

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİSİ ERİYİK BİRİKTİRME MODELLEME
YÖNTEMİ İÇİN KOMPOZİT ABS FİLAMENT ÜRETİLMESİ VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sinan DİKSU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

ŞUBAT 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİSİ ERİYİK BİRİKTİRME MODELLEME
YÖNTEMİ İÇİN KOMPOZİT ABS FİLAMENT ÜRETİLMESİ VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Sinan DİKSU
503171312**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Celalettin ERGUN

ŞUBAT 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503171312 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Sinan DİKSU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİSİ ERİYİK BİRİKTİRME MODELLEME YÖNTEMİ İÇİN KOMPOZİT ABS FİLAMENT ÜRETİLMESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Celaletdin ERGUN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Şule SELÇUK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Osman EKSİK
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 22 Ocak 2021
Savunma Tarihi : 16 Şubat 2021





Aileme ve dostlarıma,



ÖNSÖZ

Tez çalışmamda beni destekleyen, bana yardımcı olan ve yol gösteren danışman hocam Prof. Dr. Celaletdin Ergun'a sonsuz teşekkür ederim.

Tezimin yazımı için gerekli olan çalışmaları yapabilmem için laboratuvarının kapılarını bana açan, laboratuvarın bütün imkanlarından yararlanmamı sağlayan, deneysel çalışmalarımı kendi çalışması gibi takip eden ve desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen hocam Doç. Dr. Ali Kılıç'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Deneysel çalışmalarım ve tez yazım sürecinde işyerimdeki işlerimle birlikte bu çalışmayı aynı süreçte yönetebilmem için bana gerekli anlayışı gösteren ve gerekli desteği veren takım liderim Mak. Yük. Müh. Serhat Şengün'e çok teşekkür ederim.

Çalışmadaki testin gerçekleştirilmesinde kendi vaktinden ayırıp her zaman yardımına koşan ve tecrübelerini benimle paylaşan işyerimizdeki plastik hammadde uzmanımız İhsan Arabayapan'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvardaki çalışmalarımda bana her zaman yardımcı olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen arkadaşlarım Aybeniz Seyhan'a, Kadir İmdat'a, Ömer Gezer'e, Tolgahan Akdağ'a ve Yusuf Polat'a sonsuz teşekkür ederim.

Bu süreçte benden desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman yardımına koşan, moral ve motivasyon açısından benim enerjimi yüksek tutan sevgili dostlarım Akın Sözeri'ye, Alparslan Temen'e, Arda Dinçdem'e, Aygun Akaoglu'na, Batuhan Özemir'e, Burak Aydilek'e, Burhan Demir'e, Caner Mutlu'ya, Görkem Demir'e, Hasan Gürcan Aybak'a, İsmail Kağan Akıtürk'e, Mehmet Okan Güney'e, Onur Taştan'a, Merve Şahbaz'a, Murat Koşar'a, Yılmaz Karaçiray'a ayrı ayrı sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Son ve en değerli teşekkür ailem için. Çalışma süreci boyunca benden desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, çalışmanın bir an önce sonuca ulaşması için benden daha çok heyecanlanan, ebeveynlerimin bana bu dünyada sunduğu en güzel hediye olan canım ablam Sinem Diksu'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Doğduğum günden bu güne kadar hayattaki en büyük şansım olan ve bundan sonrada en büyük şansım olacak olan, yaşamım boyunca benden desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, aldığım her kararda yanımda olan, mesleğimi elime almayı ve bu tezi yazabilmemi sağlayan canım annem Necmiye Diksu'ya ve canım babam Adnan Diksu'ya sonsuz teşekkürlerimi ve minnetlerimi sunarım.

Şubat 2021

Sinan Diksu
Makine Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Hipotez	3
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	5
2.1 Eklemeli İmalat Teknolojisi Hakkında	5
2.1.1 Yazdırma özellikleri hakkında	6
2.1.2 Eklemeli imalat teknolojisi avantajları ve dezavantajları	8
2.1.3 Eklemeli imalat teknolojisi uygulama alanları	9
2.1.4 Eklemeli imalat teknolojisinin geleceği	10
2.2 Eklemeli İmalat Teknolojisi Yöntemleri	10
2.2.1 Eriyik biriktirme modelleme	11
2.2.2 Seçici lazer sinterleme	13
2.2.3 Direkt metal lazer sinterleme	14
2.2.4 Seçici lazerle ergitme	15
2.2.5 Stereolitgrafi	16
2.2.6 Poly jet-ink jet baskı	18
2.2.7 3DP	19
2.2.8 Lamine nesne imalatı	20
2.2.9 Lazerle tasarlanmış net şekillendirme	21
2.2.10 Elektron ışın kaynağı	22
2.3 FDM Yönteminde Kullanılan Malzemeler	22
2.3.1 Akrlonitril bütadien stiren	24
2.3.2 Termoplastik poliüretan	25
2.3.3 Karbon fiber	26
2.4 Kompozit Filament Çalışmaları Hakkında	26
3. FİLAMENT ÜRETİMİ	29
3.1 Filament Üretim Sisteminin Tanıtılması	29
3.1.1 Ekstrüzyon makinası	30
3.1.2 Kompaunder makinası	31
3.1.3 Soğutma havuzu	32
3.1.4 Çekici	33
3.1.5 Sarıcı	33

3.2 Filament Üretimi	34
3.2.1 Malzemeler.....	34
3.2.2 Üretimin basamakları	35
3.2.2.1 ABS filament üretimi	35
3.2.2.2 ABS ve karbon fiber tozu filament üretimi	37
3.2.2.3 ABS ve TPU filament üretimi	39
4. ÜÇ BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİM.....	43
4.1 Üç Boyutlu Yazıcının Bölümleri.....	43
4.1.1 Platform.....	44
4.1.2 Ekstrüder kafası.....	44
4.1.3 Motorlar.....	45
4.1.4 Kontrol paneli.....	46
4.2 Test Numunelerinin Üretilmesi	46
4.2.1 Üretim basamakları	46
4.2.2 Yazıcıdan baskı alınması.....	48
4.2.2.1 ABS numunelerinin basılması.....	48
4.2.2.2 ABS ve karbon fiber tozu kompozit filament test numuneleri.....	49
4.2.2.3 ABS ve TPU kompozit filament test numuneleri	49
5. ÖLÇÜM VE DENEY	51
5.1 Çap Ölçümü.....	51
5.2 Çekme Deneyi	53
5.2.1 Çekme deneyinin tanıtılması.....	56
5.2.2 ABS çekme deneyi.....	58
5.2.3 ABS ve KFT çekme deneyi.....	58
5.2.4 ABS ve TPU çekme testi.....	61
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	65
6.1 Sonuçlar.....	65
6.1.1 ABS ve KFT kompozit filament test sonuçları	65
6.1.2 ABS ve TPU kompozit filament test sonuçları	69
6.2 Öneriler.....	74
KAYNAKLAR.....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	81

KISALTMALAR

3DP	: Three Dimensions Printing
ABS	: Akrilonitril-Bütadien-Stiren
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CAD	: Computer Aided Design
DMLS	: Direkt Metal Laser Sintering
EBW	: Electron Beam Welding
FDM	: Fused Deposition Modeling
HIPS	: High Impact Polystyrene
ISO	: International Organization for Standardization
KFT	: Karbon Fiber Tozu
LENS	: Laser Engineered Net Shaping
LOM	: Laminated Object Manufacturing
PAN	: Poliakrilonitril
PC	: Polikarbonat
PET-G	: Polietilen Tereftalat Glikol
PP	: Polipropilen
PVA	: Polivinil Alkol
SAN	: Stiren Akrilonitril
SLA	: Stereolitografi
SLM	: Selective Laser Melting
SLS	: Selective Laser Sintering
STL	: Stereolithography
TPE	: Termoplastik Elastomer
TPU	: Termoplastik Poliüretan
UV	: Ultraviyole



SEMBOLLER

μ	: Uzunluk birimi
$^{\circ}\text{C}$: Sıcaklık birimi
D	: Çap ölçüsü
E	: Elastisite modülü
g	: Ağırlık birimi
L	: Uzunluk ölçüsü
m	: Uzunluk birimi
mm	: Uzunluk birimi
MPa	: Basınç birimi
Rpm	: Açısal hız birimi
ϵ_e	: Birim şekil değişimi
ϵ_k	: Kopmada birim şekil değişimi
U_R	: Rezilyans modülü
U_T	: Tokluk modülü
σ	: Gerilme değeri
σ_a	: Akmada gerilme değeri
σ_{maks}	: Maksimum gerilme değeri



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : ABS granülünün özellikleri.....	34
Çizelge 3.2 : TPU granülünün özellikleri.....	35
Çizelge 3.3 : Karbon fiber tozu özellikleri.	35
Çizelge 3.4 : ABS üretiminde kullanılan malzeme paketi.....	36
Çizelge 3.5 : ABS filament üretim parametreleri.	36
Çizelge 3.6 : ABS ve karbon fiber tozu bileşik oluşturma parametreleri.....	38
Çizelge 3.7 : Karbon fiber katkılı filamentte kullanılan malzeme paketi.....	38
Çizelge 3.8 : Karbon fiber tozu katkılı ABS filament üretim parametreleri.	39
Çizelge 3.9 : TPU katkılı filament için malzeme paketi.....	40
Çizelge 3.10 : ABS ve TPU filament için granül oluşturma üretim parametreleri. .	40
Çizelge 3.11 : TPU katkılı ABS kompozit filament üretim parametreleri.	41
Çizelge 4.1 : Katkısız ABS filament test numunesi üretim parametreleri.....	48
Çizelge 4.2 : ABS ve KFT kompozit filament test numunesi baskı parametreleri. .	49
Çizelge 4.3 : ABS ve TPU bileşik filament test numunesi baskı parametreleri.	50
Çizelge 5.1 : Üretilen filamentlerin çap ölçüm sonuçları.	51
Çizelge 5.2 : ABS test numuneleri çekme testi değerleri.	58
Çizelge 5.3 : ABS ve %1 KFT test numuneleri çekme testi değerleri.	59
Çizelge 5.4 : ABS ve %3 KFT test numuneleri çekme testi değerleri.	59
Çizelge 5.5 : ABS ve %5 KFT test numuneleri çekme testi değerleri.	60
Çizelge 5.6 : ABS ve %10 TPU test numuneleri çekme testi değerleri.	61
Çizelge 5.7 : ABS ve %20 TPU test numuneleri çekme testi değerleri.	62
Çizelge 5.8 : ABS ve %30 TPU test numuneleri çekme testi değerleri.	62



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Eriyik biriktirme modelleme yöntemi için granüller ve filamentler.	2
Şekil 2.1 : İlk stereolitgrafi cihazı [14].	6
Şekil 2.2 : Eklemeli imalat teknolojisi üretim adımları.	7
Şekil 2.3 : ASTM standartları eklemeli imalat teknolojisi sınıflandırma [48].	11
Şekil 2.4 : FDM cihazı [36].	12
Şekil 2.5 : SLS cihazı [24].	13
Şekil 2.6 : DMLS cihazı [46].	15
Şekil 2.7 : SLM cihazı [44].	16
Şekil 2.8 : SLA cihazı [41].	17
Şekil 2.9 : Poly jet cihazı [42].	19
Şekil 2.10 : 3DP cihazı [42].	20
Şekil 2.11 : LOM cihazı [42].	20
Şekil 2.12 : LENS cihazı [43].	22
Şekil 2.13 : Filament çeşitleri ve özellikleri.	24
Şekil 2.14 : ABS monomerleri [33].	25
Şekil 2.15 : BDO, HDI ve PEBA zincirleri [15].	25
Şekil 2.16 : TPU polimeri zincir yapısı [15].	26
Şekil 3.1 : Ekstrüzyon makinesi bölümleri.	30
Şekil 3.2 : Ekstrüzyon makinesi silindirin iç yapısı.	30
Şekil 3.3 : Kompaunder makinası bölümleri.	32
Şekil 3.4 : Ekstrüzyon işleminde kullanılan soğutma havuzu.	32
Şekil 3.5 : Ekstrüzyon yönteminde çekici.	33
Şekil 3.6 : Ekstrüzyon yönteminde bobin sarıcı.	34
Şekil 3.7 : (1) ABS granülleri, (2) karbon fiber tozu, (3) ABS ve KFT karışımı.	37
Şekil 3.8 : ABS ve karbon fiber tozu karışımından granül elde edilmesi.	38
Şekil 3.9 : % 10 karbon fiber tozu ile ABS kompozit filament denemesi.	39
Şekil 3.10 : Çalışmada üretilen filamentler.	41
Şekil 4.1 : Çalışmada kullanılan yazıcının özellikleri.	43
Şekil 4.2 : Çalışmada kullanılan üç boyutlu yazıcı.	44
Şekil 4.3 : Ekstrüder kafası ve yardımcı bölümleri.	45
Şekil 4.4 : Üç boyutlu yazıcı hareket motorları.	46
Şekil 4.5 : CAD programında tasarlanan test numunesi.	47
Şekil 4.6 : STL datasının G-kod programında baskıya hazırlama.	47
Şekil 4.7 : ABS test numuneleri.	48
Şekil 4.8 : ABS ve KFT kompozit filament test numuneleri.	49
Şekil 4.9 : ABS ve TPU kompozit filament test numuneleri.	50
Şekil 5.1 : ABS, ABS+TPU ve ABS+KFT çap ölçümleri.	51
Şekil 5.2 : ABS filament çap olasılık grafiği.	52
Şekil 5.3 : ABS ve TPU filament çap olasılık grafiği.	53
Şekil 5.4 : ABS ve KFT filament çap olasılık grafiği.	53
Şekil 5.5 : Gerilme-gerinim grafiği.	54

Şekil 5.6 : ASTM-D638 TİP-1 test numunesi boyutları.....	57
Şekil 5.7 : Çekme test cihazı.....	57
Şekil 5.8 : ABS gerilme-gerinim grafiği.....	58
Şekil 5.9 : ABS ve %1 KFT gerilme-gerinim grafiği.....	59
Şekil 5.10 : ABS ve %3 KFT gerilme-gerinim grafiği.....	60
Şekil 5.11 : ABS ve %5 KFT gerilme-gerinim grafiği.....	60
Şekil 5.12 : ABS ve %10 TPU gerilme-gerinim grafiği.....	61
Şekil 5.13 : ABS ve %20 TPU gerilme-gerinim grafiği.....	62
Şekil 5.14 : ABS ve 30% TPU gerilme-gerinim grafiği.....	63
Şekil 6.1 : ABS ve KFT test numunelerinin akma gerilmeleri.....	65
Şekil 6.2 : ABS ve KFT test numunelerinin elastisite modülleri.....	66
Şekil 6.3 : ABS ve KFT test numuneleri kopma gerilmeleri.....	67
Şekil 6.4 : ABS ve KFT test numuneleri boyca uzama yüzdeleri.....	68
Şekil 6.5 : ABS ve TPU test numuneleri akma gerilmeleri.....	70
Şekil 6.6 : ABS ve TPU test numuneleri elastisite modülleri.....	70
Şekil 6.7 : ABS ve TPU test numuneleri kopma gerilmeleri.....	71
Şekil 6.8 : ABS ve TPU test numuneleri boyca uzama yüzdeleri.....	72

EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİSİ ERİYİK BİRİKTİRME MODELLEME YÖNTEMİ İÇİN KOMPOZİT ABS FİLAMENT ÜRETİLMESİ VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Eklemeli imalat teknolojisi 1980'li yıllarda ortaya çıkan ve günümüzde klasik imalat yöntemlerinin tahtını sarsan bir üretim teknolojisidir. Genel olarak hızlı prototipleme ve hızlı üretim amacıyla kullanılmaktadır. Karmaşık geometriye sahip parçaların üretilmesi, kalıp yatırımı gerektirmemesi, hurda malzeme miktarının çok az olması ve sayıca düşük miktardaki ürünü daha kısa zamanda üretebilmesi gibi sunduğu avantajlar ile geleneksel imalat yöntemlerinin yerini almaya başlamıştır. Eklemeli imalat, malzemelerin birbirini üstüne biriktirilmesi prensibine dayanmaktadır. Bir platform üstünde üretilen ilk katman tamamlandıktan sonra diğer katmanlar dataya uygun bir şekilde bu katmanın üstüne biriktirilerek istenen ürün elde edilir. Eklemeli imalat teknolojisi yöntemlerinden biri de eriyik biriktirme modelleme yöntemidir. Bu yöntemde genel olarak polimer malzemeler kullanılır. Eriyik biriktirme modelleme yönteminde malzemenin kullanılabilmesi için filament şeklinde olması gerekmektedir. Bu filamentler genel olarak 1.75 mm ve 3.00 mm çapındadırlar. Polimer filamentler eriyik biriktirme modelleme yönteminde üç boyutlu baskı yapabilen bir yazıcıda kullanılarak parçaların üretilmesini sağlarlar.

Yapılan bu çalışmada katkı malzemeleri eklenerek kompozit ABS filament üretilmesi ve üretilen bu kompozit filamentlerin mekanik özelliklerinin katkısız bir şekilde üretilen ABS filamentinin mekanik özellikleri ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Karbon fiber tozu katkılı ABS filament üretilmesi ile ABS filamentin akma dayanımını artırmak hedeflenirken TPU katkısı ile de ABS filament üretilmesi uzama miktarını artırmak hedeflenmiştir.

Eriyik biriktirme modelleme yönteminde kullanılan filamentler plastik ekstrüzyon yöntemi ile üretilirler. Granül halindeki polimer hammadde ekstrüzyon makinesinde eriyik hale getirilerek belirlenen kalıptan sürekli bir şekilde geçirilerek üretim gerçekleştirilir. Kalıptan çıkan malzeme bir çekici yardımı ile çekilir ve bir sarıcı yardımı ile bobine sarılır. Bobine sarılmış haldeki malzeme üç boyutlu yazıcı için kullanıma hazır hale gelmiş olur. Çalışmada ABS granülleri katkısız bir şekilde ekstrüzyon makinesinde kalıptan sürekli geçirilerek ABS filament üretilmiştir.

Plastik ekstrüzyon yönteminde katkılı malzemelerin kullanılması bir kompozit oluşturma makinesi yardımı ile gerçekleştirilir. Kompozit oluşturma makinesi ekstrüzyon makinesi ile aynı işlevdedir. Farkı ise çift vidalı olması ve bir kırıcı yardımı ile kalıptan geçirilen malzemenin tekrar granül hale getirilebilmesidir. Çalışmada ABS granülleri karbon fiber tozu ile karıştırılarak kompozit oluşturma makinesinde kalıptan geçirilmiştir ve kırıcı tekrar granül hale dönüştürülmüştür. Elde edilen bu granüller plastik ekstrüzyon makinesinde kullanılarak karbon fiber tozu katkılı ABS filament elde edilmiştir. Karbon fiber tozu ağırlıkça farklı yüzdelerde kullanılmıştır. Bu yüzdeler sırasıyla %1, %3 ve %5 olmuştur. Benzer çalışma ABS granülleri ve TPU granülleri ile de gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında TPU granülleri eklenen ABS granülleri kompozit oluşturma makinesinde kalıptan geçirildikten sonra kırıcı yardımı ile tekrar bileşik granüller elde edilmiştir. Bu granüller ekstrüzyon makinesinde kullanılarak TPU katkılı kompozit ABS filamentleri elde edilmiştir.

Filamentlerin üretimleri 1.75 mm ölçüsünde çap hedeflenerek gerçekleştirilmiştir. Bu ölçüdeki çapı elde etmek için uygun kalıp ve çekim uygulanmıştır. Katkısız ABS filamenti için yapılan ölçüm ile ortalama çap 1.73 mm olarak bulunmuştur ve standart sapması 0.08 olarak elde edilmiştir. TPU katkılı filamentlerde bu ölçümler sırasıyla %10, %20 ve %30 için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ortalama çaplar ise 1.73 mm, 1.73 mm ve 1.72 mm olarak bulunmuştur. Standart sapmalar ise 0.07, 0.08 ve 0.06 olmuştur. Karbon fiber tozu katkılı filamentlerde yapılan ölçüm sonuçları ise %1, %3 ve %5 için sırasıyla 1.73 mm, 1.75 mm ve 1.72 mm olarak bulunmuştur. Standart sapmalar üç oranda da 0.07 olarak elde edilmiştir.

Elde edilen bu filamentlere çekme dayanım testi uygulanmıştır. Testin gerçekleştirilebilmesi için ASTM-D638 TİP-1 göre test numuneleri gereklidir. Bir üç boyutlu yazıcı kullanılarak üretilen filamentler ile bu numunelere basılmıştır. Her filament için 5 adet test numunesi hazırlanmıştır.

Yapılan çekme testi sonucunda beklenen bir artış karbon fiber tozu katkılı filamentlerin akma dayanımı ve kopma dayanımı değerlerinde gerçekleşmiştir. Elastisite modülleri genel olarak artış gösterirken yüzde uzama değerleri katkısız ABS filamentine göre azalmıştır.

TPU granülleri eklenerek üretilen filamentlerde ise akma dayanımı, elastisite modülü ve kopma dayanımlarında genel olarak bir azalış elde edilmiştir. Çalışmadan beklenen boca yüzde uzamalarda artış TPU katkılı filamentlerin test numunelerinde elde edilmiştir.

PRODUCTION OF COMPOSITE ABS FILAMENT FOR FUSED DEPOSITION MODELING OF ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY AND INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES

SUMMARY

Additive manufacturing technology is a production technology that was found in the 1980s and has started to replace classical manufacturing methods today. It is generally used for rapid prototyping and rapid production. It has started to replace traditional manufacturing methods with the advantages it offers such as the ability to produce parts with complex geometry, do not require mold investment, the amount of scrap material is very small, and the production of a small amount of products in a shorter time. Additive manufacturing is based on the principle of accumulating materials on top of each other. After the first layer produced on a platform is completed, the other layers are deposited on this layer in accordance with the data and the desired product is obtained. One of the additive manufacturing technology methods is the fused deposition modeling method. In order to use the material in the fused deposition modeling method, it must be in the form of a filament. These filaments are generally 1.75 mm and 3.00 mm in diameter. One of these two diameters is preferred according to the purpose of use. In general, the most commonly used diameter is 1.75 mm. Polymer filaments are used in a three-dimensional printer in the fused deposition modeling method to produce parts. In this study, it is aimed to produce composite ABS filament by adding additives and to compare the mechanical properties of these composite filaments with the mechanical properties of the produced ABS filament without additives. With the production of ABS filaments with the addition of carbon fiber powder, it is aimed to increase the yield strength and rigidity of the ABS filament. With ABS produced by adding TPU granules, it is aimed to increase the percentage elongation and flexibility of the filament.

Polymer filaments used in the fused deposition modeling method are produced by the plastic extrusion method. The granular polymer raw material is placed in the funnel of the extrusion machine. With the rotation of the screw, the raw material is carried inside the extrusion machine and the material is started to be heated. The material turns into a molten state with the heat applied by resistances and the pressure that occur during transportation. The molten material is continuously pulled from the mold and the desired production is realized. By applying continuous pulling, the material coming out of the mold is wrapped in a bobbin with the help of a wrapper. The material wrapped in the bobbin is ready for use in three-dimensional printer. One of the filaments produced in the study was produced by continuously passing the ABS granules through the extrusion machine without additives. This filament was used as a reference filament.

The use of additive materials in the plastic extrusion method is carried out with the help of a compound forming machine. The compounding machine is the same as the extruder. The difference is that it has a double screw and the material passed through

the mold with the help of a crusher can be granulated again. In the study, ABS granules were mixed with carbon fiber powder and passed through the mold in a compounding machine and the crusher was turned into granules again. The obtained granules were used in a plastic extrusion machine and ABS filament with carbon fiber powder was obtained. Carbon fiber powder was used in different percentages by weight. These percentages were 1%, 3% and 5%, respectively. Similar work has been carried out with ABS granules and TPU granules. After the ABS granules added with TPU granules in the ratio of 10%, 20% and 30% by weight, they were molded in the compounding machine and then compound granules were obtained again with the help of a crusher. TPU-reinforced ABS filaments were obtained by using these granules in the extrusion machine.

The production of the filaments was carried out aiming at a diameter of 1.75 mm. A mold with a 3 mm diameter hole was used to obtain this diameter. The drawing speed was adjusted to the speed required to reduce the diameter of the material coming out of the mold to 1.75 mm. Average diameter was found to be 1.73 mm with the measurement for the pure ABS filament and its standard deviation was obtained as 0.08. For filaments with TPU added, these measurements were made for 10%, 20% and 30% additive by weight, respectively. The average diameters obtained were found to be 1.73 mm, 1.73 mm and 1.72 mm. Standard deviations were 0.07, 0.08 and 0.06. The measurement results for carbon fiber powder-reinforced filaments were found to be 1.73 mm, 1.75 mm and 1.72 mm for 1%, 3% and 5%, respectively. Standard deviations were obtained as 0.07 in all three proportions.

Mechanical properties of these filaments were compared by applying tensile strength test. There are two most commonly applied standards for tensile testing of polymer materials in international standards. These standards are ASTM D638 and ISO 527. The tensile test performed in this study was performed for ASTM D638 TYPE 1. Test samples in a CAD program are designed in accordance with the standard. Then, the CAD data is converted into STL format. The data in the form of STL format, G-Code was created with the help of a computer program for a three-dimensional printer to generate this data. The data ready for production was produced with a three-dimensional printer. 5 test samples were prepared for each filament produced.

The first tests were carried out for ABS filament without additives. The average values of the results of these samples are taken as reference values. Yield strength, modulus of elasticity, tensile strength and percent elongation values of the samples were obtained through the tests.

The tests continued with test samples made of ABS filaments with carbon fiber powder added. There was an increase in yield strength and tensile strength of all filaments to which three different percentages of carbon fiber powder were added. The modulus of elasticity of the filaments with 1%, 3% and 5% carbon fiber powder added by weight increased. Percentage elongation values obtained for filaments with these three different additive percentages were lower than the percentage elongation value of the ABS filament without additives.

This tensile test was carried out on test samples made of filaments made of a mixture of TPU granules and ABS granules. The yield strength of the ABS filament with 20% and 30% TPU added by weight decreased compared to the pure ABS filament. On the contrary, the yield strength of the ABS filament, to which 10% TPU was added by weight, increased compared to the pure ABS filament. The same situation occurred for the tensile strength of the filaments. When the elasticity modules were examined, there

was an increase in module of filament with 10% contribution, while the modulus of the filaments with 20% and 30% contribution decreased. When the percentage elongations were compared, an increase was observed in the percentage elongation of the filament in each additive ratio.

Considering the results in general, a higher yield strength and more rigid composite ABS filament was produced with the carbon fiber powder additive. When the ABS filaments with TPU added are examined, it is seen that more flexible filaments with higher percentage elongation are produced.





1. GİRİŞ

Eklemeli imalat teknolojisi 1980'li yılların ortalarında ortaya çıkmıştır[14]. Bu teknoloji kullanılan malzemelerin katmanlar halinde birbirine eklenmesi sonucu istenilen şekillerin meydana gelmesini sağlar. Geleneksel yöntemlerin aksine malzemeleri kaldırarak değil malzemeleri birleştirerek istenilen şekle ulaşılır. Eklemeli imalat teknolojisi uygulama alanı olarak iki temel başlıkta toplanır. Bunlardan biri hızlı prototipleme ve diğeri hızlı üretilimdir [13]. Hızlı prototipleme ile istenilen parçanın ya konsept prototiplemesi yapılır ya da teknik testler için fonksiyonel prototipi oluşturulur.

Tasarımcılar ve iş paydaşları tasarımı yapılan parçaların final tasarımı tamamlanmadan önce bir obje olarak tasarımı görmek istemektedirler. Buna benzer olarak endüstriyel tasarımcılar eskizlerden kurtulup üç boyutlu bir şekilde tasarımlarını canlandırmayı hedeflerler. Mimarlar ve mimarlık eğitimi alan öğrenciler maketlerine ve projelerine daha kısa sürede ulaşabilmeyi istemektedirler. Çağımızda insanlar fikirlerini, tasarımlarını ve çalışmalarını görselleştirme yolunda ilerlemektedirler. Bu sayede elde ettikleri görsel objeleri fikirlerini daha etkili anlatabilmek için kullanırlar. Eklemeli imalat teknolojisi yöntemlerinden kendileri için uygun olanı seçerek konsept prototiplerini oluşturmak için kullanabilirler.

Havacılıkta, otomotiv sektöründe ve daha birçok alanda teknik hesaplamaların basite indirgenemebilmesi, teorik hesapların doğruluğuna ulaşılabilmesi ve birçok analizin gerçekleştirilebilmesi için teknik prototipleme gerçekleştirmektedirler. Eklemeli imalat teknolojisi yöntemleri ile fonksiyonel prototipleme yaparak teknik prototipler oluşturulabilir.

Hızlı prototipleme ile prototip için kalıpların yapılmasına gerek kalmamaktadır. Böylece kalıp için harcanan zamandan tasarruf edilir ve prototip maliyeti düşürülmüş olur. Prototip için harcanan işçi gücü azalır ve oluşturulan prototipin kalitesi artar.

Eklemeli imalat teknolojisi yöntemlerinin gelişmesi ve malzeme çeşitliliğinin artması ile birlikte eklemeli imalat yöntemleri ile son ürüne de ulaşılabilir. Bu durum

eklemeli imalat teknolojisi uygulama alanlarında hızlı üretimi kapsamaktadır. Günümüzde havacılık, inşaat, otomotiv ve medikal sektörleri eklemeli imalat yöntemlerini kullanarak hızlı üretim gerçekleştirmektedirler. Montaj için gerekli olan parçaların üretilmesinin yanı sıra son ürün olarak da parçalar üretilip müşterilere ulaştırılmaktadır. Gelişen teknoloji eklemeli imalat yöntemlerinde yeni çalışmalara yol açacak ve bulunacak yeni malzemeler ile eklemeli imalat yöntemleri daha etkin hale gelecektir.

1.1 Tezin Amacı

Eklemeli imalat teknolojisi yöntemlerinden biri de eriyik biriktirme modellemesidir. Bu yöntem, polimer malzemelerden elde edilen filamentleri kullanarak üretim gerçekleştirir. Bu polimerlerden bazıları ABS, PLA, PET-G, PC, PP ve TPE'dir. Bu çalışmada eriyik biriktirme modelleme yöntemi için ABS polimer granülleri kullanılarak ABS filament ve ABS kompozit filament üretimi gerçekleştirilecektir. Üretilen bu filamentler eriyik biriktirerek modellemeyi gerçekleştirebilmek için bir üç boyutlu yazıcıda kullanılacaktır. ABS filamentleri ile üç boyutlu yazıcıda üretilen test numuneleri referans olarak kullanılacaktır. Karbon fiber tozu katkısı yapılarak üretilen ABS filamentler ile ABS filamentin rijitliğinin artırılması, TPU eklenerek üretilen ABS filamentler ile de ABS filamentin esnekliğinin artırılması amaçlanmıştır.



Şekil 1.1 : Eriyik biriktirme modelleme yöntemi için granüller ve filamentler.

1.2 Hipotez

Bu çalışmada iki hipotez sunulacaktır. Bu hipotezler polimer granüller kullanılarak üretilen kompozit ABS filamentler ile ilgilidir. Bu hipotezlerden birincisi üretilen kompozit ABS filamentlerden ABS polimer granülü ve karbon fiber tozu kullanılarak üretilen filamentlere aittir. Belirlenen oranlarda karıştırılan ABS ve karbon fiber tozundan elde edilen kompozit granüller ekstrüder cihazında kompozit filament olarak üretilmektedir. Üretilen bu kompozit filamentin mekanik özellikleri katkısız ABS granülünden üretilen filamentin mekanik özellikleri ile karşılaştırılacaktır. Elde edilen kompozit filament ile üretilen test numunelerine çekme testi uygulanacaktır. Bu test sonucunda KFT ve ABS kompozit filamentin referans olarak üretilen ABS filamentine göre elastik bölgede oluşacak akma dayanımının artması, rijitliğinin yükselmesi beklenirken boyca yüzde uzamalarının azalması beklenmektedir.

Çalışmada değerlendirilen ikinci hipotez ise ABS granülü ve TPU granülünden elde edilen bileşik granülden üretilen bileşik ABS filamentine ilgilidir. Belirli oranlarda karıştırılan ABS ve TPU granüllerinden elde edilen filamentlere çekme testi uygulanacaktır. Bu test sonucunda filamentin katkısız ABS filamentine göre elastisite modülünün düşmesi ve ABS filamentin esnekliğinin artması beklenmektedir. TPU katkılı filamentlerinin kopma uzamasının artması sonucu boyca yüzde uzamasının katkısız ABS filamentine göre daha yüksek çıkması beklenmektedir.

Ortaya koyulan hipotezlerin birincisi ile katkısız ABS filamentine göre daha yüksek bir dayanıma sahip kompozit filament elde etmek amaçlanırken ikinci hipotez ile termoplastik poliüretan granülleri kullanılan filamentin katkısız ABS filamentinden daha esnek ve rijitliği daha düşük bir filament elde etmek amaçlanmıştır.



2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Çalışmanın bu bölümünde eklemeli imalat teknolojisi hakkında literatür çalışması yapılmıştır. Eklemeli imalat teknolojisi ve yöntemleri tanıtılacak, avantajları ve dezavantajlarından bahsedilecek, uygulama alanları hakkında bilgiler verilecektir. Bu yöntemlerden biri olan eriyik biriktirme modelleme 'FDM' yöntemi için kullanılan malzemelere değinilecek ve yapılan çalışmalardan bahsedilecektir.

2.1 Eklemeli İmalat Teknolojisi Hakkında

Eklemeli imalat teknolojisi genel olarak malzemelerin biriktirilmesi birbirine eklenmesi prensibine dayanır. Malzemelerin bir düzlem üzerinde katman katman biriktirilerek nihai parçanın oluşturulması işlemidir. Bu teknolojinin doğadan esinlenişine deniz kabuklarının ve kayaların oluşması örnek olarak verilebilir. Düzlemde oluşturulan katmanların üst üste biriktirilmesi ile üçüncü boyut elde edilir. Bundan dolayı bu teknoloji üç boyutlu baskı teknolojisi olarak da adlandırılır. Günümüzde prototipleme için yaygın bir şekilde kullanılışından dolayı hızlı prototipleme teknolojisi olarak da isimlendirilmektedir.

Eklemeli imalat teknolojilerinin ortaya çıkmasına bilgisayarlardaki, lazer teknolojilerindeki, kontrol sistemlerindeki ve yazılım programlarındaki gelişmeler yardımcı olmuştur. 1984 yılına gelindiğinde Fransa'da Andre ve arkadaşları, Japonya'da Murutani ve Amerika'da Hull birbirine oldukça benzer yöntemler için patent başvurularını gerçekleştirdiler. Bu patentlerin ortak noktası bir üç boyutlu parçanın üretilmesi için malzemenin katmanlar halinde biriktirilmesinden bahsetmeleriydi. Eklemeli imalat teknolojisinde stereolitografi cihazı ile ticari girişimi başaran ilk şirket 3D Systems olmuştur [14]. Malzeme olarak fotopolimer reçineyi kullandılar. Bu reçineyi ultraviyole ışınlar ile kürleştirerek istedikleri parçaları üretmeyi başardılar. Bu cihazın üretilmesi ve başarılı bir şekilde kullanılması eklemeli imalat teknolojisinin başlangıcını oluşturmuştur. İlk eklemeli imalat teknolojisi cihazı stereolitografiyi Şekil 2.1' de paylaşılmıştır. Diğer tarafta ise bu teknoloji ile ilgili çalışmalar devam etmiştir. Diğer araştırmacılar farklı yöntemler için çalışmalar ortaya koymuşlardır.

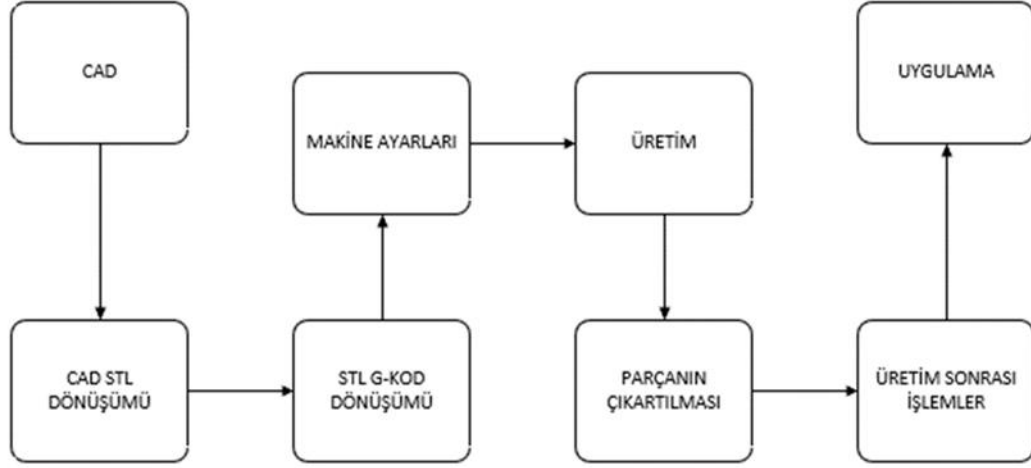


Şekil 2.1 : İlk stereolitografi cihazı [14].

1986 yılına gelindiğinde seçici lazer sinterleme yöntemi patenti ile DTM şirketi, lamine nesne üretimi yöntemi patenti ile Helisys şirketi ve katı zeminde kütleme patenti ile Cubital şirketi kurulmuştur. Günümüzde bu şirketlerden sadece seçici lazer sinterleme yöntemini bulan DTM, 2001 yılında 3D Systems bünyesine katılarak ticari faaliyetlerini devam ettirmektedir. Eriyik biriktirme modelleme yöntemini 1989 yılında Scott Crump patentleyerek Stratasys şirketini kurmuştur. Aynı yıl MIT’te bir grup araştırmacı üç boyutlu yazdırma (3DP) yönteminin patentini almışlardır. Bu araştırmacılar şirket kurmak yerine patentlerini eklemeli imalat teknolojisini ile ilgilenmek isteyen şirketlere lisanslamışlardır. Mürekkep püskürtme yöntemini 1994 yılına gelindiğinde Sanders bulmuştur. 2001 yılında ise Objet şirketi bu yöntemi reçineyi damlalar halinde püskürterek yazdırma işlemi yapmak için kullanmıştır. 2010 yılına gelindiğinde eklemeli imalat teknolojisindeki patentlerin sürelerinin sona ermesi bu teknolojiye yöntemlerin gelişimini hızlandırmış ve kullanıcı sayısının artması neden olmuştur [14].

2.1.1 Yazdırma özellikleri hakkında

Eklemeli imalat teknolojisinin yöntemlerinden herhangi biri ile bir parçanın basılabilmesi veya bir nesnenin üretilmesi için izlenmesi gereken adımlar genel olarak Şekil 2.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Eklemeli imalat teknolojisi üretim adımları.

Bilgisayar destekli bir tasarım programı, CAD programı, kullanılarak parça üç boyutlu şekilde tasarlanır. Diğer bir seçenek olarak da üretilmesi istenen parça üç boyutlu tarayıcılar kullanılarak parçanın geometrisi dijital ortama aktarılır. Elde edilen üç boyutlu data STL formatına dönüştürülür. STL formatına dönüştürme ile parçanın yüzeyleri üçgen parçalar şeklinde dilimlenir. Dilimleme işleminden sonra kullanılacak eklemeli imalat yöntem cihazına uygun bir G-Kod'a dönüştürülür. G-Kod ile parça cihaz üzerinde konumlandırılır ve parçanın üretim aşamaları için bir yol haritası çizilir. Cihazın sıcaklık, yazdırma hızı, enerji yoğunluğu gibi diğer makina ayarları da yapıldıktan sonra yazdırma işlemine başlanır. Parçanın üretimi tamamlandıktan sonra parça bağlı olduğu platformdan çıkartılır. Temizleme işlemleri, destek yapıların ana yapıdan ayırma işlemleri gerçekleştirilir. Parça nihai ürün haline gelmiş olur. Parçanın kullanılacağı yere göre boyama, yüzey işlemleri veya montaj işlemleri yapılır.

STL formatı stereolitgrafi teknolojisinde kullanılan dosya formatıdır. Bu format daha sonra diğer eklemeli imalat teknolojilerinde de kullanılmıştır. Birçok CAD programı datalarını STL formatına kendileri dönüştürebilmektedirler. STL formatı tasarlanmış olan üç boyutlu parçanın yüzeylerini bir matematiksel kural doğrultusunda çok sayıda üçgen parçaya dilimler. Üçgenlerin ve onların normaliyle sahip olduğu üç nokta ile CAD datanın ayınsını oluştururlar. STL formatındaki datanın üçgen sayısı arttıkça daha fazla detay ve çözünürlük elde edilmiş olur. STL formatındaki data daha sonra kullanılacak cihaza göre uygun üretim koduna çevrilir. Üretim kodu ile STL formatındaki datanın cihaz üzerindeki konumlandırılması yapılır ve işlem basamakları belirlenmiş olur.

Eklemeli imalat teknolojisi yöntemlerinin yazdırma özellikleri arasında öncelikli olarak yazdırma süresi gelir. Üretim süresi kullanılan yöntem ve kullanılan yöntemde seçilen yazdırma hızına göre değişir. Parçanın boyutu, herbir katmanın kalınlığı ve parçanın cihazın platformundaki konumlandırılma şekli imalat süresini etkileyen faktörler arasındadır. Üretilecek parçanın çözünürlüğü de yazdırma özellikleri arasında yer almaktadır. Parça için istenilen çözünürlüğe göre eklemeli imalat teknolojisi yöntem tercihi değişebilir. Seçilen yöntemde ise talep edilen çözünürlük doğrultusunda parçanın üretimi için farklı malzemeler kullanılır. Üretilen parçaların yüzey kalitesi de bir diğer yazdırma özelliği olarak kabul edilir. Üretilecek parçalarda daha yüksek yüzey kalitesi isteniyorsa parçalar üretilirken katmanların kalınlığının daha ince olarak seçilmesi gerekmektedir. Daha ince kalınlıktaki katmanlar üretilecek parça için daha çok katman atılması ve parçanın yüzey kalitesinin daha iyi olması demektir. Karmaşık geometriye sahip parçaların üretilebilmesi için destek yapıları kullanılır. Bu destek yapıları üretim bitene kadar esas parçaya eşlik ederler. Parçanın basımı bittikten sonra destek yapıları temizle-nerek nihai parçaya ulaşılır. Bu yüzden destek yapılarının parçanın üretiminden sonra parçaya zarar vermeden sökülebilmesi için parçanın cihaz platformundaki konumlandırılması işlemi doğru bir şekilde yapılmalıdır.

2.1.2 Eklemeli imalat teknolojisi avantajları ve dezavantajları

Eklemeli imalat teknolojisi, üretilecek parçaların tasarım aşamasında tasarımcılara ve kullanıcılara büyük bir tasarım esnekliği avantajı sağlar. Geleneksel imalat yöntemlerinde üretim için gerekli olan kesici takımlar ve üretime yardımcı olan fikstürlere, maçalara eklemeli imalat teknolojisinde gerek yoktur. Böylelikle tasarımcılar parçaların üretilebilirliklerine göre tasarımlarını oluşturmak yerine istedikleri gibi tasarımlarını gerçekleştirebilirler. Ayrıca karmaşık geometriye sahip parçaların üretilebilmesine imkan tanırırlar. Böylece bir ürünün son hale gelmesi için birden fazla parçaya ayrılarak üretilmesi ve bu ayrı ayrı üretilen parçaların son ürünü oluşturmak için gerekli olan montaj işlemlerinin yapılması ortadan kalkar. İstenilen tasarımı tek parça olarak üretme imkanı sağlar. Eklemeli imalat teknolojisinde üretimin gerçekleşebilmesi için kalıp yatırımına gerek yoktur. Kalıp maliyetinin ortadan kalkması ile parçanın birim maliyetinde fiyat avantajı sağlanır. Üretimin gerçekleştirilebilmesi için kalıp tasarım ve üretim işlemlerinin beklenmemesi ile de zamandan tasarruf edilir. Eklemeli imalat teknolojisi yöntemleri genel olarak ele

alındığında sağladıkları avantajlardan en önemlisi de çevre dostu olmalarıdır. Bu dostluğu üretim için daha az enerji tüketerek ve üretim sonrası daha az hurda malzeme oluşmasını sağlayarak elde ederler. Ayrıca daha az enerji tüketilmesi ve daha az hurda malzeme oluşması parça başına maliyeti de etkilemektedir.

Bu teknolojinin ortaya çıkmaya başladığı zamanlarda ve yakın zamana kadar cihazlar genel olarak prototipler üretmek için kullanılmışlardır. Bu yüzden üretimlerde tolerans aralıkları geniş tutulmuş ve yeteri kadar önemsenmemiştir. Bunun sonucun olarak da eklemeli imalat yöntemleri ile üretilen parçaların boyutsal doğrulukları düşük çıkmaktadır. Geleneksel imalat yöntemlerinde olduğu gibi tolerans standartları gelişmemiştir. Eklemeli imalat teknolojilerinde belirli tasarım kuralları yoktur ve elde edilen en iyi sonuçlar standartlaştırılmamıştır. Aynı data ile farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip parçalar elde edilebilir [12]. Eklemeli imalat yöntemleri her ne kadar karmaşık yapıya sahip parçaların üretilmesi için uygun olsa da ince detayların üretilmesi için et kalınlığı sınırlayıcı bir etkidir. Çünkü üretilen parçaların et kalınlığı ekstrüzyon kafasındaki nozul çapına, lazer çapına veya püskürtülen damlacık boyutuna bağlıdır. Üretim süresi düşük adetteki üretim-ler için avantaj sağlasa da eklemeli imalat yöntemleri seri üretim için uygun imalat süresine sahip değildir.

2.1.3 Eklemeli imalat teknolojisi uygulama alanları

Eklemeli imalat teknolojilerinde yapılan araştırmalar ve çalışmalar sonucunda çok çeşitli yöntemler ortaya çıkmıştır. Bu yöntemlerin ortaya çıkması ile sağladıkları avantajlar birçok sektörün dikkatini çekmeyi başarmıştır. Günümüzde havacılık, otomotiv ve medikal sektörleri aktif olarak ürünlerini, parçalarını üretmek ve çalışmalarını gerçekleştirmek için eklemeli imalat teknolojilerini kullanmaya başlamışlardır. Medikal sektöründe bireylere ait datalar üç boyutlu ultrason veya bilgisayar destekli tomografi cihazları ile elde edilmektedir. Elde edilen bu datalar eklemeli imalat yöntemleri ile üretilerek bu sektör için kullanılmaktadır. Otomotiv sektöründe de çeşitli parçaların prototipleri ve nihai ürünler için bu yöntemler kullanılmaktadır. Çeşitli konsol parçaları, fren pedalı, direksiyon ve motor blokları üretilen ürünlerden birkaçıdır. Havacılık sektöründe motor parçaları eklemeli imalat yöntemleri ile üretilmeye başlanmıştır. Bu sektörlerin yanı sıra günümüzde eklemeli imalat yöntemleri ile inşaat sektöründe yapılar oluşturulmaktadır. Mimarlar maketlerini daha kısa sürede yapabilmek, fikirlerini daha iyi açıklayabilmek ve

figürleri daha iyi vurgulayabilmek için eklemeli imalat yöntemlerini kullanmaktadır. Ayrıca sanat alanında ve hobicilikte de bu yöntemler kullanılmaktadır. Akademilerde ve araştırma merkezlerinde bilimsel araştırmalar için gerekli olan prototiplerin yapılması, endüstrilerde yeni ürün tasarımlarının prototipleri için bu teknolojinin kullanımı büyük bir oranda yer bulmaktadır. Müşterilerden gelen özel talepler doğrultusunda talepleri karşılayabilmek için yiyecek tasarımlarının da yapılmasında gıda sektörü eklemeli imalat teknolojisini kullanmaya başlamışlardır.

2.1.4 Eklemeli imalat teknolojisinin geleceği

Bu teknoloji için geleceğe yönelik beklentiler oldukça fazladır. Karmaşık geometriye sahip parçaların destek yapılarına ihtiyaç duymadan üretilmesi bu beklentilerden biridir. Bu sayede destek yapıları üretilmediği için imalat süresi kısalacak, enerji tasarrufu sağlanacak ve daha az malzeme kullanılacaktır. Bu teknolojideki gelişmeler sonucunda makine yatırım maliyetlerinin azalması beklenmektedir. Dezavantajlardan biri olan kullanılabilen malzeme çeşidinin sınırlı olması yapılacak araştırmalar ve çalışmalar sonucunda bulunacak yeni malzemeler ile ortadan kalkacaktır. Eklemeli imalat teknolojisi üretim adedi az olan üretimler için zamandan tasarruf sağlarken seri üretimler için uygun değildir. Yapılacak çalışmalar ve geliştirilen teknolojiler bu yöntemleri seri üretime uygun hale getirecektir. Yeni teknolojiler ve yeni malzemeler ile daha hafif, dayanımı daha yüksek, yüzey kalitesi ve baskı çözünürlüğü daha iyi olan parçaların basılabilmesi ile tüm sektörlerde kullanım alanları artacaktır. En önemli ihtiyaçlardan biri de eklemeli imalat yöntemleri için geliştirilecek olan standartlardır. Böylece bu teknolojinin tolerans aralıkları belirlenmiş olacak ve üretilen parçaların boyutsal doğruları artarken kararlı bir hale gelmiş olacaktır.

2.2 Eklemeli İmalat Teknolojisi Yöntemleri

Yapılan araştırmalar ve gelişen teknolojiler ile birlikte eklemeli imalat teknolojisi yöntemlerine zamanla farklı yöntemlerin katılması ile gelişme kaydetmiştir. Gelenen bu noktada eklemeli imalat teknolojisi dört ana patent üstüne kurulmuştur. Bunlar fotopolimerizasyon, malzeme ekstrüzyonu, toz füzyonu ve bağlayıcı püskürtme teknikleridir [6, 8, 16, 45]. ASTM eklemeli imalat teknolojisi yöntemlerini 7 kategoriye ayırmıştır. Bunlar Şekil 2.3.'te görüldüğü üzere sırasıyla malzeme

ekstrüzyonu, toz yatak füzyonu, fotopolimerizasyon, malzeme püskürtme, bağlayıcı püskürtme, tabaka laminasyonu ve yönlendirilmiş enerji birikimidir [48].

Yöntem	Teknoloji	Kullanılan Malzeme	Kullanılan Enerji
Malzeme Ekstrüzyonu	Eriyik Biriktirme Modelleme (FDM)	Termoplastik	Termal Enerji
		Seramik Çamurları	
		Metal Macunları	
Toz Füzyonu	Seçici Lazer Sinterleme (SLS)	Poliamid/Polimerler	Yüksek Güçte Lazer Işını
	Direkt Metal Lazer Sinterleme (DMLS)	Metal Tozları	
	Seçici Lazer Eritme (SLM)	Seramik Tozları	Elektron Işını
	Elektron Işını Eritme (EBM)		
Fotopolimerizasyon	Stereolitografi (SLA)	Fotopolimer	Ultraviyole Lazer
		Seramikler	
Malzeme Püskürtme	Polyjet-Inkjet Baskı	Fotopolimer	Termal Enerji
		Vaks	
Bağlayıcı Püskürtme	Dolaylı Mürekkep Püskürtmeli Baskı (Binder 3DP)	Polimer Tozları	Termal Enerji
		Seramik Tozları	
		Metal Tozları	
Katman Laminasyonu	Lamine Nesne İmalatı (LOM)	Polimer Film	Lazer Işını
		Metal Sac	
		Seramik Bant	
Yönlendirilmiş Enerji Birikimi	Lazerle Tasarlanmış Net Şekil (LENS)	Erimiş Metal Tozu	Lazer Işını
	Elektronik Işın Kaynağı (EBW)		

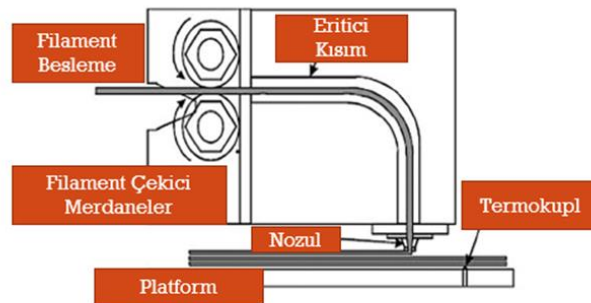
Şekil 2.3 : ASTM standartları eklemeli imalat teknolojisi sınıflandırma [48].

2.2.1 Eriyik biriktirme modelleme

Üç boyutlu baskı teknolojisi Steven Scott Crump tarafından 1989 yılında geliştirildikten sonra ilerleyen çalışmalar sonucu 1992 yılında Stratasys firmasıyla ilk ticari boyuttaki FDM cihazı pazarlanmaya başlandı. Eklemeli imalat teknolojisi yöntemlerinden eriyik biriktirme modelleme yönteminde üretimin gerçekleşebilmesi için ilk önce tasarım datasına ihtiyaç vardır. Bir CAD programında tasarlanan parçanın datası STL formatına çevrilir. Daha sonra STL formatındaki bu data parçanın platform üzerindeki konumlandırılmasının yapılabilmesi ve işlem basamaklarının belirlenebilmesi için üretim koduna dönüştürülür. Üretim için gerekli olan data istenilen formata dönüştürüldükten sonra cihaz üretim için hazır hale getirilmelidir. İlk katmanın üzerine inşa edileceği cihazın tablası kullanılacak malzemeye göre belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve üretim boyunca bu sıcaklıkta kalması istenir. Bunun sebebi basılacak ilk katmanın cihazın platformunun yüzeyine tutunmasına yardımcı olmak ve üretim boyunca doğru bir baskı için ilk katmanın yüzeyde sabit kalmasını sağlamaktır. Platformun ısınması gerçekleşirken aynı zamanda eriyik malzemeyi basacak ekstrüder kafası da malzemenin özelliğine göre belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır ve üretim

boyunca bu sıcaklıkta sabit kalması istenir. Bu yöntemde üretimde kullanılan malzeme filament şeklindedir. Bir bobine sarılmış olan malzeme ekstrüder kafasındaki bir motor yardımı ile çekilir. Ekstrüder kafasında uygun sıcaklıkta eriyik hale gelen bu malzemeyi ekstrüder kafası dataya uygun bir şekilde ilk katmanın iki boyutta basmaya başlar. İlk katmanın basımı tamamlandıktan sonra ekstrüder kafası bir katman kalınlığında yükselir ve yeni katmanı biten katmanın üstüne basar. Datadaki parçanın yüksekliği elde edilene kadar imalat süreci bu şekilde katman katman ilerler. Parçanın geometrisine ve cihazda konumlandırılmasına göre bazı katmanların basılabilmesi için destek yapıları üretim sırasında basılmaktadır. Bu destek parçaları parçanın üretimi bittikten sonra kolaylıkla parçadan ayrılarak temizlenebilirler.

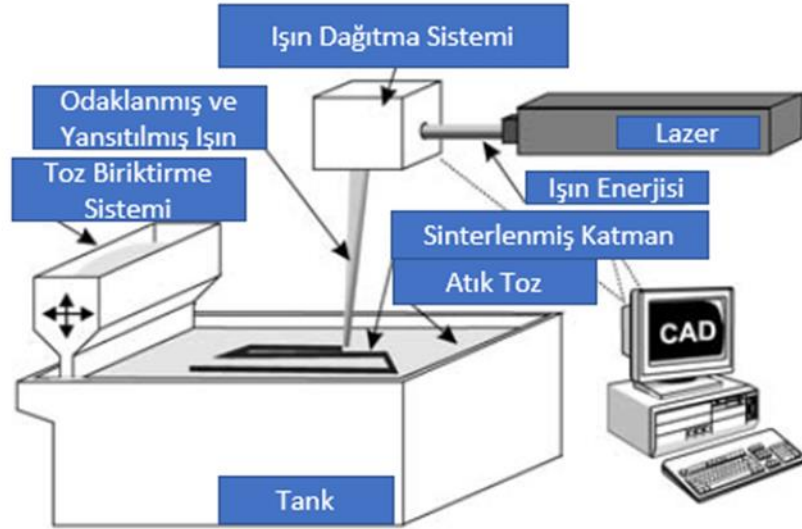
FDM yönteminde iyi bir baskı elde etmek için baskı yüzey kalitesinin ve baskı çözünürlüğünün yüksek olması gerekmektedir. Çözünürlüğü ve yüzey kalitesini sağlamanın koşullarından biri ekstrüzyon kafasında eriyik hale gelen malzemelerin basıncının sabit tutulması ile gerçekleşir. Eriyik biriktirme modelleme yönteminin hızla ilerlemesinin sebepleri arasında parça doğruluk oranının iyi olması, birçok CAD programına uyum sağlaması ve kısa üretim süresi yer almaktadır. Karmaşık geometriye sahip parçalar da bu yöntem ile üretilebilmektedir. Bu yöntemde malzeme olarak polimer filamentler kullanılır. Basılacak parçanın özelliğine ve kullanım alanına göre farklı polimer filamentler tercih edilir. Standart filamentlerin yanı sıra kullanım amacına göre katkı maddeleri eklenerek üretilen özel filamentler de bu yöntemde kullanılırlar. Geleneksel imalat yöntemlerine göre avantajları olmasına rağmen üretilen parçaların mekanik özelliklerinin değerleri klasik yöntemlere göre daha düşük değerdedirler. Uygulama alanları arasında otomotiv ve havacılık sektörü başta olmak üzere medikal sektöründe de kullanılmaktadır. Bu cihaza ait bölümler Şekil 2.4' te gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : FDM cihazı [36].

2.2.2 Seçici lazer sinterleme

Carl R. Deckard tarafından seçici lazer sinterleme teknolojisi 1980'li yılların ortalarında yaptığı çalışmalar sonucunda keşfedilmiş ve patentle sonuçlandırılmıştır [4]. Bu yöntemde kullanılan toz malzemenin sinterlenebilmesi için yüksek termal enerji gereksinimi vardır. Bu termal enerji de yüksek güce sahip olan bir lazer kullanılarak elde edilir. Basım işlemi katmanlar halinde gerçekleştirilir. Lazer ışınının her bir katmanı tarayabilmesi için bir tarayıcı sistemi kullanılarak lazer ışınının o katmana pozisyonlanması sağlanır. Bir katmanın basım işlemi bittiğinde diğer katmanın üretilmesi için biten katmanın üzeri tozla kaplanır ve lazer yeni katmana odaklanarak bir önceki katman üzerine yeni katmanı inşa eder. Sinterleme olayının gerçekleşmesi için sıcaklığın kullanılan malzeme metal tozu ise erime sıcaklığının, kullanılan malzeme polimer ise yumuşama sıcaklığının üzerine çıkması gerekmektedir. Seçici lazer sinterleme yönteminde kullanılan malzemeye bağlı olarak genellikle YB-fiber lazerler veya karbondioksit lazerler kullanılmaktadır [26, 27].



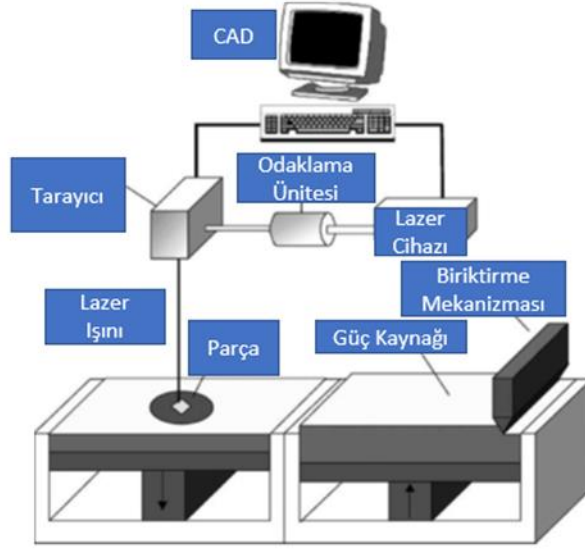
Şekil 2.5 : SLS cihazı [24].

Lazerle sinterleme operasyonu Şekil 2.5'te de gösterildiği gibi üretilecek parçanın bir CAD programı ile tasarlanmasıyla başlar. Daha sonra bu CAD dosyası STL formatına dönüştürülerek parça dilimlere bölünür. STL formatındaki data cihazın parçayı basabilmesi için cihaz üzerinde üretim programı ile konumlandırılır. Substrat üzerinde bulunan toz tabakası lazer ile taranarak şekillendirilme gerçekleştirilir. İlk katmanın şekillendirilmesi bittikten sonra diğer katman biten katmanın üzerine inşa edilir. Bu

işlem parçanın basımı tamamlanana kadar katman katman devam eder. Üretim kalitesi için imalat sürecinde kullanılan parametreler çok iyi belirlenmelidir. Seçici lazerle sinterleme yönteminde toz yapıda bulunan ve ısı ile karşılaştığında etkileşimde bulunarak kaynaşma veya sinterleme eğilimi gösterebilen her malzeme kullanılabilir. Sinterleme özelliği düşük olan malzemeler bazik bir kurban toz bağlayıcı malzeme kullanılarak sinterlenebilir. Sinterleme işlemi bittikten sonra bağlayıcı malzeme fırınlama işlemi ile parçadan uzaklaştırılabilir. Bu yöntemde kullanılmaya başlanan ilk toz malzemeler polimerlerdir. Polikarbonat bu yöntemde en çok kullanılan polimerdir. Yarı kristalin malzeme olarak da poliamid tozları tercih edilir. Çeşitli metal tozları da seçici lazer sinterleme yönteminde kullanılırlar. Metal toz malzemelerden kullanımı en yaygın olan titanyum ve tantal tozlarıdır. Seçici lazer sinterleme yöntemi geleneksel yöntemlere göre çeşitli avantajlar sunar. Bu yüzden birçok alanda kullanılırlar. Bu çalışma alanları tıp, endüstri ve akademidir. Avantajları ise kısa süren üretim, ucuz malzeme ile üretim, parça doğruluğunun yüksek olması ve tasarım özgürlüğü sunmasıdır. Seçici lazer sinterleme yöntemi tıpta anatomik modelleri üretmek için kullanılır. Otomotiv ve havacılık sektörlerinde de seçici lazer sinterleme yöntemi tercih edilir.

2.2.3 Direkt metal lazer sinterleme

Direkt metal lazer sinterlemenin ilk çalışmaları 1990'lı yıllarda Leuven Üniversitesi'nde yapılmıştır. Direkt metal lazer sinterleme yöntemi adından da anlaşılacağı üzere metal tozlarını lazer ışınları ile sinterleyen bir eklemeli imalat yöntemidir. Bir CAD programında tasarlanan data daha sonra STL formatına çevrilir. Üretilen parçanın geometrisi dijital ortamda dilimlenir. Cihaz parçanın üretimi için konumlandırılır. Lazer ışını ile toz katmanı dataya uygun bir şekilde sinterlenmeye başlanır. İlk katmanın üretimi bittikten sonra diğer katmanlar sırasıyla biten katmanın üzerine inşa edilerek parçanın üretimi tamamlanır. Lazer sistemi metal tozunu dataya uygun olarak eritir ve tozlar birbiri ile kaynarak şekillenirler. İlk katmanın imalatı bittikten sonra bir rulo toz malzemeyi eriyen bölgeye dağıtır ve diğer katmanın inşasına başlanır. Bu işlem ürün elde edilene kadar her katmanda tekrarlanır. Direkt metal lazer sinterleme yöntemi, kullanılan toz malzemelerin kimyasal yapısından önemli ölçüde etkilenirler. Titanyum, paslanmaz çelik ve alüminyum tozları bu yöntemde parça üretmek için kullanılabilirler.

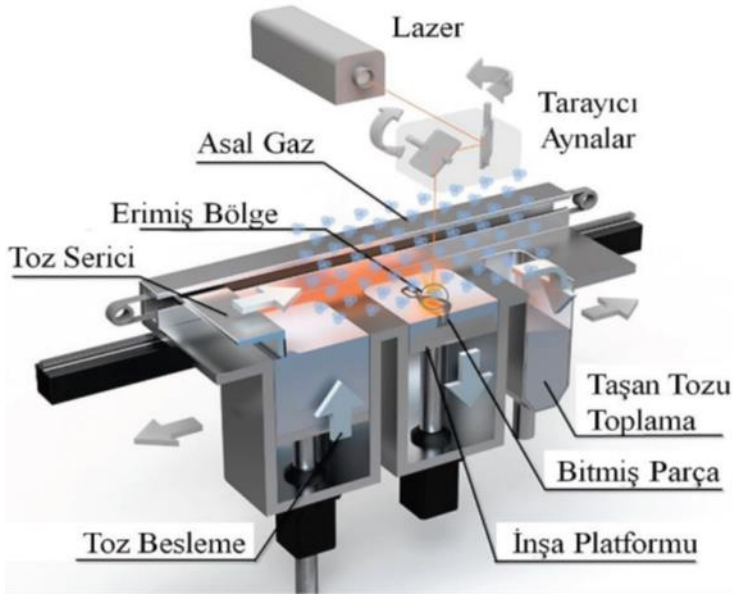


Şekil 2.6 : DMLS cihazı [46].

Direkt metal lazer sinterleme cihazının bölümleri Şekil 2.6' da gösterilmiştir. Direkt metal lazer sinterleme yöntemi parçanın boyutsal doğruluğu açısından avantaj sağlar. Fakat bunun yanında bir parçanın üretilebilmesi için geçen süre oldukça fazladır. Küçük boyutlu bir parça üretilmek istense bile üretimde tercih edilen proses parametrelerine bağlı olarak üretim süresi 12 saati bulabilmektedir. Direkt metal lazer sinterleme yöntemi ile karmaşık geometriye sahip parçalar fonksiyonel bir şekilde üretilebilmektedir. Tıp ve havacılık sektörlerinde kullanımının tercih edilme nedenlerinden biridir. Tıpta protez parçaların üretilmesinde tercih edilirler. Havacılık sektöründe de belirli parçaların son ürün olarak kullanılabilmesi için bu yöntem ile parçaların üretimleri gerçekleştirilir.

2.2.4 Seçici lazerle ergitme

Seçici lazer ergitme yöntemi Almanya'da Fraunhofer Enstitüsü'nde bir araştırma projesi olarak çalışmaları başlayan ve 1996 yılında patentlenen bir eklemeli imalat yöntemidir [34]. Bu yöntem parçanın üretilmesi işlemini lazer ışını kullanarak toz malzeme dolu bir yatakta gerçekleştirir. Bilgisayar destekli bir tasarım programında tasarlanan data STL formatına çevrilir. Elde edilmek istenen geometrinin dilimleme işlemi gerçekleşir, konumlandırma ve cihaz ayarları yapıldıktan sonra cihaz üretime hazır hale gelir.



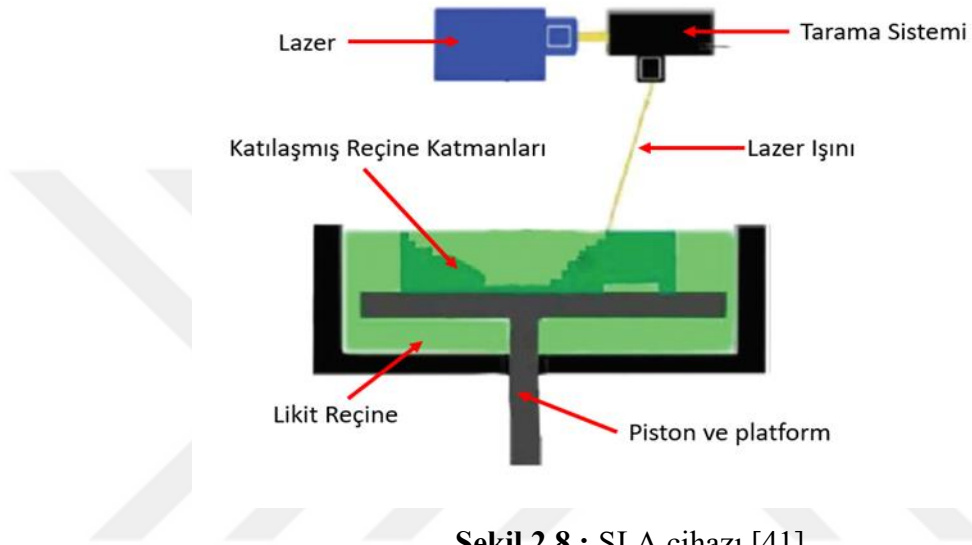
Şekil 2.7 : SLM cihazı [44].

Şekil 2.7' de görüldüğü üzere bir mekanizma ile toz serme işlemi gerçekleşir. Toz serilme işlemi gerçekleştikten sonra enerji kaynağı olarak kullanılan lazer ışını aynalar vasıtasıyla yansıtılır. Bilgisayar programında tasarlanan dataya uygun olarak lazer ışını ile istenilen bölgeler taranır. Taranan kısımdaki tozlar erirler. Eriyen bu tozlar dataya uygun olarak katılarak parçanın ilk katmanını inşa ederler. Parçanın üretiminin tamamlanması için her yeni katman biten katmanın üzerine inşa edilmesi ve datadaki parça yüksekliğine ulaşılması gerekmektedir. SLM yöntemi, SLS yöntemi baz alınarak türetilen bir yöntemdir. Yoğunluğu yüksek olan ve ikincil bir işlem yapılması istenmeyen bir metal parça üretilmek istendiğinde yüksek güçte olan lazer ışını metal tozunu tamamen eritir. Böylelikle parçalar haddelenmiş metallere yakın ya da onlardan daha iyi mekanik özelliklere sahip olabilirler. Üretim sürecine enerji girdisinin fazla olması nedeniyle süreci kontrol etmek zorlaşır. Bu yüzden oluşan artıklar parçalarda görülen deformasyonlardır [23]. Bu yöntemin dezavantajlarından biridir. Bu yöntemde kullanılan malzemeler arasında kobalt-krom, titanyum ve paslanmaz çelik tozları yer alır.

2.2.5 Stereolitgrafi

Fotopolimer malzemler 1960'lı yılların sonlarına doğru gelindiğinde geliştirildiler. Fotopolimer malzemeler ultraviyole ışınlarına maruz bırakıldıklarında kürleşebilen malzemelerdir. 1980'li yılların ortalarında Charles Hull bu malzemeleri lazer ışınları

ile katılaşmasını sağlayacak çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmaların sonucunda fotopolimer malzemeler ile üç boyutlu katı parçalar üretmeyi başarmıştır. Üretmek istediği parçayı katmanlar halinde bir katmanı diğer katmanın üstüne katılaştırarak elde etmiştir. Bu çalışmalarının sonucunda stereolitografi teknolojisi doğmuştur. 1984 yılında Charles Hull patent başvurusu yapmıştır. Kısa bir süre sonra da proto-tipler üretmek, modeller yapmak ve üretim parçaları oluşturmak için 3D Systems şirketini kurarak stereolitografi cihazlarını endüstrinin hizmetine sunmuştur [14].



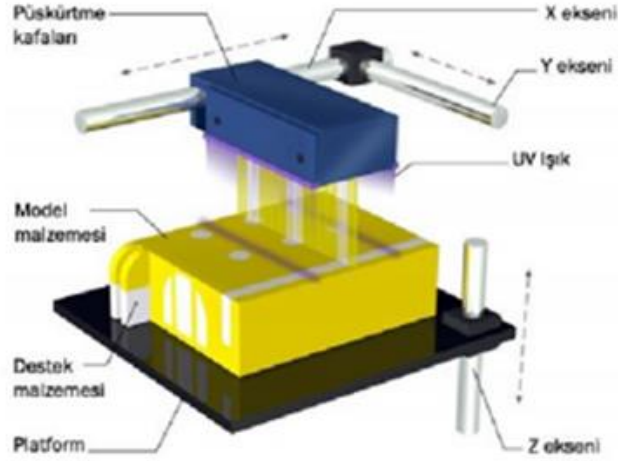
Şekil 2.8 : SLA cihazı [41].

Stereolitografi teknolojisinin temel çalışma prensibi bir bilgisayar programı ile tasarlanan dataya uygun olarak fotopolimer reçine dolu bir havuza ultraviyole ışınlar yollayarak reçineyi kürleştirir ve istenilen şeklin katı olarak oluşmasını sağlar. Bu katılaşma işlemi ise katman katman gerçekleştirilir. Ultraviyole ışınlar bir katmanın katılaşmasını tamamladıktan sonra platform bir katman kalınlığında konumunu değiştirerek yeni katmanı katılaşması tamamlanan katmanın üzerine inşa eder. Stereolitografi cihazının yapısı Şekil 2.8’ de gösterilmiştir. SLA yönteminde kullanılan polimer reçineler çapraz bağa sahiptir. Bu nedenle tekrar kullanılmak için eritilemezler. Diğer polimerlere göre daha az stres gevşemesi yaşarlar. SLA yönteminde kullanılan ilk reçineler 1989-1990 yıllarında patentlenmişlerdir [17, 35]. Bu reçineler akrilatlardan yapılmışlardır. Basılan parçaların dayanımları düşüktür. 1988 yılında Japonya’da stereolitografi teknolojisi için epoksi reçineler üretilmiştir [1, 2]. Bu reçinelerin kullanımıyla akrilat reçinelere göre daha sert parçalar elde edilmiştir. Elde edilen parçaların doğruluğu daha yüksektir. Akrilat reçinelerin kullanıldığı parçalarda %5 ile %20 arasında bir büzülme gözlenmiştir. Epoksi

reçinelerin kullanımı sonucunda oluşan büzülme oranı ise %1 ile %2 arasındadır [5]. Epoksi reçineler düşük küreleşme hızına sahiptirler. Ayrıca epoksi reçineler ile yapılan parçalar kırılğan yapıya sahiptirler. Epoksi reçinelere kullanımdan önce akrilat reçineler eklenmesi ile bu kırılğan yapı azaltılabilir [31]. Bu çalışmanın sonucu olarak da günümüzde kullanılan stereolitgrafi reçinelerinin çoğu akrilat reçineler de belli oranlarda eklendiği epoksi reçinelerdir. Bu karma reçinelerin kullanımı üretilen parçaların dayanım özelliğini iyileştirmiştir. Epoksi reçinelerin sahip olduğu bir diğer dezavantaj da neme karşı olan hassasiyetleridir [10]. Fotopolimer malzeme kullanarak çalışan stereolitgrafi yöntemi parçanın yapım aşamasında destekleyici yapıları da üretmek durumundadır. Destek yapıları için parçanın üretimi için kullanılan malzeme kullanılır. Stereolitgrafi yöntemi parçayı ince katmanlar şeklinde ürettiği için diğer yöntemlere göre parça doğruluğu oldukça iyidir. Geçmişte kullanılan fotopolimer malzemeler diğer eklemeli imalat yöntemlerinin malzemeleri ile karşılaştırıldığında oldukça zayıf fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptirler. Malzeme teknolojilerindeki çalışmalarla daha iyi mukavemet özelliği, sıcaklık direnci ve süneklik özelliği sunan fotopolimer malzemeler geliştirilmiştir. Bu malzemelerle üretilen parçalara eğer ultraviyole ışınlar karşı koruyucu bir kaplama yapılmazsa parçalarda bozulmalar ortaya çıkabilir [14]. Polimer bazlı malzemeler dışında metal veya seramik malzemelerin solüsyonları da SLA cihazının varyantlarında kullanılarak parçalar elde edilebilirler. Endüstride tasarımcılar prototip üretmek için kullanmaktadırlar. Ayrıca tıp alanında da modelleme işlemleri için kullanılmaktadır.

2.2.6 Poly jet-ink jet baskı

Mürekkep püskürtmeli yazıcılar ile ilgili yıllardır süre gelen çalışmalar sonucunda 1951 yılında Rune Elmqvist tarafından ticari olarak ilk mürekkep püskürtmeli bir cihaz yapılmıştır. Dr. Sweet tarafından ise 1965 yılına gelindiğinde ilk kez sürekli püskürtmeli mürekkep püskürtmeli cihazların üretimi gerçekleştirilmiştir [7]. Poly jet cihazının da kökeni mürekkep püskürtmeli yazıcılara dayanmaktadır. Diğer eklemeli imalat yöntemlerinde olduğu gibi baskı için data hazırlanır. Cihazın ayarları yapıldıktan sonra üretime hazır hale gelir.



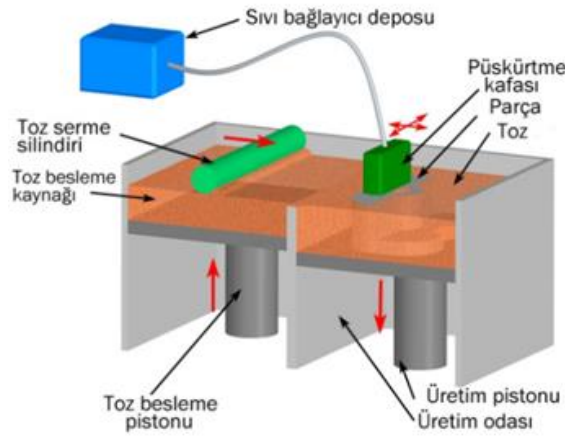
Şekil 2.9 : Poly jet cihazı [42].

Şekil 2.9’ da görülen püskürtme kafalarından reçine malzeme püskürtülürken UV ışık yardımıyla bu reçinelerin kürleşmesi sağlanır. Üretim diğer yöntemlerde olduğu gibi katman katman gerçekleşir. Parça doğruluğu yüksek olduğu için bu yöntem ile üretilen parçalar son ürün olarak kullanılabilir. Seramik, metal ve polimer malzemeler ile üretim yapılabilir. Fakat kullanılacak malzemelerin akışkan formda olması gerekmektedir. Özellikle elektronik sektöründe küçük boyuttaki parçaların üretiminde, esnek parçaların üretiminde kullanılırlar. Biyomedikal sektöründe de yapay organ basımı ve benzeri araştırma, geliştirme çalışmaları için kullanılırlar.

2.2.7 3DP

Üç boyutlu yazdırma teknolojisi Massachusetts Teknoloji Enstitüsü’nde Amerika’da ortaya çıkmıştır [42]. Eklemeli imalat teknolojisinin temeli CAD datadan STL formatını elde etmek ve bunu cihaz için uygun üretim datası haline getirmeye dayanmaktadır. Bu teknolojide de aynı yol izlenmektedir. Cihaz üretime hazır hale geldikten sonra bir platforma toz malzeme yayılır. Tozların birbirine tutunmasını sağlayacak olan bağlayıcı malzeme dataya uygun bir şekilde püskürtülerek ilk katmanın basımı sağlanır. Diğer katmanın biten katman üzerine inşasına devam etmek için platform bir katman kalınlığında yer değiştirir. Yeni toz malzeme biten katman üstüne yayılır. Bağlayıcı yapışkan yine dataya uygun olarak püskürtülerek hem yeni katmandaki tozların birbirine yapışmasını hem de yeni katmanın bir önceki katmandaki tozlara yapışmasını sağlar. İstenilen parça elde edilene kadar üretim bu şekilde katman katman devam eder. Parçanın üretimi bittiğinde üretim boyunca destek

görevi gören atık tozlar bir vakum işlemi ile parçadan temizlenir. Şekil 2.10' da cihaza ait bölümler gösterilmiştir.

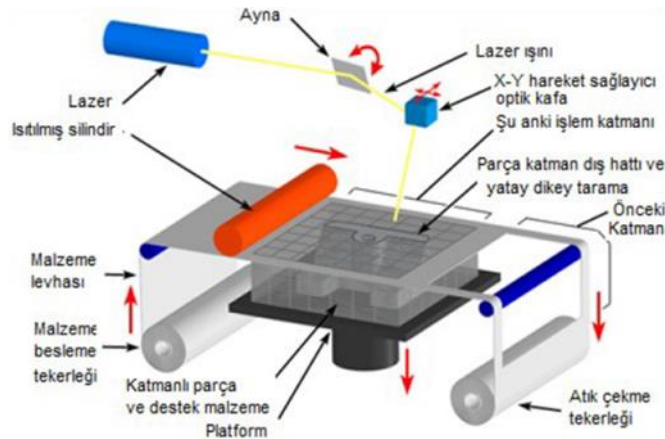


Şekil 2.10 : 3DP cihazı [42].

Bu yöntem ile polimer tozlardan, metal tozlardan ve seramik tozlardan yararlanılarak istenilen parçalar elde edilir. Prototip işlemleri için endüstrilerde, mimarlık projelerinde maketlerin yapılmasında kullanılmaktadır.

2.2.8 Lamine nesne imalatı

1991 yılında Helisys ilk ticari lamine nesne imalat cihazını geliştirmiş ve son kullanıcı ile buluşturmuştur [42]. Şekil 2.11' de cihaza ait bölümler gösterilmiştir.



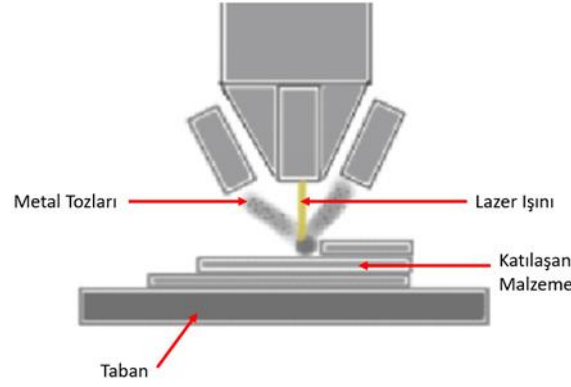
Şekil 2.11 : LOM cihazı [42].

Parça üretimi için diğer eklemeli imalat yöntemlerinde olduğu gibi bir CAD programı ile parça tasarlanır. CAD dosyası STL formatına dönüştürülür. STL formatı da cihazda üzerinde konumlandırma sağlanabilmek için üretim dosyası formatına dönüştürülür. Lamine nesne imalat yöntemi cihazında parçanın üretileceği bir platform bulunur. Bu

platformun yüzeyine ilk katman malzemenin bulunduğu rulodan bir merdane yardımı ile serilir. Serilen malzemenin yüzeye tutunması için belirli bir sıcaklıktaki bir silindir malzemenin üzerinden geçer. Daha sonra bir lazer yardımı ile ilk katman CAD datasındaki dataya göre kesilir. Lazer kesimi sonucu ana parçadan ayrılan atık kısım diğer katmanların üretiminde destek görevi görmek için parçanın üretimi bitene kadar platformda kalır. İlk katmanın üretimi bittikten sonra platform bir katman kalınlığı ölçüsünde aşağı yönde hareket eder. Malzeme rulosundan merdane yardımı ile diğer katman serilir. Belirli bir sıcaklığa sahip olan silindir bu katmanın ilk katmana yapışmasını sağlamak için üzerinden geçer ve lazer bu yeni katmanın kesim işlemini gerçekleştirir. Üretilmek istenen parça son şeklini alana kadar bu işlemler katmanlar şeklinde devam eder. Parçanın üretimi bittikten sonra lazer ile ana parçadan ayrılmış atık parçanın temizlenmesi gerekmektedir. Lamine nesne imalatı yönteminde malzeme olarak sac formunda katı malzemeler kullanılır. Bu malzemeler kağıt saclar, plastik filmler, metal saclar ve seramik bantlardır. Lamine nesne imalatı yöntemi karmaşık yapıya sahip parçaların üretimini ve üretilen parçalarda istenilen doğruluğu sağladığı için tıp, mimarlık, seramik endüstrisi ve kalıp endüstrisinde kullanımı tercih edilmektedir.

2.2.9 Lazerle tasarlanmış net şekillendirme

Lazerle tasarlanmış net şekillendirme teknolojisi üzerinde çalışmalar Sandia Ulusal Laboratuvarları'nda yapılmıştır. 1997 yılına gelindiğinde ise Optomec firması tarafından lisans işlemleri yapılarak ticari boyuta ulaşılmıştır [43]. Diğer eklemeli imalat yöntemlerinde olduğu gibi CAD datası, STL formatı ve cihaz konumlandırılması işlemleri gerçekleştirildikten sonra üretime başlanır. Üretimi gerçekleştirmek için kullanılacak metal tozları platform yüzeyine doğru püskürtülür. Tozların püskürtülmesi ve lazer ışınının bu tozları eritmesi eş zamanlı gerçekleşir. Bunun nedeni tozların püskürtülmesi ve lazer ışınının odaklanmasını aynı kafa sağlar. Böylece tozlar herhangi bir parçanın yüzeyine doğrudan da işlenebilirler. Platform veya herhangi bir parçanın yüzeyine ulaşan eritilmiş tozlar burada katılaşır. İşlemi gerçekleştiren kafa sadece düşey yönde hareket eder. Bu yöntemde kullanılan tozlar metal tozları ve metal alaşım tozlarıdır. LENS yöntemi tıbbi parçaların yapımı dahil olmak üzere havacılık, otomotiv sektörü gibi sektörlerde parça üretimi ve onarımı için kullanımları tercih edilmektedir.



Şekil 2.12 : LENS cihazı [43].

Şekil 2.12’ de cihaza ait bölümler gösterilmiştir. Metal tozları ve lazer ışını aynı kafada bulunmaktadır. Katılan malzeme bir önceki katmanın üzerinde biriktirilmiştir.

2.2.10 Elektron ışın kaynağı

Elektron ışın kaynak teknolojisi çok eskilere dayanan eklemeli imalat yöntemlerinden biridir. İlk olarak reaktif parçaları ve refrakter parçaları birleştirmek üzere nükleer alanda 1950’li yıllarda kullanılmıştır [3]. Bu yöntemde elektron ışınları yoğunlaştırılarak belirli bir bölgeye uygulanır ve kaynak işleminin gerçekleşmesi sağlanır. Isı artışı oldukça gerçekleşir ve belirli bir bölgede olduğu için kaynak işleminden sonra parçalarda atık gerilmelere ve çarpımalara neden olmaz. Belirli bir bölgede toplanan elektron ışınları ile yapılan kaynağın atmosferden etkilenmemesi için kaynak işleminin vakumlu bir ortamda yapılması tercih edilir. Vakum miktarına göre kaynak işlemi üçe ayrılır. Bu kaynak çeşitleri yüksek vakum ortamında kaynak, orta şiddette vakum ortamında kaynak ve vakumsuz bir ortamda yapılan kaynaktır. Elektron ışın kaynağı yöntemi metal parçaların işlenmesinde kullanıldığı için genel olarak havacılık ve otomotiv sektörlerinde tercih edilmektedir.

2.3 FDM Yönteminde Kullanılan Malzemeler

Eklemeli imalat teknolojisi yöntemlerinin herbirinde farklı malzemeler kullanıldığı gibi farklı yöntemlerde ortak olarak kullanılan malzemeler de mevcuttur. Eriyik biriktirme modelleme yönteminde malzeme olarak ABS, PLA, PA ve PC gibi termoplastik granül malzemelerden oluşturulan filamentler, herhangi iki farklı malzemenin belirli oranlarda karışımı sonucunda oluşturulan kompozit filamentler kullanılmaktadır [9, 38]. Eriyik biriktirme modelleme yönteminde genel olarak

balııııı ve termoplastik malzemelerle üretim gerçekleştirilmektedir. Termoplastiklerin bu yöntemde kullanılma nedenlerinden en önemlisi belirli bir sıcaklığa ulaştıkları zaman yarı erimiş hale gelmeleri ve belli bir sıcaklığın altında ise soğuyarak katılaşmalarıdır. Böylece bu yöntemde termoplastik filamentler kolayca şekillendirilebilirler [21]. Eriyik biriktirme modelleme yönteminde kullanılacak malzemenin seçimi yapılırken üretmek istenen ürünün kullanım amacı iyi tanımlanmalıdır. Böylece seçilecek malzemenin mekanik, kimyasal, elektriksel, termal ve çevre koşullarına uyumu gibi özellikleri göz önüne alınarak tercih yapılır. Doğru malzeme seçimi için izleyeceğimiz yol malzemenin karakteristiği, FDM cihazına uygunluğu, destek malzeme tipi ve renktir. FDM malzemeleri genel olarak aynı özelliklere sahip olarak gözükse de bu yöntemde kullanımları en çok tercih edilen ve yüksek mukavemet değerlerine sahip olan filamentler polikarbonat, polipropilen, poliamid ve ABS filamentleridir. Yapılan araştırmalar ve gelişen teknoloji ile eriyik biriktirme modelleme yönteminde kullanılabilen çok sayıda filament malzemeye ulaşılmıştır. ABS, PLA, PET-G, PC, PVA, TPE, TPU, HIPS bunlardan birkaçıdır. Genel olarak günümüzde bu yöntemde kullanıcılar tarafından en çok tercih edilen malzeme ABS'dir. Fakat kullanım kolaylığı açısından sunduğu esnekliklerden dolayı PLA da ABS'e yakın bir oranda tercih edilmektedir. Böylece eriyik biriktirme modelleme yönteminde ABS ve PLA kullanıcılar tarafından en çok tercih edilen filamentlerin başında gelmektedirler. Eriyik biriktirme modelleme yönteminde kullanılan filamentler iki farklı çapa sahiptir. Bu aplar sırasıyla 1.75 mm ve 3.00 mm'dir. Kullanım amacına göre bu iki farklı çaptan biri tercih edilir. 1.75 mm çapa sahip filamentler ilk yazıcılarda da kullanılmış ve günümüzde de en çok tercih edilen aptır. 3.00 mm çapa sahip filamentler de endüstriyel uygulamalarda ve plastik kaynak benzeri işlemlerde tercih edilirler. Kullanılan termoplastik malzemelerin mukavemet ve sertlik açısından metallerle karşılaştırınca daha düşük değerlerde mekanik özellik değerlerine sahiptirler. Bu durum FDM yönteminin kullanım alanlarının genişletilebilmesi için kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için çeşitli araştırmaların yapılmasını tetiklemektedir. Bu araştırmalarda katkı maddeleri eklenerek termoplastik malzemelerin fiziksel, mekanik ve ömür gibi özellikleri iyileştirilmeye çalışılır. Katkı maddeleri arasında metal tozları, jüt fiberler, titanyum dioksit, sürekli fiberler, süreksiz fiberler, cam elyaf, polimer fibrilleri, karbon fiberler ve grafen nanopaletler yer almaktadır [20]. Bazı organizasyonlarda, FDM tarafından daha yüksek mekanik özelliklere sahip fonksiyonel bileşenlerin hızlı

üretimi için yeni metalik veya seramik malzemeler geliştirmek için çalışmalar devam etmektedir [32, 40, 51].

Filamentler	Açılımı	Özellikleri	Baskı Sıcaklığı	Dayanım	Sertlik	Esneklik	Uygulama Alanı
PLA	Polilaktik Asit	Daha az koku yayar. Kullanımı kolaydır. Çevre dostu ve geri dönüşüme yakındır.	180 - 220 °C	Orta	Yüksek	Orta	Tıbbi İmplantlar Gıda Kapları Modeller Prototipler
ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren	Kullanımı zordur. Koku yapar. Birçok ticari üründe kullanılır.	210 - 250 °C	Çok Yüksek	Yüksek	Orta	Oyuncaklar Spor Ekipmanları Otomotiv Parçaları
PET-G	Polietilen Tereftalat Glikol	Dayanımı yüksek. Esnek bir yapıya sahip. Basımı kolay.	220 - 250 °C	Çok Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yiyecek ve İçecek Kapları Mutfak Gereçleri
PC	Polikarbonat	Yüksek sıcaklık direnci. Darbe dayanımı yüksek.	280 - 300 °C	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Rc Araç Parçaları Drone Parçaları
PVA	Polivinil Alkol	Destek yapıları için. Suda çözünür. Çevre dostu.	190 - 200 °C	Orta	Yüksek	Düşük	Baskı İşlemlerinde Destek Yapısı
HIPS	Yüksek Etkili Polistiren	Düşük maliyetli. Çözünür. Destek yapıları için.	220 - 230 °C	Yüksek	Düşük	Orta	Modeller Minyatür Figürler Prototipleme
NYLON	Poliamid	Esnek yapı. Dayanımı yüksek.	220 - 260 °C	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Makine Parçaları Mekanik Parçalar Dişliler
CF	Karbon Fiber	Boyutsal doğruluk. İyi katman yapışması. Yüksek dayanım.	195 - 220 °C	Yüksek	Yüksek	Düşük	Şasi Yapımları Pervane Yapımı Mekanik Parçalar
Wood	Ahşap	Ahşap yüzey.	195 - 220 °C	Orta	Orta	Orta	Dekor Aksesuar
PP	Polipropilen	Esnek bir yapıya sahip. Kimyasal direnç.	210 - 230 °C	Orta	Orta	Yüksek	Esnek parçaların üretimi Gıda ambalajları
TPE	Termoplastik Elastomer	Esneklik. Aşınma direnci.	210 - 235 °C	Orta	Düşük	Yüksek	Oyuncaklar Giyilebilir eşyalar

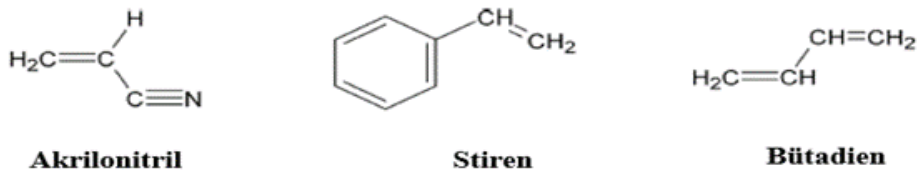
Şekil 2.13 : Filament çeşitleri ve özellikleri.

Şekil 2.13’ te eriyik biriktirme modellemede yaygın olarak kullanılan filamentler ve bu filamentlerin özelliklerinden bahsedilmiştir.

2.3.1 Akrilonitril bütadien stiren

Gevrek bir yapıya sahip olan polimerlerin tokluk değerini artırmak için polimerizasyon sürecinde bir elastomer grup eklenerek iki fazlı yapıya sahip bir kopolimer oluşturulur. Akrilonitril bütadien stiren de bu yapıya sahip bir kopolimerdir. Bütadien parçacıkları malzemenin elastomer fazını oluştururken SAN (stiren-ko-akrilonitril) malzemenin şekil alabilme özelliğini meydana getirir [22]. ABS malzemesi

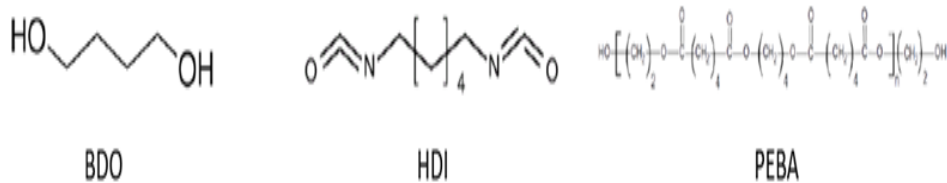
günümüzde plastik malzeme uygulamalarının başında gelmektedir. Evlerde kullanılan aletlerin plastikleri, otomobil parçalarını, tıbbi cihazları ve daha birçok ürünü üretmek için kullanılırlar [21]. ABS polimerinin işlenmesi sırasında sağladığı kolaylık onu en çok tercih edilen polimerlerden biri yapmaktadır. ABS yüksek sertliğe ve yüksek yüksek yüzey parlaklığına sahiptir. Granül halde plastik enjeksiyon ve ekstrüzyonda, filament şeklinde eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılır. Şekil 2.14' te ABS' yi oluşturan monomerlerin yapısı gösterilmiştir. Monomerlerin karışım oranları sırasıyla akrilonitril %5 ile %35 arasında, bütadien %5 ile %30 arasında ve stiren %40 ile %60 arasındadır [33].



Şekil 2.14 : ABS monomerleri [33].

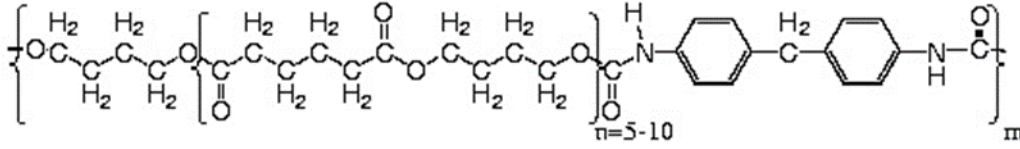
2.3.2 Termoplastik poliüretan

Termoplastik poliüretan sıcaklık artırıldığında yumuşayan, sıcaklığı düşürüldüğünde sertleşebilen bir yapıya sahiptir. Ekstrüzyon ve enjeksiyon gibi plastik işleme yöntemlerinde kullanılabilir. Moleküler yapısı ile üstünlük sağlayan bir kopolimerdir. Termoplastik poliüretanın özellikleri arasında yüksek aşınma direnci, yüksek çekme dayanımı, dış ortamdaki maddelere karşı yüksek direnç, düşük sıcaklıklarda iyi esneklik ve yüksek sönümlenme kapasitesi vardır. TPU iki aşamalı bir polimerizasyon işlemiyle elde edilir [25]. Sentezlenmesi sırasında kullanılan PEBA, BDO ve HDI zincirleri yapıları aşağıdaki Şekil 2.15'teki gibidir.



Şekil 2.15 : BDO, HDI ve PEBA zincirleri [15].

Bu zincirlerin iki aşamadan oluşan polimerizasyon işlemi sonrasında aşağıdaki Şekil 2.16' daki yapıya sahip bir termoplastik poliüretan sentezlenir. TPU seçimi sertlik değeri ile gerçekleştirilir. Uygulama alanları arasında kablo, boru, tekerlek, kılıflar, ayakkabı tabanı, kar zincirleri bulunmaktadır.



Şekil 2.16 : TPU polimeri zincir yapısı [15].

2.3.3 Karbon fiber

Karbon elyaf malzeme çoğunlukla PAN fiberlerinden elde edilirler. Çeşitli termal değişiklikler sonucunda PAN lifleri karbon fiberlere dönüştürülürler. PAN lifleri 200-300 °C sıcaklıkta termal olarak atmosfer ortamında stabilize edilirler. Liflerin ısı kararlılığına ulaşması istenir. Bu yüzden inert atmosfer ortamında 1000 °C üzerinde bir sıcaklıkta belirli bir sürede merdiven yapısına belli bir gerilim altında dönüştürülürler [11, 39]. Karbon elyafın kullanım alanı oldukça geniştir. Sağladığı avantajlar ile günümüzde havacılıkta, inşaat sektöründe, otomotivde, tekne ve yat üretiminde, rüzgar enerjisi türbinlerinde ve spor aletleri yapımında kullanılırlar. Karbon fiber ana yapısında bir aromatik halka bulunduran karbon elyafın işlenmesi ile elde edilir. Bu işlemlerden birincisi ısıtmadır. Belirli bir sıcaklığa ısıtılan elyafın daha sonra kesilmesi veya toz haline getirilmesi ile grafitleştirilir [50].

2.4 Kompozit Filament Çalışmaları Hakkında

Eriyik biriktirme modelleme yöntemi için kullanılan malzemeler sınırlı sayıdadır. Bu yöntemin prototipten üretime evrilebilmesi için kullanılabilen malzeme yelpazesinin genişlemesi ya da mevcut malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekaniksel olarak özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu yüzden eriyik biriktirme modelleme yönteminde kullanılabilen filamentlerin bu özelliklerini geliştirebilmek için çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmada da ABS filamentin mekaniksel özellikleri için çalışılmıştır. Araştırmacılar ABS polimerini matris olarak kullanıp çeşitli katkı maddeleri ekleyerek ABS filamentin özelliklerinin iyileştirilmesi için çalışmalar yapmışlardır. Eklenen katkı maddelerine incelendiğinde bu malzemeler arasında jüt

elyaflar, metal tozları, cam elyaflar, titanyum dioksit, polimer fibriller, grafen nanoplateletler, karbon elyaflar ve sürekli elyaflar bulunmaktadır [20]. Literatürde ABS granüllere karbon fiber tozu eklenerek yapılan çalışmalara bakıldığında F. Ning ve arkadaşları [37] ağırlıkça farklı yüzdelerde ABS ekledikleri karbon fiber tozu ile ürettikleri filamentlerde akma dayanımları ve elastisite modüllerinde artış sağlamışlardır. D. Jiang ve D.E. Smith'in yaptıkları çalışmada baskı yönelişinin mekanik özelliklere etkisini incelerken ABS kompozit filament ile çalışmışlardır. Bir diğer çalışmada ise L.J. Love ve diğer arkadaşları [30] karbon fiber tozu ekledikleri ABS filament için referans numunelerine göre akma dayanımında artış elde etmişlerdir. Buna ek olarak elastisite modülünü konu olarak ele almışlar ve malzemenin rijitliğinin arttığını bulmuşlardır. Bir diğer çalışma da H. L. Tekinalp ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. Farklı yüzdelerde karbon fiber tozu katkısı sonucu akma dayanımında ve elastisite modülünde artış sağlamışlardır. C. Yang ve arkadaşları [52] yaptıkları çalışmada hem karbon fiber katkılı filamentleri hem de üretim yöntemi olan plastik enjeksiyon ile karşılaştırma yapmışlardır. Akma dayanımı karbon katkılı filament ile katkısız ABS'in akma dayanımından daha yüksek çıkmıştır. Enjeksiyon yöntemine göre akma dayanımı 25% daha az çıkmıştır.

ABS malzemesine TPU eklenerek üretilen bileşik filament için yapılan çalışmalar karbon fiber ile yapılan çalışmalar kadar yaygın değildir. J. Yin ve arkadaşları ABS ve TPU bileşik filamentinin sıcaklık değiştirilmesiyle ara yüzeyde katmanların birbirlerine yapışma dayanımını incelemişler ve sıcaklığın artırılması ile 0.86 MPa'dan 1.66 MPa'ya doğru bir yükseliş elde etmişlerdir. Leon ve diğerleri [28] yaptıkları çalışma ile ağırlıkça %0 ve %30 arasında ABS granüllerine TPU eklemişlerdir. Ağırlıkça %10 TPU eklenen filamentte akma dayanımında artış elde edilirken %20 ve %30 TPU eklenen filamentlerin akma dayanımında düşüş gerçekleşmiştir. Elastisite modülleri %10 için bir miktar artış gösterirken %20 ve %30 için düşüş gerçekleşmiş ve yüzde uzamalarda en çok artış ağırlıkça %30 TPU içeren filamentte gerçekleşmiştir.



3. FİLAMENT ÜRETİMİ

Eriyik biriktirme modelleme yönteminde kullanılan termoplastik yapıdaki filamentlerin üretilebilmesi için ekstrüzyon işlemi gerçekleştirilir. Bu ekstrüzyon işlemi sonucunda üretilen filamentlerin boyutsal doğruluğu sabit bir değere sahip olursa bu filamentlerin kullanımı ile istenilen nesnelere yazıcılarla hassas bir şekilde ve yüksek yüzey kalitesinde basılabilmesi sağlanabilir [18]. FDM yönteminde kullanılan filamentlerin belirli mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olması gerekir. Üretimin katmanlar şeklinde gerçekleştirilmesinden dolayı kullanılacak termoplastik malzemelerin katmanlar oluşturmaya elverişli olması gereklidir. Üretilen filamentler minimum büzülme sağlamalıdır. Genleşme katsayısı düşük olmalı, ısı dirençleri yüksek olmalı, erime ve katılma sıcaklıkları uygun olmalı ve katı halde faz değişimine uğramamalıdır [47]. Bu çalışmada ABS granülleri kullanılarak ABS filament üretimi ve katkı maddeleri eklenerek ABS kompozit filamentleri üretimi gerçekleştirilecektir.

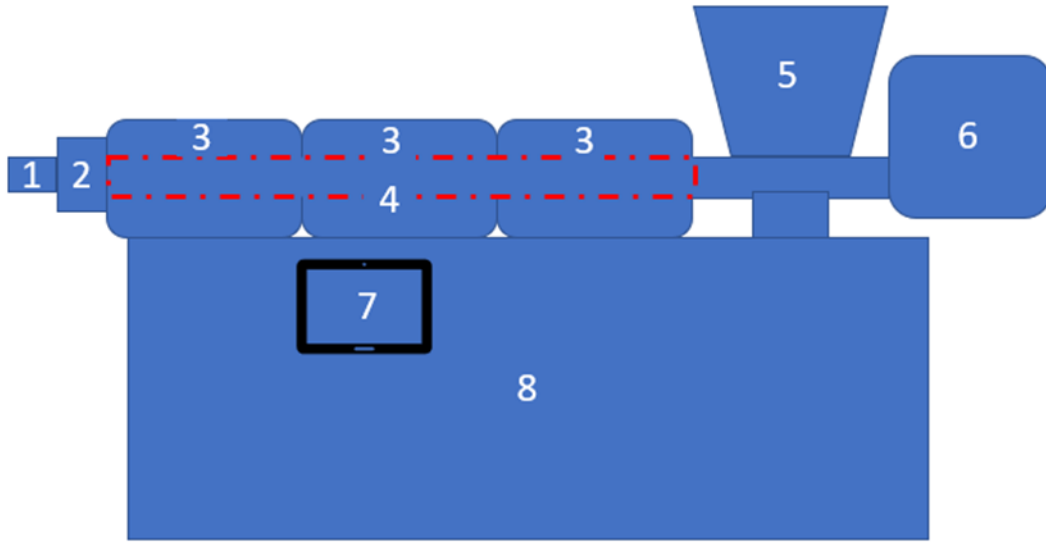
3.1 Filament Üretim Sisteminin Tanıtılması

Eriyik biriktirme modelleme yönteminde kullanılan polimer filamentler bir ekstrüzyon işlemi sonucunda üretilirler. Ekstrüzyon; granül ya da toz halindeki polimer hammaddenin ekstrüzyon makinesinde uygulanan ısı ve basınç vasıtasıyla eritilerek kullanılan kalıptan sürekli olacak şekilde geçirilerek şekillendirme işlemine denir. Aynı kesite sahip olan ve istenilen uzunluklarda profil, boru, çubuk, levha, folyo ve film gibi yarı ürün veya nihai ürünlerin üretilmesinde kullanılan bir imalat yöntemidir. Ekstrüzyon makinesinde üretim üç genel aşamada gerçekleşir. İlk aşamada polimer granül veya toz halindeki hammadde basınç ve sıcaklık ile eriyik hale getirilerek akışkanlık kazanır. Daha sonra akışkan hale gelen malzeme ekstrüzyon makinesindeki vidanın dönmesi ile ilerlemesi sağlanır ve akışkan haldeki malzeme kalıptan geçirilerek şekillendirilir. Son olarak kalıptan çıkan sıcak polimer malzeme soğutulması için son şeklini alırken gerekli kalibrasyonlar da yapılmış olur. Ekstrüzyon işlemi ile filament

üretiminde kullanılacak sistemler; ekstrüzyon makinesi, kompaunder makinesi, soğutma havuzu, çekici ve sarıcıdır.

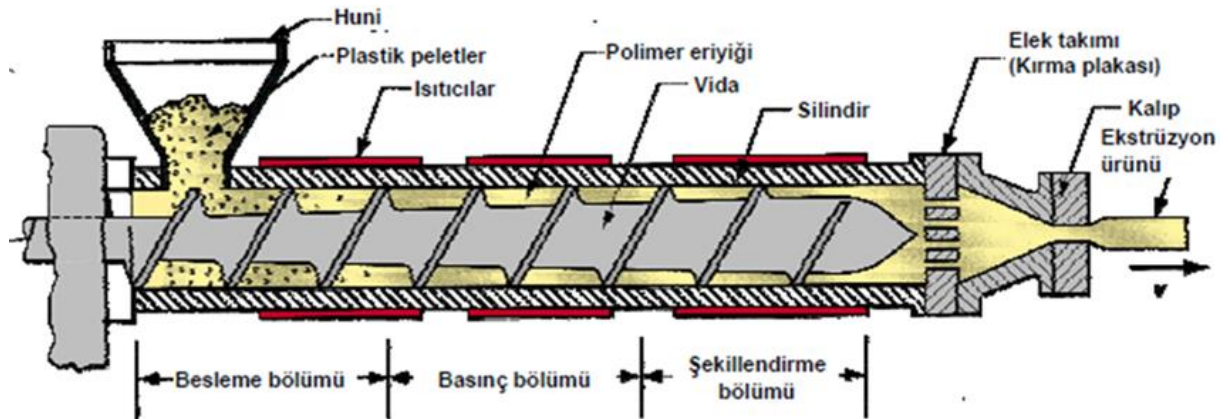
3.1.1 Ekstrüzyon makinası

Genel olarak ekstrüzyon makineleri Şekil 3.1’ de gösterildiği gibi farklı işlemlerin yapıldığı birden fazla bölümden oluşur.



Şekil 3.1 : Ekstrüzyon makinesi bölümleri.

Bu bölümler sırasıyla kalıp (1), ekstrüzyon kafası (2), ısıtıcı silindireler (3), vida (4), besleme hunisi (5), vidayı döndüren elektrik motoru (6), kontrol paneli (7) ve ekstrüzyon cihazının şasisidir (8). Ekstrüzyon makinesinin ana bölümleri silindireler ve vidadır. Kalıp, üretilecek parçanın şekline göre değişen yardımcı bölümdür.



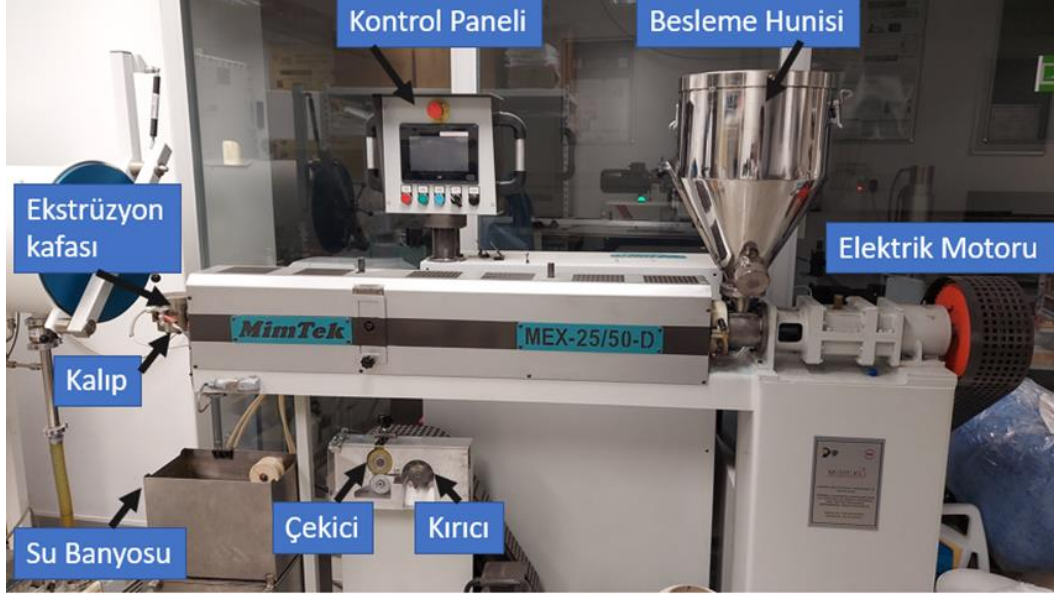
Şekil 3.2 : Ekstrüzyon makinesi silindirinin iç yapısı.

Silindirlerin iç çapı 25 mm ile 150 mm arasında değişir. Kullanılan vida ise uzunluğunun çapına oranına göre tanımlanır. L/D olarak gösterilen bu oran 10 ile 30

arasında bir değere sahip olur. Termoplastik malzemeler için yüksek bir oran tercih edilirken elastomerler için düşük değerler tercih edilir. Besleme bölümünde ekstrüzyon prosesinde besleme hunisine konulan hammadde elektrik motorunun vidayı döndürmesiyle huniden alınır, ısıtılır ve ilerletilir. İlerletilen malzeme basınç bölümünde ısıtıcı silindirlerdeki ısıtıcı rezistansların sağladığı sıcaklık ve vidanın silindirler içinde dönerken malzeme üzerinde oluşturduğu basınç ve sürtünme kuvveti sonucu açığa çıkan ısının yarattığı sıcaklık malzemeyi eriyik hale getirir ve malzemeye akışkanlık kazandırır. Şekillendirme bölümünde eriyik homojenize edilir ve kalıp boşluğunda eriyiği kalıba doldurmak için yeterli basınç oluşturulur. Vidanın dönme hareketi ile ilerleyen akışkanlık kazanmış ve homojenize edilmiş malzeme kalıptan geçirilir. Kalıbın üstünde de malzemenin kalıptan rahat bir şekilde geçirilebilmesini sağlayan ve ani soğumaya maruz kalmasını önleyen bir ısıtıcı rezistans bulunmaktadır. Kalıbın ekstrüder makinesine bağlandığı yer ekstrüder kafasını oluşturur. Bu bölgede yine akışın rahat bir şekilde sağlanabilmesi için ısıtıcı bir rezistans ile ısıtılmaktadır.

3.1.2 Kompaunder makinası

Bileşik oluşturma makinesi 'kompaunder' olarak adlandırılır. Polimer malzemelere bileşenlerin eklenmesi için kullanılır. Ekstrüzyon makinesi ile aynı prensipte çalışır. Ekstrüzyon cihazından farkı çift vidaya sahip olmasıdır. Çift vida ile sağlanan avantaj malzemelerin homojen bir yapıda birbirleri karışmasıdır. Granül veya toz halde besleme hunisine konulan malzemeler çift vida yardımı ile huniden alınır ve ilerletilir. Ekstrüder ile aynı işlemlerden geçen malzeme kalıptan çıkarken su banyosundan geçirilerek çekici ile çekilirler ve kırıcıdan geçerler. Kırıcıdan geçen malzeme granül şeklinde tekrardan elde edilir. Bu 6 farklı ısıtıcı kovana sahiptir. Böylece malzemenin eriyik hale gelmesi daha kontrollü ve homojen bir şekilde gerçekleşir. Her bölgenin sıcaklığı ya malzemenin özellik tablosundan ayarlanır ya da deneysel olarak optimizasyon yapılarak sıcaklık değerleri elde edilir. Üretim için diğer önemli parametreler motorun devir hızı ve çekicinin çekim hızıdır. Kullanılan malzemenin özelliklerine göre ayarlanır. Kırıcıda malzeme ekstrüzyon, enjeksiyon ve diğer plastik işleme yöntemlerinde kullanılmak üzere granül hale gelmiş olur. Şekil 3.3' te bileşik oluşturma makinesi ve onun bölümleri gösterilmiştir. Cihaz laboratuvar ortamında kullanılmak için tasarlanmıştır.



Şekil 3.3 : Kompaunder makinası bölümleri.

3.1.3 Soğutma havuzu

Kalıptan çıkan şekil almış polimer oda sıcaklığına maruz kalarak soğumaya başlar. Soğumanın hemen gerçekleşmemesi için üretilen malzemeye uygun soğutma havuzları kullanılır. Soğutma havuzlarında su, yağ ve benzeri malzemeler kullanılır. Bu sıvılar üretilen ürüne ve kullanılan malzemeye bağlı olarak soğutma havuzlarında belirlenen sıcaklığa kadar ısıtılırlar ve üretim boyunca bu sıcaklıkta kalmaları sağlanır. Soğutmanın bu havuzlar ile kademeli olarak yapılması malzemenin çarpılmasını engeller, ürünün çekim işlemini devam ettirir ve malzemenin iç yapısında oryantasyonun oluşmasını sağlarlar. Ürünler böylece net şekillerine daha yakın ve tolerans değerlerinde elde edilebilirler. Şekil 3.4' te çalışmada kullanılan soğutma havuzu gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Ekstrüzyon işleminde kullanılan soğutma havuzu.

3.1.4 Çekici

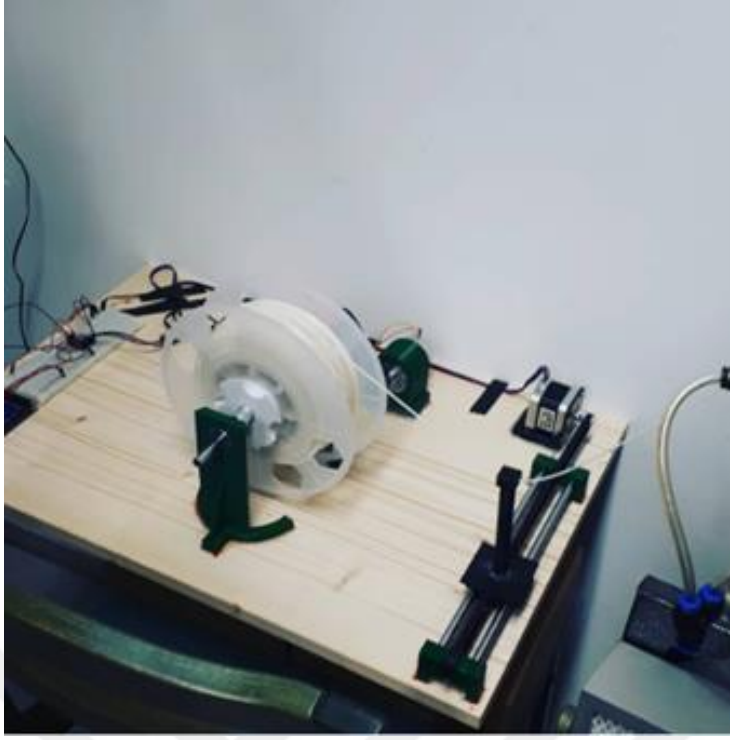
Ekstrüzyon yöntemindeki en önemli işlemlerden biri malzemenin kalıptan sürekli olarak geçirilmesi gerekliliğidir. Bu sürekliliği sağlayan kısım malzemeyi basan ekstrüzyon kafasından sonra malzemeyi kalıptan sürekli çekime maruz bırakan çekicidir. Üretilmek istenen malzemenin fiziksel özelliklerine göre farklı hızlarda çalıştırılırlar. Elde edilecek ürünün kalınlığına, çapına ve kullanılan malzemeye göre çekim hızı optimizasyon yapılarak ayarlanır. Böylelikle istenilen kalınlıkta ve çapta ürünlerin elde edilmesi sağlanır. Aynı zamanda çekici yardımı ile kalıptan çıkan malzemenin soğutma havuzunda geçmesi de sağlanır. Çekici ile yapılan çekim işlemi yan işlemlerle desteklenir. Bunlar bobine sarma, haddeleme, kesme ve istifleme gibi işlemlerdir. Şekil 3.5’ te bu çalışmada ekstrüzyon işlemi için kullanılan çekici gösterilmiştir.



Şekil 3.5 : Ekstrüzyon yönteminde çekici.

3.1.5 Sarıcı

Çekici ile çekilen malzeme kullanım amacına göre sarma, kesme veya istifleme gibi yardımcı işlemler sonucunda son ürün halini alır. Filament üretiminde son ürünün oluşmasını sağlayan yardımcı işlem bobine sarmadır. Bir sarıcı ile ekstrüderden istenilen çapta üretilen filament bir bobine sarılarak son ürün haline gelir. Bobinlere üretilen filamentleri sarmak için Şekil 3.6’ da görülen sarıcı cihazı bir step ve bir DC motor kullanılarak çalışma için üretilmiştir.



Şekil 3.6 : Ekstrüzyon yönteminde bobin sarıcı.

3.2 Filament Üretimi

Filament üretimi laboratuvar ortamında plastik ekstrüzyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretilecek filamentler sırasıyla katkısız ABS filamenti, karbon fiber tozu katkılı ABS kompozit filament ve TPU granülü katkılı ABS kompozit filamentidir.

3.2.1 Malzemeler

Bu çalışmada kullanılan malzemeler sırasıyla ABS, TPU granülleri ve karbon fiber tozudur. Kullanılan ABS granülleri, LG Chem Ltd'nin üretmiş olduğu HI121H kodlu ürünüdür. Malzemenin özellikleri Çizelge 3.1' de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : ABS granülünün özellikleri.

Özellikler	Değer	Birim
Yoğunluk	1.04	g/cm ³
Çekme Dayanımı	50	MPa
Çekme Uzaması	30	%
Yumaşama Sıcaklığı	94	°C
Erime Sıcaklığı	220	°C

Kompozit ABS filamentlerden biri TPU granülleri eklenerek üretilmiştir. Eklenen TPU granülleri BASF firmasına ait olan Elastollan® B 95A granüllerdir. Malze-menin özellikleri Çizelge 3.2’ de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 : TPU granülünün özellikleri.

Özellikler	Değer	Birim
Yoğunluk	1.22	g/cm ³
Çekme Dayanımı	22	MPa
Çekme Uzaması	300	%
Yumaşama Sıcaklığı	60	°C
Erime Sıcaklığı	220	°C

Diğer kompozit ABS filamentleri ise karbon fiber tozu ile ABS granülleri karıştırılarak üretilmiştir. Karbon fiber tozu Dost Kimya Ltd.’ den temin edilmiştir. Eklenen karbon fiber tozunun özellikleri Çizelge 3.3’ te verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Karbon fiber tozu özellikleri.

Özellikler	Değer	Birim
Yoğunluk	1.78	g/cm ³
Fiber Uzunluğu	100-400	µ
C-Elyaf Yoğunluğu	97	%

3.2.2 Üretimin basamakları

Eriyik biriktirme modelleme için üç farklı ABS filament üretimi gerçekleştirilmiştir. Bunlar sırasıyla ABS, ABS-karbonfiber tozu ve ABS-TPU filamentleridir.

3.2.2.1 ABS filament üretimi

Polimer malzemeler ortam koşullarında oldukça fazla etkilenirler. Bu yüzden çeşitli saklama koşulları vardır. Eğer bu saklama koşulları sağlanamıyorsa polimerlerde bozulmalar gerçekleşebilir. En çok etkilendikleri çevre koşulu nemdir. Bu yüzden polimer granülleri kullanılmadan önce kurutma işlemine tabi tutulurlar. Bu çalışmada da ABS granülleri üretime başlamadan önce etüv fırınında 60 °C’de 2 saat süre boyunca bekletilmişlerdir. Kullanılacak polimerlere göre ve yapılacak işlemlere göre farklı koşullarda kurutma işlemi gerçekleştirilebilir. Bu işlem ile saklama koşullarında maruz kaldıkları nem granüller üzerinden uzaklaştırılmıştır.

ABS filamentinin üretimini gerçekleştirmek için kullanılan malzeme miktarı Çizelge 3.4' te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 : ABS üretiminde kullanılan malzeme paketi.

Malzeme	Katkı Malzemesi	Katkı Yüzdesi	ABS Miktarı	Katkı Miktarı	Birim
ABS	-	%0	500	0	g

Etüv fırınlama işleminden sonra ABS granülleri ekstrüderin besleme hunisine yerleştirilir. Bu çalışmada üretim için kullanılan ekstrüderin ısıtıcı silindirleri 3 adettir. Bu 3 ısıtıcı silindir üretim için kontrol panelinden istenilen sıcaklık değerlerine ayarlanır. Isıtıcı silindir bölgeleri istenilen sıcaklığa ulaştıktan sonra kontrol panelinden vidayı döndüren elektrik motorunun hızı ayarlanır ve çalışmaya başlatılır. Vidanın dönmeye başlaması ile hunideki granülleri almaya başlar ve onları ısıtır. Besleme bölgesinden geçen granüller basınç bölümünde eriyik hale getirilir ve vida yardımı ile şekillendirme kısmına iletilirler. Ekstrüderde filament üretimi için kullanılan kalıp 3 mm' lik çapta bir deliğe sahiptir. Malzeme kalıptan daire şeklinde çıkar. Eriyik polimer kalıptan geçilirken sürekli çekim işlemi için bir çekici kullanılır. Bu çekici 3 mm' lik çaptan çıkan filamentin 1.75 mm mertebelerine kadar incelmesini sağlar. Çekicinin farklı hızlarda ayarlanması ile filament çapı değişkenlik gösterir. Kalıptan çıkan dairesel kesitli eriyik polimer soğutma havuzundan çekici yardımıyla belli hızda çekilerek son şeklini alması sağlanır ve yardımcı ekipman olan sarıcıda bir bobine sarılması ile filament eriyik biriktirme modellemede kullanılmak üzere hazır hale gelir. Çizelge 3.5' te ABS filamentinin üretiminde kullanılan üretim parametreleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 : ABS filament üretim parametreleri.

Bölümler	Değer	Birim
Silindir 1	150	°C
Silindir 2	160	°C
Silindir 3	180	°C
Ekstrüder Kafası	190	°C
Kalıp	200	°C
Soğutma Havuzu	60	°C
Vida	10	Rpm
Çekici	15	Rpm
Sarıcı	15	Rpm

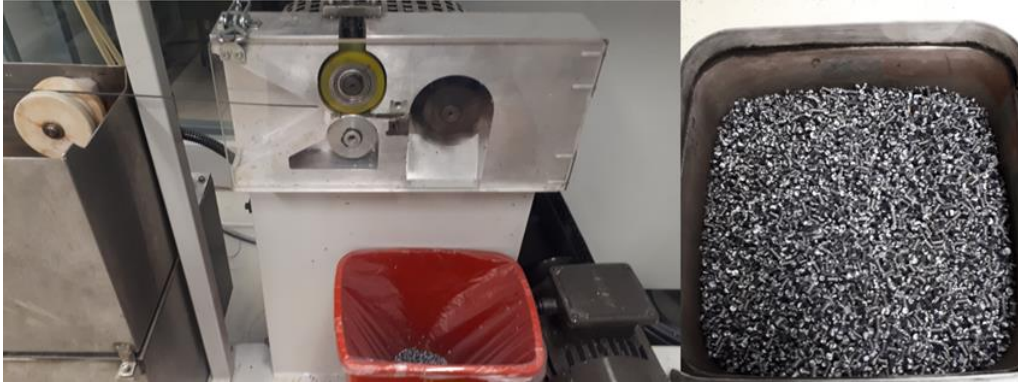
3.2.2.2 ABS ve karbon fiber tozu filament üretimi

Karbon fiber tozu ve ABS granüllerinin saklama koşullarında maruz kaldıkları nemi uzaklaştırmak için üretim işlemine başlamadan önce etüv fırınında 2 saat süre boyunca 60 °C’ de bekletilmiştir. Fırınlama işleminden sonra karbon fiber tozu ve ABS granülleri bir karıştırıcı cihaz yardımıyla karıştırılır. Şekil 3.7’ de karıştırılmış olan malzeme gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : (1) ABS granülleri, (2) karbon fiber tozu, (3) ABS ve KFT karışımı.

Karıştırılan bu malzemeler bileşik oluşturma makinesinin besleme hunisine yerleştirilir. Bu çalışmada kullanılan bileşik oluşturma makinesinin ısıtıcı silindirleri 6 adettir. Her ısıtıcı silindir kontrol panelinden istenilen sıcaklık değerine ayarlanır ve bu sıcaklıklara ulaşması beklenir. İstenilen sıcaklık değerlerine ulaştıktan sonra çift vidanın dönmelerini sağlayan elektrik motorunun hızı ayarlanır ve çalıştırılır. Vidaların besleme hunisinden aldıkları malzeme ısıtılır ve vidaların yardımıyla ilerletilirler. Ekstrüder kafasında 5 mm’ lik çapta deliği olan bir kalıp kullanılır. Bu kalıptan çıkan malzeme çekici yardımıyla soğutma havuzundan geçirildikten sonra kırıcıya giriş yapar. Bileşik oluşturma makinesinde bulunan kırıcı vasıtasıyla çubuk formda kalıptan çekilen malzeme tekrar granül forma getirilerek ekstrüderde kullanıma hazır hale gelir. Elde edilen bu granül plastik ekstrüzyon cihazında besleme hunisine yerleştirilir. Vidanın dönmeye başlaması ile granül önce ısıtılır daha sonra ilerletilir. Sırasıyla basınç ve şekillendirme bölgelerinden geçen malzeme son olarak kalıptan sürekli bir şekilde çekilerek son şekline kavuşur. Kalıptan çıkan malzeme çekicinin de yardımıyla soğutma havuzundan geçerek filamentin kontrollü bir şekilde soğuması sağlanır. Kompaunderda elde edilen malzemenin kırılarak tekrar granül olarak elde edilmesi işlemi Şekil 3.8’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 : ABS ve karbon fiber tozu karışımından granül elde edilmesi.

Çizelge 3.6 ile kompauder makinasında kompozit granül üretilirken kullanılan parametreler gösterilmiştir.

Çizelge 3.6 : ABS ve karbon fiber tozu bileşik oluşturma parametreleri.

Bölümler	Değer	Birim
Silindir 1	140	°C
Silindir 2	150	°C
Silindir 3	160	°C
Silindir 4	170	°C
Silindir 5	180	°C
Silindir 6	190	°C
Ekstrüder Kafası	200	°C
Kalıp	210	°C
Soğutma Havuzu	50	°C
Vidalar	20	Rpm
Çekici	25	Rpm
Kırıcı	25	Rpm

Bileşik oluşturma makinesinin kullanım amacı daha homojen yapıda bir bileşik elde etmektir. Bu işlemden oluşturulan bileşik granüller ekstrüder makinesinin besleme hunisine yerleştirilir. Katkısız ABS üretiminde ekstrüder cihazının gerçekleştirdiği üretim basamakları karbon fiber tozu katkılı ABS filament üretiminde de uygulanır. Karbon fiber tozu katkılı ABS kompozit filament üretiminde eklenen katkı maddesi farklı yüzdelerdedir. Bu yüzdeler Çizelge 3.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.7 : Karbon fiber katkılı filamentte kullanılan malzeme paketi.

Matris	Takviye	Katkı Yüzdesi	Matris Miktarı	Takviye Miktarı	Birim
ABS	Karbon Fiber	%1	495	5	g
ABS	Karbon Fiber	%3	485	15	g
ABS	Karbon Fiber	%5	475	25	g

Bu oranlar belirli oranlarda sınırlı kalmıştır. Bunun nedeni kullanılan karbon fiber tozunun yüzdesi arttıkça kapladığı hacmin çok artması ve yüksek yüzdedeki bileşiklerden elde edilen granüller ekstrüderde istenilen özelliklerde filament üretimine izin vermemesidir. Şekil 3.9’ da %10 karbon fiber tozu katkılı ABS filament denemesi gösterilmiştir. Filament yüzeyinde oluşan topaklar karbon fiber tozlarının yığılması sonucu oluşmuştur. Bu katkılı ABS filament üretimi için ekstrüder makinesinde Çizelge 3.8’de gösterilen parametreler kullanılmıştır.



Şekil 3.9 : %10 karbon fiber tozu ile ABS kompozit filament denemesi.

Çizelge 3.8 : Karbon fiber tozu katkılı ABS filamentini üretim parametreleri.

Bölmeler	Değer	Birim
Silindir 1	150	°C
Silindir 2	160	°C
Silindir 3	180	°C
Ekstrüder Kafası	190	°C
Kalıp	200	°C
Soğutma Havuzu	60	°C
Vida	10	Rpm
Çekici	15	Rpm
Sarıcı	15	Rpm

3.2.2.3 ABS ve TPU filament üretimi

İlk adım olarak ABS ve TPU granüllerinden ortam koşullarında maruz kaldıkları nem uzaklaştırılır. Bu işlem etüv fırınında 60 °C’ de 2 saat boyunca gerçekleştirilir. Daha sonra bir karıştırıcıda belirli yüzdelere ile karıştırılan ABS ve TPU granülleri bileşik oluşturma makinesinin besleme hunisine yerleştirilir. Bu karışım kullanılan yüzdelere Çizelge 3.9’ da paylaşılmıştır. Bu karışım çizelgede verilen en yüksek değerdeki orana kadar gerçekleştirilebilmiştir. Daha yüksek oranlardaki karışımlar bu çalışmada kullanılan ekstrüderden istenilen özelliklerdeki filamentler üretilmemiştir.

Çizelge 3.9 : TPU katkıli filament için malzeme paketi.

Matris	Takviye	Katkı Yüzdesi	Matris Miktarı	Takviye Miktarı	Birim
ABS	TPU	%10	450	50	gr
ABS	TPU	%20	400	100	gr
ABS	TPU	%30	350	150	gr

Besleme hunisine yerleştirilen malzeme vidalar yardımıyla huniden alınırlar ve ilerletirler. Isıtılmaya başlayan malzeme vidalar yardımıyla bileşik oluşturma makinesinin 6 bölgesinden de geçer ve eriyik hale gelir. Eriyik hale gelmiş olan malzeme ekstrüder kafasından basılır ve çekici yardımı ile 5 mm delik çapına sahip kalıptan sürekli geçirilerek kırıcıya girişi sağlanır. Bileşik oluşturma makinesinde ABS ve TPU granüllerinden bileşik granül elde edilmek için kullanılan üretim parametreleri Çizelge 3.10' da gösterilmiştir.

Çizelge 3.10 : ABS ve TPU filament için granül oluşturma üretim parametreleri.

Bölümler	Değer	Birim
Silindir 1	155	°C
Silindir 2	165	°C
Silindir 3	175	°C
Silindir 4	185	°C
Silindir 5	195	°C
Silindir 6	205	°C
Ekstrüder Kafası	215	°C
Kalıp	225	°C
Soğutma Havuzu	60	°C
Vidalar	20	Rpm
Çekici	25	Rpm
Kırıcı	25	Rpm

Kırıcının yardımı ile ABS ve TPU granüllerinin belirli oranlarda kullanılması ile granül formda bileşik elde edilir. Bu bileşik granüller ekstrüder cihazının besleme hunisine yerleştirili. Kontrol panelinden ısıtıcı silindiler istenilen sıcaklıklara ayarlandıktan sonra huniden malzemenin alınması ve ilerletilmesi için vidanın dönme hızı ayarlanır ve çalışmaya başlatılır. 3 mm çapta deliğe sahip olan kalıptan geçirilen eriyik malzeme çekici yardımı ile soğutma havuzundan geçirilir ve uygulanan çekim işlemi sonucunda 1.75 mm çap mertebelerinde filament elde edilerek bobine sarılması gerçekleşir. Bu kompozit filamentin üretilmesinde ekstrüder cihazında kullanılan üretim parametreleri Çizelge 3.11' de paylaşılmıştır.

Çizelge 3.11 : TPU katkılı ABS kompozit filament üretim parametreleri.

Bölümler	Birim	Değer
Silindir 1	150	°C
Silindir 2	170	°C
Silindir 3	190	°C
Ekstrüder Kafası	195	°C
Kalıp	195	°C
Soğutma Havuzu	40	°C
Vida	18	Rpm
Çekici	27	Rpm
Sarıcı	27	Rpm

Ayrıca bu çalışmada üretilerek sarı ile bobinlere sarılan filamentler Şekil 3.10' da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : Çalışmada üretilen filamentler.



4. ÜÇ BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİM

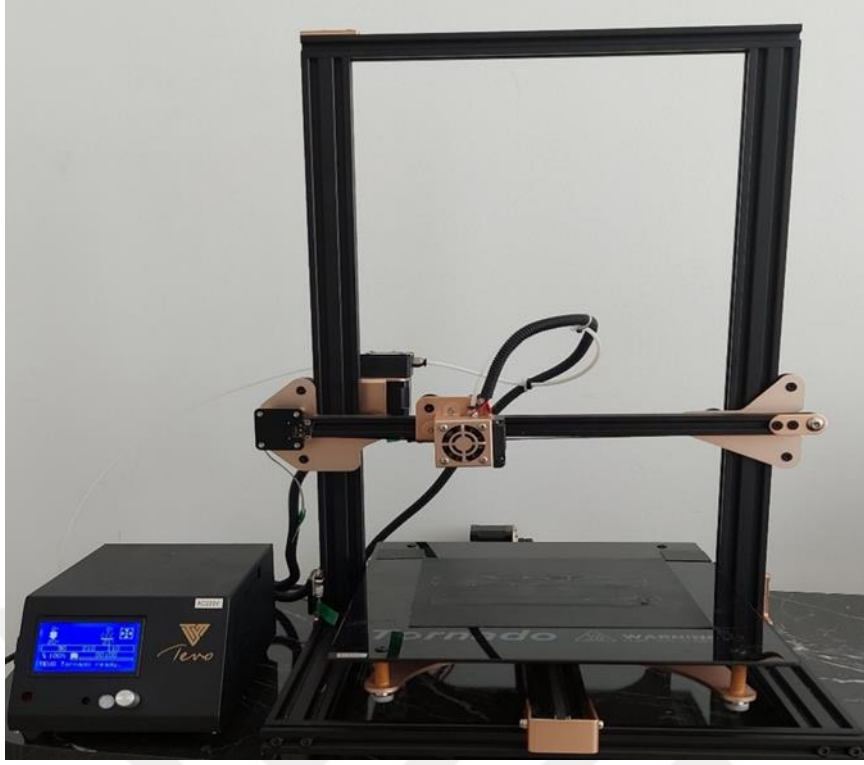
Bu çalışmada plastik ekstrüzyon yöntemi ile üretilen filamentler; ABS, ABS ve TPU kompozit filamentleri ve ABS ve karbon fiber tozu kompozit filamentleridir. Bu filamentlerin mekanik özelliklerinin karşılaştırmak amacı ile ASTM-638 TİP-1' e göre çekme testi numuneleri bir üç boyutlu yazıcı kullanılarak basılmıştır. Üç boyutlu yazıcılar genel olarak termoplastik malzemelerden yapılmış filamentleri kullanırlar. Çok renkli baskı alabilmek, destek yapılarını oluşturabilmek amacıyla iki veya üç ekstrüzyon kafasına sahip üç boyutlu yazıcılar mevcut olmasına rağmen günümüzde en çok tercih edilen ve kullanılan üç boyutlu yazıcılar bir ekstrüzyon kafasına sahiptirler. 1.75 mm çap ölçüsü ile üretim yapabilen ve 3.00 mm çap ölçüsünde filamentler ile üretim yapabilen yazıcılar birbirinden ayrılırlar. Her iki çaptaki filamentler ile üretim yapabilen yazıcılar da mevcuttur. Kullandıkları koordinat sistemlerine göre farklı yazıcılar vardır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan yazıcılar kartezyen koordinat sistemine sahip olan yazıcılardır. Diğer yazıcılar; delta koordinat sistemine sahip ve polar koordinat sistemine sahip yazıcılardır. Scara yazıcılar ise çalışma mantığı olarak baskı sırasında bir robot kol şeklinde çalışarak ekstrüzyon kafasının yönlendirilmesini sağlar.

4.1 Üç Boyutlu Yazıcının Bölümleri

Çalışmada bir üç boyutlu yazıcı ile test örnekleri basılmıştır. Bu basımda kullanılan yazıcı TEVO markasının Tornado modelidir. Yazıcıya ait özellikler Şekil 4.1' de gösterilmiştir.

Yazıcı Tipi	Baskı Boyutu	Baskı Çözünürlüğü	Nozul Tipi	Filament Çapı
Kartezyen Sistem	300*300*400 mm	0,1 mm	MK8	1,75 mm

Şekil 4.1 : Çalışmada kullanılan yazıcının özellikleri.



Şekil 4.2 : Çalışmada kullanılan üç boyutlu yazıcı.

Kartezyen koordinat sistemine sahip olan çalışmada kullanılan yazıcı Şekil 4.2' de gösterilmiştir.

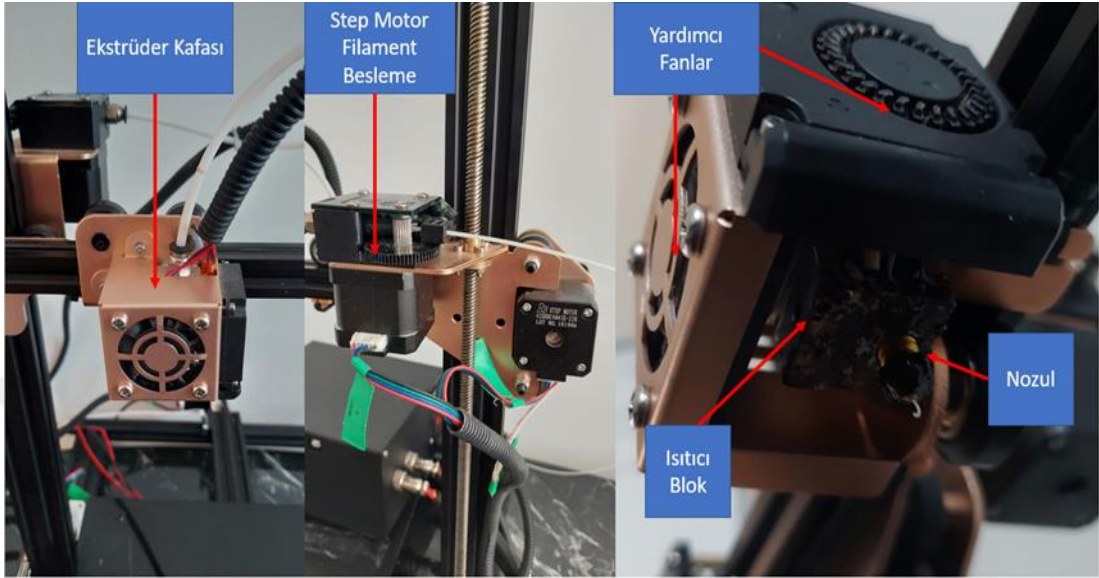
4.1.1 Platform

Platform, üç boyutlu yazıcılarda dataya uygun olarak ilk katmanın inşa edildiği ve diğer üretilecek katmanların da bu ilk katman üzerine biriktirildiği yazıcının bölümüdür. Platformun altında bir ısıtıcı ped bulunur. Bu ısıtıcı pedin sıcaklığı kullanılan malzemeye göre ayarlanır ve böylece ilk katmanın baskı boyunca platformda tutunmasına yardımcı olur.

4.1.2 Ekstrüder kafası

Üç boyutlu yazıcılarda filament şeklindeki polimer malzeme ekstrüder kafasına bir step motor yardımı ile filament makarasından çekilir. Filament bobinden proses parametresi olarak seçilen yazdırma hızında çekilir ve ekstrüder kafasındaki ısıtıcı bloğa doğru beslenir. Isıtıcı bloğun sıcaklığı kullanılan malzemeye göre ayarlanır. Malzemeye göre uygun sıcaklıktaki ısıtıcı bloktan filament geçerken eriyik hale gelir. Bu eriyik haldeki malzeme step motorun yeni filament miktarını çekmesi ile ekstrüder kafasındaki nozula doğru itirilir. Nozuldaki malzeme baskı dataısına uygun olarak

ve seçilen baskı çözünürlüğüne göre nozuldan dışarı çıkararak basılır. Farklı çaplarda nozullar mevcuttur. Yaygın olarak kullanılan nozul çapı 0.4 mm'dir. Şekil 4.3' te ekstrüder kafası, nozul ve step motor gösterilmiştir. Isıtıcı bloğun istenilen sıcaklığa ulaşmasında yardımcı olmak için fanlar kullanılır.

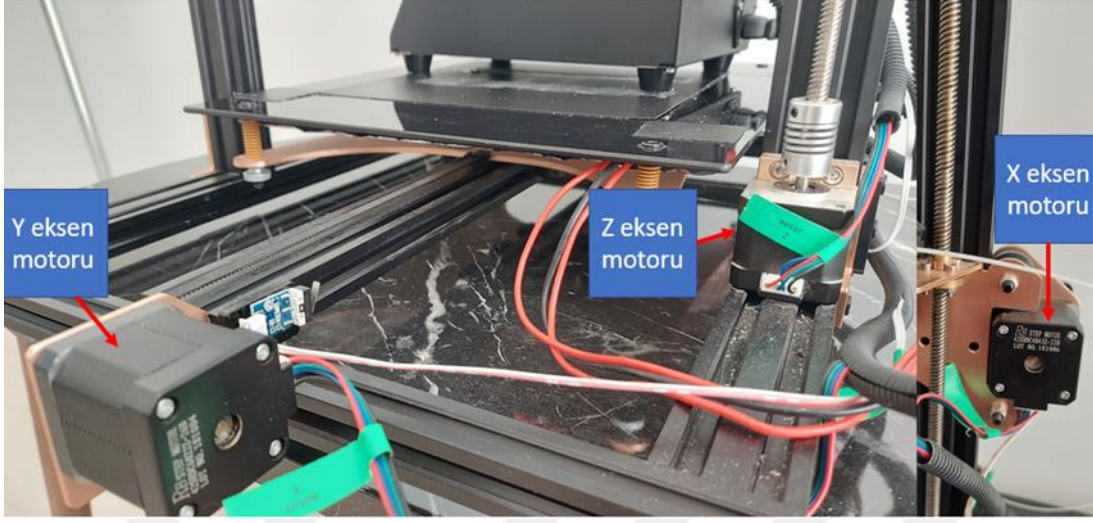


Şekil 4.3 : Ekstrüder kafası ve yardımcı bölümleri.

4.1.3 Motorlar

Kartezyen sistemine sahip bir üç boyutlu yazıcı eğer bu çalışmada kullanılan yazıcı gibi tek ekstrüder kafasına sahip ise 4 adet step motor ile baskı işlemlerini gerçekleştirirler. Bu motorlardan üç tanesi yön motorudur. Diğer kalan motor ise malzeme besleme motorudur. X eksen motoru ekstrüder kafasının şasinin bağlı olduğu kayışı dataya uygun adımlarla döndürerek ekstrüder kafasının sağ ve sol yönde hareket etmesini sağlar. Y eksen motorunun döndürdüğü kayış platformun şasisine bağlıdır. Kayışı dataya uygun olarak döndürerek platformun ileri ve geri yönde hareketini sağlar. Z eksen motoru ekstrüder kafasının aşağı ve yukarı yöndeki hareketini sağlar. Her katmanın basımı bittikten sonra ekstrüder kafasını bir katman kalınlığında yukarı yönde hareket ettirir. Ekstrüder kafası yapılacak baskıya göre platforma yakın olacak şekilde başlatılmak istenebilir. Böyle durumlarda da Z eksen motoru ekstrüder kafasının aşağı yöndeki hareketini sağlar. Dördüncü motor olan malzeme besleme motoru da kullanılan filament baskı özelliklerine uygun bir hızda ısıtıcı bloğa doğru besler ve malzemenin nozulun ucundaki çıkması için uyguladığı itme kuvveti ile

gerekli basıncı oluşturur. Üç boyutlu yazıcıda kullanılan motorlar Şekil 4.4' te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : Üç boyutlu yazıcı hareket motorları.

4.1.4 Kontrol paneli

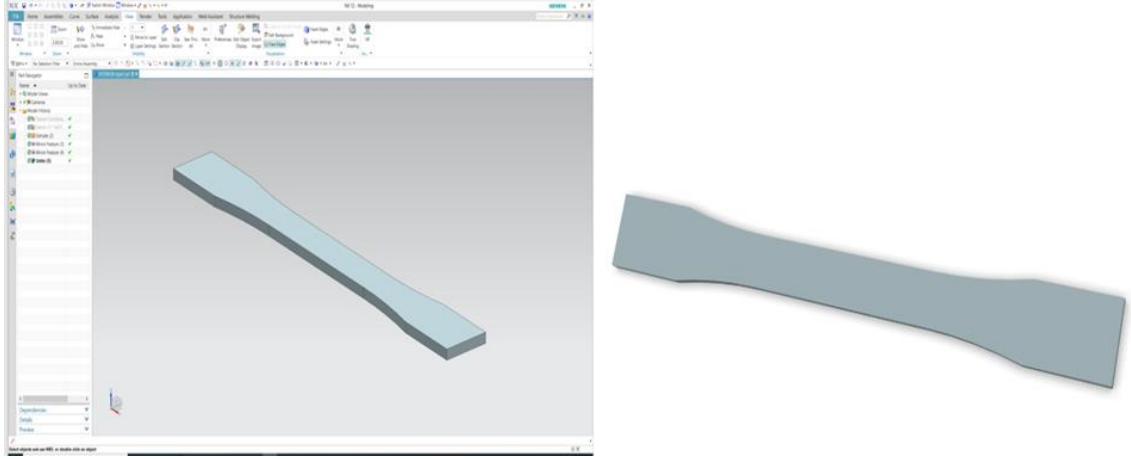
Kontrol paneli yazıcının açılmasını, üretim parametrelerinin manuel olarak ayarlanmasını, yazıcı ayarlarının manuel olarak değiştirilmesini ve üretim anında ekranında üretim hakkında bilgi verilmesini sağlar. Kontrol paneli üzerinde bir adet LCD ekran bulunur ve bu ekrandan üretimin aşamasını, cihaz ayar bilgilerinin görüntülenmesi ve yazılacak datanın seçilmesi sağlanır. Kontrol paneli kutusunda bir adet hafıza kartı yuvası ve bilgisayar bağlantısının sağlanabilmesi için bir adet USB çıkışı mevcuttur. Kontrol paneli kutusunun içerisinde motor sürücülerini ve bu sürücülerin bağlı olduğu bir anakart mevcuttur.

4.2 Test Numunelerinin Üretilmesi

Plastik ekstrüzyon yöntemi ile üretilen filamentler eklemeli imalat yöntemlerinden eriyik biriktirme modelleme yönteminde kullanılarak test numuneleri basılmıştır.

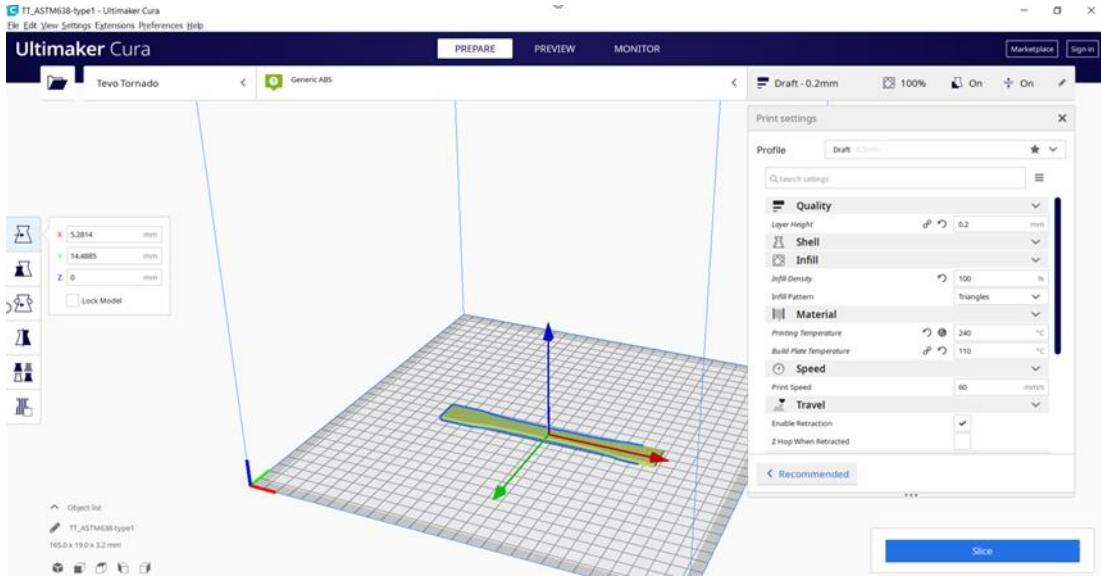
4.2.1 Üretim basamakları

Bir bilgisayar destekli tasarım programı olan Siemens NX 12 programı ile ASTM-638 TİP-1' e göre test numuneleri tasarlanmıştır. Şekil 4.5' te bu tasarım gösterilmiştir.



Şekil 4.5 : CAD programında tasarlanan test numunesi.

Test numunesi tasarlandıktan sonra CAD programı vasıtasıyla STL dosya formatına dönüştürülür. STL formatına dönüştürülen data üç boyutlu yazıcılar için yapılmış bir G-kod programına aktarılır. Bu çalışmada G-kod programı olarak Ultimaker Cura 4.8 kullanılmıştır. Bu program ile Şekil 4.6’ da de gösterildiği gibi baskının platform üzerinde nerede konumlanacağı, baskının parçanın hangi kenarı üstüne inşa edileceği ve üretim parametreleri seçilir. Üretime hazır olan data bir hafıza kartına aktarılarak üretim için yazıcıya takılabilir ya da data bilgisayarın bir usb kablosu yazıcıya bağlanması ile yazıcıda aktif hale getirilir.



Şekil 4.6 : STL datasının G-kod programında baskıya hazırlama.

4.2.2 Yazıcıdan baskı alınması

G-kodu oluşturulan data yazıcıda basılmaya hazır hale gelir. Yazıcının kontrol panelinden data dosyasının bulunur ve yazdırılması için komut verilir. Yazıcı ekstrüder kafasının ısıtıcı bloğunu ve platformu kullanılacak malzemeye göre seçilen sıcaklığa getirir. Ekstrüder kafası yazıcının sıfır noktasına gider ve pozisyonunu bütün eksenler için sıfırlar. Daha sonra parçanın platformda konumlandırılan yerine giderek baskı işlemine başlar.

4.2.2.1 ABS numunelerinin basılması

STL formatında datası hazır olan ABS numuneleri için Ultimaker Cura programında üretim parametreleri seçilir. Çizelge 4.1’ de katkısız ABS filamenti ile test numunesi üretim parametreleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Katkısız ABS filamenti test numunesi üretim parametreleri.

Malzeme	Katman Yüksekliği	Baskı Yoğunluğu	Ekstrüder Sıcaklığı	Platform Sıcaklığı	Baskı Hızı
ABS	0.2 mm	%100	240 °C	110 °C	60 mm/s

Üç boyutlu yazıcıda katkısız ABS filamenti ile 5 adet numune üretilmiştir. Bir numunenin baskısı 1 saat 4 dakika sürmüştür. Şekil 4.7’de katkısız ABS filamenti ile basılan numuneler gösterilmiştir.



Şekil 4.7 : ABS test numuneleri.

4.2.2.2 ABS ve karbon fiber tozu kompozit filament test numuneleri

Farklı oranlarda karbon fiber tozu eklenerek elde edilen bileşik ABS filamentleri ile test numuneleri basılmıştır. Bu filamentleri baskı parametreleri Çizelge 4.2’ de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : ABS ve KFT kompozit filament test numunesi baskı parametreleri.

Malzeme	Katman Yüksekliği	Baskı Yoğunluğu	Ekstrüder Sıcaklığı	Platform Sıcaklığı	Baskı Hızı
ABS+%1 KFT	0.2 mm	%100	250 °C	110 °C	60 mm/s
ABS+%3 KFT	0.2 mm	%100	250 °C	110 °C	60 mm/s
ABS+%5 KFT	0.2 mm	%100	250 °C	110 °C	60 mm/s

Bu kompozit filamentlerin her biri katkısız filamentler gibi 1 saat 4 dakikada basılmıştır. Ağırlıkça %1 karbon fiber tozu içeren, %3 karbon fiber tozu içeren ve %5 karbon fiber tozu içeren filamentlerin her birinden 5 adet test numunesi basılmıştır. Şekil 4.8’ de basılan test numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : ABS ve KFT kompozit filament test numuneleri.

4.2.2.3 ABS ve TPU kompozit filament test numuneleri

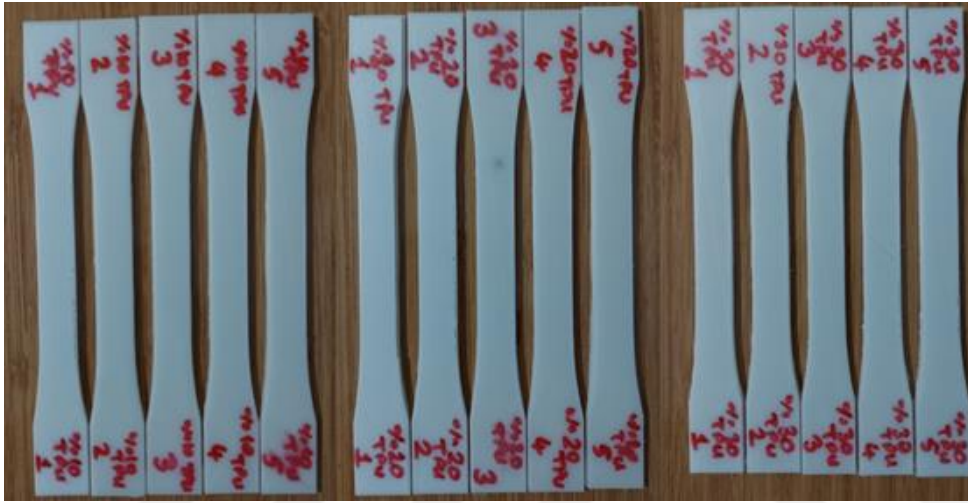
Bu kompozit filament TPU’nun ağırlıkça 10%, 20% ve 30% oranlarında ABS granülleri ile karıştırılması sonucu elde edilmiştir. Elde edilen bu filamentler ile her oran için 5 adet test numunesi basılmıştır. TPU katkılı ABS filamentleri ile test numune basılmasında baskı hızı 50 mm/s’dir. Bunun nedeni normalde TPU katkılı filamentlerin daha esnek hale gelmesi ve filament besleme işlemi esnasında filamentte oluşan esnemelerden dolayı filament besleme motorunun sorunsuz çalışması içindir. Böylece bu filamentler ile yapılan her bir baskı 1 saat 19 dakika

sürmüştür. Test numunelerinin üç boyutlu yazıcı ile üretilmesinde kullanılan üretim para-metreleri aşağıdaki Çizelge 4.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : ABS ve TPU bileşik filament test numunesi baskı parametreleri.

Malzeme	Katman Yüksekliği	Baskı Yoğunluğu	Ekstrüder Sıcaklığı	Platform Sıcaklığı	Baskı Hızı
ABS+%10 TPU	0.2 mm	%100	230 °C	100 °C	50 mm/s
ABS+%20 TPU	0.2 mm	%100	230 °C	100 °C	50 mm/s
ABS+%30 TPU	0.2 mm	%100	230 °C	100 °C	50 mm/s

Şekil 4.9’ da bu filamentler ile üretilen test numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 4.9 : ABS ve TPU kompozit filament test numuneleri.

5. ÖLÇÜM VE DENEY

Üretilen filamentlerde çap ölçümü gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu yazıcıdan elde edilen test numunelerine çekme deneyi yapılmıştır.

5.1 Çap Ölçümü

Eriyik biriktirme modelleme yönteminde iki farklı çapta filamentler kullanılmaktadır. Bu farklı çaplardan biri 1.75 mm çaptaki filamentler ve diğeri 3.00 mm çaptaki filamentlerdir. Bu çalışmada 1.75 mm çapında ABS ve kompozit ABS filamentlerin üretilmesi amaçlanmıştır. Üretilen filamentlerin bir kumpas kullanılarak ölçülmüştür. Şekil 5.1’de bu ölçümlere örnekler gösterilmiştir.



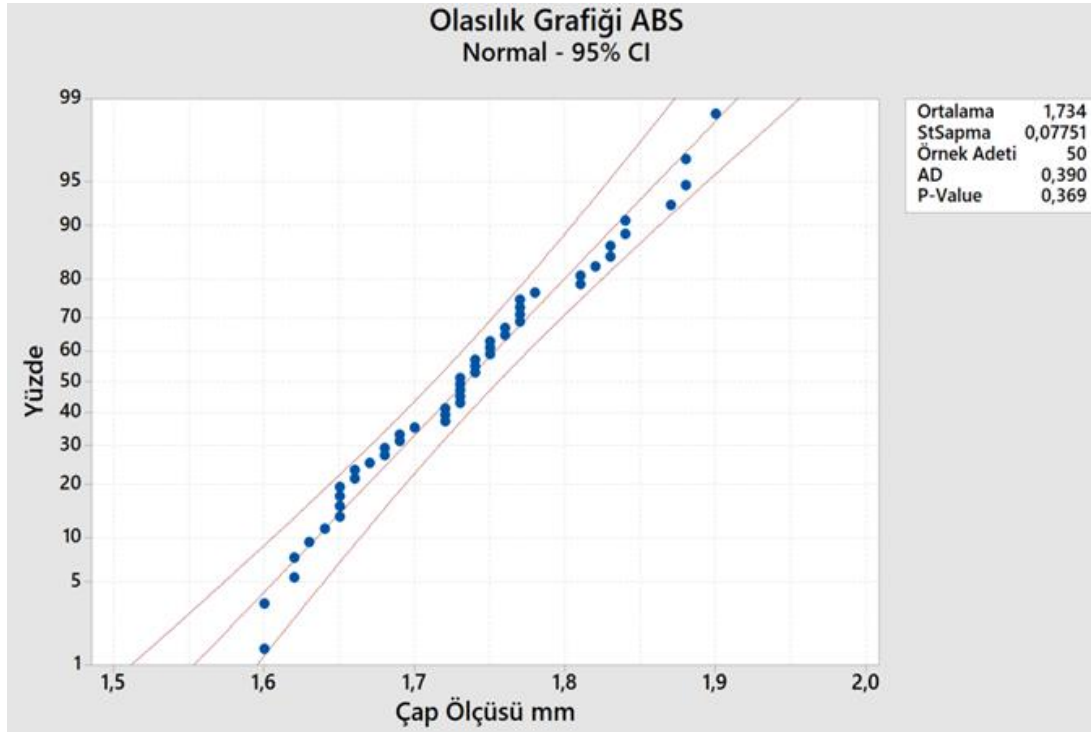
Şekil 5.1 : ABS, ABS+TPU ve ABS+KFT çap ölçümleri.

Üretilen filamentlerden her birinde 5 m uzunlukta örnekler alınmıştır. Alınan örneklerden her 1 m uzunlukta rastgele 10 adet ölçüm yapılmıştır. Çap ölçümü yapılan filamentlerin ortalama çapları, mod, medyan ve standart sapmaları istenilen çap ölçüsü olan 1.75 mm’ye göre hesaplanmıştır, Çizelge 5.1’ de gösterilmiştir.

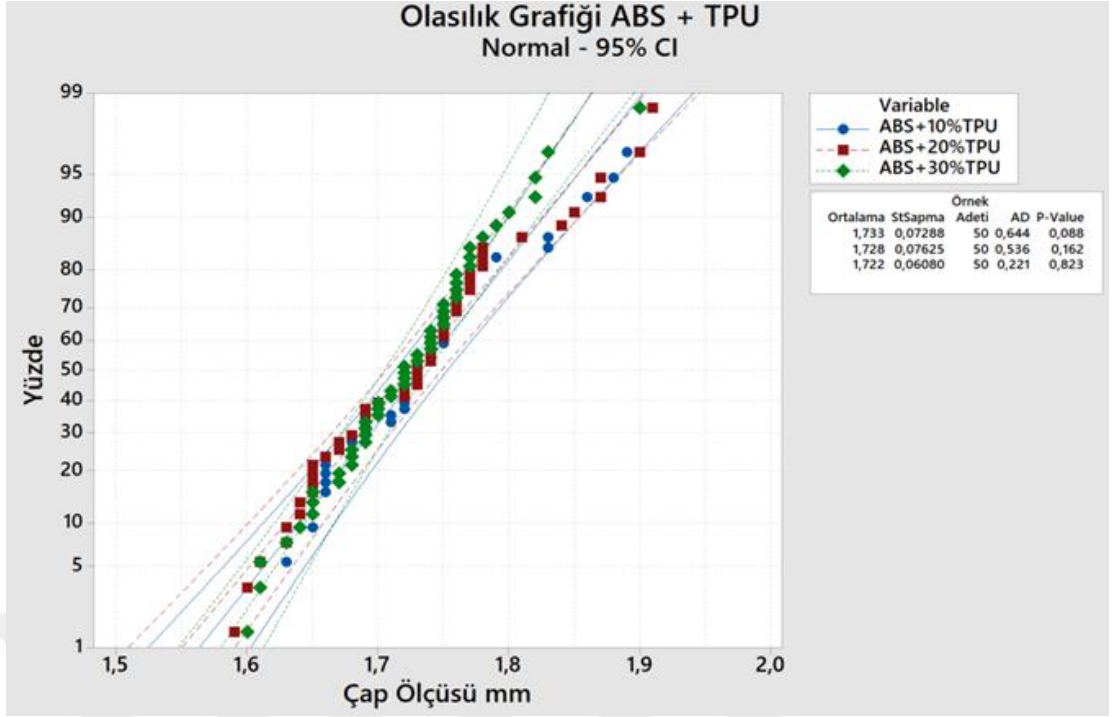
Çizelge 5.1 : Üretilen filamentlerin çap ölçüm sonuçları.

Değerler	ABS	%1 KFT	%3 KFT	%5 KFT	%10 TPU	%20 TPU	%30 TPU
Aritmetik Ortalama	1.73	1.73	1.75	1.72	1.73	1.73	1.72
Medyan	1.73	1.74	1.74	1.72	1.73	1.73	1.72
Mod	1.73	1.74	1.68	1.68	1.75	1.73	1.72
Standart Sapma	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.06

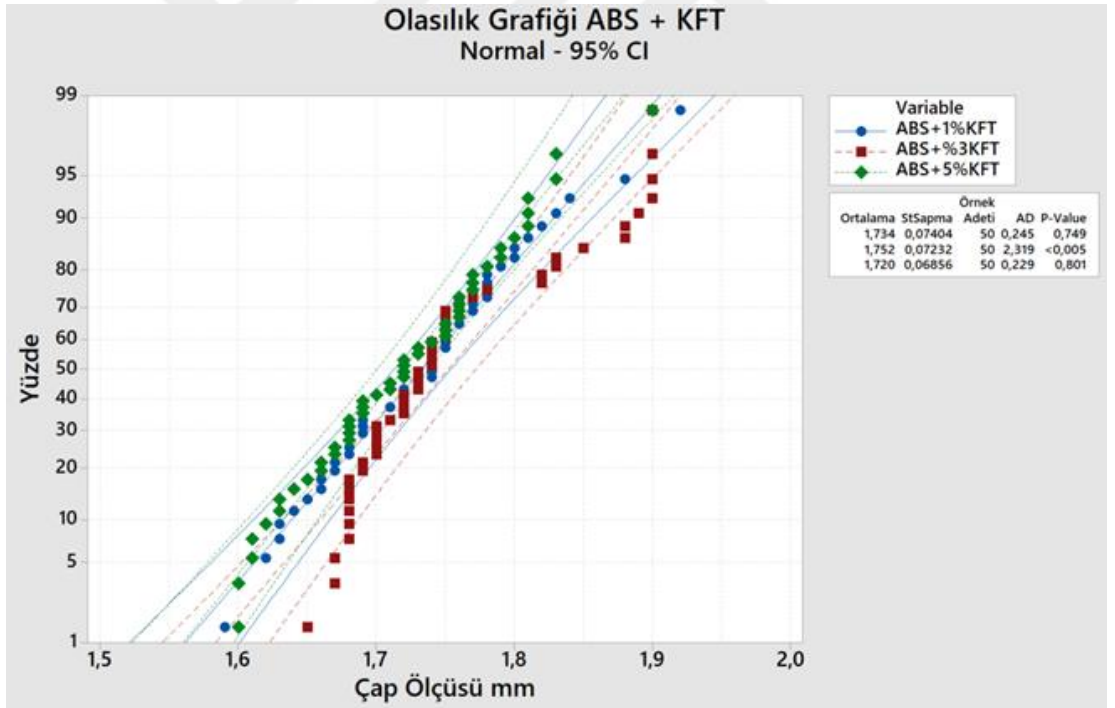
Üretilen her filamentin yapılan çap ölçümleri sonucu olasılık grafikleri Minitab programı kullanılarak oluşturulmuştur. Böylece ölçülen çap değerlerinin dağılımının grafiği tüm filamentler için çizdirilmiştir. Bu ölçümler sonucunda ABS filamentinin çapı 1.75 ± 0.08 , ABS ve %10 TPU bileşik filamentini çapı 1.75 ± 0.07 , ABS ve %20 TPU bileşik filamentinin çapı 1.75 ± 0.08 , ABS ve %30 TPU bileşik filamentinin çapı 1.75 ± 0.06 , ABS ve %1 karbon fiber tozu kompozit filamentinin çapı 1.75 ± 0.07 , ABS ve %3 karbon fiber tozu kompozit filamentinin çapı 1.75 ± 0.07 ve ABS ve %5 karbon fiber tozu kompozit filamentinin çapı 1.75 ± 0.07 bulunmuştur. Şekil 5.2, Şekil 5.3 ve Şekil 5.4' te bu filamentlere ait çap ölçüm olasılık grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 5.2 : ABS filamentini çap olasılık grafiği.



Şekil 5.3 : ABS ve TPU filamenti çap olasılık grafiği.



Şekil 5.4 : ABS ve KFT filamenti çap olasılık grafiği.

5.2 Çekme Deneyi

Elastiklik modülü, tokluk, rezilyans, akma ve çekme dayanımı değerleri polimer malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesini sağlarlar. Polimerlerin bu değerlerinin belirlenip mekanik özelliklere ulaşılmasında çekme testi kullanılır.

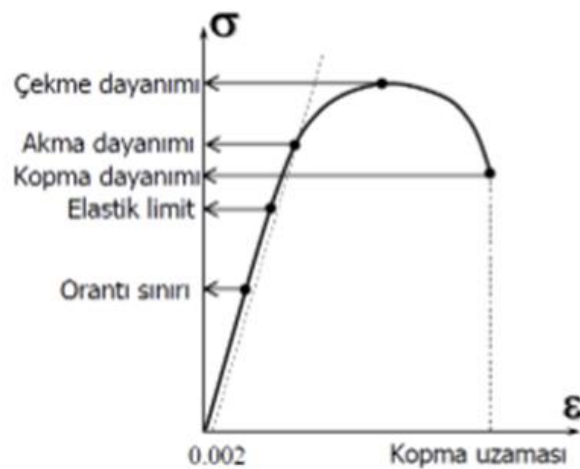
Polimer malzemeler çevre koşullarından oldukça fazla etkilenirler. Bu yüzden üretimden önce olabildiğince çevre koşullarının vereceği zararı en aza indirmek için işlemler uygulanır. Örnek olarak malzemenin üzerindeki nemi almak için fırında kurutma işlemi. Çekme testi de mümkün olduğunca stabil ortamlarda oda koşulları şartlarında yapılır. Parçaların, yapıların, ürünlerin yapıldığı malzemeler belirli bir eksenini doğrultusunda çekme işlemine maruz kaldığında gösterdikleri davranışları incelemek için çekme testi uygulanır. Malzemelerin belli bir eksenine çekme kuvveti uygulandığı zaman malzemenin o eksenindeki kesiti daralır ve malzemenin boyu uzar. Çekme testi yapılan cihazdan akma gerilmesi, yüzde boyca uzama, kopma gerilmesi ve elastisite modülü değerleri elde edilir. Çekme testi so-nucunda elde edilen gerilme değerleri aşağıdaki formül 5.1'e dayanmaktadır.

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \quad (5.1)$$

σ değeri normal gerilmeyi, F çekme işlemi için uygulanan kuvveti ve S_0 malzemenin ilk kesit alanını göstermektedir. Çekme testi yapılırken malzemenin boyca yüzde uzamasını ise formül 5.2 vermektedir.

$$\varepsilon_e = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100[\%] \quad (5.2)$$

ε_e değeri birim şekil değiştirme yüzdesini, ΔL boyca uzaman farkını, L_0 malzemenin ilk boyunun ölçüsünü göstermektedir. Çekme testi ile elde edilen dayanımlar Şekil 5.5'te gösterilmiştir.



Şekil 5.5 : Gerilme-gerinim grafiği.

Malzemeler bir çekme kuvveti ya da basma kuvveti uygulandığında iki bölgede şekil değişikliğine uğrarlar. Bunlardan birincisi elastik bölgede uğradıkları elastik şekil değişimidir. Uygulanan yük ortadan kaldırıldığında malzeme eski haline döner. Diğeri ise plastik bölgede uğradıkları plastik şekil değişimidir. Malzemeler bu bölgede kalıcı olarak şekil değişikliğine uğrarlar ve uygulanan yük kaldırılrsa dahi eski şekillerine geri dönemezler. Çekme dayanımı malzemeler için genel olarak uygulanan en yüksek kuvvetle elde edilen bir gerilme olsa da polimerler için çekme dayanımı kopma dayanımını ifade etmektedir. Malzemenin hasara uğradığı veya kırıldığı nokta polimerler için çekme dayanımı veya kopma dayanımını vermektedir. Polimer malzemelerde kopma dayanımı veya çekme dayanımı akma dayanımından büyük veya küçük olabilir. Elastik limit malzemenin uygulanan yük doğrultusunda doğrusal bir şekilde dayanımın arttığı son noktadır. Bu limitten sonra malzemenin dayanımı doğrusal bir şekilde artmamaktadır. Akma dayanımı malzemenin plastik olarak şekil değiştirmeye başladığı ilk noktadır. Bu nokta elastik şekil değişimi sona erer. Uygulanan yük kaldırıldığında malzemenin eski haline geri dönemeyeceği şekil değişiklikleri başlar. Bu yüzden tasarımcılar malzeme seçimi yaparken bu akma dayanımını dikkate alırlar ya da tasarımcılar tasarladıkları parçaların kesitlerini bu dayanıma göre tasarlarlar. Akma gerilmesi bir malzeme için plastik şekil değişikliğine karşı gösterilen dirençtir. Malzemenin akmaya başladığı noktanın belirgin olmadığı malzemelerde 0.002 uzama noktasında eğrinin doğrusal olduğu çizgiye paralel bir çizgi çekilir ve bu çizginin eğriyi kestiği nokta akma dayanımı olarak kabul edilir. Elastisite modülü ise uygulanan kuvvet ile parçanın uzamasının doğru orantılı olduğu bölgedeki doğrunun eğimi kabul edilir ve formül 5.3'te gösterildiği gibi hesaplanır. Bu formül Hooke kanunu olarak adlandırılır.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_e \quad (5.3)$$

σ değeri normal gerilmeyi, ε_e değeri birim şekil değiştirme yüzdesini ve E elastisite modülünü göstermektedir. Malzemeler için elastisite modül değeri malzemenin rijitliğinin veya yumuşaklığının bir göstergesidir. Rezilyans, bir malzemenin elastik bölgede şekil değiştirirken bu bölgede yuttuğu veya absorbe ettiği enerji eğer uygulanan kuvvet ortadan kaldırılırsa bu enerjiyi geri verme özelliği olarak adlandırılır. Rezilyans modülü ile rezilyansın değeri ölçülür ve formül 5.4 ile bu değer hesaplanır.

$$U_R = \frac{\sigma_a^2}{2E} \quad (5.4)$$

U_R malzemenin rezilyans modülünü, σ_a malzemenin akma dayanımını ve E malzemenin elastisite modülünü göstermektedir. Bir malzemenin çekme testinde kopma anına kadar absorbe ettiği enerji tokluk olarak adlandırılır. Eğrinin altında kalan alan tokluk değerinin bulunmasına yardımcı olur. Genel olarak formül 5.5' te sünek malzemelerin tokluğunu hesaplamak için kullanılır, formül 5.6' da gevrek malzemelerin tokluğunu hesaplamak için kullanılır.

$$U_T \cong \frac{\sigma_a + \sigma_{maks}}{2} \cdot \varepsilon_k \quad (5.5)$$

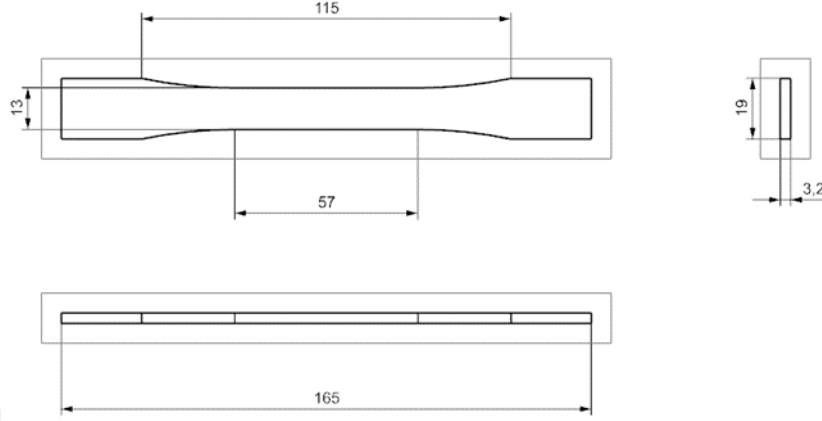
$$U_T \cong \frac{2}{3} \sigma_{maks} \cdot \varepsilon_k \quad (5.6)$$

U_T değeri tokluk değerini ifade etmektedir. σ_a malzemenin akma dayanımını, σ_{maks} test boyunca oluşan en yüksek gerilme değerini, ε_k kopma noktasındaki birim şekil değişikliğidir. Polimer bir kuvvet altında belirli bir gerilme ile birim şekil değişimine uğrarlar. Bu şekil değişimi üç farklı şekilde gerçekleşir. Bunlardan ilki malzemenin tamamen elastik bölgede şekil değişikliğine uğrar. İkincisi, malzeme hem elastik bölgede hem de plastik bölgede şekil değişimine uğrar. Akma noktasından sonra plastik şekil değişimi başlar. Sonuncusu, malzeme hem elastik hem de plastik bölgede elastik bir şekilde şekil değişimine uğrar. Akma noktası gözlenmez, kalıcı şekil değişimi gerçekleşmez ve bunlar genel olarak elastomerler olarak adlandırılır.

5.2.1 Çekme deneyinin tanıtılması

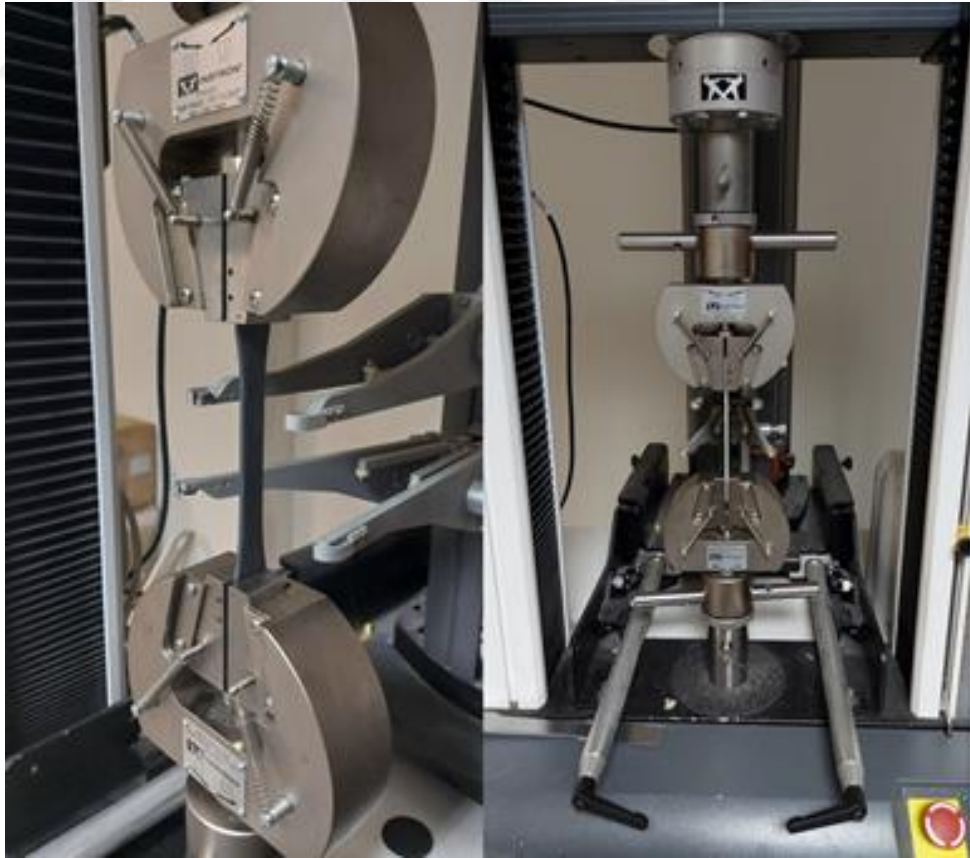
Polimer malzemelerin çekme testi için uluslararası iki standart vardır. Bunlardan biri ISO-527 ve diğeri ASTM-D638' dir. Bu standartlar teknik özellikleri bulma açısından benzerdir. Fakat standartların test hızı, numune boyutları farklılık gösterir. Bu yüzden iki standarttan alınan sonuçlar tam olarak eşleşmeyebilir. Bu çalışmada ASTM-D638

test standartı kullanılmıştır. ASTM-D638 test standartının TİP-1 şekli baz alınarak baskılar için data hazırlanmıştır. TİP-1'e göre test numunesinin boyutları aşağıdaki Şekil 5.6'da gösterilmiştir.



Şekil 5.6 : ASTM-D638 TİP-1 test numunesi boyutları.

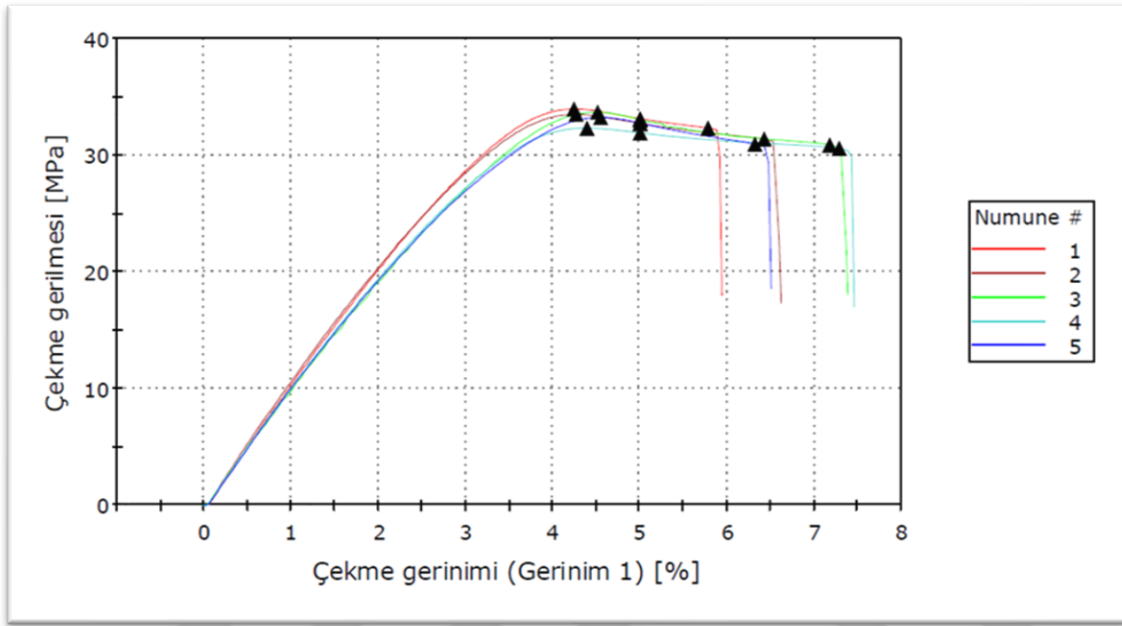
Bu çalışmadaki çekme testleri Şekil 5.7' de gösterilen çekme test cihazında yapılmıştır.



Şekil 5.7 : Çekme test cihazı.

5.2.2 ABS çekme deneyi

Katkısız ABS granüllerinden elde edilen filamentin bir üç boyutlu yazıcı kullanılarak ASTM-D638 TİP-1'e göre çekme testi numuneleri basılmıştır. 5 adet test numunesini çekme testi gerilme-gerinim grafiği sonuçları aşağıdaki Şekil 5.8' de paylaşılmıştır.



Şekil 5.8 : ABS gerilme-gerinim grafiği.

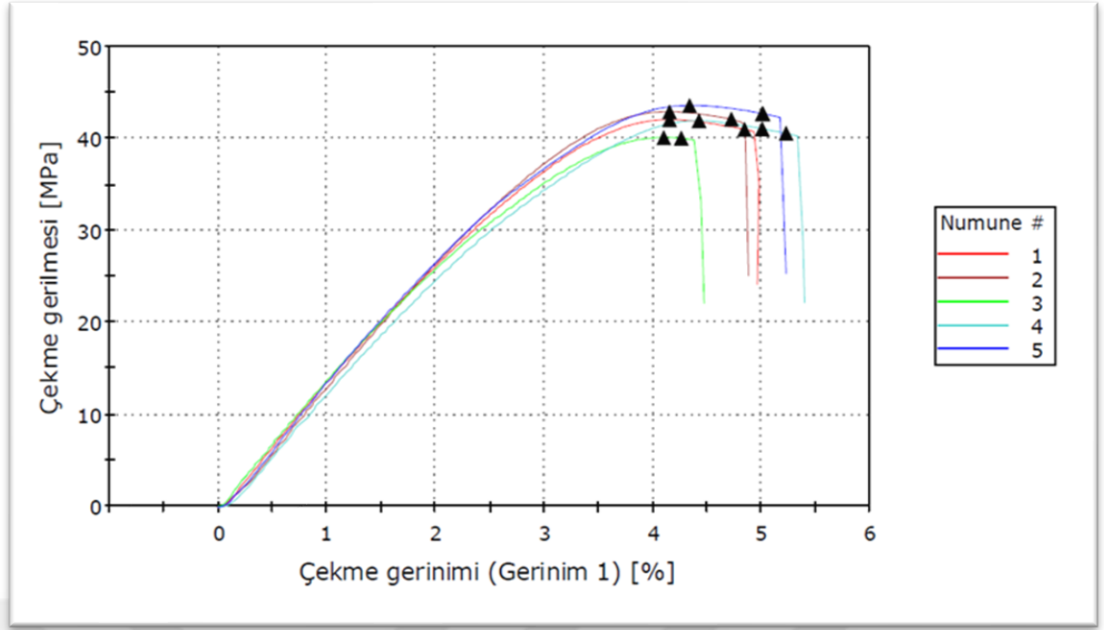
Çekme testinden elde edilen sonuçlar ve grafiğin oluşmasını sağlayan değerler Çizelge 5.2' de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : ABS test numuneleri çekme testi değerleri.

Numune	Akma Dayanımı [MPa]	Elastisite Modülü [MPa]	Kopma Dayanımı [MPa]	Uzama Yüzdesi [%]
1	33.93	1062.93	32.31	5.78
2	33.48	1138.94	31.37	6.42
3	33.66	1066.09	30.87	7.17
4	32.30	1127.70	30.57	7.28
5	33.22	1042.27	30.94	6.32
Ortalama	33.32	1087.59	31.21	6.59
S.Sapma	0.63	42.93	0.68	0.63

5.2.3 ABS ve KFT çekme deneyi

ABS granüllerine ağırlıkça belirli oranlarda karbon fiber tozu karıştırılarak elde edilen filamentler ile üç boyutlu yazıcıda test numuneleri oluşturulmuştur. Bu test numuneleri sırasıyla ağırlıkça %1 KFT katılmış, %3 KFT katılmış ve %5 KFT katılmış filamentlerden üretilmiştir.



Şekil 5.9 : ABS ve %1 KFT gerilme-gerinim grafiği.

%1 KFT katılmış kompozit ABS filamentine ait çekme testi sonucunda gerilme-gerinim grafiği Şekil 5.9’ da ve elde edilen değerler Çizelge 5.3’ te paylaşılmıştır.

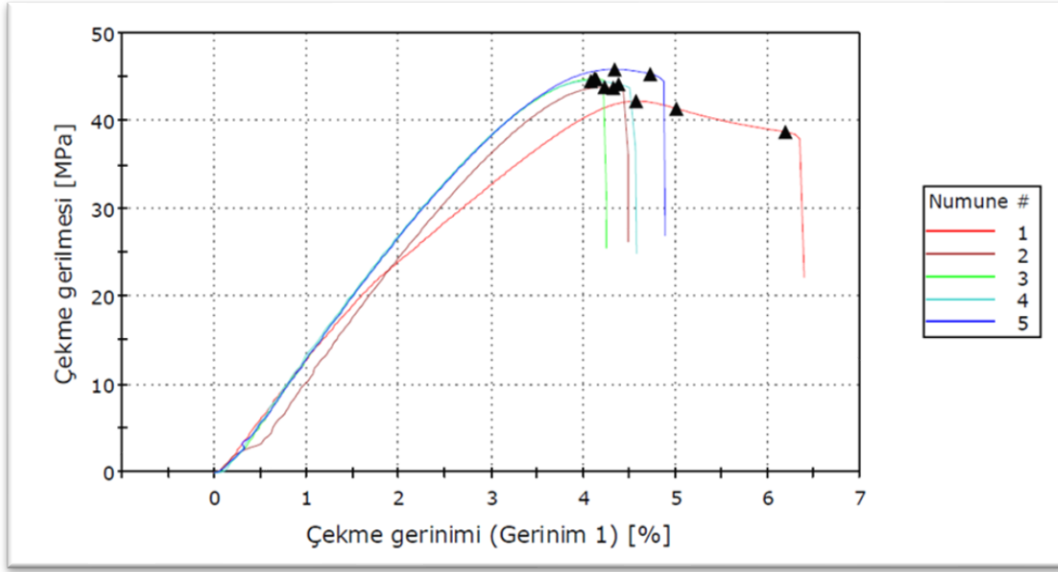
Çizelge 5.3 : ABS ve %1 KFT test numuneleri çekme testi değerleri.

Numune	Akma Dayanımı [MPa]	Elastisite Modülü [MPa]	Kopma Dayanımı [MPa]	Uzama Yüzdesi [%]
1	42.03	1260.62	40.97	4.84
2	42.89	1117.59	42.10	4.71
3	40.10	1195.86	40.01	4.26
4	41.91	1092.46	40.55	5.22
5	43.57	1212.55	42.67	5.01
Ortalama	42.10	1175.82	41.26	4.81
S.Sapma	1.31	69.43	1.10	0.36

%3 KFT katılmış kompozit ABS filamentine ait çekme testi sonucu grafiği Şekil 5.10’ da gösterilirken bu testten elde edilen değerler Çizelge 5.4’te gösterilmiştir.

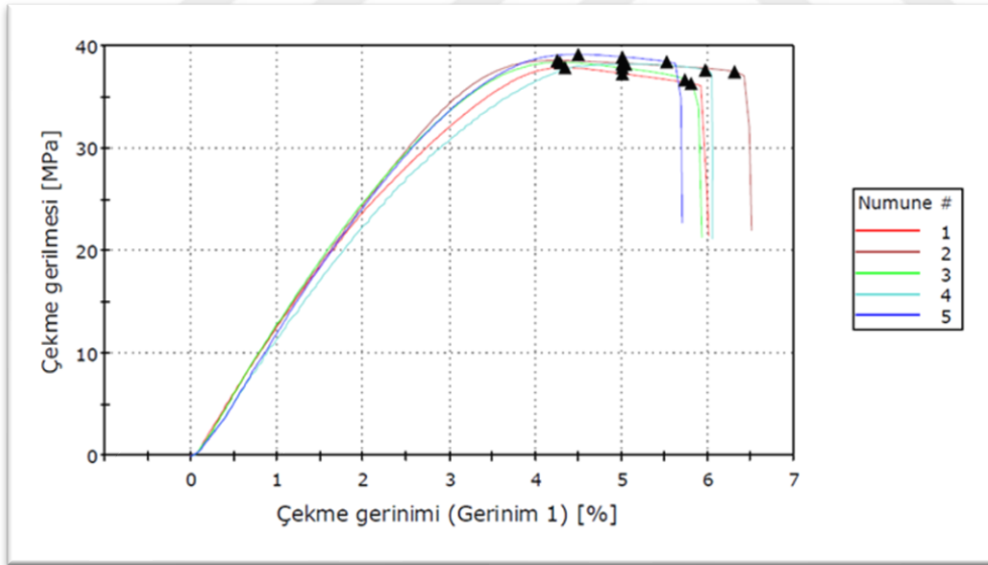
Çizelge 5.4 : ABS ve %3 KFT test numuneleri çekme testi değerleri.

Numune	Akma Dayanımı [MPa]	Elastisite Modülü [MPa]	Kopma Dayanımı [MPa]	Uzama Yüzdesi [%]
1	42.23	1216.67	38.73	6.18
2	43.81	1090.87	43.75	4.32
3	44.76	1286.15	44.75	4.13
4	44.54	1328.42	44.16	4.38
5	45.85	1381.48	45.31	4.72
Ortalama	44.24	1260.72	43.34	4.75
S.Sapma	1.34	112.48	2.65	0.83



Şekil 5.10 : ABS ve %3 KFT gerilme-gerinim grafiği.

ABS granüllerine ağırlıkça %5 KFT katılmış kompozit ABS filamentine ait çekme testi grafiği Şekil 5.11’ de gösterilmiştir. Bu teste ait değerler de Çizelge 5.5’te verilmiştir.



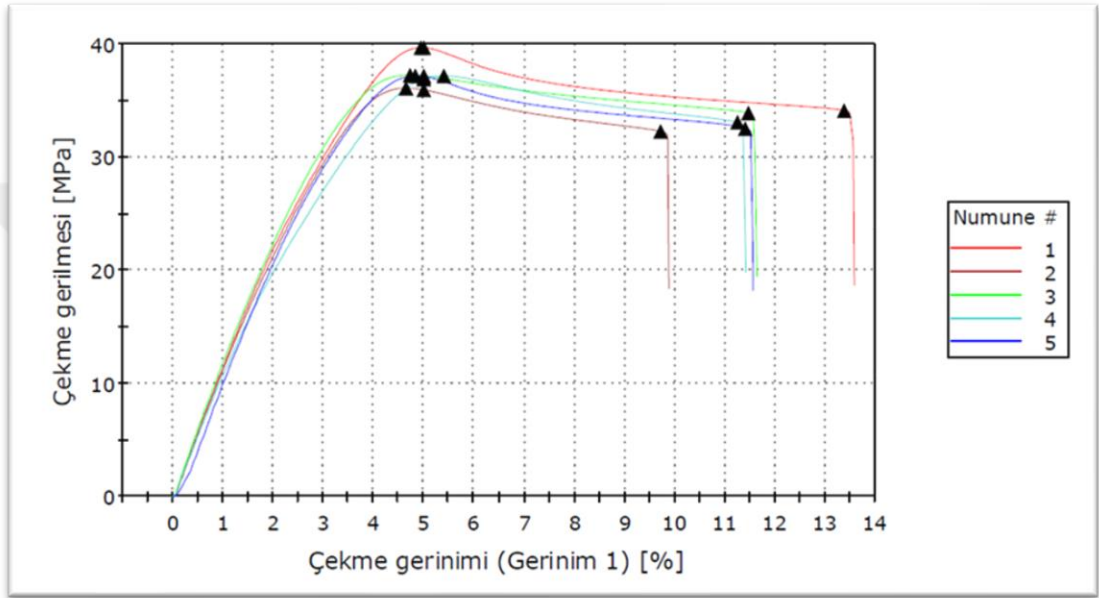
Şekil 5.11 : ABS ve %5 KFT gerilme-gerinim grafiği.

Çizelge 5.5 : ABS ve %5 KFT test numuneleri çekme testi değerleri.

Numune	Akma Dayanımı [MPa]	Elastisite Modülü [MPa]	Kopma Dayanımı [MPa]	Uzama Yüzdesi [%]
1	37.84	1183.86	36.30	5.80
2	38.52	1130.87	37.44	6.30
3	38.33	1224.17	36.66	5.73
4	38.18	1128.42	37.59	5.96
5	39.10	1121.49	38.41	5.52
Ortalama	38.39	1157.76	37.28	5.86
S.Sapma	0.79	44.70	0.83	0.29

5.2.4 ABS ve TPU çekme testi

ABS ve TPU granülleri ağırlıkça belirli oranlarda karıştırılarak ekstrüzyon işlemi uygulanarak kompozit ABS filamentler elde edilmiştir. Bu filamentler üç boyutlu yazıcıda kullanılarak çekme testi için test numuneleri basılmıştır. Bu oranlar sırasıyla ağırlıkça %10 TPU granülleri eklenerek, ağırlıkça %20 TPU granülleri eklenerek ve ağırlıkça %30 TPU granülleri eklenerek oluşturulmuştur. Şekil 5.12’de ağırlıkça %10 TPU eklenerek oluşturulan filamentte ait çekme testi grafiği verilmiştir.



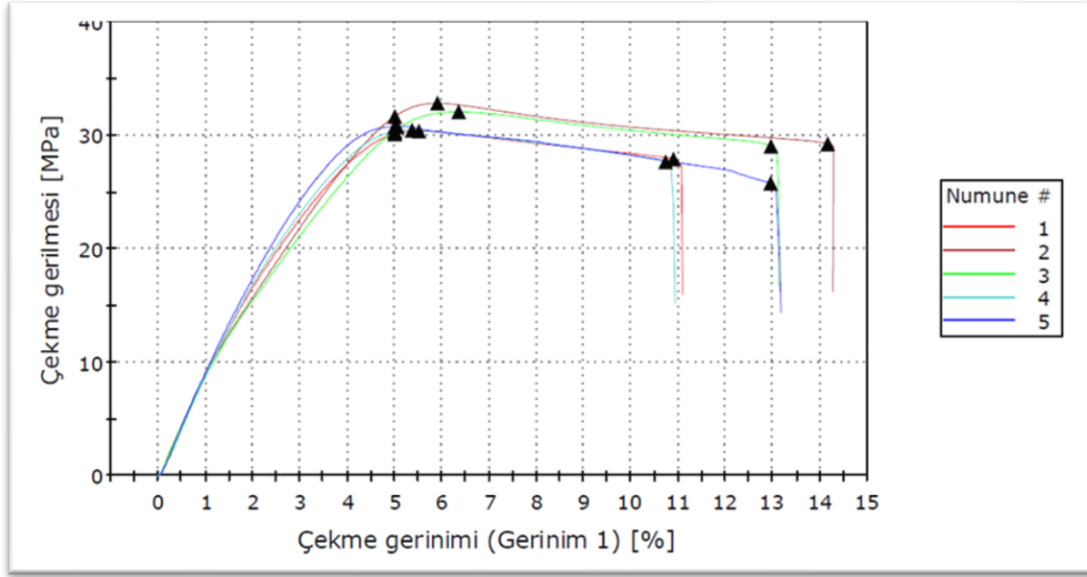
Şekil 5.12 : ABS ve %10 TPU gerilme-gerinim grafiği.

TPU’nun ağırlıkça %10 katılarak elde edilen filamentten yapılan test numunelerinin test sonuçlarından elde edilen değerler Çizelge 5.6’da paylaşılmıştır.

Çizelge 5.6 : ABS ve %10 TPU test numuneleri çekme testi değerleri.

Numune	Akma Dayanımı [MPa]	Elastisite Modülü [MPa]	Kopma Dayanımı [MPa]	Uzama Yüzdesi [%]
1	39.62	1044.13	34.10	13.37
2	36.07	1075.66	32.24	9.71
3	37.22	1112.62	33.87	11.46
4	37.17	1190.86	33.06	11.24
5	37.19	1049.12	32.51	11.39
Ortalama	37.45	1094.48	33.15	11.43
S.Sapma	1.31	60.34	0.82	1.30

Şekil 5.13’ te ağırlıkça %20 TPU eklenerek oluşturulan filamentte ait çekme testi grafiği verilmiştir.



Şekil 5.13 : ABS ve %20 TPU gerilme-gerinim grafiği.

Ağırlıkça %20 TPU granülleri katılarak elde edilen filamentte ait çekme testi değerleri Çizelge 5.7’de paylaşılmıştır.

Çizelge 5.7 : ABS ve %20 TPU test numuneleri çekme testi değerleri.

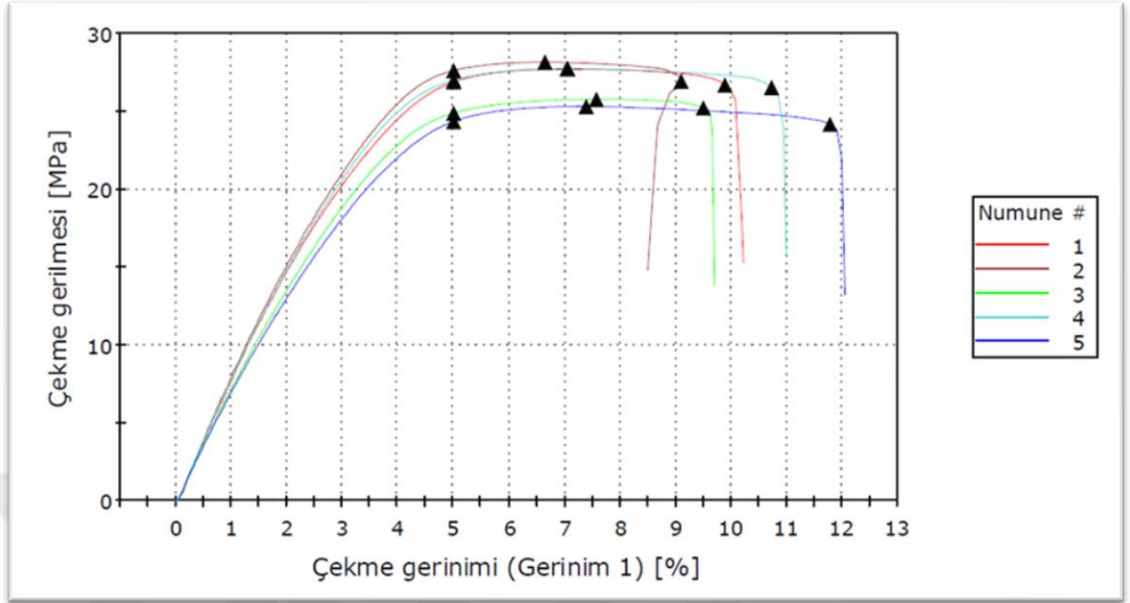
Numune	Akma Dayanımı [MPa]	Elastisite Modülü [MPa]	Kopma Dayanımı [MPa]	Uzama Yüzdesi [%]
1	30.34	990.21	27.89	10.88
2	32.79	903.35	29.25	14.14
3	32.04	995.49	29.02	12.94
4	30.43	731.78	27.65	10.72
5	30.76	784.80	25.77	12.93
Ortalama	31.27	881.13	27.91	12.32
S.Sapma	1.09	119.43	1.39	1.47

Ağırlıkça %30 TPU eklenerek oluşturulan bileşik ABS filamenti ile üç boyutlu yazıcıda test numuneleri basılmıştır. Bu çekme testi sonucu test numunelerine ait elde edilen değerler Çizelge 5.8’ de gösterilmiştir.

Çizelge 5.8 : ABS ve %30 TPU test numuneleri çekme testi değerleri.

Numune	Akma Dayanımı [MPa]	Elastisite Modülü [MPa]	Kopma Dayanımı [MPa]	Uzama Yüzdesi [%]
1	27.70	778.71	26.67	9.88
2	28.14	791.86	26.93	9.09
3	25.77	741.23	25.22	9.49
4	27.74	864.22	26.52	10.72
5	25.30	781.22	24.17	11.77
Ortalama	26.93	791.45	25.90	10.19
S.Sapma	1.29	44.96	1.17	1.07

Bu numunelere kullanılarak yapılan çekme testine ait grafik Şekil 5.14' te paylaşılmıştır.



Şekil 5.14 : ABS ve 30% TPU gerilme-gerinim grafiği.



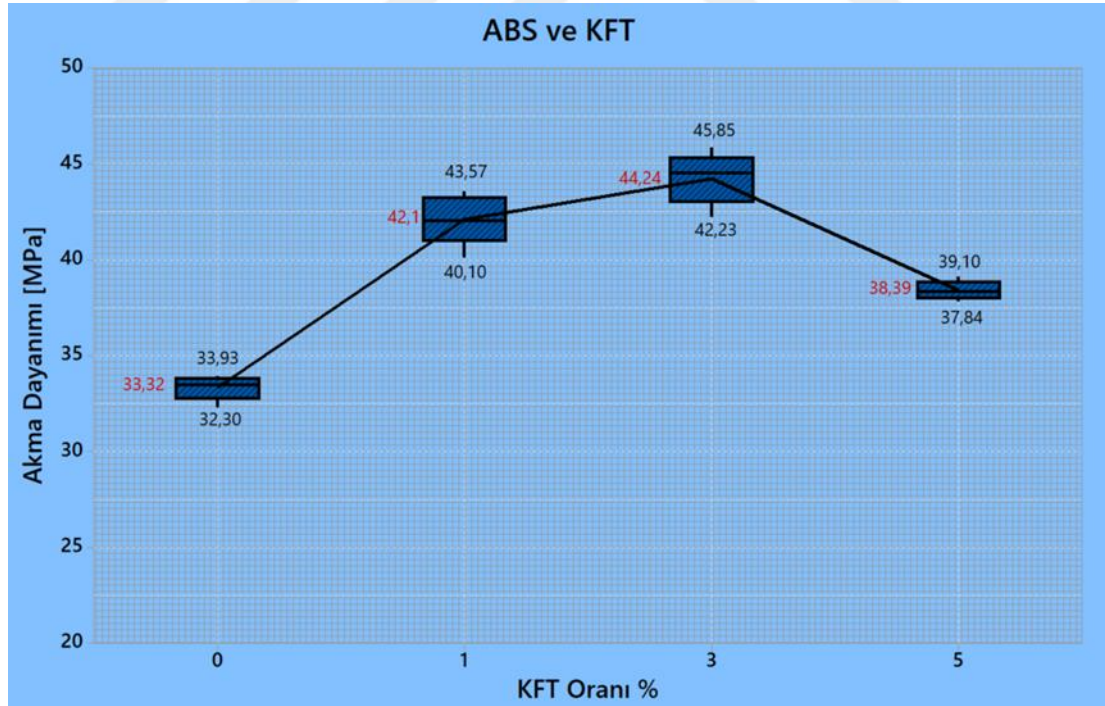
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Çalışmada yapılan çekme testi sonucu üretilen filamentlerin akma dayanımları, akma uzamaları, kopma dayanımları, yüzde uzamaları ve elastisite değerleri elde edilmiştir.

6.1.1 ABS ve KFT kompozit filamentleri sonuçları

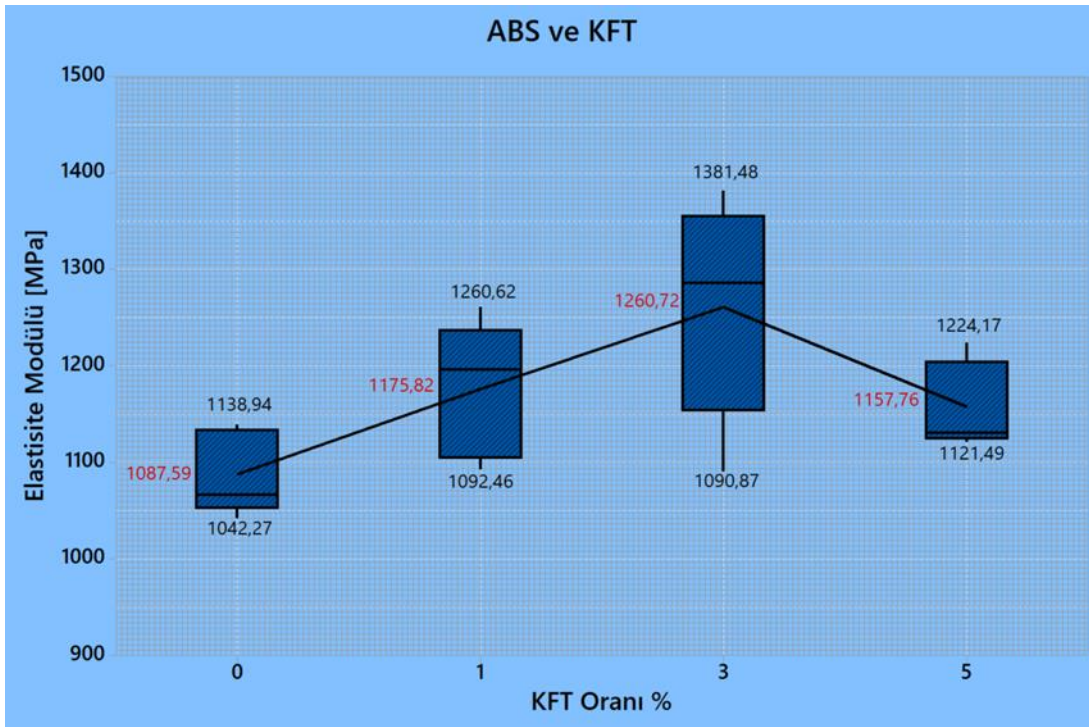
Farklı yüzdelerde karbon fiber tozunun ABS granülleri ile karıştırılması sonucu elde edilen filamentler bir üç boyutlu yazıcı kullanılarak çekme testi standartına göre test numuneleri basılmıştır. Test numunelerine yapılan çekme testi sonucunda elde edilen akma dayanımı değerleri Şekil 6.1’de paylaşılmıştır. Grafikte görülen değerler 5 adet numune ile yapılan testteki numunelerin ortalama akma değerlerini ve maksimum, minimum elde edilen akma değerlerini göstermektedir.



Şekil 6.1 : ABS ve KFT test numunelerinin akma gerilmeleri.

Grafikteki sonuçlar sırasıyla KFT eklenmemiş ABS filamentine, %1 KFT eklenmiş ABS kompozit filamentine, %3 KFT eklenmiş ABS kompozit filamentine ve %5 KFT

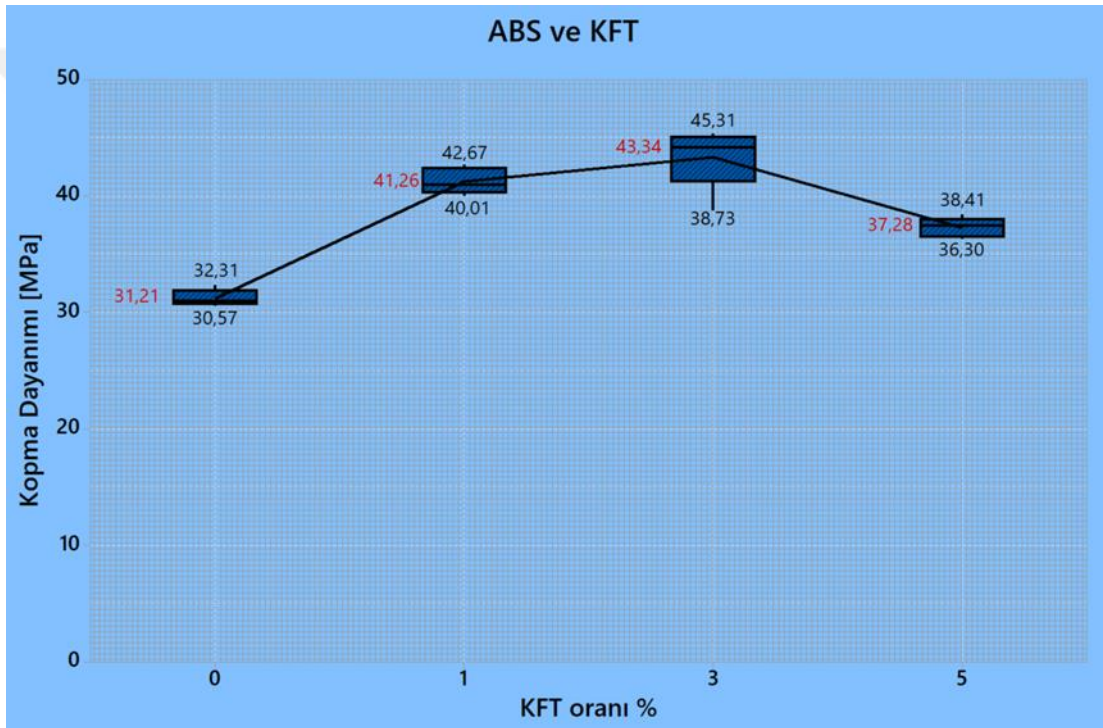
eklenmiş ABS kompozit filamentine aittir. ABS filamenti için 5 adet numunenin ortalama akma gerilme değeri 33.32 MPa olurken, ağırlıkça farklı yüzdelerde KFT eklenmiş kompozit filamentlerin akma gerilmesi değerleri sırasıyla %1 için 42.10 MPa, %3 için 44.24 MPa ve %5 için 38.39 MPa olmuştur. Testleri yapılan numunelerden elde edilen ortalama gerilme değerleri karşılaştırıldığında katkısız ABS granüllerinden elde edilen filamentte göre ağırlıkça %1, %3 ve %5 KFT eklenerek elde edilen kompozit filamentlerin akma dayanımları sırasıyla %26.36, %32.78 ve %15.26 artış göstermiştir. Bu numuneler ile yapılan çekme testi sonucunda numunelere ait elde edilen elastisite modülleri Şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 : ABS ve KFT test numunelerinin elastisite modülleri.

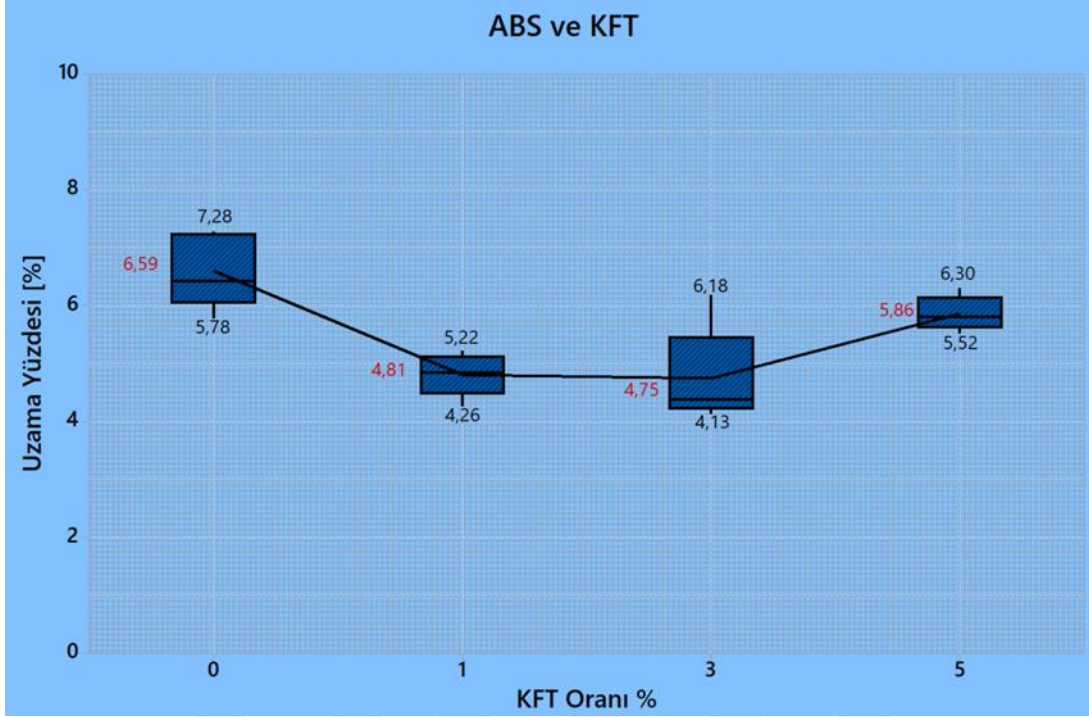
Şekilde gösterilen değerler her katkı oranı için 5 numuneye ait ortalama elastisite modülü değerleri ve bu numunelerden elde edilen maksimum ve minimum elastisite modülü değerleridir. Numunelerin ortalama değerleri karşılaştırıldığında ağırlıkça 1% KFT, %3 KFT ve %5 KFT eklenen ABS kompozit filamentinin elastisite modülü değerleri sırasıyla katkısız ABS filamentine göre %8.11, %15.92 ve %6.45 artış göstermiştir. Çekme testinin tamamlanması test numunelerinin kopması ile gerçekleşir. ABS filamentini ve KFT eklenerek elde edilen filamentlere yapılan çekme testinde numunelere ait kopma dayanımları Şekil 6.3’te gösterilmiştir. Bu grafikte numunelerin kopma dayanımlarının ortalamaları ve numunelerden elde edilen

maksimum ve minimum kopma dayanım değerleri işaretlenmiştir. Bu değerlere göre test numunelerinden elde edilen kopma dayanım değerlerinin ortalamaları karşılaştırıldığında katkısız ABS filamentinin ortalama kopma dayanım değeri 31,21 MPa olurken ağırlıkça 1% KFT eklenmiş filamentin kopma dayanımı ortalama değeri %32.19 artış ile 41.26 MPa, 3% KFT eklenmiş filamentin kopma dayanımı ortalama %38.85 artışla 43.34 MPa ve 5% KFT eklenmiş filamentin kopma dayanımı ortalama değeri %19.44 artışla 37.28 MPa olmuştur. Numunelerden elde edilen maksimum kopma dayanım değerleri sırasıyla katkısız ABS için 32.31 MPa, %1 KFT için 42.67 MPa, 3% KFT için 45.31 MPa ve %5 KFT için 38.41 MPa olmuştur. Minimum değerler ise sırasıyla 30.57 MPa, 40.01 MPa, 38.73 MPa ve 36.30 MPa olmuştur.



Şekil 6.3 : ABS ve KFT test numuneleri kopma gerilmeleri.

Test numunelerinin boyu uygulanan çekme kuvveti ile uzarken çekme yönündeki kesitinde de bir daralma gerçekleşir. Kesit uygulanan yükü taşıyamaz noktaya geldiğinde test numunesi kopar. Bu kopma noktasına kadar olan boyca yüzde uzamalar Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Şekilde katkısız ABS filamentini için ve katkılı ABS filamentinin her yüzdesi için üretilen test numunelerinden elde edilen ortalama yüzde uzamalar ile maksimum, minimum yüzde uzamalar belirtilmiştir.



Şekil 6.4 : ABS ve KFT test numuneleri boyca uzama yüzdeleri.

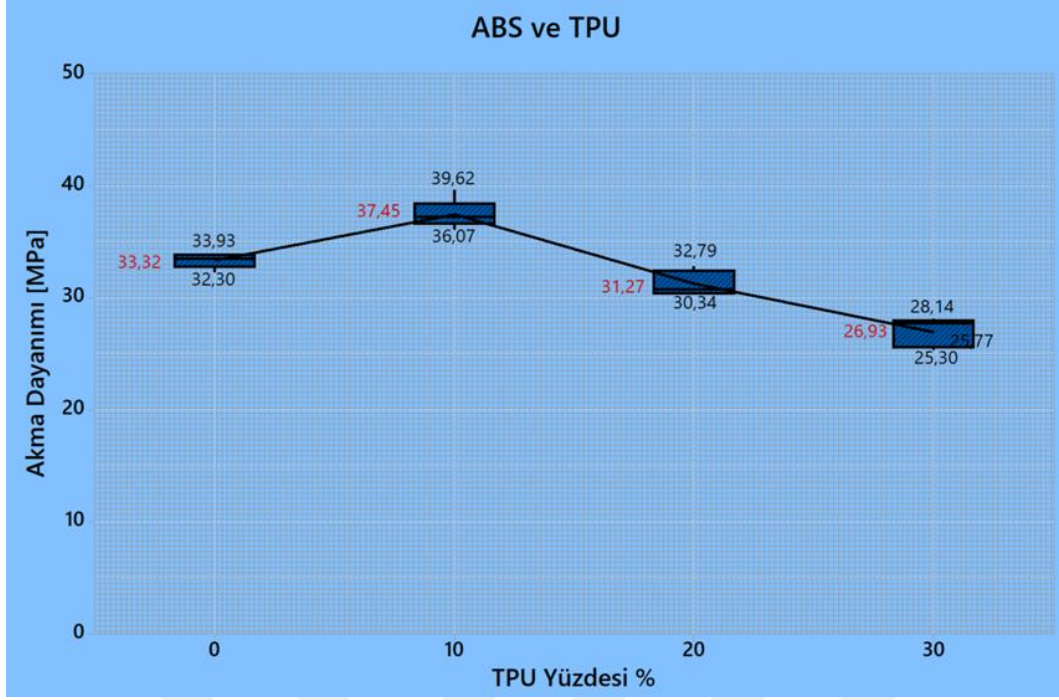
Test sonucunda elde edilen boyca uzamalar karşılaştırıldığında katkısız ABS filamentinin test numunelerinin ortalama değeri %6.59 elde edilmiştir. Farklı yüzdelerde KFT eklenerek elde edilen kompozit filamentler için bu ortalama değerler %4.81, %4.75 ve % 5.86 olmuştur. 1%, 3% ve 5% KFT eklenen filamentlerde sırasıyla %27.21, %28.03 ve %11.10 azalış gerçekleşmiştir. Numunelere ait boyca yüzde uzamalardan elde edilen maksimum ve minimum değerler Şekil 6.4'te gösterilmiştir.

Çekme testinden elde edilen sonuçlara göre karbon fiber tozu eklenerek üretilen kompozit ABS filamentlerinin akma dayanımları sırasıyla %26.36, %32.78 ve %15.26 artış göstermişlerdir. Artan karbon fiber oranı ile akma dayanımının da artması beklenirken en yüksek artış %32.78 ile 3% KFT eklenen filamentte gerçekleşmiştir. Bu sonuç bize karbon fiber tozu oranının artışının filamentin iç yapısında düzensizliklere neden olarak filamentin bağlarını zayıflattığını göstermektedir. Bunun nedeni de karbon fiber tozunun boyutlarının mikron mertebesinde olması ve ağırlıkça artışın hacimsel olarak daha yüksek artışlara sebep olmasıdır. Boyca uzamanın kuvvet ile orantılı bir şekilde arttığı bölgedeki doğrunun eğimi bize elastisite modülünü vermektedir. Bu test sonucu elde edilen elastisite modülleri katkısız ABS için ortalama değer 1087.59 MPa olurken %8.11 artış ile %1 KFT eklenmiş filamentin ortalama elastisite modülü değeri 1175.82 MPa, %3 KFT eklenen filamentin %15.92 artışla

ortalama elastisite modülü değeri 1260.72 MPa ve %5 KFT eklenen filamentin ortalama elastisite modülü değeri %6.45 artışla 1157.76 MPa olmuştur. Elastisite modülü malzemelerin rijitliğinin göstergesidir. %1 KFT, %3 KFT ve %5 KFT eklenerek üretilen kompozit ABS filamentlerindeki bu artış beklenen bir sonuçtur. Çekme testinden elde edilen kopma dayanımları karşılaştırıldığında katkısız ABS filamentine göre %1, %3 ve %5 KFT eklenmiş filamentlerin kopma dayanımları sırasıyla %32.19, %38.85 ve %19.45 artış göstermiştir. Çekme testinde test edilen numunelerine uygulanan çekme kuvveti sonucunda kopma anına kadar bir uzama gerçekleşmiştir. Katkısız ABS filamentinin numunelerinin ortalama uzama değeri yüzde olarak 6.59% olarak gerçekleşirken %1 KFT, %3 KFT ve %5 KFT eklenen filamentlerin test numunelerinin ortalama boyca uzama yüzdeleri %4.81, %4.75 ve %5.86 olarak bulunmuştur. %1 KFT, %3 KFT ve %5 KFT eklenen filamentler için boyca yüzde uzamalarda düşüş sırasıyla %27.21, %28.03 ve %11.10 olarak gerçekleşmiştir.

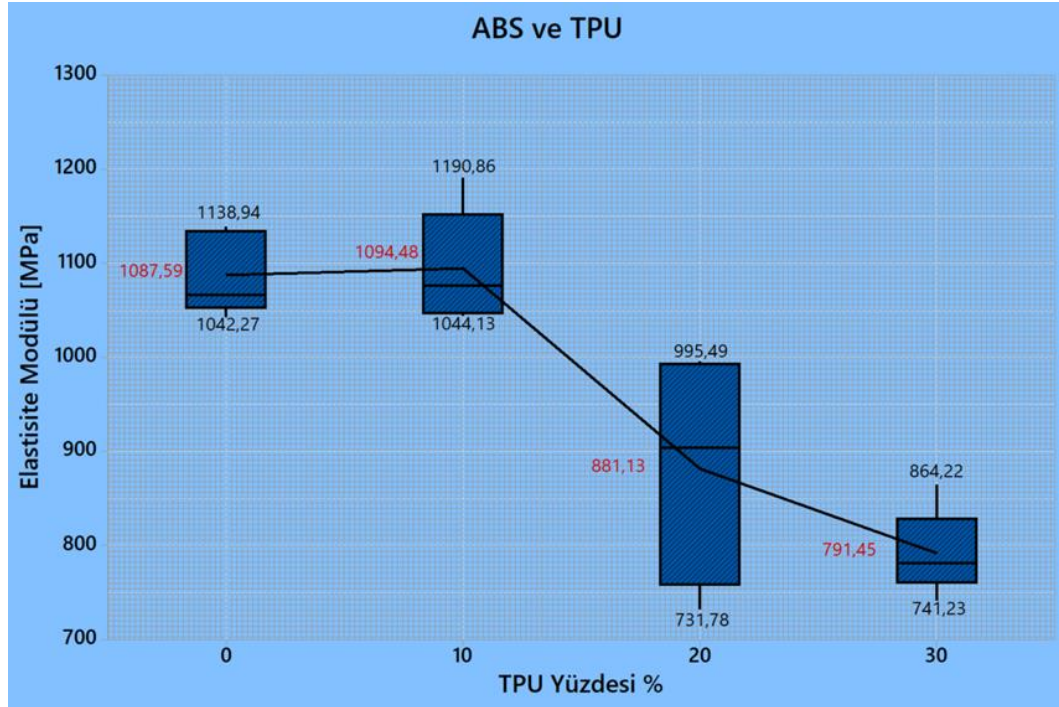
6.1.2 ABS ve TPU kompozit filamentleri sonuçları

ABS ve TPU granülleri kullanılarak belirli oranlarda yapılan karışımları sonucunda üretilen kompozit filamentlerden basılan test numunelerine çekme testi yapılmıştır. Bu test sonucunda filamentlere ait akma dayanımı, elastisite modülü, kopma dayanımı ve boyca yüzde uzama değerleri elde edilmiştir. Bu testler her filament için 5 adet numune ile gerçekleştirilmiştir. Katkısız ABS filament ve %10, %20 ve %30 TPU eklenerek elde edilen filamentlerin test ortalama değerleri, maksimum ve minimum değerleri şekillerde gösterilmiştir. Test numunelerinin akma gerilmelerinin ortalama değerleri sırasıyla katkısız ABS filament için 33.32 MPa, %10 TPU eklenen filament için 37.45 MPa, %20 TPU eklenen filament için 31.27 MPa ve %30 TPU eklenen filament için 26.93 MPa olmuştur. Numunelerin akma gerilmesi ortalamaları ağırlıkça 10% TPU eklenen filament için katkısız ABS filamentine göre %12.41'lik bir artış gerçekleşirken %20 TPU ve %30 TPU eklenen filamentler için sırasıyla %6.14 ve %19.17'lik bir düşüş gerçekleşmiştir. Numunelerden elde edilen sonuçların maksimum ve minimum değerleri de Şekil 6.5'te gösterilmiştir.



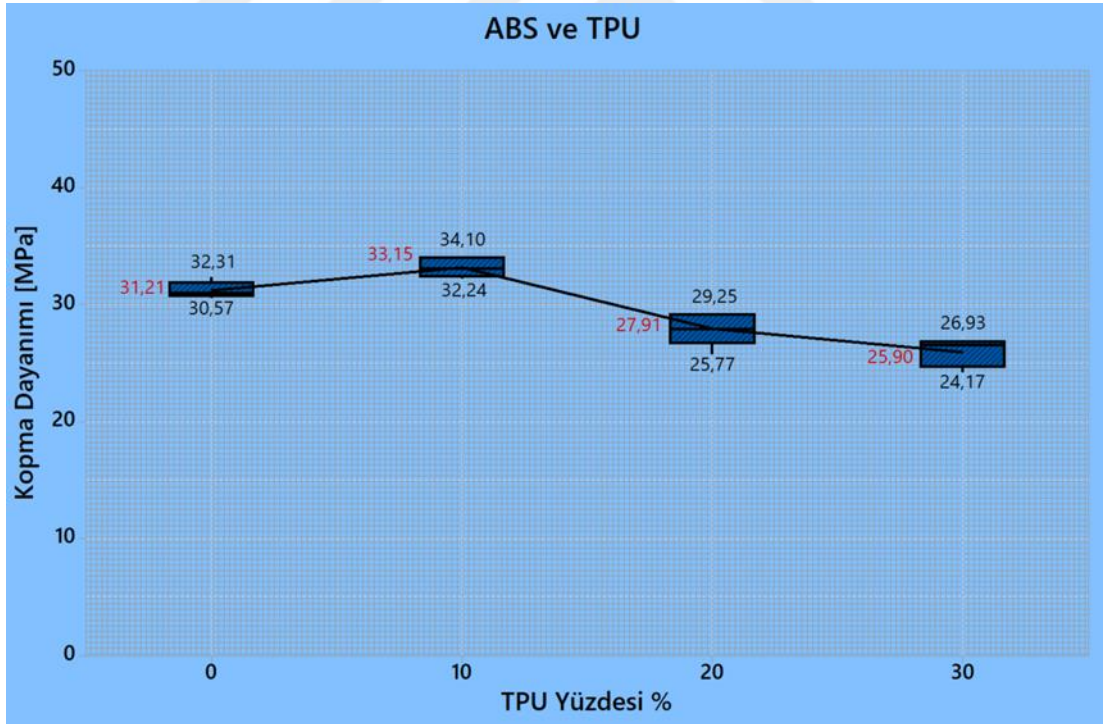
Şekil 6.5 : ABS ve TPU test numuneleri akma gerilmeleri.

Çekme testi ile numunelerin elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. Her filament için 5 adet numune kullanılmıştır ve bu numunelere ait ortalama elastisite modülü değerleri ile numunelerden elde edilen maksimum ve minimum elastisite modülü değerleri Şekil 6.6'da gösterilmiştir.



Şekil 6.6 : ABS ve TPU test numuneleri elastisite modülleri.

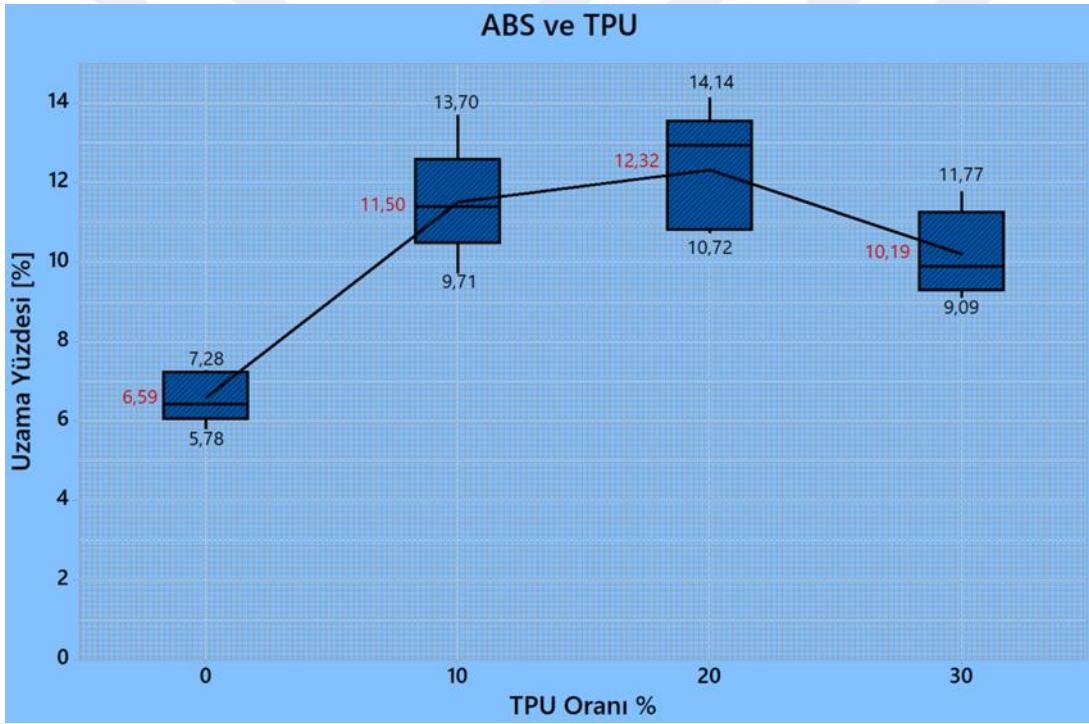
Katkısız ABS filamentinin ortalama elastisite modülü değeri 1087.59 MPa bulunurken farklı yüzdelerde TPU eklenen filamentlerin ortalama elastisite modülü değerleri sırasıyla %10 için 1094.48 MPa, %20 için 881.13 MPa ve %30 için 791.45 MPa bulunmuştur. Ağırlıkça %10 TPU eklenen filament için ortalama elastisite modülü değeri %0.6 artış gösterirken ağırlıkça %20 TPU ve %30 TPU eklenen filamentler için ortalama elastisite modülü değerleri sırasıyla %18.98 ve %27.22 düşüş göstermişlerdir. Her numuneden elde sonuçların en düşük değeri ve en yüksek değeri de Şekil 6.6' da gösterilmiştir. Bu değerler katkısız ABS filamentleri için maksimum 1138.94 MPa ve minimum 1042.27 MPa olurken TPU eklenen filamentler için sırasıyla %10 TPU, %20 TPU ve %30 eklenen katkıli filamentlerin maksimum ve minimum değerleri 1190.86 MPa ve 1044.13 MPa, 995.49 MPa ve 731.78 MPa, 864.22 MPa ve 741.23 MPa olarak bulunmuştur. TPU eklenerek üretilen kompozit ABS filamentlerine ait çekme testi sonucunda kopma dayanım değerleri de bulunmuştur. Kopma dayanım değerlerinin her filament için ortalama değerleri ve maksimum, minimum elde edilen değerler Şekil 6.7'de gösterilmiştir.



Şekil 6.7 : ABS ve TPU test numuneleri kopma gerilmeleri.

Testten elde edilen kopma gerilmesi değerlerinin ortalamaları karşılaştırıldığında katkısız ABS filamentleri numunelerinin ortalama kopma gerilmesi 31.21 MPa olurken

%10 TPU eklenen filamentin ortalama kopma gerilmesi %6.22 artışla 33.15 MPa bulunurken %20 TPU eklenen filamentin ortalama kopma gerilmesi %10.56 düşüşle 27.91 MPa ve %30 TPU eklenen filamentin ortalama kopma gerilmesi %17.01 düşüşle 25.90 MPa olmuştur. Numunelerden elde edilen maksimum ve minimum kopma gerilmesi sonuçları da Şekil 6.7’de gösterilmiştir. Çekme testi uygulanan numuneler testin başlangıcından itibaren kopana kadar boyca bir uzama sergilerler. Test sonucunda katkısız ABS filamentine ait ve belirli oranlarda TPU eklenerek elde edilen kompozit filamentlerine ait boyca yüzde uzama değerleri elde edilmiştir. Her filament için 5 adet numune ile gerçekleştirilen bu testte ortalama yüzde uzama değerleri ve maksimum, minimum yüzde uzamaya sahip olan numunelerin bu değerleri Şekil 6.8’de verilmiştir.



Şekil 6.8 : ABS ve TPU test numuneleri boyca uzama yüzdeleri.

Katkısız ABS filamentleri için yüzde uzama değerleri ortalaması %6.59 olarak bulunmuştur. Ağırlıkça %10 TPU eklenen filamentin numunelerinin ortalama boyca yüzde uzama değeri %74.40 artışla %11.50 olurken ağırlıkça %20 TPU eklenen filamentin ortalama boyca yüzde uzama değeri %86.98 bir artışla %12.32 bulunmuştur. Son olarak ağırlıkça %30 TPU eklenen filamentin ortalama boyca yüzde uzama değeri %54.53 bir artışla %10.19 olarak elde edilmiştir. Şekil 6.8’de ayrıca her filamentin numunelerinde ulaşılan maksimum ve minimum boyca yüzde uzama

değerleri de gösterilmiştir. Ağırlıkça belli oranlarda TPU eklenen filamentlerin ve katkısız ABS filamentinin çekme testinden elde eden sonuçlar yukarıdaki grafiklerde paylaşılmıştır. Test sonuçlarına bakıldığında katkısız ABS filamentinin akma mukavemeti %10 TPU eklenen filamentin akma mukavemeti dışında diğer numunelere göre daha yüksek bulunmuştur. Ağırlıkça %10 TPU eklenen filamentin numunelerinin ortalama akma değeri %12.41'lik bir artışla 37.45 MPa bulunmuştur. Bunun nedeni olarak termoplastik poliüretan moleküllerinin bağlayıcı özelliğinin %10 TPU eklenerek üretilen filament için etkin bir şekilde rol oynadığını söyleyebiliriz. Ağırlıkça %20 TPU ve %30 TPU eklenen filamentlerden elde edilen numunelerin ortalama akma değerleri katkısız ABS filamentinin ortalama akma değeri ile karşılaştırıldığında beklenen düşüşler sırasıyla %6.15 ve %19.18 olarak gerçekleşerek 31.27 MPa ve 26.93 MPa olarak bulunmuştur. TPU malzemesi elastomer yapısı ile eklendiği ABS filamentinin akma dayanımını düşürmüştür. Buna karşın katkısız ABS filamentinin ortalama boyca yüzde uzama değeri %6.59 bulunurken %10 TPU, %20 TPU ve %30 TPU eklenen filamentlerinin test numunelerinin ortalama boyca yüzde uzama değerleri %11.50%, %12.32 ve %10.19 olarak bulunmuştur. TPU filamentinin boyca uzama yüzdelerinin ortalama değerlerini sırasıyla %74.40, %86.98 ve %54.53 olarak artırmıştır. ABS filamentine eklenen TPU granülleri ile esneklik kazanmıştır. Maksimum artış %20 TPU eklenen TPU filamentinde gerçekleşirken bunu %10 TPU eklenen filament izlemiştir ve en düşük artış %30 TPU eklenen filamentte gerçekleşmiştir. %30 TPU eklenen filamentin diğer oranlara göre boyca yüzde uzamasının daha yüksek olması beklenirken daha düşük çıkma nedenleri arasında yeterli homojenizasyonun sağlanamaması, baskı sırasında oluşan hatalar ve TPU malzemesinin ABS malzemesi içerisindeki yönelimi gösterilebilir. Yüzde uzamaları artan malzemeler plastik şekil değişimi bölgesinde elastomerlere benzer bir boyca uzama grafiği oluşmasını sağlamıştır. Çekme testinde katkısız ABS ve TPU eklenerek üretilen filamentlerin elastisite modülü karşılaştırıldığında %20 TPU ve %30 TPU eklenen filamentler için beklenen düşüş gerçekleşirken %10 TPU eklenen filamentte beklenmeyen bir artış gerçekleşmiştir. Elastisite modülü %10 TPU eklenen filamentte katkısız ABS filamentine %0.6 artışla 1094.48 MPa bulunmuştur. TPU katkı oranı %20 ve %30 olan filamentlerin ortalama elastisite modülünün beklenen düşüş %18.98 ve %27.22 olarak gerçekleşerek 881.13 MPa ve 791.45 MPa olarak bulunmuştur. Elastisite modülü malzemelerde rijitliği temsil eder. %20 ve %30 TPU eklenen filamentlerin modül değerleri düşerek

rijitlikleri azalmış ve malzemeler elastikleşmiştir. Katkı olarak %10 TPU eklenen filamentte ise modül değeri çok düşük bir yüzde olsa da artarak malzemenin rijitliği düşük bir oranda yükselmiştir. Yapılan çekme testinden elde edilen kopma gerilmesi değerleri karşılaştırıldığında %20 ve %30 TPU eklenen filamentler için beklenen düşüş gerçekleşmiştir. Bu düşüş %20 TPU için %10.56 olarak %30 TPU için %17.01 olarak gerçekleşirken kopma dayanım değerleri ortalamaları 27.91 MPa ve 25.90 MPa olarak elde edilmiştir. Katkı olarak %10 TPU eklenen filamentte ise katkısız ABS filamentine göre kopma dayanımında beklenmeyen bir artış %6.25 oranında gerçekleşerek 33.15 MPa değeri bulunmuştur.

6.2 Öneriler

Bu çalışmada ABS granülleri kullanılarak ekstrüzyon yöntemi ile eklemeli imalat yöntemlerinden eriyik biriktirme modelleme teknolojisinde kullanılmak üzere filament üretilmiştir. Bu üretilen filamentler bir üç boyutlu yazıcı kullanılarak çekme testi numuneleri basılmıştır. ABS granüllerine belirli oranlarda karbon fiber tozu eklenerek kompozit ABS filamentleri üretilmiş ve bu üretilen filamentlerden çekme testi numuneleri üretilmiştir. Aynı çalışma ABS granüllerine belirli oranlarda TPU granülleri karıştırılarak da gerçekleştirilmiştir. Karbon fiber tozu ve TPU granüllerinin karışım oranları deneysel olarak bulunmuştur. Karbon fiber tozu ağırlıkça %7 ve %10 olacak şekilde eklenerek kompozit filament üretilmeye çalışılmış fakat başarılı olunamamıştır. Bunun nedeni olarak bu çalışmada kullanılan kalıp çapının ve kullanılan üç boyutlu yazıcının 1.75 mm çapında filament için uygun olması gösterilebilir. Çünkü üretimi gerçekleştirmek için ağırlıkça 5% oranından daha yüksek karbon fiber tozu eklenmesi 1.75 mm çapında filamentin içinde hacim olarak karbon fiber tozu çok daha fazla yer kaplamaktadır. Hacimsel olarak fazla yer kaplayan karbon fiber tozları üretilen filamentte topaklanmalara sebep olmuştur ve bu topaklanmalar da filamentin kopmasına yol açmıştır. Bu yüzden ekstrüzyon yönteminde sürekli bir çekim yapılamamıştır. Gelecek çalışmalarda ağırlıkça daha yüksek oranlarda karbon fiber tozu eklenerek daha büyük çapta filament üretimi gerçekleştirilebilir. Böylece karbon fiber tozunun filament içinde kapladığı hacmin daha düzenli bir şekilde dağılması sağlanarak topaklanmalarında önüne geçilebilir ve ekstrüzyon yönteminde sürekli bir çekim sağlanabilir. Daha büyük çapta üretilen filament için büyük çaplı filamentlerle çalışabilen bir yazıcı tercih edilebilir.

Çekme testinden elde edilen sonuçların bazılarında standart sapma değerleri yüksek çıkmıştır. Bu durum numuneler arasında belirgin olarak mekanik özelliklerin değerleri arasında farklara yol açmaktadır. Bunun nedenlerinden biri malzemelerin karışımlarının yeterli ya da eş homojenliğe sahip olmaması gösterilebilir. Bir başka neden de örnekleme sayısının az olması olabilir. Ayrıca bu sapmadaki farkın yüksek çıkmasına numunelerin üç boyutlu yazıcıda farklı kalitelere basılması da sebep olmuştur. Yazıcının kalibrasyonu ve ortam koşulları aynı olsa da aynı baskıyı aynı kalitede tekrarlı bir şekilde üretmek güç olabiliyor. Gelecek çalışmalarda sapma değerlerinin yüksek çıkmasını engellemek için karıştırılan malzemelerin daha homojen bir yapıda bütünleşmesi sağlanabilir. Örnekleme sayısı artırılarak numunelerden elde edilecek sonuçların standartlaştırılması sağlanabilir. Ayrıca standart sapma değerinin düşürülmesi için daha kaliteli numunelerin üretilebileceği endsütriyel üç boyutlu yazıcılar kullanılabilir. Gelecek çalışmalarda çekme testi uygulanan ve kopan numunelerin kesit görüntüleri SEM cihazı kullanılarak görüntülenebilir ve bu görüntülerin paylaşımı yapılabilir. ABS granüllerine farklı malzemeler katkı maddesi olarak eklenerek filament üretimi gerçekleştirilebilir ve bu filamentlerin mekanik özellikleri incelenebilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Asahi Denka, J.** (1988). U.S. Patent No. 2138471. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [2] **Asahi Denka, J.** (1988). U.S. Patent No. 2590216. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [3] **Aydın, M.** ELEKTRON ISIN KAYNAK YONTEMI. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, (005), 213-227.
- [4] **Beaman, J.** (1990). U.S. Patent No. 4938816. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [5] **Crivello, J. V.** (1998). Photoinitiators for free radical cationic and anionic photopolymerization. Surface and coatings technology, 168.
- [6] **Crump, S.** (1992). U.S. Patent No. 5121329. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [7] **Cummins, G., & Desmulliez, M. P.** (2012). Inkjet printing of conductive materials: A review. Circuit World, 38(4), 193-213. doi:10.1108/03056121211280413.
- [8] **Deckard, C.** (1989). U.S. Patent No. 4863538. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [9] **Dudek, P.** (2013). FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements. Archives of Metallurgy and Materials, 58(4), 1415-1418. doi:10.2478/amm-2013-0186
- [10] **Dufour, P.** (1993). state-of-the-Art and Trends in the Radiation-Curing. Radiation Curing in Polymer Science and Technology: Fundamentals and Methods, 1, 1.
- [11] **Fu, Z., Gui, Y., Cao, C., Liu, B., Zhou, C., & Zhang, H.** (2014). Structure evolution and mechanism of polyacrylonitrile and related copolymers during the stabilization. Journal of Materials Science, 49(7), 2864-2874. doi:10.1007/s10853-013-7992-3
- [12] **Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B. Zavattieri, P. D.** (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. Computer-Aided Design, 69, 65-89. doi: 10.1016/j.cad.2015.04.001
- [13] **Gebhardt, A.** (2012). Understanding Additive Manufacturing. Cincinnati, Ohio: Hanser Fachbuchverlag.
- [14] **Gibson, I., Stucker, B., & Rosen, D.** (2014). ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES. Newyork: Springer.

- [15] **Haryńska, A., Gubanska, I., Kucinska-Lipka, J., & Janik, H.** (2018). Fabrication and Characterization of Flexible Medical-Grade TPU Filament for Fused Deposition Modeling 3DP Technology. *Polymers*, 10(12), 1304. doi:10.3390/polym10121304
- [16] **Hull, C.** (1986). U.S. Patent No. 4575330. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [17] **Hull, C.** (1990). U.S. Patent No. 4929402. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [18] **Hull, E., Grove, W., Zhang, M., Song, X., Pei, Z. J., & Cong, W.** (2015). Effects of Process Variables on Extrusion of Carbon Fiber Reinforced ABS Filament for Additive Manufacturing. Volume 1: Processing. doi:10.1115/msec2015-9396.
- [19] **Jiang, D., & Smith, D. E.** (2017). Anisotropic mechanical properties of oriented carbon fiber filled polymer composites produced with fused filament fabrication. *Additive Manufacturing*, 18, 84-94. doi: 10.1016/j.addma.2017.08.006
- [20] **Jiang, D., & Smith, D. E.** (2017). Anisotropic mechanical properties of oriented carbon fiber filled polymer composites produced with fused filament fabrication. *Additive Manufacturing*, 18, 84-94. doi: 10.1016/j.addma.2017.08.006
- [21] **Klein, P.** (2009). Fundamentals of Plastics Thermoforming. *Synthesis Lectures on Materials Engineering*, 1(1), 1-97. doi:10.2200/s00184ed1v01y200904mre001
- [22] **Kroschwitz, J. I.** (1990). Concise encyclopedia of polymer science and engineering (Vol. 5). New York: Wiley.
- [23] **Kruth, J., Froyen, L., Vaerenbergh, J. V., Mercelis, P., Rombouts, M., & Lauwers, B.** (2004). Selective laser melting of iron-based powder. *Journal of Materials Processing Technology*, 149(1-3), 616-622. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2003.11.051.
- [24] **Kruth, J., Wang, X., Laoui, T., & Froyen, L.** (2003). Lasers and materials in selective laser sintering. *Assembly Automation*, 23(4), 357-371. doi:10.1108/01445150310698652.
- [25] **Kucinska-Lipka, J., Gubanska, I., Strankowski, M., Cieśliński, H., Filipowicz, N., & Janik, H.** (2017). Synthesis and characterization of cycloaliphatic hydrophilic polyurethanes, modified with l -ascorbic acid, as materials for soft tissue regeneration. *Materials Science and Engineering: C*, 75, 671-681. doi: 10.1016/j.msec.2017.02.052.
- [26] **Kumar, S.** (2003). Selective laser sintering: A qualitative and objective approach. *Jom*, 55(10), 43-47. doi:10.1007/s11837-003-0175-y.
- [27] **Lee, Y., Jeong, S., & Park, S.** (2014). Study on manufacturing of recycled SiC powder from solar wafering sludge and its application. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 1(4), 299-304. doi:10.1007/s40684-014-0036-x

- [28] **León, A. D., Domínguez-Calvo, A., & Molina, S.** (2019). Materials with enhanced adhesive properties based on acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS)/thermoplastic polyurethane (TPU) blends for fused filament fabrication (FFF). *Materials & Design*, 182, 108044. doi:10.1016/j.matdes.2019.108044.
- [29] **Louvis, E., Fox, P., & Sutcliffe, C. J.** (2011). Selective laser melting of aluminium components. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(2), 275-284. doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.09.019.
- [30] **Love, L. J., Kunc, V., Rios, O., Duty, C. E., Elliott, A. M., Post, B. K., Blue, C. A.** (2014). The importance of carbon fiber to polymer additive manufacturing. *Journal of Materials Research*, 29(17), 1893-1898. doi:10.1557/jmr.2014.212.
- [31] **Lu, L., Fuh, J., Nee, A., Kang, E., Miyazawa, T., & Cheah, C.** (1995). Origin of shrinkage, distortion and fracture of photopolymerized material. *Materials Research Bulletin*, 30(12), 1561-1569. doi:10.1016/0025-5408(95)00118-2.
- [32] **Masood, S., & Song, W.** (2004). Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modelling. *Materials & Design*, 25(7), 587-594. doi:10.1016/j.matdes.2004.02.009.
- [33] **McKeen, L. W.** (2016). *Fatigue and tribological properties of plastics and elastomers*. William Andrew.
- [34] **Meiners, W.** (1996). U.S. Patent No. 19649865C1. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [35] **Murphy, E.** (1989). U.S. Patent No. 4844144. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [36] **Nikzad, M., Masood, S., & Sbarski, I.** (2011). Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for Fused Deposition Modeling. *Materials & Design*, 32(6), 3448-3456. doi:10.1016/j.matdes.2011.01.056.
- [37] **Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., & Wang, S.** (2015). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*, 80, 369-378. doi:10.1016/j.compositesb.2015.06.013
- [38] **Novakova-Marcincinova, L., Novak-Marcincin, J., Barna, J., & Torok, J.** (2012). Special materials used in FDM rapid prototyping technology application. 2012 IEEE 16th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES). doi:10.1109/ines.2012.6249805.
- [39] **Nunna, S., Maghe, M., Fakhrohoseini, S., Polisetti, B., & Naebe, M.** (2018). A Pathway to Reduce Energy Consumption in the Thermal Stabilization Process of Carbon Fiber Production. *Energies*, 11(5), 1145. doi:10.3390/en11051145.
- [40] **Onagoruwa, S., Bose, S., & Bandyopadhyay, A.** (2001). Fused deposition of ceramics (FDC) and composites. In 2001 International Solid Freeform Fabrication Symposium.

- [41] **Oropallo, W., & Piegler, L. A.** (2015). Ten challenges in 3D printing. *Engineering with Computers*, 32 (1), 135-148. doi:10.1007/s00366-015-0407-0
- [42] **Ozsoy, K., & Duman, B.** (2017). EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİNİN EĞİTİMDE KULLANILABİLİRLİĞİ. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1(1), 36-48
- [43] **Pham, D., & Dimov, S. S.** (2012). *Rapid manufacturing: the technologies and applications of rapid prototyping and rapid tooling*. Springer Science & Business Media.
- [44] **Poyraz, O., & Kushan, M. C.** (2018). Investigation of the effect of different process parameters for laser additive manufacturing of metals. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(2), 699-711.
- [45] **Sachs, E.** (1993). U.S. Patent No. 5204055. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [46] **Simchi, A., Petzoldt, F., & Pohl, H.** (2003). On the development of direct metal laser sintering for rapid tooling. *Journal of Materials Processing Technology*, 141(3), 319-328. doi:10.1016/s0924-0136(03)00283-8.
- [47] **Sood, A. K., Ohdar, R., & Mahapatra, S.** (2010). Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials & Design*, 31(1), 287-295. doi:10.1016/j.matdes.2009.06.016.
- [48] **Standard, A. S. T. M.** (2012). F2792. 2012. standard terminology for additive manufacturing technologies. ASTM F2792-10e1.
- [49] **Tekinalp, H. L., Kunc, V., Velez-Garcia, G. M., Duty, C. E., Love, L. J., Naskar, A. K., Ozcan, S.** (2014). Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing. *Composites Science and Technology*, 105, 144-150. doi:10.1016/j.compscitech.2014.10.009.
- [50] **Tobita, M., Shimoyama, N., & Tateda, S.** (2003). U.S. Patent Application No. 10/151,618.
- [51] **Veidt, M., Albermani, F., Daniel, B., Griffiths, J., Hargreaves, D., McAree, R., & Tan, A.** (2007). Thermo-mechanical properties of a metal-filled polymer composite for fused deposition modelling applications.
- [52] **Yin, J., Lu, C., Fu, J., Huang, Y., & Zheng, Y.** (2018). Interfacial bonding during multi-material fused deposition modeling (FDM) process due to inter-molecular diffusion. *Materials & Design*, 150, 104-112. doi:10.1016/j.matdes.2018.04.029.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Sinan DİKSU

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Ekim 2018' den beri Arçelik Buzdolabı İşletmesi'nde Arge Departmanı'nda arge mühendisi olarak çalışıyor.
- Mayıs 2018-Ekim2018 arasında Tübitak 1003 projesinde yüksek performanslı fiber üretimi üzerinde çalıştı.
- Eylül 2017-Mayıs 2018 arasında İTÜ laboratuvarında kompozit malzemeler üzerinde çalıştı.
- 2018 Tübitak İnsansız Hava Araçları Yarışması'nda üyesi olduğu takım detaylı tasarım raporu birincisi oldu.
- 2017 Tübitak İnsansız Hava Araçları Yarışması'nda üyesi olduğu takım detaylı tasarım raporu birincisi oldu.
- 2017 Shell Eco Marathon'da üyesi olduğu elektrikli araç takımı kendi kategorisinde üçüncü oldu.
- 2017 yılında lisans bitirme tasarım projesi olan insansız kara aracı tasarımı ve üretimi başarılı bir şekilde sonuçlandı.
- 2016 yılında bir aylık arge stajı Ford Otosan Kamyon Fabrikası Arge Test Merkezi'nde tamamlandı.
- 2015 yılında bir aylık üretim stajı Arçelik Buzdolabı İşletmesi Üretim Departmanı'nda tamamlandı.