



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**3 BOYUTLU (3D) YAZICIDA ÜRETİLEN POLİLAKTİK ASİT (PLA)
NUMUNELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE DOLGU MADDESİ
YOĞUNLUĞUNUN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nilüfer ŞAHİN

Biyokompozit Mühendisliği Anabilim Dalı

Biyokompozit Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

ŞUBAT 2025

**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**3 BOYUTLU (3D) YAZICIDA ÜRETİLEN POLİLAKTİK ASİT (PLA)
NUMUNELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE DOLGU MADDESİ
YOĞUNLUĞUNUN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Nilüfer ŞAHİN
(21278603013)
ORCID: 0000-0001-7581-7996**

**Biyokompozit Mühendisliği Anabilim Dalı
Biyokompozit Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı**

**Danışman: Prof. Dr. Murat ERTAŞ
ORCID: 0000-0001-9218-5513**

ŞUBAT 2025

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 21278603013 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Nilüfer ŞAHİN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “3 BOYUTLU (3D) YAZICIDA ÜRETİLEN POLİLAKTİK ASİT (PLA) NUMUNELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE DOLGU MADDESİ YOĞUNLUĞUNUN ETKİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Murat ERTAŞ**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üye Naile ANGIN**
Bursa Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ayfer DÖNMEZ ÇAVDAR
Karadeniz Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 2025
Savunma Tarihi : 04 Şubat 2025



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Nilüfer ŞAHİN

İmzası:



Değerli aileme,

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde emeği geçen ve katkılarıyla çalışmamı mümkün kılan herkese minnettarlığımı ifade etmek isterim. Öncelikle, bilgi birikimi ve yönlendirmeleriyle bana rehberlik eden danışman hocam Sayın Prof. Dr. Murat ERTAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Sabırla verdiği değerli geri bildirimler ve yol gösterici yaklaşımları, bu çalışmanın başarıyla tamamlanmasını mümkün kılmıştır. Çalışmam boyunca bana destek olan, yönlendiren ve sürekli motive eden Sayın Dr. Öğr. Üyesi Naile ANGIN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Onun disiplinli yaklaşımı ve cesaretlendirici tutumu, bu çalışmanın şekillenmesinde önemli bir rol oynamıştır. Tez savunmam sırasında jüri üyesi olarak yer alan ve değerli görüşleriyle katkıda bulunan Sayın Prof. Dr. Ayfer Dönmez ÇAVDAR'a teşekkür ederim. Ayrıca, laboratuvar çalışmalarındaki testlerin gerçekleştirilmesinde teknik bilgi ve deneyimleriyle desteğini esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Doğan MEMİŞ hocama çok teşekkür ederim. Mekanik testlerin yapılması ve sonuçların analiz edilmesindeki katkıları benim için çok değerliydi.

Son olarak, bu süreçte gösterdiği sabır ve anlayışla her zaman yanımda olan sevgili eşim Serdar Şahin'e gönülden teşekkür ederim. Hem kendi sorumluluklarını hem de benim görevlerimi paylaşarak bu çalışmayı tamamlamamı mümkün kıldı. Onun desteği, bu tez çalışmasının görünmeyen temel taşlarından biri olmuştur.

Tüm bu değerli insanların katkılarıyla tamamlanan bu çalışmanın, alanında faydalı olmasını umuyorum.

Şubat 2025

Nilüfer ŞAHİN
Makine Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	x
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvi
1. GİRİŞ	17
1.1 3D Baskı Teknolojisi.....	18
1.2 3D Eklemeli İmalat Tekniklerinin Sınıflandırılması.....	20
1.3 3D Yazıcı Çeşitleri	27
1.3.1 Kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcılar	27
1.3.2 Delta tipi 3 boyutlu yazıcılar.....	28
1.3.3 Polar tipi 3 boyutlu yazıcılar	29
1.3.4 Scara tipi 3 boyutlu yazıcılar	30
1.4 3D Baskı İşlem Adımları.....	31
1.4.1 Modelleme	31
1.4.2 Dosya kaydetme	32
1.4.3 Dilimleme.....	32
1.4.4 Dosya transferi	33
1.4.5 3D Baskı.....	34
1.4.6 Son işlem.....	34
1.5 Polilaktik Asit (PLA)	35
1.6 Poliüretan	37
1.7 Epoksi Reçine.....	39
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	41
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	45
3.1 Materyal	45
3.1.1 3D yazıcı	45
3.1.2 PLA filament.....	46
3.1.3 Poliüretan köpük	47
3.1.4 Epoksi reçine.....	47
3.1.5 Dolgu malzemesi aparatı (nozül)	47
3.2 Yöntem.....	48
3.2.1 Üretim reçetesi	48
3.2.2 Üretim işlemi (yazdırma)	49
3.2.3 İç dolgu işlemi (poliüretan köpük & epoksi reçine)	50
3.2.4 Poliüretan köpük dolgu işlemi	51
3.2.5 Epoksi reçine dolgu işlemi.....	52
3.2.6 Mekanik testler.....	52

3.2.6.1 Çekme testi.....	52
3.2.6.2 Eğme testi.....	54
3.2.7 Termogravimetrik analiz ve türev termogravimetrik analiz	56
3.2.8 Maliyet analizi.....	57
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	58
4.1 Çekme Testine Ait Bulgular.....	58
4.2 Eğme Testine Ait Bulgular.....	61
4.3 TGA Analizine Ait Bulgular	63
4.4 Sem Analizi	67
4.5 Maliyet Analizi.....	69
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	72
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ.....	79



KISALTMALAR

ASTM	: Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
DTG	: Türev Termogravimetrik Analiz
EP	: Epoksi Reçine
MPa	: Mega Paskal
PLA	: Polilaktik Asit
PU	: Poliüretan Köpük
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TGA	: Termogravimetrik Analiz

SEMBOLLER

$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat derece
b	: Örnek genişliği
d	: Yoğunluk
E	: Elastikiyet modülü
F	: Kuvvet
$F_{\max}$	: Kırılma anındaki maksimum kuvvet
L	: Dayanak noktaları arasındaki açıklık
L_0	: Örnek boyu
Δ	: Eğilme miktarı
ΔL	: Birim uzama
$\delta_{\text{çd}}$	: Çekme direnci
ϵ	: Kopmada uzama miktarı

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1 : PLA'nın özellikleri.....	36
Çizelge 3.1 : 3D yazıcı teknik özellikleri.	45
Çizelge 3.2 : PLA filament özellikleri.....	46
Çizelge 3.3 : Deneysel varyasyonlar.	48
Çizelge 3.4 : 3D programının arayüzünde tasarlanan üretim parametreleri.....	50
Çizelge 4.1 : Numunelere ait kütle kayıpları.....	64
Çizelge 4.2 : Hammadde maliyeti.	70
Çizelge 4.3 : Üretim maliyet analizi.....	70

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Geleneksel imalat yöntemi ile eklemeli imalat yönteminin karşılaştırması (a) geleneksel imalat, (b) eklemeli imalat	19
Şekil 1.2 : Eklemeli imalat sınıflandırması.....	21
Şekil 1.3 : EYM üretim tekniği.	22
Şekil 1.4 : EYM işleme parametreleri balık kılçığı diyagramı.....	24
Şekil 1.5 : Baskı kalitesini etkileyen parametreler.	24
Şekil 1.6 : Farklı numune yönelimleri.	26
Şekil 1.7 : Kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcı.	28
Şekil 1.8 : Delta tipi 3 boyutlu yazıcı.	29
Şekil 1.9 : Polar tipi 3 boyutlu yazıcı.	30
Şekil 1.10 : Scara tipi 3 boyutlu yazıcı.	30
Şekil 1.11 : 3D baskı prosesi için temel adımlar.	31
Şekil 1.12 : 45° kuralına göre destek yapılar.	32
Şekil 1.13 : Parçanın dilimleme yazılımında konumlandırılması.....	33
Şekil 1.14 : PLA'nın kimyasal yapısı.	35
Şekil 1.15 : Doğal kaynaklardan PLA üretim süreci.	35
Şekil 1.16 : Poliüretan sentezinin şematik gösterimi.....	37
Şekil 1.17 : Poliüretanların kullanım alanları.	38
Şekil 1.18 : Poliüretan köpük sentezi aşamaları.	39
Şekil 3.1 : Creality marka K1 serisi K1 max 3D yazıcı.....	46
Şekil 3.2 : PLA filament	47
Şekil 3.3 : Dolgu malzemesi apaatı (nozul).....	48
Şekil 3.4 : Dolgu deseni için referans ölçü alma.	49
Şekil 3.5 : Tekrar modelleme.	49
Şekil 3.6 : Poliüretan köpük doldurma işlemi.	51
Şekil 3.7 : Nozul deliği körleme.	51
Şekil 3.8 : Çekme testi numuneleri.....	52
Şekil 3.9 : Çekme testi düzeneği.....	53
Şekil 3.10 : Eğme testi numuneleri.....	54
Şekil 3.11 : Eğme testi düzeneği.....	55
Şekil 3.12 : Hitachi marka TGA cihazı.	56
Şekil 4.1 : Gerilme dayanımı grafiği.	58
Şekil 4.2 : Maximum uzama grafiği.	59
Şekil 4.3 : Elastikiyet modulu grafiği.	60
Şekil 4.4 : Gerilme grafiği.	61
Şekil 4.5 : Maximum uzama grafiği.	62
Şekil 4.6 : Elastikiyet modulu grafiği.	63
Şekil 4.7 : PLA malzemesine ait DTG eğrisi.	64
Şekil 4.8 : PLA ve poliüretan dolgu maddesine ait DTG eğrisi.	65
Şekil 4.9 : PLA ve epoksi reçine dolgu maddesine ait DTG eğrisi.	66

Şekil 4.10 : PLA kontrol numunesine ait SEM görüntüleri.....	67
Şekil 4.11 : Epoksi reçine dolgu malzemeli PLA (%10) numunesi	67
Şekil 4.12 : Epoksi reçine dolgu malzemeli PLA (%20) numunesi.	68
Şekil 4.13 : Poliüretan köpük dolgu malzemeli PLA (%10) numunesi.....	69



3 BOYUTLU (3D) YAZICIDA ÜRETİLEN POLİLAKTİK ASİT (PLA) NUMUNELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE DOLGU MADDESİ YOĞUNLUĞUNUN ETKİSİ

ÖZET

Bu çalışmada, 3D yazıcı ile üretilen PLA (Polilaktik Asit) numunelerinin mekanik, termal ve maliyet analizleri gerçekleştirilmiş ve poliüretan köpük ile epoksi reçine dolgu malzemelerinin bu özelliklere etkileri incelenmiştir. ASTM D638 ve D5023 standartlarına uygun olarak hazırlanan %10 ve %20 doluluk oranlarına sahip PLA numuneleri, dolgu malzemeleri ile desteklenmiş ve çekme, eğme testleri gibi mekanik testlere tabi tutulmuştur. Ayrıca, dolgu malzemelerinin dağılımı ve termal davranışlarını incelemek için SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve TGA (Termal Gravimetrik Analiz) yöntemleri kullanılmıştır. Çekme testi sonuçlarına göre, poliüretan köpük dolgu, PLA'nın rijitliğini %16-22 oranında artırmış, ancak maksimum gerilme ve uzama değerlerinde yalnızca %10-15 düzeyinde sınırlı bir iyileşme sağlamıştır. Buna karşılık, epoksi reçine dolgu, PLA'nın mekanik dayanımını artırarak maksimum gerilme değerlerinde %20, uzama değerlerinde ise %15'e kadar bir artış sağlamıştır. Eğme testi sonuçlarında, kontrol grubu (dolgu malzemesi içermeyen PLA), en yüksek elastisite modülü (3177 N/mm^2) ve maksimum gerilme değerlerine ($91,59 \text{ N/mm}^2$) sahip olurken, dolgu malzemeleri ile desteklenmiş PLA numunelerinde bu değerlerde %10-30 arasında bir düşüş gözlemlenmiştir. Ancak, epoksi reçine dolgulu PLA, poliüretan dolgulu PLA'ya kıyasla %15 daha iyi mekanik performans sergilemiştir. Termal analizler, poliüretan dolgunun PLA'nın termal kararlılığını %5-7 arasında bir miktar düşürdüğünü, epoksi reçinenin ise termal kararlılığı %8-10 artırdığını göstermiştir. SEM görüntüleri, poliüretan dolgunun matriks içinde düzensiz bir şekilde dağıldığını ve kümelenmelere yol açtığını ortaya koyarken, epoksi reçinenin PLA ile daha homojen bir dağılım ve güçlü bir ara yüzey bağı oluşturduğunu göstermiştir. Maliyet analizi sonuçları, poliüretan dolgulu PLA'nın düşük maliyetli uygulamalar için uygun olduğunu, epoksi reçine dolgulu PLA'nın ise maliyetinin %19 daha yüksek olmasına rağmen, yüksek performans gerektiren uygulamalar için avantajlı olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, bu çalışma, dolgu malzemelerinin PLA'nın mekanik ve termal özelliklerini geliştirme potansiyelini ortaya koymuş, dolgu türü ve doluluk oranının optimize edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu çalışma, PLA'nın özelleştirilerek farklı endüstriyel alanlara uyarlanabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: 3D yazıcı, Eklemeli imalat, Eriyik yığılma modelleme, Polilaktik asit (PLA), Poliüretan köpük, Epoksi reçine.

EFFECT OF FILLER DENSITY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF POLY-LACTIC ACID (PLA) SAMPLES PRODUCED IN 3 DIMENSIONAL (3D) PRINTER

SUMMARY

In this study, mechanical, thermal and cost analyses of PLA (Polylactic Acid) samples produced by 3D printer were performed and the effects of polyurethane foam and epoxy resin fillers on these properties were investigated. PLA samples with 10% and 20% filling ratios prepared in accordance with ASTM D638 and D5023 standards, were supported with fillers and subjected to mechanical tests such as tensile and bending tests. Additionally, Scanning Electron Microscopy and Thermal Gravimetric Analysis methods were used to examine the distribution and thermal behavior of the filling materials. According to the tensile test results, polyurethane foam filling increased the rigidity of PLA by 16-22%, but only provided a limited improvement of 10-15% in maximum stress and elongation values. In contrast, epoxy resin filler increased the mechanical strength of PLA, providing an increase of up to 20% in maximum tensile values and up to 15% in elongation values. In the bending test results, the control group (PLA without filler material) had the highest elastic modulus (3177 N/mm²) and maximum tensile values (91.59 N/mm²), while a 10-30% decrease in these values was observed in the PLA samples supported with filler materials. However, epoxy resin-filled PLA exhibited 15% better mechanical performance compared to polyurethane-filled PLA. Thermal analysis showed that the polyurethane filler slightly decreased the thermal stability of PLA by 5-7%, while the epoxy resin increased the thermal stability by 8-10%. SEM images revealed that the polyurethane filler was unevenly distributed in the matrix, leading to clusters, while the epoxy resin formed a more homogeneous distribution and strong interfacial bond with PLA. Cost analysis results showed that polyurethane-filled PLA is suitable for low-cost applications, while epoxy resin-filled PLA is advantageous for applications requiring high performance, although its cost is 19% higher. In conclusion, this study demonstrated the potential of fillers to improve the mechanical and thermal properties of PLA, and emphasized the need to optimize the filler type and filling ratio. This study shows that PLA can be customized and adapted to different industrial fields.

Keywords: 3D printer, Additive manufacturing, Fused deposition modeling, Poly-lactic acid (PLA), Polyurethane foam, Epoxy resin.

1. GİRİŞ

Üç boyutlu (3D) yazıcı teknolojileri, geleneksel üretim yöntemlerinin ilerisine geçerek, tasarım ve üretim süreçlerinde devrim yaratmış ve mühendislikten sanata kadar geniş bir çerçevede yenilikçi çözümler sunmuştur. Özellikle düşük maliyetli prototipleme, karmaşık geometrik yapıların kolaylıkla oluşturulabilmesi ve üretilmesi, bu teknolojinin çeşitli endüstri kollarında hızla benimsenmesini sağlamıştır. 3D yazıcı ile üretimi yapılacak parçaların özellikleri, baskı için kullanılacak olan malzemenin türüne, doluluk oranına, yazdırma parametrelerine ve son işlem tekniklerine bağlı olarak büyük ölçüde değişmektedir. 3D yazıcı ile üretimde sıklıkla kullanılan malzemelerden biri olan Polilaktik Asit (PLA), biyolojik olarak parçalanabilir yapısı ve kullanım kolaylığı nedeniyle tercih edilen bir termoplastik malzeme haline gelmiştir. Buna ilave olarak PLA'nın mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, malzemenin daha geniş bir uygulama alanına sahip olabilmesi için de kritik bir gereklilik göstermektedir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan Polilaktik Asit (PLA), çevre dostu bir malzeme olması, kolay işlenebilirliği, uygun maliyeti sayesinde 3D baskı uygulamalarında en çok tercih edilen filamentlerden biridir. Ancak, düşük esneklik, kırılabilirlik ve sınırlı mekanik dayanım gibi negatif özellikleri, PLA'nın bazı endüstriyel uygulamalarda yetersiz kalmasına neden olmaktadır. PLA ile üretilen parçaların performans özelliklerini artırmak için doluluk oranları, malzemenin yoğunluğunu ve iç yapısını belirleyen önemli bir faktördür. Doluluk oranındaki değişim, parçanın ağırlığı, mukavemeti ve deformasyon davranışı üzerinde doğrudan etkili olan bir faktördür. Bu çalışmada, %10 ve %20 yazdırma doluluk oranlarına sahip PLA numunelerine epoksi reçine ve poliüretan köpük dolgu malzemelerinin entegre edilmesiyle mekanik dayanımın artırılacağı öngörülmüş ve buna yönelik çalışma yapılmıştır. Poliüretan köpükler, hafif yapıları, çevre dostu olmaları, düşük yoğunlukları ve darbe ile şok emilimi gibi üstün performans özellikleri sayesinde polimer malzemeler arasında en çok incelenen malzeme gruplarından biridir. Ayrıca, kolay işlenebilirlikleri ve yüksek esneklikleri ile geniş bir uygulama alanı ile öne çıkmaktadırlar. Bu avantajların yanı sıra üretim maliyetlerinin düşük olması ayrıca

tercih edilme sebebidir. Epoksi reçine, yüksek mekanik dayanımı, sertliği ve kimyasal direnci ile öne çıkan bir polimer malzemedir. Güçlü yapışma özelliği sayesinde çeşitli yüzeylere kuvvetli bir şekilde bağlanabilir ve yük taşıma kapasitesini artırır.

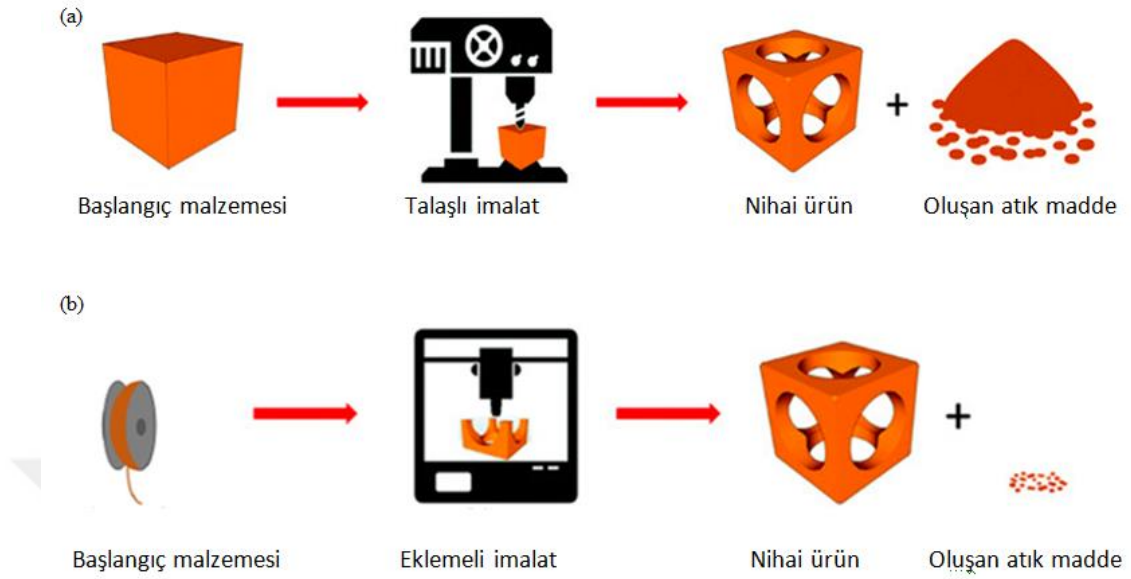
Bu tez çalışmasının temel amacı, farklı doluluk oranlarına sahip PLA numunelerinin epoksi reçine ve poliüretan köpük ile güçlendirilmesi sonucu elde edilen hibrit yapının eğme ve çekme testleri ile mekanik performansını incelemektir. Bu bağlamda, hem doluluk oranının hem de bu doluluk oranlarına bağlı olarak dolgu malzemelerinin etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmanın bulguları ile, 3D yazıcı teknolojilerinin daha geniş uygulama alanlarına adapte edilmesine yönelik önemli katkılar sağlanması hedeflenmektedir. Özellikle bu tür hibrit yapıların geliştirilebilme ihtimalleri, hem malzeme bilimi hem de endüstriyel tasarım açısından yenilikçi çözümlerin önünü açabilir. Çalışma, yalnızca 3D yazıcıyla üretilen parçaların mekanik performansını artırmaya yönelik çözümler sunmakla kalmayıp, hibrit yapıların tasarımı ve geliştirilmesi için de bir referans kaynağı oluşturmayı hedeflemektedir.

1.1 3D Baskı Teknolojisi

Eklemeli imalat olarak adlandırılan bu teknolojinin temel prensibi, bilgisayar destekli tasarım programları (Autocad, SolidWorks vb.) veya 3D tarayıcılar kullanılarak oluşturulan dijital bir nesnenin süreç planlamasına gerek kalmadan fiziksel formda doğrudan üretilmesi olarak tanımlanabilir. Bu işlemi gerçekleştiren cihazlar ise 3D yazıcı olarak adlandırılır. Eklemeli üretim teknolojisi, ürün geliştirme süreçlerini hızlandırmak, küçük ölçekli üretimlerde esneklik sağlamak ve karmaşık tasarımlı bileşenleri düşük maliyetle üretmek için geliştirilmiş yenilikçi bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Günümüz teknolojisinde kullanılan 3D yazıcılarda katman tabanlı çalışma prensibi olmakla birlikte, üretim şekillerinin farklılık göstermesinin nedeni katmanların nasıl oluşturulduğu ve birbiri ile nasıl bağlandığı, üretim için kullanılan malzemelerin çeşididir. Bazı Eklemeli İmalat yöntemlerinde nesne katmanları oluşturmada hammaddeyi eriterek ya da yumuşatarak kullanırken, diğerleri lazer/UV ışık kaynağı kullanarak foto-reaktif bir reçineyi tabaka tabaka sertleştirerek oluşturur, bu farklar ise 3D baskı teknolojilerini birbirinden ayıran temel unsurlardır [1,2].

Şekil 1.1'de de görüldüğü gibi eklemeli imalat tasarımı yapılan ürünü malzeme ekleyerek katman katman oluşturduğundan, geometrik doğruluğa yüksek oranda

ulaşabilirken, verimli hammadde kullanmaya ilave olarak minimum atık üretme özelliğine de sahiptir [3,4].



şekil 1.1 : Geleneksel imalat yöntemi ile eklemeli imalat yönteminin karşılaştırması
(a) geleneksel imalat, (b) eklemeli imalat.

Eklemeli imalat, geleneksel imalat tekniklerine kıyasla birçok avantaj sunarak cazip hale gelmektedir. Bu avantajlardan bazıları şunlardır:

- Geleneksel imalat yöntemleri ile kıyaslandığında, eklemeli imalat malzeme verimliliğini artırır ve atık miktarını minimum seviyeye indirir. Geleneksel imalat, iş parçalarının belirli şekillerde oyulması veya kesilmesiyle gerçekleştirilir ve bu süreçte büyük miktarda malzeme israf edilir. Eklemeli imalat'da ise, malzeme katman katman eklenerek yapı oluşturulduğundan, yalnızca ihtiyaç duyulan malzeme kullanılır. Bundan dolayı çevreci bir imalat yöntemi olarak da adlandırılır [3,5].
- Eklemeli imalat yöntemleri ile 3D tasarımı yapılan ürünler dijital ortamda gönderilerek, uygun cihazın bulunduğu bir yerde basım işlemi yapılabilir. Bu durum üretim yeri konusundaki kısıtlamaları ortadan kaldırarak taşıma gereksinimini ve bağımlılığı azaltmaktadır [3].
- Eklemeli imalat, dijital olarak tasarlanan bir model doğrudan 3D yazıcıya aktarılır ve katmanlar halinde üretilir. Bu süreçte enjeksiyon kalıplama gibi yaygın olarak kullanılan birçok imalat tekniğinin aksine hiçbir aparat, kesici

takım, kalıp gibi ilave yardımcı araçlara ihtiyaç duymadığından, maliyetleri önemli ölçüde azaltır [6].

- Geleneksel imalat teknikleri ile üretim uzun zaman almaktadır fakat eklemeli imalat ile tasarım ve üretim arasındaki kademeler atlandığı için, tasarımdan saatler içerisinde hızlı bir şekilde doğrudan imalat yapılabilir. Aynı zamanda daha az iş gücü ve daha az üretim adımı gerektiği için, hem zaman tasarrufu hem de maliyet düşüşü sağlar ayrıca verimliliği de artırır [6].
- Geometriden doğan kısıtlamaları ortadan kaldırarak tasarımda serbestlik sağlar, üretim sırasında bile tasarımı hızlıca değiştirebilmek mümkündür. Özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların üretiminde daha verimlidir, çünkü sadece gerekli olan alanlara malzeme eklenir [6,7].
- Eklemeli imalat, prototip üretiminden kaynaklanan maliyeti azaltır [6].
- Eklemeli imalat teknolojisi sayesinde, birden fazla parçadan oluşan karmaşık yapılar, tek seferde doğrudan üretilir ve bu da montaj gereksinimini ortadan kaldırır [6].

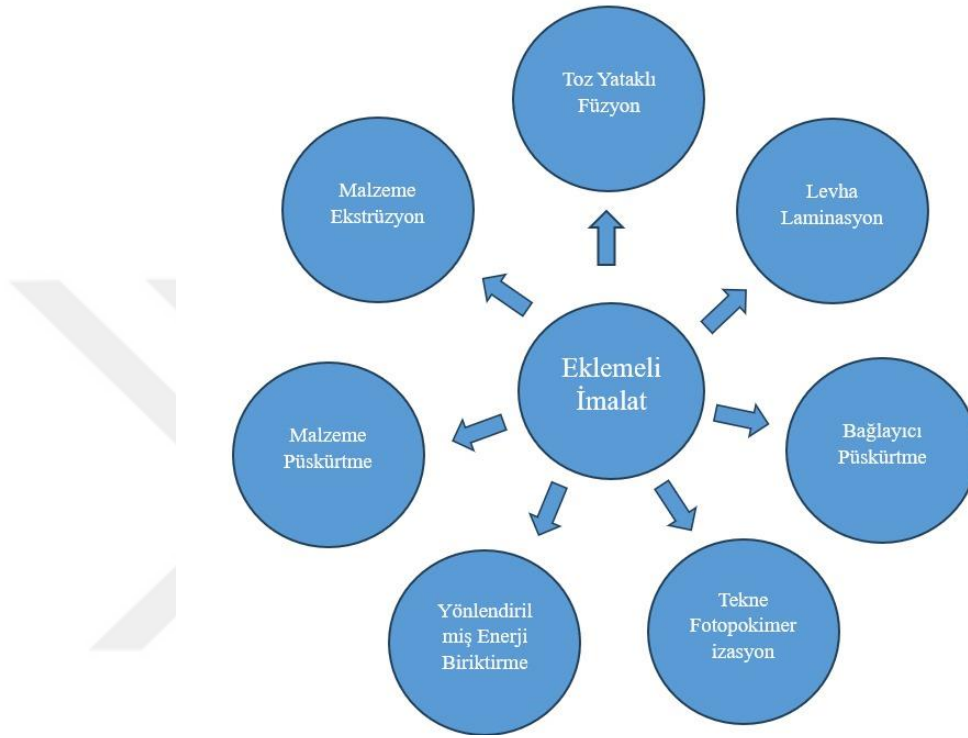
Bu avantajlar, özellikle ürün geliştirme süreçlerinde eklemeli imalatı geleneksel yöntemlere göre daha cazip hale getirmektedir.

1.2 3D Eklemeli İmalat Tekniklerinin Sınıflandırılması

Eklemeli imalat, ilk olarak 1980'li yıllarda geliştirilen stereolitografi yöntemiyle ortaya çıkmıştır. Bu teknoloji, ultraviyole ışığa hassas olan sıvı bir polimerin, lazer yardımıyla ince tabakalar şeklinde katılaştırılması prensibine dayanıyordu [6]. Ancak eklemeli üretim, ilk başlarda sınırlı sayıda malzemenin kullanılabilmesi, üretimi yapılan parçaların iç yapılarında boşlukların oluşması, basım hataları, düşük yüzey kalitesi gibi sorunlar nedeniyle yaygın olarak tercih edilmedi [6,8]. Zamanla bu teknoloji ilerledi ve önemli gelişmeler kaydetti. Malzeme çeşitliliğinin artması, üretim sırasında oluşan iç boşlukların ve basımdan kaynaklanan hataların giderilmesi, yüzey kalitelerinin artması sayesinde eklemeli üretim, sadece prototipleme için değil, son ürün üretimi için de kullanılabilir hale geldi. Bugün, havacılık, otomotiv, tıp ve birçok endüstride eklemeli üretim temel bir üretim yöntemi olarak kabul görmektedir [6,9].

ASTM (Amerikan Test ve Malzemeler Topluluğu)'na göre 3D baskı teknolojileri 7 kategori altında toplanmıştır. Bu kategoriler; toz yataklı füzyon sistemleri (powder bed

fusion), levha laminasyonu (sheet lamination), bağlayıcı püskürtme (binder jetting), tekne fotopolimerizasyonu (vat photopolymerisation), yönlendirilmiş enerji biriktirme (direct energy deposition), malzeme püskürtme (material jetting) ve malzeme ekstrüzyonu (material extrusion) şeklindedir. Eklemeli imalat sınıflandırması Şekil 1.2’de yer alan diyagramda gösterilmektedir [3,10].



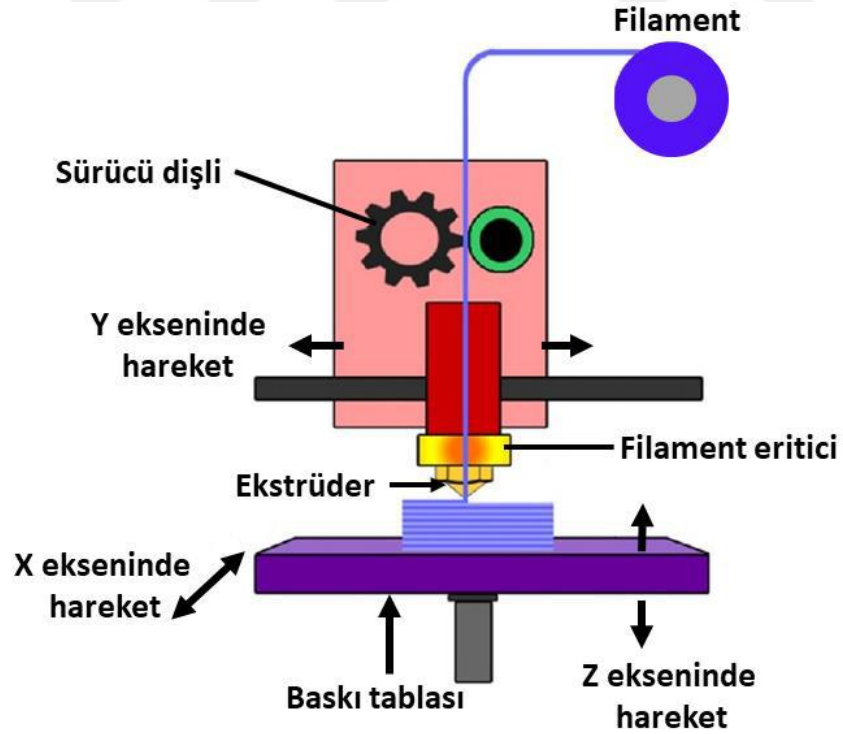
Şekil 1.2 : Eklemeli imalat sınıflandırması.

Eriyik yağma modelleme (EYM), eklemeli imalat teknikleri arasında en fazla tercih edilen yöntem olmak ile birlikte günümüzde pek çok alanda da kullanımı yaygındır. Malzeme Ekstrüzyonu olarak da adlandırılan bu yöntem otomotiv ve havacılık endüstrisi, elektronik, biyomedikal gibi alanlarda öne çıkmakla birlikte pek çok sektöre de yayılmış durumdadır. EYM teknolojisi’nin işlem adımları basit, kullanımı kolay, ayrıca pahalı kalıp, ekipman ve alet kullanmadan serbest imalat için güvenilir bir yöntemdir. Malzemelerin verimli bir şekilde kullanılmasını sağladığından malzeme israfına da önlemektedir. Bu tekniğin güçlü ve öne çıkan yönlerinden biri, çeşitli termoplastik polimer türleriyle de uyumlu olmasıdır [3,11].

1989 yılında Stratasys’in kurucu ortaklarından Steven Scott Crump tarafından keşfedilen EYM yöntemin patenti, 9 Haziran 1992’de ABD Patent Enstitüsü tarafından verilmiştir. Patent koruması 2007 yılında sona erdiğinde, yazılım herkesin erişimine açık hale gelmiş, bu durum yazılımın farklı alanlarda uygulama bulmasını

hızlandırarak günümüzde yaygın bir yöntem olarak kabul edilmesine yol açmıştır [6,12]. MakerBot, Ultimaker gibi alanında lider şirketlerce geliştirilmiş olan düşük maliyetli ve ev tipi olarak adlandırılan 3D yazıcılarının pazara girmesi ile 3D baskının ilerlemesi ve gelişmesi sağlanmıştır. Şu anda da dünya çapında ki üretici ve distribütörleri ile EYM tipi üç boyutlu yazıcılar oldukça yaygın hale gelmiştir [3].

EYM teknolojisi, termoplastik bir filamentin ısıtılarak eritilmesi ve daha sonra katman katman birleştirilerek 3D nesnelerin oluşturulması prensibine dayanır. Çapları genel olarak 1,85 mm veya 2,85 mm olan termoplastik polimer, birbirlerine zıt doğrultularda dönen iki merdaneden geçerek bir ısıtıcıya hareket ettirilir. İtme kuvvetinin etkisi ile eriyen polimer, nozzle adı verilen ve en sık kullanılan çapları 0,2mm ve 0,4mm olarak bilinen parçadan çapı küçültülerek işleme tablasına akıtılır. Eriyerek dışa akan polimer x-y eksenini boyunca istenilen doğrultuda hareket ettirilir, böylece bir katman için işlem tamamlanmış olur. Oluşan katman kalınlığını, x-y eksenindeki işleme hızı ile birlikte itme kuvvetinin etkisi sonucu oluşan akış hızının bileşkesi meydana getirir [13]. Bu işlem, CAD (bilgisayar destekli tasarım) modeline uygun olarak, z eksenini boyunca her katmanın bir önceki üzerine eklenmesiyle tekrarlanır ve 3D model tamamlanır [6]. Şekil 1.3’de EYM tekniği ile baskı işlemi şematik olarak gösterilmektedir [3].



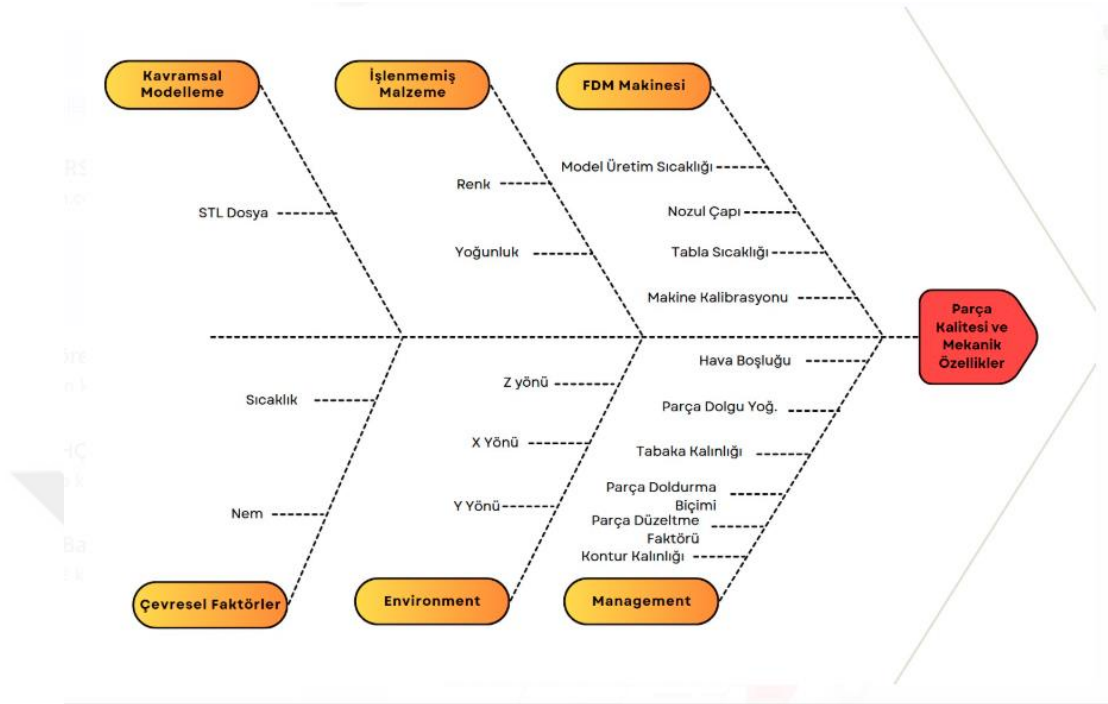
Şekil 1.3 : EYM üretim tekniği.

EYM eklemeli üretim yönteminin çalışma prensibinde; CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) dosyaları, eklemeli üretim cihazları tarafından tanınabilir hale getirmek için genellikle STL (Stereolitografi) formatına dönüştürülür. Cura (dilimleme programları) veya benzeri bir program ve hızı, doluluk oranı, tabla sıcaklığı, akış oranı, vb. gibi bir katmanın nasıl yazdırılacağını belirleyen işleme komutları belirlenerek üç boyutlu yazıcıya aktarılır kullanılarak tabakalara ayırma işlemi yapılır. Aynı zamanda tabaka kalınlığı, işleme sıcaklığı. EYM tekniğinde, çift uçlu (nozzle) yazıcılarda, baskı sırasında destek yapılarını oluşturmak için suda çözünebilen veya kolayca elle çıkarılabilen destek malzemelerinin kullanılması gerekebilir [6].

EYM tekniğinde en yaygın kullanılan termoplastik polimerler olan PLA (Polilaktik Asit) ve ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren), kolay şekil alabilen ve hızla katılaşabilen yapılarıyla öne çıkar. Bu termoplastiklerin kendine özgü özellikleri vardır. Mısır veya şeker pancarından elde edilebilen PLA, çevre dostu bir malzemedir. Doğal kaynaklardan üretildiği ve biyobozunur özelliği taşıdığı için çevreye zarar vermez [6,14]. EYM yönteminde kullanılan termoplastik malzemeler, elastisite modülü, yoğunluk, kopma uzaması, eğme modülü, eğme dayanımı, kopma ve kayma dayanımı, sertlik, işleme ve camsı geçiş sıcaklığı, darbe özellikleri gibi kendine özgü malzeme özelliklerine bakılarak, üretimi yapılması planlanan parçalarda özelliklerine uygun bir şekilde kullanılabilir [6].

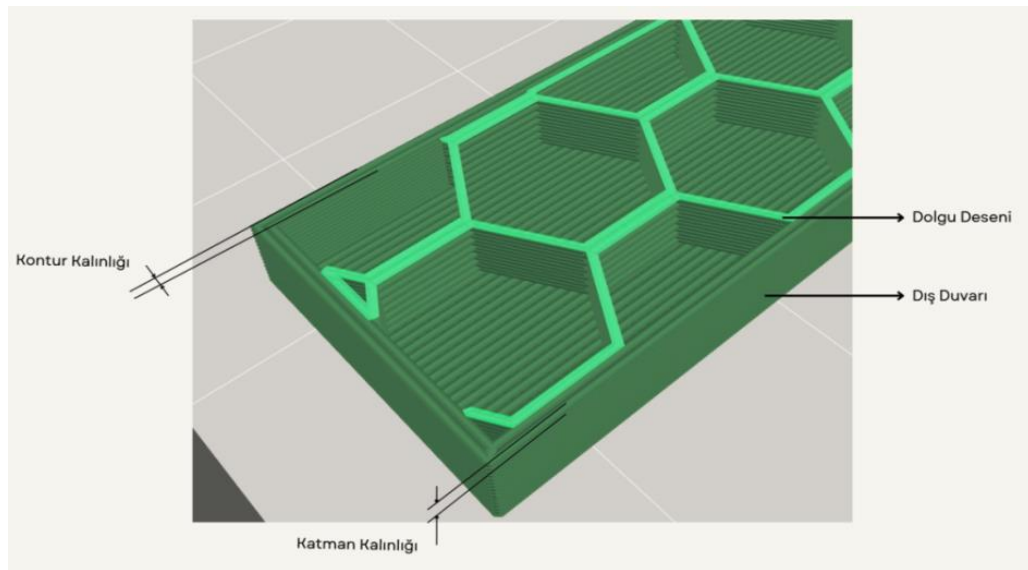
EYM yöntemi, termoplastik filamentler kullanarak üç boyutlu baskı yapar. Bu filamentlerin uygun bir şekilde işlenebilmesi için belirli termal özelliklere sahip olmaları gerekmektedir. Filamentlerin düşük erime sıcaklığı (T_m) ve yüksek camsı geçiş sıcaklığı (T_g), bu iki kritik parametre, baskı sürecinin verimliliği için önemlidir. Düşük erime sıcaklığı, filamentin daha düşük sıcaklıklarda eriyip işlenmesini sağlar, bu da baskı sürecini ekonomik hale getirir. Yüksek camsı geçiş sıcaklığı ise, polimerin ekstrüzyon işlemi tamamlandıktan sonra hızla katılaşmasını sağlayarak, her bir katmanın bir sonraki katmanla birleşerek sağlam bir yapı oluşturmaya imkan tanır. Bu termal özelliklerin uyumu, EYM yönteminin etkinliğini ve maliyet verimliliğini artırmaktadır [15]. EYM yöntemi, yüzey kalitesini ve ürünün mekanik özelliklerini etkileyen pek çok parametre barındırmaktadır. Bununla birlikte, bu yöntem, üretilcek parçanın kalitesini ve malzeme özelliklerini etkileyebilecek birbirine zıt parametrelerin varlığı nedeniyle, en uygun parametrelerin belirlenmesinde zorluklar

yaşanabilen bir süreçtir. Şekil 1.4'de, EYM yönteminde optimize edilmesi gereken parametreler verilmiştir[16].



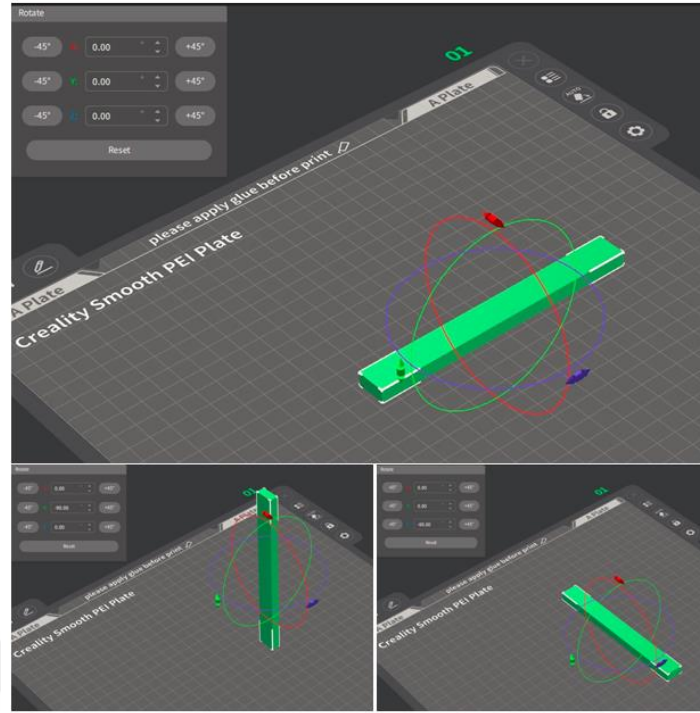
Şekil 1.4 : EYM işleme parametreleri balık kılçığı diyagramı.

EYM teknolojisi ile yeni malzemelerin verimli bir şekilde üretilebilmesi için, baskı sıcaklığı, baskı hızı, üretim yönü, tarama yönü ve açısı, katman kalınlığı ve dolgu yoğunluğu gibi işlem parametrelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi önemlidir. Şekil 1.5'de baskı kalitesini etkileyen ana parametreler belirtilmiştir [3,17].



Şekil 1.5 : Baskı kalitesini etkileyen parametreler.

- Katman kalınlığı [mm]: 3B yazıcıda üretilecek parçanın her diliminin yüksekliğidir.
- Tarama açısı [$^{\circ}$]: 0° ile 180° arasında değişen, nozulun her katman için erimiş termoplastikleri satır satır biriktirdiği açı değeri olarak tanımlanır.
- Kontur/kabuk çeperleri: Parçanın dış yüzeyi ile iç boşluğunun sınırlarını oluşturan en dış katmanları ifade eder. Kontur sayısı veya kontur genişliği terimleri, kabuk kalınlığını ayarlamak için de kullanılabilir.
- Tarama genişliği [mm]: Ekstrüde edilen filamentin genişliğini belirten bir tanımdır.
- Hava boşluğu/Tarama boşluğu [mm]: Yan yana iki ekstrüde edilmiş filament arasındaki boşluk veya mesafe tanımlanır.
- Biriktirme hızı [mm/dak]: Doğrudan baskı hızıyla ilgilidir ve nozulün hareket ettiği hızı gösterir.
- Dolgu yoğunluğu [%]: 3B yazıcıda üretilecek parçanın içindeki malzeme miktarını tanımlar. Dolgu yüzdesinin artması parçanın mekanik özelliklerini de artırır; ancak, buna bağlı olarak baskı süresi de artacaktır. Bu durum daha fazla malzemeye ihtiyaç duyulmasını gerektirir.
- Platform/yatak sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]: Bu parametre, üretimin yapıldığı platformun sıcaklığını belirtir. Özellikle ilk tabakanın düzgün bir şekilde yapışabilmesi ve bükülme (warping) etkilerinin önlenmesi açısından önemli bir faktördür. Ayrıca, ilk tabaka üzerinde ekstrüde edilen filamentin soğuma hızını da etkiler.
- Nozul sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]: Malzemenin ekstrüde edildiği sıcaklık göstergesidir.
- Numune/yapı yönlendirmesi: Yapı platformunda üç boyutlu yazdırılan parçanın yönü, x, y ve z eksenlerine göre belirlenir. X, Y, Z tanımlamalarında, ilk harf en uzun boyutun paralel olduğu eksen, ikinci harf ikinci en uzun boyutun eksenini, üçüncü harf ise en kısa boyutun eksenini ifade eder. Şekil 1.6'daki XYZ yönlendirmesine sahip bir numune için, en uzun boyut X eksenine, ikinci en uzun boyut Y eksenine ve en kısa boyut Z eksenine hizalanmış olduğu görülmektedir [17].



Şekil 1.6 : Farklı numune yönelimleri.

EYM yönteminin özellikleri, avantaj ve dezavantajları ile ilgili olarak:

- **Kullanılan Malzemeler:** EYM yöntemi ile genellikle PLA, ABS, PETG gibi termoplastikler kullanılır. Bu malzemeler, eritildikten sonra hızlıca katılaşarak istenilen şekli alabilir.
- **Yapısal Dayanıklılık ve Kalite:** EYM ile üretilen parçaların dayanıklılığı ve yüzey kalitesi, kullanılan malzemeye, baskı sıcaklığına, dolgu oranına ve katman kalınlığına bağlı olarak değişir. Yüzey kalitesi diğer yöntemlere kıyasla daha az pürüzsüz olabilir, ancak bu genellikle ek son işlem uygulamalarıyla iyileştirilebilir.
- **Kullanım Alanları:** EYM teknolojisi, hızlı prototipleme, eğitim, endüstriyel üretim ve hobi amaçlı uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Maliyetinin düşük olması ve baskı işleminin kolaylığı, EYM'yi popüler bir seçenek haline getirmektedir.
- **Avantaj ve Dezavantajlar:** EYM'nin en büyük avantajları, uygun maliyetli olması, yaygın olarak bulunabilirliği ve farklı malzeme seçeneklerine sahip olmasıdır. Dezavantajları arasında ise düşük yüzey kalitesi, sınırlı ayrıntı hassasiyeti ve destek yapılarının gerekmesi sayılabilir.

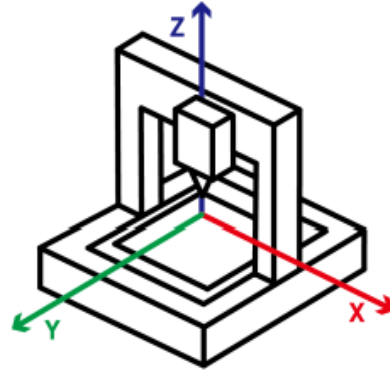
- Destek Yapıları ve Kalibrasyon: EYM yöntemiyle karmaşık geometrik şekiller üretildiğinde, modelin bazı bölümlerini desteklemek için destek yapıları kullanılabilir. Bu destekler, baskı sonrası manuel olarak temizlenir. Ayrıca, kaliteli bir baskı almak için yazıcı tablasının ve ekstrüderin uygun şekilde kalibre edilmesi büyük önem taşır.

1.3 3D Yazıcı Çeşitleri

3 boyutlu yazıcılar, çalışma mantıklarına göre Kartezyen, Delta, Polar ve Scara olarak 4 tiptir [18].

1.3.1 Kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcılar

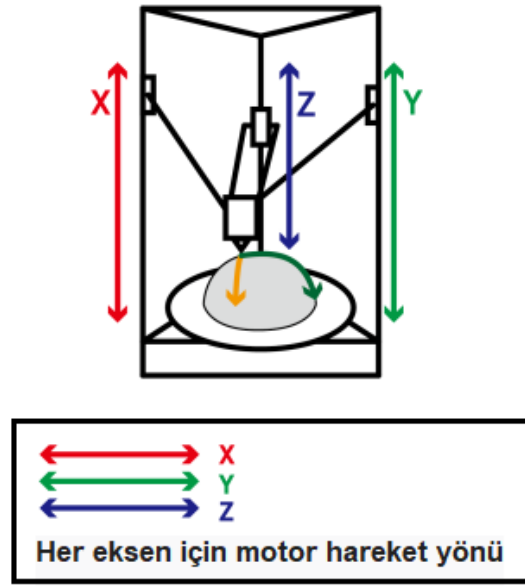
En yaygın olarak kullanılan yazıcı türü, kartezyen yazıcılardır ve bu durum kullanıcılarına avantaj sağlamaktadır. Bu yazıcılar, kullanım kolaylığı ve basit tasarımları sayesinde hem amatör hem de profesyonel kullanıcılar arasında popülerdir. Kartezyen yazıcılar, adını koordinat sistemine dayalı hareket mekanizmasından alır ve X, Y, Z eksenlerinde doğrusal olarak hareket ederek baskı işlemini gerçekleştirir. Ayrıca bu yazıcılar, montaj ve bakım kolaylığı sağlaması ve yedek parçalarının kolay bulunur olması nedeniyle de tercih edilmektedir. Popüler bir yazıcı tipi olduğu için birçok sektörde ve kişisel projelerde yaygın olarak kullanılmaktadır [18]. Kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcılar, farklı hareket özelliklerine sahip olabilir. Bazı modellerde yapı platformu tamamen sabitken, bazı modellerde platform bir veya iki ekseninde hareket edebilir. Kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcılarda her eksen için birer adet olmak üzere minimum üç adet step motor kullanılır. Kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcılarda baskı kafası yukarıdan askıya alındığı için diğer yazıcılara göre daha geniş yapım platformlarına sahiptir. Bu özelliğinden dolayı geniş tabanlı model üretimi için idealdir. Bu durumun dezavantajı ise bu yazıcıda üretimi planlanan yapının yüksekliğinin, yazıcı kafasının maksimum yüksekliği ile sınırlı olmasıdır. Kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcı örneği Şekil 1.7’de gösterilmektedir [18,19].



Şekil 1.7 : Kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcı.

1.3.2 Delta tipi 3 boyutlu yazıcılar

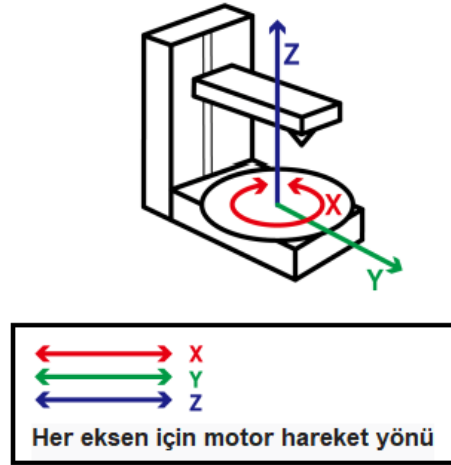
Delta tipi 3 boyutlu yazıcılar da kartezyen sistemini kullanır fakat farklı olarak z eksenindeki hareket ,3 step motorun ortak hareketiyle yönetilir [18]. Kartezyen yazıcılardan farklı olarak, üçgen bir konfigürasyonla çalışır ve bu yapı sayesinde daha hızlı ve daha geniş baskı alanları sağlar. Bu yazıcıda ekstrüder, üç uzun kol yardımıyla hareket ettirilir ve kollar, baskı modeline göre ekstrüderi yukarıya ya da aşağıya doğru konumlandırır. Kollar, üçgen bir yapıda olduğundan yazıcı kafasının daha esnek hareket etmesini sağlar. Bu 3 kol birlikte eş zamanlı hareket ederek nesnenin üretilmesini sağlar. Böylelikle nesnenin hareket etmemesi ürün kalitesinin iyi olmasını sağlar. Delta yazıcıların avantajları, yüksek hız ve pürüzsüz yüzey kalitesi sağlamasıdır. Delta yazıcılar genellikle büyük ve yüksek hassasiyetli baskılar için tercih edilir ve karmaşık, yüksek yapılar üretmede başarılıdır, özellikle hız ve esneklik gerektiren projeler için ideal bir yöntemdir [18]. Delta tipi 3 boyutlu yazıcı Şekil 1.8’de görülmektedir [18,19].



Şekil 1.8 : Delta tipi 3 boyutlu yazıcı.

1.3.3 Polar tipi 3 boyutlu yazıcılar

Polar tipi üç boyutlu yazıcılar, geleneksel kartezyen koordinatları yerine kutupsal (polar) koordinat sistemini kullanır. Bu yazıcılar, genellikle yuvarlak bir hareket sistemi ile çalışır. Kartezyen yazıcılardan farklı olarak, hareketler X, Y ve Z eksenlerinde değil, genellikle bir merkez nokta etrafında dönerek yapılır. Bu noktalar 3 boyutlu alanda bir açı ve önceden tanımlanmış bir merkezden ayrılma mesafesi yada yarıçap olarak tanımlanır. Polar tipi 3 boyutlu yazıcılar, sabit bir platform yerine dönebilen, sola ve sağa veya ileri ve geri hareket edebilen bir baskı yatağına sahiptir. Sadece başka bir katmana geçiş yaparken yukarı ve aşağı hareket eder. Bu özellikleri, onları kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcılardan ayırır. Polar yazıcıların bu hareket mekanizması, çok daha küçük bir alan kullanarak verimli bir yapı hacmi elde etmelerini sağlar. Ayrıca, yalnızca biri yapı platformunu döndürüp hareket ettirmek, diğeri ise baskı kafasının yüksekliğini kontrol etmek için kullanılan iki step motorla çalışabilme özelliğine sahiptir. En büyük dezavantajı ise, henüz yaygın olmamalarıdır. Tasarımlarının karmaşık olması nedeniyle, kartezyen tipi 3 boyutlu yazıcılara kıyasla daha pahalıdır. Polar tipi 3 boyutlu yazıcı Şekil 1.9’de görülmektedir [18,19].



Şekil 1.9 : Polar tipi 3 boyutlu yazıcı.

1.3.4 Scara tipi 3 boyutlu yazıcılar

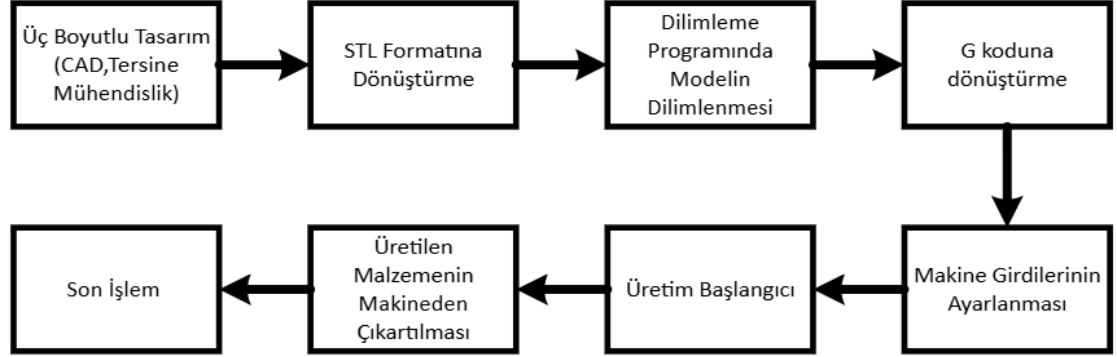
SCARA tipi 3 boyutlu yazıcılar, eklemli bir robot kolu yapısına dayalı olarak çalışan bir yazıcı türüdür. Robotik kollar, büyük otomotiv tesislerinde ve endüstriyel üretim hatlarında bileşenleri montajlamak için kullanılır. Kartezyen yazıcılardan farklı olarak iki döner kol kullanır. Bu kollar, belirli bir yüzey üzerinde esnek hareket edebilir ve yazıcı kafasını hızlı bir şekilde yönlendirebilir. Özellikle yüksek hız gerektiren uygulamalar için idealdir. Aynı zamanda, karmaşık ve hassas baskılar için de uygundur. SCARA tipi yazıcılar, özellikle seri üretim veya hızlı prototipleme gerektiren endüstriyel uygulamalarda kullanılır [18]. Şekil 1.10'da Scara tipi 3 boyutlu yazıcı görseli gösterilmiştir [20].



Şekil 1.10 : Scara tipi 3 boyutlu yazıcı.

1.4 3D Baskı İşlem Adımları

3D baskı prosesi için temel adımları gösteren şema Şekil 1.11’de gösterilmiştir.



Şekil 1.11 : 3D baskı prosesi için temel adımlar.

İlk adım, tasarımı yapılan objenin 3D modelinin dijital bir ortamda ve genellikle CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) yazılımları kullanılarak modellenmesidir.

Ardından, hazırlanan bu model dosyası, yazıcının anlayabileceği format olan STL (Standard Tessellation Language) gibi bir formata dönüştürülür.

Bir sonraki adım, modelin bir dilimleme yazılımına aktarılmasıdır. Bu yazılım, modeli baskı katmanlarına ayırır ve yazıcının çalışabilmesi için gerekli G-kodlarını oluşturur. G-kodları, yazıcının her katmanı nasıl oluşturacağını belirten talimatlardır.

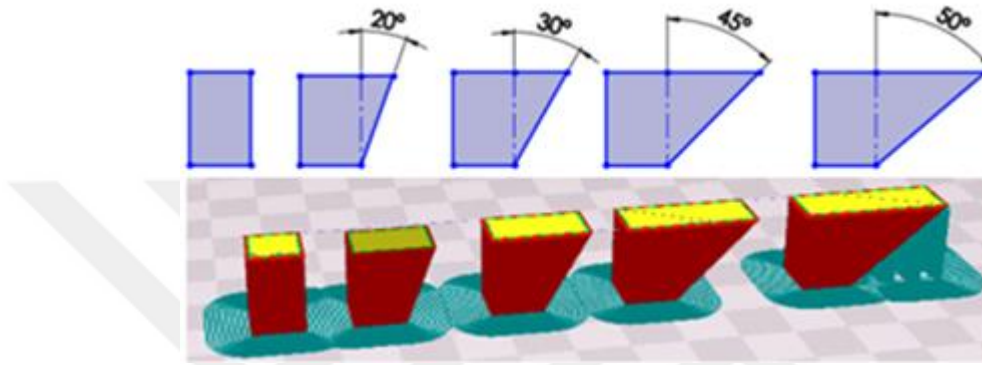
Diğer bir adımda bu kodlar, 3D yazıcıya aktarılır ve yazıcı baskı işlemi için hazırlanır. Yazıcı hazırlandıktan sonra baskı işlemi başlatılır ve model katman katman inşa edilerek fiziksel obje elde edilir. Baskı işlemi tamamlandığında, obje yazıcıdan alınır ve genellikle destek yapıları temizlenir.

Son olarak, gerekliyse obje üzerinde son-işlem (zımparalama, boyama, kütleme gibi) adımlar uygulanarak son hali elde edilir.

1.4.1 Modelleme

3D baskı sürecinin ilk adımı olarak, basımı yapılacak nesnenin CAD (bilgisayar destekli tasarım) programları aracılığıyla oluşturulan üç boyutlu modeline ihtiyaç vardır. Alternatif olarak, bir 3D tarama sistemi (lazer, optik veya fotoğraf tabanlı tarayıcılar) kullanılarak da gerçek nesneler dijital modellere dönüştürülebilir. Destek yapıları kullanılmasına ihtiyaç duyan teknolojilerde genellikle 45° kuralı geçerlidir. Modelleme sürecinde 45° kuralının göz önünde bulundurulması, hem malzeme hem de zamandan tasarruf edilmesine yardımcı olur. Kurala göre, 45°'ye kadar açılı olan

yüzeylerde destek yapısı kullanılmaz iken, 45°'yi aşan açılar Şekil 1.12'de de belirtildiği gibi destek yapılar üzerine inşa edilir. Tek parça halinde basılması planlanan montaj parçalarında ise hareketli parçalar arasındaki boşluklar belirlenirken 3D yazıcının kapasitesi dikkate alınmalıdır. Model 3D tarama sistemi ile oluşturuldu ise, detaylı bir analiz yapılmalı, yüzeydeki kusurlar için varsa bir mesh (onarım) yazılımı kullanılarak düzeltme işlemi ile birlikte boyutlar da dikkatle kontrol edilmelidir [21].



Şekil 1.12 : 45° kuralına göre destek yapılar.

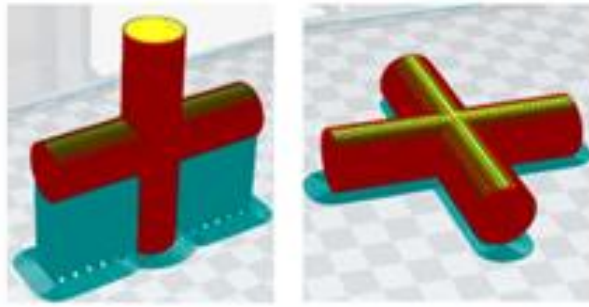
1.4.2 Dosya kaydetme

3D model elde edildikten sonra ikinci adım, hazırlanan modelin aktarılacağı slicer, software gibi dilimleme yazılımının tanıyacağı bir dosya formatına dönüştürülmesi işlemidir. Dönüştürme işlemi dosya dönüştürücü yazılımlarla veya kullanılan modelleme programının “save as”, “export” seçenekleri kullanılarak da yapılabilir. 3B baskı işlemlerinde STL en yaygın kullanılan dosya formatı olmakla birlikte .obj, .X3D, ve .3MF gibi dosya formatları da birçok yazılım tarafından desteklenmektedir. Model, STL formatına dönüştürüldükten sonra, üzerinde büyük değişiklikler yapılamaz; ancak modelin boyutu ayarlanabilir, yönü değiştirilebilir. Son dönemde, STL formatındaki modeller üzerinde sınırlı değişiklikler yapılmasına olanak sağlayan TinkerCAD gibi yazılımlar da geliştirilmiştir. Bu tür yazılımlar, özellikle basit düzenlemeler ve ölçeklendirme işlemleri için kullanıcılara esneklik sunmaktadır [21].

1.4.3 Dilimleme

3D baskı işlemlerinde, uygun formatta kaydedilen modeller, 3D dilimleyici yazılımlara aktarılır. Dilimleme yazılımının temel amacı, 3D nesneyi belirlenen katman kalınlığına göre ayırarak, 3B yazıcı tarafından kullanılacak G-kodlarını

retmektir. Bu G-kodları, yazıcının her bir katmanını nasıl basacağını belirten talimatlar içerir. Dilimleme yazılımı sayesinde, modelin baskı tablasındaki pozisyonu, katman kalınlığı, malzeme türü, baskı sıcaklığı, yoğunluğu ve baskı hızı gibi parametreler ayarlanabilir. Modelin baskı tablasına yerleştirilme biçimi, baskı süresi ve kullanılan malzeme miktarını etkileyen kritik bir faktördür. Örneğın, retimi yapılacak parça yatay yerleştirildiğinde, Şekil 1.13’da da gösterildiğı gibi daha az destek yapısına ihtiyaç duyabilir. Kısaca parça konumlandırılması, baskı sonrası kullanılan destek yapıların temizlenmesi için harcanan zamanı da emeğı de etkileyen bir faktördür. Tüm parametreler belirlendikten sonra model için dilimleme aşamasına geçilir ve G-kodları oluşturulur. Ayrıca, baskı süreci yazılım üzerinde simüle edilerek, olası hatalar önceden tespit edilebilir. MatterControl, Cura, Craftware, Netfabb Basic ve Slic3r gibi birçok ücretsiz ve açık kaynak kodlu dilimleyici yazılım, kullanıcılar tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır [21].



Şekil 1.13 : Parçanın dilimleme yazılımında konumlandırılması.

1.4.4 Dosya transferi

3D yazıcılarda dosya transferi, baskı için gerekli G-kodlarının 3D yazıcıya aktarılması işlemidir ve bu işlem aşağıda belirtilen birak farklı yolla gerçekleştirilebilir:

- USB Bellek veya SD Kart
- Doğrudan Bilgisayar Bağlantısı
- Wi-Fi veya Ethernet Bağlantısı
- Bulut Tabanlı Sistemler

Her yöntemin avantajı, yazıcının özelliklerine ve kullanıcı ihtiyaçlarına bağlıdır.

1.4.5 3D Baskı

Baskı işlemi başlamadan önce, yazıcının stabil bir zemine yerleştirildiğinden ve yazdırma tablasının doğru şekilde ayarlandığından emin olunmalıdır. Devamında kalibrasyon ayarı ve malzeme yükleme işlemleri yapılabilir çünkü bu işlemler, baskı kalitesini doğrudan etkileyen önemli adımlardır. G-kodlarının yazıcıya aktarılmasının ardından, 3D yazıcı, gerekli sıcaklık ayarına ulaştığında baskıya başlar. Bu sıcaklık ayarı genellikle kullanılan malzemenin türüne bağlıdır ve manuel bir şekilde, yazıcıda bulunan menü tablosundan ayarlanabilir. Baskılama işlemi, kullanılan 3D yazıcı çeşidine göre farklılık gösterebilir. Bununla birlikte ürünün baskı süresi, üretim için belirlenen baskı hızı, malzemenin yoğunluğu, modelin geometrisi ile birlikte boyutu, kullanılan desteğin miktarı ve istenen çözünürlük seviyesine bağlı olarak farklılık gösterir. Örneğin, yüksek çözünürlükte ve karmaşık destek yapıları gerektiren bir modelin baskı süresi, daha basit ve düşük çözünürlükte bir modele kıyasla daha uzun olabilir [21].

1.4.6 Son işlem

Baskı işlemi tamamlandığında, üretimi biten parça ilk olarak 3D yazıcının tablasından dikkatlice çıkarılır ve kullanılan destek yapıları için temizleme işlemi yapılır. Destek yapıları, iki ana türde gelir: standart destek yapıları ve çözülebilir destek yapıları.

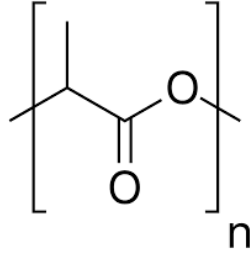
Standart destek yapıları, genellikle kesici, pense gibi uygun el aletleri kullanılarak üretimi yapılan parçadan manuel olarak çıkarılır. Bu destekler, katı yapılar olup baskı sırasında kullanılan aynı malzemeden üretilir.

Çözülebilir destek yapıları ise, suda veya parçanın malzemesi için özel olarak geliştirilmiş solüsyonlarda bekletilerek kolayca temizlenebilir. Çözülebilir destekler, genellikle karmaşık geometrilere sahip modellerin baskısında kullanılarak, parça yüzeyine zarar vermeden çıkarılmalarını sağlar.

Destekler temizlendikten sonra, parça için istenirse yada gerekliyse son-işlem olarak adlandırılan boyama, zımparalama, polisaj, epoksi kaplama, dolgu ve yüzey buharlaştırma gibi çeşitli uygulamalara tabi tutulabilir. Bu işlemler uygulanarak parçanın estetik görünümü ve yüzey kalitesi iyileştirilir. Özellikle prototiplerde ve son ürünlerde daha profesyonel bir görünüm elde edilmesinde etkilidir [21].

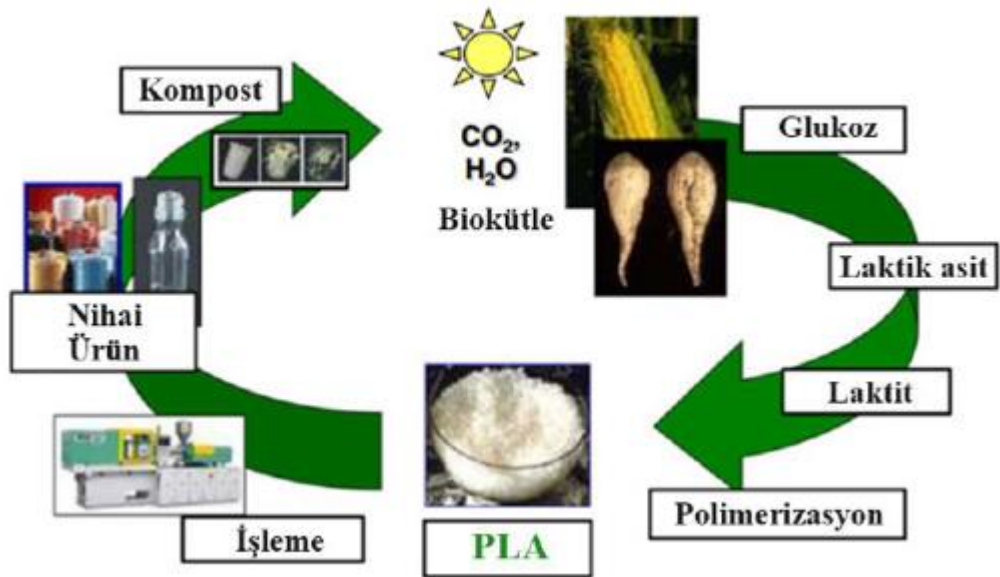
1.5 Polilaktik Asit (PLA)

Yenilenebilir kaynaklardan üretilen biyobozunur malzemeler arasında en dikkat çekici örneklerden biri olan PLA, mısır, şeker kamışı ve buğday gibi nişasta açısından zengin bitkisel kaynaklardan elde edilen biyobozunur bir termoplastik polimerdir. Şekil 1.14'de kimyasal yapısı görülen PLA, tekrarlayan laktik asit monomerlerinden oluşur ve alifatik poliesterler sınıfına ait bir polimerdir [22,23].



Şekil 1.14 : PLA'nın kimyasal yapısı.

PLA üretimi, laktik asit monomerinin kondenzasyon polimerizasyonu ya da halkalı yapıya sahip dimer laktidin katalitik halka açılma reaksiyonu ile gerçekleştirilir [22]. Laktik asit, şeker kamışı ve mısır gibi karbonhidrat kaynaklarındaki şekerlerin fermantasyonu sonucu elde edilebilir [23]. Şekil 1.15'te, PLA'nın doğal kaynaklardan elde edilme ve geri dönüşüm süreci açıklanmıştır.



Şekil 1.15 : Doğal kaynaklardan PLA üretim süreci.

PLA, düşük maliyetli üretim yöntemi sayesinde dünyada en çok sentezlenen biyopolimerlerden biridir. PLA dan üretilen filament, yüksek mekanik özellikleri ve herhangi bir toksik etki ve koku yaymayan alifatik yapısıyla dikkat çeker. Aynı zamanda baskı süreci oldukça zahmetsizdir ve üç boyutlu yazıcılarda kullanımı son derece kolaydır. Ayrıca üretimi yapılan baskılarda iyi bir yüzey kalitesine sahiptir. Katkısız olarak üretilen PLA da gaz çıkışı olmaz ve şeffaf bir görüntüye sahiptir. Doğada biyolojik olarak parçalanabilir oluşu, onu petrol bazlı polimerlerin önüne geçirir.

Otomotiv, havacılık, inşaat ve gıda endüstrileri PLA nın yaygın olarak kullanıldığı alanlar arasındadır. Özellikle medikal ve biyomedikal alanlarında üç boyutlu yazıcı teknolojisi kullanılarak üretilen implant ve protezler birçok hasta için umut verici bir gelişme olarak görülmektedir. PLA'nın insan vücuduna verdiği zararın minimum düzeyde olması, biyomedikal uygulamalarda önemli bir avantaj sunar. Ayrıca biyolojik olarak uyumlu ve parçalanabilir olması, özellikle dikiş iplikleri, implantlar ve ilaç taşıyıcı sistemler gibi tıbbi cihazların üretiminde PLA'nın tercih sebebidir. Ayrıca vücut içinde zamanla çözünebilmesi ve toksik atık bırakmaması da medikal alanda PLA'yı öne çıkarır. PLA'nın özellikleri Çizelge 1.1'de gösterilmektedir [24].

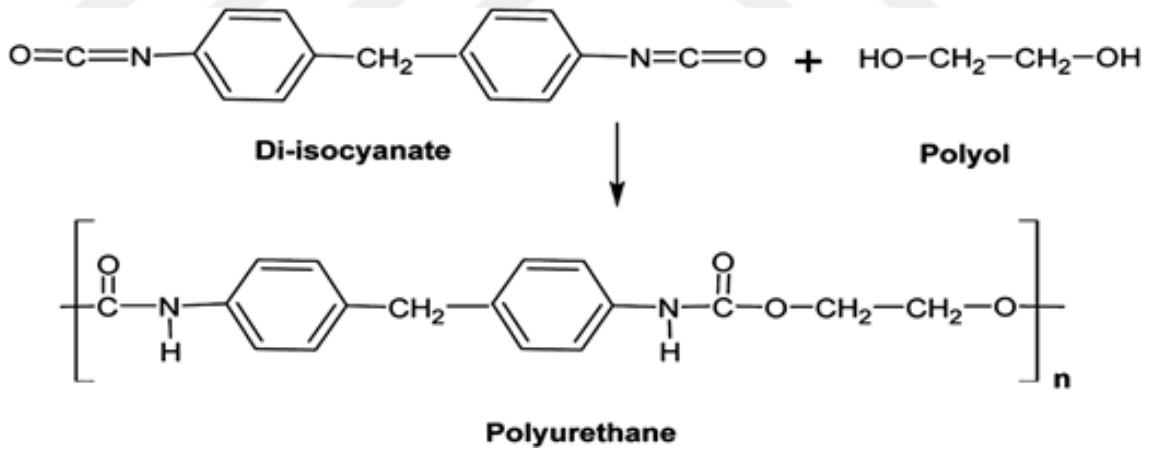
Çizelge 1.1 : PLA'nın özellikleri.

İsim	Polylactic Acid (PLA)
Kimyasal Formül	$(C_3H_4O_2)_n$
Mekanik Özellikler	
Çekme dayanımı (MPa)	61-66
Kopma uzaması (%)	10-100
Eğilme dayanımı (MPa)	48-110
Termal Özellikler	
Erime sıcaklığı (°C)	157-170
Isı sapma sıcaklığı (°C)	40-45, 135
Cam geçiş sıcaklığı (°C)	55-56
Fiziksel Özellikler	
Özgül ağırlık (g/cm ³)	1.25
Erime akış hızı (g/10 dak)	4.3-2.4

1.6 Poliüretan

Poliüretan, ilk kez 1937 yılında Almanya'nın Leverkusen şehrindeki I.G. Farben laboratuvarlarında Otto Bayer ve ekibi tarafından keşfedilmiştir. Başlangıçta yapılan araştırmalar, alifatik diizosiyanat ve diaminin poliüre üzerindeki etkilerini incelemekte odaklanmış, bu çalışmalar alifatik diizosiyanat ile glikol kullanılarak ilginç özelliklere sahip poliüretanların elde edilmesiyle sonuçlanmıştır. Poliizosiyanatlar, 1952 yılında ticari olarak kullanılabilir hale gelmiş ve aynı dönemde, 2. Dünya Savaşı sırasında, polyester polyoller ile toluen diizosiyanat (TDI) karışımından üretilen poliüretanlar ticari alanda kullanılmaya başlanmıştır. Bu gelişmeleri, 1952-1954 yılları arasında Bayer tarafından farklı polyester-diizosiyanat karışımlarının geliştirilmesi takip etmiştir [25].

Poliüretanlar; yapıştırıcı, elastomer, rigid köpük ve devam eden yıllarda ise bugün kullanımlara çok benzer, esnek, yaylanabilen köpük olarak 1950 li yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Poliüretanlar bir di/poli izosiyanat ile bir diol (veya poliölün) kimyasal reaksiyonu ile elde edilir ve şematik gösterimi Şekil 1.16 ile gösterilmiştir [26].



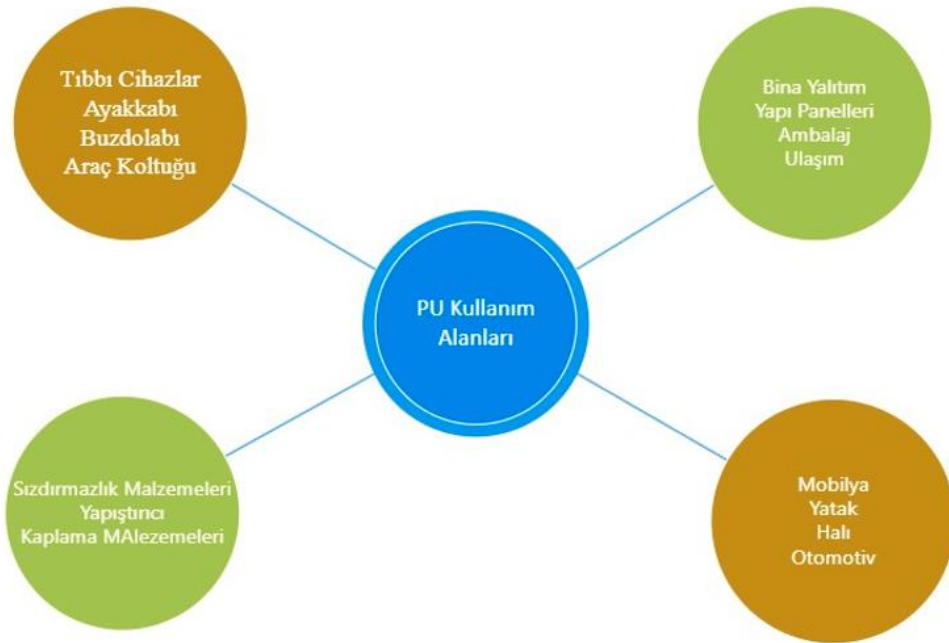
Şekil 1.16 : Poliüretan sentezinin şematik gösterimi.

Ayrıca zincir uzatıcı, silikonlar ve şişirici gazlar, çapraz bağlayıcı gibi çeşitli yardımcı ürünlerin kombinasyonları ile poliüretan yapıları çeşitlendirilebilir [27].

Sert ve esnek köpükler, elastomerler, yapışkanlar, kaplamalar, sızdırmazlık malzemeleri gibi çok çeşitli ürün türlerinin elde edilmesi bu kombinasyonlar ile mümkün olur [28].

Poliüretan köpükler, düşük yoğunlukları, yüksek mekanik dirençleri, düşük ısı iletkenlikleri ve üstün sönümlenme özellikleri nedeniyle otomotiv, mobilya, inşaat ve kozmetik gibi pek çok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır [29]. En büyük dezavantajları ise petrokimya bazlı malzemeler ile sentezlenmeleridir. Polioller ve izosiyanatlar, poliüretan sentezinde ham madde olarak kullanılan ve petrole bağlı endüstriyel malzemelerdir.

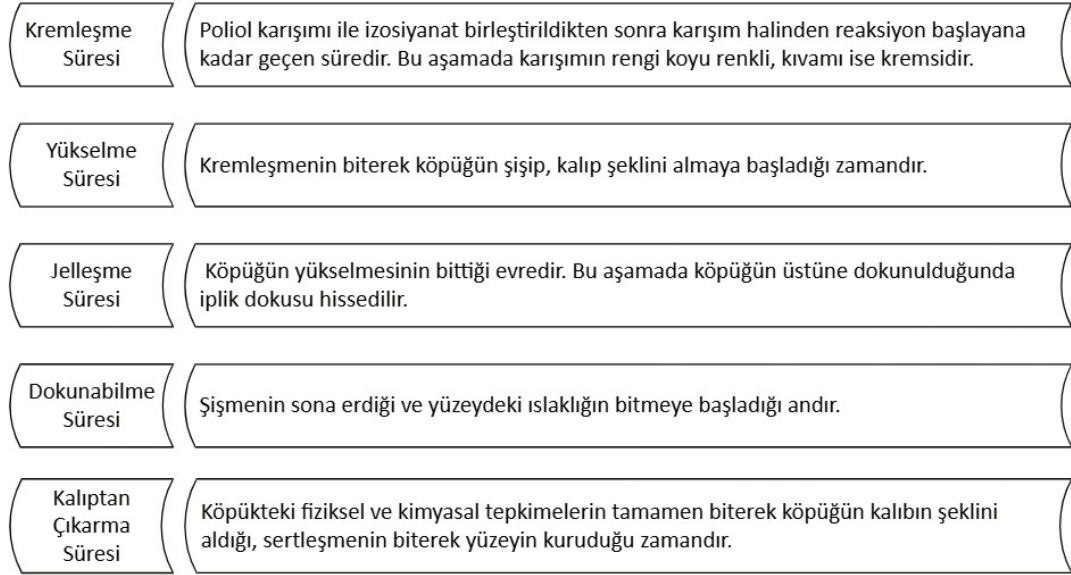
Poliüretan sentezi genel olarak poliöl, diizosiyanat ve zincir uzatıcılar ile sentezlenmektedir ve sentez öncesinde kullanılacak hammaddeler poliüretandan istenilen özellikler doğrultusunda seçilir. Sonuçta poliöl gibi yüksek molekül ağırlığındaki yapılar poliüretanın yumuşak bölgelerini, diizosiyanat ve zincir uzatıcılar gibi küçük molekül ağırlığındaki yapılar ise poliüretanın sert bölgelerini göstermektedir. Poliöl birimlerinin oranının artması elde edilen ürünü yumuşak bir yapıya götürürken, izosiyanat ve zincir uzatıcı birimlerinin oranının artması ise ürünü sert yapıya doğru götüren bir faktördür. PU'nun çok yönlü kimyası, çok çeşitli alanlarda kullanılmasını sağlar. Kullanım alanları Şekil 1.17 te gösterilmiştir [26].



Şekil 1.17 : Poliüretanların kullanım alanları.

PU köpükler, günlük hayatta deri, araba, mobilya, ayakkabı, inşaat sektörleri, mimari çalışmalar, elektrik ve elektronik sanayii gibi çeşitli alanlarda düşük maliyeti, kolay erişilebilirliği ve kullanım kolaylığından dolayı sıkça tercih edilir. PU köpük sentezi için birinci aşamada poliöl karışımı, ikinci aşamada izosiyanat, şişirme ajanı ve

hazırlanan poliöl karışımı birleştirilir ve reaksiyon başlatılır. Reaksiyon sonucu jelleşme gözlenir ve devamında yükselme aşaması ile devam eder. Bu süreç bittikten sonra hazırlanan PU köpük kalıptan çıkarılır. PU köpük sentezi aşamaları Şekil 1.18’de gösterilmiştir [26].



Şekil 1.18 : Poliüretan köpük sentezi aşamaları.

1.7 Epoksi Reçine

Epoksi malzemeleri, endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan çok yönlü malzemeler arasında yer almaktadır. Sertleştiğinde yüksek yapışma gücüne ulaşan epoksi reçine, fabrikalardan rüzgar türbinlerine, hatta yaşam alanlarına kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Yüksek yapışma kabiliyeti ve kimyasal dayanımı sayesinde alkali, asit ve su gibi etkenlere karşı oldukça dirençlidir. Bu özellikleri, onu çeşitli endüstriyel uygulamalar için ideal bir malzeme haline getirmektedir. Epoksi reçineler, diğer reçine türlerine kıyasla daha üstün mekanik dayanımın yanı sıra daha yüksek termal ve kimyasal dirence sahiptir. Sertleşme sırasında düşük büzülme oranı gösterir ve neme karşı kimyasal dayanıklılık sağlar. Elektriksel yalıtım özellikleri ile de dikkat çeken bu malzeme, uzun raf ömrü sayesinde üretici ve kullanıcılar için ekonomik ve pratik bir çözümdür. Epoksi reçine; kumaş, ahşap ve cam gibi farklı yüzeylere kolaylıkla uygulanabilir ve sertleştiğinde oldukça dayanıklı bir yapıya kavuşur. Bu özellikleri sayesinde zemin kaplamalarında da sıkça kullanılmaktadır. Özellikle fabrika, depo ve endüstriyel alanlarda beton zeminlerin hızlı bir şekilde bozulmasını

önlemek için epoksi kaplama tercih edilmektedir. Beton zeminlere yapılan epoksi uygulamaları, uzun ömürlü ve dayanıklı yüzeyler oluşturarak bakım ve onarım ihtiyacını azaltmaktadır. Epoksi reçinenin hızlı kuruma özelliği de dikkat çekicidir. Alt yüzeye güçlü bir şekilde yapışarak kısa sürede dayanıklı kaplamalar oluşturur. Böylece epoksi reçine, hem yüzey kaplamaları hem de yapısal güçlendirme uygulamaları için güvenilir ve uzun ömürlü bir çözüm sunmaktadır [30].



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Günay ve diğ. (2019); yaptığı çalışmada, 3B yazıcı ile standart çekme testi örnekleri FDM yöntemi kullanılarak hazırlanmış; baskı hızı, doluluk oranı ve tarama açısı gibi işlem parametrelerinin çekme dayanımıyla ilişkisi incelenmiştir. İlave olarak çekme dayanımı için işlem parametrelerinin optimizasyonu uygulanmıştır. Çalışma sonunda çekme dayanımı üzerindeki en etkin parametre olarak ilk sırada doluluk oranı belirlenirken, tarama ve baskı hızı diğer önemli parametreler olarak sıralanmıştır [31].

Evlen ve diğ. (2017); PLA ve PET malzemelerini kullanarak, 3D yazıcı ile üretilen malzemelerdeki doluluk oranının mekanik özellikler üzerine etkilerini araştırmıştır. PLA ve PET filamentleri kullanılarak %10, %20, %30, %40 ve %50 doluluk oranlarında 3D yazıcı ile mekanik test numuneleri üretilmiş ve üretimi yapılan bu parçalar için çekme testleri gerçekleştirilerek, pürüzlülük ve sertlik değerleri ölçülmüştür. PLA ve PET malzemeleri için, sertlik değeri ile malzemenin doluluk oranı arasında doğru orantılı olarak, doluluk oranı arttıkça ortaya çıkan ürünlerin sertliklerinin de arttığı sonucu gözlemlenmiştir. Buna karşılık yüzey pürüzlülüğü ile çekme gerilmesi değerlerinin ise birbirleri ile ters orantılı olduğunu, %30 doluluk oranından itibaren %10, %20 doluluk oranlarının tersi yönde olduğunu belirtmişlerdir. Sertlik değerleri arttıkça pürüzlülük değerlerinin azaldığı görülmüştür [32].

Pak (2019); yaptığı çalışmada PLA filamentini kullanarak, farklı parametrelere göre eklemeli imalat üretimi yapmış, üretilen numunelere mekanik özelliklerini incelemek amacıyla sertlik ölçüm testleri ve çekme testleri uygulamıştır. İlk aşamada üretim parametresi olarak üç farklı doluluk oranı kullanılmıştır. Bu doluluk oranları; %20, %60, %100'dür. Sonuç olarak doluluk oranındaki artış ile birlikte numunelerdeki çekme mukavemetinin de arttığı ayrıca parça dolgu oranındaki artış ve parça üretim hızındaki azalmanın sertlik değerini arttırdığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, sertlik, uzama değerlerindeki farklılıkların, PLA filamentini kullanılarak yapılan parça üretim sürecinde, malzemenin fazla ısıya maruz kalması ile gevreklenmesinden kaynaklandığını görmüştür [33].

Ngo ve diğ. (2018); 3D baskı ve hızlı prototipleme de kullanılan eklemeli üretim üzerine çalışma yapmışlardır. 3D baskı tekniğinde karmaşık yapıları parçaların üretilebileceğinden ve atık malzemelerin minimuma indirildiğinden ayrıca eklemeli imalatın biyomedikal, havacılık gibi alanlarda kullanılmasından bahsetmişlerdir. 3B baskı tekniğinin avantajlarına ve hızlı prototipleme süreçlerine sağladığı olumlu katkılara değinilmiş, sadece plastik değil, aynı zamanda metal ve seramik gibi malzemelerle parçaların üretiminin de mümkün olduğu vurgulanmıştır. Bunun yanı sıra, yapılan çalışmalarda 3D baskı tekniklerinin bazı eksikliklerine de dikkat çekilmiştir [34].

Öz ve diğ. (2018); PLA, ABS, naylon ve polistren filamentleri kullanarak %15, %50 ve %100 doluluk oranlarında yazdırılmış örneklerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan gözlemler, doluluk oranlarının artışıyla birlikte tüm malzeme türlerinde mukavemetin orantılı olarak arttığını göstermektedir. Doluluk oranlarına göre yapılan karşılaştırmalarda, polistren malzemede mukavemetin en yüksek artışı sağladığı, naylon örneklerinde ise artışın daha düşük olduğu belirlenmiştir [35].

Solmaz ve diğ. (2010); bal peteği sandviç levhaların petek hücre boşluklarına köpük ekleyerek, köpüğün kritik burkulma yükü üzerindeki etkisini sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmışlardır. Araştırmanın sonucunda, hücre boşluklarına eklenen köpüğün, levhanın kritik burkulma yük değerini artırdığı sonucuna ulaşmışlardır [36].

Nia ve Sadeghi (2010); aksel basma deneyi ile köpük dolgunun bal peteği yapıları etkisini incelemişlerdir. Petek malzemesi için alüminyum 5052- H39 kullanılmıştır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda köpük dolgunun parçanın ezilme mukavemetini %300 arttırdığını ifade etmişlerdir [37].

Gomez ve diğ. (2018); bu araştırmada, dört ana faktörün (tabaka yüksekliği, dolgu yoğunluğu, nozul çapı ve basma hızı) PLA'nın yorulma performansına etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde kullanılan numuneler, yorulma test makinesiyle test edilmiş ve sonuçlar Wöhler yorulma eğrisi oluşturmak amacıyla değerlendirilmiştir. PLA'nın biyo uyumlu olduğu ve implant üretimi için yorulma ömrünün belirlenmesinin faydalı olacağı belirtilmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, dolgu yoğunluğunun yorulma performansını en çok etkileyen faktör olduğu tespit edilmiştir. Baskı hızının ise yorulma performansına anlamlı bir etkisi bulunmamıştır. Ayrıca, bal peteği deseninde üretilen numunelerin doğrusal dolgu ile üretilenlere göre

daha uzun yorulma ömrü sağladığı görülmüştür. Yorulma çatlaklarının genellikle numunelerin dış katmanlarından başladığı gözlemlenmiş ve bu nedenle dış katmanların daha yoğun yapılmasının yorulma dayanımını artırabileceği önerilmiştir [38].

Chacon ve diğ. (2017); EYM yöntemi kullanılarak üretilen PLA numunelerinin mekanik performansını etkileyen parametrelerden yapı oryantasyonu ile birlikte katman kalınlığı ve ilerleme hızını incelemişlerdir. Bu amaçla, numunelere çekme ve üç noktalı eğme testleri uygulanmıştır. Sonuçlar, dikey basma yönünde numunelerin düşük mekanik özellikler sergilemesine rağmen en yüksek sertliği gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, katman kalınlığındaki artışla birlikte mekanik özelliklerin iyileştiği, ancak sünekliğin azaldığı gözlemlenmiştir. Dikey numunelerde ilerleme hızının artması ise çekme dayanımını olumsuz yönde etkilemiştir [39].

Kaygusuz ve Özerinç (2018); yaptıkları çalışmada, yaygın bir 3D baskı malzemesi olan Polilaktik Asit (PLA) ile üretilen yapıların mekanik özellikleri üzerinde nozul sıcaklığı ve dolgu yoğunluğunun etkilerini incelemiştir. Bulgular, nozul sıcaklığının artmasıyla çekme dayanımının iyileştiğini, dolgu yoğunluğunun azalmasıyla ise dayanım ve elastikiyet modülünün kademeli olarak azaldığını göstermiştir. Bu sonuçlar, üç boyutlu yazıcılarla üretilen yapıların üretim süresi, maliyet ve mekanik özellikler açısından optimize edilmesine yönelik önemli bilgiler sunmaktadır [40].

Kahraman (2018); hızlı prototipleme teknolojileri sayesinde, dijital ortamda oluşturulan üç boyutlu modeller, kalıp veya fiktür kullanmaya gerek kalmadan farklı malzemelerle somut hale getirilebilmektedir. 3D yazıcıların zaman ve maliyet açısından sağladığı tasarruf, çevre dostu olmaları, güvenlik ve gizlilik gibi pek çok avantajı, onları çeşitli sektörlerde kullanılabilir kılmaktadır. Teknolojinin gelişmesi ve daha geniş bir kullanıcı kitlesine ulaşmasıyla birlikte, 3D yazıcıların yeni uygulama alanları ortaya çıkmaktadır. Bu yazıcılar, plastik, silikon, cam ve benzeri malzemelerle üretim yapabilme yeteneğine sahiptir [41].

Ergene ve diğ. (2019); tarafından yapılan çalışmada, 3D yazıcılar kullanılarak katman kalınlığının baskı süresi, filament tüketimi ve ayrıca yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri için çalışma yapılmıştır. Elde edilen deneysel veriler, katman kalınlığının optimize edilmesiyle, yüzey kalitesi, baskı süresi ve malzeme tüketimi gibi faktörlerin dengelenebileceğini ortaya koymuştur. Özellikle düşük katman kalınlıklarında baskı

süresinin artmasına rağmen, yüzey pürüzlülüğünün azaldığı ve daha kaliteli bir yüzey elde edildiği gözlemlenmiştir. Bu, üretim hızını artırmak ve malzeme israfını azaltmak için önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır [42].

Levenhagen ve diğ. (2017); 3D baskı ile üretilen parçaların katmanlar arasındaki ara yüzey yapışmasını iyileştirmek amacıyla, ticari olarak temin edilen PLA'ya sentezlenmiş düşük molekül ağırlıklı PLA bileşimlerini ekleyerek bir bimodal polilaktit karışımı geliştirmiştir. Çekme deneyi sonuçlarına göre, düşük molekül ağırlıklı katkı maddesinin yeterli boyuta ulaştığında, baskı kafasına enine yönde basılan parçaların modül ve maksimum gerilme değerlerinde belirgin bir iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, FDM tipi üç boyutlu yazıcılarda, ticari PLA filamentine doğru moleküler ağırlık ve yükte eklenen düşük molekül ağırlıklı bileşenlerin, ara yüzeylerdeki dağılımı hızlandırdığı ve tabakalar arasındaki yapışmayı güçlendirdiği vurgulanmıştır. Bu alanda daha fazla araştırma yapılması gerektiği sonucuna dikkat çekmişlerdir [43].

Safarabadi ve diğ. (2021); yaptıkları çalışmada, Nomex bal peteği çekirdekli ve cam-epoksi yüzey malzemelerine sahip sandviç kompozitlerin burkulma davranışlarını, hem deneysel yöntemler hem de sayısal modeller kullanarak incelemişler, ayrıca sandviç panellerin viskoelastik özellikleri de göz önünde bulundurmuşlardır. Çalışma kapsamında, dört farklı sandviç kompozit için burkulma davranışları, kritik burkulma yükü, enerji absorpsiyonu analiz edilmiştir. Bu kompozitler, tek yönlü yüz malzemesi yerleşimleri [0 0 0 veya 90 90 90 konfigürasyonu] ve dolgusuz ya da poliüretan köpük dolgulu çekirdek yapılarıyla tasarlanmıştır. Deneysel bulgular, poliüretan köpüğün yükün fiber yönünde olması durumunda kritik burkulma yükünü %14 oranında artırdığını, yük fiberlere dik yönde olduğunda ise bu değer %73 arttığını göstermektedir. Ayrıca, standart çekirdek hücre boyutuna ve 5 mm çekirdek kalınlığına sahip [0 0 0] yüzey yerleşimine sahip poliüretan köpük dolgulu bal peteği çekirdekli sandviç kompozit yapısı, enerji absorpsiyonu ve yük taşıma kapasitesi açısından en iyi performansı sergilemiştir [44].

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Bu bölümde, tez çalışması için kullanılan üç boyutlu yazıcı ve kullanılan malzemeler tanıtılmıştır.

3.1.1 3D yazıcı

Test numunelerini hazırlamak için Şekil 3.1’de gösterilen Kartezyen tipi bir yazıcı olan Creality marka K1 serisi K1 max 3D yazıcı kullanılmıştır. Kullanılan 3D yazıcı teknik özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : 3D yazıcı teknik özellikleri.

Açıklama	Değer-Özellik	Birim
Marka	Creality	
Model	K1 Max	
Baskı teknolojisi	EYM (Eriyik Yığılma Modelleme)	
Extruder tipi	Çift Dişli Direct Drive Extruder	
Baskı alanı	30x30x30	cm
Maksimum baskı hızı	600	mm/sn
Max hotend sıcaklığı	300	°C
Baskı hassasiyet	100±0.1	mm
Baskı kalınlığı	0.01-0.35	mm
Maxsimum tabla sıcaklığı	120	°C
Desteklenen filament tipleri	ABS, PLA, PETG, PET, TPU, PA, ASA, PC, PLA-CF, PA-CF, PET-CF	
Dilimleme uygulamaları	Creality Slicer, Cura, Simplify3D, PrusaSlicer	
Dosya biçimi	STL, OBJ, AMF	
Dosya aktarımı	WiFi, USB, Ethernet	



Şekil 3.1 : Creality marka K1 serisi K1 max 3D yazıcı.

3.1.2 PLA filament

Deney numunelerini üretmek için Şekil 3.2’ de görülen MakerBot Natural marka PLA filament satın alınarak kullanılmıştır. Kullanılan PLA filamentte ait özellikler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : PLA filament özellikleri.

Açıklama	Metric
Sıcaklık Sapması (ASTM 648, 66 psi)	52-49°C
Elastikiyet Modülü (ASTM D790, 15 mm/min)	2,600 MPa
Çekme Dayanımı (ASTM D638, 50 mm/min)	62 MPa
Akma Modülü (ASTM D638, 50 mm/min)	3,600 MPa
Uzama (%)	>4.4%
Çentik Darbe Dayanımı (ASTM D256)	32 J/m



Şekil 3.2 : PLA filament

3.1.3 Poliüretan köpük

Bu tez çalışması için üretilen test numunelerinde, dolgu malzemesi olarak kullanılan malzemelerden biri poliüretan köpük'dür. Kullanılan poliüretan köpük, Apel marka (PF 321) olarak satın alınmıştır. Kullanılan Apel PF 321 poliüretan köpüğü hava ve ortamdaki nem ile kürleşen, özel olarak formüle edilmiş, dolgu montaj ve yapıştırma köpüğüdür. 2 ile 4 saat arasında genleşir ve kürleşir. Kürleştikten sonra kesilebilir, tıraşlanabilir ve üzeri boyanabilir. Tamamen stabil hale gelmesi 24 saati bulabilir.

3.1.4 Epoksi reçine

Tez çalışması için üretilen test numunelerinde, dolgu malzemesi olarak kullanılan malzemelerden biri Rich marka epoksi reçine'dir. Rich Epoksi Reçinenin en önemli özellikleri, yanmaz, ultra şeffaf, çizilmelere karşı çok dayanıklı olması ve zaman içerisinde sararma yapmamasıdır. Ürün 500 ml reçine ve 250 ml sertleştirici olarak iki şişe halindedir. İdeal kuruma süresi 24 saat'dir. 2 ölçü epoksi ve 1 ölçü sertleştirici olarak kullanılır.

3.1.5 Dolgu malzemesi aparatı (nozul)

Kullanılacak dolgu malzemelerinin dengeli ve homojen bir şekilde numune içinde yayılmasını sağlamak amacı ile Şekil 3.3' de görülen özel bir nozul tasarımı yapılarak 3D printerda üretimi yapılmıştır.



Şekil 3.3 : Dolgu malzemesi aapaatı (nozül).

3.2 Yöntem

Bu bölümde, numune üretimlerindeki parametre ve özellikler hakkında bilgi verilmiş, bu işlem basamağında, teorik modellemeden başlayarak 3D yazıcıda üretim ve optimizasyon aşamalarına kadar çalışma planı, tasarlanan dolgu yolu ve nozul modifikasyonları anlatılmıştır.

3.2.1 Üretim reçetesi

3D printerda üretimi yapılan numunelere poliüretan köpük ve epoksi reçine katkı işlemi Çizelge 3.3’de belirtilen deneysel test varyasyonları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.3 : Deneysel varyasyonlar.

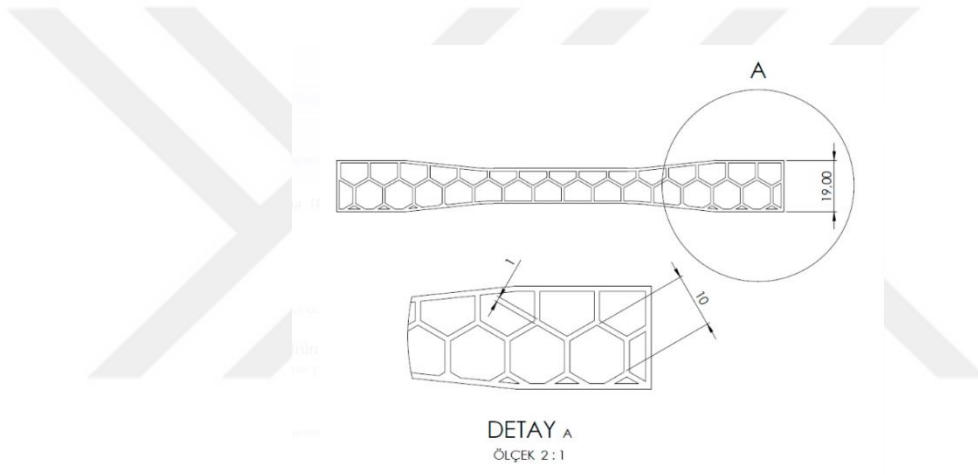
Numune adı	Yazdıma doluluk oranı	PU Dolgu	Epoksi Reçine dolgu
Kontrol	100		
PLA10	10		
PLA20	20		
PLA10-PU	10	Var	-
PLA10-EP	20		Var
PLA20-PU	10	Var	-
PLA20-EP	20	-	Var

3.2.2 Üretim işlemi (yazdırma)

Bu bölümde ürün tasarımından, üretim sürecine kadar izlenen adımlar detaylandırılmıştır. Bu süreçte, tasarımın işlevselliğini artırmak ve dolgu malzemesinin kolay uygulanabilmesi için özel yollar ve nozul tasarımları yapılmıştır.

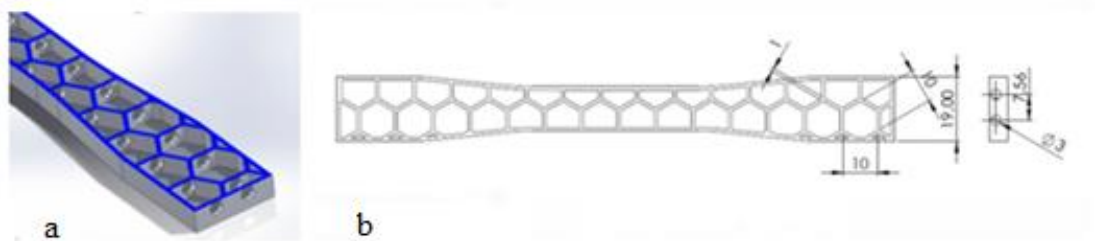
Tasarımı yapılan model için üretim başlangıcı adımına kadar Şekil 1.11 de tariflenen (3D baskı prosesi için temel adımlar) işlem basamakları takip edilir.

Bu aşamada parça üretim işlemi devam ederken, dolgu deseni yazdırılmaya ve dolgu deseni ortaya çıkmaya başladığı aşamada 3D yazıcıda yazdırma işlemi durdurulur ve henüz imalatı tamamlanmamış numune üstünden yeni tasarlanacak numuneye referans oluşturacak dolgu deseni için ölçüler alınır. Örnek ölçü Şekil 3.4’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : Dolgu deseni için referans ölçü alma.

Tekrar modelleme aşamasında referans ölçülere göre tasarımı yenilenen numuneye dolgu işleminin kolayca yapılabileceği kanal Şekil 3.5’de görüldüğü gibi ilave edilir ve yeni model için solidworks program kullanılarak çizim işlemi güncellenir. Bu işlem ile tasarım süreci tamamlanmıştır. Şekil 3.5(a)’da tasarımın solidworks programındaki görüntüsü, Şekil 3.5(b)’de tasarım ölçüleri görülmektedir.



Şekil 3.5 : Tekrar modelleme.

Nihai Üretim Süreci: Tasarımı tamamlanan model için, Şekil 1.11’de belirtilen işlem adımları yeniden başlatılarak yazdırma işlemi tamamlanır. Bu aşamada %100 doluluk oranı seçilerek numuneler üretilir. 3D programının arayüzünde tasarlanan üretim parametreleri Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4 : 3D programının arayüzünde tasarlanan üretim parametreleri.

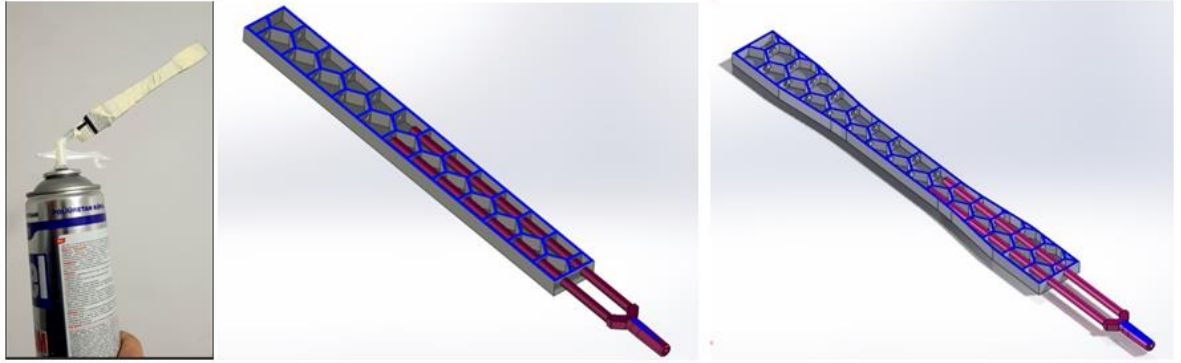
Parametre	Açıklama	Tipik Aralık / Değerler	Birim
Katman Kalınlığı (Layer Height)	Her katmanın yazdırma kalınlığı. Detay seviyesi ve baskı süresini etkiler.	0.2	mm
Doluluk Oranı (Infill Percentage)	Baskı içindeki boşluk miktarı. Mekanik dayanımı etkiler.	%10 - %20 -%100	
Yazdırma Hızı (Print Speed)	Nozülün hareket ettiği hız. Yazdırma süresi ve kaliteyi etkiler.	300	mm/s
Nozül Çapı (Nozzle Diameter)	Nozül açıklığı, baskı malzemesi çıkışını belirler.	0.4	mm
Ekstrüzyon Sıcaklığı (Extrusion Temperature)	Filamentin eritilmesi için gereken sıcaklık. Malzeme türüne bağlıdır.	220	°C
Baskı Taban Sıcaklığı (Bed Temperature)	Filamentin yapışmasını sağlamak için taban sıcaklığı.	45	°C
Destek Yapıları (Supports)	Çıkıntılı kısımları desteklemek için eklenen yapılar.	Destek Yok	
Duvar Kalınlığı (Wall Thickness)	Baskının dış duvarlarının kalınlığı. Mekanik dayanımı artırır.	1	mm
Katmanlar Arası Soğuma (Cooling)	Her katmanın soğuması için gereken fan hız ve zaman ayarı.	%100 fan	
Filament Çapı (Filament Diameter)	Yazıcının kullandığı filamentin çapı.	0,75	mm
Doluluk Deseni (Infil Pattern)	Baskı içindeki doluluk deseninin şekli. Mekanik özellikleri ve baskı süresini etkiler.	Bal Peteği	

3.2.3 İç dolgu işlemi (poliüretan köpük & epoksi reçine)

Bu bölümde 3D printerda üretimi yapılan parçalara poliüretan köpük ve epoksi reçine dolgu maddeleri ilave işlemlerinden bahsedilmiştir.

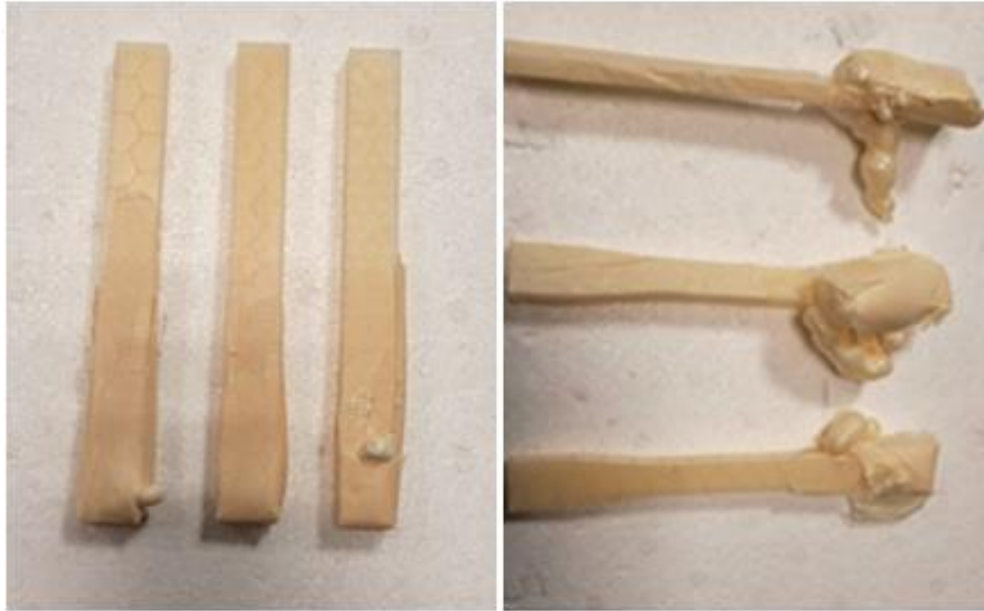
3.2.4 Poliüretan köpük dolgu işlemi

Şekil 3.3’de şekli verilen nozul tasarımı güncellenerek dolgu kanalı açılan yeni parçaya monte edilir ve poliüretan köpük ve epoksi reçine doldurma işlemi numunenin sonundan başlayarak tamamlanır.Bu işlem için temsili görsel Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6 : Poliüretan köpük doldurma işlemi.

Doldurma işlemi tamamlandığında nozul çıkarılır, numune içinde hapsolan poliüretan köpüğün(dolgu maddesinin) nozul deliklerinden dışarı çıkamaması için delikler Şekil 3.7’de görüldüğü gibi körlenir. Kürlenme süresi için minimum 24 saat beklenir.



Şekil 3.7 : Nozul deliği körleme.

3.2.5 Epoksi reçine dolgu işlemi

Madde 3.1.4’de verilen ölçülerde hazırlanan epoksi reçine dolgu maddesi Şekil 3.3’de görüldüğü gibi numunenin sonundan başlayarak doldurmaya başlanır ve işlem tamamlandığında 24 saat kürlenme süresini tamamlamak için dik bir şekilde bırakılarak süreç tamamlanır.

3.2.6 Mekanik testler

Hazırlanan PLA numunelerinin mekanik özellikleri; çekme ve eğilme testleri yapılarak belirlenmiştir. Testler BTÜ, Orman Endüstri Mühendisliği laboratuvarlarında, Amerikan Standartları (ASTM) referans alınarak yapılmıştır.

3.2.6.1 Çekme testi

Çekme testinin temel amacı, malzemenin statik yük altında gösterdiği elastik ve plastik davranışları belirlemek ve bu özellikleri analiz etmektir.

Bu tez çalışması için ASTM D638 standardına uygun, tip 4 numune ölçüleri kullanılarak PLA malzemesinden minimum 5 adet olacak şekilde çekme testi numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Bu numunelere, test süresi 30 saniyeden az ve 2,5 dakikayı aşmıyacak şekilde, test hızı 5 mm/dakika alınarak çekme testi uygulanmıştır. Uygulanan testler sonucunda, numunelerin deformasyon süresinin 60 ile 90 saniye arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Çekme testi sonucu elde edilen grafiklere, bulgular ve tartışma bölümünde yer verilmiştir. Çekme testleri, Şekil 3.9’de gösterilen SHIMADZU AG-IC Universal çekme test cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 3.8 : Çekme testi numuneleri.



Şekil 3.9 : Çekme testi düzeneği.

Çekme testi için hazırlanan numunelerin, çekmede elastikiyet modülü, çekme direnci, yüzde kopma uzaması aşağıdaki eşitlikler (Denklem 3.1, 3.2 ve 3.3) esas alınarak bilgisayar programı ile otomatik olarak hesaplanmıştır.

Çekmede elastikiyet modülü;

$$E = \frac{\delta_{cd}}{\varepsilon} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (3.1)$$

E=Çekmede elastikiyet modülü (N/mm²)

δ_{cd} =Çekme Direnci (N/mm²)

ε =Kopma esnasında oluşan birim uzama

Çekme Direnci;

$$\delta_{cd} = \frac{F_{max}}{A} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (3.2)$$

δ_{cd} =Çekme direnci (N/mm²)

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

A=Örnek enine kesit alanı (mm²)

Kopmada uzama miktarı;

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \text{ (%) } \quad (3.3)$$

ΔL =Birim uzama (mm)

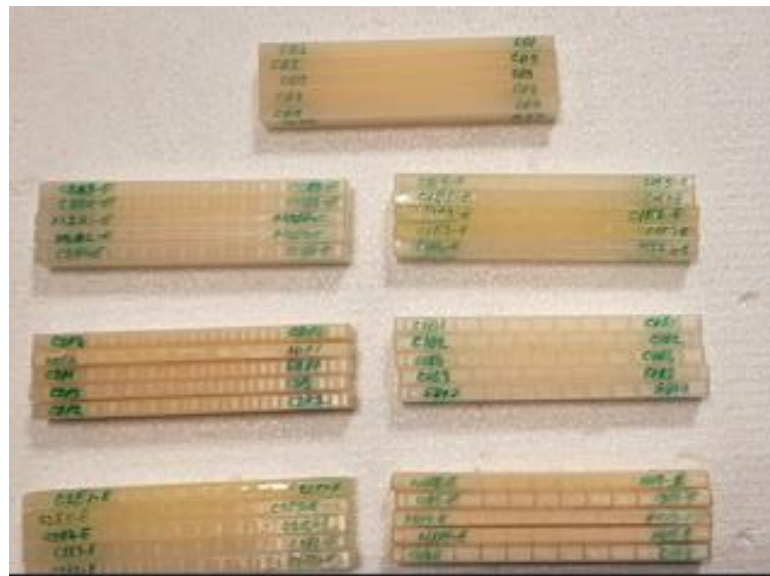
L_0 =Örnek boyu (mm)

ϵ =Kopmada uzama miktarı (%)

3.2.6.2 Eğme testi

Eğme testinin amacı, eğilme durumunda malzemede meydana gelen eğme dayanımı (σ_e), eğilme miktarı (δ), elastisite modülü (E), eğilme rijitliği (EI) değerlerini hesaplamak ve tasarım bilgilerinin belirlenmesini sağlamaktır.

Bu tez çalışmasında, PLA malzemesi kullanılarak ASTM D5023 standardına uygun, boyutları 7x15x136 mm olacak şekilde minimum 5 adet hazırlanan numunelerin eğme davranışlarının belirlenmesi için hazırlanan numunelere üç nokta eğme testi yapılmıştır. Hazırlanan numuneler Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Eğme testi, ASTM D5023 (plastikler için 3 nokta eğme testi) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Eğme testlerinin yapıldığı SHIMADZU AG-IC Universal test cihazı, Şekil 3.11'de gösterilmektedir. Eğme numunelerinin uzunluğu 136 mm'dir. İki uç mesnet arası uzunluk olan span mesafesi ise ortalama kalınlık x 16 olarak seçilmiştir. Test hızı 1 dakikadan az, 5 dakikadan uzun olmayacak şekilde 5 mm/dk hız ile yapılmıştır. Ortalama 90-120 saniye aralığında, örneklerin testleri tamamlanmıştır. Eğme testi sonucu elde edilen grafiklere, bulgular ve tartışma bölümünde yer verilmiştir.



Şekil 3.10 : Eğme testi numuneleri.



Şekil 3.11 : Eğme testi düzeneği.

PLA test numunelerine ait eğme direnci ile eğmede elastikiyet modülü denklem 3.4 ve denklem 3.5’den yararlanılarak ve universal test makinasına ait programla otomatik olarak hesaplanmıştır.

Eğmede elastikiyet modülü;

$$E = \frac{Fxl^3}{4xbxd^3x\Delta} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (3.4)$$

F=Deformasyonu sağlayan kuvvet (N)

l=Dayanak noktaları arasındaki mesafe (mm)

b=Örnek genişliği (mm)

d=Örnek kalınlığı (mm)

Δ =Eğilme miktarı (mm)

Eğme direnci;

$$\sigma_e = \frac{3xFxL}{2xBxd^2} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (3.5)$$

F=Kırılma anındaki maksimum kuvvet (N)

L=Dayanak noktaları arasındaki açıklık (mm)

d=Örnek kalınlığı (mm)

B=Örnek genişliği (mm)

3.2.7 Termogravimetrik analiz ve türev termogravimetrik analiz

Hazırlanan PLA numunelerinin termal özellikleri için TGA analizleri BTÜ Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölüm laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

TGA, bir malzemenin sıcaklık veya zaman boyunca kütle değişimini ölçmek için kullanılan bir termal analiz yöntemidir. Bu yöntem, malzemelerin termal stabilitesini ve ısıl süreçlerde meydana gelen kütle kayıplarını incelemek amacıyla uygulanır. DTG ise sıcaklık ve zamana bağlı olan bu değişimin birinci türevi alınması ile elde edilen analiz sonucudur.

Hazırlanan numune örneklerinden uygun boyutlarda parçalar alınarak, Hi-Tech STA7200 model termogravimetrik analiz cihazında test edilmiştir. (Şekil 3.12). Analiz, azot atmosferi (20 ml/dk) altında, oda sıcaklığından başlayarak 800 °C'ye kadar 10 °C/dakika hızla ısıtılarak gerçekleştirilmiştir. TGA verileri kullanılarak, numunelere ait sıcaklık ve kütle kaybı (%) grafikleri oluşturulmuş ve bu grafiklerin türevleri bir yazılım yardımıyla hesaplanarak DTG (Diferansiyel Termogravimetri) eğrileri elde edilmiştir. DTG eğrileri, numunelerin bozunma sıcaklıklarının belirlenmesinde kullanılmıştır.



Şekil 3.12 : Hitachi marka TGA cihazı.

Çekme numunelerinin kopan kısımlarından, numunelerin arayüzey yapılarının morfolojik olarak incelenmesi için BTÜ Merkez Laboratuvarlarında LEICA EM ACE600 markalı cihaz ile 15 nanometre Aupd kaplanan numunelerin SEM görüntüleri alınmıştır. Kaplama öncesi numuneler 60 °C de 48 saat etüv'de bekletilmiştir.

3.2.8 Maliyet analizi

Maliyet analiz hesabı çekme numuneleri için hazırlanan reçete üstünden yapılmıştır. Maliyet hesabını yapmak için göz önüne alınan bileşenler: Makine amortisman maliyeti, filament maliyeti, enerji tüketim maliyeti'dir. Enerji fiyatı (EPDK) 1 Temmuz 2024 tarihli fiyatından alınmıştır. PLA, poliüretan köpük ve epoksi reçine için alışveriş siteleri baz alınarak hesaplanmıştır.

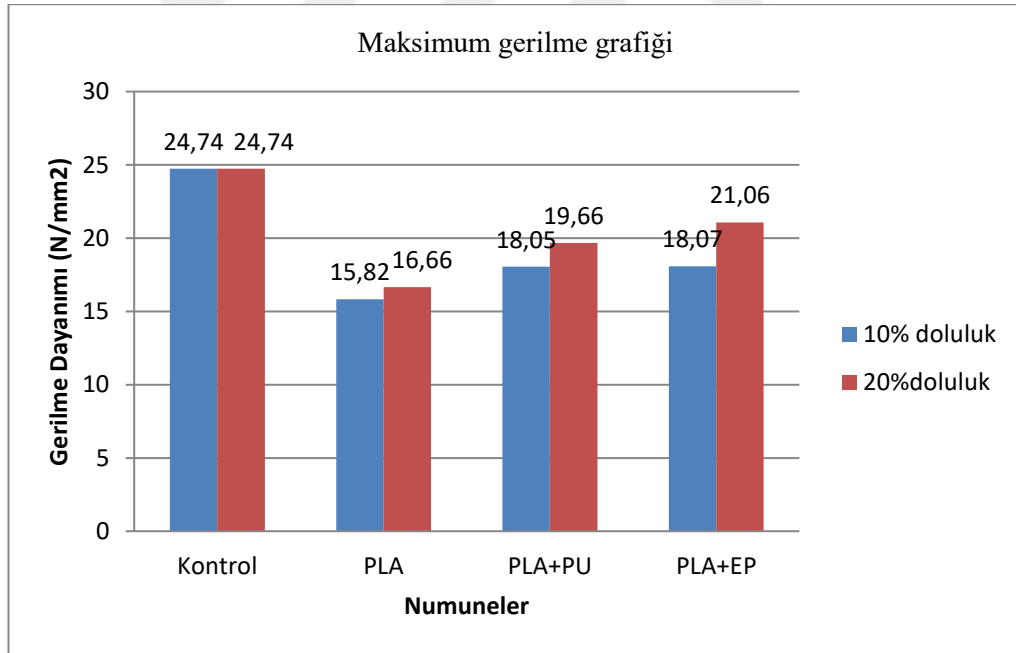


4. BULGULAR VE TARTIŞMA

ASTM D-638 ve ASTM D-790 standartlarına göre 5 tekrarlı yapılan çekme testi ve eğme testi sonuçları sırasıyla çekme testine ait bulgular ve eğme testine ait bulgular başlığı altında incelenmiştir.

4.1 Çekme Testine Ait Bulgular

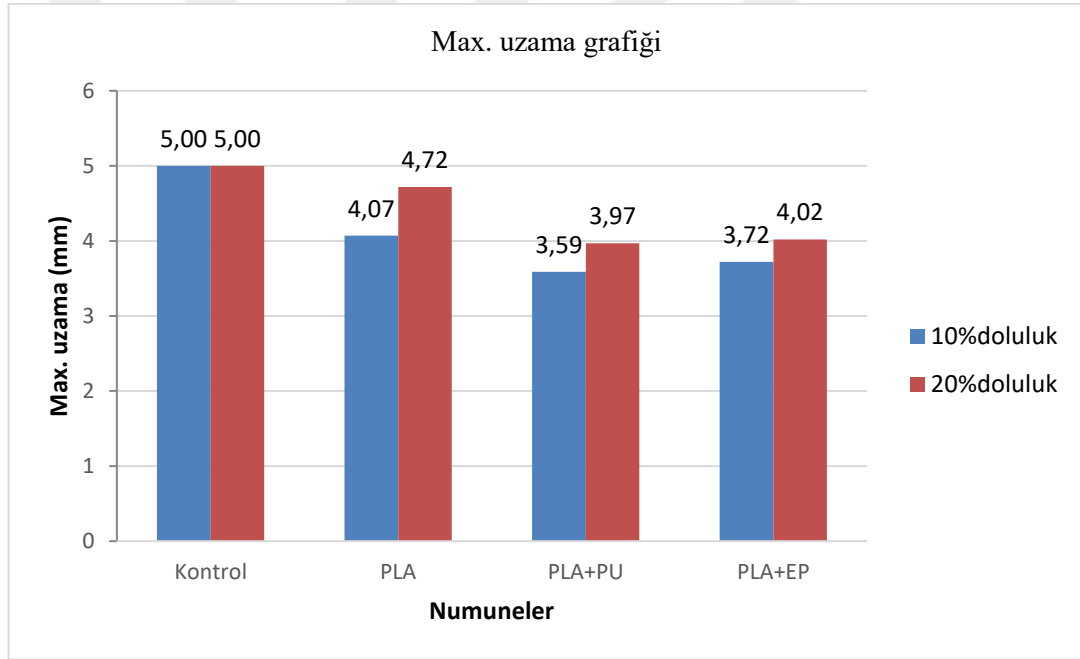
Numunelerin çekme testinde gösterdikleri karakteristiklerin daha iyi irdelenebilmesi için gerilme - uzama – elastikiyet verileri kullanılarak, testlere gösterdikleri davranışlar grafik üzerinde verilmiştir. Test numunelerine ait gerilme grafiği Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Gerilme dayanımı grafiği.

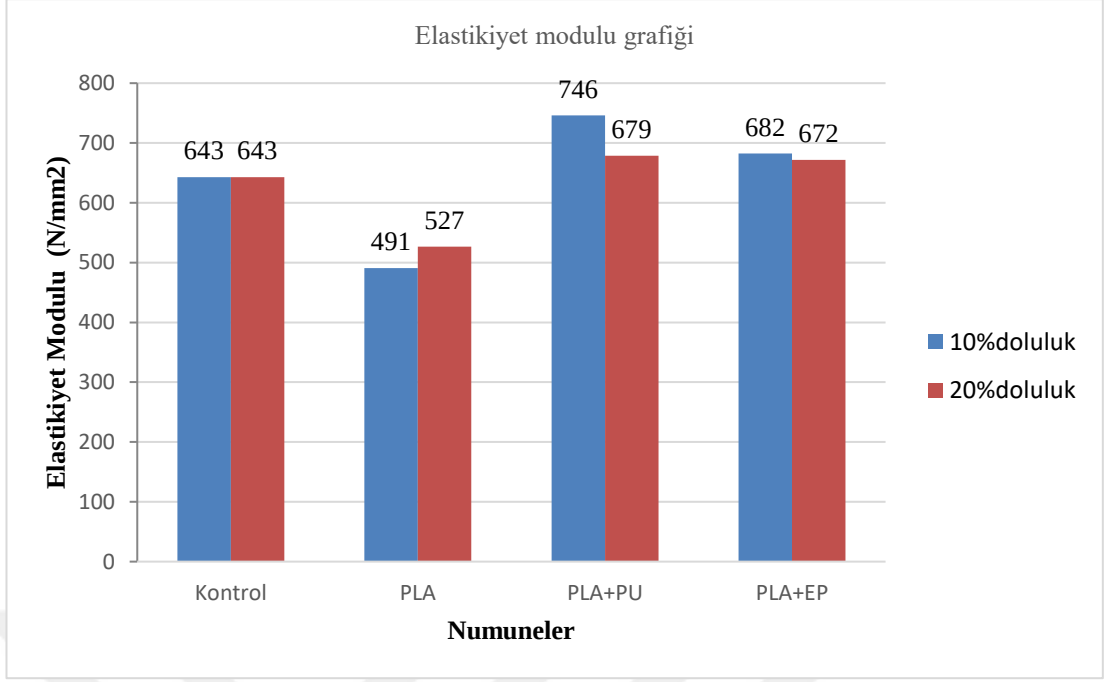
PLA numunesi kontrol numunesine kıyasla daha düşük bir maksimum gerilme değeri göstermiştir. Bu durum, PLA'nın saf haliyle daha kırılgan olduğunu ve mukavemetinin düşük olduğunu gösterir. Poliüretan köpük (PU) dolgusu, PLA'nın çekme mukavemetini artırmıştır. Doluluk oranının %20'ye çıkarılmasıyla dayanımda artış görülsede, bu artış sınırlıdır. Epoksi reçine ile takviye edilen parçalar, tüm gruplar

içinde en yüksek dayanımı göstermiştir. Epoksi reçine, iç yapıdaki boşlukları daha etkili bir şekilde doldurarak parçaların homojenliğini ve rijitliğini artırmıştır. Doluluk oranının %10'dan %20'ye çıkarılması, tüm gruplarda çekme dayanımında bir artış sağlamıştır. Özellikle epoksi reçine için daha yoğun doluluk, iç yapıyı daha sıkı hale getirerek mekanik performansı iyileştirmiştir. Poliüretan köpük ve epoksi reçine, saf PLA'ya kıyasla çekme dayanımını belirgin bir şekilde artırmıştır. Epoksi reçine, özellikle %20 doluluk oranında poliüretan köpüğe göre daha yüksek bir dayanım göstermiş ve 21,06 N/mm² ile en yüksek çekme dayanımını sağlamıştır. Bu, EP'nin yüksek sertlik ve dayanıklılık sağlayan bir dolgu malzemesi olmasından kaynaklanmaktadır. Numunelerin çekme deneylerinde gösterdikleri özelliklerin daha iyi irdelenebilmesi için Şekil 4.2'de uzama grafiği, Şekil 4.3'de elastikiyet modül grafiği verilmiştir.



Şekil 4.2 : Maximum uzama grafiği.

Kontrol grubunun, 5 mm ile maksimum uzama açısından en yüksek performansı sergilediği, dolgu malzemelerinin ise uzama kapasitesini düşürdüğü görülmektedir. Bu, kontrol grubunun en iyi esneklik özelliklerine sahip olduğunu ortaya koyar. PLA, PLA+PU ve PLA+EP numuneleri arasında ise uzama değerlerinde sırasıyla bir azalma eğilimi bulunmaktadır. Bu sonuçlar, dolgu malzemelerinin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini değerlendirme açısından önemlidir.



Şekil 4.3 : Elastikiyet modulu grafiği.

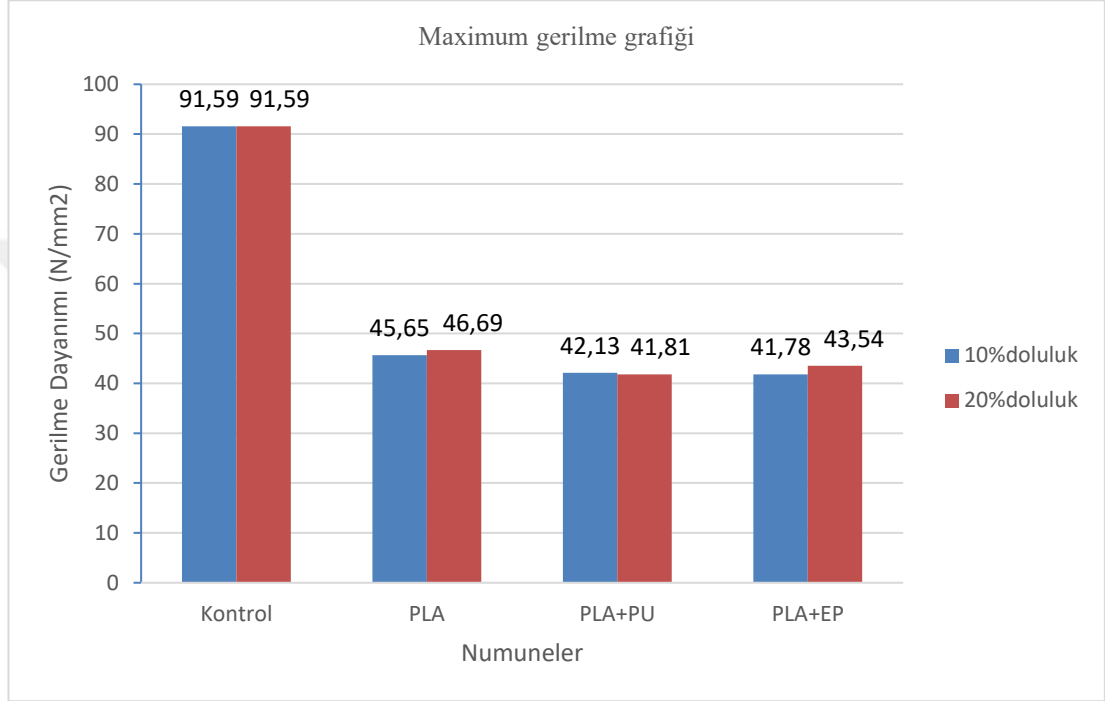
Test verilerine göre elastikiyet modulu grafiğini incelediğimizde, kontrol grubuna kıyasla PLA numunelerinde elastisite modülü %10 doluluk oranında %23,6, %20 doluluk oranında ise %18,1 oranında düşüş göstermiştir. PLA+PU numunelerinde, elastisite modülü değerleri %10 doluluk oranında 746 N/mm², %20 doluluk oranında ise 679 N/mm² olarak kaydedilmiştir. Bu, kontrol grubuna göre %10 doluluk oranında %16 daha yüksek bir elastisite modülü değeri sunarken, %20 doluluk oranında %5,6 daha yüksek bir değer göstermiştir. PLA+EP numunelerinde ise elastisite modülü, %10 doluluk oranında 682 N/mm², %20 doluluk oranında 672 N/mm² olarak ölçülmüştür. Kontrol grubuna kıyasla %10 doluluk oranında %6,1 daha yüksek, %20 doluluk oranında ise %4,4 daha yüksek elastisite modülü değerlerine ulaşılmıştır.

Sonuç olarak, PLA numunelerinde dolgu maddelerinin elastisite modülünü artırıcı bir etkisi olduğu, en yüksek elastisite modülüne ise PU dolgu maddesi ile ulaşıldığı görülmektedir. Bu bulgular, katkı malzemelerinin elastisite modülü üzerindeki etkilerini değerlendirirken hem katkı tipinin hem de doluluk oranının belirleyici bir faktör olduğunu göstermektedir. Özellikle poliüretan köpük (PU) katkısı elastisite modülünü en yüksek seviyelere çıkarırken, epoksi reçine (EP) katkısı daha dengeli ve nispeten düşük bir artış sağlamıştır. Doluluk oranının da elastisite modülü üzerinde etkisi görülmektedir; %10 ve %20 doluluk oranlarındaki farklılıklar, malzeme esnekliği ve rijitliği üzerindeki katkıların etkisini ortaya koymaktadır. Bu nedenle,

katkı malzemesi ve doluluk oranı varyasyonu, malzeme tasarımında kritik parametreler olarak değerlendirilmektedir.

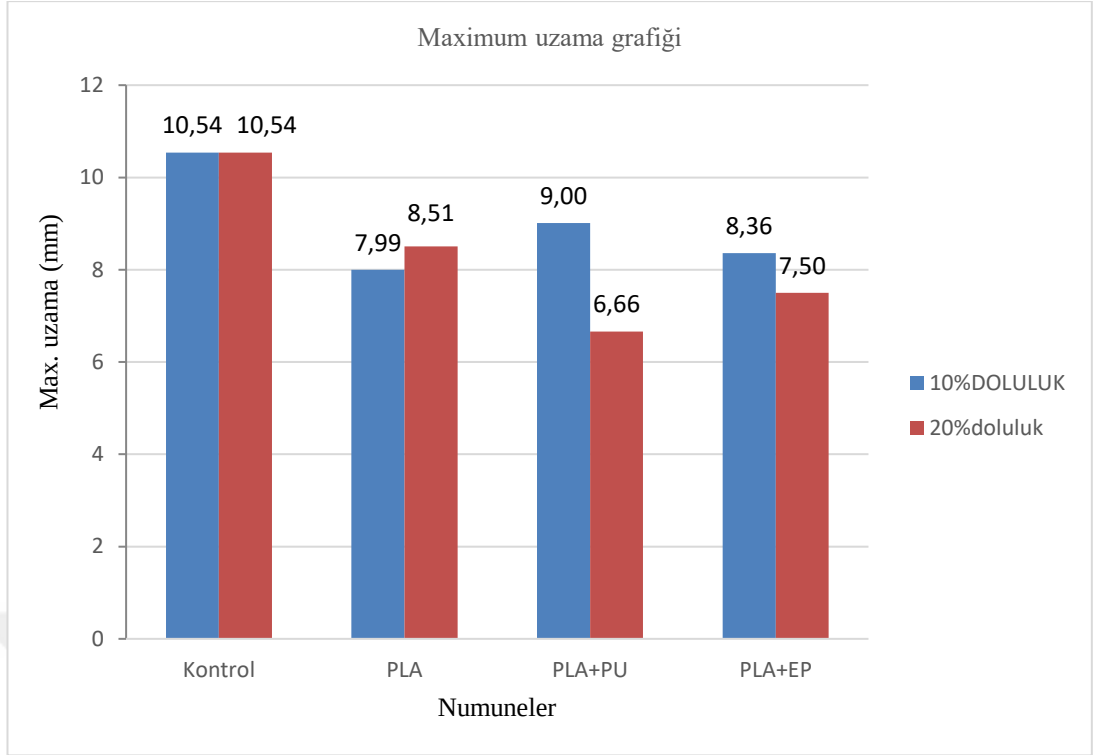
4.2 Eğme Testine Ait Bulgular

Numunelere ait üç nokta eğme deneyi verilerinden elde edilen gerilme grafiği, Şekil 4.4’de verilmiştir.



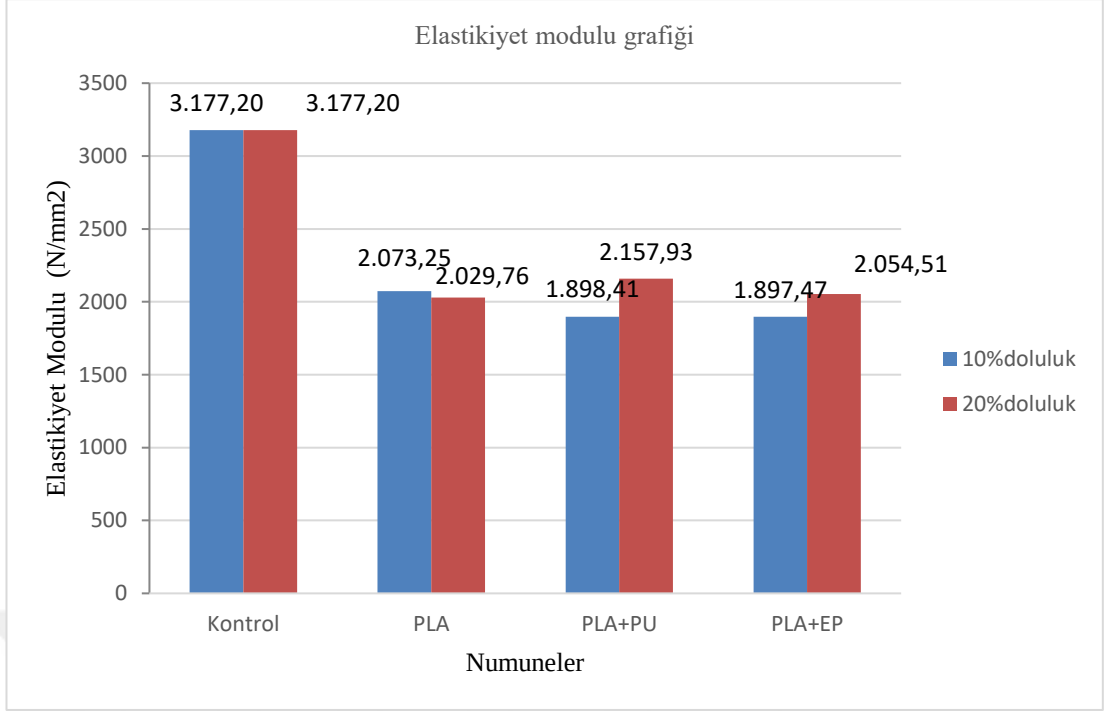
Şekil 4.4 : Gerilme grafiği.

Test sonuçlarına göre, kontrol grubunun maksimum eğme gerilme değeri her iki doluluk oranında da sabit kalmış ve 92 N/mm² olarak ölçülmüştür. Saf PLA parçalarının eğme dayanımı kontrol grubuna kıyasla %50’den fazla düşüş göstermiştir. Poliüretan köpük ile takviye edilen parçalar için, kontrol grubuna göre sırasıyla %54 (10%) ve %54,3 (20%) daha düşük eğme dayanımı görülmektedir. Epoksi reçine ile takviye edilen parçalar ise kontrol grubuna göre %54,4 (%10) ve %52,5 (%20) daha düşük eğme dayanımına sahiptir. Grafik analizine göre, dolgu malzemelerinin parçaların rijitliğini artırmasına rağmen eğme dayanımını sınırlandırdığı söylenebilir.



Şekil 4.5 : Maximum uzama grafiği.

Uzama grafiğine göre kontrol grubu 11 mm ile en yüksek uzama değerine sahiptir. Saf PLA, kontrol grubuna göre %24 (%10) ve %19,3 (%20) daha düşük uzama kapasitesine sahiptir. Poliüretan köpük takviyeli PLA numuneler %10 doluluk oranında %14,6 daha düşük uzama gösterirken, %20 doluluk oranında bu fark %36,8'e yükselmiştir. Epoksi reçine takviyeli PLA parçalar ise %10 dolulukta %20,7, %20 dolulukta %28,9 daha düşük uzama sergilemiştir. Bu sonuçlar, dolgu malzemelerinin rijitliği artırırken uzama kapasitesini düşürdüğünü göstermektedir.



Şekil 4.6 : Elastikite modulu grafiği.

Test sonuçlarına göre, kontrol grubu en yüksek elastisite modülü değeriine sahip olmuş ve her iki doluluk oranında da 3177 N/mm² olarak ölçülmüştür. Saf PLA, kontrol grubuna kıyasla %34,8 (%10 doluluk oranında) ve %36,1 (%20 doluluk oranında) daha düşük elastisite modülü göstermiştir. Poliüretan köpük ile takviye edilen PLA numuneleri, %10 doluluk oranında kontrol grubuna göre %40,2 daha düşük değeri sergilerken, %20 doluluk oranında fark %32'ye düşmüştür. Epoksi reçine takviyeli PLA numuneleri ise %10 doluluk oranında %40,2, %20 doluluk oranında %35,3 daha düşük elastisite modülü değeriine ulaşmıştır. Bu sonuçlar, dolgu malzemelerinin elastisite modülünü kontrol grubuna göre önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Bu veriler, dolgu malzemelerinin elastisiteyi artırmaktan çok, malzemenin rijitliği ve dayanımını iyileştirmeye yönelik etkiler sunduğunu göstermektedir.

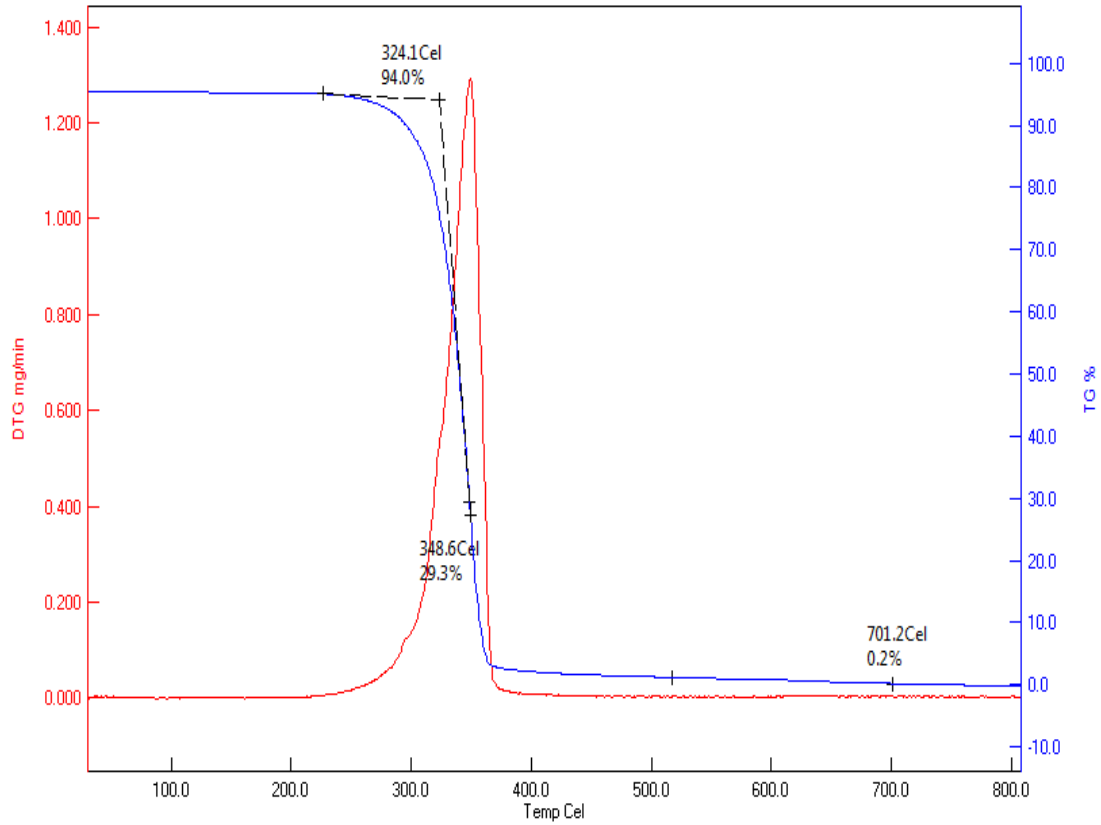
4.3 TGA Analizine Ait Bulgular

Saf PLA ve dolgu maddelerinin sıcaklıklığa bağlı ağırlıklarında meydana gelen değişimler TGA analizi yapılarak ölçülmüştür. Numunelere ait kütle kayıpları Çizelge 4.1'de özetlenmiştir. Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da ise PLA ve dolgu maddelerinin TGA ve DTG eğrileri verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Numunelere ait kütle kayıpları.

Numune Grubu	T _{%5} (°C)	T _{%10} (°C)	T _{max} (°C)	700 °C'de kalan miktar (%)
PLA10	314,1	324,1	348,6	0,2
PLA10-PU	311,0	321,0	341,2	6,8
PLA10-EP	317,2	327,2	348,1	7,1

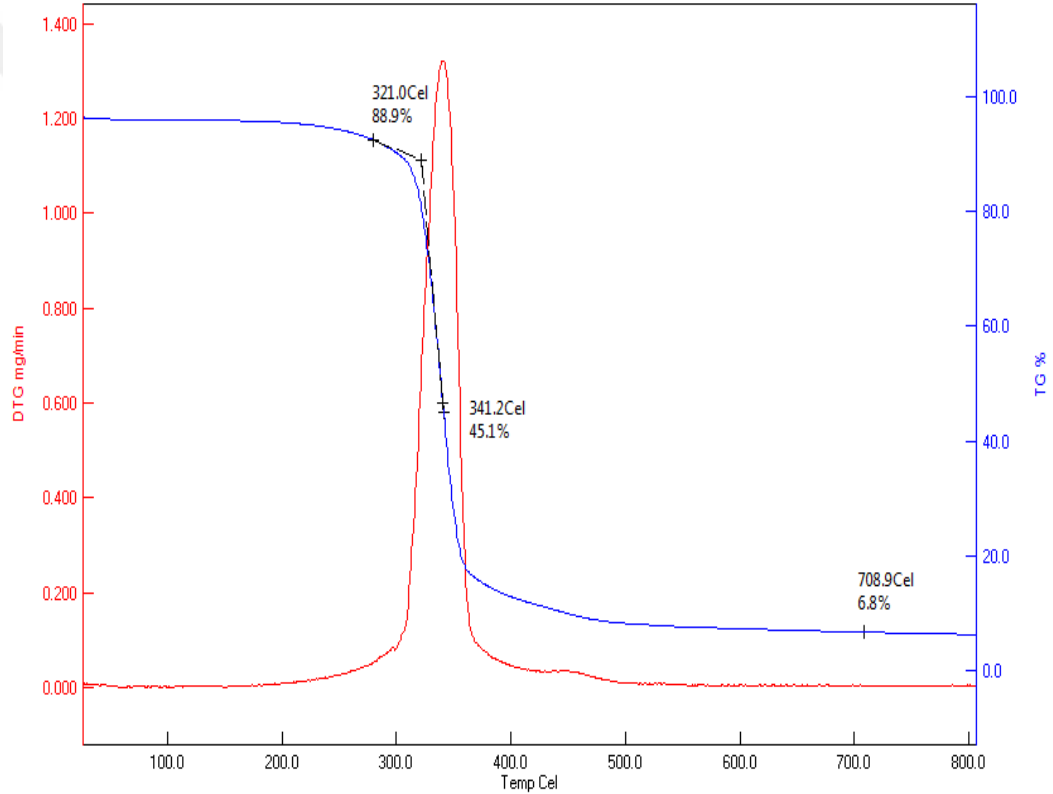
T_{%5} ve T_{%10}, sırasıyla %5 ve %10'luk kütle kayıplarındaki malzemelerin bozunma sıcaklığını ifade göstermektedir. T_{max} ise malzemenin maksimum termal bozunma oranındaki sıcaklığa karşılık gelen değerdir.



Şekil 4.7 : PLA malzemesine ait DTG eğrisi.

Grafikte, PLA'nın ana termal bozulma başlangıcı yaklaşık 324,1°C'de gerçekleşmiş ve kütle'nin büyük bir kısmı (%94) bu sıcaklıkta kaybedilmiştir. Bu sıcaklık, PLA'nın ana polimer yapısının bozulmaya başladığını göstermektedir. Maksimum bozulma hızı (DTG piki) 348,6°C'de meydana gelmiştir. Bu sıcaklıkta, PLA'nın termal bozunma süreci en yoğun şekilde gerçekleşmiştir. 700°C'de kalan kütle miktarı oldukça

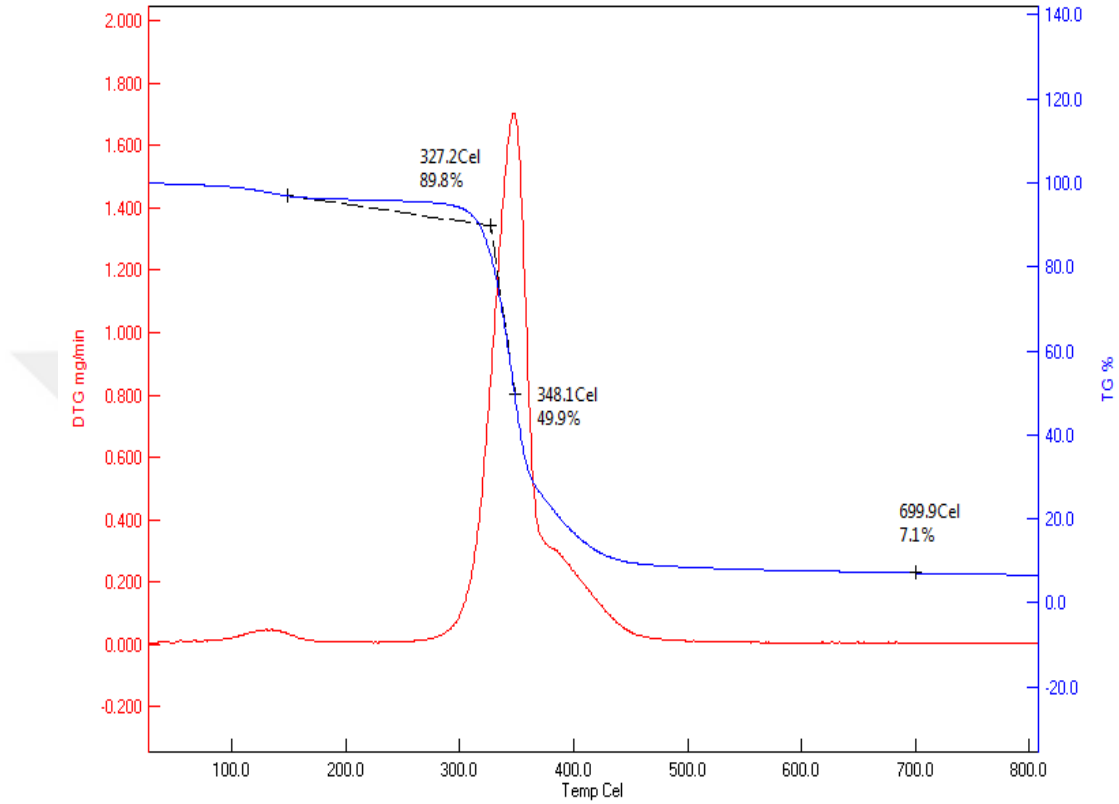
düşüktür (%0,2). Literatürde, saf PLA'nın bozunma sıcaklığının 330-355 °C aralığında olduğu rapor edilmektedir. Şekil 4.7'de görülen 324,1°C (başlangıç) ve 348,6°C (pik bozulma) değerleri bu aralığa uygundur. Ayrıca literatürde PLA'nın 700°C üzerindeki kalıntı oranının genellikle %0,5'in altında olduğu belirtilmektedir[45]. Grafikte görülen %0,2 kalıntı oranı bu bilgiyle uyumludur. Bu, PLA'nın yüksek sıcaklıkta neredeyse tamamen ayrıştığını göstermektedir. PLA'nın 700°C'de sadece %0,2 kalıntı bırakması, çevre dostu bir malzeme olduğunu ve yanma sonrası minimal atık bıraktığını desteklemektedir. Şekil 4.8 poliüretan köpük (PU) ve PLA'nın termal bozulma davranışı sonucu malzemenin sıcaklıkla birlikte kütle kaybını (% TG) ve bozulma hızını (DTG) göstermektedir.



Şekil 4.8 : PLA ve poliüretan dolgu maddesine ait DTG eğrisi.

Grafikte görülen ilk bozulma başlangıcı 321°C'de meydana gelmiş ve malzemenin kütlesinin %88,9'u bu sıcaklığa kadar korunmuştur. Bu sıcaklık, hem poliüretan köpüğün hem de PLA'nın termal stabilitesinin yüksek olduğunu ve malzemenin polimer zincir yapısının 300°C'nin üzerinde bozulmaya başladığını göstermektedir. Bu sonuç literatürdeki çalışmalar ile uyumludur. Bozulma hızının en yüksek olduğu sıcaklık, grafikte 341,2°C olarak belirlenmiştir. Bu noktada malzemenin kütlesinin yaklaşık %45,1'i kaybedilmiştir. 700°C'ye ulaşıldığında, malzemenin kütlesinin

%6,8'i kalmıştır. Bu kalıntı miktarı, poliüretan köpüğün ve PLA'nın termal ayrışma sonrası yanmayan bileşenlerinin oluşturduğu kalıntıdır. Şekil 4.7 ile beraber karşılaştırıldığında PLA'nın biyolojik olarak tamamen ayrışabilir olduğu ve bu kalıntının büyük ölçüde poliüretan köpükten kaynaklandığı söylenebilir.

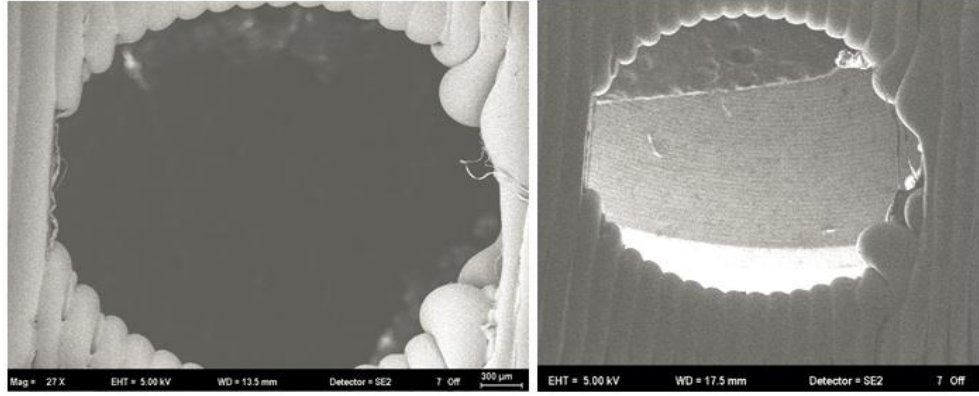


Şekil 4.9 : PLA ve epoksi reçine dolgu maddesine ait DTG eğrisi.

Grafikte görülen bozulma başlangıç sıcaklığı 327,2°C'dir. Bu sıcaklık, saf PLA'nın başlangıç bozulma sıcaklığına oldukça yakındır (Şekil 4.7) ve epoksi reçinenin PLA'nın termal stabilitesini önemli ölçüde değiştirmediyi göstermektedir. Malzemenin kütlesinin yaklaşık %89,8'i bu sıcaklığa kadar korunmuştur. Maksimum bozulma hızı, grafikte 348,1°C sıcaklıkta gözlemlenmiştir. Bu, PLA'nın esas termal ayrışma sıcaklığı ile uyumludur. Epoksi reçine dolgusu PLA matrisi için, ayrışma sıcaklıklarında herhangi bir büyük sapma yaratmamıştır. Bu sıcaklıkta malzemenin kütlesinin %49,9'u kaybedilmiştir. 700°C'ye ulaşıldığında malzemenin kütlesinin %7,1'i kalmıştır. Bu kalıntı miktarı, epoksi reçine dolgusunun yanmayan bileşenlerinin PLA ile karışımında oluşturduğu kalıntıdır. Bu değer, poliüretan köpüklü PLA karışımına kıyasla (kalıntı oranı %6,8) daha yüksektir.

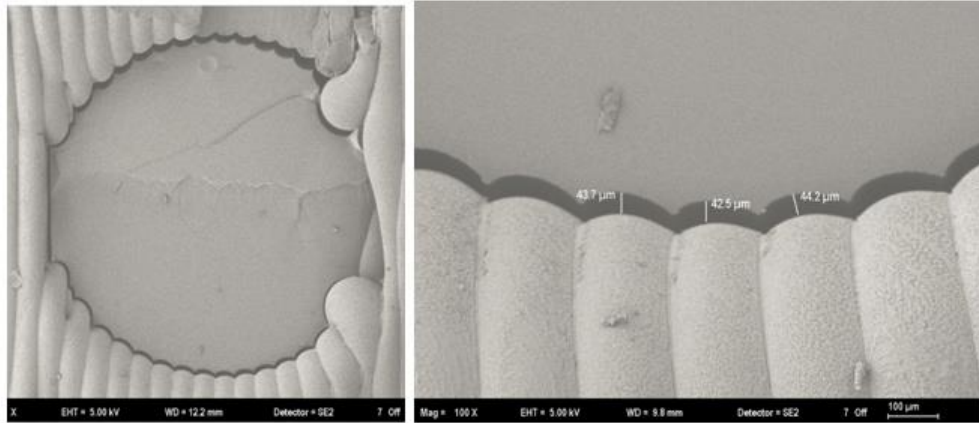
4.4 Sem Analizi

Çalışmada dolgu malzemesi olarak kullanılan poliüretan köpük ve epoksi reçine malzemeleri pla ana malzemesi ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Şekil 4.10'da kontrol numunesi olarak kullanılan PLA mazlemesine ait sem görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.10 : PLA kontrol numunesine ait SEM görüntüleri.

Şekil 4.11'de %10 yazdırma doluluk oranı ile üretilmiş PLA numunesine, epoksi reçine dolgu malzemesi ilavesine ait sem görüntüsü verilmiştir.

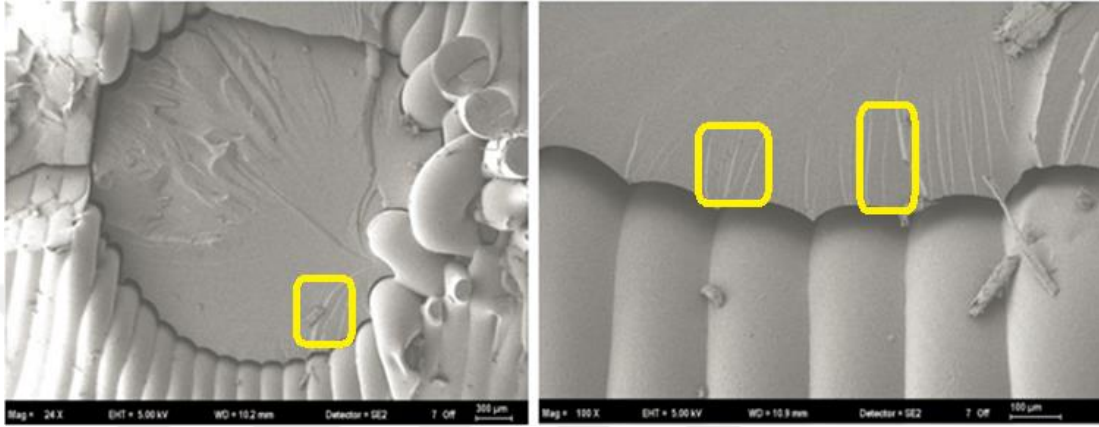


Şekil 4.11 : Epoksi reçine dolgu malzemeli PLA (%10) numunesi

Epoksi reçine dolgusunun, PLA'nın gözenekli yapısına nüfuz ettiği görülmektedir. Katmanlar arasındaki boşlukların bir kısmı doldurulmuş, ancak bazı bölgelerde dolgunun tam nüfuz etmediği ve boşlukların hâlâ mevcut olduğu fark edilmektedir. Epoksi reçinenin düşük viskozitesi, gözeneklerin bir kısmını doldurmasına olanak sağlamıştır. Ancak görüntüde hâlâ belirgin boşlukların olması, dolgu malzemesinin yeterince yoğun uygulanmamış olabileceğini düşündürmektedir.

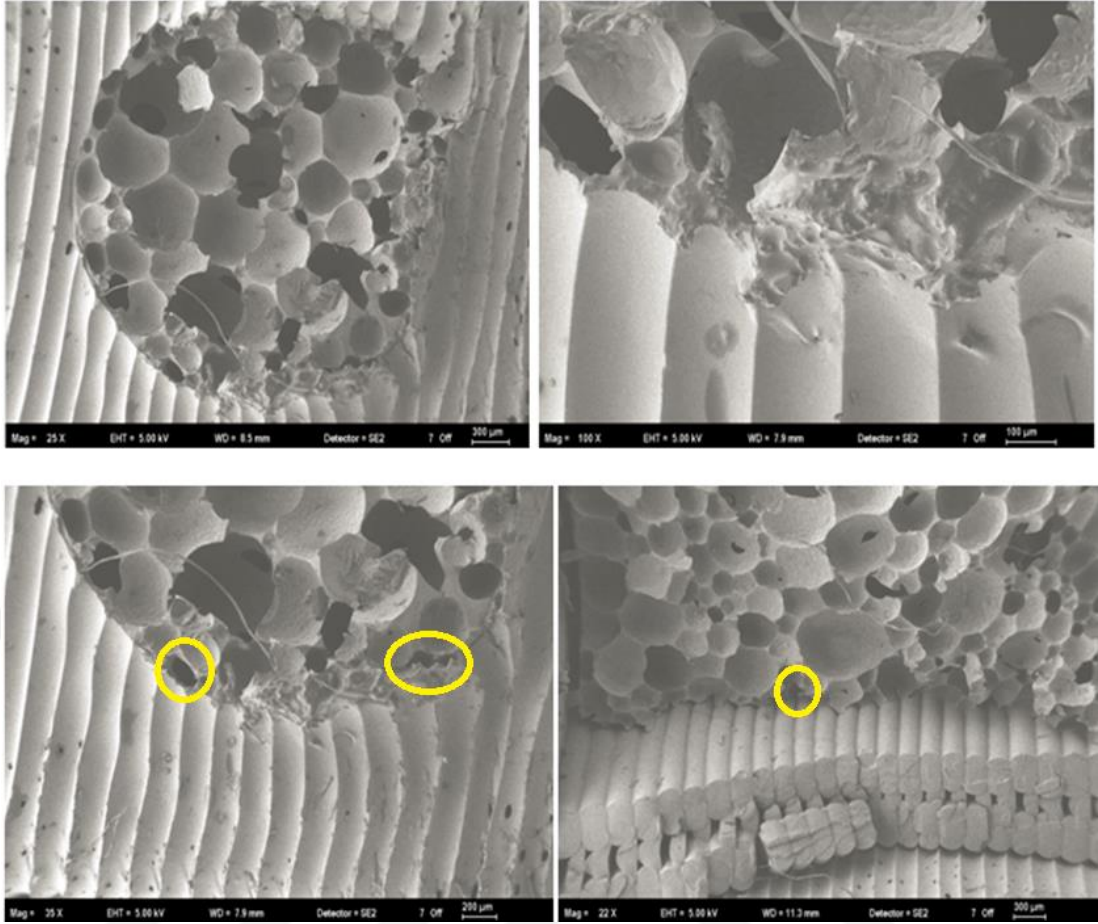
Dolgu malzemesi, PLA'nın kırılgan yapısına destek sağlayarak mukavemeti artırabilir ancak bu destek, dolgunun tam homojen bir şekilde yayılmaması durumunda sınırlı kalacaktır.

Şekil 4.12'de %20 yazdırma doluluk oranı ile üretilmiş PLA numunesine, epoksi reçine dolgu malzemesi ilavesine ait sem görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.12 : Epoksi reçine dolgu malzemeli PLA (%20) numunesi.

Katmanlar arası geçiş bölgeleri oldukça net bir şekilde gözlemlenmektedir. Epoksi reçine dolgusu, katmanlar arasındaki geçişleri kısmen stabilize etmiş görünse de, bu geçişlerde hâlâ belirgin çatlaklar mevcuttur. Çatlaklar için malzemenin kırılgan yapısını ve epoksi reçine dolgusunun bu bölgelerde sınırlı bir iyileştirme sağladığı söylenebilir. Yüzeyde, epoksi reçinenin dolduğu bölgelerde pürüzlülüğün azaldığı fark edilmektedir. Bununla birlikte, bazı bölgelerde yabancı maddelerin veya birikimlerin olduğu (yazdırma sırasında oluşmuş artıklar olabilir) görülmektedir. Epoksi reçine dolgusu, PLA'nın gözenekli yapısına kısmen nüfuz etmiş olsa da, görüntüde homojen bir dağılım göstermemektedir. Epoksi reçinenin homojen olmayan dağılımı, mekanik dayanımı sınırlayabilir. Bu, dolgu malzemesinin viskozitesinin ve uygulama yönteminin yeniden değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Şekil 4.13'de %10 yazdırma doluluk oranı ile üretilmiş PLA numunesine, poliüretan köpük dolgu malzemesi ilavesine ait sem görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.13 : Poliüretan köpük dolgu malzemeli PLA (%10) numunesi.

Poliüretan köpüğün uygulandığı bölgelerde, dolgu malzemesinin PLA'nın gözenekli yapısına nüfuz ettiği gözlemlenmektedir. Görüntülerdeki yuvarlak ve düzensiz gözenekler, poliüretan köpüğün genişleyerek PLA'nın mevcut boşluklarını doldurduğunu göstermektedir. Bazı bölgelerde ise boşlukların tamamen dolmadığı ve köpüğün homojen bir şekilde dağılmadığı görülmektedir. Köpüğün, PLA içindeki gözenekleri kısmen doldurduğu, PLA'nın katmanları arasındaki bağlantıyı kısmen stabilize ettiği, ancak yüzeyde tamamen pürüzsüz bir yapı oluşturamadığı ve dolgunun homojen bir şekilde yayılmadığı görülmektedir.

4.5 Maliyet Analizi

Bu çalışmada üretilen malzemelerin hammadde maliyeti Çizelge 4.2 ve üretim maliyet analizi Çizelge 4.3'de verilmiştir. Türk lirası (₺) cinsinden ayrı ayrı hesaplanmıştır. Aşağıda kontrol numunesi için detaylı maliyet çalışması aktarılmıştır. Yedi numune içinde aynı çalışma tekrarlanarak Çizelge 4.3' deki tablo oluşturulmuştur.

Çizelge 4.2 : Hammadde maliyeti.

Tüketim	Birim Fiyat	Birim
PLA	700	TL/kg
Enerji	2,98	TL/Kwh
Poliüretan	300	TL/kg
Epoksi Reçine	275	TL/kg
Amortisman Maliyeti	3,33	Tl/saat

3D yazıcı için maliyet hesabını yapmak için aşağıdaki bileşenler göz önüne alınacaktır:

- Makine amortisman maliyeti
- Filament maliyeti
- Enerji tüketim maliyeti

Bu makinada 23,11 gram malzeme kullanılarak 18,4 dakika işlem süresi için toplam maliyet yaklaşık 18,12 TL olarak hesaplanmıştır.

Ek maliyet kalemleri (işçilik, bakım, yazılım maliyeti vb.) dahil edilmemiştir.

Çizelge 4.3 : Üretim maliyet analizi.

	PLA Ağırlığı (GR)	Enerji Maliyeti	PLA Malzeme Maliyeti	Poliüretan Malzeme Maliyeti	Epoksi Malzeme Maliyeti	Amortisman Maliyeti	Toplam Maliyet
Kontrol	23,11	0,91	16,18	0	0	1,02	18,12
PLA10	10,57	1,03	7,4	0	0	1,15	9,57
PLA 20	11,98	1,53	8,39	0	0	1,71	11,62
PLA10-PU	10,57	1,03	7,4	0,429	0	1,15	10
PLA10-EP	10,57	1,03	7,4	0	2,87	1,15	12,44
PLA20-PU	11,98	1,53	8,39	0,156	0	1,71	11,78
PLA20-EP	11,98	1,53	8,39	0	2,48	1,71	14,1

Epoksi reçine dolgulu PLA'nın maliyeti, poliüretan dolgulu PLA'ya göre yaklaşık %19 daha yüksektir. Bu fark, epoksi reçinenin birim maliyetinin daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, seçim yapılırken uygulama alanı ve performans gereksinimleri göz önüne alınarak maliyet ve performans dengesi sağlanmalıdır. Poliüretan dolgulu PLA, maliyet odaklı uygulamalar için uygunken; epoksi reçine dolgulu PLA, yüksek performans gereksinimleri için daha avantajlıdır.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 3D yazıcı kullanılarak %10 ve %20 doluluk oranlarında PLA malzemesinden üretilen çekme ve eğme numuneleri, poliüretan köpük ve epoksi reçine dolgu malzemeleri ile doldurularak mekanik performansları analiz edilmiştir. Test sonuçları değerlendirildiğinde: Çekme testi sonuçlarına göre: Kontrol grubu numuneler (dolgu malzemesi içermeyen PLA) maksimum gerilme açısından en yüksek değerlere sahiptir ($24,74 \text{ N/mm}^2$). Poliüretan ve epoksi reçine dolgu malzemesi eklenmesiyle, %10 ve %20 doluluk oranlarında maksimum gerilme değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Epoksi reçine dolgulu PLA, poliüretan dolgulu PLA'ya kıyasla bir üstünlük sağlamıştır. PLA'nın esnekliği dolgu malzemeleriyle bir miktar azalmış, ancak epoksi reçine dolgulu PLA numuneleri, poliüretan dolgulu PLA'ya göre daha iyi uzama değerleri göstermiştir. Poliüretan dolgu malzemesi, elastisite modülünü artırmış, PLA'nın rijitliğini iyileştirmiştir. Epoksi reçine dolgu ise elastisite modülünü artırmasına rağmen poliüretan kadar etkili olmamıştır. Eğme Testi sonuçlarına göre: Kontrol grubu numuneleri maksimum gerilme açısından en yüksek değerlere ulaşmıştır ($91,59 \text{ N/mm}^2$). Poliüretan ve epoksi reçine dolgulu PLA numunelerinde gerilme değerleri kontrol grubuna kıyasla azalmış, ancak epoksi reçine dolgulu PLA (%20 dolulukta $43,53 \text{ N/mm}^2$) daha iyi bir performans sergilemiştir. Eğme testi sonuçlarında kontrol grubu numuneleri daha yüksek uzama göstermiştir. %10 doluluk oranında, kontrol grubunun maksimum uzama değeri PLA'ya göre yaklaşık %24, poliüretan dolgulu PLA'ya göre yaklaşık %15, epoksi reçine dolgulu PLA'ya göre ise yaklaşık %21 daha yüksektir. %20 doluluk oranında ise kontrol grubunun maksimum uzaması PLA'dan %19, poliüretan dolgulu PLA'dan %37, epoksi reçine dolgulu PLA'dan ise %29 daha yüksektir. Bu değerler, PLA'nın dolgu malzemesi ile rijitliğinin arttığını, ancak esneklik özelliklerinin bir miktar azaldığını açıkça göstermektedir. Poliüretan dolgu, maksimum uzamayı azaltırken epoksi reçine dolgu biraz daha iyi uzama değerleri sağlamıştır. Kontrol grubu elastisite modülünde en yüksek değerleri ($3177,2 \text{ N/mm}^2$) sunmuştur. Poliüretan dolgulu PLA, elastisite modülü açısından daha iyi sonuçlar vermiştir. Ancak dolgu malzemesi eklenmesi, elastisite modülünü kontrol grubuna göre düşürmüştür. Sem görüntüleri değerlendirilerek dolgu malzemesi

dağılımı incelendiğinde, poliüretan dolgunun matriks içinde düzensiz bir şekilde dağıldığı, bazı bölgelerde kümelenmeler olduğu görülmüştür. Epoksi reçine dolgu ise daha homojen bir dağılım ve güçlü bir ara yüzey bağlanması sağlamıştır. Epoksi reçine dolgu, PLA'nın termal kararlılığını artırmış, poliüretan dolgu ise termal kararlılığı düşürmüştür.

Maliyet analizi değerlendirildiğinde, poliüretan dolgulu PLA, maliyet açısından daha avantajlı bulunmuş (%19 daha düşük), ancak mekanik ve termal performans açısından değerlendirildiğinde epoksi reçine dolgunun gerisinde kalmıştır.

Bu çalışma sonucu elde edilen veriler, dolgu malzemelerinin PLA'nın mekanik, termal ve yapısal özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Poliüretan dolgu malzemesi, düşük maliyet ve elastisite modülünü artırma açısından avantaj sağlarken, düzensiz dağılım ve zayıf ara yüzey bağı mekanik performansı sınırlandırmıştır. Epoksi reçine dolgu malzemesi, homojen dağılım ve güçlü ara yüzey bağı sayesinde daha iyi mekanik dayanım ve termal kararlılık sağlamıştır. Ancak maliyeti poliüretana göre daha yüksektir. %20 doluluk oranında mekanik dayanım (maksimum gerilme) değerleri genel olarak %10 doluluk oranına göre artış göstermiştir. Ancak, elastisite modülü, doluluk oranı arttıkça hafifçe düşmüştür. Poliüretan dolgulu PLA, rijitlik gerektiren düşük maliyetli uygulamalar için daha uygun bir seçenektir. Epoksi reçine dolgulu PLA, yüksek termal kararlılık ve mekanik dayanım gerektiren uygulamalar için tercih edilebilir. Dolgu malzemesi seçimi, uygulama gereksinimlerine göre yapılmalıdır. Poliüretan dolgu düşük maliyetli, rijit yapılar için uygundur. Epoksi reçine dolgu ise yüksek performanslı uygulamalarda tercih edilmelidir.

Sonuç olarak, bu çalışma, PLA malzemesinin mekanik özelliklerini dolgu malzemeleri ile optimize etme potansiyelini göstermiştir. Gelecekteki çalışmalarda, dolgu malzemelerinin numune içerisinde daha homojen bir dağılım göstermesi ve farklı dolgu türlerinin mekanik performans üzerindeki etkisinin kapsamlı bir şekilde incelenmesi için yenilikçi üretim teknikleri uygulanabilir. Bu doğrultuda, dolgu maddesinin akışkanlığının artırılması, vibrasyon uygulamaları, vakum teknikleri ve nanomalzeme katkıları gibi yöntemlerin kullanımı, malzemenin iç yapısındaki boşlukları en aza indirerek mekanik özelliklerin iyileştirilmesine katkı sağlayabilir.

Dolgu sonrası vibrasyon uygulaması: Enjeksiyon işleminin ardından numuneye düşük frekanslı vibrasyon uygulanarak dolgu malzemesi içerisinde oluşabilecek hava boşlukları giderilebilir ve daha homojen bir dağılım sağlanabilir.

Vakum altında enjeksiyon: Dolgu maddesinin vakum ortamında enjekte edilmesi, hava boşluklarının oluşumunu minimize ederek dolgunun yapıya daha iyi nüfuz etmesini ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesini sağlayabilir.

Nanomalzeme katkısı: Grafen ve silika nanopartikülleri gibi nanomalzemeler kullanılarak dolgu malzemesinin PLA içinde daha homojen bir yapı oluşturması teşvik edilebilir. Bu tür katkılar, dolgunun yapıya daha iyi bağlanmasını sağlayarak mekanik dayanımı ve termal kararlılığı artırabilir.

Bu öneriler, dolgu maddelerinin daha homojen bir şekilde dağıtılmasını sağlayarak malzemenin mekanik dayanımı ve termal kararlılığını artırabilir. Ayrıca, numunelerin iç yapısında gözlemlenen düzensizliklerin azaltılarak homojenliğin artması sayesinde SEM analiz sonuçlarının daha istikrarlı ve anlamlı hale getirilmesi mümkün olabilir. Bu tür yenilikçi yaklaşımlar, PLA tabanlı kompozit malzemelerin mekanik performansını artırmak için önemli bir potansiyel sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Olam, M., Tosun, N.** (2022). 3D-printed polylactide/hydroxyapatite/titania composite filaments. *Materials Chemistry and Physics*, 276, 125267.
- [2] **Singh, R., Chhabra, M.** (2017). Three-Dimensional Printing. In Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.04167-9>
- [3] **Tunca, E.** (2022). *Bal peteği çekirdekli poliüretan köpük dolgulu sandviç kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi) Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Eskişehir.
- [4] **Url-4** < <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-vs-cnc-160320184>>, erişim tarihi 26.10.2024.
- [5] **Moghaddam, N. S., Jahadakbar, A., Amerinatanzi, A., Elahinia, M.** (2017). Recent advances in laser-based additive manufacturing. *Laser-Based Additive Manufacturing of Metal Parts*, 1-24.
- [6] **Ercan, N.** (2019). *3B eklemeli üretim yöntemiyle üretilmiş hücresel kafes yapılı sandviç panellerin mekanik davranışlarının incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [7] **Sarvestani, H. Y., Akbarzadeh, A. H., Niknam, H., Hermenean, K.** (2018). 3D printed architected polymeric sandwich panels: Energy absorption and structural performance. *Composite Structures*, 200, 886-909.
- [8] **Rodríguez, J. F., Thomas, J. P., Renaud, J. E.** (2003). Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene fused deposition materials modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 9(4), 219-230.
- [9] **Aliheidari, N., Tripuraneni, R., Ameli, A., Nadimpalli, S.** (2017). Fracture resistance measurement of fused deposition modeling 3D printed polymers. *Polymer Testing*, 60, 94-101.
- [10] **Mohanavel, V., Ali, K. A., Ranganathan, K., Jeffrey, J. A., Ravikumar, M. M., Rajkumar, S.** (2021). The roles and applications of additive manufacturing in the aerospace and automobile sector. *Materials Today: Proceedings*, 47, 405-409.
- [11] **Shaqour, B., Abuabiah, M., Abdel-Fattah, S., Juaidi, A., Abdallah, R., Abuzaina, W., ... , Cos, P.** (2021). Gaining a better understanding of the extrusion process in fused filament fabrication 3D printing: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114, 1279-1291.
- [12] **Gurralla, P. K., Regalla, S. P.** (2012). Optimization of support material and build time in fused deposition modeling (FDM). *Applied Mechanics and Materials*, 110, 2245-2251.

- [13] **Thrimurthulu, K. P. P. M., Pandey, P. M., Reddy, N. V.** (2004). Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(6), 585-594.
- [14] **Drumright, R. E., Gruber, P. R., Henton, D. E.** (2000). Polylactic acid technology. *Advanced materials*, 12(23), 1841-1846.
- [15] **Zhang, P., Wang, Z., Li, J., Li, X., Cheng, L.** (2020). From materials to devices using fused deposition modeling: A state-of-art review. *Nanotechnology Reviews*, 9(1), 1594-1609.
- [16] **Mohamed, O. A., Masood, S. H., Bhowmik, J. L.** (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in manufacturing*, 3, 42-53.
- [17] **Goh, G. D., Yap, Y. L., Tan, H. K. J., Sing, S. L., Goh, G. L., Yeong, W. Y.** (2020). Process–structure–properties in polymer additive manufacturing via material extrusion: A review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 45(2), 113-133.
- [18] **Efe, S.** (2020). *FDM tipi 3 boyutlu yazıcılardaki örgü parametrelerinin ürün dayanımına etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [19] **Wakimoto, T., Takamori, R., Eguchi, S., Tanaka, H.** (2018, April). Growable Robot with 'Additive-Additive-Manufacturing'. In *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-6).
- [20] **Url-20** < <https://www.3dsourced.com/3d-printers/types-of-fdm-3d-printer-cartesian-delta/>>, erişim tarihi 20.09.2024.
- [21] **Url-21** < <https://acikerisim.uludag.edu.tr/server/api/core/bitstreams/1c6990cf-8f84-46a3-9b00-c2ae1c3115bf/content> >, erişim tarihi 20.09.2024.
- [22] **Auras, R. A., Lim, L. T., Selke, S. E., Tsuji, H. (Eds.).** (2022). *Poly (lactic acid): synthesis, structures, properties, processing, applications, and end of life*. John Wiley & Sons.
- [23] **Yu, L.** (2009). *Biodegradable polymer blends and composites from renewable resources*. John Wiley & Sons.
- [24] **Zehir, Burçak.** (2022). *Molecular Dynamics Analyses And Experimental Investigation in The Effects of The Nanoadditives on The Thermo-Mechanical Properties and Fracture Toughness of Biodegradable Polylactic Thermoplastic*. (Unpublished master's thesis). Graduate School of Natural and Applied Sciences of Alparslan Türkeş University, Adana.
- [25] **Sharmin, E., Zafar, F.** (2012). Polyurethane: an introduction. *Polyurethane*, 1, 3-16.
- [26] **Nasuhoglu, B.** (2022). *Biyo-bazlı poliüretan köpüklerin hazırlanması ve karakterizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [27] **Ongun, N.**, (2014). *Synthesis of waterborne, branched, functional polyurethanes and their applications* (Doktora Tezi) Sabancı Üniversitesi, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [28] **Url-28** <<https://www.pagev.org/poliuretanlar> >, erişim tarihi 22.03.2021.
- [29] **Zieleniewska, M., Leszczyński, M. K., Szczepkowski, L., Bryskiewicz, A., Krzyżowska, M., Bień, K., Ryszkowska, J.** (2016). Development and applicational evaluation of the rigid polyurethane foam composites with egg shell waste. *Polymer Degradation and Stability*, 132, 78-86.
- [30] **Altay, Ç.** (2021). *Çeşitli yanmayı engelleyici kimyasal maddelerle işlem gören ayrıca poliürea/poliüretan ve epoksi reçineleri ile kaplanan Dogu kayını (Fagus orientalis L.) odununun fiziksel, mekanik ve yanma özelliklerinin belirlenmesi* (Doktora Tezi). Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Muğla.
- [31] **Günay, M., Gündüz, S., Yılmaz, H., Yaşar, N., Kaçar, R.** (2020). PLA esaslı numunelerde çekme dayanımı için 3D baskı işlem parametrelerinin optimizasyonu. *Politeknik Dergisi*, 23(1), 73-79.
- [32] **Evlen, H., Özdemir, M. A., Çalışkan, A.** (2019). Doluluk oranlarının PLA ve PET malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkileri. *Politeknik Dergisi*, 22(4), 1031-1037.
- [33] **Apak, K.** (2019). *PLA malzemesinden eklemeli imalat yöntemiyle üretilen ürünlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta.
- [34] **Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., Hui, D.** (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196.
- [35] **Öz, Ö., Aydın, M., Kara, A. S., Sancak, M. S.** (2018). Üç Boyutlu Yazıcılarda Kullanılan Doluluk Oranının Hasar Yüküne Olan Etkisinin Belirlenmesi. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 2(1), 32-39.
- [36] **Solmaz, M. Y., Kaman, M. O.** (2010). Petek Yapılı Sandviç Yapılarda Köpük Dolgusunun Kritik Burkulma Yüküne Etkisi. *Engineering Sciences*, 5(1), 24-34.
- [37] **Nia, A. A., Sadeghi, M. Z.** (2010). The effects of foam filling on compressive response of hexagonal cell aluminum honeycombs under axial loading-experimental study. *Materials & Design*, 31(3), 1216-1230.
- [38] **Gomez-Gras, G., Jerez-Mesa, R., Travieso-Rodriguez, J. A., Lluma-Fuentes, J.** (2018). Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens. *Materials & Design*, 140, 278-285.
- [39] **Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., Núñez, P. J.** (2017). Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials & Design*, 124, 143-157.

- [40] **Kaygusuz, B., Özerinç, S.** (3). 3 boyutlu yazıcı ile üretilen PLA bazlı yapıların mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, 16(1), 1-6.
- [41] **Aydın, A., Kahraman, F.** (2018). 3B Baskı teknolojisi kullanılarak hızlı prototipleme yapımı ve nesnelerin üretimi. *Academic Perspective Procedia*, 1(1), 419-428.
- [42] **Atlıhan, G., Ergene, B., Ovalı, İ.** (2019, November). Endüstriyel Mekanizma Örneği Olan Üç Boyutlu Yazıcılarda Üretim Optimizasyonu. In *Proceedings on 2nd International Conference on Technology and Science*.
- [43] **Levenhagen, N. P., Dadmun, M. D.** (2017). Bimodal molecular weight samples improve the isotropy of 3D printed polymeric samples. *Polymer*, 122, 232-241.
- [44] **Safarabadi, M., Haghighi-Yazdi, M., Sorkhi, M. A., Yousefi, A.** (2021). Experimental and numerical study of buckling behavior of foam-filled honeycomb core sandwich panels considering viscoelastic effects. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 23(8), 3985-4015.
- [45] **Angın, N., Çaylak, S., Ertas, M.** (2019). Studies on Thermal and Morphological Properties of Polyurethane Foam Filled Polypropylene/Poly (lactic acid) Blends. *Journal of Innovative Science and Engineering*, 3(2), 47.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Nilüfer ŞAHİN
Doğum Tarihi ve Yeri :
E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : Biyokompozit Mühendisliği Yüksek Lisansı