



T.C.

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

**ERİYİK YIĞMA MODELLEME (FDM) VE PLASTİK
ENJEKSİYON YÖNTEMİ KULLANILARAK ÜRETİLEN BİR
OYUNCAK FİGÜRÜNÜN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

ŞEYDA DEĞİRMENCİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ER

KIRIKKALE-2022



T.C.

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ

**ERİYİK YIĞMA MODELLEME (FDM) VE PLASTİK
ENJEKSİYON YÖNTEMİ KULLANILARAK ÜRETİLEN BİR
OYUNCAK FİGÜRÜNÜN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

ŞEYDA DEĞİRMENCİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ER

KIRIKKALE-2022

Şeyda DEĞİRMENCİ tarafından hazırlanan “ERİYİK YIĞMA MODELLEME (FDM) VE PLASTİK ENJEKSİYON YÖNTEMİ KULLANILARAK ÜRETİLEN BİR OYUNCAK FİGÜRÜNÜN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması, aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Ali Osman ER

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Oğuz ERDEM

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 26.09.2022

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Recep ÇALIN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Şeyda DEĞİRMENCİ

24.10.2022

ÖZET

ERİYİK BİRİKTİRME YÖNTEMİ (FDM) VE PLASTİK ENJEKSİYON YÖNTEMİ KULLANILARAK ÜRETİLEN BİR OYUNCAK FİGÜRÜNÜN ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

DEĞİRMENCİ, Şeyda

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ER

Ekim 2022, 97 sayfa

Plastik malzemeler diğer hammaddelere kıyasla ucuz, hafif, dayanıklı ve ürün imalatlarının da hızlı olmasıyla hayatımızın birçok alanında karşımıza çıkmaktadır. Plastikler en başta ambalaj sektörü olmak üzere otomotiv, oyuncak, züccaciye, yapı, beyaz eşya, medikal ve elektronik gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Plastiğin pek çok sektörde kullanılıyor olması üretime duyulan ihtiyacı da artırmıştır. Bu ihtiyaç genellikle plastik enjeksiyon yöntemiyle karşılanırken, teknolojinin hızla gelişmesiyle hızlı prototipleme teknolojisi olan 3 boyutlu baskı teknolojisi de oldukça önem kazanmıştır. Öyle ki zaman ve maliyet tasarrufuyla birlikte kullanım kolaylığı ve ulaşılabilirliği ile 3 boyutlu yazıcılar evlerimizde dahi üretim yapabilmemize imkan sağlamaktadır. Bu çalışmada plastik enjeksiyon yöntemi ve 3 boyutlu baskı teknolojisi uygulamalarından biri olan Eriyik Yığılma Modelleme (FDM) teknolojisi kullanılarak oyuncak figür numuneleri üretilmiştir. Yapılan bu çalışmada plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilen bir oyuncağın 3 boyutlu baskı yöntemiyle de üretilip üretilmeyeceği ve yöntemlerin birbirine karşı üstünlükleri belirlenmeye çalışılmıştır. ABS malzemeden üretilmiş plastik enjeksiyon oyuncak figürünün, endüstriyel bir üretime gerek duymadan 3 boyutlu yazıcı kullanılarak

ABS+ filamenti ve bioplastik malzeme olan PLA+ filamentleriyle üretim gerçekleştirildiğinde, beklenen dayanıklılık ve yüzey özelliklerini ne derece karşıladığı belirlenmeye çalışılmıştır. Numunelere uygulanan basma kuvveti neticesinde malzemede oluşan davranışlar incelenmiştir. Yapılan basma testi sonucunda ABS plastik enjeksiyon numunesinin basma yüküne karşı gösterdiği maksimum direnç 3,93 kN olup 3 boyutlu yazıcı numunelerinden en iyi performans gösteren PLA ise bu değer 2,97 kN olduğu belirlenmiştir. Üretilen numunelerin CMM cihazında ölçümleri yapılarak elde edilen değerler CAD modeli ile kıyaslanmış ve üretim yöntemlerinin doğrulukları incelenmiştir. Gerçekleştirilen ölçümler sonucunda CAD modeline en yakın değerlerin, ± 1 mm kabul edilen tolerans aralığını sadece 1 noktada sapma göstererek ABS plastik enjeksiyon numunesinde olduğu görülmüştür. Enjeksiyon ve 3 boyutlu yazıcıdan alınan numuneler kıyaslandığında ortalama farkın PLA' da 0,04 mm, ABS' de ise 0,0025 mm olduğu gözükmemektedir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri sonucunda ile plastik enjeksiyon yöntemiyle üretilen numunelerde ortalama ulaşılabilen yüzey pürüzlülüğü (Ra) 0.16 μm , FDM yöntemi ile üretilen numunelerde ise 3 boyutlu ABS' de Ra 1.43 μm ve 3 boyutlu PLA' da Ra 3.05 μm olarak ölçülmüştür. Ayrıca numunelere Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazı ile yüksek büyütmelemlerde yüzey görüntüsü alınmış olup bu görüntüler ile malzemenin mikro yapısı değerlendirilmiştir. 40 gram ağırlığında örnek parçanın enjeksiyon ve 3 boyutlu yazıcı ile üretimi karşılaştırıldığında aynı üretim maliyetini yakalamak için enjeksiyon yöntemiyle en az 735 adet parça üretilmesi gerektiği hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler:

Eriyik Yığıma Modelleme, FDM, 3 boyutlu yazıcı, plastik enjeksiyon, CMM, basma kuvveti, SEM, yüzey pürüzlülüğü, maliyet.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF A TOY FIGURE MANUFACTURED USING THE FUSED DEPOSITION MODELLING (FDM) AND PLASTIC INJECTION METHOD

DEĞİRMENÇİ, Şeyda

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering, Master's Thesis

Supervisor: Dr. Öğr. Üyesi Ali Osman ER

November 2022, 97 pages

Plastic materials appear in many areas of our lives as they are cheap, light, durable and fast in product manufacturing compared to other raw materials. Plastics are used in many fields such as automotive, toys, glassware, construction, household appliances, medical and electronics, especially in the packaging sector. The fact that plastic is used in many sectors has also increased the need for production. While this need is generally met by the plastic injection method, 3D printing technology, which is a rapid prototyping technology, has gained importance with the rapid development of technology. So much so that 3D printers, with their ease of use and accessibility along with time and cost savings, enable us to produce even in our homes. In this study, toy figure samples were produced using the plastic injection molding method and Fused Deposition Modeling (FDM) technology, which is one of the 3D printing technology applications. In this study, it has been tried to determine whether a toy produced with the plastic injection method can also be produced with the 3D printing method and the advantages of the methods against each other. It has been tried to determine to what extent the plastic injection toy figure made of ABS material meets the expected durability and

surface properties when production is carried out with ABS+ filament and bioplastic material PLA+ filaments using a 3D printer without the need for an industrial production. The behavior of the material as a result of the compression force applied to the samples was investigated. As a result of the compression test, the maximum resistance of the ABS plastic injection sample to the compression load was 3.93 kN, and this value was determined as 2.97 kN for PLA, which performed the best among the 3D printer samples. The values obtained by measuring the produced samples in the CMM device were compared with the CAD model and the dimensional accuracy of the production methods was examined. As a result of the measurements carried out, it was observed that the values closest to the CAD model were in the ABS plastic injection sample, deviating only 1 point from the tolerance range accepted as ± 1 mm. When the samples taken from injection and 3D printer are compared, it is seen that the average difference is 0.04 mm with PLA and 0.0025 mm with ABS. As a result of the surface roughness measurements, the average reachable surface roughness (Ra) was measured as 0.16 μm in the samples produced by plastic injection method, Ra 1.43 μm in 3D ABS and Ra 3.05 μm in 3D PLA in the samples produced by FDM method. In addition, the surface images of the samples were taken at high magnifications with a Scanning Electron Microscope (SEM) device, and the microstructures of the materials were evaluated with these images. It has been calculated that at least 735 parts should be produced with the injection method in order to achieve the same production cost of the sample piece weighing 40 grams compared to production with plastic injection and 3D printing.

Keywords:

Fused Deposition Modelling, FDM, 3Dprinter, plastic injection molding, CMM, compression force, SEM, surface roughness, cost.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesinde desteğini ve yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve birikiminden çokça yararlandığım saygıdeğer danışmanım hocam Dr. Ali Osman ER' e, sonsuz teşekkür ederim.

Yoğun çalışmalarım sırasında benden maddi manevi desteğini esirgemeyerek yanımda olan canım eşim Ahmet Sinan Değirmenci' ye, beni her zaman destekleyerek bana ilham ve güç veren, daha iyisini yapabilmem konusunda daima teşvik eden biricik aileme; annem Hanife Söğüt, babam Mehmet Söğüt, kardeşlerim Yalçın Söğüt ve Ceyda Söğüt'e, var oluşuyla hayatıma anlam ve güzellikler katan canım oğlum Bora Mirza Değirmenci' ye ve Craft Teknik Kalıp Plastik Metal İmalat San. ve Tic. Ltd. Şti. Genel Koordinatörü Celalettin ÇAM beyefendiye ve desteğini esirgemeyerek yanımda olan herkese teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
TABLolar DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Eklemeli İmalatın Tarihsel Gelişimi	2
1.2. Eklemeli İmalat İşlem Adımları	4
1.3. Eklemeli İmalat Kullanım Alanları	6
1.4. Eklemeli İmalatın Avantaj ve Dezavantajları	8
1.5. Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Sınıflandırılması	9
1.6. Eklemeli İmalat Teknolojileri	11
1.6.1. Stereolitografi (SLA) / Tarayarak Işıklı Kütleleme	11
1.6.2. Lamine Nesne İmalatı (LOM).....	12
1.6.3. FDM/ Eriyik Biriktirme/Yığıma Modelleme Tekniği.....	13
1.6.4. Polyjet Modelleme (PJM)	14
1.6.5. Seçici Lazer Sinterleme (SLS, Selective Laser Sintering).....	15
1.6.6. Elektron Işınli Ergitme (EBM).....	16
1.6.7. 3 Boyutlu Binder Jetting (BJ / Yapıştırıcı İle Katmanlı İmalat)	18
1.7. Plastik Enjeksiyon	20

1.7.1. Plastik Enjeksiyon Tarihsel Gelişimi	20
1.7.2. Plastik Enjeksiyon Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları	20
1.7.3. Plastik Enjeksiyon İşlemi	21
1.7.4. Plastik Enjeksiyon Makinesi	21
1.7.5. Plastik Enjeksiyon Kalıpları	23
1.7.6. Plastiklerin Sınıflandırılması	23
1.8. Literatür İncelemesi	26
2. MATERYAL VE YÖNTEM	33
2.1. Kullanılan Malzemeler	33
2.2. Kullanılan Cihazlar	35
2.2.1 Enjeksiyon işlemi	35
2.2.2. 3 boyutlu Baskı İşlemi	37
2.2.3. CMM ile Ölçüm İşlemi	39
2.2.4. Basma Deneyi	41
2.2.5. SEM (Scanning Electron Microscope) – Taramalı Elektron Mikroskobu	43
2.2.6. Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)	46
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	48
3.1. CMM Ölçümleri	48
3.2. Basma Deneyi	51
3.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	57
3.4. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri	61
3.5. Maliyet çalışması	63
4. DEĞERLENDİRMELER	66
5. KAYNAKÇA	71
ÖZGEÇMİŞ	79

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. 1: Eklemeli imalatın ASTM F42 standardına göre sınıflandırılması	10
Tablo 2. 1: 3 boyutlu Baskı Filament Parametreleri	34
Tablo 2. 2: ABS Granülü Enjeksiyonla üretim Parametreleri	34
Tablo 2. 3: Enjeksiyon işleminin üretim parametreleri	36
Tablo 2. 4: 3 boyutlu yazıcıda numunelerin üretim parametreleri	38
Tablo 3. 1: CMM ölçüm sonuçları	48
Tablo 3. 2: Yüzey Pürüzlülük Değerleri	62
Tablo 3. 3: Makine - Kalıp Maliyet tablosu	63
Tablo 3. 4: Plastik Enjeksiyon ve 3 boyutlu yazıcı ile üretimin maliyet girdileri	64
Tablo 3. 5: Üretim yöntemlerinin sabit ve değişken giderleri	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1: Dr. Joe Beaman ve Carl Deckard [3]	3
Şekil 1. 2 : EOSINT M250 [6]	3
Şekil 1. 3 : 3B Baskı Adımları	4
Şekil 1. 4 : Eklemeli imalat işlem basamaklarının şematik gösterimi [9]	5
Şekil 1. 5: CAD programından STL formatında kaydetme işlemi	6
Şekil 1. 6 Eklemeli İmalat teknolojisi ile üretilen endüstriyel ürünler [12]	7
Şekil 1. 7 : Eklemeli İmalatın tıp alanındaki uygulaması [15]	7
Şekil 1. 8: Klasik (üstte) ve Eklemeli İmalat Yöntemleriyle Üretilmiş Uçak Motor Kapağı Mentşesi [17]	8
Şekil 1. 9: Egzoz Parçaları / otomotivde Eİ [18]	8
Şekil 1. 10: Tarayarak Işıklı Kürleme çalışma prensibi [23]	11
Şekil 1. 11: Stereolitografi (SLA) / Tarayarak Işıklı Kürleme Uygulamaları [27]	11
Şekil 1. 12: Lamine nesne imalatı 1.Folyo temini, 2.Isıtmalı silindir, 3 Lazer ışını, 4.Tarama prizması, 5.Lazer ünitesi, 6.Katmanlar, 7.Hareketli platform, 8.Atık [28]	12
Şekil 1. 13: Eriyik biriktirme yöntemi çalışma prensibi [35]	13
Şekil 1. 14: FDM/ Eriyik Biriktirme/Yığıma Modelleme Tekniği Uygulaması [40,41]	14
Şekil 1. 15: PJM yöntemi (şematik) [44]	14
Şekil 1. 16: Polyjet Modelleme uygulaması örnekleri [45]	15
Şekil 1. 17: Lazer Sinterleme Yönteminin Şematik Gösterimi [46,47]	15
Şekil 1. 18: Seçici Lazer Sinterleme Uygulamaları [50,51]	16
Şekil 1. 19: Elektron Işın Eritme Yönteminin Şematik Gösterimi [52]	17
Şekil 1. 20: (A) Gelişmiş osseointegrasyon için entegre Trabeküler Yapılara™ sahip Ti6Al4V asetabular kapaklar (Arcam'ın izniyle), (B) γ -titanyum alüminitten yapılmış düşük basınçlı türbin kanadı (AvioAero'nun izniyle)	18
Şekil 1. 21: Elektron ışınli eritme (EBM) uygulaması [55]	18
Şekil 1. 22: 3B Yazıcı şematik gösterimi [56]	19

Şekil 1. 23: (A) 3 boyutlu baskının ardından toz yatağındaki parçalar (Höganäs AB – Digital Metal®'in izniyle), (B) 3 boyutlu baskı ile yapılmış paslanmaz vidalar (Höganäs AB – Digital Metal®'in izniyle) [58]	19
Şekil 1. 24: a) Plastik enjeksiyon makinesi şematik gösterimi, b) Plastik enjeksiyon makinesi [65, 66].....	21
Şekil 1. 25: Plastik enjeksiyon prosesi uygulama örnekleri [67]	22
Şekil 1. 26: (a) Biyobozunur PLA bardaklar, (b) PLA karışımı "bio-flex" den yapılmış malç filmi, (c) PLA'dan yapılmış çay poşeti, (d) PLA ile basılmış insan kafatası [71].....	25
Şekil 1. 27: Akrilonitril butadien stiren polimer yapısı [72]	25
Şekil 1. 28: Granül formundaki ABS termoplastik malzemesi [73]	25
Şekil 2. 1: Test numuneleri.....	33
Şekil 2. 2: LG ABS HI121 granülü	34
Şekil 2. 3: Among Us oyuncak figürüne ait kalıp tasarımı	35
Şekil 2. 4: Demag marka enjeksiyon makinesi ve plastik enjeksiyon numune örnekleri	36
Şekil 2. 5: Simplify3 boyutlu program arayüzü	37
Şekil 2. 6: 3 boyutlu3 Teknoloji S1 markalı 3 boyutlu yazıcı ve baskı numuneleri ..	38
Şekil 2. 7: CMM ölçüm cihazı [80].....	39
Şekil 2. 8: Referans nokta gösterimleri	40
Şekil 2. 9: Deney cihazı.....	41
Şekil 2. 10: Basma kuvvetine maruz kalan oyuncak figürleri.....	42
Şekil 2. 11: LEICA EM ACE200 cihazına numunelerin yerleştirilmesi.....	43
Şekil 2. 12: Altın kaplamadan sonra numunelerin görüntüsü (A) ABS Enjeksiyon ile üretim, (B) PLA PLUS 3 boyutlu baskı ile üretim, (C) ABS 3 boyutlu baskı ile üretim.....	44
Şekil 2. 13: SEM cihaz görüntüsü	45
Şekil 2. 14: Numunelerin SEM cihazına yerleştirilmesi	46
Şekil 2. 15: Surface Roughness Tester TMR 120	47
Şekil 2. 16: Yüzey pürüzlülüğü ölçüm noktalarının rakamlar ile gösterilmesi.....	47
Şekil 3. 1: CMM ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.....	51
Şekil 3. 2: ABS plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş birinci numunenin Yük – Deplasman grafiği	52

Şekil 3. 3: ABS plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş ikinci numunenin Yük – Deplasman grafiği	52
Şekil 3. 4: ABS plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş üçüncü numunenin Yük – Deplasman grafiği	53
Şekil 3. 5: ABS 3 boyutlu baskı yöntemi ile üretilmiş birinci numunenin Yük – Deplasman grafiği	53
Şekil 3. 6: ABS 3 boyutlu baskı yöntemi ile üretilmiş ikinci numunenin Yük – Deplasman grafiği	54
Şekil 3. 7: ABS 3 boyutlu baskı yöntemi ile üretilmiş üçüncü numunenin Yük – Deplasman grafiği	54
Şekil 3. 8: PLA PLUS 3 boyutlu baskı yöntemi ile üretilmiş birinci numunenin Yük – Deplasman grafiği	55
Şekil 3. 9: PLA PLUS 3 boyutlu baskı yöntemi ile üretilmiş ikinci numunenin Yük – Deplasman grafiği	55
Şekil 3. 10: PLA PLUS 3 boyutlu baskı yöntemi ile üretilmiş üçüncü numunenin Yük – Deplasman grafiği	56
Şekil 3. 11: Numunelerin Yük – Deplasman grafiklerinin karşılaştırılması	56
Şekil 3. 12: Numunelerin SEM cihazındaki 2 mm ölçekli görüntüleri, (A) ABS 3 boyutlu baskı ile üretim, (B) PLA PLUS 3 boyutlu baskı ile üretim, (C) ABS Enjeksiyon yöntemi ile üretim	57
Şekil 3. 13: Numunelerin 100µm ölçekli SEM cihazı görüntüleri: (A) ABS 3 boyutlu baskı numunesi, (B) PLA PLUS 3 boyutlu baskı numunesi, (C) ABS Plastik Enjeksiyon numunesi	58
Şekil 3. 14: Numunelerin 30µm ölçekli SEM cihazı görüntüleri: (A) ABS 3 boyutlu baskı numunesi, (B) PLA PLUS 3 boyutlu baskı numunesi, (C) ABS Plastik Enjeksiyon numunesi	59
Şekil 3. 15: Numunelerin 10µm ölçekli SEM cihazı görüntüleri: (A) ABS 3 boyutlu baskı numunesi, (B) PLA PLUS 3 boyutlu baskı numunesi, (C) ABS Plastik Enjeksiyon numunesi	60
Şekil 3. 16: Numunelerin 5µm ölçekli SEM cihazı görüntüleri: (A) ABS 3 boyutlu baskı numunesi, (B) PLA PLUS 3 boyutlu baskı numunesi, (C) ABS Plastik Enjeksiyon numunesi	61

KISALTMALAR

3D	: 3 boyutlu
ABS	: Akrlonitril bütadien stiren
Eİ	: Eklemeli İmalat
ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Metaryalleri Topluluğu
EBM	: Elektron ışınli ergitme
FDM	: Eriyik yığarak modelleme
LOM	: Lamine nesne imalatı
PLA	: Polilaktik asit
SLA	: Steryolitografi
SLE	: Seçmeli lazer ergitme
SLS	: Seçmeli lazer sinterleme
UV	: Ultra viole
TPU	: Termoplastik Poliüretan
PEEK	: Polietereterketon
CMM	: Coordinate Measurement Machine
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
STL	: Stereolitografinin
PJM	: Polyjet Modelleme
BJ	: Binder Jetting

1.GİRİŞ

Plastik malzemeler, üretim sektöründe kullanılan diğer hammadde grupları ile karşılaştırıldığında uygun fiyatlıdır. Bununla birlikte üretiminin de hızlı gerçekleşiyor olması bu hammadde grubunun üretim sektöründe kullanımının artmasına sebep olmuştur. Plastiğin bu özellikleri onun pek çok alanda kullanılır olmasını sağlamıştır. Plastikler ambalajlamada, oyuncak üretiminde, otomobil parçalarının üretilmesinde, beyaz eşya, dekorasyon ve yapı sektörü gibi daha pek çok sektörde yani hayatımızın her alanında karşımıza çıkmaktadır. Plastik malzemelerin hayatımızda bu kadar yer etmesi ve aktif olarak kullanılıyor olması bu ürün grubuna duyulan ihtiyacın ve dolayısıyla üretimin artmasını sağlamıştır. Üretime duyulan ihtiyacın yanında bu malzeme grubunun kolay işlenebilme ve şekillenebilme özellikleriyle seri üretime uygunlukları da bu malzeme grubunun kullanımının artmasının sebeplerinden biridir. Plastik malzemeler, üretim sektöründe en çok plastik enjeksiyon metodu ile şekillendirilmektedir. Bunun sebebi plastik enjeksiyon makineleri ile üretimde yüksek hız ve yüksek yüzey kalitesinin elde edilebiliyor olmasıdır. Plastiklerin şekillendirilmesinde, özellikle son yıllarda eklemeli imalat yöntemlerinin kullanımı giderek artmaktadır. Eklemeli İmalat (Eİ) yöntemlerinin bu denli kullanımının artmasında, kalıp maliyeti gibi bir maliyeti ortadan kaldırması ile düşük maliyet ile malzeme üretimine imkan sağlaması etkili olmuştur.

Eklemeli imalat, plastik malzemenin eritilerek üst üste eklenerek, katman katman biriktirilip nihai ürünün oluşturulması işlemidir. Eklemeli imalat, diğer en çok kullanılan üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında, geleneksel yöntemlerdeki malzeme üretme mantığının tam tersi bir mantıkla çalışmaktadır. Geleneksel yöntemlerde ana malzeme işlenerek malzemedan katman katman talaş kaldırarak son ürüne ulaşılır. Eklemeli imalatta ise bu durum tam tersinedir. Eklemeli imalatta plastik malzeme eritilerek katman katman biriktirilir. Eklemeli imalat bu özelliği ile malzeme israfının önüne geçerek talaş maliyetini de ortadan

kaldırmaktadır. Eİ tüm bu özellikleriyle hızlı, kolay ve ucuz üretime imkan sağlamaktadır. Sağladığı tüm bu avantajlar ile eklemeli imalat, kalıp maliyeti ve yüksek tutarlı enjeksiyon makinelerine gerek olmadan evlerimizde dahi üretim yapabilmemize, tasarımını kendi gerçekleştirdiğimiz bir parçayı saatler içinde üretebilmemize imkan sağlamaktadır.

1.1. Eklemeli İmalatın Tarihsel Gelişimi

Geçmişten günümüze üretim süreçleri incelendiğinde zaman zaman endüstriyel üretimde bir sıçrama gerçekleştiği görülmüştür. Bu sıçrayışın endüstriyel üretimde ortaya çıkmış bir kolaylıktan kaynaklandığı görülmektedir. Üretimde gerçekleşen bu kolaylıklar endüstride devrim yaratmıştır. Eklemeli imalat da alışlagelmiş üretim yöntemlerine nazaran, sağlamış olduğu kolaylıklarla 4.0 endüstriyel devrimini yaratmayı başarmıştır [1].

Endüstride yaşanan bu devrim 1981 yılında Hideo Kodama' nın yapmış olduğu çalışmalarla başlamıştır. Hideo Kodama, UV ışık kullanarak polimerize edilmiş reçineyi kütleme üzerine çalışırken ilk hızlı prototipleme işlemini gerçekleştirerek patent başvurusunu yapmıştır. Bu gelişmenin yaşanmasının ardından Charles Hull, Stereolitografi (SLA) tekniğinin geliştirilmesi üzerine çalışmalarına devam etmiştir.

Aynı yıllarda Deckard ve Beaman, eklemeli imalat teknolojilerinden biri olan SLS (Seçici Lazer Sinterleme) üzerinde çalışmaya başlamıştır. Daha sonra 1986 yılına gelindiğinde Şekil 1.1'de gösterildiği gibi Deckard ve Beaman, ilk prototip SLS diğer adıyla Seçici Lazer Sinterleme adı verilen bir tür katkılı üretim geliştirilmiş ve patentini almıştır. Aynı yılda Charles Hull, 3 boyutlu Systems adını verdiği katmanlı imalat üzerine ilk şirketi kurmuştur [2].



Şekil 1.1: Dr. Joe Beaman ve Carl Deckard [3]

Eklmeli imalat teknolojilerinden en yaygın kullanım alanına sahip olan FDM (Fused Deposition Modelling) teknolojisi 1988 yılında Scott Crump tarafından geliştirilmiştir. Aynı dönemde Charles Hull ‘un kurucusu olduğu 3 boyutlu Systems şirketi, SLA (steryolitografi) tekniğinin ilk modeli olan SLA-250’yi üretmiştir. FDM teknolojisinin mucidi Scott Crump, FDM teknolojisini geliştirdikten sonra 1989 yılında Stratasys adını verdiği bir şirket kurmuştur [74]. Eklmeli imalat teknolojisindeki bu gelişmelerden sonra 1990 yılında Manriquez Frayre ve Boureli tarafından 3 boyutlu yazıcı ile ilk metal parça üretimi gerçekleştirilmiştir [4]. 1993 yılında Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (MIT) 2 Boyutlu yazıcılardaki injet teknolojisine benzer, injet teknolojisi mürekkep püskürtmeli yazıcılarda kullanılan bir kodlama yöntemidir, bir teknik geliştirilmiş ve 3 boyutlu yazıcı adı verilen teknikle renkli ürünlerin üretilme imkanı doğmuştur. Bu gelişmeyle birlikte 1995 yılında Z Corporation şirketi 3 boyutlu yazıcı cihazlar üretmiş ve ticari olarak satışa başlanmıştır. O yıl SLM (Selective Laser Melting) lazerle seçmeli eritme anlamına gelen ilk ticari makinesi olan Şekil 1.2’de de gösterilen EOSINT M250, EOS tarafından piyasaya sürülmüştür. 1997 yılına gelindiğinde ise EOS, SLS tekniğinin tüm haklarını lisans altına alarak toz yatağı teknolojisine odaklanmıştır [5,6].



Şekil 1.2: EOSINT M250 [6]

1999 yılında Dawn White, ultrasonik yoğunlaştırma teknolojisini patentini almıştır. 2000 yılına gelindiğinde ise Andersson ve Larsson, Elektron ışını ergitme (EBM) yöntemini lisans altına almıştır. Bundan kısa bir süre sonra 3B Systems, SLS teknolojisini ticarileştirmek yolunda bir adımda bulunmuştur [6]. Reprap isimli açık kaynak kodlu katmanlı imalat tekniklerinin 2007 yılında ortaya çıkmasından sonra 2008 yılında Object Geometries şirketi tarafından Connex500 cihazının geliştirilmiştir. Bu cihaz aynı anda farklı malzemelerle ile üretime imkan sağlamıştır. Bu gelişmelerin ardından 2013 yılında 4D printing tekniği geliştirilmiştir.

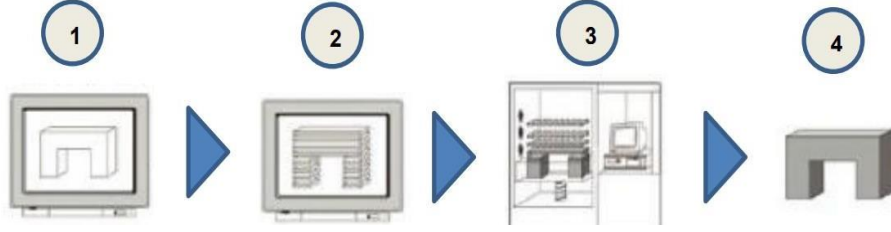
1.2. Eklemeli İmalat İşlem Adımları

Eklemeli imalat yöntemi ile malzeme üretimine başlamadan önce, baskısı alınacak malzemenin öncelikle bir çizim programında tasarımı yapılarak çizimi gerçekleştirilir. Bu tasarımı kendimiz yapılabilir ya da hazır olarak alınabilir. Baskısı alınacak malzemenin CAD modeli bir dilimleme programı kullanılarak dilimlere ayrılır. 3 boyutlu yazıcı üretim tamamlanıncaya kadar bu geometriye ait verileri kullanarak üretimi gerçekleştirir [7,8]. Şekil 1.3' de 3 boyutlu baskıya dair işlem adımları gösterilmiştir.



Şekil 1.3: 3B Baskı Adımları

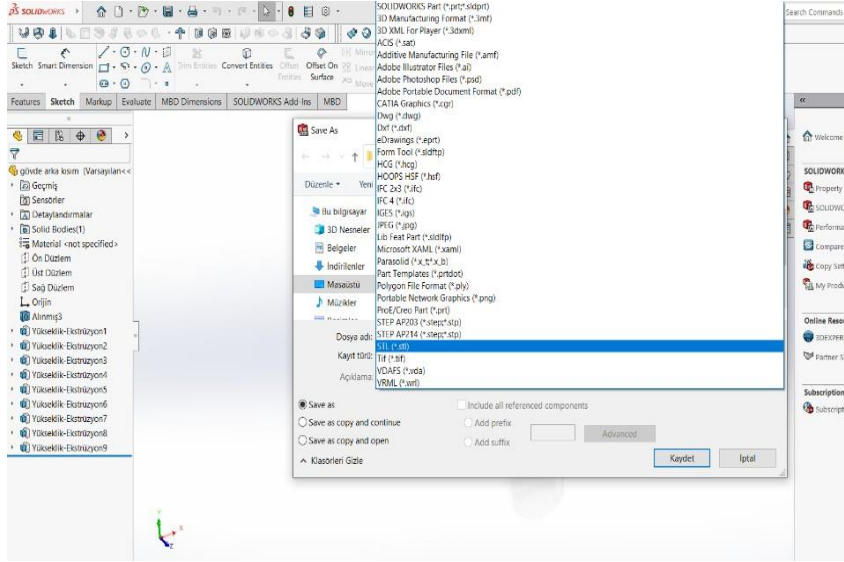
3D baskı işlemi, bilgisayar ortamında tasarımı yapılan parçanın CAD modelinin oluşturulması ile başlar. Oluşturulan CAD modelinin bir dilimle programı kullanılarak dilimlere ayrılır ve kontür hatları belirlenir. Ekleme yapılacak malzeme hatları bilgisine göre, malzeme katman katman eklenerek biriktirilir. Bu biriktirmeli imalat sonucunda son ürün elde edilir [9]. Şekil 1.4'te eklemeli imalatın işlem adımlarına dair şematik gösterim yer almaktadır.



Şekil 1.4: Eklemeli imalat işlem basamaklarının şematik gösterimi [9]

Eklemeli imalat teknolojisinde, STL formatı 3 boyutlu yazdırma işlemleri için ve bilgisayar destekli tasarım (CAD) için sıklıkla kullanılan bir dosya formatıdır. STL (Standard Triangle Language ya da Standard Tessellation Language), popüler 3 boyutlu yazdırma teknolojisi olan Stereolitografinin kısa halidir. Bilgisayar ortamında tasarımı yapılan parçanın CAD modelinin STL formatına çevrilmesiyle dilimleme işlemi gerçekleştirilir ve 3 boyutlu yazıcının anlayacağı yazılım dili olan G koda çevrilmiş olur [10]. Bu işlem ile parçaya özgü boyutlandırma, pozisyon verme ve destek yapısı oluşturma gibi modifikasyonların yapılması sağlanır.

STL formatında bir dosya 3 boyutlu modelin yüzeyini tanımlayan bir dizi bağlantılı üçgenlerden oluşmaktadır. Nesnelerin geometrik yüzeyini oluşturmak için üçgen mozaikleme yöntemi ile farklı noktalardan koordinatları alarak tüm bu noktalara ait detayları depolanır. Tasarımın karmaşıklığı arttıkça oluşturulan bu üçgenlerin sayısı da artmakta olup dosyanın çözünürlüğü de artmaktadır. Daha sonra dilimlere ayrılmış olan bu katmanlar birleştirilerek farklı üretim süreçlerine gerek olmadan tasarımdan doğrudan üretim yapılmasını sağlar. Bu özelliğiyle de iş gücünü ve üretim zamanını azaltarak verimliliğin artırılmasını sağlar [11]. Şekil 1.5'te bir CAD programı kullanılarak tasarımı yapılan parçanın STL dosya formatına çevrilmesi işlemi gösterilmektedir.



Şekil 1.5: CAD programından STL formatında kaydetme işlemi

3 boyutlu yazıcı ile baskı alma işlemi; parçanın temizlenmesi, destek parçalar kullanıldıysa destek yapıların kaldırılması gibi işlemlerin uygulanması ile son bulur fakat elde edilen ürün son ürün olmayabilir. Örneğin istenilen yüzey kalitesinin baskı alırken elde edilememiş olması, parçaya bitirme işlemleri uygulanmasını gerektirebilir. Bu amaç doğrultusunda istenilen yüzey özelliklerini sağlamak için taşlama, kumlama, parlatma, boyama gibi işlemler uygulanabilir [2].

Bitirme işlemleri (finishing operations) makine ile işleme, bilya püskürtme, cilalama, yüzey işleme, kalite kontrol, ısıl işlemler ve malzemede oluşan boşluklu yapıyı gidermek amacıyla izostatik presleme benzeri işlemler olabilir.

1.3. Eklemeli İmalat Kullanım Alanları

Eklemeli imalatın endüstriyel üretimde sağlamış olduğu birçok avantaj sonucunda, Eİ' nin kullanımı yaygınlaşmış ve her sektörde kullanılıyor haline gelmiştir. Ambalajlama sektöründen başlayarak, sağlık sektöründe tıp ve medikal alanlarına, otomotiv sektöründe araba parçalarının üretilmesinden, havacılık sektöründe uçaklarda kullanılan metal parçaların üretimi ve roketlerin motorlarına, savunma sanayisinde plastik parçaların üretilmesinden eğitim ve tekstil alanına kadar aklımıza gelebilecek birçok alanda kullanılmaktadır. Şekil 1.6' da metallerin eklemeli imalat teknolojileri uygulamaları gösterilmiştir.



Şekil 1.6: Eklemeli İmalat teknolojisi ile üretilen endüstriyel ürünler [12]

(a)

(b)

(c)

(a) Bathsheba Grossman tarafından tasarlanmış hassas metal parça, (b) 3 boyutlu baskı ile yapılmış paslanmaz vidalar, (c) Lazer Işınli Ergitme teknolojisi kullanılarak üretilmiş oyuk Ni 718 türbin kanadı

Eklemeli imalatın sağlık sektöründeki kullanımı da giderek artmaktadır. Eİ, kişiye özel medikal ürünlerin üretiminde, örneğin protezlerin üretilmesinde ve implant üretiminde kullanılmaktadır. Eklemeli imalatın tıp alanındaki bir diğer uygulaması da 3 boyutlu biyobaskıdır. Bununla birlikte eklemeli imalat ile canlı doku üretimi ve yapay organ üretilmesi de mümkündür. Şekil 1.7’de eklemeli imalat teknolojilerinin tıp alanındaki uygulamaları [13,14].



Şekil 1.7: Eklemeli İmalatın tıp alanındaki uygulaması [15]

Üretim zamanlarının ve baskı maliyetlerinin düşmesiyle eklemeli imalat, savunma sanayisinde özellikle savaş uçaklarının yapımında hava araçlarının üretilmesinde kullanılmaktadır [16]. Eklemeli imalat bunların yanında akademik çalışmalarda, patent alma çalışmalarında ve eğitim kurumlarında prototip modellerin üretilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 1.8’de uçak motor kapağı menteşesi

ve Şekil 1.9’ da egzoz parçaları eklemeli imalat uygulama alanlarına örnekler verilmektedir.



Şekil 1.8: Klasik (üstte) ve Eklemeli İmalat Yöntemleriyle Üretilmiş Uçak Motor Kapağı Menteşesi [17]



Şekil 1.9: Egzoz Parçaları / otomotivde Eİ [18]

1.4. Eklemeli İmalatın Avantaj ve Dezavantajları

Eklemeli imalat teknolojilerinin, geleneksel yöntemlerin yanı sıra uygulama alanlarının bu kadar artmasının sebebi, sağladığı birçok avantajdır. Eklemeli imalatın üretim süreçlerine olan katkıları ve sağladığı avantajların dışında diğer geleneksel yöntemlerle kıyaslandığında dezavantajları da bulunmaktadır. Plastik enjeksiyon yöntemi ile üretim yaparken sıklıkla değişen ürün gamı ile değişen kalıp maliyeti ihtiyaçları üretime maliyet yapılmasını gerektirmiştir. Bu da oldukça maliyetli bir süreçtir. Örneğin ürün gamı sürekli değişen bir üreticinin her ürün için kalıp imal ettirmesi oldukça maliyetli olacaktır. 3 boyutlu baskı, kalıp üretimini ortadan kaldırarak kalıp maliyetinin önüne geçilmesini sağlamıştır. Eklemeli imalat ile kişiye özel ve çok karmaşık geometriye sahip ürünler üretmek

mümkündür. Bununla birlikte geleneksel yöntemlere kıyasla montaj işlem sayısını düşürmektedir. Prototip üretim zamanını oldukça düşürerek ürün geliştirme faaliyetlerini hızlandırmaktadır. Renkli malzemelerin üretiminde parçanın boyanmasına gerek kalmadan renkli filament kullanılarak üretim gerçekleştirilebilir. Geleneksel üretim yöntemlerinden olan talaşlı imalattaki kadar malzeme israfı yoktur.

Avantajlarının yanı sıra dezavantajları da mevcuttur. Geleneksel yöntemlerdeki üretim hızlarına kıyasla birçok teknolojinin üretim hızları oldukça düşüktür. Baskı almak istendiğinde mekanik tasarım, malzeme ya da proses bilgisi için uzman gereksinimi gerekir ve bunun yetersizliği yaşanabilir. İmalat sonrasında baskı kalitesine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü, iç gerilmeler, iç boşluklar gibi sorunlar olabileceğinden ek işlemler gerekebilir. Ek işlemler yapıldıktan sonra dahi oluşan mekanik özellikler ihtiyaçları karşılayamayabilir. Ve üretimde kullanılacak malzeme türleri henüz sınırlıdır.

1.5. Eklemeli İmalat Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Eklemeli imalat yöntemleri Tablo 1.1'de de görüldüğü gibi, uygulama yöntemi, kullanılan malzeme ya da güç kaynağı gibi birçok özellik bakımından sınıflandırılabilir. Eklemeli imalat teknolojilerine SLS (Seçici Lazer Sinterleme), FDM (Eriyik Yığılma Modelleme), BJ (Yapıştırıcı ile Katmanlı İmalat), SLA (Tarayarak Işıklı Kütleleme) ve LOM (Tabakalı Objeler Üretimi) örnek gösterilebilir. FDM, en yaygın kullanım alanına sahip eklemeli imalat teknolojisidir.

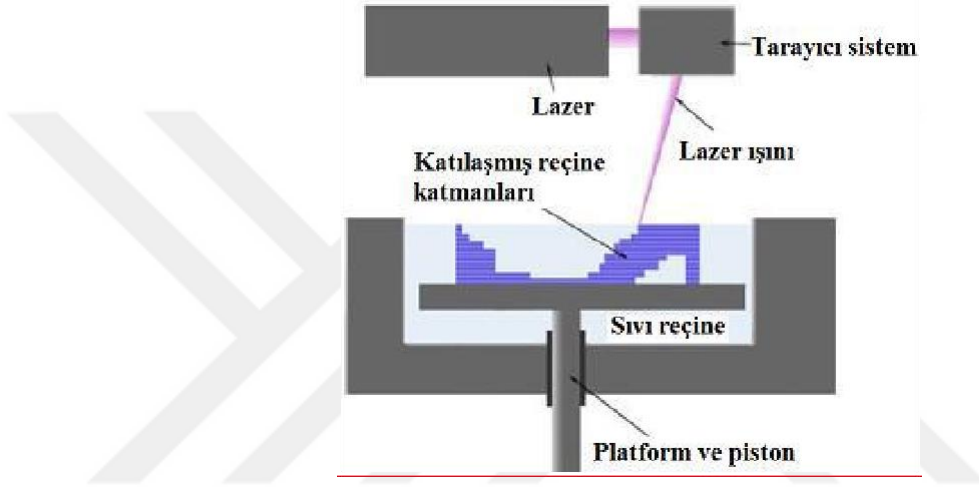
Tablo 1.1: Eklemeli imalatın ASTM F42 standardına göre sınıflandırılması [19-21]

YÖNTEM	TEKNOLOJİ		GÜÇ KAYNAĞI	MALZEME	ÖZELLİKLER
Fotopolimerizasyon	SLA	Stereolitografi	Lazerle Sertleştirme	Fotopolimer Seramik	Yüksek baskı hızı Yüksek parça çözünürlüğü Yüksek detay Yüksek malzeme maliyeti
	DLP	Dijital Işık İşleme	Projektörle Sertleştirme	Fotopolimer Seramik	Yüksek baskı hızı Çözünürlük,projeksiyonun piksel boyutuyla sınırlıdır
Malzeme Ekstrüzyonu	FDM	Eriyik Yığma Modelleme	Termal Enerji	Termoplastik	Düşük yazıcı maliyeti Çoklu malzeme ile baskı Yüksek mukavemet Düşük parça çözünürlüğü Zayıf yüzey iş sonu Düşük baskı hızı
Malzeme Püskürtme	PJ/MJ	PolyJet / MultiJet	Ultraviyole Işıklı Sertleştirme	Fotopolimer	Çoklu malzeme ile baskıyı yüzey iş sonu Yüksek doğruluk Yüksek detay
Yapıştırıcı ile Katmanlı İmalat	BJ	Yapıştırıcı ile Katmanlı İmalat	Bağlayıcı Madde ile Birleştirmek	Seramik tozu Metal tozu Kum	Renkli obje baskısı Destek yapıları gerekmez Geniş malzeme seçeneği Yüksek baskı hızı Son işlem için infiltran malzeme gerektirir Düşük dayanım Yüksek gözeneklilik
Toz Yataklı Eritme	SLS	Seçici Lazer Sinterleme	Lazer ile Eritme	Poliamid Polimer	Yüksek doğruluk Yüksek detay Tam dolu parça üretimi Yüksek mukavemet Destek yapıları gerekmez
	DMLS	Direkt Metal Lazer Sinterleme		Metal tozu Seramik tozu	
	SLM	Seçici Lazer Eritme		Metal tozu Seramik tozu	
	EBM	Elektron Işını Eritme	Elektron Işınıyla Eritme	Metal tozu Seramik tozu	
Direkt Enerji Depolama	LENS	Lazer Toz Şekillendirme	Lazer ile Eritme	Erimiş metal tozu	Hasarlı ve aşınmış parçaları tamir edebilme Son işlem gerekir
	EBAM	Elektron Işını Eklemeli İmalat	Elektron Işınıyla Eritme	Erimiş metal tozu	
Levha Sac Laminasyon Metodu	LOM	Tabakalı Objeler Üretimi	Lazer ile Eritme	Kağıt Plastik film Metalik sac Seramik bant	İyi yüzey iş sonu Yazıcı, malzeme, proses maliyeti düşük Büyük boyutlu malzeme basabilme Dikey yönde zayıf mukavemet

1.6. Eklemeli İmalat Teknolojileri

1.6.1. Stereolitografi (SLA) / Tarayarak Işıklı Kütleme

Bu teknoloji ultraviyole ışığa duyarlı olan polimerlerin lazer ışınları ile katmanlar halinde kütleme işlemi yapılarak birleştirilmesi mantığına dayanır [17]. Bu teknolojiye akışkan ışığa duyarlı malzeme, lazer ışığı ile tarayarak küllenir. Bu işlemle yüksek boyut hassasiyetine sahip 3 boyutlu polimerler elde edilmiş olur. Z eksenindeki katman yüksekliği ve lazer ışık boyutu, bu teknoloji uygulamalarının sınırlamalarıdır [22]. Şekil 1.10'da SLA çalışma prensibi gösterilmektedir.



Şekil 1.10: Tarayarak Işıklı Kütleme çalışma prensibi [23]

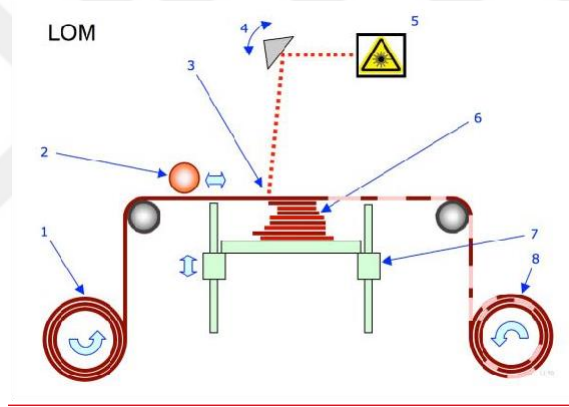
Tarayarak Işıklı Kütleme ile üretimde kütleme seviyesi, baskı parametrelerindedir. Termal ısıl işlem ve ultraviyole (UV) radyasyon gibi ikincil kütleme yöntemleriyle değiştirilebilmektedir [24-26]. Üretimde parçanın boşta kalan kısımlarına parçanın oynamaması için destek elemanları basılır. Baskı sonrası destekler parçadan ayrılırlar. SLA hızlı gerçekleşen bir prosestir. Şekil 1.11'de uygulama örnekleri verilmiştir [27].



Şekil 1.11: Stereolitografi (SLA) / Tarayarak Işıklı Kütleme Uygulamaları [27]

1.6.2. Lamine Nesne İmalatı (LOM)

LOM teknolojisinin genel mantığı yapışkan kaplı bir levhanın altındaki katmana yapıştırılarak lazerle kesilerek üst üste biriktirilmesidir. Bu işlemde lazer, her bir katmanda levhayı keser ve kesme işlemi bittikçe üstüne ilave edilen levha parçasının ısıtılmış bir silindir yardımıyla basınç uygulanarak birleştirilmesi suretiyle bu işlem, parça üretimi tamamlanana kadar devam eder. Her tabaka kesiminden sonra atık parça, destek görevi görmesi sebebiyle yerinde kalır. Lamine Nesne İmalatında (Layered Object Manufacturing) inşa platformu üzerine levha ilerleterek sistemdeki beslemeyi sağlayan besleme mekanizması, beslenen levhayı basınç uygulayarak altındaki katmanla birleştirmede kullanılan ısıtılmış silindir ve bu levhaları kesmek için kullanılan lazer sistemin ana bileşenleridir [28]. Şekil 1.12'de LOM (Lamine Nesne İmalatı) çalışma prensibi şematik gösterimi verilmiştir.



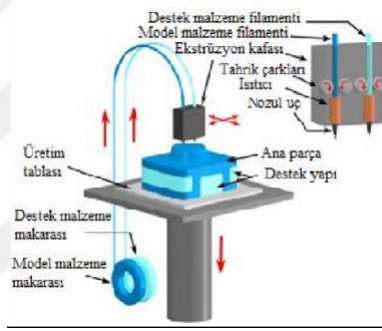
Şekil 1.12: Lamine nesne imalatı 1.Folyo temini, 2.Isıtmalı silindir, 3 Lazer ışını, 4.Tarama prizması, 5.Lazer ünitesi, 6.Katmanlar, 7.Hareketli platform, 8.Atık [28].

Katman üretimi, ısıtılmış silindir ile alt tabakaya yapıştırılan tabaka ile başlar. Lazer daha sonra katmanın ana hatlarını çizer. Parça olmayan alanlar, atık malzemenin çıkarılmasını kolaylaştırmak için çapraz taranmıştır. Lazer kesim tamamlandıktan sonra, platform aşağı doğru hareket eder ve böylece yeni sac malzeme yerine yuvarlanabilir. Yeni malzeme yerine oturduğunda, platform önceki konumunun bir kat aşağısına geri hareket eder. Lamine Nesne İmalatı (LOM) un doğruluğu Stereolitografi (SLA) ve Seçici Lazer Sinterleme'den (SLS) daha azdır. Ayrıca LOM da kimyasal bir reaksiyon gerekli değildir. Bu da büyük parçaların güvenle üretilebileceğini gösterir. Kolay bulunabilen ve düşük

maliyetli malzeme kullanımından dolayı diğer eklemeli imalat yöntemlerine kıyasla ucuz bir 3 boyutlu baskı yöntemi olarak kabul edilir [28].

1.6.3. FDM/ Eriyik Biriktirme/Yığma Modelleme Tekniği

FDM yöntemi günümüzde en popüler 3 boyutlu baskı teknolojisidir. Bu teknolojinin genel çalışma mantığı eriyik termoplastik malzemenin katman katman STL dosyasındaki verilere göre biriktirilmesidir [78]. FDM teknolojisinde en çok kullanılan termoplastikler ABS ve PLA' dır. Eriyik biriktirme yönteminin birçok üretim parametresi bulunmaktadır. Katman kalınlığı, tabla sıcaklığı [29,30], dolgu deseni [31], oryantasyon açısı, nozul sıcaklığı [32], doluluk oranı [33], üretim hızı [34] bu parametrelere örnek verilebilir [77]. Şekil 1.13'de FDM teknolojisi çalışma prensibi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.13: Eriyik biriktirme yöntemi çalışma prensibi [35]

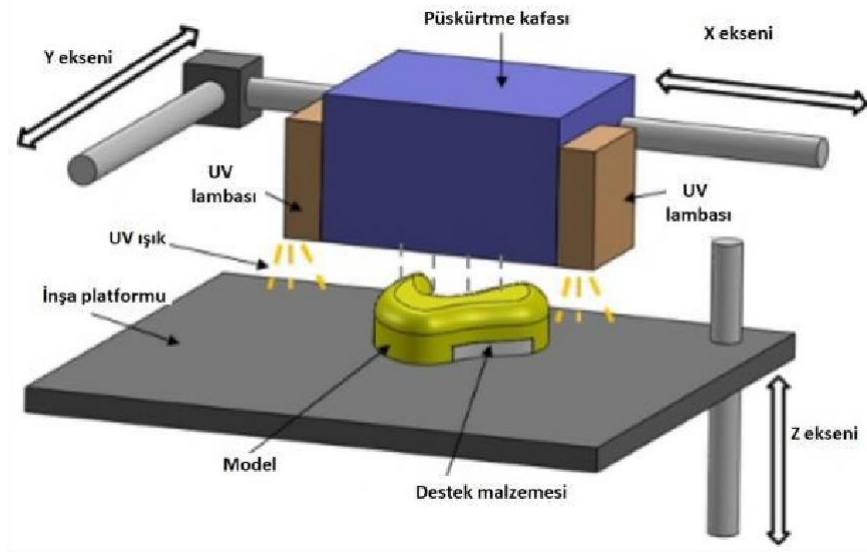
Plastik enjeksiyonla üretim yöntemi ve FDM biyolojik olarak parçalanabilen, aynı termoplastik malzemeleri kullanır [36]. Eriyik Biriktirme modelleme teknolojisi, filament formundaki malzemenin 3 eksenli, XYZ kartezyen koordinatlarında hareketli bir sisteme bağlı bir ekstrüzyon nozulünden geçirilip bir dilimleme programı kullanılarak elde edilen STL verilerine göre malzemenin biriktirilmesini kapsar [37-39]. Şekil 1.14'de FDM teknolojisi uygulama örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 1.14: FDM/ Eriyik Biriktirme/Yığıma Modelleme Tekniği Uygulaması [40,41]

1.6.4. Polyjet Modelleme (PJM)

PJM yüksek hassasiyet ile düzgün ve hassas parçaların üretilmesini sağlayan mükemmel bir Eİ yöntemidir. Polyjet Modelleme, çok çeşitli malzemeler ile üretime imkan vermektedir. Sert malzemeler ve kauçuk gibi yumuşak malzemelerle, opak ve şeffaf malzemelerle biyouyumlu malzemelerle PJM teknolojisiyle baskı alabilmek mümkündür. Üretilcek ürünün boyut ve hacmine göre uygulanabilir bir yöntemdir. Polyjet Modelleme (PJM), Şekil 1.25'te de gösterildiği gibi çok sayıda nozül içeren bir kafadan akrilik temelli fotopolimer katmanların hızlı bir biçimde basılarak malzemenin biriktirilmesini sağlayan bir Eİ teknolojisidir [42,43]. Şekil 1.25'te Polyjet Modelleme teknolojisi çalışma prensibi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.15: PJM yöntemi (şematik) [44]

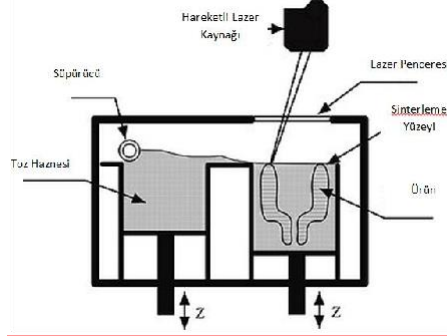
PJM püskürtme sistemini en yaygın kullanan 3 boyutlu yazıcı tipidir. Küçük kapasiteli ve ucuz makinelerden, büyük ve profesyonel makinelere kadar birçok tüketici için ürün yelpazesi oldukça geniştir [43]. Şekil 1.26’da bu teknolojiye ait uygulama örnekleri verilmektedir.



Şekil 1.16: Polyjet Modelleme uygulaması örnekleri [45]

1.6.5. Seçici Lazer Sinterleme (SLS, Selective Laser Sintering)

Selective Laser Sintering’in genel mantığı, toz haldeki malzemenin hazne içine konularak lazer yardımıyla önceden belirlenen ürün geometrisine göre sinterlenmesidir. Lazer bir aynaya gönderilir ve aynanın da hareketi ile malzeme geometrisine göre uygun bir şekilde zemine iletilmesiyle sinterleme (kaynaştırma) elde edilir. Her katmanın sinterleme işleminin tamamlanmasından sonra alt kademeye geçilir. Böylece üst üste yerleştirilen katmanlardan 3 boyutlu cisim elde edilmiş olur. Şekil 1.17’de SLS teknolojisi çalışma prensibi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.17: Lazer Sinterleme Yönteminin Şematik Gösterimi [46,47]

Sinterlenen bölge etrafında toz halindeki malzeme bulunduğu için ilave bir destek malzemesi kullanımına gerek kalmayarak yüzeyde pürüzler oluşmaz ve malzeme israfı en aza indirilmiş olur. SLS teknolojisi ile elde edilen ürünlerde orta derecede bir yüzey kalitesi elde edilir. Bu teknolojinin ön plana çıkmasının sebebi hızlı bir yöntem olmasıdır. [48,49]. Bu teknolojiye sinterleme işlemi bittikten sonra baskılar sinterlenmemiş toz içinde bırakılarak kapsülendir. Parçalar alınmadan önce kumun soğuması beklenir. Beklenen bu soğuma süresi bazen

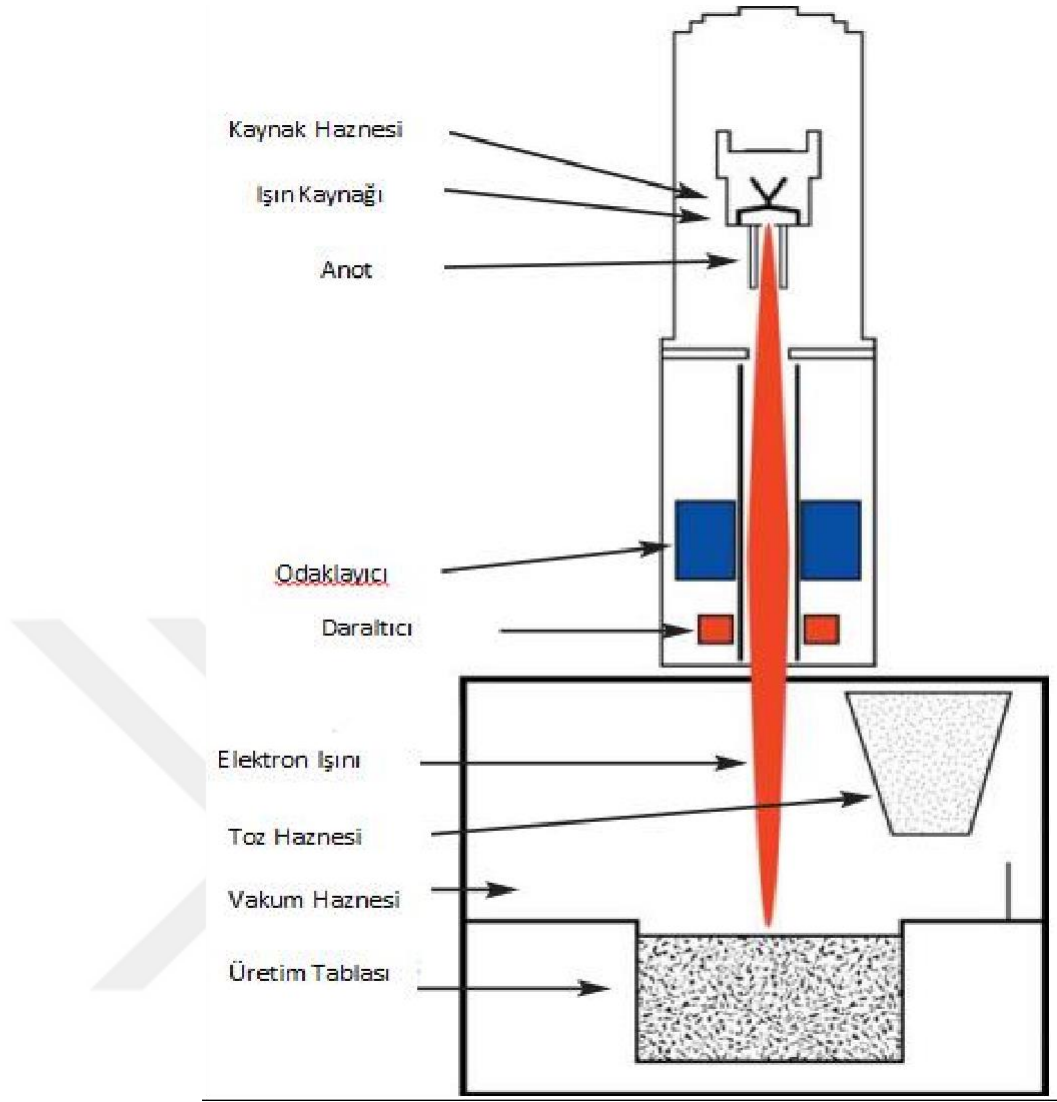
oldukça uzayabilmektedir. Kum içinden çıkarılan parça basınçlı bir hava ile ya da başka bir patlatma ortamı ile temizlenip kullanıma hazır hale getirilir [50]. Şekil 1.18’de SLS teknolojisine uygulama örnekleri verilmektedir.



Şekil 1.18: Seçici Lazer Sinterleme Uygulamaları [50,51]

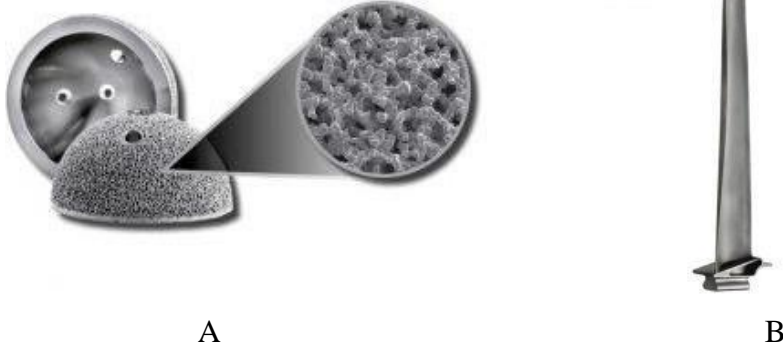
1.6.6. Elektron Işınli Ergitme (EBM)

Elektron ışınli ergitme (EBM) teknolojisi genel olarak toz haldeki metalin ısıtılıp ergitilerek birleştirilmesidir. Bu özelliğiyle Seçici Lazer Sinterleme (SLS) yöntemiyle benzerlik gösterir. Bir vakum haznesi içerisinde hareketli tabla üzerine koyulan metal tozları bilgisayar kontrolüyle elektron bombardımanına tutulur. Bu elektronlara hız kazandırıldıktan sonra ışık hızının yarısı büyüklüğünde hızla toza çarpar. Çarpan bu elektronların enerjisiyle metal ergitilir. Her ergitme işleminden sonra tabla aşağıya doğru kaydırılır ve yeni metal tozu koyulur. Bu işlem baskı işlemi bitene kadar tekrar eder. Şekil 1.19’da Elektron ışınli ergitme (EBM) yöntemi çalışma prensibi şematik olarak gösterilmektedir.

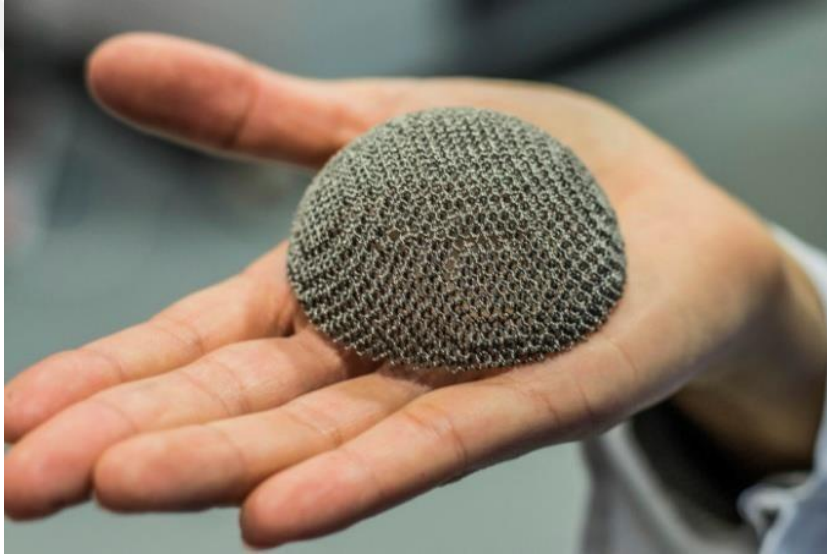


Şekil 1.19: Elektron Işın Eritme Yönteminin Şematik Gösterimi [52]

İletken malzemelerle üretimde SLS teknolojisine göre daha verimlidir. Hassas, gözeneksiz ve yoğun parçaların üretiminde tercih edilen bir baskı teknolojisidir. EBM, hassasiyet istenilen karmaşık geometriye sahip metal parçaların üretilmesini sağlar. Bu yönüyle sağlık sektörü, havacılık sektörü gibi yüksek hassasiyet gerektiren parçaların üretilmesinde kullanılır [53,54]. Şekil 1.20 ve Şekil 1.21’de Elektron Işın Eritme (EBM) yöntemine ait uygulama örnekleri verilmektedir.



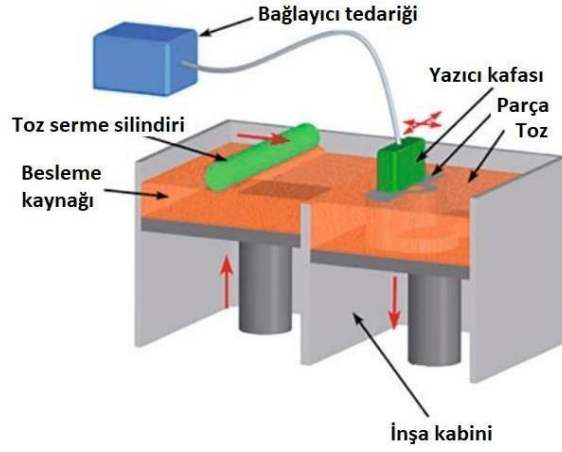
Şekil 1.20: (A) Gelişmiş osseointegrasyon için entegre Trabeküler Yapılara™ sahip Ti6Al4V asetabular kapaklar (Arcam'ın izniyle), (B) γ -titanyum alüminitten yapılmış düşük basınçlı türbin kanadı (AvioAero'nun izniyle)



Şekil 1.21: Elektron ışınli ergitme (EBM) uygulaması [55]

1.6.7. 3 Boyutlu Binder Jetting (BJ / Yapıştırıcı İle Katmanlı İmalat)

3B yazıcılar, bir inşa kabini içine serilen tozların, bağlayıcı püskürtülerek tozların birleştirilmesi ile malzeme üretimine imkân sağlayan bir eklemeli imalat teknolojisidir. Şekil 1.22'de 3 boyutlu Binder Jetting teknolojisi çalışma prensibi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.22: 3B Yazıcı şematik gösterimi [56]

Bu yöntem kullanılarak çok renkli parçalar üretebilmek mümkündür. İşlem sırasında bağlayıcı püskürtülmeyen tozlar destek göre gördüğünden ilave bir destek malzemesi kullanımı gerekli değildir. Bu üretimde genellikle kompozit malzemeler kullanılsa da döküm kumu, seramik ve metal malzemeler de kullanılır. BJ teknolojisi kullanılarak baskı alma işleminden sonra malzemeyi çevreleyen ve aynı zamanda destek görevi gören tozlar vakum yardımıyla veya bir fırçayla temizlenir [57]. Şekil 1.23'te gösterildiği gibi Yapıştırıcı ile katmanlı imalat teknolojisine ait uygulama örnekleri gösterilmiştir.



A



B

Şekil 1.23: (A) 3 boyutlu baskının ardından toz yatağındaki parçalar (Höganäs AB – Digital Metal®'in izniyle), (B) 3 boyutlu baskı ile yapılmış paslanmaz vidalar (Höganäs AB – Digital Metal®'in izniyle) [58]

1.7. Plastik Enjeksiyon

1.7.1. Plastik Enjeksiyon Tarihsel Gelişimi

Plastik enjeksiyon plastiklerin işlenmesinde en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Enjeksiyon ile üretim plastiğin icadı ile başlamaktadır. 1856'da Alexander Parkes tarafından ilk insan yapımı plastik olan Parkesine bulunmuş ve patenti alınmıştır [59]. Parkesine, nitroselüloz bazlı bir selüloittir [60]. Amerikalı kimyacı John Wesley Hyatt 1869 yılında ilk sentetik plastik olan selüloidi buldu ve onu işleyebilmek için geliştirdi [88]. Hyatt,1872 yılında kardeşi Isaiiah ilk pistonlu plastik enjeksiyon makinesinin patentini almıştır [61]. Bu gelişmelerden sonra 1903 yılında Alman kimyagerler Arthur Eichengrün ve Theodor Becker tarafından selüloz nitrattan çok daha az yanıcı olan ilk çözünür selüloz asetat formlarını icat etti. Bu sayede, enjeksiyonla kolayca kalıplanabilecek bir toz form sağlanmış oldu. Arthur Eichengrün1919 yılında ise ilk enjeksiyon kalıplama presini geliştirmiş ve 1939 yılında plastikleştirilmiş selüloz asetat enjeksiyon kalıplama patentini alınmıştır. 1946 yılında Amerikalı mucit James Watson Hendry, üretilen ürünlerin enjeksiyon hızının ve kalitesinin daha hassas kontrolünü sağlayan ilk vidalı enjeksiyon kalıplama makinesini yaptı. Bu makina, renkli ve geri dönüşümü mümkün hammadde kullanıyordu. Bu gelişmeden sonra Hendry 1970 yılında içi boş ürün üretimini sağlayan ilk gaz destekli enjeksiyon kalıplama prosesini geliştirdi [59].

1.7.2. Plastik Enjeksiyon Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

Plastik enjeksiyon, imalat sektöründe oldukça yaygın kullanım alanına sahiptir. Bunun sebebi sağlamış olduğu birçok avantajdır. Plastik enjeksiyon prosesi, yüksek üretim hızları, büyük hacimli parçaların üretilebilir olması, diğer üretim yöntemlerine kıyasla düşük maliyetli olması ve otomasyona uygun olup aynı anda çok sayıda üretime imkan vermesiyle birlikte yüksek yüzey kalitesiyle son işlem gerektirmemesi gibi sağlamış olduğu birçok avantajla kullanımı oldukça yaygındır. Bununla birlikte sağladığı renk çeşitliliği ve iyi mekanik özellikler bu üretim yönteminin avantajlarından. Plastik enjeksiyon yönteminin avantajlarının yanı sıra dezavantajları da bulunmaktadır. Yüksek kalıp maliyeti, sektördeki rekabetin yüksek olmasından kar oranının düşük tutulması, enjeksiyon

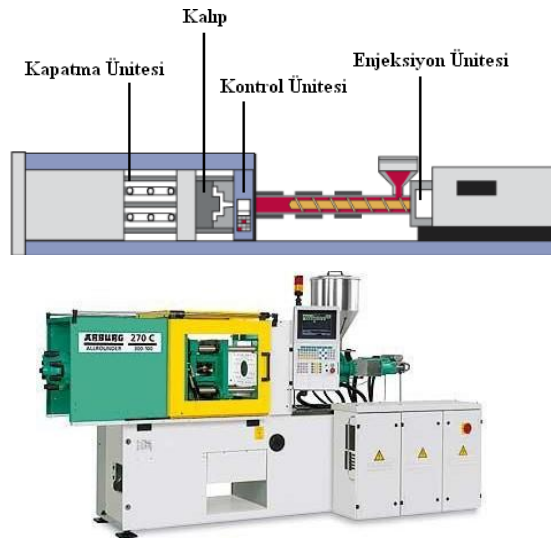
makinaları ve yedek parçalarının pahalı olması bu üretim yönteminin dezavantajlarıdır [62].

1.7.3. Plastik Enjeksiyon İşlemi

Plastik enjeksiyon prosesi, plastikleri şekillendirmede en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. Bu üretim metodu genel olarak granül haldeki plastiğin ısıtılıp bir basınçla eritilerek önceden hazırlanan kalıp içine enjekte edilip soğutulması prensibine dayanır. Soğuyan plastik kalıbın şeklini almış bir biçimde kalıptan çıkarılır. Plastik Enjeksiyon prosesi üç ana safhadan oluşur. Bunlar; dolum, ütüleme ve soğutmadır. Üretilen ürün özellikleri, kalıbın tasarımı, kullanılan plastik malzeme çeşidi ve kalıplama şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Bu üretim metodunda en çok termoplastik malzemeler kullanılır. Kullanılan bu termoplastik malzeme toz ya da granül formunda olacak şekilde bir huni yardımıyla ısıtılmış silindire gönderilir. Isıtılmış olan bu silindirin sıcaklığı termoplastik malzemenin cinsine göre ayarlanır. Silindir içindeki ısıtılarak eriyik hale getirilen plastik, hidrolik bir piston yardımıyla ya da helezon vidalı mil ile silindir sonuna taşınarak malzemenin kalıp boşluğuna taşınması sağlanır. Kalıp şeklini alan plastik malzeme soğutulurak parça kalıptan çıkarılır [63,64].

1.7.4. Plastik Enjeksiyon Makinesi

Plastik enjeksiyon işleminin gerçekleştiği makineye plastik enjeksiyon makinesi denilmektedir. Şekil 1.24'te plastik enjeksiyon makinesi görselleri verilmektedir.



Şekil 1.24: a) Plastik enjeksiyon makinesi şematik gösterimi, b) Plastik enjeksiyon makinesi [65, 66]

Plastik enjeksiyon makinesi Şekil 1.24'te gösterildiği gibi dört ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar; enjeksiyon nitesi kontrol nitesi, kalıp (makine gövdesi), kapama (mengene) nitesidir. Plastik Enjeksiyon Yöntemi ile üretilmiş malzemeler Şekil 1.25'te gösterilmiştir.



Şekil 1.25: Plastik enjeksiyon prosesi uygulama örneklere [67]

Plastik enjeksiyon prosesi 7 adımda gerçekleŐir;

- PlastikleŐtirme
- Kalıbın Doldurulması
- Ütüleme
- Tutma
- Soğutma
- Kalıptan ıkarma
-

PlastikleŐtirme

Plastiğin eritilerek kalıba enjekte edildiği adımdır. Öncelikle vida dönerek huniden ocağa hammadde alır. Daha sonra plastik hammadde ısıtıcılar ile eritilir.

Kalıbın Kapatılması

Plastik enjeksiyon makinesinin mengene ünitesinde gerçekleştirilir. Kalıbın iki parçası birbiri üzerine kapatılarak basınç uygulanır ve kalıp boşluğu oluŐmuŐ olur.

Kalıbın Doldurulması

Bu aŐamada vida hızı parametresi önemlidir. Plastik malzemenin kalıba doldurulması sırasında plastiğin sıcaklığı düŐerek viskozitesi (akıŐkanlıĐı) artarak enjeksiyon basıncının artmasını sağlar. Vida hidrolik bir pistonla ileri itilerek eriyik plastik kalıp boşluğuna doldurulur.

Ütüleme

Ütüleme fazında basınç yükseltilir ve kalıbın tam anlamıyla dolması sağlanarak ince detayların oluşması sağlanır.

Tutma

Parçada oluşacak çekmeyi azaltmak adına parça kalıp içerisinde bir basınç (tutma basıncı) altında bekletilir. Parça çektikçe kalıp içine eriyik plastik malzeme girişi sağlanır. Bu işlem yolluk girişi donana kadar devam eder.

Soğutma

Yolluğun donmasıyla parça kalıp işçinde soğur ve bir miktar çeker. Vicat yumuşama sıcaklığı noktasına kadar parça soğutulmaya devam eder.

Kalıptan Çıkarma

Dondurulmuş parça, itici bir sistem yardımı ile kalıptan çıkarılır [68].

1.7.5. Plastik Enjeksiyon Kalıpları

Eriyik hale getirilmiş plastik malzemenin katılaştırılıp şeklinin verilmesini sağlayan takımdır. Parça tasarımına ya da isteğe bağlı olarak manifold plakası, maça gibi elemanlar da bir kalıp tasarımında bulunabilir. Bir kalıp dişi ve erkek olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Plastik enjeksiyon tezgahlarında eriyik haldeki plastiğin kalıp boşluğuna getirilmesini sağlayan sisteme yolluk sistemi denilmektedir. Kalıp tasarımında eriyik plastiğin dolmasını engellemek için maça sistemi kullanılır.

Plastik enjeksiyonda kalıp tasarımı oldukça önemlidir. Üretimi yapılacak parçanın öncelikle tasarımı yapıldıktan sonra kalıp tasarımı da yapılarak, kalıbın üretimi sağlanır. Kalıp üretimi oldukça maliyetli ve zaman alıcıdır. Bu nedenle seri üretimde ürün başına düşen birim maliyet az olsa da az sayıda üretim yapıldığında birim maliyet oldukça yüksek olmaktadır. FDM teknolojisi kalıp tasarımı gibi bir süreci ortadan kaldırdığı için az sayıda üretim istendiğinde enjeksiyonlu üretime göre avantaj sağlamaktadır.

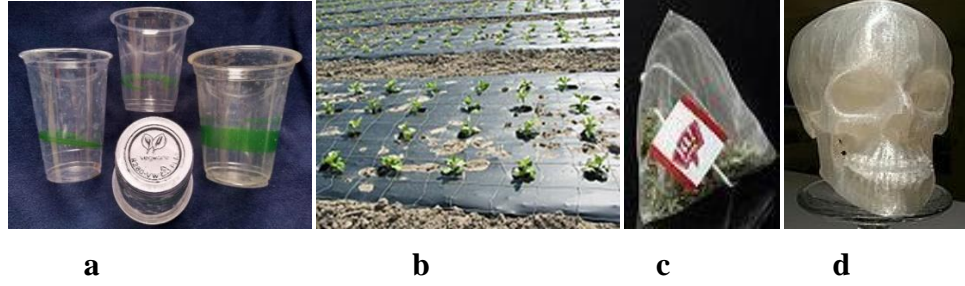
1.7.6. Plastiklerin Sınıflandırılması

Plastik malzemeler termoplastikler, termosetler ve elastomerler olmak üzere farklı 3 ana gruba ayrılırlar. Termoplastik malzemeler ısıtıldıklarında kalıplanıp

soğutulunca katılaşabilirler. Kalıplama sırasında kimyasal yapılarında bir değişiklik olmaz sadece fiziksel değişikliğe uğrarlar. Bu nedenle geri dönüştürülebilir bir malzemelerdir. Şekillendirilmiş termoplastik malzemeler ya da hurda termoplastikler ısıtılıp eritilerek tekrar kullanılabilirler. Bu özelliğiyle en çok kullanılan plastik türüdür. Termoplastikler amorf ya da yarı kristal olmak üzere iki tiptir. Termoset malzemeler sıcaklık ve basınç altında şekillendirilirler. Ve kalıptan çıkarılan plastik malzemeler tekrar eski hallerine geri getirilemezler. Çünkü bu işlemler sırasında kimyasal değişikliğe uğrarlar ve bu değişim malzemeye başka bir özellik kazandırır. Termoset malzemeler genellikle tek başına kullanılmazlar. Bu malzemelerin özelliklerini iyileştirmek için %40-60 oranında dolgu maddesi ilavesi kullanılır. Elastomerler, kauçuk özelliği gösterirler. Malzemeye bir kuvvet uygulandığında malzeme kuvvet neticesinde uzayıp genişleyerek şekil değiştirirler. Fakat malzemeye uygulanan kuvvet ortadan kalktığında plastik malzeme tekrar eski haline geri döner. Bu özellik malzemenin karşıt bağlanma mevcudiyetindedir [69].

PLA (Polylactic Acid)

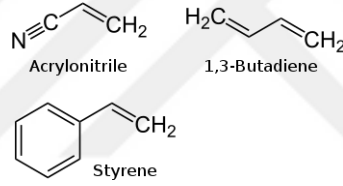
Mısır nişastası ve şeker kamışı kaynaklı bir biyopolimer ve termoplastiktir. Bu özellikleriyle insan sağlığına zararlı değildir. Akrilonitril butadien stiren (ABS) ile kıyaslandığında daha parlak bir görüntüye sahiptir. PLA, filament formunda eklemeli imalat teknolojilerinden biri olan FDM (eriyik yığma modelleme) teknolojisinde sıklıkla kullanılır. 3 boyutlu yazıcılar dışında plastik kaplar, plastik su şişeleri, paketleme malzemeleri ve gıdayla direk teması bulunan streç filmlerde de kullanılmaktadır. PLA, sert bir yapıya sahiptir. Bu nedenle darbelere karşı daha dayanıklıdır. Hafif esnek bir yapıya sahiptir. Aynı zamanda da kırılımandır. Aseton ile çözülmesi zordur. Baskı sıcaklığı olarak genellikle 190°C–220°C, yatak sıcaklığı olarak ise 50°C–70°C kullanılmaktadır. ABS ye göre basımı oldukça kolaydır. PLA, parlak bir görünüme sahiptir. Bu nedenle göze hitap etmesi gereken alanlarda kullanılabilir. Bununla birlikte biyopolimer bir yapıya sahip olduğundan zararlı değildir ve insan vücudu ile temas edebilecek her alanda kullanılabilir [70]. PLA kullanılarak üretilmiş malzeme örnekleri Şekil 1.26'da gösterilmektedir.



Şekil 1.26: (a) Biyobozunur PLA bardaklar, (b) PLA karışımı "bio-flex" den yapılmış malç filmi, (c) PLA'dan yapılmış çay poşeti, (d) PLA ile basılmış insan kafatası [71]

Akrilonitril butadien stiren (ABS)

Akrilonitril butadien stiren, Şekil 1.27'de de gösterildiği gibi akrilonitril ve stiren monomerlerinin polibütadien yanında polimerizasyonu ile üretilen bir termoplastik malzemedir. Bütadiyen, malzemeye sertlik kazandırarak dayanımını artırır; stiren malzemenin işlenebilir olmasını sağlar ve akrilonitril de ısı ve kimyasal direnç sağlar.



Şekil 1.27: Akrilonitril butadien stiren polimer yapısı [72]



Şekil 1.28: Granül formundaki ABS termoplastik malzemesi [73]

ABS yüksek sertlik değerleriyle darbe dayanımı sağlar. Bununla birlikte esnektir ve iyi yalıtım özelliği gösterir. ABS, üstün mekanik özellikleri ve kolay işlenebilirliği ile bilgisayar klavyesi bileşenleri, oyuncaklar, LEGO yapı taşları, plastik alaşımlar, dekoratif otomobil iç parçaları, yazıcılar, elektrikli süpürgeler, mutfak aletleri, faks makineleri, müzik aletleri gibi hayatımızın birçok alanında karşımıza çıkmaktadır. ABS 3 boyutlu yazıcıların da yaygınlaşması ile popüler hale gelmiştir. ABS Şekil 1.28'de gösterildiği gibi granül formunda olacak şekilde plastik enjeksiyonlu üretimde kullanılmaktadır.

1.8. Literatür İncelemesi

Fındık (2020) yapmış olduğu çalışmada, eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan Ergiyik biriktirme teknolojisini kullanmıştır. Çalışmasında 3 boyutlu yazıcı ile farklı doluluk oranlarında, farklı katman kalınlıklarında, farklı yazdırma açıları ile ABS termoplastik malzemesi kullanarak numune üretimini gerçekleştirmiştir. Bununla birlikte enjeksiyon makinesinde de baskı alınmıştır. Elde edilen numunelere çeşitli testler uygulayarak numunelerin mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmeye çalışılmıştır. Numunelerin çekme mukavemeti, elastiklik modülü, sertlik, izod darbe mukavemeti, %uzama değeri, kopma mukavemeti gibi değerleri ölçülerek değerlendirilmiştir. Plastik enjeksiyon yöntemine ait numunelerin elastiklik modülü, maksimum çekme, kopma mukavemeti, %uzama, sertlik, izod darbe mukavemeti gibi değerlerin 3 boyutlu baskı numunelerine kıyasla daha yüksek çıktığı görülmüştür. 3D yazıcıda elde edilen baskı numunelerinin ise doluluk oranları ve katman kalınlıklarının artmasıyla elastiklik modülleri, maksimum çekme mukavemeti, kopma mukavemetleri, %uzama ve darbe mukavemeti gibi değerlerinin arttığı görülmüştür. Fakat sertlik değerinin katman kalınlığının artmasıyla düştüğü görülmektedir. Plastik enjeksiyon yöntemi ile elde edilen numunelerde nem emme miktarı, aşınma oranı gibi fiziksel değerlerin 3D yazıcı numunelerine kıyasla daha az çıktığı belirlenmiştir. 3 boyutlu yazıcı numunelerinde doluluk oranı ve katman kalınlığının artmasıyla nem emme miktarı hariç diğer fiziksel özelliklerin arttığı görülmüştür. Tüm bunlara ek olarak 3D yazıcı numunelerinin enjeksiyon numunelerine kıyasla daha uzun işlem süresi gerektirdiği ve enjeksiyonla numune üretimine kıyasla daha fazla malzeme firesinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir [74]. Sezer ve ark. (2019) yapmış oldukları çalışmada eklemeli imalat teknolojilerinden olan ergiyik biriktirme yöntemi diğer adıyla FDM teknolojisi ile üretilen numunelerin düşük mekanik özellikler göstermesine karşın, bu düşük mekanik özelliklerin iyileştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Yük taşıyan sistemlerin istenilen mekanik özellikleri karşılaması amacıyla malzemelere iyileştirme yapılması gerektiğini düşünmüşlerdir. Çalışmada kompozit filament üretimini gerçekleştirmek amacıyla malzemelere karbon fiber takviye edilerek üretimin aşamaları incelenmiştir. Karbon fiber ilavesinin ABS malzemesini ne derece etkilediği gözlemlenmiştir. Kompozit filamentin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme dayanımı,

elastisite modülü, süneklik, tokluk gibi testler uygulanarak elde edilen değerler incelenmiştir. Mekanik özelliklerinin araştırılmasının yanı sıra malzemelerin SEM görüntüleri alınarak numunelerin mikro yapıları gözlemlenmiştir. Bu gözlem sonucunda malzemedeki boşluklu yapılar görüntülenmiştir. Tüm bu çalışmalar sonucunda $[0,90^\circ]$ baskı parametresi baz alındığında takviyesiz ABS numunesi ile kıyaslandığında karbon fiber takviyesinin numunelerin çekme dayanımı ve elastisite modülünü artırdığı, tokluk ve sünekliği de azalttığı görülmüştür. $[-45, +45^\circ]$ baskı parametresi baz alındığında ise elastisite modülünü artırdığı, çekme dayanımı, tokluk ve sünekliği azalttığı görülmüştür. Deneylede edilen sonuçlar takviyesiz ABS numunesinde yazdırma deseninin önemli ölçüde bir değişime neden olmadığı ve takviyeli ABS numunesinde de yazdırma açısının önemli bir derecede neden olmadığı saptanmıştır [75]. Aslan (2011) yapmış olduğu çalışmada plastiklerin üretim yöntemlerinden en popüler olan Plastik enjeksiyon yöntemini kullanmıştır. Çalışmada farklı termoplastik malzemeler kullanarak numune üretimlerini gerçekleştirmiştir. Kullanılan termoplastik malzemeler ABS, PP VE PS'dir. Aslan üretmek istediği numunelerin öncelikle modellemesini bir CAD programı kullanarak gerçekleştirmiştir. Kalıp tasarımının da aynı CAD programını kullanarak modellemesini gerçekleştirmiştir. Modellemeler için Solidworks programı kullanılmıştır. Modelleme gerçekleştirildikten sonra bu CAD verisine göre CNC tezgahında kalıp üretimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ABS, PP, PS malzemeleri kullanılarak plastik enjeksiyon makinesinde numune üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin CMM cihazında ölçümleri yapıp ürün modeli ile kıyaslanarak üretimdeki doğruluk belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda modele en yakın değerleri ABS ve PS malzemeleri kullanılarak elde edilen numuneler elde etmiştir. PP de ise çekme miktarı diğerlerine nazaran daha çok olduğundan ölçü kaybı daha fazla olmuştur. Numunelerin yüzeylerini incelemek amacıyla yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Bu ölçümler sonucunda en yüksek yüzey pürüzlülük değerinin ABS malzemesi kullanılarak üretilen numuneye ait olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlülük değeri 1,88 mikrometre ölçülmüştür. Yapılan sertlik ölçümleri sonucunda ABS numunesinin PP ve PS ye göre daha sert olduğu belirlenmiştir [69]. Apak (2019) yapmış olduğu çalışmada PLA (Polilaktik asit) filamentini kullanarak farklı baskı parametrelerinde üretimler gerçekleştirmiştir. Bu parametreler doluluk oranı, dolgu deseni ve üretim hızıdır. Farklı doluluk oranı,

farklı dolgu deseni ve farklı üretim hızlarında üretimleri gerçekleştirerek en iyi mekanik özellikleri elde etmeye çalışmıştır. Tez çalışmasında mekanik özellikleri incelemek amacıyla sertlik testi ve çekme testleri yapılmıştır. Yapılan sertlik testi sonucunda elde edilen veriler değerlendirildiğinde dolgu deseni aynı olan numuneler kıyaslandığında doluluk oranı ve üretim hızı azaldığında sertlik değeri artmaktadır. Üretim hızı ve doluluk oranı aynı tutulduğunda ise dolgu deseninin sertlik değerine anlamlı bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Yapılan çekme testi sonucunda elde edilen veriler değerlendirildiğinde dolgu desenleri aynı tutulduğunda doluluk oranının arttıkça ve üretim hızı azaldıkça uzama değerinin azaldığı görülmüştür [76]. Karaman ve ark. (2019) yapmış oldukları çalışmalarda ABS-Plus malzemesi kullanarak numune üretimini gerçekleştirmişlerdir. Numuneler farklı doluluk oranları ve farklı oryantasyon açıları kullanılarak üretilmiştir. Üretilen numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Mekanik özellikleri belirlemek amacıyla numunelere çekme testi uygulanmıştır. Elde edilen test sonuçları incelendiğinde farklı baskı açılarında üretilen numunelerde doluluk oranının artmasıyla çekme mukavemeti ve elastisite modülü değerlerinin arttığı görülmektedir [77]. Zhao J. ve arkadaşları (2020) yapmış oldukları çalışmada en popüler üç kürlenme sonrası işlem yani geleneksel fırın, mikrodalga fırın ve ultraviyole odası için nihai gerilme mukavemetini sertliği, boyutsal değişiklikleri, yüzey pürüzlülük değerlerinin, üretim maliyetlerini göz önüne bulundurarak kapsamlı bir değerlendirme yapmışlardır. Nihai çekme mukavemetleri, mikrodalga fırın ve UV odası açısından hafif kürlenme sonrası yöntemler genellikle olumlu bir etki göstermiştir. Yine de geleneksel fırın sonrası sertleştirme işlemi kolayca aşırı sertleşmeye ve dolayısıyla nihai çekme mukavemetinin azalmasına neden olmuştur. Konvansiyonel fırın nihai çekme mukavemetini artırmada daha etkili görülmektedir. SLA fabrikasyon parçaları sonradan kürlenmiş parçaların sünekliğine kıyasla daha kötü sünekliğe sahip olduğu gözlemlenmektedir. Kürlenme sonrası ürünlerin sertlik değerlerine bakıldığında UV sonrası kürlenme diğer iki yöntemle göre en iyi performansı sağlamaktadır. Sonradan kürlenmiş parçalar karşılaştırıldığında daha kötü bir yüzey kalitesine sahip olma eğilimindedir. UV sonrası kürlenmenin neden olduğu boyutsal farklılıklar, çekme oranı analizine göre diğer iki yöntemle nispeten daha yüksek olduğu görülmektedir. Mikrodalga fırın en az boyutsal küçülmeye neden olan kürlenme

yöntemidir. Mikrodalga fırın hızlı sertleşme özelliklerinden boşluk (genellikle birkaç dakika içinde) kaynaklanan, enerji açısından en verimli kütleme sonrası işlem olduğu gözlemlenmiştir. UV ışığı genellikle uzun bir kütleme sonrası süre gerektirse de daha düşük bir nominal güce sahip olduğu için enerji tüketimi geleneksel fırınlardan daha düşük olduğu gözlemlenmiştir [25]. Sood (2009) hızla büyüyen eklemeli imalat teknolojilerinden biri olan FDM teknolojisi ile çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Çalışmalarda 5 farklı üretim parametresi, baz alınarak incelemeler gerçekleştirilmiştir. Katman kalınlığı, oryantasyon, raster açısı, raster genişliği, hava boşluğu çalışmalarda değerlendirilen baskı parametreleridir. Numuneler çeşitli testlere tabi tutularak çekme ve eğilme dayanımları incelenmiştir. Çalışmalarda SEM görüntüleme yapılarak darbe testi çekme testi ve eğilme testi sonrasında numunelerin yüzeyleri görüntülenmiştir. Tüm bu çalışmalar sonucunda elde edilen veriler değerlendirildiğinde iyi bir dayanım değeri elde etmek için malzemedeki bozulmanın en aza indirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır [78]. Çelik ve ark. (2013) yapmış oldukları çalışmada eklemeli imalat teknolojilerini açıklamış ve imal edilen parçaların mukavemet, yüzey pürüzlülüğü, çözünürlük gibi numunelere ait bu özellikler karşılaştırılmıştır yapılan çalışmalar sonucunda en yaygın eklemeli imalat yönteminin SLA teknolojisi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu teknoloji ile yüksek doğrulukta ve renkli parçaların üretimini gerçekleştirebilmek mümkündür. Fakat üretilen parçalarda çarpılma büzülme gibi problemler ile karşılaşılabilir. SLA teknolojisinin bu özelliklerinin yanı sıra metal parça üretimine imkan vermediği bilinmektedir. Eklemeli imalat teknolojileri ile mukavemeti yüksek parçalar üretmek için SLS, FDM, EBM teknolojilerinin tercih edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Büyük kapasiteli malzemelerin üretimleri için LOM teknolojisi tercih edilse de bu üretim yöntemi ile üretilen numunelerin mekanik özellikleri memnun edici olmayabilir. Çalışmada genel olarak eklemeli imalat teknolojilerinin tanıtımları yapılarak özellikleri, uygulama alanları gibi konular üzerine değerlendirmeler yapılmıştır [8]. Diksu (2021) yapmış olduğu çalışmada ABS malzemesini karbon fiber tozu ve TPU katkı malzemelerini ekleyerek kompozit filament üretmiştir. Bu çalışmada katkısız ABS filamentleri ile kompozit filamentlerin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Kompozit numunelerden karbon fiber tozlu numuneler ağırlıkça %1, %3, ve %5 oranında oluşturulmuştur. TPU numuneleri ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranında oluşturulmuştur.

Filamentlerin üretiminde 1,75 mm çap hedeflenmiş olup karbon fiber tozu kompozit numunelerinin çap ölçümleri sırasıyla 1,73mm (%1), 1,75mm (%3) ve 1,72mm (%5) olarak ölçülmüştür. TPU numunelerinin çap ölçümleri sırasıyla 1,73mm (%10), 1,73mm (%20) ve 1,72mm (%30) olarak ölçülmüştür. Numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için karbonfiber takviyeli, TPU takviyeli ve katkısız ABS numunelerine çekme testi yapılmıştır. Çekme testi sonucunda karbon fiber tozu katkılı kompozit filament numunelerinin akma ve kopma mukavemet değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte % uzama miktarlarında katkısız ABS filamentine göre azalış olduğu görülmüştür. TPU katkılı kompozit filamentlerde, katkısız ABS filamentine göre akma ve kopma mukavemetlerinde azalma olduğu görülmüştür. Bununla birlikte % uzama miktarlarında artış olduğu gözlemlenmiştir [42]. Qattavia ve arkadaşları (2017) yaptıkları çalışmada PLA (Polilaktik Asit) termoplastik malzemesi kullanarak çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada her bir işleme parametresinin, baskı yönü, dolgu yüzdesi, dolgu deseni, baskı hızı, ekstrüzyon sıcaklığı ve katman yüksekliğinin, mekanik özelliklere olan etkileri ve boyutsal doğruluk üzerine olan etkileri bağımsız olarak incelenmiştir. Boyutsal doğruluğu en çok etkileyen parametreler baskı yönü, ekstrüzyon sıcaklığı, katman yüksekliği, doluluk oranı, dolgu deseni ve baskı hızı olmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda üretilen parçaların boyutsal doğruluğunu iyileştirmek için daha düşük ekstrüzyon sıcaklıkları ve daha düşük katman yüksekliği tercih edilmelidir. Baskı yönünün de katman yönüne paralel olması boyutsal doğruluğu iyileştirmektedir. Baskı parametrelerinin mekanik özelliklere olan etkileri incelendiğinde baskı yönü, ekstrüzyon sıcaklığı ve baskı hızına göre dolgu deseninin daha az etki ettiği görülmüştür. Mekanik özellikleri iyileştirmek için katmanları ve yük yönünü aynı düzlemde yapan uygun baskı yönüne ek olarak daha yüksek ekstrüzyon sıcaklığı ve daha büyük katman yüksekliğinin gerekli olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte sıcaklığın artmasıyla mekanik özelliklerin iyileştiği görülmüştür. Bu durum ekstrüde edilmiş tabakalar arasında gelişmiş füzyon ile açıklanmaktadır. Belli bir sınırdan sonra ekstrüzyon sıcaklığının artmasının mekanik özelliklerde bir iyileştirmeye sebep olmadığı görülmüştür [33]. Ahn ve ark.(2002) yapmış oldukları çalışmada enjeksiyon kalıplama ile üretilen numuneler ile karşılaştırmak için FDM teknolojisi kullanılarak numune üretimlerini gerçekleştirmişlerdir. Hava boşluğu ve raster yönelimi iki önemli etki olup, bu iki değişkenin, numunelerin

çekme dayanımına etkisi incelenmiştir. FDM numuneleri çeşitli raster yönelimine sahip 12 katmandan oluşturulmuştur. 0 hava boşluğuna sahip numunelere çekme deneyi yapılmış ve sonucunda enjeksiyon ile kalıplanmış ABS numunesi 26mpa yüke dayanmıştır. Diğer FDM numuneleri raster yönlerine bağlı olarak enjeksiyon ile kalıplanmış ABS numunesine göre %10 ile %73 aralığında daha az mukavemet göstermiştir. Negatif hava boşluğu etkisindeki numunelere yapılan çekme testinde, eksenel numunelerin mukavemetlerinde fazla artış olmamasına rağmen diğer FDM numunelerinde çekme mukavemetlerinde büyük bir artış gözlemlenmiştir. Numunelerin kırılma yüzeyleri SEM görüntüleri alınarak incelendiğinde FDM numuneleri arasında en yüksek çekme mukavemeti ile eksenel baskı numunesi olmuştur. Lifler arasındaki boşluklar etki kesit alanını azalttığı için mukavemet değerleri enjeksiyon kalıplama ile üretilen numuneye göre daha düşüktür. Enine baskı numuneleri en düşük çekme mukavemeti değerlerini göstermiştir. Daha yüksek basınç dayanımları genellikle polimerlerde ve dökme ABS malzemelerde göstermektedir. Tipik dökme ABS'nin çekme mukavemeti basma mukavemetinden daha düşüktür. Enine baskı numuneleri eksenel baskı numunelerinden %15 daha düşük basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Genel olarak FDM numunelerinin basınç dayanımları, enjeksiyon yöntemi kullanılarak üretilen numunelerin basınç dayanımının %80'i ile %90'ı arasında değişmektedir [31]. Kepenekçi (2021) yapmış olduğu çalışmada eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan kaynaşmış filament üretimi (FFF) kullanmıştır. Bu teknoloji ile üretim ABS ve PLA ile sınırlı iken teknolojinin de gelişmesiyle kompozit malzemeler kullanılarak baskı numunelerinin üretimini mümkün kılmıştır. Kepenekçi bu tezde çalışmalarını iki kısımda değerlendirmiştir. İlk kısımda iki polimer arasındaki ara yüzeylerin mekanik özellikleri incelenmiştir. PLA ve TPU malzemeleri farklı şekillerde birleştirilmiştir. Bu numunelere çekme kuvveti uygulanmıştır. Bu uygulama sonucunda PLA ve TPU malzemelerinin yeterince sağlam bir şekilde yapışmadığı görülmüştür. Farklı birleştirme şekilleri için bu yapışma durumları incelenmiştir. İkinci olarak poliamid ve karbon elyaf takviyeli poliamid malzemesi kullanılarak numune üretimleri gerçekleştirilmiştir. Dolgu deseninin mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir [79].

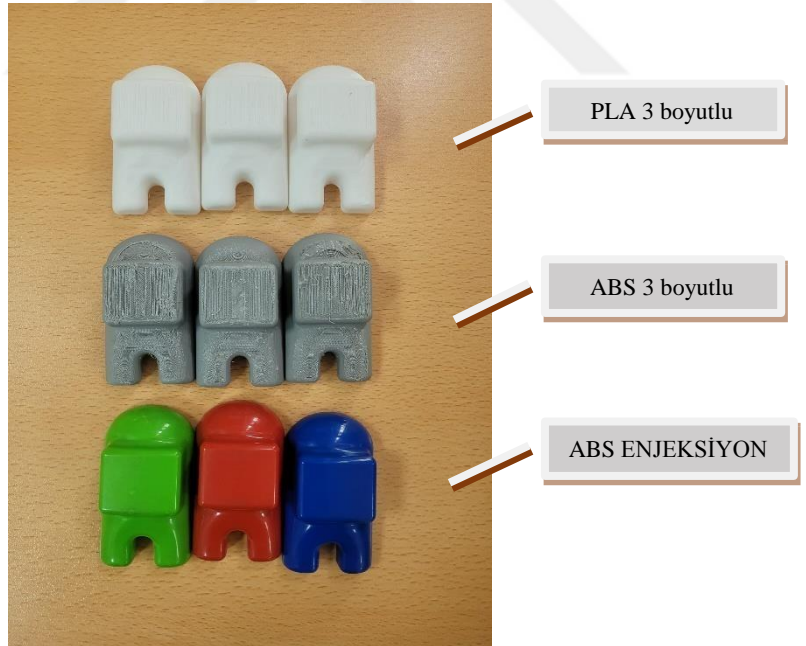
Literatür araştırmalarında yapılan çalışmalarda çeşitli üretim yöntemleri ve çeşitli termoplastikler kullanılarak test numuneleri üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen

numunelere uygulanan test ve analizlerle numuneye ait fiziksel, kimyasal ya da mekanik özelliklerin belirlenmeye çalışıldığı görülmüştür. Literatürde rastlanılmayan test numuneleri dışında üretilen bir parçaya ait değerlendirmelerdir. Bu sebeple bu çalışmada bir test numunesi ile değil, endüstriyel bir ürün olan Among Us oyuncak figürü ile çok boyutlu çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu oyuncak figürü, ABS malzemesi granül formunda olmak üzere enjeksiyon makinasında üretilmiştir. Ayrıca ABS ve PLA malzemesi filament formunda olmak üzere FDM tekniği kullanılarak üretilmiştir. Üretilen bu numunelere basma kuvveti uygulayarak oyuncak figürünün kuvvet karşısındaki davranışları incelenmiştir. Aynı zamanda bu numunelerin CMM cihazında ölçümleri yapılarak bilgisayar ortamındaki modellemesi ile üretilen numunelerin farklı noktalardan ölçümleri referans alınarak boyutsal toleransları kıyaslanmıştır. Yüzey pürüzlülükleri ölçülerek elde edilen değerler, üretimdeki yüzey kalitesini kıyaslamak amacıyla kullanılmıştır. Ayrıca SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu) cihazı ile yüksek ölçekli büyütme oranları kullanılarak numunelerin iç yapıları incelenmiştir. Bu incelemeler sonunda numune yüzeyi yüksek çözünürlükte görüntülenerek, üretim sırasında numunede oluşan boşluklar ve filamentlerin üst üste gelen yerleri gözlemlenerek üretim sırasında oluşan bu durumların numunelere etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Bunlarla beraber üretilen numuneler için maliyet çalışması yapılmış olup kullanım amacına göre hangi üretim yönteminin daha ekonomik ya da daha avantajlı olacağı üzerine tartışılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Kullanılan Malzemeler

Çalışmada plastik enjeksiyon yöntemi ve eklemeli imalat teknolojilerinden biri olan FDM teknolojisi ile ABS (Akrilonitril bütadien stiren), FDM teknolojisi ile PLA (Polylactic Acid) malzemeleri kullanılarak Among Us oyuncak figürüne ait numune üretimi gerçekleştirilmiştir. ABS malzemesi, granül formunda plastik enjeksiyon makinesinde; ABS ve PLA plus malzemesi filament formundan da olacak şekilde 3 boyutlu yazıcıda üretilmiştir. 6 adet ABS plastik enjeksiyon, 6 adet ABS 3 boyutlu yazıcı, 6 adet PLA plus 3 boyutlu yazıcı olmak üzere 18 adet malzeme numunesi üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan Among Us oyuncak figürüne ait görseller Şekil 2.1’ de verilmiştir.



Şekil 2.1: Test numuneleri

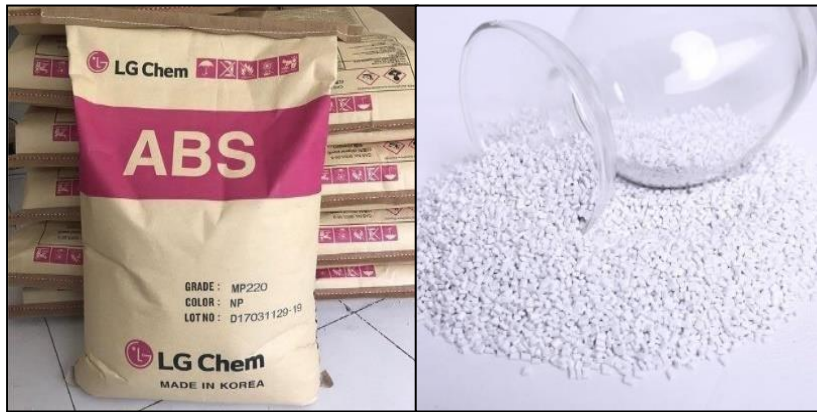
3 boyutlu yazıcıda baskı alma işleminde Basf Fusion plus marka ABS filament ve Uzaras marka PLA plus filament kullanılmıştır. Plastik enjeksiyon makinesinde ise LG marka HI121 kodlu ABS granül malzemesi kullanılarak üretim gerçekleştirilmiştir. Tablo 2. 1’de 3 boyutlu baskı filament parametreleri, Tablo 2. 2’de ABS granülü enjeksiyonla üretim parametreleri ve Şekil 2. 2’de LG ABS HI121 granülü verilmiştir.

Tablo 2.1: 3 boyutlu Baskı Filament Parametreleri

Malzeme	ABS /PLA
Filament Markası	BASF ABS Fusion+/UZARAS PLA Plus
Filament Rengi	Gri/Beyaz

Tablo 2.2: ABS Granülü Enjeksiyonla üretim Parametreleri

Malzeme	ABS / GRANÜL
Granül Markası	LG
Granül Çeşiti	HI121

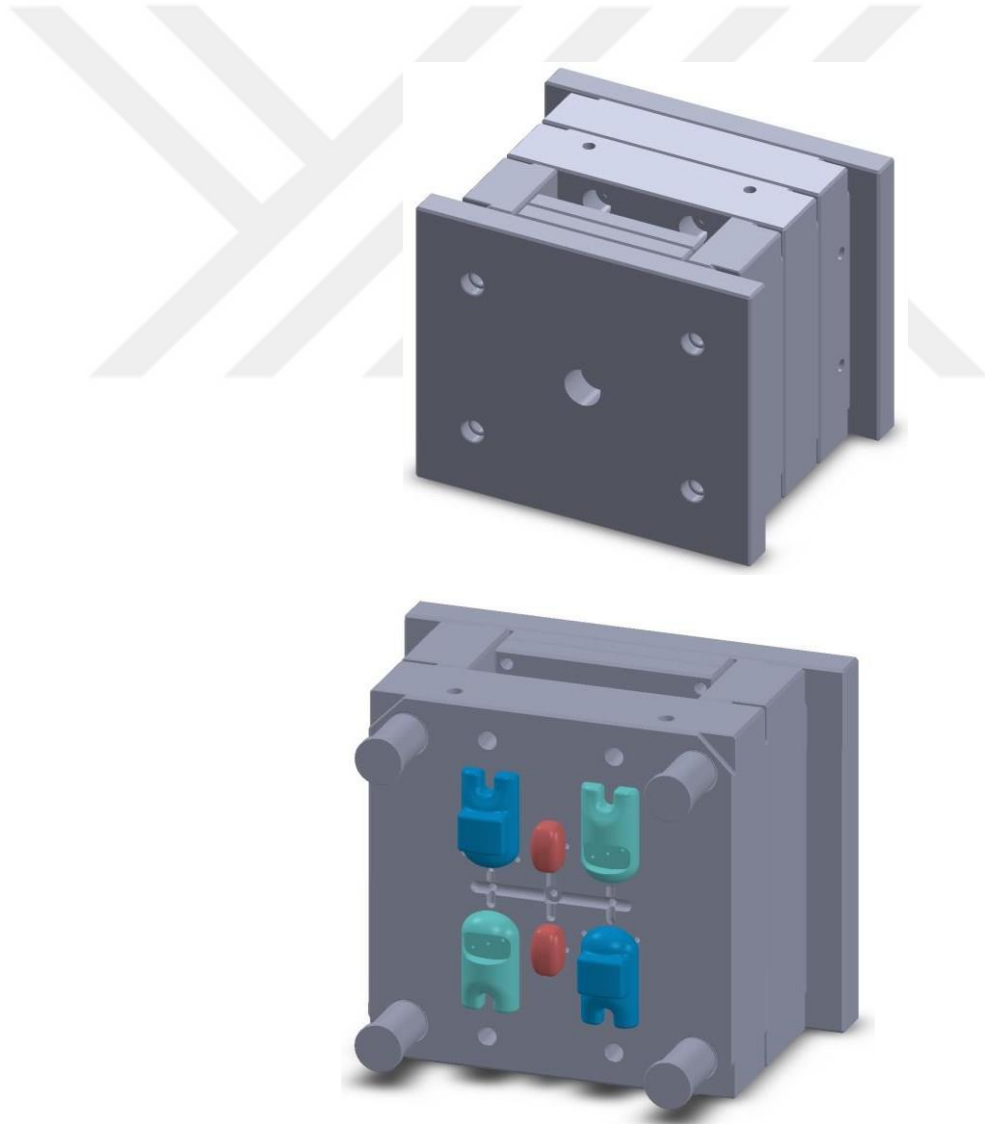


Şekil 2.2: LG ABS HI121 granülü

2.2.Kullanılan Cihazlar

2.2.1 Enjeksiyon işlemleri

Plastik enjeksiyon prosesinde kalıp tasarımının yeri büyüktür. Bu imalat yöntemi ile baskı almadan önce üretilecek parçaya uygun kalıp tasarımı gerçekleştirip bir model elde edilmelidir. Daha sonra enjeksiyon makinesinde kullanılmak üzere kalıp üretimi gerçekleştirilmelidir. Bu çalışmada da üretimi gerçekleştirilecek Among Us oyuncak figürünün öncelikle bilgisayar ortamında modellenmesi yapılarak kalıp tasarımı gerçekleştirilmiştir. Solidworks programı kullanılarak modellenen kalıp çizimine göre kalıp üretimi gerçekleştirilir. Among Us oyuncak figürüne ait kalıp tasarımının görseli Şekil 2.3'teki gibidir.



Şekil 2.3: Among Us oyuncak figürüne ait kalıp tasarımı

Çalışmada 90 Tonluk DEMAG marka plastik enjeksiyon makinesi ile LG marka ABS HI121 kodlu granül malzemesi kullanılarak 3 adet numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim, ABS malzemesinin 3 saat fırınlanarak neminin alınmasıyla başlamaktadır. Daha sonra nemi alınan malzeme ocağa iletilir ve 220-250 °C sıcaklık altında eritilmesi sağlanır. Eriyik hale getirilen malzemenin enjeksiyonu gerçekleştirilir. Malzemenin enjeksiyon kalıbına gönderilmesi ve kalıpta soğutulması işlemlerinden sonra numune üretimi tamamlanmış olur. Malzemenin eritilip, enjekte edildikten sonra kalıpta soğutulup çıkarılması çok kısa bir sürede gerçekleşmektedir. 90 Tonluk DEMAG marka plastik enjeksiyon makinesi ile maksimum 150 gram plastiğin enjeksiyon işlemi yapılabilmektedir. Oyuncak figürü yaklaşık 40 gram civarında olup baskı yapılma ve kalıptan ayrılma süresi toplam 30 saniye sürmektedir. Bir baskı sürecinde 2 takım (gözlük kısmı, ön ve arka gövde kısmı) Among Us oyuncak figürü üretilmektedir. Tablo 2.3'te Enjeksiyon işlemi üretim parametreleri verilmiştir. Şekil 2.4'te de Demag marka enjeksiyon makinesi ve plastik enjeksiyon numuneleri gösterilmektedir.

Tablo 2.3: Enjeksiyon işlemi üretim parametreleri

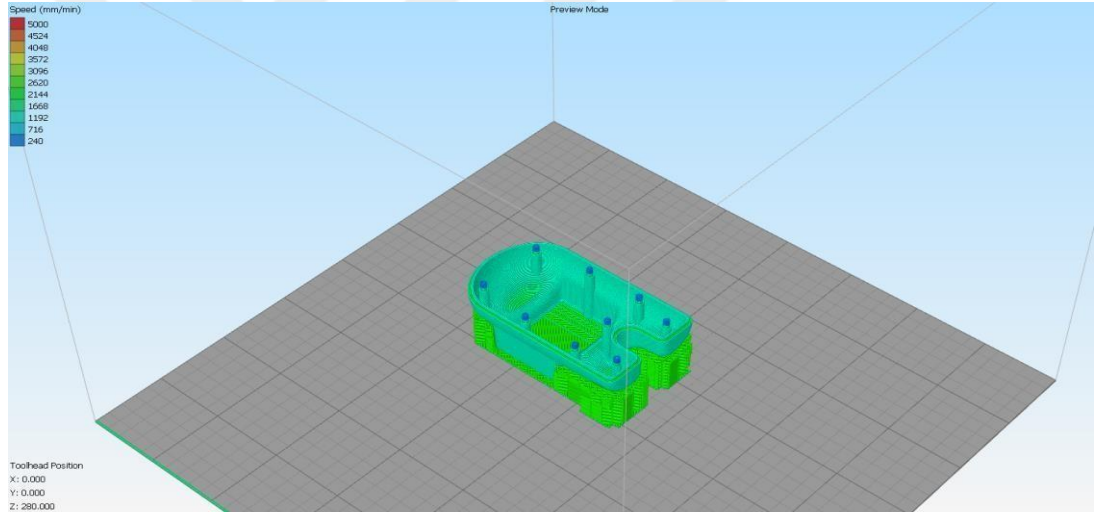
Malzeme Adı	Akrilonitril Bütadien Stiren
Fırınlama süresi	3 saat
Enjeksiyon sıcaklığı	220-250 °C
Üretim süresi	30 saniye



Şekil 2.4: Demag marka enjeksiyon makinesi ve plastik enjeksiyon numune örnekleri

2.2.2. 3 boyutlu Baskı İşlemi

3 boyutlu model ile baskı alma işlemi, bilgisayar ortamında tasarım yapılarak bir CAD modelinin oluşturulmasıyla başlar. Bilgisayar ortamında tasarlanan ya da dışarıdan hazır olarak alınan CAD modeli, bir dilimleme programı vasıtası ile dilimlere ayrılır. Dilimlere programı, parçaya ait işlem parametreleri yani katman, destek, baskı yoğunluğu, süre ve hız gibi özelliklerin G kodlar vasıtası ile baskı alınmasını sağlar. 3 boyutlu model STL formatına Solidworks CAD programı aracılığıyla çevrilip, Simplify3D boyutlu programı kullanılarak dilimlenmiştir. Dilimlemede 3 boyutlu model çok sayıda ince katmanlara ayrılır. Dilimleme uygulaması baskı alınacak parçanın katmanları, destekleri, yoğunluk süre ve hız vb. özelliklerinin kodlanıp (G code) baskıya hazır hale getirilmesini sağlar. Şekil 2.5'te Among Us oyuncak modelinin Simplify3D programındaki uygulaması verilmiştir.

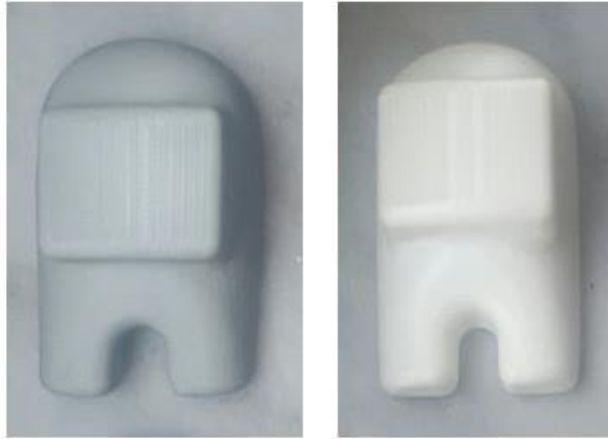


Şekil 2.5: Simplify3D program arayüzü

STL formatına çevrilen 3 boyutlu modellemenin 3 boyutlu yazıcıya aktarılmasıyla baskı alma işlemi başlamaktadır. Bu çalışmada 3D3 Teknolojiye ait S1 markalı 3 boyutlu yazıcı kullanılmıştır. 4 adet ABS filament ve 4 adet PLA+ filament kullanılarak malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. 3 boyutlu yazıcıya ait baskı parametreleri Tablo 2.4' te 3 boyutlu yazıcıda numuneleri üretim parametreleri ve Şekil 2.6 'da da 3 boyutlu baskının gerçekleştiği 3D3 Teknoloji S1 markalı 3 boyutlu yazıcı ve üretilen numune görselleri verilmektedir.

Tablo 2.4: 3 boyutlu yazıcıda numunelerin üretim parametreleri

	ABS	PLA
Baskı Hızı (mm/s)	50	50
Baskı Sıcaklığı (° C)	240	200
Tabla Sıcaklığı (° C)	90	40
Katman Yüksekliği (μ)	120	120
İç Doluluk Oranı (%)	100	100
Nozul Çapı (mm)	0,3	0,3
Baskı Süresi (dk)	240	240



Şekil 2.6: 3 boyutlu3 Teknoloji S1 markalı 3 boyutlu yazıcı ve baskı numuneleri

2.2.3. CMM ile Ölçüm İşlemi

CMM (Coordinate Measurement Machine) cihazı, ince uçlu bir prob ile üretimi gerçekleşmiş olan 3 boyutlu nesnenin yüzeyindeki farklı birçok noktadan ölçümler alarak 3 boyutlu model ile kıyaslayabilmemizi sağlar. Koordinat ölçme sistemi olarak da bilinen bu sistem koordinatlara göre ölçüm yapmaktadır. X, Y ve Z eksenlerinde hareket ederek proba bağlı kafası her yönde hareket ederek nesnenin çok yönlü ölçümünün yapılabilmesini sağlar. CMM cihazı ile yapılan bu işlemle malzemenin boyutsal ve geometrik toleransa uygunluğu belirlenmiş olur. Bu cihaz ölçümünü X-Y-Z eksenlerinin karelerinin toplamının karekökünün iki katı alınarak hesaplanmaktadır. Şekil 2.7’de CMM cihazına ait görsel verilmektedir.

Bu tez çalışmasında DEA markasına ait Brown&Sharpe model CMM cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz ile elde edilen değerler aşağıda verilen formüle göre hesaplanmaktadır.

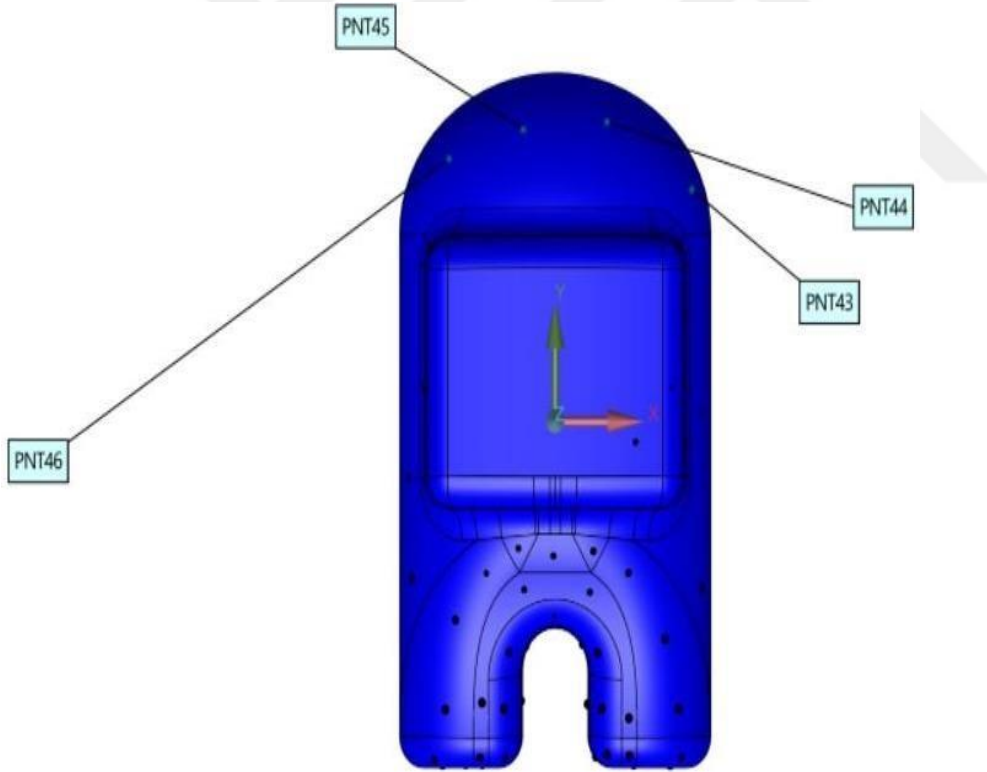
$$2\sqrt{(x^2+y^2+z^2)} = \text{CMM ölçüm sonuçları}$$



Şekil 2.7: CMM ölçüm cihazı [80]

Among us oyuncak figürüne ait 3 boyutlu model, plastik enjeksiyon yönteminde kalıp tasarımında; FDM teknolojisinde ise STL formatına çevrilerek 3 boyutlu yazıcıya aktarılmasında kullanılır. Bu iki üretim yönteminde de numuneler, 3 boyutlu modele göre üretilmektedir. Bu çalışmada CMM cihazı ile ölçümler yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda, numuneye ait 3 boyutlu model ile üretilmiş numune arasındaki boyutsal farklılıklar değerlendirilmiştir.

3 boyutlu baskı yöntemiyle ABS ve PLA filamentleri kullanılarak üretilmiş baskı numuneleri ve plastik enjeksiyon yöntemiyle ABS granül malzemesi kullanılarak üretilmiş plastik enjeksiyon numunesi olmak üzere 3 adet Among Us oyuncak figürü kullanılarak CMM cihazında ölçümleri yapılmıştır. Bu parçaların ölçümü yapılırken bilgisayar ortamındaki katı model referans alınmıştır ve o referansa göre 60 adet noktadan ölçüm alınarak üretimdeki doğruluk değerlendirilmiştir. Şekil 2. 8’de referans nokta gösterimleri verilmektedir.

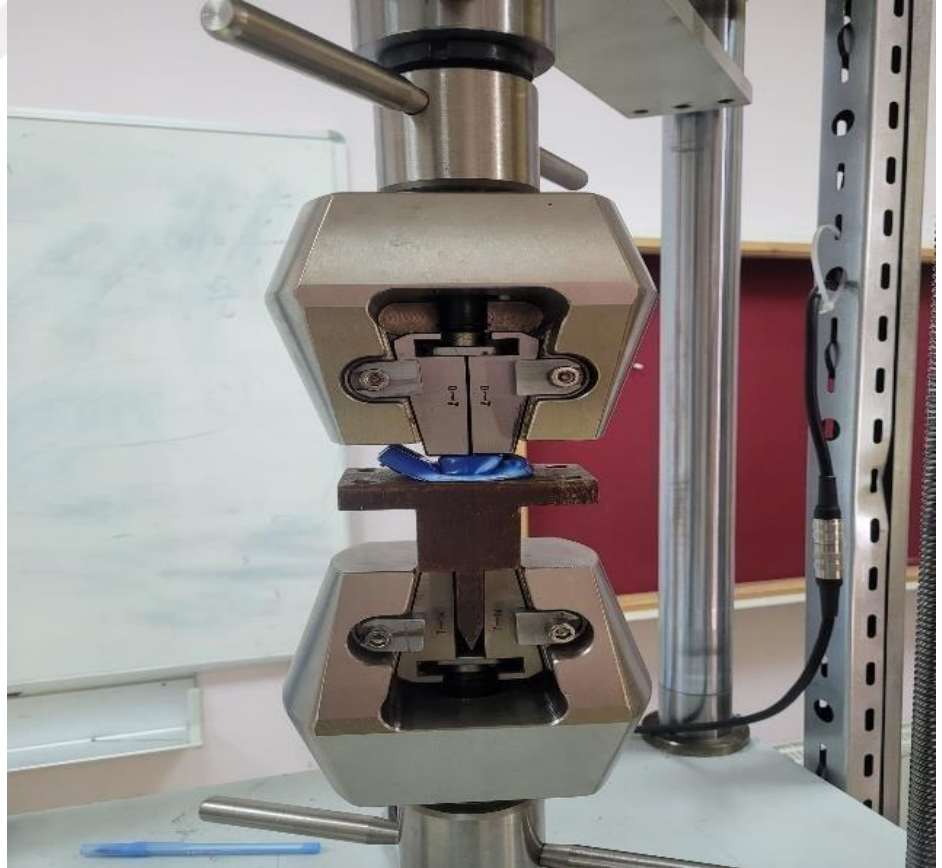


Şekil 2.8: Referans nokta gösterimleri

2.2.4. Basma Deneyi

Üretilen numunelerin mekanik davranışlarını incelemek amacıyla mekanik testlerden olan basma testi yapılmıştır. Malzemelerin yüzeyinden içeri kısımlara doğru etkiyen dış kuvvetlere basma kuvvetleri denir ve basınç gerilmeleri oluşturur. Basma testi genellikle gevrek malzemelere uygulanmaktadır. Basma deneyinde malzemelerin yük altındaki davranışları incelenir ve mekanik özellikleri bu yöntemle belirlenir.

BASF ABS Fusion+ ve UZARAS PLA+ filamentlerinden 3 boyutlu yazıcı kullanılarak üretilen numuneler ile LG ABS HI121 granül malzemesi kullanılarak plastik enjeksiyon makinesinde üretilen numunelere basma kuvveti uygulanmıştır. Uygulanan bu kuvvet sonucunda numunelerde oluşan deformasyonlar incelenmiştir. Üretilen numunelerden her birinden 3'er adet olmak üzere toplamda 9 adet oyuncak figürüne basma kuvveti uygulanmıştır. Basma kuvvetinin uygulandığı cihaz Şekil 2.9'daki gibidir.



Şekil 2.9: Deney cihazı



Şekil 2.10: Basma kuvvetine maruz kalan oyuncak figürleri

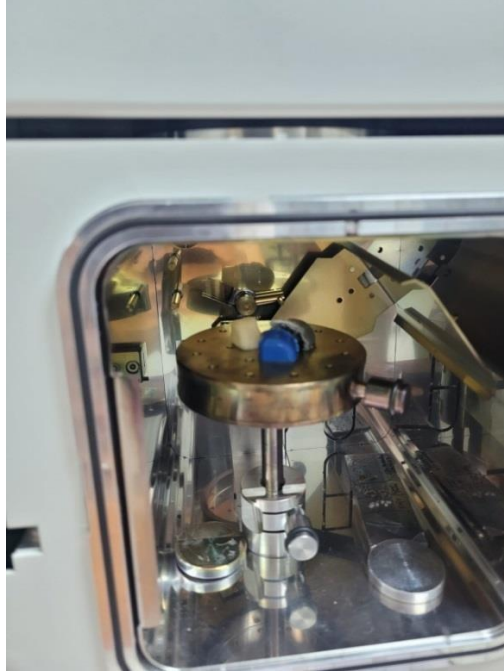
Deney cihazında alt çene sabit olup, numuneler hareketli üst çenenin uygulayacağı kuvvete dik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Üst çeneye bilgisayar ortamında aşağı doğrultuda kuvvet uygulama emri verilip numuneye basma yönünde kuvvet uygulanır. Numunelerde oluşan deformasyonlar ve basma kuvvetine karşı kırılma noktasına kadar gösterebildikleri direnç bilgisayar ortamına Yük (kN) – Deplasman (mm) grafiği halinde aktarılır. Şekil 2.10'da Basma kuvvetine maruz kalan oyuncak figürleri verilmektedir.

2.2.5. SEM (Scanning Electron Microscope) – Taramalı Elektron Mikroskobu

Taramalı Elektron Mikroskobu, birçok dalda araştırma-geliştirme çalışmalarının yanı sıra mikro elektronikte, yonga üretiminde, sanayinin birden fazla kollarında hata analizlerinde, biyolojik bilimlerde, tıp ve kriminal uygulamalarda yaygın olarak hizmet vermektedir.

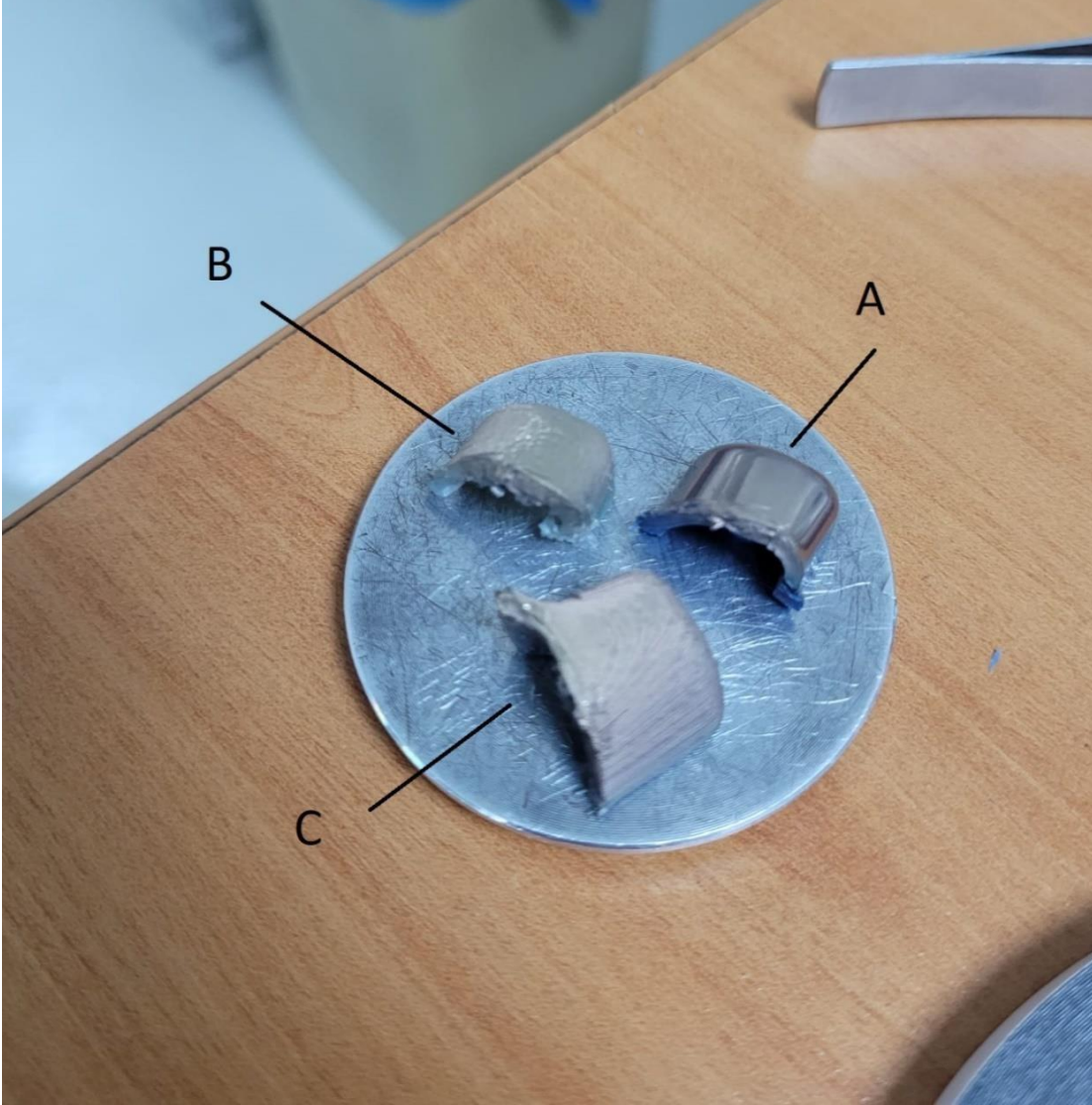
Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron grubunun numune yüzeyinde taratılması esnasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli etkileşimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanıp, sinyal güçlendiricilerinden geçirilip daha sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına yansıtılmasıyla elde edilmektedir. Günümüzde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilerek bilgisayar monitörüne aktarılmaktadır.

Görüntülemek istediğimiz numuneler iletken olmadığı için dış yüzeylerine altın kaplama işlemi yapılmıştır. Kaplamada altın seçilmesinin en büyük nedeni altın tanelerinin küçük ve çok iyi bir iletken olmasıdır.



Şekil 2.11: LEICA EM ACE200 cihazına numunelerin yerleştirilmesi

Kaplama işlemi yapılmadan önce oyuncak figürden parça numuneler elde edilip alkol ile temizlenmiştir. Daha sonra LEICA EM ACE200 isimli cihazda argon gazı ile plazma oluşturularak numuneler üzerine cihazın içinde bulunan altın disk üzerinden nano partiküller koparılarak numunelerin üzerine kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlem süresi 30 saniye tutulmuş olup kaplama sonucunda numuneler Şekil 2.12’de gösterildiği hale gelmiştir.



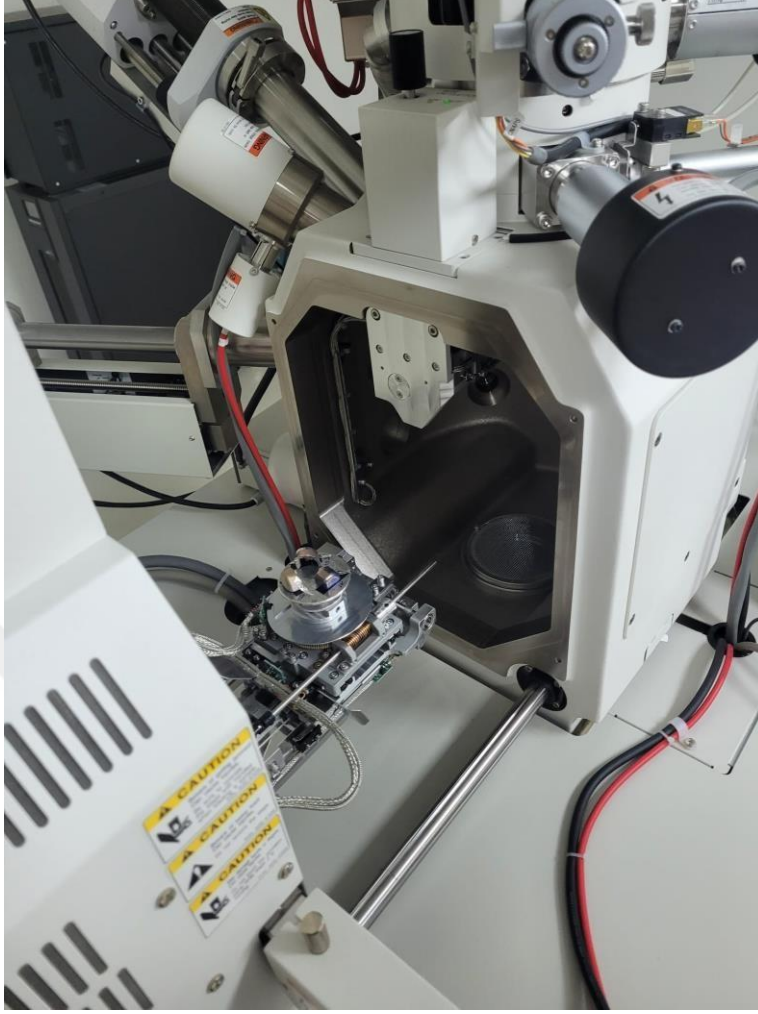
Şekil 2.12: Altın kaplamadan sonra numunelerin görüntüsü (A) ABS Enjeksiyon ile üretim, (B) PLA PLUS 3 boyutlu baskı ile üretim, (C) ABS 3 boyutlu baskı ile üretim

Numunelerin SEM görüntüleri Şekil 2.13’te gösterilen HITACHI SU5000 isimli cihaz ile elde edilmiştir. Farklı yakınlaştırma ve odaklarda örnek görüntüler alınmış olup numunelerin boşluklu yapıları incelenmiştir.



Şekil 2.13: SEM cihaz görüntüsü

Numuneler metal disk üzerine bantlar ile yapıştırılarak hareket kabiliyetleri sıfıra indirgenmiş olup görüntüleme için hazır hale getirilmiştir. Şekil 2.14'te numunelerin SEM cihazına yerleşimi verilmiştir.



Şekil 2.14: Numunelerin SEM cihazına yerleştirilmesi

2.2.6. Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)

Yüzey pürüzlülüğü, kısaca pürüzlülük olarak da adlandırılan yüzey dokusunun bir bileşeni kabul edilmektedir. Bir yüzeyin ideal biçiminden normal vektörü yönündeki sapmalar ile ölçülür. Sapmalar büyükse, yüzey pürüzlü olarak kabul edilir, küçük ise yüzey pürüzsüz olarak kabul edilir. Ra evrensel olarak kabul edilen pürüzlülük parametresi olup, pürüzlülük profili koordinatlarının mutlak değerlerinin aritmetik ortalaması olarak kabul edilir.



Şekil 2.15: Surface Roughness Tester TMR 120

Numunelerin her birine 9 farklı noktadan yüzey pürüzlülüğü ölçümü Şekil 2.15'teki cihaz ile yapılmış olup, ölçüm sonuçları MS Excel'e aktarılmıştır. Şekil 2.16'da numunelerin ölçüm yapılan yüzeyindeki noktalar rakamlar ile belirtilmiştir. Ölçümler sırasında yüzey pürüzlülüğü ölçüm probu 3 boyutlu yazıcı çalışma yönünde hareket ettirilmiştir. 3 boyutlu yazıcı çalışma yönüne dik yönde tırtıklı yüzey olduğu için ölçüm mümkün olmamaktadır.



Şekil 2.16: Yüzey pürüzlülüğü ölçüm noktalarının rakamlar ile gösterilmesi

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmada numunelerin, üretimdeki doğrulukları CMM cihazında yapılan ölçümler yardımıyla, üretim kaliteleri yüzey pürüzlülüklerinin ölçümü ve SEM görüntüleriyle, mekanik özellikler ise basma deneyi ile belirlenmeye çalışılmıştır.

3.1. CMM Ölçümleri

Farklı üretim yöntemleri ile üretilen Among us oyuncak figürünün CMM cihazında yapılan ölçümleri sonucunda üretilen numunelerin 60 farklı noktadan ölçüm değerleri alınarak sapmaları MS Excel'e Tablo 3.1' deki gibi işlenmiştir.

Tablo 3.1: CMM ölçüm sonuçları

REFERANS	PLA 3 boyutlu (mm)	ABS 3 boyutlu (mm)	ABS Enjeksiyon (mm)	Enjeksiyon–3Boyutlu PLA Sapma Farkı (mm)	Enjeksiyon–3Boyutlu ABS Sapma Farkı (mm)
POİNT1	0,061	0,011	0,065	0,004	0,054
POİNT2	-0,173	-0,199	-0,153	0,02	0,046
POİNT3	-0,365	-0,281	-0,264	0,101	0,017
POİNT4	-0,336	-0,185	-0,335	0,001	-0,15
POİNT5	-0,323	-0,25	-0,309	0,014	-0,059
POİNT6	-0,288	-0,18	-0,304	-0,016	-0,124
POİNT7	-0,264	-0,149	-0,255	0,009	-0,106
POİNT8	-0,04	-0,034	-0,153	-0,113	-0,119
POİNT9	0,129	-0,007	-0,07	-0,199	-0,063
POİNT10	-0,175	-0,342	-0,138	0,037	0,204
POİNT11	-0,003	-0,197	0,043	0,046	0,24
POİNT12	0,054	-0,19	0,107	0,053	0,297
POİNT13	-0,126	-0,181	-0,382	-0,256	-0,201
POİNT14	0,143	-0,013	0,214	0,071	0,227
POİNT15	-0,05	-0,079	0,109	0,159	0,188

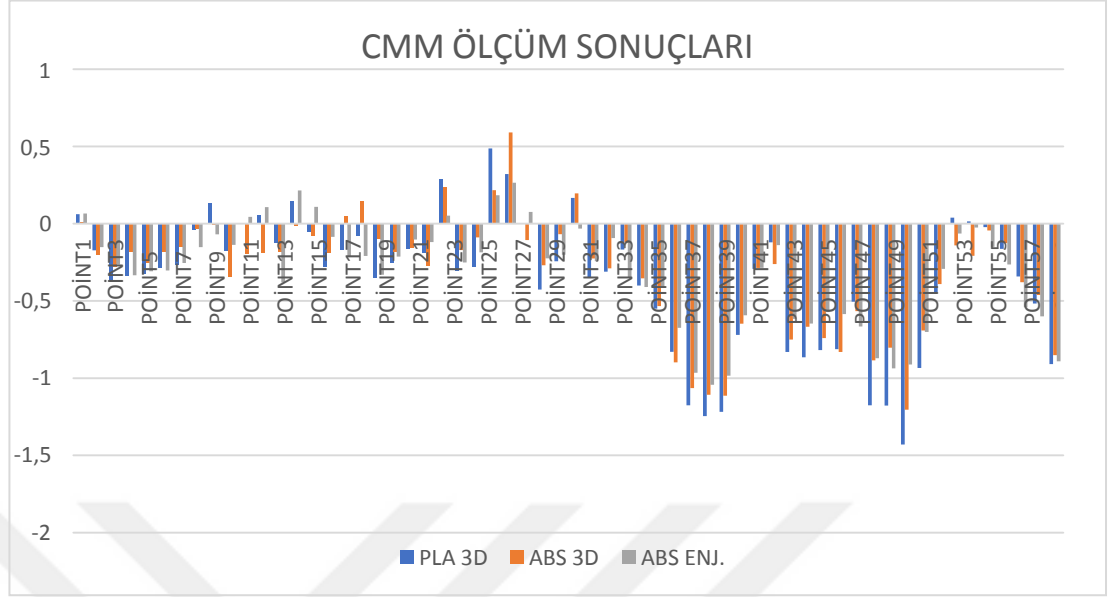
POİNT16	-0,277	-0,19	-0,086	0,191	0,104
POİNT17	-0,168	0,047	-0,212	-0,044	-0,259
POİNT18	-0,078	0,144	-0,21	-0,132	-0,354
POİNT19	-0,353	-0,099	-0,331	0,022	-0,232
POİNT20	-0,253	-0,181	-0,214	0,039	-0,033
POİNT21	-0,165	-0,154	-0,103	0,062	0,051
POİNT22	-0,188	-0,274	-0,119	0,069	0,155
POİNT23	0,288	0,233	0,052	-0,236	-0,181
POİNT24	-0,308	-0,171	-0,252	0,056	-0,081
POİNT25	-0,278	-0,089	-0,186	0,092	-0,097
POİNT26	0,487	0,216	0,183	-0,304	-0,033
POİNT27	0,321	0,59	0,265	-0,056	-0,325
POİNT28	0,002	-0,107	0,075	0,073	0,182
POİNT29	-0,427	-0,27	-0,225	0,202	0,045
POİNT30	-0,244	-0,069	-0,201	0,043	-0,132
POİNT31	0,167	0,196	-0,032	-0,199	-0,228
POİNT32	-0,353	-0,226	-0,243	0,11	-0,017
POİNT33	-0,311	-0,289	-0,093	0,218	0,196
POİNT34	-0,168	-0,123	-0,349	-0,181	-0,226
POİNT35	-0,401	-0,355	-0,411	-0,01	-0,056
POİNT36	-0,55	-0,534	-0,415	0,135	0,119
POİNT37	-0,83	-0,899	-0,675	0,155	0,224
POİNT38	-1,176	-1,066	-0,966	0,21	0,1
POİNT39	-1,247	-1,108	-1,044	0,203	0,064
POİNT40	-1,219	-1,114	-0,985	0,234	0,129
POİNT41	-0,72	-0,648	-0,594	0,126	0,054
POİNT42	-0,293	-0,287	-0,286	0,007	0,001
POİNT43	-0,121	-0,262	-0,139	-0,018	0,123
POİNT44	-0,831	-0,75	-0,617	0,214	0,133
POİNT45	-0,865	-0,668	-0,647	0,218	0,021
POİNT46	-0,819	-0,741	-0,573	0,246	0,168
POİNT47	-0,813	-0,831	-0,586	0,227	0,245

POİNT48	-0,506	-0,567	-0,667	-0,161	-0,1
POİNT49	-1,176	-0,885	-0,872	0,304	0,013
POİNT50	-1,178	-0,803	-0,937	0,241	-0,134
POİNT51	-1,43	-1,205	-0,912	0,518	0,293
POİNT52	-0,935	-0,692	-0,702	0,233	-0,01
POİNT53	-0,446	-0,392	-0,293	0,153	0,099
POİNT54	0,038	-0,141	-0,064	-0,102	0,077
POİNT55	0,014	-0,209	-0,025	-0,039	0,184
POİNT56	-0,023	-0,045	-0,15	-0,127	-0,105
POİNT57	-0,164	-0,127	-0,265	-0,101	-0,138
POİNT58	-0,342	-0,379	-0,542	-0,2	-0,163
POİNT59	-0,517	-0,462	-0,6	-0,083	-0,138
POİNT60	-0,91	-0,852	-0,891	0,019	-0,039
Ortalama				0,042633333	0,0025

Tablo 3.1’de gösterilen referans noktalar ile numunelerin bilgisayar ortamındaki katı modele göre ne kadar sapma gösterdikleri verilmiştir. Tolerans ± 1 mm olarak kabul edilmiş olup tolerans dışında kalan ölçüm noktaları üretimdeki hata miktarını gözler önüne sermektedir. Tolerans dışı ölçümler Tablo 3.1’e bakıldığında PLA PLUS 3 boyutlu baskı işleminden üretilmiş numunenin 6 farklı noktasında, ABS 3 boyutlu baskı işlemi ile üretilmiş numunenin 4 farklı noktasında, ABS plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş numunenin 1 noktasında ölçülmüştür. POINT39 referanslı ölçüm için tüm numuneler hatalı kabul edilmiş olup sapma miktarlarına bakıldığında -1.044 mm ile diğerlerinden daha az bir sapma ile plastik enjeksiyon ile üretilmiş numune belirlenmiştir. 3 boyutlu baskılar için ortak POINT38, POINT39 ve POINT40 referans noktalarına baktığımızda ABS filamentinden üretilen numune PLA PLUS filamentinden üretilen numuneye göre daha az hatalı ölçülmüştür. Şekil 3.1’deki grafikte numunelerin CMM cihazındaki ölçümleri sütun grafiği kullanılarak karşılaştırılmıştır.

60 farklı noktadan referans alınan ölçümlere göre elde edilen veriler excel tablosuna işlenerek grafik haline getirilmiştir. Elde edilen grafik ile parçanın

hangi noktalarda ± 1 tolerans aralığında kaldığı ya da bu aralığın dışına çıktığı görülmektedir.

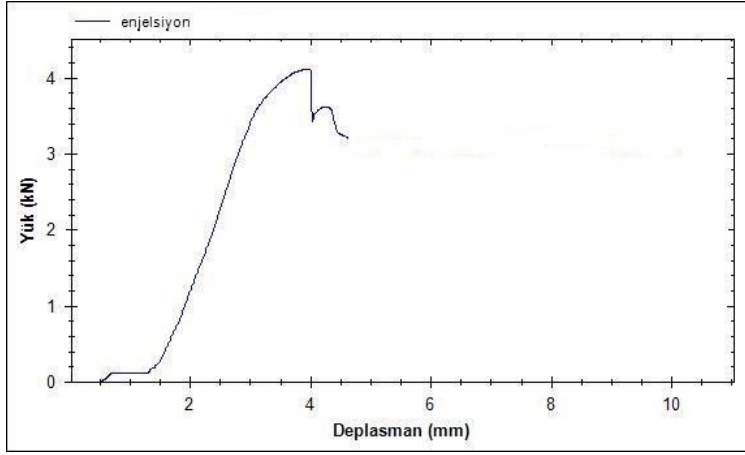


Şekil 3.1: CMM ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

CMM cihazı ölçüm verileri ve bilgisayar ortamındaki katı model ölçüleri kıyaslandığında birçok noktada ölçümler negatif yönde saptanmıştır. Bunun temel nedeninin üretim yöntemlerinin malzemeye sıcaklık uygulayarak işlenmesinden ve katılaşırken malzemenin büzüşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Enjeksiyon ve 3 boyutlu yazıcıdan alınan numuneler kıyaslandığında ortalama farkın PLA’da 0,04 mm, ABS’de ise 0,0025 mm olduğu gözükmemektedir.

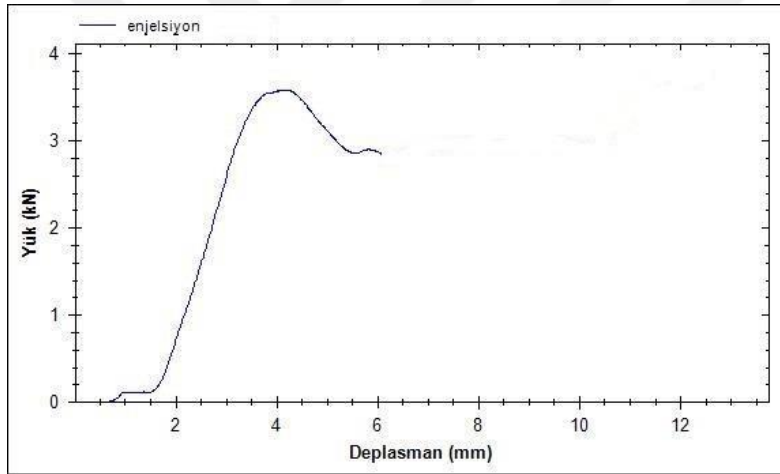
3.2. Basma Deneyi

Yapılan basma deneyi ile plastik enjeksiyon ve 3 boyutlu baskı numunelerine uygulanan kuvvet sonucunda numunelerin gösterdiği davranışlar incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen veriler ile oyuncak figürlerinin kuvvet altında göstermiş oldukları gevrek-sünek davranışlar hakkında bilgi edinilmiştir. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen basma deneyleri her numuneden 3 er adet olmak üzere 9 farklı numuneye basma kuvveti uygulanmıştır. Her deneyin sonucunda Şekil 3.2’deki gibi Yük (kN) – Deplasman (mm) grafiği elde edilmiştir.



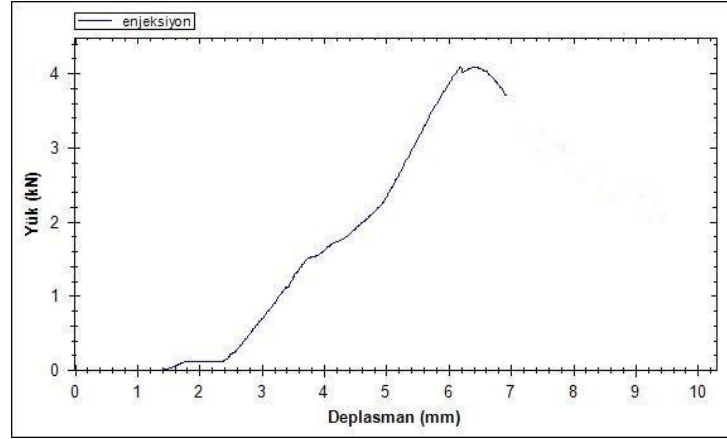
Şekil 3.2: ABS plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş birinci numunenin Yük – Deplasman grafiği

Şekil 3.2’de plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş birinci ABS numunesinin basma yüküne karşı gösterdiği maksimum direncin 4.1 kN olduğu belirlenmiştir.



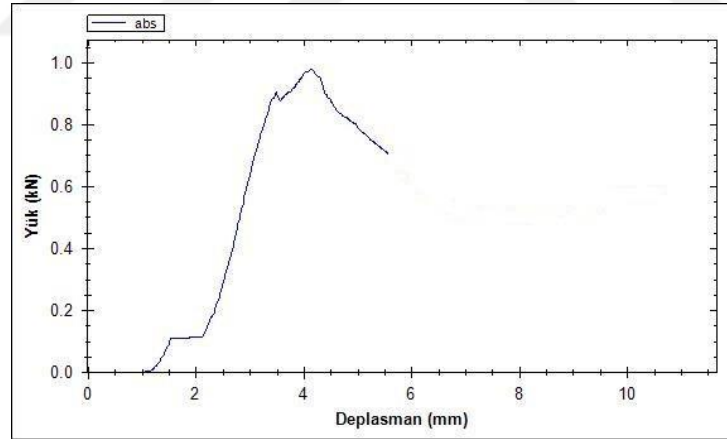
Şekil 3.3: ABS plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş ikinci numunenin Yük – Deplasman grafiği

Şekil 3.3’te plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş ikinci ABS numunesinin basma yüküne karşı gösterdiği maksimum direncin 3.6 kN olduğu belirlenmiştir.



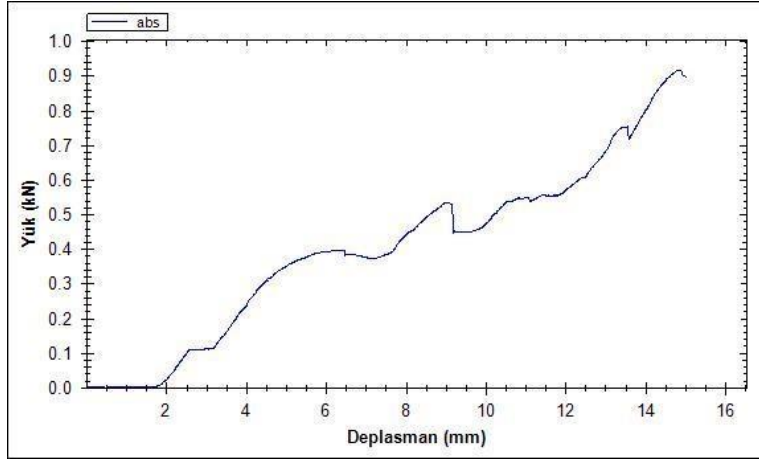
Şekil 3.4: ABS plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş üçüncü numunenin Yük – Deplasman grafiği

Şekil 3.4'te plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş üçüncü ABS numunesinin basma yüküne karşı gösterdiği maksimum direncin 4.1 kN olduğu belirlenmiştir. Şekil 3.2, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te verilen grafikler incelendiğinde plastik enjeksiyon ile üretilen ABS numunelerinin kırılmaya karşı gösterdikleri maksimum ortalama direncin 3,93 kN olduğu belirlenmiştir.



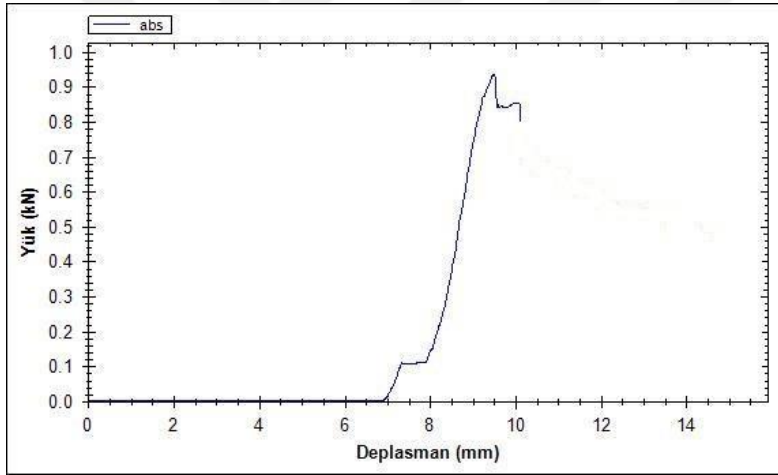
Şekil 3.5: ABS 3 boyutlu baskı yöntemi ile üretilmiş birinci numunenin Yük – Deplasman grafiği

Şekil 3.5'te 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiş birinci ABS numunesinin basma yüküne karşı gösterdiği maksimum direncin 0.98 kN olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.6: ABS 3 boyutlu baskı yöntemi ile üretilmiş ikinci numunenin Yük – Deplasman grafiği

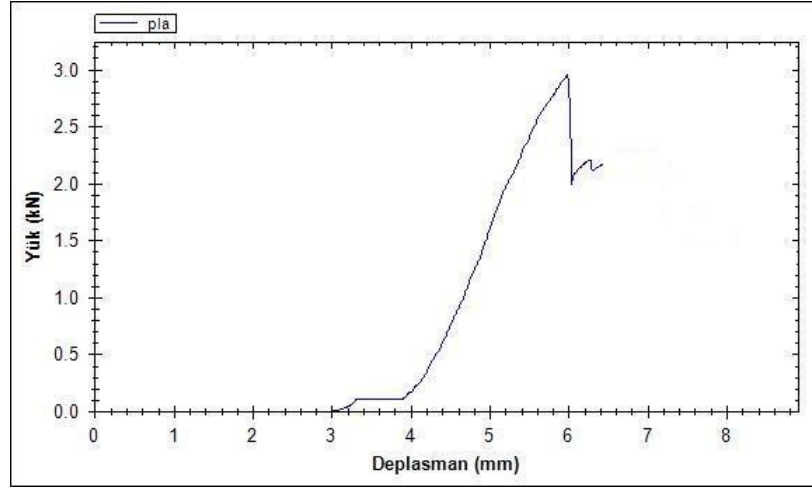
Şekil 3.6'da 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiş ikinci ABS numunesinin basma yüküne karşı gösterdiği maksimum direncin 0.94 kN olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.7: ABS 3 boyutlu baskı yöntemi ile üretilmiş üçüncü numunenin Yük – Deplasman grafiği

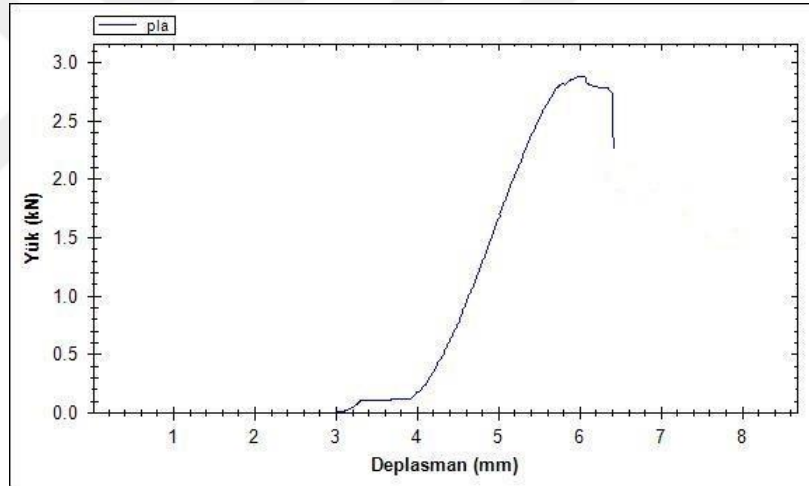
Şekil 3.7'de 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiş üçüncü ABS numunesinin basma yüküne karşı gösterdiği maksimum direncin 0.94 kN olduğu belirlenmiştir.

Şekil 3.5, Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de bulunan grafikler incelendiğinde numunelerin kırılmaya karşı gösterdikleri maksimum ortalama direncin 0,95 kN olduğu belirlenmiştir.



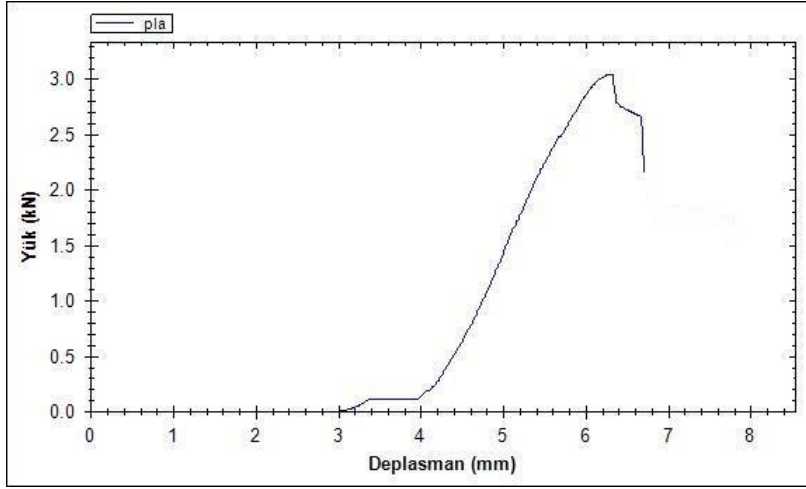
Şekil 3.8: PLA PLUS 3 boyutlu baskı yöntemi ile üretilmiş birinci numunenin Yük – Deplasman grafiği

Şekil 3.8’de 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiş birinci PLA Plus numunesinin basma yüküne karşı gösterdiği maksimum direncin 2.95 kN olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.9: PLA PLUS 3 boyutlu baskı yöntemi ile üretilmiş ikinci numunenin Yük – Deplasman grafiği

Şekil 3.9’da 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiş ikinci PLA Plus numunesinin basma yüküne karşı gösterdiği maksimum direncin 2.9 kN olduğu belirlenmiştir.

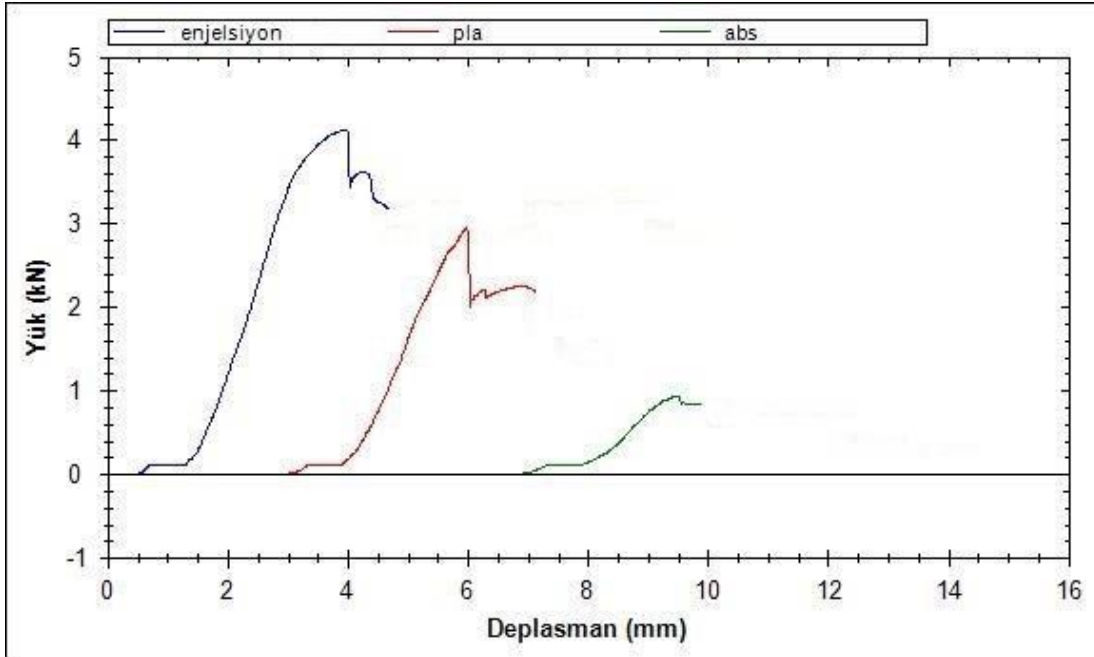


Şekil 3.10: PLA PLUS 3 boyutlu baskı yöntemi ile üretilmiş üçüncü numunenin Yük – Deplasman grafiği

Şekil 3.10'da 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiş üçüncü PLA Plus numunesinin basma yüküne karşı gösterdiği maksimum direncin 3.05 kN olduğu belirlenmiştir.

Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da bulunan grafikler incelendiğinde numunelerin kırılmaya karşı gösterdikleri maksimum ortalama direnç 2.97 kN olduğu belirlenmiştir.

Çalışmada oyuncak numunelere basma kuvveti uygulanmış, uygulanan bu kuvvet sonucunda malzemenin göstermiş olduğu davranışlar incelenmiştir. Şekil 3.11'de oluşan grafikte numunelerin basma deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

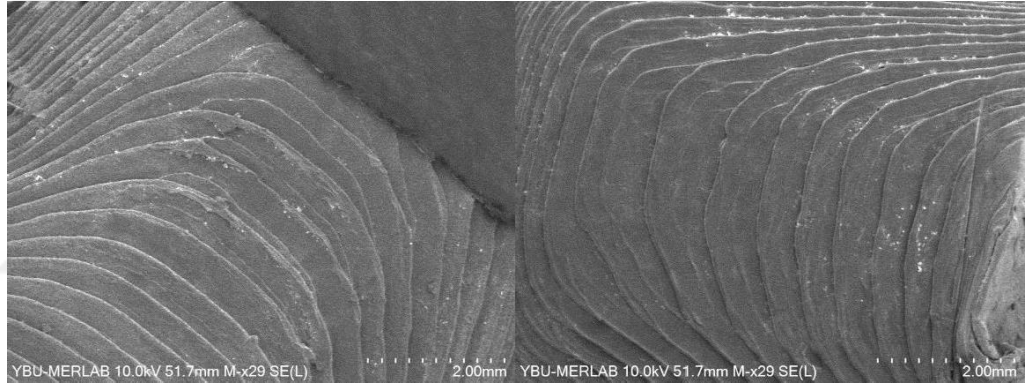


Şekil 3.11: Numunelerin Yük – Deplasman grafiklerinin karşılaştırılması

Bu konudaki kaynaklar incelendiğinde ASTM D695-96 standardına göre test numuneleri kullanıldığında 3 boyutlu yazıcı numunelerinin enjeksiyon numunelerine göre %75 civarında dayanım farkı meydana getirdiği görülmektedir. Oyuncak numunelerinin de PLA için benzer sonuçlar meydana gelmiştir. ABS de ise istenilen 3 boyutlu yazıcı numunelerinde beklenen basma dayanımına ulaşamamıştır. Enjeksiyona oranla %25 oranında dayanıma ulaşılabilmiştir.

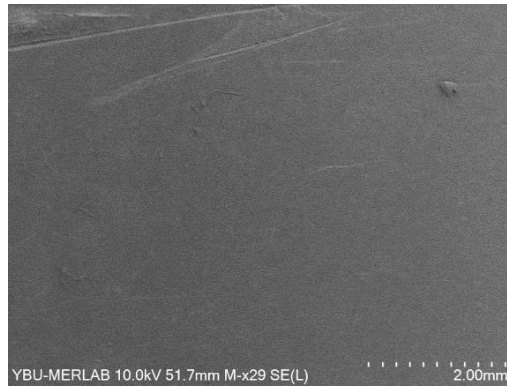
3.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

SEM görüntüleri 2 mm (milimetre), 5 µm (mikron), 10 µm, 30 µm, 100 µm olmak üzere 5 farklı ölçek ile gözlemlenmiş olup numunelerdeki mikro yapılar detaylı bir şekilde incelenmiştir.



(A)

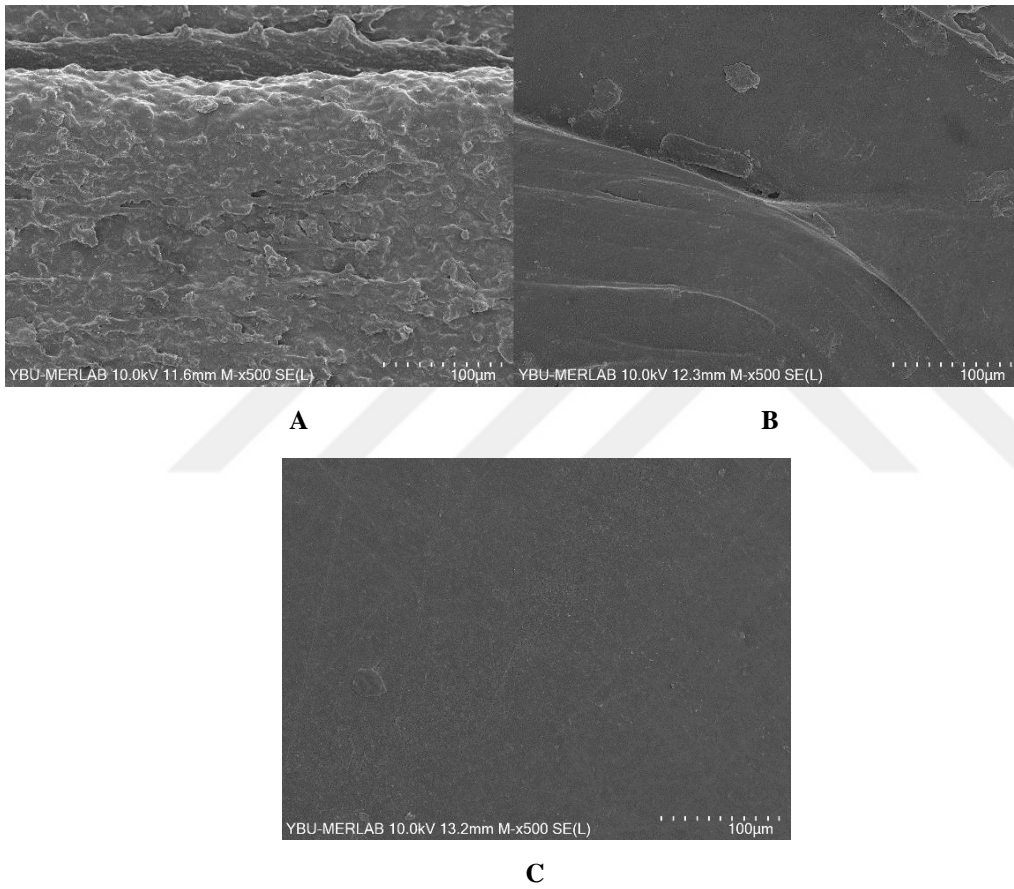
(B)



(C)

Şekil 3.12: Numunelerin SEM cihazındaki 2 mm ölçekli görüntüleri, (A) ABS 3 boyutlu baskı ile üretim, (B) PLA PLUS 3 boyutlu baskı ile üretim, (C) ABS Enjeksiyon yöntemi ile üretim

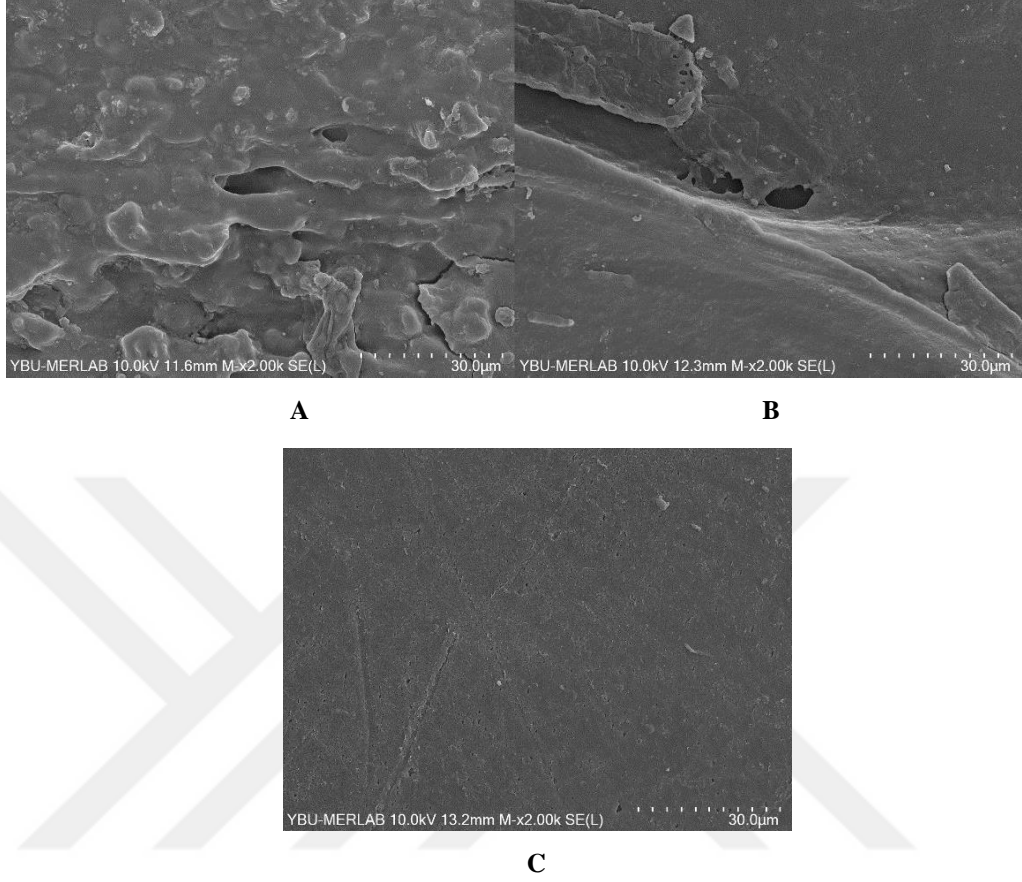
3 boyutlu yazıcı ile üretilen ABS+ ve PLA+ numuneleri 1,75 mm çapında filament kullanılarak 0,3 mm nozuldan geçirilerek malzeme biriktirilmiştir. 3 boyutlu baskı numunelerinin 2 mm ölçekli ve 29 kat yakınlaştırma ile Taramalı Elektron Mikroskobu ile elde edilmiş görüntülerinde katman geçişleri net bir şekilde görülmektedir. Plastik Enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş ABS numunesi katman katman biriktirilerek değil, plastik malzemenin kalıpta bir basınçla sıkıştırılıp soğutulması ilkesine dayanarak üretim yapıldığından 2 mm ölçekli görüntüleme sonucunda numune yüzeyinin 3 boyutlu baskı numunelerine kıyasla daha pürüzsüz bir yüzeye sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 3.13: Numunelerin 100µm ölçekli SEM cihazı görüntüleri: (A) ABS 3 boyutlu baskı numunesi, (B) PLA PLUS 3 boyutlu baskı numunesi, (C) ABS Plastik Enjeksiyon numunesi

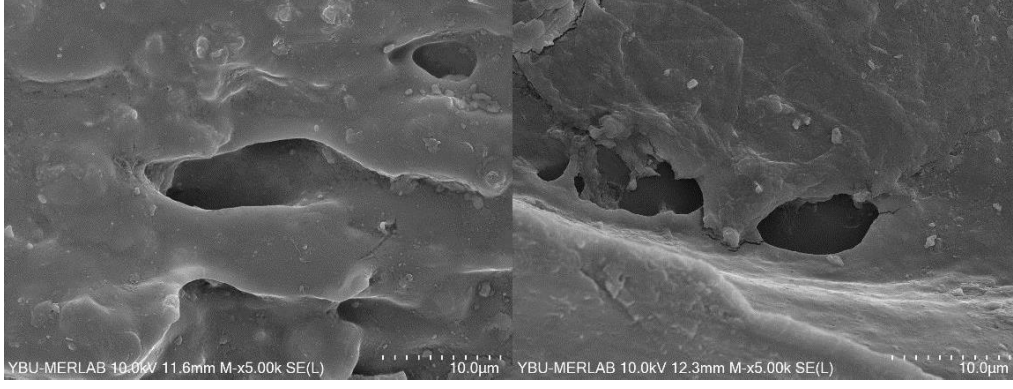
Numunelerin Taramalı Elektron Mikroskobu ile 5µm, 10 µm, 30 µm ver 100 µm ölçeklerinde görüntüleri elde edilmiştir. Şekil 3.13'te numunelerim 100 µm ölçekte 500 kat yakınlaştırma ile boşluklu yapıları görüntülenmiştir. 3 boyutlu baskı ile üretilen numunelerin boşluklu yapıları olup, plastik enjeksiyon ile

üretmiş numunenin boşluklu yapısı yok denecek kadar az olarak görüntülenmiştir.



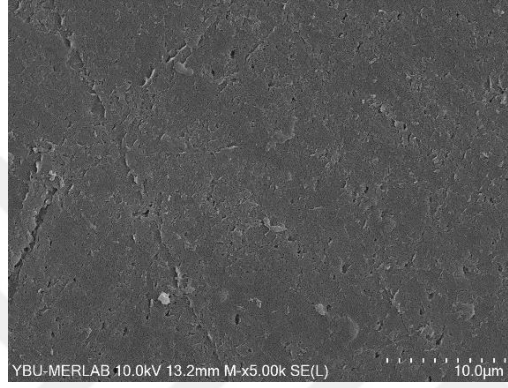
Şekil 3.14: Numunelerin 30µm ölçekli SEM cihazı görüntüleri: (A) ABS 3 boyutlu baskı numunesi, (B) PLA PLUS 3 boyutlu baskı numunesi, (C) ABS Plastik Enjeksiyon numunesi

Numunelere Taramalı Elektron Mikroskobu ile 30 µm ölçek ve 2.000 kat yakınlaştırma ile bakıldığında Şekil 3.14'teki görüntüler elde edilmiştir. ABS 3 boyutlu baskı ile üretilmiş numunenin yüzeyindeki boşluklu yapı diğer numunelere göre daha fazladır. PLA+ 3 boyutlu baskı numunesi ABS+ 3 boyutlu baskı numunesine göre daha az boşluklu yapıdadır.



A

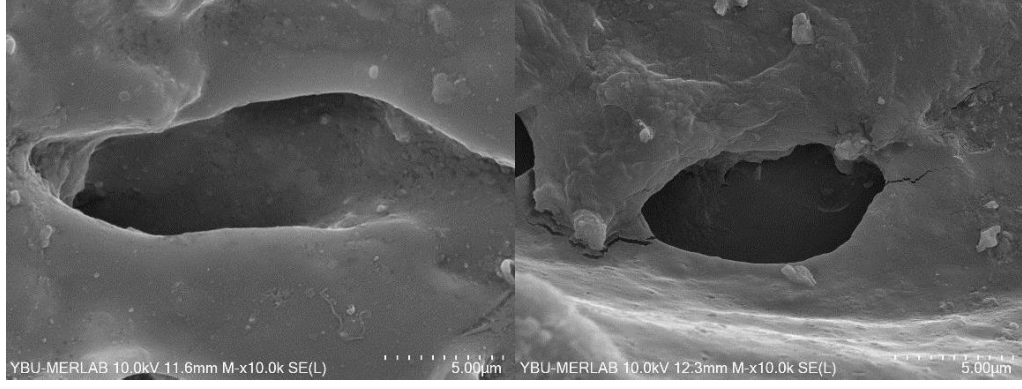
B



C

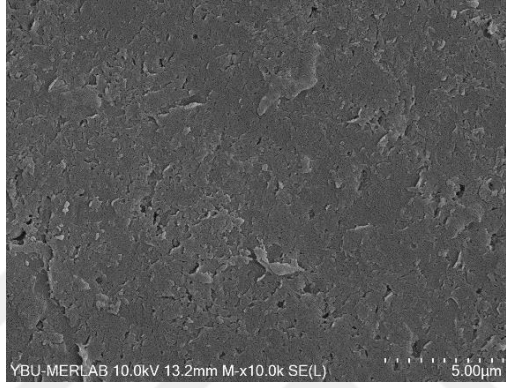
Şekil 3.15: Numunelerin 10µm ölçekli SEM cihazı görüntüleri: (A) ABS 3 boyutlu baskı numunesi, (B) PLA PLUS 3 boyutlu baskı numunesi, (C) ABS Plastik Enjeksiyon numunesi

Şekil 3.15'te numunelerin 10 µm ölçekli 5.000 kat yakınlaştırılmış SEM görüntüleri verilmiştir. 3 boyutlu baskı numunelerinin görüntüleri benzer olup boşluklu yapılarının üretim yöntemlerinin benzerliği ile ilişkilendirilmiştir.



A

B



C

Şekil 3.16: Numunelerin 5µm ölçekli SEM cihazı görüntüleri: (A) ABS 3 boyutlu baskı numunesi, (B) PLA PLUS 3 boyutlu baskı numunesi, (C) ABS Plastik Enjeksiyon numunesi

Şekil 3.16’da numunelerin 5µm ölçekte 10.000 kat yakınlaştırma ile SEM görüntüleri elde edilmiştir. Elde edilen yüksek çözünürlükte görüntülerde FDM teknolojisi ile üretilen ABS ve PLA numunelerindeki büyük boşluklar dikkat çekmektedir. Mikro yapıdaki bu süreksizlikler dayanım farkı ve yüzey pürüzlülüğünü açıklamaktadır.

3.4. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Numunelere Şekil 2.16’da gösterildiği üzere 9 farklı noktadan ölçüm yapılmış olup Ra yüzey pürüzlülüğü değerleri Tablo 3.2’ de verilmiştir. Daha sonra değerlerin aritmetik ortalamaları alınarak ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri bulunmuştur.

Tablo 3.2: Yüzey Pürüzlülük Değerleri

	ABS ENJ. (μm)	ABS Plus 3 boyutlu (μm)	PLA Plus 3 boyutlu (μm)
1. Nokta	0.13	0.73	2.31
2. Nokta	0.18	1.25	3.55
3. Nokta	0.15	0.96	3.34
4. Nokta	0.12	1.94	2.57
5. Nokta	0.24	1.64	3.56
6. Nokta	0.19	2.08	2.22
7. Nokta	0.14	1.94	2.67
8. Nokta	0.14	1.29	3.32
9. Nokta	0.13	1.05	3.91
Ortalama	0.16	1.43	3.05

ABS plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilen numunenin yüzey pürüzlülük değeri ortalama 0.16 μm (mikron) olarak bulunmuştur. ABS 3 boyutlu baskı yöntemi ile üretilen numunenin yüzey pürüzlülük değeri ortalama 1.43 μm olarak bulunmuştur. PLA Plus 3 boyutlu numunesinin yüzey pürüzlülük değeri ortalama 3.05 μm olarak bulunmuştur. 3D baskı numunelerinden elde edilen ölçümler baskı yönüne paralel yönde elde edilen ölçüm değerlerdir. Baskı yönüne dik olan yüzey ölçüm alınmaya uygun değildir. Plastik enjeksiyon ile üretilen numunelerin yüzey pürüzlülükleri 3 boyutlu baskıya göre çok iyidir. Bu Şekil 3.12 ile Şekil 3.16 arasındaki taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde de açıkça görülmektedir. Buna rağmen 3 boyutlu yazıcılarda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri plastik parçaların kullanılması için gayet yeterlidir. Çok daha parlak yüzeyler istenilirse 3D yazıcı numunelerine basit zımparalama ve boyama işlemleri uygulanarak enjeksiyon ile aradaki fark kolayca kapatılabilir.

3.5. Maliyet çalışması

FDM teknolojisi kullanılarak ve plastik enjeksiyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen numune üretimleri için maliyet çalışması yapılmıştır. Yapılan bu çalışma kaç adet oyuncak figürü üretimi gerçekleştirildiğinde maliyetimizi çıkararak kara geçebiliriz belirlenmeye çalışılmıştır.

Tablo 3.3: Makine - Kalıp Maliyet tablosu

	3 boyutlu YAZICI	PLASTİK ENJEKSİYON
MAKİNE MALİYETİ	9.750 TL	450.000 TL
KALIP MALİYETİ	0	30.000 TL

Tablo 3.3'te 3 boyutlu yazıcı ve plastik enjeksiyon yöntemine ait makine maliyeti ve kalıp maliyeti verilmiştir. Plastik enjeksiyon makinesi 450 bin ₺ olup ve kalıp maliyeti de 30 bin ₺'dir. 3 boyutlu yazıcı makine maliyeti 9750 ₺ olup kalıp maliyeti bulunmamaktadır.

Plastik enjeksiyon makinesi için 10 yıl, 3 boyutlu yazıcı için 2 yıl amortisman ömrü belirlenmiştir. Tablo 3.4'te plastik enjeksiyon ve 3 boyutlu yazıcı ile üretimin maliyet girdileri verilmiştir ve Tablo 3.5'te üretim yöntemlerinin sabit ve değişken giderleri verilmiştir.

1 numune üretimi için gerekli makine amortisman maliyeti.

$$450.000 \text{ ₺} / 10 = 45.000 \text{ ₺ (yıllık ücret)}$$

$$45.000 \text{ ₺} / 12 = 3750 \text{ ₺ (aylık ücret)}$$

$$3.750 \text{ ₺} / 30 = 125 \text{ ₺ (günlük ücret)}$$

$$125 \text{ ₺} / 24 = 5,21 \text{ ₺ (saatlik ücret)}$$

$$5,21 \text{ ₺} / 240 = 0,021 \text{ ₺}$$

(1 saatte 240 numune üretildiği bilinmektedir.)

1 numune üretimi için gerekli makine amortisman maliyeti.

$$9.750 \text{ ₺} / 2 = 4.875 \text{ ₺ (yıllık ücret)}$$

$$4.875 \text{ ₺} / 12 = 406,25 \text{ ₺(aylık ücret)}$$

$$406,25 \text{ ₺} / 30 = 13,54 \text{ ₺(günlük ücret)}$$

$$13,54 \text{ ₺} / 24 = 0,56 \text{ ₺(saatlik ücret)}$$

$$0,56 \times 4 = 2,26 \text{ ₺}$$

(4 saatte 1 numune üretildiği bilinmektedir.)

Tablo 3.4: Plastik Enjeksiyon ve 3 boyutlu yazıcı ile üretimin maliyet girdileri

	PLASTİK ENJEKSİYON	3 boyutlu YAZICI
MALZEME FİYATI (KG)	₺65,00	₺778,00
MAAŞ (AY)	₺6.500,00	₺9.500,00
ENERJİ TÜKETİMİ (KW/SA)	15 KW / SA	0,3 KW / SA

1 numune üretimi için malzeme maliyeti;

(1 numune 40 gramdır)

$(40 \times 65) / 1000 = 2,6$ TL (plastik enjeksiyon numunesi malzeme birim maliyeti)

$(40 \times 778) / 1000 = 31,1$ TL (3 boyutlu yazıcı numunesi malzeme birim maliyeti)

1 numune üretimi için işçilik maliyeti;

(Haftalık çalışma saati 45 saat kabul edilmiştir ve plastik enjeksiyon makinesinde saatte 240 numune üretimi gerçekleştirildiği bilinmektedir.)

$(6500 / 180) / 240 = 0,15$ TL (plastik enjeksiyon numunesi)

$[(9500 / 180) \times 10] / 60 = 8,8$ TL (3 boyutlu yazıcı numunesi)

1 numune üretimi için enerji maliyeti;

(1ks/sa = 1,25 TL)

$(15 \times 1,25) / 240 = 0,08$ TL (plastik enjeksiyon numunesi)

$0,3 \times 1,25 \times 4 = 1,5$ TL (3 boyutlu yazıcı numunesi)

Tablo 3.5: Üretim yöntemlerinin sabit ve değişken giderleri

		PLASTİK ENJEKSİYON	3 boyutlu YAZICI
SABİT GİDERLER	KALIP MALİYETİ	₺30.000,00	₺0,00
	MAAŞ	₺6.500,00	₺9.500,00

BİRİM GİDERLER	MAKİNE (TL/birim)	₺0,02	₺2,26
	MALZEME (TL/birim)	₺2,60	₺31,10
	İŞÇİLİK (TL/birim)	₺0,15	₺8,80
	ENERJİ (TL/birim)	₺0,08	₺1,50

TOPLAM	₺2,85	₺43,66
--------	-------	--------

$$\frac{\text{KALIP MALİYETİ}}{\text{TOPLAM BİRİM GİDERLER FARKI}} = \text{BAŞABAŞ NOKTASI}$$

$$30.000 / (43,66 - 2,85) = 735 \text{ Adet}$$

Enjeksiyon ile 735 adet üretildiğinde birim maliyet eşitlenmektedir. 735 adetten fazla üretildiğinde 3 boyutlu yazıcıya göre enjeksiyon daha hesaplı olmaktadır. 735 adet üretimden az gerçekleştirilen imalatlarda 3 boyutlu yazıcı daha ekonomik olmaktadır.

Buna ek olarak tezgah ilk yatırım maliyetinin amorti edilmesi için gereken adetlerin hesaplanması için satış fiyatlarının bilinmesi gerekmektedir. Enjeksiyon için satış fiyatı 30, üç boyutlu yazıcı 60 ₺ alınırsa:

$$[30.000+450.000] / [30-(0,02+2,6+0,15+0,08)]=\mathbf{17680 \text{ adet}}(\text{plastik enjeksiyon})$$

$$[0+9.500] / [60-(2,26+8,80+31,10+1,5)]=\mathbf{582 \text{ adet}}(3 \text{ boyutlu yazıcı}) \text{ olarak bulunur.}$$

Plastik enjeksiyon ve 3 boyutlu yazıcı ile üretim yöntemlerine ait başa baş noktası hesabı sonunda plastik enjeksiyon yöntemi kullanılarak 17680 adet ve 3 boyutlu yazıcı yöntemi kullanılarak 582 adet oyuncak figürü üretiminden sonra makine ve kalıp maliyetini çıkarıp kara geçildiği görülmüştür.

4. DEĞERLENDİRMELER

Çalışmada Among Us oyuncak figürü numunelerinin üretimi, FDM (eriyik biriktirme teknolojisi) kullanılarak ve plastik enjeksiyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada DEMAG marka plastik enjeksiyon makinası ile LG marka ABS granülü kullanılarak ve 3D3 S1 marka makine ve Uzaras PLA+, BASF ABS fusion+ malzemeleri kullanılarak ürünler elde edilmiştir. Üretilen numunelere basma kuvveti uygulanarak, bu kuvvet sonucunda malzemede oluşan değişim ve malzeme mukavemeti değerlendirilmiştir. Bununla birlikte üretilen Among Us figürlerinin CMM cihazında ölçümleri yapıp 3 boyutlu CAD modeli ile kıyaslaması yapılarak üretimdeki doğruluk araştırılmıştır. Yapılan bu çalışmaların yanında malzeme yüzey pürüzlülük değerleri ölçülüp yüzey kaliteleri hakkında bir değerlendirme yapılmıştır. Üretilen numunelerin SEM ile yüksek çözünürlükte görüntüleri alınarak mikroyapı yorumlanmıştır. Bu çalışmaların dışında üretim hızı ve üretim maliyeti açısından da karşılaştırmalar yapılarak iki üretim yönteminin hangi durumlarda kullanımının daha uygun olacağı konusunda bir sonuca varılmıştır.

- Among Us numunelerinin koordinatlarının ölçümü sonucunda; CMM cihazı kullanılarak elde edilen veriler değerlendirildiğinde plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş ABS numunesinin 3 boyutlu modele en yakın değerler göstererek tolerans ± 1 mm olarak kabul edilen aralığın dışına sadece bir noktada çıkarak, ve grafiğin geneline bakıldığında 3 boyutlu modele en yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Tolerans dışı ölçümler Tablo 3.1'e bakıldığında PLA Plus 3 boyutlu baskı işleminden üretilmiş numunenin 6 farklı noktasında, ABS 3 boyutlu baskı işlemi ile üretilmiş numunenin 4 farklı noktasında, ABS plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş numunenin 1 noktasında ölçülmüştür. POINT39 referanslı ölçüm için tüm numuneler hatalı kabul edilmiş olup sapma miktarlarına bakıldığında -1.044 mm ile diğerlerinden daha az bir sapma ile plastik enjeksiyon ile üretilmiş numune belirlenmiştir. 3 boyutlu baskılar için ortak POINT38, POINT39 ve POINT40 referans noktalarına baktığımızda

ABS filamentinden üretilen numune PLA+ filamentinden üretilen numuneye göre daha az hatalı ölçülmüştür. Enjeksiyon ve 3 boyutlu yazıcıdan alınan numuneler kıyaslandığında ortalama farkın PLA'da 0,04 mm, ABS'de ise 0,0025 mm olduğu gözükmektedir. Tüm bu veriler değerlendirildiğinde çok düşük tolerans aralıklarında çalışmayı gerektirmeyen durumlarda 3 boyutlu yazıcı ile enjeksiyona yakın sonuçlar elde edilebileceği görülmüştür.

- Among us numunelerine uygulanan basma kuvveti sonucunda; plastik enjeksiyon ile üretilen numunelerin kırılmaya karşı gösterdikleri maksimum ortalama direnç 3,93 kN olup; 3 boyutlu baskı yöntemi ile üretilen numunelerin kırılmaya karşı gösterdikleri dirençten daha fazladır. Plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilen ABS figürünün diğer 3 boyutlu ABS ve PLA numunelerine kıyasla daha sünek davranış gösterdiği görülmüştür. 3 boyutlu baskı numuneleri kendi içinde değerlendirildiklerinde ise PLA+ malzemesi kullanılarak üretilen among us oyuncak numunesinin uygulanan kuvvet neticesinde kırılmaya gösterdiği direnç 2,97 kN olup, ABS 3 boyutlu numunesine göre daha sünek davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Basma yüküne en az direnç gösteren 0,95 kN değeri ile ABS 3 boyutlu baskı ile üretilen numune olmuştur. PLA+ 3 boyutlu baskı numunesi ABS plastik enjeksiyon ile üretilmiş numuneye göre basma yüküne karşı gösterdiği mukavemet %25 daha azdır. ABS+ 3 boyutlu baskı numunesi ABS plastik enjeksiyon numunesine göre basma yüküne karşı gösterdiği mukavemet ise %76 daha azdır. 3 boyutlu yazıcı numunelerini karşılaştırdığımızda ABS+ malzemesinden üretilen numune PLA+ malzemesinden üretilen numuneye göre %68 daha az basma yüküne karşı direnç göstermektedir. Numune bir oyuncak parçası olduğu için 3 boyutlu PLA ile üretilen parçanın basma dayanımının yeterli olduğu görülmektedir.
- Taramalı Elektron Mikroskopu ile yapılan görüntüleme çalışması ile; among us numunelerinin mikro yapısı gözlemlenmiştir. ABS+ ve PLA+ numunelerine ait farklı ölçek ve yakınlaştırmalarda görüntüler elde edilmiştir. Bu görüntüler ile numunedeki boşluk, çatlak ve hava boşlukları gözlemlenmiştir. Numunelerin kırılmaya karşı gösterdikleri direnç ve

malzemelerin boşluklu yapılarını incelediğinde, en az boşluklu yapıya ABS plastik enjeksiyon numunesinin sahip olduğu gözlemlenmektedir. Numunelere uygulanan basma kuvveti sonucunda elde edilen verileri de SEM görüntülemeleri destekler niteliktedir.

Basma kuvveti neticesinde 3,93 kN değer ile basma yüküne en fazla direnç gösteren numune ABS plastik enjeksiyon numunesi olmuştur. Plastik enjeksiyon yöntemi ile numune üretiminin genel mantığı olan kalıpta sıkıştırarak bir basınç altında ütüleme ve tutma fazları ile malzemedeki boşluklu yapı önlenmektedir. Bunun sonucunda bu boşluksuz yapının malzemenin dayanımını artırdığı belirlenmiştir. Numunelerin boşluklu yapıları azaldıkça kırılmaya karşı gösterdikleri direncin arttığı, boşluklu yapılar arttıkça kırılmaya karşı gösterilen direncin azaldığı görülmektedir. Bu nedenle plastik enjeksiyon ile üretim yönteminin daha az boşluklu yapıya sahip olduğu için yük altında sünek davranışlar sergilediği sonucuna varılmıştır. 3 boyutlu baskı numuneleri Şekil 3.13'e bakıldığında benzer büyük boşluklu yapıya sahip oldukları görülmektedir. Bunun sebebi olarak filamentin ekstrüzyonu sırasında eriyik polimerin eşit olmayan dağılımla ya da zayıf yapışma göstermesine bağlı olduğu düşünülmektedir. Bu çalışma sonucunda malzemedeki boşluk miktarı ve mikro yapı düzensizliği arttıkça malzeme dayanımının düştüğü sonucuna varılmıştır. Taramalı elektron mikroskopu ile elde edilen tüm bu veriler diğer çalışmalarda elde ettiğimiz sonuçları destekler niteliktedir.

- Yüzey pürüzlülüğü ölçüm çalışmaları sonucunda; plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş Among us oyuncak figürüne ait numunelerin 3 boyutlu baskı numuneleri ile kıyaslandığında daha düşük Ra değerleri göstererek daha pürüzsüz yüzeylere sahip olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri sonucunda plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilen ABS numunesi 0.16 Ra yüzey pürüzlülüğü değeri ile diğer numunelere göre daha pürüzsüz yüzeye sahiptir. 3 boyutlu baskı yöntemi ile üretilen numuneler sırasıyla ABS 1.43, PLA Plus 3.05 Ra yüzey pürüzlülüğü olarak ölçülmüştür. PLA Plus 3 boyutlu baskı numunesi ABS 3 boyutlu baskı numunesine göre daha pürüzlü bir yüzeye sahip olduğu tespit edilmiştir. Aynı malzeme grubundan üretilen numuneler için yüzey

pürüzlülüklerindeki farklılık üretim yöntemlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. 3 boyutlu baskı numunelerinde elde edilen veriler birbiri ile yakındır. FDM yöntemi kullanılarak üretilen bu numunelerde baskı değerlerinin enjeksiyonlu tasarımla kıyaslandığında daha pürüzlü yüzeylere sahip olmasının nedeni katman katman biriktirilerek üretilmesidir ve katman kalınlığına bağlı olarak bu değerlerin değiştiği görülmektedir. Elde edilen sonuçların SEM görüntüleri de desteklediği görülmektedir. Yüksek çözünürlükte elde ettiğimiz bu görüntülerde numunelerde yüzey pürüzleri, hava boşlukları ve boşluklar gözlemlenmiştir. ABS plastik enjeksiyon yöntemi ile üretilmiş numunenin daha iyi yüzey kalitesine sahip olduğu görülmektedir. Parçanın plastikten üretildiği ve etkileşimde olduğu parça olmadığı durumlarda 3 boyutlu yazıcılardan alınan numunelere ait yüzey pürüzlülüğü değerlerinin yeterli olduğu görülmektedir.

- Yapılan hesaplamalar sonucunda; elde edilen veriler değerlendirildiğinde plastik enjeksiyona ait granül haldeki ABS malzemesinin filament haldeki ABS malzemesinden çok daha uygun fiyatlı olduğu belirlenmiştir. Fakat plastik enjeksiyon yöntemindeki makine ve kalıp maliyetinin oldukça yüksek olduğu bilinmektedir. 3 boyutlu yazıcı ile üretimde makine maliyetinin düşük olması ve kalıp maliyetinin olmaması büyük avantaj sağlamaktadır. Yapılan bu değerlendirmeler ile birlikte üretim hızı ele alındığında plastik enjeksiyon yönteminin 3 boyutlu baskı yöntemine kıyasla çok daha hızlı üretim kapasitesine sahiptir. Yapılan hesaplamalar sonucunda plastik enjeksiyon yöntemi ile 17680 adet üretim ile ve 3 boyutlu yazıcı yöntemi ile 582 adet üretim ile makine ve kalıp amortismanını sağlayacak başa baş noktası yakalanmıştır. Enjeksiyon ve 3 boyutlu yazıcı ile üretim karşılaştırıldığında aynı üretim maliyetini yakalamak için enjeksiyon yöntemiyle en az 735 adet parça üretilmesi gerektiği hesaplanmıştır. Bu veriler belirtilen sayıda gerçekleştirilen oyuncak figürü üretiminden sonra kalıp maliyetini karşılayarak bundan sonraki üretimlerde kara geçildiğini göstermektedir. Yani bu boyutlarda 4 gramlık bir parça için 735 adetten az istenildiğinde eğer üretim zamanı önemli değilse 3 boyutlu yazıcının daha ekonomik olduğu gözükmektedir.

Dayanımın istenildiği durumlarda PLA, ölçüsel hassasiyet ve yüzey pürüzsüzlüğünün istenildiği durumlarda ise ABS filament malzemesi önerilmektedir.

- Bu çalışmanın işletmelerin ya da kişilerin üretim yöntemi tercihinde, hangi durumlarda avantajlı olacağı konusunda yol gösterici olacağı ve plastik enjeksiyonla üretilmiş bir endüstriyel ürünün 3 boyutlu yazıcı ile üretimini gerçekleştirilerek gerekli ihtiyacı karşılayıp karşılayamayacağı araştırılmıştır. Özellikle düşük sayıdaki üretimler için kişiselleştirme imkanı, yeterli dayanım ve yüzey pürüzlülüğü veren 3 boyutlu yazıcılarla evlerde oyuncak ve plastik gereçlerin üretimleri uygun fiyatlara gerçekleştirilebilecektir.



5. KAYNAKÇA

1. Kayacan, M. C., Özsoy, K. ve Kor, Ö. (2017). 4. Endüstri Devrimi ve Türkiye. 2. 3B Baskı Teknolojileri Uluslararası Sempozyumu. Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 3-4 Nisan.
2. Gibson I., Rosen D., Stucker B. (2015). 3D Printing, Rapid Prototyping, Direct Digital Manufacturing. (2nd edition). New York Heidelberg Dordrecht London: Springer, 4-6.
3. <https://sites.utexas.edu/amdc/2019/10/29/selective-laser-sintering-high-temperature-workstation/>
4. Manriquez-Frayre, J.A. and Bourell, D.L. (1990). Selective Laser Sintering of Binary Metallic Powder. Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, USA, 99–106 September.
5. EOS. (2013). Industries and markets. http://www.eos.info/industries_markets (21.09.2017).
6. Wimpenny D. I. , Padley P. M. and Kumar, L. J. (Edt.), (2017). Advances in 3D Printing and Additive Manufacturing Technologies. Baig U. M., Khan, A. R. A. and Rajakumar D. R., Wear Characterization of Direct Steel-H20 Specimens Produced by Additive Manufacturing Techniques (ss. 121-128). Singapore : Springer Science+Business Media.
7. Giannatsis, J., Dedoussis, V. (2009). Additive Fabrication Technologies Applied To Medicine And Health Care: A Review, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 40, 116-127.
8. Çelik, İ., Karakoç, F., Çakır, M. C., Duysak, A. (2013). Hızlı Prototipleme Teknolojileri ve Uygulama Alanları. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 31, 53-69.
9. Gebhardt, A. (2011): Understanding Additive Manufacturing. Rapid Prototyping, Rapid Tooling- Rapid Manufacturing, Munich: Hanser.

10. Özsoy K. ve Duman B. (2017). Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği. International Journal Of 3 boyutlu Printing Technologies And Digital Industry, 1:1(2017), 36-48.
11. Duman B ve Kayacan M.C.. (2016). Seçmeli Lazer Sinterleme Tezgâhı İçin İmalat Yazılımı Geliştirilmesi [Development Of Manufacturing Software For Selective Laser Sintering Machine] [article in Turkish]. SDU International Journal of Technologies Science ;8(3):27-45.
12. EPMA (Edt.) (2019). Additive Manufacturing Technology : A guide for designers and engineers. 3rd edition. France : EPMA.
13. Zhang, B., Luo, Y., Ma, L., Gao, L., Li, Y., Xue, Q. ve Cui, Z. (2018). 3D bioprinting: an emerging technology full of opportunities and challenges. Bio-Design and Manufacturing, 1-12. doi:10.1007/s42242-018-0004-3
14. Kurata A., Koyama Y., Shirakawa T., Miyoshi T. (2018). Clinical Applications of Three-Dimensional Printing in Cardiovascular Disease. Asian Society of Cardiovascular Imaging, Japan, Oct;2(4):153-165, Retrieved from: <https://doi.org/10.22468/cvia.2018.00094>
15. Çeyrek Mühendis (2022). Eklemeli imalat teknolojisinin tıp uygulamaları. <https://ceyrekmuhendis.com/eklemeli-imalat-teknolojisinin-tip-uygulamalari/> İndirilme Tarihi : 25.08.2022
16. Huang, R., Riddle, M., Graziano, D., Warren, J., Das, S., Nimbalkar, S. ve Masanet, E. (2016). Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components. Journal of Cleaner Production, 135, 1559-1570. doi:10.1016/j.jclepro. 2015.04.109
17. Kara N. (2013). Havacılıkta Katmanlı İmalat Teknolojisinin Kullanımı, Mühendis ve Makine Dergisi, Cilt 54, Sa yı 636, 70-75.
18. Altuncu E. (2019). Eklemeli/Katmanlı İmalat Teknolojisinde Tozlar, Endüstriyel Uygulamalar ve Standardizasyon. 2. Ulusal Döküm Kongresi. İzmir, Türkiye, 30 Kasım – 1 Aralık.
19. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, 2012, ASTM

20. Asadollahi-Yazdi, E., Gardan, J., Lafon, P. (2016). Integrated Design in Additive Manufacturing Based on Design for Manufacturing. International Conference on Mechanical Engineering and Manufacturing, Jun 2016, Toronto, Canada. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03609587>
21. Calignano, F., Manfredi, D., Ambrosio, E. P., Biamino, S., Lombardi, M., Atzeni, E., Salmi, A., Minetola, P., Iuliano, L., Fino, P. (2017). Overview on Additive Manufacturing Technology. *Proceeding of the IEEE*, vol. 105, no. 4, April.
22. Taormina, G., Sciancalepore, C., Bondioli, F., Messori, M. (2018). Special Resins for Stereolithography: In Situ Generation of Silver Nanoparticles. *Polymers*, 10(2), 212.
23. Oropallo W., Piegł L.A. (2015). Ten challenges in 3D printing, *Journal of Engineering with Computers*, 32: 135-148. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00366-015-0407-0>
24. De Pasquale, G., Bertana, V., Scaltrito, L., (2018). Experimental Evaluation of Mechanical Properties Repeatability of SLA Polymers for Labs-on-chip and bio-MEMS. *Microsystem Technologies*, 24(8), 3487–3497. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00542-018-3753-1>
25. Zhao, J., Yang, Y., Li, L. (2020). A Comprehensive Evaluation for Different Postcuring Methods Used in Stereolithography Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 56, 867–877.
26. Karalekas, D., Aggelopoulos, A., 2003. Study of Shrinkage Strains in a Stereolithography Cured Acrylic Photopolymer Resin. *Journal of Materials Processing Technology*, 136(1-3), 146–150.
27. Anonim, [https://fibilo.com/sla-3 boyutlu-baski-teknolojisi/](https://fibilo.com/sla-3-boyutlu-baski-teknolojisi/)
28. https://en.wikipedia.org/wiki/Laminated_object_manufacturing
29. Choi, Y. H., Kim, C. M., Jeong, H. S., Youn, J. H. (2016). Influence of bed temperature on heat shrinkage shape error in FDM additive manufacturing of the ABS engineering plastic. *World Journal of Engineering and Technology*, 4(3), 186-192.

30. Spoerk, M., Gonzalez-Gutierrez, J., Sapkota, J., Schnuschnigg, S., Holzer, C. (2018). Effect of the printing bed temperature on the adhesion of parts produced by fused filament fabrication. *Plastics, Rubber and Composites*, 47(1), 17-24.
31. Ahn, S. H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid prototyping journal*, 8(4), 248-257.
32. Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. (2017). Process parameter optimization of viscoelastic properties of FDM manufactured parts using response surface methodology. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 8250-8259
33. Li, H., Wang, T., Sun, J., & Yu, Z. (2018). The effect of process parameters in fused deposition modelling on bonding degree and mechanical properties. *Rapid Prototyping Journal*, 24(1), 80-92. https://www.deepdyve.com/lp/emerald-publishing/the-effect-of-process-parameters-in-fused-deposition-modelling-on-0JWhzIls0v?impressionId=5fac9363137ea&i_medium=docview&i_campaign=recommendations&i_source=recommendations
34. Qattavia, A., Alrawi, B., & Guzman, A. (2017). Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: a design-for-manufacturing approach. *Procedia Manufacturing*, 10, 791-803.
35. Tian, X., Liu, T., Yang, C., Wang, Q., & Li, D. (2016). Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 88, 198- 205.
36. Redwood, B.; Schoffer, F. (2017). Garret, B. *The 3D Printing Handbook Technologies, Design and Applications*; Hardcover: Amsterdam, The Netherlands.
37. Sathies, T., Senthil P., Anoop M.S. (2020). A review on advancements in applications of fused deposition modelling process , *Rapid Prototyping Journal*, 26(4), 669-687.

38. A.W. Gebisa, and H. G. Lemu, (2018). Investigating Effects of Fused-Deposition Modelling (FDM) Processing Parameters on Flexural Properties of ULTEM 9085 Using Designed Experiment, *Materials*, vol. 11, no. 500, 1-23.
39. Çelik, K. and Özkan, A.(2017). Eklemeli İmalat Yöntemleri ile Üretim ve Onarım Uygulamaları, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, vol. 5, no. 1, 107-121.
40. Anonim, <https://www.poligonmuhendislik.com/hizmetlerimiz/uretim/hizli-prototipleme/fdm>
41. Anonim, [https://www.3 boyutluprototip.com.tr/fdm-teknolojisi](https://www.3boyutluprototip.com.tr/fdm-teknolojisi)
42. Diksu, S. (2021). Eklemeli İmalat Teknolojisi Eriyik Biriktirme Modelleme Yöntemi İçin Kompozit ABS Filament Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
43. P. Gay, D. Blanco, F. Pelayo, A. Noriega, and P. Fernandez, (2015). “Analysis of Factors Influencing the Mechanical Properties of Flat Polyjet Manufactured Parts”, *Procedia Engineering*, vol. 132, pp. 70-77.
44. https://researchgate.net/figure/schematic-representation-of-polyjet-printing-process_fig1_318112255
45. Anonim, <https://tech-labs.com/polyjet-technology>
46. Anonim, www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Thermal_manufacturing
47. Anonim, [http://www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/File:Nano_\(2\).jpg](http://www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/File:Nano_(2).jpg)
48. Greco, S., Gutzeit, K., Hotz, H., Kirsch, B., Aurich, J. C. (2020). Selective laser melting (SLM) of AISI 316L- impact of laser power, layer thickness, and hatch spacing on roughness, density and microhardness at constant input energy density. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108, 1551-1562.

49. Gibson, I. and Shi, D. (1997) . Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process, Rapid Prototyping Journal, 3(4), 129-136
Retrieved from:
<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/13552549710191836/full/html>
50. Anonim, [https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3 boyutlu-printing/](https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sls-3-boyutlu-printing/)
51. Anonim, <https://marsisinovasyon.com/secici-lazer-sinterleme-sls/>
52. Anonim, <https://www.eetimes.com/rapid-prototypes-move-to-metal-components/>
53. Demirer, A. Hızlı Prototipleme, Ders notları.
54. Alsaran, A. Hızlı Prototipleme, Ders notları.
55. Anonim, <https://additivemanufacturingllc.com/services/electron-beam-melting/>
56. Anderl R., Schmid, H. J. Kage, M. and Karg, M. C. H. (2017). Additive Manufacturing, Acatech-National Academy of Science and Engineering, GERMANY.
57. Sönmez, S., Kesen, U., Dalgıç, C. (2018). 3 boyutlu yazıcılar. 6. Uluslararası Matbaa Teknolojileri Sempozyumu. İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 01-03 Kasım.
58. Anonim, <https://tutorials.one/additive-manufacturing/>
59. Anonim, <https://tr.sjplasticworld.com/info/history-of-plastic-injection-molding-63333191.html>
60. Office, Patent (1857). Patents for inventions. Abridgments of specifications (İngilizce). 24 Haziran 2021 tarihinde kaynağından arşivlendi. Erişim tarihi: 13 Haziran 2021.
61. U.S. patent #133229, dated 19 November 1872.
62. Boztoprak, Y. (2001). Enjeksiyonla Kalıplanmış Plastik Parçalarda Oluşan Yönlenme ve Artık Gerilmelerin Polarize Işık Mikroskobu Yardımıyla

- İncelenerek Kritik Noktaların Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
63. Goodship, V. (2004). Arburg Practical Guide to Injection Moulding, Smithers Rapra, 1-65.
64. Rees, H. (1995). "Mold Engineering", Hanser Publishers, 3-26.
65. Pınar, E. (2010). Plastik Enjeksiyon Yöntemiyle İmalatta Hataların Tespiti ve Proses Şartlarının Optimizasyon Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
66. Anonim, <http://ayyildizplastik.com.tr/en/2015/11/02/arburg-200t-plastic-injection-machine/>
67. Anonim, <https://tr.framo-morat.com/urunlerimiz/plastik-enjeksiyon-kaliplama-teknolojisi/>
68. Köse, E. (2006). Plastik Enjeksiyonda Proses ve Kalıp Kaynaklı Sorunların Giderilmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
69. Aslan, G. (2011). Farklı Malzemelerden Plastik Enjeksiyon Yöntemi İle Makine Parçası Üretimi. Yüksek Lisans Tezi. Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
70. Anonim, [https://www.artiboyut.com/index.php/tr/bilgi-bankasi/39-3 boyutlu-yazici filament%20ozellikleri](https://www.artiboyut.com/index.php/tr/bilgi-bankasi/39-3-boyutlu-yazici-filament%20ozellikleri)
71. https://tr.wikipedia.org/wiki/Polilaktik_asit
72. https://tr.wikipedia.org/wiki/Akrilonitril_b%C3%BCtadien_stiren
73. Anonim, <http://www.korkusuzplastik.com/abs-akrilonitril-butadien-stiren-p-1>
74. Fındık, B. (2020). Eriyik Yığılma Modelleme ve Enjeksiyon Kalıplama Tekniği ile Üretilen Akrilonitril Bütadien Stiren Polimerinin Mekanik, Fiziksel ve Morfolojik Özelliklerinin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
75. Sezer, H. K., Eren, Ö., Börklü, H. R., Özdemir, V., (2019). Additive Manufacturing Of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites By Fused Deposition Modelling: Effect Of Fiber Content And Process Parameters On

Mechanical Properties. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34:2, 663-674.

76. Apak K. (2019). PLA Malzemesinden Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen Ürünlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta.
77. Karaman, E., Çolak, O., (2019). Eriyik Biriktirme Yönteminde Farklı Üretim Parametrelerinin Mekanik Özelliklere Etkisi. Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 1:2, 90-99.
78. Sood, A. K. Ohdar, R. K. ve Mahapatra, S. S. (2009). Parametric appraisal of fused deposition modelling processed parts. Material Design, 31, 287-295.
79. Kepenekci M. (2021). Mechanical Behavior of Additively Manufactured Polymer Composite Structures and Interfaces. Yüksek Lisans Tezi. The Graduate School of Natural And Applied Sciences of Middle East Technical University, Ankara.
80. Anonim, <https://yigitlersavunma.com.tr/tr/product/dea-cmm-cihazı-1.html>

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Şeyda DEĞİRMENCI
Doğum Tarihi :
Yabancı Dil : İngilizce
Eğitim Durumu
Lisans : Kırıkkale Üniversitesi (2014-2018)
Yüksek Lisans : Kırıkkale Üniversitesi (2019-2022)

Yetkinlikler / Sertifikalar

Autocad / Beltek Gazi Üniversitesi Mesleki ve Teknik Eğitim Kursu Sertifikası

Catia V5 (CAD-CAM) / Beltek Gazi Üniversitesi Mesleki ve Teknik Eğitim Kursu Sertifikası

Unigraphics NX (CAD-CAM) / Beltek Gazi Üniversitesi Mesleki ve Teknik Eğitim Kursu Sertifikası

Ansys Workbench / Beltek Gazi Üniversitesi Mesleki ve Teknik Eğitim Kursu Sertifikası

Microsoft Office

Solidworks

Logo Tiger

CRM

Matlab

SAP

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl/Yıllar:

DAB MİMARLIK (09.2020 -11.2021)

SERDAROĞLU TESİSAT (11.2021- 05.2022)

BÜLBÜLOĞLU VİNÇ (05.2022 - halen)

Araştırma Alanları:

Eklemeli İmalat

3D Yazıcılar

Araç Dinamiği ve Konsept Araç Tasarımı

