

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ERİYİK YIĞMA MODELLEME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ PLA, PAHT-CF15 VE
PLA/PAHT-CF15 KOMPOZİTLERİN HIZLANDIRILMIŞ YAŞLANDIRMA
ALTINDAKİ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FURKAN PARMAKSIZ

ARALIK 2025

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ERİYİK YIĞMA MODELLEME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ PLA, PAHT-CF15 VE
PLA/PAHT-CF15 KOMPOZİTLERİN HIZLANDIRILMIŞ YAŞLANDIRMA
ALTINDAKİ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Furkan PARMAKSIZ

DANIŞMAN : Doç. Dr. Nergizhan ANAÇ

İKİNCİ DANIŞMAN : Doç. Dr. Oğuz KOÇAR

ZONGULDAK

Aralık 2025

KABUL:

Furkan PARMAKSIZ tarafından hazırlanan “Eriyik Yığıma Modelleme Yöntemi ile Üretilmiş PLA, PAHT-CF15 ve PLA/PAHT-CF15 Kompozitlerin Hızlandırılmış Yaşlandırma Altındaki Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 26/12/2025

Danışman: Doç. Dr. Nergizhan ANAÇ

.....
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

Üye: Doç. Dr. Ferhat ŞEN

.....
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Çaycuma Gıda ve Tarım Meslek Yüksek Okulu, Gıda Kalite Kontrolü ve Analizi Programı

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Serdar GÜLDİBİ

.....
Karabük Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

....../....../20....

Prof. Dr. Fikret GÖLGELEYEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Furkan PARMAKSIZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ERİYİK YIĞMA MODELLEME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLMİŞ PLA, PAHT-CF15 VE PLA/PAHT-CF15 KOMPOZİTLERİN HIZLANDIRILMIŞ YAŞLANDIRMA ALTINDAKİ MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Furkan PARMAKSIZ

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Nergizhan ANAÇ

İkinci Danışman: Doç. Dr. Oğuz KOÇAR

Aralık 2025, 105 sayfa

Bu çalışmada, Eriyik Yığma Modelleme (EYM) yöntemi kullanılarak üretilen, tek ve çoklu malzeme yapılarının, çevresel faktörlere karşı dayanımlarını anlamak için UV yaşlandırma sonrası mekanik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Çalışma kapsamında, EYM tekniğinde yaygın kullanılan filamentlerden; PLA+, yüksek performanslı karbon fiber takviyeli Poliamid (PAHT-CF15) ve bu iki malzemenin bir arada kullanılmasıyla oluşturulan, çalışmada MIX olarak adlandırılan yapılar incelenmiştir. Deneysel tasarımda, numuneler farklı duvar sayıları (2,3,4) ve farklı doluluk oranlarında (%25, %50, %75, %100) üretilmiştir. Üretilen numunelerin bir grubu referans olarak adlandırılıp yaşlandırma işlemi uygulanmazken; geri kalan numunelere ASTM G154 ve ASTM D4329 standartları referans alınarak, 168 saat boyunca, 70 °C ortam sıcaklığında ve UVA-340 lambalar altında hızlandırılmış UV yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Referans ve yaşlanmış numunelere, çekme, üç nokta eğme, sertlik testleri uygulanmış ve kütle değişimleri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, duvar sayısı ve doluluk oranındaki artışın tüm malzeme yapılarında mekanik dayanımı arttırdığını

ÖZET (devam ediyor)

göstermiştir. Yaşlandırma sonrası PLA+ numunelerde mekanik özellikler çok değişmezken; PAHT-CF15 ve MIX yapıların yaşlandırma süreci sonrasında mekanik performansları iyileşmiştir. Özellikle MIX yapıların, karbon fiber takviyeli dış duvarların sağladığı etki sayesinde çekme mukavemetleri iyileşmiş, eğilme performanslarının ise PAHT-CF15'ten daha iyi olduğu görülmüştür. Çalışma sonuçları, 3B yazıcılarda uygun parametreler kullanılarak üretilen MIX yapıların hem ekonomik hem de mekanik performans açısından kendisini oluşturan PLA+ ve PAHT-CF15 malzemelere alternatif olabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: 3B yazıcı, Eriyik Yığma Modelleme (EYM), PAHT-CF15, PLA+, UV Yaşlandırma, Mekanik özellikler.

Bilim Kodu: 625.02.00.

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF FUSED DEPOSITION MODELING MANUFACTURED PLA, PAHT-CF15, AND PLA/PAHT-CF15 COMPOSITES UNDER ACCELERATED AGING

Furkan PARMAKSIZ

**Zonguldak Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Nergizhan ANAÇ

Co-Advisor: Assoc. Prof. Dr. Oğuz KOÇAR

December 2025, 105 pages

In this study, changes in mechanical properties after UV aging were investigated to understand the resistance to environmental factors of single and multi-material structures produced using the Fused Deposition Modeling (FDM) method. Within the scope of the study, filaments commonly used in the FDM technique; PLA+, high-performance carbon fiber reinforced Polyamide (PAHT-CF15), and structures formed by the combination of these two materials, referred to as MIX in the study, were examined. In the experimental design, specimens were produced with different wall counts (2, 3, 4) and different infill densities (%25, %50, %75, %100). While one group of the produced specimens was designated as the reference and not subjected to aging, the remaining specimens were subjected to an accelerated UV aging process for 168 hours at an ambient temperature of 70 °C under UVA-340 lamps, based on ASTM G154 and ASTM D4329 standards. Tensile, three-point bending, and hardness tests were performed on the reference and aged specimens, and mass changes were analysed. The obtained results showed that the increase in wall count and infill density increased the mechanical strength in

ABSTRACT (continued)

all material structures. While the mechanical properties of PLA+ specimens did not change significantly after aging; the mechanical performances of PAHT-CF15 and MIX structures improved after the aging process. In particular, it was observed that the tensile strengths of MIX structures improved due to the effect provided by the carbon fiber reinforced outer walls, and their bending performances were better than that of PAHT-CF15. The study results demonstrated that MIX structures produced using appropriate parameters in 3D printers can be an alternative to their constituent PLA+ and PAHT-CF15 materials in terms of both economic and mechanical performance.

Keywords: 3D printer, Fused Deposition Modeling (FDM), PAHT-CF15, PLA+, UV Aging, Mechanical properties.

Science Code: 625.02.00.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın konusunun belirlenmesinden sonuçlanmasına kadar geçen tüm süreçte, engin bilgi ve tecrübeleriyle yoluma ışık tutan, akademik vizyonumun gelişmesine büyük katkı sağlayan, her zaman hoşgörü ve desteğini hissettiğim, daha nice çalışmalarda birlikte olmayı dilediğim, kıymetli hocalarımdan; tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Nergizhan ANAÇ ve ikinci danışmanım Sayın Doç. Dr. Oğuz KOÇAR'a en derin saygılarımı ve şükranlarımı sunarım.

Deneyisel çalışmaların yürütülmesi sürecinde, teknik imkanlarını sunarak değerli bilgilerini bizlerle paylaşan Gökerplast firmasına ve süreç boyunca yardımlarını esirgemeyen Laboratuvar Sorumlusu Sayın Aydın SOYSAL'a teşekkür ederim.

İlköğrenim sürecimde kısa bir süre öğrencisi olma şansı bulduğum; ancak bu kısıtlı zamanda bana bilimin aydınlattığı yolu sevdiren, bugünlere gelmemin temellerini atarak üzerimde unutulmaz bir emeği bulunan kıymetli öğretmenim Sayın Cengiz KESİMCİ'ye minnettarım.

Lisansüstü eğitimim boyunca yanımda olan, süreci benim için kolaylaştıran değerli arkadaşlarım İsmet Onur ÜNAL, Abdulsamed ARIK ve Zeynep Hale ŞİMŞİR'e; ayrıca hayatımın her alanında maddi ve manevi destekleriyle beni yalnız bırakmayan kadim dostlarım Bahriye Gizem KILIÇASLAN, Abdülkadir KILIÇ, Fatma Buse BORLU ve değerli kuzenim Aleyna KÖMEÇCİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak; hayatım boyunca en büyük şansım ve kıymetli hazinem olan, her koşulda kayıtsız şartsız arkamda duran, sevgilerini ve desteklerini her daim hissettiğim canım aileme sonsuz teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL:	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
 BÖLÜM 1 GİRİŞ	 1
 BÖLÜM 2 TEMEL KAVRAMLAR	 5
 2.1 EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİ	 5
2.2 ERİYİK YIĞMA MODELLEME (EYM) YÖNTEMİ	8
2.2.1 EYM Uygulanması ve 3B Yazıcı Parçaları	9
2.2.2 3B Baskıda Dilimleme İşlemi	12
2.2.3 EYM’de Kullanılan Baskı Parametreleri	13
2.2.3.1 Katman Kalınlığı (Katman Yüksekliği)	14
2.2.3.2 Doluluk Oranı (Dolgu Yoğunluğu)	14
2.2.3.3 Dolgu Deseni	15
2.2.3.4 Duvar Sayısı ve Kalınlığı (Kabuk)	15
2.2.3.5 Üst/Alt Katman Sayısı	15
2.2.3.6 Nozul Sıcaklığı	16
2.2.3.7 Tabla Sıcaklığı ve Fan Hızı	16
2.2.3.8 Baskı Hızı	16
2.2.3.9 Raster (Tarama) Açısı	17
2.3 EYM YÖNTEMİNDE KULLANILAN FİLAMENTLER	17

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.3.1 Geleneksel Filamentler	17
2.3.1.1 Polilaktik Asit (PLA)	18
2.3.1.2 Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS)	18
2.3.1.3 Polietilen Tereftalat Glikol (PETG)	18
2.3.1.4 Termoplastik Poliüretan (TPU)	19
2.3.2 Mühendislik Filamentleri ve Katkılı Filamentler	19
2.3.2.1 Akrilonitril Stiren Akrilat (ASA)	19
2.3.2.2 Poliamid (PA/Nylon)	19
2.3.2.3 Polipropilen (PP)	19
2.3.3 Kompozit Filamentler	20
2.3.3.1 Karbon Fiber (CF) Katkılı Filamentler	20
2.3.3.2 Cam Fiber (GF) Katkılı Filamentler	21
2.3.3.3 Ahşap Katkılı Filamentler	21
2.3.3.4 Metal Katkılı Filamentler	21
2.3.3.5 Nanoparçacık Katkılı Filamentler	21
2.4 POLİMERLERDE YAŞLANMA	22
2.4.1 Fiziksel Yaşlanma	23
2.4.2 Kimyasal Yaşlanma	24
2.4.3 Yaşlandırma Testleri ve Hızlandırılmış Yaşlandırma	25
BÖLÜM 3 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	27
3.1 EYM YÖNTEMİNDE KULLANILAN POLİMER MALZEMELERİN YAŞLANDIRILMASI	27
3.2 EYM YÖNTEMİ KULLANILARAK ÜRETİLMİŞ ÇOKLU MALZEME YAPILARI	36
3.3 ÇALIŞMANIN MOTİVASYONU	38

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 4 MATERYAL VE METOT	41
4.1 DENEYSEL AKIŞ ŞEMASI.....	41
4.2 KULLANILAN FİLAMANTLARIN ÖZELLİKLERİ	42
4.3 DİLİMLEME İŞLEMİ	44
4.4 BASKI PARAMETRELERİ	46
4.5 DENEY TASARIMI VE 3B BASKI SÜRECİ	48
4.6 YAŞLANDIRMA İŞLEMİ VE TEST KABİNİ	52
4.7 NUMUNELERE UYGULANAN MEKANİK TESTLER	54
4.7.1 Çekme Testi	54
4.7.2 Üç Nokta Eğme Testi.....	55
4.7.3 Sertlik Testleri ve Kütle Ölçümü	56
BÖLÜM 5 BULGULAR VE TARTIŞMA.....	59
5.1 REFERANS NUMUNELERİN TEST SONUÇLARI	59
5.1.1 Referans Numunelerin Çekme Özellikleri.....	59
5.1.2 Referans Numunelerin Eğme Özellikleri	65
5.1.3 Referans Numunelerin Sertlik Özellikleri	69
5.1.4 Referans Numunelerin Kütle Değerleri	71
5.2 YAŞLANMIŞ NUMUNELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ	72
5.2.1 Yaşlanmış Numunelerin Çekme Özellikleri	72
5.2.2 Yaşlanmış Numunelerin Eğme Özellikleri	78
5.2.3 Yaşlanmış Numunelerin Sertlik Özellikleri.....	79
5.2.4 Yaşlanmış Numunelerin Kütle Değerleri.....	81
5.3 REFERANS VE YAŞLANMIŞ NUMUNELERİN KIYASLANMASI	82
5.3.1 Çekme değerlerinin karşılaştırılması	82
5.3.2 Eğme değerlerinin karşılaştırılması	84
5.3.3 Sertlik değerlerinin karşılaştırılması	86

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
5.3.4 Kütle değerlerinin karşılaştırılması.....	87
BÖLÜM 6 SONUÇLAR.....	91
KAYNAKLAR.....	93
ÖZGEÇMİŞ	105



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Yaygın kullanılan eklemeli imalat yöntemlerinin şematik gösterimi.	6
Şekil 2.2 Farklı tiplerdeki 3B yazıcılar.	8
Şekil 2.3 3B baskı aşamaları.	9
Şekil 2.4 Farklı tipteki EYM yazıcıların eksenel yönleri.	10
Şekil 2.5 3B yazıcıda ekstrüzyon işlemi.	11
Şekil 2.6 3B yazıcının mekanik bileşenleri.	12
Şekil 2.7 3B baskının akış şeması.	13
Şekil 2.8 Yaygın kullanılan polimer çeşitleri ve kimyasal yapıları	22
Şekil 2.9 Yaşlanma mekanizmalarına genel bir bakış	23
Şekil 2.10 Kimyasal yaşlanmanın Polietilen (PE) numunelerin yüzeyi üzerindeki etkisi.	25
Şekil 2.11 Hızlandırılmış yaşlandırma kabini ve UV lambalar.	26
Şekil 4.1 Çalışmanın grafik özeti.	41
Şekil 4.2 Çalışmada kullanılan filamentler.	43
Şekil 4.3 Cura yazılımından alınmış ekran görüntüsü.	45
Şekil 4.4 Ultimaker Cura programında bulunan örnek baskı parametreleri.	46
Şekil 4.5 MIX çekme numunesinin, şematik katman gösterimi.	47
Şekil 4.6 Çalışmada kullanılan mekanik test numunelerinin ölçüleri	48
Şekil 4.7 3B yazdırma işlemi ve kullanılan teknolojileri	49
Şekil 4.8 Numune kodlama örneğinin şematik gösterimi.	52
Şekil 4.9 Kullanılan yaşlandırma kabini	53
Şekil 4.10 a) Yaşlandırma kabini kontrol paneli, b) Numunelerin kabine yerleştirilmesi.....	54
Şekil 4.11 Çekme numunesi ve test cihazı.	55
Şekil 4.12 a) Üç nokta eğme testi, b) Eğme testi aparatı.	56
Şekil 4.13 Sertlik ölçümü ve Shore D durometresi.	57
Şekil 4.14 Analitik terazi ile kütle ölçümü.	58
Şekil 5.1 Referans (yaşlanmamış) numunelerin çekme mukavemetlerinin gösterimi.	63
Şekil 5.2 2 duvara sahip referans numunelerin çekme sonrası görüntüleri.	63

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 5.3 3 duvara sahip referans numunelerin çekme sonrası görüntüleri.....	64
Şekil 5.4 4 duvara sahip referans numunelerin çekme sonrası görüntüleri.....	65
Şekil 5.5 Referans (yaşlanmamış) numunelerin eğme kuvvetlerinin gösterimi.....	68
Şekil 5.6 En yüksek eğme kuvvetine sahip referans numunelerin görüntüleri.	69
Şekil 5.7 Referans (yaşlanmamış) numunelerin sertlik grafikleri.....	70
Şekil 5.8 Yaşlanmış numunelerin çekme mukavemetlerinin grafiksel gösterimi.....	76
Şekil 5.9 Farklı doluluk oranlarındaki 2 duvara sahip yaşlanmış numunelerin çekme sonrası görüntüleri.	76
Şekil 5.10 Farklı doluluk oranlarındaki 3 duvara sahip yaşlanmış numunelerin çekme sonrası görüntüleri.	77
Şekil 5.11 Farklı doluluk oranlarındaki 4 duvara sahip yaşlanmış numunelerin çekme sonrası görüntüleri.	77
Şekil 5.12 Yaşlanmış numunelerin eğilme kuvvetlerinin grafiksel gösterimi.	78
Şekil 5.13 En yüksek eğme kuvvetine sahip yaşlanmış numunelerin görüntüleri.	79
Şekil 5.14 Yaşlanmış numunelerin sertlik grafikleri.....	81
Şekil 5.15 Referans ve yaşlanmış PLA + numunelerin kütleleri.	88
Şekil 5.16 Referans ve yaşlanmış PAHT-CF15 numunelerin kütleleri.	89
Şekil 5.17 Referans ve yaşlanmış MIX numunelerin kütleleri.	90

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 ISO/ASTM 52900 standardına göre temel eklemeli imalat yöntemleri.	7
Çizelge 4.1 PLA+ ve PAHT-CF15 filamentinin teknik özellikleri.....	44
Çizelge 4.2 Baskı parametreleri.	47
Çizelge 4.3 Çalışmada kullanılan üretim parametreleri	50
Çizelge 5.1 Referans (yaşlanmamış) numunelerin çekme mukavemetleri.	60
Çizelge 5.2 Referans (yaşlanmamış) numunelerin çekme testi verileri.	60
Çizelge 5.3 Referans (yaşlanmamış) numunelerin eğilme kuvvetleri.....	67
Çizelge 5.4 Referans (yaşlanmamış) numunelerin sertlik değerleri	70
Çizelge 5.5 Referans (yaşlanmamış) numunelerin kütleleri.	71
Çizelge 5.6 Yaşlanmış numunelerin çekme mukavemetleri.	73
Çizelge 5.7 Yaşlanmış numunelerin çekme testi verileri.	75
Çizelge 5.8 Yaşlanmış numunelerin eğilme kuvvetleri.	78
Çizelge 5.9 Yaşlanmış numunelerin sertlik değerleri.	80
Çizelge 5.10 Yaşlanmış test numunelerin kütleleri.....	82
Çizelge 5.11 Referans ve yaşlanmış numunelerin çekme mukavemetleri.	84
Çizelge 5.12 Referans ve yaşlanmış numunelerin eğilme kuvvetleri.	86
Çizelge 5.13 Referans ve yaşlanmış numunelerin sertlik değerleri.	87



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

%	: Yüzde
°C	: Santigrat Derece
mm	: Milimetre
T _g	: Camsı Geçiş Sıcaklığı
T _m	: Ergime Sıcaklığı
nm	: Nanometre
W/m ²	: Watt bölü metrekare (Işınım Şiddeti)
MPa	: Megapascal (N/mm ²)
kg	: Kilogram
g/cm ³	: Gram bölü santimetreküp (Yoğunluk)
mm/s	: Milimetre bölü saniye
kN	: kiloNewton
R _m	: Çekme Mukavemeti (MPa)
E _t	: Elastisite Modülü (MPa)
g	: Gram
N	: Newton
F _{max}	: Maksimum Kuvvet (N)

KISALTMALAR

3B	: Üç Boyutlu
ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
AMF	: Additive Manufacturing File Format
ASA	: Akrilonitril Stiren Akrilat
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
BJ	: Bağlayıcı Püskürtme

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
CF	: Karbon Fiber
DLP	: Dijital Işık İşleme
Eİ	: Eklemeli İmalat
EYM	: Eriyik Yığma Modelleme
FDM	: Eriyik Yığma Modelleme
FFF	: Eriyik Filamentle İmalat
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
GF	: Cam Fiber/Elyaf
HIPS	: Yüksek Darbe Dayanımlı Polistiren
ISO	: Uluslararası Standartlar Teşkilatı
LOM	: Lamine Nesne İmalatı
MIX	: Çalışma kapsamında PLA+ ve PAHT-CF15 malzemelerinin birlikte kullanıldığı yapı
OBJ	: Object File Format
PA	: Poliamid (Naylon)
PAHT-CF15	: Yüksek Sıcaklık Dayanımlı Karbon Fiber Takviyeli Poliamid
PC	: Polikarbonat
PETG	: Polietilen Tereftalat Glikol
PLA	: Polilaktik Asit
PLA+	: Geliştirilmiş Polilaktik Asit
PP	: Polipropilen
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SLA	: Stereolitografi
SLS	: Seçici Lazer Sinterleme
STL	: Standard Triangle Language
TPE	: Termoplastik Elastomer
TPU	: Termoplastik Poliüretan
UV	: Ultraviyole

BÖLÜM 1

GİRİŞ

İnsanlık, tarih boyunca doğada bulunan malzemeleri ihtiyaçları doğrultusunda şekillendirmiş ve işlemiştir. Teknolojinin ve ekonomik sistemlerin giderek gelişmesi ile, insanoğlu geleneksel yöntemlerin sınırlarını aşarak daha yenilikçi, verimli ve sürdürülebilir teknolojilere yönelmiştir. Özellikle 1980’lerde temelleri atılan ve son yıllarda, Endüstri 4.0 etkisi ile ivme kazanan eklemeli imalat teknolojileri, bu yönelimin en somut örneklerinden biridir. Geleneksel imalat yöntemlerinin yol açtığı yüksek hammadde israfı, karmaşık kalıp hazırlama süreçleri ve tasarım kısıtlamaları gibi zorluklar; malzemeyi katman katman yığarak üretim yapan eklemeli imalat teknolojileri sayesinde günümüzde yavaşça ekarte edilmektedir. Bu durum hem hammadde verimliliğine hem de karmaşık geometrili parçaların üretimine olanak sağlamaktadır.

Eklemeli imalat yöntemleri arasında yer alan ve farklı tipteki malzemeleri kullanarak, evlerdeki son kullanıcıların düşük maliyetlerle üretim yapmasına olanak sağlayan 3B yazıcıları kapsayan EYM (Eriyik Yığma Modelleme) teknolojileri, eklemeli imalat yöntemlerinden biridir. EYM yöntemi son dönemlerde endüstride yaygınca kullanılmaktadır. Başlangıçta yalnızca hızlı prototipleme gibi amaçlara kullanılan bu yöntem, artık hem teknik hem de kişisel ihtiyaçlara özgü parçaların üretimine olanak sağlamaktadır. EYM, teknik olarak filament adı verilen termoplastik malzemelerin eriyik hale getirilmesinin ardından, bir ekstrüder vasıtası ile daha önce belirlenen geometrik cisimlerin üst-üste katman katman serilerek üretilmesi prensibine dayanır.

EYM süreçlerinin başında, üretilecek malzemelerin bilgisayar ortamında tasarlanması ve ardından dilimleyici yazılımlar aracılığı ile takım yolunun belirlenmesi işlemleri vardır. Dilimleyici yazılımlar, üretim sürecinin adımlarını belirleyen baskı parametrelerini, baskı öncesinde ayarlamaya olanak sağlar. EYM yönteminde birçok baskı parametresi bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak dolgu deseni, nozul sıcaklığı, tabla sıcaklığı, duvar sayısı ve doluluk oranı parametreleri verilebilir. Bu parametreler üretilecek parçaların çekme

dayanımı, eğme dayanımı, sertlik gibi mekanik özelliklerine direkt etki ederler. Bu yüzden baskı öncesinde ürünlerden beklenen performans ve dayanım özellikleri dikkate alınarak, bu parametrelerin optimize bir şekilde ayarlanıp, nihai parçaların istenilen performansta üretilmesi büyük önem taşır.

Polimer malzemeler, hafiflikleri ve işlenebilirlikleri sayesinde EYM teknolojisinde en çok kullanılan hammaddeler olsalar da, çevresel faktörlere karşı yapısal bir hassasiyete sahiptirler. Polimerler; nem, sıcaklık ve özellikle güneşten yayılan ultraviyole (UV) ışınımı gibi dış ortam koşullarına maruz kaldıklarında, molekül zincirlerinde kopma gibi yapısal bozulmalar meydana gelir. Çevresel faktörlerin oluşturduğu bu türdeki negatif etkilere yaşlanma adı verilir. Yaşlanma, polimer malzemelerin dış görüşünde, yüzey kalitesinde ve en önemlisi de polimer mekanik dayanımlarında geri dönüşümlü farklılıklara yol açar. Yaşlanma olayının, gerçekleşmesi için genellikle malzemelerin uzun süreli olarak çevresel etmenlere maruz kalması gerekmektedir. Bu nedenle üretilen parçaların, gerçek kullanım koşullarındaki davranışlarını gözlemlemek ve buna bağlı olarak da ömürlerini tayin etmek, mühendislik açısından çok kritik bir gerekliliktir.

Yaşlanma sürecini doğal olarak gözlemlemek büyük bir vakit kaybına yol açar. Üretilen malzemelerin uzun vadeli performanslarını kısa sürede öngörebilmek amacıyla, hızlandırılmış yaşlandırma testleri geliştirilmiş ve bu testler endüstri standardı haline gelmiştir. Bu testlerde, malzemeler, test standartlarına göre üretilmiş kabinlerde, daha önce belirlenen belirli çevresel etmenlere maruz bırakılıp bir nevi doğa simülasyonuna tabi tutulurlar. Bu testlerden UV lambaları, sıcaklık ve nem faktörlerini kullanarak yapılan hızlandırılmış yaşlandırma testleri, polimerlerin çevresel koşullara karşı davranışlarını ölçmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Bu testlerin ardından, referans ve yaşlanan numunelere bir takım mekanik testler uygulanarak, yaşlanmanın malzemelerin performansı üzerindeki etkileri gözlemlenebilir. Tüm malzeme çeşitlerinde ve çoklu malzeme yapılarında yaşlandırmanın mekanik özelliklere etkisi farklı olacaktır.

EYM yönteminde kullanılan ikili ekstrüzyon sistemleri sayesinde, iki farklı filament tipini kullanarak yekpare parçalar üretmek mümkündür. Bu sayede iki farklı malzemenin kendine göre avantajlı özelliklerinin kullanıldığı yapılar üretilebilir. Özellikle geleneksel filamentlere nazaran yüksek mekanik performanslı, karbonfiber takviyeli kompozit filamentler sayesinde bu yapılar daha işlevsel hale gelmektedir. Ancak bu filamentler yaygınca kullanılan PLA gibi

filamentlere göre daha maliyetlidir. Özellikle sıcaklık ve UV ışıınının neden olduğu yaşlanma etkisini azaltmak için iki farklı malzemenin bir arada kullanıldığı yapılar bu konuda iyi bir çözüm yolu olmaktadır. Literatürde PLA, ABS ve karbon fiber takviyeli kompozit filamentlerin yaşlandırma etkisi altındaki davranışlarını inceleyen çalışmalar mevcuttur. Ancak mevcut çalışmalar genellikle tek malzeme kullanılarak üretilen parçalar üzerine yoğunlaşmakta ve çoklu malzemeden üretilmiş parçaları kapsamamaktadır.

Üretim maliyeti ve ürünlerin mekanik performansını dengelemek mühendislik açısından oldukça önemli bir konudur. Bundan ötürü birbirinden farklı malzemelerin bir arada kullanıldığı yapıların eklemeli imalat yöntemleriyle üretilmesi üzerine birçok çalışma mevcuttur. Fakat dış duvar ve dış duvar altında bulunan ana malzemenin değiştirilmesiyle oluşturulan çok malzemeli yapılar ve bu şekilde üretilen çoklu malzemelerin yaşlanması hakkında literatür bilgisi sınırlıdır. Özellikle bu çalışmaya konu olan dış duvar yapılarının karbon fiber takviyeli poliamid (PAHT-CF15), iç yapıların PLA+ olduğu, farklı doluluk ve duvar sayılarına sahip çok malzemeli numunelere uygulanan yaşlandırma işleminin malzemelerin mekanik performansını inceleyen bir çalışmaya da rastlanmamıştır.

Bu çalışmanın amacı, EYM yöntemi ile üretilen PAHT-CF15 ve PLA+ malzemelerin bir arada kullanıldığı ve çalışma kapsamında MIX olarak adlandırılan, farklı duvar sayısı ve doluluk oranlarındaki yapıların, UV yaşlandırma altındaki etkisinin incelenmesidir. Çalışmada uygulanan hızlandırılmış yaşlandırma testi özellikle sınır sıcaklık şartlarında (70 °C), 168 saatlik bir süreçte ve filamentlerin higroskopik yapılarından ötürü nem etkisinden uzak bir şekilde uygulanmıştır. Bu testler sayesinde, özellikle kuru ve sıcak iklim koşulları altında, sürekli olarak sıcaklığa maruz kalacak fonksiyonel parçaların optimum parametrelerde yenilikçi yapılarda üretilmesi ve çalışma performansları hakkında fikir sahibi olunacaktır. Ayrıca, uygulanan UV yaşlandırma testleri sonucunda, belirlenen parametreler deneysel olarak analiz edilerek, sonuçlar kısmında verilmiştir.



BÖLÜM 2

TEMEL KAVRAMLAR

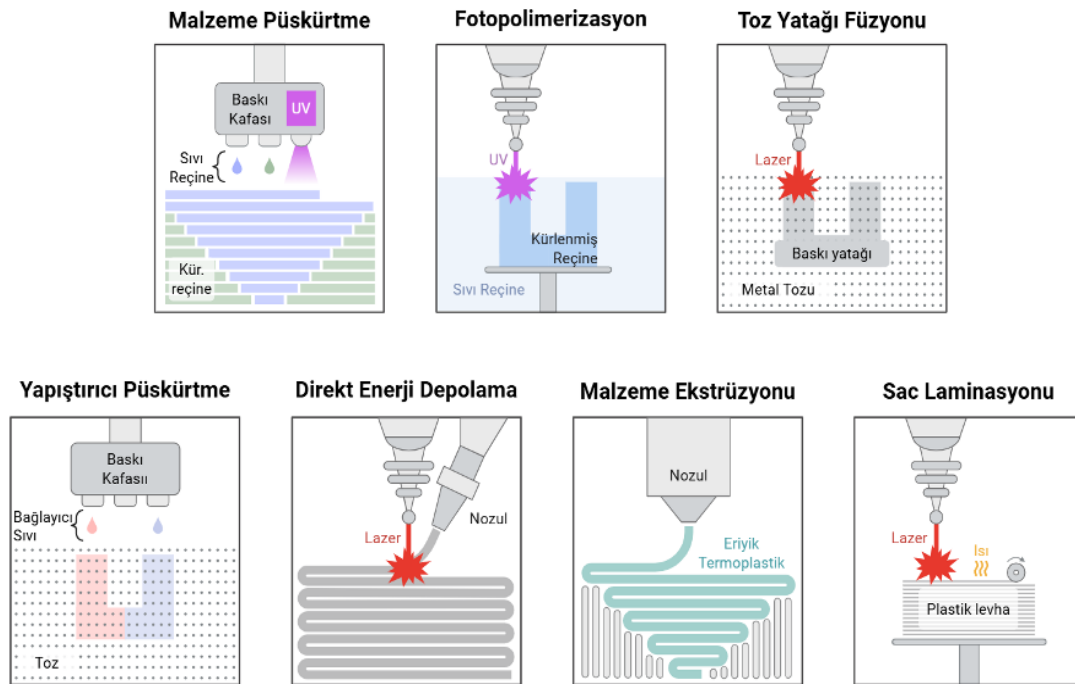
2.1 EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİLERİ

Eklemeli imalat (Eİ), katmanlı üretim olarak da adlandırılan bir alışılmamış imalat sürecidir. Yöntemde; tornalama, frezeleme, döküm, plastik enjeksiyon gibi konveksiyonel yöntemlerin aksine üretilecek parçadan talaş kaldırma işlemine veya kalıplara ihtiyaç duyulmaz. Üretimi gerçekleştirecek nesnenin, dijital ortamda katmanlarına ayrılıp, fiziksel olarak katmanların üst üste bindirilmesiyle yekpare halde üretilmesi sağlanır. Gelişen teknoloji sayesinde eklemeli imalat yöntemleri de sürekli olarak gelişmekte ve birçok sektörde, bahsedilen üretim yönteminin kullanımı artmaktadır. Bu teknolojiler, günümüzde mühendislik sektörünün yanı sıra tıp, eğitim, mimarlık, hobi ve eğlence amaçlı toplumun diğer alanlarında da çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Zhou et al. 2024, Prashar et al. 2023).

Eİ teknolojilerinin geleneksel üretim metotlarına nazaran üstün olduğu birçok konu bulunmaktadır. Eklemeli İmalat sayesinde karmaşık geometri ve kompleks parçaların üretimi kolaylaşmakta, bu sayede tasarım özgürlüğünü artırarak yenilikçi fikirlerin uygulanmasına olanak sağlanmaktadır. Ayrıca seri üretim öncesinde prototip üretimi için bu yöntemleri kullanmak, tasarım ve geliştirme süreçlerini hızlandırabilmektedir. Özellikle fiziksel boyutları ufak ve seri üretime gerek duyulmayan yapıların üretimi, yöntemi ekonomik olarak iyi bir alternatif haline getirmektedir. Bununla birlikte, kişiselleştirilebilen tasarımlar sayesinde kullanıcıya özel parçaların üretimi sağlanmaktadır. Tıbbi alanlarda kullanılan, kişiye özgü implant ve protezlerin üretimi eklemeli imalatın en önemli avantajlarından biridir. Sadece belirli kullanım alanlarına özgü olmayan bu teknolojiler ile, üretim sırasında birden fazla malzeme aynı anda kullanılabilir, böylece montaj gibi ikincil işlemlere gerek kalmadan daha hafif ve dayanıklı yapılar elde etmek mümkün hale gelir. Ayrıca, herhangi bir talaş kaldırma vb. işleme gerek duyulmadığı için yalnızca gerekli miktarda malzeme kullanılarak atık oranı minimuma indirilmekte ve sürdürülebilir bir üretim anlayışı desteklenmektedir. Tüm bu avantajları sayesinde eklemeli imalat, yenilikçi düşünceyi teşvik eden ve üretim süreçlerine esneklik

kazandıran önemli bir üretim yöntemidir (Prashar et al. 2023, Manogharan et al. 2015, Ngo et al. 2018).

Bununla birlikte, eklemeli imalat yalnızca bir üretim metodolojisi üzerine kurulmuş bir yöntem değildir, kullanım alanlarına göre farklı eklemeli imalat teknikleri bulunmaktadır (Özsolak 2019) (Şekil 2.1). Üretimi gerçekleştirecek parçalara göre, en uygun yöntem, her uygulama için gerekli malzeme ve performans gereksinimleri dikkate alınarak seçilmelidir. Bu ayrım, Çizelge 2.1'de özetlenen ve ISO/ASTM 52900:2021 standardında (URL-1) belirtilen yedi temel kategori üzerinden yapılmaktadır. Eİ teknolojisinin geliştirilmesi sırasında, genellikle belirli uygulama alanlarına ve ticari markalara atıfta bulunulan çok sayıda farklı terim ve tanım kullanılmaktadır. Bunlar, genellikle belirsiz ve kafa karıştırıcıdır. Bu kavramlar teknolojinin iletişimini ve daha geniş bir uygulama alanı potansiyelini engellemektedir. Bu gibi engellerin önüne geçebilmek amacıyla ISO/ASTM 52900:2021 standardı geliştirilmiştir. Standardın içerdiği sınıflandırma, her bir yöntemin parçaları oluşturmak için kullandığı fiziksel ve kimyasal prensiplere dayanır.



Şekil 2.1 Yaygın kullanılan eklemeli imalat yöntemlerinin şematik gösterimi.

Çizelge 2.1 ISO/ASTM 52900 standardına göre temel eklemeli imalat yöntemleri (Dedeakayoğulları vd. 2020).

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMLERİ						
TİP	KATEGORİ	YÖNTEM	TEKNOLOJİ	MALZEME	GÜÇ KAYNAĞI	ÖZELLİKLER
SIVI	Eriyik	Malzeme Ekstrüzyonu	EYM	Termoplastik	Termal Enerji	-Düşük yazıcı maliyeti -Çoklu malzeme ile baskı -Yüksek mukavemet -Düşük parça çözünürlüğü -Düşük baskı kalitesi ve baskı hızı
	Polimerize edilebilir	Fotopolimerizasyon	SL (SLA)	Fotopolimer, Seramik	UV Işını	-Yüksek baskı hızı -Yüksek parça çözünürlüğü -Yüksek detay -Malzeme maliyeti yüksek
			DLP		Projeksiyon	-Yüksek baskı hızı -Çözünürlük, projeksiyonun piksel boyutuyla sınırlıdır.
			Malzeme Püskürtme	Çoklu Püskürtme (PJ)	Fotopolimer, Wax	UV Işını
KATI	Yapışık Objeler	Sac Laminasyonu	Lamine Nesne İmalatı (LOM)	Kâğıt, Plastik film, Metalik sac, Seramik bant	Lazer Işını	-İyi yüzey kalitesi -Yazıcı, malzeme, proses maliyeti düşük -Büyük boyutlu malzeme basabilme -Dikey yönde zayıf mukavemet
TOZ	Eritme	Toz Yataklı Eritme	SLS	Poliamid, Polimer	Yüksek Güçlü Lazer Işını	-Yüksek doğruluk -Yüksek detay -Tam dolu parça üretimi
			DMSL	Metal Tozu, Seramik Tozu		
			SLM		Elektron Işını	-Yüksek mukavemet -Destek yapıları gerekmez
			EBM			
	Yapıştırma	Direkt Enerji Depolama	LENS	Erimiş Metal Tozu	Lazer Işını	-Hasarlı ve aşınmış parçaları tamir edebilme -Son işlem ihtiyacı
			EBAM			
	Yapıştırıcı Püskürtme	Bağlayıcı Püskürtme (BJ)	Seramik Tozu, Metal Tozu, Kum	Termal Enerji	-Renkli obje baskısı -Destek yapıları gerekmez -Geniş malzeme seçeneği -Yüksek baskı hızı -Düşük dayanım -Yüksek gözeneklilik	

2.2 ERİYİK YIĞMA MODELLEME (EYM) YÖNTEMİ

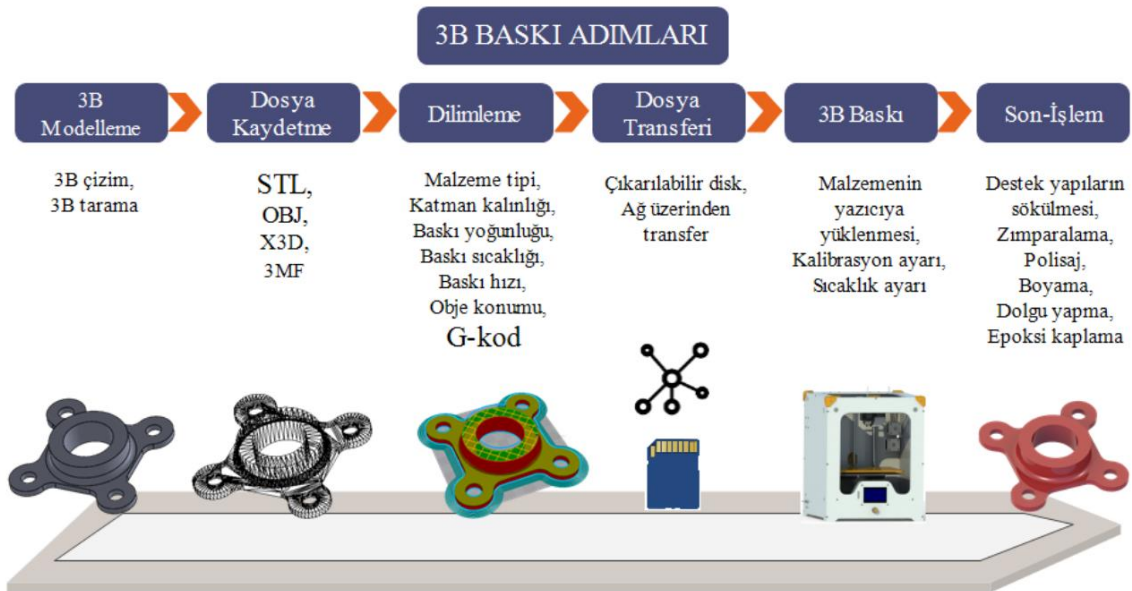
Malzeme ekstrüzyon yöntemlerinden olan Eriyik yığma modelleme metodu, en yaygın kullanılan Eİ yöntemlerinden biridir. Bu yöntem eklemeli imalat sektöründe FFF (Eriyik Filamentle İmalat) yöntemi olarak da bilinmektedir. Bunun temel sebebi 1989 yılında, Stratasys firması bünyesinde, ilk kez bu yöntemi kullanan ve üreten, Scott Crump tarafından FDM (Türkçe: EYM) isminin ticari haklarının tescil edilmesidir. Ancak pratik uygulamalar ve eklemeli imalat terminolojisinde FDM ismi yaygınca kullanılır. Kişisel kullanıcıların yaygınca kullandığı bu yöntemin popüler olmasının başlıca nedeni, bu teknoloji ile çalışan birçok farklı ev tipi yazıcının olması (Şekil 2.2) ve diğer metotlara göre, düşük hammadde maliyetiyle çalışması olarak gösterilebilir. EYM metodu ile çalışan 3B yazıcılar geleneksel üretim tekniklerinde kullanılanlardan daha sınırlı ve az sayıda malzeme çeşidi ile üretim gerçekleştirse de gelişen teknolojiler sayesinde hemen hemen her sektörde yer almaya başlamıştır. 3B yazdırma işlemi en basit anlatımı ile, bir hazne içerisinde eriyik hale getirilen termoplastik malzemenin, hareket ileten yardımcı elemanlar kullanılarak nozul ucundan ekstrüzyon işlemine uğratılmasıdır. Bu ekstrüzyon işlemi sırasında 3B yazıcı, daha önceden belirlenmiş parametreler doğrultusunda belirli bir takım yolunu izleyerek üretilcek parçayı bir tabla üzerinde katman katman üst üste ekleyerek oluşturur (Luo et al. 2023).



Şekil 2.2 Farklı tiplerdeki 3B yazıcılar.

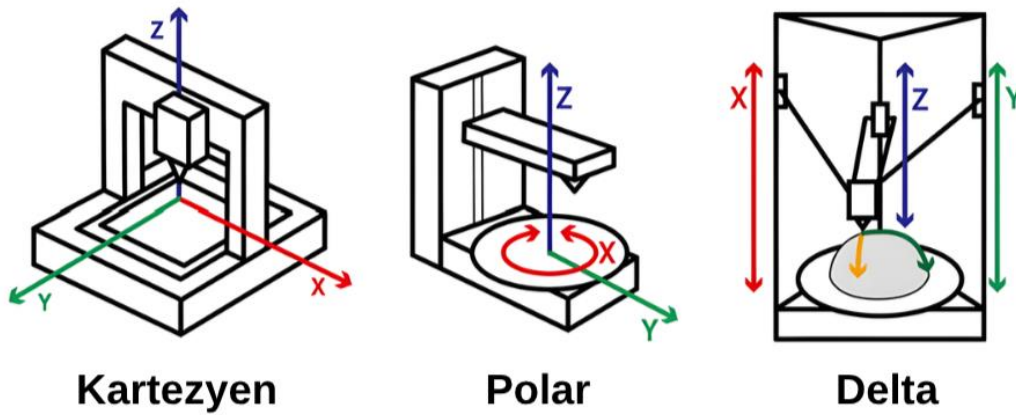
2.2.1 EYM Uygulanması ve 3B Yazıcı Parçaları

EYM yöntemi ile parça üretimi için öncelikle üretilecek modellerin, Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) programları ile dijital ortamda hazırlanması gerekmektedir. Bu aşamada üretilecek parçaların eklemeli imalata uygun parçalar olması önem arz etmektedir. Ayrıca daha öncesinden topoloji optimizasyonu gibi işlemler yapılarak parçanın mekanik performansın optimize edildiği yapılar oluşturulabilir. Bilgisayar ortamında üretilen bu modeller kullanılan bilgisayar programının çıktıları çeşitli ve farklı olduğundan direkt olarak yazıcıya aktarılamaz. Bundan ötürü evrensel bir format kullanmak gereklidir. Bu formatlar üretilen modellerin yüzey yapılarının üçgenlere ayrıldığı STL, OBJ ve AMF gibi formatlardır. Kayıt biçimine göre değişen format tiplerini direkt olarak 3B yazıcılara aktarmak ve baskıya başlamak mümkün değildir. Bundan ötürü baskı öncesinde dilimleme olarak adlandırılan baskının katmanlarına ayrıldığı ve takım yolunun belirlendiği bir işleme ihtiyaç duyulmaktadır. Dilimleme işlemi sonrasında üretilen g-kodların cihaza aktarılması gerekmektedir. Bu aktarım yazıcının desteklediği donanımına göre; ağ yolu, hafıza kartı ve çıkarılabilir bellekler ile sağlanır. Ardından baskı işlemi gerçekleşir ve baskı bitiminden sonra gerekirse ardıl işlem uygulamaları yapılabilir. 3B baskı aşamalarına ait akış şeması Şekil 2.3'te verilmiştir (Sohrabian et al. 2021, Delic et al. 2020, Sürmen 2019).



Şekil 2.3 3B baskı aşamaları (Sürmen 2019).

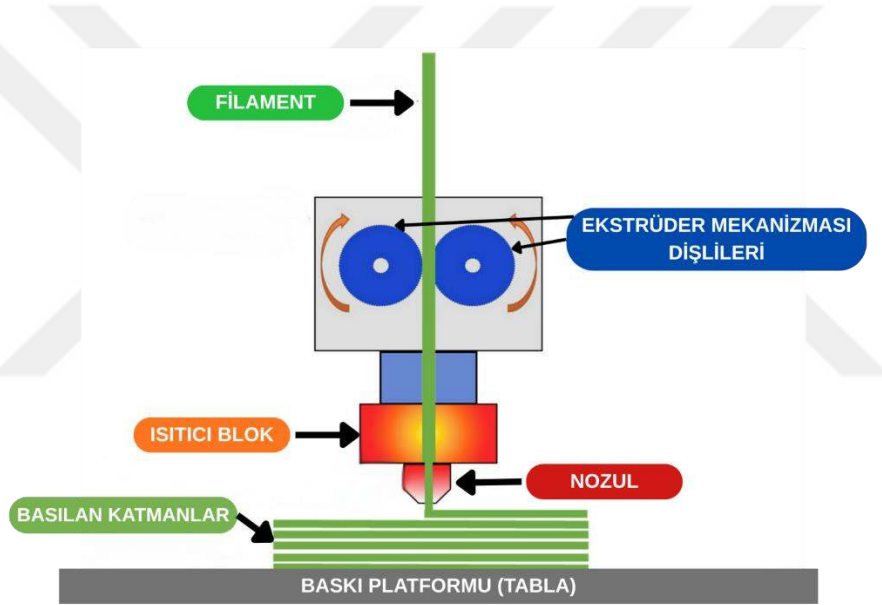
EYM yöntemi ile çalışan 3B yazıcılar, üretim sürecini gerçekleştirebilmek için birçok mekanik ve termal bileşenlerden oluşurlar. Temel olarak mekanik kısımda; yazıcının hareketlerini gerçekleştirmek için motorlar ve hareket iletim elemanlarından oluşan 3B yazıcılar, aynı zamanda kullandığı filament malzemelerini eritebilmek amacıyla termal parçaları da sistemlerinde barındırırlar (Bankapalli et al. 2023). Bu parçalar yazıcı üreticilerinin kullandığı malzeme ve yazıcı tasarımlarına göre değişiklik gösterse de temelde; kartezyen, delta, polar gibi farklı platform türlerinde üretilmiştir (Villi et al. 2024). Kartezyen 3B yazıcılar, piyasada en yaygınca kullanılan 3B yazıcılardır. Matematiksel olarak kartezyen koordinat sisteminin kullanıldığı bu yazıcılarda, baskı kafasının çizgi konumları ve baskı yönünü belirlemek için üç ortogonal eksen (X, Y, Z eksenleri) kullanılır. Piyasada kartezyen yazıcıların tablanın hareket yönüne göre farklı tipleri bulunmaktadır. Z eksen baskının katman yüksekliğinin belirlendiği eksenidir. X ve Y eksenleri ise ekstrüder ya da tablanın hareket yönünün belirlendiği eksenlerdir. Farklı tip yazıcıların kullandığı eksenel yönler Şekil 2.4’te gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Farklı tipteki EYM yazıcıların eksenel yönleri (Kakabadze 2020).

EYM tipi 3D yazıcılarda üretim yapabilmek için genellikle makaralara ip gibi sarılmış filament malzemeleri kullanılmaktadır. Fakat kullanılacak filamentlerin eriyik hale getirilip akışkan bir forma girmesi gereklidir. Bundan ötürü öncelikle yazıcıları uygun bir kısımdan filamentle sürekli olarak beslemek gereklidir. Ekstüder adı verilen bu yapılar filamentle beslenir ve içindeki dişliler sayesinde, hareketli baskı kafasına iletim sağlar. Baskı kafasının içinde hotend adı verilen yapılar bulunur. Hotendler; çelik kovan, teflon boru, soğutucu eleman, ısıtıcı blok, ve nozullardan oluşan bir bileşendir. Hotendin çelik kovanını içinden geçen teflon tüp yardımıyla gerekli gerekli besleme işlemi yapılır. Ardından filamentlere ekstrüder dişlileri

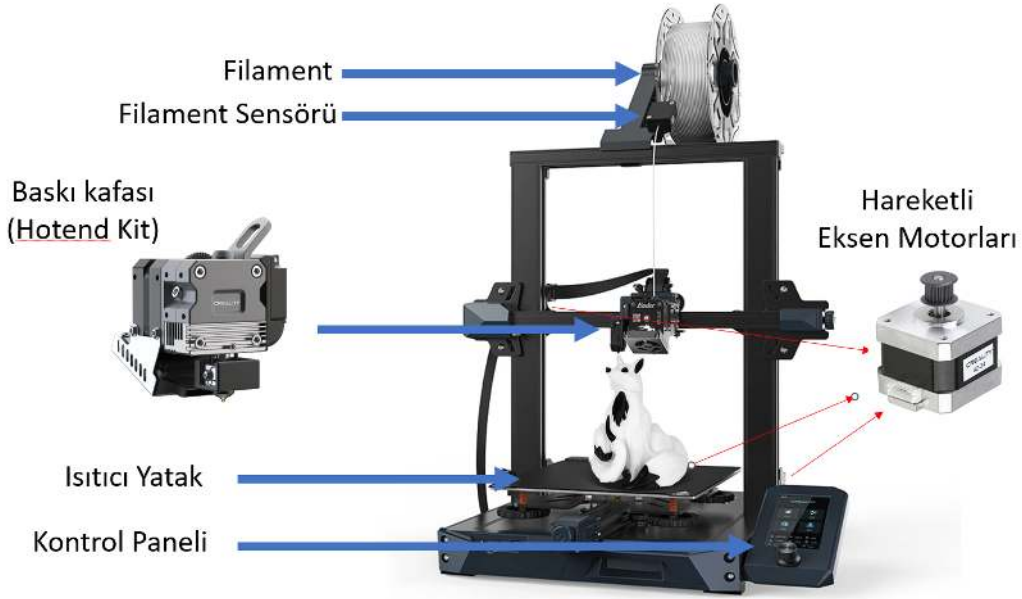
tarafından itme kuvveti uygulanarak hotendin içinde hareket sağlanır. Isıtıcı bloğa ilerleyen filament, daha önce belirlenen baskı parametrelerince belirli sıcaklığa ulaşır. Bu sayede malzeme eriyik hale gelir ve ekstrüder tarafından sürekli ilerleme hareketi yapıldığından uç kısmındaki nozulun deliğinden dışarı akıtılır. Bu sayede Şekil 2.5'te şematik gösterimi verilen ekstrüzyon işlemi yapılmış olur. Yapılacak işlemlere göre nozul çapları ve malzemeleri değişiklik gösterebilir. 3B yazıcılarda farklı malzeme tipleri kullanıldığı için standart bir nozul malzemesi bulunmamaktadır. Daha çok pirinç nozullar tercih edilse de, aşındırıcı takviye malzemesi içeren ve yüksek sıcaklıklara çıkması gereken filamentlerde çelik gibi aşınmaya karşı daha dayanıklı nozul tipleri tercih edilebilir. Ayrıca işlem proseslerine göre genellikle 0.2-1 mm aralığında nozullar sektörde yaygınca kullanılmaktadır (Bankapalli et al. 2023, Khan et al. 2024, URL-2).



Şekil 2.5 3B yazıcıda ekstrüzyon işlemi.

Eriyik filamentin nozuldan akıtılması, modelin oluşturulması için tek başına yeterli değildir. Nozulun bulunduğu baskı kafasının ve modelin üretileceği tablanın X, Y ve Z eksenlerinde çok hassas, milimetrik adımlarla hareket etmesi gereklidir. Bu hareket, modelin sanal ortamdaki üç boyutlu koordinatlarına uygun olarak, step (adım) motorları, kayışlar ve miller aracılığıyla sağlanır. Ekstrüder ve eksen hareketleri, bu motorlar ve mekanik bileşenler sayesinde kontrol edilir (Şekil 2.6). Dilimleyici yazılımlar tarafından belirlenen yörüngeyi takip eden baskı kafası, hareket ederken eriyik malzemeyi tabla üzerine veya bir önceki katmanın üzerine bırakır. Bırakılan malzeme kısa sürede, fanlar aracılığı ile soğuyup katılaşarak modelin ilk katmanını oluşturur ve bu süreç, model tamamlanana kadar katman katman üst üste binerek devam eder.

Parçanın tüm katmanları üretildikten sonra, baskı kafası genellikle [0,0,0] koordinatlarındaki, cihazın ev denilen konumuna giderek baskıyı sonlandırır.



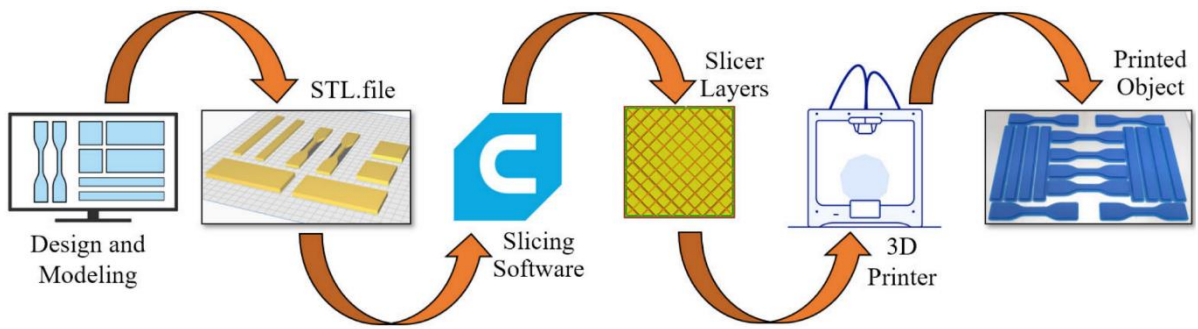
Şekil 2.6 3B yazıcının mekanik bileşenleri.

3B baskının ilk katmanının düzeni, üretim sırasındaki katmanların tamamı üzerine bineceği için oldukça önemlidir. Bundan ötürü 3B yazıcılarda ilk katmanın yüksek sıcaklık gibi farklı parametrelerde üretilmesi gerekir. Ayrıca baskının tabladan ayrılması ve baskı kalitesinin düşmesi gibi problemler yaşamamak amacıyla da ilk katmanın düzgün basımı oldukça önemlidir. Bundan ötürü yazıcının tablası üzerinde z ekseni kalibrasyonu adı verilen işlem yapılır. Bu işlemde tabla ile nozul arasındaki mesafenin eşit hale getirilmesi sağlanır. Bunun için yazıcı tablasının altında bulunan manuel kalibrasyon tekerlekleri sıkılıp gevşetilerek ayarlanır. Böylece el ile kalibrasyon işlemi yapılır. Ancak bu kalibrasyon biçiminin hata payı yüksektir. Bu nedenle gelişen 3B yazıcı sektöründe üretici firmalar, profesyonel baskılara yönelik olarak otomatik tabla kalibrasyonu yapan sistemleri kullanılır. Bu sistemlerde tablanın eğimi ve düzensizliğini ölçen mekanik, kapasitif ve endüktif sensörleri yazıcılara entegre etmişlerdir. Böylece kalibrasyon hataları minimuma inerek daha kaliteli baskıların yapılmasına olanak sağlanmaktadır.

2.2.2 3B Baskıda Dilimleme İşlemi

3B modelleme sonrasında üretilmiş 3 boyutlu dijital objeler üretim amacıyla direkt olarak cihaza aktarılamaz. Dilimleyici (Slicer) yazılımlar, eklemeli imalat sürecinin temelini

oluşturan, dijital obje ile fiziksel baskı arasında bir köprü görevi gören kritik bir araçtır. Bu tip yazılımlar, Bilgisayar Destekli Tasarım (CAD) programlarında oluşturulan ve genellikle STL (Standard Triangle Language) benzeri formatlarda kaydedilmiş dijital dosyaları, 3B yazıcının algılayıp üretim işlemine geçebileceği talimatlara, yani G-kodlarına dönüştürür. Bu dönüşüm süreci olmadan, 3B yazıcılar 3 boyutlu modelleri doğrudan okuyup, uygulayamadığı için yazdırma işlemi gerçekleşemez. Dilimleme işlemi, 3B nesnenin yatay yönde birçok katmana bölünerek, her bir katmanın nasıl yazılacağına dair bilgilerin belirlendiği aşamadır. Bu işlem sırasında temel baskı parametreleri belirlenir ve baskının aşamaları g-kod olarak dışarı aktarılır (Bryła and Martowicz 2021). Şekil 2.7’de 3B baskının akış şeması verilmiştir (Ünal et al. 2025).



Şekil 2.7 3B baskının akış şeması (Ünal et al. 2025).

Dilimleyici yazılımlar, içinde bulundurduğu ayar menüleri ile nihai basılı ürünün mekanik ve geometrik özelliklerini doğrudan etkileyen parametreleri ayarlamayı sağlarlar. Bu parametrelerden bazıları; katman yüksekliği, iç doluluk oranı, duvar sayısı, nozul sıcaklığı, tabla sıcaklığı ve baskı hızı gibi parametrelerdir. Bu parametreler optimize edilerek parçanın fiziksel ve mekanik özelliklerinde iyileştirme ve geliştirmeler yapılabilir.

Destek yapıları, parçanın geometrik yapısına bağlı olarak, parçanın geometrik yapısındaki çıkıntılarının, belirli bir eğimden itibaren (genellikle 30-45 derece) yer çekimi etkisi ile akmasını önleyen ve baskı sonrası sökülen geçici yapılardır. Dilimleyici yazılımlar sayesinde baskı sırasında kullanılan destek yapıları farklı şekillerde ve parametrelerde (standart, ağaç ve hibrit form vs.) ayarlanabilir. Buna ek olarak üretilen parçanın, tablaya tutunması için gerekli olan kenar yapılarının ayarlanmasında da dilimleyici yazılımlar kullanılır.

2.2.3 EYM’de Kullanılan Baskı Parametreleri

İmalat sektörü, bir nesnenin üretimini gerçekleştirirken maliyet açısından en avantajlı çözüme odaklanır. Bundan ötürü de farklı üretim parametrelerinde, en optimize şekilde üretim yapmak

önemlidir. Eklemeli imalat ve bunun altında EYM teknolojisinin en büyük getirilerinden birisi, bir nesneyi üretmek için yalnızca belirli bir şablona ya da tek bir parametreye bağlı kalmamaktadır. 3B baskı teknolojilerinin belirli kısıtlamalarına rağmen, takım ve kalıp değişimi gibi maliyetli yöntemlere gerek kalmadan, yalnızca dilimleyici yazılımlar üzerinde parametre değişiklikleri yaparak üretimi sağlamak, yöntemin en büyük avantajlarından biridir. Dilimleyici yazılımlar bu parametrelerin ayarlanabildiği bir dizi ayarı içlerinde barındırır. Bu parametrelerin kullanılarak, nihai ürünlerin yüzey kalitesi gibi estetik açıdan önemli unsurlarının korunması ve parçaların yapısal bütünlüğünün sağlanarak optimize bir ürün elde edilmesi, 3B baskı sürecinin en kritik aşamalarındandır.

Tasarım ve mühendislik esasları üretilecek parçaların sadece dış görünümünü referans almaz. Tüketiciler, üretilen parçaların estetik kaygıları güderken aynı zamanda mekanik dayanım performanslarının da uygun olmasını beklerler. Örneğin birçok statik ve dinamik yük altında kalan parçanın yorulma mukavemetinin iyi olması beklenir. Sürekli çekme kuvvetlerine maruz kalan parçaların ise çekme dayanımlarının yüksek olması beklenen özelliklerden birisidir. 3B yazıcılarda nesneler üretilirken kullanılan parametreler mekanik özelliklere oldukça etki ederler. Mekanik özelliklere etki eden parametrelerin bazıları şunlardır:

2.2.3.1 Katman Kalınlığı (Katman Yüksekliği)

Katman kalınlığı, üretim aşamasında parçanın Z eksenindeki hassasiyetini belirleyen önemli bir faktördür (Sevli 2021). Bu parametre üretilecek parçanın her bir katmanının kaç milimetre kalınlıkta olduğunu belirtir. Katman kalınlığı düştükçe parçanın yüzey kalitesi artar. Aynı zamanda mekanik özelliklerinde iyileşmeler gözlemlenir (Shergill et al. 2023). Fakat katman kalınlığının düşmesi ters orantılı olarak baskı süresini azaltır.

2.2.3.2 Doluluk Oranı (Dolgu Yoğunluğu)

3B yazıcılarda üretilen parçalar, dışarıdan bakıldığında tamamen dolu ve boşluksuz üç boyutlu nesneler gibi gözükse de aslında içleri boş, ya da belirli doluluk oranlarına sahip olabilir. Doluluk oranı parçanın iç kısmının, dış yüzeyden (duvarlardan) bağımsız olarak, sadece iç kısmının doluluğunu belirler. %0 doluluktaki parçaların içi boş iken %100 doluluk oranına sahip parçaların içi tamamen doludur. 3B yazıcılarda üretilmiş parçalardan enine ya da boyuna kesit alma durumunda bu yapılar makro boyutta görülebilmektedir. Doluluk oranı parametresi sayesinde fonksiyonel parçalara hafiflik katılabilir. Ayrıca gereken dayanımlar elde edildiği sürece hem aşırı malzeme kullanımından kaçınmak hem de parçaları hafifletmek adına, bu

parametreden yararlanılabilir. Doluluk oranı arttıkça parça basım süresi ve kullanılan malzeme oranı artar, ancak daha rijit ve dayanımlı nesneler elde edilebilir. Fakat bu durumda kullanılan parçaların ağırlaşması da büyük bir dezavantajdır (Kaptan and Kartal 2020).

2.2.3.3 Dolgu Deseni

3B yazıcılarda üretilen parçaların, iç yoğunluğunu arttırılabildiği gibi, aynı zamanda bu yoğunluğu sağlayan desenlerin de şekli değişebilmektedir. Parçanın oryantasyonuna uygun olarak, kullanım ihtiyacına yönelik birçok iç dolgu deseni geliştirilmiştir. Aynı malzemelerden ve aynı doluluk yüzdesi ile üretilmiş farklı desenli parçalar, malzemenin mekanik özelliklerini olumlu ve olumsuz olarak etkileyebilir (Birosz et al. 2022). Birçok dilimleyici yazılım içinde; ızgara, kübik, vb. dolgu desenlerini barındırır.

2.2.3.4 Duvar Sayısı ve Kalınlığı (Kabuk)

Bu parametre, üretilen parçanın iç dolgusunu çevreleyen, kabuk olarak da adlandırılan, dış duvar yapılarının sayısının belirlendiği parametrelerdir. Modelin dış kabuğunu oluştururken nozulun geçiş sayısına oranla artış gösterir. Buna bağlı olarak tek bir duvarın kalınlığı nozul çapına eşit olmalıdır. Duvar sayısının artımı, parçanın dış katmanlarını kalınlaştırıp, parçayı daha farklı bir forma sokacağı için parçanın çekme, eğme ve darbe dayanımı gibi özelliklerini etkiler (Nikiema et al. 2023). Fakat iyi bir baskı için dış duvar yapıları iç dolgulara nazaran yavaş basılması gerekmektedir. Bundan ötürü duvar sayısı arttıkça parça basım hızı yavaşlayabilir.

2.2.3.5 Üst/Alt Katman Sayısı

Parçanın en üst ve en alt katmanlarının belirlendiği parametrelerdir. Bu parametre sayesinde doluluk oranı %100'den düşük bir numunenin üst ve alt yüzeylerinin tamamen kapalı hale getirilmesi sağlanır. İstenilen sayıda ayarlanabilen bu parametre bir nevi parçanın üst ve alt kaplamalarıdır. Örneğin 50 katmandan oluşan ve doluluk oranı %50 olan bir numunenin üst ve alt katman sayısı 5 olarak belirlenmiş ise, 40 katmanda doluluk oranı %50 iken geri kalan 10 katmanda ise %100 olacaktır.

Evrendeki tüm maddelerin kendine özgü form değiştirme sıcaklıkları vardır. Buna bağlı olarak tüm malzemeler aynı sıcaklıkta eriyik hale gelemezler. 3B baskıda, malzemeyi kullanmak için ergimiş hale getirebilmemiz gereklidir. Tüm bunlar baz alındığında, tüm filamentler aynı sıcaklıklarda basılamaz. Ayrıca her malzeme ile aynı ortam koşullarında verimli bir baskı

gerçekleştirilemez. Bazı malzemeler daha yüksek sıcaklıklardaki tablaya tutunurken bazı malzemeler düşük sıcaklıkta tabladan kalkar ve baskının başarısız olmasına sebep olurlar. Bundan ötürü dilimleyici yazılımlar bünyelerinde bir dizi sıcaklık temelli parametre bulundururlar ve yazıcılar belirlenen bu sıcaklık değerlerinde çalışırlar.

2.2.3.6 Nozul Sıcaklığı

Malzemelerin viskoz özellikler kazanması için öncelikle camsı geçiş sıcaklığı, sonrasında ise ergime sıcaklığına ulaşması gerekmektedir. Bu parametre, baskıda kullanılacak malzemeleri eriyik hale getirmek amacıyla, ısıtıcı bloğun sıcaklığının belirlendiği parametredir. Nozul sıcaklıkları, kullanılacak malzemelere ve yazıcının ısıtma sıcaklığına göre değişiklik gösterebilir (Wang et al. 2025). Bunlara ek olarak baskının ilk katmanında nozul sıcaklığı 5-10 °C derece fazla tutularak, ilk katmandaki yapışma probleminin önüne geçilmesi sağlanır. Düşük nozul sıcaklıkları, nozulda tıkanmalara yol açabilir. Yüksek nozul sıcaklıkları ise kullanılan polimerlerin yapısal özelliklerini bozabilir ve buna ek olarak baskıda ipliklenme problemlerine yol açar. Bunları önlemek için filament üreticisi firmaların önerdiği aralıkta, bu parametreyi ayarlamak önemlidir.

2.2.3.7 Tabla Sıcaklığı ve Fan Hızı

Tabla sıcaklığı parametresi, baskının basıldığı alanın ısıtıldığı sıcaklıktır. Kullanılan filament çeşidine göre optimum parametrelerde ayarlanması gerekmektedir. Fan sıcaklığı ise, katmanları oluşturmak için uygulanan ekstrüzyon işlemi sırasında, parçanın eriyik olarak akan filamenti soğutmak ve biten katmanı katılaştırmak amacıyla, doğrudan hava akışı sağlayan fanların hızının ayarlandığı parametrelerdir. Her iki parametre de baskıda yapışma ve büzülmenin önüne geçmek için hassas bir şekilde ayarlanmalıdır.

2.2.3.8 Baskı Hızı

Baskı hızı parametresi, ekstrüzyon yapılırken, yani katmanlar oluşturulurken baskı kafasının bir saniye içinde milimetrik olarak yer değiştirmesini tanımlayan, bir diğer deyişle, yazıcı kafasının ne kadar hızla hareket ettiğini belirleyen parametredir. Kullanılan filament tipine ve yazıcı kabiliyetine göre bu parametre değişmektedir. Baskı hızının optimize bir şekilde kullanılması, baskı sırasındaki ekstrüzyon işleminin başarılı olması için oldukça önemlidir. Bunlara ek olarak; ilk katmanın, duvarların ve iç dolgunun baskı hızı ayrı olarak ayarlanabilmektedir. Baskı hızı parametresi, üretilen parçaların yüzey kalitesi ve mekanik özelliklerini etkiler (Loskot et al 2023).

2.2.3.9 Raster (Tarama) Açısı

Raster (tarama) açısı parametresi, EYM 3B yazıcılarda üretilen parçaların, her bir katman yapısının dış duvarları oluşturulduktan sonra, iç doluluğun sağlanması amacıyla nozulun izlediği yolun parça ve baskı tablasının eksenine göre yaptığı açıdır. Bu parametre eriyik haldeki filamentin hangi geometrik düzende serileceğini belirler. Üretilen parçalara uygulanacak yüklerin yönü ile raster açılarının doğrultusu arasındaki ilişki, yük taşıma kapasitesini değiştireceği için, parçaların mekanik özelliklerini ciddi bir şekilde etkiler (Dziewit el al. 2024).

2.3 EYM YÖNTEMİNDE KULLANILAN FİLAAMENTLER

Eriyik yığma modelleme metodunda 3B yazıcılar hammadde olarak filament olarak adlandırılan termoplastik malzemeleri kullanırlar. Kullanılacak filamentler uygulama alanına ve istenilen mekanik özelliklere göre farklılık arz ederler. Hem yazıcı teknolojilerinin gelişmesi hem de 3B baskının uygulama alanlarının genişlemesi sayesinde, ihtiyaç doğrultusunda birçok filament tipi üretilmiştir ve üretilmeye devam edilmektedir. Filamentler, ticari üreticiler tarafından ekstrüzyon yöntemi ile üretilirler, ardından birtakım işlemlerden geçerek makaraya sarılıp satışa sunulurlar. Kullanıcı gereksinimlerini karşılayacak filament tipi ve yazıcısının üretim kısıtlamalarına göre uygun bir filament tipini seçer. Üretilmiş tüm filament çeşitleri her yazıcıda basılamaz. Bunun başlıca nedenleri yazıcının ekstrüzyon yeteneği ve yazıcıların tasarım kısıtlamalarıdır. Örneğin, endüstriyel işlerde kullanılan, gelişmiş mühendislik malzemeleri için yazıcının baskı sırasında yüksek sıcaklara çıkması gerekmektedir. Aynı zamanda yazıcının kabin tipine bağlı olarak iç sıcaklık muhafazası gibi özellikler de filament ve yazıcı arasında seçim yapmada önem arz eder. Bunlara ek olarak, 3B yazıcılar farklı çaplardaki filamentlerde çalışmaktadır. Her 3B yazıcı, kendi ekstrüder mekanizmasına uygun çaptaki filamentleri kullanabilir. Sektörde en çok 1.75 ve 2.85 mm çaplarında filamentler kullanılmaktadır.

2.3.1 Geleneksel Filamentler

Geleneksel filamentler, genellikle tek bir termoplastik hammaddeden üretilmiş ve ev tipi 3B yazıcı kullanıcıları tarafından en çok kullanılan filamentlerdir. Bu filamentler, malzeme özellikleri ve renk tonları gibi açılardan oldukça çeşitlidirler.

2.3.1.1 Polilaktik Asit (PLA)

Laktik asitten üretilen bir polimer olan PLA malzemeler, şeker kamışı, mısır nişastası gibi yenilenebilir kaynaklardan üretilen ve diğer eklemeli imalat polimerlerine göre doğada daha çabuk parçalanabilen, biyouyumlu malzemelerdir. Ayrıca PLA malzemeler ekstrüde edilirken zehirli gazlar ortaya çıkarmazlar bu yüzden toksik değildirler. PLA filamentlerin erime noktaları diğer filamentlere göre düşüktür (150-180°C). PLA filamentlerin basımı kolaydır, hemen hemen her 3B yazıcıda basılabilir ve katmanlar arası iyi yapışma sağlar (Chan et al. 2025). Ayrıca baskı neticesinde iyi bir yüzey kalitesi sağlarlar. Bunlara ek olarak PLA filamentlere eklenen takviye malzemeleri ile daha mukavemetli PLA varyasyonları elde etmek mümkündür. Bu gibi avantajlarından ötürü PLA filamentler, ev tipi yazıcılarda en çok kullanılan filament çeşididir. Fakat kırılganlık, düşük esneklik, düşük ısıl dayanımları (Plamadiala et al. 2025) ve nispeten düşük UV dayanımı da PLA'nın dezavantajlı yönlerindendir. Bundan ötürü ileri derecede mekanik ve fiziksel dayanım istenen teknik işlerde PLA filamentler tercih edilmemektedir.

2.3.1.2 Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS)

ABS filamentler 3B baskıda popüler olarak kullanılan bir diğer filament çeşididir. Aşınmaya karşı direnç, tokluk ve darbe direnci gibi özellikleriyle ön plana çıkmaktadır. Ayrıca üretim maliyetlerinin düşük olması ve yüksek sıcaklık dayanımları gibi özellikleri ile de tercih sebebidirler. Ancak basılırken çıkardığı toksik gazlar, baskı sırasında uğradığı büzülme ve bunun sonucunda da tabladan kalkma problemi gibi basım zorluklarına sahiptir. Bu zorlukların önüne geçmek amacıyla, ABS malzeme kullanımında, kapalı kabin tipinde, iç sıcaklığı muhafaza eden yazıcılar tercih edilmelidir (Tao et al. 2025, Agrawal 2023).

2.3.1.3 Polietilen Tereftalat Glikol (PETG)

Polietilen Tereftalat (PET) malzemelere, glikol eklenerek üretilmiş bir filament türüdür. Basım kolaylığı, yüksek sıcaklık, tokluk ve darbe dayanımı PETG filamentleri, PLA ve ABS arasında iyi bir alternatif seçenek olarak öne çıkarır. Ayrıca, su ve nem gibi çevresel etkenlere karşı gösterdiği yüksek kimyasal direnç sayesinde, sıvı ile temas eden veya dış mekânda kullanılan parçalar için tercih edilebilir (Bolanakis et al. 2025). Ancak baskı sırasında ipliklenme ve baskı sonrası hafif büzülme gibi dezavantajlara sahiptirler.

2.3.1.4 Termoplastik Poliüretan (TPU)

TPU malzemeler, Termoplastik elastomer (TPE) ailesine ait bir polimer türüdür. TPU filamentler yüksek esneklik ve elastisitesi sayesinde, gerildiğinde uzayabilir ve eski haline tekrar dönebilir. TPU filamentler yapıları gereği esnek maddeler olduğundan, yüksek darbe dayanımı, kırılma ve çatlamaya karşı yüksek direnç gibi özellikler gösterirler. Ayrıca yüksek çekme mukavemetine sahiptirler. TPU bazlı malzemeler, baskılı katmanlar arasında güçlü ve dayanıklı bir yapışma sağlayan pürüzsüzlüğün yanı sıra büyük biyouyumluluk sunar. TPU filamentler farklı sertlik seviyelerine sahiptir ve Shore A sertlik ölçüm skalasında değerlendirirler. Bu sayede istenilen sertlik derecesinde TPU malzemeyi temin etmek mümkün kılınır. Fakat TPU malzemelerin esnek yapısı beraberinde baskı zorluklarını da getirmektedir. Bu yüzden TPU basılırken özellikle iki dişli yapının bir arada kullanıldığı ekstruderler tercih edilmektedir (de la Rosa et al. 2025, Sardinha et al. 2025).

2.3.2 Mühendislik Filamentleri ve Katkılı Filamentler

2.3.2.1 Akrilonitril Stiren Akrlat (ASA)

ASA malzemeler ABS ile benzer özellikler taşırlar fakat ABS'den farklı olarak, dış mekan koşullarına karşı yüksek dayanıklılığa sahiptir; dış mekanda parlaklığını, rengini ve mekanik özelliklerini korurlar. Özellikle dış mekan uygulamalarında UV dayanımı sayesinde ABS yerine kullanımı tercih edilmelidir (Rakshit et al. 2023).

2.3.2.2 Poliamid (PA/Nylon)

Nylon olarak da bilinen poliamid filamentler, PA6, PA12 ve PA66 gibi farklı varyasyonlara sahiptirler. Mekanik dayanımları ve yüksek kimyasal dirençleri sayesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. PA yüksek mukavemet, sertlik ve aşınma direncine sahiptir, böylece otomotiv ve elektronik sektörlerindeki yük taşıyan yapılar ve uygulamalar için ideal bir malzeme olarak tercih edilir. Öte yandan, PA termal kararlılık, düşük gözeneklilik ve üretim esnekliğinde mükemmeldir ve bu da havacılık ve biyomedikal alanlarında yaygın olarak kullanılmasını sağlar. Fakat higroskopik yapıları yüzünden, PA filamentler kullanılırken nemden uzak bir şekilde muhafaza edilmesi gerekmektedir (Kohutiar et al. 2025).

2.3.2.3 Polipropilen (PP)

Polipropilen malzemeler hafiflik, esneklik ve yüksek kimyasal direnç gibi üstün özellikleri sayesinde, prototiplemeden otomotiv ve havacılık gibi hafiflik ve dayanım gerektiren yerlerde

yaygınca kullanılır (Hossain et al. 2024, Avcı vd. 2019). PP filamentler özellikle EYM teknolojisinde tercih edilen bir malzemedir. Ancak saf PP'nin yarı kristal yapısından kaynaklanan yüksek hacimsel büzülme oranı ve katmanlar arası zayıf yapışma eğilimi, malzemenin 3B baskıda kullanımını, olumsuz etkileyerek doğrudan kullanımını zorlaştırır. Bu kısıtlamaları aşmak ve PP'yi 3B baskıya uygun hale getirmek amacıyla malzeme, genellikle cam elyafı gibi dolgu maddeleriyle güçlendirilir (Penumakala et al. 2020).

2.3.3 Kompozit Filamentler

Kompozit filamentler, geleneksel olarak kullanılan filamentlerin özelliklerini güçlendirmek amacı ile, polimer matrisine karbon fiber, cam fiber, metal, seramik, doğal lifler veya nanoparçacıklar gibi takviye malzemeleri eklenerek üretilir (Kaptan and Kartal 2024). Bu takviyeler, saf polimerlere kıyasla baskı parçalarının mekanik dayanımını, sertliğini, tokluğunu, termal ve elektriksel iletkenlik gibi özelliklerini de artırır. Ayrıca kompozit filamentler, üretilen parçalara estetik iyileştirmeler ve boyutsal kararlılık gibi avantajlar sağlamaktadır (Kantaros et al. 2023). Yaygınca kullanılan kompozit filament yapıları;

2.3.3.1 Karbon Fiber (CF) Katkılı Filamentler

Karbon fiber katkılı filamentler, polimer matris (genellikle PLA, PETG, PA veya ABS) içerisine kısa veya sürekli karbon fiberlerin eklenmesiyle elde edilir ve özellikle yüksek mukavemet ve düşük ağırlık oranı gerektiren uygulamalar için ideal yapılardır (Dickson et al. 2020). Filamentlere eklenen karbon fiber, parçaların çekme dayanımını ve sertliğini önemli ölçüde artırırken, termal genleşmeyi azaltarak baskı sırasındaki bükülme sorunlarını da azaltır. Özellikle hafiflik ve dayanım avantajları sayesinde, motor parçaları, otomotiv, havacılık bileşenleri gibi alanlarda, EYM ile üretilen parçalarda iyi alternatiflerdir (Kantaros et al. 2025). Eklenen sürekli ve kısa karbonfiberler, parçaların yük taşıma kapasitelerini yüksek seviyelere taşır. Ancak katkı malzemelerin aşındırıcı etkilerine karşın, üretim aşamasında geleneksel filamentlerin basıldığı nozullardansa sertleştirilmiş çelik nozul gibi farklı uçların kullanıldığı nozullar tercih edilmelidir. Buna ek olarak karbon fiber dağılımlarının eşit olmadığı durumlarda, basılan nesnelerin iç yapılarında boşluklara yol açması bir takım negatif etkilere yol açabilir (Dey et al. 2021). Genellikle bu tipteki filamentler, kullanılan matris filamentin sonuna CF eki eklenerek isimlendirirler. Ayrıca bazı üreticiler, bu yapıdaki filamentleri isimlendirirken, sonuna rakamlar ekleyerek kompozit filamentin yapısında bulunan karbonfiber yüzdesini belirtirler. BASF firmasının ürettiği PAHT-CF15 filamenti buna bir örnektir.

2.3.3.2 Cam Fiber (GF) Katkılı Filamentler

Karbonfiber katkılı filamentler gibi, geleneksel filamentlere belirli oranlarda cam fiberin (cam elyaf) eklenmesi ile üretilen bu filamentler, yüksek mekanik dayanım gibi özellikleri sayesinde otomotiv, havacılık ve elektronik gibi endüstriyel parça üretimi yapılan alanlarda kullanılmaktadır. Cam fiber katkısı parçaların elektriksel yalıtkanlık ve darbe direnci gibi özelliklerini geliştirmektedir. PP gibi mühendislik filamentlerine eklenen cam fiber katkısı, malzemenin bükülmeye karşı gösterdiği direnci artırır. Ancak cam fiber katkılı filamentler ile çalışılırken, parametrelere bağlı delaminasyon faktörü gibi özellikler dikkate alınmalıdır (Kantaros et al. 2023, Anaç vd. 2025).

2.3.3.3 Ahşap Katkılı Filamentler

Ahşap katkılı filamentler, genellikle PLA matrisine ahşap tozu veya liflerinin karıştırılmasıyla üretilir ve parçalara gerçek ahşap benzeri bir görüntü kazandırarak, üretilen numuneleri estetik olarak etkiler (Kantaros et al. 2023). Bu filamentler daha çok mimari model, sanatsal objeler ve dekoratif ürünlerde kullanılır. Mekanik açıdan bakıldığında, ahşap partiküllerinin polimer bağları kesintiye uğrattığı için genellikle saf PLA'ya göre daha düşük mekanik dayanım sergiler. Ancak düşük oranda katkı mekanik özellikleri iyileştirebilir (Kariz et al. 2018).

2.3.3.4 Metal Katkılı Filamentler

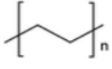
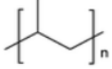
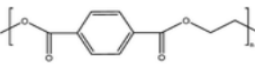
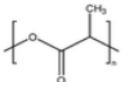
Metal katkılı filamentler, bakır, bronz, paslanmaz çelik türleri gibi ince metal tozlarının polimer matrisine, belirli oranlarda eklenmesi ile üretilir. Bu filamentler parçalara metalik bir görünüm, ağırlık, belirli oranlarda termal ve elektriksel iletkenlik kazandırır. Ancak takviye olarak eklenen metal tozunun, parçaların polimerlerin iç yapısında boşluklara yol açarak katmanların birbirine yapışma davranışını etkiler, bu da genellikle üretilen parçaların mekanik dayanımlarında düşümlere yola açabilir. (Er ve Aydın 2024, Jiang and Ning 2020).

2.3.3.5 Nanoparçacık Katkılı Filamentler

Grafen, silika, karbon nanotüp gibi nanomalzemelerin geleneksel filamentlere eklenmesi ile geliştirilmiş filament çeşitleridir. Nanoparçacıkların polimer matrisi içerisinde homojen bir şekilde dağılması ile, bu parçacıklar tarafından sağlanan üstün özellikleri, nihai ürünün mekanik özelliklerini, termal kararlılıklarını ve elektriksel iletkenliğini olumlu olarak etkilerler. Bu filamentler elektronik parça üretimi, sensörler, giyilebilir teknolojiler ve biyomedikal teknolojileri gibi alanlarda kullanılır (Silva et al. 2021, Lepak-Kuc et al. 2024, Bertašius et al. 2023).

2.4 POLİMERLERDE YAŞLANMA

Polimerler, monomer olarak isimlendirilen birçok küçük molekülün kimyasal bağlar ile, tekrarlı olarak birleşmesiyle oluşan kimyasal bileşiklerdir (Şekil 2.8). Hafiflik, düşük yoğunluk, korozyona karşı direnç, iyi işlenebilme kapasitesi, elektriksel ve termal yatkınlık gibi avantajlarının yanı sıra üretim kolaylığı gibi özellikleri sayesinde endüstride yaygınca kullanılmaktadır. Polimerlerin, kullanım alanlarına göre birçok çeşidi bulunmaktadır. Ancak bu kullanım alanlarına istinaden polimerlerin dezavantajları da göz önünde bulundurulmalı ve kullanım alanları, kullanılacak malzemenin işlevselliğine göre seçilmelidir (Khah ve Soleimani 2023, Romero et al. 2020, Yoruç ve Uğraşkan 2017).

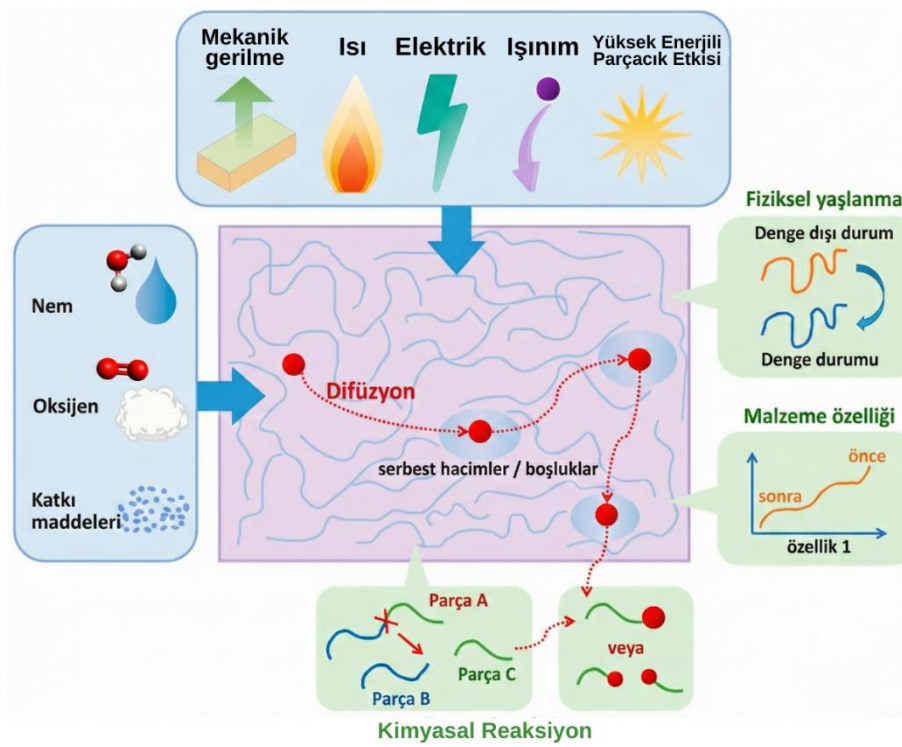
Kısaltma	Malzeme	Kimyasal yapı
LDPE	Düşük yoğunluklu polietilen	
PP	Polipropilen	
PS	Polistiren	
PET	Polietilen tereftalat	
PLA	Polilaktik asit	

Şekil 2.8 Yaygın kullanılan polimer çeşitleri ve kimyasal yapıları (Hoseini et al. 2023).

Polimerler, camsı geçiş sıcaklığı (T_g) veya ergime sıcaklığı (T_m)'nin üzerinde sıcaklıklara maruz kaldıklarında, rijit yapıları bozulup, zincir ve moleküler bağlar koparak parçaların mekanik dayanımları azalmaktadır. Ayrıca polimerler kullanım ömürleri boyunca çeşitli çevresel faktörlere maruz kalabilmektedir. Polimerler; ısı, oksijen, nem, güneş ışığı (UV ışınımı), gibi çevresel faktörlerden olumsuz olarak etkilenmektedir. Buna ek olarak polimerler, kimyasallar ve mekanik stres faktörleri karşısında, metal ve seramiklere nazaran daha düşük dayanım sergilerler. Bu tip olumsuz etkiler altında sürekli kalan polimerler zamanla morfolojik olarak bozunmalara uğrarlar. Ayrıca polimerler sürekli olarak; nem, kimyasal, ortam, belirli dalga boyutlarında ışık ve sıcaklık etkisi altında kaldıklarında, iç yapıda meydana gelen bozunmalar sonucunda sahip olduğu özelliklerin kaybına uğrar. Buna benzer bozunmalar, özellik kayıpları ve polimerleri hem kimyasal hem fiziksel olarak yıpranmaya uğratan etkiye,

polimerlerin yaşlanması denir (Nzimande et al. 2024, Zhang et al. 2023, Pickett et al. 2019). Şekil 2.9’da polimer malzemelerin yaşlanma mekanizmalarına ait bir şematik çizim verilmiştir.

Polimerlerin yaşlanması, zamanla çevresel ve fiziksel etkiler sonucunda malzemenin kimyasal yapısında ve mekanik özelliklerinde meydana gelen kalıcı değişimleri ifade eder. Yaşlanmanın polimerler üzerinde; makro boyutta renk solması, yüzey çatlakları ve parlaklık yitirme gibi etkileri vardır. Mikro boyutta ise, zincir kopmaları, çapraz bağlardaki bozulmalar ve oksidatif bozulmalar gibi etkileri vardır. Polimer yaşlanması, dayanıklı yapılar üretmek ve malzemenin fonksiyonel ömrünü belirlemek için oldukça önemlidir. Polimerlerin yaşlanması genel olarak fiziksel ve kimyasal olmak üzere iki temel başlıkta incelenebilir (Nzimande et al. 2024, White 2006).



Şekil 2.9 Yaşlanma mekanizmalarına genel bir bakış (Zhang et al. 2023).

2.4.1 Fiziksel Yaşlanma

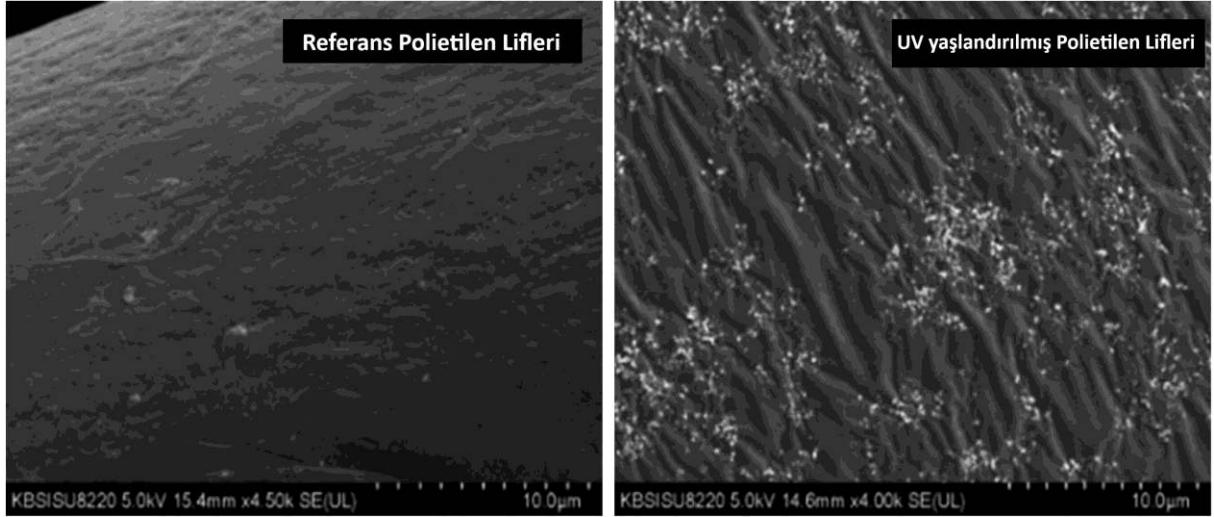
Fiziksel yaşlanma, polimerlerin kimyasal yapısında herhangi bir değişiklik ya da kimyasal reaksiyon meydana gelmeden oluşan yaşlanma çeşididir. Fiziksel yaşlanma genellikle polimerin termal olarak yaşadığı değişimler sonucu meydana gelir. Polimerler camsı geçiş sıcaklığının (T_g) altında ya da üstündeyken ani ısı değişimlerinde fiziksel yaşlanmaya uğrarlar. Polimer zincirleri serbest hacimlerinde denge durumundayken, hızlı soğutma etkisi altında

serbest hacimlerinde değişimler olur. Hacimsel gevşemeye uğrayan polimer malzemeler daha sert ve gevrek özellik kazanırlar. Mekanik özellikleri değişen malzemelerin çatlama eğilimleri artar. Ayrıca ikincil kristallenme adı verilen, farklı kristal bölgelerin oluşumlarında da tetikleyici faktör olabilir. Bu gibi nedenlerden ötürü, hem yapısal hem de mekanik olarak parça yeniden düzenlenmiş olur. Sıcaklığın artması da düşmesi kadar bu faktörü etkiler (Zhang et al. 2023, White 2006).

2.4.2 Kimyasal Yaşlanma

Kimyasal yaşlanma, polimerin moleküler yapısını değiştiren, malzemenin kimyasal yapısında geri dönülemez değişimlerin meydana geldiği sürece verilen isimdir. Polimer bağlarının kopması veya çapraz bağların oluşması gibi kimyasal reaksiyonları kapsar. Kimyasal yaşlanma sonucu polimerlerin zincir yapıları değiştireceğinden, malzemeler gevrek hale gelmekte, böylece malzemeler tokluğunu ve esnek yapılarını yitirerek, daha kırılgan bir performans göstermektedir. Malzemelerin kimyasal olarak yaşlanması için, çevresel etkenler altında bazı bozunmaların meydana gelmesi gerekmektedir. Yüksek sıcaklıkların neden olduğu kimyasal reaksiyonlar malzemeyi işlevsiz hale getirebilir. Ergime sıcaklığı (T_g) üzerindeki sıcaklıklarda kullanılan polimerler tipine göre, malzeme tekrardan şekil alabilir veya yanarak kullanılmaz hale gelebilir. Ayrıca yüksek sıcaklıkların neden olduğu kimyasal reaksiyonlar polimer zincirlerini kırarak termal bozunmalara yol açar. Polimerler, oksijenle tepkimeye girerek oksidadif bozunmalara da uğrayabilir. Bunlara ek olarak, özellikle higroskopik karakterdeki polimerler, su veya nem ortamında bağlarında oluşan hidroliz tepkimeleri ile hidrolitik bozunmalara uğrayabilirler (Zhang et al. 2023, White 2006, Liu et al. 2024).

Kimyasal yaşlanmaya yol açan en önemli faktörlerden birisi de UV ışınımı etkisidir. Doğal koşullarda güneş gibi çevresel etkenler sayesinde UV ışınımına maruz kalan polimerler, fotokimyasal bozunmalara yol açar (Şekil 2.10). Genellikle foto-oksidasyon olarak adlandırılan bu süreç, dış mekânda kullanılan polimerlerin yaşlanmasının temel sebebidir. Enerjisi yüksek UV ışınımı, polimer zincirlerindeki kimyasal bağları parçalayabilir. Güneşten yayılan UV-B ve UV-C ışınlarının büyük bir kısmı ozon tabakası tarafından engellenir. Fakat 315-400 nm dalga boyu aralığındaki UV-A ışınimleri, yerküre üzerindeki en fazla miktardaki ışınım türüdür; bu ışınlar polimerler üzerinde etkiler oluşturur ve polimer zincirleri tarafından absorbe edilir ise oksijenin etkisi ile birlikte foto-oksidatif yaşlanmaya sebep olur (Pickett et al. 2019, Mendes et al. 2025).



şekil 2.10 Kimyasal yaşlanmanın Polietilen (PE) numunelerin yüzeyi üzerindeki etkisi (Zambrano et al. 2023).

Özetlemek gerekirse kimyasal yaşlanmalar sonucu malzemelerin, iç yapı ve morfolojilerinin değişmesinden ötürü; malzeme sertliği, gevrekliği, çekme, eğme ve basma mukavemetinin değişmesi gibi mekanik özellikler üzerinde birtakım değişiklikler meydana gelmektedir. Bunlara ek olarak malzemeler, yüzey görünümündeki değişikler, renk değişimi ve çatlak oluşumu gibi fiziksel olarak da bazı etkilere uğrayabilir.

2.4.3 Yaşlandırma Testleri ve Hızlandırılmış Yaşlandırma

Yaşlandırma testleri malzemenin dış ortama karşı dayanım ve kararlılıklarını belirlemek amacıyla gerçekteşirilen deneysel uygulamalardır. Bu testler, kullanım alanına veya hedeflenen çevresel koşullara bağlı olarak doğal bir şekilde, açık havada yapılabilir. Doğal yaşlandırma testleri ile malzemenin çevresel faktörlere karşı direnci çok başarılı şekilde hesaplanır. Ancak bu yöntem, bozunma süreçlerinin uzun zaman dilimlerine yayılması, gerçekte hava koşullarının düzenli biçimde tekrarlanamaması ve bölgesel değişkenlerin etkisi gibi büyük dezavantajlarla sahiptir. Ayrıca sıcaklık, nem, güneşlenme süresi veya yağış gibi değişkenlerin sürekli farklılık göstermesi, testlerin standartlaştırılmasını ve tekrarlanabilirliğini zorlaştırır. Nitekim tabiatın yasalarını tamamen kontrol etmek mümkün değildir. Gelişen endüstrinin rekabetçi kültürü ve yeni ürün geliştirmek için daha hızlı davranma gerekliliği gibi etmenler, ayrıca örnekler üzerinden mukayese edilecek verilerin tam anlamıyla bir standarda uygun hale sokulamamasından ötürü doğal yaşlandırma her ne kadar doğru bir yöntem olsa da günümüzde sanayide pek tercih edilmemektedir (Pickett et al. 2019, Al-Salem et al. 2015).

Bilim ve endüstrideki ilerlemeler sonucunda, insanlık tam manası ile doğaya müdahil olamasa da doğa olaylarını, laboratuvar ortamında simüle edebilen sistemleri geliştirmiştir. Bu gelişmeler, malzemelerin ömür tayini için kullanılan hızlandırılmış yaşlandırma kabinlerini, endüstri standardı hale getirmiştir. Hızlandırılmış yaşlandırma testleri, malzemenin uzun vadeli performanslarını, kısa sürede tahmin etmek amacıyla yapılan bir işlemdir. Bu testlerde, malzemeye UV ışınımı, sıcaklık ve nem faktörleri belirli döngüler halinde uygulanarak, çevresel etkenler ile laboratuvar ortamında malzemelere doğal ortam etkisi oluşturur. Hızlandırılmış yaşlandırma kabinleri (Şekil 2.11), ortalama dış ortam koşullarına kıyasla daha yüksek ışıyım şiddeti ve sıcaklık değerleri ile malzemeleri etkiler. Bu sayede, doğal ortamda aylar veya yıllar sürebilecek bozunmalar, birkaç gün veya hafta içinde gözlemlenebilir hale gelir. Kabinler, test standardına uygun olarak UV-A, UV-B, UV-C ve ksenon ark lambaları ile donatılabilir. UVA-340 lambaları, 295–365 nm aralığındaki dalga boylarını taklit ederek güneş ışığının kısa dalga kısmını en doğru biçimde simüle ederken, UV-B lambaları daha şiddetli foto-oksidatif etki yaratır (Al-Salem et al. 2015, Chávez-Montes et al. 2015). Test sonrasında, malzemelerde meydana gelen, moleküler ağırlıkta azalmalar, mekanik özellik değişimleri, renk değişimleri ve yüzey aşınması gibi etkiler incelenir. Bu değişimler sayesinde yaşlandırma işleminin malzeme üzerindeki etkisinin değerlendirmelerin yapılması sağlanır. Özetle, hızlandırılmış yaşlandırma testleri, malzemelerin kullanım ömrünün hesaplanabilmesi sayesinde hem tasarım açısından hem güvenlik açısından kritik bir işlemdir (Al-Salem et al. 2015, Chávez-Montes et al. 2015, González-López et al. 2020).



Şekil 2.11 Hızlandırılmış yaşlandırma kabini ve UV lambalar (Shi et al. 2022).

BÖLÜM 3

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1 EYM YÖNTEMİNDE KULLANILAN POLİMER MALZEMELERİN YAŞLANDIRILMASI

Son yıllarda, EYM yönteminde kullanılan termoplastik polimer malzemelerin çevresel koşullar altındaki performansı, araştırmacıların önem verdiği konu başlıklarından biri haline gelmiştir. Özellikle farklı çeşit UV lambalar kullanılarak, ultraviyole ışınımı altında yapılan yaşlandırma işleminin; malzemelerin çekme, eğme ve darbe dayanımı gibi mekanik özelliklere etkisi ilgi çeken bir çalışma alanıdır. Bunlara ek olarak polimer malzemeler için kritik sıcaklık eşiklerinde (camsı geçiş, ergime vs.) gözlemlenen, yapısal bozunmalar, optik özelliklerdeki değişimler gibi etkiler de, literatürdeki çalışmaların temel konularındandır. Bazı çalışmalarda farklı polimerlerin bir arada kullanılması, kaplama işlemi yapılması veya polimerlerin içine birtakım takviyeler ekleyerek oluşturulan kompozit polimerler sayesinde bu değişimlerin nasıl gerçekleştiği incelenmiştir. Fakat spesifik olarak EYM yöntemi ile çalışan 3B yazıcılarda farklı malzemelerin bir arada kullanıldığı ve farklı doluluk oranı kombinasyonlarına sahip yapıların UV yaşlandırma sonrası mekanik davranışlarını inceleyen çalışmalara rastlanmamıştır. Bununla birlikte daha önce yapılmış çalışmalar birçok açıdan bu çalışmaya ışık tutmaktadır. Literatür incelendiğinde;

Alfaro vd. (2022a) çalışmalarında, farklı çevresel koşullar altında yaşlandırmanın EYM yöntemi ile üretilmiş üç boyutlu iskele yapıları üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Çalışmada kullanılan PLA numuneler, Minibot 130 model 3B yazıcı kullanılarak, %25 dolulukta üretilmiştir. Ardından numuneler iki farklı metodoloji izlenerek yaşlandırma testlerine maruz bırakılmıştır. Bu metodlardan ilki, mikroişlemci kontrollü kurutma fırını kullanılarak, ASTM F1980 standardına uygun, 35 °C ve 45 °C sıcaklık altında, yalnızca sıcaklık etkisi altında yapılan bir yaşlandırma testidir. Diğer test ise, ASTM G154 standartlarında, UV ışınımı, sıcaklık ve nem döngüleri altında yaşlandırma işlemine tabi tutulması ile gerçekleştirmiştir. UV ışınımının kullanıldığı testler UVA/UVB yaşlandırma kabini

kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 60 °C ortam sıcaklığında, 0.89 W/m² ışıınım şiddetine sahip UV-A ışığı yayan lambalar ile yaşlandırılan numuneler, toplam 24, 96, 168, 240 ve 336 saatlik döngülerde işleme maruz bırakılmıştır. Testler sonrası, yaşlandırmaya tabi tutulan tüm numuneler; renkli görsel analiz, diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), X-ışını difraktometresi (XRD), fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) metotları kullanılarak incelenmiştir. Sonuç olarak yalnızca 35°C kullanılan testler ve UV ışıınım testlerinde bozunmanın ağırlıklı olarak numunelerin amorf kısımlarında başladığı ve o kısımda kaldığı, 45°C’de ise polimerin kristal kısımlarını da etkilendiği gözlemlenmiştir. Döngüsel olarak yapılan UV yaşlandırma tesirindeki numunelerin FTIR analizi sonucunda, fotoliz ve hidroliz yoluyla zincir kırılmalarının yoğunlaştığını gösteren değişiklikler meydana gelmiştir. Ayrıca, 336 saatlik UV maruziyeti sonrası parça yüzeylerinde mikro çatlaklar, matlaşma ve sararmalar gözlemlenmiştir (Alfaro et al. 2022a).

Alfaro vd. (2022b) yaptığı bir diğer çalışmada da hızlandırılmış yaşlandırma yönetimini kullanarak, 3B baskı ile üretilmiş PLA iskelelerin raf ömrünü tespit etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında EYM yöntemi ile üretilmiş numuneler iki farklı yaşlandırma çeşidine tabi tutulmuştur. Bir önceki çalışmalarına ek olarak, yalnızca sıcaklık etkisi altındaki yaşlandırma 25 °C sıcaklık parametresini de dahil etmişlerdir. Fakat bu çalışma kapsamında mekanik davranışları ISO/TS 13498 standardına göre maksimum tork dayanımı üzerinden değerlendirmişlerdir. ASTM G154’e göre bulundukları konum üzerinden yapılan hesaplamalar sonucunda, 45 °C ortam sıcaklığında 456 saatlik bir yaşlandırma testi, 171 günlük doğal yaşlanmaya, 168 saatlik yaşlandırma da 38 saat doğal yaşlanmaya denk gelmiştir. Deneysel süreçler ardından, PLA’dan üretilmiş iskele yapılarının raf ömrünün yaklaşık olarak 150 güne (5 ay) denk geldiği söylenmektedir. Ayrıca bu yapıların optimum olarak 25 °C sıcaklıkta ve %70 bağıl nemin altında güneş ışığından uzak bir şekilde saklanması gerektiğini önermişlerdir (Alfaro et al. 2022b).

Koçar ve çalışma arkadaşları (2024), EYM tipi 3B yazıcılarda üretilmiş farklı renklerde (sarı, turuncu, kırmızı) ve farklı doluluk oranlarında (%20, %60, %100) numunelerin, hızlandırılmış yaşlandırma sonrası mekanik özellik ve optik özellik değişimini incelemişlerdir. Q-Lab QUV cihazı kullanılarak, ISO 4892-3 standartlarında ve 432 saat sürede yaşlandırılan numuneler, bu işlem sonrasında çekme, üç nokta eğme, sertlik ve renk ölçüm testlerine tabi tutulmuşlardır. Yapılan testler sonucunda %100 doluluktaki kırmızı numunelerin çekme dayanımları yaklaşık %21 azalmıştır. %100 doluluk oranındaki sarı numunelerde ise çekme dayanımı %7 oranında artış göstermiştir. Numunelerin eğme kuvvetleri ise yaşlandırma sonrası artış

göstermiştir. Genel olarak, yaşlandırma sonrasında mekanik özelliklerde en kararlı davranışı turuncu renkli numuneler sergilemiştir. Araştırmacılar bu farklılığın temel nedenini, filamentler içinde bulunan renk pigmentlerinin, UV emilim özelliklerinin farkına dayandırmaktadır. Örneğin, kırmızı pigmentler UV-B dalga boylarını güçlü şekilde absorbe ederek, polimerlerin iç yapılarını değiştiren reaksiyonları hızlandırmakta, sarı renkli pigmentler ise daha çok yansıtıcı görevi görüp, UV emilimini düşürmektedir. Ayrıca doluluk oranı arttıkça, iç yapının degradasyona karşı koruyucu bir bariyer etkisi oluşturduğu, böylelikle yaşlandırmanın olumsuz etkilerinin azaldığı da çalışmanın sonucunda ifade edilmektedir (Koçar et al. 2024).

Kaynak ve Sarı (2016) çalışmasında, katkısız PLA ve kütle olarak %1 oranında montmorillonit (Mt) katkılı PLA nanokompozitlerin hızlandırılmış yaşlandırılma koşulları altında davranışlarını incelemiştir. Çalışmada kullanılan nanokompozit, çift vidalı ekstrüzyon ile eriyik karıştırma ve enjeksiyon kalıplama prosesleri uygulanarak üretilmiştir. Üretilen numunelerin yaşlandırılması, 50 °C ortam sıcaklığında, 200 saat boyunca, ISO 4892-3 C çevirimi ve ASTM G154-05 standartlarına uygun olarak, 310 nm dalga boyu ve 0.49 W/m² ışınım altında UV-B tipi lambalar kullanarak gerçekleştirilmiştir. Üretilen numuneler kullanılarak eğme (ISO 178), çekme (ISO 527-2) ve kırılma tokluğu (ISO 13586) testleri yapılarak mekanik özellikler belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda kütlece %1 Mt katkılı numunelerin mekanik özelliklerinin daha iyi değerlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca katkılı PLA'nın UV, nem ve ısıya karşı dayanımı belirgin ölçüde artmıştır. Bunlara ek olarak taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelendiğinde; saf PLA'da mikro çatlaklar ve boşluklar oluşurken, katkılı PLA numunelerin yüzeyleri daha az çatlaklı ve bütün yapıda kaldığı görülmüştür. Katkılı PLA'da gözlemlenen bu iyileşmelerin temel sebebinin, nano takviyenin sağladığı bariyer etkisi sayesinde fotodegradasyon ve nem etkisi altında yaşanan hidroliz süreçlerin gecikmesi olduğu, yazarlar tarafından açıklanmaktadır. Böylelikle PLA malzemelere eklenen katkı maddesine bağlı olarak yaşlandırma dayanımının artabileceği ve malzemelerin iç ve dış ortamda kullanımına yönelik bir iyileştirme yaşanacağı söylenebilir (Kaynak and Sarı 2016).

Lv vd. (2018) çalışmalarında nişasta ve odun unu katkısının, PLA malzemelerin yaşlanma performansına etkisini incelemiştir. PLA (306DX) matrisine nişasta ve odun unu eklenerek üretilen numuneler, Q-Panel UV sisteminde ASTM G154-06 standardına uygun olarak, dalga boyu 340 nanometre ve yayılım oranı 0.89 W/m² olan UVA-340 lambalar kullanılarak hızlandırılmış yaşlanma testine tabi tutulmuştur. Numunelere döngüsel olarak, 60 °C sıcaklıkta 8 saat UV ışık, ardından 50 °C sıcaklıkta 4 saat yoğunlaşma ile toplam 300,600,900 ve 1200 saat yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. ASTM D638 standartlarında çekme testine tabi tutulan

numunelerde yaşlanma etkisi ile, çekme mukavemetlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Özellikle katkısız PLA numunelerin 1200 saatlik yaşlandırılması sonrası çekme mukavemetlerinde %55 oranında düşüş meydana gelmiştir. Mekanik özellikleri değişimi açısından, çekme mukavemetindeki %29 azalma oranıyla en iyi performansı odun unu katkılı numuneler göstermiştir. Elde edilen sonuçlar, dış mekân uygulamaları için daha fazla dayanıklı ve sürdürülebilir PLA bazlı malzemeler tasarlamak için bir fikir vermektedir (Lv et al. 2018).

Islam, vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada, film istifleme yöntemi ile üretilmiş, %30 oranında elyaf takviyesi içeren PLA kompozitlerin hızlandırılmış yaşlandırma koşulları altındaki mekanik davranışları incelenmiştir. PLA malzemeye takviye olarak, işlem görmemiş kenevir elyafı (AUL) ve alkali işlem görmüş kenevir elyafı (AAL) eklenmiştir. Numuneler ASTM G154-00a standardına göre QUV/Spray cihazı kullanılarak, 340 nm dalga boyu ve 0.68 W/m² ışınım şiddetinde UV-A lambalarla yaşlandırılmıştır. Yaşlandırma işlemi 50 °C ortam sıcaklığında; 1 saat UV ışınımı, 1 dakika su spreyi, 2 saat yoğuşma döngüsüyle gerçekleştirilmiştir. Numuneler, yaşlanma süresi farkının etkisini ölçmek amacıyla 250, 500, 750, 1000 saat süre ile yaşlandırılmıştır. Çalışmada mekanik davranışların tespiti amacıyla, sırasıyla ASTM D638, ASTM D790, ISO179 ve ASTM D5045 standartlarında; çekme, üç nokta eğme, darbe ve tokluk testleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda, alkali işlem görmüş kenevir takviyeli PLA kompozitlerin (AAL), işlem görmeyen kompozitlere nazaran daha yüksek yaşlanma direnci gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca işlemsiz numunelerde ultraviyole ve nem etkisiyle liflerin dışarı çıkması ve yüzey bozulmaları daha belirgin olarak meydana gelmiştir. Çalışmanın yürütücüleri, alkali işlem sayesinde hidrofil grupların giderilerek malzeme yapısındaki bağların güçlendiğini ve UV ışınımının malzemeye nüfuz etkisinin azalma sağladığını belirtmişlerdir (Islam et al. 2010).

Mihut ve arkadaşları (2022), 3B baskı ile üretilen polimerler de elektriksel iletkenlik oluşturma ve üretilen parçaların çevresel faktörlere dayanımı arttırmak amacı ile metalik kaplama uygulamasını araştırmışlardır. Çalışmada ABS ve PLA filamentler kullanılarak ASTM D790 standartlarında 3 nokta eğme test numuneleri üretilmiştir. Bu numunelerin bir kısmı gümüş ve bakır kullanılarak kaplanmış, diğer kısmı ise kontrol numunesi olarak hiçbir kaplama işlemine tabi tutulmamıştır. Tüm numuneler ASTM G154 standardına uygun olarak, Q-Lab QUV hızlandırılmış test cihazında; 300,600 ve 1200 saatlik sürelerde yaşlandırılmıştır. Yaşlandırma sonrası, kontrol numuneleri ile üç nokta eğme testi işlemine geçilmiştir. Bu test sonucunda, kaplamasız ABS numunelerin 1200 saat yaşlanması sonrası eğme dayanımları %59 oranında düşmüştür. Ayrıca PLA numunelerin kaplamaları delaminasyona uğramıştır. Taramalı elektron

mikroskobu incelemeleri sonucunda, kaplamasız yüzeylerde mikro çatlak oluşumu gözlemlenmiş, kaplamalı yüzeylerde ise bu deformasyonlara rastlanmamıştır. Kısacası, 3B yazıcı ile üretilmiş numunelerin dış yüzeylerini metal malzemeler ile kaplamak, parçalara elektriksel iletkenliğin yanı sıra mekanik olarak da dayanım kazandırmaktadır. Böylelikle parçalar dış ortam kullanımı için daha uygun hale gelmektedir (Mihut et al. 2022).

Amza vd. (2021a) çalışmalarında, EYM ile üretilmiş polimer parçaların sterilizasyonu amaçlı, UV-C ışık kaynaklarının kullanılması sonucu oluşabilecek potansiyel yaşlanma durumunu araştırmak amacıyla, UV-C ışınımına maruz kalan numuneler üzerinde görülen mekanik özellik değişimini incelemişlerdir. Çalışmalarında 3B yazıcılarda yaygın kullanılan PLA ve PETG filamentleri kullanmışlardır. 3B baskı işlemi sonrası numuneler, kontrol grubu ve UV-C ışınımına maruz bırakılacak grup olarak ikiye ayrılmıştır. Numunelerin bir kısmı, ISO 4892-1:2016 standardına uygun olarak BS-02 model yaşlandırma kabininde, 254 nm dalga boyu ve 50 °C sıcaklık parametrelerinde 24 saat UV-C ışınımına maruz bırakılmıştır. Ardından tüm numuneler mekanik özelliklerin tespiti amacıyla, çekme, basma ve sürünme testleri kapsamında incelenmiştir. Ayrıca taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemesiyle mikro boyutta yapısal değişiklikler de gözlemlenmiştir. Yapılan bu testler sonucunda, UV-C'ye maruz kalan PLA numunelerin çekme mukavemetinde yaklaşık %9, PETG numunelerde ise %38 oranında kayıp gözlemlenmiştir. Numunelerin basma mukavemetleri ise PLA'da %13, PETG'de %34 civarında düşüşle sonuçlanmıştır. Malzemelerin sürünme dayanımlarında ise kayda değer bir fark gözlemlenmemiştir. SEM analizi sonucu, UV-C etkisinin, özellikle PETG malzemelerde, yüzey yapısında bozulmalara yol açtığını göstermektedir. Sonuç olarak UV-C'ye maruz kalan PLA ve PETG numunelerde mekanik dayanımın düştüğü gözlemlenmiştir (Amza et al. 2021a).

Afshar ve Wood (2020) çalışmalarında, EYM yönteminde, ASA ve ABS filamentleri kullanarak; tamamen ABS'den oluşan ve alt/üst katmanların 0.25 mm kalınlıkta ASA ile kaplandığı çok malzemeli yapılar oluşturmuşlardır. Yüzeylerin ASA ile kaplanması ile üretilen numunelerin UV yaşlanmaya karşı gösterdiği direnci ölçmeyi temel alan çalışmada, mekanik davranıştaki değişimler, ASTM D790 standardına uygun olarak üç nokta eğme testi ile ölçülmüştür. Yapılan yaşlandırma testi Q-Lab QUV cihaz kullanılarak ASTM G154 standardında, 60 °C ortam sıcaklığı ve UVA-340 lamba altında, 1200 saat boyunca yaşlandırılmıştır. Bu yaşlandırma sürecinde her bir döngü 8 saat UV ışınım, 4 saat yoğunlaşma olarak gerçekleşmiştir. Ayrıca dijital mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu ile de analiz yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, ASA kaplaması bulunmayan numunelerde sararma ve mikro çatlak oluşumu gözlemlenmiştir. Eğilme dayanımı, kopma uzaması ve eğilme tokluğu

gibi mekanik özellikler ASA kaplamalı numunelerde büyük oranda korunurken, kaplama yapılmayan numunelerde ciddi düşüşler gözlemlenmiştir. Böylelikle, imalatla çoklu malzeme yapılarının kullanımının, çevresel faktörlere karşı, büyük ölçüde avantaj sağlama potansiyelinin olduğu söylenebilmektedir (Afshar and Wood 2020).

Pandžić ve arkadaşları (2023) çalışmalarında, EYM yöntemi ile PC ve PLA filamentler kullanılarak üretilen malzemelerde, UV ışınımı maruziyetinin, mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışma, UV radyasyonuna maruz bırakılan beş test numunesi ile maruz bırakılmayan beş kontrol numunesinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması ile yapılmıştır. Yaşlandırma testi Formlabs Cure cihazı kullanılarak, ISO 4892-3 (B yöntemi) standardı doğrultusunda, 50 °C ortam sıcaklığında, numuneleri 24 saat boyunca UV ışığa maruz bırakarak gerçekleştirilmiştir. Ardından mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla çekme (ISO 527-2) ve eğme testleri (ISO 178) yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde; UV ışınımı, PC malzemesinde çekme mukavemetinde azalmalara neden olurken, PLA malzemesinde çekme mukavemetinde artışa yol açmıştır. Ayrıca her iki malzeme için, yaşlandırma işlemi sonrasında eğme dayanımında artış gözlemlenmiştir (Pandžić et al. 2023).

Osadolor vd. (2024) çalışmalarında, PLA filament kullanılarak EYM yöntemi ile üretilmiş, kafes yapılara uygulanan UV yaşlandırma işleminin mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Çalışmada üretilen 40 mm kenar uzunluklu kübik yapılar, BGD 825 Bench model bir yaşlandırma kabini kullanılarak, 365 ile 295 nm dalga boyu aralığındaki UVA-340 lambalar ile 45 °C ortam sıcaklığında, numuneleri 4, 6 ve 8 hafta boyunca yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Ayrıca mekanik özelliklerin belirlenmesi amacı ile de basma testi yapılarak, parçaların basma mukavemeti, young modülü ve basma deformasyon değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen bulgular değerlendirildiğinde, yaşlanma süresi arttıkça hem young modülü hem basma dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca parçalar üzerindeki deformasyon da doğru orantılı olarak artış göstermiştir. Araştırmacılar bu artışların sebeplerini, polimerlerde UV ışınım kaynaklı moleküler zincir kopması ve çapraz bağlanma reaksiyonlarının gerçekleşmesi ile meydana geldiğini düşünmektedir. Bunlara ek olarak deformasyon oranına bağlı olarak gevrekleşme ve kırılabilirliğin arttığı kanaatine varmışlardır (Osadolor et al. 2024).

Amza vd. (2023) yaptığı çalışmada, Zortrax M200 marka 3B yazıcı kullanarak ürettiği ABS-PC numuneler üzerinde UV-C ışınımına bağlı hızlandırılmış yaşlandırmanın, mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Çalışmada kullanılan filament yaklaşık, %55-60 ABS ve %30-35 PC içeren kopolimer bir filamenttir. Bu filamentten çekme ve basma numuneleri üretilmiştir.

Üretilen parçaların UV-C yaşlandırılması, BS-02 model bir kabin kullanılarak, 254 nm dalga boyunda 24 saatlik bir çevirimde ve 50 °C ortam sıcaklığında yapılmıştır. Mekanik özellikler incelenirken çekme, sürünme ve basma testleri kullanılmıştır. Yapılan testler sonucu UV-C maruziyeti sonrası malzemelerin çekme ve basma mukavemetlerinde hafif bir düşüşün yaşandığı gözlemlenmiştir. Sürünme testlerinde ise UV-C ışınımının, numuneler üzerinde baskın bir etkisinin olmadığını, UV ışınımına maruz kalan ve kalmayan numunelerin benzer sürünme davranışı sergilediği belirlenmiştir. Genel olarak UV-C yaşlandırmasının 3B olarak üretilen ABS-PC parçaların mekanik özelliklerinde göz ardı edilebilecek düşüşlere yol açtığını ve buna ek olarak bu düşüşlerin malzemenin uzun süreli kullanımını etkilemeyeceği kanaatine varılmıştır (Amza et al. 2023).

Januténienė vd. (2024) plastik malzemelerin geri dönüşümünü ve sürdürülebilirliğini hedefledikleri çalışmalarında, EYM yönteminde kullanılan geri dönüştürülmüş ve saf PLA, ABS, PETG filamentleri kullanarak bu malzemelerin UV yaşlandırmaya karşı mekanik özelliklerindeki değişimlerini incelemişlerdir. Tüm numuneler %100 doluluk oranında Prusa MK4 yazıcı kullanılarak üretilmiş, yaşlandırma testi ise 1.65 W/m^2 ışınım şiddetinde, 40 saat boyunca Atlas marka UV test kabini içinde gerçekleştirilmiştir. Ardından mekanik özelliklerin tahlil edilmesi amacı ile numunelere, ISO 527-2 standartlarında çekme testi ve Charpy darbe testleri uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda, geri dönüştürülmüş numunelerin mekanik dayanımlarında belirgin düşüşler gözlemiştir. Ayrıca tüm numunelerde yaşlandırma işlemi sonrası çekme ve darbe dayanımlarında azalmalar gözlemlenmiştir. Bu azalma PETG ve PLA malzemelerde ABS ile kıyasla daha fazla olmuştur. Çalışmada PETG'nin UV ışınımına en dayanıksız malzeme; ABS'nin ise en dirençli malzeme olduğu gözlemlenmiştir. Bu azalmaların temel sebebinin UV yaşlandırma sonrası; zincir kırılması, mekanik özelliklerin zayıflaması, süneklik kaybı ve gevrekleşme olduğu söylenmektedir. Böylelikle, 3B baskıda geri dönüştürülmüş filamentlerin kullanılabilirliği mümkün olsa da yaşlandırma sonrası mekanik performans değişimine, tasarım aşamasında dikkat edilmesi gerekmektedir (Januténienė et al. 2024).

Lucarelli vd. (2025) çalışmalarında, EYM yönteminde kullanılan, PETG, ASA ve ticari adı TRITAN olan mühendislik filamentlerinin yaşlandırma altındaki, mekanik ve optik özelliklerinin değişimlerini incelemiştir. Çalışmada, tüm filament tiplerinin şeffaf ve beyaz renkli halleri kullanılarak ASTM D638 standardında çekme ve ASTM D695 standartlarında basma numuneleri üretilmiştir. Bu numuneler kontrol ve test numuneleri olarak ayrılmış ve ASTM G154 ve ISO 4892 standartlarında UV yaşlandırma testine tabi tutulmuştur.

Yaşlandırma işlemi, 350-400 nm dalga boyu aralığında, 0.97 W/mm² ışınım şiddetinde, yoğunlaşma ve yağmur etkisini de içeren 90 döngüde ve 720 saat süresinde uygulanmıştır. Bu koşulların, gerçek çevresel etkenlere kıyaslandığında yaklaşık 1.5-2.5 yıllık bir süreci simüle ettiği belirtilmiştir. Çalışmada hem beyaz hem şeffaf ASA ve TRITAN numunelerde ve şeffaf PETG numunelerde çekme dayanımının arttığı görülmüştür. Bu artışların polimer zincirlerin yeniden düzelmesi ve iç gerilmenin azalması sonucu malzeme homojenliğinin artmasıyla açıklanmıştır. Ayrıca tüm numunelerde basma dayanımında düşüş gözlemlenmiştir. Ayrıca numunelerde en iyi renk değişim performansını (en az renk değişimi) PETG filamentler sağlamıştır. Böylelikle çalışmada, EYM ile üretilmiş mühendislik plastiklerinin, dış ortam kullanımında yaşlanma davranışlarının dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır (de Carvalho Lucarelli et al. 2025).

Amza vd. (2021b) yaptıkları çalışmada, EYM metodunda yaygınca kullanılan PLA ve PETG malzemelerinin UV-B ışınımına bağlı hızlandırılmış yaşlandırılmasının, parçaların mekanik özelliklerine etkisi incelemiştir. Numunelerin tamamı %100 doluluk oranında, Creality Ender 3 model 3B yazıcıda basılmıştır. UV yaşlandırma işlemi ise 310 nm dalga boyunda ve 0.43 Wm⁻² x nm⁻¹ ışınım şiddetinde, 50 °C ortam sıcaklığında, 24 saat boyunca uygulanmıştır (8 saatlik 3 döngü). Yaşlanma sonrası mekanik özelliklerin ölçümü için, hem kontrol numunelere hem de yaşlanmış numunelere çekme, basma ve sürünme testleri uygulanmıştır. Yaşlandırması sonrasında PLA numunelerde çekme dayanımı yaklaşık %5.3, PETG numunelerinde %36 oranında azalma göstermiştir. Basma dayanımları da sırasıyla %6.3 ve %38.6 oranında düşmüştür. Ayrıca sürünme testlerinde UV ışınımının belirgin bir etkisi gözlenmemiştir. Çalışmanın sonucunda, kısa süreli UV-B ışınımının özellikle PETG malzemede mekanik özellikleri olumsuz etkilediği, bu nedenle EYM ile üretilen parçaların dış ortam uygulamalarında, yaşlandırma dayanımlarının dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir (Amza et al. 2021b).

Jirků vd. (2025) tarafından yapılan çalışmada, geri dönüştürülmüş PLA malzemesine %10 oranında kahve telvesi eklenerek oluşturulmuş PLA kompozitinin, UV yaşlandırma altındaki mekanik davranışları incelenmiştir. Numuneler EYM yöntemi ile çalışan, Prusa i3 MKS3S model 3B yazıcı kullanılarak, %100 doluluk oranında üretilmiştir. Yaşlandırma testleri ise Q-Sun Xe-3 HS model, ksenon tipi lambalar kullanan test kabini, 340 nm dalga boyunda ve 0.55 W/m² ışınım şiddetinde gerçekleştirilmiştir. Testler 40 °C ortam sıcaklığı ve %40 bağıl nem koşullarında 4 ve 12 haftalık yaşlandırma periyotlarında yapılarak, yaşlandırma sonrasında numuneler EN ISO 527-2 standardında göre çekme testine tabi tutulmuştur. Çalışmanın

sonucunda saf PLA başlangıçta yaklaşık 28 MPa çekme dayanımına sahipken 12 haftalık yaşlandırma sonucunda dayanım 10 MPa altında düşmüştür. Kahve telvesi içeren kompozit numuneler ise başlangıçta 25-27 MPa arasında dayanım gösterirken, 12 hafta sonrasında 24-25 MPa çekme mukavemeti göstermiştir. Çalışma, kahve telvesi takviyesinin PLA'nın UV ışınımına karşı dayanımını arttırdığı gösterirken aynı zamanda malzemenin kırılgenliğini azaltarak, sürdürülebilirlik açısından potansiyelini ortaya çıkartmıştır (Jirků et al. 2025).

Doğru vd. (2021) yaptıkları çalışmada, EYM yöntemi ile, %10 oranında kenevir takviyeli PLA biyokompozitleri kullanarak, farklı dolgu desenlerinde deneysel numuneler üretmiştir. Numuneler, üretim sonrasında UV yaşlandırma testine tabii tutularak, yaşlandırmanın mekanik özelliklere etkisini incelenmiştir. Çalışmada kullanılan dolgu desenleri, ASTM D638 Tip 4 standartına uygun olarak, çekme yönüne paralel ve çekme yönü ile 45 derecelik açı yapacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca tüm numuneler %100 doluluk oranında üretilmiştir. Yaşlandırma işlemi ise ISO 9227 standardında, Ascott CC1000ip cihazında, üç haftalık bir döngüde yapılmıştır. Yaşlandırma sonrası, tüm numuneler çekme testine tabii tutulmuştur. Çekme testleri sonucunda, yaşlandırılan numunelerin çekme mukavemetlerinde yaklaşık %50 oranında azalma tespit edilmiştir. Ayrıca yaşlandırma yapılan numunelerin SEM analizlerinde arayüzey boşlukları ve fibrilasyon tespit edilmiştir. Bunlara ek olarak yazarlar, kullanılan dolgu deseninin yaşlanma sonrasında mekanik özellikler üzerinde etkili olduğunu, 45 derece açılı dolguya sahip numunelerin, parçalara etkiyen yükleri daha eşit dağıttığını belirtmişlerdir (Doğru et al. 2021).

Akderya (2023a), yaptığı çalışmada EYM yöntemi ile üretilen PLA numunelere, ardıl olarak uygulanan UV kürlleme işleminin, düşük hızlı darbe dayanımına olan etkisini incelemiştir. Tüm numuneler Creailty CR-05 Pro H 3B yazıcı ile, %100 doluluk oranında üretilmiştir. Üretimin ardından numunelere, Anycubic Wash and Cure 2.0 cihazı kullanılarak, 405 nm dalga boyunda UV ışınımı uygulanmıştır. Bu işlem 15,30,45 ve 60 dakika olarak farklı sürelerde gerçekleştirilmiştir. Kürlleme işlemi sonrası, numuneler ISO 6603 standartında darbe testine sokulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, 30 dakikalık UV maruziyetinin PLA'nın darbe dayanımı ve rijitliğini attırdığı, ancak daha uzun süreli ışınımlarda foto oksidadif bozunmanın, zincir kırılmalarına ve ara katman bağlarının zayıflamasına neden olduğu belirtilmiştir (Akderya 2023a).

Akderya (2023b), yaptığı bir diğer çalışmada EYM yöntemi ile üretilen PLA numunelere, ardıl olarak uygulanan UV kürlleme işleminin, numuneler üzerindeki eğilme ve su emme davranış etkilerini incelemiştir. Çalışmada kullanılan numuneler %100 doluluk oranında, Creailty CR-

05 Pro H cihazında üretilmiştir. Üretimin ardından numunelere, Anycubic Wash and Cure 2.0 cihazı kullanılarak, 405 nm dalga boyunda UV ışınım işlemi uygulanmıştır. Bu işlem farklı sürelerde (15,30,45 ve 60 dakika) gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu ardıl işlem sonrası numunelere, ASTM D790 standardında eğme testi ve ASTM D570 standardında su emilimi testi yapılmıştır. Yapılan testler sonucu, numunelerin eğilme dayanımı; 30 dakikalık sürece kadar artış göstermiştir. Geri kalan 45 ve 60 dakikada ise numunelerin eğilme dayanımları düşmüştür. Bunun sebebi olarak, uzun süreli UV ışınımı kaynaklı yapısal bozulmalar söylenebilir. Su emme testleri sonucunda 60 dakika kürleme işlemi gören numunelerin en yüksek su emilimine sahip olduğu, işlem görmemiş numunelerin ise en düşük su emilimine sahip olduğu tespit edilmiştir (Akderya 2023b).

3.2 EYM YÖNTEMİ KULLANILARAK ÜRETİLMİŞ ÇOKLU MALZEME YAPILARI

EYM teknolojisinin gelişmesiyle birlikte, birden fazla polimer malzemenin aynı yapı üzerinde bir araya getirilerek kullanıldığı işlevsel parçalara karşı olan ilgi hızla artmıştır. Özellikle farklı mekanik, kimyasal, termal özelliklere sahip malzemelerin birlikte kullanımıyla oluşturulan yapılar sayesinde, parçaların mekanik, kimyasal, termal performansının iyileştirilebildiğine dair literatürde çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, çoklu malzeme yapılarında kullanılan malzemelerin uyumluluğu, baskı parametreleri ve arayüz geometrileri gibi faktörlerin parçaların mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği göstermektedir. Bu doğrultuda literatür incelendiğinde aşağıdaki bilgilere ulaşılmıştır.

Dağlı (2025), çalışmasında EYM yöntemiyle üretilen PLA, PETG ve ABS malzemelerinden oluşan çoklu malzeme yapılarının mekanik davranışlarını ve arayüzey yapışma kalitesini araştırmıştır. Numuneler, Anycubic Kobra Combo yazıcı kullanılarak, yekpare şekilde, farklı doluluk oranları (%50 ve %100) ve raster açılarında (45° ve -90°) üretilmiş; ardından çekme, eğilme ve darbe testlerine tabi tutularak incelenmiştir. Çalışma sonucunda, tekli malzemeler arasında en yüksek çekme dayanımını PETG'nin gösterdiğini, çoklu malzeme yapıları arasında ise PLA-PETG-ABS konfigürasyonunun mekanik kararlılık açısından öne çıktığını ve doluluk oranı ile tarama açısının artırılmasının numunelerin tamamında, mekanik özellikleri iyileştirdiğini gözlemlemiştir. Böylelikle, çok malzemeli bileşenlerin geliştirilmesindeki potansiyelin, mühendislik alanlarında işlevsel uygulamalarının ilerlemesi için değerli olduğunu söylemiştir (Dağlı 2025).

Kumar ve arkadaşları (2022), çalışmalarında EYM yöntemi ile üretilmiş ABS ve TPU malzemelerinin; Lamine Nesne İmalatı yöntemi (LOM) birleştirilerek, çoklu malzeme

yapılarının mekanik ve morfolojik özelliklerini incelemiştir. Çalışmada, ATA (ABS-TPU-ABS) ve TAT (TPU-ABS-TPU) olmak üzere iki farklı kombinasyonda numuneler, epoksi reçine kullanılarak birleştirilmiş ve ASTM D790 standartlarına göre üç nokta testine tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçlar, ATA konfigürasyonunun TAT yapısına göre daha yüksek eğilme mukavemeti sergilediğini, TPU katmanlarının eklenmesinin kopma uzamasını önemli ölçüde (%187) artırdığını ortaya koymuştur (Kumar et al. 2022).

Arifvianto vd. (2022), EYM yöntemiyle üretilen PLA ve esnek TPU malzemelerinden oluşan sandviç yapılı parçaların mekanik özelliklerini belirlemeyi amaçlamıştır. Flashforge CreatorPro çift nozullu yazıcı kullanılarak farklı raster açılarında ($0^{\circ}/90^{\circ}$ ve $45^{\circ}/-45^{\circ}$) üretilen numunelere çekme testi uygulanmış, test sonrasında malzemelerin kırılma yüzeyleri de elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Araştırma sonucunda, sandviç yapının TPU'nun çekme dayanımını artırdığını ancak PLA'nın düşük kopma uzamasını iyileştirmediğini, ayrıca numunelerin ara yüzlerinde zayıf yapışma gösterdiğini ve bunun sonucunda da numunelerin delaminasyona uğradığını gözlemlemişlerdir (Arifvianto et al. 2022).

Ribeiro vd. (2019), EYM ile üretilen çoklu malzeme yapılarında, farklı arayüz geometrilerinin (t-şekli, u-şekli ve kıvrangıç kuyruğu şekli) mekanik performansa etkisini, yüksek (PLA-PLA) ve düşük (PLA-TPU) uyumluluğa sahip malzeme çiftleri üzerinden değerlendirmiştir. Numuneler, Prusa i3 model 3B yazıcıda üretilmiş ve çekme testine tabi tutulmuştur. Test sonuçları, malzeme uyumluluğundan bağımsız olarak, mekanik kenetlenmeye dayalı makroskopik ara yüzlerin (özellikle t-şekli), basit yüzey temaslı arayüzlere kıyasla daha üstün mekanik performans sağladığını ortaya koymuştur (Riberio et al. 2019).

Khodae ve arkadaşları (2024), EYM yöntemiyle üretilen ABS/PLA çoklu malzeme yapılarının mekanik özellikleri üzerinde yazdırma hızı, dolgu yoğunluğu ve raster açısının etkilerini araştırmıştır. Deney numuneleri farklı doluluk oranları (%50, %75, %100) ve farklı raster açılarında (0° , 45° , 90°) üretilerek çekme ve üç nokta eğme taestine tabi tutulmuştur. Testler sonucunda, dolgu yoğunluğunun ve raster açısının mekanik özellikler üzerinde belirleyici faktörler olduğunu; en yüksek çekme (37.71 MPa) ve eğilme dayanımının (69.8 MPa) %100 doluluk ve 0 derece raster açısına sahip numunelerde elde edildiğini, ancak yüksek dolgu oranının gevrek kırılma davranışına yol açtığını söylemişlerdir (Khodae et al. 2024).

Palaniyappan vd. (2023), saf PLA ve %10 ceviz kabuğu takviyeli PLA (WPLA) filamentlerini bir arada kullanarak, malzeme özelliklerinin katmanlar arasında kademeli olarak değiştiği kompozit yapılar geliştirmişlerdir. Numuneler, Pratham 3.0 model endüstriyel sınıf bir EYM

yazıcı kullanılarak, tek (PLA-WPLA) ve çoklu malzeme geçişlerine sahip farklı katman dizilimleriyle üretilmiştir. Üretim sonrasında numunelere çekme, eğilme, basma ve sertlik gibi mekanik testlerin yanı sıra; termal iletkenlik ve aşınma testleri uygulanmıştır. Test sonuçlarına göre; çekme dayanımında çoklu geçişli PLA-WPLA-PLA numunesi 28.88 MPa ile en yüksek değeri gösterirken, eğilme dayanımında tek geçişli PLA-WPLA numunesi 41.58 MPa ile en iyi performansı sergilemiştir. Tüm numuneler arasında en yüksek sertlik değeri 77.8 ile ceviz kabuğu takviyeli WPLA numunesinde ölçülmüştür. Ayrıca, PLA-WPLA numuneler, en yüksek basma (63.68 MPa) ve eğilme dayanımına (41.58 MPa) sahip olduğundan yapısal uygulamalar için bu kombinasyonun en uygun seçenek olduğunu söylemişlerdir (Palaniyappan et al. 2023).

Baca ve Ahmad (2020), EYM teknolojisi kullanılarak PLA, ABS ve HIPS filamentlerden üretilen sandviç yapılı numunelerin mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Farklı malzeme kombinasyonlarına sahip numuneler, çoklu nozul sistemi kullanılarak üretilmiş ve ASTM D638 standardına göre çekme testine tabi tutulmuştur. Çalışmada, çoklu polimer sandviç yapılarının EYM ile üretilmesi durumunda çekme mekanik davranışı araştırılmış; PLA, ABS ve HIPS kullanılarak oluşturulan farklı sandviç konfigürasyonları, tek malzemeli yapılarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada en yüksek çekme dayanımının, PLA dış yüzeyler ve ABS iç kısım ile oluşturulan sandviç yapıda elde edildiği görülmektedir (44.40 MPa). Çalışma sonucunda, çok malzemeli yapıların, düşük maliyetli malzemelerle üretilerek çeşitli uygulamaların gereksinimlerini karşılamada uygun ve uygulanabilir bir alternatif olduğu vurgulanmıştır. (Baca ve Ahmad 2020)

3.3 ÇALIŞMANIN MOTİVASYONU

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; özellikle EYM yönteminde kullanılan termoplastik polimerlerin ve kompozit yapıların, UV ışınımı, sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörler altında yaşlanma etkisinin araştırmacılar tarafından sıklıkla incelendiği görülmektedir. Mevcut çalışmalar genellikle tek malzeme kullanılan veya kompozit malzeme yapılarındaki yaşlanma etkileri üzerine yoğunlaşmıştır. Ayrıca literatürde çoklu malzeme yapılarının mekanik özelliklerine değinen çalışmalar bulunsa da, bu çalışmaların büyük çoğunluğu yaşlandırma etkisini kapsamamaktadır.

Literatürde, PAHT-CF15 ile PLA+ malzemenin bir arada ve tek bir yapı içerisinde kullanıldığı; bu yapıların da farklı parametrelerle üretilip, yaşlandırılma etkisinin incelendiği başka bir çalışmaya rastlanmamıştır. PAHT-CF15 filament yüksek maliyetli, PLA+ filament ise daha uygun maliyetli bir malzemedir.

Bu doğrultuda bu çalışmanın temel motivasyonu, optimize parametreler ile üretilmiş, çalışmada MIX olarak adlandırılan yapılar oluşturup bu fonksiyonel yapıların çevresel şartlara karşı mekanik özelliklerini incelemektir. Bu çalışma, literatürdeki bu boşluğu doldurarak, hem bilimsel hem de endüstriyel uygulamalara katkı sağlamayı hedeflemektedir.



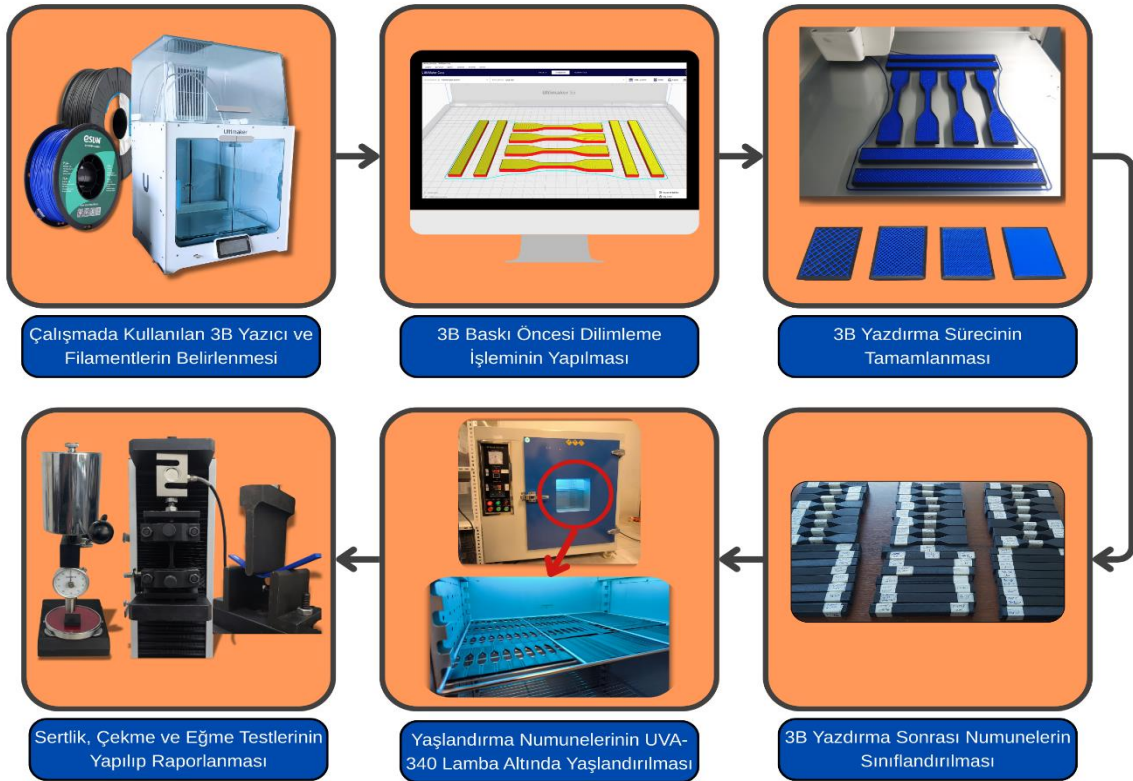


BÖLÜM 4

MATERYAL VE METOT

4.1 DENEYSEL AKIŞ ŞEMASI

Çalışmada öncelikle deney tasarımı gerçekleştirilmiş, ardından numuneler standartlara uygun olarak bilgisayar ortamında modellenmiş ve dilimleme işlemi uygulanmıştır. Dilimleme sonrasında numuneler EYM teknolojisi ile üretilmiştir. Üretilen numunelerin referans ve yaşlandırılacak numuneler olarak sınıflandırılmasının ardından, yaşlandırılacak numuneler 168 saat boyunca UVA-340 ışınımı altında yaşlandırma testine tabi tutulmuştur. Bu süreçte referans numunelerin mekanik testleri yapılmıştır. UV yaşlandırma işlemi bittikten sonra, yaşlanmış numunelere de mekanik testler uygulanmış ve elde edilen tüm sonuçlar raporlanmıştır. Şekil 4.1’de çalışma boyunca yapılan işlemlerin grafik özeti verilmiştir.



Şekil 4.1 Çalışmanın grafik özeti.

4.2 KULLANILAN FİLAMENTLERİN ÖZELLİKLERİ

Çalışmada, Esun (eSUN, Shenzhen, Çin) firmasına ait PLA+, ve BASF markasının üretimi olan PAHT-CF15 (BASF, Ludwigshafen am Rhein, Almanya) filamentleri kullanılmıştır (Şekil 4.2). Polilaktik asit (PLA), temel olarak mısır nişastası ve şeker kamışı gibi bitkisel bazlı, yenilenebilir kaynaklardan üretilen bir biyomalzemedir. PLA malzemeler geleneksel plastik malzemelere kıyasla daha düşük karbon salınımına sahip olup biyolojik olarak doğada daha kolay parçalanmaktadır. Bu da PLA malzemelere sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sağlar. Eklemeli imalat teknolojilerinde en çok tercih edilen malzemelerden biri olan PLA malzemeler, kolay işlenebilirlik ve düşük büzülme oranı ve 3 boyutlu yazıcılarda kolay basılması sebebiyle yaygın kullanıma sahiptir. Ayrıca PLA malzemeler toksik olmayan yapıları sayesinde tıp ve gıda sektöründe de kullanılmaktadır (Güldibi et al. 2025).

Çalışmada kullanılan PLA+ filamentler ise standart PLA'nın mekanik özelliklerinin geliştirilmiş bir varyasyonudur. PLA+ malzemeler standart PLA malzemelere göre daha yüksek çekme ve eğme mukavemeti gösterirler. Ayrıca bunlara ek olarak daha yüksek darbe dayanımı ve tokluk gibi avantajlar da sağlarlar (URL-3). Fakat PLA malzemelerin, düşük ısıl dayanımı ve düşük ultraviyole dayanımı gibi dezavantajları da vardır. Ayrıca çekme ve eğme mukavemetleri de eklemeli imalatta kullanılan diğer polimer malzemelere göre düşüktür. Bundan ötürü özellikle çevresel koşullardan etkilenecek şekilde dış mekân uygulamalarında ve yüksek dayanım isteyen endüstriyel uygulamalarda PLA malzemelerin kullanımı tercih edilmez (Sun et al. 2025, Zou et al. 2024). Piyasada yaygın olarak cam ve karbonfiber katkılı PLA filamentleri bulunsa da çevresel koşullar sebebiyle daha farklı bir malzemenin kullanılması gerekmektedir. Çalışmada kullanılan filamentler 1 kilogramlık makaralar halinde 2.85 mm çapında temin edilmiştir.

Çalışmada kullanılan diğer filament ise BASF firmasının ürettiği PAHT-CF15 (Şekil 4.2) malzemesidir. PAHT-CF15, Poliamid malzemesine %15 oranında karbon fiber katkısının eklenmesiyle üretilmiş bir kompozit filament çeşididir. Filament 2.85 mm çapında ve 750 gramlık makaralar halinde temin edilmiştir. Filamentin 130 °C dereceye kadar yüksek sıcaklıklara dayanması sebebiyle isminde HT (Yüksek Sıcaklık) ifadesi yer alır. Filament ayrıca gelişmiş mekanik özelliklere, boyutsal kararlılığa ve iyi kimyasal dirence sahiptir. (URL-4). Nylon olarak da bilinen Poliamid malzemeler, mekanik özellikleri bakımından 3B yazıcıda kullanılan PLA malzemelere kıyasla daha iyi darbe dayanımı, eğme ve çekme mukavemeti gibi avantajlara sahiptir. Bunlara ek olarak esneklik ve aşınma direnci gibi özellikler açısından da

PLA malzemelerden çok daha avantajlıdır (Yılmaz 2024). Ayrıca UV ışınlarına ve neme karşı direnci, yüksek sıcaklık dayanımı gibi pozitif özellikleri sayesinde PLA'ya göre çevresel koşullara daha uygun ve dış mekân uygulamalarında daha yaygınca kullanılmaktadırlar. Poliamide eklenen kısa karbon fiber katkısı ile rijitlik ve hafiflik gibi parça özellikleri artsa da, baskı zorluğu ve özellikle baskı sırasında yüksek sıcaklara çıkılması gerektiğinden her 3B yazıcı bu filamentleri kolayca basamaz. Özellikle karbon fiber liflerinin aşındırıcı etkisi ve yüksek sıcaklıkta basılması gerektiğinden, bazı üreticiler standart pirinç nozül yerine, sertleştirilmiş çelik benzeri nozullar kullanılmasını önermektedir (Rodríguez-Reyna et al. 2022).



Şekil 4.2 Çalışmada kullanılan filamentler a) Esun PLA+, b) BASF PAHT-CF15.

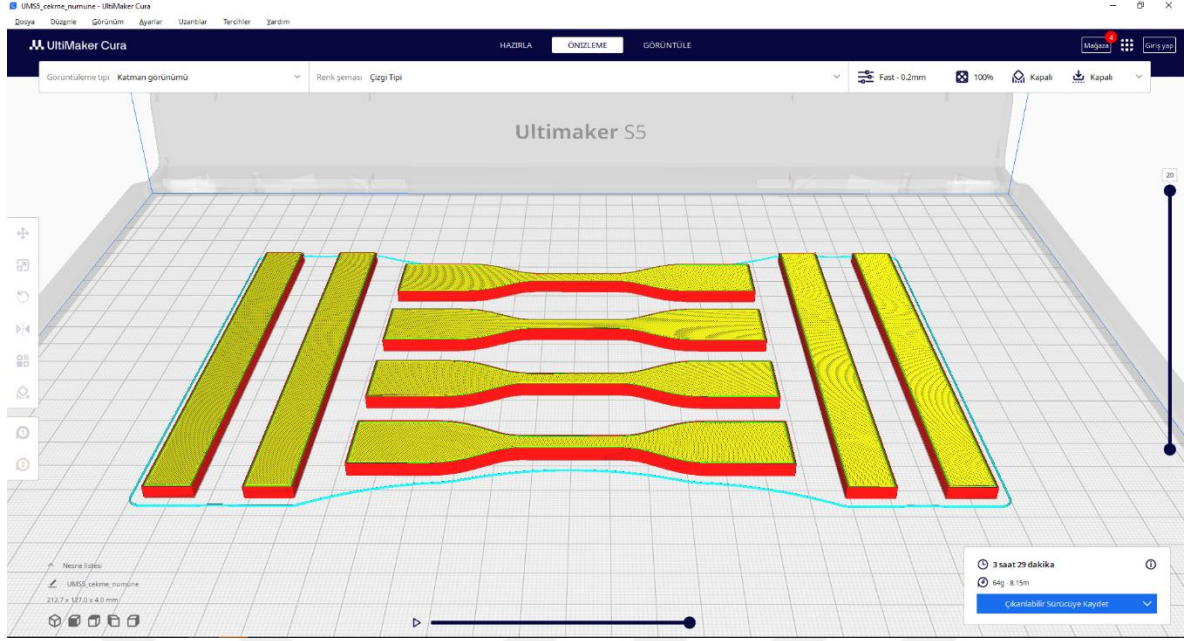
Üretim sürecinde filamentler, nem etkisini azaltmak amacıyla kullanılan, orijinal vakumlu ambalajından çıkarıldıktan hemen sonra, paketinden çıktığı gibi 3B yazıcıya yüklemiş ve baskı işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretici firma, PAHT-CF15 malzemesi için baskı öncesinde filament makarasını kurutma işlemini önermektedir. Bununla birlikte, literatürde bu filamente baskı öncesinde herhangi bir ön kurutma işlemi uygulanmamış ve malzemenin temin edildiği haliyle basılması şeklinde çeşitli uygulamalar bulunmaktadır (Chicos et al. 2022). Yapılan deneylerde de filament malzemesinin paketinden çıktığı halde kullanımı tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan filamentlerin teknik özellikleri aşağıdaki Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 PLA+ ve PAHT-CF15 filamentinin teknik özellikleri (URL-4, URL-5).

Teknik Özellikler	PLA+	PAHT-CF15	
Marka	eSUN	BASF	
Renk	Mavi	Siyah	
Çap Ölçüsü (mm)	2.85	2.85	
Yoğunluk (g/cm ³)	1.230	1.023	
		Şartlandırılmış	Kurutulmuş
Çekme Dayanımı (MPa)	63	62.9	103.2
Kopma Uzaması (%)	20	2.9	1.8
Eğilme Dayanımı (MPa)	74	125.1	160.7
Elastisite Modülü (MPa)	1973	6063	8258

4.3 DİLİMLEME İŞLEMİ

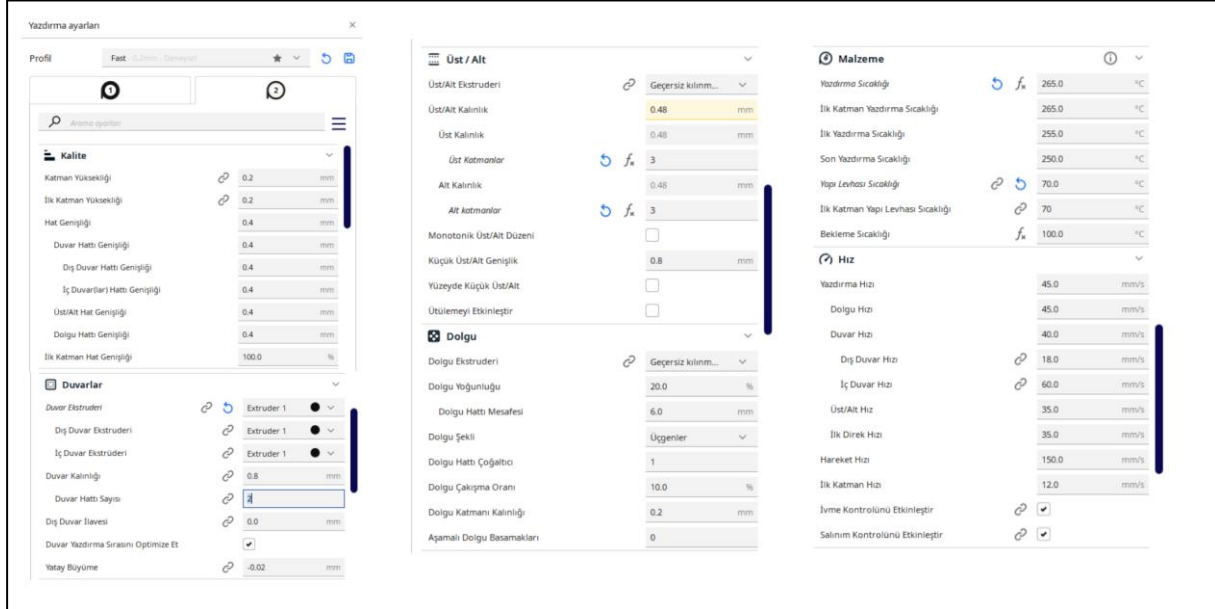
Eklemeli imalat sektöründe farklı ihtiyaçlara yönelik geliştirilen birçok dilimleme yazılımı bulunmaktadır. Cihaz kabiliyetlerine ve çalışma sistematiğine uygun, farklı profilleri içinde barındıran dilimleyici yazılımlar sayesinde, optimum parametreler ile üretim işlemini gerçekleştirmek mümkündür. Çalışmada üretilen numuneler; 3B baskı işlemi öncesinde, Ultimaker firmasının geliştirdiği, açık kaynak kodlu, EYM yazıcılar için bir dilimleme programı olan, Cura 5.7.2 yazılımı ile dilimlenmiştir. Yapılacak 3B baskı işlemi Ultimaker Cura yazılımı içinde bulundurduğu birçok parametre ayarı ile farklı 3B yazdırma işlemini sağlamaya olanak tanır. Çalışmada bu dilimleyicinin kullanılmasının temel sebebi, kullanılacak 3B yazıcının, üreticisinin geliştirdiği bir program olması ve buna bağlı olarak da yazıcı profillerinin güncel ve çalışmasıdır. Ayrıca çalışmada ikili ekstrüzyon yöntemi ile aynı anda iki farklı baskı hücresi kullanıldığı için, özel bir g-kod işlemesine ihtiyaç duyulmasıdır. Şekil 4.3'te Ultimaker Cura yazılımı ara yüzünde dilimlenmiş numunelerin ekran görüntüsü verilmektedir.



Şekil 4.3 Cura yazılımından alınmış ekran görüntüsü.

Baskı parametreleri; üretim sürecine doğrudan etkiyen ve dilimleme aşamasında parçanın temel özelliklerini belirleyerek, parçanın dayanımına etki eden önemli faktörlerdir. Bundan ötürü en optimize baskı parametrelerinin kullanılması, hedeflenen mekanik özelliklere ve baskı kalitesine ulaşılabilmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Literatür incelendiğinde, katman kalınlığı parametresinin çekme dayanımı gibi faktörlere doğrudan etkiyen bir faktör olduğu görülmektedir (Gajjar et al. 2025, Sultana et al. 2024, Giri et al. 2021). Katmanların serilmesi ve yönelimini belirleyen, raster açısı parametresi de, çekme, eğme ve darbe dayanımı gibi parçaların mekanik özellikleri etkileyen bir parametredir (Gajjar et al. 2025, Syrlybayev et al. 2021). Parça basımı sırasında nozul sıcaklığı ve parça basım hızı, elbette malzemelerin ergime sıcaklığına ve akışkanlığına göre optimize bir şekilde ayarlanmalıdır. Genellikle kullanılacak filament tipine göre değişiklik gösterir. Ancak aynı tip filamentlerde kullanılan farklı nozul sıcaklıkları, parçaların boyutsal doğruluklarının, çekme ve eğme mukavemetlerini de etkilemektedir (Ghaffar 2024, Wang et al. 2021). Tüm bunlara ek olarak, parçaların iç doluluk oranı ve dolgu deseninin, parça mukavemetine etkisi araştırmacılar açısından ilgi çekici bir konu olmuştur. Özellikle parçaların ağırlıklarının hafifletilip, istenilen mukavemetlerde, fonksiyonel yapılar oluşturma çabası bu parametrelerin önemini arttırmaktadır (Panico et al. 2025, Rogelj et al. 2025, Bögrekçi et al. 2019, Camargo et al. 2019). Ayrıca numunelerin dış duvar sayıları (kabuk yapıları) da numunelerin mekanik özelliklerini etkileyen faktörlerdendir (Rogelj et al. 2025, Ćwikła et al. 2017). Bundan ötürü, tüm baskı parametreleri baskıdan önce dilimleyici yazılımlarla ayarlanmalı ve baskı işlemine ardından başlanmalıdır. Dilimleyici

yazılımların arayüzünde bulunan pencereler sayesinde birçok temel ve hassas parametre ayarı yapılabilir. Şekil 4.4'te Ultimaker Cura yazılımında baskı parametrelerinin ayarlandığı pencerelerin bir kısmı örnek olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.4 Ultimaker Cura programında bulunan örnek baskı parametreleri.

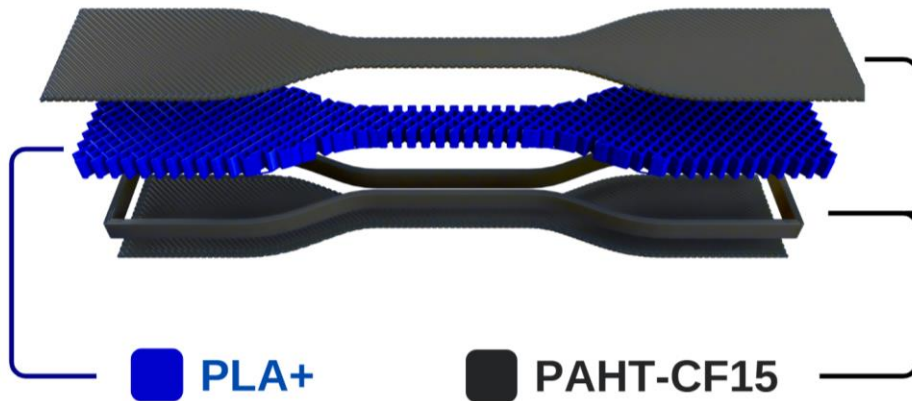
4.4 BASKI PARAMETRELERİ

Bu çalışmada, numune yüzeylerine doğrudan etki eden UV ışınımının neden olduğu yaşlanmanın, mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, dış duvar parametreleri 2, 3 ve 4 olacak şekilde farklı sayıda duvar yapılarında numuneler üretilmiştir. Ayrıca, numunelerin iç doluluk oranları da, malzeme yapısına göre %25, %50, %75 ve %100 olarak değiştirilerek hem duvar sayısının hem de doluluk oranının farklılaştığı bir deney tasarımı oluşturulmuştur. Buna ek olarak, duvar sayısı ile doğru orantılı şekilde üst ve alt katman kalınlıkları 0.4-0.6-0.8 mm olarak ayarlanmıştır. Böylece dış yüzeyde bir kabuk etkisi yapılarak içi dolu ve boşluklu yapıların dış etmenlerden korunması ve parçaların hafifletilerek en optimum yapıların elde edilmesi hedeflenmiştir. Çizelge 4.2'de çalışma kapsamında üretilen numunelerin baskı parametreleri verilmektedir. Deney numunelerinin tamamı, X ve Y düzlemine paralel olacak bir biçimde, en geniş yüzeyi baskı tablasına tam temas ederek, Z eksenini boyunca katman yükselmesinin gerçekleşmesi ile, desteksiz bir biçimde ve yatay oryantasyonda üretilmiştir.

Çizelge 4.2 Baskı parametreleri.

Çalışmada Üretilen Numunelerin Basım Parametreleri		
	PLA+	PAHT-CF15
Renk	Mavi	Siyah
Dolgu deseni	Izgara	Izgara
Dolgu oranı	%25, %50, %75, %100	%25, %50, %75, %100
Raster açısı	[-45, +45]	[-45, +45]
Katman Yüksekliği (mm)	0.2	0.2
Yazdırma Sıcaklığı (°C)	210	260
Tabla Sıcaklığı (°C)	60	100
Üst Katman Sayısı	2, 3, 4	2, 3, 4
Alt Katman Sayısı	2, 3, 4	2, 3, 4
Duvar hattı genişliği (mm)	0.4, 0.8, 1.2	0.4, 0.8, 1.2
Duvar hattı sayısı	2, 3, 4	2, 3, 4
Yazdırma Hızı (mm/s)	70	45

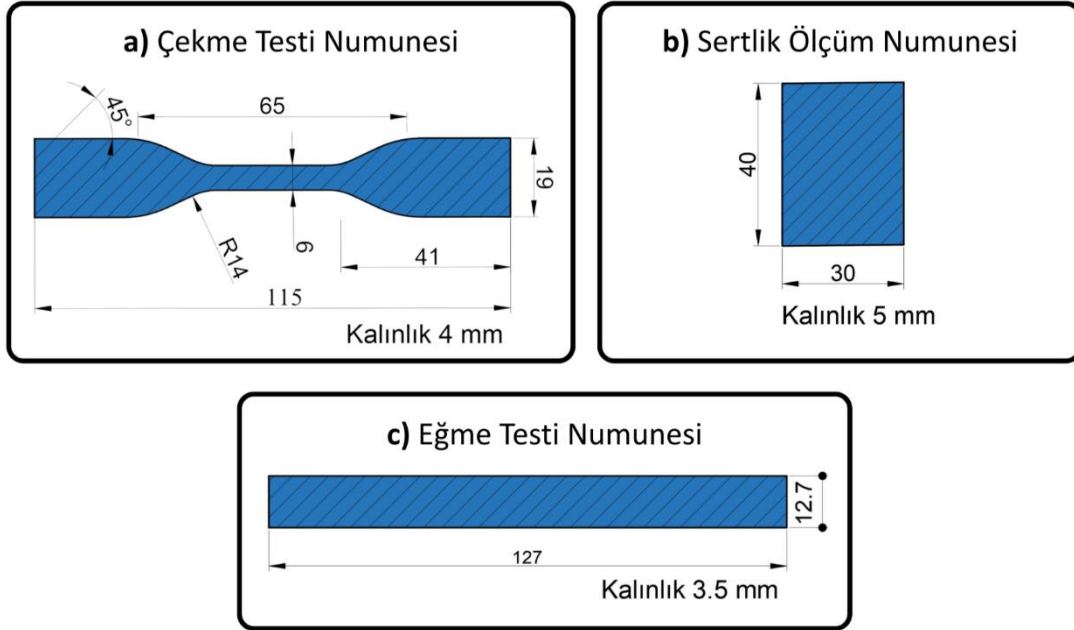
Birden çok malzemenin bir arada kullanıldığı MIX numunelerde, aynı anda farklı filament malzemeleri ile üretim işlemi gerçekleştiğinden, tablodaki filament çeşidine göre parametreler, değiştirilmeden aynı şekilde uygulanmıştır. MIX numunelerde dış duvarlar PAHT-CF15, iç yapı ve dolgu PLA+ filament kullanılarak üretilmiştir. Şekil 4.5'te MIX yapılı çekme numunesinin, şematik katman gösterimi verilmektedir.



Şekil 4.5 MIX çekme numunesinin, şematik katman gösterimi.

4.5 DENEY TASARIMI VE 3B BASKI SÜRECİ

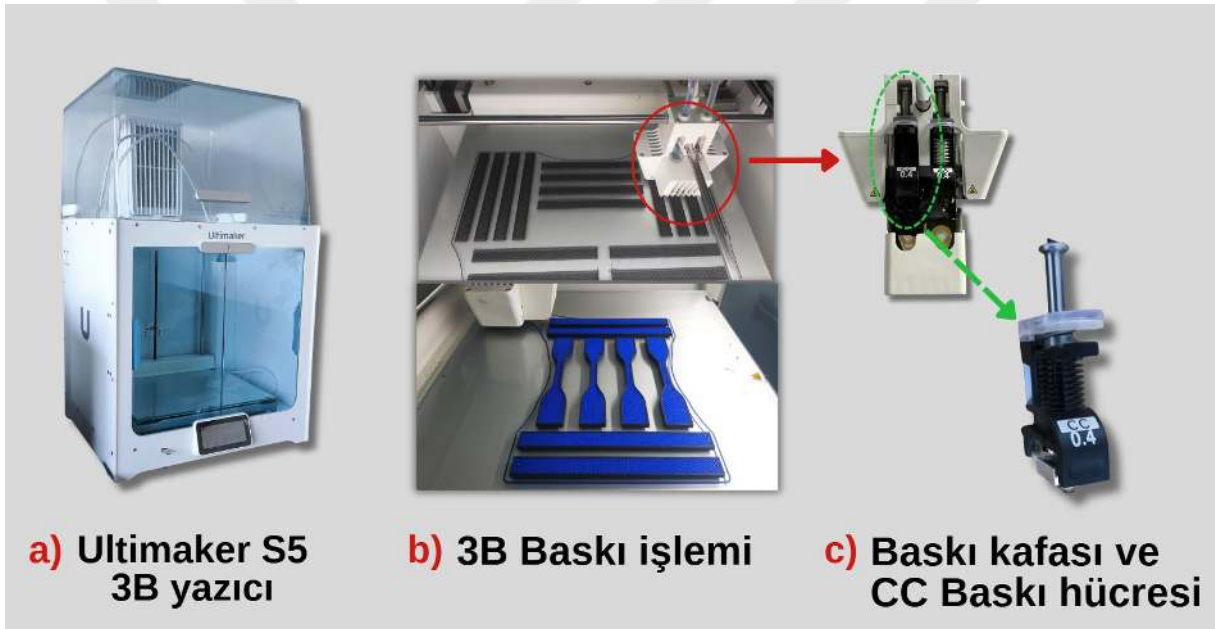
Çalışma kapsamında üretilen tüm numuneler, test standartlarına sadık kalınarak, belirtilen parametreler ve Şekil 4.6’da verilen ölçüler kullanılarak Autodesk Fusion adlı bilgisayar destekli tasarım programı kullanılarak tasarlanmıştır. Ardından stl formatına çevrilerek 3B yazıcıya aktarılmıştır.



Şekil 4.6 Çalışmada kullanılan mekanik test numunelerinin ölçüleri a) Çekme testi numunesi, b) Sertlik ölçüm numunesi, c) Eğme testi numunesi (ölçüler mm’dir)

Numunelerin tamamı, EYM yöntemi ile çalışan Ultimaker (Ultimaker, B.V., Hollanda) markalı, S5 model masaüstü tipi yazıcı kullanarak üretilmiştir. Ultimaker S5, profesyonel kullanıma yönelik, 330x240x300 mm’lik baskı hacmine sahip, bu sayede büyük ölçekteki baskılara veyahut aynı anda çok sayıda parça basılmasına imkân sağlayan bir 3B yazıcıdır. Yazıcı 2.85 mm çapındaki filamentler ile beslenerek çalışmaktadır. Yazıcının baskı kafası, hareketi sağlayan kızak ve kayışlı mekanizma sayesinde X ve Y eksenlerinde hareket ederken; baskı tablası, vidalı mil ile Z ekseninde hareket eder. Ayrıca her baskı öncesi, nozül ucunun tablanın birçok noktası ile teması ile gerçekleşen kalibrasyon işlemi, sayesinde daha iyi bir baskı sağlamak hedeflenir. Hareket mekanizması ve kalibrasyon sistemi sayesinde, baskı işlemi hızlı ve stabil bir biçimde gerçekleşmektedir. Cihaz, değiştirilebilir baskı hücresi (print core) teknolojisine sahip gelişmiş bir çift ekstrüzyon (ikili ekstrüzyon) sistemi barındırmaktadır. Bu modüler yapı, farklı türdeki malzemelerin aynı baskı sürecinde bir arada

kullanılabilmesine imkân tanır. Baskı hücreleri, kullanılacak malzeme çeşidine göre, üretici firma tarafından özel olarak geliştirilmiş ve isimlendirilmiştir. Üretici firma, standart filamentlerin (PLA, ABS, PETG vb.) AA tip baskı hücresi ile, suda eriyen destek filamentlerinin BB tip baskı hücresi ile, aşındırıcı içeren kompozit filamentlerin ise CC tip baskı hücresiyle basılmasını önermektedir. CC tip baskı hücresi yüksek sıcaklara çıkabilen ayrıca sertleştirilmiş çelik nozul ucuyla aşındırıcı malzemelere karşı dirençli bir baskı hücresidir. Çalışmadaki PAHT-CF15 numuneler, Ultimaker CC baskı hücresi kullanılarak üretilirken, PLA+ numunelerin üretiminde ise Ultimaker AA baskı hücresi kullanılmıştır. Her iki filamenti içeren MIX numunelerin üretiminde ise her iki baskı hücresi de kullanılarak, tek bir baskıda ikili ekstrüzyon sistemi aktif şekilde kullanılmıştır (URL-6, URL-7, URL-8). Şekil 4.7’de 3B yazdırma işlemi ve işlemde kullanılan donanımlar gösterilmektedir.



Şekil 4.7 3B yazdırma işlemi ve kullanılan teknolojileri a) Ultimaker S5, b) 3B Baskı İşlemi, c) Baskı kafası ve CC baskı hücresi.

Çalışma kapsamında; PLA+, PAHT-CF15 ve bu malzemelerin tek parça üzerinde bir arada kullanıldığı kompozit yapıların (MIX) üretimi gerçekleştirilmiştir. Deneysel tasarımda, tüm malzeme grupları için üç farklı duvar sayısı (2, 3 ve 4) ve dört farklı iç doluluk oranı kullanılmıştır (%25, %50, %75 ve %100). Deneysel verilerin tutarlılığı ve tekrarlanabilirliğini sağlamak amacı ile her bir üretim varyasyonunda sekizer adet çekme, eğme ve sertlik ölçüm numunesi üretilmiştir. Farklı duvar kalınlıkları, iç doluluk oranları ve malzeme kombinasyonlarına sahip bu numunelerin yarısı kadar (her gruptan 4’er adet) numune, referans

grubu olarak belirlenmiş ve herhangi bir yaşlandırma işlemi uygulanmadan, doğrudan çekme, eğme ve sertlik testlerine tabi tutulmuştur. Geriye kalan numuneler ise yaşlandırma işleminin, üretilen parçalar üzerindeki mekanik özellik değişimine etkisini tespit etmek amacıyla, UV yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Yaşlandırma sonrasında numuneler, referans numuneler ile aynı koşullar altında ve aynı cihazlar kullanılarak, çekme, eğme ve sertlik testlerine tabi tutulmuştur. Böylelikle hem referans numuneler hem de yaşlandırılmış numunelerin mekanik özellikleri kıyaslanmış ve mekanik özellikler üzerindeki değişimler yorumlanmıştır. Üretilen numuneler, yaşlandırma işlemi öncesi ve sonrasında numunelerin ağırlıkları hassas terazi ile ölçülerek, birbirleriyle kıyaslanmıştır. Mekanik testler, referans numuneler üzerinde tahribata yol açacağından ötürü, direkt yaşlandırma işlemine tabi tutulup aynı numuneler üzerinden ölçüm yapmak yerine, deneysel tasarım kapsamında, aynı cihaz ve parametreler kullanılarak, aynı 3B baskı sırasında yaşlanacak numuneler de üretilmiştir. Çizelge 4.3'te, çalışmada kullanılan parametrelere bağlı deney tasarımı gösterilmektedir.

Çizelge 4.3 Çalışmada kullanılan üretim parametreleri.

Malzeme Yapısı	Dolgu Oranı (%)	Duvar Sayısı
PLA+	25	2
PAHT-CF15	50	3
MIX	75	4
	100	

Mekanik testler ve yaşlandırma süreçleri sonrasında numune üzerinde oluşan tahribatları gözlemlemek, numune üzerindeki fiziksel değişimlerden yola çıkarak uygun yorumları yapabilmek bilimsel açıdan oldukça önemlidir. Deneysel süreçlerin kararlı olması açısından birden fazla üretilen mekanik test numuneleri; farklı malzeme kombinasyonu, duvar sayısı ve doluluk oranlarını içermektedir. Bu da numunelerin, benzer renklere sahip olması, makro boyuttaki dış görünüş benzerliği gibi etmenler yüzünden, numunelerin direkt göz ile ayırt edilememesine yol açmaktadır. Bundan ötürü çalışmada, her bir numuneyi tanımlayabilmek amacı ile bir kodlama sistemi geliştirilmiştir. Bu kodlama sistemi sayesinde her bir numuneye bir nevi kimlik numarası tanımlanmıştır. Böylelikle deneysel verilerin tutulması sırasında daha açık bir veri akış süreci sağlanmıştır. Kodlama sistemi deneysel çalışmalar yapılırken, fiziksel olarak alınan veri tablolarının üst ve alt kısmında verilmiştir. Tüm verilerin kaydı için farklı tablolar oluşturulup, kodlama sistemi bu tablonun alt kısmında verilmiştir.

Deneyisel numuneler kodlama ile isimlendirirken;

- İlk harf numunenin hangi malzeme kombinasyonuna sahip olduğunu tanımlamaktadır.

A: PLA+, **B:** PAHT-CF15, **C:** MIX

- Kodlamanın ikinci harfi, numunenin referans numunesi veya yaşlandırma numunesi olduğunu tanımlamaktadır.

R: Referans Numunesi, **U:** Yaşlandırma Numunesi

- Kodlamanın üçüncü harfi ise, üretilen numunenin duvar sayısını tanımlamaktadır.

X: 2 duvar, **Y:** 3 Duvar, **Z:** 4 Duvar

Harflerin devamı olarak sayı ile tanımlamalar yapılmaktadır.

- Burada kodlamanın dördüncü sırasına bir sayı gelmek zorundadır. Bu sayı numunenin doluluk oranı tanımlamakta ve direkt olarak iç doluluk oranına eşit olmaktadır.

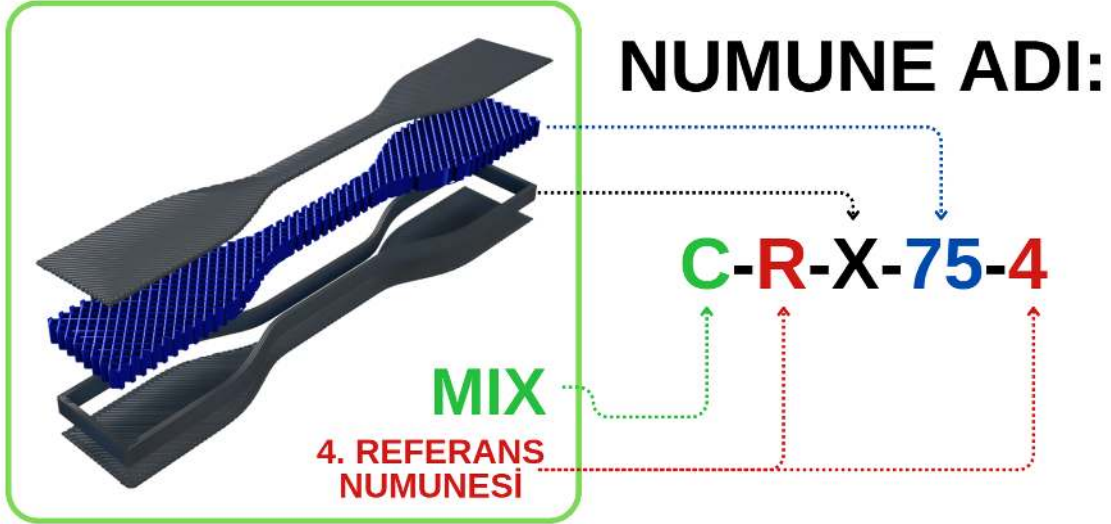
25, 50, 75, 100

Son olarak kodlamanın beşinci sırasına da son sayı gelerek, deneyde kullanılacak numunenin sırasını (anma/belirteç amacı ile) sayısını vermektedir.

1, 2, 3, 4

Kodlama yapılırken ikinci harf öncesinden itibaren, her bir karakter öncesi kısa çizgi (-) işareti kullanılır. Böylece kodlamada kullanılacak beş karakter, özellikler bakımından ayırt edici bir hale gelir.

Örnek: “C-R-Y-75-4” numunesi, MIX kombinasyonunda, Referans numunelerinin, 3 duvar sayısına ve %75 doluluk oranına sahip, dördüncü numunesidir. Şekil 4.8’de numune kodlama örneğinin şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 4.8 Numune kodlama örneğinin şematik gösterimi.

4.6 YAŞLANDIRMA İŞLEMİ VE TEST KABİNİ

ASTM G154, ISO 4892 ve ASTM D4329 standartları, metal olmayan malzemelerin gerçek kullanım ortamlarında küresel güneş ışınımı veya pencere camından gelen güneş ışınımına maruz bırakılması durumunda oluşan aşınma etkilerini simüle etmek amacı ile tasarlanan bir cihazda, numunelerin floresan UV ışınımına, ısıya veya neme maruz bırakılmasına yönelik standartlardır. Bu standartlar uygulama açısından farklı, döngü çeşitlerini ve uygulanacak prosedürleri içinde barındırır. Örneğin, ISO 4892-1 genel olarak metodolojinin temellerine yer verir, ancak ISO 4892-3 standardı direkt olarak UV-A ışınımı altındaki etkiyi göstermek amacıyla uygulanmaktadır. Ancak genel olarak, bu standartları baz olarak hazırlanmış cihaz ve uygulamalar, metal olmayan malzemelerin gerçek kullanım koşullarında maruz kalacağı güneş ışınımı ve sıcaklık etkilerini kontrollü bir şekilde simüle eder ve standartlar endüstride birbirinin muadilleri olarak kullanılırlar (Vogt et al. 2009, ASTM 2023, URL-9, URL-10).

Çalışmada, numunelerin yaşlandırılıp, UV-A ışınım ve termal etkiler altındaki davranışlarının tespiti amacı ile, söz konusu standartlar ile uyumlu çalışabilen, DahoMeter markalı DH-RUV-3 model (Guangdong Hongtuo Instrument Technology Co., Ltd. GuangDong, Çin), 225 litre hacimli UV yaşlandırma kabini kullanılmıştır (Şekil 4.9). Cihazın kabin iç boyutları 600x500x750 mm'dir. Böylelikle büyük hacimli parçaların da yaşlandırılmasına olanak sağlanır (URL-11). Kabinin içinde üst kısma bağlanan, altı adet 340 nm dalga boyuna sahip UVA-340 floresan lamba sayesinde UV ışınımı sağlanmakta; ayrıca kabinin iç yüzeyinin ışığı

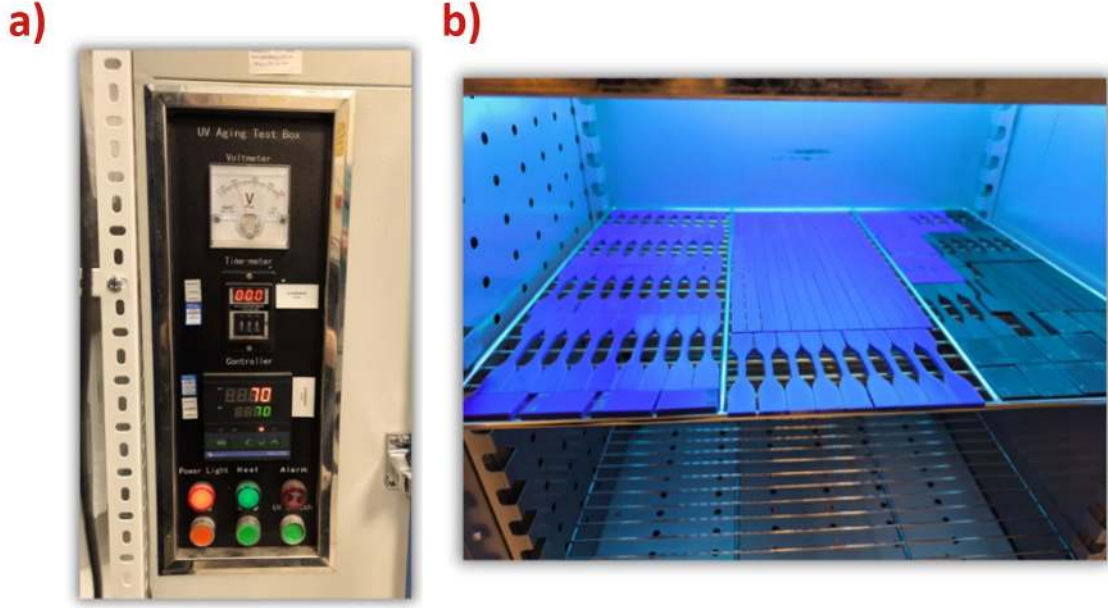
yansıtan bir yapıda olmasından ötürü numunelerin ızgara şeklinde tepsi kullanılarak yerleştirilmesi durumunda, numunelerin alt yüzeylerinin de mümkün olduğunda UV ışınımından etkilenmesi sağlanmaktadır. Cihazın ön kısmında bulunan dijital kontrol paneli (Şekil 4.10) aracılığıyla, kabin iç sıcaklığı ve UV maruziyet süresi ayarlanabilmektedir. Testin uygulanışında, öncelikle istenilen ortam sıcaklığı parametresi belirlenip cihaz üzerinde gerekli ayarlamalar yapılır. Ardından kabinin istenilen sıcaklığa gelmesi ile UV lambalar yakılır ve numuneler üst-üste gelmeyecek şekilde cihazın kabinine yerleştirilir (Şekil 4.10). Daha sonra kontrol paneli üzerindeki sayaç yardımı ile süre ayarlanır. Ayarlanan süre özelindeki çevrim bittikten sonra, cihaz otomatik olarak UV lambalarını kapatmakta, iç ortam sıcaklığını düşürmekte ve kullanıcı ses ile uyarılarak yaşlandırma işlemi bitirmektedir.

Çalışmada, üretilen numuneler ASTM G154 (ASTM 2023) ve ASTM D4329 (ASTM 2013) standartları referans alınarak, özel bir hızlandırılmış yaşlanma protokolüne tabi tutulmuştur. Yaşlandırma işlemi, 1 haftalık (168 saat) bir döngüde, 70 °C kabin sıcaklığında, 340 nm dalga boyu ve 0.89 W/m² ışınım şiddetinde UVA-340 lambalar kullanılarak, kesintisiz bir şekilde gerçekleştirmiştir.

Yapılan UV maruziyet testlerinde nem ve yoğuşma döngüsü uygulanmamıştır. Böylelikle yaşlandırma işlemi, higroskopik etkilerden uzak bir şekilde, fotokimyasal bozulmaların öne çıktığı, sıcak ve kurak havalara sahip çöl vb. iklim ve doğal ortam koşullarını simüle etmek amacıyla 70°C üst sınır sıcaklığında, agresif etkileri öne çıkarır bir biçimde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.9 Kullanılan yaşlandırma kabini.



Şekil 4.10 a) Yaşlandırma kabini kontrol paneli, b) Numunelerin kabine yerleştirilmesi.

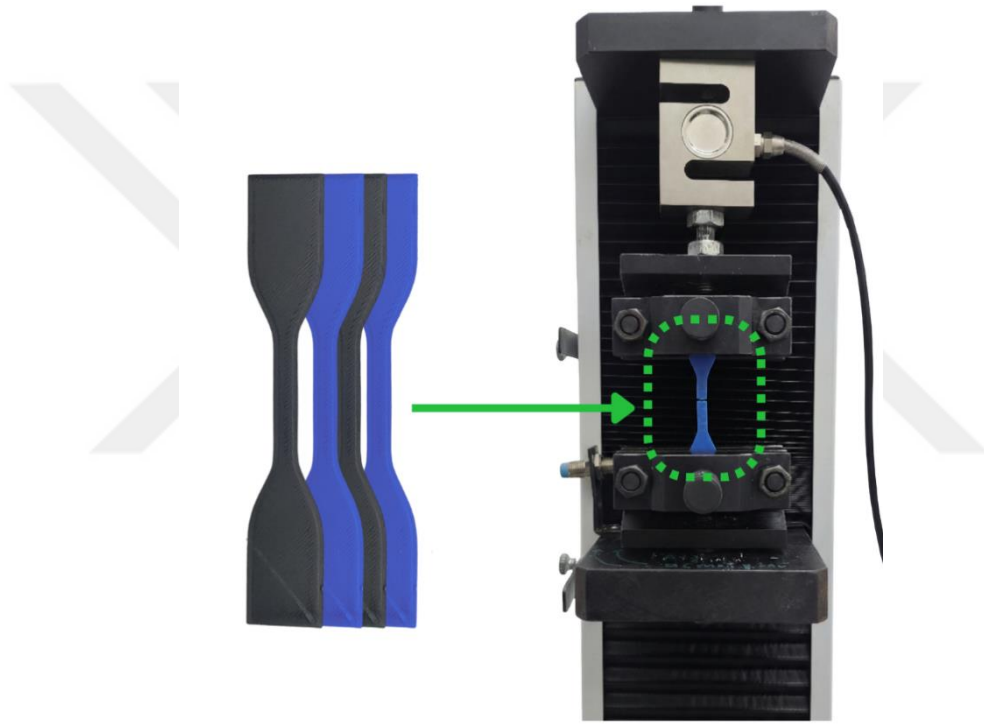
4.7 NUMUNELERE UYGULANAN MEKANİK TESTLER

4.7.1 Çekme Testi

Çekme testi, farklı sektörlerde yaygın olarak kullanılan malzemelerin temel mekanik özelliklerinin belirlendiği bir testtir. Çekme testinde, standartlara uygun olarak üretilen numuneler, kopma noktasına ulaşana kadar kademeli olarak artan bir gerilme kuvvetine tabi tutulur. Test sırasında uygulanan kuvvet ve numunenin ortaya çıkan uzama ve deformasyon miktarı ölçülür. Bu ölçümler sayesinde, malzemenin maksimum çekme dayanımı, akma dayanımı, elastisite modülü ve kopma uzaması gibi önemli mekanik özelliklerin belirlenmesini sağlar (Aydemir vd. 2015, Karalar 2023). Çekme testlerinde, cihazın çenelerine sabitlenen numune, kopmaya uğrayana kadar, sabit hızla ve statik bir yük tek çeneden eksenel yönde çekilir. Kopmanın ardından gerekli veriler kaydedilerek test tamamlanmış olur (Nurazzi et al. 2021, URL-12).

Çalışmada üretilen numuneler, ASTM D638 (URL-13) standartlarında tanımlanan, Tip 4 (Type IV) numune tipi esas alınarak üretilmiştir. Literatürde, 3B baskı ile üretilmiş numunelerin mekanik özelliklerinin tespit edilme aşamasında, yaygınca bu standart kullanılmaktadır (Laureto et al. 2018, Hasan et al. 2024, Tao et al. 2020, Anand and Shivraj 2018). Çekme testlerinin tutarlı ve karşılaştırmalı verilere dayanması amacıyla; her bir numune tipinden dört

adet çekme testi numunesi üretilmiştir. 3B baskı sonrasında numuneler hava almayan plastik kilitli poşetlerde, oda sıcaklığında ve ışıktan uzak bir şekilde saklanmıştır. Böylelikle testler öncesinde numunelere etkiyen dış ortam faktörlerinin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan numunelerin, yaşlandırma işlemi öncesi ve sonrasında mekanik özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla çekme testi yapılmıştır. Numune hazırlığı sonrasında yapılan çekme testleri, ASTM D638 standartlarına uygun olarak 5 kN kapasiteli, WDW-5 model universal test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.11). Çekme testleri oda sıcaklığında, 1 mm/dakika hızında ve her bir numune tipi için 4 tekrarlı olacak şekilde yapılmıştır.



Şekil 4.11 Çekme numunesi ve test cihazı.

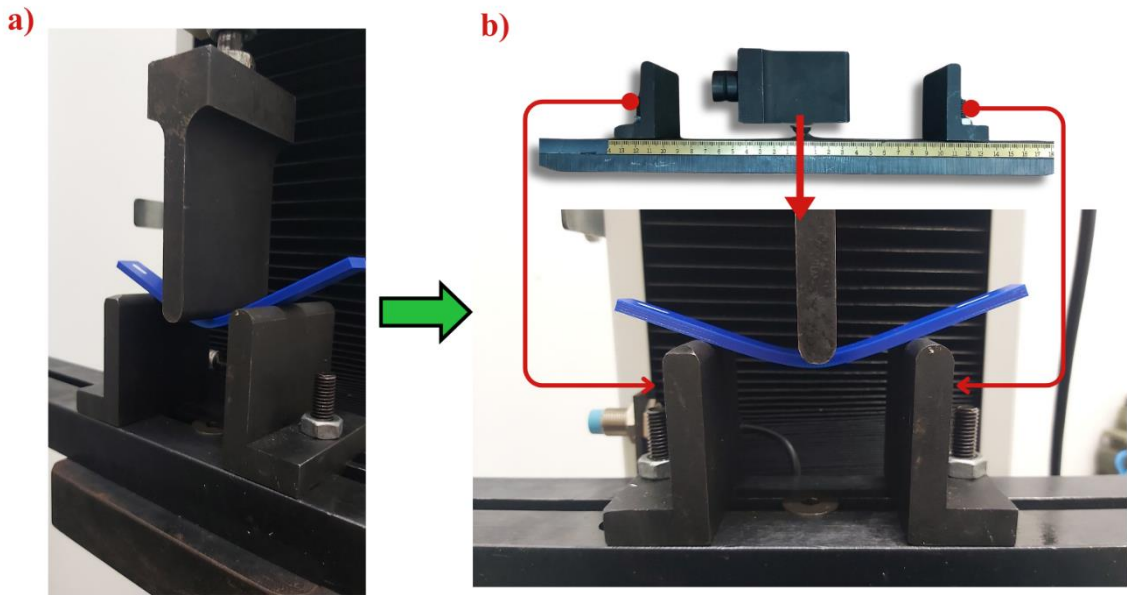
Çalışma kapsamında üretilen tüm mekanik test numuneleri, test standartlarına sadık kalınarak, Autodesk Fusion adlı bilgisayar destekli tasarım programı kullanılarak tasarlanmıştır. Ardından STL formatına çevrilerek 3B yazıcıya aktarılmıştır.

4.7.2 Üç Nokta Eğme Testi

Üç nokta eğme testleri, malzemelerin eğilme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılır. Bu testle elde edilen en yaygın sonuçlar, gerilim-şekil değiştirme eğrisindeki başlangıç eğiminden hesaplanan eğilme modülü, eğilme dayanımı ve numune kırılma anındaki eğilme gerinimidir.

Üç nokta eğme test düzeneğinde, dikdörtgen kesitli bir numune, kesit kalınlığının 16 katına sahip iki paralel destek üzerine eşit mesafeli olarak yerleştirilir. Yerleştirilen numunenin tam orta noktasından, sabit hızda ve kontrollü bir şekilde, tek bir ekseninde yük uygulanır (URL-14, URL-15).

Çalışmada, çekme testinde kullanılan üretim aşamaları tekrarlanarak, ASTM D790 standardına uygun üç nokta eğme test numuneleri üretilmiştir. Bu standart 3B baskılı numunelerin eğme testlerinin yapılması amacıyla literatürde yaygınca kullanılmaktadır (Nugroho et al. 2018, Altun ve Sekban 2023). Çalışmada kullanılan numunelerin, yaşlandırma işlemi öncesi ve sonrasında maksimum eğme kuvvetlerini tespit etmek amacıyla, ASTM D790 standardında üç nokta eğme testi yapılmıştır. Uygulanan bu testler 5 kN kapasiteli WDW-5 model universal cihaza (Şekil 4.12) eğme testi için özel üretilmiş bir, eğme test aparatı bağlanarak (Şekil 4.12) 5 mm/dk hızında gerçekleşmiştir. Ayrıca aparatdaki alt desteklerin aralığı numune kalınlığının 16 katı olacak şekilde (3.5 mm x16), 56 mm olarak ayarlanmıştır. Eğme testleri de çekme testi gibi her numune türüne özel dört tekrarlı olarak uygulanmıştır. Bunlara ek olarak çekme testlerinde uygulanan malzeme muhafaza prosedürleri eğme testlerinde de korunmuştur.



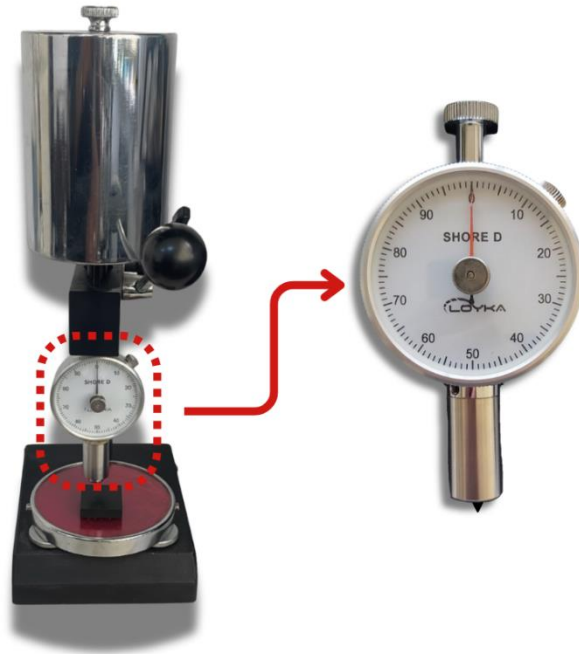
Şekil 4.12 a) Üç nokta eğme testi, b) Eğme testi aparatı.

4.7.3 Sertlik Testleri ve Kütle Ölçümü

Katı bir malzemenin sertliği, sabit bir basınç kuvveti uygulandığında malzemenin yüzeyinde deformasyona yol açan, girinti, çizilme, kesilme, mekanik aşınma veya bükülme gibi farklı biçimlerde kalıcı bir şekil değişikliğine karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir.

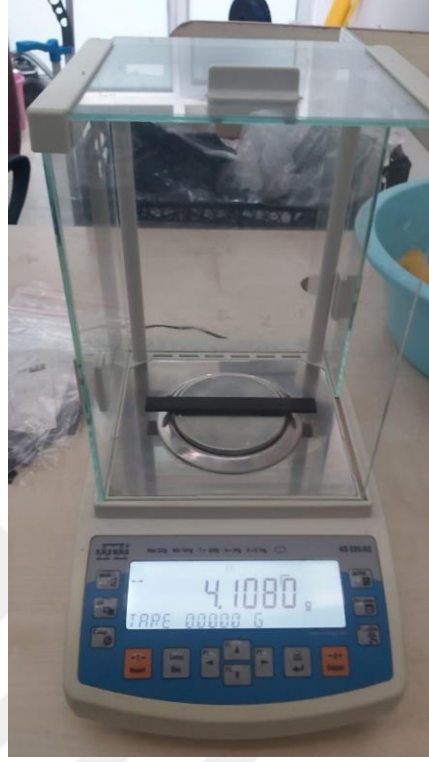
Metallerde, seramiklerde ve çoğu polimerde sertlik, yüzeyin plastik deformasyonu ile ilişkilidir. Sertlik aynı zamanda mukavemet, süneklik ve yorulma direnci gibi diğer mekanik özelliklerle de yakın bir ilişkiye sahiptir. Bu gibi nedenlerden ötürü sertlik testi, endüstride basit, hızlı ve nispeten ucuz bir malzeme kalite kontrol yöntemi olarak kullanılabilir. Malzeme yapısı özelinde farklı tip ve farklı ölçeklerde sertlik ölçüm testleri mevcuttur (Broitman 2017). Polimer malzemelerde ise malzemenin batmaya gösterdiği direnci hesaplayarak, sertliği ölçmek amacı ile Shore ölçüm yöntemi kullanılmaktadır. Ucu iğneli durometreler parça yüzeyine batırılarak durometre üzerinden belirli Shore ölçeğinde sertlik değeri okunur. Shore A ölçeği daha yumuşak ve kauçuk benzeri polimerler için kullanılırken, Shore D ölçeği daha sert polimerlerin sertlik ölçümü için kullanılır (McKeen 2016, Ulutaş vd. 2019).

Çalışmada, numunelerin yaşlandırma öncesi ve sonrasındaki sertlik değerinin ölçülmesi amacıyla, çekme ve eğme testleri ile benzer şekilde, literatürdeki örneklere uygun olarak sertlik ölçüm numuneleri üretilmiştir. Bu numunelerin sertlik ölçümleri ASTM D2240-15 standartlarında bir Shore D durometresi (Loyka, Shenzhen Yibai Network Technology Co., Ltd., Shenzhen, Çin) kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.13). Her numune tipinin üst yüzeyinin beş farklı noktasından sertlik ölçümleri alınmış ve ortalama değerler hesaplanıp, kaydedilmiştir.



Şekil 4.13 Sertlik ölçümü ve Shore D durometresi.

Ayrıca, yaşlandırma testine tabi tutulan mekanik test numunelerinin kütleleri, işlem öncesi ve sonrasında Radwag AS 220 R2 PLUS (RADWAG Balances and Scales, Radom, Polonya) analitik terazi (Şekil 4.14) kullanılarak kütleleri ölçülmüş ve değişimler kaydedilmiştir.



Şekil 4.14 Analitik terazi ile kütle ölçümü.

BÖLÜM 5

BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1 REFERANS NUMUNELERİN TEST SONUÇLARI

5.1.1 Referans Numunelerin Çekme Özellikleri

Yapılan çekme testleri sonucunda, numunelerin üretim parametrelerinden; doluluk oranı ve duvar sayısının, mekanik özellikler üzerinde etkili bir faktör olduğu görülmüştür. Referans (yaşlanmamış) numuneler birbirleriyle kıyaslandığında (Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2), duvar sayısının ve iç doluluk oranının artışının çekme mukavemetini büyük oranda arttırdığı görülmüştür. Bunun temel sebebinin kesit alanına düşen malzeme miktarının artarak, mukavemeti iyi yönde arttırması olduğu düşünülmektedir.

Referans numunelerin tamamı incelendiğinde, en yüksek çekme mukavemeti 3 duvarlı ve %100 iç doluluktaki yapıda olan PAHT-CF15 numunelerde (64.41 MPa) elde edilmiştir. Ayrıca 4 duvarlı ve %100 iç doluluğa sahip numunelerde de sonuç yakın olup, en yüksek ikinci mukavemet değeri elde edilmiştir (64.01 MPa).

MIX yapıdaki numunelerin çekme mukavemetleri %50 doluluktaki numuneler haricinde, genel olarak PLA+ ve PAHT-CF15 numunelerin mukavemetleri arasında seyretmiştir (Şekil 5.1). Bu sonuçlarla birlikte, çoklu malzemeleri optimize parametrelerle üretmenin çekme mukavemetlerini etkilediği ve istenilen çekme mukavemetlerinde bu yapıların kullanımının uygun olduğu düşünülmektedir.

Ayrıca, uzama yüzdeleri ve elastisite modülleri kıyaslandığında, PAHT-CF15 numuneler ve MIX numunelerde elastisite modüllerinin yüksek bulunduğu görülmüştür.

Çizelge 5.1 Referans (yaşlanmamış) numunelerin çekme mukavemetleri.

Referans (yaşlanmamış) Numunelerin Çekme Mukavemetleri Rm (MPa)				
Duvar Sayısı	Doluluk Oranı	PLA+	PAHT-CF15	MIX
2 DUVAR	%25	25.34	28.60	28.19
	%50	26.82	24.60	28.54
	%75	32.83	32.49	34.80
	%100	44.19	52.59	49.38
3 DUVAR	%25	35.44	41.05	40.98
	%50	36.54	35.66	39.78
	%75	38.83	53.62	51.76
	%100	46.26	64.41	54.68
4 DUVAR	%25	40.28	49.20	46.95
	%50	40.78	46.58	48.20
	%75	44.46	56.63	49.87
	%100	49.99	64.01	55.75

Çizelge 5.2 Referans (yaşlanmamış) numunelerin çekme testi verileri.

Referans (yaşlanmamış) Numunelerin Çekme Testi Veri Tablosu										
NUMUNE TİPİ		Rm (MPa)			Et (MPa)			%Uzama		
Duvar Sayısı	Doluluk Oranı	PLA+	PAHT-CF15	MIX	PLA+	PAHT-CF15	MIX	PLA+	PAHT-CF15	MIX
2 DUVAR	%25	25.34	28.60	28.19	769.13	766.75	1009.47	4.08	5.36	5.48
	%50	26.82	24.60	28.54	696.52	586.13	893.67	3.41	6.74	4.53
	%75	32.83	32.49	34.80	604.05	816.98	983.50	3.61	6.74	4.15
	%100	44.19	52.59	49.38	801.70	807.17	1066.48	5.46	5.90	4.77
3 DUVAR	%25	35.44	41.05	40.98	1041.55	731.83	1115.43	5.87	7.25	6.57
	%50	36.54	35.66	39.78	941.20	756.46	964.90	4.87	6.02	5.38
	%75	38.83	53.62	51.76	833.67	876.10	1150.40	4.44	5.17	6.53
	%100	46.26	64.41	54.68	796.73	882.58	1240.13	6.25	5.34	5.98
4 DUVAR	%25	40.28	49.20	46.95	887.38	1118.01	1032.88	5.76	7.67	6.58
	%50	40.78	46.58	48.20	899.82	791.00	1129.90	4.87	6.67	7.28
	%75	44.46	56.63	49.87	735.72	967.17	1009.47	4.32	6.56	6.93
	%100	49.99	64.01	55.75	798.85	913.41	893.67	5.15	5.25	7.13

Referans PLA+ numuneler için;

- %25 doluluk oranındaki PLA+ numuneler kıyaslandığında, 2 duvarlı numunenin çekme dayanımının 25.34 MPa, 3 duvarlı numunelerin çekme dayanımı 35.44 MPa ve 4 duvarlı numunenin ise 40.28 MPa olduğu görülmektedir. PLA+ numunelerde duvar sayısının

2'den 4'e çıkarılması, çekme mukavemetinde yaklaşık olarak %59 artışa neden olmuştur. Böylelikle, PLA+ numuneler üretilirken duvar sayısı artışının net bir şekilde parça mukavemetinde iyileştirmeye neden olduğu söylenebilir.

- Tüm duvar sayılarında ortak olmak üzere, parçaların iç doluluk oranı artışının çekme mukavemetlerini arttırdığı görülmektedir. PLA+ numunelerde en yüksek çekme mukavemetinin (49.99 MPa) %100 doluluk ve 4 duvarlı numunelerde olduğu görülmektedir. Böylece hem duvar sayısı artışı hem de doluluk oranı artışıyla beraber malzeme parçanın daha rijit yapıda olacağı ve yapısındaki boşluk etkilerinin azalacağından ötürü, kesit alanına düşecek malzeme miktarının artması ile parçaların çekme mukavemetlerinde artışa sebep olacağı söylenebilir.
- 2 duvar ve %75 doluluğa (32.83 MPa ve 6.4g) sahip numunelerin, 3 duvar ve %25 doluluğa (35.44 MPa ve 4.67g) ve %50 doluluğa sahip (36.54 MPa ve 5.68g) numunelere oranla, çekme mukavemetlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Düşük doluluk oranına ve ağırlığa sahip olan numunelerde duvar sayısının artırılması ile daha performanslı ve optimize yapıların oluşturulabileceği düşünülmektedir.

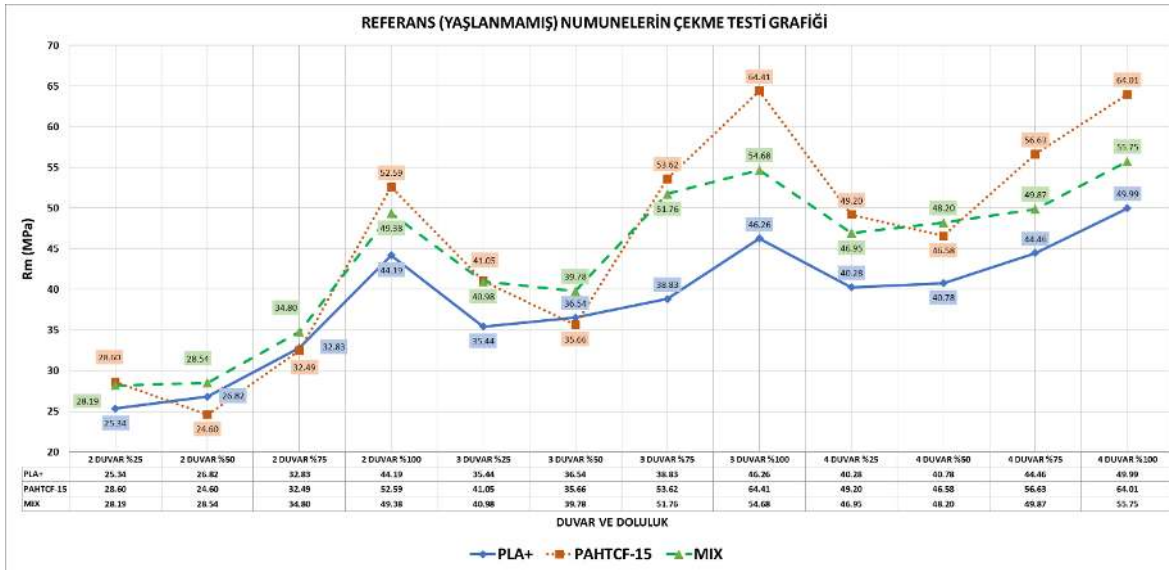
Referans PAHT-CF15 numuneler için;

- PAHT-CF15 numunelerde en yüksek çekme dayanımı, 3 duvarlı ve %100 doluluktaki numunelerde (64.41 MPa) gözlemlenmiştir. Aynı doluluk oranında, 4 duvarlı numunelerin çekme dayanımı ise 64.01 MPa bulunmuştur.
- Çalışmada 3 duvarlı ve %100 doluluktaki çekme numunelerin yaşlandırma öncesi kütleleri 6.43g, 4 duvarlı numunelerin ise 6.88 g olarak ölçülmüştür. Böylece, daha hafif parçaların üretilmesi (çekme mukavemetindeki bir miktar düşüğe rağmen) mümkün görülmektedir.
- 2 duvarlı ve %100 doluluktaki numunelerde çekme mukavemeti 52.59 MPa iken, aynı doluluk oranındaki 3 duvarlı numunelerde 64.41 MPa ve 4 duvarlı numunelerde 64.01 MPa olarak ölçülmüştür. Bu da duvar sayısını 2'den 3 veya 4'e çıkarmanın yaklaşık olarak %22 oranında çekme dayanımını iyileştirdiğini göstermektedir.
- PAHT-CF15 numuneleri arasında, 2 duvar ve %50 doluluk oranına sahip numunelerde çekme mukavemeti 24.60 MPa olarak ölçülmüştür. Bu değer, PAHT-CF15 numunelerin hem doluluk oranı hem de duvar sayıları ile kıyaslandığında en düşük çekme mukavemeti değeridir. Ayrıca PAHT-CF15'in tüm duvar sayılarında %50 doluluk oranında, çekme mukavemeti düşmüştür. Tüm veriler değerlendirildiğinde, PLA+ ve PAHT-CF15 numunelerde doluluk oranı ve duvar sayısı artışının, çekme

mukavemetinde pozitif bir artışa sebep olması beklenmektedir. Ancak PAHT-CF15 için %50 doluluğa sahip numunelerde mukavemet değeri negatif etkilenebilir. Yapılan çekme testleri sırasında tüm numuneler için aynı prosedür uygulanıp numunelerin tamamı 4 tekrarlı olarak test edilmiş, ortalaması alınıp tablolara işlenmiştir. Numunelerin üretimi sırasında numunelerde gözle görülür bir hataya rastlanmamıştır.

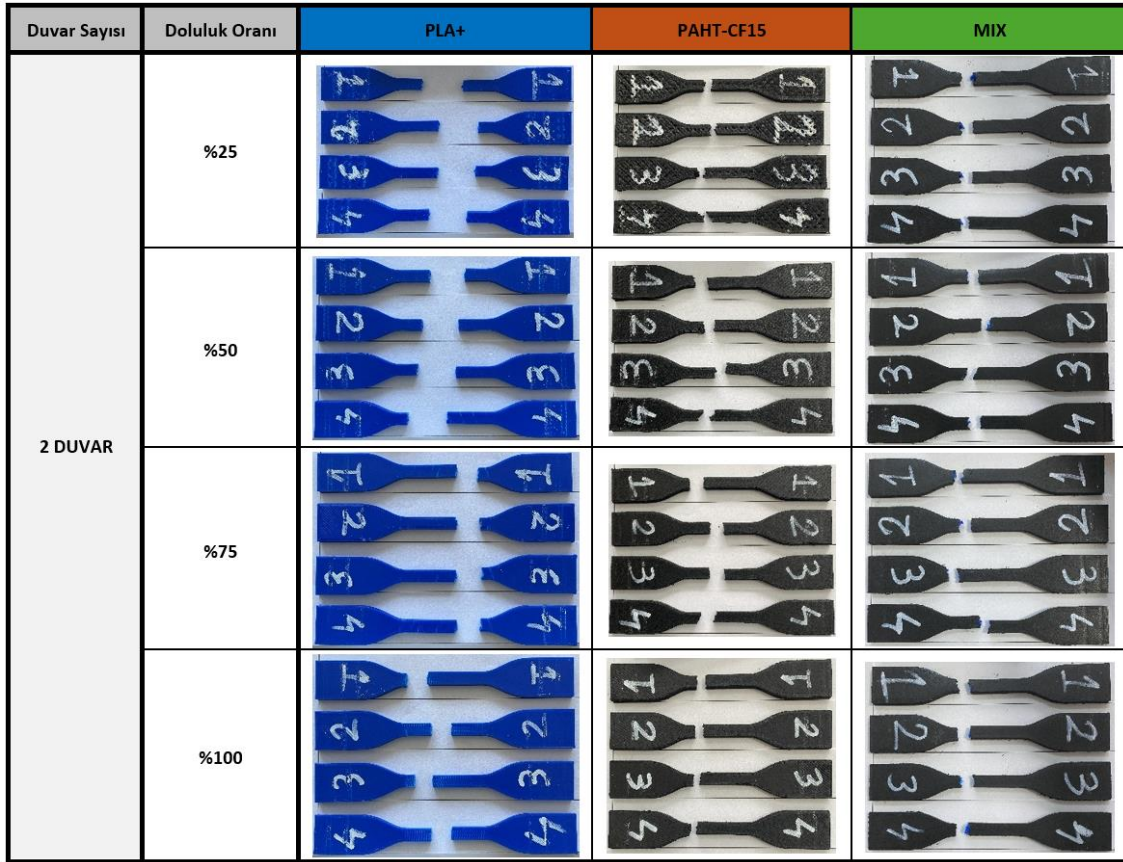
Referans MIX numuneler için;

- PLA+ ve PAHT-CF15'in birlikte kullanıldığı MIX yapılarda, en yüksek çekme mukavemeti, 4 duvar ve %100 dolulukta (55.75 MPa) ölçülmüştür. Ayrıca 3 duvar ve %100 dolulukta numunelerde de çekme mukavemeti en yüksek ikinci değer (54.68 MPa) olarak, çok yakın bir değerdir. Bu sayede, tam dolulukta yapılarda PAHT-CF15'ten oluşan duvar sayısını azaltmak, maliyet açısından tercih edilebilir.
- Özellikle 2 duvardan 3 duvara geçildiğinde, mukavemet değerlerinin kesin bir şekilde arttığı görülmektedir. Örneğin %25 doluluk oranına sahip 2 duvarlı numunelerin çekme mukavemeti 28.19 MPa iken, 3 duvarlı numunelerde bu değer 40.98 MPa'a çıkarak, yaklaşık olarak %45 oranında artmıştır. Bu durum duvar sayısı ve buna bağlı olarak üst ve alt katmanların artışının, dış kabuk yapısını oluşturan PAHT-CF15 etkisi ile, parçaların mukavemetlerindeki artışları net bir şekilde göstermektedir.
- PLA+ numunelerde karşılaşılan duruma benzer şekilde; 2 duvar ve %75 dolulukta MIX numuneler 34.80 MPa çekme mukavemeti gösterirken, daha az iç doluluğa sahip, 3 duvarlı ve %25 dolulukta MIX numuneler 40.98 MPa çekme mukavemeti göstermiştir. Böylece, çoklu malzeme yapılarında doluluk oranını artırmak yerine PAHT-CF15'ten oluşan bir duvar daha ekleyerek daha yüksek dayanımlı ve hafif parçaların üretilmesine olanak sağlamaktadır.
- Genel olarak MIX numunelerin çekme mukavemetleri, eşdeğer parametrelerdeki PLA+ ve PAHT-CF15 numunelerin arasında seyretse de, %50 doluluk oranlarında PAHT-CF15'ten yüksek çıktığı görülmektedir.



Şekil 5.1 Referans (yaşlanmamış) numunelerin çekme mukavemetlerinin gösterimi.

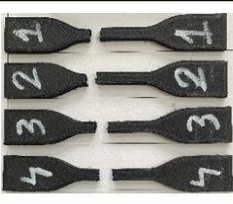
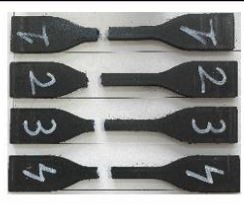
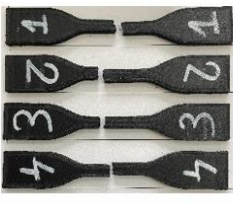
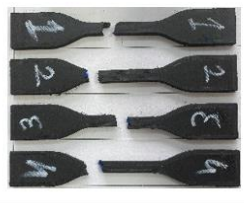
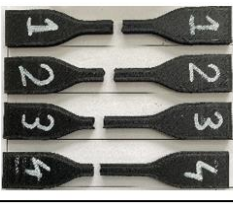
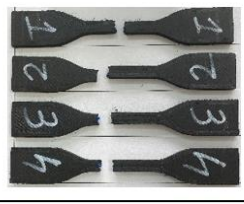
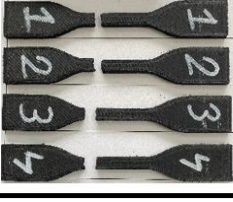
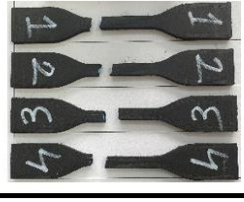
Şekil 5.2’de bütün doluluk oranları için PLA+, PAHT-CF15 VE MIX numunelerinin 2 duvar, Şekil 5.3’te 3 duvar ve Şekil 5.4’te 4 duvar çekme sonrası görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.2 2 duvara sahip referans numunelerin çekme sonrası görüntüleri.

Duvar Sayısı	Doluluk Oranı	PLA+	PAHT-CF15	MIX
3 DUVAR	%25			
	%50			
	%75			
	%100			

Şekil 5.3 3 duvara sahip referans numunelerin çekme sonrası görüntüleri.

Duvar Sayısı	Doluluk Oranı	PLA+	PAHT-CF15	MIX
4 DUVAR	%25			
	%50			
	%75			
	%100			

Şekil 5.4 4 duvara sahip referans numunelerin çekme sonrası görüntüleri.

5.1.2 Referans Numunelerin Eğme Özellikleri

Eğme testi sonuçları incelendiğinde (Çizelge 5.3 ve Şekil 5.5), malzeme türünün ve üretim parametrelerinin malzemelerin eğilme davranışları üzerinde belirleyici faktörler olduğu görülmüştür.

Çekme mukavemeti sonuçlarında en yüksek performansı gösteren PAHT-CF15 numunelerinin genel olarak, eğilme kuvvetleri PLA+'a kıyasla düşük çıkmıştır. Tüm numuneler incelendiğinde en düşük eğilme kuvveti (F_{max}) 13.68 N olarak 2 duvar ve %50 doluluğa sahip PAHT-CF15 numunelerde bulunmuştur.

Numunelerin neredeyse tamamında yüksek eğilme kuvvetleri, PLA+ ve PAHT-CF15'in bir arada kullanıldığı MIX numunelerde görülmüştür. 4 duvar ve %25 doluluk parametrelerinin kullanıldığı yapılarda; PLA+ numunelerin eğilme kuvveti (105.76 N) çok az bir fark ile MIX numuneleri (103.98 N) geçmiştir.

En yüksek eğilme kuvveti, 180.6 N ile 2 duvarlı ve %100 doluluktaki MIX numunelerde ölçülmüştür. Ayrıca aynı dolulukta 3 duvarlı numunelerin eğilme kuvvetleri de bu değere yakın olarak 178.57 N değerinde ölçülmüştür. Ancak 4 duvarlı numunelerde, en yüksek eğme kuvvetine kıyasla, yaklaşık %16 oranında düşüş gözlemlenmiştir (150.94 N). Bu durum da fonksiyonel parça üretiminde duvar sayısının arttırılmasının, direkt olarak eğilme mukavemetini iyi yönde etkileyen bir faktör olmadığını, ancak parametreler optimize edilirse maksimum verimde numunelerin elde edileceğini göstermektedir.

Referans PLA+ numuneler için;

- PLA+ numunelerde en yüksek eğilme kuvveti, 4 duvarlı ve %100 doluluktaki numunelerde gözlemlenmiştir (138.42 N).
- PLA+ numunelerde, duvar sayısının sabit kalarak doluluk oranının artması ile eğilme kuvvetleri artmıştır. Buna ek olarak doluluk oranının sabit kalıp, duvar sayısının artış gösterdiği parametrelerde de eğilme kuvvetleri istikrarlı bir şekilde arttığı görülmektedir. Böylelikle PLA+ parçaların, çalışmadaki parametrelerin kullanılarak üretilmesi sırasında, duvar sayısı ve doluluk oranı açısından doğru orantılı bir şekilde eğilme kuvvetlerini iyileştirebileceği söylenebilir.

Referans PAHT-CF15 numuneler için;

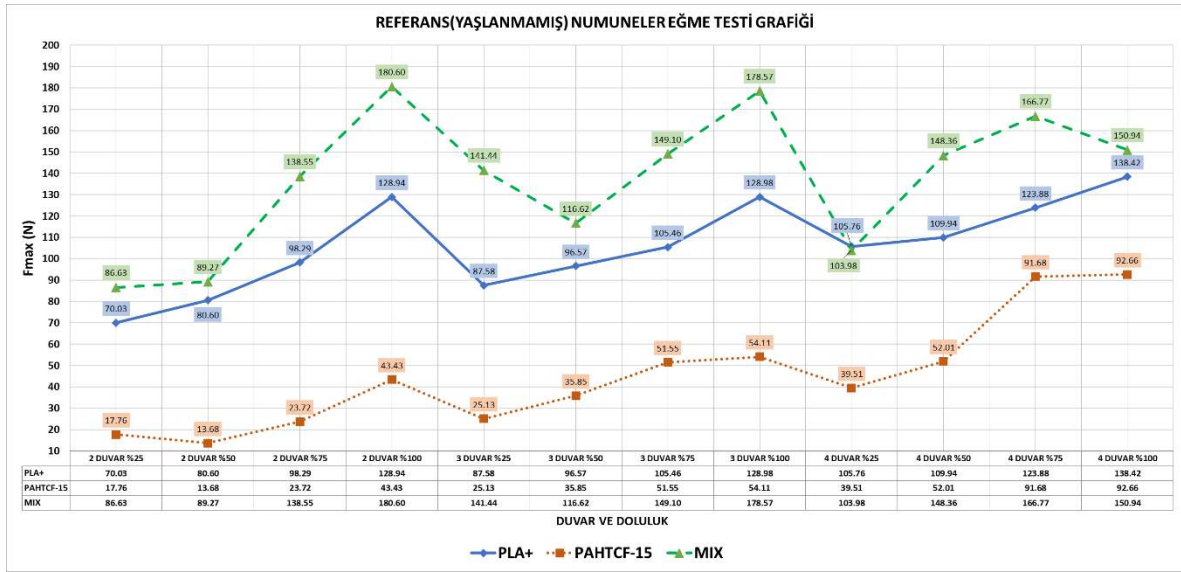
- PAHT-CF15 numunelerin eğme testi sonuçlarında, malzemenin eğilme kuvvetlerindeki artışın, doluluk oranından ziyade duvar sayısına bağlı olarak arttığı görülmektedir. Özellikle 4 duvarlı numunelerde eğilme kuvveti, 2 ve 3 duvarlı numunelere kıyasla belirgin bir artış sergilemiştir.
- En yüksek eğilme kuvveti, 4 duvarlı ve %100 doluluktaki numunelerde (92.66 N) görülürken, en düşük eğilme kuvveti 2 duvarlı ve %50 doluluktaki numunelerde (13.68 N) görülmüştür.
- Tüm yapılarda duvar sayısı sabit kalıp doluluk oranı arttıkça eğilme kuvvetleri artmıştır. Ancak, 2 duvarlı ve %50 doluluktaki numunelerin eğilme kuvvetleri, geri kalan doluluk oranlarındaki kuvvetlerden düşük çıkarak, tıpkı çekme testlerinde karşılaşıldığı gibi bir azalma görülmüştür.

Referans MIX numuneler için;

- MIX numunelerde en yüksek en yüksek eğilme kuvvetine (180.6 N), 2 duvarlı ve %100 doluluktaki numunelerde rastlanmıştır. Duvar sayısı 4'e çıkarılıp doluluk oranı sabit tutulduğunda ise eğilme kuvvetinde %16.42 oranında bir azalma görülmüştür (150.94 N). Bu durum, tam doluluğa sahip iki malzemenin kullanıldığı yapılarda; duvar sayısının artması ile parçaların esneklik yapısını kaybedip daha rijit bir hale gelmesi, bunun da eğilme kabiliyetleri üzerinde bir düşüşe yol açması ile yorumlanabilir.
- %75 doluluğa sahip numuneler, duvar sayıları arttıkça MIX numunelerin maksimum eğilme kuvveti olan 180.6 N değerine yakın sonuçlar göstermiştir (2 duvar: 138.55 N, 3 duvar: 149.10 N, 4 duvar: 166.77 N). Buna ek olarak 3 duvarlı ve %25 doluluktaki numuneler de 144.44 N gibi oldukça yüksek bir eğilme dayanımı göstermiştir. Bu sonuçlar, optimum parametreler kullanılarak, daha hafif ve maliyeti düşük parçaların üretilebileceğini göstermektedir.
- 2 duvarlı numuneler arasında %50'den (89.27 N) %75 doluluk oranına (138.55 N) geçişte %55.20 oranında bir artış görülmüştür. Bu da 2 duvarlı numune üretiminde %75 doluluğunu alt sınır olarak belirlemek için önem taşır.

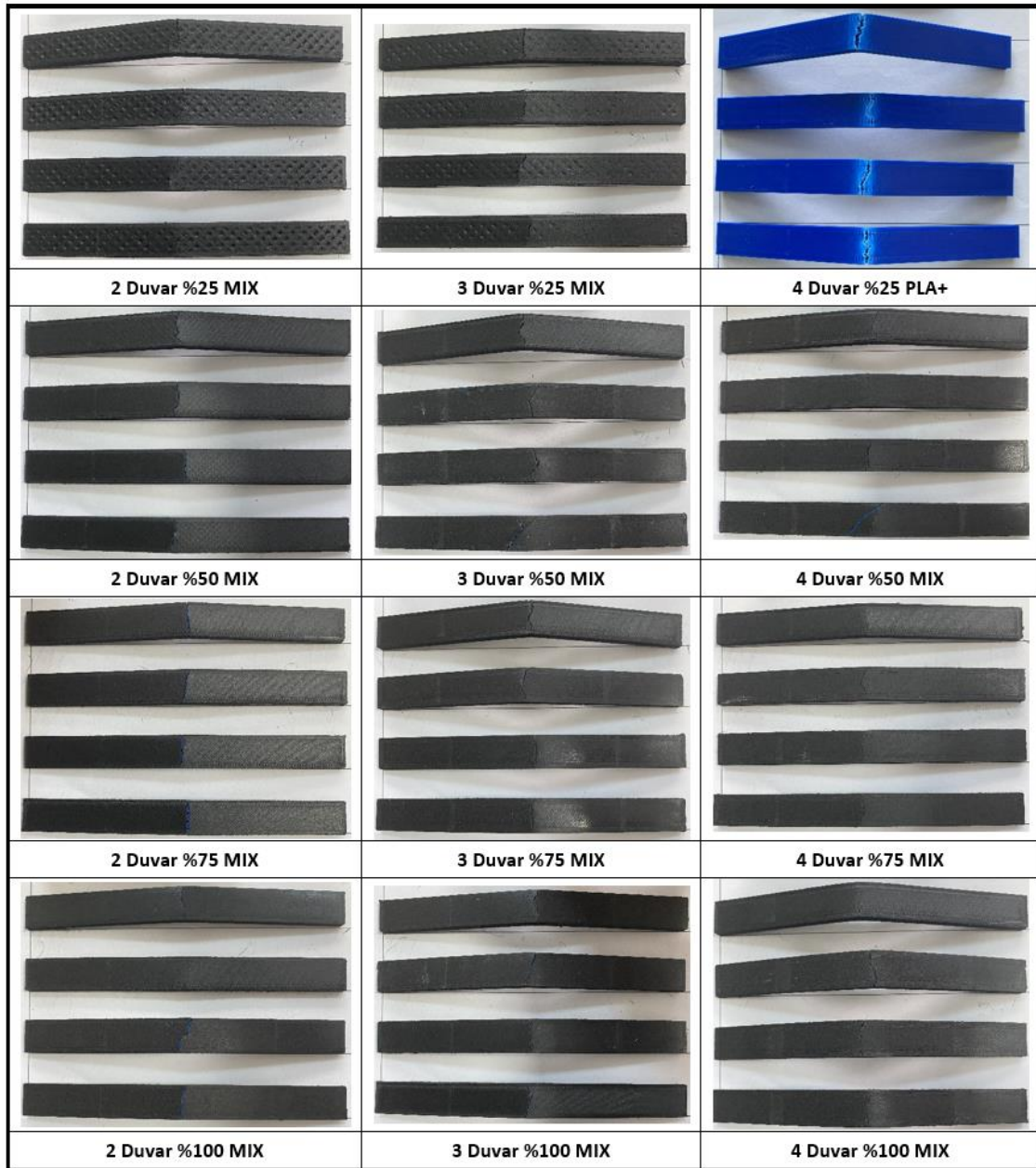
Çizelge 5.3 Referans (yaşlanmamış) numunelerin eğilme kuvvetleri.

Referans (yaşlanmamış) Numunelerin Eğilme Kuvvetleri Fmax (N)				
Duvar Sayısı	Doluluk Oranı	PLA+	PAHT-CF15	MIX
2 DUVAR	%25	70.03	17.76	86.63
	%50	80.60	13.68	89.27
	%75	98.29	23.72	138.55
	%100	128.94	43.43	180.60
3 DUVAR	%25	87.58	25.13	141.44
	%50	96.57	35.85	116.62
	%75	105.46	51.55	149.10
	%100	128.98	54.11	178.57
4 DUVAR	%25	105.76	39.51	103.98
	%50	109.94	52.01	148.36
	%75	123.88	91.68	166.77
	%100	138.42	92.66	150.94



Şekil 5.5 Referans (yaşlanmamış) numunelerin eğme kuvvetlerinin gösterimi.

Şekil 5.6'da en yüksek eğme kuvvetlerine sahip numunelerin eğme sonrası görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.6 En yüksek eğme kuvvetine sahip referans numunelerin görüntüleri.

5.1.3 Referans Numunelerin Sertlik Özellikleri

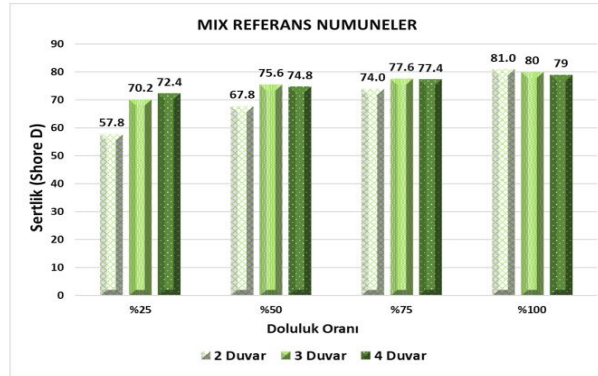
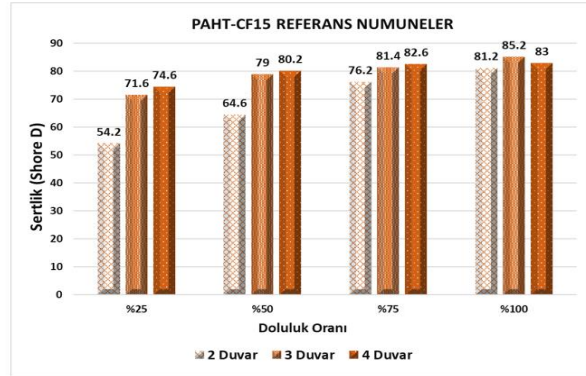
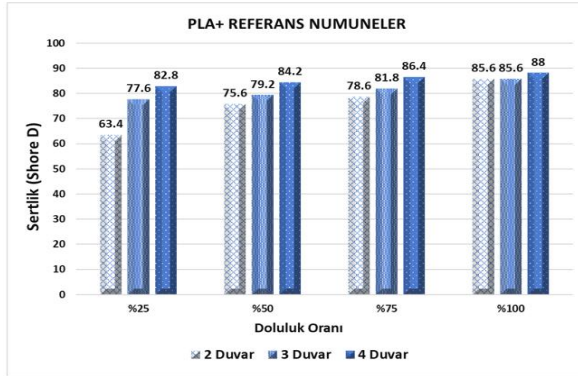
- Referans (yaşlanmamış) numunelerin sertlik değerleri incelendiğinde (Çizelge 5.4 ve Şekil 5.7), tüm malzeme yapılarında en düşük sertlik değerleri, %25 doluluktaki numunelerde görülmüştür (PLA+: 63.4, PAHT-CF15: 54.2, MIX: 57.8). Doluluk oranının artışı ile, parça sertliğinin artması, EYM ile üretilen numunelerde beklenen bir durumdur (Neccaroğlu ve Karamanlı 2025).
- Numunelerin tamamında doluluk oranı ve duvar sayısı artışının, sertliği doğru oranda arttırdığı görülmektedir. Bu durumun malzemelerin, ızgara desenindeki dolgu yapısına

sahip numunelerin içyapısında oluşan boşlukların, parça yüzeyinden alınan sertlik değerlerine etki ettiği söylenebilir.

- Referans numuneler malzeme bazında kıyaslandığında; en yüksek sertlik değerlerine, tüm duvar ve doluluk parametrelerinde sırasıyla PLA+, PAHT-CF15 ve MIX numunelerinde ulaşılmıştır.

Çizelge 5.4 Referans (yaşlanmamış) numunelerin sertlik değerleri.

Referans (yaşlanmamış) Numunelerin Sertlik Ölçüm Tablosu				
Numune Tipi		Sertlik (Shore D)		
Duvar Sayısı	Doluluk Oranı	PLA+	PAHT-CF15	MIX
2 DUVAR	%25	63.4	54.2	57.8
	%50	75.6	64.6	67.8
	%75	78.6	76.2	74.0
	%100	85.6	81.2	81.0
3 DUVAR	%25	77.6	71.6	70.2
	%50	79.2	79.0	75.6
	%75	81.8	81.4	77.6
	%100	85.6	85.2	80.0
4 DUVAR	%25	82.8	74.6	72.4
	%50	84.2	80.2	74.8
	%75	86.4	82.6	77.4
	%100	88.0	83.0	79.0



Şekil 5.7 Referans (yaşlanmamış) numunelerin sertlik grafikleri.

5.1.4 Referans Numunelerin Kütle Değerleri

Referans numunelerin özkütleleri (Çizelge 5.5) kıyaslandığında; PLA+ malzemesinin özkütlesinin, 1.23 g/cm³, PAHT-CF15'in ise 1.203 g/cm³ olduğu bilinmektedir. Üretilen çekme ve eğme numunelerinde, bu yoğunluk farkına paralel olarak, tüm doluluk ve duvar sayısı kombinasyonlarında PLA+ numuneleri PAHT-CF15 numunelerine kıyasla daha yüksek kütle değerleri sergilemiştir. Bu beklenen ve tutarlı bir sonuçtur.

Numunelerin tamamında, duvar sayısı ve doluluk oranındaki artışın numune kütlesinde düzenli bir artışa neden olduğu görülmüştür. Çekme numunelerinde en düşük kütle, %25 doluluk oranında ve 2 duvar sayısındaki PAHT-CF15'te (3.46 g), en yüksek kütle ise %100 doluluk oranında ve 4 duvar sayılı PLA+ numunelerde (7.60 g) görülmüştür.

Her iki malzemenin bir arada kullanıldığı MIX numunelerde ise kütle değerleri genel olarak PLA+ ve PAHT-CF15 malzemelerin arasındadır. Bununla birlikte 4 duvarlı, %25 ve %50 doluluk oranı parametresinde üretilen MIX numunelerdeki gibi kütlenin düşük olması, duvar sayısının artması ile daha hafif parça üretimini mümkün kılmaktadır.

Çizelge 5.5 Referans (yaşlanmamış) numunelerin kütleleri.

Referans (yaşlanmamış) Numunelerin Kütle Ölçüm Tablosu (g)							
NUMUNE TİPİ		Çekme Numunesi			Eğme Numunesi		
Duvar Sayısı	Doluluk Oranı	PLA+	PAHT-CF15	MIX	PLA+	PAHT-CF15	MIX
2 DUVAR	%25	3.95	3.46	3.79	3.72	2.95	3.62
	%50	5.16	4.73	4.95	4.76	4.05	4.55
	%75	6.40	5.94	6.05	6.05	5.02	5.70
	%100	7.48	6.80	7.18	6.93	5.76	6.66
3 DUVAR	%25	4.67	4.09	4.30	4.32	3.68	3.99
	%50	5.68	5.07	5.20	5.27	4.17	4.88
	%75	6.64	5.78	6.35	6.14	5.07	5.89
	%100	7.51	6.43	7.17	6.96	5.58	6.61
4 DUVAR	%25	5.36	5.00	4.96	5.05	4.25	4.70
	%50	6.04	5.63	5.51	5.58	4.55	5.14
	%75	6.89	6.24	6.41	6.49	5.09	5.95
	%100	7.60	6.88	7.09	7.02	5.60	6.56

5.2 YAŞLANMIŞ NUMUNELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

5.2.1 Yaşlanmış Numunelerin Çekme Özellikleri

UV yaşlandırma işlemine tabi tutulan numunelerin çekme testi sonuçları (Çizelge 5.6, Çizelge 5.7 ve Şekil 5.8) incelendiğinde; mekanik özelliklerin, tıpkı referans numunelerde olduğu gibi duvar sayısı ve doluluk oranı parametrelerinden etkilendiği görülmektedir. Yaşlanmış numunelerde, duvar sayısı ve doluluk oranının artışının çoğunlukla çekme mukavemetini arttırdığı görülmektedir.

Farklı malzemelerden (MIX) üretilen yaşlanmış numunelerin tamamında, en yüksek çekme mukavemeti 4 duvarlı ve %100 doluluktaki PAHT-CF15 numunelerde (101.14 MPa) elde edilmiştir.

MIX yapıdaki numunelerin çekme mukavemetleri, tüm parametre kombinasyonlarında, PLA+ ve PAHT-CF15 numunelerin arasında bulunmuştur. MIX numunelerin çekme mukavemeti, 2 duvar ve %50 doluluğa sahip numuneler harici, doluluk oranı ile doğru orantılı olarak artarken, bu parametrede PLA+'a daha yakın bir performans göstermiştir.

Genel bir değerlendirme yapıldığında; yaşlanmış numunelerin çekme mukavemetlerinin, üretim parametrelerine bağlı olarak artış eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Grafikler ve tablolardaki çekme değerleri incelendiğinde, duvar sayısı ve doluluk oranı arttıkça dayanımın doğrusal bir şekilde iyileştiği açıkça görülmektedir. Bu sayede, yaşlandırma etkisine maruz kalacak parçaların gerekli parametreler kullanılarak üretilmesinin, çekme performansı üzerinde beklenmedik sonuçlar doğurmayacağı; aksine parametrelerin doğru seçimi ile malzemenin yaşlanma etkisi altında dahi öngörülebilir ve güvenli bir mekanik davranış sergilemeye devam ettiği sonucuna varılmıştır.

Çizelge 5.6 Yaşlanmış numunelerin çekme mukavemetleri.

Yaşlanmış Numunelerin Çekme Mukavemetleri Rm (MPa)				
Duvar Sayısı	Doluluk Oranı	PLA+	PAHT-CF15	MIX
2 DUVAR	%25	23.86	43.25	41.49
	%50	24.11	53.23	30.99
	%75	31.69	71.98	46.56
	%100	43.05	97.15	62.99
3 DUVAR	%25	32.83	65.67	61.23
	%50	35.19	74.06	61.42
	%75	39.50	83.18	69.89
	%100	45.64	94.52	79.24
4 DUVAR	%25	40.30	89.17	76.66
	%50	39.29	90.79	76.89
	%75	42.58	97.18	85.15
	%100	47.88	101.14	93.22

Yaşlanmış PLA+ numuneler için;

- Yaşlanmış PLA+ numuneler kendi içlerinde kıyaslandığında, en düşük çekme mukavemeti %25 dolulukta ve 2 duvarlı numunelerde (23.86 MPa) görülmüştür. En yüksek çekme mukavemeti ise %100 dolulukta ve 4 duvarlı numunelerde (47.88 MPa) görülmüştür. Bu değişim; duvar sayısı ve doluluk oranının, çekme mukavemetini yaklaşık iki katına çıkarabilecek (%100.67 artış) parametreler olduğunu gösterir.
- PLA+ numunelerde duvar sayısının artışı, yaşlanma sonrası mekanik dayanımının korunmasında kritik önem taşır. Özellikle 2 duvar ve 4 duvarlı numuneler, aynı doluluk oranlarında belirgin bir mukavemet farkı göstermektedir. Örneğin, %25 doluluk oranında; 2 duvarlı numuneler 23.86 MPa çekme mukavemeti gösterirken, 4 duvarlı numuneler 40.30 MPa çekme mukavemeti göstermiştir. Bu da yaklaşık olarak %69'luk bir artışa tekabül etmektedir. Bu durum, duvar sayısını arttırıp daha kalın dış duvarlı numunelerin üretilmesinin, mekanik özellikler üzerinde olumlu bir sonuç doğurduğunu gösterir.
- Veriler incelendiğinde, 4 duvarlı ve %25 doluluk oranına sahip numunelerin (40.30 MPa), 2 duvarlı ve %75 doluluk oranına sahip numunelerden (31.69 MPa) çok daha yüksek, hatta 2 duvar ve %100 doluluk oranına sahip numuneye (43.05 MPa) oldukça yakın bir dayanım sergilediği görülmektedir. Bu durum, yaşlanması muhtemel parçaların üretiminde, iç doluluk oranı ve buna bağlı olarak malzeme sarfiyatını arttırmak yerine, sadece dış duvar sayısını arttırmanın, hem daha hafif hem de

mukavemet açısından neredeyse tam dolu numunelere eş değer parçalar üretmek için daha verimli bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır.

- 4 duvarlı numunelerde, %25'ten (40.30 MPa) %50 (39.29 MPa) doluluk oranına geçerken mukavemette bir miktar azalma gözlemlenmiştir. Ancak genel trend bozulmamış ve %75 doluluktan itibaren mukavemette artış devam etmiştir.

Yaşlanmış PAHT-CF15 numuneler için;

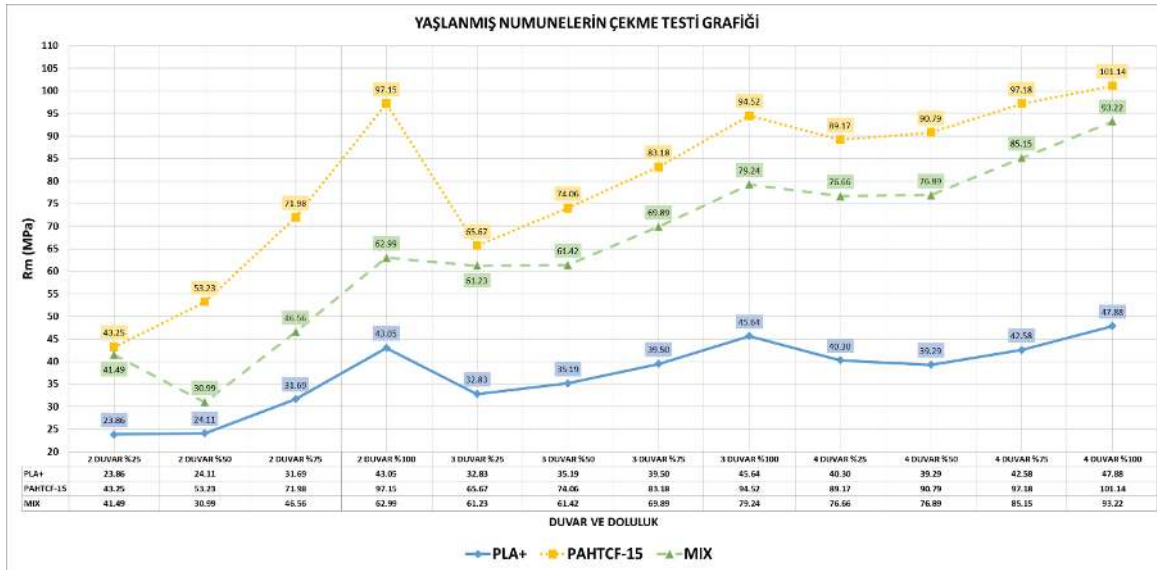
- Yaşlanmış PAHT-CF15 numunelerde en düşük çekme mukavemeti, 2 duvarlı ve %25 doluluktaki numunelerde (43.25 MPa), en yüksek çekme mukavemeti ise 4 duvarlı ve %100 doluluktaki numunelerde (101.14 MPa) görülmüştür. Bu numuneler arasında yaklaşık %135 oranında bir çekme mukavemeti performansı artışı vardır. Buna bağlı olarak da, yaşlanmaya maruz bırakılacak numuneler için doğru parametre kullanımının kritik öneme sahip bir faktör olduğu görülmektedir.
- Dikkat çekici bir bulgu olarak; 2 duvarlı ve %100 doluluğa sahip numunelerde çekme mukavemeti 97.15 MPa gibi oldukça yüksek bir değerde ölçülmüştür. Bu değer, 3 duvarlı ve %100 doluluktaki numunelerden (94.52 MPa) bile yaklaşık olarak %2 fazladır. Bu durum, tam doluluk oranının ince duvarlı yapılarda da UV ışınımına karşı yapıyı koruyarak iyi bir dayanım sağladığını göstermektedir.
- Düşük doluluk oranlarında, duvar sayısının etkisi çok daha belirgindir. %25 duvar yapısında; 2 duvarlı numuneler 43.25 MPa mukavemet gösterirken, 4 duvarlı numuneler 89.17 MPa mukavemet göstermiştir. Duvar sayısını 2'den 4'e çıkarmak, düşük dolulukta parça mukavemetini yaklaşık %106 arttırmıştır. Bu durum çalışmada, PAHT-CF15 kullanılarak üretilen parçalarda çekme mukavemetinin artışı ve dış duvar sayısı arasında doğru orantı olduğunu ve dış duvar sayısı arttıkça çekme mukavemetinin arttığını göstermektedir. Bunun bir sebebinin, duvar içinde kalan karbon fiberlerin daha uzun olması ve yönlendirmelerinin çekme yönüne paralel olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Duvar sayısının artmasıyla çekme yönüne paralel dizilen karbon fiberlerin sayısı artacaktır (Rogelj et al. 2025, Majko et al. 2022).
- Çalışmada, 4 duvarlı ve %25 doluluktaki numunelerin (89.17 MPa), 2 duvar ve %75 doluluktaki numunelerden (71.89 MPa) çok daha yüksek bir dayanım sunduğu görülmektedir. Böylelikle geleneksel filamentlere göre daha maliyetli olan PAHT-CF15 filamentleri, yaşlanma etkisi altındaki parçalarda kullanımı sırasında, daha düşük doluluk oranlarında ve gramajlarda kullanmak mümkündür.

Yaşlanmış MIX numuneler için;

- Yaşlanmış MIX yapıdaki numunelerde en düşük çekme mukavemeti, 30.99 MPa ile 2 duvarlı ve %50 doluluktaki numunelerde, en yüksek çekme mukavemeti ise 93.22 MPa ile 4 duvarlı ve %100 doluluktaki numunelerde görülmüştür.
- 4 duvarlı ve %100 doluluktaki MIX numunelerin çekme mukavemetleri, aynı doluluk oranındaki PLA+ numunelerden (47.88 MPa) çok yüksek, PAHT-CF15 numunelere ise (101.14 MPa) oldukça yakındır. Bu durum, PAHT-CF15'in dış duvarlarda kullanılmasının, MIX yapılı numunelerde mukavemeti bariz bir şekilde arttırdığını göstermektedir. Böylelikle çevresel etkiler altındaki parçaların üretiminde, istenilen dayanımlar elde etmek ve maliyeti düşürmek amacıyla, MIX yapılı numuneler kullanılabilir.
- 2 duvar ve %75 doluluktaki MIX numuneler 46.56 MPa dayanım gösterirken, 3 duvar ve %25 doluluktaki numuneler 61.23 MPa dayanım göstermiştir. Bu sonuç, çoklu malzeme yapılarında dayanım için doluluk oranını arttırmak yerine dış duvar sayısını (bu çalışmada PAHT-CF15) arttırmanın, avantajlı olabileceğini göstermektedir.

Çizelge 5.7 Yaşlanmış numunelerin çekme testi verileri.

Yaşlanmış Numunelerin Çekme Testi Veri Tablosu										
NUMUNE TİPİ		Rm (MPa)			Et (MPa)			%Uzama		
Duvar Sayısı	Doluluk Oranı	PLA+	PAHT-CF15	MIX	PLA+	PAHT-CF15	MIX	PLA+	PAHT-CF15	MIX
2 DUVAR	%25	23.86	43.25	41.49	512.03	664.68	730.22	3.52	3.88	3.98
	%50	24.11	53.23	30.99	549.08	785.33	851.24	3.27	4.27	2.32
	%75	31.69	71.98	46.56	560.35	1176.85	537.86	3.35	4.75	3.79
	%100	43.05	97.15	62.99	671.01	997.98	535.15	4.61	5.30	4.37
3 DUVAR	%25	32.83	65.67	61.23	615.91	785.25	551.56	5.54	5.76	4.67
	%50	35.19	74.06	61.42	559.58	830.83	527.43	4.17	5.20	4.35
	%75	39.50	83.18	69.89	540.77	831.83	519.87	4.17	6.16	4.97
	%100	45.64	94.52	79.24	508.27	824.35	463.31	5.26	5.93	5.18
4 DUVAR	%25	40.30	89.17	76.66	578.60	649.86	1432.59	5.26	6.04	4.61
	%50	39.29	90.79	76.89	514.72	583.40	687.86	4.94	5.73	4.94
	%75	42.58	97.18	85.15	426.20	661.25	613.20	4.24	5.76	5.38
	%100	47.88	101.14	93.22	605.23	641.58	571.30	5.32	5.40	5.68

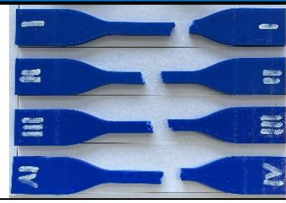
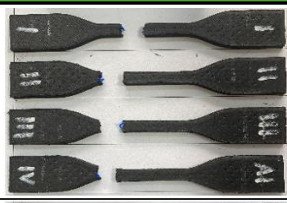
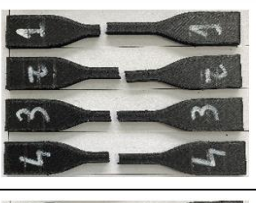
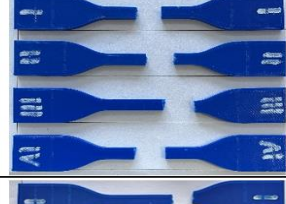
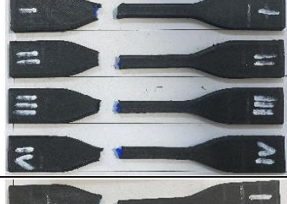
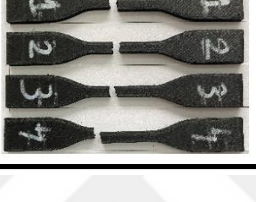
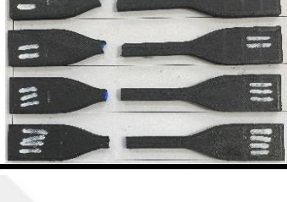


Şekil 5.8 Yaşlanmış numunelerin çekme mukavemetlerinin grafiksel gösterimi.

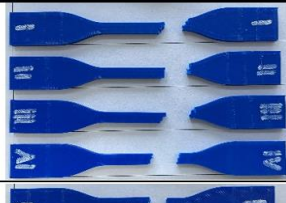
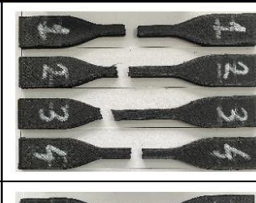
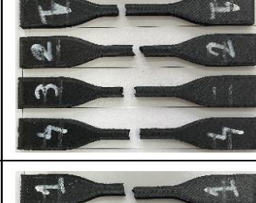
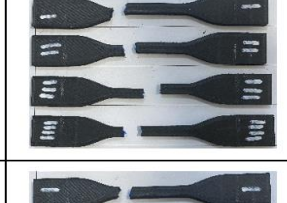
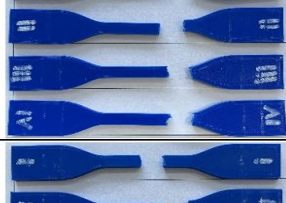
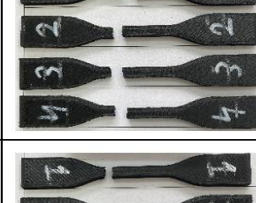
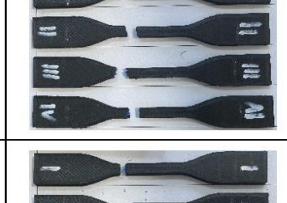
Şekil 5.9’da yaşlanmış numunelerin bütün doluluk oranları için PLA+, PAHT-CF15 VE MIX numunelerinin 2 duvar, Şekil 5.10’da 3 duvar ve Şekil 5.11’de 4 duvar çekme sonrası görüntüleri verilmiştir.

Duvar Sayısı	Doluluk Oranı	PLA+	PAHT-CF15	MIX
2 DUVAR	%25			
	%50			
	%75			
	%100			

Şekil 5.9 Farklı doluluk oranlarındaki 2 duvara sahip yaşlanmış numunelerin çekme sonrası görüntüleri.

Duvar Sayısı	Doluluk Oranı	PLA+	PAHT-CF15	MIX
3 DUVAR	%25			
	%50			
	%75			
	%100			

Şekil 5.10 Farklı doluluk oranlarındaki 3 duvara sahip yaşlanmış numunelerin çekme sonrası görüntüleri.

Duvar Sayısı	Doluluk Oranı	PLA+	PAHT-CF15	MIX
4 DUVAR	%25			
	%50			
	%75			
	%100			

Şekil 5.11 Farklı doluluk oranlarındaki 4 duvara sahip yaşlanmış numunelerin çekme sonrası görüntüleri.

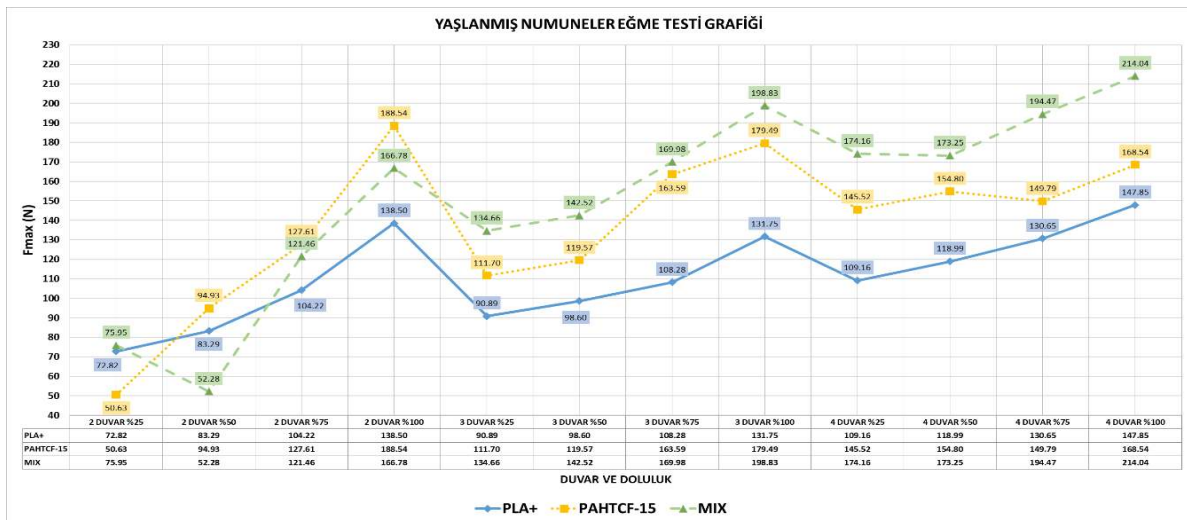
5.2.2 Yaşlanmış Numunelerin Eğme Özellikleri

Yaşlanmış numunelerin eğilme kuvvetleri için;

2 duvarlı numunelerde genelde eğme kuvveti ana malzemelerin (PLA+ ve PAHT-CF15) eğme kuvveti arasında bulunurken, 3 ve 4 duvarlı MIX numunelerde (tüm doluluk oranları için) ana malzemelerde elde edilenden daha yüksek çıkmıştır. Bu durum duvar sayısına bağlı olarak MIX kullanım şeklinin avantajlı olduğunu göstermektedir. Eğilme kuvvetinin ve dolayısıyla eğilme dayanımının yüksek olması istendiği durumlarda, %75 ve %100 doluluk oranlarına sahip MIX numuneler kullanılabilir. Çizelge 5.8’te ve Şekil 5.12’de yaşlanmış numunelerin eğilme kuvvetleri verilmektedir.

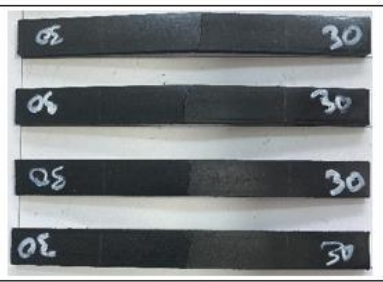
Çizelge 5.8 Yaşlanmış numunelerin eğilme kuvvetleri.

Yaşlanmış Numunelerin Eğilme Kuvvetleri Fmax (N)				
Duvar Sayısı	Doluluk Oranı	PLA+	PAHT-CF15	MIX
2 DUVAR	%25	72.82	50.63	75.95
	%50	83.29	94.93	52.28
	%75	104.22	127.61	121.46
	%100	138.50	188.54	166.78
3 DUVAR	%25	90.89	111.70	134.66
	%50	98.60	119.57	142.52
	%75	108.28	163.59	169.98
	%100	131.75	179.49	198.83
4 DUVAR	%25	109.16	145.52	174.16
	%50	118.99	154.80	173.25
	%75	130.65	149.79	194.47
	%100	147.85	168.54	214.04



Şekil 5.12 Yaşlanmış numunelerin eğilme kuvvetlerinin grafiksel gösterimi.

Şekil 5.13'te yaşlanmış numunelerde en yüksek eğme kuvveti elde edilen numunelerin eğme sonrası görüntüleri verilmiştir.

		
2 Duvar %25 MIX	3 Duvar %25 MIX	4 Duvar %25 MIX
		
2 Duvar %50 PAHT-CF15	3 Duvar %50 MIX	4 Duvar %50 MIX
		
2 Duvar %75 PAHT-CF15	3 Duvar %75 MIX	4 Duvar %75 MIX
		
2 Duvar %100 PAHT-CF15	3 Duvar %100 MIX	4 Duvar %100 MIX

Şekil 5.13 En yüksek eğme kuvvetine sahip yaşlanmış numunelerin görüntüleri.

5.2.3 Yaşlanmış Numunelerin Sertlik Özellikleri

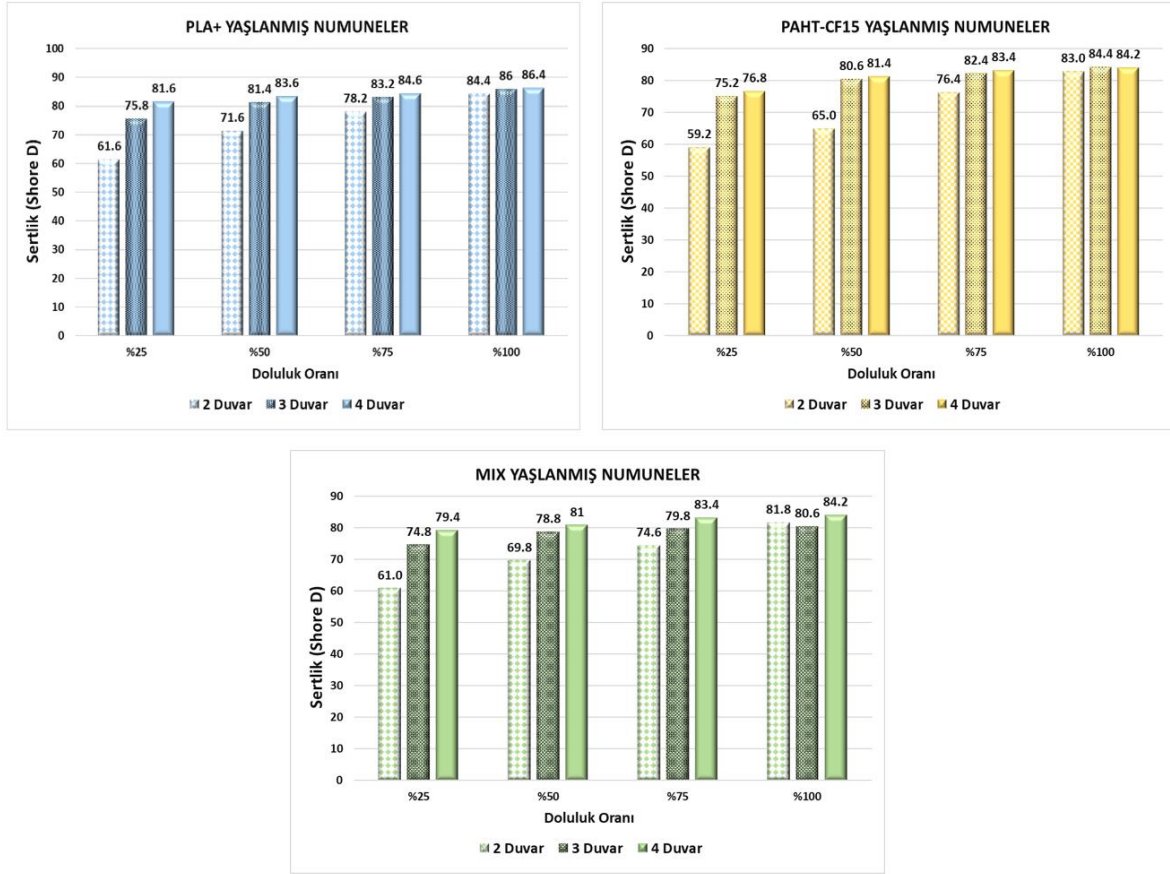
- Yaşlanmış numunelerin sertlik değerleri (Çizelge 5.9) incelendiğinde, tüm malzeme yapılarında en düşük sertlik değerleri, 2 duvar ve %25 doluluk oranına sahip numunelerde ölçülmüştür (PLA+: 61.6, PAHT-CF15: 59.2, MIX: 61.0). Buna karşılık

olarak en yüksek sertlik değerleri ise, duvar sayısı ve doluluk oranının en yüksek kullanıldığı 3 ve 4 duvarlı numunelerde ölçölmüştür (PLA+: 86.4, PAHT-CF15: 84.4, MIX: 84.2).

- Numunelerin tamamında doluluk oranı ve duvar sayısı artışının, sertliği arttırdığı görölmektedir. Özellikle 2 duvarlı numunelerde %25 doluluktan %100 doluluğa geçişte sertlik değerlerinde belirgin bir artış mevcuttur. Bu durumun, ızgara desenindeki dolgu yapısına sahip numunelerin iç yapısında oluşan boşlukların %100 doluluk oranında azalmasıyla, parça yüzeyinden alınan sertlik değerlerinin daha kararlı hale gelmesinden kaynaklandığı söylenebilir.
- 3 duvarlı ve 4 duvarlı numuneler kıyaslandığında, sertlik değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görölmektedir. Hatta %100 doluluktaki PAHT-CF numunelerde istisnai olarak 3 duvarlı numunelerin (84.4), 4 duvarlı numuneleri (84.2) çok az bir farkla geçtiği görölmektedir. Bu da malzemenin çeşidine bağlı olarak (PLA+ ve PAHT-CF15) optimum yüzey sertliğine ulaşmak için 3 duvar kullanımının yeterli olduğunu göstermektedir. şekil 5.14'te yaşlanmış numunelerin sertlik grafikleri verilmiştir.

Çizelge 5.9 Yaşlanmış numunelerin sertlik değerleri.

Yaşlanmış Numunelerin Sertlik Ölçüm Tablosu				
Numune Tipi		Sertlik (Shore D)		
Duvar Sayısı	Doluluk Oranı	PLA+	PAHT-CF15	MIX
2 DUVAR	%25	61.6	59.2	61.0
	%50	71.6	65.0	69.8
	%75	78.2	76.4	74.6
	%100	84.4	83.0	81.8
3 DUVAR	%25	75.8	75.2	74.8
	%50	81.4	80.6	78.8
	%75	83.2	82.4	79.8
	%100	86.0	84.4	80.6
4 DUVAR	%25	81.6	76.8	79.4
	%50	83.6	81.4	81.0
	%75	84.6	83.4	83.4
	%100	86.4	84.2	84.2



Şekil 5.14 Yaşlanmış numunelerin sertlik grafikleri.

5.2.4 Yaşlanmış Numunelerin Kütle Değerleri

- UV yaşlandırma işlemine tabi tutulan numunelerin kütle ölçümleri (Çizelge 5.10) incelendiğinde; malzemelerdeki temel özkütle farkının, numuneler üzerinde kütle farkının yaşanmasına sebep olduğu görülmektedir. Yaşlandırma sonrası elde edilen çekme ve eğme numunelerinde, tüm doluluk ve duvar sayısı kombinasyonlarında PLA+ numuneleri, PAHT-CF15 numunelere kıyasla daha yüksek kütle değerleri sergilemiştir.
- Yaşlanmış numunelerin tamamında, duvar sayısı ve doluluk oranındaki artışın, numunelerin kütlelerinde düzenli bir artışa neden olduğu görülmektedir. Yaşlanmış çekme numunelerinde en düşük kütle, %25 doluluk oranı ve 2 duvar sayısındaki PAHT-CF15 numunesinde (3.39 g) ölçülürken; en yüksek kütle %100 doluluk oranı ve 4 duvar sayısındaki PLA+ numunesinde (7.45 g) kaydedilmiştir.
- Her iki malzemenin bir arada kullanıldığı yaşlandırılmış MIX numunelerde ise kütle değerleri, düşük duvar sayılarında genel olarak PLA+ ve PAHT-CF15 numunelerin arasında seyretmiştir.

Çizelge 5.10 Yaşlanmış test numunelerin kütleleri.

Yaşlanmış Test Numunelerin Kütle Tablosu (g)							
NUMUNE TİPİ		Çekme Numunesi			Eğme Numunesi		
Duvar Sayısı	Doluluk Oranı	PLA+	PAHT-CF15	MIX	PLA+	PAHT-CF15	MIX
2 DUVAR	%25	3.91	3.39	3.74	3.71	2.90	3.57
	%50	5.11	4.66	4.90	4.72	4.05	4.51
	%75	6.37	5.84	6.00	6.03	4.98	5.64
	%100	7.41	6.72	7.12	6.83	5.73	6.61
3 DUVAR	%25	4.63	4.00	4.26	4.29	3.61	3.95
	%50	5.62	4.98	5.12	5.19	4.10	4.81
	%75	6.59	5.66	6.25	6.13	4.99	5.80
	%100	7.44	6.32	7.08	6.82	5.49	6.52
4 DUVAR	%25	5.31	4.87	4.86	4.97	4.15	4.60
	%50	6.00	5.52	5.40	5.57	4.45	5.04
	%75	6.86	6.13	6.30	6.47	5.01	5.85
	%100	7.45	6.78	6.98	6.90	5.51	6.46

5.3 REFERANS VE YAŞLANMIŞ NUMUNELERİN KIYASLANMASI

5.3.1 Çekme değerlerinin karşılaştırılması

Referans numuneler ve yaşlanmış numunelerin çekme testleri sonrasında elde edilen sonuçlar Çizelge 5.11’de verilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde, duvar sayısı ve doluluk oranı parametrelerinin çekme dayanımı üzerinde belirleyici bir rol oynadığı görülmektedir. Numunelerin tamamı incelendiğinde, genel olarak duvar sayısının artması ve doluluk oranının yükselmesi, tüm malzeme yapılarında çekme dayanımlarını büyük ölçüde arttırmıştır. Bu parametrelere ek olarak, yaşlandırma işleminin de, numunelerin çekme dayanımları üzerinde büyük bir etkisi olduğu görülmektedir.

- Çalışmada, üretilen tüm numuneler arasında en yüksek çekme dayanımı, 4 duvar ve %100 doluluk oranına sahip yaşlanmış PAHT-CF15 numunelerde elde edilmiştir. Bu sonuç, duvar sayısı ve doluluk oranının yüksek tutulmasının, üretilen parçaların çekme mukavemetlerini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Ayrıca çalışma kapsamında 168 saat uygulanan UV yaşlandırma işlemi sonrasında; referans değeri 64.01 MPa olan, 4 duvar ve %100 doluluktaki PAHT-CF15 numunelerin, %58 oranında çekme dayanımı kazanarak 101.14 MPa değerine ulaştığı görülmektedir.

- 2 duvarlı ve %75 dolulukta, referans PAHT-CF15 numunelerin 32.49 MPa olan çekme dayanımları, yaşlanma sonrası %121.5 artarak 71.98 MPa'a ulaşmıştır. Bu tüm numunelerde en yüksek orandaki performans artışıdır.
- PLA+ malzemesi UV yaşlandırma koşullarında mekanik stabilitesini kısmen korurken veya hafif kayıplar yaşarken; PAHT-CF15 ve MIX yapılar, yaşlandırma sürecinin termal etkisinden faydalanarak mekanik performanslarını artırmıştır. Bu durum, karbon fiber takviyeli poliamid yapıların, UV ışınlam ve yüksek sıcaklık içeren dış ortam koşullarında, mekanik dayanım açısından PLA+'a kıyasla daha avantajlı olabileceğini göstermektedir.
- PLA+ malzemesinde ise, yaşlandırma sonrası neredeyse tüm doluluk ve duvar yapılarında çekme dayanımında bir miktar düşüş görülmüş olup, bu durum PLA'nın, çevresel etkenlere karşı daha hassas bir yapı göstermesinden kaynaklanmaktadır. Özellikle %50 doluluk ve 2 duvarlı yapılarda çekme mukavemeti -%10.10 oranında azalarak (Referans:26.82, Yaşlanmış: 24.11) daha belirgin hale gelmiştir.
- MIX yapıdaki numuneler incelendiğinde, yaşlandırma sürecinin çekme dayanımı üzerinde PAHT-CF15'e benzer şekilde olumlu bir etki yarattığı görülmektedir. Özellikle 4 duvar ve %100 doluluk oranına sahip referans MIX numunesinin çekme dayanımı 55.75 MPa iken, yaşlandırma sonrası bu değer %67 oranında artış göstererek, 93.22 MPa değerine ulaşmıştır. Bu durum, MIX yapıların dış duvarlarını oluşturan PAHT-CF15 malzemesinden kaynaklanmaktadır. PAHT-CF15 katmanlarında meydana gelen bu iyileşme, iç yapıdaki PLA'yı olumsuz etkilerden koruyarak, yaşlanma sonrasında MIX yapılarda yüksek bir çekme performansı elde edilmesini sağlamıştır. Elde edilen bu veriler doğrultusunda, özellikle çevresel etkilere maruz kalacak parçalar üretilirken, sadece PAHT-CF15 kullanmak yerine MIX yapıların tercih edilmesinin, parça üretim maliyeti açısından daha ekonomik bir alternatif olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 5.11 Referans ve yaşlanmış numunelerin çekme mukavemetleri.

Tüm Numunelerin Çekme Mukavemetleri: R _m (MPa)							
Duvar Sayısı	Doluluk Oranı	PLA+		PAHT-CF15		MIX	
		Referans	Yaşlanmış	Referans	Yaşlanmış	Referans	Yaşlanmış
2 DUVAR	%25	25.34	23.86	28.60	43.25	28.19	41.49
	%50	26.82	24.11	24.60	53.23	28.54	30.99
	%75	32.83	31.69	32.49	71.98	34.80	46.56
	%100	44.19	43.05	52.59	97.15	49.38	62.99
3 DUVAR	%25	35.44	32.83	41.05	65.67	40.98	61.23
	%50	36.54	35.19	35.66	74.06	39.78	61.42
	%75	38.83	39.50	53.62	83.18	51.76	69.89
	%100	46.26	45.64	64.41	94.52	54.68	79.24
4 DUVAR	%25	40.28	40.30	49.20	89.17	46.95	76.66
	%50	40.78	39.29	46.58	90.79	48.20	76.89
	%75	44.46	42.58	56.63	97.18	49.87	85.15
	%100	49.99	47.88	64.01	101.14	55.75	93.22

5.3.2 Eğme değerlerinin karşılaştırılması

Hem referans hem yaşlanmış numunelerin üç nokta eğme testi sonuçları beraber incelendiğinde (Çizelge 5.12), duvar sayısı ve doluluk oranının, numunelerin eğilme kuvvetleri üzerinde etkili bir faktör olduğu görülmüştür. Numunelerin neredeyse tamamında duvar sayısı ve doluluk oranının artması ile eğilme kuvvetleri artmıştır.

- Çalışmada uygulanan yaşlandırma işlemi, numunelerin eğilme kuvvetleri üzerinde olumlu bir etki oluşturarak numunelerin büyük bir çoğunluğunda eğilme kuvvetlerini arttırmıştır. Ancak, MIX numunelerin 2 duvarlı yapılarının tamamında ve 3 duvarlı %25 dolulukta numunelerde bir miktar düşüşler yaşanmıştır. Özellikle 2 duvarlı ve %50 dolulukta numunelerin (89.27 N) eğilme kuvvetleri %41.1 oranında azalarak 52.28 N değerine gerilemiştir. Bu değer MIX numunelerde en düşük eğilme kuvveti değeridir. Aynı parametrelerde üretilmiş diğer malzeme yapılarında da yaşlanma sonrasında en düşük değerdir. Böylelikle özellikle çevresel etmenlere maruz kalacak parçaların; 2 duvar %50 doluluk ve MIX yapıların kullanılmaması önerilmektedir.
- PLA+ numunelerin eğilme kuvvetleri yaşlandırma işleminden çok fazla etkilenmemiştir. Tüm PLA+ numune yapılarının eğilme mukavemetleri az olsa da artmıştır. En yüksek artış ise %7.41 oranında artışla 2 duvar ve %100 doluluk oranındaki numunelerde görülmüştür.

- Tüm numuneler arasında en yüksek eğilme kuvveti, 4 duvar ve %100 doluluk oranına sahip yaşlanmış MIX numunelerde elde edilmiştir. Bu sonuç, duvar sayısı ve doluluk oranının yüksek tutulmasının, parçaların eğilme kuvvetlerini belirgin bir biçimde yükselttiğini göstermektedir. Çalışma kapsamında 168 saat uygulanan UV yaşlandırma işlemi sonrasında; referans değeri 150.94 N olan 4 duvar ve %100 dolulukta MIX yapıların, %41.8 oranında mukavemet kazanarak 214.04 N gibi çalışmanın en yüksek değerine ulaştığı görülmektedir.
- Özellikle PAHT-CF15 numunelerinde yaşlandırma sonrası eğilme kuvvetlerinde yüksek artışlar kaydedilmiştir. Örneğin, 2 duvar ve %50 dolulukta referans PAHT-CF15 numunelerin 13.68 N olan eğilme kuvveti, yaşlanma sonrası yaklaşık %594 (7 katı) artarak 94.93 N değerine ulaşmıştır. Bu, düşük doluluk oranlarında dahi, çalışmada uygulanan yaşlandırma parametrelerin PAHT-CF15'in eğilme performansını büyük oranda etkilediğini göstermektedir.
- Malzeme davranışları karşılaştırıldığında; çekme testlerinde genellikle düşüş eğilimi gösteren PLA+ numuneler, eğme testlerinde farklı bir davranış sergileyerek yaşlandırma sonrasında dayanımlarını arttırmıştır. PAHT-CF15 ve MIX yapılar yaşlandırma sürecinin etkisinden ötürü, mekanik performanslarını arttırmıştır. Bu durum, özellikle karbon fiber takviyeli poliamid yapıların, çevresel etmenlere karşı, uygun parametrelerle üretildiğinde, daha dirençli hale geldiğini kanıtlamaktadır.
- MIX yapıdaki numuneler incelendiğinde, yaşlandırma sürecinin eğilme dayanımı üzerinde PAHT-CF15'ten bile daha iyi bir yapı oluşturduğu görülmektedir. Özellikle 4 duvar ve %100 doluluk oranında elde edilen 214.04 N değeri, aynı parametrelerdeki yaşlanmış PAHT-CF15 numunesinin (168.54 N) üzerindedir. Ayrıca eğilme kuvvetleri, yaşlandırma sonrasında 3 ve 4 duvarlı yapılarda, PAHT-CF15'ten daha iyi bir performans sergilemiştir. Böylelikle, çevresel etmenlerin tesirinde kalacak fonksiyonel parçaların üretiminde; uygun parametrelerdeki MIX yapıların kullanılması, hem ekonomik açıdan hem de parçaların mekanik performansı bakımından alternatif oluşturur.

Çizelge 5.12 Referans ve yaşlanmış numunelerin eğilme kuvvetleri.

Tüm Numunelerin Eğilme Kuvvetleri: Fmax (N)							
Duvar Sayısı	Doluluk Oranı	PLA+		PAHT-CF15		MIX	
		Referans	Yaşlanmış	Referans	Yaşlanmış	Referans	Yaşlanmış
2 DUVAR	%25	70.03	72.82	17.76	50.63	86.63	75.95
	%50	80.60	83.29	13.68	94.93	89.27	52.28
	%75	98.29	104.22	23.72	127.61	138.55	121.46
	%100	128.94	138.50	43.43	188.54	180.60	166.78
3 DUVAR	%25	87.58	90.89	25.13	111.70	141.44	134.66
	%50	96.57	98.60	35.85	119.57	116.62	142.52
	%75	105.46	108.28	51.55	163.59	149.10	169.98
	%100	128.98	131.75	54.11	179.49	178.57	198.83
4 DUVAR	%25	105.76	109.16	39.51	145.52	103.98	174.16
	%50	109.94	118.99	52.01	154.80	148.36	173.25
	%75	123.88	130.65	91.68	149.79	166.77	194.47
	%100	138.42	147.85	92.66	168.54	150.94	214.04

5.3.3 Sertlik değerlerinin karşılaştırılması

- Numunelerin sertlik değerleri (Çizelge 5.13) incelendiğinde; çalışmada kullanılan duvar sayısı ve doluluk oranı parametresindeki artışın, numunelerin sertliklerini arttırdığı görülmektedir. Özellikle %25 doluluktaki numunelerde sertlikler düşükken, %100 doluluktaki numunelerin, iç doluluklarının artması ile yüksek değerlere ulaşmıştır.
- Yaşlandırma işlemi PLA+ numunelerde sertlik düşüşlerine yol açarken, PAHT-CF15 ve MIX numunelerin, genelinde sertlik değeri, yaşlandırma sonrası yükselmiştir.
- Tüm malzeme yapılarında en düşük sertlik değerleri, 2 duvar ve %25 doluluk oranına sahip numunelerde ölçülmüştür (Yaşlanmış PLA+: 61.6, Ref. PAHT-CF15: 54.2, Ref. MIX: 57.8). Buna karşılık en yüksek sertlik değerleri ise, %100 doluluktaki, 3 ve 4 duvarlı numunelerde elde edilmiştir (Ref. PLA+: 88, Yaşlanmış PAHT-CF15: 84.4, Yaşlanmış MIX: 84.2).
- 3 duvarlı ve 4 duvarlı %100 doluluktaki numuneler kıyaslandığında, sertlik değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Hatta %100 doluluktaki yaşlanmış PAHT-CF15 numunelerde istisnai olarak; 3 duvarlı numunelerin sertlik değerinin (84.4), 4 duvarlı yapıyı (84.2) çok küçük bir farkla geçtiği görülmektedir. Bu durum, kullanılan malzeme çeşidinden bağımsız olarak, optimum yüzey sertliğine ulaşmak için 3 duvar kullanımının yeterli olduğunu, ekstra duvar kalınlığının yüzey sertliğine her zaman etkili bir katkı sağlamadığını göstermektedir.

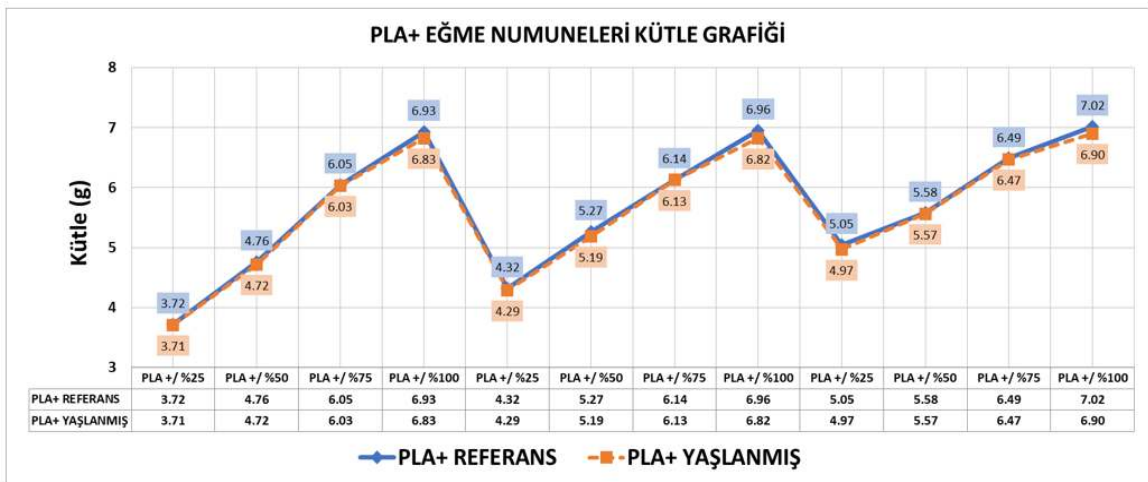
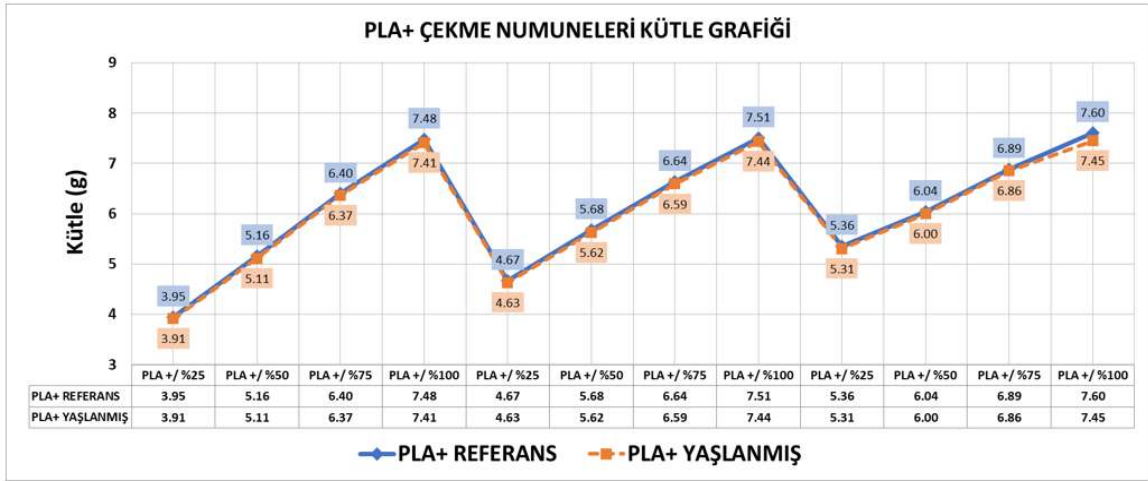
- MIX numuneler incelendiğinde, dış yüzeyi oluşturan PAHT-CF15 katmanlarının etkisiyle sertlik davranışının, PAHT-CF15 numuneler ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Bu da çalışmada oluşturulan MIX yapıların, sertlik istenen durumlarda; çevresel koşullar altında, yalnızca PAHT-CF15 numunelerden oluşan parçalara ekonomik bir alternatif olarak kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 5.13 Referans ve yaşlanmış numunelerin sertlik değerleri.

Tüm Numunelerin Sertlik Ölçüm Tablosu							
Numune Tipi		Sertlik (Shore D)					
Duvar Sayısı	Doluluk Oranı	PLA+		PAHT-CF15		MIX	
		Referans	Yaşlanmış	Referans	Yaşlanmış	Referans	Yaşlanmış
2 DUVAR	%25	63.4	61.6	54.2	59.2	57.8	61.0
	%50	75.6	71.6	64.6	65.0	67.8	69.8
	%75	78.6	78.2	76.2	76.4	74.0	74.6
	%100	85.6	84.4	81.2	83.0	81.0	81.8
3 DUVAR	%25	77.6	75.8	71.6	75.2	70.2	74.8
	%50	79.2	81.4	79.0	80.6	75.6	78.8
	%75	81.8	83.2	81.4	82.4	77.6	79.8
	%100	85.6	86.0	85.2	84.4	80.0	80.6
4 DUVAR	%25	82.8	81.6	74.6	76.8	72.4	79.4
	%50	84.2	83.6	80.2	81.4	74.8	81.0
	%75	86.4	84.6	82.6	83.4	77.4	83.4
	%100	88.0	86.4	83.0	84.2	79.0	84.2

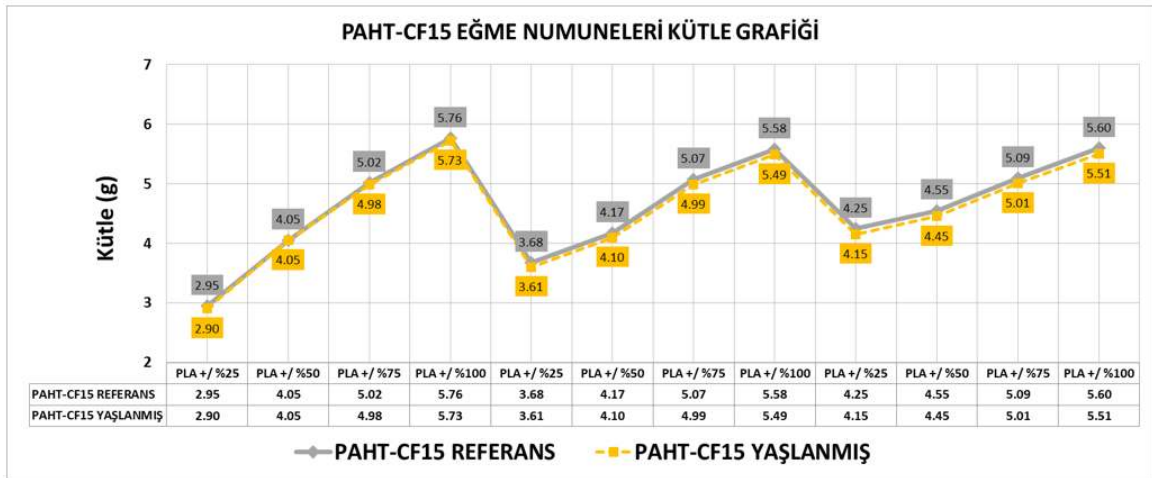
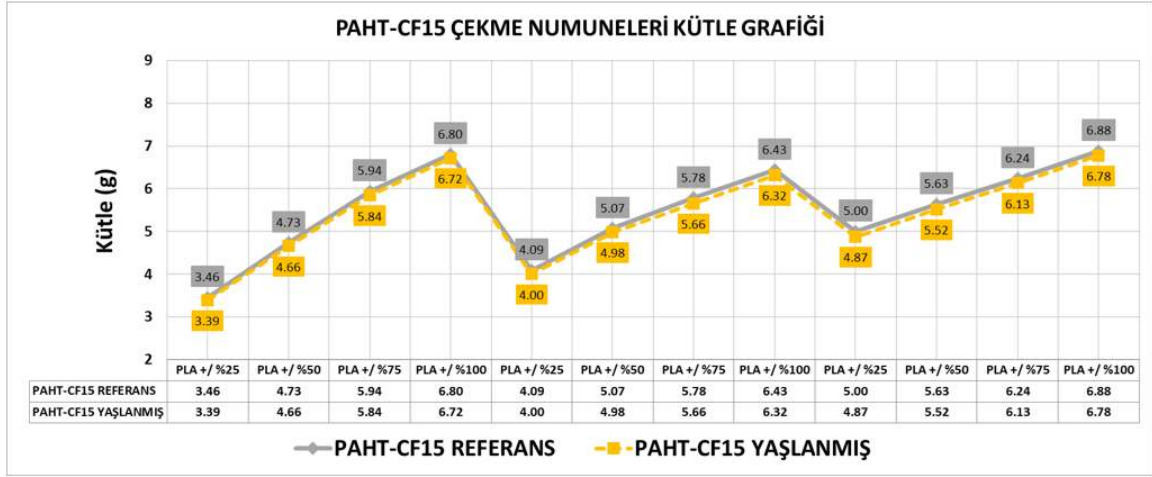
5.3.4 Kütle değerlerinin karşılaştırılması

- Şekil 5.15'te görülen kütle değerleri incelendiğinde, doluluk oranı ve duvar sayısı artışının numune kütlelerini doğrusal olarak artırırken; yaşlandırma işlemi, PLA+ numunelerde kütle kaybına yol açmıştır. Tüm doluluk ve duvar sayısı kombinasyonlarında yaşlanmış numune kütlelerin, referans numunelerin kütle değerlerinin altında kalmasının temel sebebinin, yaşlandırma sırasında uygulanan 70 °C'lik sıcaklığın etkisi ile numuneler içindeki nemin buharlaşması olduğu düşünülmektedir. Bu etki ile de yaşlanma sonrasında numunelerin kütlelerinde tutarlı bir şekilde azalma meydana gelmiştir.



Şekil 5.15 Referans ve yaşlanmış PLA + numunelerin kütleleri.

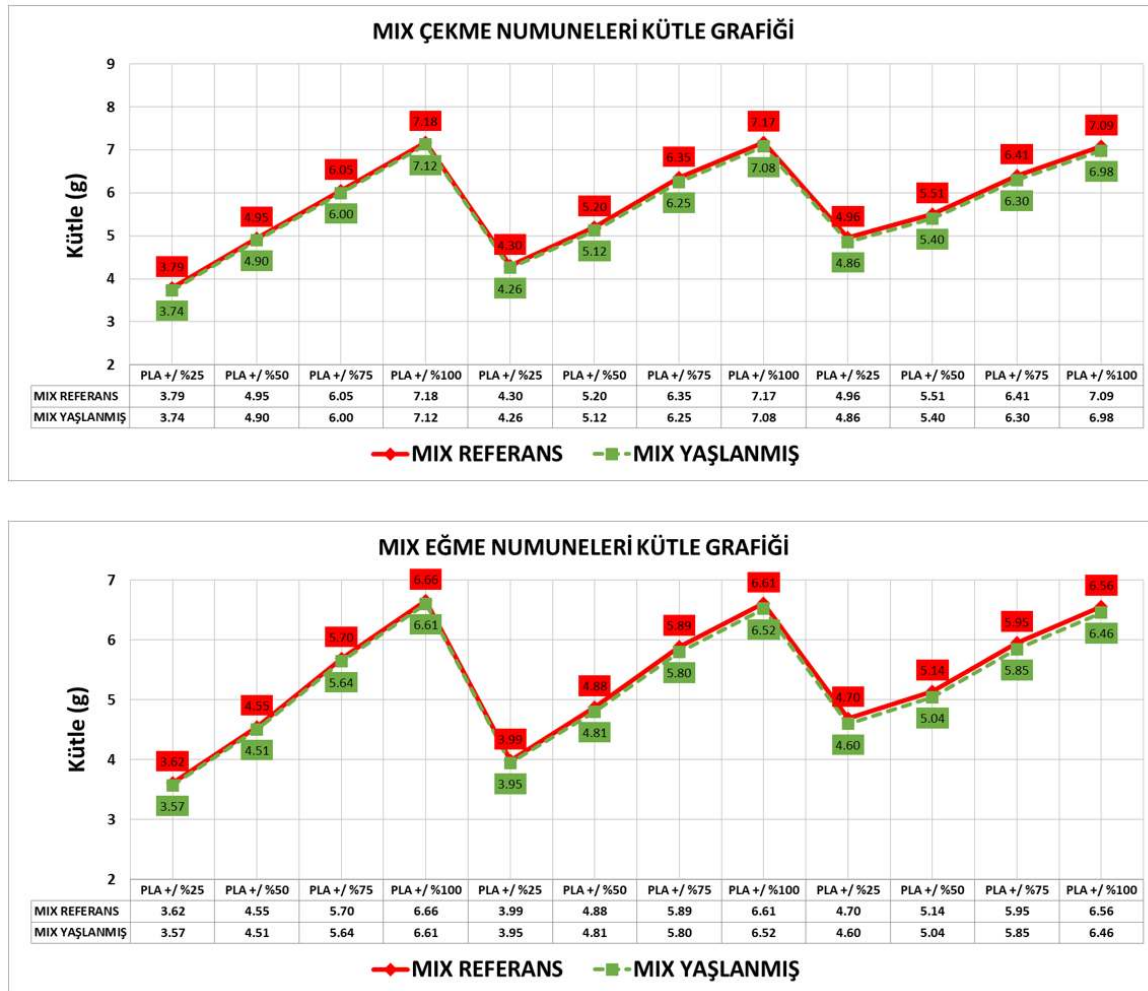
- Şekil 5.16’da görülen PAHT-CF15 numunelerin kütle değerleri incelendiğinde; doluluk oranı artışının numune kütlesini artırdığı görülmektedir. Ancak duvar sayısı parametresi incelendiğinde, %75 ve %100 gibi yüksek doluluklarda 3 duvarlı yapıların, 2 duvarlı yapılara kıyasla bir kütle düşüşü sergilediği görülmektedir. Bu bulgu, hafifliğin önemli olduğu parça üretimlerinde, yüksek doluluk oranlarında 2 duvar yerine 3 duvar parametresinin tercih edilmesinin daha avantajlı olacağını göstermektedir.
- Yaşlandırma işleminin etkisi incelendiğinde ise; PLA+ numunelerinde olduğu gibi PAHT-CF15 numunelerin tamamında tutarlı bir kütle kaybı yaşanmıştır. Yaşlanmış numune eğrilerinin referans eğrilerin altında kalmasının temel sebebinin; poliamid esaslı malzemenin higroskopik (nem tutucu) yapısından dolayı, 70°C’lik yaşlandırma sıcaklığında bünyesindeki nemi kaybetmesi olduğu düşünülmektedir. Bu etki, numune kütlelerinde azalma meydana getirmiştir.



Şekil 5.16 Referans ve yaşlanmış PAHT-CF15 numunelerin kütleleri.

- Şekil 5.17’de bulunan MIX numunelerine ait kütle verileri incelendiğinde; doluluk oranındaki artışın numune kütlesini artırdığı görülmektedir. Ancak duvar sayısı parametresinin kütle üzerindeki etkisi incelendiğinde, PAHT-CF15 numunelerine benzer bir durum tespit edilmiştir. Özellikle %100 doluluk oranına sahip numunelerde; duvar sayısı arttıkça numune kütlesinde belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. Yaşlanmış çekme numunelerinde, 2 duvarlı yapının kütlesi 7.12 g iken, 3 duvarlı yapının 7.08 g, 4 duvarlı yapının kütlesi 6.98 g olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, hafifliğin ve mukavemetin önemli olduğu parça üretimlerinde, yüksek doluluk oranlarında duvar sayısını artırmanın kütle avantajı sağlayacağını göstermektedir. Bu durum eğme numunelerinde de aynı şekildedir.

- Yaşlandırma sürecinin etkisi değerlendirildiğinde ise; MIX numunelerin tamamında, diğer malzeme yapılarında olduğu gibi tutarlı bir kütle kaybı kaydedilmiştir. Hem PLA+ hem PAHT-CF15 kullanılan bu yapıların referans ve yaşlanmış kütleleri, tüm durumlarda iki malzemenin de arasında kalmıştır.



Şekil 5.17 Referans ve yaşlanmış MIX numunelerin kütleleri.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Bu çalışmada, 3B yazıcıda üretilen PLA +, PAHT-CF15 ve MIX malzemelerinin yaşlanma sonrası mekanik dayanımları incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır;

- 3 Boyutlu yazıcıda üretilen parçalarda doluluk oranı arttığında, parça mukavemeti artmaktadır. Aynı zamanda duvar sayısı ve doluluk oranı artışının parça sertliğini arttırdığı görülmüştür.
- UV yaşlandırma koşullarında PLA+ malzemesinin mekanik özellikleri çok değişmezken; PAHT-CF15 ve MIX yapıların yaşlandırma süreci sonrasında mekanik performans artmıştır.
- Yaşlanmış numuneler için doluluk ve duvar sayısı kombinasyonların tamamında ölçülen kütle değerleri, referans numunelerin kütle değerlerinden daha az bulunmuştur.
- Yaşlandırma sonrasında MIX yapıdaki numunelerde çekme dayanımı üzerinde, MIX parçaların dış duvarlarını oluşturan PAHT-CF15 malzemesinden dolayı olumlu bir etki oluşmuştur.
- Yaşlanma sonrası elde edilen en yüksek eğilme kuvveti, 4 duvar ve %100 doluluk oranına sahip MIX numunelerde elde edilmiştir. MIX yapıdaki numuneler, PAHT-CF15'ten daha iyi bir yapı oluşturmuşlardır.
- 3B yazıcılarda uygun parametreler kullanılarak üretilen MIX yapıların, hem ekonomik hem de mekanik performans açısından kendisini oluşturan PLA+ ve PAHT-CF15 malzemelere kıyasla daha tercih edilebilir bir seçenek olduğu ortaya çıkmıştır.



KAYNAKLAR

- Afshar A and Wood R** (2020) Development of weather-resistant 3D printed structures by multi-material additive manufacturing. *Journal of Composites Science*, 4 (3): 94.
- Agrawal A P, Kumar V, Kumar J, Paramasivam P, Dhanasekaran S and Prasad L** (2023) An investigation of combined effect of infill pattern, density, and layer thickness on mechanical properties of 3D printed ABS by fused filament fabrication. *Heliyon*, 9 (6).
- Akderya T** (2023a) Post-Ultraviolet-Curing Process Effects on Low-Velocity Impact Response of 3D Printed Polylactic Acid Parts. *Sakarya University Journal of Science*, 27 (5): 943-955.
- Akderya T** (2023b) Effects of Post-UV-Curing on the Flexural and Absorptive Behaviour of FDM-3D-Printed Poly (Lactic Acid) Parts. *Polymers*, 15: 348.
- Alfaro M E C, Stares SL, de Oliveira Barra GM and Hotza D** (2022a) Effects of accelerated weathering on properties of 3D-printed PLA scaffolds. *Materials Today Communications*, 33: 104821.
- Alfaro M E C, Stares SL, de Oliveira Barra GM and Hotza D** (2022b) Estimation of shelf life of 3D-printed PLA scaffolds by accelerated weathering. *Materials Today Communications*, 32: 104140.
- Al-Salem S M, Abraham G, Al-Qabandi OA and Dashti AM** (2015) Investigating the effect of accelerated weathering on the mechanical and physical properties of high content plastic solid waste (PSW) blends with virgin linear low density polyethylene (LLDPE). *Polymer Testing*, 46: 116-121.
- Altun S ve Sekban B** (2023) 3B yazıcılar için cam fiber katkılı kompozit filament üretimi ve mekanik özellikleri. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 7 (1): 64-77.
- Amza C G, Zapciu A, Baci F and Radu C** (2023) Effect of UV-C radiation on 3D printed ABS-PC polymers. *Polymers*, 15 (8): 1966.
- Amza C G, Zapciu A, Baci F, Vasile M I and Nicoara AI** (2021b) Accelerated aging effect on mechanical properties of common 3D-printing polymers. *Polymers*, 13 (23): 4132.
- Amza C G, Zapciu A, Baci F, Vasile M I and Popescu D** (2021a) Aging of 3D printed polymers under sterilizing UV-C radiation. *Polymers*, 13 (24): 4467.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Anaç N, Şen E, Gül E, Acar E, Yıldız ME, Koçar O ve Parmaksız F (2025) Cam Fiber Takviyeli Plastik Malzemelerin Delaminasyon Durumunun İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 13 (1): 234-249.
- Anand Kumar S and Shivraj Narayan Y (2018) Tensile testing and evaluation of 3D-printed PLA specimens as per ASTM D638 type IV standard. *Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering (I-DAD 2018)*, Springer Singapore, 79-95.
- Arifvianto B, Satiti B E, Salim UA, Suyitno, Nuryanti A and Mahardika M (2022) Mechanical properties of the FFF sandwich-structured parts made of PLA/TPU multi-material. *Progress in Additive Manufacturing*, 7 (6): 1213-1223.
- ASTM (2013) Standard Practice for Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus Exposure of Plastics. ASTM International.
- ASTM G154 (2023) Standard practice for operating fluorescent ultraviolet (UV) lamp apparatus for exposure of materials. *Annual book of ASTM standards*, Standard G 154.
- Avcı H, Üreyen M E, Kılıç A, Sağlam AE ve Demir A (2019) Güç Tutuşur Polipropilen Polimeri Ve Lif Uygulamalarında Son Gelişmeler ve Gelecek Beklentileri. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24 (2): 609-632.
- Aydemir B, Taşcan H, Camyurdu C ve UME T (2015) Çekme deneyinde farklı uzama ölçme yöntemlerinin etkilerinin incelenmesi. *Metal Dünyası*, (266): 44-50.
- Baca L D M and Ahmad R (2020) Tensile mechanical behaviour of multi-polymer sandwich structures via fused deposition modelling. *Polymers*, 12 (3): 651.
- Bankapalli N K, Gupta V, Saxena P, Bajpai A, Lahoda C and Polte J (2023) Filament fabrication and subsequent additive manufacturing, debinding, and sintering for extrusion-based metal additive manufacturing and their applications: A review. *Composites Part B: Engineering*, 264: 110915.
- Bertašius P, Plyushch A, Macutkevič J, Banys J, Selskis A, Platnieks O and Gaidukovs S (2023) Multilayered composites with carbon nanotubes for electromagnetic shielding application. *Polymers*, 15 (4): 1053.
- Birosz M T, Ledenyák D and Andó M (2022) Effect of FDM infill patterns on mechanical properties. *Polymer Testing*, 113: 107654.
- Bögrekçi İ, Demircioğlu P, Sucuoğlu H S and Turhanlar O (2019) The effect of the infill type and density on hardness of 3D printed parts. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3 (3): 212-219.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Bolanakis N, Maravelakis E, Papadakis V, Kalderis D, Michailidis N, Argyros A and Vidakis N** (2025) Valorization of Biochar as a Reinforcement Agent in Polyethylene Terephthalate Glycol for Additive Manufacturing: A Comprehensive Content Optimization Course. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9 (2): 68.
- Broitman E** (2017) Indentation hardness measurements at macro-, micro-, and nanoscale: a critical overview. *Tribology Letters*, 65 (1): 23.
- Bryła J and Martowicz A** (2021) Study on the importance of a slicer selection for the 3d printing process parameters via the investigation of g-code readings. *Machines*, 9 (8): 163.
- Camargo J C, Machado Á R, Almeida E C and Silva E F M S** (2019) Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 103 (5): 2423-2443.
- Chan Y L, Widodo R T, Ming L C, Khan A, Abbas S A, Ping N Y and Kanakal M M** (2025) Review on 3D Printing Filaments Used in Fused Deposition Modeling Method for Dermatological Preparations. *Molecules*, 30 (11): 2411.
- Chávez-Montes W M, González-Sánchez G, López-Martínez E I, de Lira-Gómez P, Ballinas-Casarrubias L and Flores-Gallardo S** (2015) Effect of artificial weathering on PLA/nanocomposite molecular weight distribution. *Polymers*, 7 (4): 760-776.
- Chicos L A, Pop M A, Zaharia S M, Lancea C, Buican .. and Stamate V M** (2022) Infill density influence on mechanical and thermal properties of short carbon fiber-reinforced polyamide composites manufactured by FFF process. *Materials*, 15 (10): 3706.
- Ćwikła G, Grabowik C, Kalinowski K, Paprocka I and Ociepka P** (2017) The influence of printing parameters on selected mechanical properties of FDM/FFF 3D-printed parts. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 227 (1): 012033.
- Dağlı S** (2025) Mechanical Characterization and Interface Evaluation of Multi-Material Composites Manufactured by Hybrid Fused Deposition Modeling (HFDM). *Polymers*, 17 (12): 1631.
- de Carvalho Lucarelli C, Oliveira MM, Pagoto GB, Pereira JPM and Carlo JC** (2025) Structural and optical behavior of rapidly aged and unaged engineering-grade copolymers produced via fused deposition modeling. *Multiscale and Multidisciplinary Modealing, Experiments and Design*, 8 (6): 286.
- de la Rosa S, Mayuet Ares P F and Rodríguez-Parada L** (2025) Design of Flexible TPU-Based Lattice Structures for 3D Printing: A Comparative Analysis of Open-Cell Versus Closed-Cell Topologies. *Polymers*, 17 (9): 1133.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Dedeakayoğulları H ve Kaçal A** (2020) Eklemeli imalat teknolojileri ve kullanılan talaşlı imalat yöntemleri üzerine yapılan çalışmaların değerlendirilmesi. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 1 (1): 1-12.
- Delic M and Eyers D R** (2020) The effect of additive manufacturing adoption on supply chain flexibility and performance: An empirical analysis from the automotive industry. *International Journal of Production Economics*, 228: 107689.
- Dey A, Roan Eagle I N and Yodo N** (2021) A review on filament materials for fused filament fabrication. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5 (3): 69.
- Dickson A N, Abourayana HM and Dowling D P** (2020) 3D printing of fibre-reinforced thermoplastic composites using fused filament fabrication—A review. *Polymers*, 12 (10): 2188.
- Doğru A, Sözen A, Neser G and Seydibeyoğlu M O** (2021) Effects of aging and infill pattern on mechanical properties of hemp reinforced PLA composite produced by fused filament fabrication (FFF). *Applied Science and Engineering Progress*, 14 (4): 651-660.
- Dziewit P, Rajkowski K and Platek P** (2024) Effects of Building Orientation and Raster Angle on the Mechanical Properties of Selected Materials Used in FFF Techniques. *Materials*, 17 (24): 6076.
- Er A O ve Aydınli O M** (2024) Ergiyik filament ile imalat yönteminde kullanılan PLA ve çelik katkılı PLA filament malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 39 (2): 1285-1302.
- Gajjar T, Yang R, Ye L and Zhang Y X** (2025) Effects of key process parameters on tensile properties and interlayer bonding behavior of 3D printed PLA using fused filament fabrication. *Progress in Additive Manufacturing*, 10 (2): 1261-1280.
- Ghaffar A** (2024) Correlating FDM printing parameters with mechanical properties and surface quality of PLA printouts. *Engineering Research Express*, 6 (4): 045538.
- Giri J, Chiwande A, Gupta Y, Mahatme C and Giri P** (2021) Effect of process parameters on mechanical properties of 3d printed samples using FDM process. *Materials Today: Proceedings*, 47: 5856-5861.
- González-López M E, del Campo A S M, Robledo-Ortíz J R, Arellano M and Pérez-Fonseca A A** (2020) Accelerated weathering of poly (lactic acid) and its biocomposites: A review. *Polymer Degradation and Stability*, 179: 109290.
- Güldibi AS, Koçar O, Anaç N ve Parmaksız F** (2025) 3B Yazıcıda Polilaktikasit Ve Cam Fiber Katkılı Polipropilen Malzemeler İle Üretilen Parçaların Mekanik Performansının İncelenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28 (4): 1688-1702.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Hasan M R, Davies IJ, Pramanik A, John M and Biswas W K** (2024) Impact of process parameters on improving the performance of 3D printed recycled polylactic acid (rPLA) components. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 131 (7): 3751-3779.
- Hoseini M, Stead J and Bond T** (2023) Ranking the accelerated weathering of plastic polymers. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 25 (12): 2081-2091.
- Hossain M T, Shahid MA, Mahmud N, Habib A, Rana MM, Khan SA and Hossain M D** (2024) Research and application of polypropylene: a review. *Discover Nano*, 19 (1): 2.
- Islam MS, Pickering K L and Foreman NJ** (2010) Influence of accelerated ageing on the physico-mechanical properties of alkali-treated industrial hemp fibre reinforced poly (lactic acid)(PLA) composites. *Polymer Degradation and Stability*, 95 (1): 59-65.
- Janutėnienė J, Vasylius M, Tadžijevs A, Kartašovas V, Šapalas D and Grigaliūnienė S** (2024) Influence of Recycling and UV Exposure on the Properties of 3D Printing Polymer Materials. *Polymers*, 16 (23): 3292.
- Jiang D and Ning F** (2020) Fused filament fabrication of biodegradable PLA/316L composite scaffolds: effects of metal particle content. *Procedia Manufacturing*, 48: 755-762.
- Jirků P, Muller M, Mishra R K and Svobodová J** (2025) Effect of Recycling and UV Ageing on the Properties of PLA-Based Materials Used in Additive Manufacturing. *Polymers*, 17 (13): 1862.
- Kakabadze G** (2020) Anisotropic Behaviour Analysis of 3D Printed Structures. *Doktora Tezi*, Nottingham Trent University, Nottingham, 81 s.
- Kantaros A, Drosos C, Papoutsidakis M, Pallis E and Ganetsos T** (2025) Composite Filament Materials for 3D-Printed Drone Parts: Advancements in Mechanical Strength, Weight Optimization and Embedded Electronics. *Materials*, 18 (11): 2465.
- Kantaros A, Soulis E, Petrescu F I T and Ganetsos T** (2023) Advanced composite materials utilized in FDM/FFF 3D printing manufacturing processes: the case of filled filaments. *Materials*, 16 (18): 6210.
- Kaptan A and Kartal F** (2020) The effect of fill rate on mechanical properties of PLA printed samples. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10 (3): 1919-1927.
- Kaptan A and Kartal F** (2024) A critical review of composite filaments for fused deposition modeling: Material properties, applications, and future directions. *European Mechanical Science*, 8 (3): 199-209.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Karalar A B** (2023) An artificial neural network approach to predict the results of strain gauge measurements in the tensile testing of unidirectional laminated composites. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Savunma Teknolojileri Ana Bilim Dalı, İstanbul, 73 s.
- Kariz M, Sernek M, Obućina M and Kuzman M K** (2018) Effect of wood content in FDM filament on properties of 3D printed parts. *Materials Today Communications*, 14: 135-140.
- Kaynak C and Sarı B** (2016) Accelerated weathering performance of polylactide and its montmorillonite nanocomposite. *Applied Clay Science*, 121: 86-94.
- Khah H M and Soleimani O** (2023) Properties and applications of polymers: A mini review. *J. Chem. Rev.*, 5 (2): 204-220.
- Khan I, Abas M, Ahmad S, Al Rashid A and Koç M** (2024) Fabrication of a low-cost fused filament fabrication-based 3D printer and investigation of the effects of process parameters on mechanical properties of 3D-printed samples. *Journal of Engineering Research*.
- Khodaei A, Abedini V and Kami A** (2024) Effects of fused filament fabrication (FFF) process parameters on tensile and flexural properties of ABS/PLA multi-material. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 46 (10): 628.
- Koçar O, Anaç N, Baysal E, Parmaksız F ve Akgül İ** (2024) Investigation of mechanical properties and color changes of 3D-printed parts with different infill ratios and colors after aging. *Materials*, 17 (23): 5908.
- Kohutiar M, Kakošová L, Krbata M, Janík R, Fekiač JJ, Breznická A and Timárová Ľ** (2025) Comprehensive review: technological approaches, properties, and applications of pure and reinforced polyamide 6 (PA6) and polyamide 12 (PA12) composite materials. *Polymers*, 17 (4): 442.
- Kumar S, Singh I, Koloor SSR, Kumar D and Yahya MY** (2022) On laminated object manufactured FDM-printed ABS/TPU multimaterial specimens: an insight into mechanical and morphological characteristics. *Polymers*, 14 (19): 4066.
- Laureto J J and Pearce JM** (2018) Anisotropic mechanical property variance between ASTM D638-14 type i and type iv fused filament fabricated specimens. *Polymer Testing*, 68: 294-301.
- Lepak-Kuc S, Nowicki Ł, Lekawa-Raus A and Jakubowska M** (2024) Multifiller carbon nanotube, graphene, and carbon black composite filaments: A path to versatile electromaterials. *MRS Bulletin*, 49 (11): 1092-1099.
- Liu X, Yang R, Xu Z P, Ye Y, Tang G S, Zhao M and Meng X Z** (2024) Characterization of polymer aging: a review. *Chinese Journal of Polymer Science*, 42 (11): 1642-1660.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Loskot J, Jezbera D, Loskot R, Bušovský D, Barylski A, Glowka K and Zubko M** (2023) Influence of print speed on the microstructure, morphology, and mechanical properties of 3D-printed PETG products. *Polymer Testing*, 123: 108055.
- Luo X, Cheng H and Wu X** (2023) Nanomaterials reinforced polymer filament for fused deposition modeling: a state-of-the-art review. *Polymers*, 15 (14): 2980.
- Ly S, Gu J, Tan H and Zhang Y** (2018) Enhanced durability of sustainable poly (lactic acid)-based composites with renewable starch and wood flour. *Journal of Cleaner Production*, 203: 328-339.
- Majko J, Vasko M, Handrik M and Saga M** (2022) Tensile properties of additively manufactured thermoplastic composites reinforced with chopped carbon fibre. *Materials*, 15 (12): 4224.
- Manogharan G, Wysk R, Harrysson O and Aman R** (2015) AIMS—a metal additive-hybrid manufacturing system: system architecture and attributes. *Procedia Manufacturing*, 1: 273-286.
- McKeen L W** (2016) Introduction to the Tribology of Plastics and Elastomers. *Fatigue and Tribological Properties of Plastics and Elastomers*, 27-44.
- Mendes ADO, Costa VL, Vieira JC, Videira PE, Nunes MJ, Gaspar A and Fiadeiro PT** (2025) UV-Accelerated Aging of PLA and PP-Based Biocomposites: A Spectral and Colorimetric Study. *Journal of Composites Science*, 9 (7): 317.
- Mihut D, Afshar A, McDonald B and McMillan R** (2022) Independent Study on Creating Conductive 3D Printed Polymers and Improving their Strength. *2022 ASEE Southeastern Section Conference*, American Society for Engineering Education.
- Neccaroğlu V and Karamanlı İA** (2025) Experimental and Statistical Analysis of the Effect of 3D Printing Parameters on Mechanical Performance. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 9 (2): 207-219.
- Ngo T D, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KT and Hui D** (2018) Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143: 172-196.
- Nikiema D, Sène NA, Balland P and Sergent A** (2023) Study of walls' influence on the mechanical properties of 3D printed onyx parts: experimental, analytical and numerical investigations. *Heliyon*, 9 (8).
- Nugroho A, Ardiansyah R, Rusita L, Larasati A and Larasati I L** (2018) Effect of layer thickness on flexural properties of PLA (PolyLactid Acid) by 3D printing. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 1130: 012017.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Nurazzi N M, Asyraf M R M, Fatimah Athiyah S, Shazleen SS, Rafiqah S A, Harussani M M and Khalina A** (2021) A review on mechanical performance of hybrid natural fiber polymer composites for structural applications. *Polymers*, 13 (13): 2170.
- Nzimande M C, Mtibe A, Tichapondwa S and John MJ** (2024) A review of weathering studies in plastics and biocomposites—Effects on mechanical properties and emissions of volatile organic compounds (VOCs). *Polymers*, 16 (8): 1103.
- Osadolor A O, Showole AO, Eze T J, Ajayi V and Owulo R O** (2024) Design and Analysis of the Impact of Ultraviolet Aging on the Mechanical Properties and Durability of PLA Lattice Structures. *J. Mater. Sci. Res. Rev*, 7: 287-301.
- Özsolak O** (2019) Eklemeli imalat yöntemleri ve kullanılan malzemeler. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 3 (1): 9-14.
- Palaniyappan S, Annamalai G, Sivakumar NK and Muthu P** (2023) Development of functional gradient multi-material composites using Poly Lactic Acid and walnut shell reinforced Poly Lactic Acid filaments by fused filament fabrication technology. *Journal of Building Engineering*, 65: 105746.
- Pandžić A, Hodžić D, Kadrić D and Kadrić E** (2023) The Effect of Ultraviolet Radiation on Mechanical Properties of Fused Deposition Modeling 3D Printed Materials. *TEM Journal*, 12 (4).
- Panico A, Corvi A, Collini L and Sciancalepore C** (2025) Multi objective optimization of FDM 3D printing parameters set via design of experiments and machine learning algorithms. *Scientific Reports*, 15 (1): 16753.
- Penumakala P K, Santo J and Thomas A** (2020) A critical review on the fused deposition modeling of thermoplastic polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 201: 108336.
- Pickett J E, Kuvshinnikova O, Sung LP and Ermi B D** (2019) Accelerated weathering parameters for some aromatic engineering thermoplastics. *Polymer Degradation and Stability*, 166: 135-144.
- Plamadiala I, Croitoru C, Pop M A and Roata IC** (2025) Enhancing polylactic acid (PLA) performance: A review of additives in fused deposition modelling (FDM) filaments. *Polymers*, 17 (2): 191.
- Prashar G, Vasudev H and Bhuddhi D** (2023) Additive manufacturing: expanding 3D printing horizon in industry 4.0. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 17 (5): 2221-2235.
- Rakshit R, Kalvettukaran P, Acharyya S K, Panja S C and Misra D** (2023) Development of high specific strength acrylonitrile styrene acrylate (ASA) structure using fused filament fabrication. *Progress in Additive Manufacturing*, 8 (6): 1543-1553.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Ribeiro M, Sousa Carneiro O and Ferreira da Silva A** (2019) Interface geometries in 3D multi-material prints by fused filament fabrication. *Rapid Prototyping Journal*, 25 (1): 38-46.
- Rodríguez-Reyna S L, Mata C, Díaz-Aguilera J H, Acevedo-Parra H R and Tapia F** (2022) Mechanical properties optimization for PLA, ABS and Nylon+ CF manufactured by 3D FDM printing. *Materials Today Communications*, 33: 104774.
- Rogelj A, Liović D, Hozdić E, Franulović M and Mijović B** (2025) Influence of Cooling Lubricants and Structural Parameters on the Tensile Properties of FFF 3D-Printed PLA and PLA/Carbon Fiber Composites. *Polymers*, 17 (13): 1797.
- Romero M, Macchione M A, Mattea F and Strumia M** (2020) The role of polymers in analytical medical applications. A review. *Microchemical Journal*, 159: 105366.
- Sardinha M, Ferreira L, Diogo H, Ramos TR, Reis L and Vaz MF** (2025) Material extrusion of TPU: thermal characterization and effects of infill and extrusion temperature on voids, tensile strength and compressive properties. *Rapid Prototyping Journal*, 31 (11): 62-81.
- Sevli O** (2021) 3 boyutlu baskıda kullanılacak malzemenin makine öğrenmesi teknikleri ile tahminlenmesi. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5 (3): 596-605.
- Shergill K, Chen Y and Bull S** (2023) What controls layer thickness effects on the mechanical properties of additive manufactured polymers. *Surface and Coatings Technology*, 475: 130131.
- Shi Z, Zou C, Zhou F and Zhao J** (2022) Analysis of the mechanical properties and damage mechanism of carbon fiber/epoxy composites under UV aging. *Materials*, 15 (8): 2919.
- Silva M M, Lopes P E, Li Y, Pötschke P, Ferreira F N and Paiva M C** (2021) Polylactic acid/carbon nanoparticle composite filaments for sensing. *Applied Sciences*, 11 (6): 2580.
- Sohrabian M, Vaseghi M, Khaleghi H, Dehrooyeh S and Kohan M S A** (2021) Structural investigation of delicate-geometry fused deposition modeling additive manufacturing scaffolds: experiment and analytics. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30 (9): 6529-6541.
- Sultana J, Rahman MM, Wang Y, Ahmed A and Xiaohu C** (2024) Influences of 3D printing parameters on the mechanical properties of wood PLA filament: an experimental analysis by Taguchi method. *Progress in Additive Manufacturing*, 9 (4): 1239-1251.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Sun L, Liu S, Wu G, Shen H, Zhu Y, Huang W and Guan J** (2025) Strong, tough, and UV-resistant polylactic acid composites by incorporating doped carbon dots. *International Journal of Biological Macromolecules*, 308: 142416.
- Sürmen H K** (2019) Eklemeli İmalat (3b Baskı): Teknolojiler Ve Uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24 (2): 373-392.
- Syrlybayev D, Zharylkassyn B, Seisekulova A, Akhmetov M, Perveen A and Talamona D** (2021) Optimisation of strength properties of FDM printed parts—A critical review. *Polymers*, 13 (10): 1587.
- Tao Q, Fu B and Zhong F** (2025) A Review of Challenges and Future Perspectives for High-Speed Material Extrusion Technology. *Applied Sciences*, 15 (22): 12176.
- Tao Y, Li P and Pan L** (2020) Improving tensile properties of polylactic acid parts by adjusting printing parameters of open source 3D printers. *Materials Science*, 26 (1): 83-87.
- Ulutaş E, Taşdemir M ve Koçak ED** (2019) Investigation of mechanical properties of recycled polypropylene/rice husk polymer composite.
- URL-1** <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>>, Ziyaret Tarihi: 11.09.2025.
- URL-2** <<https://all3dp.com/2/3d-printer-nozzle-size-material-what-to-know-which-to-buy/>>, Ziyaret Tarihi: 11.09.2025.
- URL-3** <<https://www.esun3d.com/tr/pla-pro-product/>>, Ziyaret Tarihi: 18.09.2025.
- URL-4** <https://forward-am.com/wp-content/uploads/2024/10/Ultrafuse_PAHT_CF15_TDS_EN_v3.5-1.pdf>, Ziyaret Tarihi: 18.09.2025
- URL-5:** <https://www.esun3d.com/uploads/eSUN_PLA+-Filament_TDS_V4.0.pdf>, Ziyaret Tarihi: 18.09.2025.
- URL-6** <<https://ultimaker.com/learn/introducing-the-new-ultimaker-print-core-cc>>, Ziyaret Tarihi: 01.10.2025.
- URL-7** <<https://ultimaker.com/learn/the-ultimaker-s5-is-here/>>, Ziyaret Tarihi: 01.10.2025.
- URL-8** <<https://ultimaker.com/learn/3d-printing-quality-factors-enhancing-accuracy-and-resolution>>, Ziyaret Tarihi: 01.10.2025.
- URL-9** <<https://www.iso.org/standard/83801.html>>, Ziyaret Tarihi: 03.10.2025.
- URL-10** <<https://www.iso.org/standard/83802.html>>, Ziyaret Tarihi: 03.10.2025.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- URL-11** <<https://www.hongtuoinstrument.com/dh-ruv-3-uv-aging-environmental-test-chamber-uv-aging-test-machine-7689604.html>>, Ziyaret Tarihi: 03.10.2025.
- URL-12** <<https://www.zwickroell.com/industries/materials-testing/tensile-test/>>, Ziyaret Tarihi: 04.10.2025.
- URL-13** <<https://store.astm.org/d0638-14.html>>, Ziyaret Tarihi: 04.10.2025.
- URL-14**: <<https://www.zwickroell.com/industries/plastics/thermoplastics-and-thermosetting-molding-materials/3-point-flexure-test-iso-178/>>, Ziyaret Tarihi: 04.10.2025.
- URL-15**: <<https://www.zwickroell.com/industries/plastics/thermoplastics-and-thermosetting-molding-materials/3-point-flexure-test-astm-d790>>, Ziyaret Tarihi: 04.10.2025.
- Ünal İ O, Koçar O, Neccaroğlu V, Baysal E and Anaç N** (2025) Investigation of Color and Mechanical Properties of Parts Printed on 3D Printers After Salt Spray Testing. *Polymers*, 17 (14): 1902.
- Villi Ö, Villi O and Yavuz H** (2024) Concept Design for Optimizing Mass Production Processes with 3D Printer in the Industry. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 8 (1): 8-19.
- Vogt N B and Kleppe EA** (2009) Oxo-biodegradable polyolefins show continued and increased thermal oxidative degradation after exposure to light. *Polymer Degradation and Stability*, 94 (4): 659-663.
- Wang J, Hu H, Liu Z, Shi Y and Huang Y** (2025) Optimization of 3D Printing Nozzle Parameters and the Optimal Combination of 3D Printer Process Parameters for Engineering Plastics with High Melting Points and Large Thermal Expansion Coefficients. *Materials*, 18 (3): 500.
- Wang P, Zou B, Ding S and Li L** (2021) Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34 (9): 236-246.
- White J R** (2006) Polymer ageing: physics, chemistry or engineering? Time to reflect. *Comptes Rendus Chimie*, 9 (11-12): 1396-1408.
- Yılmaz S** (2024) Comprehensive analysis of 3D printed PA6. 6 and fiber-reinforced variants: revealing mechanical properties and adhesive wear behavior. *Polymer Composites*, 45 (2): 1446-1460.
- Yoruç ABH ve Uğraşkan V** (2017) Yeşil polimerler ve uygulamaları. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17 (1): 318-337.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Zambrano M G G, Yoon S G, Lee J Y and An J** (2023) Effect of aging on polyethylene microfiber surface properties and its consequence on adsorption characteristics of 17alpha-ethynylestradiol. *Science Progress*, 106 (2): 00368504231173835.
- Zhang F, Yang R and Lu D** (2023) Investigation of polymer aging mechanisms using molecular simulations: A review. *Polymers*, 15 (8): 1928.
- Zhou L, Miller J, Vezza J, Mayster M, Raffay M, Justice Q and Bernat J** (2024) Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Sensors*, 24 (9): 2668.
- Zou Z, Wei X, Liao M, Deng, L, Yao J, Sun L and Wang L** (2024) Effect of polycarbodiimide, epoxy chain extenders and tannic acid on the hydrolysis and UV resistance of polylactic acid. *Reactive and Functional Polymers*, 199: 105894

ÖZGEÇMİŞ

Furkan PARMAKSIZ, ilköğrenimini Kırklareli ve Mardin’de, lise öğrenimini ise Afyonkarahisar Bolvadin Ayfer Ceylan Emet Fen Lisesi’nde tamamladı. Lisans eğitimine 2018 yılında başladığı Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi (ZBEÜ) Makine Mühendisliği Bölümü’nden, 2022 yılında Makine Mühendisi unvanıyla mezun oldu. 2023 yılında ZBEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda tezli yüksek lisans eğitimine başlayan Parmaksız, 2024 yılında ZBEÜ Makine Mühendisliği Bölümü’ne Araştırma Görevlisi olarak atanmıştır. Halihazırda lisansüstü eğitime ve akademik görevine devam etmektedir.

Temel çalışma alanı eklemeli imalat teknolojileri olan Parmaksız’ın, ulusal ve uluslararası hakemli dergilerde yayımlanmış makaleleri ve bilimsel konferanslarda sunulmuş çeşitli bildirileri bulunmaktadır. Malzeme bilimi ve üretim teknolojileri de yazarın diğer akademik ilgi alanları arasında yer almaktadır.