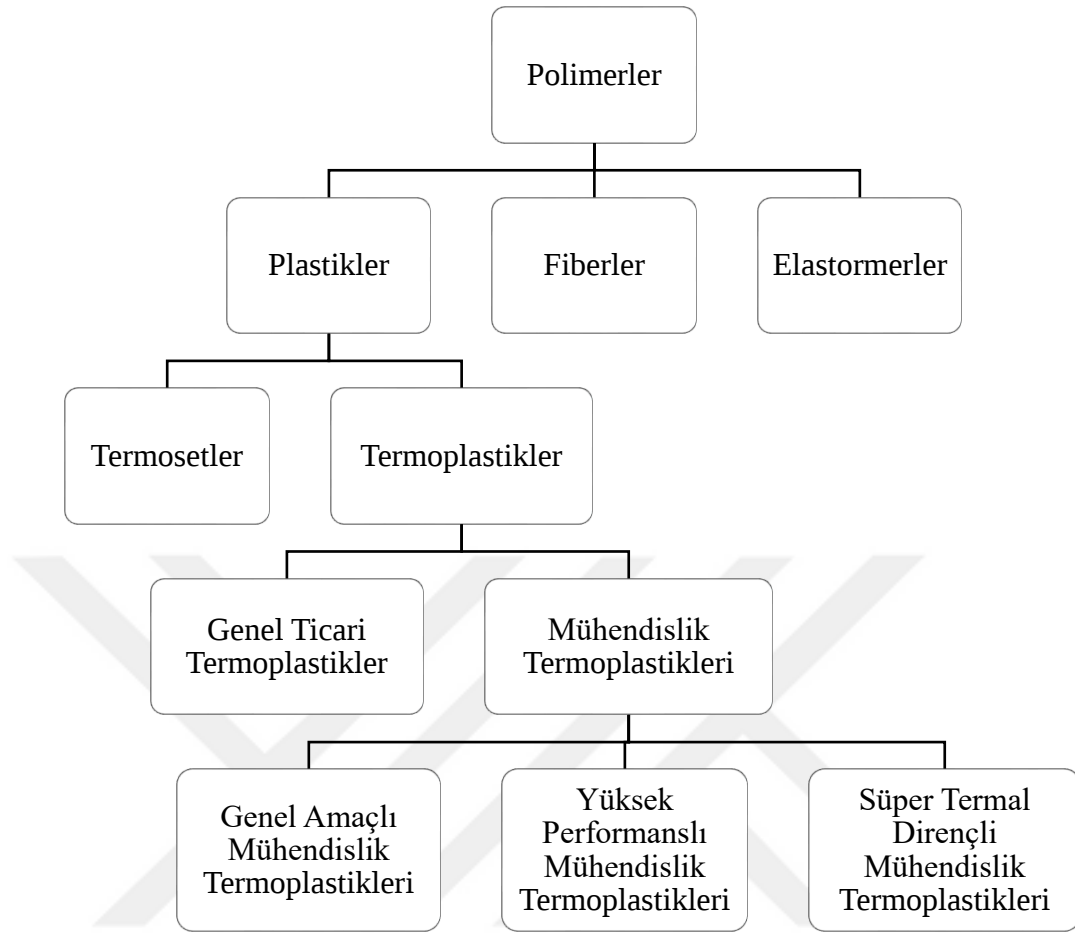
Polimerlerin kullanım alanlarındaki çokluğunun önemli olması yani avantajları şöyle sıralanır (Ekrem, 2006)

- ❖ Düşük yoğunluğa sahip olması ve dayanım oranının yüksek olması,
- ❖ Korozyon direncinin yüksek, düşük ısı ve elektrik iletkenliği,
- ❖ İmalat için az enerjiye gerek duyulması,
- ❖ Kompozit malzemelerde yaygın kullanılması.

Polimerlerin dezavantajları ise şöyle özetleyebiliriz (Ekrem, 2006):

- ❖ Daha düşük dayanıma sahip olmaları,
- ❖ Elastik modülünün düşük olmaları,
- ❖ Yükleme şartlarının düşük olmalarıdır.

Şekil 1.7.'de polimer bazlı ürünlerin genel sınıflandırma şeması yer almaktadır.



Şekil 1.7. Polimer bazlı ürünlerin genel sınıflandırma şeması

1.7. Termosetler

Termosetler, uzun polimer moleküller haline gelmesi ile oluşmaktadır. Bu oluşumun gerçekleşebilmesi için katalizörlere, iyileştirme malzemelerine, ısıya ve mikrodalga gibi dış etkenlere ihtiyaç vardır. Kimyasal reaksiyon işlemi geri döndürülemez. Termoset reçinelerin diğer bir özelliği kırılğan olmasıdır ve kimyasal dirençleri oldukça iyidir. Kompozit için kullanılan termosetler; epoksiler, polyesterler ve fenoliklerdir (Ekrem, 2006).

Tablo 1.1. Termoset malzemelerin özellikleri (Ekrem, 2006)

Özellikler	Epoksi	Polyester	Fenolik
Yoğunluk (gr/cm ³)	1,11	1,04-1,46	1,24-1,32
Elastiklik Modülü (MPa)	7000	3400	4800
Çekme Dayanımı (MPa)	70	41-90	34-62

Kopma Uzaması (%)	3-6	42	1,5-2
Isıl İletkenlik	0,19	0,19	0,15
Isıl Genleşme (1/ °C)	45-65	55-100	68

1.8. Termoplastikler

Metal harici malzemeler, genellikle plastikler olarak üretim koşullarında karşımıza çıkmaktadır. Termoset, termoplastik ve elastomerler bu grup altında incelenebilir. Bu noktada, eklemeli imalat yöntemlerinin metal olmayan malzemeler için bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır (Çelik & Özkan, 2017). Termoplastikler, ısıtıldıkları zaman yumuşar ve akar, soğutulunca sertleşirler yani katılaşır. Bu şekillendirme esnasında kimyasal değişime uğramazlar. Polimerizasyon adı verilen kimyasal işlemle elde edilirler. Yüksek sıcaklıklarda ise termoplastik malzeme zincirler arası bağlar zayıflar. (Ay, 2010)

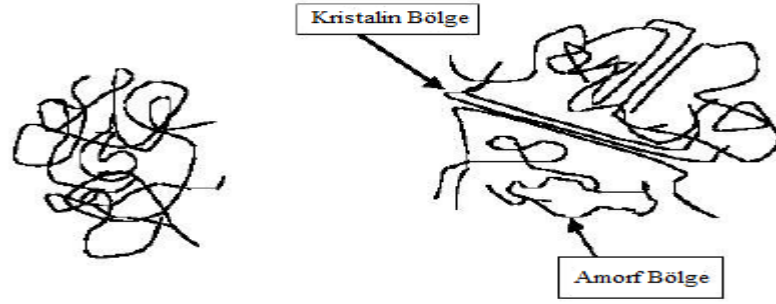


Görsel 1.20. Termoplastik ürünler (Talın, 2020)

❖ Termoplastiklerin genel özellikleri:

- 1) Çekme dayanımları düşüktür.
- 2) Sertlikleri dayanımları yüksektir.
- 3) Basınç altında şekil değiştirebilirler.
- 4) Yoğunlukları diğer malzemelere göre düşüktürler.
- 5) Termal uzama katsayıları yüksektir.
- 6) İşlenmeye oldukça elverişlidir.
- 7) Isı ve elektrik iletkenlik katsayıları düşüktür (Talın, 2020).

Termoplastikler, sünek ve termosetlere göre sert malzemelerdir. Termoplastik moleküller esnektir ve yeniden şekillendirilebilirler. Şekil 1.8’de yer alan şekilde amorf veya yarı kristalin olabilirler. Amorf moleküller rastgele düzenlenmiş bir yapıdadır. Kristalin moleküller ise sıkı ve düzenli bir yapıdadır (Dave & Loos, 2000).



Şekil 1.8. Amorf ve kristalin bölge (Mazumdar, 2002)

Moleküllerin karmaşık yapısı, plastiklerin % 100 kristalize olmasına olanak vermemektedir. Termoplastikler, termosetlere göre yüksek sıcaklıklarda, düşük dayanım göstermektedirler. Çözeltilere karşı ise daha kolay etkilenebilir yapıdadırlar.

Termoplastikler, normal sıcaklık olarak tabir edilen oda sıcaklığında katı haldedirler. Bu sebepten ötürü çizgisel molekül zincirleri birbirine Van der Waals bağları ile bağlantılıdır. Soğutulunca yeniden sertleşirler. Sıcaklık artışı oldukça viskoziteleri düşmektedir. Ara yüzey bağı termosete göre daha zordur (Ekrem, 2006).

1.8.1. Termoplastik türleri

Termoplastik birçok türden oluşmaktadır. Genel olarak özelliklerine göre üç grup altında sınıflandırılabilir. Bunlar aşağıdaki tablo 1.2.'de belirtilen genel amaçlı mühendislik plastikleri, tablo 1.3.'de yüksek performanslı mühendislik plastikleri ve tablo 1.4.'de süper termal dirençli mühendislik plastikleri 'dir.

Tablo 1.2. Genel amaçlı mühendislik plastikleri (Beşergil, 2010)

Amorf	Yarı-kristalin veya kristalin
Polifenilenoksit (PPO)	Polioksimetilen (POM)
Polifenileter (PPE)	Poliamid (PA)
Termoplastik Poliüretan (TPU)	Polietilentereftalat (PET)
Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS)	Polibütentereftalat (PBT)
Polimetilmetakrilat (PMMA)	Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE)
Polikarbon (PC)	

Tablo 1.3. Yüksek performanslı mühendislik plastikleri (Beşergil, 2010)

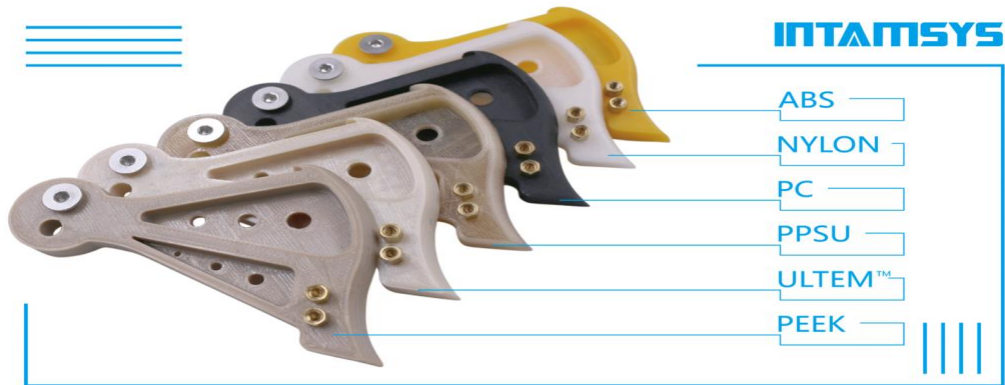
Amorf	Yarı-kristalin veya kristalin
-------	-------------------------------

Polieterimid (PEI)	Polivinilidenfluorür (PVDF)
Polisülfon (PSU)	Politetrafluoroetilen (PTFE)
Polietersülfon (PES)	Etilenklorotrifluoroetilen (ECTFE)
Poliarilsülfon (PAS)	Fluoroetilenpropilen (FEP)
	Perfluoroalkoksi (PFA)
	Polifenilensülfür (PPS)
	Polietereterketon (PEEK)
	Sıvı kristal polimer (LCP)

Tablo 1.4. Termal dirençli mühendislik plastikleri (Beşergil, 2010)

Amorf	Yarı-kristalin veya kristalin
Poliamidimid (PAI)	Poliimid (PI)
Polibenzimidazol (PBI)	

Tablolarda belirtilen bazı sık kullanıma sahip termoplastikler malzemelere aşağıdaki başlıklar kapsamında detaylı bir şekilde değinilmiştir.



Görsel 1.21. Yüksek performanslı ve kompozit termoplastikler (Intamsys, 2018)

1.8.1.1. Polietilen (PE)

Kullanılmakta olan toplam plastiğin %35'e varan kısmı polietilen plastiktir. En fazla kullanılan ve ucuz maliyetli plastik olarak bilinmektedir. Saydamdır ve sudan hafiftir. Simetrik moleküler yapıları ile genellikle kristalleşebilirler. Kristallik arttıkça özgül ağırlık, mukavemet yükselmektedir (Talın, 2020).

Paketleme, ambalajlama, boru hortumu ve birçok mutfak eşyasında kullanılır (Talın, 2020).



Görsel 1.22. PE düz ambalaj shrink film (Patel, 2013)

1.8.1.2. Polivinilklorür (PVC)

Polietilenden sonra fazlaca kullanılan plastik türüdür. Polietilen gibi ucuzdur. Dayanım yüksek, kimyasal etkilere ve aşınmaya karşı dayanıklıdır. Alevle yanmaya dirençlidir lakin yandığında zehirli gaz yaymaktadır (Talın, 2020).

Döşeme kaplamaları, boru, yapay deri üretim işlemleri için elverişlidir. PVC profil olarak büyük ölçüde kullanılmaktadır (Talın, 2020).



Görsel 1.23. PVC tesisat borusu (Erkulah, 2018)

1.8.1.3. Poliamid (PA)

Genellikle naylon olarak bilinmektedirler. Dayanımı, rijitliği ve tokluğu yüksektir. Kristalleşme oranı ile mekanik özellikleri ve ergime sıcaklığı oranlar doğru orantılıdır. Sert plastik olup aşınmaya, bükülmeye karşı dayanıklıdır (Talın, 2020).

Askeri uygulamalardan gıda sektörüne kadar geniş bir kullanım alanı vardır. Denizcilikte, halat üretiminde kullanılmaktadır (Talın, 2020).



Görsel 1.24. *Poliamid partikülleri (Tetraco, 2011)*

1.8.1.4. Polikarbon (PC)

Boyutlarının kararlılığından dolayı otomobil ve uçak endüstrisinde dişli, kama, takım sapları gibi parçaların üretiminde kullanılmaktadır (Talın, 2020).



Görsel 1.25. *Şeffaf polikarbon koruma gözlüğü (3M, 2013)*

1.8.1.5. Akrilonitril bütadien stiren (ABS)

ABS termoplastik özelliğini özel yapan yüksek mukavemetli ve darbe dayanımı sayesinde termoform yeteneğidir. ABS heterojen yapısal uygulamalara son derece uyumludur. Kozmetik ve kapsamlı kullanılabilirlik ömrü boyunca dayanıklı olması, küçük ve detay odaklı kapların hazırlanmasını sağlar (Visonpack , 2019).

Ruj kapları, kompaktlar, maskara tüpleri, paneller, tekerlek jant kapakları, atık boruları, araç iç düzenlemelerinde ABS kullanılan örneklerdir (Visonpack , 2019).



Görsel 1.26. ABS tesisat boru parçaları (Bors, 2010)

1.8.1.6. Polietilen tereftalat (PET)

PET giyimde kullanılan sentetik tekstilleri üretmek için aynı polyester reçinesinden türetilir ve biyolojik olarak parçalanabilen plastikler için kök bileşenlerinden biridir. PET, herhangi bir paketleme ünitesi için en yaygın kullanılan plastiktir. Ambalajlama için kullanışlı yapan özelliği neme karşı reaktif olmayan doğasıdır böylece losyonlar gibi sıvı ve yarı sıvı ürünler için nem bariyeri oluşturur (Visonpack , 2019).

Paketleme filmleri, şişe imalatı, izolasyon ve koruyucu giysiler, paneller, halı ve içi döşemelerin üretiminde kullanılır (Visonpack , 2019).



Görsel 1.27. PET şişe ürünleri (Eshragh , 2020)

1.8.1.7. Polilaktik asit (PLA)

PLA, nişasta, şeker kamışı gibi yenilenebilir kaynaklardan imal edilen biyoaktif termoplastik olmasının yanı sıra bir biyo bozunurdur (Pressreader, 2019).

Market poşetlerinde ve plastik çatal-bıçak takımlarında, hesap makinesi kalıbı ve uzun kullanımlı suluklarda kullanılmaktadır (Pressreader, 2019).



Görsel 1.28. PLA hammaddesi (Pressreader, 2019)

1.8.1.8. Ultem 9085

ULTEM 9085 alev geciktirici, yüksek performanslı termoplastik ve Polieterimid karışımı bir üründür. Yüksek mukavemet ve ağırlık oranı ve FST (alev, duman ve toksisite) derecesine sahiptir (Stratasys, 2017).

Nakliye, otomotiv endüstrisi için kullanımı idealdir. ULTEM 9085 zorlu havacılık ve uzay endüstrisi gereksinimlerini karşılar. Örnek olarak tırların çamurluklarında kullanılan kompozit malzemede mevcuttur (Stratasys, 2017).



Görsel 1.29. ULTEM 9085 ürünü (Stratasys, 2017)

1.8.1.9. Polieter Eter Keton (Peek)

Polieter eter keton (PEEK) polimeri, yarı kristalin termoplastiklerde öne çıkan polimerlerinden biridir (Shekar, Kotresh, Rao, & Kumar, 2009). Peek, organik polimer üzerine yapılan araştırmalar 1960'lı yıllara dayanmaktadır. Peek, ilk olarak 1970'lerin sonlarında 1980'lerin başında 'ICI Advanced Materials' tarafından üretilmiştir ve yine

aynı şirket tarafından ‘Vitrex PEEK’ adı altında ticarileştirilmiştir (Hearle, 2001). ICI ve Leeds Üniversitesi tarafından yapılan araştırmalar bu polimerin yüksek performans özelliklerine sahip olduğunu ve yüksek performans özelliklerinin arandığı teknik ürünlerde kullanıma uygun olduğunu göstermiştir (Hearle, 2001). Bugün lif, film, reçine, kumaş, kablo, membran ve kompozit olmak üzere çeşitli formlarda bulunabilmektedir (Shekar, Kotresh, Rao, & Kumar, 2009).



Görsel 1.30. PEEK malzeme ürünü (Filiz, 2015)

Tablo 1.5.’de farklı Peeklere detaylı şekilde yer verilmiştir. PEEK polimeri 1993’te resmi olarak ICI Advanced Materials’dan ayrılan Vitrex LTD. şirketi tarafından üretilmeye başlanmıştır (Hearle, 2001).

Tablo 1.5. Farklı PEEK polimerlerinin camlaşma ve erime noktaları (Hearle, 2001), (Vegt, 2002)

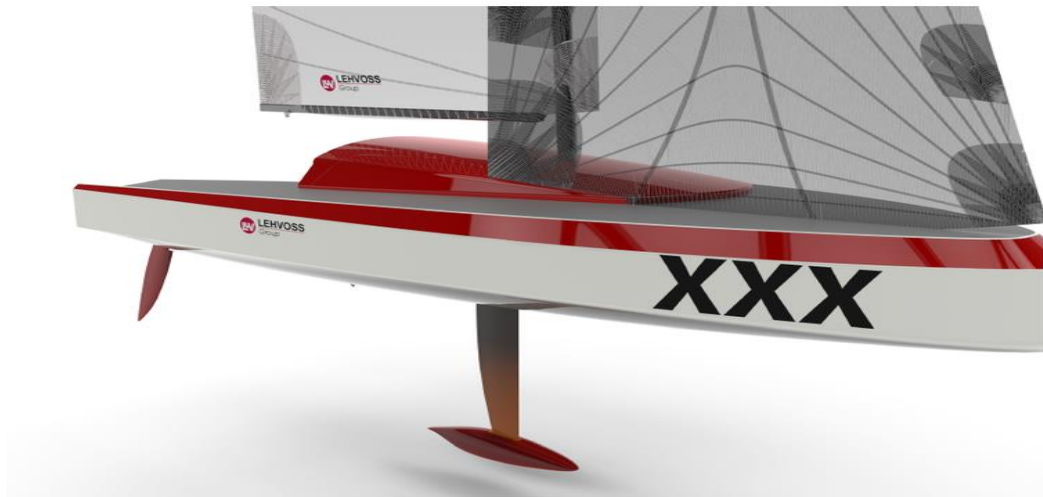
Polimer	Üretici Firma	Tg (°C)	Tm (°C)
PEEK	Vitrex LTD	143-145	334-343
PEEKK	Hoechst	150	365
PEKEKK	BASF	170	381
PEKK	DuPont	165	391

RoHS yönetmelikleri yeni nesil elektrik-elektronik aletlerde kurşun, kadminyum, polibromlu bifenil (PBB), civa, heksavalent krom bileşikler, polibromlu difenileter (PBDE) gibi belirli maddelerin kullanımı sınırlamakta ya da yasaklamaktadır. Peek yapısında bu tür tehlikeli maddeler içermediğinden dolayı elektronik aletlerde kullanılabilir (Kalaycı, Avinç, & Yavaş, 2017).

Güçlendirilmiş termoplastikler (RTP), otomotivden altyapıya ve havacılığa kadar geniş bir sektör yelpazesinde bir dizi yeni uygulama ile göz yaşartıyor gibi gözükmektedir. Kompozit uygulamalar için, termoplastik ana şirketleri tarafından son kullanıcılar ve fiber güçlendirme üreticileri ile ortaklaşa yürütülen olağanüstü geliştirme çalışmaları sayesinde termoplastikler ve termosetler arasındaki boşluk giderek daralmaktadır. Son birkaç yılda uzun elyafli termoplastikler (LFT) tarafından yapılan ve daha yüksek elyaf yüklemesi sağlayan hızlı adımlar, metallere uygun bir alternatif olarak çeşitli çığır açan uygulamalarla sonuçlandığı anlaşılmaktadır. Kısa elyaf takviyeli termoplastiklerdeki son gelişmeler, güçlü bir geri dönüş yaptıklarını göstermektedir. Piper Plastics, karmaşık parçaların sürekli olarak yüksek mekanik özelliklerle kalıplanmasını sağlayan ve LFT bileşikleriyle işleme ve elyaf kırılması endişelerini ortadan kaldıran benzersiz bir kısa elyaf teknolojisi geliştirdiğini iddia etmektedir. İşleme sırasında kaynak hattı mukavemet kayıpları ve elyaf uzunluğundaki azalma, LFT'lerin sıkıntısı olarak kabul edilir ve bildirildiğine göre, daha düşük dolgu yüklerinin kullanımına izin veren bu kısa elyaf teknolojisi ile sorunun üstesinden gelinmiştir. Kalıplanmış bileşenler, LFT emsallerine göre % 20 daha hafif ve % 20-50 daha güçlüdür. PA, PPA, PEI ve PEEK termoplastikler ile 352 MPa'nın üzerinde gerilme mukavemetleri ve 44,816 MPa'yı aşan eğilme modülü elde edildiği bildirilmiştir (Sundaram, Future Trends For Composites Growth Have Never Been Better, 2018).

Airbus A350-900'ün kanatları ve gövde çerçeveleri için kompozitler kullandığı bilinen bir gerçektir. Uçaklarda ağırlıktan tasarruf etme arayışı uzun ömürlüdür. A350-900'ün uçak kapısı bağlantı elemanında alüminyumun yerine karbon fiber takviyeli PEEK kullanıldığı anlaşılmıştır. Metalin kompozitlerle ikame edilmesi, üretimde % 40 daha hafif ve eşit derecede daha ucuz olan malzeme sonuçlanmaktadır. Kompozit yapı, iç tarafta bir destek yapısı ile birlikte bir dış kaplama kullanır. Güçlendirilmiş PEEK braket, dış kaplamayı iç destek yapısı üzerindeki noktalara bağlar. İki bileşen, maksimum geometrik atalet momentinden (MI) yararlanmak için kutu benzeri bir yapı oluşturur. Alüminyum, korozyonu önlemek için özel bir kaplama gerektirirken, güçlendirilmiş PEEK, uçak kapılarının içinde biriken neme karşı dayanıklıdır. Ek olarak, kompozit, aynı koşullar altında alüminyuma kıyasla 100 kata kadar daha uzun yorulma ömrüne ve % 20'ye kadar daha fazla özgül mukavemete ve sertliğe sahip olduğu gözlemlenmektedir (Sundaram, 2016).

Livrea Yacht, İtalya'nın 2017 Ulusal İnovasyon Ödülü'nü kazanan iki İtalyan tekne üreticisi Francesco Belvisi ve Daniele Cevola'nın iddialı bir projesidir. 2014'ten beri Minitransat yarışı için ilk 3D baskılı yat olan Mini 650'yi tasarlamak ve inşa etmek için çalışmaktadırlar. Livrea, Amerika Kupası ve Volvo Ocean Race'de deneyimli mühendisler tarafından desteklenen tüm simülasyon ve değerlendirme çalışmalarını da yürütmektedir. Gerçek tekne yapımı NautiLab ekibi tarafından gerçekleştirilmektedir. Yat projesine paralel olarak, iki girişimci, gerekli kalitedeki parçaları sağlayan şirketleri OCORE ile doğrudan ekstrüzyon 3D baskı teknolojisinin geliştirilmesine öncülük etmiştir. Robotik 3D yazıcı ekstrüder ve nozul gibi baskı donanımını iyileştirmenin yanı sıra fraktallardan esinlenen bir algoritma kullanarak yeni bir malzeme biriktirme stratejisinin patentini aldılar. LEHVOSS Grup, ana şirketi Lehmann&Voss&Co. Almanya, Hamburg'da, süreç geliştirmeyi destekledi ve ek olarak bu teknoloji ve uygulamaya adanmış özelleştirilmiş 3D baskı malzemeleri tasarladı ve teslim etmiştir. LUVOCOM 3F ticari adıyla bu malzemeler, yüksek performanslı Poliamitler ve PEEK gibi termoplastik polimerlere dayanmaktadır. Gerekli mekanik özellikleri elde etmek için bu polimerler karbon fiberlerle güçlendirilmiştir. Ayrıca, baskılı parçalar hiçbir eğrilme göstermezken, malzemeler daha iyi bir katman mukavemeti verecek şekilde modifiye edilmiştir. Bu daha güçlü, daha dayanıklı ve hassas ama aynı zamanda daha hafif parçalarla eklemeli imalat yöntemi kullanılarak Görsel 1.31.'de tasarımı bulunan botu imal etmişlerdir (Lehvoss, 2018).



Görsel 1.31. Livrea Yacht'a ait 3d yazıcı ile imal edilen yelkenli bot (Lehvoss, 2018)

1.9. Taguchi Deney Tasarımı ve Varyans Analizi

Taguchi yöntemi, deney tasarımı yoluyla süreçteki varyasyonu azaltmayı içerir. Yöntemin genel amacı, üreticiye düşük maliyetle yüksek kaliteli ürün üretmektir. Taguchi yöntemi, bu varyasyonu sürdüren Japon bilim adamı Dr. Genichi Taguchi tarafından oluşturulmuş ve geliştirilmiştir. Taguchi, farklı parametrelerdeki sürecin ne kadar iyi çalıştığını tanımlayan bir süreç performans karakteristiğinin ortalamasını ve varyansını nasıl etkilediğini araştırmak için deney tasarlamının yöntemini geliştirmiştir. Taguchi tarafından önerilen deneysel tasarım, süreci etkileyen parametreleri ve bunların değişmesi gereken seviyeleri düzenlemek için ortogonal diziler kullanmayı içerir. Taguchi yöntemi, faktöriyel tasarım gibi tüm olası kombinasyonları test etmek yerine kombinasyon çiftlerini test ederek çalışmaktadır. Bu yöntem minimum miktarda deneme ile hangi faktörlerin ürün kalitesini en çok etkilediğini belirlemek için gerekli verilerin toplanmasını sağlamaktadır. Böylece zaman ve kaynak tasarrufu sağlanmış olur. Taguchi yöntemi en iyi şekilde, orta sayıda değişken (3 ila 50) değişkenler arasında birkaç etkileşim olduğunda ve yalnızca birkaç değişkenin önemli ölçüde katkıda bulunduğu durumlarda kullanılır. Taguchi deney tasarımıyla toplanan veriler üzerindeki Varyans analizi yani Anova analizi, performans karakteristiğini optimize etmek için yeni parametre değerleri seçmek için kullanılmaktadır (Fraley, Oom, Terrien, & Zalewski, 2021).

Farklı tasarım parametrelerinin genel ürün kalitesi ve güvenilirliği üzerindeki etkisini incelemek için çeşitli deney tasarımı (Design of Engineering-DOE) yöntemleri kullanılmaktadır. Mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılan bir DOE yöntemi ise Taguchi yöntemidir. Taguchi yöntemi, deneysel planın basitleştirilmesi gibi çeşitli avantajlar sunan tasarım optimizasyonu için sistematik ve verimli bir yaklaşım sağlamaktadır. Bu sadeleştirme, parçaların üretim zamanında ve maliyetinde bir azalmaya yol açmakla beraber ürün tasarımı ve üretiminde ürün geliştirme döngü süresini büyük ölçüde azaltmaktadır (Fitzharris, Watt, Rosen, & Shofner, 2018).

Taguchi yönteminde, kontrol parametreleri seçilir ve her parametre için uygun değerler belirlenir. Seçilen parametre ve değer sayısına bağlı olarak ortogonal bir dizi seçilir. Bir ortogonal dizi, hangi kontrol parametrelerinin tasarım çıktısının önemli olduğunu belirlemek için istatistiksel olarak analiz edilebilen kontrol parametresi kombinasyonlarının bir alt kümesidir. Deneylerin ölçülen ortalaması ve varyansı, Sinyal-

Gürültü (S/N) oranı olarak bilinen Taguchi yöntemi tarafından kullanılan performans karakteristiğini hesaplamak için kullanılır. S/N oranı, tasarım çıktısının, gürültü parametreleri olarak bilinen, açıkça kontrol edilmeyen parametrelere duyarlılığını ölçmekte kullanılır (Fitzharris, Watt, Rosen, & Shofner, 2018).

Taguchi Yönteminde yer alan genel adımlar aşağıdaki Şekil 1.14'deki gibidir (Fraley, Oom, Terrien, & Zalewski, 2021):



Süreci oluşturan ilk aşama, süreç hedefini veya daha spesifik olarak sürecin performans ölçümü için bir hedef değeri tanımlamaktır. Bu akış hızı, sıcaklık vb. herhangi bir değer olabilir. Performans özelliğindeki hedef değerden sapma, süreç için kayıp fonksiyonunu tanımlamak için kullanılmaktadır.



Süreci oluşturan ikinci aşama ise süreci etkileyen tasarım parametrelerini belirlenmesidir. Parametreler kolayca kontrol edilebilen sıcaklıklar, basınçlar vb. gibi performans ölçümünü etkileyen süreç içindeki değişkenlerdir. Parametrelerin değiştirilmesi gereken düzey sayısı belirtilmelidir. Bir parametreyi değiştirmek için seviye sayısının artırılması, yapılacak deneylerin sayısını arttırmaktadır.



Süreci oluşturan üçüncü aşama ise her deney için sayı ve koşulları gösteren parametre tasarımı için ortogonal diziler oluşturmaktır. Ortogonal dizilerin seçimi, parametre sayısına ve her parametre için varyasyon seviyelerine bağlıdır.



Süreci oluşturan dördüncü aşama ise performans ölçüsü üzerindeki etki hakkında veri toplamak için tamamlanmış dizide belirtilen deneyleri gerçekleştirmektedir.



Süreci oluşturan beşinci aşama ise farklı parametrelerin performans ölçüsü üzerindeki etkisini belirlemek için veri analizini (Anova analizini) tamamlamaktır.

Şekil 1.9. Taguchi yönteminin genel adımları

Her değişkenin yürütülen her deney çıktısı üzerindeki etkisini belirlemek için sinyal-gürültü oran yani SN (signal-to-noise ratio) hesaplanması gerekir. Dizideki ilk deney için SN oranının hesaplanması, performans karakteristiğinin belirli bir hedef değeri

durumunda aşağıda gösterilmiştir. Aşağıdaki denklemlerde s^2 varyanstır. y , belirli bir deney için performans karakteristik değeridir. u , deneme numarasıdır. i , deney sayısını temsil etmektedir.

Nominal en iyi olduğu durumda SN oranı aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır:

$$SN = 10 \log \frac{y^2}{s^2} \quad (1.1)$$

Performans karakteristiğinin en aza indirilmesi durumunda SN oranı aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır:

$$SN = -10 \log \sum_{u=1}^{Ni} \frac{y^2}{Ni} \quad (1.2)$$

Performans karakteristiğinin maksimize edilmesi durumunda SN oranı aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır:

$$SN = -10 \log \frac{1}{Ni} \sum_{u=1}^{Ni} \frac{1}{y^2} \quad (1.3)$$

2. LİTERATÜR ÖZETLERİ

Bu bölümde, eriyik biriktirme yöntemlerinde hammadde olarak kullanılan termoplastik Peek, Peek esaslı kompozit ve Abs malzemeler dikkate alınarak 3 ana başlıkta detaylı incelenmiştir. Eriyik biriktirme yöntemi ile çalışan büyük hacimli eklemeli imalat sistemleri ve eriyik biriktirme yönteminde kullanılan vidalı ekstruderler hakkında yapılan çalışmaların, ASTM D638 standartı ile termoplastik kullanılarak imal edilen numunelerin çekme testleri ve analizleri ile ilgili çalışmaların, üç boyutlu yazıcı, malzeme geri dönüşümleri, Peek ve Abs malzemenin kimyasal, fiziksel özellikleri ve baskı hatalarının giderilmesi konularında kısa özetlere yer verilmiştir.

2.1. Eriyik Biriktirme Yöntemi İle Vidalı Ekstruder Kullanılarak İmalatı Yapılan Parçalar

Eriyik biriktirme metodunun baskı özelliklerini arttırmak için granül beslemeli vidalı ekstrüzyon sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistem ile üretilen PEEK malzemesi farklı çalışma koşulları altında test edilmiştir. Bu vidalı ekstrüzyon baskı sistemi, yüzey pürüzlülüğünü ve baskı hızını arttıran değiştirilebilir baskı kafası tasarımı ile istenilen özelliklerde parçalar basabildiklerini bildirmişlerdir (Tseng, ve diğerleri, 2018).

Uluslararası Uzay İstasyonunda eklemeli imalat uygulamalarının denemeleri üzerine bir çalışma yapmışlardır. NASA, Dünya ve ISS arasındaki lojistiğin kısıtlılığı, ikmal azlığı ve hammadde sıkıntılarından dolayı geri dönüştürülmüş termoplastik malzemeler ile üç boyutlu yazıcı kullanarak baskılar yapmaktadır. NASA, uzay içi mikro yerçekimi mürettebatlı bir ortamda kullanım için platformların ve işlemlerin üretim projelerinin olgunlaşması için çalışmalarına devam edeceğini belirtmektedir. Marshall Uzay Uçuş Merkezi bu teknolojiyi üstlenmiştir. Plastik malzemelerin geri dönüştürülmesini sağlayan Tethers A.Ş. şirketi ile ortak çalışmalar yürütüldüğü anlaşılmıştır. Refabricator olarak adlandırılan sistem, normalde Earthbound 3D yazıcılarla ilişkili olmayan plastik öğeleri bile geri dönüştürebilmektedir. Örneğin; istasyona teslim edilen malzemeler köpük veya plastik torbalarla paketlenmektedir. Uzun menzilli bir keşifte gerekli yedek malzeme miktarı sınırlıdır. Uzayda alan çok önemlidir ve bu probleme çözüm üç boyutlu yazıcı ile üretilmektedir. İmal edilen ürünler; çekme bağlantısı, BEAM modülü radyasyonu sensör kapağı, anten besleme borusu, oksijen üretim sistemi adaptörü gibi örneklerdir (Prater, Werkheiser, Ledbetter, & Morgan, 2018).

3D yazıcılar birçok insanın aşına olduğu bir teknoloji olsa da, şu anda Dünya'da bulunan hiçbir şeye benzemeyen Uluslararası Uzay İstasyonunda (ISS) dahi kullanılmaktadır. Yeni ürünler imal etmek için polimer plastiğini defalarca geri dönüştürebilen hibrit bir üç boyutlu yazıcı olan ve Refabricator olarak bilinen yazıcı ile çalışmalar yapılmaktadır. Bu 3D yazıcı, üretimini video kameralar aracılığıyla denetleyen operatörler tarafından kontrol edilmektedir. Plastiği tekrar tekrar kullanma yeteneği ve geri dönüştürüp işleme uzun vadeli uzay araştırmaları için çok önemlidir. Alabama, Huntsville'deki Marshall Uzay Uçuş Merkezi'nde NASA'nın Uzay İçi Üretim Müdürü Niki Werkheiser şöyle demektedir: “Dünya'nın üzerindeki yörüngede dönerken ihtiyacımız olan birçok şeyi değiştirebiliriz; onları bir ikmal görevinde teslim edebiliyoruz. Ama derin uzaydayken bu seçeneğe sahip değilsiniz; ihtiyaç duyabileceğiniz tüm parçaları ve fazladan malzeme yığınınına sahip olmadan yapabilmelisiniz.” (Nagaraja, 2018)

(Roschli, ve diğerleri, 2019), büyük hacimli eklemeli imalat yönteminin karşılaştığı sorunları ve sorunlara karşı çözümler hakkında çalışma yapmışlardır. Çalışmada hem tasarımda hem de dilimlemede kullanılan yazılımların özelliklerinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamışlardır. PEEK malzemelerin kullanımı ile büyük hacimli kompozit kalıpların imalatı havacılık sektöründe yaygınlaşmaktadır. 1 m³ baskı hacmini geçen ve büyük hacimli eklemeli imalat şeklinde ifade edilen bu yenilikçi üretim teknolojisinde destek parçalarının kullanımının üretim sonrasındaki bitim işlemlerinin minimuma indirilmesi adına gerekliliğini belirtmişlerdir. Bunun nedeni hem parça üzerinde kusurlar bırakması hem de çıkarılması zor olduğu için kaçınılması gerektiğidir. Eriyik biriktirme metodu ile üretim yapan büyük hacimli eklemeli imalat metodunda da üretilen parçaların mekanik açıdan en zayıf yönleri z yönleridir. Bu nedenle tasarım sürecinde parçaya yükü taşıma yönü iyi analiz edilmelidir ve mümkün oldukça x ve y yönlerinde yük taşımaları sağlamak gerektiğini vurgulamışlardır. Parçaların yüzey kalitelerini arttırmak için zımparalama, işleme veya kimyasal maddeler kullanmak gibi işlemler yapılabilmektedir. İlerleme hızına bağlı katman işleme sürelerinin çok önemli olduğunu, katman işleme süresinin çok kısa ise katmanın bölümlerinde sarkmaların oluşacağını, katman işleme süreleri çok uzun ise alt katmanın bir üst tabakayı uygun şekilde yapışmayacağını belirtmişlerdir.

(Valkenaers, Vogeler, Ferraris, Voet, & Kruth, 2013), çok çeşitli termoplastik polimer malzeme basabilen vidalı ekstruder geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri bu ekstruderi test etmek için dört farklı malzeme kullanmışlardır. Bunlar; polistren (PS), polipropilen (PP), polikaprolakton (PCL) ve polilaktik asittir (PLA). Yapılan deneylerin sonuçlarında hava kabarcıksız ve pürüzsüz yüzeyli malzemeler gözlemlenmiştir. Sonuç olarak yaptıkları bu çalışma ile vida ekstrüzyon sisteminin granüllü olması, filament ekstrüzyon sistemine göre iyi bir çözüm olduğu bildirmişlerdir.

(Karaman, 2019), geliştirdikleri eriyik biriktirme esaslı büyük hacimli eklemeli imalat sisteminde ABS ve ABS karbon fiber kompozit termoplastik malzemelerin havacılık sektöründe kanat için destek parçalarının üretimi üzerine yaptıkları çalışmalarda, eriyik biriktirme metodu üretim parametrelerinin mekanik özelliklere etkisini incelemiş, elde edilen sonuçlar ile yapısal bir parçanın topoloji optimizasyonu ile tasarım ve üretimini gerçekleştirmişlerdir. Bu doğrultu dikkate alınarak büyük hacimli parçaların üretimine imkân tanıyacak 1000 mm x 1000 mm x 1000 mm baskı boyutlarına sahip bir üç boyutlu yazıcı dizaynı, tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiş. İmal edilen üç boyutlu yazıcı ile karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin kullanımına yönelik, tasarım ve üretim parametreleri incelenmiş, bu parametrelerin mekanik özellikler üzerindeki etkileri tespit edilmiştir. Elde edilen mekanik özelliklere göre ideal üretim parametreleri belirlenmiştir. Bu çalışmada ayrıca kanat kaburga parçasının topoloji optimizasyonu ile tasarımı yapılmış ve üretilen büyük boyutlu yazıcıda imalatı gerçekleştirilmiştir.

(Ge Reports: Aviation , 2020), General Electric (GE) şirketinin havacılık bölümü ilerleyen zamanlarda bu malzeme ve teknolojiyi kapsayan en az 100 bin parça üretimini planlamaktadır. Bu yöntem ve termoplastik malzemeler ile bir uçak motorunda 500 kg azalma sağlanacağını bildirmektedir. 500 kg azaltmakla ne kadar tasarruf sağlanacağı hakkında şu örneği verebiliriz: (Newswire, 2013), 2013'te American Airlines şirketine ait uçaklarda uçak kılavuzlarını Apple marka iPad'lerle dijital versiyonlarına geçmişlerdir. Böylece bir uçak için yaklaşık 15 kg ve yıllık yakıt giderleri içinde 12 milyon dolarlık tasarruf sağlamışlardır. Kullanılan PEEK malzemenin hafif olmasından dolayı havacılık sektöründe kullanıma fazlasıyla elverişlidir. Hafif olan malzemenin neden tercih edilmesi gerektiği konusunda değinmemiz gerekirse bu iki kaynak bize yol gösterecektir.

Tez konusu kapsamında termoplastik malzemelerin farklı parçalarda kullanımı gibi kompozit kalıplar ve model yapımlarında da eriyik biriktirme yöntemi ile üretilen ürünler mevcuttur. Dassult Falcon marka jetlerde karbon elyaf katkılı kompozit kalıpların imalatı üzerine yapılan çalışmada Ultem (PEEK 'in ticari ismi) malzemesi kullanarak, talaşlı imalat metotları ile 10-14 hafta süren ve 68 kg'lık bir kompozit kalıbı, üç boyutlu yazıcıda eriyik biriktirme yöntemi ile 40 saatte imal etmiş ve ağırlığı 15 kg'a düşürülmüştür. (Karaman, 2019).

Büyük hacimli katmanlı imalat sistemleri maliyet ve imalat zamanı açısından, standart üç boyutlu yazıcılara göre avantajlar sağlamaktadır. Termoplastiklerin, büyük hacimli sistemlerde kullanılabilmesi, ORNL Laboratuvarında imal edilen büyük baskı hacimli eklemeli imalat yapabilen üç boyutlu yazıcı ile denenmiştir. BAAM (Big Area Additive Manufacturing) olarak bilinen üç boyutlu yazıcılar, 3556 mm x 1651 mm x 1828 mm baskı hacmine sahiptir. Ekstruder sistemi ile eriyik biriktirme yönteminde üretim yapan üç boyutlu yazıcı olarak ticarileştirilmiştir. Bu üç boyutlu yazıcıyı satın alarak Local Motors dünya tarihinde %75 oranında üç boyutlu yazıcı ile üretilmiş ilk elektrikli araç Strati'yi tanıtmıştır (Love, 2015). Bu gelişme ile eriyik biriktirme teknolojisinde geniş hacimli eklemeli imalatta üretilebilirliği ve fonksiyonel olarak kullanılabilirliği kanıtlanmıştır.

2.2. ASTM D638 Standartlı Termoplastik Ve Kompozit Termoplastik Malzemeli Numunelerin Çekme Deneyi Sonucu Mekanik Testlerin Analizi

(Tymrak, Kreiger, & Pearce, 2014), eriyik biriktirme yönteminde PLA ve ABS kullanarak, üretim açısının ve katman kalınlıklarının mekanik özelliklere etkisi üzerinde çalışma yapmışlardır. İki farklı imalat açısı ($0/90^\circ$, $45/-45^\circ$) ve üç farklı katman kalınlığında (0.4 mm, 0.3mm, 0.2 mm) ASTM D638 standardı baz alınarak imal ettikleri numunelerde doluluk oranını %100 olarak sabitlemişlerdir. Çekme test sonuçlarında, ABS'de 0.2 mm katman kalınlığı ve $45/-45^\circ$ üretim açısında en yüksek çekme mukavemeti elde edilmiştir. 0.4 mm katman kalınlığı ve $90/0^\circ$ üretim açısında ise en yüksek elastisite modülü değerleri kayıt altına alınmıştır. ABS için elde edilen en yüksek çekme mukavemeti ve elastisite modülü 29.7 MPa ve 1875 MPa olarak bulmuşlardır. İmal edilen ürünün mekanik özelliklerinde, imalat sırasındaki filament kalitesinin, nozul sıcaklığının ve üç boyutlu yazıcı özelliklerinin etkisi olduğu anlaşılmıştır.

(Karaman & Çolak, 2020), üretim açısı ve doluluk oranı ile iki farklı üretim parametresi kullanılarak, ABS Plus ve karbon elyaf takviyeli ABS kompozit malzemelerinden test numuneleri üretilmiş ve mekanik özelliklerin tespiti için ASTM D638 standartında çekme testleri uygulanmıştır. Çekme testleri sonucu üretim parametrelerinin mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir. Kırık yüzeylerde ise Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüleri alınarak, üretim parametrelerinin iç yapıda meydana getirdiği değişimler değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre doluluk oranının artması mekanik özelliklerde artış gösterirken, üretim açılarının mekanik özellikler üzerinde etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır. En yüksek çekme dayanımı ise her iki malzeme 'de %100 doluluk oranı ve 30°/-60° üretim açısında ABS Plus malzeme ve karbon elyaf destekli ABS kompoziti için 37.67 MPa ve 32.82 MPa olarak bulunmuştur. Karbon elyaf katkısı, ABS Plus malzemeye kıyasla çekme mukavemetinde %14 oranında bir düşüş gösterirken elastisite modülü %68 oranında artış göstermiştir. Karbon elyaf takviyeli ABS ve ABS Plus malzemelerinin her ikisinde elastisite modülü en yüksek olan parametreler 30°/-60° üretim açısı ve %100 doluluk oranında sırasıyla 1.67 GPa ve 0.99 GPa olarak hesaplanmıştır.

(Karaman & Çolak, 2019), ABS Plus termoplastik malzemesi kullanılarak eriyik biriktirme yönteminde ASTM D638 test numuneleri imal edilmiştir. Numuneler, farklı doluluk oranlarında ve farklı üretim açılarında üretilerek çekme testlerine maruz bırakılmıştır. Çekme testlerinin sonuçlarına istinaden doluluk oranları ve imalat açılarının mekanik özelliklerde önemli etkisi olduğu anlaşılmıştır. Doluluk oranı yüzde olarak arttıkça çekme mukavemetinde %70', elastisite modülünde ise %60'a yakın artış meydana gelmiştir. Test sonuçlarına istinaden optimum iyi mekanik özellikler %100 doluluk oranında ve 30°/-60° üretim açısında bulunmuştur. Bunlar; 37,67 MPa çekme mukavemeti ve 0,99 GPa elastisite modülü olarak elde edilmiştir. Şekil değiştirme oranlarına bakıldığında, 45°/-45° üretim açısı ile imal edilen numuneler doluluk oranlarında, 30°/-60° ve 90°/0° üretim açısındaki numuneler ile kıyaslandığında fazla yüzde uzama olduğu sonucuna varılmıştır. En yüksek yüzde uzama ise %6,4 ile 45°/-45° imalat açısında elde edilirken, en düşük yüzde uzama ise %4,7 ile 90°/0° üretim açısından elde edilmiştir.

(Zekavat, Jansson, Larsson, & Pejryd, 2019), eriyik biriktirme yönteminde ile parçaların özelliklerinde nozul sıcaklığı ile değişimin etkisi incelenmiştir. Bu çalışma

PLA malzemesi kullanılarak yapılmıştır. 180-260°C aralığında nozul sıcaklıkları ile 10°C artırarak imalatlar yapılmıştır. İmal edilen parçalar x-ışını bilgisayarlı tomografi ile incelendiğinde 180°C ve 190°C sıcaklıklarda üretilen numunelerin diğer sıcaklıklarda üretilen numunelere göre daha az kütlede olduğu anlaşılmıştır. Bunun sebebi ise düşük sıcaklıklarda eksik malzeme akışından kaynaklı azalma olduğu belirtmişlerdir. Ayrıca 180°C ve 190°C sıcaklıklarda az malzeme akışı sebebiyle parçanın bazı kısımlarında malzeme yığılmadığı ve kalitenin olduğu gözlenmiştir. 180°C -260°C sıcaklık aralığında sıcaklık arttıkça, içyapıdaki boşluk oranının %12'den %3'e indiği ve çekme mukavemetini 25.77 MPa'dan 37.79 MPa değerine yükseldiği anlaşılmıştır.

2.3. 3D Yazıcı Ve Granül Bazlı Malzemelerin Kimyasal, Fiziksel Ve Mekanik Etkenleri

Eriyik biriktirme yönteminde ekstruderin saran rezistansların çalışma sıcaklıklarının maksimum 300°C olması, yüksek sıcaklıkta eriyen plastiklerin kullanımını daraltmaktadır (Salem, Wahab, & Ahmad, 2016). Lakin bu kısıtlama Eskişehir Teknik Üniversitesi'nin 3DAM laboratuvarında sahip olduğu üç boyutlu yazıcı için geçerli değildir. 3D yazıcının ekstruderini saran rezistanslar 900 W gücünde olup sıcaklık değerleri 600 °C'ye kadar çıkmaktadır. Ekstruderin bu sıcaklık değerine ulaşması termoplastik malzemelerin de imalata girmesi ve neredeyse tüm plastiklerin eriyik hale getirilerek işlenebilir hale gelmesine olanak sağlamaktadır.

3D yazıcılarda ekstruderin yüksek sıcaklık seviyeleri sonrası ve soğumanın olması gerektiğinden hızlı olması imal edilecek malzemede çarpılma (kıvrılma, deforme) yaşanmasına sebep olur. PEEK malzemenin çekme pay oranı %0.7 ile %1.2 arasındadır (Plastik Malzeme Çizelgesi, 2021). İmal edilecek malzemenin çarpılmalarına karşı alınacak ilk önlem tabla üzerinde PEEK levha konularak eriyik malzeme levha üzerinde şekillendirmektir. İkinci önlem ise soğuma süresini uzatmak ve soğutma hızını azaltmaktır. Çarpılmayı engellemek için üçüncü önlem ise platformun ısıtıcılar koyarak kullanılmasıdır (Şahin & Turan, 2018).

Türkiye'deki eklemeli imalat piyasasında bulunan ve PEEK gibi termoplastik malzemeleri işleyebilen üç boyutlu yazıcılar hakkında detaylı bir şekilde araştırılma yapılmıştır. 3D yazıcı imalat eden (T3 Dizayn Teknoloji Tasarım ve Bilişim Hizmetleri Ticaret Limited Şirketi, 2021) firması ile iletişime geçilmiştir ve teknik görüşme sonrası fiyat teklifi istenmiştir. Dijital İleri İmalat Araştırma Laboratuvarında bulunan 3D

yazıcının modifikasyon edilerek elde edilecek eş değer özelliklerine sahip piyasadaki 3D yazıcı fiyatları oldukça yüksektir. Piyasadaki 3D yazıcılar (179.065,0 ₺) ile sahip olunan 3D yazıcının veya PEEK işleyebilen yazıcı imalatının ekonomik değerlerinin % şeklinde kıyaslama, saptamada yardımcı olacaktır. Karşılaştırma sonrası belirlenen eksiklerin giderilerek imalata hazırlık yapılması konusunda ön veriye ulaşılmıştır.

Ford Motor Company, 3D yazıcı atıklarını araçlarında yeniden kullanmak için HP ile iş birliği yapmıştır. Ford, otomobil endüstrisinde bir ilk olarak geri dönüştürülmüş malzemeler için 3D yazıcı atığını, tozlarını ve parçalarını enjeksiyonla kalıplanmış araç parçalarına dönüştürmek için HP ile geri dönüşüm kapsamında anlaşmıştır. Çeşitli üretim alanlarında 3D baskı teknolojilerini kullanan Ford, gelecekte araçlarında tamamen sürdürülebilir malzemeler kullanmayı hedeflediği anlaşılmıştır. Ford'un sürdürülebilirlik teknik görevlisi Debbie Mielewski, çöpe gidecek atık toz ve plastikler için yüksek değerli bir uygulamayı bulan ve onu işlevsel ve dayanıklı otomobil parçalarına dönüştüren ilk şirket olduklarını belirtmektedir. İlk olarak Ford Super Duty F-250'lerde kullanılacak olan bu geri dönüştürülmüş malzemeler, enjeksiyon kaplamalı yakıt hattı klipslerinin imalatında yer alacağı belirtilmektedir. Bu parçalar sadece geleneksel olarak üretilen muadilleri tarafından sunulan kimyasal ve nem direnci standardını karşılamakla kalmayacak aynı zamanda %7 hafiflik ve %10 maliyet kazancı sağlayacaktır. HP sürdürülebilirlik ve sosyal etki direktörü Ellen Jackowski: "Üç boyutlu yazıcı ile daha sürdürülebilir üretim süreçleri elde edersiniz ancak biz her zaman daha fazlasını yapmaya çalışıyoruz ve sektörümüzü tozları, plastikleri ve parçaları azaltmanın, yeniden kullanmanın ve geri dönüştürmenin yeni yollarını bulmaya yönlendiriyoruz. Ford ile işbirliğimiz, üç boyutlu baskının çevresel faydalarını daha da genişleterek, kullanılmış üretim malzemelerinden daha iyi yararlanmak için tamamen farklı endüstrileri nasıl bir araya getirdiğimizi göstererek yeni bir döngüsel ekonomiye olanak tanıyor." ifadelerinde bulunmuştur. Çok aşamalı geri dönüşüm faaliyetinde Ford'un üç boyutlu yazıcı ve parça tedarikçisi olan HP, ürünü geri dönüştürmek için faaliyet zincirini tasarlamak ve uygulamak için Ford'un gelişmiş üretim merkezinde Ford ile birlikte çalışmaktadır. Bu iki şirkete, dental cihaz üreticisi SmileDirectClub, reçine üreticisi Lavergne ve Ford için parça tedarikçisi A-Raymond şirketleri de bu süreçte destek vereceği anlaşılmıştır (Ergülü, 2021).

Tez konusu kapsamında yüksek başarılı plastiklerden olan termoplastik PEEK malzemesinin kullanılmış formları Eskişehir Teknik Üniversitesinde doktora ve yüksek lisans çalışmaları ile imal edilmiş ve geliştirilmiş olan üç boyutlu yazıcı üzerinde doğrudan ekstrüde edilebilmesini sağlamak için çalışmalar yürütülmüştür. Lakin bu çalışmalar ile birlikte geri dönüştürülmüş Peek malzemenin üç boyutlu yazıcıda ekstrüde edilmesinde çeşitli deneyler yapılmasına rağmen başarıya ulaşamamıştır. Devamında ise malzeme imalatı için termoplastik malzeme olan performans Abs granülleri imalat sürecinde kullanılmıştır. Literatürde geri dönüştürülmüş Peek malzemesi ile ilgili çalışmalar, üç boyutlu yazıcılarda Peek malzemesinin kullanımı ve granül Abs malzemenin eklemeli imalatla imalatı ile ilgili oldukça fazla çalışma bulunmamaktadır.



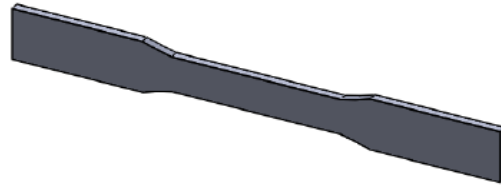
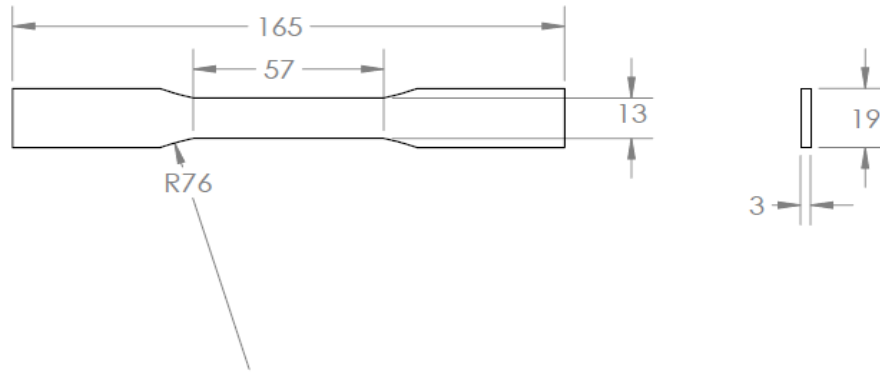
3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışmasının materyal ve yöntem başlığı beş ayrı bölümden oluşmaktadır. Bu bölümde çalışma kapsamında gerçekleştirilen aşamalar incelenmiştir. İlk olarak geniş baskı özelliğine sahip üç boyutlu yazıcının eriyik biriktirme yöntemine ile üretim yapan ekstrüzyon esaslı eklemeli imalat sisteminin Peek ve Abs gibi termoplastik malzemeleri işleyebilir özelliklere sahip olması için modifikasyon gerçekleştirilmiştir. Eriyik biriktirme yönteminde üretilen parçaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme deneyi yapılmaktadır. Yöntem, termoplastik esaslı malzemeleri kullanarak üretim yapılarak mekanik özelliklerin belirlenmesinde, plastik esaslı malzemelerin mekanik davranışlarının belirlenmesinde kullanılan standartlardan faydalanılmaktadır. Takviyeli ve takviyesiz plastik malzemelerin çekme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan standartlardan biri ASTM D638 standardıdır (ASTM D638-14, 2014).

Bu sistemde Abs granülleri ile ASTM D638 standartı baz alınarak numuneler imal edilmiştir. Test numunelerinin üretim parametreleri incelenmiş ve en iyi sonucu veren üretim parametreleri Taguchi L9 ile Varyans analizi yapılarak optimize edilmiştir.

Eklemeli imalatta parçanın imalat süreci bazı adımlar içermektedir. Bu imalat sektörü üretimde üç boyutlu model verilerini baz almaktadır. Bu nedenle ilk olarak katı modele ihtiyaç duyulur. Bu ihtiyaç doğrultusunda üretilmesi planlanan parçanın, herhangi bir katı modelleme programı (CAD) kullanarak veya lazer ya da optik bir tarayıcı yardımı ile tersine mühendislik yaparak üç boyutlu modeli oluşturulmalıdır. Hedef parçanın üç boyutlu modeli oluşturulduktan sonra modelin eklemeli imalat sistemine transfer edilmesi gerekmektedir. Büyük baskı hacmine sahip üç boyutlu yazıcının hareket kontrolü Arduino ile yapılmakta ve Marlin yazılımı kullanılarak kodlar üretilen üç boyutlu yazıcıya göre uyarlanmaktadır. Tasarımı alınan ASTM D638 standartına uygun çekme test numunesi .Stl formatında kayıt edilerek, dilimleme programına aktarılacaktır. Makina bir masaüstü bilgisayar ile doğrudan bağlı olarak çalışmaktadır. Bilgisayarda yüklü olan Repetier yazılımı ile kontrol edilmektedir. İmalat için gerekli olan G-kodlar Slic3er ile oluşturulmaktadır (Karaman, 2019).

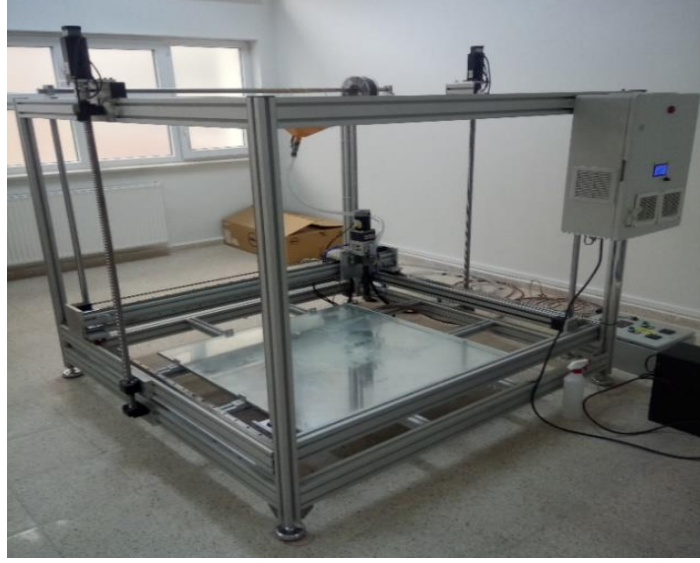
ASTM D638 standartına uygun Tip-1 model çekme test numunesini cad tasarımı standartın kendi web sitesinden alınmıştır ve Şekil 3.1’de yer almaktadır. Çalışma kapsamında modernizasyonu yapılmış üç boyutlu yazıcıyı kullanarak farklı üretim parametrelerinde deney numuneleri üretilmiştir.



Şekil 3.1. ASTM D638 Tip-1 standartına uygun test numunesinin cad tasarımı (ASTM D638-14, 2014)

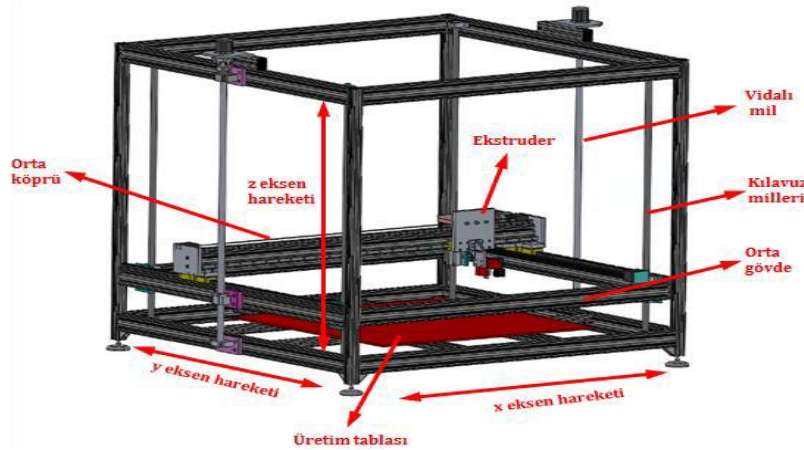
3.1. 3D Yazıcının Modifikasyonu ve İmalata Hazırlanması

Eklemeli imalatla kullanılacak Eskişehir Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Dijital Tasarım ve Dijital İleri İmalat araştırma laboratuvarında (3DAM - Digital Design and Digital Advanced Manufacturing) bulunan üç boyutlu yazıcı kartezyen koordinat sisteme göre çalışmaktadır ve eski genel bakışı Görsel 3.1’de gösterilmiştir. Parçanın oluşturulduğu tabla sabit olup, sonradan ekleme yapılan ekstruder x, y, z eksenlerinde hareket etmektedir. X ve Y eksenlerindeki hareket; step motorlar ile dişli kayış ve kasnak aracılığıyla lineer ray araba modeli üzerinden yapılmaktadır. Z eksenindeki hareket; servo motorlar ile vidalı mil somun sistemi aracılığıyla indüksiyonlu mil lineer yataklar üzerinden yapılmaktadır. Sahip olunan üç boyutlu yazıcının üretim tablası 1100x1100x10 mm boyutlara sahip ve malzemesi taşlanmış alüminyum levhadır. Eriyik hale gelen malzemelerin tablaya yapışması için yalnızca nozulu ısıtma yeterli olmamaktadır, tabla sıcaklığı da etkilidir. Üretim tablasının ısıtılması silikon rezistanslar kullanılarak sağlanmaktadır. 3D yazıcının üretim tablası büyük boyutlarda olduğu için boyutsal doğruluğu sağlamak ve ısıtma sonrası çarpılmayı önlemek amacıyla yüksek mukavemet ve iyi korozyon direncine sahip 10 mm kalınlıklı taşlanmış 5083 serisi alüminyum alaşımı malzemeye sahiptir.



Görsel 3.1. Büyük baskı hacimli üç boyutlu yazıcı (Karaman, 2019)

3D yazıcı ve parçaları başta olmak üzere kendine has özgün bir değere sahiptir. Ve bu makineye yüksek lisans çalışması ile granül beslemeli ekstrüzyon sistemi baştan sona kadar kurularak, imal edilmiş ve montajı yapılmıştır. Böylelikle yüksek baskı hacmine ve olanaklarına ve alt yapısına sahip olunmaktadır. Üç boyutlu yazıcı gövdesi 45 mm x 90 mm ve 45mm x 45 mm alüminyum sigma profillerden oluşmakta ve rijit, hafif bir yapıya sahiptir. Üretim tablası, maksimum 140°C sıcaklığa çıkabilmektedir. Lakin emniyetten dolayı sahip olup 120°C çalışma sıcaklığına ulaşabilmektedir. Isıtıcı tabla sayesinde, üretimde kullanılacak malzeme çeşidi artmaktadır. 3D yazıcının katı model tasarımı Görsel 3.2’de gösterilmiştir.



Görsel 3.2. Büyük baskı hacimli eklemeli imalat sisteminin katı model tasarımı (Karaman, 2019)

Peek ve Abs malzeme bir termoplastiktir. Her plastiğin erime sıcaklığı, dayanıklılığı, çalışma sıcaklığı aralığı gibi fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri

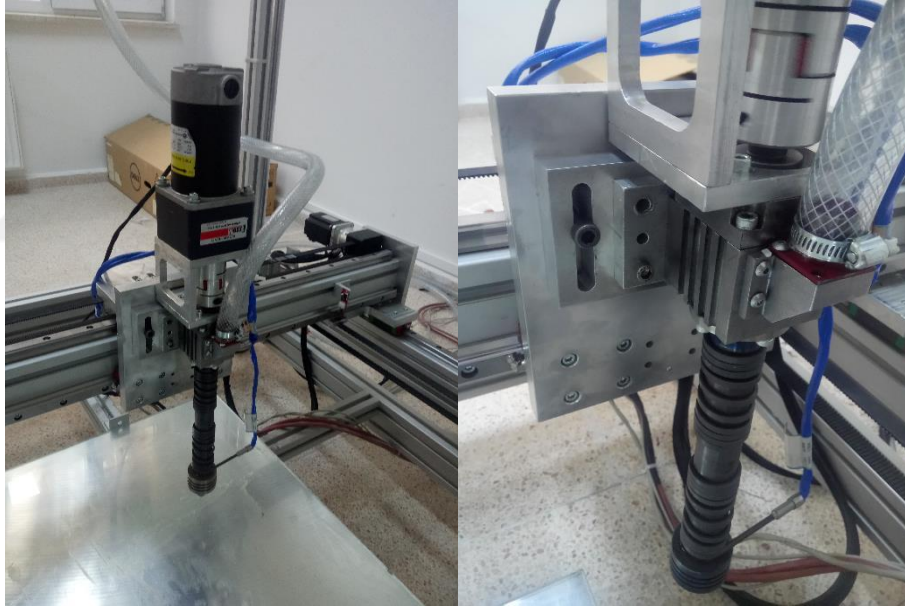
farklıdır. Bu bilimsel araştırmanın ve tez konusunun belirlenen amaçlara ve hedeflere başarıya ulaşması için Peek veya Abs malzemenin ASTM D638 standartının şartlarına uygun 3D yazıcının malzemeyi işleyebilir olması gerekmektedir. Bu şartlar için 3D yazıcının noksanlıkları giderilip hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Eksiklikler ve optimum gerekli şartlar piyasadaki Peek ve Abs malzeme gibi termoplastikleri işleyebilen 3D yazıcılar ile kıyaslanarak belirlenmiştir. Yazılımsal ekleme ve iyileştirmeden, donanımsal eksiklerin giderilmesine kadar modifikasyon için gerekli tüm işlemler için 5 farklı firmadan teklifler alınmıştır.

Mevcut olan 3D yazıcının printerı öncelikle filament kullanımını baz alarak imal edilmiştir. Yüksek lisans çalışması ile büyük hacimli eklemeli imalat makinaları için granül beslemeli tek vidalı ve 3 bölmeli ekstrudere geçiş çalışması yürütülmüştür ve filament beslemeli ekstruder iptal edilmiştir. Granül beslemeli ekstruderin her bir parçasının boyutları belirlendikten sonra üç boyutlu modeli oluşturulmuş ve montajlanmıştır. Burada ekstruderin her bir elemanının tasarım ve imalat aşaması beraber ele alınmıştır. İlk olarak vida boyutlarının belirlenmesinden sonra vida tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Vida malzemesi olarak Ç-4140 ıslah çeliği kullanılmıştır. Vidaya yüzey sertleştirme işlemi olan nitrasyon işlemi yapılmıştır. Böylelikle vidanın yüzey aşınma direnci, korozyon dayanımı ve yorulma dayanımı arttırılmıştır. Vidayı kovan içerisinde yataklamak için 6005 serisi sabit bilyalı rulman kullanılmıştır. Vida üzerinde rulmanın iç bileziğinin oturacağı yüzey sıkı geçme toleransında işlenmiştir. (Çiftçi, 2020)

Tablo 3.1. Ekstruder genel parametreleri

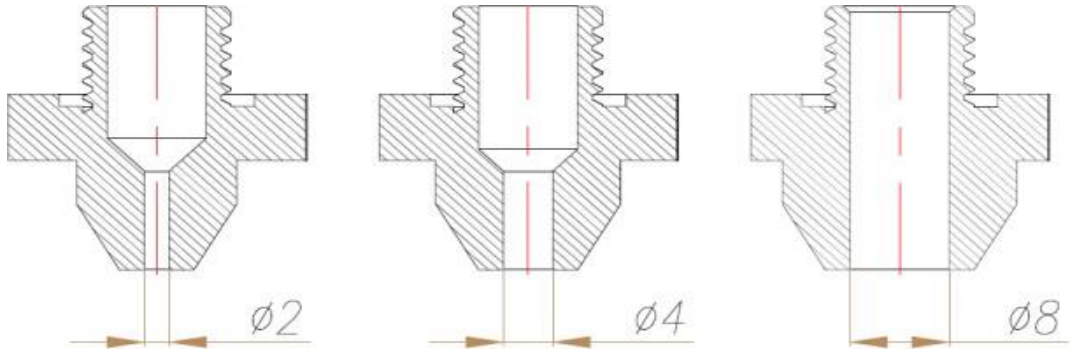
Parametre	Parametre Değerleri	Birim
Ağırlık	6.5	kg
Vida Çapı	20	mm
Operasyon Hızı	130	dev/dk
Maksimum Sıcaklık	600	°C
Nozul Çapı	1, 2, 4, 8	mm
Maksimum Akış Kapasitesi	6.23	kg/sa
Toplam Uzunluk	633	mm
Vida Uzunluğu	280	mm
Isıtma Gücü	950	W

Motordan alınan dönme hareketini vidaya iletmek için GS 19 boşluksuz servo kaplin kullanılmıştır. Kaplin ile vida arasındaki iletim için vida üzerine kama kanalı açılmıştır. Ekstruder içinde erimiş ve belli bir basınç kazanmış malzemelerin çıkışları nozul ile gerçekleştirilir. Nozullar üretim kapasitesi ve parça hassasiyetine göre değişik çaplarda kullanılabilirler. Bu çalışmada büyük hacimli eklemeli imalata uygun, farklı imalat parametrelerinde kullanılması için 2,4 ve 8 mm çaplarında üç adet nozul imal edilmiştir. Ekstruder motoru olarak 24V DC motor kullanılmıştır. Motor 90 W gücünde olup maksimum devri 3000 dev/dk'dır. Ayrıca redüksiyon oranı 25 olan bir redüktör kullanılmıştır. Bu redüktörün çıkış devri 130 dev/dk olup çıkış torku 5.3 Nm'dir. Motor kontrolü motor sürücüsü tarafından yapılmaktadır (Çiftçi, 2020). Vidanın tüm özellik parametreleri Tablo 3.1'de listelenmiştir.



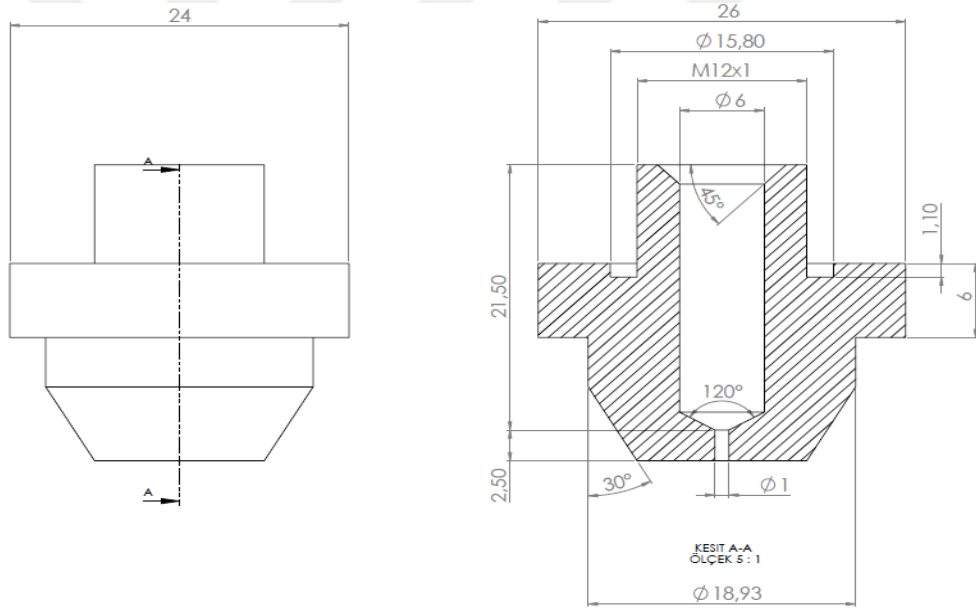
Görsel 3.3. Eklemeli imalat makinasına montajı yapılan ekstruder (Çiftçi, 2020)

3D yazıcının termoplastik Peek veya Abs granülü işleyebilir olması için yapılması gereken revizyonlar kapsamına ekstruder girmemektedir. Ekstruder özellikleri bakımında termoplastik Peek veya Abs granül malzemeyi işleyebilir konumdadır. Sadece gerekli görülen ufak ek iyileştirmeler yapılmıştır. İmalat yani yapısal olarak herhangi bir değişikliğe gidilmemiştir. 3D yazıcıda önceki çalışmalarda imal edilmiş 3 farklı çaplı nozula sahiptir. Görsel 3.4.'de bu nozullara ait teknik resimler mevcuttur.

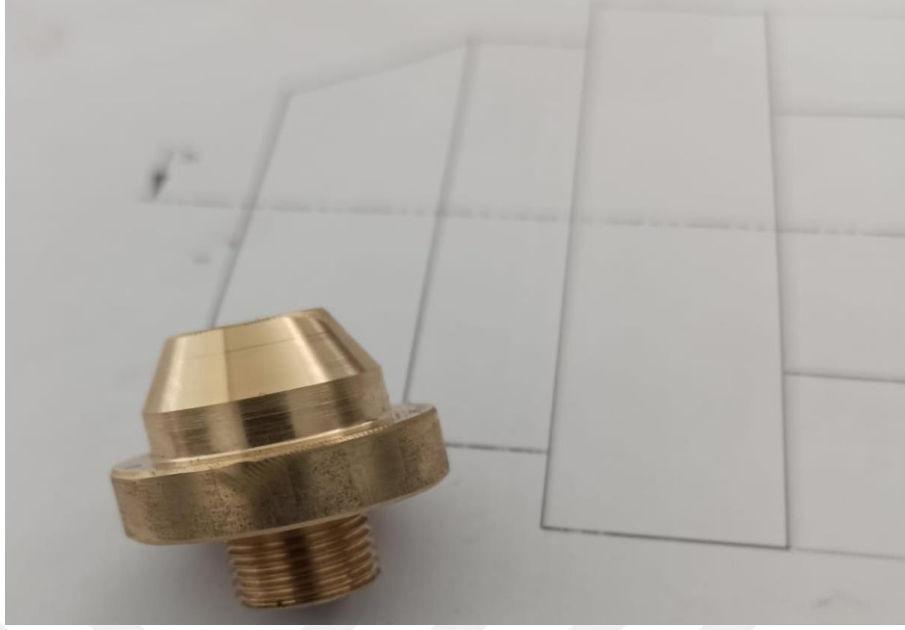


Görsel 3.4. 2, 4 ve 8 mm çaplarında imal edilmiş nozulların teknik resmi

Yapılacak çalışma ASTM D638 standartı kapsamında hassas imalat yapılması gerekliliğinden dolayı mevcut 3 nozul çapına ek olarak çapı 1 mm olan Pirinç malzemeden nozul imal edilmiştir. Toplamda 4 farklı çapta nozul bulunmaktadır. Bu nozullar, parametrelerdeki farklılıkları görmek adına çeşitlilik için yeterlidir.



Görsel 3.5. 1 mm çaplı imal edilmiş nozulun teknik resmi



Görsel 3.6. 1 mm çaplı ve pirinç malzeme ile imal edilmiş nozul

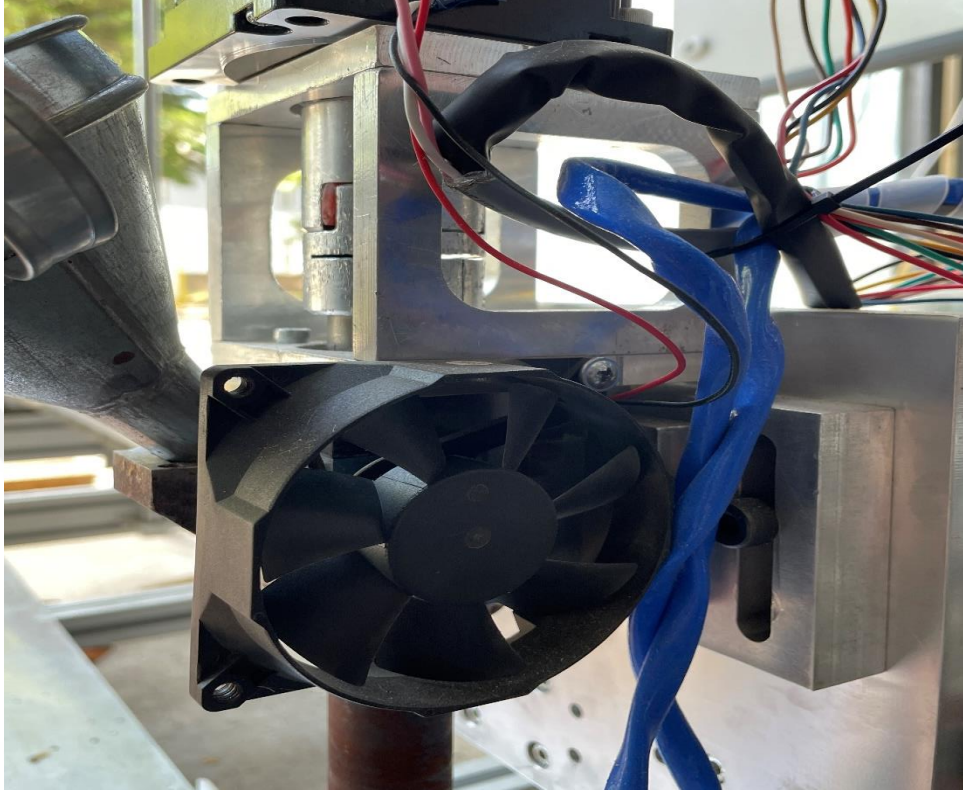
3.1.1. Mevcut 3D yazıcının eksikliklerinin tespiti ve giderimi

Alüminyum levha üzerinde, üretimde pürüzsüz bir yüzey ve boyut doğruluğu elde edebilmek amacıyla yüksek sıcaklığa dayanıklı 3 mm kalınlığında temperlenmiş cam levha bulunmakta ve üretim tablası parçaları montajlanarak gövdeye yerleştirilmiştir. Sistemde 300 mm x 450 mm boyutlarında 1300 Watt güç özelliğine sahip emniyet termostatl silikon rezistanslar bulunmaktadır (Karaman, 2019). Lakin bu rezistanslar tabla sıcaklığı için max 120 °C'e kadar ısınmaktadır ve termoplastik Peek malzemenin tablaya yapışmasında bu sıcaklık yeterli değildir. Termoplastik Peek malzemede gerekli tabla sıcaklığı 150 °C - 200 °C arasında olduğu literatür araştırmasında tespit edilmiştir (Daurskikh, ve diğerleri, 2018).

Termoplastik Peek malzemenin ekstruder edilerek eriyik şekilde ilk katmanın alüminyum levhalı cam yüzeye yapışmasını artırmak amacıyla tabla ısıtmasının yanı sıra yapışmayı artırıcı film ve bant benzeri elemanlarla kaplanması ya da Peek levha (ULTEM™ %100 PEI – 215mm X 215 mm) benzeri levhalarla desteklenmesi düşünülmektedir. İstenilen miktarda ısı elde edilen tabla üzerinde Peek levha konularak ASTM D638 standartına uygun çekme test numunesi bu tabaka üzerinden yeterli yapışma sağlanmış olacaktır.

Mevcut üç boyutlu yazıcıdaki elektromekanik parçalar yüksek sıcaklıklara dayanıklı olup belirli sürelerle sıcaklık ölçümleri yapılacaktır. Ekstruder parça basma

işlemini etkilemeden soğutma işlemi için 1 adet soğutucu fan montajı braket üzerine monte edilmiştir. Buradaki amaç ısı akışını dengelemektir. Görsel 3.7. 'de fan montajı yapılmış ekstrudera yer verilmiştir.

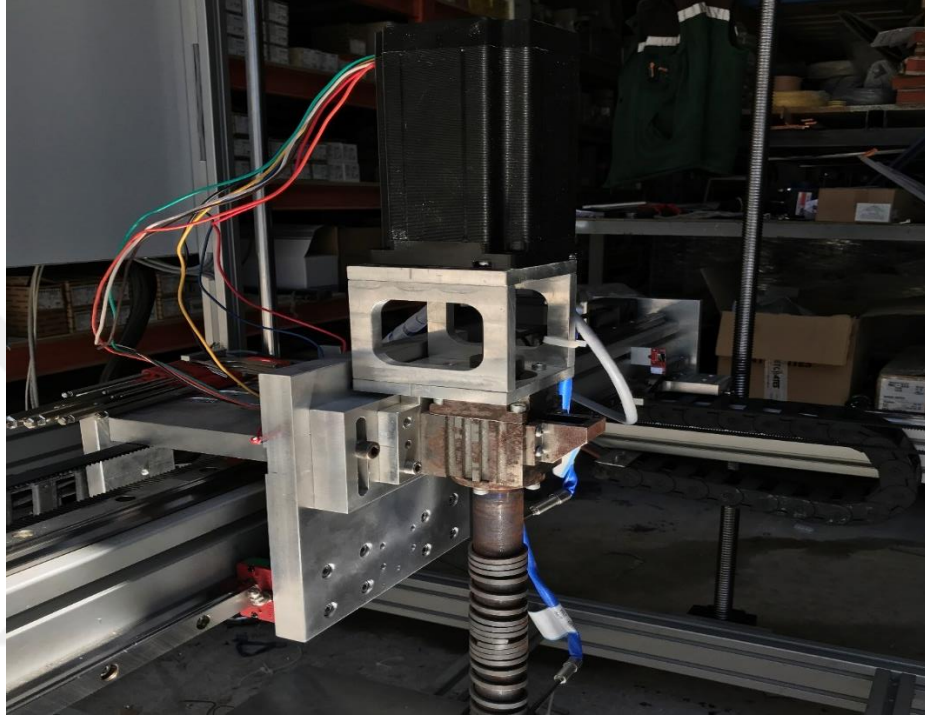


Görsel 3.7. Fan montajı yapılmış ekstruder

Ekstruderi imal ederken vida formlu malzemesi olarak Ç-4140 ıslah çeliği kullanıldığı bilinmektedir (Çiftçi, 2020). Mevcut eklemeli imalat makinesinde rezistansların PID kontrol termostatlar ile sıcaklık kontrolleri $\pm 0,5$ toleransla yapılmaktadır. Peek veya Abs granüllerinin ekstruder içinde istenen şekilde eriyik hale gelebilmesi için hassas sıcaklık ayarı ve ölçümüne ihtiyaç duyulduğundan sıcaklığa dayanıklı MAXIM marka MAX6675 K tipi RLC0D10-0000 kodlu termokupl sensör monte edilerek homojen bir şekilde ısı verilecektir.

Ekstruder motoru olarak 24V DC motor kullanılmıştır. Motor 90 W gücünde olup maksimum devri 3000 dev/dk'dır. Ayrıca redüksiyon oranı 25 olan bir redüktör kullanılmıştır. Bu redüktörün çıkış devri 130 dev/dk olup çıkış torku 5.3 Nm dir. Motor kontrolü motor sürücüsü tarafından yapılmaktadır (Çiftçi, 2020). Lakin bu motorlar ile ekstruder kullanımda hassas hareket ve hassasiyet sağlanamamaktadır. Bu yüzden ince işçilikli parça imalatında sorunlar yaratmakta ve malzeme kullanımında fire vermektedir.

Termoplastik Peek malzemenin kg başına fiyatı baz alındığındaki maliyeti de hesaba katınca DC motorlar 86BYGH156-Y42-Y32E kodlu NEMA marka STEP MOTOR NEMA 34 ve ile değiştirilmesi sonucuna varılmıştır. Motor değişimi olacağı için motor parçalarının ve alt parçalarında değişimi gerekmektedir. Görsel 3.8.'de ekstruder için değişimi yapılan motor yer almaktadır.



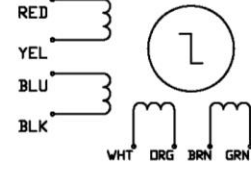
Görsel 3.8. Nema 34 step motorun montajı

Tablo 3.2. Ekstrudera ait Nema 34 step motorun teknik özellikleri

Özellik	Özellik bilgisi
Tutma Torku	12 Nm
Akım	4.2 Amper
Nema	34
Flanş Ölçüsü	86 mm x 86 mm
Boy	156 mm

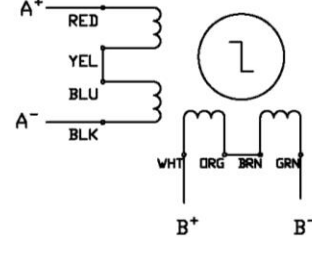
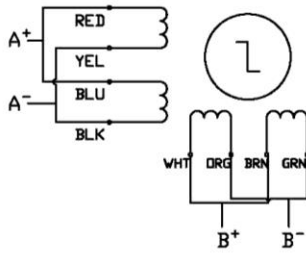
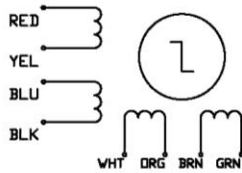
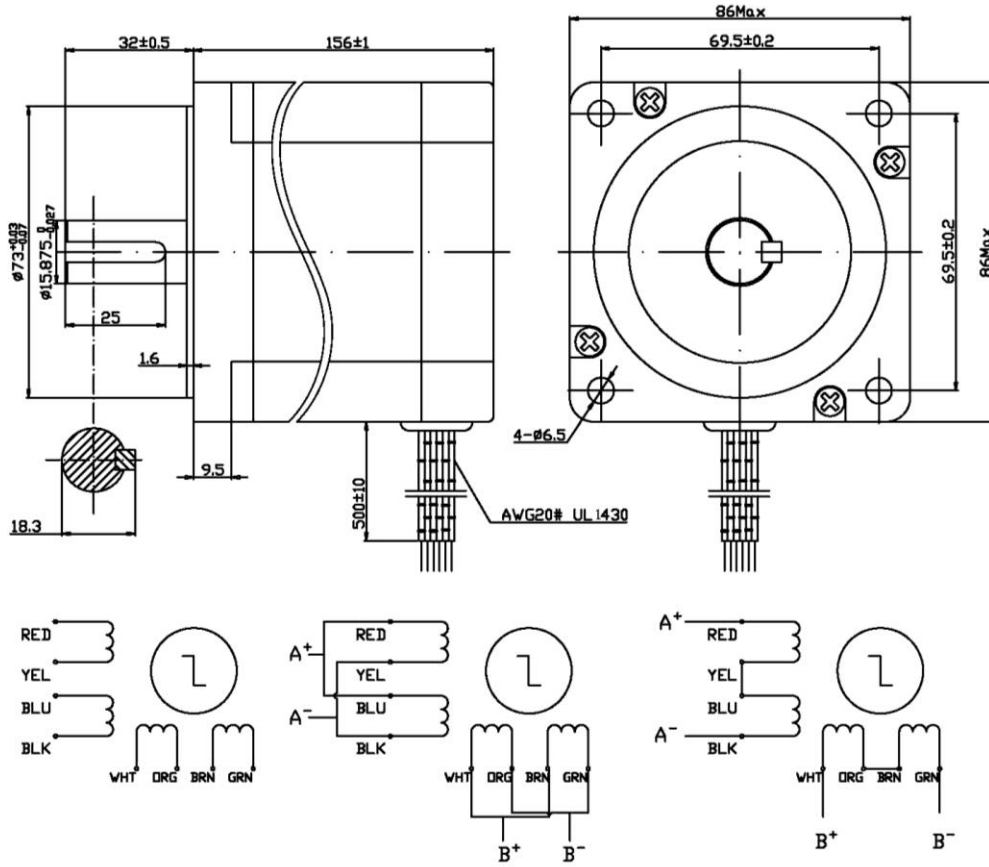
STEPPING MOTORS TYPE CW 86BHH156-Y42-Y32E

COMMON RATINGS		SPECIFICATIONS		Wiring Diagram
STEP ANGLE	1.8°±5%	VOLTAGE	5.9V	
PHASES	4phases	CURRENT	4.2A	
INSULATION RESISTANCE	100Mohm (500VDC)	INDUCTANCE	9mH±20%	
CLASS OF INSULATION	B level	RESISTANCE	1.4Ω±10%	
		HOLDING TORQUE	110Kg. cm	



DIMENSION

units:mm



parallel

serial

Şekil 3.2. Nema 34 step motora ait data-sheet

Modifikasyon öncesi üç boyutlu yazıcıda 2 adet ayrı pano bulunmaktaydı. Bunlardan biri yazıcıyı çalıştıran pano olmakla beraber diğeri rezistanslar ve ekleme yapılan ekstruder için kullanılmaktaydı. Bu 2 pano kontrol etme mekanizmasında sorunlara sebep olmaktaydı. Bu yüzden bu 2 pano birleştirilerek 1 pano haline getirilmiştir. Mevcut 2 ayrı panonun birleştirilerek, 3D yazıcıya yapılacak olan eklemeler ve revizyonlar için yazılımsal ve elektriksel güncellemeler dâhilinde uyumlu yeni tek pano hazırlanmıştır.

NEMA marka STEP MOTOR NEMA 34'ün panoya işlenmesi için 1 adet CWD556 malzeme kodlu CW-Motor Step motor sürücü M542 ürün kodlu kartı eklenmiştir. Motor sürücüsü elektrik enerjisini dönme hareketine dönüştüren step motorun kontrolü sağlamak için kullanılmaktadır. Motor sürücüsü emir girilen step motora komut vermektedir.

Tablo 3.3. Nema 34 step motora ait sürücü kartı teknik özellikleri

Özellik	Özellik bilgisi
Besleme gerilimi	+ 50 VDC
Çıkış akımı	4.5 A
Voltaj	20 V - 50 V
Amper	4.5 A
Boy x En x Genişlik	119 mm x 75 mm x 35 mm

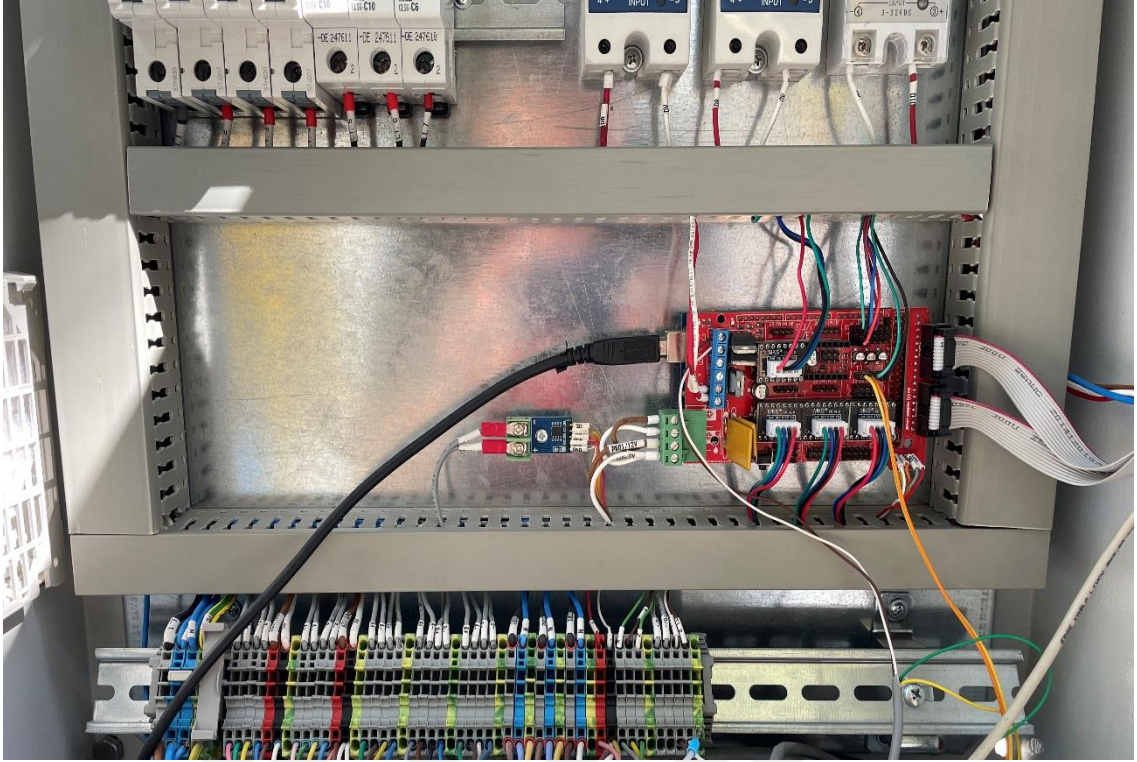
Görsel 3.9.'da Tekpan marka 700mmx500mmx200 mm boyutlarındaki yeni panonun iç kısmının üst bölümü görülmektedir. Üst kısım soldan sağa doğru 24 volt ve 12 voltluk güç kaynakları, z eksenindeki 2 motorun step motor sürücüsü, ekstrudere ait step motorun sürücüsü ve sonradan ilave edilecek x ve y eksenindeki step motorların sürücüleri ve son olarak en sağ kısımda soğutucu fan yer almaktadır. Alt kısım soldan sağa doğru ise Siemens, Eaton marka sigorta grupları ve ekstruder için solid state röleleri ve tabla için solid state röleleri yer almaktadır.



Görsel 3.9. Tekpan marka yeni panonun iç kısmının üst bölümü

Görsel 3.9.'da yer alan yeni panonun alt sağ kısmında 3 farklı solid state röle bulunmaktadır. Bunlar 2 adet EMAS marka SSR-25DA malzeme kodlu solid state röle 25 amper ve 1 adet CLİON marka solid state röle 25 amper'dir. Emas marka röle ekstruder ısıtılması için Clion marka röle ise tablanın ısıtılması için kullanılmaktadır. Solid state röleler güç ve kontrol devrelerinin anahtarlamasında kullanılmaktadır.

İlave edilen step motorların sürücüleri için tasarlanmış bir kontrol kartı ile birlikte kullanmak adına 4 adet RLE0C02-1750 malzeme kodlu MKS marka CD 57/86 step motor sürücü akım genişletme kartı birleştirilmiş tek panoya monte edilmiştir. Görsel 3.10.'da yer alan kontrol kartında (kırmızı) akım genişletme kartlarına yer verilmiştir.



Görsel 3.10. Akım genişletme kartı eklenmiş kontrol kartı

MKS marka CD 57/86 step motor sürücü akım genişletme kartı, üç boyutlu yazıcı kontrol kartında (kırmızı) bağımsız bir step sürücüsü montajı yapılması gerektiğinde kullanılır. Bu kart bağımsız step sürücü için gereken sinyallere kolayca erişimi sağlamaktadır.

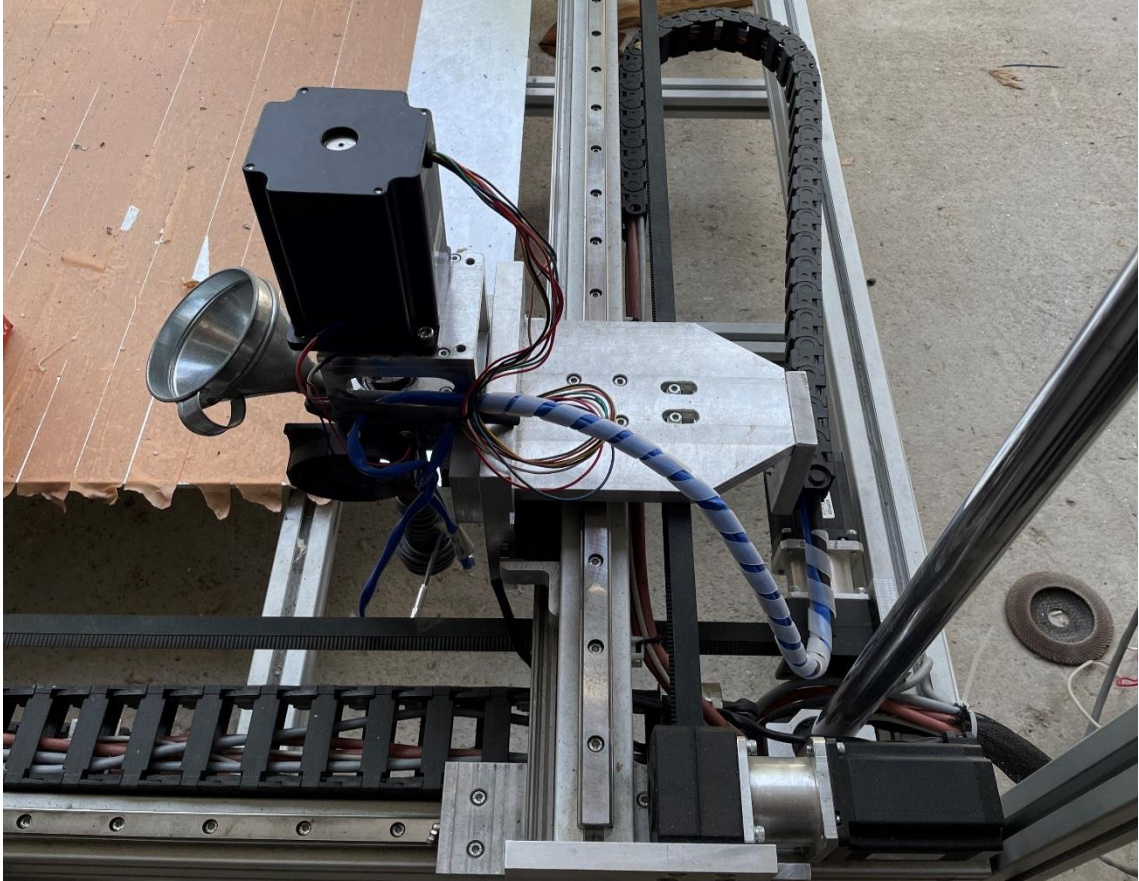
Görsel 3.11.'de Tekpan marka 700mmx500mmx200 mm boyutlarındaki yeni panonun güncel tüm bileşenlerinin yer bulunduğu ve hazır hale getirilmiş parçalarının genel gösterimi yer almaktadır. Pano üç boyutlu yazıcı üzerinde monte edilerek revizyonu tamamlanmıştır.



Görsel 3.11. *Tekpan marka yeni pano*

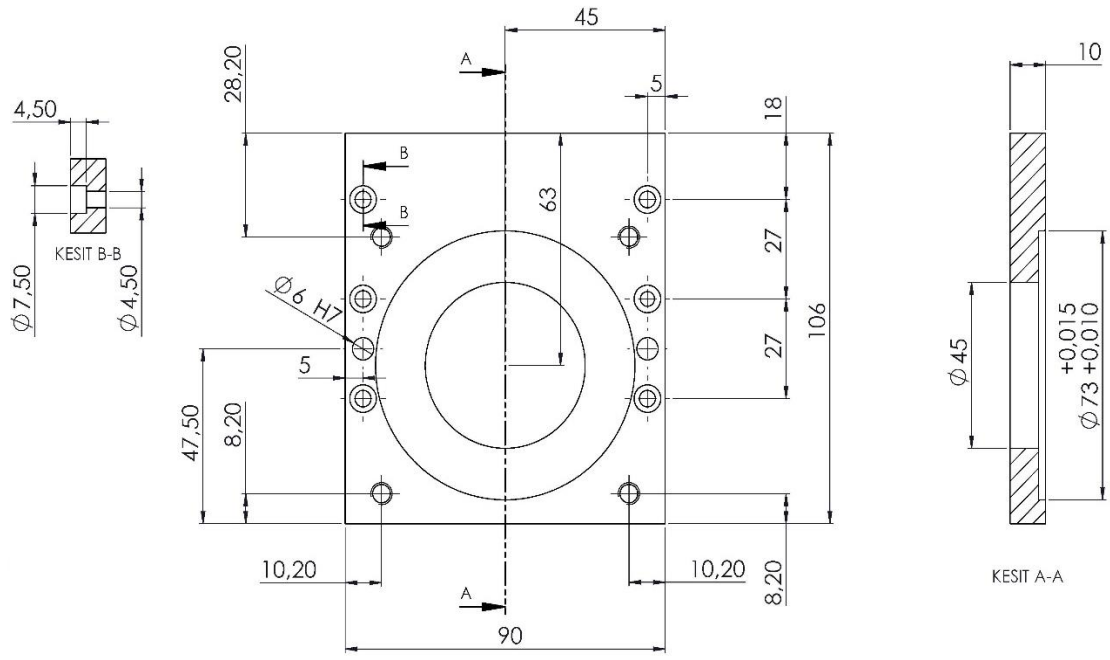
Ekstruder ile parça imalatındaki problemlerden biri ise tabla üzerinde üç boyutlu yazıcıya ait kabloların dağınık bir şekilde yer alması ve rezistanslara değmesidir. Bu süreç iş güvenliği açısından sorun teşkil etmenin yanı sıra imalat sırasında kabloların birisi

tarafından elden tutulması gibi bir durum meydana getirmektedir. Kabloların daha toplu ve düzgün bir şekilde yıpranmadan kullanılması için KODUCT marka hareketli kablo kanalları x ve y eksenlerinde kullanılması ön görülmüştür. Yapılan ölçümler sonrasında malzeme kodu KP40.57 olan 1 metre uzunluğunda ve 35mm x 20mm ölçülerinde ve malzeme kodu KDP032.35 olan 0.5 metre uzunluğunda 45mm x 20mm ölçülerinde kablo kanalları yaşanan sorunun çözümü için uygun görülmüştür.

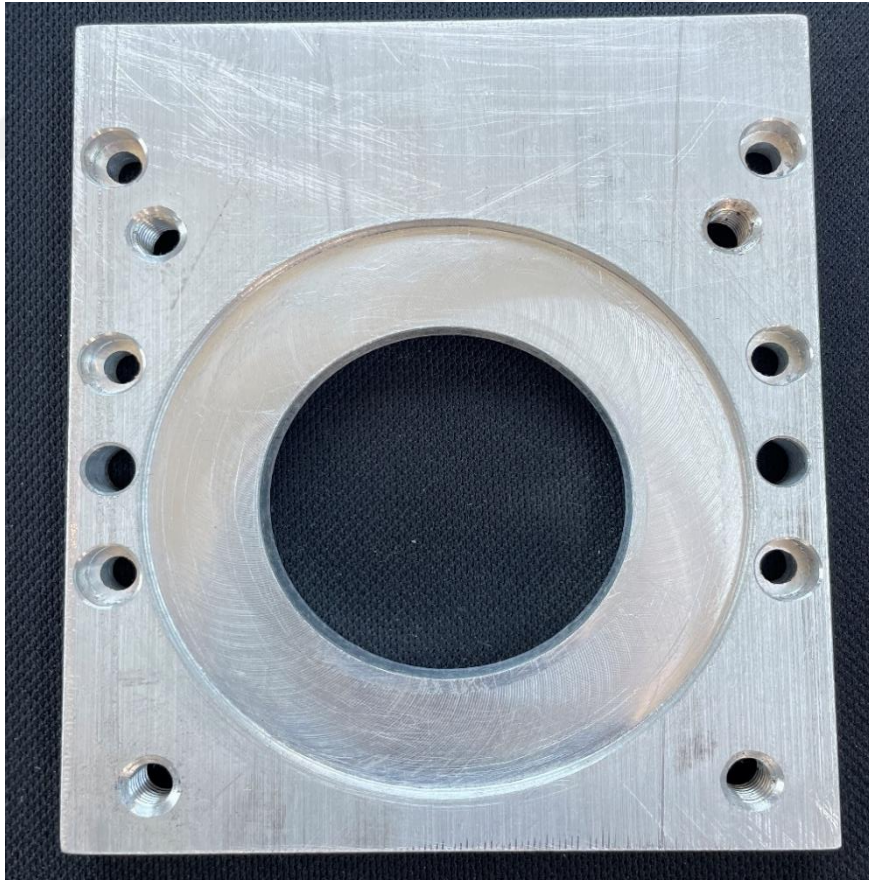


Görsel 3.12. *X ve Y ekseninde montajı yapılmış kablo kanalları*

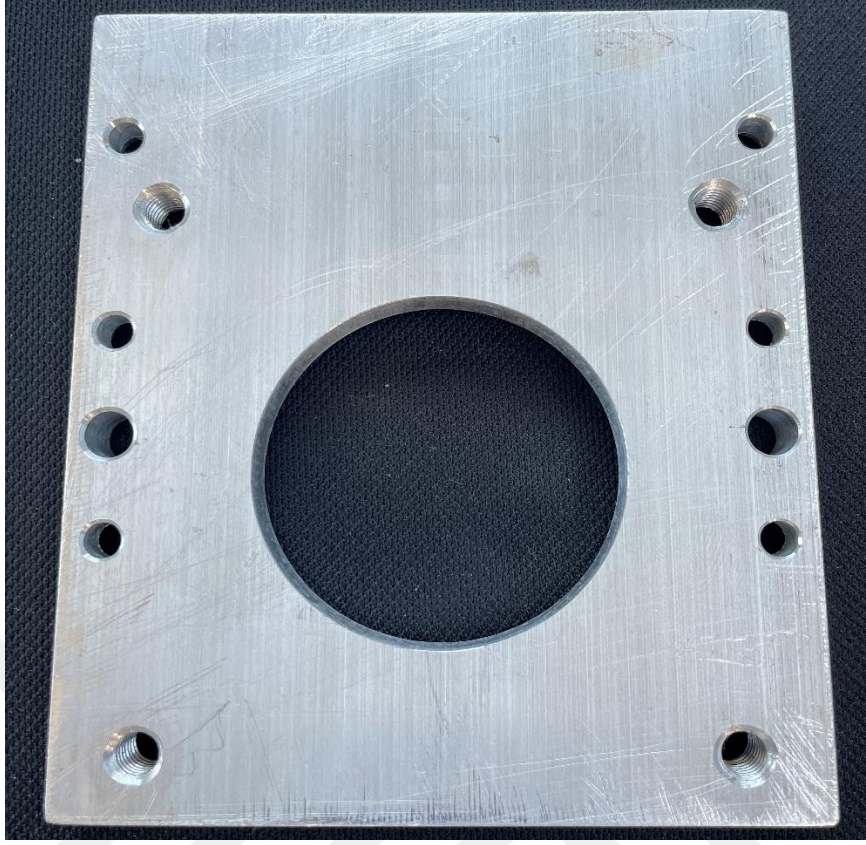
Step motor güç ve hacim olarak büyüdüğü için ekstruder ile arasında bağlanması için eski braketin montaj yerleri uymamıştır. Şekil 3.1. dikkate alınarak Nema 34 step motora istinaden ölçümler ve tasarım yapılarak alüminyum malzemeden braket imal edilmiştir. Görsel 3.9.’da alüminyum 5000 serisi malzeme ile ekstruder motoru için imal braketin teknik resmi yer almaktadır. Görsel 3.14. ve 3.15.’te ise teknik resim baz alınarak imal edilmiş nihai ürün olan braketlerin ön ve arka yüzleri yer almaktadır.



Görsel 3.13. Nema 34 step motorun montajı için alüminyum 5000 serisi braket tasarımı



Görsel 3.14. Nema 34 step motorun montajı için imal edilen alüminyum 5000 serisi braketin ön yüzü



Görsel 3.15. Nema 34 step motorun montajı için imal edilen alüminyum 5000 serisi braketin arka yüzü

Yapılan iyileştirmeler, modernize edilen sistem ve ekipmanlar doğrultusunda üç boyutlu yazıcı için ABS granülleri kullanılarak ASTM D638 standartına uygun çekme testi numuneleri basılarak denemeler yapılmıştır. Denemelerin doğrultusunda eksiklikler tespit edilerek iyileştirmeler yapılmıştır. Üç boyutlu yazıcı için parça imalatında dilimleme programı olarak Ultimaker Cura 4.10. versiyonu ve sistem kontrolü için ise Repetier-Host programları sisteme eklenmiştir ve bu yazılımlar kullanılmıştır. Ultimaker Cura 3D tasarım dosyalarından üç boyutlu yazıcınızın anlayabileceği G-kod komut dosyalarının hazırlanması ve hazırladığı G-kod komut dosyalarını doğrudan baskı alınması için üç boyutlu yazıcımıza usb bağlantısı, dosya aktarımı ile gönderilmesi veya SD karta kaydedilmesinde kolaylık sağladığı için seçilmiştir.

Basılan parçalardaki hatalar ve eksiklikler üzerinden sistemin revizyon işlemi devam edilmiştir. Peek malzeme pahalı ve temini sorunlu olan bir plastik olduğu için denemeler ABS granülleri ile yapılmıştır. Görsel 3.16.'da, görsel 3.17.'de ve görsel 3.18.'de revize edilmiş 3D yazıcı ile ABS granülü ile basılmış ASTM D638 standartına uygun olmayan çekme test numuneleri yer almaktadır.



Görsel 3.16. *ASTM D638 standartına uygun olmayan çekme test numunesi - 1*



Görsel 3.17. *ASTM D638 standartına uygun olmayan çekme test numunesi - 2*

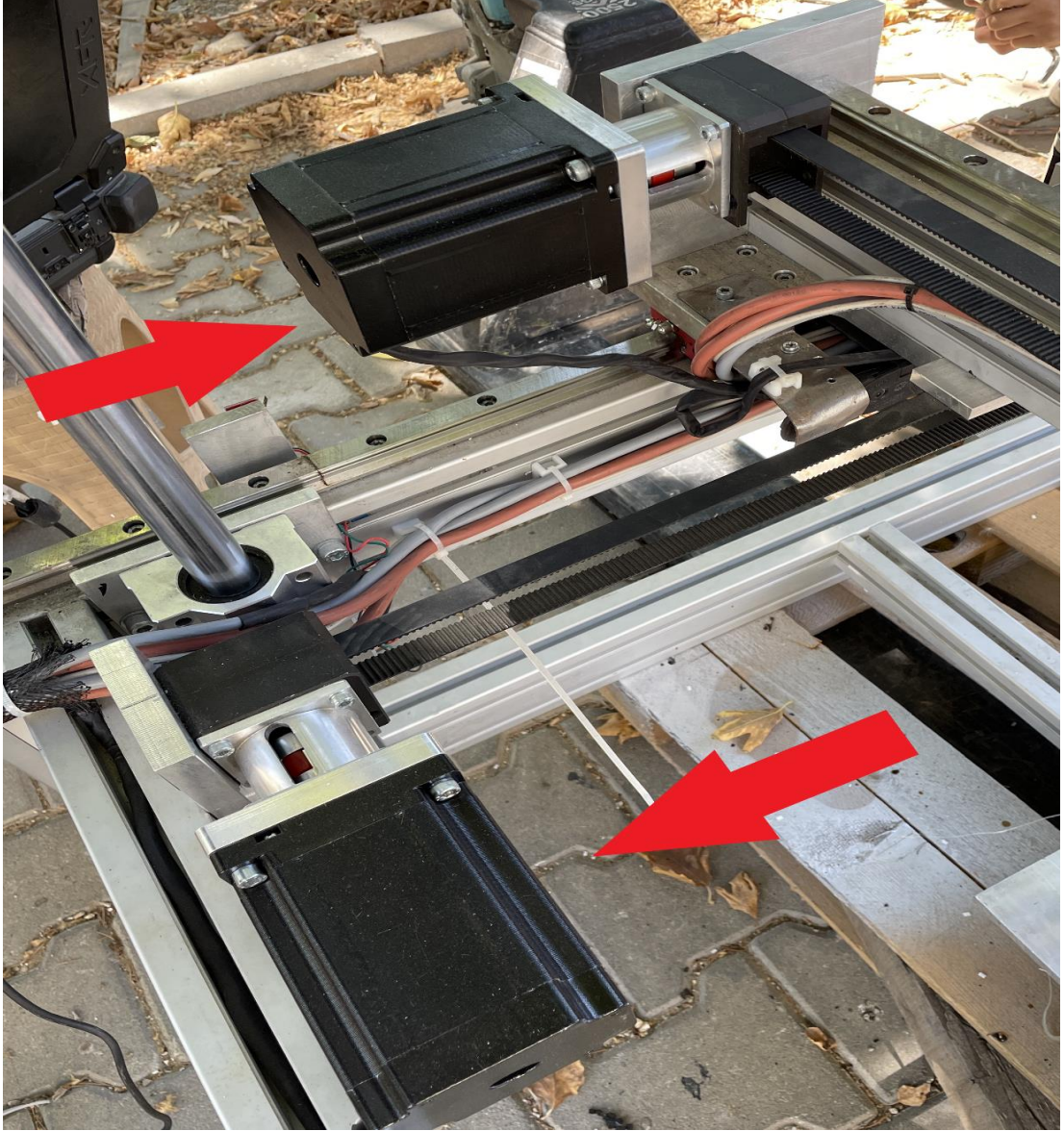


Görsel 3.18. *ASTM D638 standartına uygun olmayan çekme test numunesi - 3*

ABS granülü ile üçboyutlu yazıcıda ASTM D638 standartı dikkate alınarak basılan 6 adet deneme test numunelerinin bazılarında belirgin hatalar mevcuttur. Standart kapsamında imal edilemeyen test numuneleri incelendiğinde x ve y eksenindeki motorların gücü ekstruder öncesi filament için ayarlandığı için düşük gelmektedir. Ekstruderdeki parça fazlalığından dolayı oluşan ağırlık motorlarda optimizasyon sorununu meydana getirdiği tespit edilmiştir. Bu güç düşüklüğü ise test numunesi denemelerinde adım atlama, kaydırma, istenilen konuma gidememe, duraksama ve gibi

sorunları ve hataları meydana getirmiştir. Bu hatalardan kaynaklı ise ASTM D638 standardı kapsamında Type-1 modelinin imalatı yapılamamaktadır.

Mevcut sistemde x ve y eksenlerinde 2 adet 2.8 Nm gücünde adım motoru bulunmaktadır. Bu mevcut motor gücü baz alınarak 3 katı büyüklüğünde 8.5 Nm güce sahip 2 adet Nema 34 marka ve 86BHH118-Y490A-Y32 malzeme kodlu step motor ile değişimi yapılmıştır.



Görsel 3.19. X ve y eksenlerdeki Nema 34 step motorun montajı

Tablo 3.4. X ve y eksenlerdeki Nema 34 step motorun teknik özellikleri

Özellik	Özellik bilgisi
Tutma Torku	8.5 Nm

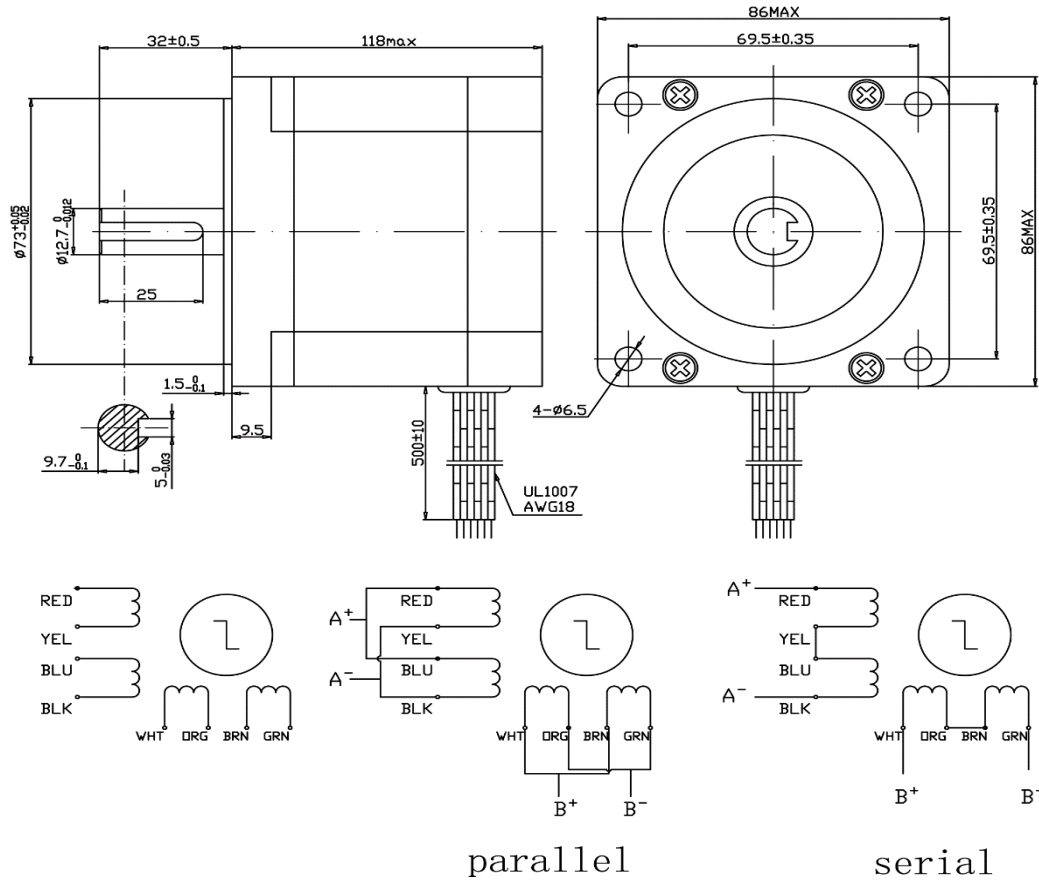
Akım	4.9 Amper
Nema	34
Flanş Ölçüsü	86 mm x 86 mm
Boy	118 mm

STEPPING MOTORS TYPE CW 86BHH118-Y490A-Y32A

COMMON	RATINGS	SPECIFICATIONS		Wiring Diagram
STEP ANGLE	1.8°±5%	VOLTAGE	4.9V	
PHASES	2 phases	CURRENT	4.9A	
INSULATION RESISTANCE	100Mohm (500VDC)	INDUCTANCE	5.2mH±20%	
CLASS OF INSULATION	B level	RESISTANCE	1 Ω ± 10%	
		HOLDING TORQUE	85kg.cm	

DIMENSION

units:mm



Şekil 3.3. X ve y eksenindeki Nema 34 step motora ait data-sheet

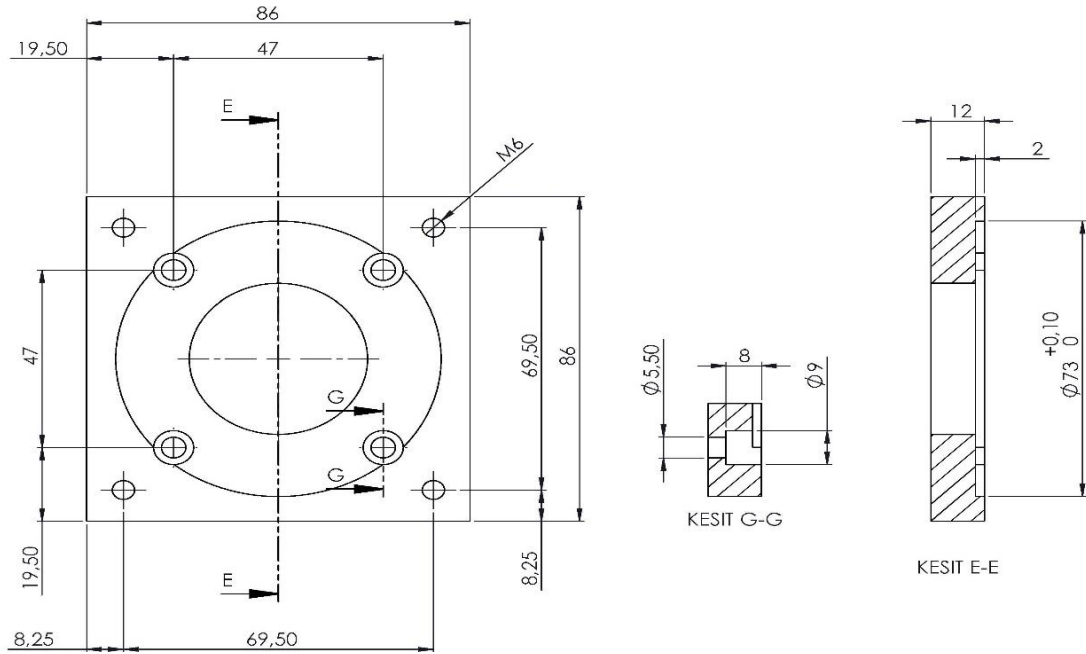
X ve y eksenini için değişimi yapılan 2 adet NEMA marka STEP MOTOR NEMA 34'ün panoya işlenmesi için 2 adet CWD556 malzeme kodlu CW-Motor Step motor

sürücü M542 ürün kodlu kart eklenmiştir. Görsel 3.9.'da görüleceği üzere ekstrudera ait step motor sürücüsünün yanında yer almaktadır.

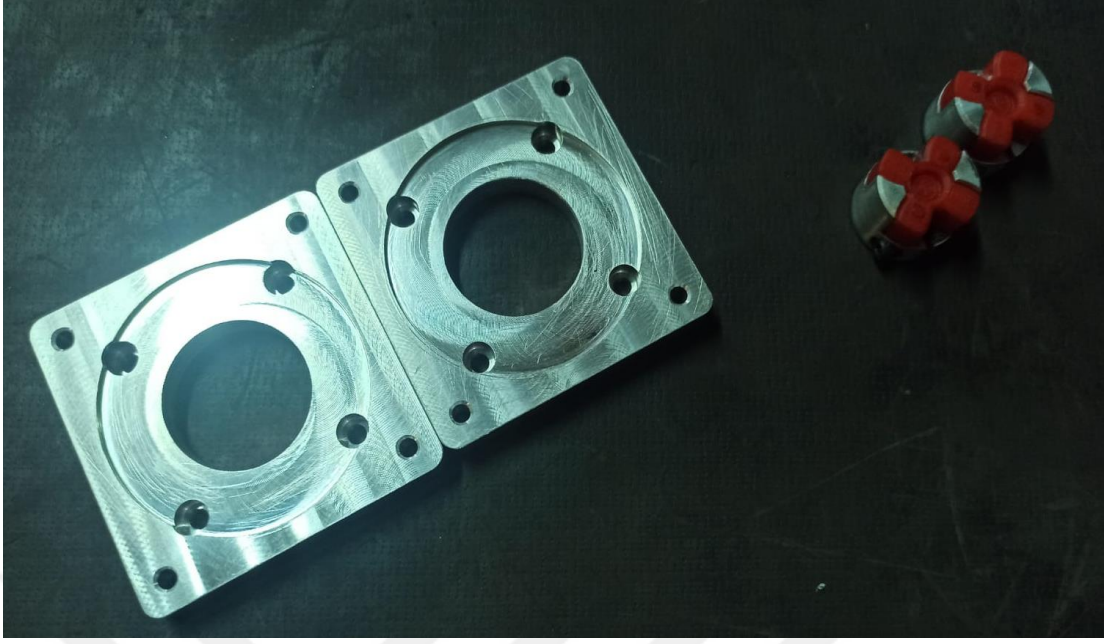
Tablo 3.5. Nema 34 step motora ait sürücü kartlarına ait teknik özellikleri

Özellik	Özellik bilgisi
Besleme gerilimi	+50 VDC
Çıkış akımı	4.5 A
Voltaj	24 V – 50 V
Amper	4.5 A
Boy x En x Genişlik	119 mm x 75 mm x 35 mm

Değişmesi planlanana x ve y eksenindeki 2 adet Step motor güç ve hacim olarak büyüdüğü için x ve y eksenlerindeki eski braketlerin montaj yerleri birbirine uymamıştır. Görsel 3.20. dikkate alınarak 2 adet Nema 34 step motora istinaden ölçümler ve tasarım yapılarak alüminyum malzemeden 2 adet farklı braket imal edilmiştir. Görsel 3.21.'de alüminyum 5000 serisi malzeme ile ekstruder motoru için imal braketin görseli yer almaktadır.

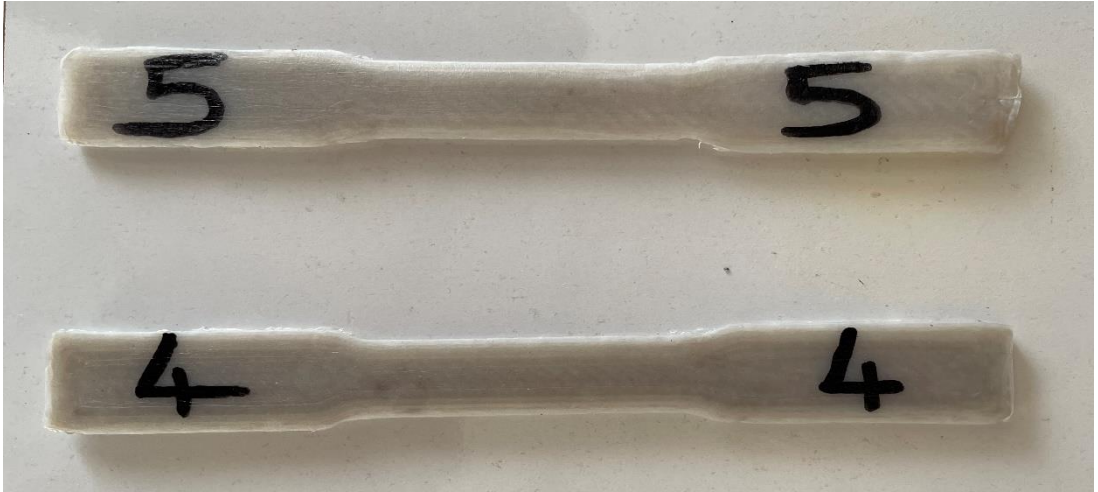


Görsel 3.20. X ve y ekseni Nema 34 step motorun montajı için alüminyum 5000 serisi braket tasarımı

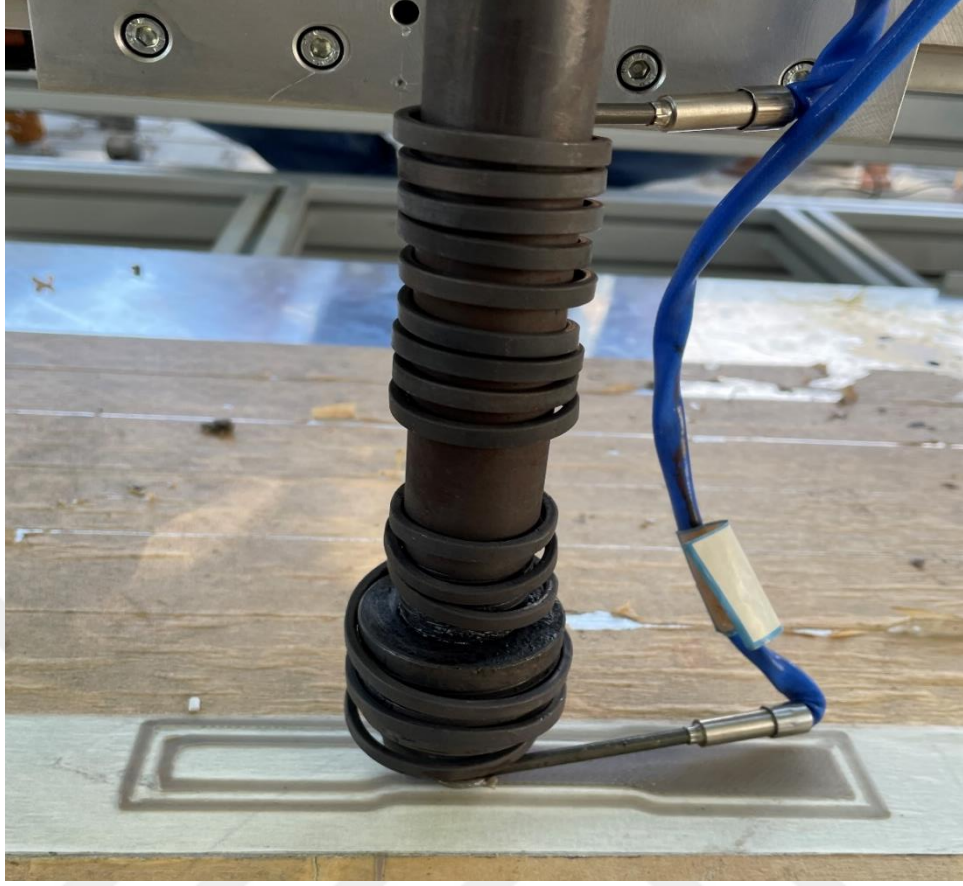


Görsel 3.21. *X ve Y eksenindeki Nema 34 step motorun montajı için imal edilen alüminyum 5000 serisi braketter*

X ve y eksenine eklenen step motorlar ve yeni panoya eklenen sürücüler kapsamında yazılımsal olarak da iyileştirmeler yapılarak revize edilmiştir. ABS granülleri kullanılarak tekrardan ASTM D638 standartına uygun deneme için çekme testi numuneleri basılmıştır. Görsel 3.22.'de görüleceği üzere üçboyutlu yazıcıda basılmış test numuneleri yer almaktadır.



Görsel 3.22. *ASTM D638 standartına uygun çekme test numunesi 4 ve 5*



Görsel 3.23. ASTM D638 standartına uygun ABS malzeme ile parça imalatı

Görsel 3.23.'de ASTM D638 standartına uygun termoplastik granül performans ABS kullanılarak imal edilen deneme test numunesinin imalat sürecinden bir kesit yer almaktadır.

Görsel 3.24.'de göre IR (termal kamera) kullanarak sıcaklığa ve zamana bağlı olarak üretilen numulerdeki yer değiştirmeyi, ısı transferini, ekstruder ve nozuldaki sıcaklık seviyeleri ve programdaki ısı değeri ile ekstruderda yer alan ısı değerin kıyaslanması ve teyiti sağlanmıştır. Termal kamera Flir marka C5 serili olup cep tipi wifi özelliklidir. Maksimum 400 °C, minimum -20 °C sıcaklık ölçmektedir. IR sensör özellikleri 160 mm × 120 mm olup 19.200 pikseldir.



Görsel 3.24. Termal kamera ile sıcaklık kontrolleri

Mevcut eklemeli imalat makinesine eklenecek parçalar ve modernize edilecek ürünler doğrultusunda sistemin yazılımsal güncellemesi yapılmıştır.

3.2. Geridönüşüm PEEK Malzemenin Eklemeli İmalat İle Üretilirliğinin Test Edilmesi

Tez konusu kapsamında kullanılan ana malzeme Peek değil geri dönüştürülmüş Peek malzemedir. Bu yüzden ham Peek malzeme yerine geri dönüşüm ve talaşlardan oluşa Peek malzeme tedariği oldukça elzemdir. Medikal ve Ar-Ge firmaları üzerinden Peek ile imal edilen ürünlerin atıkları toplanarak, temin edilmiştir. Bu amaçla yapılan teknik ön görüşmelerde 2 Ar-Ge merkezinde 5 kg miktarında PEEK hammadde atığı sağlanmıştır. Medikal, Ar-Ge ve otomotiv firmalarının talaşlı üretim atığı olan bu Peek malzemelere ait teknik detayların yer aldığı data-sheetler mevcuttur. Bu geri dönüşümlü

malzemelerin eklemeli imalat makinesi olan 3D yazıcıda işlenmesi için granüle yakın hale çevrilmesi gerekmektedir.

Termoplastik Peek malzemenin su absorbe oranı %0.45'dir (Singh, Prakash, & Ramakrishna, 2019). Tedarik edilen geri dönüşüm Peek malzeme belirli işlemlerden geçtiği ve işlenen malzemeden geri dönüşüm talaş olarak çıktığından dolayı ıslak (nemli) sayılmaktadır. Geridönüşüm talaş Peek malzeme 3D yazıcının ekstruder haznesine koyulmadan önce hassas ölçüm aletleri ile belirli süre ve periyotlarda fırında ısıtılarak kurutma işlemine tabi tutulmuştur. Bu kurutma işlemi ile absorbe edilmiş su, kullanılacak geri dönüşüm talaş Peek malzemeden uzaklaştırılmıştır.



Görsel 3.25. Geri dönüştürülecek Peek malzemeler

Görsel 3.25. 'de farklı olarak geri dönüştürülmesi düşünülen Peek malzeme esaslı ürünler ve Peek malzeme talaş atıkları bulunmaktadır. Talaş atıkları ve Peek esaslı ürünleri Eskişehir'de yer alan ve geri dönüşüm firması olarak bilenen Benli Geri Dönüşüm 'den destek alınmıştır. Küçük parçalara ayırma işleminde ve hazneye girebilecek malzeme şekline uygun olarak görsel 3.26.'daki geri dönüştürme makinesinin

kullanılmasına karar verilmiştir. Yapılan geri dönüştürme işlemi sonucunda görsel 3.27.'deki malzeme elde edilmiştir.



Görsel 3.26. Benli Geri Dönüşüm firmasına ait geri dönüşüm parçalama makinesi



Görsel 3.27. *Geri dönüşümü tamamlanmış Peek malzeme ve parçalara ayrılmış atık Peek talaşı*

3.3. Taguchi L9 Deney Tasarımı

Termoplastik talaş Peek malzemenin maliyetinin çok yüksek olması, tedarığının sorunlu ve kısıtlı olmasından kaynaklı deney sürecinin akıllı ve etkin bir şekilde modellenmesini ve bunun istatistiksel olarak değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu amaçla literatürde geçerli bir Deney Tasarım Metodu olan Taguchi DEO metodu tercih edilmiştir. Deney parametreleri ile Taguchi L9 formatı ve ortogonal dizisi kullanılarak deney tasarımı oluşturulmuştur. Minitab 19 yazılımı ile oluşturulan ortogonal deney tasarımı tablo 3.9.'da yer almaktadır. Deney sonunda kontrol parametresi olarak numunelerin ASTM D638 standartına göre çekme testinden elde edilen mekanik sonuçlar doğrultusunda Varyans analizleri ile Anova (değişkenlerin analizi) metodu kullanılarak istatistiksel bir metotla analiz edilecektir.

Eklemeli imalatla Peek malzemenin imal edilmesi için malzeme özelliği açısından gerekli şartlar literatürde araştırılmıştır. Literatür araştırmasına istinaden Tablo 3.6.'da Peek malzeme için Taguchi L9 deney tasarımı ve imalatla kullanılmak üzere parametreler ve değerleri verilmiştir.

Tablo 3.6. *Peek malzeme baskı parametreleri*

Parametreler	Değerler
Üretim Açısı	0° (Rahman, Letcher, & Reese, 2015)
Katman Kalınlığı	0.1–0.3 mm (Arif, Kumar, Varadarajan, & Cantwell, 2018)
Tabla Sıcaklığı	150–200 °C (Dauriskikh, ve diğerleri, 2018)
Nozul Sıcaklığı	420–440 °C (Wang, Zou, Xiao, Ding, & Huang, 2019)
Baskı Hızı	20 mm/s (Wu, ve diğerleri, 2015)
Ortam Sıcaklığı	70-90 °C (Başgöl, ve diğerleri, 2018)
Doluluk Oranı	% 100
Dolgu Deseni	Doğrusal

Baskı hızı, nozul sıcaklığı ve tabla sıcaklığı değişken parametreler olarak belirlenmiştir. Kontrol parametreleri tablo 3.7.'de yer almaktadır. Malzeme, 3D yazıcı, çevresel vb. diğer faktörlerin etkisi ile gereksinimlere istinaden üretim parametrelerinde farklılıklar saptanması amaçlanmıştır.

Tablo 3.7. *Taguchi analizi için kontrol parametreleri ve seviyeleri*

Kontrol	Seviye		
Parametreleri	1	2	3
Baskı Hızı			
(mm/s)	20	40	60
(A)			
Nozul Sıcaklığı			
°C	380	410	440
(B)			
Tabla Sıcaklığı			
°C	130	150	170
(C)			

İlgili kontrol parametrelerinin sayısına ve bunlara karşılık gelen seviyelere bağlı olarak proses optimizasyonu için bir L9 ortogonal dizisi kullanılmıştır. L9 dizisi, Taguchi tarafından geliştirilen dokuz denemeli bir kesirli-faktöriyel deney matrisidir. Bir kesirli-faktöriyel deney matrisi, ana kontrol parametresi etkilerini tahmin etmek için kontrol parametrelerinin olası toplam kombinasyonlarının bir kısmını kullanır. (Ross, 1996)

Minitab 19 programı kullanılarak oluşturulan Tablo 3.8.'da verilen L9 dizisi, gerçekleştirilen deneylerde kullanılan her bir kontrol parametresinin seviyelerini detaylandırmaktadır.

Tablo 3.8. L9 ortogonal dizisi kullanılan deneysel plan

Deney Numarası	Parametre ve Seviye		
	Baskı Hızı	Nozul Sıcaklığı	Tabla Sıcaklığı
1	20	380	130
2	20	410	150
3	20	440	170
4	40	380	150
5	40	410	170
6	40	440	130
7	60	380	170
8	60	410	130
9	60	440	150

Tablo 3.9. 'da verilen deney planına takiben her deney numarası için iki ASTM D638 Tip-1 çekme testi numunesi üretilecek ve toplam 18 adet çekme test numunesi üretilmiş olacaktır.

Eriyik biriktirme yönteminde dikkate alınması gereken en önemli tasarım kriterlerinden biri parça oryantasyonudur. Parçanın, üretim tablası üzerindeki yönelimi üretimde kullanılacak malzeme miktarını, üretim süresini, destek yapılarının gerekli olup olmadığını belirlemektedir. Bu nedenle tasarımda makine özellikleri de dikkate alınarak parça konumunun iyi analiz edilmesi gerekmektedir. Analiz sonucu, test numunesini x-y ekseninde/düzleminde imal edilip katmanlar z ekseninde yığılacağı için herhangi bir destek yapısına ihtiyaç duyulmayacaktır. Daha sonraki süreçte üretimi tamamlanan parça tabladan uzaklaştırılarak test ve analizlere hazır hale gelmektedir.

Öncelikle geri dönüşümlü Peek talaşında kurutma işlemi yapılmıştır. Kurutma işlemi 5 gün süre ile 40 °C sıcaklıkta tutulmuştur. Tabla 3.9.'da yer alan parametreler doğrultusunda talaş Peek malzeme ekstruderin malzeme girişinden baskı yaparak vidanın malzemeyi yemesi denenmiştir lakin hiçbir şekilde stabil bir malzeme akışı sağlanamamıştır. Görsel 3.28. de görüldüğü üzere geri dönüşümlü Peek malzeme, ekstruderde yer alan milin 2 dişi arasında sıkışıp kalmaktadır ve aşağıya doğru

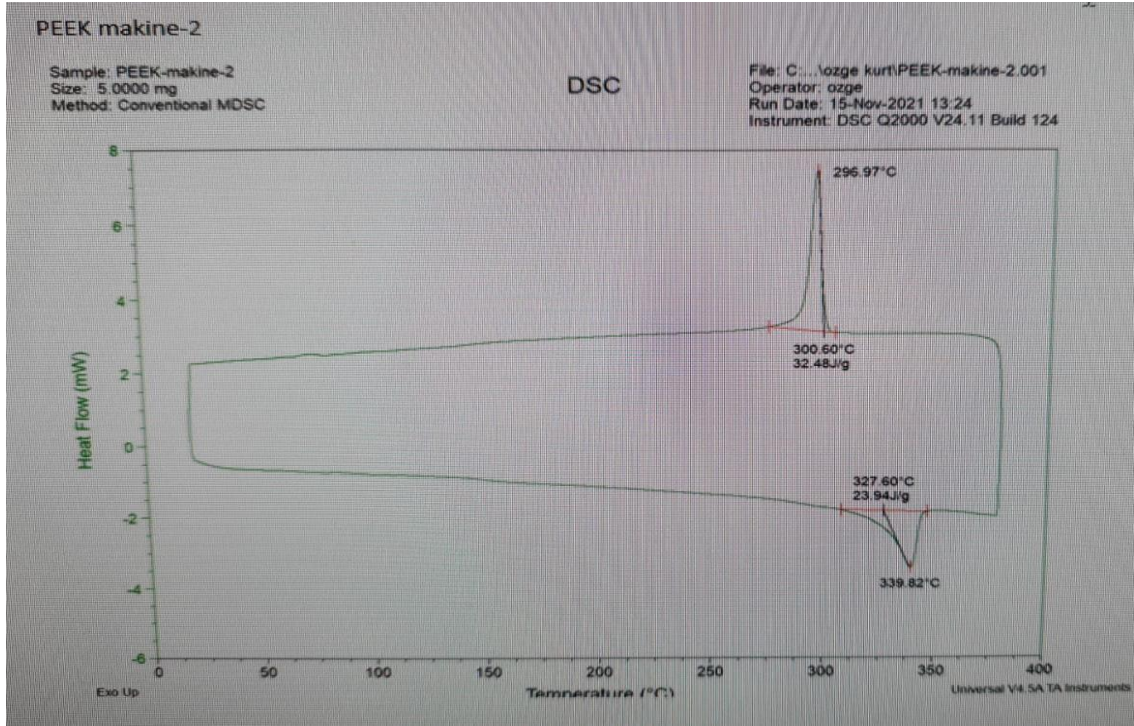
iletilmemektedir. Sıkışan malzeme de sürekli ısıtıldığı için ekstruder içinde kül olmaktadır ve tıkama yapmaktadır. Ekstruder 'da malzeme bırakmamak ve temizlemek için ise ABS granülü ile devamında ekleme yapılmıştır.



Görsel 3.28. Geridönüşüm PEEK malzemenin ekstruderdaki akış hatası

2-3 farklı deneme sonrası talaş ve iplik şeklindeki Peek malzemede ağırlık elde etmek ve ekstruder milinin malzemeyi çekerek işlemesi için malzemenin eritilmesi düşünülmüş ve ince tabaka haline dönüşen Peek malzemeyi küçük boyutlarda parçalara ayrılması ön görülmüştür.

Geridönüşüm talaş Peek malzeme için öncelikle üniversitemizdeki Kimya Bölümü laboratuvarında bulunan DSC Q2000 V24.11 makinesinde 5.000 mg ağırlığındaki malzemenin “Conventional Mds” metodu ile DSC analizi yapılmıştır. Analize istinaden erime sıcaklığı 339.82 °C olarak belirlenmiştir. Belirlenen erime sıcaklığı ve malzemenin technical datasheet'i ile uyushmaktadır. Dsc analizinin sonuç grafiği görsel 3.29.'de yer almaktadır.



Görsel 3.29. Geridönüşüm PEEK malzemenin DSC analizi

Bu kapsamda öncelikle Eskişehir Organize Sanayi Bölgesinde bulunan Entekno Endüstriyel Teknolojik ve Nano Malzemeler San. ve Tic. A. Ş. firmasının yardımları ile malzemenin erime sıcaklığı baz alınarak görsel 3.30. 'da yer alan Ref-San marka RS-50 model fırında eritmek için farklı denemeler yapılmıştır. 1. deneme aşağıdaki tablo 3.9'da yer alan parametreler dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Geri dönüşümlü talaş Peek malzeme fırına konularak aşağıdaki parametrelere maruz bırakılmıştır.

Tablo 3.9. Geridönüşüm Peek talaşına uygulanan ısı işlem, birinci deney

Sıcaklık	Süre
0 °C - 350 °C	70 dakika'da istenilen sıcaklığa ulaşmıştır. Fırın, 5°C/dakika artış olarak ayarlanmıştır.
350 °C	15 dakika aynı sıcaklıkta bekletilmiştir.
350 °C - 0 °C	70 dakika'da sıcaklık düşürülmüştür.

2. deneme ise aşağıdaki tablo 3.10'de yer alan parametreler dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Görsel 3.31.'de bu iki deneye ait geri dönüşümlü Peek talaşların birleştirilmiş hali bulunmaktadır. Görselde görüleceği üzere sıcaklık artışı malzemede koyu renk oluşumuna sebep olmuştur. Bu doğrultuda eriyik hale getirilip birleştirilen atık

Peek talaşları bütün halden, kesici alet yardımı ile düzensiz bir şekilde küçük parçalara ayrılmıştır.

Tablo 3.10. Atık Peek talaşına uygulanan ısıtıl işlem, ikinci deney

Sıcaklık	Süre
0 °C - 380 °C	76 dakika'da istenilen sıcaklığa ulaşmıştır. Fırın, 5 °C/dakika artış olarak ayarlanmıştır.
380 °C	20 dakika aynı sıcaklıkta bekletilmiştir.
380 °C - 0 °C	76 dakika'da sıcaklık düşürülmüştür.



Görsel 3.30. Kamara tip ısıtıl işlem fırını

Görsel 3.31.'deki ısıtıl işleme uğramış atık Peek talaşları ile tekrardan üç boyutlu yazıcıda denemeler yapılmıştır. Ekstrudera atılan malzeme, iplik malzemede yaşanan sorun gibi mile sarma yapmamıştır. Lakin buradaki ikinci deneydeki denemede ise yeniden stabil bir ürün akışı sağlanamamıştır. Çünkü malzeme, mil doğrultusunda aşağıya ilerlememiştir. Bu kapsamda öncelikle sıcaklık kademeli şekilde artırılmış fakat herhangi bir değişim gözlenememiştir. Sıcaklık artışlarının devamında ise ekstruderin 400 °C'lik sıcaklığa ulaşmasına karşın ABS granülü beslemesi yapıldıktan sonra geri dönüşümlü Peek talaşı yanmış bir şekilde toz ve kül halde çıkmaktadır.



Görsel 3.31. *Isıl işlem uygulanarak birleştirilmiş geri dönüşümlü Peek talaşı*

İlk 2 deneyde de geri dönüştürülmüş talaş Peek malzemedan stabil bir şekilde malzeme akışı sağlanamamıştır. Malzeme, granül Abs malzemesi eklemesi yapılarak itme uygulamış ve akış böylece sağlanabilmiştir. Malzeme, görsel 3.32’de görüldüğü üzere ekstruderda stabil ve sürekli akmadığı için ve istenilen malzeme olmadığı için ASTM D638 çekme test numunesi basılamamıştır.



Görsel 3.32. *Peek malzemenin ekstruder akış sorunu*

Kimya laboratuvarında çift vidalı ekstruderde geri dönüşümlü Peek talaşı üzerinde denemeler yapılmıştır. Lakin ekstrüde edilmeyen malzeme filament haline gelmediği için pelletizer makinesini besleyememiş ve kesim işlemi yapılamadığı için granül hale getirilememiştir. Bu süreçte tekrardan başarısız olduğu için son bir farklı yöntem olarak soğuk pres denilen işlemin uygulanmasına karar verilmiştir. Kimya laboratuvarında atık Peek malzemelere pres uygulaması yapılarak film haline getirilmeye çalışılmıştır. Burada ise talaş haldeki Peek malzeme film haline getirilememiştir.

Tüm bu deneylere ve denemeler göz önünde bulundurularak hammadde olarak gelen, Doğu Pres Otomotiv ve Teknik Sanayi ve Tic. A.Ş. tornalama işlemi yapılan Peek malzemenin atıklarından yapılması düşünülen termoplastik malzemedede olumlu sonuç alınamamıştır. Bu doğrultuda 3DAM laboratuvarında hazır halde bulunan OO-Kuma marka ve görsel 3.33.'de yer alan termoplastik performans ABS granülü üzerinden sürece devam edilmiştir.



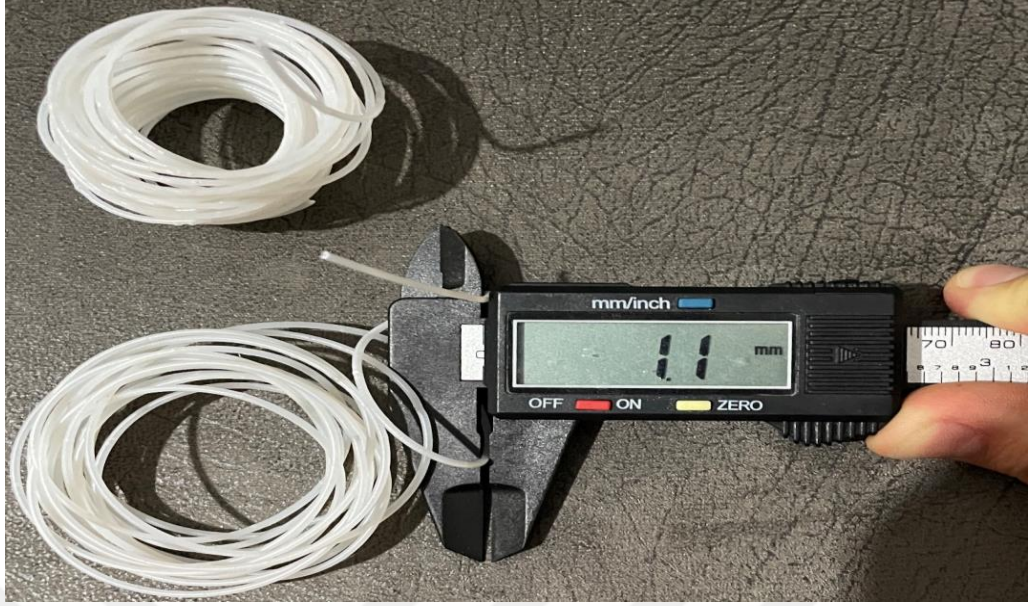
Görsel 3.33. *OO-Kuma marka termoplastik performans ABS granülü*

Özetlemek gerekirse üç boyutlu yazıcıda, geri dönüşümlü Peek malzeme yerine termoplastik performans Abs granül malzeme kullanılarak ASTM D638 standartına uygun bir şekilde gerekli parametreleri deneyerek çekme testi numunesi imal edilmiştir.

3.4. ASTM D638 Test Numunelerinin İmalatı ve Çekme Testi

3DAM laboratuvarında yer alan üç boyutlu yazıcı için termoplastik performans Abs granülünün çalışma parametrelerinin bulunması gerekmektedir. Üç boyutlu yazıcı ve ekstruder dış etkenlerden, çevresel faktörlerden fazlasıyla etkilenmektedir. Nozulu saran rezistansların sıkı sarılması ve gevşemesi sonucu sıcaklık farkları meydana gelmektedir. Bu yüzden tüm imalat süresinde mekanik, yazılımsal, kimyasal, çevresel faktörlerin aynı olmasına dikkat edilmelidir. Çünkü herhangi bir değişiklik, parametrelerde ve imal edilen ürünlerde farklı sonuçların el edilmesine sebep olabilmektedir. Buradaki bu önemli detaya dikkat edilmesi gerekmektedir.

Ekstrudera granül olarak giren performans Abs granülün, 1 mm çaplı pirinç malzemeden imal edilen yeni nozuldan filament şeklinde çıkmaktadır. İmal edilen nozulun hassasiyetini belirlemek için filamentin çapı dijital kumpas yardımıyla ölçülmüştür. Filamentte, görsel 3.34.'de görüleceği üzere nozul kaynaklı + 0.1 mm farklılık mevcuttur.



Görsel 3.34. Ekstrüde edilmiş Abs filamenti ve ölçümü

ASTM D638 standartı kapsamında test numunelerinin üç boyutlu yazıcı için dilimleme programı olan Ultimaker Cura 4.10'da sabit tutulan imalat parametreleri tablo 3.11.'de yer almaktadır.

Tablo 3.11. Cura'daki sabit parametreler

Parametre	Değer
Nozul çapı	1 mm
Katman kalınlığı	0.5 mm
Duvar hattı sayısı	2
Dış duvar sürme mesafesi	3 mm
Dolgu deseni	Izgara
İlk katman kalınlığı	1 mm
Duvar kalınlığı	1 mm
Katman genişliği	0.5 mm
Hareket hızı	80 mm/s
Yazdırma hızı	40 mm/s
Geri çekme mesafesi	3 mm
Geri çekme hızı	15 mm/s
Yapı levhası türü	Kenar
Kenar hattı sayısı	2

Baskı hızı, nozul sıcaklığı ve tabla sıcaklığı değişken parametreler olarak belirlenmiştir. Deneme amaçlı kontrol parametreleri tablo 3.12.'de yer almaktadır.

Malzeme, üç boyutlu yazıcı, çevresel vb. diğer faktörlerin etkisi ile kontrol parametreleri ile gereksinimlere istinaden üretim, deney parametrelerine ulaşılabacaktır.

Tablo 3.12. Taguchi L9 için kontrol parametreleri ve seviyeleri

	Seviye		
	1	2	3
Baskı Hızı (mm/s) (A)	32 mm/s - %80	40 mm/s - %100	48 mm/s - %120
Nozul Sıcaklığı °C (B)	300	330	360
Tabla Sıcaklığı °C (C)	90	110	130

Tablo 3.12.'deki ana parametrelere göz önüne alınarak performans Abs malzemesi için denemeler yapılmıştır. Üç boyutlu yazıcının kontrol yazılımı olan Repetier Host, üç boyutlu yazıcıda makine kontrol yazılımındaki ilerleme hızı %100 olduğunda 40 mm/s olarak ayarlanmıştır. Bu hız ayarlaması, Ultimaker Cura 4.10.0 programındaki dilimleme ayarlarından dikkate alınarak yapılmıştır. Repetier Host programında yer alan ilerleme hızındaki yüzdelik kısımlar değiştikçe baskı hızı oran orantı ile ayrıca hesaplanmaktadır.

Öncelikle kontrol parametreleri ile ASTM D-638 çekme test numunesi imalatına tablo 3.13.'de yer alan seviye 3 üzerinden başlanmıştır. Bunun sebebi performans Abs granülün yanmadan öncesi en üst sıcaklık seviyesini görmektir. Seviye 3 için aşağıdaki tablo 3.13.'de yer alan şekilde denemeler yapılmıştır.

Tablo 3.13. Seviye 3 için deneysel çalışma parametreleri

Deney Numarası	Parametre ve Seviye		
	Baskı Hızı	Nozul Sıcaklığı	Tabla Sıcaklığı
1	48 mm/s - % 120	360 °C	130 °C
2	48 mm/s - % 120	370 °C	130 °C
3	48 mm/s - % 120	390 °C	130 °C

Sonrasında tablo 3.12.'de yer alan seviye 2 kontrol parametreleri ile ASTM D-638 çekme test numunesi imalatı yapılmıştır. Seviye 2 için aşağıdaki tablo 3.14.'de yer alan şekilde denemeler yapılmıştır.

Tablo 3.14. Seviye 2 için deneysel çalışma parametreleri

Deney Numarası	Parametre ve Seviye		
	Baskı Hızı	Nozul Sıcaklığı	Tabla Sıcaklığı
1	40 mm/s - % 100	330 °C	110 °C
2	40 mm/s - % 100	350 °C	110 °C
3	40 mm/s - % 100	370 °C	110 °C

Son olarak tablo 3.12.'de yer alan seviye 1 kontrol parametreleri ile ASTM D-638 çekme test numunesi imalatı yapılmıştır. Seviye 1 için aşağıdaki tablo 3.15.'de yer alan şekilde denemeler yapılmıştır.

Tablo 3.15. Seviye 1 için deneysel çalışma parametreleri

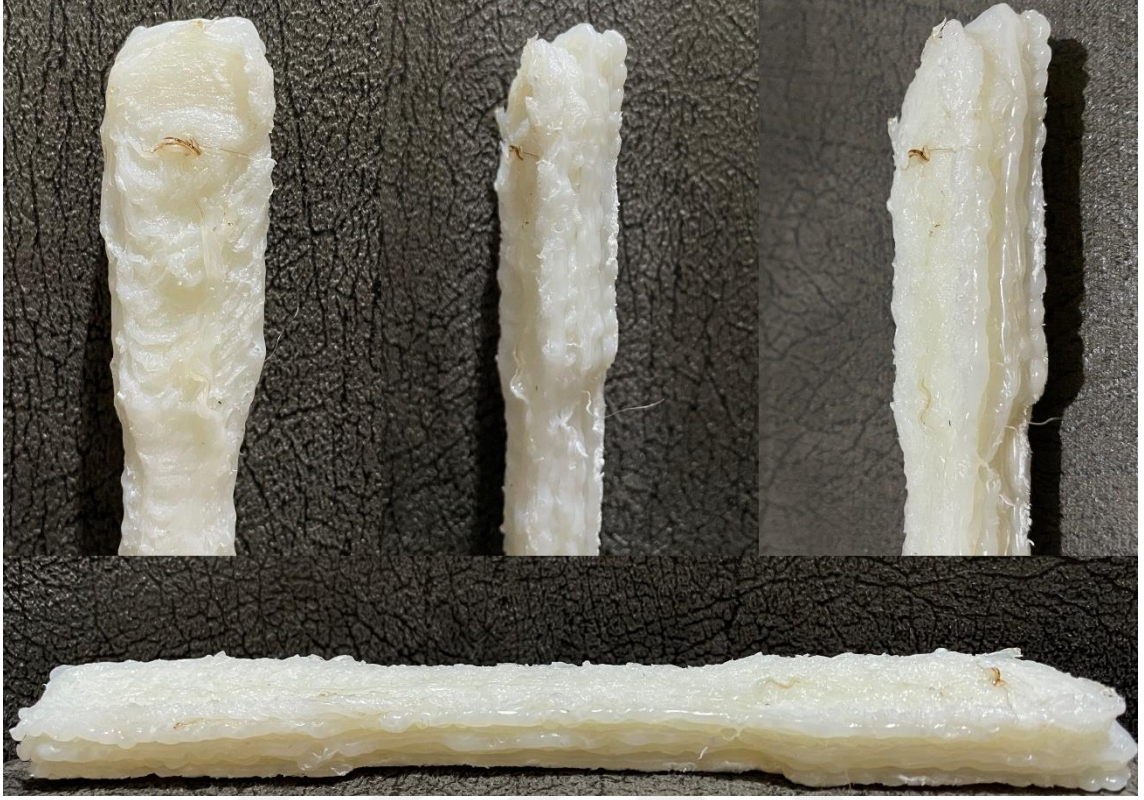
Deney Numarası	Parametre ve Seviye		
	Baskı Hızı	Nozul Sıcaklığı	Tabla Sıcaklığı
1	32 mm/s - % 80	310 °C	90 °C
2	32 mm/s - % 80	300 °C	90 °C
3	32 mm/s - % 80	280 °C	90 °C

Tablo 3.15.'de yer alan seviye 1 deneysel çalışmasında, 2 numaralı deney numarasındaki ASTM D638 test numunesinin imalatı için ekstruder sıcaklığının 300 °C altı için malzeme akışında sorunlar yaşanmaya başlanmıştır. Ekstruder, granül haldeki malzemeyi erime parametresinde eritemediği için akış sağlanamamaktadır. Üç boyutlu yazıcı imalata devam etse bile malzeme akışı sağlanamadığı için malzeme ilk kat, ara kat, son katlarda dolgu işlemi yapmamaktadır. Bu yüzden seviye 1 deneysel çalışmasında 3 numaralı deney malzeme akışı stabil olmadığı için gerçekleştirilememiştir.



Görsel 3.35. Seviye 1'deki deney 3 için eksik malzeme akış hatalı ASTM D638 çekme test numunesi

Seviye 3 deneysel çalışmasında, 3 numaralı deney numarasındaki ASTM D638 test numunesi için ekstruder sıcaklığının 370 °C üstü için malzeme akışında sorunlar yaşanmaya başlanmıştır. Malzeme, eriyik kıvama geldiği için numunede yığılma ve renk değişikliği yapmaktadır. Hem numenin duvarında hem de dolgu işlemi yapılırken akış fazlalığından dolayı taşmalara sebep olmaktadır. Bu yüzden seviye 3 deneysel çalışmasında, 3 numaralı deneyler malzeme akışı stabil olmadığı için gerçekleştirilememiştir.



Görsel 3.36. *Seviye 3’deki deney 3 için fazla malzeme akış hatalı ASTM D638 çekme test numunesi*

Termoplastik performans Abs granülün ekstrüde edildikten sonra tablaya yapışması için öncelikle kağıt bant, mavi maskeleye bandı ve Uhu marka stic magic yapıştırıcı kullanılmıştır. Burada tabla sıcaklığı tek başına yapışma sağlamamaktadır. ASTM D638 test numunesinin imalat süresinin yarısında iken tabla ile ayrılma olabilmektedir. Bu ise hem imalat sürecinde zaman kaybı meydana getirmenin yanı sıra malzeme kaybına da sebep olmaktadır. Yapışmanın herhangi bir sorun yaratmaması için Detsan marka saf aseton ($\text{CH}_3\text{-COCH}_3$), kullanılan Abs granülün 2 katı olacak şekilde karıştırılarak ve 8 saat bekleme sonucu yapışkanlık sağlayan karışım elde edilmiştir. Tablaya, imalat öncesi spatula ile ince katman şeklinde sürülmüştür. Yapılan deneylerde bu karışım kullanıldığı sürece yapışma konusunda herhangi sorun ve ayrılma yaşanmamıştır. Tablo 3.12’de yer alan tablodaki tabla sıcaklığı dikkate alınarak yapılan deneylerde 9 adet numune arasında en iyisi yapışma elde edilen tabla sıcaklığı 110 °C derece seçilmiştir ve sabitlenmiştir.

Yapılan denemeler ve hatalar göz önüne alınana belirlenen parametrelerin çalışma aralığı aşağıdaki tablo 3.16.’da yer almaktadır. Bu parametreler, büyük baskı hacmine sahip ekstrüzyon esaslı üç boyutlu yazıcıda eriyik biriktirme yöntemi ve granül

termoplastik malzemeye yönelik en uygun imalat parametrelerinin tespiti için kullanılmıştır.

Tablo 3.16. *L9 ortogonal dizisi için kullanılacak deneysel plan*

Deney Numarası	Parametre ve Seviye		
	Baskı Hızı	Nozul Sıcaklığı	Tabla Sıcaklığı
1	25 mm/s - % 56	310 °C	110 °C
2	35 mm/s - % 88	330 °C	110 °C
3	45 mm/s - % 113	350 °C	110 °C

İlgili kontrol parametrelerinin sayısına ve bunlara karşılık gelen seviyelere bağlı olarak proses optimizasyonu için bir L9 ortogonal dizisi kullanılmıştır. L9 dizisi, Taguchi tarafından geliştirilen dokuz denemeli bir kesirli-faktöriyel deney matrisidir. Bir kesirli-faktöriyel deney matrisi, ana kontrol parametresi etkilerini tahmin etmek için kontrol parametrelerinin olası toplam kombinasyonlarının bir kısmını kullanır. (Ross, 1996)

Minitab 19 programı kullanılarak oluşturulan Tablo 3.16.'de verilen L9 dizisi, gerçekleştirilen deneylerde kullanılan her bir kontrol parametresinin seviyelerini detaylandırmaktadır. Tablo 3.17. 'de verilen deney planına takiben her deney numarası dikkate alınarak 9 adet ASTM D638 Tip-1 çekme testi numunesi daha üretilmiştir.

Tablo 3.17. *L9 ortogonal dizisi*

Deney Numarası	Parametre ve Seviye		
	Baskı Hızı	Nozul Sıcaklığı	Tabla Sıcaklığı
1	25 mm/s	310 °C	110 °C
2	35 mm/s	310 °C	110 °C
3	45 mm/s	310 °C	110 °C
4	25 mm/s	330 °C	110 °C
5	35 mm/s	330 °C	110 °C
6	45 mm/s	330 °C	110 °C
7	25 mm/s	350 °C	110 °C
8	35 mm/s	350 °C	110 °C
9	45 mm/s	350 °C	110 °C



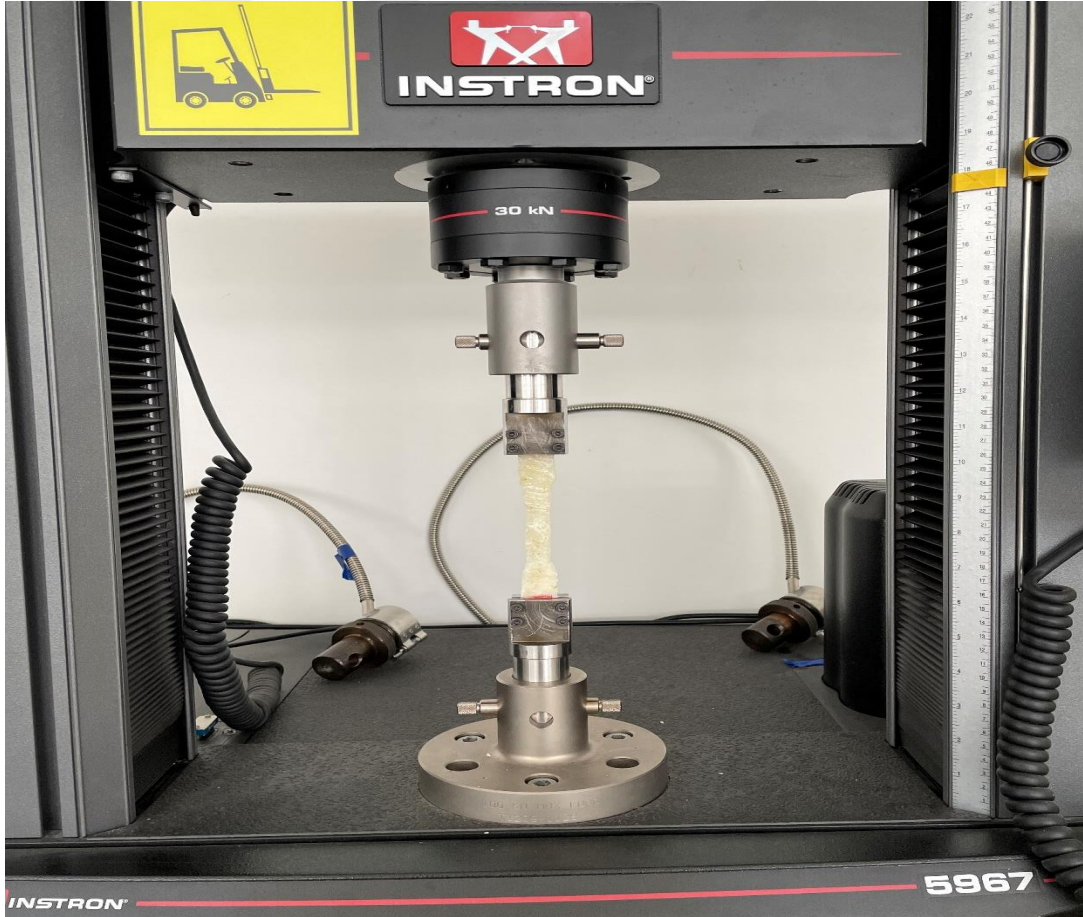
Görsel 3.37. L9 ortogonal dizisi dikkate alınarak imal edilen çekme test numunesi ölçümü

L9 ortogonal dizisi dikkate alınarak ASTM D638 standardı kapsamında mal edilen çekme test numunesi dijital kumpas ile ölçülmüştür. Şekilde 3.1.'de yer alan standart test numunesi tasarımı ile kıyaslandığında görsel 3.37.'de imal edilen çekme test numunesi, çekme çenesinin tutturulacağı (geniş en) 19 mm'dir. Orta kısım (dar en) 13.1 mm olarak ölçülmüştür. Orta kısımda + 0.1 mm farklılık mevcuttur. Çekme test numunesinin kalınlığı ise 3.1 mm olarak ölçülmüştür. Numunenin kalınlığında + 0.1 mm farklılık mevcuttur. 9 adet üretilen çekme test numunesine ait 3 farklı baskı hızı mevcuttur. 25 mm/s - %56 olan baskı hızının çekme test numune imalat süresi 07:08,56 olarak ölçülmüştür. 7 dakika 10 saniye olarak düşünülebilir. 35 mm/s - %88 baskı hızının çekme test numune imalat süresi 06:38,49 olarak ölçülmüştür. 6 dakika 40 saniye olarak düşünülebilir. 45 mm/s - %113 baskı hızının çekme test numune imalat süresi 06:06,87 olarak ölçülmüştür. 6 dakika 10 saniye olarak düşünülebilir.

Standartta istinaden hazırlanan test numuneleri, standartta belirtilen test hızları altında parçada kopma meydana gelene kadar çekme işlemine maruz bırakılmıştır. Mekanik çekme test deneyleri, Eskişehir Teknik Üniversitesinde yer alan Instron marka 30 kN yük kapasitesine sahip çekme test cihazında yapılmıştır. ASTM D638 standardına göre test hızı 5 mm/dk 'ya ayarlanmış ve veriler 0,1 sn aralıklarla kayıt edilmiştir (Lawrence, 2009). Görsel 3.38'de hazırlığı tamamlanmış çekme test numunesi için yapılacak çekme test öncesi Instron marka çekme test cihazı yer almaktadır. Çekme test

numuneleri cihaza bağlanırken önce alt çekme test çenesi (çekme kafası) numuneye bağlanmalı ve sıkılaştırılmalıdır. Ardından cihazdaki yatağına bağlanmalıdır. Üst çene ise alt çene bağlandıktan sonra birbirine hassas şekilde yakınlaştırılarak ASTM D638 çekme test standardı kapsamında alt-üst çene mesafeleri 115 mm olacak şekilde (bağlamadan önce ölçülerek numuneye çizilmelidir) bağlanıp, sabitlenmelidir. 165 mm boya sahip olan test numunesinin kenarlardan çekme çenelerine uzaklıkları alt ve üst için 25 mm ve toplam 50 mm ölçüm boyuna sahiptir.

Çekme test numuneleri, çekme çenelerine ve Instron marka çekme cihazına belirtildiği gibi bağlanmaz ise herhangi bir dikkatsizlikte numune kırılmaktadır. Buda tekrardan parça imalatının yapılması anlamına gelmektedir. Üç boyutlu yazıcıdaki herhangi bir farklılık numunenin özelliklerinde değişiklikler meydana getirebilir.



Görsel 3.38. Instron marka çekme test cihazı

Çekme testi deneylerine başlamadan önce 9 adet numunenin 3 farklı noktadan kalınlık ve genişlik ölçümleri alınmıştır. Alınan ölçümlerin ortalaması her deney numunesi için mukavemet hesabında kullanılacaktır. Deneylerden elde edilecek veriler

Instron çekme test cihazının bağlantılı olduğu bilgisayarda bulunan Bluehill yazılımında kayıt altına alınmaktadır. Analizlere istinaden gerilim - gerinim diyagramları belirlenecektir. Belirlenen parametreler ile çekme kuvveti (MPa), elastisite modülü (GPa) ve şekil değiştirme (mm/mm) gibi mekanik değerlere de ulaşılabacaktır.



Görsel 3.39. Çekme testine maruz kalarak kopmuş numune ve çekme testi aşaması

4. BULGULAR

Bu bölüm, büyük hacimli eklemeli imalatla hassas parçalar imal etme kabiliyetine ulaşan üç boyutlu ekstruder bazlı yazıcı kullanılarak ve ASTM D638 standardı kapsamında termoplastik performans Abs granülü malzemesi ile Taguchi L9 deney standartına istinaden 9 adet üretilen çekme test numunelerinin üretim parametrelerinin mekanik özelliklere etkilerinin incelenmesi, Taguchi deney tasarımı ile çekme test sonuçları dikkate alınarak en uygun üretim parametrelerinin belirlenmesi, Anova analizi ile belirlenen parametreler ile kalibrasyon parçası imalatının yapılmasını kapsamaktadır.

Bulgular ve tartışma, 3 ana başlıktan oluşmaktadır.

4.1. Çekme Test Bulguları

Çekme deneyleri tabloda belirtilen deney sayısına göre değil A-sayı verilerek kodlanmıştır.

Instron marka çekme test cihazı, çekme testlerinin sonucunu “Raw Data” olarak vermektedir. Öncelikle bu verileri Excel uzantılı dosyaya taşınması sağlanmıştır. Veriler, 4 farklı kategoride oluşmaktadır. Bunlar zaman (s), uzama (mm), yük (kgf) ve çekme gerilimi (mm/mm)’dir. Öncelikle yük biriminin N olması gerekmektedir. Bu yüzden (kgf) birimli yükleri 9,81 ile çarparak N birimli yükler elde edilmiştir.

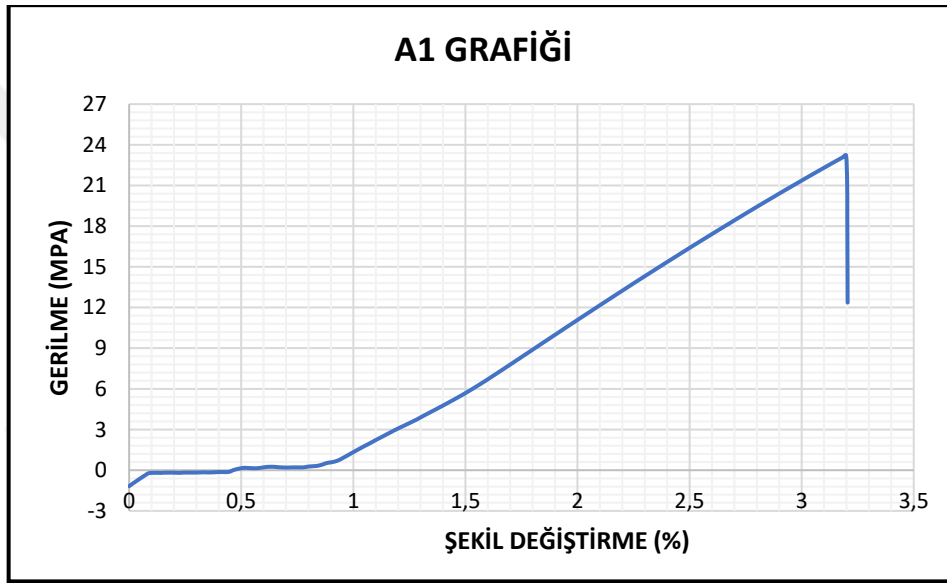
$$kgf \times 9,81 = N \quad (4.1)$$

Gerilme için formül Yük / Kesit Alanı olduğu için N birimli yükler, tasarımda ve imalatla kesit alanında kritik olan yer alınmıştır. Kritik kesit alanı şekil 3.1.’de yer alan ASTM D638 çekme test numunesi için $13 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} = 39 \text{ mm}^2$ ’dir.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.2)$$

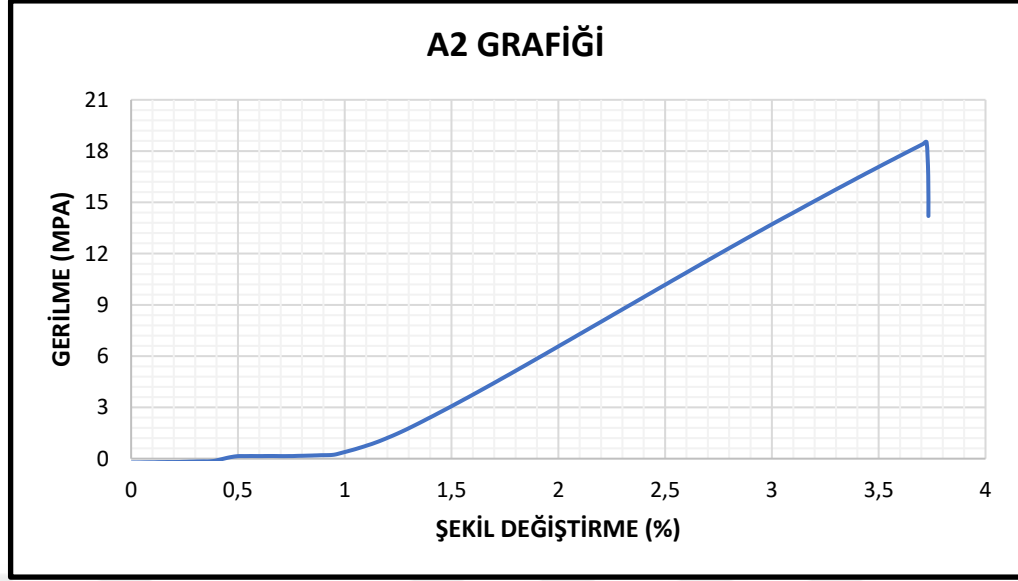
Birim şekil değiştirme için formül Uzama / Ölçüm Boyu olduğu için ölçüm boyu ASTM D638 çekme test standardı kapsamında, çekme testi yapılan ölçüm boyu 50 mm olarak alınmıştır. 9 adet çekme testi sonuçları bu kapsamda düzenlenerek, gerinim – gerilme grafikleri elde edilmiştir. Çekme test numunelerine istinaden grafikler aşağıda yer almaktadır.

A1 çekme test numunesinin gerilme-şekil değiştirme diyagramı şekil 4.1.'de yer almaktadır. A2 olarak adlandırılan test numunesi 310 °C ekstruder sıcaklığı, 25 mm/s baskı ve 110 °C tabla sıcaklığına sahiptir. A1, Tablo 3.17.'de yer alan parametreler dikkate alınarak 1 nolu deney numunesidir. A1 numunesinin şekil 4.1. grafiğinde görüldüğü üzere 1 nolu çekme deneyi numunesi için en yüksek çekme mukavemeti 23,21 MPa'dır. A1 numunesinin şekil 4.1. grafiğinde görüldüğü üzere 1 nolu çekme deneyi numunesi için şekil değiştirme oranı % 3,21 'dir. A1 numunesinin şekil 4.1. grafiğinde görüldüğü üzere 1 nolu çekme deneyi numunesinde net bir akma görülmeden kopma meydana gelmiş ve gevrek davranış gözlemlenmiştir.



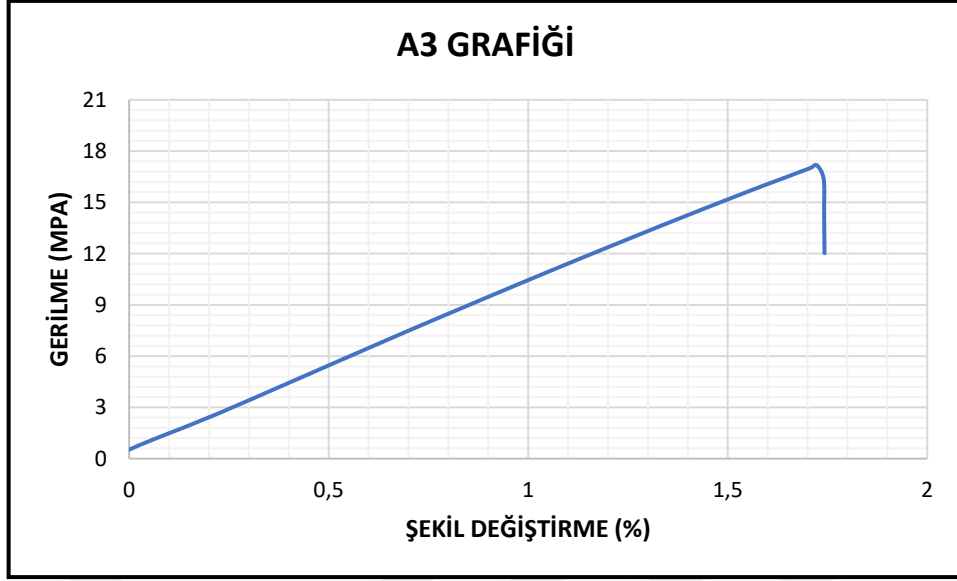
Şekil 4.1. A1 çekme test numunesinin gerilme-gerinim grafiği

A2 çekme test numunesinin gerilme-şekil değiştirme diyagramı şekil 4.2.'de yer almaktadır. A2 olarak adlandırılan test numunesi 310 °C ekstruder sıcaklığı, 45 mm/s baskı ve 110 °C tabla sıcaklığına sahiptir. A2, Tablo 3.17.'de yer alan parametreler dikkate alınarak 3 nolu deney numunesidir. A2 numunesinin şekil 4.2. grafiğinde görüldüğü üzere 3 nolu çekme deneyi numunesi için en yüksek çekme mukavemeti 18,51 MPa'dır. A2 numunesinin şekil 4.2. grafiğinde görüldüğü üzere 3 nolu çekme deneyi numunesi için şekil değiştirme oranı % 3,74 'tür. A2 numunesinin şekil 4.2. grafiğinde görüldüğü üzere 3 nolu çekme deneyi numunesinde net bir akma görülmeden kopma meydana gelmiş ve gevrek davranış gözlemlenmiştir.



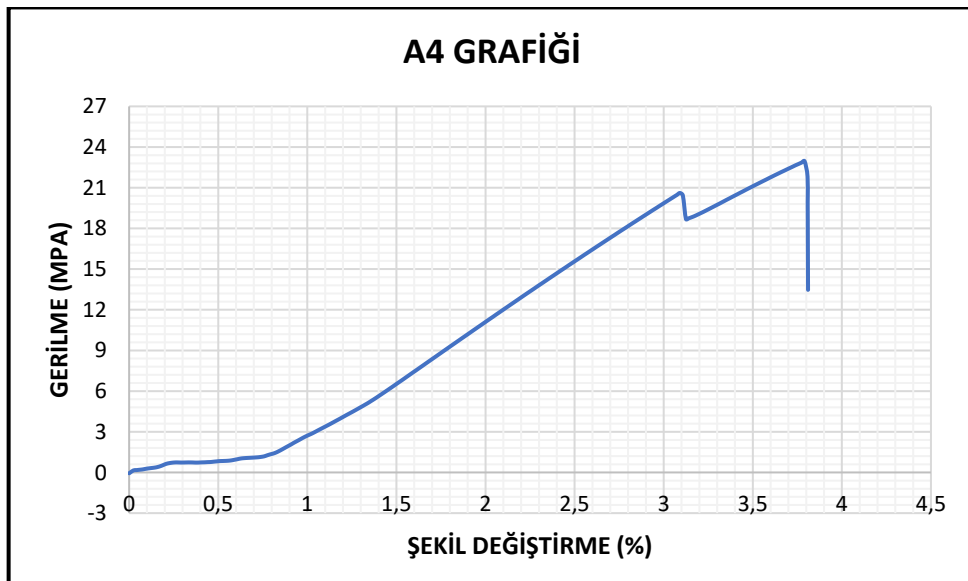
Şekil 4.2. A2 çekme test numunesinin gerilme-gerinim grafiği

A3 çekme test numunesinin gerilme-şekil değiştirme diyagramı şekil 4.3.'de yer almaktadır. A3 olarak adlandırılan test numunesi 330 °C ekstruder sıcaklığı, 35 mm/s baskı ve 110 °C tabla sıcaklığına sahiptir. A3, Tablo 3.17.'de yer alan parametreler dikkate alınarak 5 nolu deney numunesidir. A3 numunesinin şekil 4.3. grafiğinde görüldüğü üzere 5 nolu çekme deneyi numunesi için en yüksek çekme mukavemeti 17,15 MPa'dır A3 numunesinin şekil 4.3. grafiğinde görüldüğü üzere 5 nolu çekme deneyi numunesi için şekil değiştirme oranı % 1,75'tir. A3 numunesinin şekil 4.3. grafiğinde görüldüğü üzere 5 nolu çekme deneyi numunesinde net bir akma görülmeden kopma meydana gelmiş ve gevrek davranış gözlemlenmiştir.



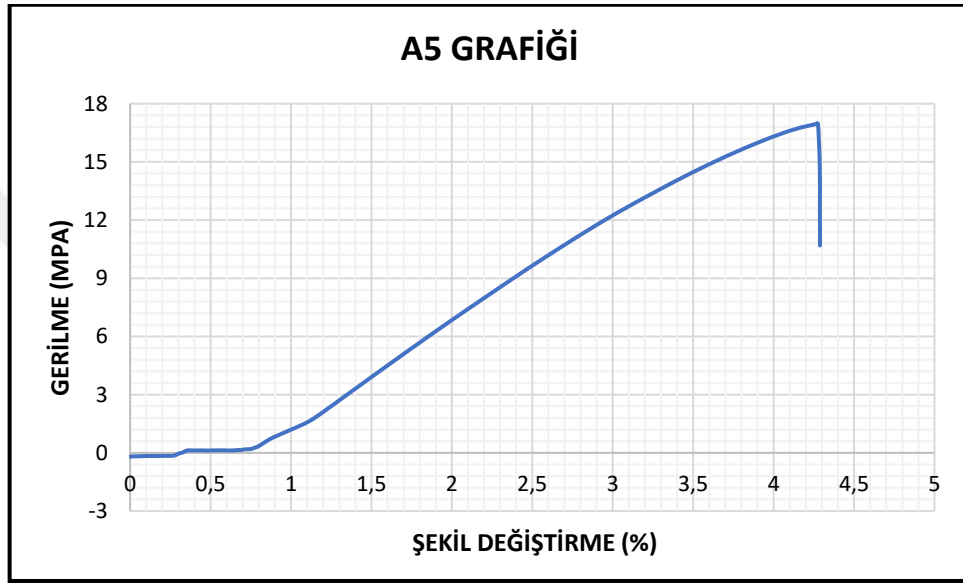
Şekil 4.3. A3 çekme test numunesinin gerilme-gerinim grafiği

A4 çekme test numunesinin gerilme-şekil değiştirme diyagramı şekil 4.4.'de yer almaktadır. A4 olarak adlandırılan test numunesi 310 °C ekstruder sıcaklığı, 45 mm/s baskı ve 110 °C tabla sıcaklığına sahiptir. A4, Tablo 3.17.'de yer alan parametreler dikkate alınarak 7 nolu deney numunesidir. A4 numunesinin şekil 4.4. grafiğinde görüldüğü üzere 7 nolu çekme deneyi numunesi için en yüksek çekme mukavemeti 22,95 MPa'dır. A4 numunesinin şekil 4.4. grafiğinde görüldüğü üzere 7 nolu çekme deneyi numunesi için şekil değiştirme oranı % 3,81'dir.



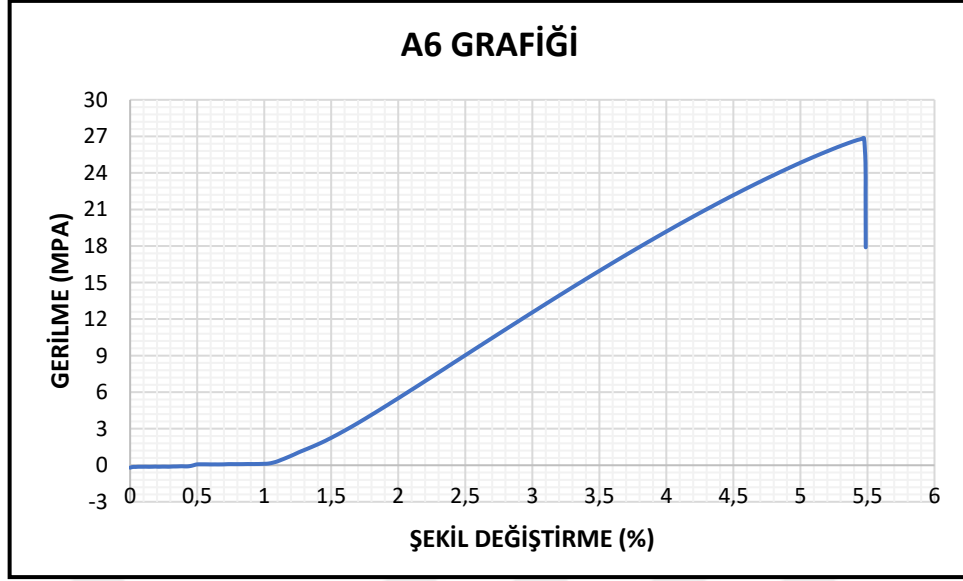
Şekil 4.4. A4 çekme test numunesinin gerilme-gerinim grafiği

A5 çekme test numunesinin gerilme-şekil değiştirme diyagramı şekil 4.5.'de yer almaktadır. A5 olarak adlandırılan test numunesi 330 °C ekstruder sıcaklığı, 25 mm/s baskı ve 110 °C tabla sıcaklığına sahiptir. A5, Tablo 3.17.'de yer alan parametreler dikkate alınarak 4 nolu deney numunesidir. A5 numunesinin şekil 4.5. grafiğinde görüldüğü üzere 4 nolu çekme deneyi numunesi için en yüksek çekme mukavemeti 16,96 MPa'dır. A5 numunesinin şekil 4.5. grafiğinde görüldüğü üzere 4 nolu çekme deneyi numunesi için şekil değiştirme oranı % 4,30'dur.



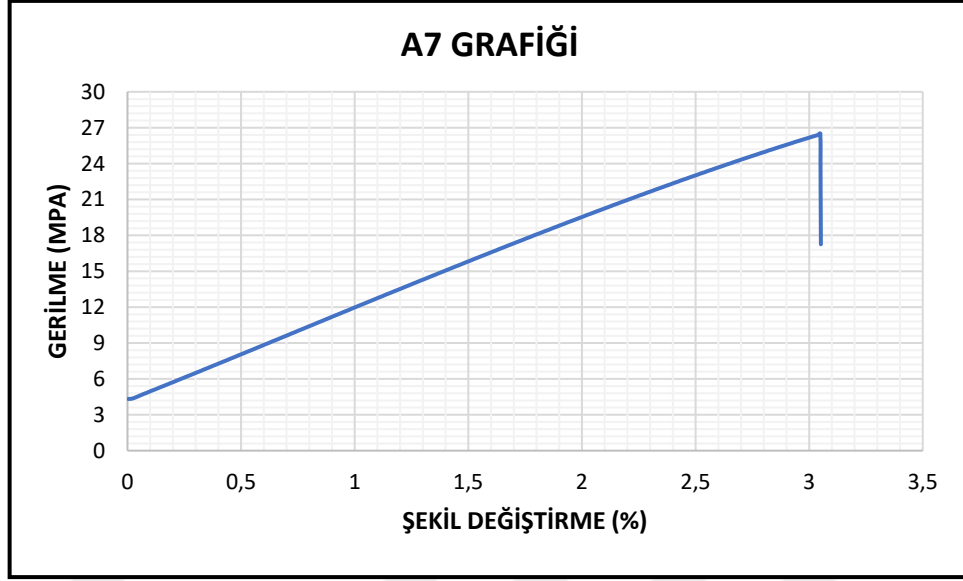
Şekil 4.5. A5 çekme test numunesinin gerilme-gerinim grafiği

A6 çekme test numunesinin gerilme-şekil değiştirme diyagramı şekil 4.6.'da yer almaktadır. A6 olarak adlandırılan test numunesi 350 °C ekstruder sıcaklığı, 45 mm/s baskı ve 110 °C tabla sıcaklığına sahiptir. A6, Tablo 3.17.'de yer alan parametreler dikkate alınarak 9 nolu deney numunesidir. A6 numunesinin şekil 4.6. grafiğinde görüldüğü üzere 9 nolu çekme deneyi numunesi için en yüksek çekme mukavemeti 26,84 MPa'dır. A6 numunesinin şekil 4.6. grafiğinde görüldüğü üzere 9 nolu çekme deneyi numunesi için şekil değiştirme oranı % 5,50'dir.



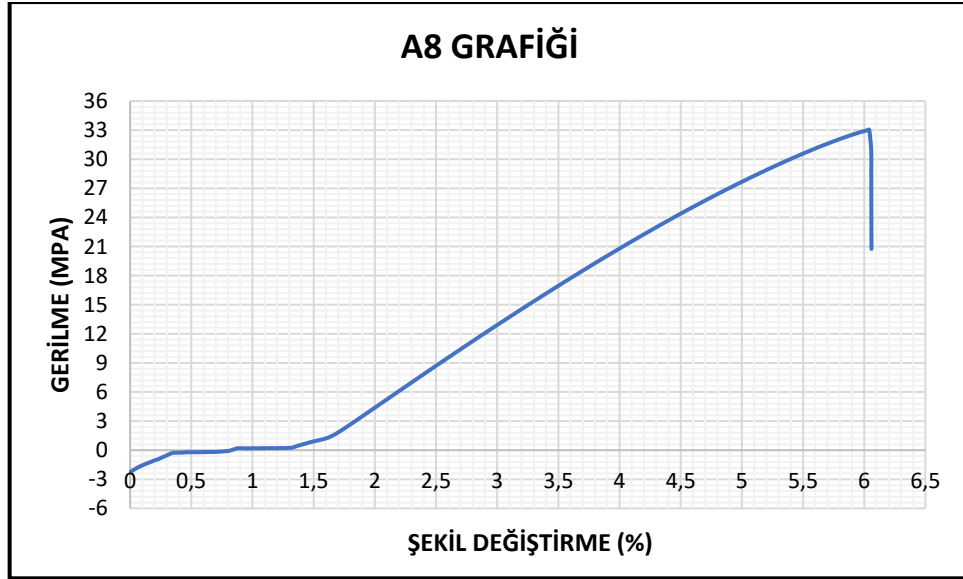
Şekil 4.6. A6 çekme test numunesinin gerilme-gerinim grafiği

A7 çekme test numunesinin gerilme-şekil değiştirme diyagramı şekil 4.7.'de yer almaktadır. A7 olarak adlandırılan test numunesi 330 °C ekstruder sıcaklığı, 45 mm/s baskı ve 110 °C tabla sıcaklığına sahiptir. A7, Tablo 3.17.'de yer alan parametreler dikkate alınarak 6 nolu deney numunesidir. A7 numunesinin şekil 4.7. grafiğinde görüldüğü üzere 6 nolu çekme deneyi numunesi için en yüksek çekme mukavemeti 26,50 MPa'dır. A7 numunesinin şekil 4.7. grafiğinde görüldüğü üzere 6 nolu çekme deneyi numunesi için şekil değiştirme oranı % 3,05 'dir. A7 numunesinin şekil 4.5. grafiğinde görüldüğü üzere 6 nolu çekme deneyi numunesinde net bir akma görülmeden kopma meydana gelmiş ve gevrek davranış gözlemlenmiştir.



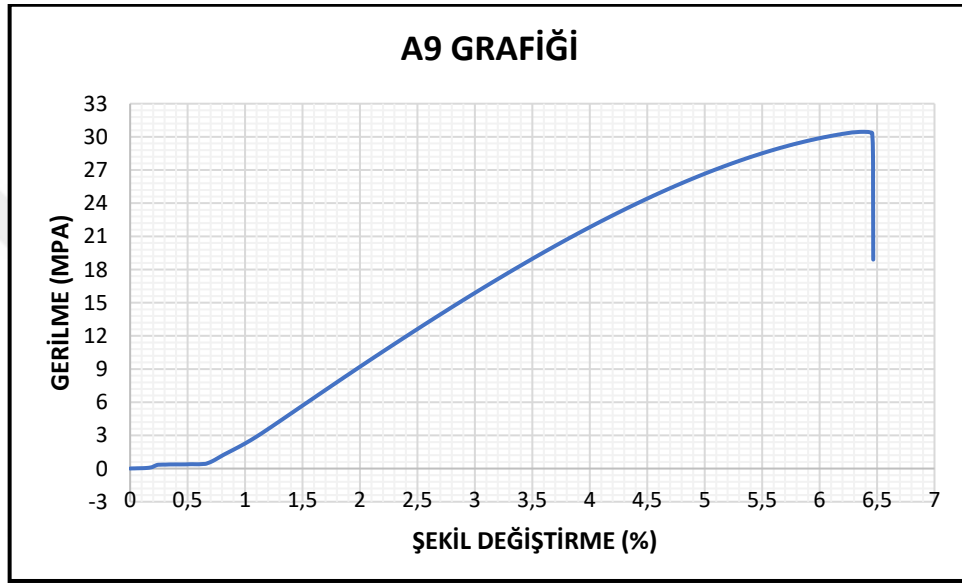
Şekil 4.7. A7 çekme test numunesinin gerilme-gerinim grafiği

A8 çekme test numunesinin gerilme-şekil değiştirme diyagramı şekil 4.8.'de yer almaktadır. A8 olarak adlandırılan test numunesi 310 °C ekstruder sıcaklığı, 35 mm/s baskı ve 110 °C tabla sıcaklığına sahiptir. A8, Tablo 3.17.'de yer alan parametreler dikkate alınarak 2 nolu deney numunesidir. A8 numunesinin şekil 4.8. grafiğinde görüldüğü üzere 2 nolu çekme deneyi numunesi için en yüksek çekme mukavemeti 33,01 MPa'dır. A8 numunesinin şekil 4.8. grafiğinde görüldüğü üzere 2 nolu çekme deneyi numunesi için şekil değiştirme oranı % 6,06'dır.



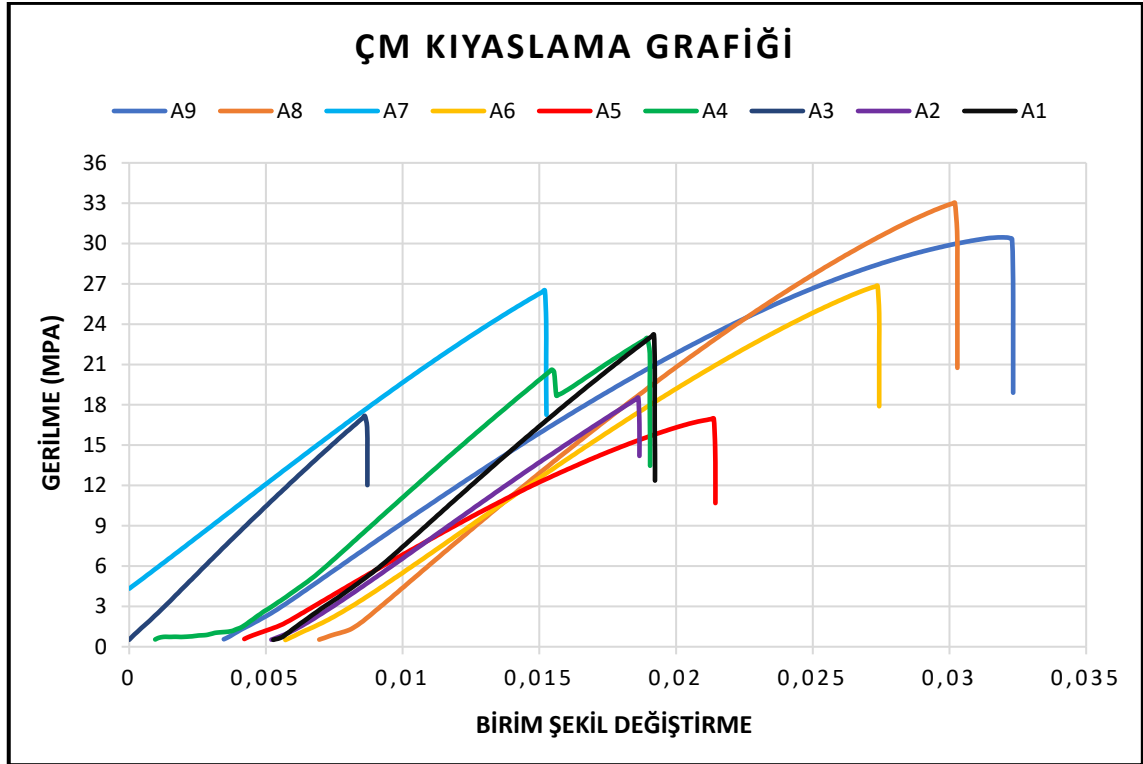
Şekil 4.8. A8 çekme test numunesinin gerilme-gerinim grafiği

A9 çekme test numunesinin gerilme-şekil değiştirme diyagramı şekil 4.9.'da yer almaktadır. A9 olarak adlandırılan test numunesi 350 °C ekstruder sıcaklığı, 35 mm/s baskı ve 110 °C tabla sıcaklığına sahiptir. A9, Tablo 3.17.'de yer alan parametreler dikkate alınarak 8 nolu deney numunesidir. A9 numunesinin şekil 4.9. grafiğinde görüldüğü üzere 8 nolu çekme deneyi numunesi için en yüksek çekme mukavemeti 30,45 MPa'dır. A9 numunesinin şekil 4.9. grafiğinde görüldüğü üzere 8 nolu çekme deneyi numunesi için şekil değiştirme oranı % 6,47'dir.



Şekil 4.9. A9 çekme test numunesinin gerilme-gerinim grafiği

9 adet çekme test grafiğini daha iyi karşılaştırmak için tek bir grafikte toplanmıştır. Burada ise gerilme ve birim şekil değiştirme baz alınmıştır. Aşağıdaki gibi şekil 4.10.'da yer alan karşılaştırmalı grafik elde edilmiştir.



Şekil 4.10. Gerilme - birim şekil değiştirme karşılaştırma grafiği

4.2. Taguchi L9 Tasarım Bulguları

Yapılan çekme testlerinin grafikte belirlenen mekanik değerlerini daha iyi analiz etmek için tablo 4.1.'de toplanmıştır. Bu tabloda çekme mukavemeti, şekil değiştirme ve ilaveten elastisite modülü verileri yer almaktadır. Tablo 4.1.'de Taguchi deney tasarımının çekme testi yapılan ASTM D638 standartı dikkate alınarak imal edilmiş çekme test numunelerinin sonuçları verilmektedir. Elastisite modülü ise MPa birimli çekme gerilmesi ve birimi olmayan birim şekil değiştirme verilerinin dikkate alınarak grafik çizilerek ve grafiğin eğimi alınarak hesaplanmıştır. Birim şekil değiştirmeyi, çekme testi yapılan Instron marka çekme test cihazı yapılan işlem sırasında verileri otomatik olarak vermektedir.

Tablo 4.1. Gerilme-gerinim grafiğindeki mekanik değerler

Deney Numarası	Mekanik Değerler					
	Baskı Hızı (mm/s)	Nozul Sıcaklığı (°C)	Tabla Sıcaklığı (°C)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Şekil Değiştirme (mm/mm)	Elastisite Modülü (GPa)
1	25	310	110	23,21	0,0321	1,149
2	35	310	110	33,01	0,0606	1,486
3	45	310	110	18,51	0,0374	1,391

4	25	330	110	16,96	0,0430	1,016
5	35	330	110	17,15	0,0175	1,953
6	45	330	110	26,50	0,0305	1,478
7	25	350	110	22,95	0,0381	1,440
8	35	350	110	30,45	0,0647	1,114
9	45	350	110	26,84	0,0550	1,286

Granül termoplastik performans Abs malzemesi için yapılan deneyler sonucunda hesaplanan elastisite modülleri tablo 4.1.'deki veriler dikkate alınarak yapılan literatür kıyaslamasında değerlerin yakın olduğu anlaşılmıştır. (Sezer, Eren, & Börüklü, 2017), 6 mm uzunluğunda karbon elyaf takviyeli ABS kompozit filamentlerin üretimi üzerinde fizibilite çalışması yapmışlardır. Karbon elyaf takviyesi ile parça mukavemetinin önemli ölçüde iyileştirdiğine lakin esneklik ve işlenebilirliğin artan içeriği ile azaldığı sonucuna varmışlardır. Burada ise Abs filamenti için elastisite modülünü 1,161 GPa ve 1,183 GPa olduğunu belirtmişlerdir. (MatWeb, 2021), sitesi Abs malzemeler için fiziksel, mekanik, elektriksel, termal, optik, proses özellikleri incelendiğinde baz alınan 65 çalışmayı genelleterek 1,00 GPa ile 2,650 GPa arasında elastisite modülüne sahip olduklarını raporlamışlardır. (Li, ve diğerleri, 2020), Abs malzemesinin enjeksiyon makinesinde farklı sıcaklıklarda davranışlarını incelemişlerdir. Bu çalışmada 40 °C ile 90 °C arasında çalışılmış ve elastisite modülleri 0,761 GPa ile 2,499 GPa arasında tespit edilmiştir.

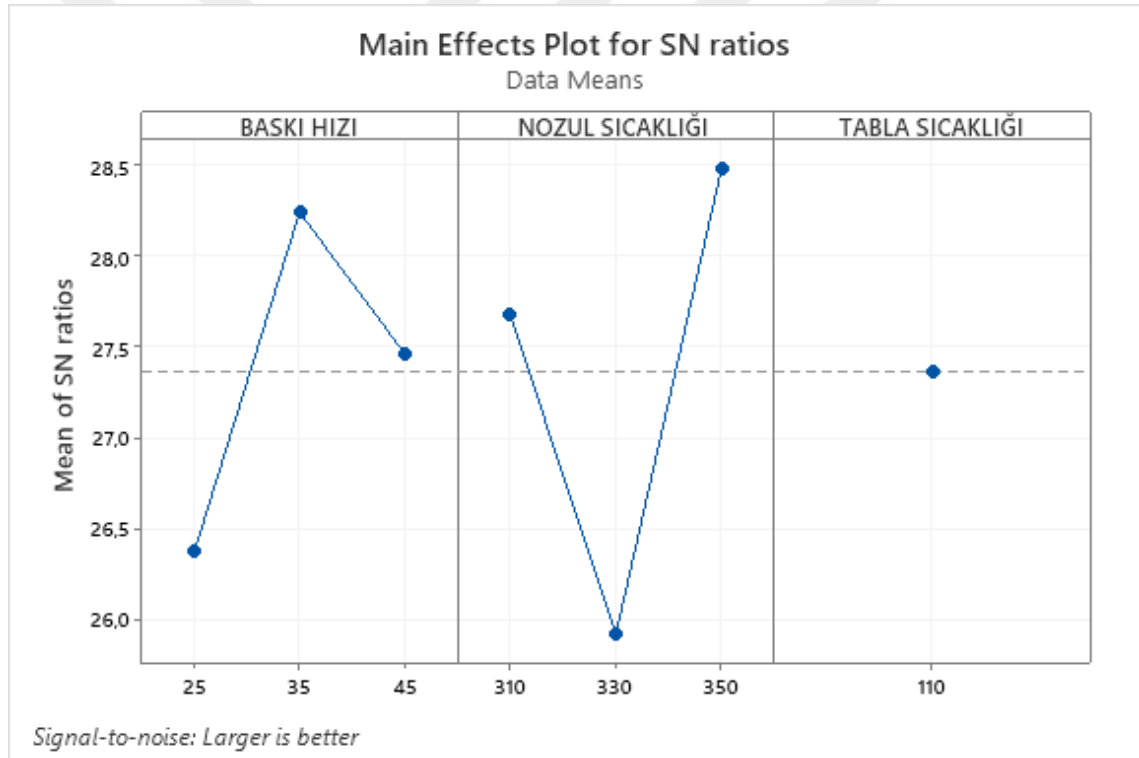
Performans termoplastik granül Abs malzemesi kullanılarak ASTM D638 standartları kapsamında imal edilmiş ve çekme testleri yapılmıştır. Tablo 4.1.'de yapılan deneyler için sonuçlar yer almaktadır. Deney sonuçlarının her parametre için (baskı hızı, nozul sıcaklığı, sabit alınsada tabla sıcaklığı) çekme mukavemetini etkileyen etkisinin Anova testi ya da diğer adıyla Varyans analizi kullanılarak bir Sinyal/Gürültü (S/G) yanıt tablosuna dönüştürülmüştür. S/G yanıt tablosu çekme mukavemeti için tablo 4.2.'de yer almaktadır. Minitab programı ile Taguchi metodu baz alınarak oluşturulan bu tablo en yüksek çekme mukavemetini elde etmek için en uygun ve kullanılması gereken kontrol parametreleri hakkında bilgi vermektedir.

Tablo 4.2. Sinyal/Gürültü yanıt tablosu

Seviye	Baskı Hızı	Nozul Sıcaklığı	Tabla Sıcaklığı
1	26,37	27,68	27,36
2	28,24 – (35mm/s)	25,91	

3	27,46	28,49 – (350 °C)	
Delta	1,87	2,57	*
Sonuç	3	2	1

S/G oranı bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki ortalama etkilerini sinyal gürültü oranlarına göre çizer. Anova analizi ise, S/G oranı dikkate alınarak yapılır. Çekme test numunelerinde, yüksek çekme mukavemetinin tespiti için S/G analizinde en büyük yani en yüksek en iyi kısım ayarlaması Minitab 19 programı üzerinden yapılmıştır. Programa girilen en yüksek en iyi yaklaşımının sonucuna istinaden alınacak tablo 4.2.'deki her parametre için en yüksek değer, teorik açıdan deney sonucunun en iyi olanını belirlemektedir.



Şekil 4.11. Sinyal/Gürültü oranları

Şekil 4.10'da yer alan sinyal gürültü oranlarına ait olay örgüsünde baskı hızı ikinci seviye olan 35 mm/s, nozul sıcaklığı için seviye olan 350 °C ve tabla sıcaklığı 110 derece °C için kullanılacak bu parametreler yapılan deneylerde çekme mukavemeti için en yüksek değeri vermesi beklenmektedir.

4.3. Anova Analizi

Varyans analizi (Anova), bir veri setinde bulunan ve gözlemlenen değişkenliği iki bölüme ayıran ve istatistikte kullanılan bir analiz aracı ve türüdür. Bu iki bölüm; sistematik faktörler ve rastgele faktörler şeklindedir. Sistematik faktörler, veri seti üzerinde istatistiksel bir etki yaratırken, rastgele faktörlerde böyle bir durum yoktur. Regresyon çalışmasında, bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini belirlemek için Anova analizi kullanılmaktadır (Kenton, 2021). ASTM D638 standardı dikkate alınarak imal edilen ve çekme testine maruz bırakılan numunelerin en yüksek gerilme veya çekme mukavemetini elde etmek için belirlenen parametrelerden hangisinin en etkili olduğunu bulmak için Anova analizi yapılmıştır.

Tablo 4.3. Anova analizi

Düzye	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Ortalama Kareler Toplamı	F Değeri	P Değeri
Baskı Hızı	2	50,98	25,49	0,70	0,555
Nozul Sıcaklığı	2	68,34	34,17	0,94	0,464
Hata	4	146,10	36,53		
Toplam	8	265,43			

Tablo 4.3.'de yer alan Anova analizi sonucu çekme mukavemetinde en etkili faktörün nozul sıcaklığı olduğu görülmüştür.

Nozul sıcaklığının, çekme mukavemeti üzerindeki etkisini belirlemek için korelasyon analizi Minitab programı ile gerçekleştirilmiştir. Korelasyon analizi ise var olan değişkenlerin arasındaki ilişki bağı ve pozitif veya negatif yönde ne şiddetle etkilediği sonucuna vardığımız bir analizdir. Korelasyon analizi sonucu korelasyon katsayısı 0,105 olarak bulunmuştur. Bu sonuç bize nozul sıcaklığı ile çekme mukavemeti arasında aynı yönlü fakın zayıf bir ilişki olduğunu göstermektedir.

Çekme mukavemeti için imalat parametrelerine ilişkin belirlenen regresyon denklemi aşağıda denklem 4.1.'de yer almaktadır.

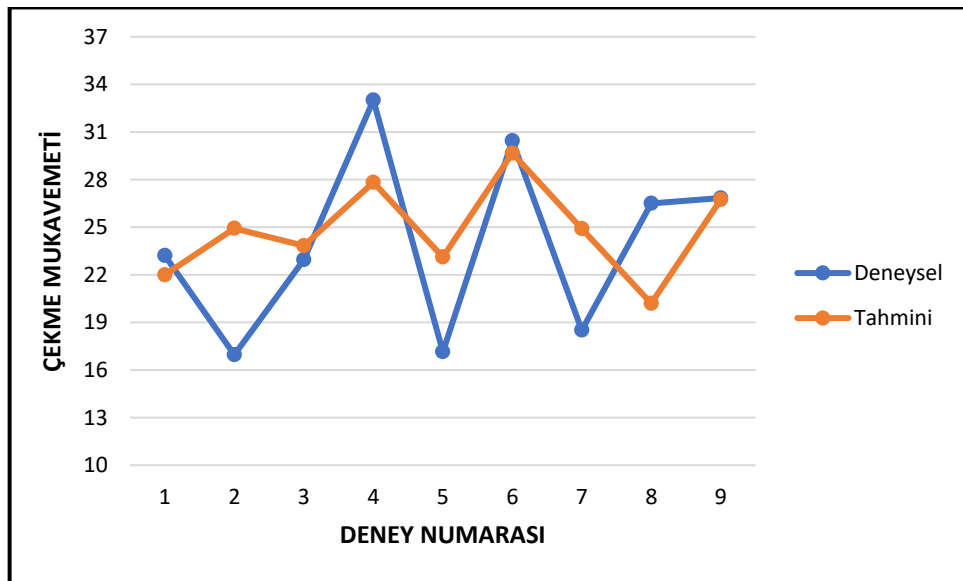
Tablo 4.4. Regresyon denklemi

$$\text{Çekme Mukavemeti} = 3,7 + 0,145 \text{ Baskı Hızı} + 0,046 \text{ Nozul Sıcaklığı} \quad (4.1)$$

Regresyon denklemi ve modeli dikkate alınarak deneylerde bulunan çekme mukavemeti değerleri ile karşılaştırmak üzere tahmin edilen çekme mukavemeti değerlerini karşılaştırılacaktır.

Tablo 4.5. Regresyon ile tahmini çekme mukavemeti değerleri

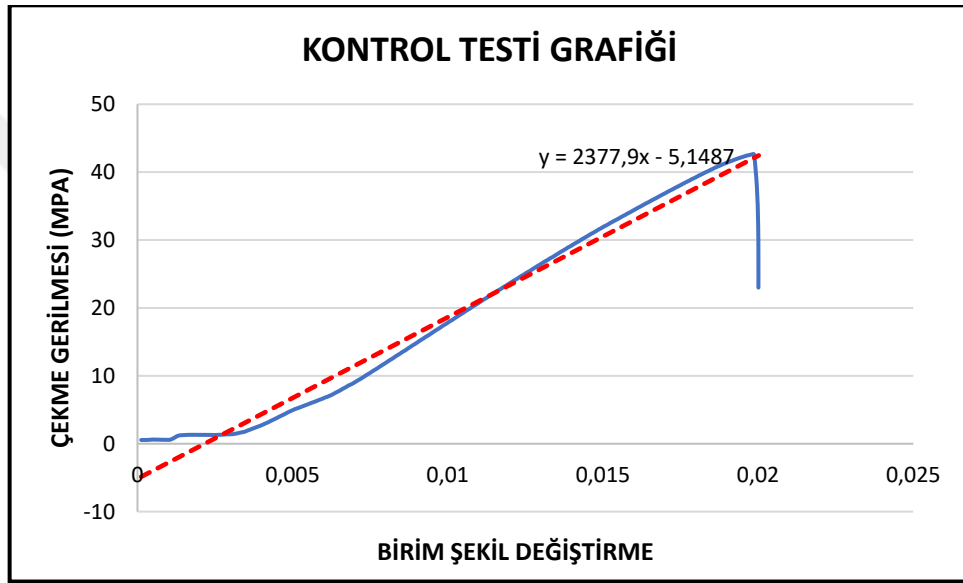
Deney Numarası	Tahmini Çekme Mukavemet Değerleri				
	Baskı Hızı (mm/s)	Nozul Sıcaklığı (°C)	Tabla Sıcaklığı (°C)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Tahmini Çekme Mukavemeti (MPa)
1	25	310	110	23,21	21,99
2	35	310	110	33,01	24,92
3	45	310	110	18,51	23,83
4	25	330	110	16,96	27,82
5	35	330	110	17,15	23,12
6	45	330	110	26,50	29,66
7	25	350	110	22,95	24,90
8	35	350	110	30,45	20,20
9	45	350	110	26,84	26,74



Şekil 4.12. Gerçek ve tahmin çekme mukavemeti kıyaslaması

Regresyon modeli ile tahmin edilen çekme mukavemetleri arasındaki korelasyon 0,787 olarak hesaplanmıştır.

Teorik olarak bulunan uygun imalat parametrelerini doğrulamak için 1 adet ASTM D638 standartı kapsamında çekme test numunesi imal edilmiştir. Doğrulama test numunesinde ise elde edilen çekme testi mukavemeti 42,59 MPa, elastisite modülü ise 2,37 GPa ve kopma uzaması 0,019 mm olarak bulunmuştur. Belirlenen en uygun parametreler kullanılarak çekme test mukavemetinde ve elastisite modülündeki istenilen belirgin artış gözlemlenmiştir. Doğrulama testine ait grafik şekil 4.13.'de yer almaktadır.

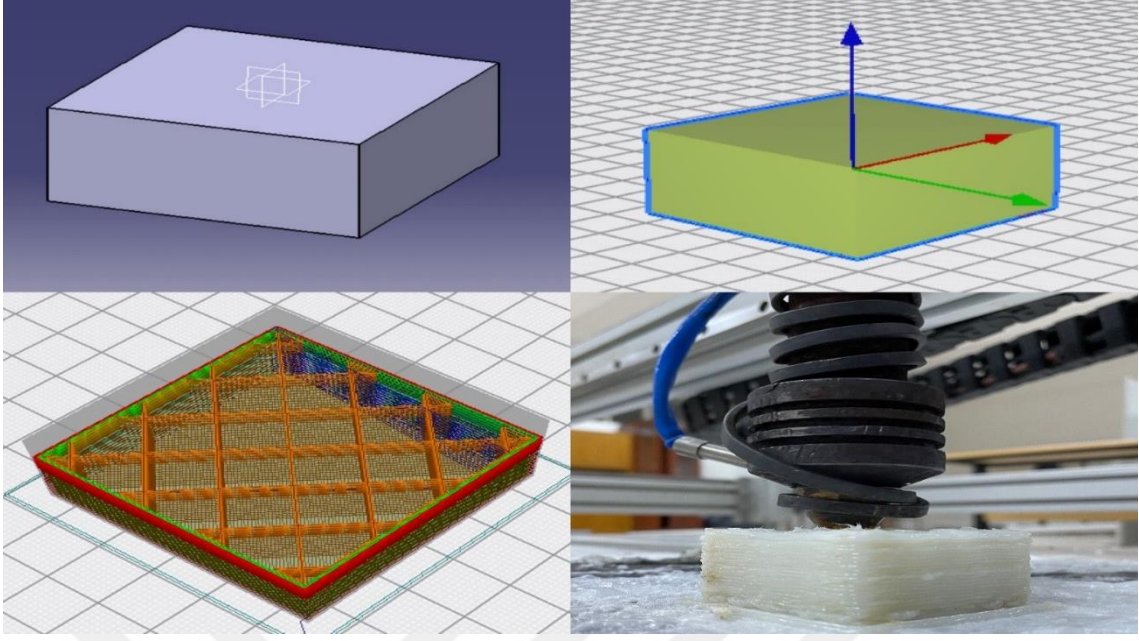


Şekil 4.13. Doğrulama test numunesinin gerilme-birim şekil değiştirme grafiği

4.4. Boyutsal Doğrulama Testleri

Yapılan çalışmalar kapsamında belirlenen parametreler olan baskı hızı 35 mm/s, ekstruder sıcaklığı 350 °C ve tabla sıcaklığı 110 °C kullanılarak 50 mm x 50 mm x 25 mm boyutlarında kalibrasyon parçası imal edilmiştir.

Kalibrasyon parçasının baskı aşamaları aşağıdaki görsel 4.1.'de yer almaktadır. Bu aşamalar cad tasarımı, .stl formatı, dilimlenmiş g-code ve imal edilmiş 3D baskılı ürün şeklindedir.



Görsel 4.1. Kalibrasyon parçası imalat aşamaları

Tek vidalı ekstrudera sahip büyük hacimli eklemeli imalat yazıcılarında kalibrasyon parça imalatında malzeme akışının stabil olması önem arz etmektedir. Eğer parça imalatı öncesi başka malzeme gibi kullanımlar olursa ekstruderin içi temizlenmelidir. Nozul çapı 1 mm ve granül Abs malzeme beslemesi mevcut yazıcı için manuel olduğundan dolayı dikkat edilmeli farklı malzemelerin karışması engellenmelidir. Görsel 4.2.'de görüldüğü üzere 2 farklı boyutlardaki kalibrasyon parçasının imalatında, nozulda tıkanıklık meydana geldiği için imalat yarıda kesilmiştir ve istenilen numune imalatı gerçekleştirilememiştir.



Görsel 4.2. Kalibrasyon parçası imalat hataları

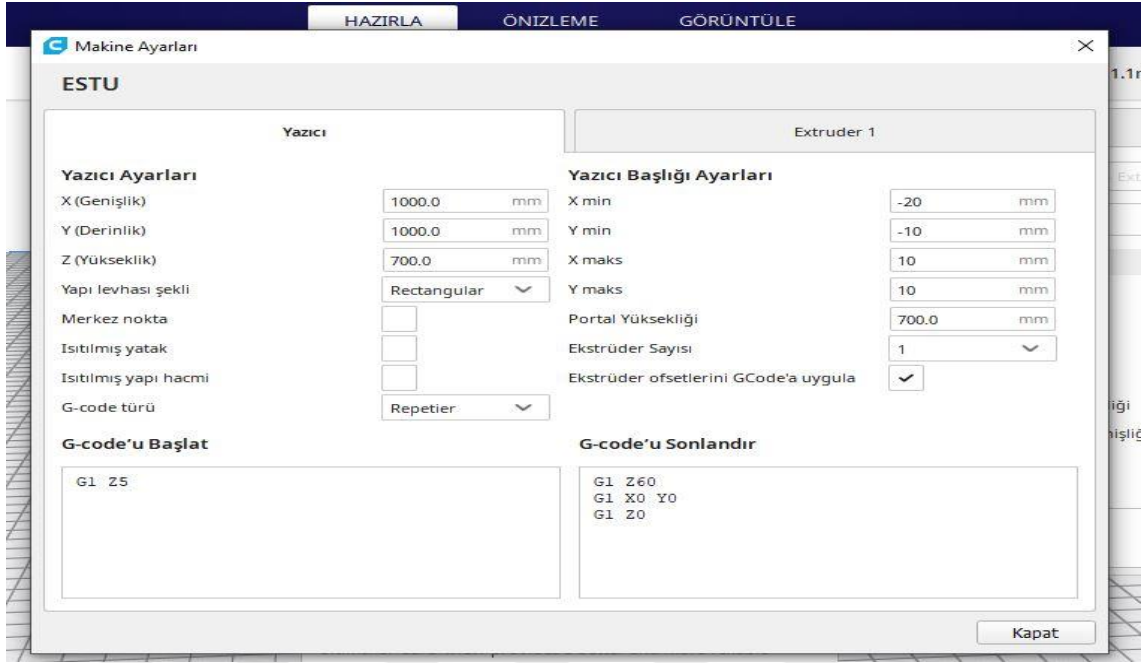
Hatalar dikkate alınarak imal edilen 50 mm x 50 mm x 25 mm boyutlarında öncelikle 3 adet kalibrasyon parçası belirlenen parametreler dikkate alınarak %20 doluluk oranı ile imal edilmiştir. Bu imalat sırasında ise 2 farklı hata ile karşılaşmıştır. İlk hata

imal edilen kalibrasyon parçalarının son katmanı tamamlandıktan sonra ekstruderin yukarı kalkıp home'a gitmesi gerekirken Z ekseninde aşağıya doğru dalma yaparak, parçayı bozmasıdır. Ekstruderin Z ekseninde dalış yaparak bozduğu ve imal edilmiş kalibrasyon parçaları görsel 4.3.'de yer almaktadır.



Görsel 4.3. Z ekseninde ekstruderin dalış yaparak bozduğu kalibrasyon parçaları

Buradaki hatanın g-code'un bitiş yüksekliğinin ayarlanması ile giderilmesi ön görülmüştür. Ultimaker Cura programı üzerinden aşağıdaki görsel 4.4.'de yer alan yazıcı ayarlarından "G-code'u Sonlandır" kısmında yer alan kodlardan ilk satıra "G1 Z60" kodu eklenmiştir. Bu g-kod, imal edilen parçanın Z0 noktasından Z60'a yani 60 mm yüksekliğe çıktıktan sonra ekstruder'in home'a gitmesi şeklinde açıklanabilir. Parçamızın yüksekliği 25 mm olduğu için kalibrasyon parçası imalatında bu yükseklik yeterlidir. Lakin imal edilecek parça yüksekliği 60 mm yukarısı olanlar için aynı hatanın yaşanmaması adına sonlanacak g-code'un yükseklik için tekrardan değişmesi ve ayarlanması gerekmektedir.



Görsel 4.4. Ultimaker Cura 3D yazıcı ayarlar ekranı

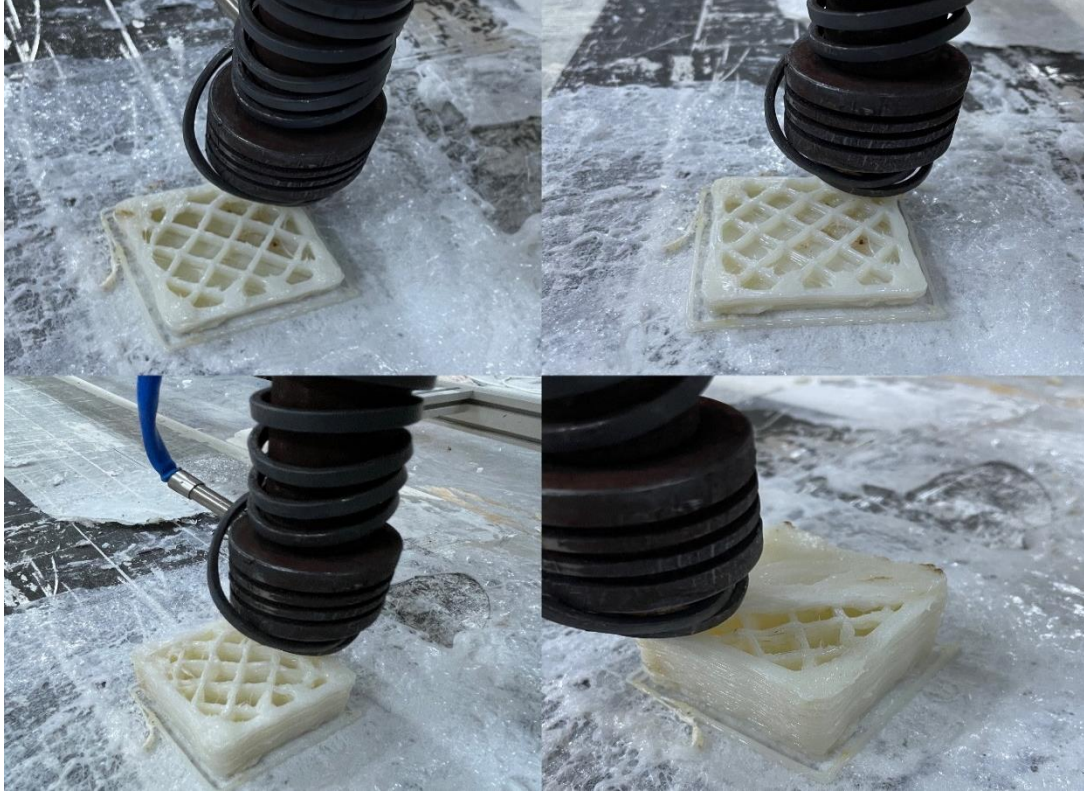
İkinci hata ise imal edilen kalibrasyon parçasının baskı ölçüleri ile ilgilidir. Tablo 4.6.'da 2 adet dalma yapan kalibrasyon parçası (1-2 nolu numune) ve 1 adet normal kalibrasyon parçasının (3 nolu numune) ölçümleri yer almaktadır. Tablo 4.6.'da görüleceği üzere kalibrasyon parçasının yüksekliğinde yani Z ekseninde ortalama 5 mm'e yakın fazlalık tespit edilmiştir. Z eksen motorlarında adım işleme oranında düzenleme yapılması gerekmektedir. Öncelikle çözümün doğru olması için Z eksenini yani yüksekliği 20 mm olan kalibrasyon parçası imal edilmiştir. İmalat sonrası yapılan ölçümde yükseklik 25.2 mm olarak belirlenmiştir.

Ön görülen kalibrasyon ayarı sonrası Repetier Host programı üzerinden "EEPROM" ayarları penceresi açılarak "Z-axis steps per mm" oranı değiştirilecektir. Değişim öncesi değer 666.66 olarak ayarlı iken yükseklik 25 mm için 30 mm ölçüyorsa, 25 mm ölçmemiz için oran orantı sonucu bu değer 555.55 olarak program üzerinden değiştirilmiştir.

Tablo 4.6. Kalibrasyon parçası imal ölçüleri

Numune	Model ölçüleri (mm)	İmal edilen parça ölçüsü (mm)	Tolerans ölçüsü (mm)
1	50 x 50 x 25	50.5 x 50.9 x 29.4	0.5 x 0.9 x 4.4
2	50 x 50 x 25	50.1 x 50.2 x 29.9	0.1 x 0.2 x 4.9
3	50 x 50 x 25	50.7 x 50.6 x 30.7	0.7 x 0.6 x 5.7

Giderilen hatalar ve yapılan kalibrasyon iyileştirmeleri sonucunda, 50 mm x 50 mm x 25 mm boyutlarında 2 adet kalibrasyon parçası belirlenen parametreler dikkate alınarak %20 doluluk oranı ile imal edilmiştir. 35 mm/s - %88 baskı hızının kalibrasyon test numunesinin imalat süresi 27:33,17 olarak ölçülmüştür. 27 dakika 35 saniye olarak düşünülebilir. Kalibrasyon parçası imalat prosesinden kesitler görsel 4.5.'de yer almaktadır.



Görsel 4.5. %20 doluluk oranlı kalibrasyon parçası imalat prosesi

İmal edilen kalibrasyon parçalarının dijital kumpas ile ölçümleri tablo 4.7.'de yer almaktadır. X-y-z formatında ölçümler yapılmıştır.

Tablo 4.7. Kalibre edilen kalibrasyon parçası imal ölçüleri

Numune	Model ölçüleri (mm)	İmal edilen parça ölçüsü (mm)	Tolerans ölçüsü (mm)
1	50 x 50 x 25	50.0 x 50.7 x 25.0	0.0 x 0.7 x 0.0
2	50 x 50 x 25	50.2 x 50.8 x 25.1	0.2 x 0.8 x 0.1

Kalibre edilen üç boyutlu büyük hacimli yazıcı ile imal edilen kalibrasyon testinin 1 numaralı numunesi görsel 4.6.'da yer almaktadır.



Görsel 4.6. Kalibre edilen 1 numaralı kalibrasyon parçası

Kalibre edilen üç boyutlu büyük hacimli yazıcı ile imal edilen kalibrasyon testinin 2 numaralı numune görsel 4.7.'de yer almaktadır.



Görsel 4.7. Kalibre edilen 2 numaralı kalibrasyon parçası

Büyük hacimli üç boyutlu yazıcının kalibrasyon parçasının imalatı için karşılaşılan sorunlar çözüldükten sonra nihai kalibrasyon numuneleri imal edilmiştir. Tablo 4.7.'de yer alan ölçümler kapsamında kalibrasyon parçalarında x eksenini için ortalama ± 0.2 mm, y eksenini için ortalama ± 0.7 mm, z eksenini için ortalama ± 0.1 mm boyutsal hassasiyet ve tolerans olduğu tespit edilmiştir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Üniversitenin üç boyutlu yazıcısının üstün termoplastiklerde veya termoplastik bazlı kompozitlerden kullanımı vb. güncel ihtiyaçlar karşılaması için gelişime açık olması, yeni Ar-Ge çalışmalarının ile imkan sağlayabilir. Tez kapsamında mevcut olarak medikal ve havacılık sektörleri gerekli ilişkiler kurulmuş ve hammadde tedariği ve teknik destek tedariği konusunda işbirlikleri başlamıştır. Çalışmanın bu iki sektör özelinde farklı işbirlikleri doğurması beklenmektedir.

Ülkemiz için konuşulduğunda bu sıcaklıklara çıkan ve termoplastik işleyen üç boyutlu yazıcının fiyatları oldukça yüksektir. Lakin Eskişehir Teknik Üniversitesinin sahip olduğu yazıcı ile uygulama alanında imkanlar vermektedir. Özel veya kamu şirketleri üç boyutlu yazıcı ile ilgili yatırımlarını ithal ederek değil mevcutta bulunan makine üzerinden modifikasyon ve Ar-Ge çalışmaları yapabilirler.

Büyük hacimli ekstrüzyon esaslı üç boyutlu yazıcılarda sadece büyük ve kaba imalat yapılabilir gibi bir anlayış bu tez çalışmasında giderilmiştir. Çünkü yapılan modifikasyonlar ve yaşanan her hatanın sonucunda tecrübe edilen bilgiler doğrultusundaki iyileştirilmiş denemeler ile büyük hacimli ekstrüzyon esaslı üç boyutlu yazıcılarda daha hızlı bir şekilde ve daha az sürede dahi hassas parça imalatının yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

Herhangi bir üç boyutlu yazıcıda karşılaşılabilecek hataların çözümü kapsamında bu tez çalışması bir kullanım kılavuzu niteliğindedir. Büyük hacimli ekstrüzyon esaslı üç boyutlu veya normal üç boyutlu yazıcılarda yapılması gereken iyileştirmeler, modifikasyonlar için yapılan işlemler bir know-how kaynağı oluşturmaktadır.

Granül malzeme kullanılarak ASTM D638 standartı kapsamında yapılan çekme test numune imalatı ve çekme testi süreçlerinde elde edilen sonuçlarda en yüksek çekme mukavemetini elde etmek için belirlenen parametreler filament malzemeler göre farklılık gösterdiği sonucuna varılmıştı. Granül bazlı malzemelerdeki test sonuçlarının, filament bazlı malzemelere kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti ve elastisite modülü el edildiği yani sahip olduğu kıyaslama sonucu anlaşılmıştır (Karaman, 2019).

Yapılan modifikasyonlar, deneyler ve çalışmalar kapsamında öneriler ise:

- ❖ İmalat süreci tamamlandıktan sonra home'a gönderilen ekstruder hemen kapatılmamalıdır. Sıcaklık değeri 350 °C ayarlanarak, malzeme beslemesi

yapmadan boş döndürme ile içerde kalan granül malzemenin sonuna kadar boşaltılması gerekmektedir. Eğer böyle yapılmaz ise tıkanma meydana gelmektedir.

- ❖ Bu çalışmada, üretim hızı, nozul sıcaklığı, tabla sıcaklığı gibi mekanik özellikler üzerinde etkisi olan parametreler ile çalışılmıştır. Sonraki çalışmalarda doluluk oranı, katman genişliği, katman kalınlığı, üretim açıları gibi farklı üretim parametreleri ile mekanik özellikler incelenebilir.
- ❖ Sadece performans Abs granülü ile kalmayarak farklı ham madde termoplastik granüller ile belirli oranlarda karıştırılarak kompozit malzeme ile mekanik özellikler incelenebilir ve artan veya azalan özelliklerde kıyaslama olarak kullanılabilir.
- ❖ Ekstruder motoruna yoğunluğu daha yüksek olan termoplastik granülleri daha kolay ergitmesi için gerekli ise step motor redüktörü eklemesi yapılabilir.
- ❖ Hem tablaya hem ekstrudere ek rezistans eklemesi yapılarak üst sıcaklık değerleri değiştirilebilir. Bu ise yüksek performanslı termoplastik malzemeler gibi malzeme işleme envanteri için çeşitlilik olanağı sağlayacaktır.
- ❖ Büyük hacimli üç boyutlu yazıcının etrafı 6 adet pleksiglas gibi malzeme ile kapatılabilir. Böylece standart bir etrafı kapalı üç boyutlu yazıcı elde edilmiş olur. Burada ise amaç ortam sıcaklığının sensörler ile ölçülerek ve ısıtıcı montajı yapılarak istenilen seviyede tutulabilme imkanı tanımak ve dışarıdan müdahaleyi engellemektedir. Kapalı bir üç boyutlu yazıcı her türlü çevre şartından (korozyon, yağış, su kaçağı, plastik erimesi sonucu zehirli duman vb.) korunmuş olacaktır.
- ❖ Ekstrudera malzeme girişi, ekstruder granül giriş kısmının yetersizliğinden dolayı manuel olarak yapılmaktadır. Buradaki giriş kısmının tekrar tasarlanarak ve küçük bir vakum motoru eklemesi yapılarak granül malzeme akışının yazılım veya sistem üzerinden otomatik yapılması sağlanması üretim sırasında kolaylık sağlayacak ve hataları minimize edecektir.
- ❖ Z ekseninde bulunan adım motorlarının torku (3 Nm) yüksek boyutlarda bir imalat için büyütülmesi gerekebilir. Z eksenine mevcut motorun min 3 katı olarak şekilde 2 adet yeni adım motoru ve sürücü alımı yapılması önerilmektedir.

- ❖ Plastik enjeksiyon ile ABS malzemesi kullanarak ASTM D638 standardı ile yapılan testler ile bu tez çalışmasındaki veriler karşılaştırılmıştır. (CPA, 2022), plastik enjeksiyonda yapılan çekme testlerin sonuçlarında çekme mukavemeti 41.2 MPa olarak bulunmuştur. Bu tez çalışmasındaki çekme mukavemeti değerinden daha düşük çekme mukavemetine sahiptir. Bu kıyaslama kapsamında, eklemeli imalatta imalat edilecek ürün plastik enjeksiyon ile imal edilecek üründen çekme mukavemeti olarak daha yüksek değere sahiptir, sonucuna varılmıştır.
- ❖ AZURE marka film ABS filament kilosu 14,79 \$ iken filament bazlı ABS hammaddeli üretim maliyeti yüksektir. ABS pelet LG marka HI121H granül kilosu 2,52 \$'dır. Granül hammaddeli eklemeli imalatta üretim hem zaman hemde maliyet açısından avantaja sahiptir.

KAYNAKÇA

- Leinenbach, C. (2018). *Selective Laser Melting*. Haziran 19, 2021 tarihinde Empa Materials Science And Technology: <https://www.empa.ch/web/coating-competence-center/selective-laser-melting> adresinden alındı
- Parry, D. (2015). *NRL Licenses New Polymer Resin for Commercial Applications*. Mayıs 2, 2021 tarihinde U.S. Naval Research Laboratory - The Department of the Navy's Corporate Laboratory: <https://www.nrl.navy.mil/Media/News/Article/2534826/nrl-licenses-new-polymer-resin-for-commercial-applications/> adresinden alındı
- Wood, L. (2014). *Polyether Ether Ketone (PEEK) Market - Global Trends & Forecasts to 2018*. Mayıs 01, 2021 tarihinde PRNewswire: <https://www.prnewswire.com/news-releases/polyether-ether-ketone-peek-market---global-trends--forecasts-to-2018-243930651.html> adresinden alındı
- Wu, W., Geng, P., Li, G., Zhao, D., Zhang, H., & Zhao, J. (2015). Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS. *Materials (Basel)*, 8, 5834-5846.
- 3Dörtgen. (2019, Ağustos 8). *Cura İç Dohuluk Tipleri Hakkında Bilmeniz Gereken Her Şey*. Eylül 19, 2021 tarihinde 3dörtgenblog: <https://blog.3dortgen.com/cura-ic-doluluk-tipleri-hakkinda-bilmeniz-gereken-her-sey/> adresinden alındı
- 3M. (2013). *Şeffaf Polikarbonat (PC) Koruma Gözlüğü*. RS Components Ltd., İstanbul. Mayıs 22, 2021 tarihinde <https://tr.rsdelivers.com/product/3m/71360-00011m/seffaf-polikarbonat-pc-koruma-gozlugu/6667707> adresinden alındı
- Adamidis, O., Alber, S., & Anastasopoulos, L. (2018). Investigation Into 3D Printing Of Granular Media. *Conference: 9th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ICPMG 2018)*. London, United Kingdom: Taylor & Francis Group.
- Additive-3D. (2014). *What is the PolyJet technology?* Mayıs 30, 2021 tarihinde <https://www.additive-3d.com/technologie-polyjet.html> adresinden alındı

- Additive-X. (2016). *What is Selective Deposition Lamination (SDL)?* Haziran 20, 2021 tarihinde Additive-X: <https://www.additive-x.com/blog/selective-deposition-lamination-sdl/> adresinden alındı
- Arif, M. F., Kumar, S., Varadarajan, K. M., & Cantwell, W. J. (2018). Performance of biocompatible PEEK processed by fused deposition additive manufacturing. *Materials & Design*, 146, 249-259.
- ASTM D638-14. (2014). Standard Test Method For Tensile Properties of Plastics. *American Society for Testing and Materials*. West Conshohocken, PA, United States.
- ASTM, C. (2012). *Standard Terminology For Additive Manufacturing Technologies*. Philadelphia: ASTM.
- Ay, İ. (2010). *Termoplastik ve Termoset Plastikler*. Mayıs 15, 2021 tarihinde Plastik & Ambalaj Teknolojisi: <http://www.plastik-ambalaj.com/tr/plastik-ambalaj-makale/1019-termoplastik-ve-termoset-plastikler> adresinden alındı
- Baranowski, P., Płatek, P., Antolak-Dudka, A., Sarzyński, M., Kuciewicz, M., Durejko, T., . . . Czujko, T. (2019). Deformation of Honeycomb Cellular Structures Manufactured With Laser Engineered Net Shaping (LENS) Technology Under Quasi-Static Loading: Experimental Testing And Simulation. *Additive Manufacturing*, 25, 307-316.
- Başgöl, C., Yu, T., MacDonald, D. W., Siskey, R., Marcolongo, M., & Kurtz, S. M. (2018). Structure-Property Relationships For 3D Printed PEEK Intervertebral Lumbar Cages Produced Using Fused Filament Fabrication. *Journal of Materials Research*, 33(14), 1-12.
- Beşergil, B. (2010). *Termoplastikler: Mühendislik Plastikleri; PC, PET, ABS, PA, PMMA, POM*. Mayıs 15, 2021 tarihinde E-Makale: http://besergil.cbu.edu.tr/e_makaleleri.html adresinden alındı
- Bors. (2010). *ABS (Akrilonitril bütadien stiren)*. Bors Şirketler Grubu, İstanbul. Mayıs 22, 2021 tarihinde <https://borsgroup.com.tr/abs/> adresinden alındı

- Boxed. (2017, 10 20). *Warping and Cracking with Closed Environment FDM 3D Printers*. Eylül 19, 2021 tarihinde Box3D: <https://www.box3d.eu/warping-cracking-closed-environment-3d-printers/> adresinden alındı
- BoyutKat. (2019). *En İyi Filament Baskı Sıcaklığı*. Temmuz 04, 2021 tarihinde Boyutkat: <https://www.boyutkat.com/3d-yazici-filament/en-iyi-filament-baski-sicakligi/> adresinden alındı
- Chartier, T., & Chaput, C. (2007). Fabrication Of Ceramics By Stereolithography. *RTEjournal - Forum für Rapid Technologie*, 4(1).
- CPA. (2022, Nisan 07). *Channel Prime Alliance*. Channelpa: <https://www.channelpa.com/actions/union/api/datasheet?entryIds=380819> adresinden alındı
- Çelik, K., & Özkan, A. (2017). Eklemeli İmalat Yöntemleri İle Üretim ve Onarım Uygulamaları. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 107-121.
- Çiftçi, S. (2020). Termoplastik Kompozitlerin Büyük Hacimli Katmanlı Üretim Sisteminde Üretimi İçin Granül Beslemeli Ekstrüzyon Sisteminin Geliştirilmesi. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*. Eskişehir: Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.
- Dağ, E. (2021, Haziran 27). *3D Baskı Parametreleri*. 3D 3Teknoloji: <https://3d3teknoloji.com/blog/3d-baski-parametreleri-nelerdir/> adresinden alındı
- Daimler, A. (2020). *LinkedIn*.
- Daurskikh, A., Sgambati, A., Graça, D., Berg, M., Baptista, A., Angelo, M., & Lafont, U. (2018). Influence Of Spatial Orientation On Properties Of 3D Printed PEEK Parts And Their Design Adaptation. In *Proceedings of the 69th International Astronautical Congress*. Bremen, Germany.
- Dave, R. S., & Loos, A. C. (2000). *Processing of Composites*. Hanser Publishers.
- Dermeik, B., & Travitzky, N. (2020). Laminated Object Manufacturing of Ceramic-Based. *Advanced Engineering Materials*, 22(9).
- Dijital 3B. (2020). *FDM Teknolojisi Nedir ?* Haziran 20, 2021 tarihinde Arti90: <https://arti90.com/fdm/#toggle-id-3> adresinden alındı

- Ekrem, M. (2006). Cam Kumaş Takviyeli Termoplastik Kompozitlerin Mekanik Özellikleri ve Kırılma Davranışları. *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Konya: Yüksek Lisans Tezi.
- Ergülü, B. (2021, Nisan 25). *Ford ve HP Ortaklığı*. <https://www.donanimhaber.com/ford-3d-yazici-atiklarini-araclarinda-yeniden-kullanmak-icin-hp-ile-is-birligi-yapti--131632> adresinden alındı
- Erkulah, S. (2018). *Poli Vinil Klorür (PVC)*. Serkan Polimer Sanayi Ve Ticaret Limited Şirketi, Gaziantep. Mayıs 16, 2021 tarihinde https://www.serkanpolimer.com/08_poli_vinil_klorur_pvc.html adresinden alındı
- Eshragh . (2020). *Polietilen Tereftalat Şişesi*. Eshragh A.Ş., Tahran, İran. Mayıs 22, 2021 tarihinde <https://epsco.ir/tr/polietilen-tereftalat-sisesi/> adresinden alındı
- Evlen, H., Özdemir, M. A., & Çalışkan, A. (2019). Doluluk Oranlarının PLA ve PET Malzemelerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri. *Politeknik Dergisi*, 22(4), 1031-1037.
- Fidan, İ., Imeri, A., Gupta, A., Hasanov, S., Nasirov, A., Elliott, A., . . . Nanami, N. (2019). The Trends And Challenges Of Fiber Reinforced Additive Manufacturing. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 1-18.
- Filiz. (2015). *PEEK | Polietereeterketon*. Filiz Plastik Metal ve Makine San. Tic. Ltd. Şti., İstanbul. Mayıs 22, 2021 tarihinde <https://filizplastik.com.tr/urun/peek-polietereeterketon> adresinden alındı
- Fitzharris, E. R., Watt, I., Rosen, D. W., & Shofner, M. L. (2018). Interlayer Bonding Improvement of Material Extrusion Parts With Polyphenylene Sulfide Using the Taguchi method. *Additive Manufacturing*, 24, 287-297.
- Fraley, S., Oom, M., Terrien, B., & Zalewski, J. (2021). Design of Experiments via Taguchi Methods - Orthogonal Arrays. *Chemical Process Dynamics And Controls*, s. 804-814.
- Ge Reports: Aviation . (2020, Ekim 24). <https://www.ge.com/news/reports/tag/Aviation> adresinden alındı

- Gebhardt, A. (2011). *Understanding Additive Manufacturing*. Munich, Germany: Hanser Publishers.
- Gibson, I., & Shi, D. (1997). Material Properties And Fabrication Parameters İn Selective Laser Sintering Process. *Rapid Prototyping Journal*, 3(4), 129-136.
- Gokuldoss, P. K., Kolla, S., & Eckert, J. (2017). Additive Manufacturing Processes: Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting—Selection Guidelines. *Materials*, 10(6), 672.
- Groover, M. P. (2010). *Principles of Modern Manufacturing*. New York: John Wiley & Sons.
- Hearle, J. W. (2001). *High-Performance Fibres*. Woodhead Publishing.
- Hull, C. W. (1986). *USA Patent No. US4575330A*.
- Intamsys. (2018). *Intamsys Launches 3D Printing Service and Releases Materials Technical Data Sheets*. Intamsys Technology Co. Ltd. Mayıs 22, 2021 tarihinde <https://www.intamsys.com/intamsys-launches-3d-printing-service/> adresinden alındı
- Izadi, M., Farzaneh, A., Mohammed, M., Gibson, I., & Rolfe, B. (2020). A Review Of Laser Engineered Net Shaping (LENS) Build And Process Parameters Of Metallic Parts. *Rapid Prototyping Journal*, 26(6), 1059–1078.
- Kalaycı, E., Avinç, O., & Yavaş, A. (2017). Polieter Eter Keton (Peek) Lifleri. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi (CFD)*, 38(2).
- Kara, N. (2013). Havacılıkta Katmanlı İmalat Teknolojisinin Kullanımı. *Mühendis ve Makina*, 54(636), 70-75.
- Karaman, E. (2019). Eriyik Biriktirme Metodu İle ABS Polimer Katkılı Karbon Fiber Elyaf Destekli Malzemelerin Üç Boyutlu Printer İle Tasarım Ve Üretim Parametrelerinin İncelenmesi. *Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*. Isparta: Yayınlanmamış Doktora Tezi.
- Karaman, E., & Çolak, O. (2019). Eriyik Biriktirme Yönteminde Farklı Üretim Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkisi. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 1(2), 90-99.

- Karaman, E., & Çolak, O. (2020). Eriyik Biriktirme Yönteminde Üretim Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Ve Parçaların İç Yapısına Etkisinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8, 617-630.
- Kenton, W. (2021, Ekim 06). *Analysis of Variance (ANOVA)*. Ocak 15, 2022 tarihinde Investopedia:
<https://www.investopedia.com/terms/a/anova.asp#:~:text=Analysis%20of%20variance%2C%20or%20ANOVA,the%20dependent%20and%20independent%20variables.> adresinden alındı
- Körner, C. (2016). Additive Manufacturing of Metallic Components by Selective Electron Beam Melting - A Review. *International Materials Reviews*, 61(5), 361-377.
- Kruth, J. P., Leu, M. C., & Nakagawa, T. (1998). Progress In Additive Manufacturing And Rapid Prototyping. *Cirp Annals*, 47(2), 525-540.
- Lawrence, E. (2009, Şubat 02). *ASTM D638: The Definitive Guide To Plastic Tensile Testing*. Aralık 25, 2021 tarihinde Instron: <https://www.instron.com/en/testing-solutions/by-standard/astm/astm-d638> adresinden alındı
- Lehvoss. (2018). *Livrea Yacht will be the first 3D printed sail boat with carbon fiber reinforced thermoplastic*. Haziran 26, 2021 tarihinde Lehmann&Voss&Co: <https://www.lehvoss.de/en/news-events/news/details/article/livrea-yacht-will-be-the-first-3d-printed-sail-boat-with-carbon-fiber-reinforced-thermoplastics-le/> adresinden alındı
- Levy, G. N., Schindel, R., & Kruth, J. P. (2003). Rapid Manufacturing And Rapid Tooling With Layer Manufacturing (LM) Technologies, State Of The Art And Future Perspectives. *Cirp Annals*, 52(2), 589-609.
- Li, J., Jia, Y., Li, T., Zhu, Z., Zhou, H., Peng, X., & Jiang, S. (2020). Tensile Behavior of Acrylonitrile Butadiene Styrene at Different Temperatures. *Advances in Polymer Technology*.
- Love, L. (2015). *Utility Of Big Area Additive Manufacturing (BAAM) For The Rapid Manufacture Of Customized Electric Vehicles*. USDOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE).

- Mahmood, S., Qureshi, A. J., Goh, K. L., & Talamona, D. (2017). Tensile Strength Of Partially Filled FFF Printed Parts: Experimental Results. *Rapid Prototyping Journal*, 23(1), 122-128.
- Manufactur3D. (2018). *MJF Working Process*. Mayıs 30, 2021 tarihinde <https://manufactur3dmag.com/understanding-hps-multi-jet-fusion-mjf-technology/mjf-working-process/> adresinden alındı
- Marsis. (2020). *3D Yazıcı Teknolojileri*. Marsis İnovasyon: <https://marsisinovasyon.com/modern-3d-yazici-teknolojileri/> adresinden alındı
- MatWeb. (2021). *Overview of materials for Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), Extruded*. Ocak 29, 2022 tarihinde Material Property Data: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3a8afcddac864d4b8f58d40570d2e5aa&ckck=1> adresinden alındı
- Mazumdar, S. K. (2002). *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*. Florida: CRC Press LLC.
- McKeen, L. W. (2006). *Fluorinated Coatings and Finishes Handbook: The Definitive User's Guide and Databook*. Norwich, NY: William Andrew Publishing.
- Micheal, P. (2018). *Solid Ground Curing (SGC)*. Green Industrylinks: <https://greenindustrylinks.com/solid-ground-curing-sgc/> adresinden alındı
- Mikitaev, A. K., Ligidov, M. K., & Zaikov, G. E. (2006). *Polymers, Polymer Blends, Polymer Composites and Filled Polymers: Synthesis, Properties and Applications*. Nova Science Publishers.
- Mohan, N., Senthil, P., Vinodh, S., & Jayanth, N. (2017). A Review On Composite Materials And Process Parameters Optimisation For The Fused Deposition Modelling Process. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(1), 47-59.
- Nagaraja, D. M. (2018). *The In-Space Refabricator*. Aralık 05, 2020 tarihinde <https://science.nasa.gov/science-news/news-articles/the-in-space-refabricator> adresinden alındı
- Newswire, P. (2013). *American Airlines Completes Electronic Flight Bag Implementation*. Kasım 24, 2020 tarihinde Aviation Pros:

<https://www.aviationpros.com/aircraft/commercial-airline/news/10976588/american-becomes-the-first-major-commercial-carrier-to-deploy-electronic-flight-bags-throughout-fleet-and-discontinue-paper-revisions> adresinden alındı

Nicholson, J. W. (2012). *The Chemistry of Polymers*. Cambridge: Royal Society of Chemistry.

Patel, P. (2013). *PE Plain Packaging Shrink Films, Packaging Type: Roll, Packaging Size: 80-400 mm*. Niyo Film Packaging (Unit Of Niyo Group), Gujarat, India. Mayıs 16, 2021 tarihinde İndiamart: <https://www.indiamart.com/proddetail/packaging-shrink-films-8820982148.html> adresinden alındı

Plastik Malzeme Çizelgesi. (2021, Şubat 20). Bhrt Sıcak Yolluk Sistemleri San. Tic. Ltd. Şti.: <http://bhrt.com.tr/wp-content/uploads/2018/06/1-mn.pdf> adresinden alındı

Prater, T., Werkheiser, N., Ledbetter, F., & Morgan, K. (2018). In-Space Manufacturing at NASA Marshall Space Flight Center: A Portfolio of Fabrication and Recycling Technology Development for the International Space Station. *AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition*. NASA Marshall Space Flight Center, Huntsville, AL, USA.

Pressreader. (2019). *Polilaktik Asit (PLA) Pazarı Hız Kazanıyor*. (C. Today, Düzenleyen, & Zion Market Araştırması) Mayıs 22, 2021 tarihinde Chemlife: <https://www.chemlife.com.tr/polilaktik-asit-pla-pazari-hiz-kazaniyor> adresinden alındı

Rahman, K. M., Letcher, T., & Reese, R. (2015). Mechanical Properties of Additively Manufactured PEEK Components Using Fused Filament Fabrication. *Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Houston, Texas: ASME.

Reddy, P. (2016). Digital Light Processing (DLP). *3D Technologies*. Think 3D. <https://www.think3d.in/digital-light-processing-dlp-3d-printing-service-india/> adresinden alındı

- Roschli, A., Gaul, K. T., Boulger, A. M., Post, B. K., Chesser, P. C., Love, L. J., . . . Borish, M. (2019). Designing for Big Area Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*, 25, 275-285.
- Ross, P. J. (1996). *Taguchi techniques for quality engineering : loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design*. New York.
- Ryan, V. (2019). *Stereolithography*. Mayıs 30, 2021 tarihinde https://technologystudent.com/despro_3/stereol.html adresinden alındı
- Salem, A., Wahab, S. B., & Ahmad, M. B. (2016). Elements And Materials Improve The FDM Products: A Review. *Advanced Engineering Forum*, 16, 33-51.
- Sculpteo. (2017). *Multijet 3D Printing: Multimaterial 3D Printing*. Mayıs 30, 2021 tarihinde Sculpteo: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/multijet-definition/> adresinden alındı
- Sezer, H. K., Eren, O., & Börüklü, H. R. (2017). Ergiyik Biriktirme Yöntemi İle Karbon Fiber Takviyeli Plastik Kompozitlerin Eklemeli İmalatı: İşlem Parametrelerinin Çekme Özelliklerine Etkisi. (3D-PTS2017, Dü.) *2nd International Symposium On 3d Printing Technologies*.
- Shekar, R. I., Kotresh, T. M., Rao, D., & Kumar, K. (2009). Properties Of High Modulus PEEK Yarns For Aerospace Applications. *Journal of Applied Polymer Science*, 112(4), 2497-2510.
- Singh, S., Prakash, C., & Ramakrishna, S. (2019). 3D Printing Of Polyether-Ether-Ketone For Biomedical Applications. *European Polymer Journal*, 114, 234-248.
- Srivastava, M., Maheshwari, S., Kundra, T. K., & Rathee, S. (2017). Estimation of the Effect of Process Parameters on Build Time and Model Material Volume for FDM Process Optimization by Response Surface Methodology and Grey Relational Analysis. *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*, s. 29-38.
- Stratasys. (2017). *ULTEM™ 9085 Resin High-Performance FDM PEI Thermoplastic*. Mayıs 22, 2021 tarihinde Stratasys: <https://www.stratasys.com/materials/search/ultem9085> adresinden alındı

- Sundaram, S. (2016, Ocak 15). *Composites Stay Afloat With Continued Growth Forecast In Wind Energy, Automotive And Aerospace Markets*. Mayıs 04, 2021 tarihinde ESSJAY Composites Technical + Commercial Solutions: <https://essjaycomposites.wordpress.com/category/aerospace/> adresinden alındı
- Sundaram, S. (2018, Mart 17). *Future Trends For Composites Growth Have Never Been Better*. Mayıs 04, 2021 tarihinde ESSJAY Composites Technical+Commercial Solutions: <https://essjaycomposites.wordpress.com/category/aerospace/> adresinden alındı
- Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli İmalat (3B Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-392.
- Şahin, K., & Turan, B. O. (2018). Üç Boyutlu Yazıcı Teknolojilerinin Karşılaştırmalı Analizi. *Stratejik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 2(2), 97-116.
- T3 Dizayn Teknoloji Tasarım ve Bilişim Hizmetleri Ticaret Limited Şirketi. (2021). Şubat 14, 2021 tarihinde <https://www.t3dizayn.com/coremax-x-pro/> adresinden alındı
- Talın, A. O. (2020). *Termoplastik Malzemeler Nelerdir? Termoplastiklerin Özellikleri Nelerdir?* Mayıs 15, 2021 tarihinde MalzemeBilimi.net: <https://malzemebilimi.net/termoplastik-malzemeler-nelerdir-termoplastiklerin-ozellikleri-nelerdir.html> adresinden alındı
- Tetraco. (2011). *Poliamid Profil Hatları*. Novoma A.Ş, İstanbul. Mayıs 22, 2021 tarihinde <https://novoma.com.tr/polyamid-profil-hatlari/> adresinden alındı
- Texas Prototype. (2019). *Fused Deposition Modeling (FDM)*. Haziran 20, 2021 tarihinde Texas Prototype: <https://texasprototype.com/fused-deposition-modeling-fdm/> adresinden alındı
- Tridi. (2019). *3D Baskı Parametreleri Nelerdir?* Haziran 26, 2021 tarihinde Tridi: <https://www.tridi.co/blog/3d-baski-parametreleri-nelerdir> adresinden alındı
- TSE. (2017). *Türk Standartları Enstitüsü*. 05 01, 2021 tarihinde <https://intweb.tse.org.tr/Standard/Standard/Standard.aspx?0531071061110650671151130491160901071000560520551080810900710860750690850471100671>

0907507308111610309008108607310806511708411910206709810504805605
0083114107074111087113079110069116074086113049 adresinden alındı

Tseng, J. W., Liu, C. Y., Yen, Y. K., Belkner, J., Bremicker, T., Liu, B. H., . . . Wang, A. B. (2018). Screw Extrusion-Based Additive Manufacturing Of PEEK. *Materials and Design*(140), 209–221.

Tymrak, B. M., Kreiger, M., & Pearce, J. M. (2014). Mechanical Properties Of Components Fabricated With Open-Source. *Materials & Design*, 58, 242-246.

Valkenaers, H., Vogeler, F., Ferraris, E., Voet, A., & Kruth, J.-P. (2013). A Novel Approach To Additive Manufacturing: Screw Extrusion 3D-Printing. *Proceedings of the 10th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture*, (s. 235-238). Spain.

Vegt, V. D. (2002). *From Polymers To Plastics*. The Netherlands : Delf University Press.

Victrex , S. (2021). *The Thermoplastic Fibre Of Choice For Demanding Environments*. Ocak 1, 2021 tarihinde Victrex™ PEEK Polymer: <https://www.victrex.com/brochures> adresinden alındı

Vikipedi. (2021). *Taramalı elektron mikroskobu*. https://tr.wikipedia.org/wiki/Taramalı_elektron_mikroskobu adresinden alındı

Visonpack , C. (2019). *ABS VS PET - Which Material Is Better for Cosmetic Packaging*. Mayıs 22, 2021 tarihinde Medium.com: https://medium.com/@cosmetic_packaging_world/abs-vs-pet-which-material-is-better-for-cosmetic-packaging-c4e8bb5dedf3 adresinden alındı

Wang, P., Zou, B., Xiao, H., Ding, S., & Huang, C. (2019). Effects of Printing Parameters of Fused Deposition Modeling on Mechanical Properties, Surface Quality and Microstructure of PEEK. *Journal of Materials Processing Tech.*, 271, 62–74.

Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. *International Scholarly Research Network - ISRN Mechanical Engineering*.

Wright, L. (2016). *How Big Area Additive Manufacturing is Enabling Automotive Microfactories*. Ekim 31, 2020 tarihinde

<https://www.engineering.com/story/how-big-area-additive-manufacturing-is-enabling-automotive-microfactories> adresinden alındı

- Wu, W., Ye, W., Wu, Z., Geng, P., Wang, Y., & Zhao, J. (2017). Influence of Layer Thickness, Raster Angle, Deformation Temperature and Recovery Temperature on the Shape-Memory Effect of 3D-Printed Polylactic Acid Samples. *Materials*, 10(970).
- Xia, M., & Sanjayan, J. (2016). Method Of Formulating Geopolymer For 3D Printing For Construction Applications. *Materials and Design*, 110, 382–390.
- Yang, C., Tian, X., Li, D., Cao, Y., Feng, Z., & Shi, C. (2017). Influence Of Thermal Processing Conditions In 3D Printing On The Crystallinity And Mechanical Properties Of PEEK Material. *Journal of Materials Processing Technology*, 248, 1-7.
- Yap, C. Y., Chua, K. Z., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., & Sing, S. L. (2015). Review of Selective Laser Melting: Materials and Applications. *Applied Physics Reviews*, 2(4).
- Yürekli, A. (2019). Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, 1-12.
- Zekavat, A. R., Jansson, A., Larsson, J., & Pejryd, L. (2019). Investigating The Effect Of Fabrication Temperature On Mechanical Properties Of Fused Deposition Modeling Parts Using X-Ray Computed Tomography. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(1-4), 287-296.