

T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ERİYİK YIĞMA TEKNİĞİ İLE ÇALIŞAN ÜÇ BOYUTLU YAZICI TASARIMI,
İMALATI VE ELDE EDİLEN NUMUNELERİN
BAZI ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Hasan BAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TC
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ERİYİK YIĞMA TEKNİĞİ İLE ÇALIŞAN ÜÇ BOYUTLU YAZICI TASARIMI,
İMALATI VE ELDE EDİLEN NUMUNELERİN
BAZI ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

HASAN BAŞ

AKILLI SİSTEMLER MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SAMSUN
2017**

Her hakkı saklıdır.

TEZ ONAYI

Hasan BAŞ tarafından hazırlanan “ERİYİK YIĞMA TEKNİĞİ İLE ÇALIŞAN ÜÇ BOYUTLU YAZICI TASARIMI, İMALATI VE ELDE EDİLEN NUMUNELERİN BAZI ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ” adlı tez çalışması 14/06/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Akıllı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman Doç. Dr. Fatih YAPICI
Akıllı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri

Başkan Prof. Dr. Sermin ELEVLİ
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Akıllı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye Doç. Dr. Fatih YAPICI
Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Akıllı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye Doç. Dr. Emrullah DEMİRCİ
Karadeniz Teknik Üniversitesi
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım. .../.../2017

.....

Prof. Dr. Bahtiyar ÖZTÜRK
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

14/06/2017

.....

Hasan BAŞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ERİYİK YIĞMA TEKNİĞİ İLE ÇALIŞAN ÜÇ BOYUTLU YAZICI TASARIMI, İMALATI VE ELDE EDİLEN NUMUNELERİN BAZI ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Hasan Baş

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Akıllı Sistemler Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fatih Yapıcı

Gelişen teknoloji ve artan bilgi birikimi, kullanılan malzemeleri ve üretim tekniklerinin gelişmesini sağlamış ve bunun sonucunda da eskiden insanların yapılmasını ve kullanılmasını hayal ettiği ürünleri elde etme imkanı sunmuştur. Günümüzde eklemeli imalat (3D yazıcılar) sayesinde hayali kurulan veya ihtiyaç duyulan parçaları 3 boyutlu tasarımını yaparak kısa sürede üretebilmek mümkün olmuştur. 3D yazıcıların piyasadan temin edilmesinin yanısıra, ihtiyaca göre modifikasyonlar yapılarak tasarlanması ve imalatının mümkün olması önemli bir avantaj olarak ön plana çıkmaktadır.

Bu çalışmada FDM (Eriyik Yığıma Tekniği-Fused Deposition Modelling) tipi bir 3D yazıcı özel olarak tasarlanıp imal edilmiştir. İmal edilen yazıcının baskı boyutları 500x500x500mm'dir. Eksen hareketlerinin hassasiyetinin önemli olması nedeniyle 3D yazıcı tasarımı yapılırken uygun mekanik elemanlar seçilmiştir. 3D yazıcılarda hareket iletiminde yaygın olarak kullanılan trigger kayışı yerine vidalı mil-bilyalı somun mekanizması kullanılarak konum hassasiyeti geliştirilmiştir. 3D yazıcıya ek olarak iki farklı filament tipi (ABS ve PET-G) kullanılarak, farklı baskı hızı, farklı baskı sıcaklığı ve doluluk oranında üretilen deney örneklerinin eğilme direnci ve yüzey sertlik değerleri belirlenmiştir.

Deney örneklerinin eğilme direnci, yüzey sertlik değerleri, bu değerlere etki eden üretim koşulları ve seviyeleri 2^k Faktöriyel Deney Tasarımı yardımı ile incelenmiştir. Deney tasarımı sonucunda elde edilen veriler analiz edildiğinde üretim parametlerinin eğilme direnci ve yüzey sertlik değerleri üzerine önemli bir etkisinin olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yine yapılan analizler sonucunda en etkili parametre ise filament türü olarak belirlenmiştir.

Haziran 2017, 77 sayfa

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, 3D yazıcılar, FDM tekniği, Tam faktöriyel deney tasarımı.

ABSTRACT

Master's Thesis

Design and Production of Fused Deposition Modelling Type Three Dimensional Printer and Determination of Some Properties of Samples

Hasan Baş

Ondokuz Mayıs University
Graduate School of Sciences
Department of Intelligent Systems Engineering

Supervisor: Assoc.Prof. Fatih Yapıcı

Emerging technology and increased knowledge have allowed the development of materials and production techniques, and as a result, the ability to acquire products that formerly people imagine to be made and used. Nowadays, additive manufacturing (3D printer) makes it possible to produce imaginative or required parts in a short time by making 3D design. In addition to providing 3D printers from the market, it is an important advantage to design and manufacture by making modifications as required.

In this study, a 3D printer of FDM (Fused Deposition Modeling) type was specially designed and manufactured. The print size of the manufactured printer is 500x500x500mm. Because of the sensitivity of the axis movements, proper mechanical elements have been chosen when designing 3D printers. In 3D printers, position accuracy has been improved by using a ball screw mechanism instead of the trigger belt, which is widely used in motion transmission. In addition to the 3D printer, bending resistance and surface hardness values of two different filament types (ABS and PET-G) produced at different printing speeds, different printing temperatures and filling ratios were determined.

The bending strength, surface hardness values, production conditions and levels affecting these values of the test specimens were investigated with the help of 2k Factorial Test Design. When the data obtained from the test design is analyzed, it is concluded that the production parameters have a significant effect on the bending resistance and surface hardness values. As a result of the analysis, the most effective parameter is determined as filament type.

June 2017, 77 pages

Key Words: Additive Manufacturing, 3D Printers, FDM methods , Full Factorial Experimental Design.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Çalışmalarımnda bana destek olan Yrd.Doç.Dr. İbrahim İNANÇ'a, Arş. Gör. Burak BAYGÜNEŞ'e, Arş. Gör. Barış ÖZKAN'a, Arş. Gör. Hakan ÖZTÜRK'e, Arş. Gör. Mehmet Serdar ÇELİK'e ve danışmanım Doç. Dr. Fatih YAPICI'ya teşekkürü borç bilirim.

Haziran 2017, Samsun

Hasan Baş

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. EKLEMELİ İMALAT	14
3.1. Eklemeli İmalat Hakkında Genel Bilgiler	14
3.2. Eklemeli İmalat Parçalarının Kullanımı	15
3.3. Eklemeli İmalat Genel Süreci	16
3.3.1. CAD süreci	16
3.3.2. STL formatına dönüştürme	17
3.3.3. STL dosyasını dilimleme	17
3.3.4. Makina ayarları	17
3.3.5. Basım aşaması	17
3.3.6. Parçanın makinadan çıkarılması	17
3.3.7. Temizleme işlemleri	17
3.3.8. Uygulama	18
3.4. Eklemeli İmalat Terimi	18
3.4.1. Otomatik imalat	19
3.4.2. Serbest şekil imalatı	19
3.4.3. Katman bazlı imalat	19
3.4.4. Stereolitografi ve 3D basım	19
3.4.5. Hızlı prototipleme	20
3.5. Eklemeli İmalatın Avantajları	20
3.6. Eklemeli İmalat ile CNC Talaşlı İmalat Arasındaki Fark	21
3.6.1. Malzeme çeşitliliği	21
3.6.2. Hız	22
3.6.3. Karmaşıklık	22
3.6.4. Hassasiyet	23
3.6.5. Geometri	23
3.6.6. Programlama	23
3.7. Eklemeli İmalat Yöntemleri	24
3.7.1. Fotopolimerizasyon	24
3.7.2. Toz ergitme	26
3.7.2.1. Seçici lazer sinterleme (Selective Laser Sintering - SLS)	26
3.7.2.2. Elektron ışınıyla ergitme (Electron Beam Melting - EBM)	27
3.7.3. Malzeme püskürtme	28
3.7.4. Yapışkan püskürtme	29
3.7.5. Levhalarla katman oluşturma	30
3.7.6. Ekstrüzyon yöntemi	31
3.8. FDM Makinelerinde Mekanik Tasarım	33
3.8.1. FDM makine yapıları	33
3.8.2. Triger kayışı, vidalı mil-bilyalı somun, vidalı mil-trapez somun	37
3.8.3. Lineer kızaklar ve lineer rulmanlar	39

3.9. FDM Makinelerinde Kontrol Sistemi	40
3.9.1. Nümerik kontrol	40
3.9.2. Hareket kontrolü	40
3.9.3. Step motorların temelleri	41
3.9.4. Step motor kontrolü	42
3.9.4.1. Tam adım	42
3.9.4.2. Yarım adım.....	43
3.9.4.3. Mikro adım.....	43
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	44
4.1. FDM Yazıcı Tasarımı ve İmalatı	44
4.1.1. Yazıcı kasası	45
4.1.2. X-Y eksenleri	46
4.1.3. Z eksenini	49
4.1.4. Ekstrüder	50
4.1.5. Motor sürücüleri ve denetleyiciler	51
4.1.6. Yazılım.....	53
4.2. Eğilme Dayanımı ve Sertlik Deneyleri için 2 ^P Faktöriyel Deney Tasarımı	53
4.2.1. Eğilme dayanımı ve sertlik deneyleri.....	54
4.2.2. Deney numunelerinin hazırlanması ve belirlenmesi	55
5. BULGULAR.....	57
5.1. Çekme Dayanımları Sonuçları.....	57
5.2. Eğilme Dayanımı Sonuçları	62
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	68
KAYNAKLAR	70
ÖZGEÇMİŞ.....	78

SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

Al_2O_3	Alüminyum Oksit
CO_2	Karbon Dioksit

KISALTMALAR

ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
AM	Additive Manufacturing
ASTM	American Society of Testing and Materials
CAD	Computer Aided Desing
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computer Numerical Control
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Fused Deposition Modeling
LOM	Laminated Object Manufacturing
PET-G	Polietilen Tereftalat Glikol
PLA	Polilaktik Asit
RP	Rapid Prototyping
SLS	Selective Laser Sintering (Seçici Lazer Sinterleme)
UV	Ultraviolet
3DP	3 Dimensional Printing

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Stereolitografi tekniği	25
Şekil 3.2. Seçici lazer sinterleme tekniği	27
Şekil 3.3. EBM tekniği.....	27
Şekil 3.4. Malzeme püskürtme tekniği.....	29
Şekil 3.5. Üç boyutlu baskı tekniği	30
Şekil 3.6. LOM tekniği	31
Şekil 3.7. FDM tekniği.....	32
Şekil 3.8. Prusa i3 3D yazıcı	34
Şekil 3.9. Darwin 3D yazıcı	35
Şekil 3.10. Morgan 3D yazıcı	36
Şekil 3.11. Udelta 3D yazıcı	36
Şekil 3.12. Triger kayışı	37
Şekil 3.13. Trapez somun vidalı mil mekanizması	38
Şekil 3.14. Vidalı mil-bilyalı somun mekanizması.....	38
Şekil 3.15. Lineer rulman-mil mekanizması	39
Şekil 3.16. Lineer kızak-araba mekanizması	39
Şekil 3.17. Step motor iç kesiti	41
Şekil 4.1. FDM 3D yazıcı katı model resmi	45
Şekil 4.2. FDM 3D yazıcı tamamlanmış hali.....	45
Şekil 4.3. 60x30mm sigma profil	46
Şekil 4.4. Kanal somun-civata bağlantısı.....	46
Şekil 4.5. X eksen hareket iletim mekanizması	47
Şekil 4.6. X eksen yatak tasarımı (motorlu kısım).....	47
Şekil 4.7. X eksen yatak tasarımı (motorsuz kısım)	47
Şekil 4.8. X eksen yatak tutucuları	48
Şekil 4.9. X eksen yatak tutucu gerçek resmi	48
Şekil 4.10. Y eksen hareket iletim mekanizması	49
Şekil 4.11. Y eksen yatak tutucu.....	49
Şekil 4.12. Z ekseninin hareket iletim mekanizması	50
Şekil 4.13. Ekstrüder	51
Şekil 4.14. TB6560 step motor sürücü.....	51
Şekil 4.15. Ramp 1.4 kart.....	52
Şekil 4.16. Elektronik aksam	52
Şekil 4.17. Eğilme dayanımı deney numunesi ölçüleri B=10mm, L=80mm, H=4mm (DIN EN ISO 178)	54
Şekil 4.18. Eğilme dayanımı numunesi.....	56
Şekil 5.1. Normal olasılık grafiği (Eğilme dayanımı).....	58
Şekil 5.2. Pareto grafiği (Eğilme dayanımı).....	58
Şekil 5.3. Ana etkiler grafiği (Eğilme dayanımı).....	60
Şekil 5.4. Etkileşimler grafiği (Eğilme dayanımı)	61
Şekil 5.5. Artıkların grafiksel analizi (Eğilme dayanımı).....	62
Şekil 5.6. Normal olasılık grafiği (Sertlik)	63
Şekil 5.7. Pareto grafiği (Sertlik)	63
Şekil 5.8. Ana etkiler grafiği (Sertlik).....	65
Şekil 5.9. Etkileşimler grafiği (Sertlik).....	66
Şekil 5.10. Artıkların grafiksel analizi (Sertlik).....	67

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Ülkemizde yapılan tez çalışmaları	9
Çizelge 2.2. ABS ve PET-G malzemelerin bazı özellikleri	11
Çizelge 3.1. Eklemeli imalat ile CNC talaşlı imalat arasındaki farklar	21
Çizelge 3.2. Eklemeli imalat yöntemleri	24
Çizelge 3.3. EBM ve SLS yöntemine ait bazı özellikler.....	28
Çizelge 4.1. Deney faktörleri ve seviyeleri	55
Çizelge 4.2. Tasarım matrisi	56
Çizelge 5.1. Eğilme dayanımı varyans analizi sonuçları	57
Çizelge 5.2. Eğilme dayanımı için tahmin edilen etkiler ve katsayılar.....	59
Çizelge 5.3. Sertlik deneyi varyans analizi sonuçları	62
Çizelge 5.4. Sertlik deneyi için tahmin edilen etkiler ve katsayılar.....	64

1. GİRİŞ

3D yazıcılar, günümüzde modern teknolojinin getirdiği en önemli mühendislik ürünlerinden birisi olup her geçen gün farklı alanlarda kullanımı artmaktadır. Özellikle endüstriyel uygulamalarda tasarımcılar tasarladıkları ürünün prototipini 3D yazıcıları kullanarak yapmaktadır. 3D yazıcıların çıkış noktası hızlı prototip imal etme olduğu için bu teknolojinin ilk adı Hızlı Prototiplemedir (Rapid Prototyping-RP). Ancak zamanla imalat sektöründe de direkt olarak kullanılacak parçaların imalatı için 3D yazıcılar kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle imalat sektöründe kullanılan 3D yazıcılar yüksek teknoloji ve pahalı makineler olup ileri seviyede hassasiyetle parça üretebilmektedirler. Bu sayede karmaşık şekilli parçaların üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu teknolojiye artık nihai ürün üretme kapasitesine ulaşıldığı için hızlı prototipleme terimi yetersiz kalmakta olup yerine eklemeli imalat (Additive Manufacturing - AM) terimi kullanılmaktadır. Günümüzde popüler olarak 3D basım terimi de kullanılmaktadır. Eklemeli imalat makinelerine sıklıkla 3D yazıcılar denmektedir. Aslında üç boyutlu basım tekniği eklemeli imalat tekniklerinden sadece biridir.

3D yazıcı teknolojisindeki gelişmeler çok hızlı bir şekilde olmakta ve pek çok endüstri kolu için büyük önem arz etmektedir. Hızlı prototiplemenin (RP) hem tasarımda hem de küçük partili üretimlerde kullanışlı olduğunu kanıtlanmıştır. Yazıcı teknolojisinde özellikle Eriyik Yığılma Tekniği (Fused Deposition Modelling – FDM) teknolojisi çok hızlı yayılmaktadır. FDM teknolojisi ucuz bir yöntem olmasının yanında yazılımın açık kaynaklı olması teknolojinin yayılmasını hızlandırmıştır. Bu şekilde kullanıcılar kendi yazıcılarını kendileri üretebilir hale gelmişlerdir. Kendi kendini üretebilen, açık kaynak kodlu, ucuz, 100-µm çözünürlüğe sahip, yazıcılar yapılabilmektedir.

Bu alanda yapılan araştırmalar ve çalışmalar 3D yazıcıların çok farklı alanlarda çok farklı amaçlar için kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Yine yapılan literatür araştırmaları yazıcıların parça çıkarma hassasiyetine yönelik çok fazla çalışma bulunduğunu göstermektedir. Birçok firma farklı amaçlara yönelik farklı eklemeli imalat yöntemleriyle çalışan yazıcıları üretmektedirler. 3D yazıcılar

Özellikle tıp, uzay, havacılık, otomotiv, kuyumculuk gibi sektörlerde kullanılmaktadırlar.

3D yazıcıların gelişmesi ve bu yüksek teknolojiyi yazıcıların imalat sektöründe kullanılması yeni gelişmeleri de beraberinde getirmiştir. 3D yazıcılar klasik imalat yöntemlerine iyi bir alternatif olma yolunda ilerlemektedir. Hatta 3D yazıcılar teknolojinin daha da ilerlemesiyle imalat yöntemlerinde büyük değişikliklere neden olabilir. Eklemeli imalat yöntemleriyle üretimin tek bir noktadan değil de parçalı bir şekilde yapılabilir hale gelmesi beklenmektedir. Bu sayede birden fazla noktada üretim merkezleri oluşturulup stok, lojistik, üretim ve tedarik süreçleri açısından avantaj sağlanması hedeflenmektedir. Ayrıca bu şekilde depo ihtiyaçlarının en aza indirgenmesi planlanmaktadır.

Tez kapsamında yapılan çalışmada FDM tipi bir 3D yazıcı tasarlanıp imal edilmiştir. Yazıcının baskı boyutları 500x500x500mm'dir. Yazıcının özel olarak tasarlanıp imal edilmesinin nedeni yazıcının modifikasyona daha açık olması ve daha düşük maliyetle yapılabilmesidir. ABS ve PET-G filamentler kullanılarak imal edilen yazıcıdan eğilme numuneleri basılmıştır. Deney numuneleri 2^k faktöriyel deney tasarımı kullanılarak hazırlanmıştır. Eğilme deneyleri yapıldıktan sonra numuneler üzerinden sertlik ölçümü yapılmıştır. Numunelerden elde edilen veriler kullanılarak gerekli istatistiksel analizler yapıp sonuçlar gösterilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Eklemeli imalat teknolojisinin ilk çıkış noktası stereolitografi olup Charles Hull tarafından 1980'li yılların ortalarında icat edilmiştir. Bunun dışında literatürde eriyik yığma tekniği, seçici lazer sinterleme, katmanlı nesne imalatı gibi birçok farklı eklemeli imalat teknolojisi vardır. Pham ve Gault (1998) çalışmalarında, mevcut teknolojilerin bir özetinden bahsedip bu teknolojilerin güçlü ve zayıf yanlarıyla ilgili yorumlara yer vermiştir. Salmi vd (2013) çalışmalarında seçici lazer sinterleme (SLS), üç boyutlu baskı (3DP) ve çoklu püskürtme (PolyJet) metodlarıyla üretilen tıbbi modellerin doğruluğunu kıyaslamışlardır. İbrahim vd (2009) mandibular anatominin kopyasını çıkarmak ve boyutsal hatalarını incelemek için SLS, 3DP ve PolyJet tekniklerini kullanarak üretilen alt çene kemiklerini boyutsal olarak karşılaştırmışlardır. Szykiedans ve Credo (2016) FDM ve SLA (Stereolitografi) yazıcılardan basılan parçaların çekme gerilmelerini ve elastisite modüllerini kıyaslamışlardır. Testleri cam elyaf takviyeli polietilen tereflatat glikol (Z-Glass) ve Nobel yazıcılarında kullanılan fotorezistiren reçine üzerinde deneyerek yapmışlardır. Trosch vd (2016) dövme, döküm ve seçici lazer eritme (Selective Laser Melting-SLM) metodlarıyla üretilmiş Inconel 718 parçaların mikro yapılarını ve mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Farklı imalat yöntemleriyle üretilmiş parçaların çekme deneylerini yapmışlardır. Çekme deneylerini oda sıcaklığında, 450oC ve 650 oC derecede gerçekleştirmişlerdir. Singh vd (2014) model malzemesi olarak mum (wax) ve Akrlonitril Bütadien Stiren (ABS) kullanılarak hassas döküm işlemleri ile hazırlanan kalça eklemine boyutsal hassasiyeti için karşılaştırma yapmışlardır.

Ippolito vd (1995) çalışmalarında hızlı prototipleme (RP) tekniklerinin boyut hassasiyetini ve yüzey bitirme durumunu araştırmışlar ve bir hızlı prototipleme (RP) iş parçasının kalitesini ANSI-IS0 standartlarına göre kontrol eden yeni bir teknik sunmuşlardır. Ayrıca RP modelinin yüzeyini tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemişlerdir. Boschetto ve Bottini (2016) çalışmalarında eriyik yığma tekniğinin (FDM) boyutsal hassasiyetini geliştirmeye yönelik bir araştırma yapmışlardır. Boyutsal sapmaları telafi etmek için yüzeylere matematiksel bir formülasyonla tanımlanan anizotropik bir ofset uygulamışlardır. Lieneke vd (2016)

eriyik yığıma tekniği (FDM) için standart parametreleri kullanarak boyut toleranslarını deneysel olarak belirlemeye çalışmışlardır. Deneysel olarak belirlenmiş sapsmalara dayanarak boyutsal toleransları türetmişlerdir. Griffiths vd (2016) FDM tekniğinde yapım parametrelerinin performans ve verimlilik çıktılarına etkilerini ölçmek için bir deney tasarımı oluşturmuşlardır. Raghunath ve Pandey (2007) çalışmalarında seçici lazer sinterleme tekniğinde çekme payının lazer gücü, ışın hızı, tarama alanı, parça yatak sıcaklığı ve tarama uzunluğu ile ilişkisini araştırmışlar ve Taguchi yöntemiyle oluşturulan çekme modeli yardımıyla boyut hassasiyetini geliştirmişlerdir. Sood vd (2009) FDM tekniğiyle basılmış ABS P400 (Akrilonitril Butadin-Stiren) parçanın tabaka kalınlığı, parça oryantasyonu, tarama açısı, tarama genişliği ve hava boşluğunun boyutsal hassasiyete olan etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Test numunesinin uzunluğu, genişlik ve kalınlığındaki yüzdesel değişimini en aza indirmek amacıyla Taguchi'nin deney tasarımı kullanılarak optimumun parametreler belirlenmiştir. Ölçü hassasiyetini tahmin etmek için yapay sinir ağlarını (ANN) kullanmışlardır. Braian vd (2016) farklı dört ticari eklemeli imalat makinası için tolerans kıyaslaması yapmışlar ve dışçilikle alakalı iki geometrik şekili ISO_12836;2012 ek A ve B'ye göre tersine mühendislik ile elde etmişlerdir. Nunez vd (2015) FDM makinalarında ABS malzeme kullanarak ölçü toleransı, yüzey kalitesi ve düzlülüğü ile ilgili sonuçlar elde etmişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışmalarda iki farklı yoğunluk (düşük ve yüksek) ve katman kalınlığı (0.178mm ve 0.254mm) kullanmışlar ve en iyi ölçü toleransı sonuçları, en yüksek katman kalınlığı (0.254mm) ve yüksek yoğunluk (%100 yoğunluk) olduğu durumda gerçekleştiğini en fazla hata 36µm hata ile tespit etmişlerdir. En iyi yüzey kalitesi, en az düzlülük hatası, en düşük katman kalınlığı (0178mm) ve yüksek yoğunluk (%100 yoğunluk) olduğu durumda elde edildiğini belirtmişlerdir. Chohan vd (2016a) çalışmalarında, buhar uygulanmış FDM üretimi parçaların ortalama yüzey pürüzlülüğünün matematiksel modelini geliştirmek için Taguchi ve ANOVA (Analysis of Variance) yöntemlerini kullanmışlardır. Buckingham Pi teoremini kullanarak ikisi FDM ve dördü buharla yüzey düzeltme olmak üzere altı adet birbirleriyle ilişkili giriş parametresi türetmişlerdir. Çalışmalarında yüzey düzeltme süresinin ve çevrim sayısının yüzey pürüzlülüğüne olan etkilerini araştırıp istatistiksel analizler ile ortaya koymuşlardır. Kurdukları model buhar uygulanmış FDM parçaların yüzey pürüzlülüğünün yüzdesel olarak değişimini düzeltme zamanına ve döngü sayısına bağlı olarak tahmin etmektedir. Kaveh vd (2015) hassas

dökümler için FDM yöntemini kullanarak model üretmişlerdir. Çalışmalarında baskı parametrelerinin imalat parçasının hassasiyetine ve iç boşluğuna olan etkilerini araştırmışlardır. Yüksek etkili polistiren (HIPS) malzemelerde en uygun baskı parametrelerini elde etmek için bir deneysel yöntem sunmuşlardır. Bu parametreler ekstrüzyon sıcaklığı ve kafes genişliğidir. Tasarlanan ile gerçek ölçümler arasındaki sistematik hataları en aza indirmek için kalibrasyon, delik ve kalınlık faktörleri istatistiksel yöntemlerle en uygun şekilde belirlenmiştir. Chohan vd (2016b) çalışmalarında FDM makinalardan basılan ABS parçaların yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmek için buharla düzleştirme metodu (Vapour smoothing - VP) üzerine yoğunlaşmışlardır. Biyomedikal amaçla kullanılacak ABS parçaların sürdürülebilir olması için FDM yöntemi ile VP tekniği süreç parametrelerini optimize etmişlerdir. Ahn vd (2009) çalışmalarında FDM yönteminde yüzey pürüzlülüğünü gidermek adına yüzey pürüzlülüğü dağılımını ifade eden teorik bir model geliştirmişlerdir. Boschetto ve Bottini (2015) çalışmalarında, bitiş operasyonundan sonraki yüzey kalitesini tahmin etmek için, akıtılmış filamentin geometrik modelini oluşturmuşlardır. Model katman kalınlığı, akıtma açısı ve operasyon boyunca akan malzeme kütlesi gibi FDM süreç parametrelerine bağlıdır. Bunlar miktarıdır. Yüzey kalitesinin tahmini, çalışma süresinin fonksiyonu olarak ters kare ilişkisini gösteren yüzey pürüzlülüğü ölçme prosedürü ile istatistiksel olarak teyid edilmiştir.

Singh vd (2016a) yaptıkları çalışmada tek parçacık boyutunun, çift parçacık boyutunun ve AL_2O_3 le kuvvetlendirilmiş üçlü parçacık boyutunun mekanik özelliklere etkilerini araştırmışlardır. Bu mekanik özellikler uzama (%), çekme dayanımı, basma dayanımı ve Young modülüdür. Croccolo vd (2013) FDM yöntemindeki baskı parametrelerinin, çekme muhavemetine ve sertliğe olan etkilerini inceleyerek sorunun hem sayısal hemde deneysel olarak ele alınmasını amaçlamışlardır. Parça kenarındaki kontur sayısına ve diğer baskı parametrelerini ele alarak mukavemet ve sertlik özelliklerini tahmin eden bir analitik model geliştirmişlerdir. Tarama yolu (boyutlar, kontur sayısı, tarama açısı) belirtildikten sonra, FDM parçaların mekanik davranışlarını tahmin etmeyi amaçlamışlardır. Teorik verilerle deneysel sonuçların arasında %4'lük bir hata tespit etmişlerdir. Mohamed vd (2017) çalışmalarında belirli bir tarama tasarımı kullanarak FDM süreç koşulları ile zamana bağlı mekanik özellikler arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Raut vd (2014) baskı yönünün mekanik özelliklere ve toplam maliyete olan etkilerini

araştırmışlardır. Deneyleri ABS malzeme kullanarak ticari bir FDM makinasında gerçekleştirmişlerdir. Çekme ve basma deney numunelerini ASTM standartlarına göre hazırlamışlardır. Numuneleri üç ekseninde farklı baskı yönlerinde hazırlamışlardır. Deneysel çalışmalardan elde ettikleri verilere göre baskı yönünün çekme, basma mukavemetine ve maliyete olan etkilerinin büyük ölçüde olduğunu gözlemlemişlerdir. Espin vd (2015) yaptıkları çalışmada FDM parçaları simüle etmek için model oluşturmuşlardır. Sonlu elemanlar analizi simülasyonlarını doğrulamak için deneysel testler yapmışlardır. Naghieh vd (2016) yaptıkları çalışmada katman penetrasyonunun kemik yapı iskelesinin mekanik özellikleri ile ilişkili olan katmanlar arası adhezyona olan etkilerini ölçmek için parametrik bir sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Bu modeli doğrulamak için biyoyumlu ve biyolojik olarak parçalanabilen polilaktik asit kullanarak FDM metodu ile ürettikleri kemik yapıları ile basma deneyi yapmışlardır. Bütün kemik numuneleri ile basma testi yapıp, numunelerin elastik modüllerini elde etmişlerdir. Deneysel verilerle model verileri arasında bir uyum olduğunu gözlemlemişlerdir. Dawoud vd (2016) yaptıkları çalışmada FDM ve enjeksiyon kalıplama ile üretilen ABS numunelerin mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır.

Alvarez vd (2016) yaptıkları çalışmada ABS'den değişik doluluk oranlarında hazırladıkları deney numunelerinin mekanik özelliklerindeki değişimi araştırmışlar ve numunelerin doluluk oranının artması ile çekme dayanımının yükseldiğini tesbit etmişlerdir. Hwang vd (2015) 190, 200, 210 ve 220°C'de basılan ABS numunelerin çekme dayanımlarının baskı sıcaklığı ile birlikte arttığını gözlemlemişlerdir. Tymrak vd (2014) ABS ve PLA malzemelerde katman kalınlığı ve baskı oryantasyonunun çekme dayanımına ve elastisite modülüne etkilerini incelemişlerdir. Numuneleri dört farklı yazıcıdan basmışlardır. ABS malzeme için çekme dayanımını ortalama 28,5 MPa, PLA malzeme için ise ortalama 56,6 MPa olarak bulmuşlardır. Elastisite modülünü ise ABS için ortalama 1807 MPa, PLA için ise ortalama 3368 MPa olarak tespit etmişlerdir. Johansson (2016) yaptığı çalışmada PLA malzemelerde baskı sıcaklığı, debi, baskı hızı, katman kalınlığı ve oryantasyonun çekme dayanımına olan etkilerini araştırmıştır. Akış hızının artmasıyla çekme testinde maksimum yükünde arttığı görülmüştür. Baskı sıcaklığının artması ile de çekme testindeki maksimum yük artmaktadır. Katman kalınlığının ve baskı hızının artması ise maksimum yükü azaltmaktadır. Lanzotti vd (2015) PLA filamentten tarama oryantasyonu, katman

kalınlığı ve dış çeper sayısı gibi parametreleri göz önüne alarak FDM tekniğı ile çekme numuneleri üretmişlerdir. Deneysel sonuçlardan tarama orantasyon açısının artmasıyla çekme dayanımının azaldığını gözlemlemişlerdir. Dış çeper sayısının artması ise çekme dayanımını arttırmıştır. Carneiro vd (2015) çalışmalarında Polipropilen (PP) malzemelerde oryantasyonun, katman kalınlığının ve doluluk oranının çekme dayanımına ve Young Modülüne olan etkilerini araştırmışlardır. Katman kalınlığının ve doluluk oranının artması ile çekme dayanımı ve Young Modülü artmıştır. Wittbrodt ve Pearce (2015) çalışmalarında 190, 200, 210 ve 215°C'de basılan PLA numunelerin akma dayanımlarını araştırmışlar ve en yüksek akma dayanımı 215°C'de yapılan numunelerde, en düşük akma dayanımı ise 200°C'de yapılan numunelerde gerçekleştiğini tespit ettiklerini rapor etmişlerdir.

Chacon vd (2017) PLA malzemelerde oryantasyon, katman kalınlığı ve baskı hızının çekme ve eğilme dayanımına olan etkilerini araştırmışlardır. Numuneleri dik, yatay ve kenardan olmak üzere üç farklı oryantasyonda basmışlardır. Katman kalınlıklarını 0,06, 0,12, 0,18 ve 0,24mm, baskı hızları ise 20, 50 ve 80mm/sn olarak almışlardır. Dik olarak basılmış modellerde baskı hızının artması çekme ve eğilme direncini azaltmaktadır. En iyi mekanik özellikler numunelerin kenardan basılması durumunda gerçekleşmiştir. Rankouhi vd (2016) yaptıkları çalışmada farklı tarama açılarında ve farklı katman kalınlıklarındaki numunelerin çekme dayanımlarını ve elastisite modüllerini elde etmişlerdir. Katman kalınlıklarını 0,2 ve 0,4mm, tarama açılarını ise 0°, 45° ve 90° almışlardır. Çekme testi sonuçlarına göre 0,2mm katman kalınlığının daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Wu vd (2015) polieter-eter-keton (PEEK) malzemenin tarama açısı ve katman kalınlıklarını değiştirerek mekanik özelliklerini tespit etmeye çalışmışlardır. Elde ettikleri verileri ABS malzemenin mekanik özellikleri ile kıyaslamışlardır. Katman kalınlıklarını 0,2, 0,3 ve 0,4mm, tarama açılarını ise 0°/90°, 30°/-60° ve 45°/-45° olarak belirlemişlerdir. PEEK için en uygun mekanik özellikleri 0.3mm katman kalınlığında ve 0°/90° tarama açısında elde etmişlerdir. PEEK malzemenin çekme dayanımını 56 MPa olarak belirlemişlerdir. Çekme, eğilme ve basma dayanımı olarak PEEK malzemenin ABS malzemedan daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Durgun vd (2014) FDM tekniğı ile ABS filamentten 0°, 30°, 45°, 60° ve 90° tarama açılarına dik, yatay ve kenardan olmak üzere üç farklı oryantasyonda çekme ve eğilme numuneleri basmışlardır. Oryantasyonun mekanik özelliklere

etkisinin tarama açısından daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Yatay doğrultuda ve 0° tarama açısında en iyi mekanik sonuçların elde edildiğini tespit etmişlerdir. Luzanin vd (2014) çalışmalarında PLA malzemelerde yığılma açısı, katman kalınlığı ve doluluk oranının eğilme dayanımına etkilerini araştırmışlardır. Doluluk oranı olarak %10, %20 ve %30 dolulukta eğilme numuneleri basmışlardır. Doluluk oranının artmasının eğilme dayanımını arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Eklemeli imalat yöntemleri döküm endüstrisinde de kullanılmakta olup bazı çalışmalarda; naylon-6, Al ve Al₂O₃ tozlarından yapılmış kompozit filamentler ile FDM metodu kullanılarak hassas döküm modelleri oluşturulmuştur (Singh ve Singh, 2016a; Singh ve Singh, 2015a; Singh ve Singh, 2016b; Singh vd, 2016b; Singh ve Singh, 2015b; Singh ve Singh, 2015c).

Eklemeli imalat yöntemleri tedarik yönetim süreçlerinde de avantaj sağlamaktadır. Eklemeli imalat tekniği ile parçalı üretim sistemine geçilebilir. Dolayısıyla bu teknik kullanılarak lojistik ve dopalama faaliyetlerinin azalması öngörülmektedir (Spalt ve Bauernhansl, 2016; Barz vd, 2016; Bogers vd, 2016; Pour vd, 2016; Khajavi vd, 2014; Emelogu vd, 2016; Durao vd, 2016).

Ülkemizde eklemeli imalat alanıyla ilgili çalışmalarda genellikle FDM tekniği üzerinde durulmuştur. Çizelge 2.1'de ülkemizde eklemeli imalat alanında yapılan bazı önemli tez çalışmaları gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Ülkemizde yapılan tez çalışmaları

Kaynak	Konu	Yazıcı türü
Uysal (2000)	Hızlı prototip üretimi	SLA, FDM
Ekşi (2001)	Kalıp imalatında eklemeli imalatın kullanılması	SLA, FDM
Şenol (2001), Ermurat (2002), Üstümkol (2003), Kan (2006), Gültekin (2003), Çavdar (2005), Akalın (2006), Akınca (2006), Yazıcıoğlu (2007), Bentürk (2009), Cerit (2009), Çelik (2015), Oktay (2015), Güler (2016), Sezen (2016)	Eklemeli imalat tekniklerinin incelenmesi	Hepsi
	3D yazıcı imalatı ve uygulamaları	FDM
İlkgün (2005), Jande (2009)	Lazer sinterleme ile ilgili çalışmalar	SLS
Özüğür (2006)	Eklemeli imalat ile model üretimi	FDM, SLA, SLS, BJ
Doğan (2007)	Mikro ve nano hızlı prototipleme ve uygulamaları	Elektro Biriktirme
Bircan (2008)	FDM uygulamaları için dilimleme çalışması	FDM
Kırelli (2008), Çantı (2016)	Filament üretimi	FDM
Apak (2010)	Farklı yazıcılarda üretilen parçaların kıyaslanması	FDM, SLA, SLS, BJ
Çabuk (2011)	3D yazıcıdan parça imalatı ve mekanik testleri	FDM
Kendüzler (2011)	FDM yöntemi ile karmaşık parça üretimi	FDM
Aydın (2014), Alagöz (2016), Okucu (2016),	Medikal çalışmalar	FDM
Karakoç (2016)	Eklemeli imalat ile hafif parça imalatı	DMLS

Yapılan literatür araştırmalarında filament türü geliştirme, konum ve hareket hassasiyeti iyileştirme, filamentlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan mekanik testler, mekanik testler için deney tasarımı çalışmaları, yüzey kalitesi geliştirme ve tahmin etme, baskı maliyeti düşürmeye yönelik çalışmalar, klasik imalat yöntemleri ile eklemeli imalat yöntemlerinin kıyaslanması, eklemeli imalat yöntemleri ile döküm modeli oluşturma ve 3D yazıcıların tedarik yönetim süreçlerinde kullanılması gibi çalışmalar mevcuttur.

Bu çalışmada FDM tipi üç boyutlu yazıcı imalatı yapılmıştır. FDM tekniğinin seçilmesinin nedeni imalatının düşük maliyetli olması ve açık kaynak kodlu yazılımına internet üzerinden erişiliyor olmasıdır. FDM tipi yazıcının tasarımı yapılırken büyük çaplı bir yazıcı imal etmek istenmiştir. Bunun nedeni yazıcının geliştirilebilmeye açık olabilmesi, döküm modeli gibi büyük parçaların tek parça halinde çıkarabilmesi gibi nedenlerdir. FDM tipi bir yazıcının satın alınmayıp imal edilmesinin nedeni ise büyük çaptaki yazıcıların çok pahalı olması ve satın alınacak yazıcıya geliştirmek için dışarıdan çok fazla müdahale edilemeyecek olmasıdır. İmal edilen yazıcının baskı boyutlarının ne kadar büyük olacağına karar verilmesinde de yine maliyet etkili olmuştur. Çünkü yazıcının parça basma boyutu büyüdükçe maliyeti daha da fazla artmaktadır. Bütün bu faktörler göz önünde bulundurularak çalışma kapsamında imal edilen üç boyutlu yazıcının baskı boyutlarının 500x500x500mm olmasına karar verilmiştir. Ayrıca piyasada satılan FDM tipi üç boyutlu yazıcılarda hareket iletiminde genellikle triger kayışı ve lineer rulman kullanılmaktadır. İmalatı yapılan yazıcıda ise hareket iletiminin daha hassas olması için vidalı mil-bilyalı somun ve lineer kızak-araba sistemi kullanılmıştır. Çalışmada büyük boyutlu, baskı kalitesi yüksek ve düşük maliyetli bir yazıcının imal edilmesi amaçlanmıştır. İmal edilen yazıcıdan eğilme numuneleri basılmıştır. Numunelerin eğilme testleri yapılmıştır. Ayrıca eğilme numuneleri üzerinden sertlik değerleri ölçülmüştür.

FDM tipi üç boyutlu yazıcıdan elde edilen numuneler ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren) ve PET-G (Polietilen Teraftalat Glikol) malzemelerden basılmıştır. Bu iki malzeme FDM tipi yazıcılarda sıklıkla kullanılan malzemelerdir. Günlük hayatta ise ABS ve PET-G birçok alanda kullanılmaktadır. ABS'in kullanım alanları olarak müzik enstrümanları (plastik klarinet, piyano tuşları), otomotiv döşeme malzemeleri, otomobil ayna ve farkları, telefon gövdeleri, medikal aletler, legolar, çanta, bavul ve beyaz eşya parçaları örnek verilebilir. PET-G'nin kullanım alanları ise fotoğraf filmleri, manyetik kayıt filmleri, ambalajlar, gıda endüstrisi ve tarım sektörü gibi alanlardır. Bu malzemelerin dışında FDM tipi yazıcılarda PLA, Naylon, PETT, ASA, PP, TPE, PCTPE, TPU, katkılı filamentler (karbon fiber, alüminyum katkılı) gibi malzemeler filament olarak kullanılmaktadır. Çizelge 2.2'de ABS ve PET-G malzemelerin bazı özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. ABS ve PET-G malzemelerin bazı özellikleri

Kaynaklar	Filament Türü	Eğilme Direnci (MPa)	Sertlik
Anonim (2017a)	PET-G	79	-
Anonim (2017b)	PET-G	39,2-88,9	-
Anonim (2017c)	PET-G	68.6	-
Anonim (2017d)	PET-G	-	78 (Shore D)
Anonim (2017e)	PET-G	-	78 (Shore D)
Anonim (2017f)	ABS	61	109,5 (Shore D)
Anonim (2017g)	ABS	75-78	86
Anonim (2017h)	ABS	60	-
Anonim (2017i)	ABS	77.5	108 (Rockwell)
Anonim (2017j)	ABS	60	-

3. EKLEMELİ İMALAT

3.1. Eklemeli İmalat Hakkında Genel Bilgiler

Eklemeli imalat, hızlı prototipleme denilen ve yaygın olarak 3 boyutlu baskı olarak adlandırılan teknoloji için resmileştirilmiş terimdir. Hızlı prototipleme terimi, birçok endüstride bir ürünün yada bir sistemin ticarileşmeden veya işleme konmadan önce hızlı bir şekilde prototipinin hazırlanmasında bu teknolojiye faydalandığı için kullanılmaktadır. İleriki modellere ve son olarak nihai ürüne ulaşmak için hızlı bir şekilde prototip yapmak için bu teknoloji geliştirilmiştir. Yönetim danışmanları ve yazılım mühendisleri, müşterilerin ve diğer paydaşların gelişim süreci boyunca fikirleri test etmesine ve geri bildirimde bulunmasına olanak tanıyan bu sisteme iş ve yazılım çözümleri geliştirme sürecini tanımlamak için hızlı prototipleme terimini vermişlerdir. Ürün geliştirme bağlamında, hızlı prototipleme terimi, dijital model verilerinden doğrudan fiziksel prototipler üreten teknolojileri tanımlamak için yaygın bir şekilde kullanılmıştır. İlk önce prototipleme için geliştirilen bu yeni teknoloji şimdi daha birçok amaç için kullanılmaktadır.

Hızlı prototipleme teknolojisinin kullanıcıları, bu terimin yetersiz olduğunu ve özellikle teknolojinin daha yeni uygulamalarını etkili bir şekilde tanımlamadığını fark etmişlerdir. Bu makinelerden üretilen çıktılarının kalitesindeki gelişmeler, bu teknolojinin nihai ürün yapımında kullanılmasına olanak sağlamıştır. Birçok parça aslında bu makinelerde doğrudan üretilmektedir, bu yüzden onları "prototipler" olarak etiketlemek mümkün değildir. ASTM (American Society of Testing and Materials) bünyesinde oluşturulan bir teknik komite tarafından yeni bir terminolojinin kabul edilmesi konusunda anlaşılmıştır. Halen tartışmalar devam etmekle birlikte, yakın zamanda kabul edilen ASTM fikir birliği standartları artık "eklemeli imalat" terimini kullanmaktadır (Anonim, 2017b).

Kısaca eklemeli imalat olarak anılan bu teknolojinin temel ilkesi, başlangıçta üç boyutlu bir Bilgisayar Destekli Tasarım (3D CAD) sistemi kullanılarak üretilen bir katı modelin, proses planlama ihtiyacı olmaksızın doğrudan imal edilebilir olmasıdır. Bu gerçekte görüldüğü kadar basit olmasa da eklemeli imalat teknolojisi,

3 boyutlu karmaşık nesnelerin katı model (CAD) verilerinden doğrudan üretilme sürecini önemli ölçüde basitleştirmektedir. Diğer imalat proseslerinde, parçanın kısımlarının imal edilme sırasını, hangi takımların ve proseslerin kullanılması gerektiğini ve parçayı tamamlamak için hangi ek aparatların gerekli olabileceğini belirlemek için parça geometrisinin dikkatli ve detaylı bir analizinin yapılması gerekmektedir. Bütün bunların aksine eklemeli imalatta sadece basit ölçü detayları, hangi malzemenin kullanılacağı ve eklemeli imalat makinasının nasıl kullanılacağı gibi basit düzenlemelerin yapılması yeterli olmaktadır.

Eklemeli imalatta parça basma mantığı oluşturulan katmanların üst üste birleştirilmesidir. Her bir tabaka orjinal CAD verilerinden türetilen parçanın ince bir kesitidir. Her tabaka ne kadar inceltirse, parça orijinala o kadar yakın olacaktır. Bugüne kadar piyasaya sürülen tüm eklemeli imalat makineleri katman tabanlı bir yaklaşım kullanmakta ve bazı farklılıklara sahiptir. Bu farklılıklar kullanılan malzemeler, katmanların nasıl oluşturulduğu ve katların birbirlerine nasıl bağlandığı gibi özellikler olup parçanın yüzey hassasiyeti ve doğruluğu, malzeme özellikleri ve mekanik özellikler gibi etmenleri belirlemektedir. Ayrıca, parçanın ne kadar hızlı bir şekilde üretilebileceği, üretildikten sonraki işlemlerin ne kadar olacağı, kullanılan eklemeli imalat makinesinin boyutu ve makinenin ve prosesin toplam maliyeti gibi faktörleri de belirlemektedir.

3.2. Eklemeli İmalat Parçalarının Kullanımı

Eklemeli imalat başlangıçta, geliştirilen ürünlerin görsel modellerini elde etmek için kullanılmıştır. Tasarımcıların tasarımlarını sunarken, gerçek model kullanmaları çizimlerden ve animasyonlardan çok daha yararlı olduğu bilinmektedir. Çizimler daha hızlı ve kolay oluşturulabilir ancak tasarımın doğrulanması için neredeyse her zaman gerçek modele ihtiyaç duyulmaktadır.

Eklemeli imalatın başlangıçta sadece model oluşturmada kullanılırken zamanla bu teknoloji malzeme, doğruluk ve çıktı kalitesi bakımından dahada gelişmiştir. Modeller form, uyum ve işlev hakkında bilgi sağlamak için kullanılmaktadır. İlk modeller, bir tasarımın genel amacını ve şeklini değerlendirmek için kullanılmıştır. Boyutsal doğruluğun geliştirilmesiyle modeller, montaj için gerekli olan boyutsal ölçülerini test etmek için kullanılmıştır. Malzeme özelliklerinin

gelişmesiyle birlikte ise artık modeller parçanın işlevini de test edebilir hale gelmiştir.

Eklemeli imalat teknolojisini yalnızca modeller oluşturmak için yararlı olduğunu söylemek, bu teknolojiyi yanlış değerlendirmek anlamına gelir. Eklemeli imalat, süreç zincirlerini oluşturmak için diğer teknolojiler ile birlikte kullanıldığında, ürün geliştirme zamanlarını ve maliyetlerini önemli ölçüde azaltmak için kullanılabilir. Bazı eklemeli imalat makinalarıyla son kullanıma uygun parçalar üretilmektedir. Bu da, terminolojinin neden hızlı prototiplemeden eklemeli imalata dönüştüğünü açıklamaktadır. Ayrıca yüksek güçte lazer kullanımı ile parçalar artık birçok metal malzemeden yapılabilmektedir.

3.3. Eklemeli İmalat Genel Süreci

Eklemeli imalat, sanal CAD (Computer Aided Design – Bilgisayar Destekli Tasarım) ortamından gerçek parça oluşumuna kadar birçok adım içermektedir. Eklemeli imalatta bazı ürünlerin imalatında bir takım farklılıklar olacaktır. Küçük, nispeten basit ürünlerin modellerini oluşturmada sadece eklemeli imalat teknikleri kullanılabilirken daha fazla mühendislik içeren, daha büyük ve karmaşık ürünlerin geliştirme süreci boyunca çok sayıda aşama ve tekrarlarma olabilir. Ürün geliştirme sürecinin ilk aşamalarında parçaların çok hassas üretilmesi gerekmeyebilir. Çünkü bu süreçte eklemeli imalat hızlı olması açısından seçilmiştir. Sürecin sonraki aşamalarında parçaların kullanılmadan önce dikkatli bir şekilde temizlenmesi ve işlenmesi gerekebilir (zımparalama, boyama vs.). Eklemeli imalatın avantajı çok karmaşık formları kolay bir şekilde yapılabilmesidir. Klasik talaşlı imalatta karmaşık parçaların yapımı zordur, birden fazla imalat süreci gerekebilir. Dolayısıyla tasarım sürecinde talaşlı imalatın zorlukları göz önünde bulundurulmalıdır. Burada eklemeli imalatın bir diğer avantajı ise tasarımcıyı daha özgür kılabilmesidir.

3.3.1. CAD süreci

Bütün eklemeli imalat parçaları dış geometriyi tamamiyle tanımlayan bir yazılım modelinden başlamalıdır. Burada hemen hemen her CAD katı modelleme programı çizim üç boyutlu katı model olması kaydıyla kullanılabilir. Ayrıca tersine mühendislik ekipmanlarıyla (lazer, optik tarayıcı) yüzey taranarak üç boyutlu model kısa zamanda çok hızlı bir şekilde elde edilebilir.

3.3.2. STL formatına dönüştürme

Neredeyse her eklemeli imalat makinesi, standart haline gelen “STL” dosya biçimini kabul eder ve günümüzde hemen hemen her CAD sisteminde mevcuttur. Bu dosya, orjinal CAD modelin dış yüzeylerini tanımlayarak dilimlerin hesaplanması için temel oluşturur.

3.3.3. STL dosyasını dilimleme

CAD programlarında çizilen modelin STL formatına dönüştürüldükten sonra özel programlar aracılığıyla dilimlenmesi gerekmektedir. Çünkü eklemeli imalat makinalarında parça basılırken katmanların oluşturulmuş olması gerekir. Bu özel programlar vasıtasıyla katman kalınlığı ayarı yapılabilir, parça ölçeklendirilebilir, baskı hızı tayin edilebilir, parçanın içi tamamen dolu veya istenilen boşlukta olacak şekilde ayarlanabilir.

3.3.4. Makina ayarları

Eklemeli imalat makinesi yada popüler adıyla 3D yazıcı parça basım işleminden önce düzgün bir şekilde kurulmalıdır. Kurulum ayarları malzeme kısıtları, enerji kaynağı, katman kalınlığı, zamanlama gibi ayarlardır.

3.3.5. Basım aşaması

Parçanın oluşturulması esas olarak otomatikleştirilmiş bir süreç olup makine denetim olmadan baskıya devam edebilir. Malzeme bitmesi, güç veya yazılım aksaklıkları gibi problemlerden kaçınmak için makinenin izlenmesi yeterlidir.

3.3.6. Parçanın makinadan çıkarılması

Yazıcıda baskı işlemi tamamlandıktan sonra parçanın çıkarılması gerekmektedir. Parça çıkarılırken makine içi sıcaklığın düşük olduğundan veya hareketli parça olmadığından emin olmak gerekir.

3.3.7. Temizleme işlemleri

Parçaların makineden çıkarıldıktan sonra kullanıma hazır olmadan önce bir miktar ek temizlemeye tabi tutulması gerekebilir. Parçalar bu aşamada zayıf olabilir veya parçaların temizlenmesi gereken destek kısımları olabilir. Bu kısımların

temizlenmesi zaman alsada temizleme işlemleri yapılırken dikkatli olunması gerekmektedir.

3.3.8. Uygulama

Temizleme işlemlerinden sonra parça kullanılabilir. Bununla birlikte parçalar kullanılmadan önce bazı işlemlere tabi tutulabilir. Örneğin kabul edilebilir bir yüzey dokusu vermek için astarlama ve boyama gerekebilir. Yalnız bu işlemler çok yorucu ve zaman alıcı olabilir. Ayrıca nihai bir model veya ürün oluşturmak için diğer mekanik veya elektronik bileşenlerle birlikte monte edilmesi gerekebilir.

Eklemeli imalatta makinaların dikkatli bir şekilde bakımının yapılması gerekmektedir. Birçok eklemeli imalat makinasında çok hassas lazer ve yazıcı teknolojisi kullanılır. Dolayısıyla bu makinalar kirli ve gürültülü ortamlarda kullanılmamalıdır. Makineler genelde gözetimsiz olarak çalışacak şekilde tasarlanmış olsa da bakım çizelgesine düzenli kontroller koyulması önemlidir. Eklemeli imalatta çoğu malzeme ve proses standartlar dışındadır. Bu sorunun üstesinden gelmek ve aşmak için Eklemeli İmalat Teknolojileri ASTM F42 komitesi çalışmaktadır (Anonim, 2017b). Bununla birlikte, birçok makine satıcısı, makinelerin kabul edilebilir sınırlar dahilinde çalıştığını onaylamak için periyodik olarak kullanılacak test modelleri önermektedir.

Makinelerin hassasiyetleri ve bakımı dışında malzemelerinde dikkatli bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Bazı eklemeli imalat proseslerinde kullanılan hammaddelerin raf ömrü sınırlıdır ve ayrıca istenmeyen kimyasal reaksiyonlardan korunması için muhafaza edilmesi gerekebilir. Malzemeler neme, aşırı ışıığa ve diğer kirlenmelere maruz bırakılmamalıdır. Çoğu süreçlerde malzemeler tekrardan kullanılabilir. Bununla birlikte, yeniden kullanımın pek çok kez yerine getirilmesi durumunda özelliklerin bozulabileceği ve dolayısıyla geri dönüşüm yoluyla elde edilen malzemenin kalitesinin korunması için bir prosedürün de gözlemlenmesi gerekebilir.

3.4. Eklemeli İmalat Terimi

Daha önceden de bahsedildiği gibi eklemeli imalat teknolojisinde katmanların oluşturulup üst üste getirilmektedir. Eklemeli imalat terimi bu teknolojiyi çok iyi

ifade ediyor gibi gözüksede başka terimler de mevcuttur. Bu bölümde bu teknolojiyi tanımlayan diğer terimler tartışılacaktır.

3.4.1. Otomatik imalat

Bu terim, 1990'ların başında bu teknolojiyi kapsayan ilk metinlerden biri olan ve Marshall Burns tarafından yazılmış "Automated Fabrication" kitabında popülerleştirilmiştir (Burns M, 1993). Hareket bileşenlerini kontrol etmek ve sistem değişkenlerini izlemek için bilgisayar ve mikrodenetleyiciler kullanılmaktadır.

3.4.2. Serbest şekil imalatı

Bu terimin kullanılmasındaki amaç süreçlerin karmaşık geometrik şekiller üretme kabiliyetidir. Bazen bu teknolojilerin avantajı "girdi nesnesinin şeklinin gerçekte ne olduğu kesinlikle önem taşımaz" anlamına gelen "özgür karmaşıklık" sunma açısından açıklanmıştır. Basit bir küp veya silindir aynı hacimdeki karmaşık bir anatomik yapı olarak makinede üretmek için çok zaman ve çaba gerektirir. Serbest şekil imalat ismi imalat sürecinden bağımsız olmasıyla ilişkilidir.

3.4.3. Katman bazlı imalat

Parçanın imal edilme süreçlerinde katmanlar üst üste konulduğu için böyle bir tanımlama yapılmıştır. Bu teknoloji bir hammadde bloğundan malzeme çıkararak imal etme tekniğinin tersidir. Bu teknikte bütün süreçler tamamen ekleme bazlı olmayabilir, aynı zamanda bazı aşamalarda malzeme çıkartma işlemleri yapılabilir. Şu anda bütün ticari makinaların imalat teknikleri katman bazlıdır. Gelecekte başka bir mantıkta malzeme ekleme yolu bulunacağına dair bir yaklaşım veya öneri bulunmamaktadır.

3.4.4. Stereolitografi ve 3D basım

Başlangıçta bu iki terim bazı belirli makinaları tanımlamak için kullanılmıştır. Stereolitografi (SL), ABD şirketi 3D System tarafından, 3 boyutlu baskı (3DP) püskürtmeli baskı teknolojisini icat eden MIT'li araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılmıştır. Her iki terim de 2 boyutlu süreçlerin (litografi ve baskı) kullanımını ve onların üçüncü boyuta geçirilmesini amaçlar. Çoğu kişi yazdırma teknolojisine aşina olduğundan fiziksel bir üç boyutlu cisim yazdırma fikri mantıklı

gelmektedir. Birçok kişi eklemeli imalat teknolojilerini tanımlamak için en çok kullanılacak olan ifadenin 3 boyutlu baskı terimi olacağına inanmaktadır.

3.4.5. Hızlı prototipleme

Hızlı prototipleme bu teknolojinin ilk adıdır. Zaten bu teknoloji hızlı bir şekilde prototip üretmek için icat edilmiştir. Üreticiler ve ürün geliştiriciler, yeni bir ürünün tanıtılması için yapılan prototiplerin yapım sürecini gelişimsel ve yaratıcı aşamaları engelleyen, karmaşık, sıkıcı ve pahalı bir süreç olarak görmekteydiler. Hızlı prototiplemenin bulunmasıyla bu süreç önemli ölçüde hızlandığı için hızlı prototipleme terimi kabul görmüştür.

3.5. Eklemeli İmalatın Avantajları

Birçok kişi bu teknolojinin ürün geliştirme ve üretimi için devrim niteliği taşıdığını düşünmektedir. Hatta bazı kişiler şu anki mevcut imalat teknolojisinin ileride eklemeli imalatın gelişmesiyle birlikte yok olacağını iddia etmektedir.

İlk olarak bu teknolojinin hız karakterini düşünmek gerekmektedir. Bu teknolojideki hız avantajı sadece parçaları inşa etmek için gereken süre açısından değildir. Ürün geliştirme sürecinin hızlanması bilgisayar kullanımı ile alakalıdır. 3 boyutlu katı modelleme CAD başlangıç noktası olarak kullanıldığından ve eklemeli imalata aktarımın nispeten kesintisiz olması nedeniyle, veri dönüştürme veya tasarım amacının yorumlanması üzerine daha az sıkıntı vardır.

Üretilecek parçaların karmaşıklığı ne olursa olsun, bir eklemeli imalat makinasında baskı tek bir adımda gerçekleşir. Diğer imalat süreçlerinde, çoklu ve tekrarlanan birçok aşamanın yapılması gerektirmektedir. Bir tasarıma daha fazla özellik eklendiğinde bu aşamaların sayısı önemli ölçüde artabilmektedir. Bu nedenle eklemeli imalat, ürün geliştirme aşamasında hangi değişikliklerin uygulanabileceğine bakılmaksızın, modellerin üretilmesi için geçen süreyi daha etkili bir şekilde tahmin etmenin bir yolu olarak görülebilir.

Eklemeli imalat kullanıldığında gerekli işlem ve kaynak sayısı önemli ölçüde azaltılabilir. Klasik yöntemlerle CAD çizimine göre bir prototip yapılması durumunda, prototipin birkaç aşamada yapılması gerekmektedir. Bunlar el oymaları, kalıplama, şekillendirme ve CNC işleme gibi yöntemler olabilir. El oyması ve

benzeri işlemler sıkıcı, zor ve hataya müsait işlemlerdir. Kalıp teknolojisi karmaşık olabilir ve kesinlikle bir veya daha fazla kalıp yapımı gerektirir. CNC işleme, dikkatli planlama ve parçanın kendisi yapılmadan önce fiyestürlerin inşasını da gerektirecek ardışık bir yaklaşım gerektirmektedir.

Eklemeli imalat, bu çok aşamalı süreçlerin çoğunu kaldırmak veya en azından basitleştirmek için kullanılabilir. Silikon kauçuk kalıplama, matkaplar, parlaticılar, öğütücüler vb. gibi bazı destekleyici teknolojilerin eklenmesiyle, farklı özelliklere sahip geniş bir yelpazede farklı parçalar üretmek mümkün olabilir. Eklemeli imalat teknolojisini benimseyen atölyeler, daha temiz, daha aerodinamik ve daha önce hiç olmadığı kadar çok yönlü olabilir.

3.6. Eklemeli İmalat ile CNC Talaşlı İmalat Arasındaki Fark

Eklemeli imalat içeriğinin bir kısmını CNC işleme teknolojisinden almaktadır. CNC ürünleri imal etmek için kullanılan bilgisayar tabanlı bir teknolojidir. CNC esas olarak, ekleme işleminden ziyade çıkarma odaklı bir yöntem olması nedeniyle, en azından yapılacak parça kadar büyük bir malzeme bloğu gerektirmektedir. Eklemeli imalat ile CNC talaşlı imalat arasında ki bazı farklılıklar bu bölümde incelenmiştir. Bunlardan en önemlileri malzeme, hız, karmaşıklık, hassasiyet, geometri ve programlamadır. Çizelge 3.1’de eklemeli imalat ile CNC talaşlı imalat arasındaki farklılardan bahsedilmiştir.

Çizelge 3.1. Eklemeli İmalat ile CNC Talaşlı İmalat arasındaki fark

Özellikler	İmalat Metodu	
	Eklemeli İmalat	CNC Talaşlı İmalat
Malzeme çeşitliliği	Fazla	Çok fazla
Hız	Orta	Yüksek
Karmaşıklığa yatkınlık	Çok	Az
Hassasiyet	Düşük	Yüksek
Programlama	Kolay	Zor

3.6.1. Malzeme çeşitliliği

Eklemeli imalat teknolojisinde başlangıçta malzeme olarak polimerik malzemeler, mumlar ve kağıt laminatlar kullanılmıştır. Daha sonra, kompozitler, metaller ve seramikler kullanılmaya başlanmıştır. CNC işleme, orta yoğunluklu sunta (MDF),

işlenebilir köpükler, işlenebilir mumlar ve hatta bazı polimerler gibi yumuşak malzemeler için kullanılabilir. Bununla birlikte, yumuşak malzemeleri şekillendirmek için CNC kullanımı, bu parçaların döküm gibi çok aşamalı bir süreçte hazırlanmasını gerektirmektedir. Nihai ürünler yapmak için CNC işleme kullanımı, çelikler ve diğer metal alaşımları gibi sert, nispeten kırılğan malzemeler için iyi tanımlanmış özelliklere sahip yüksek doğruluklu parçalar üretmek içindir. Bunun aksine, bazı eklemeli imalat parçaları, parça yönlendirmesinin, işlem parametrelerinin veya tasarımın makineye nasıl girildiğinin bir fonksiyonu olan boşluklar veya anizotropi gösterebilirken, CNC parçaları normalde daha homojen ve kalitede öngörülebilir olacaktır.

3.6.2. Hız

Yüksek hızlı CNC işlemede, aynı hacimde ve aynı şekilde bir parçayı imal ettiğimizi düşünürsek genelde eklemeli imalata göre daha hızlı parça üretilir. Ancak eklemeli imalatta tek aşamada parça üretilebilmesi büyük bir avantajdır. CNC tezgahlarında karmaşık şekilli parçaların imal edilmesi gerektiğinde çok aşamalı kurulumların ve süreç planlarının yapılması gerekebilir. Dolayısıyla hızı sadece parça işleme hızı olarak değil bilakis tüm süreçleri hesaba katarak değerlendirmek gerekmektedir. CNC işleme çok aşamalı bir imalat prosesi olup, parçaların tek bir makinede yeniden konumlandırılması, yeniden yerleştirilmesi veya birden fazla makine kullanılması gerekebilir. Bir eklemeli imalat makinasında birden fazla parça yapılmak istendiğinde bu işlem birkaç saat sürebilir. İleri seviyede yüzey pürüzlülüğü istenildiğinde bu işlem birkaç gün sürebilir. CNC işlemede aynı işlemin tamamlanma süresi haftalarca sürebilir.

3.6.3. Karmaşıklık

Geometrik karmaşıklık ne kadar fazla olursa eklemeli imalatın CNC işleme üzerindeki üstünlüğü o kadar büyük olmaktadır. CNC işlemede bir parçanın tek işlemde yapılması çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Kesici takımlar bir mil üzerinde bulunduğundan parçanın bazı bölgelerine erişim mümkün olmaz. Eklemeli imalatta parça üretilirken böyle kısıtlamalar olmaz bütün karmaşık yüzeyler kolayca oluşturulabilir. Bazı parçalar ise CNC işlemede bileşenlere ayrılmadan yapılamaz, tek bir parça ancak birkaç parça haline getirilerek yapılabilir. Eklemeli imalatta ise böyle parçalar tek parça halinde yapılabilir.

3.6.4. Hassasiyet

Eklemeli imalat makinaları genellikle birkaç on mikron çözünürlükte çalışırlar. Eklemeli imalat makinelerinin farklı dikey eksenler boyunca farklı çözünürlüğe sahip olması yaygın bir durumdur. Genellikle, dikey eksen katman kalınlığına karşılık gelir ve bu yapı düzlemindeki iki eksene kıyasla daha düşük bir çözünürlük olacaktır. Yapı düzlemindeki doğruluk ve hassasiyet ise bir tür dişli kutuları ve motorları içeren yapı mekanizmasının konumlandırılmasıyla belirlenir. Bu mekanizma eklemeli imalat tekniklerinde farklılık gösterebilir. Örneğin stereolitografi (SL) de yapı mekanizmasının bir parçası olarak laser kullanılır ve lazer galvanometrik ayna sürücülerini yardımı ile konumlandırılır. Lazer ışınının çapı asgari katman kalınlığını belirlerken, galvanometrelerin çözünürlüğü ise yapı düzlemindeki genel boyutları belirleyecektir. Öte yandan CNC tezgahların hassasiyeti üç ortogonal eksen boyunca olan konum çözünürlüğü ve kesici uçların çapı ile belirlenir. CNC işlemede parça hassasiyeti çok iyi olmaktadır. Bu konuda eklemeli imalat makinalarından daha avantajlıdır.

3.6.5. Geometri

Eklemeli imalat makineleri kompleks bir 3 boyut problemini nominal kalınlığa sahip basit bir 2 boyut kesit serisine böler. Bu şekilde yüzeylerin 3 boyutta bağlantısı kesilir, süreklilik ise bir kesitin yakınlığının bitişik olanla ne kadar yakın olduğuna göre belirlenir. Bu durumun CNC işlemede yapılamaması nedeniyle yüzeylerin işlenmesi 3 boyutlu uzayda yapılmalıdır. Silindir, küp ve koni gibi geometrilerin noktalarını bir yol boyunca birleştirerek tanımlamak nispeten kolay bir iştir çünkü bu noktalar birbirinden oldukça uzaktır ve takım yönü de sabittir. Serbest çizim yüzeylerde bu noktalar oryantasyondaki birçok değişiklik nedeniyle birbirine çok yakın olabilir. Bu tarz geometrileri 5 eksenli CNC tezgahlarda bile üretmek çok zor olabilir.

3.6.6. Programlama

Bir CNC tezgahı için program sırasının belirlenmesi, takım seçimi, makine hızı ayarları, yaklaşma konumu ve açısı gibi birçok ayar vardır. Eklemeli imalat makinelerinde de aralık, karmaşıklık ve çevreleme gibi seçilmesi gereken ayarlar vardır ama CNC işleme ile karşılaştırıldığında çok azdır. Çoğu eklemeli imalat makinesinde olması muhtemel en kötü şey, programlama düzgün yapılmazsa,

parçanın çok iyi oluşturulmayacağıdır. Bir CNC tezgahın yanlış programlanması makineye ciddi hasar verebilir ve hatta insan güvenliği için risk oluşturabilir (Gibson vd, 2015).

3.7. Eklemeli İmalat Yöntemleri

Birden fazla eklemeli imalat yönteminin oluşu ve bu yöntemlerinin farklı ve benzer yönlerinin olması nedeniyle literatürde eklemeli imalat yöntemleri farklı şekillerde sınıflandırılmıştır. Literatürde baskı tekniğine göre (Kruth vd, 1998), kullanılan ham maddeye göre (Chua ve Leong, 1998) ve her ikisinin de beraber kullanıldığı sınıflandırmalar (Pham ve Gault, 1998) mevcuttur. Çizelge 3.2’de baskı tekniğine göre sınıflandırılmış eklemeli imalat yöntemleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Eklemeli imalat yöntemleri

Temel Eklemeli İmalat Yöntemleri	Alt Yöntemler
Fotopolimerizasyon Yöntemi	Vektör Tarama, Katman Yansıtma, Çift Foton Tekniği
Toz Ergitme Yöntemi	Seçici Lazer Sinterleme, Elektron Işınıyla Ergitme
Ekstrüzyon Yöntemi	Eriyik Yığılma Tekniği, Bioekstrüzyon, Kontur İzleme
Püskürtme Yöntemi	Yapışkan Püskürtme, Malzeme Püskürtme
Levhalarla Katman Oluşturma	Yapışkanla Bağlama, Isıyla Bağlama
Yoğunlaştırılmış Enerji Yöntemi	Toz Beslemeli, Tel Beslemeli
Doğrudan Yazma Yöntemi	Mürekkep Bazlı Sistem, Işınla Doğrudan Yazma

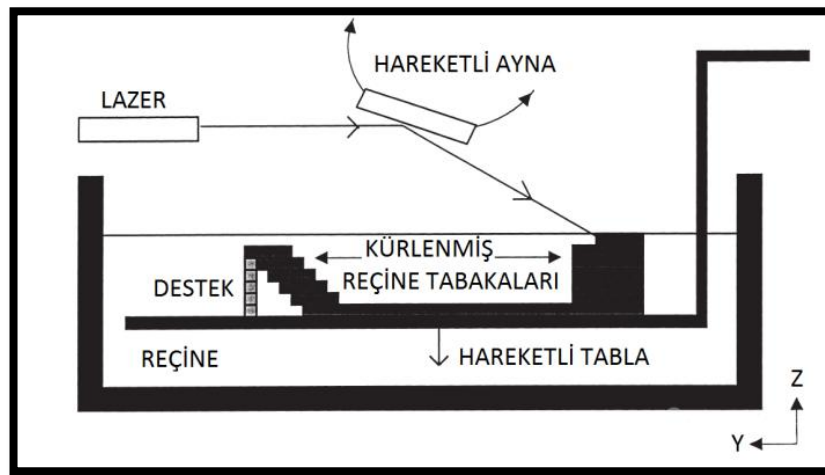
3.7.1. Fotopolimerizasyon

Fotopolimerizasyon tekniğinde radyasyonla kürlenebilen reçineler veya fotopolimer malzemeler kullanılır. Fotopolimer malzemeler, üzerine ışık vurduğu zaman katılaştıran malzemelerdir. Fotopolimer malzemelerin çoğu morötesi dalga boyundaki ışıkla tepkimeye girer. Bunun dışında görülebilir ışıkla tepkimeye giren malzemeler de vardır.

Fotopolimerler 1960'ların sonlarına doğru geliştirilmiş ve çok geçmeden ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. Kuşe kağıtların ve kartonların çoğu fotopolimer malzemelerden yapılmaktadır. Ayrıca dişçilik sektöründe fotokürlenabilir reçinelerle dişlerin üst yüzeyindeki küçük deliklerin kapatılarak dişlerin çürümelere karşı korunması sağlanmaktadır.

Charles Hull 1980'lerin ortalarında UV (Ultravioletole-morötesi) kürlenabilir malzemeleri lazerle tarayarak katı parça oluşturabilecek bir makinanın yapılabileceğini keşfetti. Katman katman kürlleme yaparak 3 boyutlu katı parça üretimini sağlayan bu yöntemin adı stereolitografidir. Ayrıca bu yöntem ilk 3 boyutlu basım yöntemidir. Bu sistemin keşfi diğer hızlı prototipleme veya eklemeli imalat yöntemlerinin icat edilmesine ön ayak olmuştur.

Stereolitografi en eski hızlı prototipleme yöntemi olması ile birlikte en detaylı prototipleme yöntemlerinden birisidir. İlk olarak ABD menşeli bir şirket olan 3D Systems tarafından ticarileştirilmiştir. Bu yöntemde lazerle sıvı fotopolimer yüzey taranarak katman oluşturulur. Sonra platform bir katman kalınlığı kadar aşağı indirilir veya yukarı kaldırılır. İkinci katmanın oluşması için fotopolimer sıvı tekrar lazerle taranır ve katman oluşur. Diğer katmanlar için bu işlemler tekrarlanarak model elde edilir. Şekil 3.1.'de stereolitografi tekniği sembolik olarak gösterilmiştir (Pham ve Gault, 1998).



Şekil 3.1. Stereolitografi tekniği

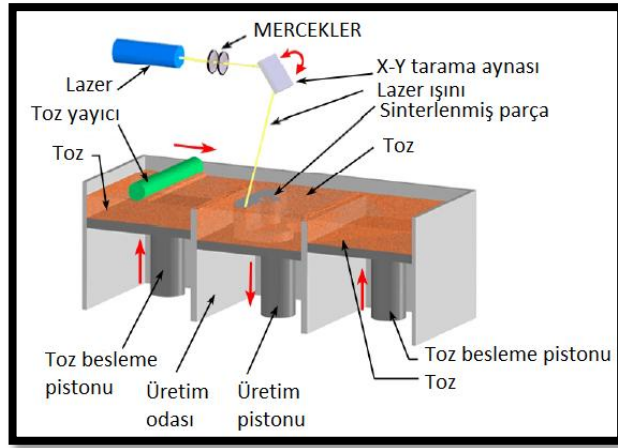
3.7.2. Toz ergitme

Toz ergitme yöntemi, isminden de anlaşılacağı gibi temel olarak tozun, lazer veya elektron gibi bir ısı kaynağı tarafından ergitilmesi ilkesine dayanmaktadır. Toz ergitme yöntemi ilk ticarileşen eklemeli imalat yöntemlerinden birisidir. Toz ergitme yöntemlerinden ilk ticarileşeni ise seçici lazer sinterleme olup (Selective laser sintering-SLS) ABD’de Texas Üniversitesinde geliştirilmiştir. Yöntemlerin hepsi ana hatlarıyla birbirine benzemektedir. Genel olarak toz malzemenin bir ısı kaynağı tarafından ergitilmesi veya sinterlenmesiyle katman oluşturulur. Sonra tozun bulunduğu platform aşağı indirilir ve katmanın üzerine toz serilir. Tekrardan tozlar ergitilerek ikinci katman oluşturulur. Diğer katmanlar için bu süreçler tekrarlanarak parça oluşturulur.

Toz ergitme yöntemlerinde kullanılan malzeme çeşitliliği çok fazla olup polimer, metal, seramik ve kompozit malzemeler kullanılabilir. Bu yöntemlerle üretilen parçalar ikinci bir işlem görmeksizin kullanılabilir. Dolayısıyla bu yöntemlerin dünya genelinde çok geniş bir kullanım alanı vardır. Bu çalışmada seçici lazer sinterleme ve elektron ışınıyla ergitme yöntemlerinden bahsedilecektir. Bunun dışında maskeli seçici sinterleme (SMS), yüksek hızlı sinterleme ve seçici inhibisyon sinterleme gibi yöntemlerde mevcuttur.

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

Seçici lazer sinterleme (SLS) yönteminde malzeme olarak plastik, seramik veya metal tozlar kullanılır. Amerikan menşei 3D Systems firması ile Almanya menşei EOS GmbH firmaları tarafından ticarileştirilmiştir. SLS yönteminde modelin oluşturulacağı platformun üzerine ince toz tabakası serilir. Sonra CO₂ lazer ile XY eksenini boyunca tozun üzeri taranır. Lazerle etkileşen tozların ergimesi ve akabinde katılaşmasıyla birinci katman oluşturulur. Birinci katman oluştuktan sonra platform Z eksenini boyunca katman kalınlığı kadar aşağı indirilir. Sonra yardımcı mekanik elemanlar yardımıyla katılaştıran katmanın üzerine tekrardan toz serilerek yine katman CO₂ lazerle tozu üzeri tekrar taranır ve böylece ikinci katman oluşturulur. Bu işlemler tekrarlanarak bütün katmanlar oluşturulur ve model elde edilir. Şekil 3.2’ de seçici lazer sinterleme temsili olarak gösterilmiştir (Çelik vd, 2013).

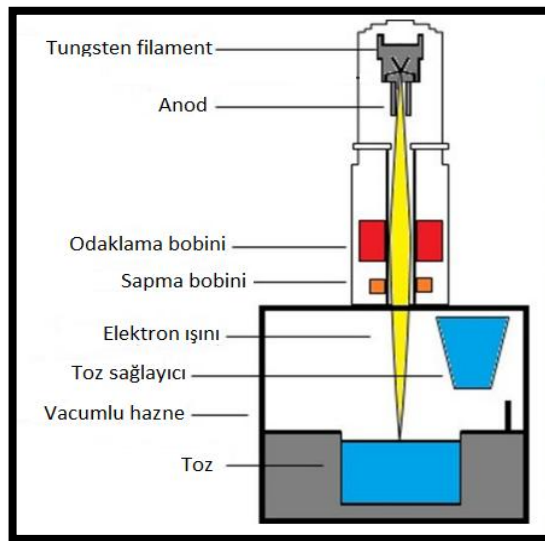


Şekil 3.2. Seçici lazer sinterleme tekniği

3.7.2.2. Elektron ışınıyla ergitme (Electron Beam Melting - EBM)

Elektron ışınıyla ergitme tekniği, İsveç' deki Chalmers Teknoloji Üniversitesinde geliştirilmiştir ve yine İsveç menşeli Arcam AB firması tarafından 2001 yılında ticarileştirilmiştir. Yöntem metal tozların yüksek enerjili electron ışınlarıyla ergitilmesine dayanmaktadır. Metal lazer sinterleme metoduna benzer olarak EBM tekniğinde, odaklanmış electron ışınları serilmiş ince metal toz tabakasını tarayarak kısmi ergime sağlanır ve sonrasında ergiyen tozlar tekrar katılarak katman oluşur. Şekil 3.3' de EBM süreci temsili olarak gösterilmektedir (Anonim, 2017c).

EBM sürecinde vacumlu ve yüksek sıcaklıklı bir ortam gerekir. Elektron ışınları gönderilmeden önce tozlar ön ısıtma ile ısıtılır. Odaklama bobininde odaklama çapı control edilir. Sapma bobininde ise elektron ışınının X-Y eksenindeki gideceği konumu kontrol edilir.



Şekil 3.3. EBM tekniği

EBM yönteminde kullanılacak olan malzemenin iletken olması gerekmektedir. Seçici lazer sinterleme (SLS) yönteminde malzemenin iletken olmasına gerek yoktur. EBM yöntemi lazer sinterleme yöntemine göre enerji maliyeti açısından daha uygundur. EBM ile SLS yöntemine ait bazı özellikler Çizelge 3.3’de verilmiştir (Gibson vd, 2015).

Çizelge 3.3. EBM ve SLS yöntemine ait bazı özellikler

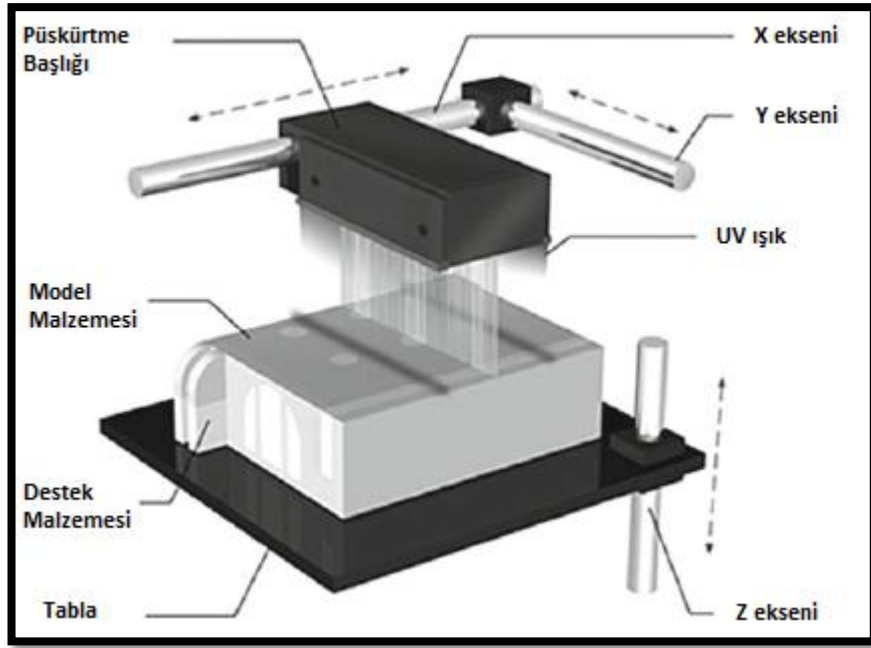
ÖZELLİKLER	EBM	SLS
Isı kaynağı	Electron Işını	Lazer
Atmosfer	Vakumlu ortam	İnert gaz
Tarama	Saptırma bobinleri	Galvonometre
Enerji emilimi	İletkenliğe bağlı	Tozun enerji emilebilirliğine bağlı
Toz ön ısıtma	Elektron Işını ile	İnfrared veya rezistans
Tarama hızı	Çok hızlı	Orta
Enerji maliyeti	Orta	Yüksek
Yüzey kalitesi	Orta ve kötü	Mükemmel ve orta
Çözünürlük	Orta	Mükemmel
Kullanılabilen malzemeler	Metal	Plastik, metal, seramik
Toz boyutları	Orta	İnce

3.7.3. Malzeme püskürtme

İki boyutlu inkjet yazıcılar 1960’ lardan beri kullanılmaktadır. Yıllardır inkjet yazıcılar vasıtasıyla bilgisayar ve diğer dijital cihazlardan belge veya resim çıkarılmaktadır. Bu teknolojiye bir boyut daha eklenerek son yıllarda elektronik paketleme, optik ve eklemeli imalat gibi alanlarda uygunmaya başlanmıştır.

İnkjet yazıcı mantığıyla çalışan ve üç boyutlu parça üreten makina ilk olarak Sanders Prototype (Solidscape) firması tarafından ticarileştirilmiştir. Yazıcı ısıtılarak sıvı hale getirilmiş vaks ile çıktı vermektedir. 3D Systems firması da 1996’ da yine vaks malzeme ile çıktı alan Actua 2100 modeliyle piyasaya girmiştir.

Son zamanlarda fotopolimer akrilat malzemenin ultraviyole ışıkla katılaştırılması yöntemi üzerine bir yoğunlaşma vardır. Bu yöntemdeki fotopolimerizasyon şekli stereolitografi ile benzerdir ancak diğer süreçler tamamiyle farklılık arz etmektedir. Bu makinalarda fotopolimer sıvı, üzerinde 1500’ ün üzerinde nozül bulunan yazıcı başlığından püskürtülmektedir. Şekil 3.4’de bu tekniğin anlatımı temsili olarak gösterilmiştir (Gibson vd, 2015).



Şekil 3.4. Malzeme püskürtme tekniği

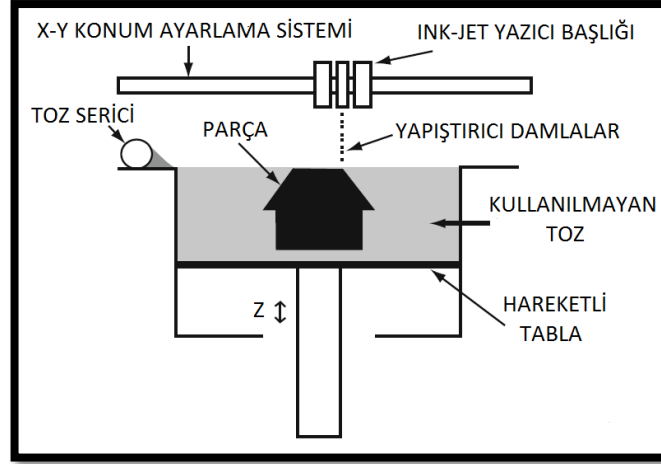
Malzeme püskürtme yönteminde malzeme olarak polimer, seramik ve metal kullanılabilir. Polimer malzeme kullanılan teknikte iki yöntem vardır. Birincisi Solidscape firmasının kullandığı erimiş vaksın püskürtülmesi metodu diğeri ise 3D Systems ve Stratasys firmalarının kullandığı akrilik fotopolimerin UV ışıkla katılaştırılması yöntemidir.

3.7.4. Yapışkan püskürtme

Yapışkan püskürtme yöntemi 1990'ların başında MIT' de geliştirilmiştir. Toz yatak üzerine yapıştırıcılar damlatarak parçanın kesitlerini oluşturan yöntemlere 3 boyutlu basım teknolojisi ismini vermişlerdir. Toz eritme yöntemlerinden farklı tozların eritilerek değil yapıştırılarak birleştirilmesidir. Bazı yapışkan püskürtme makinaları boya püskürten nozullara sahiptir dolayısıyla bu makinalarda renki çıktı alınabilmektedir. ExOne ve ZCorp gibi bazı ticari firmalar 3DP (3 boyutlu basım) teknolojisini lisansını alarak kaliteli makinalar geliştirmişlerdir.

Yapışkan püskürtme yönteminin orjinal adı üç boyutlu baskı yöntemidir ve daha önceden de belirtildiği gibi MIT'de icat edilmiştir. Üç boyutlu baskı tekniğinde, yaklaşık 50µm çapındaki toz parçacıklar üzerine sıvı yapıştırıcı enjekte edilerek katman katman yapıştırılır. Tozlar SLS yöntemindeki gibi bir haznenin içerisinde ve hareketli platform vasıtasıyla aşağıya doğru hareket ettirilir. Birinci katmanı oluşturmak için tozun gerekli yerleri yapıştırıcı ile yapıştırılır sonra platform katman

kalınlığı kadar aşağı indirilir. Birinci katman üzerine yardımcı mekanik elemanlar yardımıyla toz serilir. Tekrar yapıştırıcı enjekte edilerek ikinci katman oluşturulur. Diğer katmanlarda aynı işlemler tekrar edilerek yapılır ve parça meydana çıkar. Şekil 3.5’ de üç boyutlu baskı süreci gösterilmektedir (Gibson vd, 2015).



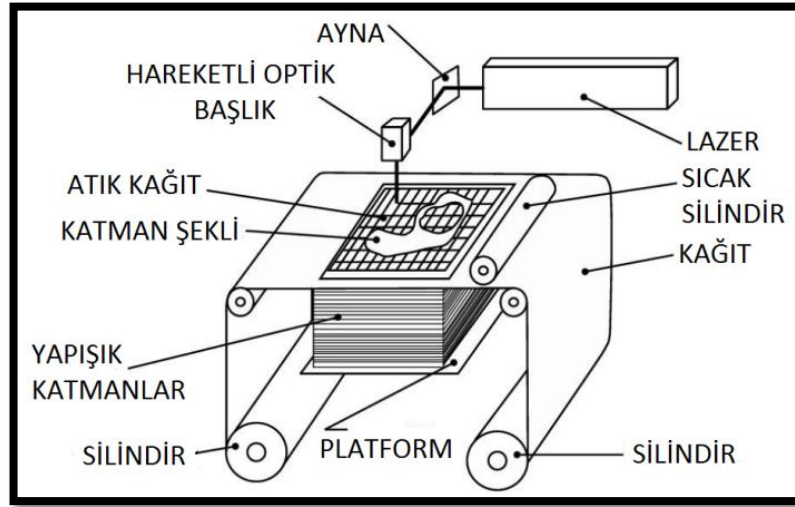
Şekil 3.5. Üç boyutlu baskı tekniği

3.7.5. Levhalarla katman oluşturma

İlk ticarileşen eklemeli imalat teknolojilerinden biri de katmanlı nesne imalatıdır (Laminated Object Manufacturing - LOM). LOM yönteminde kağıtlar CO₂ lazer ile kesilip katman katman üst üste yapıştırılarak parça üretilir. Diğer tabaka ile katman oluşturma yöntemlerinde farklı malzemeler (plastik, metal, seramik, vb.) ve farklı kesim metodları kullanılmaktadır. Katmanları birbirine yapıştırmak için tutkal veya zamlarla yapıştırma, termal birleştirme, sesüstü kaynak gibi metodlar uygulanmaktadır.

Levhalarla katman oluşturma yöntemlerinin en yaygın olanı Katmanlı Nesne İmalatıdır. Bu yöntemi ilk geliştiren ve ticarileştiren firma Amerikan Helisys firmasıdır. Katmanlı nesne imalatında (Laminated Object Manufacturing - LOM) katman malzemesi olarak kağıt kullanılmaktadır. Kağıt malzeme yaklaşık olarak 0.2 mm kalınlığı kadardır. LOM tekniğinde ilk önce kağıt, platform üzerine yerleştirilir. Sonra katman şeklinin oluşturulması için lazer yardımıyla kağıt kesilir. Kesimden sonra platform, katman kalınlığı kadar aşağı indirilir. İkinci bir kağıt tabakası birinci katmanın üzerine serilir sonra yapıştırıcı ve sıcak bir silindir yardımıyla yapışması sağlanır. İkinci katman da lazer vasıtasıyla kesilir. Diğer katmanlar içinde aynı

işlemler tekrarlanır. Son olarak atık kağıtlar temizlenerek parça meydana çıkarılır. Şekil 3.6' de LOM tekniği gösterilmiştir (Anonim, 2015).



Şekil 3.6. LOM tekniği

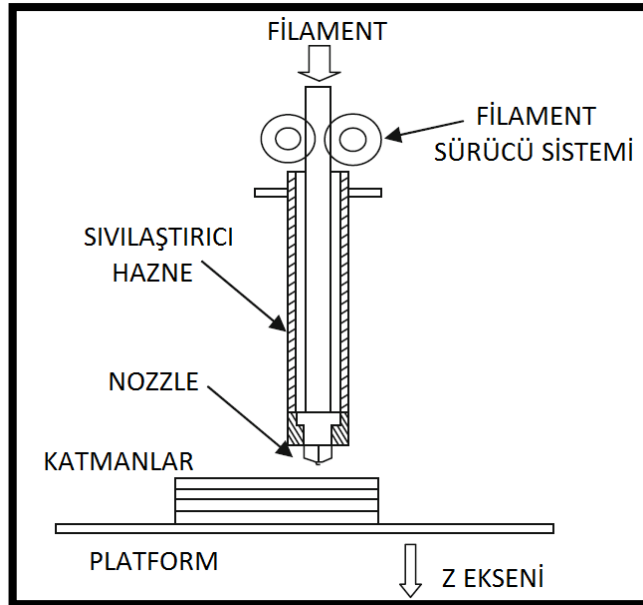
3.7.6. Ekstrüzyon yöntemi

Ekstrüzyon mantığıyla çalışan yöntemler şu anda makina ve sarf malzeme maliyetinin düşük olması nedeniyle pazardaki en popüler olan yöntemlerdir. Ekstrüzyon sistemi diş fırçasına sıkılan diş macununa benzetilebilir. Malzeme yarı eriyik şekilde basınçla bir nozül içerisinde akıtılır. Akıtılan malzemenin X-Y ekseninde gezdirilmesiyle katman oluşturulur. Ekstrüzyon sürecinde önemli iki çeşit teknik vardır. En sık kullanılanı sıcaklıkla malzemenin hal değişiminin kontrol edilmesi iken diğeri ise kimyasal değişim ile katılaşmanın sağlanması yöntemidir. İkinci yöntem daha çok biyokimyasal çalışmalarda uygulanmaktadır. Genel olarak ekstrüzyon tekniğinin süreç basamakları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Malzemenin nozula sürülmesi
- Malzemenin sıvılaştırılması
- Nozul içerisinde sıvılaştıran malzemeye basınç uygulanması
- Ekstrüzyon süreci
- Nozulun önceden belirlenmiş yol üzerinde gezdirilmesi
- Eriyik malzemenin nozuldan çıktıktan sonra hemen katılaşarak katmanın oluşturulması

Ekstrüzyon yönteminde en yaygın olan yöntem Eriyik Yığıma Tekniğidir (Fused deposition modelling-FDM). Piyasadaki çoğu yazıcı FDM tekniğiyle çalışmaktadır. Bunun dışında diğer ekstrüzyon yöntemlerinden biyoekstrüzyon tekniği tıp alanında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemde malzeme nozuldan akıtılmadan önce sıvı veya jel halde olmalıdır. Malzemeyi sıvılaştırmak için FDM yöntemindeki gibi ısıtılabilir veya çeşitli kimyasal metodlarla malzeme jel haline getirildikten sonra nozuldan akıtılan jel malzeme kendiliğinden kuruyabilir veya kimyasal olarak sertleşebilir. Biyoekstrüzyon tekniği genelde yapay doku yapımında kullanılmaktadır.

Eriyik yığıma tekniği, ekstrüzyon bazlı eklemeli imalat yöntemlerinin en yaygın olanıdır ve ilk olarak ABD menşeli Stratasys firması tarafından ticarileştirilmiştir. FDM tekniğinde tel halindeki plastik malzeme (filament) ergime noktasının üzerinde olacak şekilde ısıtılarak nozul içerisinden geçirilir ve fışkırtılır. Fışkırtılan eriyik malzeme XY ekseninde dolaştırılır ve malzeme kendiliğinden soğuyarak katman oluşturulur. Sonra Z ekseninde katman kalınlığı kadar nozul kaldırılır veya tabla indirilir. İkinci katmanın oluşturulması için nozul tekrar XY ekseninde gezdirilir. Bu işlemlerin tekrarlanmasıyla diğer katmanlar oluşturularak parça tamamlanır. Aşağıdaki Şekil 3.7’de FDM tekniği temsili olarak gösterilmiştir (Gibson vd, 2015).



Şekil 3.7. FDM tekniği

3.8. FDM Makinelerinde Mekanik Tasarım

FDM tekniği mekanik süreçlerin baskın olduğu bir tekniktir. Eksen hareketlerinden ekstrüderden filament akıtılmasına kadar bütün sistemde mekanik hareketler mevcuttur. Dolayısıyla FDM makinesindeki mekanik tasarımın ve mekanik ekipmanların kaliteli olması gerekmektedir. Tasarımın kalitesi, mekanik ekipmanların çeşidi ve kalitesine göre sistemin ürettiği parçanın düzgünlüğü, hassasiyeti değişebilmektedir.

3.8.1. FDM makine yapıları

FDM mantığı temelde bir ekstrüderin mekanik ekipmanlar yardımıyla X,Y ve Z eksenlerinde gezdirilmesine dayanır. Eksen hareketleri yapılırken aynı zamanda ekstrüderde filament çeşitli mekanizmalar yardımıyla nozıla sürülür. Nozıl içerisindeki ısıtma elemanlarıyla filament eritilir ve basınç nedeniyle eriyen filament nozıldan akar. Filamentin nozıldan akmasıyla ve akan filamentin X ve Y eksenlerinde gezdirmesiyle katman oluşturulur. Bir st katmanın oluşturulması için de Z ekseninin hareket ettirilmesi gerekmektedir. Bu işlemlerin yapılması için çok farklı mekanik tasarımlar yapılabilir ve zaten hali hazırda FDM tekniği için geliştirilmiş birçok mekanik tasarım vardır. Farklı FDM makina tiplerinin kendi aralarında avantajları ve dezavantajları mevcuttur.

FDM tekniği patent tescil koruma sürelerinin bitmesinden sonra hızla yayılmıştır. Bu tekniğinin birçok mekanik tasarımı olmakla birlikte birden çok açık kaynak kodlu yazılımı da mevcuttur. Dünyanın her yerinden insanlar hem mekanik tasarım olarak hemde yazılım olarak bu tekniği geliştirmektedir. FDM tipi yazıcıların yayılması ve geliştirilmesi için RepRap kurulmuştur. RepRap'ın kurulma amacı kendi kendini kopyalayan yazıcıları yapmaktır. Buradan kullanıcılar sadece parça maliyetini ödeyerek yazıcı sahibi olmaktadır. RepRap'ta kullanıcılar tarafından tasarlanan birçok farklı FDM tipi yazıcı tipi bulunmaktadır. Bu yazıcılar yine kullanıcılar tarafından sürekli olarak geliştirilmektedir (Anonim, 2017d).

FDM tipi makinalarda tasarım yaparken çeşitli kıstaslar vardır. Bu kıstaslar maliyet, boyut, hız, hassasiyet, sağlamlık gibi kıstaslardır. Bu amaçlara binaen tasarımlar değişmektedir. Mesela küçük ve hafif bir tasarım yapılmak istendiğinde bazı özelliklerden feragat edilmesi gerekmektedir. Daha iyi parça basabilen hassasiyeti yüksek bir yazıcı yapılmak istenirse de maliyet artacak tasarım da

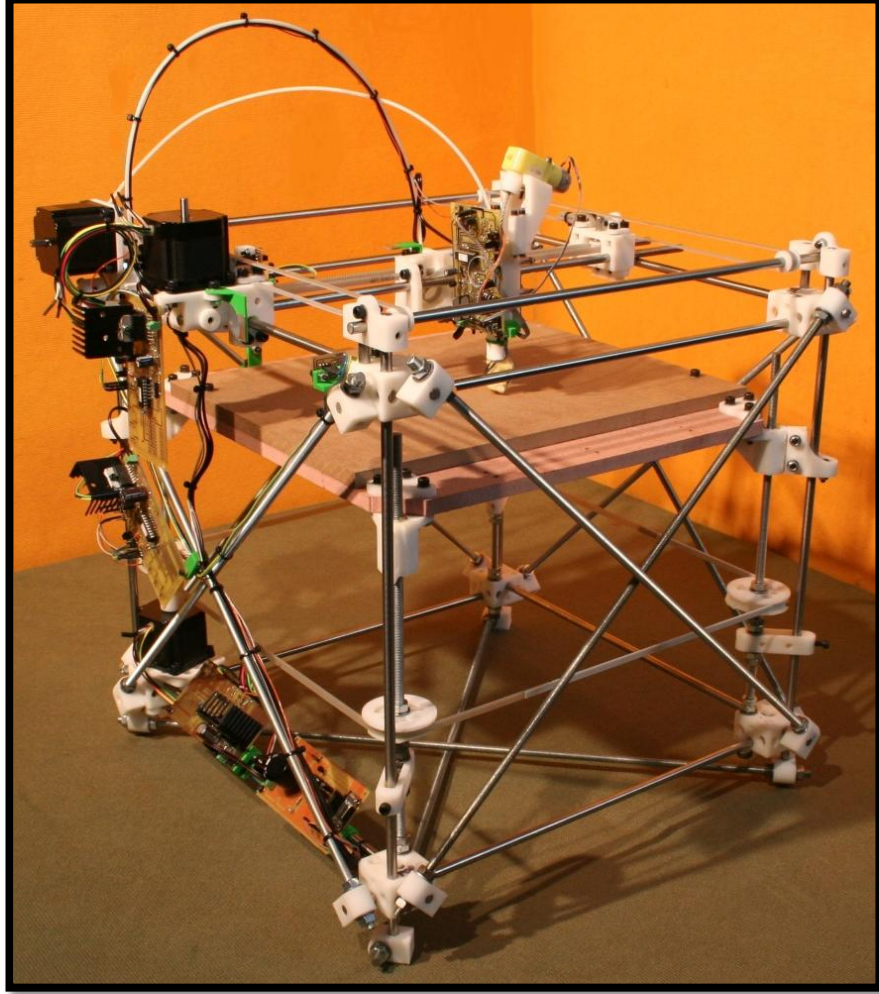
karmaşıklılaşacaktır. Şekil 3.8’de RepRap makinalarından olan Prusa i3 modeli görülmektedir. Yazıcı tasarımlarında tablanın hareket edip etmemesi ana tasarım etmenlerinden biridir. Prusa i3 modelinde tabla Y ekseninde hareket etmektedir. X ve Y ekseninde hareket iletimini sağlamak için triger kayışı ve lineer rulmanlar mevcuttur. Z ekseninde hareket iletimi için ise gijon ve somun kullanılmıştır. X ve Y ekseninde bir Z ekseninde iki adet NEMA 17 step motor vardır. Prusa i3 en temel RepRap makinalarından birisidir.



Şekil 3.8. Prusa i3 3D yazıcı

RepRap yazıcılarından olan Darwin 3D yazıcısı Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Bu yazıcıda tabla Z ekseninde bir adet step motor tahriki ile hareket etmektedir. Hareket iletimi için gijon somun kullanılmıştır. X ve Y eksenlerinde yine birer adet step motor vardır ve hareket iletimi triger kayışı ve lineer rulmanlar yardımı ile yapılmaktadır.

Şekil 3.10’da RepRap Morgan 3D yazıcısı gösterilmektedir. Klasik yazıcı tasarımlarından daha farklı bir yazıcıdır. Bu makinede X ve Y ekseni tek bir step motor yardımı ile tahrik edilmektedir. X ve Y ekseninde hareket iletimi Şekil 3.10’da da görüldüğü gibi farklı bir mekanizma ile sağlanmaktadır. Z ekseninde ise tabla hareketi vardır. Tabla hareketini iki adet step motor, gijon ve somun vasıtasıyla sağlamaktadır.



Şekil 3.9. Darwin 3D yazıcı



Şekil 3.10. Morgan 3D yazıcı

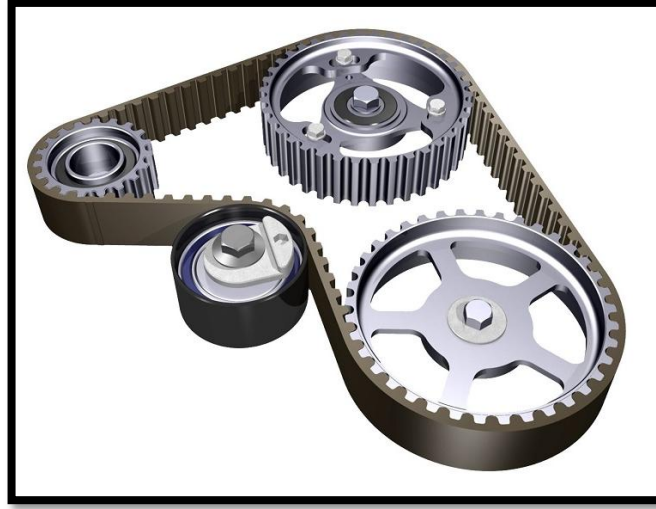
Şekil 3.11’de RepRap Udelta 3D yazıcısı gösterilmektedir. Bu yazıcı da farklı bir tasarıma sahiptir. Yazıcıda bütün eksen hareketleri üç adet step motorla tahrik edilmektedir. Hareket iletimi triger kayışı ve lineer rulmanlar yardımıyla yapılmaktadır.



Şekil 3.11. Udelta 3D yazıcı

3.8.2. Triger kayışı, vidalı mil-bilyalı somun, vidalı mil-trapez somun

FDM tipi üç boyutlu yazıcılarda hareket iletiminde triger kayışları sıklıkla kullanılmaktadır. Triger kayışları yük gerektirmeyen durumlarda hareket iletimi için kullanılabilirler. FDM tipi yazıcılarda X ve Y eksenlerinde fazla bir yük yoktur. Ayrıca triger kayışları yüksek hızlarda sessiz çalışabilir ve ucuzdur. Dolayısıyla bu eksenlerde genelde triger kayışı kullanılır. Yalnız triger kayışları esnek olmaları ve kayış ve dişli arasında boşluk olması sebebiyle konum hassasiyetleri mükemmel değildir. Şekil 3.12’de triger kayışının resmi gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Triger kayışı

Hareket iletiminde kullanılan bir diğer mekanik eleman da vidalı mil trapez somun mekanizmasıdır. Trapez somun ile mil bağlantısı arasında çalışma mantığı nedeniyle boşluk olması gerekmektedir. Dolayısıyla triger kayışlarına göre konum hassasiyeti daha kötü denilebilir. Triger kayışlarında da boşluk vardır ama trapez somun vidalı mil bağlantısına göre daha azdır. Ancak Z ekseni gibi somunun vidaya tam oturduğu boşluğun yükten dolayı olmadığı durumlarda daha hassas olabilir. Trapez somun vidalı mil bağlantısı triger kayışlarına göre daha sesli ve yavaş çalışır. Ancak yük gerektiren durumlarda triger kayışlarından daha iyidir. Şekil 3.13’de trapez somun vidalı mil mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 3.13. Trapez somun vidalı mil mekanizması

Vidalı mil bilyalı somun mekanizmaları vidalı mil trapez somun mekanizmasının bir benzeridir. Ancak bilyalı somunların içerisinde bulundurdukları bilyalar nedeniyle vidalı mil ile aralarında boşluk yoktur. Dolayısıyla konum hassasiyetleri trapez somunlara göre de triger kayışlarına göre de çok daha iyidir. Trapez somunda sürtünme çok fazla olduğundan verimi düşüktür bilyalı somunda sürtünme daha azdır. Bundan dolayı bilyalı somunların verimi daha yüksektir. Trapez somunlara göre daha sessis ve hızlı çalışırlar. Triger kayışları vidalı mil bilyalı somun mekanizmasından daha sessiz çalışır. Fakat vidalı mil bilyalı somun mekanizması trigerlere göre daha pahalı ve tahrik edilirken yüksek tork gerektirmektedir. Şekil 3.14’de vidalı mil bilyalı somun mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 3.14. Vidalı mil-bilyalı somun mekanizması

3.8.3. Lineer kızaklar ve lineer rulmanlar

Lineer kızaklar ve lineer rulmanlar hareketin istenilen doğrultuda düzgün ve hatasız bir şekilde aktarılmasına yardımcı olur. Hareket iletimini sağlamaz hareketin doğruluğunu ayarlar. Lineer rulmanlarda da lineer kızaklarda da bilyalar mevcuttur. Bu bilyalar hem sürtünmeyi azaltır hemde hassasiyet sağlar. Vidalı mil, triger gibi mekanizmalarla birlikte çalışır. Vidalı mil ve triger mekanizmaları tek başlarına çalıştıklarında ekseninde kaçıklıklar olabilir. Bu kaçıklıkları düzeltmek için lineer kızaklar ve lineer rulmanlar kullanılır. Rijit yapıları nedeniyle vidalı milleri ve triger kayışlarını yüklerden oluşak kesme kuvvetlerine ve eğme momentlerine karşı korurlar. Lineer rulmanlar lineer kızaklara göre daha sessiz çalışırlar ancak fazla yükte lineer kızaklar daha iyidir. Lineer kızaklar lineer rulmanlardan daha boşluksuz bir yapıdadır. Dolayısıyla hareketin doğruluğu kızaklarda daha iyidir. Şekil 3.15’de lineer rulman ve mil mekanizması gösterilmektedir. Şekil 3.16’da ise lineer kızak ve araba mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 3.15. Lineer rulman-mil mekanizması



Şekil 3.16. Lineer kızak-araba mekanizması

3.9. FDM Makinelerinde Kontrol Sistemi

Eklemeli imalat makinaları CNC tezgahlarındaki gibi nümerik kontrolle denetlenirler. Eklemeli imalat makinaları çalışma mantığı olarak CNC makinalarının tersidir. Eklemeli imalatta adından da anlaşılacağı gibi ekleme usulü ile parça yapılırken CNC tezgahlarda talaş kaldırma usulü ile parça yapılmaktadır. Ancak eksen hareketlerini kıyaslayacak olursak CNC tezgahlarla eklemeli imalat makinaları (özellikle FDM yazıcılar) aşağı yukarı aynıdır.

3.9.1. Nümerik kontrol

Sayısal kontrollü takım tezgahları işlem üniteleri tarafından alınan komutlarla otomatik olarak çalıştırılan makinelerdir. Nümerik kontrollü tezgahlar II. Dünya Savaşı'ndan sonra geliştirilmiştir. İstenilen parçalardan büyük miktarlarda hassas ve verimli bir şekilde üretilmek istendiğinde nümerik kontrollü tezgahlar kullanılmaktadır. 1960'lı yıllarda nümerik kontrollü tezgahlar geliştirilerek CNC yani bilgisayarlı nümerik kontrollü tezgahlar yapılmıştır.

Sayısal kontrol (Numerical Control - NC), bugünün bilgisayarlı sayısal kontrolün (Computer Numerical Control - CNC) öncüsüdür. CNC takım tezgahlarının otomasyonunu ve bunlar için tasarlanmış özgün araç işlemlerini denetler. Bilgisayar destekli tasarım (CAD) programlarıyla tasarlanan parçalar, bilgisayar destekli imalat (CAM) programlarıyla CNC tezgahlarında işlenecek hale getirilirler. Bilgisayarlı nümerik kontrol çok eksenli bir hareketin geçiş noktalarındaki enterpolasyonun hesaplanması mantığı nümerik kontrolden almıştır. Bilgisayar destekli imalat (CAM) programları tarafından oluşturulan program bir disket sürücüsü, seri veri arabirimi veya bir ağ bağlantısı aracılığı ile CNC'nin belleğine aktarılır. Verinin CNC'ye aktarılmasından sonra artık tezgah parçayı işleyebilecek hale gelmiştir.

3.9.2. Hareket kontrolü

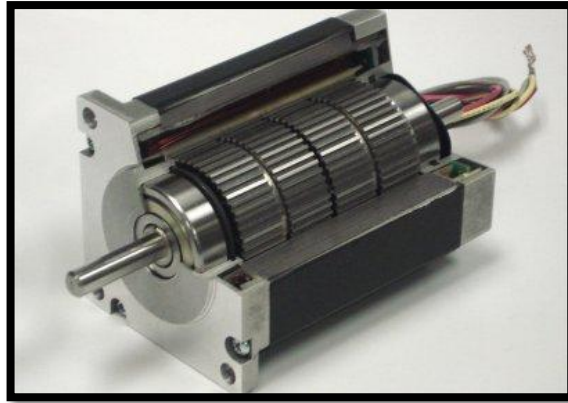
Herhangi bir CNC tezgahın en temel işlevi otomatik, hassas ve sürekli olan hareket kontrolüdür. CNC tezgahlarda iki veya daha fazla eksen vardır. Eksen hareketleri hareket yolu boyunca otomatik, hassas ve kusursuz bir biçimde konumlanır. En yaygın olarak CNC'lerde doğrusal ve döner olmak üzere iki eksen türü vardır.

Üniversal tezgahlarda doğru konumlandırma yapmak için operatör, çevirdiği el çarkının devir sayılarını sayarak yada kadrandaki ölçekleri okuyarak yapar. CNC tezgahlarda ise konumlandırma manuel olarak değil, CNC'nin kontrolü altındaki servo motorlar tarafından yapılır. Genel olarak, hareket türü (hızlı, doğrusal ve dairesel), hareket ettirilecek eksenler, hareket miktarı ve hareket hızı (besleme hızı) hemen hemen tüm CNC takım tezgahlarında programlanabilir.

CNC tezgahlarda tahrik motoru ile bilyalı vidalı mili istenilen tur sayısında döndürülür. Enkoderler yardımıyla bilyalı vidalı milin istenilen turda döndürülüp döndürülmediğine bakılır.

3.9.3. Step motorların temelleri

Step motorlar, elektrik enerjisini döndürme hareketine dönüştüren elektromekanik ekipmanlardır. Gönderilen elektrik pulslarıyla rotor döner dolayısıyla da motora bağlı olan mil döndürülür. Step motorlar yüksek anahtarlama kapasitesine sahip step motor sürücülerine bağlanırlar. Bu sürücüler dijital bir denetleyici tarafından gelen komutlara bağlı olarak step motora pulslar gönderir ve bu pulslar motor milini belli bir açıda döndürür. Bu küçük açı, adım açısı olarak adlandırılır ve her step motor için sabittir. Hareketin hızı ve yönü darbe sıralanımına ve frekansına bağlıdır. Şekil 3.17'de step motor iç kesiti gösterilmektedir.



Şekil 3.17. Step motor iç kesiti

Devir sadece pulsların sayısı ile alakalı değil aynı zamanda pulsların frekansı ile de ilişkilidir. Her step motor sargılarına enerji verildiğinde belli miktarda döner ve bu miktar motordan motora değişir. Dönme miktarına daha önceden de bahsedildiği gibi adım açısı denir ve bu açı 0.9 derece ile 90 derece arasında değişir. Adım açısı devir başına gelen adım sayısını belirler. Mesela 1.8 derece adım açısına sahip bir

step motorda milin tam tür döndürülmesi için 200 ($1.8^\circ \times 200 = 360^\circ$) puls gönderilmelidir. Step motorların hassaslığı ve dolayısıyla maliyeti bir tura karşılık gelen adım sayısıyla artmaktadır.

Step motorlarda anlaşılacağı gibi adım açısı azaldığında motorun doğruluğu artmaktadır. Ancak step motorların saniyede kabul edeceği puls sayısının bir üst sınırı vardır. Ağır iş gören step motorlar genellikle saniyede 200 veya 300 adım atma hızına sahiptir, bu nedenle saniyede bir ila üç devir arasında dönerler. Bazı küçük step motorlar saniyede bin veya daha fazla puls kabul edebilir ancak bu motorlar fazla tork üretemezler.

3.9.4. Step motor kontrolü

Step motorların dönüş miktarı, hızı ve dönüş yönü, dijital kontrol cihazlarının uygun yapılandırılmaları ile belirlenir. Step motor sürücüleri saat pulslarını ve yn sinyallerini alır ve bu sinyalleri uygun faz akımlarına çevirir. Saat pulslarını ve yn sinyallerini dizinleyici oluşturur. Bilgisayarlar veya PLC'ler (programlanabilir mantık denetleyicisi) dizinleyiciye komutlar gönderirler. Tam adım, yarı adım ve mikro adım en çok kullanılan uyarma modlarıdır.

3.9.4.1. Tam adım

Tam kademeli çalışmada, mesela bir turda 200 adım alan bir step motor bir tam turda 1.8 derece döner. Yarım adımda ise 0.9 derece döner. İki tür adım modu vardır. Tek fazlı tam adımda uyarmada motor tek fazda bir kere uyarılarak çalıştırılır. Bu mod yk koşullarının iyi tanımlandığı ve motorun sabit hızla çalıştırıldığı, tork ve hız performansının önemli olmadığı durumlarda kullanılır. Sabit hız ve sabit yük olan durumlarda rezonans sorunu iyi tanımlanmıştır. Rezonans ile ilgili problemler bazı hızlarda çalışmayı engelleyebilir. Bu mod, tahrik modları arasında en az güç gerektiren moddur. Çift fazlı tam adımda uyarma, motorun bir seferde iki fazlı olarak enerjilendirilmiş olarak çalıştırılmasıdır. Bu mod minimum rezonans problemlerinde iyi bir tork ve hız performansı sağlar. Çift tahrik, tek tahrike göre yaklaşık yüzde 30 ila 40 arasında fazla tork sağlar, ancak sürücü güç kaynağından iki kat daha fazla g eker.

3.9.4.2. Yarım adım

Yarım adımda tahrik alternatif bir tek ve çift fazlı işlem olup, normal adım boyutlarının yarısı kadar adımlarla motor döndürülür. Bu mod, çözünürlüğün iki katına çıkmasını sağlar. Motor torku çıkışı adımlarla değişirken yarım adım tahrikle bu durum dengelenmeye çalışılmıştır. Bu mod ile rezonans problemlerinde büyük kolaylık sağlamaktadır. Motorlar bu modda çeşitli hızlarda çalıştırılabilir ve neredeyse yaygın olarak karşılaşılan her yük durumunda motorlar bu modda sürülebilir.

3.9.4.3. Mikro adım

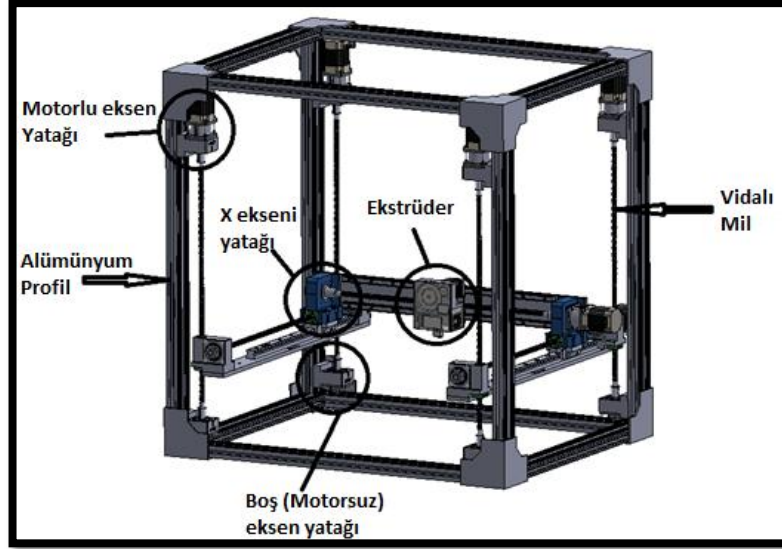
Mikro adım modunda, bir motorun doğal adım açısı çok daha küçük açılara bölünebilir. Örneğin standart bir 1.8 dereceli motor bir turda 200 adım atar. Bu motorun adımları ona bölünürse her bir mikro adım 0.18 derece olur ve motor bir tam turda 2000 adım atar. Genel olarak mikro adım yönteminde adımlar 10 ile 256'ya kadar bölünür (1.8 derece motor için bir tam turda 51200 adım). Bu mod hassas hareket ve daha fazla çözünürlük gerektiğinde kullanılır (Bentürk Ö, 2009).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

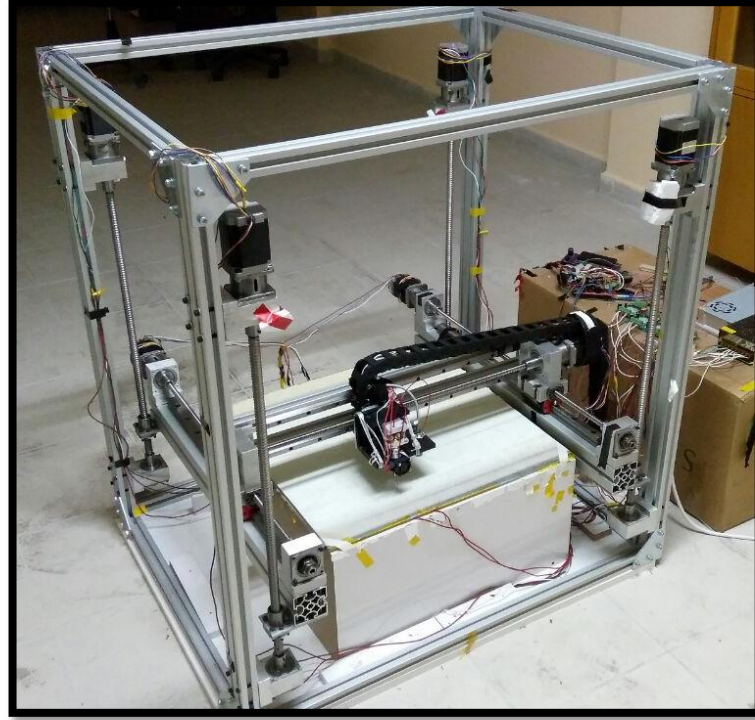
4.1. FDM Yazıcı Tasarımı ve İmalatı

Çalışmada FDM yazıcı tasarımı yapılmadan önce baskı alınacak parçanın boyutları düşünülmüştür. Ancak ne kadar büyük çaplı bir yazıcı yapılırsa maliyet o kadar artmaktadır. Dolayısıyla çok büyük bir yazıcı imal etmek çok pahalı olmaktadır. Nihai olarak piyasada yaygın olarak kullanılan FDM yazıcıların boyutları ve maliyet de göz önüne alınarak tasarlanacak olan yazıcının baskı boyutunun 500x500x500mm olmasına karar verilmiştir. Bu boyutta parçalar çıkarabilecek bir yazıcı büyük çaplı bir yazıcıdır. Bundan dolayı bazı tasarım kriterlerine karar verilmesi gerekmektedir. Öncelikle daha küçük bir makine yapmak için en uygun tasarımın seçilmesi lazımdır. Bundan dolayı tablanın hiçbir ekseninde hareket etmeyeceği bir tasarım düşünülmüştür. 500x500x500 mm'lik bir ABS parça basmak istediğimizde 130 kg'lık bir parça oluşacaktır. Bu kadar ağırlığın kaldırılması çok zor olacağı için tablanın hiçbir ekseninde hareket etmeyeceği bir tasarım düşünmek mantıklıdır.

Tasarlanan yazıcıda Y ekseni X eksenini taşımaktadır. Z ekseni de X ve Y eksenlerinin her ikisini birden taşımaktadır. X ekseninin hareketi için bir adet step motor, Y ekseni hareketi için iki adet step motor, Z ekseninin hareketi için ise 4 adet step motor kullanılmıştır. Yazıcının tasarlanmasında üç boyutlu katı model programı kullanılmıştır. Şekil 4.1'de üç boyutlu yazıcının katı model resmi gösterilmiştir. Şekil 4.2'de ise yazıcının tamamlanmış hali gösterilmektedir.



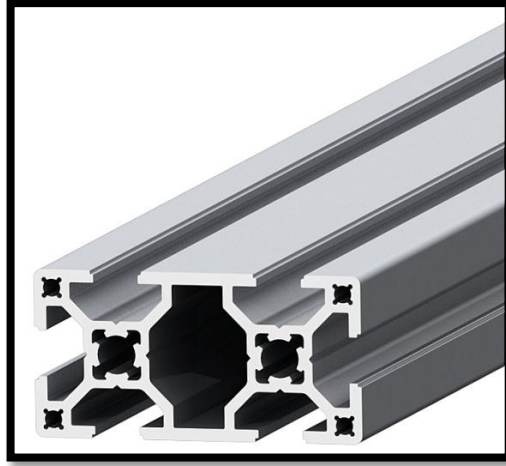
Şekil 4.1. FDM 3D yazıcı katı model resmi



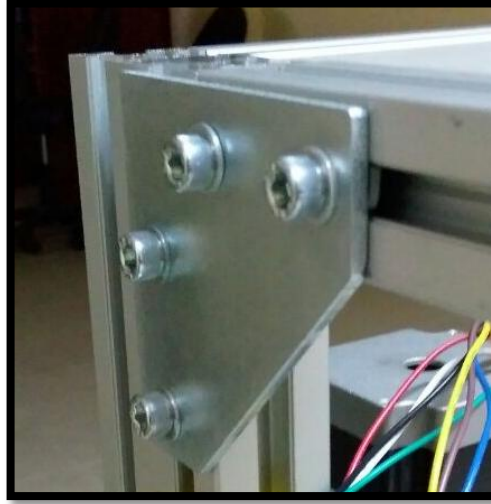
Şekil 4.2. FDM 3D yazıcı tamamlanmış hali

4.1.1. Yazıcı kasası

Yazıcı gövdesinde 60 x 30 mm'lik alüminyum sigma profiller kullanılmıştır. Şekil 4.3'de 60x30 mm'lik alüminyum sigma profil resmi gösterilmektedir. Sigma profiller kanal somun ve civata bağlantısı ile birbirlerine bağlanmıştır (Şekil 4.4). Yazıcının dış ölçüleri 1000 x 800 x 700 mm'dir.



Şekil 4.3. 60x30mm sigma profil



Şekil 4.4. Kanal somun-civata bağlantısı

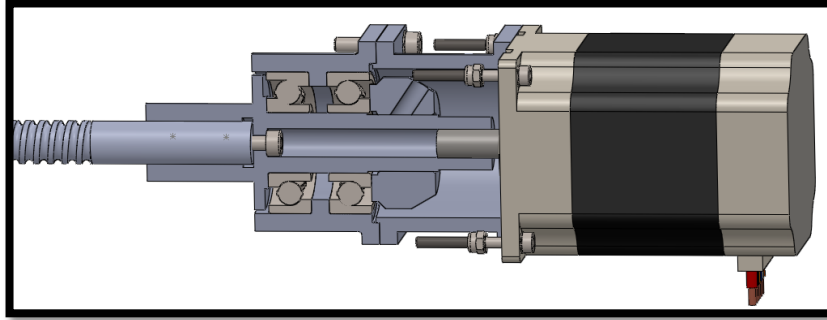
4.1.2. X-Y eksenleri

X-Y eksenlerinde taşıyıcı olarak alüminyum sigma profil kullanılmıştır. X ekseninde 30x30 mm'lik alüminyum sigma profil kullanılmıştır. Y ekseninde ise 60x60 mm'lik alüminyum sigma profil kullanılmıştır. X ve Y eksenlerinde hareket iletiminde vidalı mil-bilyalı somun ve lineer kızak-araba hareket elemanları kullanılmıştır. X eksenindeki vidalı mil 12 mm çapında olup hatvesi 4 mm'dir. X ekseninde bir adet vidalı mil-bilyalı somun mekanizması kullanılmıştır. X ekseninde 15 mm'lik kızak kullanılmıştır. X eksenindeki kızakların sayısı iki adettir. X eksenini hareket iletim mekanizması Şekil 4.5' de gösterilmiştir. X ekseninin hareket uzunluğu 500 mm'dir.

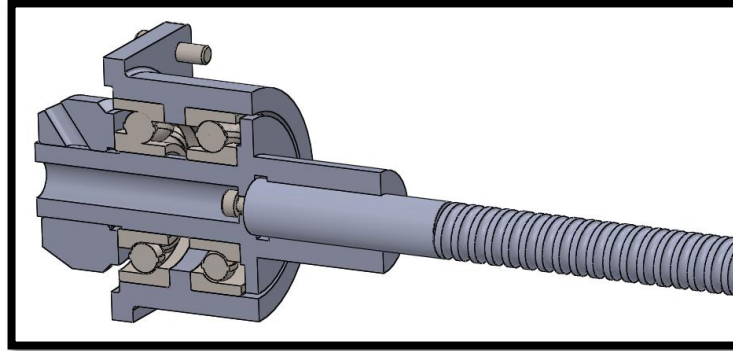


Şekil 4.5. X ekseni hareket iletim mekanizması

X ekseni yataklarında ikişer adet rulman kullanılmıştır. X ekseninde bir adet 57BHH82 step motor kullanılmıştır. Step motor 1.8° derecelik 200 adımlık bir motordur. X ekseni yatak tasarımı (motorlu kısım) Şekil 4.6' de gösterilmiştir. Şekil 4.7' de de X ekseni motorsuz boş kısmının yatak tasarımı gösterilmiştir.

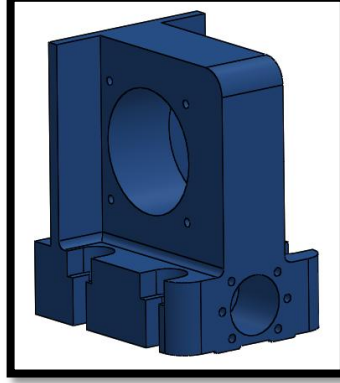


Şekil 4.6. X ekseni yatak tasarımı (motorlu kısım)

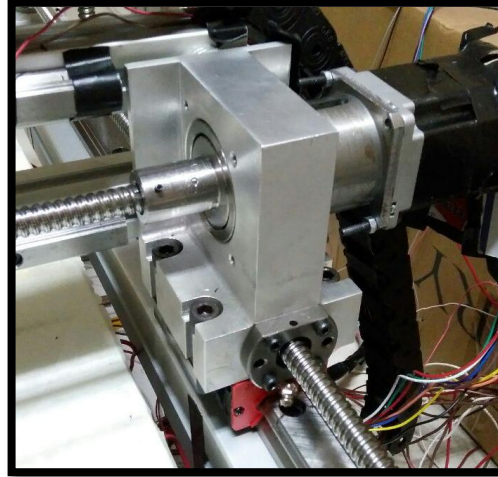


Şekil 4.7. X ekseni yatak tasarımı (motorsuz kısım)

Şekil 4.8’ de X eksen yatak tutucuları gösterilmiştir. Yataklar bu yatak tutucuları üzerine monte edilmiştir. Şekil 4.9’ de de X ekseninin motorlu kısmının gerçek resmi gösterilmektedir.

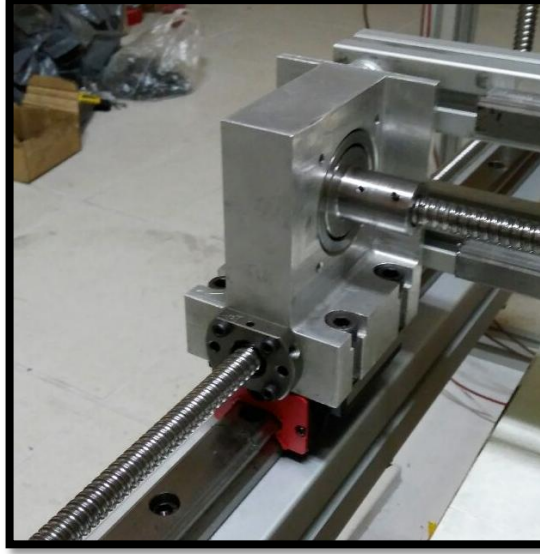


Şekil 4.8. X eksen yatak tutucuları



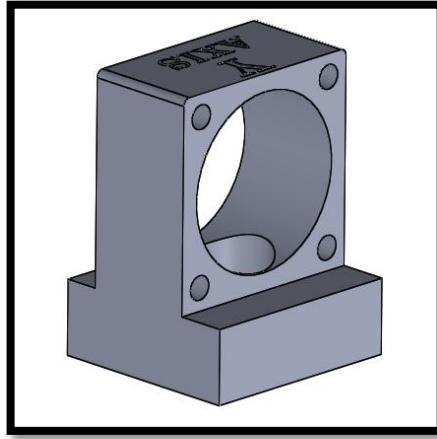
Şekil 4.9. X eksen yatak tutucu gerçek resmi

Y ekseninde kullanılan vidalı mil 16 mm çapında olup hatvesi 5 mm’dir. Y ekseninde iki adet vidalı mil–bilyalı somun mekanizması kullanılmıştır. Y ekseninde 25 mm’lik kızak kullanılmıştır. Y ekseninde iki adet kızak kullanılmıştır. Y ekseninin hareket iletim mekanizması Şekil 4.10’ de gösterilmiştir. Bu resimde aynı zamanda X ekseninin yatak tutucusu da görülmektedir. Resimdeki X eksen yatak tutucusu X eksenin motorsuz kısmının yatağını taşımaktadır. Y ekseninin hareket uzunluğu 500 mm’dir.



Şekil 4.10. Y eksenli hareket iletim mekanizması

Y eksenli yataklarında da ikişer adet rulman kullanılmıştır. Bütün eksenlerdeki yatak tasarımı aynıdır. Y ekseninde iki adet step motor kullanılmıştır. Motorlar X ekseninde olduğu gibi 57BHH82 step motorlarıdır. Şekil 4.11’ de Y eksenli yatak tutucuları gösterilmiştir. Aynı şekilde Y eksenli yatakları bu yatak tutucuları üzerine monte edilmiştir.

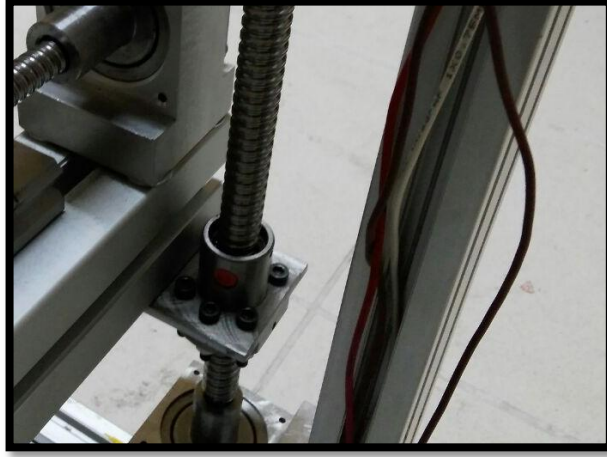


Şekil 4.11. Y eksenli yatak tutucu

4.1.3. Z eksenli

Z ekseninde hareket iletiminde vidalı mil–bilyalı somun mekanizması kullanılmıştır. Z ekseninde dört adet vidalı mil–bilyalı somun mekanizması kullanılmıştır. Millerin çapı 16 mm olup hatvesi 5 mm’dir. Z ekseninde kızak kullanılmamıştır. Z ekseninin hareket uzunluğu 500 mm’dir. Z ekseninin hareket iletim mekanizması Şekil 4.12’ de gösterilmektedir. Şekilde aynı zamanda Y ekseninin yatak tutucusu görülmektedir

(Sol üstte). Resimdeki Y eksen yatak tutucusu Y ekseninin motorsuz kısmının yatağını taşımaktadır.

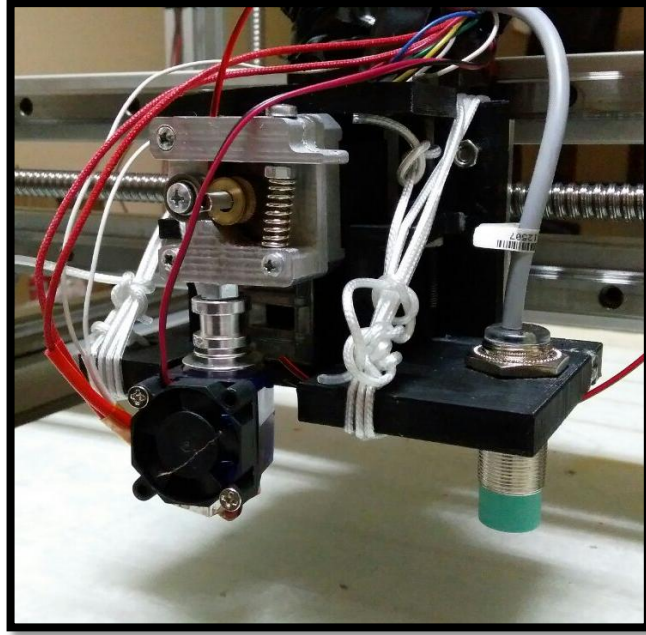


Şekil 4.12. Z ekseninin hareket iletim mekanizması

Z ekseninin yataklanması yazıcı kasası üzerine yapılmıştır. Z ekseninde de X ve Y eksenlerinde olduğu gibi aynı yatak tasarımı kullanılmıştır. Z ekseninin yatak tutucuları Y eksenindeki gibidir. Z ekseninde 4 adet step motor kullanılmıştır. Motorlar X ve Y eksenlerinde olduğu gibi 57BHH82 step motorlarıdır.

4.1.4. Ekstrüder

Çalışmada E3D-v6 ekstrüder sıcak ucu kullanılmıştır. Ekstrüderin filamanet süren kısmı satın alınmıştır. Ekstrüderin geri kalan kısımları ise tasarlanıp imal edilmiştir. Filamenti sürmek için Nema 17 step motor kullanılmıştır. Şekil 4.13' de ekstrüder gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi ekstrüderin sağ alt kısmında endüktif sensör vardır. Bu endüktif sensör yardımı ile tabla kalibrasyonu yapılmaktadır. Endüktif sensör metal malzemeye duyarlı bir sensördür. Kullanılan endüktif sensörün 0 - 8mm'lik bir çalışma aralığı vardır. Sensörün tablayı algıladığında durması için tabla alüminyum bant ile sarılmıştır.



Şekil 4.13. Ekstrüder

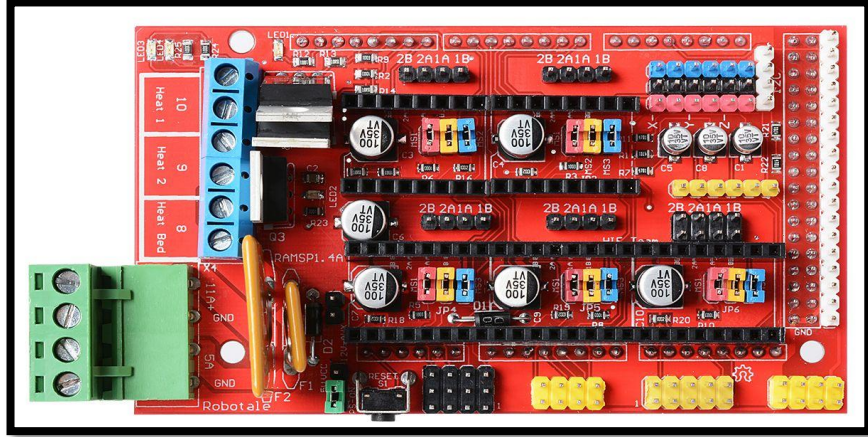
4.1.5. Motor sürücüleri ve denetleyiciler

Yazıcıdaki step motorların sürülmesi için TB6560 step motor sürücüleri kullanılmıştır. X eksenindeki bir step motor için bir, Y eksenindeki iki step motor için bir, Z eksenindeki dört step motor için ise iki adet step motor sürücü kullanılmıştır. Şekil 4.14' de TB6560 step motor sürücü gösterilmektedir. Sürücünün maksimum çıkış akımı 3A'dır. Sürücü 24V ile beslenmektedir. Bu sürücüleri beslemek için 24 voltluk 20A'lık bir güç kaynağı kullanılmıştır.



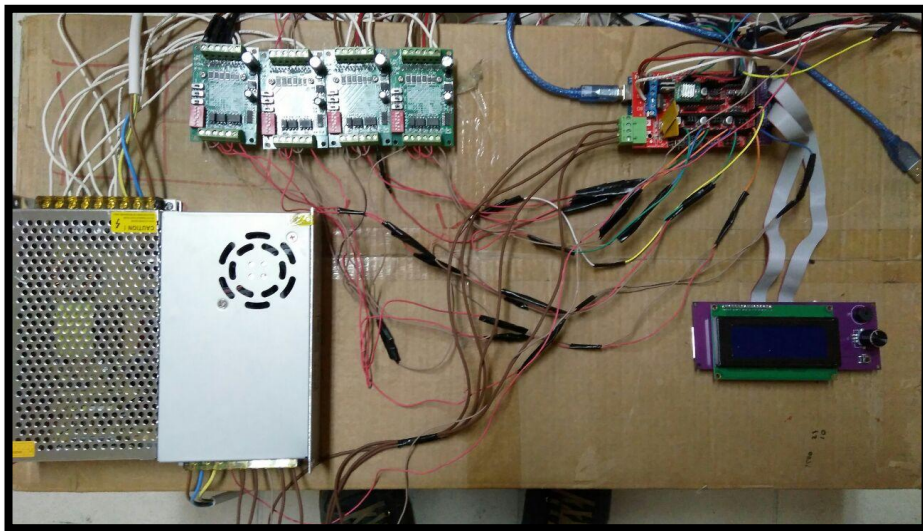
Şekil 4.14. TB6560 step motor sürücü

Yazıcının bütün aksamalarının denetlenmesinde Arduino mega 2560 R3 mikrodenetleyici kullanılmıştır. Arduino mega 2560 R3 kartının üzerine üç boyutlu yazıcılar için tasarlanmış Ramps 1.4 kartı yerleştirilmiştir. Ramps 1.4 kartı, step motorlar sürücüleri, LCD ekran ve sensörler gibi elemanların Arduino denetleyici kartına bağlanmasında kolaylık sağlamaktadır. Şekil 4.15' de Ramps 1.4 kartı gösterilmektedir.



Şekil 4.15. Ramp 1.4 kart

Ramps 1.4 kartı 12V ile iki kanaldan beslenmektedir. Bu kartı beslemek için 12V'luk 20 A'lık bir güç kaynağı kullanılmıştır. Ramp 1.4'e bütün step motor sürücüleri, LCD ekran, ısıtıcı tabla ve ekstrüder sıcak uç sensörleri, ısıtıcı tabla ve ekstrüder sıcak uç ısıtıcısı, soğutucu fanlar, tüm eksenlerdeki end stoplar, tabla sıfırlamada kullanılan endüktif sensör ve 12V'luk güç kaynağı bağlanmıştır. Şekil 4.16' de bütün elektronik aksam gösterilmektedir.



Şekil 4.16. Elektronik aksam

4.1.6. Yazılım

Yazıcının yazılımında Marlin 1.1.0-RC7 açık kaynak kodlu FDM yazıcı yazılımı kullanılmıştır. Çalışmada yazılım üzerine bir iyileştirme yapılmamıştır. Ancak yazılım üzerinden bazı ayarların yapılması gerekmektedir. Yazıcı tipi ve tasarımı için gerekli olan kurulum ayarları yazılım üzerinden yapılıp, Arduino Mega 2560 R3 mikrodenetleyicisine gömülmüştür. Yazılım bütün FDM tip yazıcılar için genel bir yazılımdır. Ancak yazıcıların boyutları, kullanılan sensörler, step motor sürücüleri, tabla sıfırlama metodu gibi özelliklerinin farklı olması nedeniyle kurulum ayarlarının yapılması zorunludur.

4.2. Eğilme Dayanımı ve Sertlik Deneyleri için 2^P Faktöriyel Deney Tasarımı

4.2.1. Deney tasarımı için temel kavramlar

Deney Tasarımı, bir süreçteki girdi değişkenleri üzerinde istenilen değişikliklerin yapılmasıyla cevap değişkeni üzerindeki etkilerinin gözlenmesi, elde edilmesi ve yorumlanması olarak tanımlanabilir (Besterfield vd, 1995). Deney Tasarımı, süreç optimizasyonunda, süreç değişkenlerinin tanımlanmasında ve prosesteki değişkenliğin azaltılmasında kullanılan çok önemli bir teknik olup, incelenen çıktı özelliklerine etki eden ve kontrol edilebilir değişkenlerin süreç performansına etkisini belirlemede kullanılır. Deney Tasarımı teknikleri, yeni bir süreç geliştirmede ve performans artırma amacıyla mevcut süreci düzeltmede çok önemli bir rol oynamaktadır (Montgomery, 2005).

Deney tasarımı vasıtasıyla bir süreç hakkında az sayıda deney yapılıp bilgi edinilmesi mümkündür. Deney tasarımında kullanılan bazı kavramlar aşağıda sıralanmıştır.

- Cevap Değişkeni: Gözlemlenen yada ölçülen çıktı değişkeni
- Faktör: Cevap değişkeni üzerinde etkisi olan, kontrol edilebilen bağımsız değişkendir.
- Seviye: Deneydeki her bir faktörün tanımlı sayısal değerleridir.
- Ana Etki: Deney faktörlerinin cevap değişkeni üzerindeki diğer faktörlerden bağımsız etkisidir.

- Etkileşim: Bir faktörün cevap değişkenine etkisinin diğer faktörün hangi değerde bulunduğuna ilişkin olması durumudur.
- Gürültü: Faktör olarak tanımlanmayan ancak cevap değişkeni üzerinde etkisi olan diğer bağımsız.

4.2.2. Eğilme dayanımı ve sertlik deneyleri

Malzemeler kullanım alanlarında yük ve kuvvetlere maruz kalmakta ve bunların etkisi ile deforme olmaktadır. Malzemelerin kullanım yerini dikkate alarak mekanik ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi gereklidir. Eğilme dayanımı ve sertlik malzemelerin en önemli mekanik özellikleri arasındadır.

Eğilme deneyinde malzeme iki desteğe serbest olarak konulduktan sonra malzemenin orta noktasına yön değiştirmeden belirli bir hızda kuvvet uygulanarak malzeme kalıcı şekil değişikliğine uğratarak eğilme direnci değeri belirlenir. Şekil 4.17’de standart eğilme direnci numunesi ölçüleri verilmiştir. Eğilme direncinin hesaplanmasında aşağıda verilen eşitlikten yararlanılmıştır.

(4.1) nolu denklem,

$$F_m = \frac{3 \times F_{\max} \times L_s}{2 \times B \times H^2} \quad (\text{N/mm}^2)$$

Olacak şekilde düzenlenerek yeniden ifade edilebilir.

Burada;

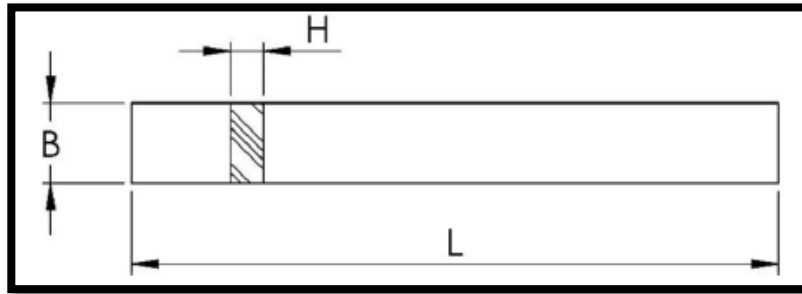
F_m = Eğilme direnci (N/mm^2)

F_{\max} = Kırılma anındaki maksimum kuvvet (N)

L_s = Dayanak eksenleri arasındaki mesafe (mm)

B = Deney örneğinin genişliği (mm)

H = Et kalınlığı



Şekil 4.17. Eğilme dayanımı deney numunesi ölçüleri $B=10\text{mm}$, $L=80\text{mm}$, $H=4\text{mm}$ (DIN EN ISO 178)

Sertlik deneyinde plastik malzemelerin sertliğinin ölçümünde kullanılan Shore testi uygulanmıştır. Shore testinde deney cihazında bulunan ucun numunelere batırılmasıyla sertlik ölçülmektedir. Ucu içerisinde bulunan yay malzemenin sertliğine göre gerilir ve buna bağlı olarak malzemenin sertliği belirlenir. Plastik malzemelerin sertliği Shore A, B, C, D, O ve OO olmak üzere farklı ölçütlerde belirlenmektedir. Bu ölçütlerin dönüşüm tabloları mevcuttur. Dolayısıyla Shore A cinsinden ölçülmüş bir sertlik değeri Shore B, C veya başka bir Shore değerine dönüştürülebilir. Test cihazında Shore A ucu bulunması nedeniyle elde edilen numunelerin sertlikleri Shore A cinsinden ölçülmüştür.

4.2.3. Faktörlerin, seviyelerin belirlenmesi ve deney tasarımı

FDM tipi yazıcılarda baskı işlemi yapılırken baskı sıcaklığı, doluluk oranı, baskı hızı, oryantasyon, tarama açısı, katman kalınlığı, nozıl çapı gibi faktörler süreci etkilemektedir. Bu çalışmada doluluk yüzdesinin, baskı sıcaklığının, baskı hızının ve malzeme türünün eğilme dayanımına ve sertliğe olan etkileri araştırılmıştır. Çizelge 4.3’de deney faktörleri ve seviyeleri sıralanmıştır. Bu faktörlerden malzeme türü niteliksel diğer faktörler ise niceliksel olarak ifade edilmiştir.

Çizelge 4.1. Deney faktörleri ve seviyeleri

Faktör	Sembol	Düşük Seviye (-1)	Yüksek Seviye (+1)
Tür	A	ABS	PET-G
Doluluk Yüzdesi (%)	B	60	100
Baskı Hızı (mm/s)	C	50	90
Baskı Sıcaklığı (°C)	D	240	260

Deneylere başlamadan önce deney tasarımı matrisi, kodlama yöntemi kullanılarak Minitab 16.0 istatistik yazılım programı yardımıyla oluşturulmuştur. Numunelerin yapımında toplam 16 (2^4) farklı kombinasyon denenmiştir. Her kombinasyon üçer kez tekrar edilmiştir. Deney Tasarımına göre yapılan deneyler sonucunda elde edilen Eğilme direnci ve yüzey sertlik değerleri Çizelge 4.4 ‘de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Tasarım matrisi

Deney No	Deney Faktörleri				Eğilme Dayanımı			Sertlik		
	A	B	C	D	I	II	II	I	II	II
1	-1	-1	-1	-1	44,12	45,12	37,36	95,19	96,06	96,15
2	1	-1	-1	-1	39,00	37,50	37,50	96,42	95,75	96,72
3	-1	1	-1	-1	50,30	50,70	48,90	89,38	90,37	89,70
4	1	1	-1	-1	42,75	49,50	41,63	94,15	92,93	91,80
5	-1	-1	1	-1	52,30	51,00	50,30	93,57	92,97	93,58
6	1	-1	1	-1	40,13	39,00	37,50	96,62	97,08	96,82
7	-1	1	1	-1	50,70	49,10	51,20	90,12	91,35	89,25
8	1	1	1	-1	62,90	75,90	70,50	88,40	88,60	89,28
9	-1	-1	-1	1	56,90	57,90	57,40	93,25	91,45	92,75
10	1	-1	-1	1	55,90	54,00	55,70	88,45	90,15	90,85
11	-1	1	-1	1	57,90	53,90	52,50	88,60	88,25	90,00
12	1	1	-1	1	67,50	72,60	67,60	88,70	88,20	89,97
13	-1	-1	1	1	62,50	60,70	58,90	93,40	93,40	91,90
14	1	-1	1	1	77,70	79,90	80,80	94,05	92,50	92,05
15	-1	1	1	1	70,40	70,90	69,70	92,35	93,85	94,75
16	1	1	1	1	68,80	69,50	66,90	91,75	88,65	90,95

Üç boyutlu yazıcıda kullanılan nozulun iç çapı 0,4mm'dir. Numunelerinin taban ve üst katman kalınlıkları 0.6 mm'dir. Ara katmanların kalınlıkları ise 1.2 mm'dir. Numuneler düz çizgili (rectilinear) şekilde basılmıştır. Şekil 4.18' de üç boyutlu yazıcıdan basılmış eğilme dayanımı numunesi gösterilmektedir. Eğilme dayanımı testi yapıldıktan sonra numune üzerinden sertlik değerleri ölçülmüştür.



Şekil 4.18. Eğilme dayanımı numunesi

5. BULGULAR

5.1. Eğilme Dayanımı Sonuçları

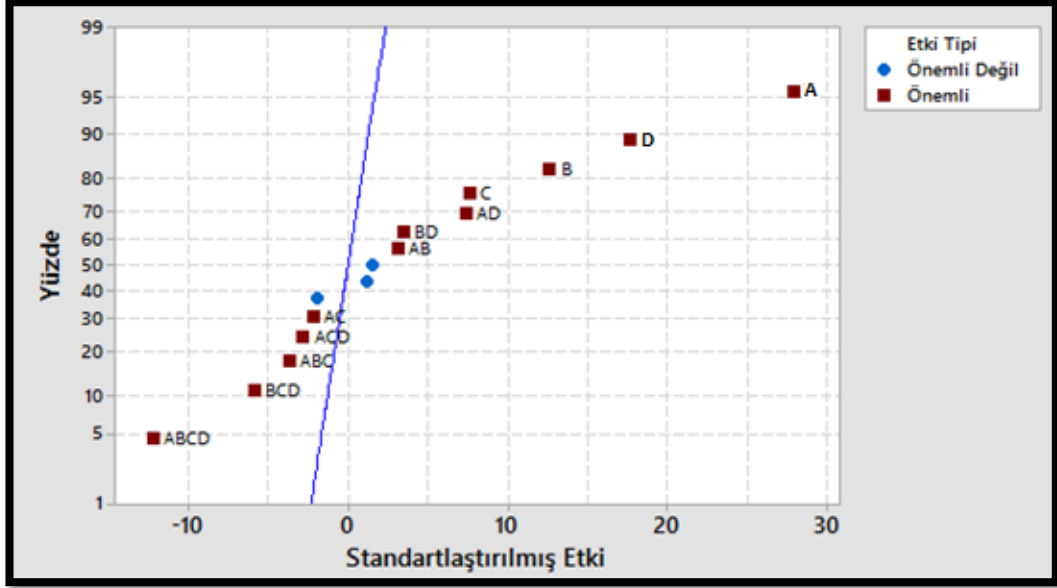
İstatistiksel çalışmalar için Minitab 16.0 yazılımından faydalanılmıştır. Hem ABS hemde PET-G filamentler kullanılarak deney matrisinde belirtilen koşullarda üretilen deney örneklerinden belirlenen eğilme dayanımına ait varyans analizi sonuçları Çizelge 5.1’de gösterilmiştir. Çizelge 5.1’de P değeri 0,05’den büyük olan parametrelerin %5 anlamlılık düzeyinde cevap değişkeni (eğilme dayanımı) üzerinde etkisi olmadığı anlaşılmaktadır.

Çizelge 5.1. Eğilme dayanımı varyans analizi sonuçları

Değişim Kaynağı	S.D.	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P
Ana Etkiler	4	3348,37	837,09	327,78	0,00
A	1	1993,05	1993,05	780,42	0,00
B	1	406,59	406,59	159,21	0,00
C	1	147,18	147,18	57,63	0,00
D	1	801,56	801,56	313,87	0,00
İki Yönlü Etkileşimler	6	223,38	37,23	14,58	0,00
AB	1	25,38	25,38	9,94	0,00
AC	1	12,25	12,25	4,80	0,04
AD	1	138,89	138,89	54,39	0,000
BC	1	5,92	5,92	2,32	0,14
BD	1	30,96	30,96	12,12	0,00
CD	1	9,99	9,99	3,91	0,06
Üç Yönlü Etkileşimler	4	146,99	36,75	14,39	0,00
ABC	1	35,11	35,11	13,75	0,00
ABD	1	3,44	3,44	1,35	0,25
ACD	1	20,15	20,15	7,89	0,01
BCD	1	88,29	88,29	34,57	0,00
Dört Yönlü Etkileşimler	1	380,25	380,25	148,90	0,00
ABCD	1	380,25	380,25	148,90	0,00
Hata	32	81,72	2,55		
Genel	47	4180,72			

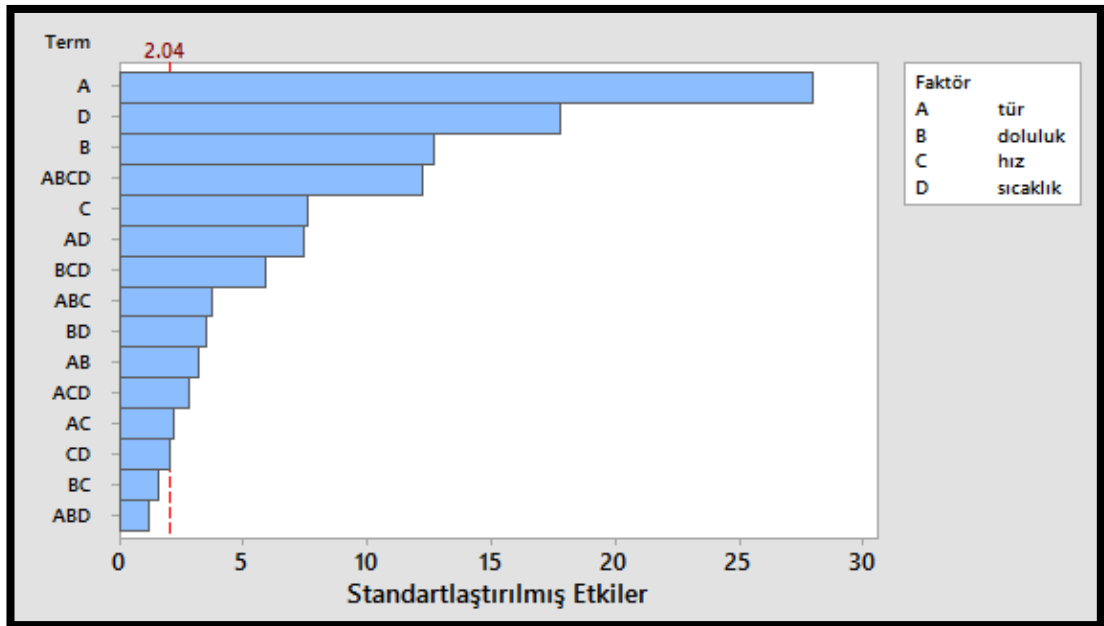
S.D.=Serbestlik Derecesi

Şekil 5.1'deki normal olasılık grafiği de cevap değişkeni üzerinde etkili olan faktörleri göstermektedir. Grafikten anlaşılacağı gibi çizgi etrafında toplanan etkiler eğilme dayanımına etkisi olmayan faktörlerdir. Bu grafikten referans çizgisine en uzak noktada bulunan A (Tür) etkisinin eğilme dayanımında (cevap değişkeni) en etkili parametere olduğu görülmektedir.



Şekil 5.1. Normal olasılık grafiği (Eğilme dayanımı)

Şekil 5.2'deki pareto grafiğinde faktörlerin etkilerin büyükten küçüğe sıralaması görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı gibi A etkisi en büyük etki iken CD, BC ve ABD etkileşimlerinin cevap değişkeni üzerinde bir etkisi yoktur.



Şekil 5.2. Pareto grafiği (Eğilme dayanımı)

İkinci aşamada eğilme dayanımına etkisi olmayan parametreler çıkarılarak analiz tekrardan yapılmıştır. Çizelge 5.2’de eğilme dayanımı için etkiler ve katsayıları verilmiştir. Ana etkilerin ve etkileşimlerin eğilme dayanımına etkilerinin anlamlı olup olmadığı t-testi sonuçlarından anlaşılmaktadır. Çizelge 5.2’de P değerinin 0,05’den küçük olduğu parametreler eğilme dayanımı için istatistiksel olarak etkili olan parametrelerdir. Katsayının negatif değerde olması parametrenin eğilme dayanımını olumsuz yönde etkilediği anlamına gelmektedir. Katsayıların mutlak değerinin büyük olması faktörün eğilme dayanımı daha fazla etkilemesine neden olacaktır. R² değerine göre % 96,75 doğrulukla cevap değişkeni hesaplanabilmektedir.

Çizelge 5.2. Eğilme dayanımı için tahmin edilen etkiler ve katsayılar

Terim	Etki	Katsayı	Std. Hata	T	P
Sabit		57,99	0,245	236,44	0,00
A	12,88	6,44	0,245	26,27	0,00
B	5,82	2,91	0,245	11,87	0,00
C	3,50	1,75	0,245	7,14	0,00
D	8,17	4,08	0,245	16,66	0,00
AB	1,45	0,72	0,245	2,96	0,00
AC	-1,01	-0,50	0,245	-2,06	0,04
AD	3,40	1,70	0,245	6,94	0,00
BD	1,60	0,80	0,245	3,27	0,00
ABC	-1,71	-0,85	0,245	-3,49	0,00
ACD	-1,29	-0,64	0,245	-2,64	0,01
BCD	-2,71	-1,35	0,245	-5,53	0,00
ABCD	-5,62	-2,81	0,245	-11,48	0,00

$$S = 1,69932 \quad R^2 = 97,58\% \quad R^2 (\text{tah.}) = 95,45\% \quad R^2 (\text{düz.}) = 96,75\%$$

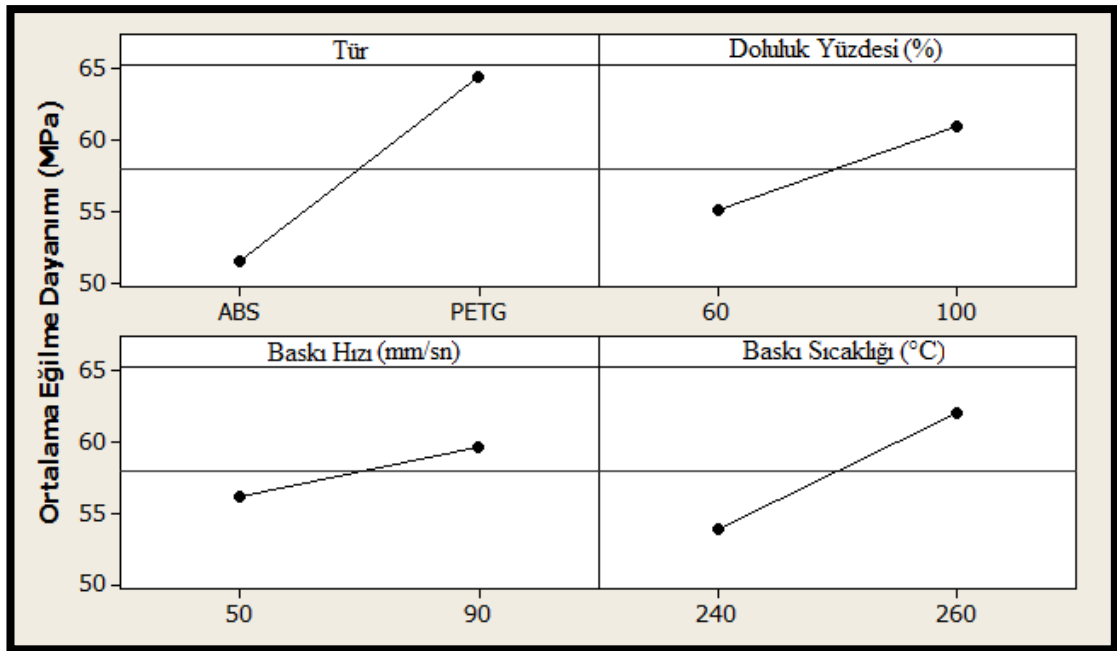
Katsayı, herhangi bir etkinin bir birim arttığında çıktı üzerinde yaratacağı etkiyi yani; cevap değişkeni ve faktörler arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Çizelge 5.2’de gösterilen katsayılar kullanılarak eğilme dayanımı ile faktörler arasındaki regresyon ilişkisi Denklem 5.1’de verilmiştir.

(5.1) nolu denklem,

$$Y = 57,99 + 6,44xA + 2,91xB + 1,75xC + 4,08xD + 0,72xAB - 0,50xAC + 1,70xAD + 0,80xBD - 0,85xABC - 0,64xACD - 1,35xBCD - 2,81xABCD$$

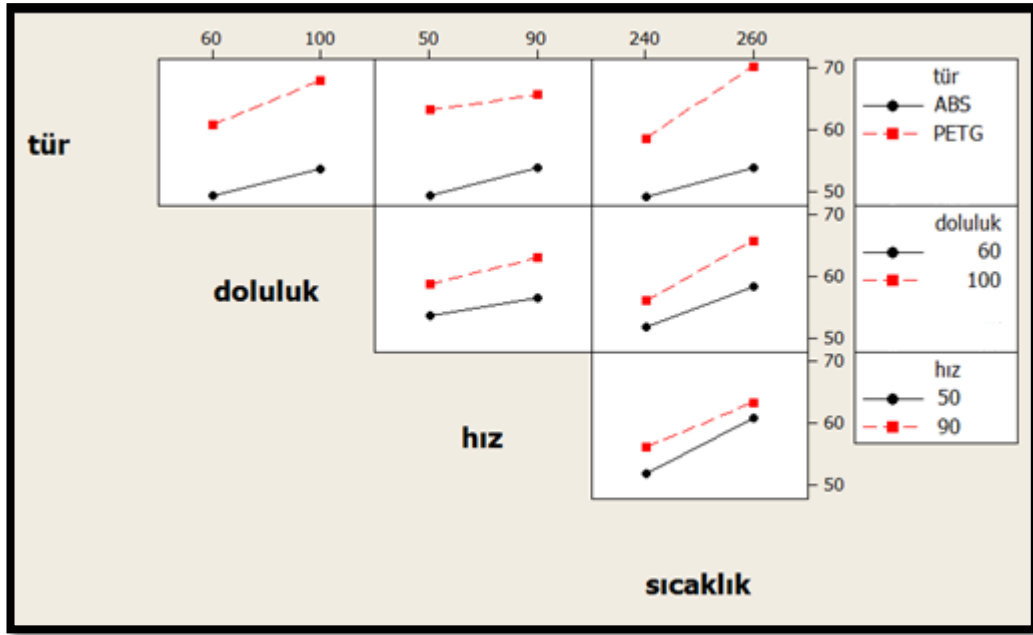
olacak şekilde ifade edilmiştir.

Şekil 5.3’de ana etkiler grafiği gösterilmiştir. Bir faktörün ana etkisi; faktör yüksek seviyede ve düşük seviyede iken hesaplanan ortalama cevap değişkenleri arasındaki farkı ifade etmektedir. Ana etki grafiğinde, bir faktörün seviye değişimlerinin cevap değişkeni üzerinde yaratacağı fark ne kadar büyük ise, seviyeleri birleştiren çizgi o kadar dik olacaktır. Şekilden filament türünün eğilme dayanımına etkisi diğer faktörlere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra doluluk yüzdesinin, baskı hızının ve baskı sıcaklığındaki değişiminin eğilme dayanımını üzerine arttırıcı yönde etkili olduğu söylenebilir. Ancak baskı hızı ve baskı sıcaklığının artması belli bir noktadan sonra eğilme dayanımını düşürecektir.



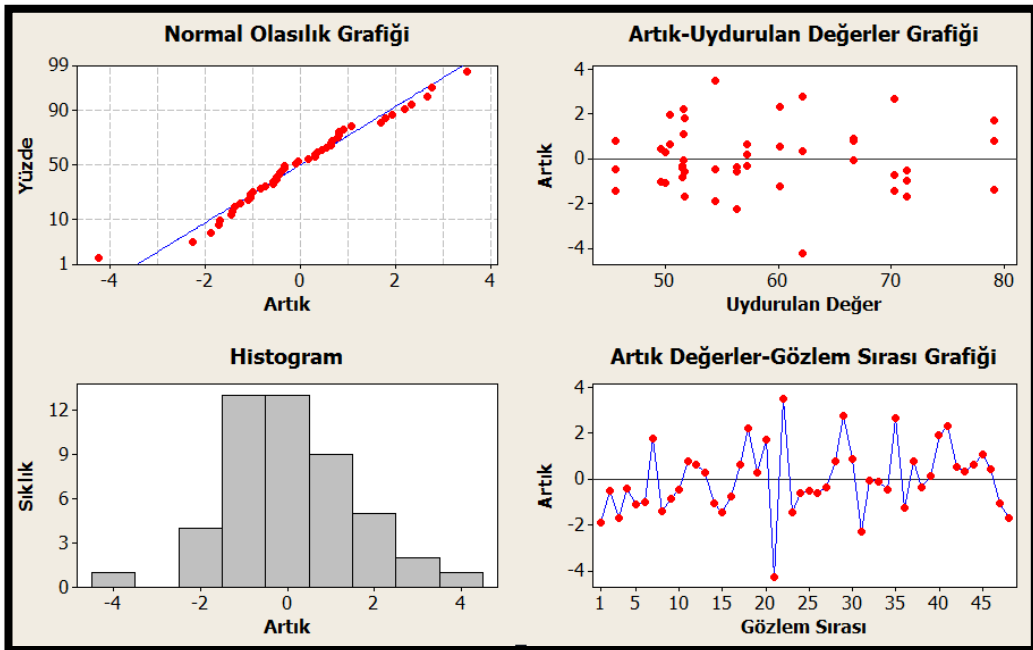
Şekil 5.3. Ana etkiler grafiği (Eğilme dayanımı)

Şekil 5.4’de etkileşimler grafiği görülmektedir. Paralel olmayan çizgiler etkileşime işaret eder. Örneğin PET-G’de sıcaklığın yüksek olması (+1) eğilme dayanımını üzerinde daha etkili olmuştur. Aynı şekilde doluluğun artması ile de PET-G’nin dayanımını artmıştır.



Şekil 5.4. Etkileşimler grafiği (Eğilme dayanımı)

Şekil 5.5’de ise artıkların grafiksel analizi gösterilmektedir. Normal Olasılık Grafiğinden artıkların normal dağıldığı ve ortalamasının sıfır olduğu, Histogram grafiğinden verilerde çarpıklık olmadığı ve uç değer içermediği ve bir ayrı histogram grafiğinin oluştuğu, Artık Değerler-Uydurulan Değerler Grafiğinden artık değerlerin rastgele dağıldığından varyansın sabit olduğu, Artık Değerler-Gözlem Sırası Grafiğinden ise veri toplama esnasında herhangi bir sistematik etkinin olmadığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla modelin geçerli olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.5. Artıkların grafiksel analizi (Eğilme dayanımı)

5.2. Sertlik Deneyi

ABS ve PET-G filamentler kullanılarak değişik koşullarda üretilen deney örneklerinden belirlenen sertlik değerlerine ait varyans analizi Çizelge 5.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.3. Sertlik deneyi varyans analizi

Değişim Kaynağı	S.D.	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	P
Ana Etkiler	4	163,20	40,80	34,61	0,00
A	1	41,41	41,41	35,13	0,00
B	1	0,24	0,24	0,20	0,65
C	1	120,15	120,15	101,94	0,00
D	1	1,38	1,38	1,18	0,28
İki Yönlü Etkileşimler	6	108,85	18,14	15,39	0,00
AB	1	21,28	21,28	18,06	0,00
AC	1	32,62	32,62	27,68	0,00
AD	1	51,67	51,67	43,84	0,00
BC	1	3,09	3,09	2,62	0,11
BD	1	0,16	0,16	0,14	0,70
CD	1	0,00	0,00	0,00	0,99
Üç Yönlü Etkileşimler	4	37,05	9,26	7,86	0,00
ABC	1	1,76	1,76	1,50	0,22
ABD	1	0,00	0,00	0,01	0,93
ACD	1	5,64	5,64	4,79	0,03
BCD	1	29,63	29,63	25,14	0,00
Dört Yönlü Etkileşimler	1	0,15	0,15	0,13	0,72
ABCD	1	0,15	0,15	0,13	0,72
Hata	32	37,72	1,17		
Genel	47	346,98			

S.D.=Serbestlik Derecesi

Normal olasılık grafiğinden de süreç üzerinde etkili olan parametreler görülebilir (Şekil 5.6). Grafikten anlaşılacağı gibi çizgi etrafında toplanan parametreler sertliğe etkisi olmayan parametrelerdir. Bu grafikten referans çizgisine en uzak noktada bulunan C (Baskı hızı) faktörünün sertlikte en etkili faktör olduğu görülmektedir. B ve D faktörlerinin sertlik dayanımına etkilerinin olmadığı

sertlik için etkiler ve katsayıları verilmiştir. Ana etkilerin ve etkileşimlerin sertliğe olan etkilerinin anlamlı olup olmadığı t-testi sonuçlarından anlaşılmaktadır. Çizelge 5.4’de P değerinin 0,05’den küçük olduğu parametreler sertlik için istatistiksel olarak etkili olan parametrelerdir. Katsayının negatif değerde olması parametrenin sertliği olumsuz yönde etkilediği anlamına gelmektedir. Daha önceden de bahsedildiği gibi katsayının mutlak değeri büyük ise faktör sertliği daha fazla etkileyecektir. R² değerine göre cevap değişkeni % 75,74 doğrulukla hesaplanabilmektedir.

Çizelge 5.4. Sertlik deneyi için tahmin edilen etkiler ve katsayılar

Terim	Etki	Katsayı	Std. Hata	T	P
Sabit		92,18	0,15	601,06	0,00
A	-1,85	-0,92	0,15	-6,06	0,00
B	-0,14	-0,07	0,15	-0,46	0,64
C	-3,16	-1,58	0,15	-10,32	0,00
D	0,34	0,17	0,15	1,11	0,27
AB	-1,33	-0,66	0,15	-4,34	0,00
AC	1,64	0,82	0,15	5,38	0,00
AD	2,07	1,03	0,15	6,77	0,00
ACD	0,68	0,34	0,15	2,24	0,03
BCD	-1,57	-0,78	0,15	-5,12	0,00

$$S = 1,08570 R^2 = 89,13\% \quad R^2 (\text{tah.}) = 84,03\% \quad R^2 (\text{düz.}) = 75,54\%$$

Çizelge 5.2’de gösterilen katsayılar kullanılarak yüzey sertlik değeri ile faktörler arasındaki ilişki kurulabilir. Denklem 5.2’de sertlik ile faktörler arasındaki ilişki ifade edilmiştir.

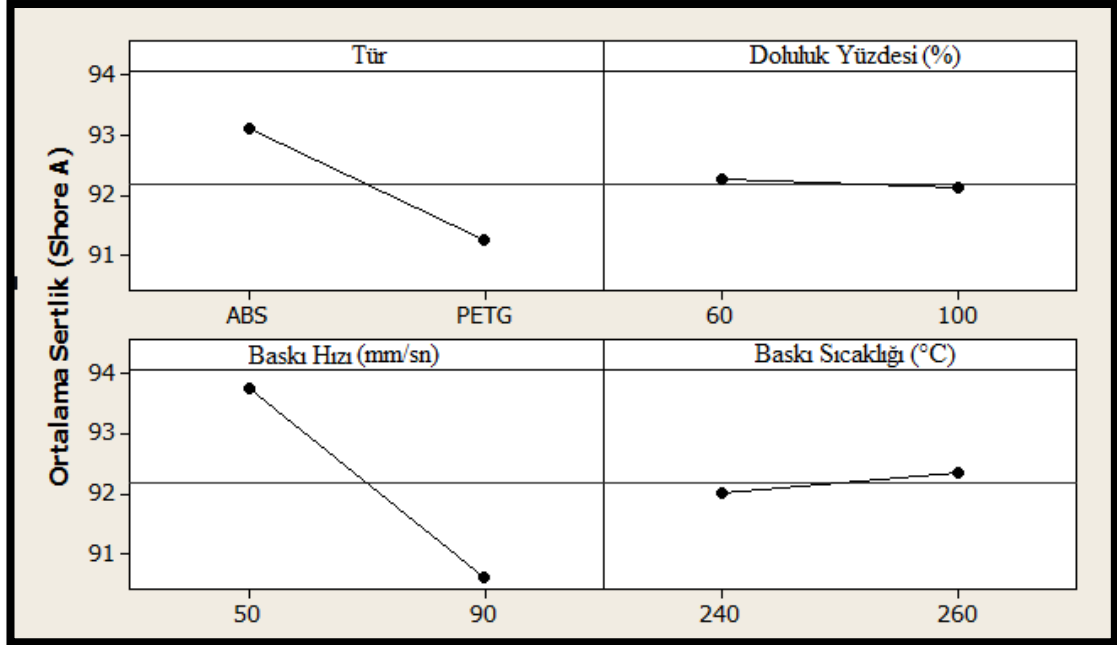
(5.2) nolu denklem,

$$Y = 92,18 - 0,92xA - 0,07xB + 1,58xC - 0,17xD - 0,66xAB - 0,82xAC - 1,03xAD + 0,34xACD + 0,78xBCD$$

olacak şekilde ifade edilebilir.

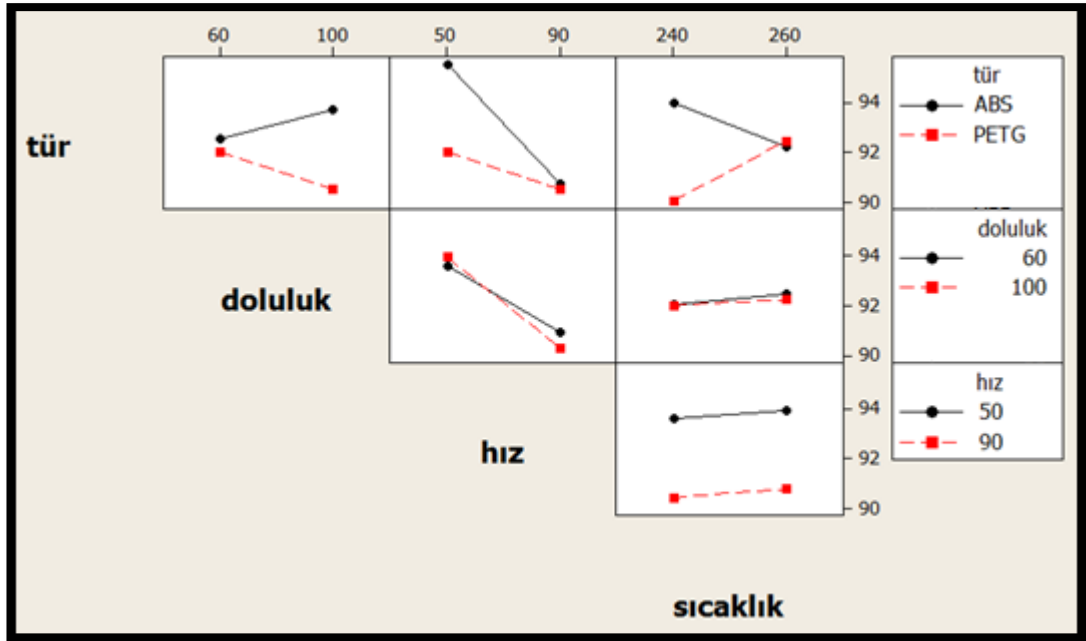
Şekil 5.8’de ana etkiler grafiği gösterilmiştir. Şekilden ABS filament türünün daha sert bir malzeme olduğu anlaşılmaktadır. Grafiklerden doluluk yüzdesinin ve baskı sıcaklığının sertlik üzerinde çok fazla bir etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır. Baskı hızının artması ise sertliği önemli ölçüde etkilemiştir. Sertlik daha çok malzemenin yüzeyi ile alakalı bir özellik olduğundan ve kullanılan stardarta göre yüzeyden mikro düzeyde ölçüm yapıldığında numunenin iç doluluk oranı sertliği çok etkilememiştir. Fakat başka sertlik standartları kullanılarak numune iç doluluk oranının etkisi daha net bir şekilde belirlenebilir. Sıcaklığın artması ise nozıldan

akan malzemenin daha iyi yayılmasını neden olduğu için daha iyi bir yüzey formu sağlamıştır. Dolayısıyla az da olsa sertliği arttırıcı yönde etki yaptığı tespit edilmiştir. Baskı hızının artması nedeniyle yüzeyde malzeme güzel bir şekilde birikmemiş ve yüzey sertlik değerini azaltıcı yönde etki yapmıştır.



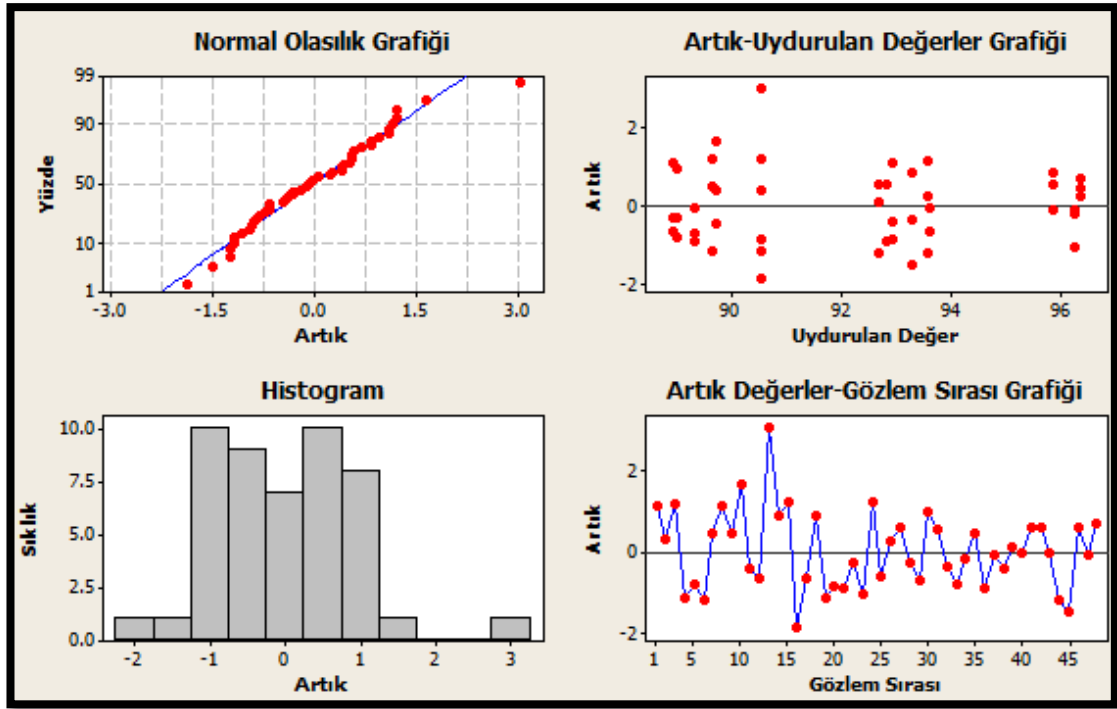
Şekil 5.8. Ana etkiler grafiği (Sertlik)

Şekil 5.9'da etkileşimler grafiği gösterilmektedir. Grafiklerde hızın artması ile sertliğin azaldığı görülmektedir. Bu durum ABS malzemede daha net bir şekilde olmuştur. Yüksek hızda yüzey düzgün oluşturulamamış ve dolayısıyla sertlik azalmıştır. Sıcaklığın artması ABS'de sertliği düşürürken PET-G'de arttırmıştır.



Şekil 5.9. Etkileşimler grafiği (Sertlik)

Şekil 5.10’da ise artıkların grafiksel analizi gösterilmektedir. Belirlenen yüzey sertlik değerlerinde Normal Olasılık Grafiğinden artıkların normal dağıldığı ve ortalamasının sıfır olduğu, Histogram grafiğinden anlaşılacağı gibi iki tepeli ve ayrık bir dağılımda olduğu, Artık Değerler-Uydurulan Değerler Grafiğinden artık değerlerin rastgele dağıldığından varyansın sabit olduğu, Artık Değerler-Gözlem Sırası Grafiğinden ise veri toplama esnasında herhangi bir sistematik etkinin olmadığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla modelin geçerli olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.10. Artıkların grafiksel analizi (Sertlik)

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında 500x500x500mm boyutlarında parça basabilme kabiliyetine sahip Eriyik Yığıma Tekniği (FDM) ile çalışan 3D yazıcı imal edilmiştir. Tasarlanan ve imalatı yapılan 3D yazıcıda, piyasada yaygın olarak üretilen ve kullanılan 3D yazıcılarından farklı olarak vidalı mil-bilyalı somun kullanılmak suretiyle konum hassasiyetinde iyileştirme gerçekleştirilmiştir. İmalatı yapılan yazıcının büyük hacimli baskı alanına sahip olması büyük parçaların basımı için bir avantajdır. Yazıcı yazılım olarak, mekanik aksam olarak ve baskı kalitesi olarak geliştirilmeye açıktır.

Eksenlerde vidalı mil-bilyalı somun ve kızak-araba sisteminin kullanılması sistemin daha büyük ve ağır olmasına neden olmuş ve tablanın ısıtılması daha da zorlaşmıştır. Ayrıca tasarım aşamasında belirlenen step motorları yetersiz kalmış bu da kalibrasyonu daha zorlaştırmıştır. Yazıcının ekstrüder tasarımı imalat aşamasında bazı sorunlardan dolayı yapılamamış ve hazır bir ekstrüder satın alınarak bu problem çözülmüştür. Satın alınan ekstrüder yazıcı ile uyumlu bir şekilde çalışmaktadır.

3D yazıcılarda hazırlanan örneklerin mekanik özelliklerine doluluk oranı, baskı hızı ve baskı sıcaklığı, katman kalınlığı, tarama açısı, oryantasyon, kullanılan filament türü vb. parametrelerin etkileri oldukça fazladır. Çalışma kapsamında farklı koşullarda (baskı hızı, filament türü, baskı sıcaklığı ve doluluk oranı) üretilen örneklerin eğilme mukavemeti ve sertlikleri tespit edilmiştir. Elde edilen deney sonuçlarına göre;

- PET-G türü filamentlerden elde edilen deney örneklerinin eğilme dayanımı değerleri ABS den üretilenlerden daha yüksek değerlerde olduğu görülmüştür.
- ABS ve PET-G numunelerinin her ikisi içinde doluluk yüzdesinin artması eğilme dayanımını değerlerini dikkate değer oranda arttırmıştır.
- Yapılan deneylerde baskı hızının artması ABS ve PLA dan hazırlanan deney numunelerin eğilme dayanımı arttırmıştır. Ancak baskı çok hızlı olursa malzeme iyi yayılamayacağı için eğilme dayanımı düşücektir. Ancak diğer parametrelerle kıyaslandığında bu faktör daha az etkilidir.

- Sıcaklığın artması da eğilme dayanımını olumlu ölçüde etkilemiştir. Yüksek sıcaklıkta malzeme daha iyi yayılmaktadır. Dolayısıyla dayanım artmıştır. Fakat malzemelerin fiziksel özelliklerinden dolayı sıcaklığın çok fazla artması mümkün değildir.
- Yapılan sertlik deneylerinde ABS'in PET-G'den daha sert olduğu gözlemlenmiştir. Hızın artması sertliği önemli ölçüde etkilemiştir. Yüksek hızda yayılım iyi olmadığı için düzgün bir yüzey oluşturulamamıştır. Bu nedenle sertlik düşmüştür. Doluluk yüzdesi ve baskı sıcaklığının sertlik üzerinde çok fazla etkisinin olmadığı anlaşılmıştır. Özellikle doluluk yüzdesi sertliği etkilememiştir. Nedeni sertliğin daha çok yüzey ile alakalı bir özellik olmasıdır. Malzemenin iç kısımlarındaki boşluklar sertliği etkilememiştir. Sıcaklığın artmasıyla da az da olsa sertlikte bir artış gözlemlenmiştir. Sıcaklığın artmasıyla malzeme daha iyi yayıldığı için daha düzgün bir yüzey formu oluşturulmuştur. Dolayısıyla sertlik artmıştır.

İleride yapılabilecek çalışmalarda;

- Baskı hassasiyetini ve hızını arttıracak farklı bir ekstrüder tasarımı yapılabilir.
- Eksen hareketlerini iyileştirmeye yönelik yazılımla alakalı iyileştirmeler yapılabilir.
- Farklı katkı maddeleriyle yeni filamentler oluşturulup edilen numunelerinin bazı özellikleri iyileştirilebilir.
- Daha farklı baskı parametreleri baz alınarak elde edilebilecek numunelerin mekanik özellikleri araştırılabilir.
- Eklemeli imalat teknolojilerinin geleceğin üretim sistemi olan Endüstri 4.0 ile olan ilişkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Ahn, D., Kweon, J., Kwon, S., Song, J. and Lee, S. (2009). Representation of Surface Roughness in Fused Deposition Modelling. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(15-16): 5593-5600.
- Alagöz, A. S. (2016). Bone Tissue Engineering Using Macroporous PHA-PLA and PHBV Scaffolds Produced by Additive Manufacturing and Wet Spinning. Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoloji Anabilim Dalı, 131, Ankara.
- Alvarez, C. K. L., Lagos, C. R. F. and Aizpun, M. (2016). Investigating the Influence of Infill Percentage on the Mechanical Properties of Fused Deposition Modelled ABS Parts. *Ingenieria e Investigacion*, 36(3): 110-116.
- Akalın, A. (2006). Design and Production of a New Rapid Prototyping Device. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 75, İstanbul.
- Anonim (2015). Rapid Prototyping. <http://www-old.me.gatech.edu/jonathan.colton/me4210/rpm.pdf> (Erişim Tarihi: 15.12.2015)
- Anonim (2017a) Solutions in Plastics PETg Datasheet. <http://solutions-in-plastics.info/nl-be/datasheets/transparante%20kunststoffen/eriks%20-%20petg%20datasheet.pdf> (Erişim Tarihi: 05.04.2017)
- Anonim (2017b) Overview of Materials for PETG Copolyester. http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=4de1c85bb946406a86c52b688e3810d0 (Erişim Tarihi: 05.04.2017)
- Anonim (2017c) Material Data Sheet: Z-PETG. http://uprint3d.xyz/media/material_data/Z-PETG_Material_Data_Sheet.pdf (Erişim Tarihi: 05.04.2017)
- Anonim (2017d) Technical Data Sheet PETG Sheets. http://www.s-polytec.com/media/attachment/file/d/a/data_sheet_petg_sheets.pdf (Erişim Tarihi: 05.04.2017)
- Anonim (2017e) Technical Handbook Simona Plastics. http://www.simona.de/fileadmin/user_upload/Medien/Mediacenter/Technische_Informationen/Technical_Handbook.pdf (Erişim Tarihi: 05.04.2017)
- Anonim (2017f) FDM Material Specifications ABS RED. <https://express.stratasysdirect.com/documents/abs-red-plastic-material-datasheet.pdf> (Erişim Tarihi: 05.04.2017)
- Anonim (2017g) Accura ABS Black (SL 7820). https://www.protolabs.co.uk/media/751866/3d-systems_accura_abs_black_sl7820_datasheet_a4_012217_uken_web.pdf (Erişim Tarihi: 05.04.2017)
- Anonim (2017h) ABS-M30 Production-Grade Thermoplastic for Fortus 3D Production Systems. http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Material_Spec_Sheets/MSS_FDM_ABSM30.pdf (Erişim Tarihi: 05.04.2017)

- Anonim (2017i) LG ABS XR404 Prospector.
http://plasticker.de/recybase/docs/22482_1424422478.pdf (Erişim Tarihi: 05.04.2017)
- Anonim (2017j) ABS Extrafill Datasheet.
<http://shop.3dfilaprint.com/ekmps/shops/billyboyclyde/resources/Other/datasheet-abs-extrafill.compressed.pdf> (Erişim Tarihi: 05.04.2017)
- Anonim (2017l). ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies.
<http://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm> (Erişim Tarihi: 05.01.2017)
- Anonim (2017l). Material Development for electron beam melting.
<http://camal.ncsu.edu/wp-content/uploads/2013/10/Tim-Horn-2013CAMAL.pdf> (Erişim Tarihi: 07.01.2017)
- Anonim (2017n). RepRap. <http://reprap.org/> (Erişim Tarihi: 08.02.2017)
- Apak, S. (2010). Farklı Hızlı Prototipleme Cihazlarında Üretilen Parçaların Üretim Zamanı ve Maliyet Açısından Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 101, Ankara.
- Aydın, L. (2014). Üç Boyutlu Yazıcıyla Ayak Bileği Ortezinin Tasarımı ve Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı, 202, Kocaeli.
- Barz, A., Buer, T. and Haasis, H. D. (2016). A Study on the Effects of Additive Manufacturing on the Structure of Supply Networks. 7th IFAC Conference on Management and Control of Production and Logistics MCPL, 22-24 February, *IFAC-PapersOnLine*, 72-77, Bremen, Germany.
- Bentürk, Ö. (2009). Production and Design of FDM (Fused Deposition Modelling) Type Rapid Prototyping Machine with Extrusion Head Unit. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 69, İstanbul.
- Besterfield, D. H., Besterfield, C., Besterfield, G.H. and Besterfield, M. (1995). *Total quality management*, Prentice Hall Inc, New Jersey.
- Bircan, D. A. (2008). Development of a Nurbs Based Adaptive Slicing Procedure for Fused Deposition Modeling in Rapid Prototyping Applications. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 117, Adana.
- Bogers, M., Hadar, R. and Bilberg, A. (2016). Additive Manufacturing for Consumer-centric Business Models: Implications for Supply Chains in Consumer Goods Manufacturing. *Technological Forecasting ve Social Change*, 102: 225-239.
- Boschetto, A. and Bottini, L. (2015). Roughness Prediction in Coupled Operations of Fused Deposition Modeling and Barrel Finishing. *Journal of Materials Processing Technology*, 219: 181-192.
- Boschetto, A. and Bottini, L. (2016). Design for Manufacturing of Surfaces to Improve Accuracy in Fused Deposition Modeling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37: 103-114.

- Braian, M., Jimbo, R. and Wennerberg, A. (2016). Production Tolerance of Additive Manufactured Polymeric Objects for Clinical Applications. *Dental Materials*, 23(7): 583-861.
- Burns, M. (1993). *Automated Fabrication: Improving Productivity in Manufacturing*. PTR Prentice Hall, New Jersey.
- Carneiro, O. S., Silva, A. F. and Gomes, R. (2015). Fused Deposition Modeling with Polypropylene. *Materials ve Design*, 83:768-776.
- Cerit, E. (2009). Development of a Novel Open Architecture Rapid Prototyping System. Yüksek Lisans Tezi, Koç Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 249, İstanbul.
- Chacon, J. M., Caminero, M. A., Garcia-Plaza, E. and Nunez, P. J. (2017). Additive Manufacturing of PLA Structures Using Fused Deposition Modelling: Effect of Process Parameters on Mechanical Properties and Their Optimal Selection. *Materials and Design*, 124:143-157.
- Chua, C. K. and Leong, K. F. (1998). *Rapid Prototyping: Principles and Applications in Manufacturing*. Wiley, New York.
- Chohan, J. S., Singh, R. and Boparai, K. S. (2016a). Mathematical Modelling of Surface Roughness for Vapour Processing of ABS Parts Fabricated with Fused Deposition Modelling. *Journal of Manufacturing Processes*, 24(1): 161-169.
- Chohan, J. S., Singh, R. and Boparai, K. S. (2016b). Parametric Optimization of Fused Deposition Modeling and Vapour Smoothing Processes for Surface Finishing of Biomedical Implant Replicas. *Measurement*, 94: 602-613.
- Croccolo, D., De Agostinis, M. and Olmi, G. (2013). Experimental Characterization and Analytical Modelling of the Mechanical Behaviour of Fused Deposition Processed Parts Made of ABS-M30. *Computational Materials Science*, 79: 506-518.
- Çabuk, M. (2011). Hızlı Prototipleme ile Üretilmiş Sabit Dikdörtgen Kesitli Ankastre Destekli Esneyerek Kilitlenebilen Bazı Plastik Bağlantıların Birleştirme ve Sökme Kuvvetlerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 72, Edirne.
- Çantı, E. (2016). Üç Boyutlu Yazıcılar için Polimer Nanokompozit Filamentlerin Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 102, Kütahya.
- Çavdar, F. (2005). Design and Construction of a New Rapid Prototyping Machine. Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 72, Gaziantep.
- Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C. ve Duysak, A. (2013). Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulamaları. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 31: 1302-3055.
- Çelik, D. (2015). Üç Boyutlu Yazıcı Tasarımı, Prototipi ve Tersine Mühendislik Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı, 220, Karabük.

- Dawoud, M., Taha, I. and Ebeid, S. J. (2016). Mechanical Behaviour of ABS: An Experimental Study Using FDM and Injection Moulding Techniques. *Journal of Manufacturing Processes*, 21: 39-45.
- Durao, L. F. C. S., Christ, A., Anderl, R., Schützer, K. and Zancul, E. (2016). Distributed Manufacturing of Spare Parts Based on Additive Manufacturing: Use Cases and Technical Aspects. 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP-CMS 2016), 25-27 May, *Procedia CIRP*, 704-709, Stuttgart, Germany.
- Durgun, I. and Ertan, R. (2014). Experimental Investigation of FDM. *Rapid Prototyping Journal*, 20(3):228-235.
- Doğan, G. (2007). Mikro ve Nano Hızlı Prototipleme. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 168, İstanbul.
- Ekşi, M. (2001). Kalıplı imalatta hızlı prototipleme teknolojisi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 113, İstanbul.
- Emelogu, A., Marufuzzaman, M., Thompson, S. M., Shamsaei, N. and Bian, L. (2016). Additive Manufacturing of Biomedical Implants: A Feasibility Assessment Via Supply-chain Cost Analysis. *Additive Manufacturing*, 11: 97-113.
- Ermurat, M. (2002). Hızlı Prototip ve Üretim Teknolojilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Tasarım ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, 194, Kocaeli.
- Espin, M. E., Forcada, J. M. P., Granada, A. A. G., Lluma, J., Borros, S. and Reyes, G. (2015). Mechanical Property Characterization and Simulation of Fused Deposition Modelling Polycarbonate Parts. *Materials ve Desing*, 83: 670-677.
- Gibson, I., Rosen, D. W. and Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies*. Springer, New York.
- Griffiths, C. A., Howarth, J., Rowbotham, G. D. and Rees, A. (2015). Effect of Build Parameters on Processing Efficiency and Material Performance in Fused Deposition Modelling. The Second CIRP Conference on Biomanufacturing, 29-31 July, *Procedia CIRP*, Manchester, UK.
- Güler, B. (2016). Çift Başlı Kartezyen Tipi 3 Boyutlu Yazıcı Tasarım ve Prototip İmalatı (Granülden Modele). Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı, 161, Karabük.
- Gültekin, M. (2003). Design and Development of a Rapid Prototyping Machine. Doktora Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 113, Gaziantep.
- Hwang, S., Reyes, E. I., Moon, K. S., Rumpf, R. C. and Kim, N. S. (2015). Thermo-mechanical Characterization of Metal/Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process. *Journal of Electronic Materials*, 44(3):771-777.

- Ibrahim, D., Broilo, T. L., Heitz, C., De Oliveira, M. G., De Oliveira, H. W., Nobre, S. M. W., Filho, J. H. G. D. S. and Silva, D. N. (2009). Dimensional Error of Selective Laser Sintering, Three-dimensional Printing and Polyjet™ Models in the Reproduction of Mandibular Anatomy. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 37(3): 167-173.
- Ippolito, R., Iuliano, L. and Gatto, A. (1995). Benchmarking of Prototyping Techniques in Terms of Dimensional Accuracy and Surface Finish. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 44(1): 157-160.
- İlkün, Ö. (2005). Effects of Production Parameters on Porosity and Hole Properties in Laser Sintering Rapid Prototyping. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 144, Ankara.
- Jande, Y. A. C. (2009). Manufacturing and Characterization of Uniformly Porous and Graded Porous Polymeric Structures via Selective Laser Sintering. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 276, Ankara.
- Johansson, F. (2016). Optimizing Fused Filament Fabrication 3D Printing for Durability. Master's Degree Thesis, Blekinge Institute of Technology Department of Mechanical Engineering, 87, Karlskrona.
- Kan, B. (2006). Hızlı Prototipleme Sistemleri ve Uygulama Esasları. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 60, Sakarya.
- Karakoç, F. (2016). Katmanlı İmalat ile Hafif Parça İmal Edebilmek için Hücresel Kafes Yapıların Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 153, Kütahya.
- Kaveh, M., Badrossamay, M., Foroozmehr, E. and Etefagh, A. H. (2015). Optimization of the Printing Parameters Affecting Dimensional Accuracy and Internal Cavity for HIPS Material Used in Fused Deposition Modelling Processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 226: 280-286.
- Kendüzler, H. D. (2011). Hızlı Prototipleme Harç Yığılma Yöntemi ile Karmaşık Parçaların Üretilebilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 118, Ankara.
- Khajavi, S. H., Partanen, J. and Holmström, J. (2014). Additive Manufacturing in the Spare Parts Supply Chain. *Computers in Industry*, 65(1): 50-63.
- Kırelli, Ö. (2008). Production of ABS Wire Material for Rapid Prototyping Machines. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 95, İstanbul.
- Kruth, J. P., Leu, M. C. and Nakagawa, T. (1998). Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 47(2): 525-540.
- Lanzotti, A., Grasso, M., Staiano, G. and Martorelli, M. (2015). Mechanical Properties of Parts Fabricated in PLA. *Rapid Prototyping Journal*, 21(15):604-617.

- Lieneke, T., Denzer, V., Adam, G. A. O. and Zimmer, D. (2016). Dimensional Tolerances for Additive Manufacturing: Experimental Investigation for Fused Deposition Modelling. 14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (CAT 2016), 18-20 May, *Procedia CIRP*, 286-291, Gothenburg, Sweden.
- Mohamed, O. A., Masood, S. H. and Bhowmik, J. L. (2017). Experimental Investigation of Time-dependent Mechanical Properties of PC-ABS Prototypes Processed by FDM Additive Manufacturing Process. *Materials Letters*, 193: 58-62.
- Montgomery, D. C. (2005). *Design and analysis of experiments*, 6th ed., John Wiley ve Sons Inc. 3-10. Ss, New York.
- Naghied, S., Ravari, M. R., Badrossamay, M., Foroozmehr, E. and Kadkhodai, M. (2016). Numerical Investigation of the Mechanical Properties of the Additive Manufactured Bone Scaffolds Fabricated by FDM: The Effect of Layer Penetration and Post-Heating. *Journal of the Mechanical Behaviour of Biomedical Materials*, 59: 241-250.
- Nunez, P. J., Rivas, A., Garcia-Plaza, E., Beamud, E. and Sanz-Lobera, A. (2015). Dimensional and Surface Texture Characterization in Fused Deposition Modelling (FDM) with ABS Plus. The Manufacturing Engineering Society International Conference, MESIC 2015, 22-24 July, *Procedia Engineering*, 856-863, Barcelona, Spain.
- Oktay, K. (2015). Ergitmeli Yığıma Yöntemiyle Üretim Yapan 3D Yazıcılarda Çift Filament Süren Ekstruder Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 101, İstanbul.
- Okucu, E. (2016). Manyetik Rezonans ve Bilgisayarlı Tomografi Verileri Kullanılarak İnsana Ait Anatomik Yapıların Hızlı Prototiplenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 156, Balıkesir.
- Özüğür, B. (2006). Hızlı Prototipleme Teknikleri ile Kompleks Yapıdaki Parçaların Üretilebilirliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı, 117, Ankara.
- Pham, D. T. and Gault, R. S. (1998). A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools ve Manufacture*, 38(10-11): 1257-1287.
- Pour, M. A., Zanardini, M., Bacchetti, A. and Zanoni, S. (2016). Additive Manufacturing Impacts on Productions and Logistics Systems. 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control, 28-30 June, *IFAC-PapersOnLine*, 1679-1684, Troyes, France.
- Raghunath, N. and Pandey, P. M. (2007). Improving Accuracy Through Shrinkage Modelling by Using Taguchi Method in Selective Laser Sintering. *International Journal of Machine Tools ve Manufacture*, 47(6): 985-995.
- Rankouhi, B., Javadpour, S., Delfanian, F. and Letcher, T. (2016). Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS with Respect to Layer Thickness and Orientation. *Journal of Failure Analysis and Precention*, 16(3):467-481.

- Raut, S., Jatti, V. K., Khedkar, N. K. and Singh, T. P. (2014). Investigation of the Effect of Built Orientation on Mechanical Properties and Total Cost of FDM Parts. 3rd International Conference on Materials Processing and Characterisation (ICMPC 2014), 8-9 March, *Procedia Materials Science*, 1625-1630, Hyderabad, India.
- Salmi, M., Paloheimo, K., Tuomi, J., Wolff, J. and Makitie, A. (2013). Accuracy of Medical Models Made by Additive Manufacturing (Rapid Manufacturing). *Journal of Crani-Maxillo-Facial Surgery*, 41(7): 603-609.
- Sezen, F. (2016). Malzeme Ekstrüzyon Tekniği Kullanılarak, Üç Boyutlu Yazıcı Tasarımının ve Prototipinin Gerçekleştirilmesi. Abant İzzet Baysal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 195s, Bolu.
- Singh, R., Singh, S. and Singh, G. (2014). Dimensional Accuracy Comparison of Investment Casting Prepared with Wax and ABS Patterns for Bio-Medical Application. 3rd International Conference on Materials Processing and Characterisation (ICMPC 2014), 8-9 March, *Procedia Materials Science*, 851-858, Hyderabad, India.
- Singh, R. and Singh, S. (2015a). Experimental Investigations for Statistically Controlled Solution FDM Assisted Nylon6-Al-Al₂O₃ replica Based Investment Casting. 4th International Conference on Materials Processing and Characterization, 14-15 March, *Materials Today: Proceeding*, 1876-1885, Hyderabad, India.
- Singh, R. and Singh, G. (2015b). Investigation of Al-SiC AMC Prepared by Vacuum Moulding Assisted Stir Casting. *Journal of Manufacturing Processes*, 19: 142-147.
- Singh, S. and Singh, R. (2015c). Wear Modelling of Al-Al₂O₃ Functionally Graded Material Prepared by FDM Assisted Investment Casting Using Dimensionless Analysis. *Journal of Manufacturing Processes*, 20(3): 507-514.
- Singh, S. and Singh, R. (2016a). Development of Functionally Graded Material by Fused Deposition Modelling Assisted Investment Casting. *Journal of Manufacturing Processes*, 24(1): 38-45.
- Singh, S. and Singh, R. (2016b). Effect of Process Parameters on Micro Hardness of Al- Al₂O₃ Composite Prepared Using an Alternative Reinforced Pattern in Fused Deposition Modelling Assisted Investment Casting. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 37: 162-169.
- Singh, R., Bedi, P., Fraternali, F. and Ahuja, I. P. S. (2016a). Effect of Single Particle Size, Double Particle Size and Triple Particle Size AL₂O₃ in Nylon-6 Matrix On Mechanical Properties Of Feed Stock Filament for FDM. *Composites Part B: Engineering*, 106: 20-27.
- Singh, R., Singh, J. and Singh, S. (2016b). Investigation for Dimensional Accuracy of AMC Prepared by FDM Assisted Investment Casting Using Nylon-6 Waste Based Reinforced Filament. *Measurement*, 78: 253-259.
- Sood, A. K., Ohdar, R. K. and Mahapatra, S. S. (2009). Improving Dimensional Accuracy of Fused Deposition Modelling Processed Part Using Grey Taguchi Method. *Materials and Design*, 30(10): 4243-4252.

- Spalt, P. and Bauernhansl, T. (2016). A Framework for Integration of Additive Manufacturing Technologies in Production Networks. 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP-CMS 2016), 25-27 May, *Procedia CIRP*, 716-721, Stuttgart, Germany.
- Szykiedans, K. and Credo, W. (2016). Mechanical Properties of FDM and SLA Low-cost 3-D Prints. The 20th International Conference: Machine Modeling and Simulations, MMS 2015, 7-9 September, *Procedia Engineering*, 257-262, Terchova, Slovak Republic.
- Şenol, C. K. (2001). The Role of Rapid Prototyping Technologies in New Product Design and Development Processes. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, 115, İstanbul.
- Trosch, T., Strobner J., Völkl, R. and Glatzel, U. (2016). Microstructure and Mechanical Properties of Selective Laser Melted Inconel 718 Compared to Forging and Casting. *Materials Letters*, 164: 428-431.
- Tymrak, B. M., Kreiger, M. and Pearce, J. M. (2014). Mechanical Properties of Components Fabricated with Open-source 3-D Printers Under Realistic Environmental Conditions. *Materials and Design*, 58:242-246.
- Uysal, H. (2000). Hızlı Prototip Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 117, İstanbul.
- Üstümkol, D. Ç. (2003). Hızlı Prototipleme. Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 96, Zonguldak.
- Wittbrodt, B. and Pearce, J. M. (2015). The Effect of PLA Color on Material Properties of 3-D Printed Components. *Additive Manufacturing*, 8:110-116.
- Wu, W., Geng, P., Li, G., Zhao, D., Zhang, H. and 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*, 8(9):5834-5846.
- Yazıcıoğlu, F. (2007). Design and Implementation of a Two-Axes Linear Positioning System for Rapid Prototyping Applications. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 88, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hasan Baş
Doğum Yeri : Samsun
Doğum Tarihi : 17.07.1988
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Samsun Huriye Süer Anadolu Lisesi (2006)
Lisans : Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü (2011)
Y. Lisans : Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Çalıştığı Kurum/Yıl

Samsun Yurt Savunma Sanayi, Ar-Ge Mühendisi, SAMSUN / Ocak – Haziran 2012
TSK Kara Kuvvetleri Lojistik Komutanlığı, Mesleki Asteğmen, ANKARA / Ocak 2013- Aralık 2014
Batu makina, Tasarım Mühendisi, SAMSUN / Mart 2014 – Aralık 2015
Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi / Haziran 2015 - Halen

Bilimsel Çalışmalar

Bas H ve Keles I (2017). Analysis of Transient Thermal Stresses in Annular Fin. Proceeding of the 2nd World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer (MHMT'17), 6-8 April, Barcelona, Spain.

Çelik M S, Tepe C, **Baş H** ve Eminoğlu İ (2016). Multifunctional Hand Prosthesis Setup Design. Tıp Teknolojileri Kongresi (TIPTEKNO 2016), 27-29 Ekim, Bildiri Kitabı, 245-248, Antalya, Türkiye.

Yapıcı F, Esen R, Eryılmaz Okan ve **Bas H** (2015). Modelling of Compressive Strength Parallel to Grain of Heat Treated Scotch Pine(Pinus sylvestris L.) Wood by Using Artificial Neural Network. *Drvna Industrija*, 66(4): 347-352.

Bas H ve Keles I (2015). Novel Approach to Transient Thermal Stress in an Annular Fin. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 29(4): 705-710.

Baş H ve Yapıcı F (2015). Ergonomik Tasarımda Hızlı Prototipleme. *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3(3): 199-204.

Yapıcı F ve **Baş H** (2015). Verimlilikte Ergonomik Faktörler. *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3(3): 591-595.